הוד הים

איתנות ותמורות במערכות הימיות של ישראל

עורכת
נגה סטמבלר

חוף הים

איתנות ותמורות
במערכות הימיות של ישראל

נגה סטמבלר
עורכת

הוד הים

איתנות ותמורות במערכות הימיות של ישראל

The Glory of the Sea

Strength and Transformation in the Aquatic Systems of Israel

עורכת: נגה סטמבלר

עורכת מדעית: נגה סטמבלר

עיצוב: נגה סטמבלר

עורכת לשונית: עפרה גלברט – אבני

עיצוב גרפי ועיבוד דיגיטלי: לביא צרפתי

© כל הזכויות שמורות

© All right reserves (Hebrew version)

שימוש מסחרי מכל סוג שהוא בחומר הכלול בספר זה אסור בהחלט אלא ברשות מפורשת בכתב מהעורכת.

מסת"ב 978-965-597-380-8

נדפס בישראל תשפ"ו, 2025

מהדורה ראשונה

העמותה הישראלית למדעי הימים

ספר זה ראה אור באמצעות תמיכתו של המכון לחקר תולדות הציונות ביחידת המדען הראשי בקרן קיימת לישראל,
ובתמיכתם של מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט והמרכז הישראלי לחקר הים התיכון.

תמונת השער: אלמוג רך ססגונית המפריך (*Dendronephthya hemprichi*), אילת.
צילום: תום שלזינגר.

תמונות בגב הספר: מימין, גני ספוגים בשונית העמוקה של שמורת ים פולג. צילום: טל אידן.
משמאל: סקר בשונית במפרץ אילת. צילום: תוכנית הניטור הלאומית לניטור מפרץ אילת.

הוד הים

איתנות ותמורות במערכות הימיות של ישראל

החשופית זרית טבעתית (*Goniobranchus annulatus*), חוף קסריה. צילום: רמי קליין.

The Glory of the Sea

Strength and Transformation in the Aquatic Systems of Israel

מאז 2022 מופיע בים התיכון שחקן חדש – אלמוג רך מרהיב הנקרא: ססגונית המפריך (*Dendronephthya hemprichi*) שמקורו בים האדום. תחילה התגלה במאות מושבות מרשימות שהתפרשו על פני מצעים מלאכותיים, ועד מהרה נצפה גם, אם כי במספרים קטנים יותר, על ריפים טבעיים. עתידו בים התיכון עדיין לוט בערפל: האם יתפשט וידחוק מינים מקומיים, או שמא יקים "יערות" תת-ימיים שיעשירו את המגוון וייצרו מרחב מחיה חדש לבעלי חיים רבים? כך או כך, דבר אחד כבר ברור – האלמוג הזה מוסיף צבע וחיות לנופי הים התיכון המשתנים. בתמונה נראה האלמוג בסביבתו המקורית בים האדום, ענפיו הוורודים-סגולים מתפרשים בקדמת הפריים, ומאחוריהם נפרש המרחב הכחול של הים הפתוח שבו חולפות להקות דגים. צילום: תום שלזינגר.

פתח דבר

הספר שנכתב פרקים-פרקים בא להציג תמונה עדכנית מדעית מחקרית לנושאים הקשורים למערכות הימיות של ישראל. הספר מאיר זוויות אקולוגיות, ביולוגיות גיאולוגיות, אוקיינוגרפיות, כלכליות, חברתיות, רגולטריות ואנרגטיות. הספר כולל פרקים המציגים את השינויים הטבעיים והשפעת שינויי אקלים, והשפעות האדם, דיג המכמורת ורמות מזהמים בסביבה הימית בעבר, בהווה ובעתיד על גופי מים שמדינת ישראל שוכנת לחופם: הים התיכון, הים האדום. הספר עוסק במדיניות וביישום ניטור, שמירה וניהול של הסביבה הימית, הערכה כלכלית ורגולציה, גישה סביבתית במבני הגנה חופית, חינוך, מדע וקהילה, זרמים ומערבלים בים. יש פרקים המוקדשים למערכות אקולוגיות ייחודיות ביניהן נביעות גז ותמלחות בהפרעת פלמחים, שוניות דרום-מזרח הים התיכון ושונית האלמוגים במפרץ אילת. פרקים שלמים מוקדשים להיבטים שונים של הביוטה בסביבה הימית כולל: המיקרובים, פיטופלנקטון, אצות וציאנובקטריה רעילות, עשבי-ים, זואופלנקטון, פורמיניפרה, חי טחבים, ספוגים, קיפוד-הים, מיקסוזואה, דגים, החילזון צינוריר, מינים זרים (פולשים), כרישים, לובסטרים, יונקים ימיים ואלמוגים.

זהו המשכו, הרחבתו ועדכונו של הספר "הוד הים – יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל" שיצא לאור בשנת 2015. הכותבים הם חוקרים פרופסורים דוקטורים מהאקדמיה, מובילים בחקר הים בעולם, אחראים על אוצרות הים במשרדי הממשלה, מובילי דרך בשמירה על הים מרשות הטבע, החברה להגנת הטבע ועמותות שונות.

הספר מיועד בעיקר לסטודנטים למדעים, לתלמידי תיכון, למורים, למקבלי החלטות במדינת ישראל כולל המשרד להגנת הסביבה, רשות הטבע והגנים וכדומה, וכן לכל אדם שיש לו קשר ואהבה לים. ידע והבנה של המערכות הימיות מבוססים על מחקר ומאגר נתונים מדעיים. אנו חושבים שיש משמעות מדעית, חינוכית וכלכלית לספר כאוסף נתונים, מידע וידע שיאפשר שמירה, ניטור והבנה של התהליכים בים בעתיד.

אם תקשיב לגלים בעיניים עצומות, תגלה את הסוד הפלאי (אהוד מנור)

רשימת פרקים

1. **רני עמיר**, הגנת המערכת הימית בישראל מפני פעילות אנושית – מדיניות ויישום 2023 — 9
2. **דרור צוראל וברק חרות**, מערך ניטור הסביבה הימית בישראל — 27
3. **יונתן שקד**, התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת — 43
4. **אילן נסים וערן ברוקוביץ**, תרומת פיתוח ואסדרת משאבי הגז הטבעי במרחב הימי של ישראל לתהליך קבלת ההחלטות, המחקר, הידע וההגנה על הסביבה הימית — 57
5. **רותי יהל, אורי פריד-לנדאו, מאי לצרוס, רעי דיגה ועדנה גוק**, תפקידן ותפקודן של שמורות הטבע הימיות בים התיכון הישראלי: תובנות מסקרי הביובליץ הימי בשנים 2015-2023 — 81
6. **אלון רוטשילד ועתרת שבתאי**, מ"מערב פרוע" לניהול מערכתי: הישגים ואתגרים באסדרת ניהול המערכות האקולוגיות בים התיכון בעשור האחרון (2010-2023) — 95
7. **שירי צמח שמיר, יעל שקד מנדלברג וזיו צמח שמיר**, הערכה כלכלית של שירותי המערכת האקולוגית הימית, תיאוריה והדגמה ביחס לים התיכון — 117
8. **ציפי איסר-איציק, טל גרנות ושגיא אגמון**, צמיחת הכלכלה הכחולה – זווית רגולטורית ירוקה — 135
9. **תמר טננבאום, איתמר אבישי, עינת צוקרמן-טל, מיכל שטרן, יניב בלייכר ואסף אריאל**, חינוך, מדע וקהילה: פעילות עמותות לשמירה על הסביבה הימית והחופית – עמותת אקואושן כדוגמה — 155
10. **סטיב ברנר**, הזרמים בים התיכון באגן המזרחי – מבט כללי — 171
11. **אביב סולודוך, רועי ברקן וחזי גילדור**, זרם הגבול וספקטרום המערבלים במזרח הים התיכון — 183
12. **אלמוג בן נתן ונדב ששר**, שילוב גישה סביבתית במבני הגנה חופית — 197
13. **ברק חרות, טל עוזר, יעל סגל, איזק גרטמן, אלי ביטון, איה לזר, רון גולדמן, ג'ק סילברמן, ירון גרטנר, הגר האוזר, גיא סיסמה-ונטורה ואיל רהב**, מגמות ארוכות טווח של השפעת שינויי אקלים ורמות מזהמים בסביבה הימית – מממצאי הניטור הלאומי של ישראל בים התיכון בשנים 1980-2022 — 217
14. **גליה פסטרנק**, פסולת ימית בחופי הים של ישראל — 233
15. **יעל סגל ומתן אורן**, המערכת האקולוגית של חלקיקי המיקרופלסטיק הצפים בים התיכון – מבט ישראלי — 251
16. **נגה סטמבלר**, המיקרובים בים וחשיבותם בעולם משתנה — 267
17. **אורנה שוויצר-נתן, אשרף אל-אשהב, אסף סוקניק ודניאל שר**, המיקרוביום של מים מתוקים בישראל — 285
18. **איל רהב, נורית גורדון, נטליה בלקין, תום רייך, חימנה וולסקז-דובינסקי, מקסים רובין-בלום וברק חרות**, פיטופלנקטון במזרח הים התיכון – מגמות בזמן ובמרחב — 305
19. **פלג אסטרחן, שירה ניניו ואסף סוקניק**, אצות וציאנובקטריה רעילות בסביבה הימית של ישראל – תמונת מצב ואתגרים — 325
20. **מקסים רובין-בלום, ברק חרות ויצחק מקובסקי**, מערכת אקולוגית ייחודית של נביעות גז ותמלחות בהפרעת פלמחים, הים העמוק באגן הלבנט — 349
21. **אורית חיימס-קפצן, אהובה אלמוגי-לבין, מיכאל קיטין, סופיה זולוטרבסקי, עירית גפן-סיזבסקי, הדר אלישיב, עודד כץ וברק חרות**, פורמיניפרה בנתונים במים הכלכליים של ישראל בים התיכון – תפוצה, מאפיינים וסמנים לתנאי הסביבה — 365

22. **נגה סוקולובר,** חי-טחביים – זעירים אך מרתקים 383
23. **סיגל שפר, טל אידן, לירון גורן, תמר פלדשטיין, תום מורב, רותי יהל ומיכה אילן,** ספוגים לחופי הים התיכון של ישראל – עשור של מחקרים ותגליות חדשות 399
24. **אהוד שפניר,** לובסטרים במזרח הים התיכון ובצפון ים סוף 429
25. **סמדר בן טבו דה לאון,** קיפוד סגול מצוי ותרומתו להבנת השפעת הסביבה על התפתחות עוברית של בעלי חיים ימיים 449
26. **גיל רילוב,** שוניות החוף הסלעי של דרום-מזרח הים התיכון – עבר, הווה ועתיד בעידן של שינויים גלובליים מואצים 463
27. **אורית ברנע, מיכל לידור-נעים, רמי צדוק, רותי יהל ואריאל קושמרו,** הופעה מחודשת של החילזון צינוריר בונה (Dendropoma anguliferum) על טבלאות הגידוד באזור חוף הכרמל 481
28. **תמר לוטן,** מיקסוזואה – קבוצה עתיקה שמצאה את מיקומה במערכת הצורבים 493
29. **נטע סוטו, גדעון וינטרס וגלעד אנטלר,** ההשפעה של היעלמות עשבי-ים על הביוגיאוכימיה של משקעים ימיים במפרץ אילת 505
30. **טלי מס,** ביולוגיה ביומנרליזציה ופזיולוגיה של אלמוגים 521
31. **נעמה רוז קוכמן ומעוז פיין,**עדות מטבולית לעמידות תרמית גבוהה יותר של אלמוגי מפרץ אילת לעומת אלו מקצהו הדרומי של הים האדום 533
32. **בלה ש. גליל, הנק ק. מיניס ומנחם גורן,** הים אינו אותו ים, מינים זרים בחוף הים התיכוני של ישראל – נתונים עדכניים, מדיניות, תחזית 553
33. **עדי ברש ויערה גרוסמרק,** דגי סחוס בישראל 569
34. **אביעד שיינין, אייל ביגל, עינב כהן, לי ליבנה, דני מוריק, דלית מירון, זיו צמח שמיר ודן צ'רנוב,** מחקר ארוך שנים על התקבצות הכרישים בחדרה 593
35. **דני גולני,** דגי הים התיכון ושאלת השפעת דיג המכמורת על הסביבה הימית 609
36. **יונתן בלמקר, טל גבריאל, ענבר דאהן, אורי הפנר אוקו, שחר חייקין, מאי לצרוס ושבי רוטמן,** חברות23 הדגים בים התיכון ובים האדום: גורמי סיכון ומגמות שינוי 623
37. **אביעד שיינין, יאלי מבורך, מיה אלסר, יותם צוריאל, קים קובו, אייל ביגל, אורי גלילי, דני כרם, דן צ'רנוב ודני מוריק,** יונקי הים התיכון בישראל 649

שוניות האלמוגים במפרץ אילת, שנחשבות לעמידות במיוחד בפני עליית טמפרטורות הים, מתחילות לגלות סימנים ראשונים להשפעת ההתחממות הגלובלית – תופעת הלבנת האלמוגים. אירוע ההלבנה בקיץ 2024 לא היה חמור במיוחד, ורק אלמוגים מעטים נפגעו (בתמונה זו אלו אלמוגי אש, *Millepora dichotoma*). עם זאת, ייתכן שתופעה זו מסמלת נקודת מפנה קריטית בעתידו של המפרץ, ומהווה קריאת אזהרה ותזכורת דחופה לחשיבות ההגנה על שוניות האלמוגים של מפרץ אילת מכל הפרעה נוספת. צילום: תום שלזינגר.

1 הגנת המערכת הימית בישראל מפני פעילות אנושית - מדיניות ויישום 2023

רני עמיר

אשכול משאבי טבע, תכנון וחוסן אקלימי, המשרד להגנת הסביבה

rani@sviva.gov.il

תקציר

המושג "המערכת הימית בישראל" כולל את סך כל המרכיבים של פעילויות ושימושים בסביבה הימית בתחומי השיפוט של ישראל, בים התיכון ובים סוף. מערכת ייחודית זו הייתה ועודנה חשופה ללחצים אדירים ממקורות אנושיים, בדגש על היבטי האקולוגיה של מערכת זו. סטטוטורית, המרחב הימי של ישראל (בים התיכון) מתחיל 300 מטר מזרחית לקו החוף (איור 1) מערבה, עד קצה המים הלאומיים של ישראל שמרחקם 12 מייל ימי מקו החוף. אולם מרחב זה נמשך עוד מעבר אליו, עד קצה האזור הכלכלי הבלעדי של ישראל – EEZ Exclusive Economic Zone – (כמותר על-פי אמנת חוק הים 1982). במרחב מתרחשות פעילויות נופש וקיט, ספנות ומסחר, דיג, הפקת אנרגיה, הפקת מים, והפקת משאבי טבע אחרים. כל הפעילויות הללו קורות על גבי מערכת אקולוגית מורכבת ורגישה הקרויה ים ומציבות אותה בסיכון כרוני כתוצאה מפליטות מזהמים ומשימושים, לעיתים בלתי אחראיים, בסביבה החופית ובמרחב הימי, לצרכים השונים.

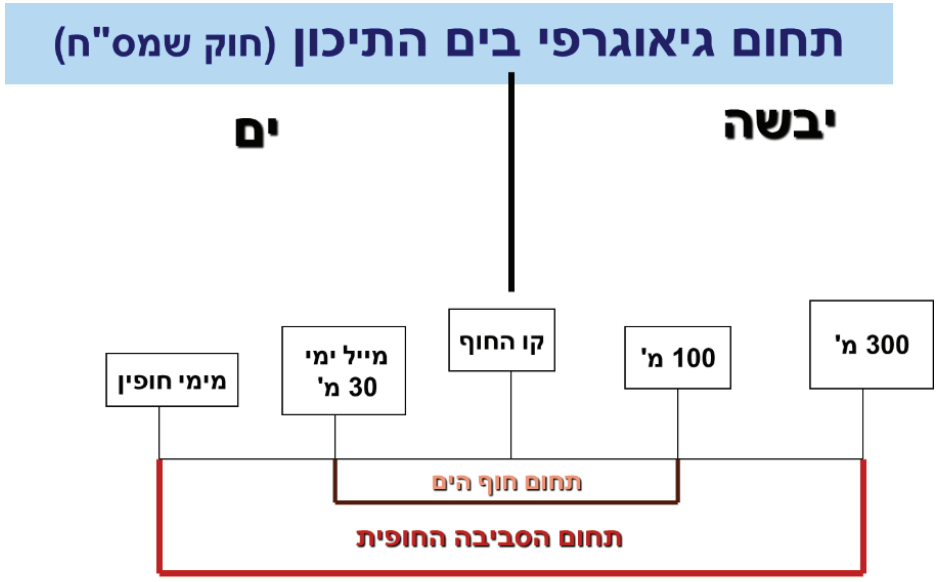
מדינת ישראל השכילה לייצר מערכת חקיקה ואסדרה (רגולציה) מתקדמת שמקורה בחלקה בהסכמים ובאמנות בינלאומיות וחלקה ביוזמות שמקורן בישראל. החשוב הוא, שאכן מתקיימת מדיניות עקבית של הנחיה ויישום הוראות האסדרה תוך שקיפות לציבור, המגובים בפיקוח ובאכיפה בלתי מתפשרים. פעילות אסדרה זו מיושמת על-ידי המשרד להגנת הסביבה באופן עקבי ומקצועי מזה כ-35 שנה, תוך הצבת יעדים שאפתניים יותר ובמקביל, התמודדות עם אתגרים גדולים יותר. התוצאות באות לידי ביטוי בהפחתה דרמטית בעומסי הזיהום המוזרמים לים מהיבשה, בהפחתה גדולה לא פחות של הזיהום מספנות וממתקנים ימיים, בגילוי אזורים במעמקי הים על-ידי חוקרי הים העמוק המקיימים בתי גידול ואוצרות טבע עוצרי נשימה, בשמירה מוגברת על משאב החוף כנכס הציבור ובהטמעת ההבנה כי המרחב הימי הייחודי הוא נכס לאומי-עולמי שמחייב תשומת לב, אמצעים ונחישות להגנה עליו.

בשנת 2025 תחגוג אמנת ברצלונה להגנת הים התיכון 50 שנה להיווסדה. כבר היום, בשנתה ה-75 של מדינת ישראל, אנו מוצאים את עצמנו בקדמת המדינות המסוגלות להראות הגנה אקטיבית, המגובה בתוצאות מדודות, על הסביבה החופית והמרחב הימי שבאחריותנו. עם זאת, אנו נתקלים באתגרים חדשים כגון: התפלת מי ים בהיקף עצום בקנה-מידה עולמי; יוזמות לניצול משאבי קרקעית ותת קרקע הים כמו חול, גז ונפט; ניצול הסביבה הימית לפיתוח חקלאות ימית אינטנסיבית; פיתוח מתקני אנרגיה חדשניים וחדשנות בכלל במרחב הימי; וכמובן האיום הבלתי נגמר על הרצועה החופית הפיזית גם כרצועה אטרקטיבית מצד יזמים ומפתחים וגם מצד הים בצורת סכנת עליית מפלס הים ועוצמת סערות המתגברות בכל שנה.

בנוסף, ברור יותר ויותר כי קיימים מערכות אקולוגיות ימיות רגישות ובתי גידול מיוחדים בעומק הים התיכון שברובם עדיין לא התגלו. משום כך, אלו ועוד מחייבים את מדינת ישראל להשקיע יותר בדמות כלי אסדרה חדשניים, קביעת מדיניות מחמירה ומבוססת מדעית ומקצועית, ולא פחות חשוב הקצאת משאבים משמעותיים לשיפור יכולת הפיקוח והתגובה לאירועי חירום בים ולאכיפת החוק. המציאות מכתיבה מחויבות רצינית עוד יותר, למתן מענה הולם לאתגרי ההגנה על המערכת הימית והחופית המיוחדת שלנו.

הגנת הסביבה החופית הפיזית

חוק שמירת הסביבה החופית (שמס"ח) שנכנס לתוקף בנובמבר 2004, הגדיר וקבע לראשונה את תחומי הסביבה החופית הזקוקים להגנה מפני פגיעות אפשריות (איור 1), הגדיר מקצת מסוגי הפגיעות, והחשוב ביותר, קבע כי המרחב החופי-ימי הוא משאב טבע ציבורי יחיד בסוגו.



איור 1. תרשים חתך סכימתי של תחומים וגבולות בסביבה החופית על-פי חוק שמירת הסביבה החופית, התשס"ח 2004.

ועדה לשמירת הסביבה החופית – החוק קבע ועדת תכנון ארצית עם סמכויות תכנון נרחבות (בגרסתה הקודמת "ועדה למימי חופין"). בוועדה בראשות מינהל התכנון חברים 17 נציגי משרדי ממשלה שלטון מקומי וארגונים והיא המאשרת תוכניות בנייה בסביבה החופית. ועדה זו מיישמת בין השאר את עקרונות התכנון החופי בר-הקיימא, תוך מתן עדיפות ברורה לשמירת המשאב החופי הטבעי וכנכס של הציבור כולו ובהתאם להוראות פרוטוקול ה-ICZM (Integrated Coastal Zone Management) של אמנת ברצלונה אשר נכתב בד בבד עם הליך אישור החוק בישראל.

פינוי מבנים הפוגעים בסביבה החופית – החוק שנכנס לתוקף ב-2005 נתן לאנשי המשרד להגנת הסביבה סל כלים להתמודד עם בעיות כגון בנייה בלתי חוקית לאורך החופים, כזו הפוגעת בהיבטים שונים של המערכת האקולוגית והגורמת לשינוי ניכר בסביבה החופית. כמו כן ניתנה אפשרות להתמודד עם חסימות המעבר החופשי בחופים (גדרות, ומבנים) שהוקמו בניגוד לחוק וגם עם נסיעת רכבים בתחום חוף הים. מאידך, ההתמודדות עם נושאים אלו חייבה היערכות חדשה בתחומי מומחיות רבים בתחום הגנת הסביבה, כאלו המשיקים להנדסה אזרחית, אקולוגיה חופית, פינוי והריסה באופן סביבתי ועוד (איור 2).

הגנת המצוק החופי – שלוש החלטות ממשלה הובילו את הצורך בהגנת מצוקי הכורכר החופי להתמודדות עם בעיית ההתמוטטות הטבעית, אך המואצת, על-ידי תהליכים מעשה ידי אדם כגון השקיה וניקוז לא תקין. החברה הממשלתית להגנות מצוקי חוף הים התיכון בע"מ, הוקמה תחת המשרד להגנת הסביבה ומטרתה היא הפעלת אמצעים ונקיטת פעולות הנדסיות לביצוע הגנות ימיות לצמצום התופעה של קריסת המצוק, בעוד שמטלת ביצוע ההגנות של המצוקים עצמם הוטלה על הרשויות המקומיות החופיות אשר במרבית המקרים, נכון להיום, מתמודדות בהצלחה חלקית בלבד עם התופעה.

הגנת הסביבה הימית מהזרמות לים ממקורות יבשתיים

החוק הישראלי למניעת זיהום הים ממקורות יבשתיים שנכנס לתוקף בשנת 1990, בעקבות כניסת פרוטוקול LBS (Land-Based Sources) של אמנת ברצלונה לתוקף, שינה באופן קיצוני את התייחסות ישראל לים, שהייתה כאל אתר פסולת שאליו ניתן להשליך ולהזרים שפכי תעשייה וביוב גולמי ללא כל טיפול. החוק אסר לראשונה, כל הזרמה לים אלא באם קיבל המבקש היתר מיוחד להזרמה לים מאת ועדה בינמשרדית מיוחדת שהוקמה בחוק ובה 8 חברים, לרבות נציג ציבור. זיהום הים ממקורות יבשתיים מהווה כ-80% מהזיהום בים. הפעלת המערכת הקפדנית של מתן היתרי הזרמה לים, הנחיה ומעקב, פיקוח ואכיפה בלתי מתפשרת, תוך בקרה מבוססת על מדידת עומס זיהום המוזרם לים, הביאה להפסקה מוחלטת של הזרמות לים, היכן שהייתה חלופה יבשתית או אפשרות למיחזור באופן נאות סביבתית (השבת קולחין למשל, או ייעול ניצול נוזלים ומיחזור מזהמים). במקרים האחרים, המערכת הביאה לצמצום מובהק בעומסי הזיהום המוזרמים לים ובשיפור האיכויות וגם בצמצום התקלות של הזרמת ביוב ממערכות הולכת שפכים עירוניות, לחופים ולים.

כל בקשה למתן היתר הזרמה או הטלה לים מחייבת לימוד מדוקדק של מקורות חומרי הגלם של המפעל, תהליכי ייצור והרכב השפכים הגולמי, תוכנית עבודה להקמת מתקנים לטיהור השפכים ממרכיבים/ חומרים מזיקים לסביבה הימית ולציבור. יישום מטרת החוק מחייב חיפוש אלטרנטיבות להזרמה לים ולהשבת קולחין, תוך הבנה והשקעת מאמצים בהנחיה מקצועית.

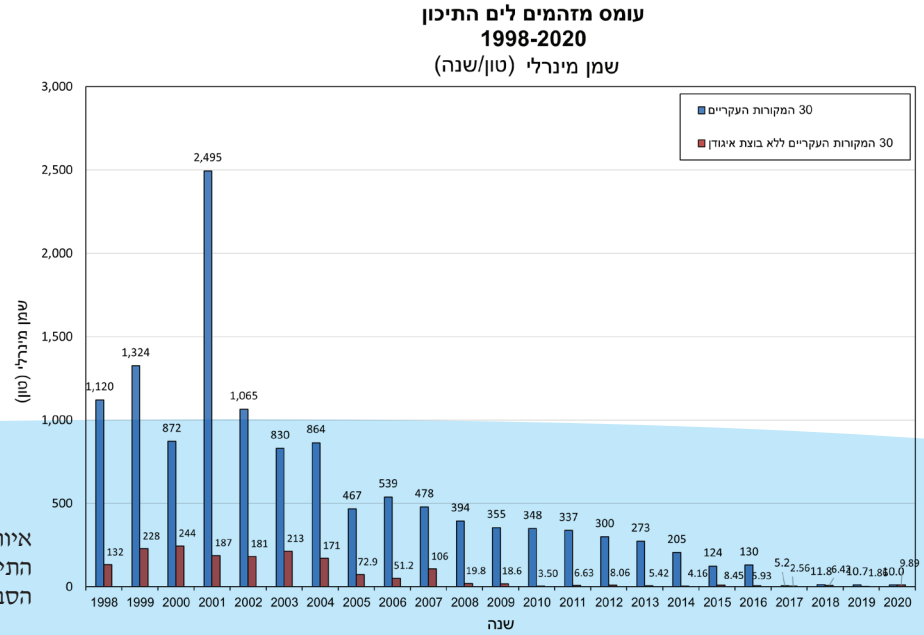
בישראל בעיית המלחת הביוב מקבלת ביטוי גם בפן הימי. יצרן תמלחת שעלולה להמליח את מכון טיהור השפכים מחויב בהגשת בקשה להיתר הזרמה/הטלה ובאם הבקשה עונה על הקריטריונים הרשומים בתקנות ובהחלטות הוועדה, ניתן לסלקם בהיתר הזרמה לים, באמצעות מסוף תמלחות המאושר ומפוקח על-ידי היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית.

הפרסום הראשון של **מאזן מזהמים לים התיכון**[1] **– 1998-2004**, הציג הפחתה של כ-60% ברוב

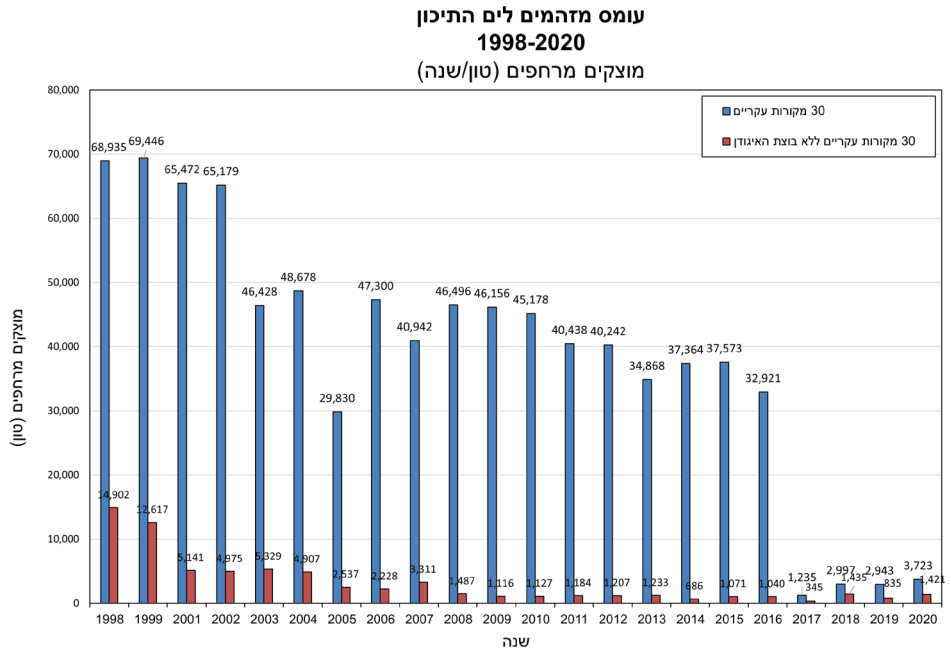
איור 2. הסרת פגיעה בסביבה החופית מארבע מסעדות בחוף גבעת אולגה, חדרה. א-לפני; ב-בעת הפינוי; ג-לאחר הפינוי החוף נקי. דצמבר 2012. צילום: רני עמיר.

המדדים לזיהום, עד כדי הפחתה של כ-98% בעומסים שהוזרמו ממפעלי הקישון. בשנים שעברו מאז ועד 2016 חלו שינויים עקביים והפחתות נוספות בעומס המוזרם לים, ברוב הפרמטרים, למעט צח"ב אשר התורם העיקרי שלו הייתה בוצת השפד"ן. בתחילת שנת 2017 הופסקה הזרמת הבוצה לים לאחר הקמת מערכת עיכול אנארובי בעלויות של למעלה ממיליארד ורבע שקלים. באיורים 3,4,5 להלן ניתן לראות דוגמאות למגמת הפחתת עומסי מזהמים מדודים, של המזרימים העיקריים בהיתרים לים התיכון בישראל.

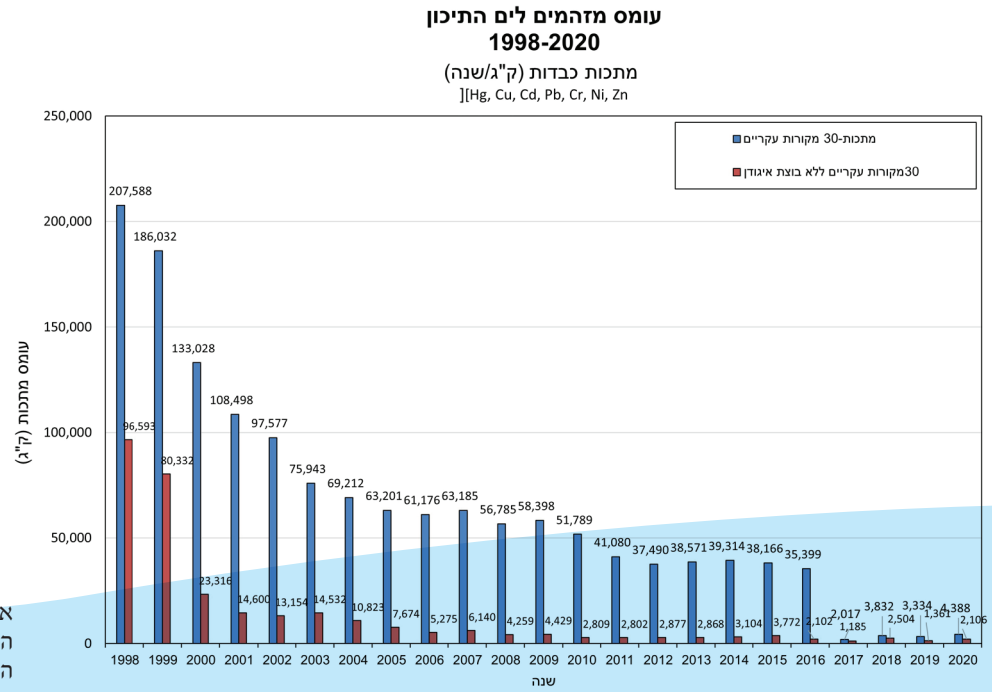
דוגמאות למקרי הפסקת הזרמות לים (איור 6) כתוצאה מהשבת קולחין: שפכי נהריה, שפכי עכו (הקמת מכוני טיהור ומיחזור להשקיה חקלאית); בסיסי חיל הים בעתלית ובאשדוד; הפסקת הטלה לים מפרוטארום; הפסקת הזרמת מפעלי המזון מילוז ומילוטל; הפסקת הזרמה לים המלח מרותם אמפרט (מיחזור מים ושפכים); הוצאתן הסופית מהים של חוות הדגים באילת. דוגמאות לתהליכי שיפור באיכות קולחין המוזרמים לים, בדרך כלל בהשקעות כספיות גדולות ולעיתים בערכים הננקבים בעשרות מיליוני שקלים, ניתן לראות במקרים הבאים: הקמת מתקני טיפול ביולוגיים בשפכים ב"פז בית זיקוק אשדוד"; במפעל "יוניליבר-תלמה"; בנמל הדלק תש"ן בחיפה לטיפול במי נטל ושיפוליים; במכלל קצא"א באשקלון; ב"אגן-אדמה" במתקן מורכב לטיפול והפחתת עומס הזיהום בחומרים אורגניים וקוטלי עשבים; ב"חיפה כימיקלים דרום" מתקן הסמכה וסחיטה. כצפוי, השיפור המשמעותי ביותר בעומס הזיהום לים קרה עם הוצאת בוצת השפד"ן מהים בתחילת 2017, שהייתה המזהם הגדול ביותר של הים בישראל[1,2].



איור 3. עומסים שנתיים של שמן מינרלי (Mineral Oil) המוזרמים לים התיכון (1998 עד 2020) בהיתר הזרמה לים (מקור: היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית).



איור 4. עומסים שנתיים של מוצקים מרחפים (TSS) המוזרמים לים התיכון (1998 עד 2020) בהיתר הזרמה לים (מקור: היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית).



איור 5. עומסים שנתיים של שבע מתכות כבדות (Metals) המוזרמים לים התיכון (1998 עד 2020) בהיתר הזרמה לים (מקור: היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית).

איור 6. א. בוצת איגוד ערים דן לביוב זורמת לים, בצינור תת-ימי כ-5 ק"מ מול פלמחים, בעומק ים של כ-38 מ' (עד שנת 2017). צילום: גליה פסטרנק. ב. שפכי מפעל ארגמן, יבנה. (עד שנת 2005). צילום: רני עמיר.

דוגמאות לתהליכי שיפור באיכות קולחין המוזרמים לים, בדרך כלל בהשקעות כספיות גדולות ולעיתים בערכים הננקבים בעשרות מיליוני שקלים, ניתן לראות במקרים הבאים: הקמת מתקני טיפול ביולוגיים בשפכים ב"פז בית זיקוק אשדוד"; במפעל "יוניליבר-תלמה"; בנמל הדלק תש"ן בחיפה לטיפול במי נטל ושיפוליים; במכלל קצא"א באשקלון; ב"אגן-אדמה" במתקן מורכב לטיפול והפחתת עומס הזיהום בחומרים אורגניים וקוטלי עשבים; ב"חיפה כימיקלים דרום" מתקן הסמכה וסחיטה. כצפוי, השיפור המשמעותי ביותר בעומס הזיהום לים קרה עם הוצאת בוצת השפד"ן מהים בתחילת 2017, שהייתה המזהם הגדול ביותר של הים בישראל[1,2].

מתקני התפלת מי ים – מדינת ישראל נמצאת במהלך אסטרטגי שהחל בשנת 2001, שהופך אותה לאחת מהמדינות המתפילות מי ים בהיקפים מהגדולים בעולם ובמובני מ"ק לנפש, הגדולה שבהן. התפלה של כ-750 מלמ"ק/שנה גוררת באופן מובנה הזרמה לים של כמות זהה, פחות או יותר, של רכז התפלה המכיל מלח בריכוז גבוה בממוצע פי 1.7 מהסביבה הטבעית, וכן תוספים שונים כגון מונעי שקיעה ותוספי ברזל (איור 7). בהתחשב בעובדה שהזרמה זו מתבצעת לאורך קו חוף קצר של כ-150 ק"מ, משישה מתקנים פעילים (מאשקלון ועד חדרה ועוד אחד שבנייתו צפויה בגליל המערבי), ניתן לצפות להשפעות מסוימות ארוכות טווח על הסביבה הימית גם בגלל השפעות מקומיות של תמלחת מרוכזת וגם בגלל אפקט השאיבה של מי הגלם שלמעשה "מנקה" את הים מהאורגניזמים החיים שבו. במשרד להגנת הסביבה נכתב מסמך מדיניות המפרט את הדרוש להקמת המתקנים בהיבטים תכנוניים למניעה ומזעור ההשפעות, כולל הנחיות לתסקירי השפעה על הסביבה וביצוע תוכניות ניטור ומעקב בסביבה הימית והחופית. כבר ב-2010, בשיתוף פעולה עם רשות ההתפלה והחשב הכללי באוצר, במכרזי המדינה להקמת מתקני ההתפלה החדשים, נכנסו תקנים ואמצעים מחייבים ברמה הגבוהה ביותר שמטרתם צמצום ההשפעה של ההתפלה על הים.

איור 7. א. מי רכז התפלה עשירים בתחמוצת ברזל במוצא מתקן ההתפלה VID באשקלון, 2003; ב. מוצא רכז מתקן ההתפלה באשקלון, 2023. צילומים: רני עמיר.

הגנת הסביבה הימית מפעילות אוניות ומכליות נפט

בים התיכון יש פעילות מסחרית ענפה ומפותחת המתבססת על נתיבי שיט החוצים אותו לאורכו ולרוחבו. אוניות מכולה, מכליות נפט, מכליות כימיקלים, אוניות מטען בתפזורת ואוניות מטען כללי, ספינות עבודה, מתקני קידוח, ספינות מעבורת ואוניות נוסעים – כל אלו מייצרים בעצם פעילותם סוגי פסולת שונים ובין השאר פסולת שמנית, אשפה ביתית, ביוב, כימיקלים וזיהום אוויר ממנועיהן. על-פי נתוני מרכז REMPEC- Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea של אמנת ברצלונה, בכל רגע נתון מפליגות בים התיכון כ-2000 אוניות סוחר מכל הסוגים. על-פיו, במהלך השנים בין 1980 ועד היום, נגרמו אירועי זיהום הים התיכון בשמן בהיקף של כ-75 אלף טון שזיהמו ים וחופים. על-פי אתר המידע לאנרגיה של ארה"ב, נכון לנתוני 2021, במזרח הים התיכון בלבד, נצרכים כ-134 מיליון טון של נפט ומוצרי דלק במכליות ימיות[3,4].

העולם השכיל להבין כי יש ליצור מערכת חקיקה והסכמים בינלאומית שתסדיר את הפיקוח על ענף הספנות. כך נחתמה בשנת 1973 (ושופרה ב-1978) אמנת MARPOL The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships המסדירה באמצעות 6 נספחיה (ANNEXS) את אופן התפעול השוטף, הסביבתי ביותר המתחייב מהפעלת אוניות, כל זאת כדי למנוע או לצמצם זיהום ים תפעולי מכל המקורות האפשריים באוניות, לרבות בעת תקלות, קלות כחמורות (איור 8).

ביקורות אוניות על אופן יישום MARPOL והחוקים הישראליים המתחייבים מאמנה זו, מבוצעות על-ידי מפקחי כלי שיט של רשות הספנות והנמלים ועל-ידי מפקחי מניעת זיהום ים של היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית. ביקורות אלו מיועדות לבדוק עמידה של האוניות בדרישות האמנה הבינלאומית, לרבות אופן בניית האונייה, מתקנים נדרשים באונייה (לצמצום פליטות מאוויר, משמנים, מביוב ומאשפה), ניהול דלקים וכימיקלים, קיום נהלים, ניהול ספרים ואחזקת ציוד חירום ותרגול.

איור 8. א. האונייה "ולדימיר סבינסטופ" שנפלטה לחוף, פברואר 2001 , אשדוד. צילם: יצחק קודובצקי. ב. האונייה "זלקה סטאר" שנפלטה לחוף , מרץ 2019, חוף אשדוד. צילם: עמיר ארד.

נכון להיום, כל נספחי אמנת MARPOL מיושמים בישראל על-ידי חקיקה לאומית תואמת, כולל נספח 4 העוסק בביוב המיוצר באוניות ודרכי הטיפול ושפיכתו לים, שקודם לאחרונה על-ידי רשות הספנות והנמלים בשיתוף כל המשרדים הרלוונטיים. ב-30 ביוני 2024 אושרו בכנסת תקנות הנמלים (מניעת זיהום משפכים מכלי שיט), תשפ"ד-2024. בכך, אושררו כל נספחי אמנת MARPOL על ידי ישראל במלואם. נושא אחר שהמשרד להגנת הסביבה החל בטיפול רגולטורי בו הוא תקנות מניעת זיהום עשן שחור מאוניות, אשר ייתן בידי מפקחי המשרד להגנת הסביבה את היכולת לפקח ולאכוף מניעת פליטת עשן שחור חריג מארובות אוניות (איור 9).

איור 9. פליטת עשן חריגה מאוניות נוסעים בנמל חיפה, 2011. צילום: רני עמיר.

הגנת הסביבה הימית מפעילות קידוח והפקת גז ונפט

למקורות המסכנים את הסביבה הימית נוספה, במהלך עשרים השנים האחרונות, תעשיית החיפוש וההפקה של גז ונפט בים. בשנת 2002 החלה הפקת הגז משדה "ים תטיס" באמצעות אסדת MARY B, בשנת 2012 נכנסה לפעולה אסדת ההפקה "תמר", בשנת 2019 נכנסה לפעולה אסדת ההפקה "לווייתן" ובשנת 2022 החלה ההפקה המסחרית מאסדת "כריש".

תעשיית הפקת האנרגיה מהים, עתירת המשאבים והידע הטכנולוגי הייחודי, מכתיבה היערכות חדשה גם ברמת הידע המקצועי-רגולטורי הנדרש כאשר מדובר בקידוחי-ים אולטרה-עמוקים (מעל 1.7 ק"מ קרקעית ים), גם באופן ההיערכות הלוגיסטית, כאשר מרבית הפעילות מבוצעת בשטחי ים המצויים רחוק מחוץ למים הלאומיים של ישראל, באזור הכלכלי הבלעדי (Exclusive Economic Zone-EEZ), במרחקים של עד 70 מייל ימי (כ-130 ק"מ) מהחוף וגם בחיזוק הקשר המקצועי עם המדינות המתקדמות בעולם בתחומים אלו (איור 10).

איור 10. א. אסדת קידוח (MODU) בשדה הגז לווייתן, 2013. צילום: רני עמיר. ב. אסדת הפקת גז "לווייתן" מול חוף דור,2021. צילום: יבגני מלכין.

מבחינת המשרד להגנת הסביבה, למרות היעדרו של חוק לאומי מחייב המחיל את כל הדינים הסביבתיים ב-EEZ, נדרש כל מתקן אנרגיה לבקש לקבל ולעמוד בהגשת מסמך סביבתי מלא ובהוראותיו, בהגשת וביצוע תוכנית ניטור בים סביב המתקן, בקבלת היתר רעלים על-פי חוק החומרים המסוכנים, בקבלת היתר הזרמה לים על-פי חוק מניעת זיהום הים ממקורות יבשתיים ובקבלת היתר פליטה לאוויר על-פי חוק אוויר נקי היכן שמתחייב על-פי החוק.

איור 11. א. פריקה רשלנית של סודה אש בנמל אשדוד (סודיום קרבונט, Na_2CO_3) 2007. צילום: איציק קודובצקי. ב. פריקה רשלנית של גרעינים בנמל אשדוד, 2010. צילום: דרור אריאלי.

הגנת הסביבה הימית ממתקני תשתית, נמלים ומסופים

לאורך החופים בישראל, גם בים התיכון וגם בים סוף, נמצאים עשרות מתקני תשתית, הכרחיים לחיינו. מאידך, תופסים מתקנים אלו, הלכה למעשה, מקום פיזי במרחב חוף-ים. מתקנים כמו: נמלי הים המסחריים (אשדוד, חיפה ואילת); 11 מעגנות המשמשות לכלי שיט קטנים לדיג ולספורט; מסופים ומקשרי נפט ומוצריו בחיפה, אשדוד, אשקלון ואילת; מסופי פריקה וטעינה של כימיקלים בחיפה ואשדוד; מסופי פריקת פחם בתחנות הכוח בחדרה ובאשקלון; חמש תחנות הכוח החופיות. על מנת למזער ולמנוע ככל האפשר את הנזקים שעלולים להיגרם מפעילותם בשגרה ובתקלות, על המתקנים ליישם ולהקפיד על הוראות הנובעות מפרטי חקיקה כגון תקנות הנמלים ומעגנות, תנאים ברישיונות העסק ובהיתרי רעלים, תנאים בהיתרי הזרמה לים, הוראות אישיות למניעת פליטת מזהמים לאוויר ועוד.

כך, למשל, הנמלים מחויבים בהתקנת אמצעים ומערכות לטיפול בנגר העילי ברציפים ולטיפול בהם לפני שחרורם לים ולמניעת זיהום קרקעית הנמל. החל משנת 2010, הנמלים המסחריים חויבו בהקמת מתקני פריקה וטעינה נקיים למטעני הצובר (איור 11), ובנקיטת אמצעים שונים למניעת זיהומי אוויר, ים וקרקע. באופן דומה מתקיימת ביקורת שגרתית ושוטפת להיענות להנחיות ולהוראות גם במרינות ובנמלים התפעוליים שלאורך החופים. גם בסיסי חיל הים, המצויים מעצם טיבם ותפקידם בנמלים ובשטחי חוף, אמונים על השמירה על הסביבה הימית וככלל מבצעים את הנדרש מהם במודעות הולכת וגוברת, גם אם לעיתים רבות החקיקה למניעת זיהום ים אינה חלה על מתקני צבא וכלי שיט צבאיים.

הגנת הסביבה הימית והחופית מפני זיהומי ים בשמן (נפט)

התוכנית הלאומית למוכנות ותגובה – תלמ"ת – אושרה בממשלה ביוני 2008. בסוף 2021 הוחל שוב המאמץ לחקיקת "חוק המוכנות והתגובה לתקריות זיהום ים בשמן". התוכנית הלאומית הנ"ל ותוכניות המוכנות המפעליות הנגזרות ממנה מהוות את המסגרת הארגונית ללחימה והדברת שפך שמן לים ולחופים מהמקורות השונים. ישראל, אשר חתומה על אמנת השיתוף והמוכנות הבינלאומית לטיפול בזיהומי ים בשמן Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation (OPRC ,1990) מקיימת את מחויבותה, אולם נדרשת השלמת התשתית החוקית למענה לאומי למצבים כגון אלו שקרו ועלולים לקרות[4].

איור 12. חוסם ים פתוח סביב מכלית נפט במזח 2 בקצא"א, אילת, 2023. צילום: התחנה למניעת זיהום ים באילת, המשרד להגנת הסביבה.

איור 13. ספינת הפיקוח "סביבה 4" בעת אירוע זיהום ים בנמל חיפה. יולי 2023. צילום: היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית.

דוגמאות כואבות מהעולם לתקריות זיהום בנפט כוללות מכליות כמו "טורי קניון" 1973, "אקסון ולדז" 1989, "פרסטיג'" 2002, "סנצ'י" 2018, אוניית המטען "וואקאשיו" ב-2020, או תקרית זיהום הים האדירה מבאר נפט גולמי בשדה "מקונדו" במפרץ מקסיקו 2010.

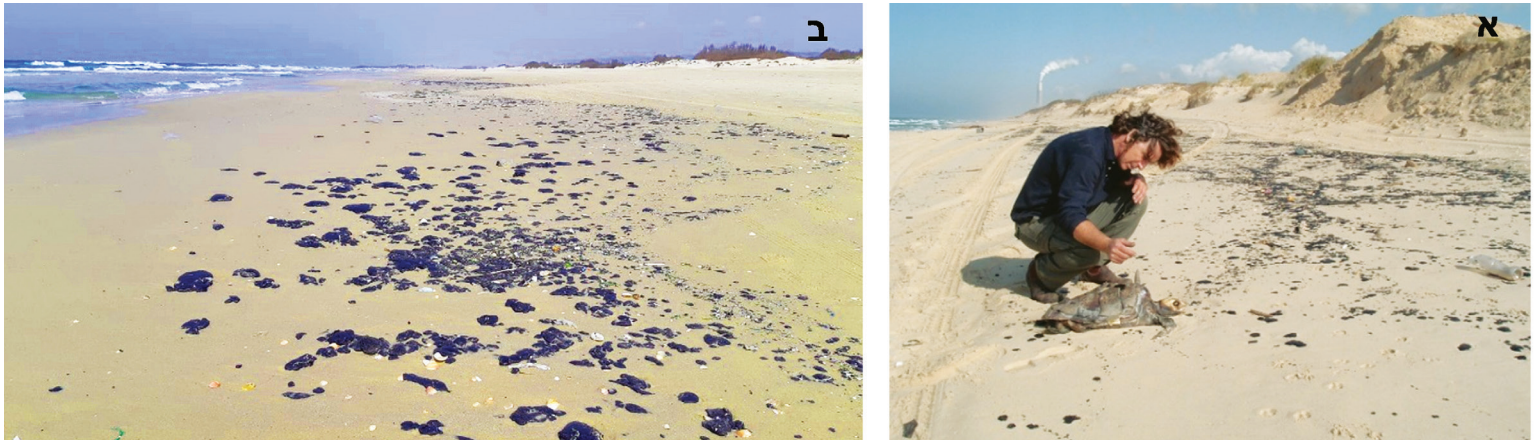
המוכנות בישראל ללחימה בזיהומי ים בשמן מתחלקת טקטית לשלושה אזורים: צפון (מפרץ חיפה עד נמל חדרה), דרום (תחנת כוח רידינג עד נמל הנפט אשקלון קצא"א), אילת – באמצעות התחנה למניעת זיהום הים באילת. המערך הלאומי בנוי בשיטת "תגובה מדורגת" בת 3 מצבים. בתקריות זיהום מדרגה 1, כל בעל תשתית בים או בחוף מחויב באחזקת ציוד וכוח אדם לטיפול מקומי (איור 12 – חוסם להכלת אירוע זיהום בשמן). במצבי אירוע בהיקף רחב יותר – דרגה 2 – מתבצע איגום משאבים של מספר בעלי תוכניות מפעליות להתמודדות עם התקרית. ברמה הלאומית – דרגה 3 – מופעל גם ציוד המשרד להגנת הסביבה על-ידי אנשי היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית, המיומנים בטיפול ובניקוי זיהומי ים בשמן, המסתייעים מצידם בקבלנים פרטיים, בחיל הים, ובמקרים חמורים תיתכן גם פנייה לקבלת סיוע מחו"ל. לצורך כך, מדינת ישראל קשורה בהסכמים בינלאומיים לעזרה הדדית עם קפריסין ויוון בים התיכון ובמפרץ אילת עם ירדן. היערכות זו מחייבת תרגילים מכל הסוגים לשמירת הכשירות, העלאת המיומנות ובחינת תרחישים אפשריים לאירועי זיהום ים.

בישראל אירעו לא מעט תקריות במהלך השנים, רובן המוחלט היה בהיקף מקומי של מספר טונות שמן אשר טופלו על-ידי אנשי המשרד להגנת הסביבה או על-ידי המתקנים המעורבים בתקרית (איור 13 – תקרית זיהום בשמן בנמל חיפה, איור 14 – תקריות זיהום בשמן במפרץ אילת).

תקרית "זפת בסערה"[5] שהתרחשה ב-17 בפברואר 2021, לאורך 160 ק"מ של חוף ישראל בים התיכון, שרטטה מחדש את הנדרש להיערכות ולתגובה ממלכתיות ומקומיות לזיהום חופים בשמן (איור 15 ו-16). תקרית זו הוגדרה כתקרית ברמה 2 (tier 2b) וטופלה על-ידי המשרד להגנת הסביבה בשיתוף פעולה הדוק עם הרשויות המקומיות החופיות, רשות הטבע והגנים וארגוני מתנדבים, במהלך חודש אינטנסיבי (17 בפברואר עד 16 במרץ 2021) ועוד מספר חודשים לאחר מכן בפעולות ניקוי יחידניות היכן שהיה צורך בכך.

איור 14. א. זיהום הים בשמן. אונייה AVRAMIT. אילת, יוני 2011. צילום: דורון נסים; אילת 2001. ב. איסוף ציוד ספיגה מזוהם בנפט, אירוע זיהום אונייה FLOREALIS. צילום: תחנה למניעת זיהום ים אילת.

איור 15. זפת נפלטת מהים ("זפת בסערה"), פברואר 2021. צילום: שרון עדי.



איור 16. א. אירוע זיהום זפת בחוף זיקים, פברואר 2005. צילום: רני עמיר; ב. אירוע זיהום זפת בחוף הכרמל ("זפת בסערה"), פברואר 2021. צילום: דן בירון.

הגנת הסביבה הימית מזיהום פסולת פלסטיק

זיהום מימי הים בפסולת פלסטיק היא תופעה עולמית חמורה שתופסת מקום חשוב ביותר בסדר היום הסביבתי הימי. ברחבי העולם מגיעים לים עשרות אלפי טון פסולת פלסטיק המושלכים בחופים, המוזרמים לים, ברוב המקרים דרך נחלים ותעלות ניקוז וחלקם אף מושלך ישירות לים על-ידי אוניות ובעיקר על-ידי כלי שיט העוסקים בדיג (איור 17).

17. א. פסולת פלסטיק בים בישראל, בעומק כ-800 מ'. צילום: ספינת מחקר "נאוטילוס" באדיבות אוניברסיטת חיפה. ב. חוף אשקלון אחרי סערה, 2008. צילום: יצחק קודובצקי.

בים התיכון אומדן כמות הפסולת המגיעה לים עומדת על כ-18 אלף טון בכל שנה. פסולת זו מתכלה באופן איטי ביותר וחלקה מוצא דרכו לשרשרת המזון, במיוחד חלקיקי הפלסטיק המיקרוניים. המשרד מבצע ניטור של הפסולת במסגרת הניטור הלאומי המבוצע על-ידי והמכון לחקר ימים ואגמים (חיא"ל).

המשרד להגנת הסביבה, בשיתוף רשות הטבע והגנים והמכון לחקר ימים ואגמים, פרסם דוח מקיף הבוחן את השפעת הפסולת הימית במזרח הים התיכון על צבי-הים שנפלטו לחופי ישראל, במהלך 1999 עד 2021. הממצאים הראו שבכל 100% מקיבות הצבים היו שאריות פלסטיק[6].

ביוני 2005, יזם המשרד להגנת הסביבה את תוכנית ניקיון החופים הפתוחים הקרויה "חוף נקי", בסיוע תקציבי של הקרן לשמירת הניקיון. לתוכנית 6 נדבכים הפועלים כמקשה אחת: ניקוי קבוע על-ידי הרשויות המקומיות החופיות; קמפיין הסברה ופרסום; פעילות אכיפה על משליכי פסולת בחופים; תמיכה במתקני מיחזור והפחתה במקור בחופים; פעילויות חינוך קהילתי; ניטור סביבתי. הייחוד של התוכנית הוא "מדד חוף נקי" הנמדד פעם בשבועיים בכל החופים ונותן אומדן טוב לרמת הניקיון בחוף.

שנת 2022 צוינה כשנה הנקייה ביותר בחופי הארץ ובה 81.8% מהחופים נמצאו נקיים עד נקיים מאוד ב-70% מהזמן. בשנת 2021 עד 2024 תומך המשרד להגנת הסביבה ברשויות החופיות בסכום של כ-26.4 מלש"ח לצורך תגבור הניקיון בחופים הבלתי מוכרזים.

ניטור המערכת הימית - בדיקת מצב שגרתית וקבועה

אחת המטלות השלטוניות של המשרד להגנת הסביבה היא בדיקה קבועה של מגמות האיכות בים מבחינה כימית, ביולוגית ופיזיקלית. המעקב נעשה בשתי רמות, הרמה המקומית (תוכנית ניטור ציות) והרמה הלאומית (תוכנית ניטור לאומית)[7]. ברמה הראשונה, בעלי היתרי הזרמה כגון: תחנות כוח, מרינות, מסופי הזרמה לים, מתקני התפלה ומוצאי קולחי תעשייה, נדרשים לבצע ניטור ימי, לניתוח ההשפעות של ההזרמה על הסביבה הימית. כיום מבוצעות באופן שגרתי כ-16 תוכניות ניטור המאושרות ומפוקחות על-ידי היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית[7]. במקביל, מרכז מנחה ומממן המשרד להגנת הסביבה, יחד עם משרד האנרגיה והתשתיות ומשרד המדע, תוכנית ניטור לאומית לים התיכון המבוצעת על-ידי המכון לחקר ימים ואגמים לישראל משנת 1978[8] וכן תוכנית לאומית לניטור מפרץ אילת, המבוצעת על-ידי המכון הבינאוניברסיטאי באילת, משנת 2003[9]. המשרד להגנת הסביבה חתם כבר בשנת 2002 על הסכם עם מזכירות אמנת ברצלונה (Mediterranean Action Plan, MAP) לניטור הים לפי הנחיות הארגון ומבצע זאת בקפידה. נתוני ודוחות הניטור השונים מועברים לארגון בכל שנה ואף מפורסמים באתר הארגון וכן באתר המשרד להגנת הסביבה[11]. במהלך השנים הניטור הימי הורחב מאוד לנושאים כגון מגוון ביולוגי בים, ניטור סדימנטולוגי, ניטור מיקרופלסטיק וניטור מיקרוביאלי בעיקר בחופי רחצה. כמו גם מעקב בעקבות שינויי אקלים. אמנת ברצלונה קבעה כבר ב-2015 את ה"גישה האקולוגית" (Ecosystem Approach)[10] לפיה נקבעו 11 מטרות אקולוגיות ולמעלה מ 25 אינדיקטורים המשמשים את המדינות במסגרת תוכניות הניטור בים התיכון.

הגנת הסביבה הימית - היערכות לאתגרים חדשים

להלן יפורטו מספר תחומים שבהם צפויים אתגרים חדשים ומחודשים אשר צופנים בחובם מורכבות ובעייתיות לסביבה הימית ואשר יחייבו את מדינת ישראל ובראשה המשרד להגנת הסביבה להיערכות מתאימה.

מבנים ימיים – תוכניות חדשות לתשתיות לאומיות בים, החל מבניית נמלים מסחריים נוספים, ותוכנית להקמת מעגנות, בניית איים מלאכותיים בים לנשיאת תשתיות חיוניות, מחייבות היערכות אסטרטגית בראייה לאומית של האזור הימי ובחינה יסודית של השפעה על הסביבה הימית.

חקלאות ימית – קידום תוכניות יזמיות להקמת חוות חקלאות ימית לגידול אינטנסיבי של דגים באזורי המרחב הימי של ישראל. גידול דגים בהיקפים ובתנאי מזרח הים התיכון מגדיל פוטנציאל לזיהום ממקור אורגני לים ומחייב היערכות מתאימה.

מתקני חדשנות – נמצאת בעריכה מתקדמת תמ"א להקמת מתקני חדשנות, שלהם יוקצו אזורים נרחבים בים. מתקנים אלו מקדמים פיתוח, אולם יש להשגיח על השלכות אפשריות. מתקנים כאלו כוללים הפקת אנרגיה מרוח, מגלים ומזרמים. בנוסף, מקודמת תוכנית לקידום יזמות היי-טק בים על-ידי משרד המדע והחדשנות (תוכנית "בלו-טק") אשר גם היא מעודדת פיתוח משאב הים בכיוונים שונים של כלכלה כחולה.

פעילות לחיפוש והפקה של משאבי אנרגיה – מרבצי הגז של ישראל מהווים ענף כלכלי רציני לפיתוח והשקעות. פעילות לחיפוש והפקת גז (ו/או נפט) במדף היבשתי של ישראל (מחקר סייסמלוגי, קידוחי חיפוש, פיתוח שדות ומתקני הפקה והולכה) עד מרחקים של 70 מייל ימי מחופי ישראל, מהווה עדיין אתגר ידע הנדסי ויכולות טכניות לבצע פיקוח ובקרה סביבתית הדוקה.

שינויי אקלים – להתחממות הגלובלית יש השפעה ישירה וקריטית על הסביבה הימית. השפעות פיזיקוכימיות שכוללות התחממות גוף הים, שינויי מליחות, החמצה, פלישה מוגברת של מינים, הגברת עוצמת סערות וגלים משמעותיים וכמובן עלייה חזויה של מפלס הים הסטטי והדינמי. מדובר במערך אתגרים עצום שקושר דיסציפלינות רבות לטיפול מיידי ולאורך הדורות הבאים.

במקביל, יש לציין פתרונות אפשריים לחלק מהאתגרים הישנים והחדשים. כך למשל:

שמורות טבע ימיות בשטח הים הטריטוריאלי – כבר בשנת 2012 יזמה רשות הטבע והגנים תוכנית לשמורות טבע ימיות בים התיכון הריבוני של ישראל. יישום תוכנית זו כבר החל ובמסגרתה העלתה ישראל את שטח שמורות הטבע בים התיכון מ-0.3% ל-4%, ועוד כ-1.5% שטח שמורות מאושרות שעדיין לא הוכרזו.

אזורים ימיים מוגנים – האזור הכלכלי הבלעדי של ישראל בים התיכון זוהה כבעל פוטנציאל עצום להכיל בתי גידול רגישים ויחודיים (כגון המצוי ב"גלישת פלמחים"). תוכנית-אב שהוכנה על-ידי החברה להגנת הטבע ואומצה על-ידי המשרד להגנת הסביבה, מחייבת הקצאת משאבים למחקר הים ולביצוע אכרזות מתאימות להגנת אזורים אלו מאיומים שונים בים.

הגנת המערכת הסביבתית הימית בישראל - ציוני דרך

רשימה חלקית של ציוני הדרך ודוגמאות בהגנה על הסביבה הימית לאורך השנים:

1. חתימה על אמנת ברצלונה ופרוטוקוליה 1975.
2. תיקון פקודת מניעת זיהום מי ים בשמן 1980 והתקנות שאחריה.
3. הקמת הקרן למניעת זיהום הים, בשנת 1983.
4. החוק למניעת זיהום הים ממקורות יבשתיים 1988 ותקנותיו ותיקון החוק משנת 2005.
5. הפחתה דרסטית בעומסי הזיהום למפרץ חיפה ממפעלי הקישון ונוספים 2005-2001.
6. 2003 – חקירה פלילית והגשת כתב אישום נגד א.ע. דן לביוב לאחר פריצת צינור ראשי לסניקת הביוב והזרמת כ-3 מיליון מ"ק ביוב לים. הרשעת האיגוד בקנס של כ-800 אלף₪ הביאה לשינוי בניהול מערכות הולכת ביוב ותחזוקה מונעת ברשויות המקומיות ותאגידי הביוב וחקיקת תקנות בהתאם.
7. חקיקת חוק שמירת הסביבה החופית 2004.
8. 2005-2008 – חוות לגידול דגים במפרץ אילת, שהיו בפעילות בים מאז אמצע שנות התשעים של המאה הקודמת, הוצאו מהים סופית, במאבק סביבתי מתוקשר וממושך, מהגדולים שידעה הסביבה הימית בישראל, לאחר שלוש החלטות ממשלה בנושא זה.
9. יוני 2008 – החלטת ממשלה על תוכנית החירום הלאומית לאירועי זיהום ים בשמן (תלמ"ת)
10. דצמבר 2010 – הקנס הגבוה ביותר שהוטל על אונייה MSC PERLE בגין זיהום הים בשמן, בסך 1.05 מלש"ח.
11. תיקון תקנות היטל ההזרמה לים 2011.
12. דצמבר 2012 – פינוי ארבע מסעדות בלתי חוקיות שפגעו בסביבה החופית בחוף חדרה.
13. 2012 – פורסמה תוכנית-אב של רשות הטבע והגנים לשמורות טבע ימיות במים הריבוניים שאומצה על-ידי המשרד להגנת הסביבה.
14. 2016 – פרסום מסמך המדיניות למרחב הימי על-ידי מינהל התכנון (גירסה רשמית ב-2018).
15. יולי 2017 – 10.6 מלש"ח, שילמה פז בית זיקוק אשדוד, בגין חריגות מהיתר הזרמה לים. הקנס הסביבתי הגבוה שהוטל בישראל עד היום בנוגע לדיני הים.
16. פברואר-מרץ 2021 – תקרית זיהום חופים רחב היקף, "זפת בסערה".
17. מאי 2023 – פורסמה תוכנית-אב לאזורים ימיים מוגנים באזור הכלכלי הבלעדי ובה הצעה ל-30% שטח מוגן עד 2030, על-ידי החברה להגנת הטבע שריכזה צוות מקצועי-אקדמי ואומצה על-ידי המשרד להגנת הסביבה.

סיכום

ישראל עשתה צעדי ענק בפעולות להגנת הסביבה הימית במהלך ארבעת העשורים האחרונים. במהלך העשור האחרון התעוררו אתגרים ואיומים חדשים הנובעים בחלקם מעצם היות ישראל חלק מהגלובוס – התחממות גלובלית וההשפעה על הים – והיותה "מדינת אי" לחופי הים התיכון וחופי הים האדום, ובחלקם מגילוי המרחב הימי ומשאבי האנרגיה והמרחבים שבו וכמובן מהעובדה שחופי הים התיכון והים האדום הם משאב יקר ערך בכל היבט כלכלי-חברתי-ציבורי וסביבתי.

לכן, בצד הפעולות הרגולטוריות והציבוריות שנעשו על-ידי המשרד להגנת הסביבה, רשות הטבע והגנים וכמובן על-ידי ארגונים אזרחיים מוטי הגנת הים, יש להדגיש את החוסר המובנה במשאבים שמטרתם להכיל ולהתמודד בהצלחה עם אותם אתגרים ברמה הלאומית. כך למשל, חקיקת חוק אשר יסדיר את הדין הלאומי שיחול באזור הכלכלי הבלעדי הינו מחויב המציאות. בנוסף, הקצאת אמצעים נרחבים וכוח אדם למשרד להגנת הסביבה לביצוע תפקידי הנחיה, פיקוח ואכיפת דיני הגנת הסביבה הימית והתמודדות עם אירועי תקריות זיהום הים בשמן, הינם הכרח.

לצד אלו יש לציין יוזמות חיוביות כמו אימוץ מדיניות לאומית לתכנון וניהול המרחב הימי[12] שריכז מינהל התכנון, בסיוע צוות מקצועי בינמשרדי, וכן את יוזמת רשות הטבע והגנים שקידמה תוכנית שמורות טבע ימיות ששתיים גדולות הוכרזו זה מכבר (ראש הנקרה וראש כרמל), שלוש אושרו (אבטח, פולג ועתלית). ולבסוף נזכיר את יוזמת תוכנית-האב לאזורים ימיים מוגנים באזור הכלכלי הבלעדי שריכזה ופרסמה החברה להגנת הטבע ואומצה על-ידי השרה להגנת הסביבה ביוני 2023[13].

רשימת מקורות

1. מלסטר, א. מרק, א. מאזן מזהמים רב-שנתי לים התיכון 1998-2004, (המשרד להגנת הסביבה ביוני 2006) https://www.gov.il/he/pages/pollutant_loads_sea_annual_reports
2. סאלח, ס. מלסטר, א. מאזן מזהמים לים 2016. 102. (המשרד להגנת הסביבה, 2017) https://www.gov.il/he/pages/pollutant_loads_sea_annual_reports
3. אתר משרד האנרגיה ארה"ב https://www.eia.gov/
4. REMPEC – Regional Mediterranean Pollution Emergency Center. www.rempec.org
5. דוח תחקיר "זפת בסערה", היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית, אתר ועדת הפנים והגנת הסביבה, כנסת, 2022 https://fs.knesset.gov.il/24/Committees/24_cs_bg_627200.pdf
6. מחקר השפעת הפסולת הימית על צבי-הים בישראל, ש. ששון, י. לוי, י. סגל, (2022) https://www.gov.il/he/Departments/publications/reports/sea_turtles
7. תוכניות הניטור המקומיות בים https://govmap.gov.il/?c=175821.82,656383.46&z=2&b=2&lay=NITUR_YAMIT
8. חרות, ב. וחובריו, תוכנית הניטור הלאומית בים התיכון לשנת 2022 ניטור זיהום ים. H26/2023 דוח חיא"ל (חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ, 2023)
9. תוכניות ניטור מפרץ אילת https://iui-eilat.ac.il/research/NMPReports.asp
10. Website of the Mediterranean Action Plan www.unepmap.org
11. אתר המשרד להגנת הסביבה, ים וחופים https://www.gov.il/he/departments/topics/seas_and_coasts/gov-il-landing-page
12. מסמך חזון ומדיניות למרחב הימי, מינהל התכנון, (2022) https://www.gov.il/he/pages/sea_policy_suggest
13. תוכנית-אב לשמורות טבע באזור הכלכלי הבלעדי. (2023) chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.teva.org.il/app/uploads/2023/06/Master-plan-for-nature-reserves-WEB-.pdf

2 מערך ניטור הסביבה הימית בישראל

דרור צוראל[1], ברק חרות[3,2]

[1] היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית, המשרד להגנת הסביבה
[2] חקר ימים ואגמים לישראל
[3] המרכז האקדמי רופין

barak@ocean.org.il,
drorZ@sviva.gov.il

תקציר

בעשורים האחרונים גדלה התלות של מדינת ישראל במשאב הימי כמקור למים שפירים, אנרגיה, מסחר ועוד. בהתאם, חל שינוי דרמטי בהיקף הפעילות במרחב הימי של ישראל, ובכלל זה הקמה של מתקני התפלת מי ים מן הגדולים בעולם, קידוחים והפקה של גז בים העמוק, הרחבה והקמת נמלים ועוד. בנוסף, בעשור האחרון חלה הגברה משמעותית של השפעת שינויי אקלים, במיוחד באזורי המערכות הימיות של מדינת ישראל. על מנת לעקוב אחר ההשפעות הסביבתיות של פעילות זו, ובכדי לייצר בסיס מידע מדעי למדיניות סביבתית מקיימת ומושכלת, יש צורך בבחינה תקופתית ומתמשכת של מצב המערכת הימית באמצעות ניטור ימי.

במדינת ישראל קיים זה למעלה משני עשורים מערך ניטור של הסביבה הימית הכולל דיגום של כלל מרכיבי המערכת הימית ובחינת מצב המערכת הימית והשינויים בזמן ובמרחב. מערך זה בנוי משלוש רמות: 1. הרמה המקומית (Compliance monitoring) – תוכניות ניטור מקומיות (אכיפתיות) הנדרשות ממפעלים בעלי היתרי הזרמה או הטלה לים. 2. הרמה הארצית (National monitoring) – תוכניות ניטור לאומיות בים התיכון ובצפון מפרץ אילת. 3. הרמה הבינלאומית במסגרת אמנה אזורית (The Barcelona Convention) – תוכנית הניטור הבינלאומית בים התיכון של ארגון הסביבה של האו"ם ומוסדות אמנת ברצלונה (UNEP-MAP, United Nations Environmental Protection Agency, Mediterranean Action Plan) המבוססת על תוכניות הניטור הלאומיות של כלל מדינות הים התיכון. פרק זה מפרט את מערכי ניטור הסביבה הימית בישראל ומציג דוגמאות למצאים אשר שימשו ומשמשים את מקבלי ההחלטות בישראל לצורך ניהול מקיים של הסביבה הימית בישראל.

רקע

הסביבה הימית מאופיינת כמערכת דינמית ופתוחה, ובהתאם, המערכת הימית חשופה להשפעות ישירות ומתמשכות של המערכת היבשתית והאטמוספרית ושל מערכות ימיות קשורות. כמו כן, המערכת חשופה לשינויים עתיים מהירים ועד יומיים, עונתיים ורב-שנתיים. על מנת לבחון את השפעות הפעילות האנתרופוגנית המקומית, האזורית והגלובלית על המערכת הימית, ואת הצלחת המדיניות הסביבתית והרגולציה שכרוכה בכך, יש צורך בבסיס מידע מדעי רחב ובמעקב רציף, ארוך טווח ובר-השוואה, שנקרא "ניטור".

ניטור הינו סדרה של בדיקות תדירות במטרה לבחון מגמות שינוי במרחב ובזמן, וחריגות ביחס למצב המערכת האקולוגית או תקנים סביבתיים ובריאותיים. ממצאים של בדיקה חוזרת של פרמטרים פיזיקליים, כימיים, סדימנטולוגיים וביולוגיים מאפשרים למקבלי ההחלטות לבחון את השפעת פעילות האדם על הסביבה הימית ולתכנן תשתיות ופעילות באופן מיטבי ומקיים. פרמטרים פיזיקליים כוללים בין היתר שינויים בטמפרטורת ובמליחות המים, במפלס הים ועוד. פרמטרים כימיים מאפיינים את "איכות המים והקרקעית", כלומר, שינויים ברמת המזהמים והשפעתם על החי והצומח הימי וכן על בריאות האדם, בין אם ישירות על-ידי טבילה בים ובין אם בעקיפין, על-ידי צריכת מזון מהים. פרמטרים ביולוגיים כוללים בחינה של הרכב החי והצומח בבתי הגידול השונים בים, דוגמת מגוון מינים, עושר מינים, נוכחות מינים פולשים ועוד. תוכנית ניטור מיטבית כוללת לרוב את כלל המרכיבים המשפיעים על תפקוד המערכת האקולוגית.

מערך הניטור בישראל

ניטור הסביבה הימית בישראל נעשה בשלוש רמות: ברמה המקומית (אכיפתית), ברמה הלאומית וברמה הבינלאומית האזורית.

ניטור מקומי

הניטור המקומי הינו ניטור אכיפתי הנדרש מבעלי תשתיות במסגרת ההיתרים והרישיונות שניתנו להם בים, לדוגמה, היתר הזרמה לים, היתר הטלה לים, רישיון עסק והיתר בנייה. תוכניות אלה כוללות ניטור של פרמטרים כימיים, פיזיקליים וביולוגיים בנקודות דיגום קבועות בשטח ההשפעה של התשתית. לדוגמה, השטח הסובב את מוצא השפכים לים, ובנקודות ביקורת מרוחקות, אלה נדגמים בין 2 ל-4 פעמים בשנה. בעל ההיתר אחראי על ביצוע הניטור באמצעות גופים מקצועיים המאושרים על-ידי המשרד להגנת הסביבה.

מטרות הניטור המקומי

1. בחינה כי בעל ההיתר עומד במגבלות הסביבתיות שהושתו עליו (לדוגמה, טיפול בשפכים להגעה לאיכות מים נדרשת).
2. מדידת והגדרת תחום ואופי ההשפעה של המתקן על הסביבה הימית, כאמצעי לקבלת החלטות לגבי תפעול המתקן עצמו ולגבי תכנון מתקנים דומים בעתיד.
3. בחינה מחודשת ועדכון הדרישות הסביבתיות (החמרה או הקלה) בהיתרים והרישיונות השונים כתגובה למגמות הנצפות לאורך זמן בסביבה הימית בשטח שנבדק.

סוגי תוכניות הניטור המקומי

תוכניות הניטור המקומיות מותאמות לסוגים שונים של היתרי הזרמה/פעילות ימית, כגון תשתיות, לרבות מתקני התפלה, תחנות כוח, מפעלים ובתי זיקוק בעלי מוצא הזרמה לים, אסדות/שדות הפקת גז, מתקני חקלאות ימית (בריכות דגים ביבשה וכלובי דגים בים), מסופי תמלחות, מכוני טיהור שפכים והזרמות שונות לים.

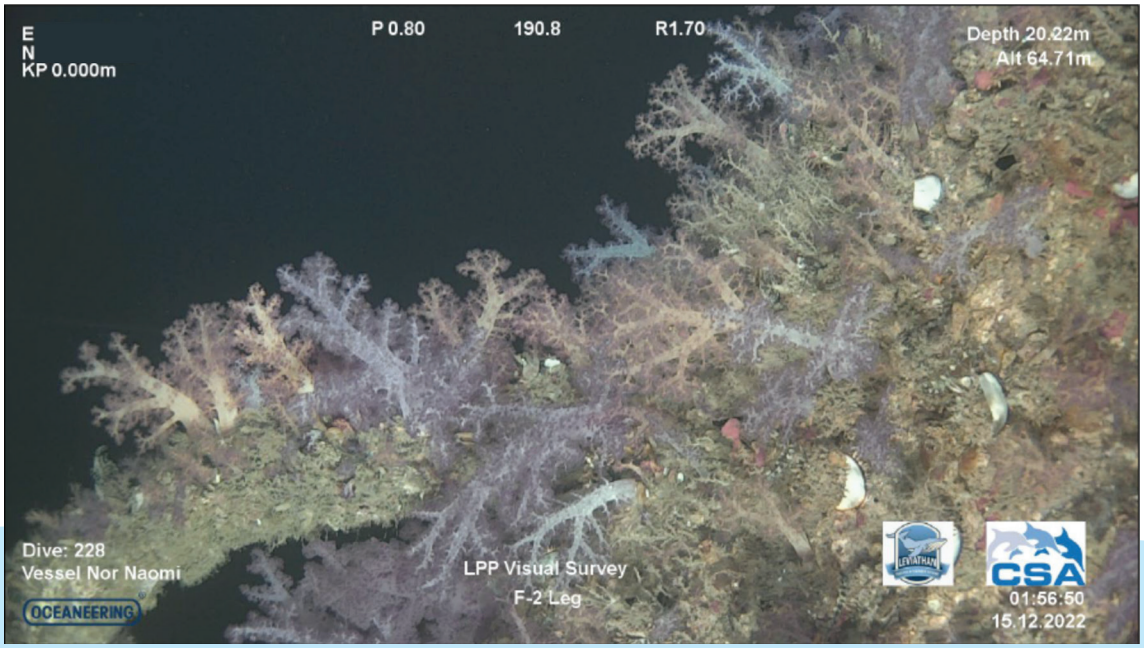
בנוסף לאלה קיימות תוכניות ניטור זמניות הנדרשות בעת ביצוע פרויקט ימי. לדוגמה, ניטור הסביבה לפני ואחרי קידוחי חיפוש/הפקה של גז, ניטור לפני במהלך ואחרי פעילות להגנה המצוק החופי. ישנן גם תוכניות ניטור זמניות המהוות חלק מתוכנית ניהול סביבתי (תנ"ס) של פרויקט בזמן הקמה. לדוגמה, עבודות חפירת החול להקמת הנמל החדש בחיפה לוו בניטור מתמשך של עכירות מי הים על-ידי מדידות רציפות של עכירות במצופים סביב המחפר ובאזורים רגישים סביבתית. במצבים שבהם העכירות עברה את הסף שנקבע הופסקו פעולות החפירה. דוחות הניטור המקומי מפורסמות באתר המשרד להגנת הסביבה[1].

מבנה תוכנית ניטור מקומית

תוכנית הניטור המקומית מתוכננת בהתאם לסוג התשתית או הפעילות וההשפעות הצפויות שלה על הסביבה, כפי שהוגדרו במסגרת תסקיר ההשפעה על הסביבה או המסמך הסביבתי שהוכן בשלבי תכנונה. לדוגמה, מערך דיגום מי הים והסדימנט סביב מוצא הזרמת תמלחת של מתקן התפלה מתוכנן בהתאם לאזור ההשפעה שנחזה בתנאי ים שונים, במודל פיזור מזהמים שהורץ במסגרת תסקיר ההשפעה על הסביבה של המתקן. באיור 1 ניתן לראות את מערך הדיגום של תוכנית הניטור של מתקני ההתפלה "שורק" ו"דרך הים" באזור חוף פלמחים.

איור 1. מערך תחנות הדיגום בתוכנית הניטור של מתקני ההתפלה "שורק" ו"דרך הים" בפלמחים.

מערך הדיגום בתוכנית כולל דיגום של מי ים בעמודת המים, דיגום של הקרקעית (סדימנט) ודיגום ביולוגי. זיהום בעמודת המים לרוב נמהל או מוסע עם הזרמים ואילו זיהום בסדימנט מייצג חשיפה לטווחי זמן גדולים יותר. הדיגום נעשה בדרך כלל באמצעות ספינת מחקר ומכשור ייעודי לדיגומים השונים. הניטור הביולוגי כולל סוגי דיגום שונים לרבות דיגום ואיסוף קרקעית לאפיון החי בתוך המצע, דיגום על-ידי סקרי צלילה לאורך קו באורך קבוע (שיטת הטרנסקט) וסקרי וידיאו בעזרת רובוט תת-ימי (בעיקר בעומקים שבהם לא ניתן לצלול או שהשטח המנוטר גדול מדי לצלילה). בעבר כללו חלק מהתוכניות גם מרכיב של גרירת רשת דיג על מנת לבחון הצטברות מזהמים בבעלי חיים ימיים. בשנים האחרונות, על מנת לצמצם את הנזק הסביבתי של שיטות אלה, בוטלה בדיקה זו בתוכניות המקומיות שבהן הממצאים לא הצביעו על הצטברות מזהמים לאורך זמן והבדיקה מבוצעת כיום במסגרת הניטור הלאומי בלבד. כמו כן, סביב אסדות הגז יש שימוש במכשירים המכילים ממברנה שאליה נספחים מזהמים (מכשירי SPMD לבדיקת הצטברות הידרוקרבונים ו-DGT לבחינת הצטברות מתכות). מכשירים אלה בוחנים את פוטנציאל הצטברות המזהמים בחי הימי ללא צורך בדיגום בעלי החיים עצמם. באסדות הגז מתבצעים גם סקרי וידיאו של החי על גבי ומסביב לרגלי האסדה. החי על האסדה משמש כמדד לחשיפה כרונית לזיהום ים, שכן חברת חי בריאה לא יכולה להתבסס באזור הנמצא תחת חשיפה כרונית לזיהום. כמו כן, סקרים אלה בוחנים האם האסדות משמשות כאתר התבססות למינים פולשים, לדוגמה, מושבות האלמוג הרך הפולש שהתגלו על רגלי אסדת "לווייתן" (איור 2)[2].



איור 2. מושבות אלמוג רך פולש מהסוג *Dendronephthya* (ססגונית) שהתבסס על רגלי אסדת ההפקה לווייתן. צילום: חברת שברון.

תוכניות הניטור כוללות מספר רב של פרמטרים, הנקבעים בהתאם לפוטנציאל ההשפעה על הים של התשתית והמזהמים שהיא אמורה לטפל בהם. לדוגמה, דיגום מי הים סביב מוצא ההזרמה של מפעל "אגן כימיקלים" כולל אנליזה לאיתור בים של חומרי הדברה המיוצרים במפעל, בעוד שסביב מוצאי הזרמה לים של בתי זיקוק או אסדות גז נעשות גם אנליזות של מדדים הקשורים לנפט ונגזרותיו, לדוגמה, שמנים ושומנים, (Total Petroleum Hydrocarbons TPH), הידרוקרבונים נדיפים למחצה, (PAH, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) וכדומה.

מדדים הנמדדים במי הים: מליחות, pH, טמפרטורה, ריכוז כלורופיל, נוטריינטים (זרחן, חנקן, ניטראט+ניטריט, פוספאט, חומצה סיליצית), עכירות, ריכוזי מזהמים (TBT tributyltin – תרכובות בדיל אורגני, TPH, PAH) מתכות כבדות, מינרלים, שמנים ושומנים, חומרים עבירים ב-Gas chromatography/mass spectrometry GCMS, חומרי הדברה, חומר אורגני מומס), מסיסות חמצן, נוכחות חיידקי ביוב.

פרמטרים הנמדדים בסדימנט: גודל גרגר, ריכוזי מזהמים (TPH, PAH), שמן מינרלי, שמנים ושומנים, חומרים עבירים ב-GCMS, מתכות, קוטלי עשבים, חומר אורגני מומס), נוכחות חיידקי ביוב.

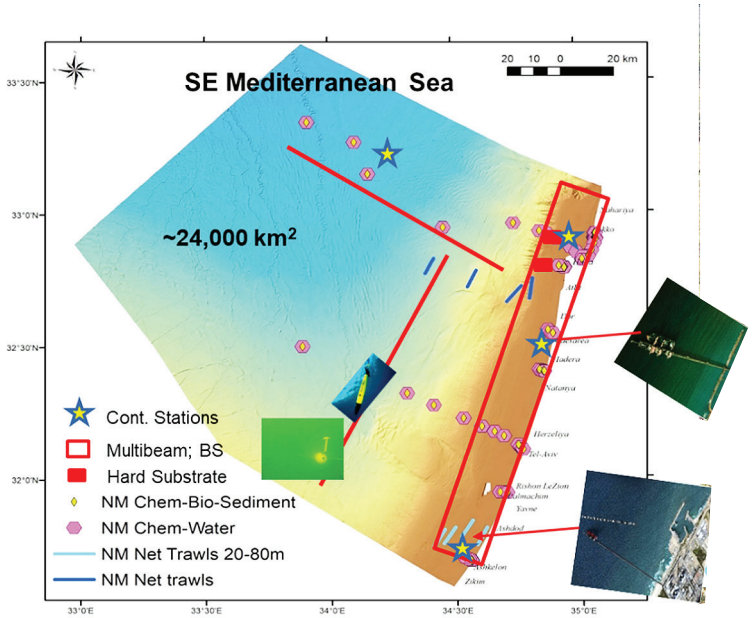
פרמטרים ביולוגיים: חי תוך המצע הרך, חי על המצע הרך, סקרי דגים, הרכב חברת חסרי חוליות ישיבים, הרכב חברת האצות, הרכב חברת המיקרואצות בגוף המים ונוכחות מיקרואצות עם פוטנציאל רעילות וחברת החי (צמדה) על גבי רגלי אסדות.

תוכניות הניטור מתוכננות בהתאם להנחיות המתקבלות מהמשרד להגנת הסביבה ומותאמות לסוג הפעילות/סוג והרכב ההזרמות לים. השיטות, צוות הניטור והמעבדות שבהן נעשות האנליזות עוברים תהליך של בדיקה ואישור על-ידי מרכז הניטור ביחידה הארצית להגנת הסביבה הימית במשרד להגנת הסביבה. דוחות הניטור נבדקים ומאושרים ואז מועלים לאתר המשרד, שם הם נגישים לציבור. הדוחות המוגשים למשרד להגנת הסביבה כוללים את הפרקים הבאים: 1. רקע על המתקן והתוכנית. 2. שיטות העבודה, צוות הדיגום ורשימת המעבדות שאושרו לביצוע האנליזות. 3. ממצאים. 4. ניתוח מרחבי ורב-שנתי של התוצאות. 5. מסקנות והמלצות להמשך.

תוכניות הניטור הלאומי

הניטור הלאומי בים התיכון

הניטור הלאומי בים התיכון מבוצע מאז שנות ה-80 של המאה הקודמת על-ידי חקר ימים ואגמים לישראל. לאחר הקמת המשרד להגנת הסביבה החל הניטור לקבל מימון מסודר מכספי הקרן למניעת זיהום ים המנוהלת על-ידי המשרד. בשנת 2018, במסגרת החלטת ממשלה[3], הצטרפו גם משרד האנרגיה והתשתיות ומשרד המדע למימון ישיר של התוכנית, אשר הורחבה הן מרחבית, כך שתכלול את כל השטח הימי של ישראל בים התיכון, כולל הים העמוק (איור 3), והן מבחינת המרכיבים שכלולים בתוכנית[4].



איור 3. מפת אתרי הדיגום והמדידות במסגרת הניטור הלאומי בים התיכון.

תוכנית הניטור מושתתת על עקרונות הביצוע הבאים:

- הניטור הינו משימה שלטונית – מחויבות של המדינה לאזרחיה לספק מידע אמין על מצב הסביבה הימית.
- ניטור רב-שנתי; ביצוע בדיקות חוזרות באותם אתרים לאורך שנים.
- ניטור כלל ההיבטים הסביבתיים בראייה של הים כמכלול ולאורך זמן.
- שיטות בדיקה אחידות / בנות השוואה לממצאי ניטור של מדינות שכנות.
- התאמה למחויבויות באמנות בינלאומיות.
- שמירת הנתונים ב"מרכז המידע הימי הלאומי".
- שקיפות, פתיחות ודיווח לציבור.

תוכנית הניטור כוללת את החזון, המטרות והיעדים להלן, כפי שנקבעו בהחלטת הממשלה לניטור לאומי מורחב:

חזון:

שמירה על הסביבה הימית לאור ניצול הפוטנציאל הגלום בה לטובת אזרחי המדינה והדורות הבאים.

מטרות:

1. הערכת מצב הסביבה הימית בים התיכון של ישראל לטווח הארוך, ובכלל זה אכיפת ההוראות של החקיקה הלאומית בעניין מניעת זיהום הים, שמירה על המערכת האקולוגית, יישום האמנות הבינלאומיות הרלוונטיות, ותמיכה בקבלת החלטות על שימור, ניצול בר-קיימה וניהול הסביבה הימית של ישראל ומשאביה.
2. יצירת בסיס מדעי ארוך טווח לקבלת החלטות בהקשר להגנה על הסביבה הימית, שימור, ניצול בר-קיימה וניהול הסביבה הימית של ישראל ומשאביה.

3. שיפור הידע הקיים על הסביבה החופית והימית בישראל בראייה אסטרטגית של מתן מענה למקבלי ההחלטות בנושאים הקשורים בפיתוח תשתיות לאומיות תוך הקפדה על ניצול בר-קיימה ושמירת הסביבה הימית.
4. ריכוז, תיעוד, שמירה והפצת נתונים על הסביבה הימית של ישראל באמצעות "מרכז המידע הימי הלאומי" כדי להפיק מהנתונים מידע שימושי. הפעלת המרכז באה לענות על הדרישה הגוברת במדינה לנתונים ומידע לצורכי תכנון, תפעול ובקרה של שימושים בסביבה הימית.
5 יצירת בסיס מדעי וכלים אופרטיביים לצורך תמיכה בתהליכי קבלת החלטות בזמן אמת באירועי קיצון כדוגמת זיהומים או אירועי צונאמי.

יעדי ומרכיבי תוכנית הניטור הלאומי בים התיכון

* **אימוץ האינדיקטורים והיעדים האקולוגיים (ראה להלן) למצב סביבתי טוב** (Good Environmental Status) ליישום "גישת המערכת האקולוגית" (Ecosystem Approach, EcAp) של מוסדות אמנת ברצלונה (מדינות הים התיכון)
* **מעקב אחר השפעות שינויי אקלים**
* **פיתוח ותחזוקת של מרכז המידע הימי הלאומי**

1. פיתוח ותחזוקה של מאגר מידע שיאסוף את כל המידע המדעי והנתונים הימיים (פיזיקליים, כימיים וביולוגיים) של תוכניות הניטור ומחקרים במימון ממשלתי או דרישה ממשלתית.
2. ביצוע בדיקה שוטפת של איכות ואמינות נתוני הניטור של התוכניות המקומיות.
3. הנגשת המידע המדעי ונתוני הניטור לציבור ולבעלי העניין תוך קביעת מדיניות פרסום שקופה והוגנת ועמידה בסטנדרטים בינלאומיים.

* **תמיכה בתשתיות איסוף נתונים (תשתיות ניטור לאומי)**

1. תחנות ומערכות למדידה רציפה של פרמטרים פיזיקליים וכימיים (לדוגמה, טמפרטורה, מליחות, גלים, זרמים, מפלס ים, חמצן).
2. אחזקה שדרוג וכיול מודלים אוקיינוגרפיים אופרטיביים לרבות מודלים לחיזוי גלים וזרמים ומודלים אקולוגיים לחיזוי השפעת הזרמת שפכים על הסביבה הימית.
3. אחזקה, שדרוג וכיול מודלים (דוגמת מודל MEDSLIK) לחיזוי מסלול כתמי שמן בים, לצורך פעולות במקרה של אירוע זיהום ים בשמן ויצירת תרחישים ריאליים לתרגילי זיהום ים.
4. שימור וארכוב דגימות ימיות (כימיות וביולוגיות) ושירותי טקסונומיה.

מרכיבים נלווים

1. פרויקטים ארוכי טווח: כדוגמת השלמת מיפוי בתימטרי, השלמת מאגר הברקודינג (זיהוי גנטי של מינים), סקרים אקולוגיים לתיקוף ועדכון מפת בתי הגידול, גורמי אי יציבות בקרקעית הים (כגון שברים גיאולוגיים, גלישות) כולל תת-הקרקע.

2. מחקרים תומכי ניטור (במסגרת קולות קוראים של מדעני המשרדים השונים) לצורך:
   * פיתוח של שיטות ניטור חדשות.
   * יצירת בסיסי נתונים מדעיים בנושאים שלא נחקרו מספיק, לפיהם יוחלט על פרמטרים לניטור המתאימים לסביבה הימית של ישראל.

במסגרת החלטת הממשלה הוקמו שתי ועדות הקשורות בניטור הלאומי בים התיכון:

1. ועדת מומחים מייעצת – ועדה הכוללת[7] מדענים בעלי מומחיות בכלל הנושאים המנוטרים במסגרת הניטור הלאומי: פיזיקה ימית, כימיה ימית, ביולוגיה ימית וסדימנטולוגיה. תפקיד ועדת המומחים היא לבחון את הביצוע של התוכנית, את הממצאים המדעיים וההמלצות ולהעביר לוועדת ההיגוי הבינמשרדית את התייחסותם והמלצתם.
2. ועדת היגוי בינמשרדית – ועדה הכוללת נציגים מכלל הגופים הישראליים הפועלים בים התיכון, לרבות משרדי הממשלה השונים (המשרד להגנת הסביבה, משרד האנרגיה והתשתיות, משרד המדע, משרד הפנים, משרד הביטחון, משרד החקלאות ומשרד הבריאות), רשות הטבע והגנים, רשות המים, נציג האקדמיה ונציגי ארגוני הסביבה. יו"ר הוועדה הם המדענים הראשיים של המשרד להגנת הסביבה ומשרד האנרגיה והתשתיות. תפקיד ועדת ההיגוי הינו לאשר את דוחות הניטור ומתכונת ותקצוב המשך הניטור הלאומי.

הניטור הלאומי בים התיכון מוגש לוועדות בחמישה כרכים נפרדים שכוללים פרקים שונים:

1. ניטור שלמות הקרקעית והיבטים סדימנטולוגיים.
2. ניטור שינויי אקלים והמערכת ההידרוגרפית הכולל את: ניטור שינויים תרמו-הליניים ונתוני מדידה רציפה, ניטור שינויי מפלס ים, ניטור שינויים בחומציות ובמערכת הקרבונט במי הים, ניטור שינויים ברמת החמצן והנוטריינטים במי הים, מרכז מידע ימי לאומי – הידרוגרפיה.
3. ניטור זיהום ים הכולל: ניטור כימי של מזהמים במים ובסדימנטים, ניטור כימי של מזהמים במעגנות ונמלים, ניטור כימי של מזהמים בבעלי חיים ימיים, ניטור כימי של משקעים אטמוספריים, נוטריינטים וכלורופיל בנחלי החוף ומדף היבשת.
4. ניטור המגוון הביולוגי הכולל: ניטור ביולוגי ואקולוגי של פיטופלנקטון ופיקופיטופלנקטון, ניטור ביולוגי ואקולוגי של המערכת הבקטריאלית, ניטור ביולוגי ואקולוגי של זואופלנקטון, ניטור ביולוגי ואקולוגי של חי בתוך המצע, ניטור ביולוגי ואקולוגי של חי על המצע הרך, ניטור חברות אקולוגיות בחוף הסלעי ובמצע הקשה, טקסונומיה מולקולרית (barcoding) של המגוון הביולוגי.
5. ניטור פסולת ימית.

דוחות הניטור מפורסמים באתר המשרד להגנת הסביבה[5] ובאתר חקר ימים ואגמים לישראל:

ממצאי הניטור הלאומי שימשו לא פעם לצורך קבלת החלטות מבוססות מדע בתכנון ובניהול הפעילות האנושית בסביבה הימית. נתוני הניטור משמשים כנתוני רקע בבחינה של ממצאי הניטור האכיפתי, לדוגמה, של מתקני תשתית כמו אסדות הגז, נמלי הים ומתקני ההתפלה. הנתונים משמשים גם לצורך בחינת ההשפעות של התשתיות על הים וקביעת הנחיות

רגולטוריות לצמצום השפעות אלה, לדוגמה, קביעת ערכי סף להזרמה לים וקביעת דרישות לטיפול בשפכים המוזרמים לים מהתעשייה. ממצאי הניטור משמשים גם לצורך קידום נושאים סביבתיים, למשל לצורך הכרזה על שמורות טבע חדשות, עדכון רשימות המינים המוגנים ועדכון תקנות הדיג.

נתוני הניטור מהווים גם רקע למאות מחקרים מדעיים שפורסמו בעיתונות המדעית העולמית והוצגו בשלל כנסים בינלאומיים. מחקרים אלה מהווים בסיס להבנת אופן תפקודה של המערכת האקולוגית בים התיכון. תוצאות נוספות של הניטור הלאומי מוצגות בפרקים בספר: ברק וחובריו; רהב וחובריו; יעל סגל ומתן אורן; גיל רילוב.

להלן דוגמאות לממצאי הניטור שהיוו בסיס מדעי למדיניות/החלטות סביבתיות:

* **גילוי מקור זיהום** חדש של כספית בצפון מפרץ חיפה – בסיס מדעי להמשך פעולות רגולטוריות לניקוי קרקע וטיפול במי התהום.
* תביעת פיצויים של מדינת ישראל מול הקרן הבינלאומית ה-FUND1992 לאירוע זיהום הזפת – בין היתר על בסיס חוות דעת המתבססת על הרצת המודל האופרטיבי לגילוי מסלול ומקור זיהום הנפט באירוע זיהום הזפת בשנת 2021 ואימות המודל באמצעות תחנות מדידה רציפה המופעלות במסגרת הניטור. במהלך האירוע הועברו הרצות מודל יומיות של פיזור הזפת לצורך היערכות פעולות הניקוי. הועברו ממצאים שעל בסיסם החליט משרד הבריאות "לפתוח" את הים לרחצה ולצריכת דגים.
* **בריאות הציבור** – התראה על חריגות תכולת כספית בדגים ממינים מסוימים (ובכלל זה דיווח מיוחד בשנים 2022-2024)[6].
* **מיקום מתקן התפלה** גליל מערבי (מבין 2 חלופות) – החלטה של רשות המים ומשרדי הממשלה על בסיס ממצאי הניטור על איכות מים, הערכת משטר הזרמים וזמני תחלופת מים באתרים השונים.
* מידע חיוני להחלטות ממשלה בנוגע **לשינויי אקלים** – מגמות בזמן של טמפרטורת מסות המים (ים פתוח ומים חופיים); מליחות; אנומליות; חומציות; מפלס ים; מערכת הקרבונט; חמצן; מגוון ביולוגי.
* המלצה **לתקנים אקולוגיים של איכות מים** (נוטריינטים, כלורופיל, חומר מרחף) באזורים ימיים שונים – אימוץ (זמני) של ההמלצות במסגרת ניטור אכיפתי.
* **בחינת חשד לאירוע זיהום נפט/הידרוקרבוניים** – שילוב גליידרים (gliders) בתוכנית הניטור הלאומית ככלים אופרטיביים אוטונומיים. שימוש בגליידרים בעת אירוע זיהום הזפת, בחשד לכתם נפט ובדליפה מאסדת לווייתן (בשנת 2021).
* דיווח שנתי על זיהומי ביוב (נוטריינטים) בשפכי נחלים ואזורים חופיים שאינם חופי רחצה מוכרזים – השלכות לגבי מערך הבדיקות הבקטריאליות של משרד הבריאות לאורך החופים, ובחינת מקורות הזיהום.
* הנחיית **מדיניות הניטור האכיפתי של קידוח לווייתן 2** (משרדי האנרגיה והגנת הסביבה) – שימוש בנתוני הניטור להערכת האנומליות של טמפרטורה ומליחות בניטור קידוח לווייתן 2.
* בחינת **מיקום צינור היניקה של מתקן התפלה חדרה** – נתוני הניטור (תחנות המדידה הרציפה) שימשו בסיס להרצת מודל פיזור תמלחות ומשטר הגלים.
* בחינה הנדסית של הצבת תשתיות ימיות והרצת מודלים של תפוצת קונדנסט מאסדות וצנרת לווייתן וכריש

(ממצאים הוגשו למשרדי הממשלה ואיגוד ערים כרמל) – שימוש בארכיב נתוני הגלים והזרמים מתחנות המדידה הרציפה של הניטור הלאומי.

* **שינוי במדיניות הנחיות תנאי החפירה בבניית נמל המפרץ** – גילוי חריגות עכירות במהלך בניית נמל המפרץ, והמלצות נגזרות.
* **הערכת התפוצה של חיידקים ממקור צואתי מהזרמות בעזה** – שימוש בנתוני הזרמים מתחנת הניטור הרציף באשקלון ושימוש במודל.
* גיאוהזרדס (גורמי סיכון גיאולוגיים) – גילוי ומיפוי מצב החשיפה החריגה של צינור הגז הימי / תשתיות ימיות. הערכה של אזורי ארוזיה במדף הרדוד.
* בעבר, שינוי התקנות בנוגע לשימוש בצבעי אנטיפאולינג (נוגדי צמדה) – גילוי תרכובת האורגנית של בדיל (Tributyltin-TBT) בנמלים ובמעגנות שהביא לשינוי התקנות, ובשנים האחרונות המשך מעקב אחר מצב הזיהום והחריגות.
* איתור פריחות חריגות של מיקרואצות בעלות פוטנציאל רעילות – בסיס להמשך פעילות של זיהוי רעלנים מומסים לאורך החוף ושפכי נחלים.
* היבטים תכנוניים – מעקב אחר שינויי מפלס הים ודיווח לרשויות.
* מידע חיוני להחלטות ממשלה בנוגע למגוון הביולוגי – גילוי מינים חדשים; מינים פולשים ושינויים במגוון הביולוגי.

הניטור הלאומי במפרץ אילת

תוכנית הניטור הלאומי במפרץ אילת החלה לפעול במימונו של המשרד להגנת הסביבה בשנת 2003, לאחר כשנה של איסוף נתונים וחוות דעת מקצועיות אשר גיבשו את תוכנה של התוכנית והפעולות החיוניות הנכללות בה. התוכנית מופעלת על-ידי מדעני המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת (מב"א) ובהישען על תשתית נרחבת שהייתה זמינה במב"א. תשתית זו נובעת משנות מחקר ופעילות רבות שבהן היווה מב"א מרכז ייחודי לחקר נושאים ימיים אשר התמקד במפרץ אילת – בשוניות האלמוגים מחד ובחקר הים הפתוח מאידך – מאז הקמתו בשלהי שנות השישים של המאה העשרים.

מתכונתה של תוכנית הניטור הלאומי נגזרה במידה רבה מתוכניות ניטור ומחקר קודמות אשר פעלו (במימון קרנות מחקר) במסגרת מב"א על-ידי חוקרי וטכנאי המכון. התוכנית הנוכחית היא תולדה ישירה של התוכניות המפורטות שבוצעו על-ידי חוקרים מממוסדות אקדמיים מרחבי הארץ אשר פעלו כל אחת למשך שנים ספורות בלבד:

DCPE, 1976-7 – תוכנית ראשונית שבה נחקרו מגוון משתנים אקולוגים לכל אורך מפרץ אילת.

REEFLUX, 1988-91 – תוכנית אשר התמקדה בקשר שבין שוניות האלמוגים והים הפתוח.

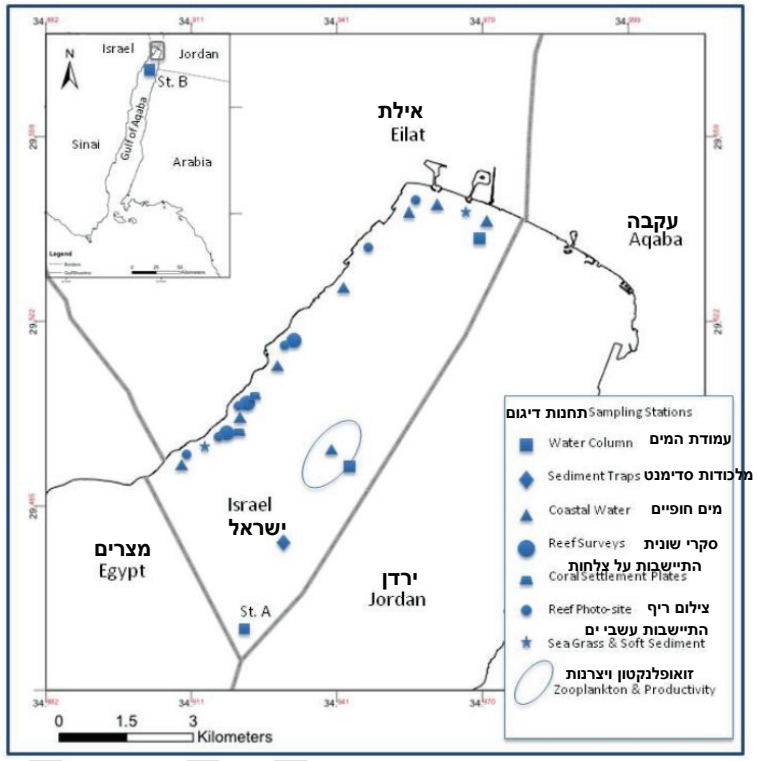
RSP (תוכנית הים האדום), 1995-1998, בשיתוף פעולה ישראל-מצרים-גרמניה (במימון גרמניה) – תוכנית שבה התבצעו פעולות ניטור רבות ונצבר ידע רב על משתנים אקולוגים לאורך המפרץ, בזכות שיתוף הפעולה עם מצרים.

RSMPP (פארק השלום בים האדום), 1999-2002, שיתוף פעולה ישראל-ירדן (במימון ארה"ב) – התוכנית אשר הינה

"תוכנית-האב" הישירה של תוכנית הניטור הלאומי, במסגרתה מוסדו שיטות ניטור רבות, ומוסד שיתוף הפעולה עם ירדן בנושא שמירת הסביבה הימית במפרץ.
במהלך שנות העבודה במסגרת תוכניות אלה נאסף ידע רב לגבי המשתנים המרכזיים במערכת האקולוגית של המפרץ והתדירות שבה יש לנטרם, גובשו שיטות העבודה, נרכש ציוד מתקדם והוכשר צוות טכני מקצועי האמון על ביצוע העבודה. כאשר החלה לפעול מתוך המכון הבינאוניברסיטאי אילת קיבלה תוכנית הניטור הלאומית משאבים אלה מן המוכן, קרי: תשתית ידע המתבטאת בהליכי ניטור מגובשות, צוות טכני מיומן, מסד נתונים קיים, והבנה מעמיקה של המערכת האקולוגית של מפרץ אילת.
תוכנית הניטור כוללת מדידות של פרמטרים פיזיקליים וכימיים בעמודת המים ובקרקעית, לדוגמה, ריכוזי נוטריינטים, טמפרטורה ומליחות המים, ופרמטרים ביולוגיים דוגמת אחוז הכיסוי ושינויים בהרכב חברת החי בשונית האלמוגים, ובמערכות האקולוגיות התומכות בה, דוגמת מרבדי עשבי-הים בחוף הצפוני.
מאז 2003 שימשו נתוני הניטור הלאומי לצורך קבלת החלטות בשלל נושאים רגולטוריים, אזרחיים ותכנוניים, לרבות:

* קביעת ערכי סף להזרמות לים
* איתור מקורות זיהום בעייתיים וטיפול בהם
* התמודדות עם אירועים קיצוניים ואיתור הסיבות להתרחשותם, דוגמת אירוע תמותת דגי השונית שאירעה בקיץ 2017
* תכנון מיטבי של תשתיות דוגמת מוביל השלום, מתקן ההתפלה של חברת מקורות, הרחבת רציפי הנמל ומסמך המדיניות למרחב הימי של מינהל התכנון למפרץ אילת
* אספקת נתוני רקע למאות מחקרים מדעיים שפורסמו בעיתונות המדעית העולמית והוצגו בשלל כנסים בינלאומיים. מחקרים אלה מהווים בסיס להבנת אופן תפקודה של המערכת הטבעית במפרץ.

הניטור הלאומי באילת מנוהל על-ידי ועד מנהל הכולל את החברים הבאים:
יו"ר – המדען הראשי במשרד להגנת הסביבה;
נציגי המשרד להגנת הסביבה: סמנכ"ל פיקוח ואכיפה, מנהל היחידה הארצית להגנת הסביבה ימית והמרכז המדעי לניטור ומחקר בים;
נציגי רשות הטבע והגנים: המדען הראשי, מנהל מרחב אילת והאקולוג הימי של מרחב אילת;
מדענים מומחים בנושאי הניטור: ביולוגיה (אלמוגים, דגים, חסרי חוליות) מיקרוביולוגיה, כימיה ימית ואוקיינוגרפיה.
הניטור הלאומי באילת כולל את הפעולות הבאות:
סקרי שונית האלמוגים – סקר חברת השונית, ניטור שולחן השונית, ניטור חברת האלמוגים בלגונה, התיישבות אלמוגים בשונית, ניטור חסרי חוליות ניידים בשונית, ניטור מקרואצות בשונית וניטור דגי שונית.
סקרי תחנות חופיות – אפיון מימי החופים (כימיה, פיזיקה ופעילות ביולוגית), חי במצע הרך, כיסוי עשב-ים ולרוות של דגים (איור 4).
סקרי הים העמוק (כולל נקודה משותפת עם מכון הניטור של ירדן) – אפיון תהליכים בעמודת המים (כימיה, פיזיקה



איור 4. מפת תחנות הדיגום בניטור הלאומי של מפרץ אילת.

ופעילות ביולוגית), יצרנות ראשונית, ניטור זואופלנקטון, ניטור חומר חלקיקי בעמודת המים.
מדידות רציפות במזח המכון – טמפרטורה, כלורופיל, תחנה מטאורולוגית, גלם וזרמים ואבק מרחף.
דוחות הניטור הלאומי מפורסמים באתר המשרד להגנת הסביבה[7]. נתוני הניטור מפורסמים באתר המכון הבינאוניברסיטאי באילת ונגישים לציבור[8] ומופיעים בפרק של יונתן שקד בספר.

ניטור באגן הים התיכון

הניטור הלאומי בים התיכון הינו חלק ממערך ניטור בינלאומי אזורי המרוכז על-ידי ארגון הסביבה של האו"ם, (UNEP United Nations Environmental Program). בשנת 2008 התקבלה החלטה של כלל המדינות החתומות על אמנת ברצלונה לשמירה על הים התיכון לקדם את תהליך ה-Ecosystem Approach for the Mediterranean Sea – גישת המערכת האקולוגית לשמירה על הים התיכון (EcAp). החזון שהוסכם למהלך זה היה "ים תיכון בריא עם בתי גידול ימיים וחופיים יצרניים ובעלי מגוון ביולוגי רחב למען טובת הדור הנוכחי והדורות הבאים". במסגרת המהלך הוסכם בין היתר להגדיר מספר מטרות ויעדים סביבתיים. על מנת לבחון את מצב הסביבה הימית ואת העמידה במטרות ויעדים אלה, הוקמה תוכנית ה-Integrated Monitoring and Assessment Program, או בקיצור – IMAP[9]. תוכנית זו למעשה נשענת על תוכניות הניטור הלאומי שהיו קיימות בחלק ממדינות הים התיכון ותומכת בהקמה של תוכניות ניטור לאומיות במדינות שבהן לא היו כאלה. על מנת לאפשר השוואה בין ממצאי תוכניות הניטור השונות, פעלה התוכנית לקביעת סטנדרטיזציה של

טבלה 1. תוכנית ה-IMAP נבנתה סביב יעדים אקולוגיים שנקבעו ל-11 נושאים.

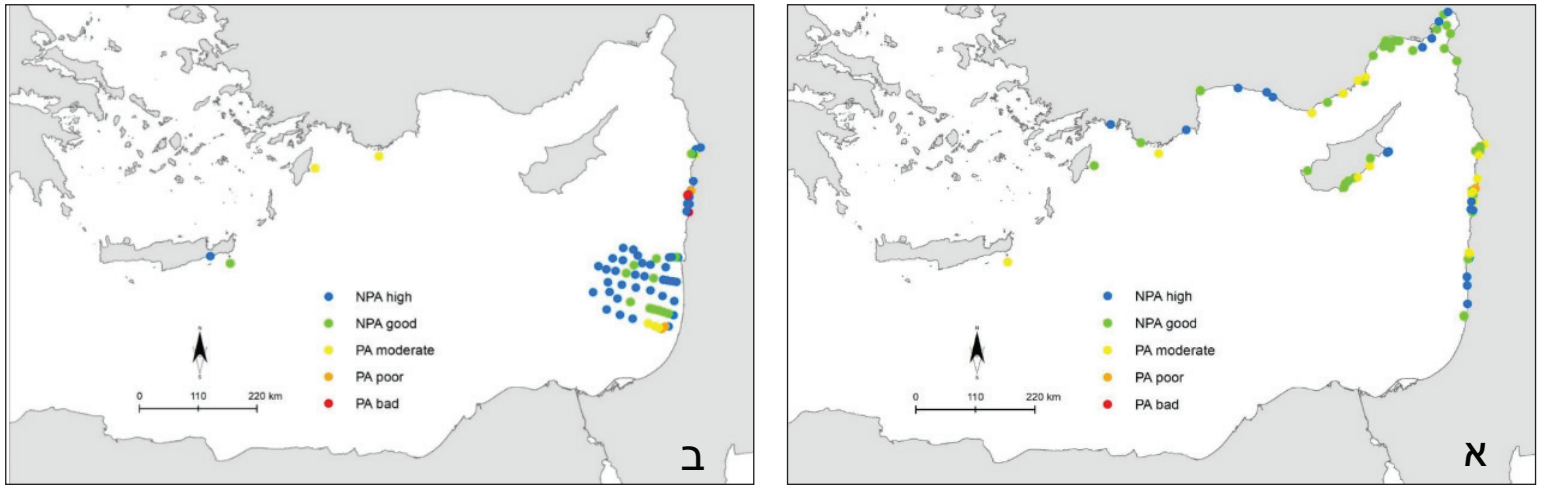
נושא	יעדים אקולוגיים
מגוון ביולוגי	המגוון הביולוגי נשמר. מצב בתי הגידול וקיומם נשמר ותפוצת ושפע המינים השונים נמצאים בקו אחד עם המצב הפיזיוגרפי, הגיאוגרפי והאקלימי האופייניים לאזור ולזמן. *במסגרת התוכנית הוגדרו סוגי בתי הגידול בים התיכון, לרבות בתי גידול בעלי מצע קשה ובעלי מצע רך.
מינים פולשים	מינים זרים שהוכנסו למערכת בשל פעילות אנושית נשמרים ברמה שאינה משנה את תפקוד המערכת האקולוגית.
דגים וחסרי חוליות בעלי ערך מסחרי	אוכלוסיות מיני הדגים וחסרי החוליות המסחריים נמצאות ברמה ביולוגית בטוחה, בעלות תפזורת גילאים וגודל המעידה על מאגר מדגה יציב.קיום מרכיבי מארג המזון מבטיחים שמירה לטווח ארוך על השפע ויכולת ההתרבות של אוכלוסיות הדגים המסחריים.
מארגי המזון הימיים	כל האלמנטים הידועים של מארג המזון הימי נמצאים בנפוצות נורמלית ומגוון המינים השונים נשמר ברמה המאפשרת קיום ארוך טווח של המינים, ואת יכולתם להתרבות.
העתרה בחומרי דשן (אאוטרופיקציה)	העתרה שמקורה בפעילות אנושית מצומצמת לרמה המינימלית שאינה גורמת לאובדן מגוון המינים, להריסה של בתי גידול, לפריחת אצות מזיקה או לשינויים בריכוז החמצן בקרקעית.
שלמות קרקעית הים	שלמות קרקעית הים נמצאת ברמה שמבטיחה שהמבנה והתפקוד של המערכת האקולוגית, בדגש על הבנתוס, נשמרים ואין השפעה ניכרת על בתי הגידול.
תנאים הידרוגרפיים	שינויים תמידיים בתנאים ההידרוגרפיים אינם משפיעים לרעה על המערכת האקולוגית.
זיהום ים	ריכוזי מזהמים נמצאים מתחת לסף המשפיע על המערכת האקולוגית ואינם במגמת עלייה.
מזהמים בדגי מאכל ובחסרי חוליות מסחריים	ריכוז המזהמים במאכלי הים מתחת לרמה הבטוחה.
פסולת ימית	תכונות וכמות הפסולת הימית אינן מהוות מטרד ומפגע למערכת האקולוגית החופית והימית.
זיהום רעש תת-ימי וסוגי אנרגיה נוספים	החדרת אנרגיה למים ממקור אנושי, לרבות רעש, נשמרת ברמות שאינן מזיקות למערכת האקולוגית הימית.

שיטות הניטור. טבלה 1 מציגה את עיקרי תוכנית ה-IMAP.

לכל אחד מהיעדים הוגדרו אינדיקטורים מדידים לצורך קביעה האם היעד הושג, כשלכל אינדיקטור הוגדרו שיטות ניטור ואנליזות על מנת לייצר מידע בר השוואה.

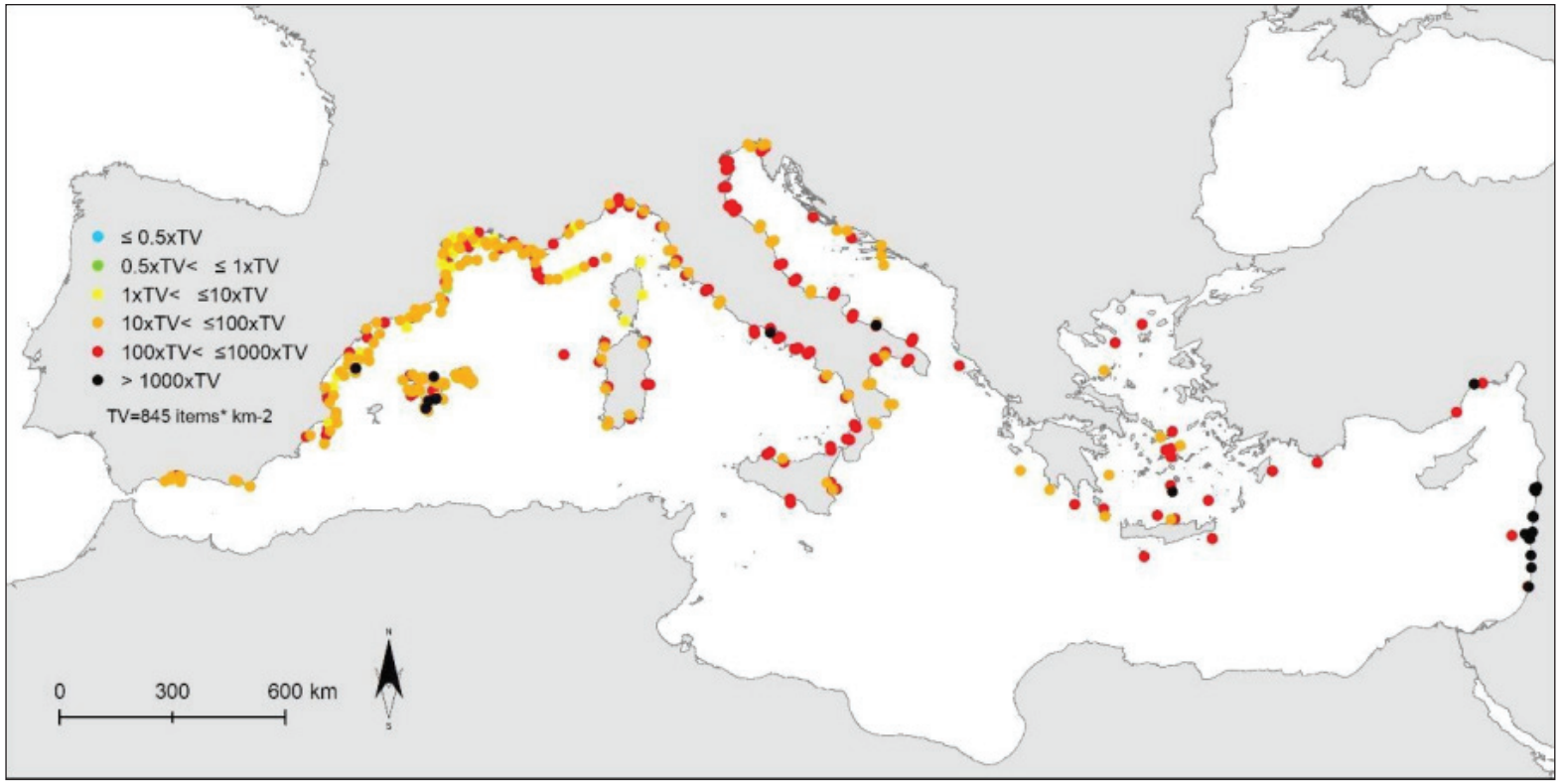
את המידע מתוכניות הניטור מגישות המדינות למאגר המידע IMAP InfoSystem אשר הוקם במסגרת התוכנית. המאגר עדיין בשלבי פיתוח וקביעת מדיניות פרסום לנתונים. מדינת ישראל מגישה למאגר זה את נתוני הניטור הלאומי בים התיכון ונתוני סקרי ה"ביובליץ" המבוצעים על-ידי רשות הטבע והגנים. המידע שהוגש למאגר שימש לכתיבת דוח מצב הים התיכון Mediterranean Quality Status Report (Med QSR)[10]. דוח זה מציג תמונה כללית של מצב הים התיכון. לדוגמה, איור 5א ו-ב מציגים ניתוח של מצב הזיהום במתכות (total metals) ומזהמים אורגניים ארומטיים נדיפים למחצה – PAHs (בהתאמה) בקרקעית הים במזרח הים התיכון. הניטור הלאומי בישראל

הוא מרכיב חשוב מאוד בתוכנית זו, שכן הוא מספק את מרב המידע (ולעיתים אף המקור היחיד) של נתוני ניטור ממזרח ודרום הים התיכון. ה-QSR של שנת 2023 פורסם באתר אמנת ברצלונה[10].



איור 5. ניתוח מצב זיהום קרקעית הים לפי מידע שהצטבר במערכת ה-IMAP infosystem במזרח הים התיכון. NPA, non-problem area–PA – problem area (מתוך דוח ה-QSR 2023). א. זיהום הקרקעית במתכות כבדות. ב. זיהום הקרקעית ב-PAHs.

אחד הממצאים המעניינים של דוח ה-2023QSR הוא מצב הזיהום במיקרופלסטיק צף על פני הים.
איור 6 מציג את ממצאי ניתוח ה-(GES) Good Environmental Status שהתקבל מנתוני חמש שנות ניטור של חלקיקי פלסטיק צפים בים. מזרח הים התיכון מסתמן כאתר שבו מתרכזות כמויות אדירות של מיקרופלסטיק צף המגיע עם הזרמים מכיוון דרום-מערב, כשריכוזיו עולים על מעל פי 1000 מערך הסף (threshold value – TV) שנקבע לים התיכון. איסוף עתידי של מידע ממדינות צפון אפריקה, ובעיקר מאזור שפך נהר הנילוס, יוכל לשפוך אור על המקורות העיקריים לזיהום זה ואולי אף לסייע לצמצם תופעה מטרידה זו.



איור 6. ניתוח GES (Good Environmental Status) שהתקבל מנתוני חמש שנות ניטור של חלקיקי פלסטיק צפים בים (2016-2021). בניגוד לחומרים כימיים, לפלסטיק אין ריכוזים טבעיים בים, לכן נקבע ערך סף אזורי (threshold value – TV) שאליו משווים את ממצאי הניטור.

סיכום

בעשור האחרון גדלה התלות של מדינת ישראל בסביבה הימית כמשאב טבע לצורכי אנרגיה, מים, מסחר ועוד. מרבית מי השתייה מופקים מהתפלת מי ים, ייצור האנרגיה מבוסס בעיקרו על גז המופק בסביבה הימית, ונמלי הים מהווים את הקשר המסחרי העיקרי עם שאר מדינות העולם. קו הים מהווה גם את הגבול המדיני הגדול ביותר של מדינת ישראל ושטחה הימי של ישראל גדול משמעותית משטחה היבשתי. מעבר לכך, הים מהווה מקור לפנאי ולנופש, לספורט ימי ולתיירות.

מערך הניטור הימי של ישראל כולל: ניטור מקומי, ניטור לאומי וניטור אזורי-בינלאומי. הניטור נעשה על-ידי מדענים ומלווה על-ידי ועדות של מדענים מומחים מכלל תחומי מדעי הים. שיוכו למערך הניטור הבינלאומי מאפשר שיתוף פעולה עם כלל מדינות הים התיכון, גם בתקופות של מתיחות פוליטית ומדינית, מתוך הבנה כי מדובר בגוף מים משותף אשר לכולן יש אינטרס לשמור עליו.

הניטור, על כלל מרכיביו, מהווה בסיס מידע מדעי לתכנון ולניהול הפעילות האנושית בישראל ובעולם. הניטור מאפשר מעקב אחר המדיניות הסביבתית, הבנה טובה יותר של המערכת הימית ותכנון וקביעת מדיניות של הפעילות האנושית במרחב הימי באופן שלא יפגע בסביבה הימית, בחי והצומח החיים בה, בציבור הנהנה ממנה ולמען הדורות הבאים.

רשימת מקורות

1. דוחות הניטור המקומי במאגר חופש המידע באתר המשרד להגנת הסביבה. https://www.gov.il/he/pages/marine_environment_monitoring?chapterIndex=4
2. Tiggelaar, J., Galili, O., Kelly, C., Mills, E. Leviathan production platform environmental monitoring program 2021 Survey report. (2022).
3. החלטת ממשלה מספר 4399 מיום 23.12.2018 – אישור תוכנית לאומית מורחבת לניטור הים התיכון https://www.gov.il/he/pages/dec4399_2018
4. Herut, B. The national monitoring program of Israel's Mediterranean waters–scientific perspectives, Ninth International Symposium "Monitoring of mediterranean coastal areas: problems and measurement techniques. Bonora, L. Carboni, D. De Vincenzi, M. & Matteucci, G. (Ed.) Firenze – Firenze University Press, 677-684. (2022).
5. דוחות הניטור הלאומי בים התיכון https://www.gov.il/he/pages/marine_environment_monitoring?chapterIndex=2
6. Sisma-Ventura, G. et al. Long-term (1979-2024) trends and remobilization process of mercury pollution, the case study of Haifa Bay, southeast Mediterranean Sea. J. Hazard. Mater. 137760 (2025).
7. דוחות הניטור הלאומי במפרץ אילת https://www.gov.il/he/pages/marine_environment_monitoring?chapterIndex=3
8. אתר הנתונים של הניטור הלאומי באילת https://www.meteo-tech.co.il/eilat-yam/eilat_he.asp
9. Decision IG.22/7 Integrated monitoring and assessment programme of the Mediterranean sea and coast and related assessment criteria.
10. Mediterranean Quality Status Report - https://medqsr2023.info-rac.org.(2023) /

3 התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת

יונתן שקד

האוניברסיטה העברית, המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת

Yonathan.s@mail.huji.ac.il

תקציר

התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת אוספת נתונים מרובים ומגוונים מזה שני עשורים במטרה לאפיין את מצבה של המערכת הטבעית בצפון מפרץ אילת, וליצור מסד נתונים אובייקטיבי וזמין. משך הזמן הארוך ואופיים הסדור של הנתונים הנאספים מאפשרים הפרדה של תנודות זמניות ומגמות מתמשכות, כמו גם זיהוי של אירועים חריגים. בפרק זה מוצגות שלוש דוגמאות מתחומים שונים שבהם עוסקת התוכנית, הממחישים את אופן הפעולה והיתרונות של ניטור מתמשך במפרץ.

הדוגמה הראשונה עוסקת בניטור שונית אלמוגים והדרכים שבהן מנסה התוכנית לאמוד את בריאותה. בפרט מתוארים השינויים באחוז כיסוי האלמוגים, התפלגות גודלי המושבות ושינויי המגוון בשני העשורים האחרונים. נמצאו תנודות רבות במהלך השנים ובכל זאת, ניתן לומר כי שוניות אילת בריאות יותר מאשר היו בתקופה שבה החל הניטור. עם זאת, בשנים האחרונות נמצאה האטה במגמת השיפור ואף הידרדרות מסוימת המשויכת, בחלקה, לפגיעתה של סערה דרומית חזקה.

הדוגמה השנייה עוקבת אחר המחזורים הרב-שנתיים בריכוזי נוטריינטים במים העמוקים. לרוב, המים העליונים במפרץ עניים בחומרי מזון, אך ערבוב עמודת המים מעלה נוטריינטים מהעומק ומזין יצרנות ראשונית ואת כל מארג המזון. בד בבד יורדים ריכוזי הנוטריינטים במים העמוקים. בתקופת הניטור מתועדים ארבעה מחזורים של ערבוב עמוק; בשנים הראשונות לניטור היו ריכוזי החנקה (נוטריינט עיקרי) במי העומק גבוהים, אך לאחר כל ערבוב עמוק הצטברו מחדש לאט יותר – עד לערבוב העמוק האחרון (2022) שבעקבותיו עלה ריכוז החנקה בעומק מהר מאשר במחזורים קודמים. העשרת המים בנוטריינטים היא תהליך אשר עשוי לפגוע במרקם הקיים במפרץ.

הדוגמה השלישית עוקבת אחר עליית טמפרטורת המים והשלכותיה האפשריות על המערכת. התחממות המים העליונים מהווה איום ישיר על שוניות אלמוגים עקב רגישותם של האלמוגים לטמפרטורות גבוהות. בנוסף לכך, ערבוב עונתי של עמודת המים תלוי בהפרשי הטמפרטורות בין פני הים ובין המים העמוקים. על כן, שינויים במשרעת הטמפרטורות בין העומקים עשויים לשנות את תדירות, עומק ומשך הערבוב העונתי, וכך לשנות את אופייה של המערכת. תוכנית הניטור מתעדת עלייה מתמשכת בטמפרטורה, הן של המים העמוקים והן של פני הים, אך פני הים מתחממים בקצב מהיר יותר וכך, חורפים של ערבוב עמוק הפכו נדירים יותר לאורך התקופה שבה פועלת התוכנית.

מבוא

התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת (להלן, "תוכנית הניטור", "התוכנית") הוקמה על-ידי המשרד להגנת הסביבה בכדי ליצור תשתית ידע מדעי שעליו ניתן יהיה לבסס החלטות בהקשר לשימור ופיתוח הסביבה הימית באילת. התוכנית פועלת במתכונת סדורה כבר כעשרים שנים, באמצעות המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת, על-ידי צוות מקצועי ומיומן שמעסיקה האוניברסיטה העברית במימון והנחיית המשרד להגנת הסביבה.

באופן זה, תוכנית הניטור נשענת על ידע נרחב אשר נצבר במכון הבינאוניברסיטאי במשך עשורים רבים קודם להקמתה, ונהנית משיתוף פעולה קרוב עם קהילת מדעני הסביבה הימית הפועלת במפרץ. התוכנית מנוהלת על-ידי ועד מנהל בראשות המדענית הראשית של המשרד להגנת הסביבה וכולל מדעני ים ונציגים מהמשרד ומרשות הטבע והגנים.

בעשורים האחרונים עולה ההכרה בחשיבותן ויתרונותיהן של תוכניות ניטור בשמירה על הסביבה הטבעית, ובמשך הזמן מתגבשים הקווים המנחים אשר הופכים תוכניות ניטור לתוכניות אפקטיביות (למשל, [1]).

בין היתר, מדובר ביצירת סדרות זמן רציפות ורבות שנים שבהן נעשה שימוש במיטב הכלים המדעיים בלי לוותר על יציבות אשר מאפשרת המשכיות ומקלה על ניתוח הנתונים הנאספים; שמירה על קשר עם מטרות הניטור ובמקרה זה, צורכי המשרד להגנת הסביבה; וחילופי ידע עם קהילת מחקר פעילה: מצד אחד, הנתונים שאותם אוספת התוכנית זמינים לקהל בכלל ולקהילת המדענים בפרט ומשמשים במחקרים רבים ומגוונים, ומצד שני, הניטור נעזר בקהילת המדענים לגבי שיטות העבודה, פירוש התוצאות ועוד. באופן זה מתאפשרים בחינה מדוקדקת של הנתונים, שיפור ההבנה והידע לגבי המפרץ, ועדכון השיטות בהתאם לכלים מדעיים חדשים.

ניטור סביבתי יכול לבוא לידי ביטוי בשני אופנים עיקריים: האופן הראשון: חזרה על מדידות באופן שגרתי ובתדירות מספקת צפויה לחשוף שינויים דרמטיים בסמוך לזמן התרחשותם וכך לאפשר התייחסות מהירה. האופן השני: באמצעות מעקב מתמשך אשר דרכו שינויים מגמתיים, גם אם מתרחשים בקצב איטי, עשויים להיחשף ולאפשר היערכות הולמת. מכיוון שבמערכות טבעיות ישנן תנודות רבות על פני סקאלות זמן שונות (למשל, עונתיות או רב-שנתיות), ככל שהמעקב נמשך זמן רב יותר כך ניתן לאפיין את המערכת בביטחון רב יותר ולהפריד בין תנודות מחזוריות ובין שינויים מגמתיים.

הניטור במפרץ אילת עוקב אחר בתי גידול ומשתנים סביבתיים רבים בתדירות שנעה על פני טווח של שנייה ועד שנה – כתלות במשתנה הנמדד. ממצאי הניטור עשויים להיות מתוקשרים בזמן התרחשותם ובכל מקרה, הינם מתועדים בדוחות הניטור השנתיים המוגשים למשרד להגנת הסביבה ומפורסמים לציבור.

במשך הזמן, הצביעו מדידות הניטור על מפגעים מקומיים (למשל, מוקדי כניסה לים של נוטריינטים או הפרעות פיזיות באזורים החופיים), בעיות אקולוגיות בזמן התהוותן (למשל, תמותת דגים פתאומית, פריחת אצות, תמותת קיפודי-ים, פגיעה בעשבי-הים) ושינויים דרמטיים גם מסיבות טבעיות (למשל, סערות חזקות או סדרות של שיטפונות והשפעתן המיידית על המערכת). אך מעבר לכך, המעקב הרציף והמתמשך אחר מרכיבי המערכת האקולוגית במפרץ אילת מאפשר אפיון טוב של טווח הערכים הטבעי לה, עבור מגוון משתנים חשובים (למשל, טמפרטורות וריכוזי נוטריינטים במים העליונים והעמוקים, גלים וזרמים אופייניים, אחוז הכיסוי ומצאי סוגי האלמוגים בשוניות, אפיון קרקעית הים הרדוד באתרים שונים ועוד ועוד).

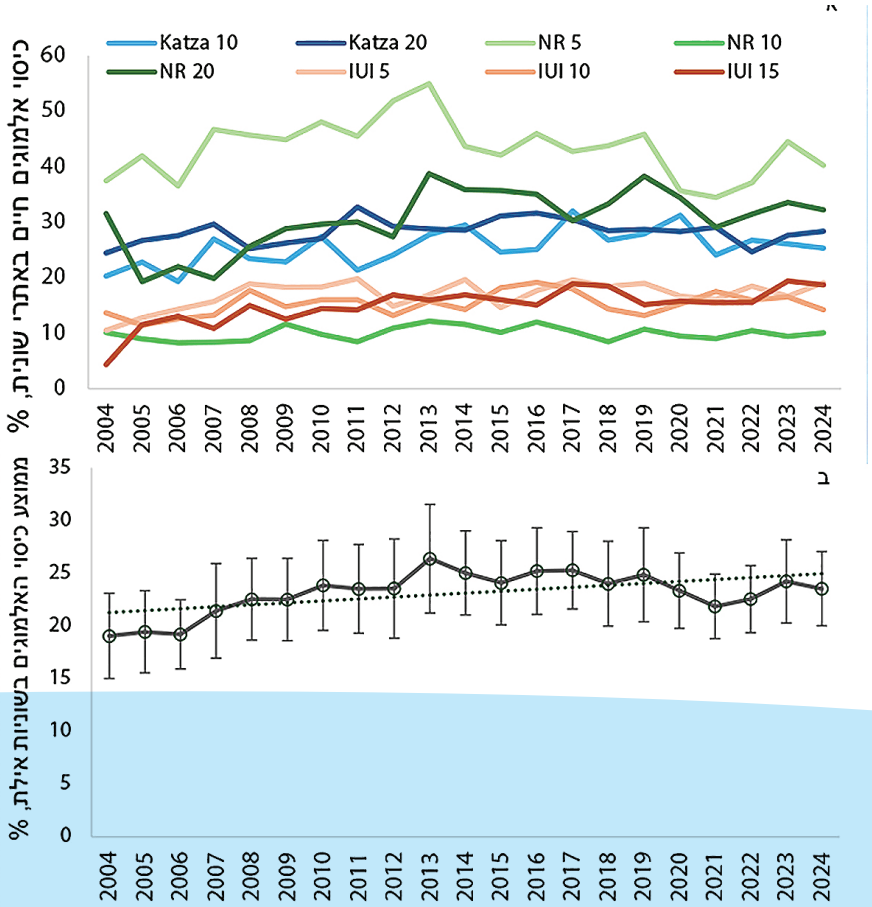
בהמשך הפרק מובאות מספר דוגמאות לממצאי הניטור המתמשך באילת.

התפתחות שוניות האלמוגים באילת בעשרים השנים האחרונות

שוניות האלמוגים באילת הן בית גידול מגוון וייחודי בישראל, הנמצא בשיווי משקל עדין עם סביבתו ומתקיים בזכות מערך תנאי סביבה ספציפיים אשר רק בהם מתקיימות שוניות אלמוגים. מחקרי עבר תיעדו הידרדרות דרמטית בבית גידול זה (למשל, [2]) והתוכנית החלה לנטר את שוניות אילת באופן סדיר בשנת 2004, לקראת סוף תקופת פעילותן של חוות הדגים בצפון המפרץ. התוכנית עוקבת אחר מדדי שונית רבים בשמונה אתרי שונית באילת, במטרה לאפיין את מצב השוניות עד כמה שניתן. רבים מהנתונים נאספים בשיטת "חתכי הקו" לפיה צוללים מומחים פורסים סרט מדידה לאורך השונית ומתעדים את כל מה שנמצא תחת הסרט במקטעים שאורכם עשרה מטרים ([3], איור 1). המקטעים נפרסים בכל אתר באופן שרירותי עד אשר נאספים נתונים מספקים לאפיון סטטיסטי של האתר. לרוב נסקרים 15- 25 חתכי קו בכל אתר, כתלות במידת השונות הפנימית שבו (ראו דוחות הניטור השנתיים המוגשים למשרד להגנת הסביבה [4,5]).

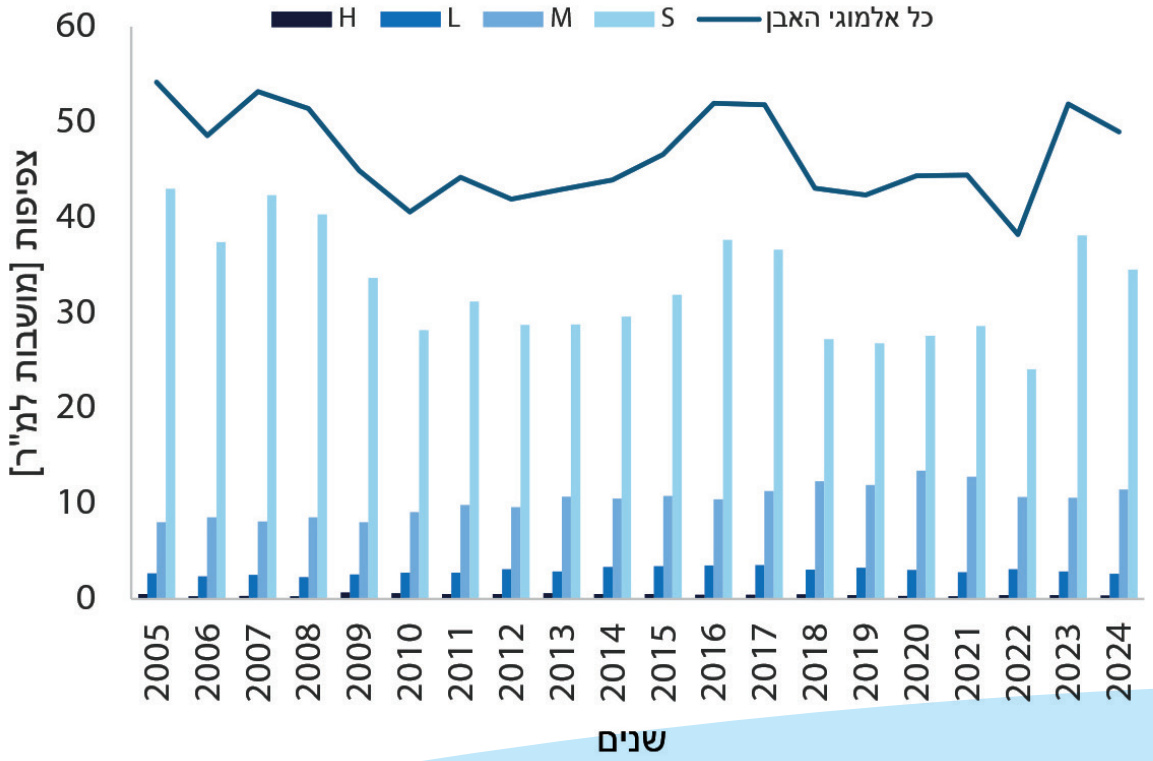
איור 1. איסוף נתונים בסקרי השונית, בשיטת "חתכי קו".

אחד המדדים העיקריים המתקבלים בשיטה זו הוא מדד "אחוז כיסוי האלמוגים בשונית". בכל חתך מחושב האורך המצטבר של אלמוגי אבן חיים תחת סרט המדידה, ומנורמל לאורך החתך הכולל (עשרה מטרים). ממוצע אחוז הכיסוי בכל החתכים באתר הוא אחוז הכיסוי הממוצע הנמדד באותו אתר. ממוצע אחוז הכיסוי של כלל האתרים הוא "אחוז הכיסוי הממוצע של אלמוגי אבן חיים בשוניות אילת" (להלן "אחוז הכיסוי הממוצע באילת"). בחינה של השינויים באחוז הכיסוי הממוצע בשוניות אילת מראה כי בשנים הראשונות לניטור מדד זה עמד על ערך של כ-19%. משנת 2007 החלה עלייה מתמשכת בערך המדד והשיא נמדד בשנת 2013, כ-6%. בשנים הבאות ערך המדד נע סביב 25%, עד שבשנת 2020 החלה ירידה בכיסוי האלמוגים ובשנת 2021 עמד ערך המדד על כ-22% בלבד. מאז נמדדה עלייה קלה ובקיץ 2023 נמדד אחוז כיסוי ממוצע של 23.5% בשוניות אילת (איור 2). אומנם השונות בתוך ובין אתרי השונית הנסקרים רבה, אך כמות החזרות הגדולה יחד עם פרק הזמן הארוך שבו מבוצעים הסקרים באופן עקבי מקנים ביטחון סטטיסטי בתוצאות המתקבלות.



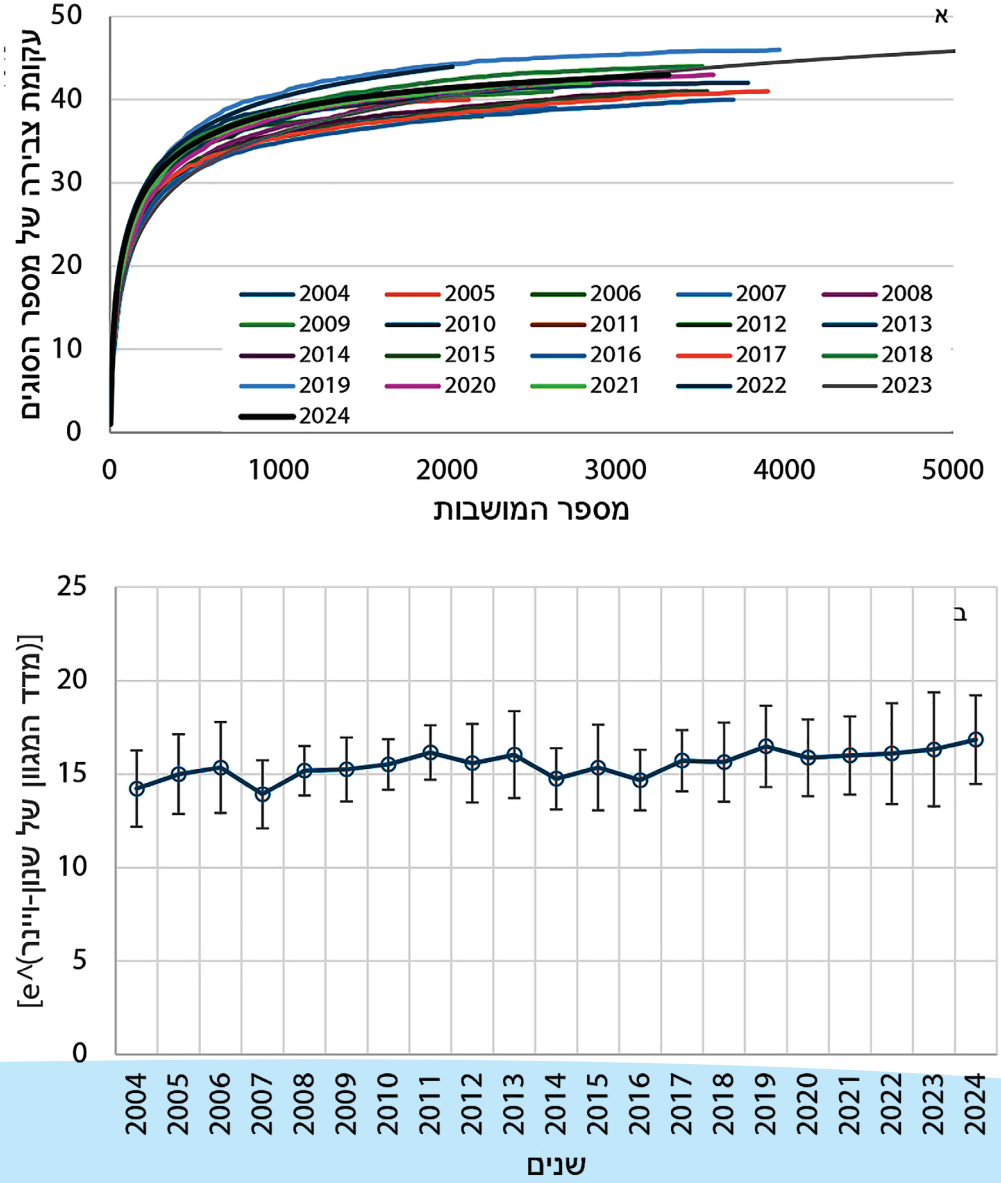
איור 2. א. אחוז כיסוי האלמוגים החיים באתרי השונית הנסקרים באילת. ב. הכיסוי הממוצע בין כל האתרים. קווי השגיאה מייצגים את שגיאת התקן, אתרי השונית הם: Katza= חוף קצא"א, NR= שמורת האלמוגים הסגורה, IUI= המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת; המספרים מציינים את העומק הנדגם במטרים.

אלמוגי האבן הנסקרים מחולקים לארבע קבוצות גודל בכדי לעקוב אחר שינויים באוכלוסייה מבחינת התיישבות, צמיחה ותמותה. בבסיס אנליזה זו עומדת ההנחה שעבור כל סוג אלמוג, אלמוגים קטנים הם אלמוגים צעירים וככל שהם חיים זמן רב יותר כך יהיו גדולים יותר. בשנות הניטור הראשונות נמצאה התפלגות גדלים שבה כ-80% מאוכלוסיית האלמוגים בשוניות אילת היו שייכים לקבוצת הגודל הקטנה, המייצגת גיל אלמוגים נמוך מ- 3-5 שנים (על-פי ניתוח סדרות זמן מצולמות, ראו דוח הניטור השנתי לשנת 2019 [4]). במשך הזמן, חלקה של קבוצת גודל זו ירד, ובמקביל עלה חלקה של קבוצת הגודל הבינונית, המייצגת טווח גילים הנע בין 3 ל-10 שנים. אך גם צפיפות המושבות הקטנות בשוניות אילת ירדה עם הזמן מכ-40 מושבות קטנות למ"ר שונית בשנים הראשונות לניטור, עד לכ-30 מושבות למ"ר בשנת 2013. בשנים 2018-2020 הייתה צפיפות המושבות הקטנות 24-27 מושבות למ"ר בלבד ואילו בשנת 2023, נמדדה עלייה, כ-38 מושבות קטנות למ"ר, בדומה לשנות הניטור הראשונות (איור 3). בשנת 2024 היוו המושבות הקטנות כ-63% מסך מושבות האלמוגים בשוניות אילת.



איור 3. שינויים בצפיפות מושבות האלמוגים בשוניות אילת, על-פי חלוקה לארבע קבוצות גודל, במשך תקופת הניטור. מושבות בקבוצת הגודל "קטנות" (S) בקוטר של עד 5 ס"מ, "בינוניות" (M): 5-15 ס"מ, "גדולות" (L): 15-03 ס"מ, ענקיות (H) בעלות קוטר גדול מ-30 ס"מ.

בכל תקופת הניטור, ועל אף השינויים באחוז הכיסוי והתפלגות הגדלים של מושבות האלמוגים, לא אובחנו שינויים גדולים או מגמתיים במדדי מגוון שונים עבור סוגי האלמוגים באילת (איור 4).



איור 4. א. עקומות צבירה של מספר הסוגים כנגד מספר הפרטים הנסקרים בשוניות אילת במשך תקופת הניטור. העקומות מחושבות באמצעות תוכנת Past [6]. ב. מגוון סוגי האלמוגים בשוניות אילת, מיוצג באמצעות מספר הסוגים האפקטיבי[7].

תמונת השוניות המצטיירת מתוך מדדים אלה מצביעה על כך שבשנים הראשונות לפעילות הניטור היו שוניות אילת במצב עקה אשר בא לידי ביטוי באחוז כיסוי נמוך ואוכלוסיית אלמוגים צעירה. הרכב סוגי המינים היה מגוון, ולא היה מחסור באספקת מתיישבים חדשים בשונית. במשך הזמן עלה אחוז הכיסוי ואוכלוסיית האלמוגים החלה להתבגר. בד בבד נמצאה ירידה באספקת מתיישבים חדשים, אך הרכב סוגי האלמוגים נותר יציב. בשנים האחרונות נמדדו תנודות בכיסוי האלמוגים בין היתר, ניתן לייחס חלק מתנודות אלה לסערה דרומית חזקה אשר פגעה בחופי אילת בחודש מרץ 2020, וגרמה לנזק רב[8]. בסערה זו נמדדו על-ידי תוכנית הניטור רוחות דרומיות במהירות ממוצעת של 82 קמ"ש ומהירות מרבית של 106 קמ"ש, הרוחות החזקות ביותר במאגר המדידות.

בתקופה זו צפיפות מושבות האלמוגים הקטנות הייתה נמוכה יחסית וחלקם מכלל האלמוגים היה הקטן ביותר בתקופת הניטור, רק מעט יותר מ-60%. על אף התנודות הללו לא נמצאו שינויים גדולים בהרכב סוגי האלמוגים ונראה שהגורמים לשינויי הכיסוי, הצמיחה וההתיישבות משפיעים באופן דומה על מרבית סוגי האלמוגים המרכיבים את חברת האלמוגים בשוניות אילת.

מתוך כך ניתן לסכם כי בשנים הראשונות לפעילות הניטור שוניות אילת היו במצב של עקה ומגמת התאוששות וצמיחה נמצאה בין השנים 2007-2013. אחר כך היו מספר שנים של יציבות ובשנים האחרונות נמצאו תנודות ושינויים המעידים על כך שהמערכת נמצאת בשיווי משקל עדין ושוניות אילת במצב של רגישות גבוהה.

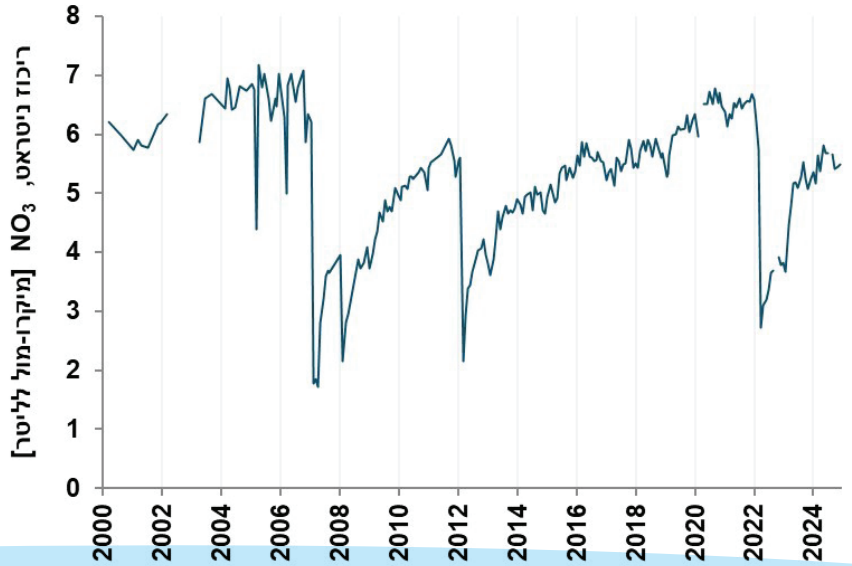
שינויים בריכוזי חנקן מומס

מפרץ אילת נחשב לים אוליגוטרופי עני בנוטריינטים (חומרי מזון מומסים, כגון חנקן, זרחן, וסיליקה), בזכות היותו אגן סגור המוקף יבשה מדברית עם מיעוט צמחייה וכניסת נחלים והתיישבות אנושית דלילה[9]. ים עני בנוטריינטים הוא תנאי חשוב לשגשוגן של שוניות אלמוגים (למשל, [10,11,12]): צמיחת אצות בו מוגבלת והמים לרוב צלולים ומאפשרים חדירת אור לעומק. זו אחת הסיבות שלאורך השנים ריכוז הנוטריינטים במפרץ מהווה מוקד למחקר וניטור (למשל, [13,14]). ככלל, ריכוז הנוטריינטים במים העליונים נמוך מכיוון ששם מתקיימת פעילות פוטוסינתטית שבה נצרכים הנוטריינטים ובמים העמוקים הריכוזים גבוהים יותר מכיוון שלשם שוקע חומר אורגני ומתפרק למרכיביו.

המערכת מאופיינת בדינמיקה עונתית שמתחוללת בה בתקופת הקיץ, כאשר שכבת המים העליונה מופרדת מהמים העמוקים בזכות שיכוב תרמלי יציב (מים חמים בקרבת פני הים מעל מים קרים יותר בעומק), ריכוז הנוטריינטים במים העליונים אפסי והמערכת היצרנית מורעבת. ככל שמתקדמת עונת החורף והמים העליונים מתקררים, מתאפשר ערבוב בינם לבין המים העמוקים יותר וכך מגיעים למים העליונים נוטריינטים מהעומק. ככל שהערבוב עמוק וממושך יותר, כך יגיעו נוטריינטים רבים יותר למים העליונים. ככל שחולף זמן רב יותר מאז ערבוב שכבות המים העמוקות, כך נצברים בהן נוטריינטים רבים יותר. עליית נוטריינטים מהעומק למים העליונים תומכת בפעילות יצרנית ופריחות של אצות[15,16]. אצות מתחרות באלמוגים על משאבים ועלולות לפגוע במערכת השונית בשני אופנים: פיטופלנקטון – מיקרואצות חד-תאיות זעירות וציאנובקטריה – בעמודת המים גורמות לעכירות ומורידות את כמות האור החודרת לעומק, ומקרואצות ישיבות תופסות שטחי שונית פנויים ובמצבי קיצון אף מכסות אלמוגים. דינמיקה זו היא הסיבה שלאורך השנים עלה חשש מהעשרת צפון המפרץ בנוטריינטים ומעבר ממצב אוליגותרופי (לפחות בקיץ), שבו יש יתרון

לשוניות האלמוגים, למצב מזותרופי או אפילו אאותרופי (עשיר בנוטריינטים), שבו שוניות אלמוגים יאבדו את יתרונן היחסי בתחרות על משאבים, למשל[17].

עקב החשיבות הגדולה המיוחסת לריכוזי נוטריינטים במי המפרץ עוקבת תוכנית הניטור אחר ריכוזי נוטריינטים עיקריים בעמודת המים בצפון המפרץ. להלן תיאור של הדינמיקה הרב-שנתית של ריכוזי ניטראט (חנקה, NO_3) בעמודת המים העמוקה בקצה הדרומי של המים הטריטוריאליים של ישראל: בשנים הראשונות לניטור ריכוזי החנקן המומס (ובפרט הניטראט, נוטריינט עיקרי) במים העמוקים בצפון המפרץ, בעומק של 700 מטרים, עמד ריכוז הניטראט על 6-7 מיקרו-מול לליטר. בשנת 2007 עורבבה עמודת המים עד לעומק גדול מזה (עומק הקרקעית בתחנת המדידה בקצה המים של ישראל במפרץ) וכתוצאה מכך התרחשה פריחת אצות חזקה וממושכת וריכוז הניטראט במים העמוקים ירד מאוד. עם תום הערבוב החל החנקן להצטבר מחדש במי העומק, אך בחורף הבא, 2008, שוב אירע ערבוב עמוק. במשך תקופת הניטור תועדו עוד שני אירועים של ערבוב לעומק גדול מ-700 מטרים, בשנת 2012 ובשנת 2022. בארבע השנים שלאחר הערבוב של 2008 הגיע ריכוז הניטראט המומס בעומק 700 מטרים לכ-5.9 מיקרו-מול לליטר. ארבע שנים לאחר הערבוב של שנת 2012, ריכוז הניטראט בעומק זה היה 5.2 מיקרו-מול לליטר. כך נראה שבתקופה זו קצב צבירת החנקן במים העמוקים בצפון המפרץ ירד. נדרשו עוד כשלוש שנים עד שריכוז הניטראט השתווה לזה שלפני ערבוב 2012, וחלפו שמונה שנים מאז הערבוב ב-2012 עד שריכוזו במים העמוקים הגיע לזה של טרום-ערבוב 2007 (איור 5).



איור 5. ריכוזי ניטראט (NO_3-) בעומק 700 מטרים, כעשרה ק"מ דרומית לאילת, מאז שנת 2000.

הערבוב העמוק של שנת 2022 גרם לפריחת אצות ממושכת אך כבר בסוף אותה שנה היה ריכוז הניטראט בעומק 700 מטר 3.8 מיקרו-מול לליטר. כעבור שנה נוספת, בסוף 2023, שנתיים בלבד לאחר הערבוב העמוק, כבר נמדד שם ריכוז ניטראט של 5.5 מיקרו-מול לליטר. נראה שבשנים האחרונות עולה מחדש קצב הצטברות החנקן המומס (ונוטריינטים אחרים אשר מודדת תוכנית הניטור) במים העמוקים, בהשוואה לעשור הקודם.

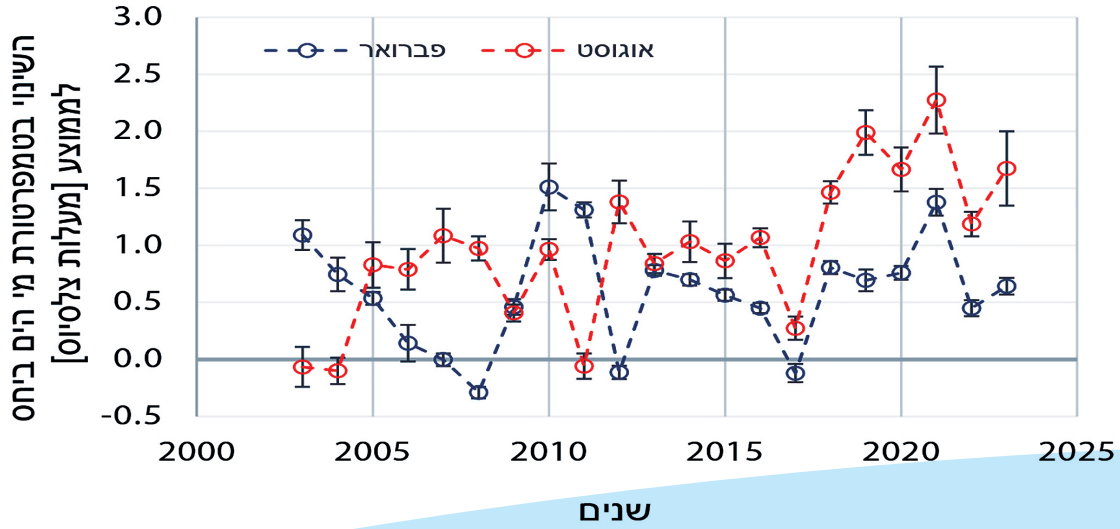
הניטור רב-השנים של כמויות וריכוזי נוטריינטים בצפון המפרץ הובילו לזיהוי של ועדת מומחים על-ידי המשרד להגנת הסביבה אשר דנה בהשפעות אפשריות של הגדלת כמויות הנוטריינטים המוזרמות למפרץ ממקורות חיצוניים. הדיון נעשה במאמץ לקבוע את כושר הנשיאה של המערכת לנוטריינטים, ובפרט חנקן מומס, וכך את כמות ההזרמות המרבית שיכול המשרד להתיר. נתוני הניטור שימשו את הוועדה בקביעת הערך המרבי של סך ההזרמות השנתיות. ערך זה משמש את הוועדה להיתרי הזרמה לים במתן היתרי הזרמה, וכך מסייע להגבלת הזרמות ומציאת אלטרנטיבות לפעולות פיתוח שצפויות להשפיע לרעה על תפקודה של המערכת הימית.

טמפרטורת פני הים וטמפרטורת המים העמוקים

טמפרטורת המים העליונים במפרץ אילת נעה בטווח עונתי קטן בהשוואה לחופי הים התיכון של ישראל אך גם כאן, משרעת מחזור הטמפרטורות העונתי בפני הים גדולה בהרבה מהשינויים הנמדדים בין שנה לשנה. משך הזמן שבו פועלת תוכנית הניטור ארוך דיו על מנת לאפשר זיהוי של מגמת חימום רב-שנתית בעשורים האחרונים, הן בפני הים והן במים העמוקים[18].

בפני הים, עקב משרעת הטמפרטורה העונתית הגדולה, ראוי לבחון את טמפרטורות החורף (פברואר) וטמפרטורות הקיץ (אוגוסט) בנפרד.

ממדידות יומיות שנעשו כל בוקר בסמוך לשונית האלמוגים על-ידי מעבדתו של פרופ' אמציה גנין עולה שבמשך עשור השנים 1988-1998, טמפרטורת פני הים הממוצעת בחודש פברואר עמדה על 21.04 מעלות צלסיוס, ואילו זו של חודש אוגוסט עמדה על 26.26 מעלות.



איור 6. טמפרטורות פני הים הממוצעות לחודשים פברואר ואוגוסט מאז תחילת הניטור, בהשוואה לטמפרטורה הממוצעת לחודשים אלה בעשור השנים 1988-1998. נתוני טמפרטורה לשנים 1988-1998 נאספו במעבדתו של פרופ' א. גנין. קווי השגיאה הם רווח בר סמך (95%).

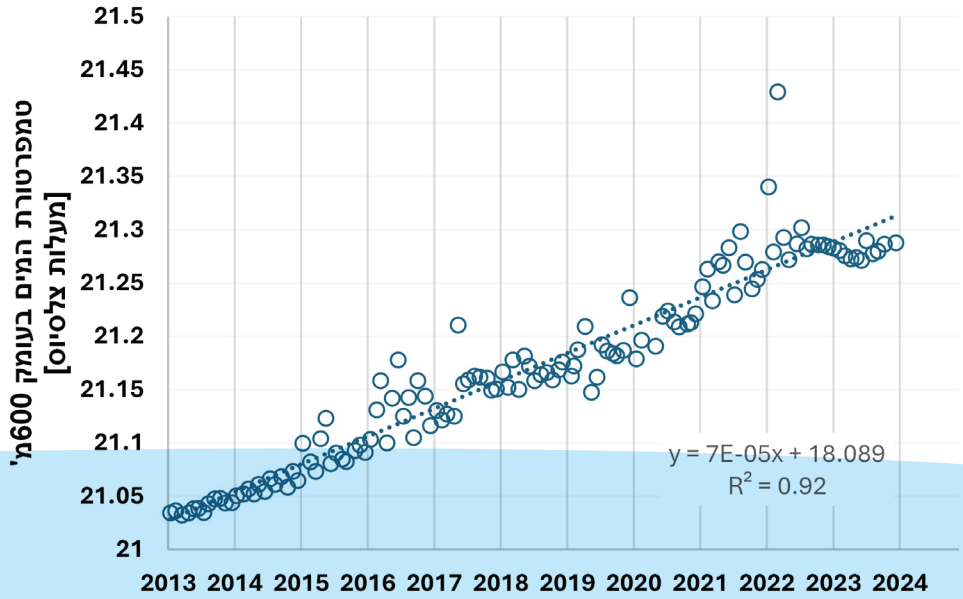
מאז הקמתה, המשיכה תוכנית הניטור את המדידות היומיות שהחלו במעבדתו של פרופ' גנין בשנת 1988. כך ניתן להשוות מדידות שנעשו באופן דומה על פני יותר משלושה עשורים. מדידות אלה מראות שבסמוך לשונית, טמפרטורת פני הים הממוצעת בחודש פברואר 2003 הייתה 22.13 מעלות ובאוגוסט אותה שנה 26.2. בשנת 2023 טמפרטורת פני הים הממוצעת בחודש פברואר הייתה 21.68 מעלות ובאוגוסט 27.94.

בסך הכול, ניתן לעקוב אחר מגמה ברורה של עליית טמפרטורת פני הים הן בחורף (פברואר) והן בקיץ (אוגוסט). בעשור האחרון, מלבד בשנת 2017, טמפרטורת פני הים באוגוסט גבוהה ב-2-1 מעלות בהשוואה לממוצע חודש זה בשנים 1988-1998. בחודש פברואר טמפרטורת פני הים בעשור האחרון, מלבד בשנת 2017, גבוהות ביותר מחצי מעלה בהשוואה לשנים 1988-1998 (איור 6).

על-פי המדידות היומיות בסמוך לשונית, הקצב הממוצע של עליית טמפרטורת פני הים בחודש פברואר הוא כעשירית המעלה בכל עשור מאז תחילת הניטור (2003) וכפול מזה בעשור האחרון (מאז 2013). הקצב הממוצע של התחממות פני הים בחודש אוגוסט הינו 0.73 מעלות בעשור מאז תחילת הניטור ו-1.1 מעלות בעשור האחרון. במילים אחרות, קצב עליית הטמפרטורה גדל.

במים העמוקים התנודות העונתיות קטנות הרבה יותר וטמפרטורת המים כמעט קבועה. על כן, וגם מכיוון שתדירות המדידות קטנה הרבה יותר, עבור המים העמוקים נכון לדבר על ממוצעים שנתיים.

מדידות טמפרטורת המים בעומק 600 מטרים בעשור 1988-1998 מעטות, אך מהן עולה כי הטמפרטורה הממוצעת בעומק זה הייתה 20.73 מעלות.



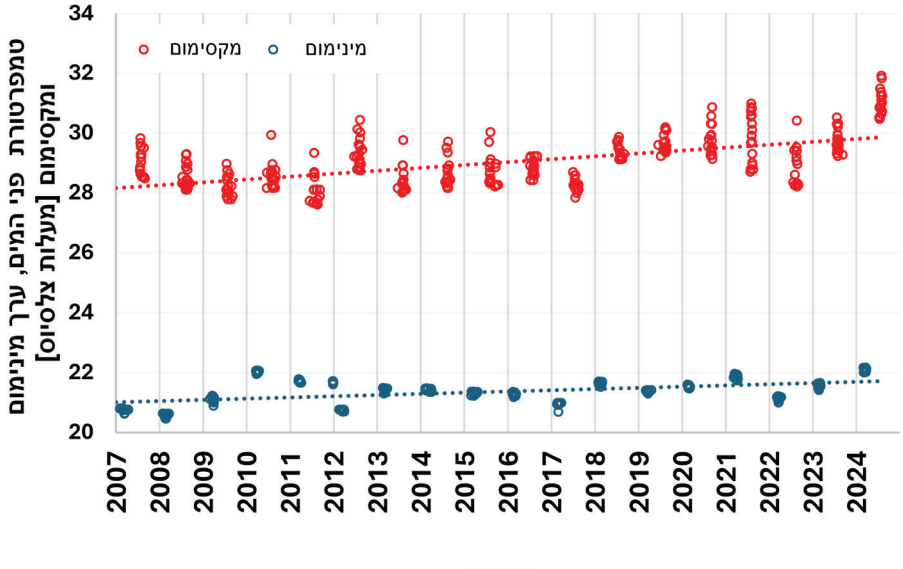
איור 7. טמפרטורת המים בעומק 600 מטרים מדרום לאילת, כפי שנמדדה על-ידי תוכנית הניטור בעשור האחרון.

טמפרטורת המים בעומק 600 מטרים נמדדת בהפלגות חודשיות שמוציאה תוכנית הניטור. מאז אותן מדידות ראשונות, עלתה הטמפרטורה השנתית הממוצעת ל-21.28 מעלות בשנת 2023 ובעשור האחרון (2013-2023) המים מתחממים בקצב של כ-0.026 מעלות בשנה (איור 7).

באותן הפלגות נמדדת גם טמפרטורת פני הים והממוצע לשנת 2023 עמד על 24.61 מעלות. קצב החימום הממוצע בעשור 2013-2023 הוא 0.073 מעלות בשנה.

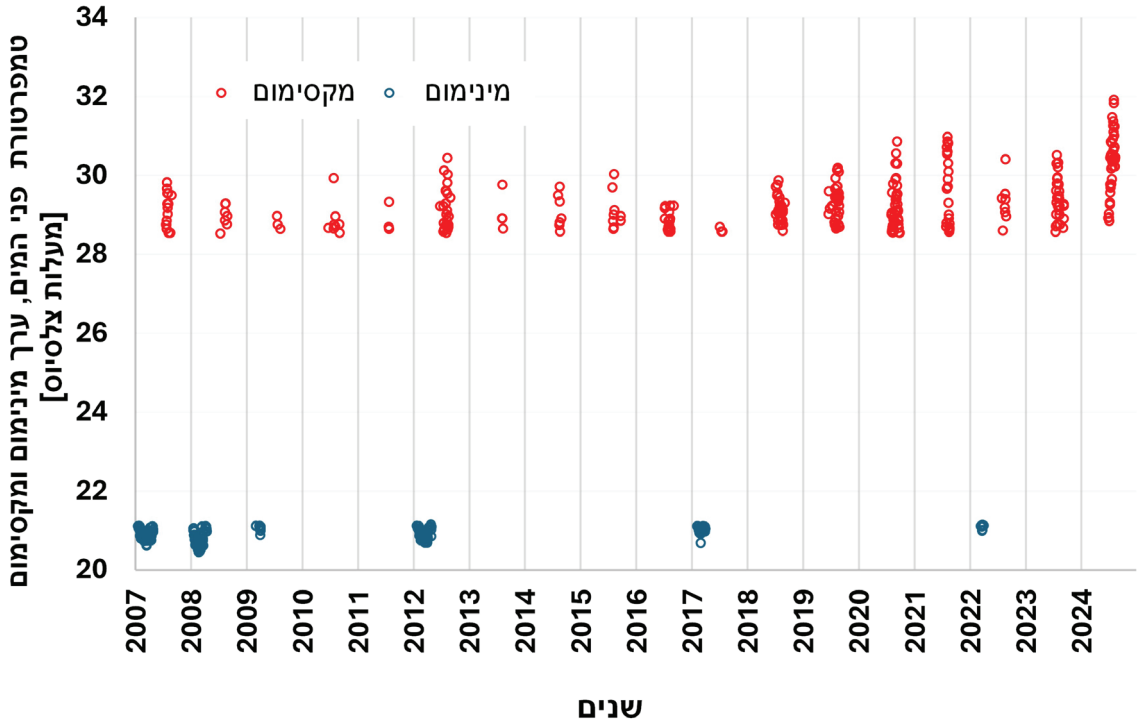
מדידות טמפרטורה בפני הים פשוטות, יחסית, ובסוף 2006 הציבה תוכנית הניטור חיישנים המודדים את טמפרטורת פני הים באופן רציף. מדידות אלה מאפשרות התבוננות ברזולוציה גבוהה יותר והבנה מעמיקה יותר של תהליך התחממות פני הים.

בחינת 5% הימים החמים ביותר והקרים ביותר בכל שנה (18 ימים בכל שנה, איור 8) מאז 2007 מראה כי הימים החמים נעשים חמים יותר בקצב של 1.1 מעלות בעשור, בהתאמה למדידות היומיות שהוזכרו למעלה. גם הימים הקרים ביותר מתחממים, בקצב של 0.37 מעלות בעשור – קצב גדול ממה שהוזכר למעלה מתוך המדידות היומיות, מכיוון שלא בכל שנה חודש פברואר הוא החודש הקר ביותר בשנה.



איור 8. טמפרטורת פני הים ב-18 הימים הקרים ביותר (כחול) והחמים ביותר (אדום) בכל שנה (5% מהמדידות השנתיות) מאז הצבת מערך המדידות האוטומטי בקצה מזח המכון הבינאוניברסיטאי בסוף שנת 2006.

כאשר בוחנים את 5% הימים החמים והקרים מתוך סך כל המדידות הרציפות שנאספו מאז 2007 (315 קריאות מינימום ומקסימום יומיות מתוך 6431 ימי מדידה) מסתבר שבכל קיץ מאז תחילת המדידות ישנם מספר ימים חמים, אך בשנים האחרונות ישנם יותר ימים חמים והטמפרטורה המרבית הנמדדת עולה. לעומת זאת, ימים קרים נעשים נדירים – כמעט כל המדידות ה"קרות" מרוכזות בשנים הראשונות למדידה, ובעשור האחרון היו מעט מאוד ימים "קרים" (איור 9).



איור 9. טמפרטורת פני הים ב-315 הימים הקרים ביותר והחמים ביותר מתוך כלל המדידות מאז הצבת מערך המדידות האוטומטי בקצה מזח המכון הבינאוניברסיטאי בסוף שנת 2006 (5% מהמדידות).

הטמפרטורות הגבוהות שנמדדות בקיצים האחרונים מהוות איום ישיר על המערכת האקולוגית בצפון מפרץ אילת עקב רגישותם של אלמוגים לטמפרטורות גבוהות. לעומת זאת, הטמפרטורות הגבוהות הנמדדות בחורף מהוות איום עקיף על המערכת כולה, דרך מנגנון ערבוב עמודת המים. כפי שהוזכר למעלה, בכל חורף מתקררים פני הים ונוצרת שכבה בעלת טמפרטורה אחידה שבה קיים ערבוב אנכי בין מים עליונים למים עמוקים יותר. עומק השכבה המעורבבת תלוי במידה ובמשך הקירור. אם פני הים יתקררו לטמפרטורה דומה לטמפרטורת המים העמוקים למשך זמן מספיק – יוסר השכוב התרמלי וכל עמודת המים תעורבב.

לערבוב עמודת המים חשיבות גדולה במפרץ מכיוון שהעלאת נוטריינטים מהעומק היא הדרך העיקרית שבה מוזנת המערכת הביולוגית. התחממות פני הים בקצב מהיר מזה של המים העמוקים תיצור הפרש טמפרטורות הולך וגדל בין פני הים לעומק, ועליית טמפרטורות החורף תיצור מצב שבו חורפים שבהם עמודת המים מתערבבת לעומק 700 מטרים (עומק הקרקעית בתחנת המדידה בקצה גבול המים של ישראל) הופכים לנדירים. תהליך זה צפוי להשפיע באופן דרמטי על המערכת האקולוגית במפרץ, אף כי קשה לחזות איך יתבטא השינוי. ניתן, אולי, ליצור מודלים שיוזנו בנתונים הקיימים שאספה תוכנית הניטור ולנסות לענות על שאלה זו.

סיכום

התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת מודדת מגוון גדול של מדדים ברוב בתי הגידול העיקריים המרכיבים את המערכת האקולוגית בצפון מפרץ אילת. במשך עשרים שנות פעילותה יצרה תוכנית הניטור מאגר נתונים גדול הכולל סדרות זמן ארוכות של משתנים חשובים, אשר בעזרתן ניתן לעקוב אחר השינויים המתרחשים במפרץ. מלבד היכולת לזהות שינויים גדולים העשויים להצביע על בעיות אקוטיות סמוך לזמן התרחשותן, ניתן בעזרת סדרות הזמן הארוכות גם לנסות להבין את השינויים האיטיים המתרחשים במערכת כולה.

בדוגמאות המובאות למעלה מתועדת עלייה בכיסוי האלמוגים החי בשוניות אילת בעשור הראשון לפעילות התוכנית ולאחר מכן תנודות המעידות על שיווי המשקל העדין שבו מצויה מערכת השוניות. מתוארים השינויים בריכוזי נוטריינטים בעמודת המים, ובפרט ריכוזי הניטראט במים העמוקים, עם דגש על השינויים בין השנים ולאורך תקופת הניטור. לבסוף, מתוארת העלייה המתמשכת בטמפרטורת המים, הן בעומק והן בפני הים והשלכתה האפשרית על תפקוד המערכת.

תודות

כל ההכרה וההערכה על איכות וכמות הנתונים מגיעה לצוות הניטור: ד"ר ענבל אילון, מוריאל דריי, ד"ר טל עמית, אירנה קולסניקוב וטניה ריבלין. ללא עבודתן המסורה והמקצועית לא היה על מה לדבר (או לכתוב). את התוכנית דחף, הקים, קידם וניהל מדעית במשך שנים רבות פרופ' (אמריטוס) אמציה גנין, ובשנים האחרונות מופקד הניהול המדעי בידי פרופ' מעוז פיין. התוכנית פועלת באמצעות האוניברסיטה העברית וזוכה לבית חם במכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת, אשר ללא תמיכתו לא יכולה הייתה לתפקד. המשרד להגנת הסביבה מממן את התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת, לאורך השנים ועל אף הקשיים, והתוכנית פועלת מטעם היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית ומשרד המדען הראשי במשרד להגנת הסביבה. תודה מיוחדת לד"ר דרור צוראל אשר תומך ועמֵל למען המשך פעילותה התקין והרציף של התוכנית וחוצץ בינה ובין קשיי הקיום.

רשימת מקורות

1. Lovett, G. et al. Who needs environmental monitoring? *Front. Ecol. Environ.* **5**, 253–260 (2007).
2. Loya, Y. The Coral Reefs of Eilat — Past, Present and Future: Three Decades of Coral Community Structure Studies. In E. Rosenberg & Y. Loya (Eds.), *Coral Health and Disease* ,1–6. Springer, Berlin, Heidelberg (2004).
3. Loya, Y. Community structure and species diversity of hermatypic corals at Eilat, Red Sea. *Mar. Biol.*, **13**, 100–123 (1972).
4. שקד, י. וגנין, א. התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת דוחות מדעיים שנתיים (2007-2022) . https://iui-eilat.ac.il/Research/NMPReports.aspx

5. שקד, י. ופיין, מ. התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת, דוח מדעי שנתי (2023). https//:iui-eilat.ac.il/Research/NMPReports.aspx
6. Hammer, Ø., Harper, D. A. T. & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.*, **4**, 1, art. 4, 9 (2009) at http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
7. Jost, L. Entropy and diversity. *OIKOS*, **113**, 363–375 (2006).
8. Oron, S., Akkaynak, D., Goodman Tchernov, B. N. & Shaked, Y. How monster storms shape fringing reefs: Observations from the 2020 Middle East Cyclone. *Ecosphere*, **14**, 7, e4602 (2023).
9. Torfstein, A., Kienast, S., Yarden, B., Rivlin, A., Isaacs, S. & Shaked, Y. Bulk and export production fluxes in the Gulf of Aqaba, Northern Red Sea. *ACS Earth Space Chem.*, **4**, 1461–1479 (2020).
10. Swart, P. K. Coral reefs: Canaries of the sea, rainforests of the oceans. *Nature Educ. Knowledge*, 4, 5 (2013).
11. Adam, T. C., et al. Landscape-scale patterns of nutrient enrichment in a coral reef ecosystem: Implications for coral to algae phase shifts. *Ecol. Appl.*, **31**, 1, e2227 (2021).
12. Birkeland, C. Geographic differences in ecological processes on coral reefs. In C. Birkeland (Ed.), *Coral Reefs in the Anthropocene*,179–194. Springer Science+Business Media, Dordrecht (2015).
13. Lazar, B., et al. Recent environmental changes in the chemical-biological oceanography of the Gulf of Aqaba (Eilat). In F. D. Por (Ed.), *Aqaba-Eilat, the Improbable Gulf. Environment, Biodiversity and Preservation*, 49–115, Magnes Press, Jerusalem (2008).
14. Berman, H., Gildor, H. & Fredj, E. Inter-annual variability in phytoplankton and nutrients in the Gulf of Eilat/Aqaba. *J. Geophys. Res. Oceans*, **128**, 6, e2022JC019431 (2023).
15. Levanon-Spanier, I., Padan, E. & Reiss, Z. Primary production in a desert-enclosed sea—the Gulf of Eilat (Aqaba), Red Sea. *Deep-Sea Res. A*, **26**, 673–685 (1979). https://doi.org/10.1016/0198-0149(79)90040-2
16. Lindell, D. & Post, A. F. Ultraphytoplankton succession is triggered by deep winter mixing in the Gulf of Aqaba (Eilat), Red Sea. *Limnol. Oceanogr.* **40**, 1130–1141 (1995).
17. Karcher, D. B. et al. Nitrogen eutrophication particularly promotes turf algae in coral reefs of the central Red Sea. *PeerJ*, **8**, e8737 (2020).
18. Sengupta, S., Gildor, H. & Ashkenazy, Y. Depth-dependent warming of the Gulf of Eilat (Aqaba). *Clim. Change*, **177**, 107 (2024).

4 תרומת פיתוח ואסדרת משאבי הגז הטבעי במרחב הימי של ישראל לתהליך קבלת ההחלטות, המחקר, הידע וההגנה על הסביבה הימית

אילן נסים[1], ערן ברוקוביץ[2]

[1] מינהל אוצרות טבע, משרד האנרגיה והתשתיות
[2] מינהל תעשיות, משרד הכלכלה והתעשייה

ilann@energy.gov.il,
Eran.brokovich@economy.gov.il

תקציר

משרד האנרגיה והתשתיות קידם את הידע והמידע הסביבתי במרחב הימי של ישראל, בדגש על הים העמוק, כצעד הכרחי תומך בפיתוח ניצול משאבי הגז הטבעי בים שהואץ בסוף העשור הראשון של המאה ה-21. המידע נאסף בשל הצורך בבסיס מדעי סביבתי שיאפשר שמירה על הסביבה הימית לצד פיתוח משאבי הגז הטבעי. הוכנו הנחיות סביבתיות במגוון נושאים כדי לשמור על האיזון בין הצורך הכלכלי והאסטרטגי לפיתוח משאבי הגז הטבעי ובין הצורך להגן על הסביבה הימית. כן סוכמה חלוקת האחריות בין המשרד להגנת הסביבה לבין משרד האנרגיה והתשתיות בשלבי החיפוש והפיתוח השונים. בסיס הידע כלל סקר רקע, סקר אסטרטגי סביבתי (סא"ס), סקרים ומחקרים תומכים נוספים; ואלה הובילו ליצירת מפות בתי גידול ורגישות שהכתיבו את המגבלות והאמצעים להגנה על כלל בתי הגידול שבמרחב הימי של ישראל. משנת 2012 ועד 2023 משרד האנרגיה והתשתיות בשיתוף המשרד להגנת הסביבה הקצו תקציב של מעל ל-97 מיליון ש"ח לניטור, מחקר וסקרים בים. המידע שהצטבר שימש לעדכון הסא"ס המהווה מסמך נושם המתעדכן תדיר ומשפיע על תהליך קבלת ההחלטות המתקבלות מעת לעת. בנוסף להחלטות פרטניות של משק הגז הטבעי, המידע תרם והשפיע על קבלת החלטות בנושאים נוספים כגון תכנון פיזי של המרחב הימי ומדיניות הפיתוח שלו, שבוצע במקביל על-ידי מינהל התכנון והטכניון, אכרזה על אזורים עם ערכי טבע מוגנים במים הכלכליים ואכרזה על שמורות ימיות במים הריבוניים על-ידי רט"ג. המידע יהווה גם בסיס לגיבוש מדיניות והכנת סא"ס נוסף לפיתוח אנרגיות מתחדשות בים וימשיך להתעדכן באופן תדיר.

פיתוח משאב הגז הטבעי בישראל והאיזון עם שמירת הסביבה הימית

ישראל הפכה למדינה שיכולה לספק חלק משמעותי מצריכת האנרגיה שלה בלא תלות במקורות חיצוניים באמצע 2012, עם תחילת ההפקה משדה תמר. זאת, בזכות האצת תהליכי החיפוש והפיתוח של גז טבעי בים, שהובילו להפקה מוצלחת המתבצעת משלושה שדות גז טבעי (תמר, לווייתן וכריש) והמספקת נכון לשנת 2023 מעל ל-70% מאספקת החשמל בישראל. עבודות חיפוש והפקה של נפט וגז טבעי בים מבוצעות לאחר שהושלמו סקרים גיאולוגיים אשר מצביעים על סבירות גבוהה למציאת פחממנים (הידרוקרבונים: נפט או גז טבעי) בשכבות מסלע עמוקות. תהליכי החיפוש, ההפקה של נפט וגז טבעי וההוצאה מכלל שימוש (Decommissioning) של הציוד עלולים לגרום למפגעים סביבתיים כתוצאה מזליגה של הנפט או גז טבעי לסביבה הימית, שחרור של חומרים מזהמים ופסולת מסוגים שונים לים, כגון ביוב, שאריות של ציוד קדיחה, בוץ קידוח, מלט, מִטחן – שאריות ממסלע הקידוח (drill cuttings), מי ייצור (produced water), חומרים כימיים שבהם משתמשים בשלבי העבודה השונים, פליטות מזהמים לאוויר, מפגעי תאורה, קול (רעש), הקמת תשתיות צנרת על קרקעית הים ומתקנים נלווים – מפגעים אלה עלולים להתרחש בשלבי העבודה השונים כתוצאה מהפעילות עצמה וכן בעקבות טעויות אנוש, מִכשָׁלים טכניים, או כתוצאה מפגעי טבע (סערות בעוצמה גדולה ואירועים סיסמיים).

הנזקים הפוטנציאליים ממפגעים אלו באגן המזרחי של הים התיכון הופכים לסיכונים, שכן האזור מתאפיין ברגישות סביבתית גבוהה הנובעת מתחלופת מים איטית ביחס לאוקיינוסים, אוכלוסיות ביולוגיות ייחודיות, בתדירות ובעוצמת סופות גדולה, שינויים משמעותיים באופי המגוון הביולוגי כתוצאה מכניסתם של מינים פולשים דרך תעלת סואץ, ומגוון שימושים גדול באזורי החופים לרבות תעשייה, תיירות, ספנות ודיג. כל אלה מחזקים את הצורך בנקיטת אמצעי בטיחות ואבטחה כדי למנוע תקלות ולמזער זיהום.

בעקבות תגליות הגז בשדות תמר ולווייתן ב-2009 וב-2010, שר האנרגיה דאז, ד"ר עוזי לנדאו, החליט ביולי 2012 על סגירת שטח הים למתן זכויות חדשות על-פי חוק הנפט, כדי לבחון מחדש את מדיניות מתן הזכויות לחיפוש גז טבעי בים ולכלול, בנוסף לשיקולים הכלכליים של ניצול המשאב, גם שיקולים סביבתיים במטרה לאזן בין הפקת התועלת הכלכלית ובין הצורך להגן על הסביבה הימית.

לצורך כך, הוחלט לעצור מתן זכויות חדשות עד ליצירת בסיס ידע גיאולוגי וסביבתי שישמשו ככלי עזר בתהליך האסדרה, קבלת ההחלטות ושיווק שטחים חדשים לחיפוש בתהליכים תחרותיים.

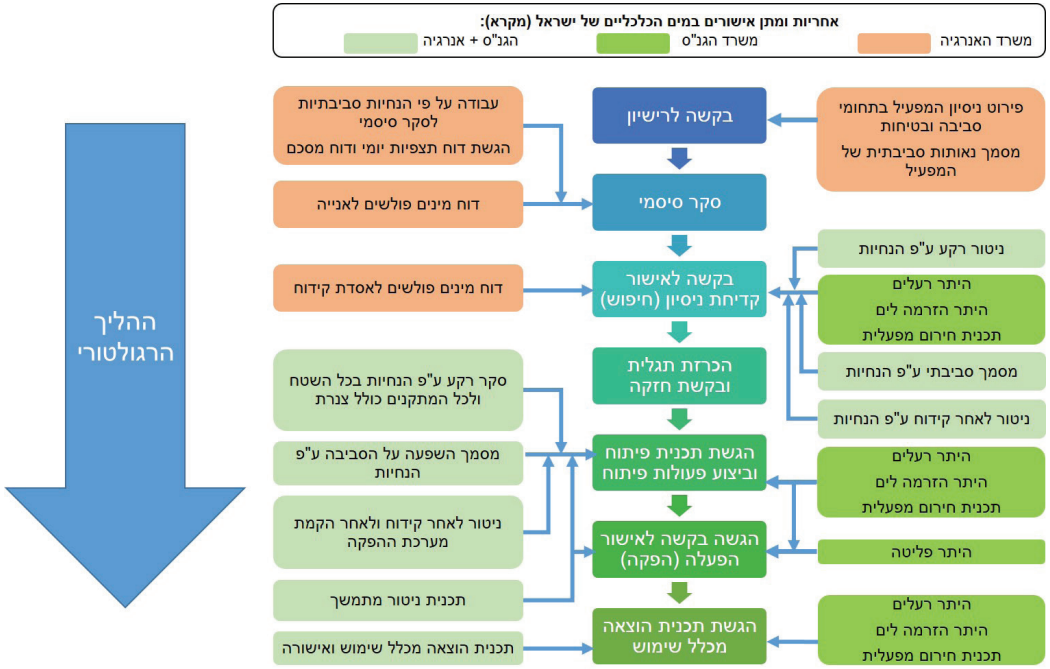
עד שנת 2013 המידע על הסביבה הימית באגן המזרחי של הים התיכון, הכולל את המים הריבוניים והמים הכלכליים הבלעדיים של ישראל, היה מוגבל באופן יחסי, וכיוון שפעילות חיפוש והפקה של הנפט והגז הטבעי באגן זה התפתחה רק בשנים אלה, מרחב זה הוגדר על-ידי משרד האנרגיה והתשתיות כאזור חדש לפיתוח (Frontier) – לחיפוש ולהפקת נפט וגז טבעי.

אסדרה ממשלתית לאיזון בין צורכי הפיתוח ושמירת הסביבה הימית

במקביל להרחבת בסיס הידע שיפורט להלן, הוכנו הנחיות סביבתיות במגוון נושאים כדי לשמור על האיזון בין הצורך הכלכלי והאסטרטגי לפיתוח משאבי הגז הטבעי ובין הצורך להגן על הסביבה הימית.

הנחיות סביבתיות לחיפוש ולהפקת נפט וגז טבעי בים

כדי למנוע ולמזער ככל הניתן מפגעים סביבתיים פוטנציאליים, משרד האנרגיה והתשתיות בשיתוף עם המשרד להגנת הסביבה גיבשו ופרסמו הנחיות סביבתיות המתוות כללים להבטחת ביצוע בטוח של כלל השלבים והפעולות לחיפוש ולהפקה של נפט וגז טבעי בים[1]. קביעת ההנחיות התבצעה תוך חלוקת אחריות ברורה בין המשרדים וקביעת סמכויות כל משרד בחלוקה גיאוגרפית של מים ריבוניים ומים כלכליים בכל שלבי התהליך, מהחיפוש, דרך קידוחי הניסיון, פיתוח השדה, ההפקה ועד להוצאה מכלל שימוש (איור 1).



איור 1. הדרישות הסביבתיות ממשרדי האנרגיה והגנת הסביבה מבעל הזכות בשלבי החיפוש וההפקה.

בהנחיות מפורטים הפעולות והמסמכים שבעלי הזכויות בים מחויבים להכין ולהגיש לאישור ובכלל זה, אופן טיפולם ומוכנותם למניעה ולמזעור המפגעים הסביבתיים העלולים להיווצר כתוצאה מפעילות חיפוש והפקת נפט וגז טבעי בים בכל הזכויות הניתנות ובכל הפעולות הנגזרות מהן.

העוגן החוקי לדרישה הוא חוק הנפט, תשי"ב – 1952 שבמסגרתו ניתנים על-ידי הממונה על ענייני הנפט (להלן גם "הממונה"), תנאים מיוחדים לרישיון המהווים חלק בלתי נפרד מזכות הנפט, ומתוכנית העבודה בה, ומחייבים את בעלי הזכות. סטייה מהם עלולה להביא לביטול זכות הנפט בהתאם להוראת סעיף 55 לחוק הנפט. כיוון שניתן להכתיב את ההנחיות בכל שלב שבו מעדכנים את תוכנית העבודה או הזכות, התנאים הסביבתיים העדכניים נדרשו גם מאותם בעלי זכויות שבעת מתן הרישיון לא קיבלו הנחיות סביבתיות כחלק מהתנאים, והחל מאמצע 2012 ההנחיות והדרישות הסביבתיות חלות על כל בעלי הזכויות.

ההנחיות בנויות מדרישות סביבתיות המעוגנות בזכויות הנפט (רישיון או חזקה), והנחיות מסגרת אשר מותאמות לכל זכות נפט באופן פרטני.

ההנחיות מפורטות על-פי שלבי הפעילויות השונות. בשלבי החיפוש הראשוניים, לעיתים נדרש מחקר גיאולוגי וגיאופיזי, לצורך כך נדרש סקר סיסמי באמצעות כלי שיט המפעיל מקורות קול חזקים. ההשפעה של פעילות זו מוגבלת בזמן התרחשותה, אך עלולה להשפיע על יונקים ימיים ורבייה של בעלי חיים ימיים שונים. לפיכך נדרשים בעלי הזכויות להגיש לאישור הממונה תוכנית לביצוע הסקר, ולפרט בה, בין השאר, את עוצמת הקול (כולל רישום שיטה ודגמים של המכשירים), המסלולים והמועדים המתוכננים של הסקר הסיסמי, הערכת סיכונים סביבתיים ליונקים ימיים, צבי-ים, דגים ובעלי חיים נוספים העלולים להיות מושפעים מביצוע הסקר בעמודת המים וגם בבתי גידול רגישים בקרקעית הים, פירוט האמצעים למניעת פגיעה ביונקים ימיים ובעלי חיים ימיים נוספים ועוד.

במסגרת התנאים לאישור קדיחה נדרש ביצוע סקר רקע מקדים שמטרתו לוודא שאין בתי גידול רגישים במרחב המתוכנן לקידוח החיפוש, והכנת מסמך סביבתי התואם בתוכנו תסקיר השפעה על הסביבה. אישורו של המסמך הסביבתי נסמך על חוות דעת היחידה להגנת הסביבה הימית במשרד להגנת הסביבה, קבלת מספר אישורים והיתרים הנמצאים בסמכות הבלעדית של המשרד להגנת הסביבה: היתרי הזרמה לים ורעלים ואישור לתוכנית חירום מפעלית (איור 1). במסגרת התנאים לאישור הפקה נדרש סקר רקע לכל המרחב של השדה ושטח תשתיות ההפקה התת-ימיות, הכנת מסמך השפעה על הסביבה שאישורו נסמך על חוות דעת היחידה להגנת הסביבה הימית במשרד להגנת הסביבה, ומותנה בקבלת היתרי רעלים, הזרמה לים ופליטה לאויר, כמו גם אישור לתוכנית חירום מפעלית הניתן באופן עצמאי על-ידי המשרד להגנת הסביבה (איור 1). בעל הזכות לחיפוש ולפיתוח ולהפקה נדרש גם לבצע ניטור של הסביבה הימית בסמוך לאסדת ההפקה ובכלל תשתיות ההפקה התת-ימיות (קידוחים, צנרת הולכה, צנרת פיקוד וכו').

ההנחיות הסביבתיות זמינות באתר משרד האנרגיה והתשתיות, תחת חיפוש והפקת גז טבעי, מידע סביבתי, הנחיות סביבתיות לפעולות חיפוש והפקה של נפט וגז טבעי בים[1].

יצירת בסיס ידע בים העמוק

כאמור לעיל, בשנת 2012 הוחלט על הכנת סקר רקע לסביבה הימית באזור המים הכלכליים של ישראל בים התיכון, כמענה לפערי המידע המהותיים שהיו באותו זמן בנושא הים העמוק של ישראל וכן על הכנת סקר אסטרטגי סביבתי (Strategic Environmental Assessment – SEA) לחיפוש ולהפקת נפט וגז טבעי בים התיכון (סא"ס) בשנת 2014. סקרים אלה יצרו את בסיס הידע המדעי-סביבתי שאיפשר שילוב של שיקולים סביבתיים בקבלת החלטות. רק לאחר השלמת סקרים אלה, בסוף 2016, משרד האנרגיה והתשתיות חידש את החיפוש של משאבי הגז הטבעי במרחב הימי. שיווק שטחי החיפוש החדשים התבצע במסגרת תהליכים תחרותיים המתחשבים בידע הסביבתי שנצבר בסא"ס, מתוך הבנה והפנמה ששמירה על הסביבה הימית חיונית לפיתוח בר-קיימא של משאבי הגז הטבעי.

סקר רקע סביבתי באזור המים הכלכליים של ישראל בים התיכון

במקביל לניסוח ההנחיות והדרישות הסביבתיות עלה הצורך בקבלת תמונת מצב עדכנית של הסביבה הימית שתאפשר קבלת החלטות מושכלות לניצול המשאבים הימיים של ישראל. הוחלט על הכנת סקר רקע של הסביבה הימית בעזרת איסוף ובחינה של המידע הבסיסי הקיים, ניתוח פערי הידע וביצוע דיגום רקע לאזור המים הכלכליים של ישראל. הדיגום לסקר הרקע בוצע ב-52 נקודות ו-5 קווי גרירה במרחב הימי של ישראל (איור 2), וכלל מאפיינים פיזיקליים (פרופילים בעמודת המים של טמפרטורה, מליחות, כלורופיל, עכירות, חמצן מומס), כימיים

סדימנטציה); הרכב חברת החי על ובתוך המצע; וכן דיגומי רקע של מתכות כבדות ומזהמים אורגניים ברקמות חי על המצע, ומתכות כבדות, PAHs, PCBs בשלדי פורמיניפרה[2]. הנתונים שנאספו ונותחו בסקר הרקע שימשו כבסיס מדעי להכנת סקר אסטרטגי סביבתי כמתואר בהמשך.

סקר אסטרטגי סביבתי לחיפוש ולהפקה של נפט ושל גז טבעי בים (סא"ס)

סקר אסטרטגי סביבתי (SEA - Strategic Environmental Assessment) משמש כלי עזר בגיבוש מדיניות לפיתוח בר-קיימה של משאבי טבע במדינות The Organization for Economic and Development) OECD Cooperation and Development) ומומלץ לשימוש גם על-ידי הדירקטיבה האירופית EC/2001/42. לפיכך, מינהל אוצרות טבע יזם הכנת סא"ס לחיפוש ולהפקה של נפט וגז טבעי בים התיכון, שבו נדרש להתייחס לכל המרחב הימי של מדינת ישראל (מים ריבוניים וכלכליים בלעדיים) ומבלי לפגוע בזכויות הקיימות. זאת, כדי לספק תשתית מידע שתאפשר קבלת החלטות לפיתוח המשאבים, תוך התחשבות במכלול שיקולים סביבתיים, כלכליים וחברתיים.

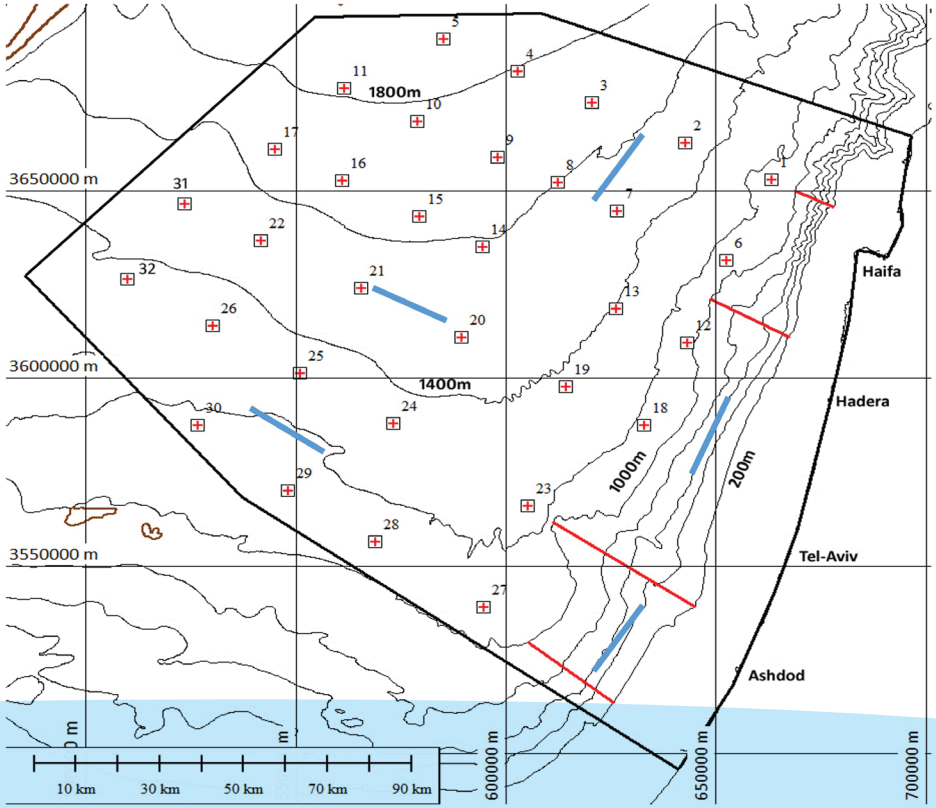
הכנתו של הסא"ס לוותה על-ידי ועדת עבודה וועדת היגוי רחבה, הכוללת משרדי ממשלה, גופים ציבוריים, ארגוני סביבה, נציגי התעשייה, אקדמיה ובעלי העניין הרלוונטיים לנושא העבודה. חברת "גיאופרוספקט" בע"מ נבחרה לערוך את הסקר האסטרטגי הסביבתי, בשיתוף צוות יועצים המונה מגוון של מומחים בתחומם, שבהם גם יועצים בינלאומיים. חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל) היה השותף המדעי לעריכת הסקר, כשעריכת סקר הרקע לעיל מהווה את הבסיס למיפוי בתי הגידול בסא"ס.

על-פי המתודולוגיה המקובלת לעריכת סקרים מסוג זה, המסמך מאגד בתוכו נושאים רבים, המתארים ומנתחים את המצב הקיים בכל ההיבטים בנושאים השונים, תוך מתן המלצות והנחיות הנובעות מניתוח זה.

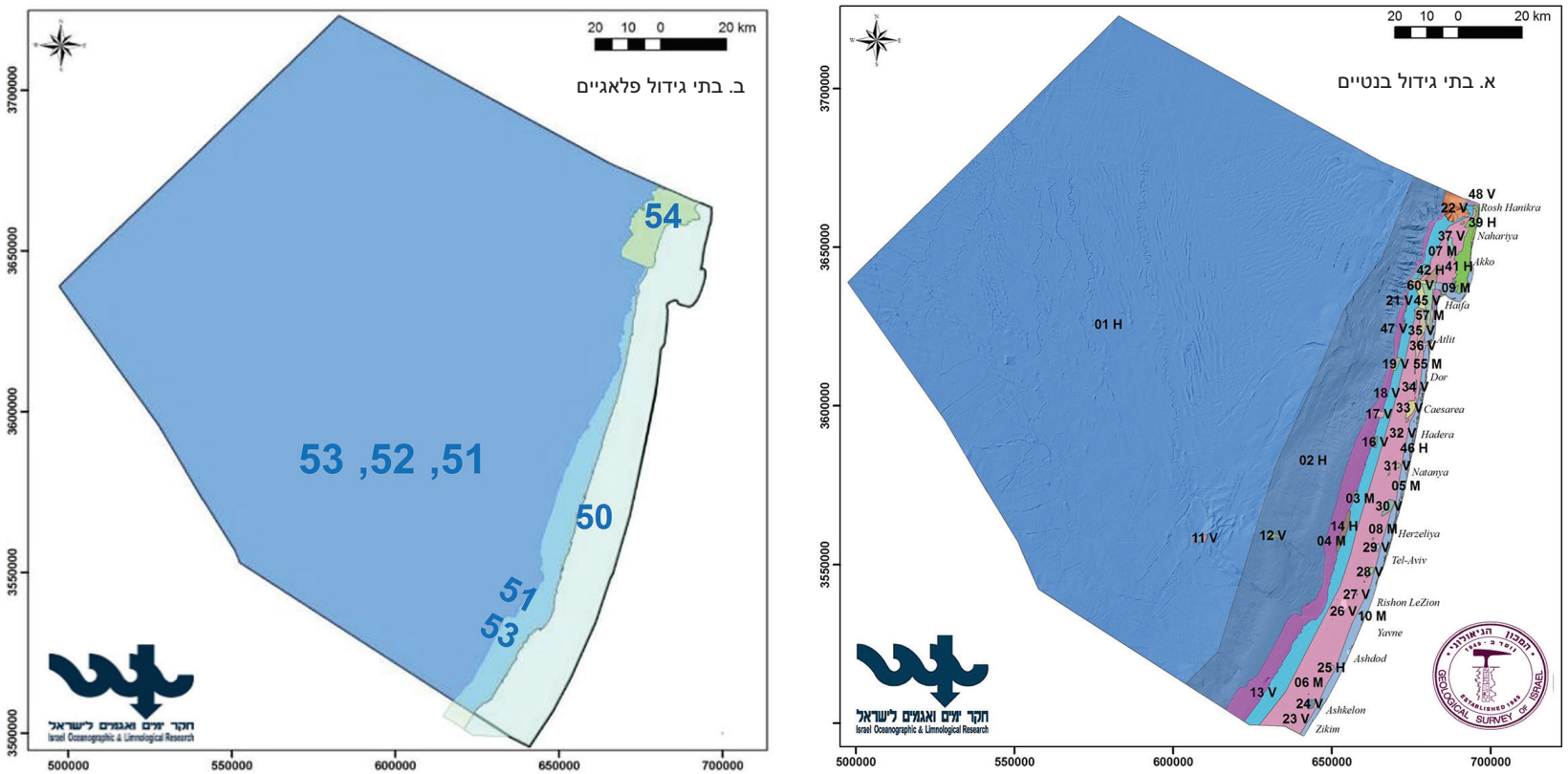
הסא"ס נותן תמונה כוללת ורחבה המהווה בסיס נתונים לקבלת החלטות מדיניות על-ידי הממונה, זאת בניגוד למסמך סביבתי ולסקרים ייעודיים שנערכים עבור פעולות פרטניות לחיפוש ולהפקה של נפט וגז טבעי ומתמקדים בתמונה המקומית.

בתחום הסביבתי, המטרה שהוגדרה היא שמירת יציבותם הביוטית הטבעית של כלל בתי הגידול במים הריבוניים והכלכליים של ישראל, בד-בבד עם המשך פעילות האדם הקשורה בחיפוש ובהפקה של גז טבעי ונפט. לשם כך בוצע איסוף מידע ביחס לבתי הגידול, נותחו ההשפעות הסביבתיות הפוטנציאליות של פעילות חיפוש והפקת נפט וגז טבעי בים והוגדרו רמות רגישות ופערי הידע לבתי הגידול השונים. הגדרת רמת הרגישות של בתי הגידול איפשרה לקבוע מדיניות לצורך השגת המטרה שהוגדרה. איסוף המידע בוצע על-ידי חיא"ל והמכון הגיאולוגי והצגתו באמצעות מערכת מידע גיאוגרפי (ממ"ג) שהוטמעה בסא"ס בוצעה על-ידי חיא"ל. שתי גישות עיקריות שימשו להגדרת בתי גידול – גישה ביוטית, כלומר, הגדרת בתי גידול לפי אחידות הרכב חברת החי בהם, וגישה א-ביוטית – הגדרת בית גידול לפי מאפייניו הפיזיקליים. הגישה הביוטית יושמה באזורים שבהם היה מידע ביוטי מספק, על סמך הרכב חברת החי בהם, בעיקר לגבי בתי גידול של המצע הרך בקרקעית, אשר הוגדרו מתוך תוצאות האנליזה תוך שימוש בשיקולים אקולוגיים, ומתמטיים סטטיסטיים. הגישה הא-ביוטית יושמה באזורים שלגביהם לא היה מידע ביוטי מספק, בעיקר לגבי בתי הגידול של המצע הקשה ובתי הגידול של עמודת המים. מיפוי אזורי המצע הקשה במדף בוצע בשני מסלולים

בהם, בעיקר לגבי בתי גידול של המצע הרך בקרקעית, אשר הוגדרו מתוך תוצאות האנליזה תוך שימוש בשיקולים אקולוגיים, ומתמטיים סטטיסטיים. הגישה הא-ביוטית יושמה באזורים שלגביהם לא היה מידע ביוטי מספק, בעיקר לגבי בתי הגידול של המצע הקשה ובתי הגידול של עמודת המים. מיפוי אזורי המצע הקשה במדף בוצע בשני מסלולים משלימים – מיפוי לפי פרשנות השכבות הגיאומורפולוגיות (בתימטריה, מפת הצללה, מפת שיפועים ומפת החזרים) ומיפוי מגובה בעדויות ממשיות: תיעוד סיסמי, עדות צלילה, צילום או דיגום קרקעית של פני השטח. רצועה חולית של כמה מאות מטרים סביב כל אחד מבתי הגידול הסלעיים נכללה בבית הגידול הסלעי, מתוך הנחה שחלקם של מיני החי החיים על מצע קשה מנצלים אם את רצועת המצע הרך שסביבו לפעילות של חיפוש מזון ועוד. בתי הגידול של עמודת המים הוגדרו כמסות מים שמשפיעה עליהם הפרעה סביבתית מסוימת. השימוש בשתי הגישות להגדרת בתי גידול הביאה להגדרה של 55 בתי גידול, צמודי קרקעית (בנטליים) במים הריבוניים והכלכליים של ישראל (איור 3 א.), וגוף המים חולק ל-5 בתי גידול תלת-ממדיים ומשוכבים (פלאגיים) (איור 3 ב)[3].



איור 2. איסוף המידע בסקר הרקע: 52 נקודות דיגום מים וסדימנט (פלוס אדום); 5 קווי גרירה לדיגום חי על מצע (2012-2013, קו כחול);
4 חתכים במדרון היבשת (4X5, תחנת דיגום כל 200 מטר, קו אדום) ופירוט הנתונים שנדגמו ונותחו[2] תחימה בקו שחור – גבולות המרחב הימי של ישראל (מים ריבוניים וכלכליים).



איור 3. א. מפת בתי הגידול הבנטיים (צמודי הקרקעית) במים הריבוניים והכלכליים של ישראל. בתי הגידול מסומנים במספרים וכן מצויינת רמת פערי הידע באותיות לועזיות: בנוני M-medium, גבוה H-high, גבוה מאוד V-very high ב. בתי הגידול הפלאגיים (של גוף המים). גוף המים חולק ל-5 בתי גידול תלת-ממדיים ומשוכבים[3].

לצורך ניתוח השפעות סביבתיות פוטנציאליות של הפעולות השונות הקשורות בחיפוש ובהפקת של נפט וגז טבעי בים, בוצעה סקירה של כלל ההשפעות הכרוכות בפעילות טכנית/הנדסית, בפוטנציאל לתאונות ובהשלכות הסביבתיות של פעילות ההקמה, התפעול השוטף והפירוק של המתקנים השונים, תוך התייחסות לבתי הגידול השונים. לאחר סקירת כלל שלבי הפיתוח ופוטנציאל הנזק הסביבתי הגלום בהם הוגדרו רמות רגישות לבתי הגידול השונים בהתייחס לבית גידול מוגדר, כאשר הנחות היסוד הן, שניתן יהיה להחיל על בית גידול זה מדיניות סביבתית אחידה, שרגישות בית גידול תלויה בהפרעה הסביבתית ואין רמת רגישות אוניברסלית לבית גידול. כלל שלבי הפעילות הכרוכים בחיפוש והפקה של נפט וגז טבעי בסביבה הימית קובצו לארבעה סוגי הפרעות סביבתיות: (1) הפרעה פיזית – הסרה וכיסוי של חומר קרקעית, סדימנט וסלע. (2) זיהום קול כתוצאה מפעילות סיסמית ועבודות של הקמת מתקנים ימיים. (3) זיהום אור כתוצאה מתאורה של מתקנים ימיים זמניים או קבועים. (4) השפעה כימית של חומרים שנעשה בהם שימוש בתעשיית הדלקים הפוסיליים לשלביה. לכל אחת מארבע ההפרעות ניתנו מדדים להערכת רגישות בתי הגידול,

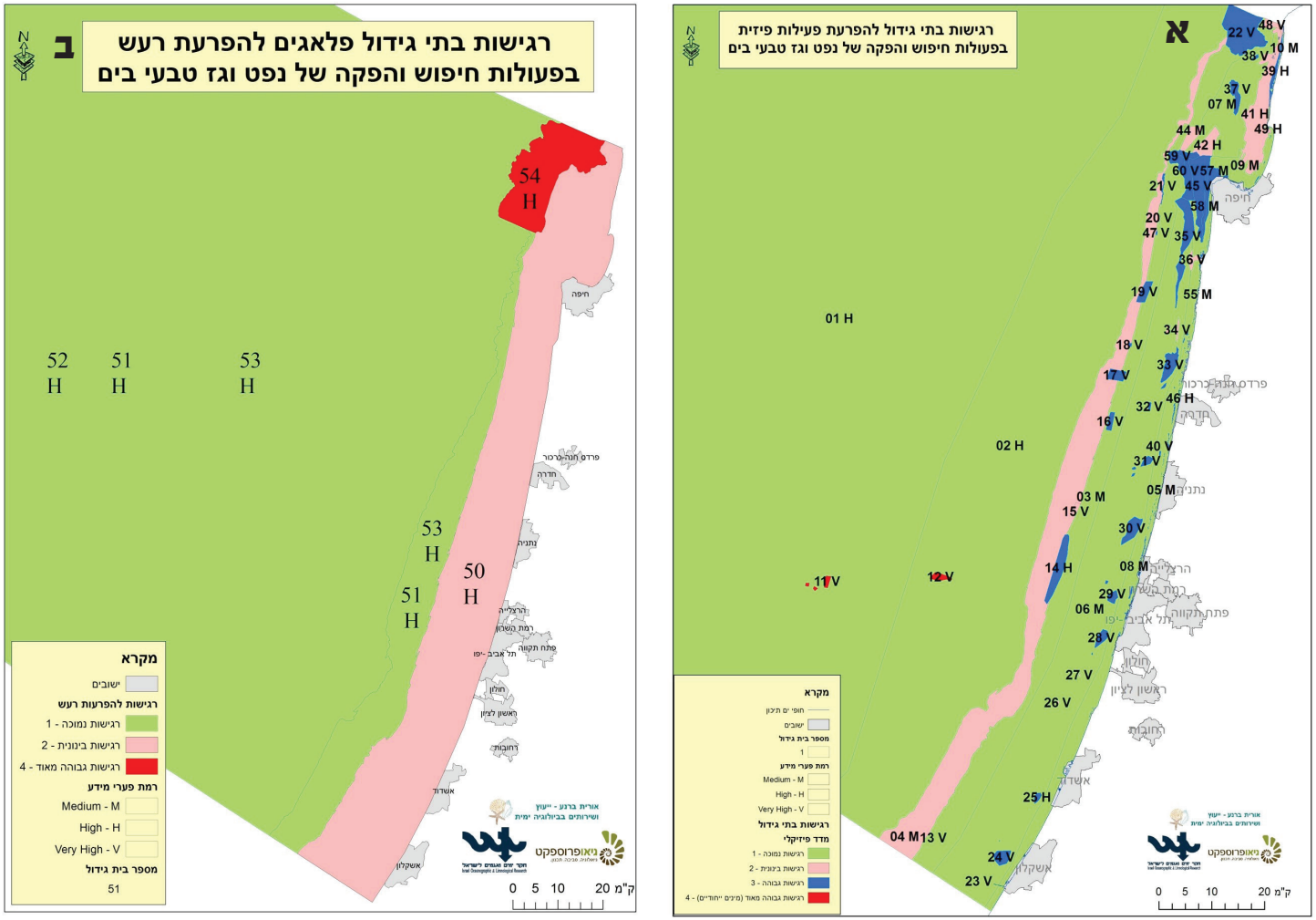
ובהתאם להם נקבעו ארבע דרגות רגישות: 1 – רגישות נמוכה, 2 – רגישות בינונית, 3 – רגישות גבוהה, 4 – רגישות גבוהה מאוד (למינים ייחודיים). רמת הרגישות בבית הגידול משקללת את הרגישות הגבוהה ביותר שהוגדרה לכל בית גידול מסך כל הקריטריונים שניתנו לו (איור 4), אך ההחלטות לגביו תלויות גם במצב פערי המידע לגביו, כפי שאומץ בעקבות הערות ציבור שהתקבלו במהלך הכנתו. לדוגמה, מרבית שטח הבתיאל הוגדר כבעל רגישות נמוכה, אך עדיין נדרשת זהירות בשל רמת פערי המידע הגבוהה לגביו. המלצות הסא"ס, שגובשו על בסיס התובנות ופערי המידע שזוהו בתחומים השונים כללו, בין השאר, המלצות לגבי עיתוי ומיקום מתן הזכויות, אקולוגיה, סיכונים, כלכלה, טכנולוגיות לביצוע פעולות החיפוש וההפקה, ניטור הסביבה הימית, סגירת פערי ידע ובקרה על ביצוע ההמלצות.

יישום המלצות הסא"ס

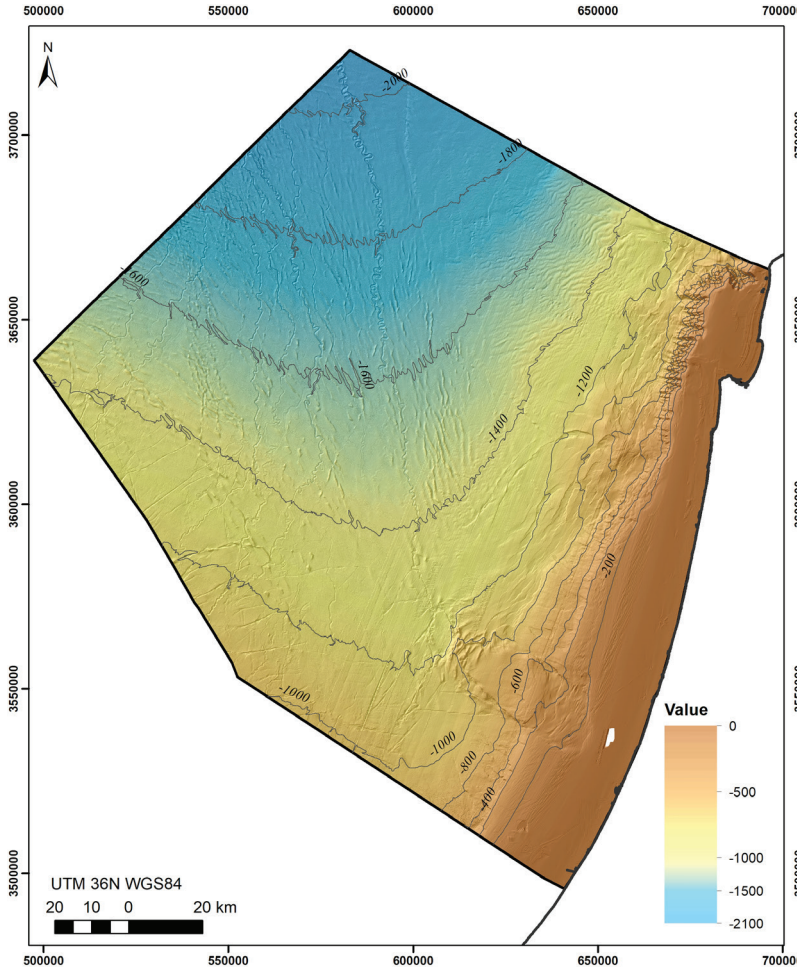
להלן יפורטו מספר המלצות, דרכי יישומן, השפעתן על תהליך קבלת ההחלטות בניטור הים, קידום סקרים ומחקרים, בשיווק שטחים חדשים לחיפוש, ההשפעה על חקר הים העמוק, על שמירת הים ותהליכים נוספים לתכנון הים.

הרחבת תוכנית הניטור הלאומית

כפועל יוצא של אחת מהמלצות הסא"ס להבנת בריאות המערכת האקולוגית ולהערכת מגמות ושינויים ארוכי טווח, כתוצאה מהתערבות האדם וגורמים טבעיים, גובשה במשותף עם המשרד להגנת הסביבה הרחבה של תוכנית הניטור הלאומית, המשמשת כבסיס מדעי חיוני לקבלת החלטות לקביעת מדיניות סביבתית ורגולציה בעת שימוש וניצול משאבי הים. התוכנית החלה לפעול על מדף היבשת בשנות ה-80 של המאה הקודמת במימון ובהנחיית המשרד להגנת הסביבה. בשנת-2018, מתוקף החלטת ממשלה מס' 4399, הורחבה התוכנית כך שתכלול גם את שטחי הים העמוק שבהם מתקיימת מרבית פעילות החיפוש וההפקה של הגז הטבעי. בהתאם להחלטת הממשלה, התוכנית המורחבת החלה לפעול ב-2019 ומתוקצבת בכ-5 מיליון ש"ח בשנה לתקופה של 10 שנים, על-ידי משרדי האנרגיה והתשתיות, הגנת הסביבה והמדע. חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל) משמשת כזרוע המדעית של המדינה ליצירת בסיס מדעי בכל הקשור לניטור, מחקר ופיתוח בר-קיימה של הים. כמו כן חיא"ל היא הגוף האחראי לתוכנית ומפעילה את "מרכז המידע הימי הלאומי" המחזיק במאגרי הנתונים שנאספו לאורך שנים. במהלך השנים 2017 ו-2018 חיא"ל ביצעה סבב ניטור ראשון לים העמוק הכולל איסוף דוגמאות והשוואתן לסקר הרקע של 2012-2013 הנזכר לעיל [4-14].



איור 4. רמות רגישות של בתי גידול במרחב הימי של ישראל לפעולת חיפוש והפקה של נפט וגז טבעי בים. א. בתי גידול בנטיים (צמודי קרקעית);
ב. רגישות בתי גידול פלאגיים להפרעות אור וקול[3]



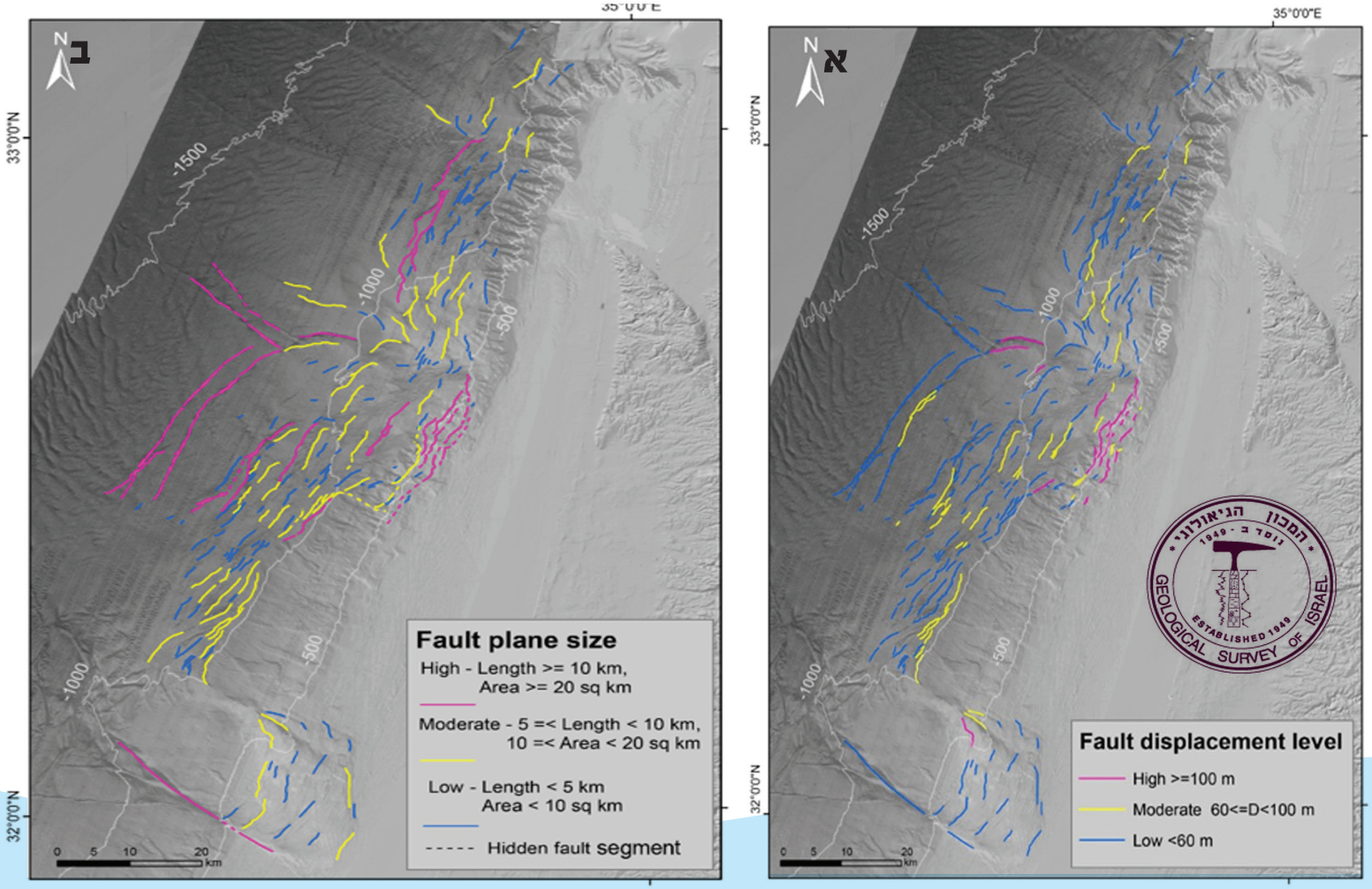
איור 5. מיפוי בתימטרי ברזולוציה גבוהה של כלל מרחב הים של ישראל[16].

קידום סקרים ומחקרים

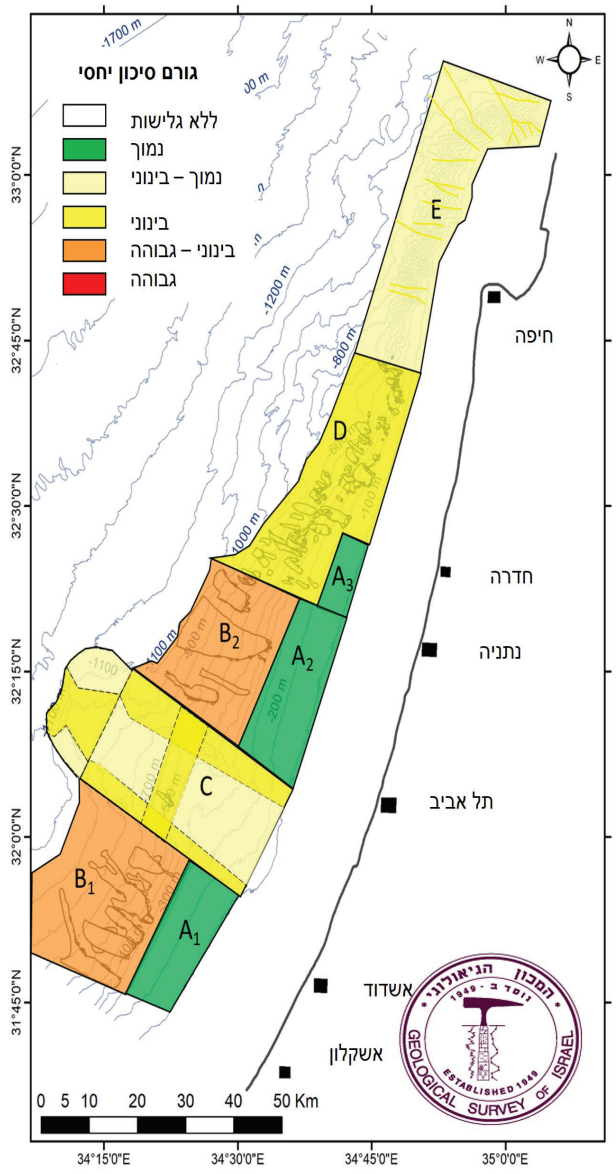
מעת פרסום הסא"ס בשנת 2016 ועד לסוף שנת 2023, תמך משרד האנרגיה והתשתיות ב-95 מחקרים במכוני המחקר ובאקדמיה בנושאים גיאולוגיים, אקולוגיים, טקסונומיים, טכנולוגיים, אוקיינוגרפיים ועוד, בסכום העולה על 30 מיליון ש"ח. בנוסף, כדי להשלים מספר פערי מידע שהוגדרו כבעלי חשיבות, משרד האנרגיה והתשתיות הטיל על חיא"ל לבצע סקרים ומחקרים נוספים שעלותם מסתכמת בכ-16 מיליון ש"ח. במסגרת זו, הושלם מיפוי בתימטרי ברזולוציה גבוהה לכלל המרחב הימי של ישראל [15] שעודכן על-ידי כנרי וחובריו בשנת 2020 (איור 5)[16]. לאחר קבלת תוצאות המיפוי אותרו אזורים שבהם עלה כי קיימים ממצאים לבתי גידול נוספים ולכן בוצעו צלילות באמצעות רכבים לא מאוישים (ROV ו-AUV) שסקרו מספר אתרים נבחרים באמצעים ויזואליים והדמיות נוספות.

התקציב שהוקצה במהלך השנים 2012-2023 לניטור ולקידום מחקרים וסקרים של הסביבה הימית בישראל מסתכם בכ-97 מיליון ש"ח.

כמענה לפערי הידע הגיאולוגי במרחב הימי של ישראל ובמימון משרד האנרגיה והתשתיות, החל המכון הגיאולוגי בשנת 2020 במחקר לבחינת גורמי הסיכון הגיאולוגיים במרחב הימי של ישראל וממצאיו פורסמו בשנת 2023[17]. במחקר נסקרו ההעתקים בקרקעית הים (איור 6) וגלישות בוץ תת-ימיות (איור 7) המהווים גורמי סיכון גיאולוגיים שעלולים לסכן תשתיות ימיות במרחב הימי של ישראל. ממצאי המחקר מספקים לראשונה מפות לתכנון מוקדם של תשתיות שיעזרו למזער את הסיכון מגורמי הסיכון הגיאולוגיים.



איור 6. סיווג ההעתקים לפי גודלם ומידת ההסטה האנכית שלהם. א. שיעור ההסטה האנכית של אופק שגילו 350 אלפי שנה. ב. גודל מישור ההעתק[17].

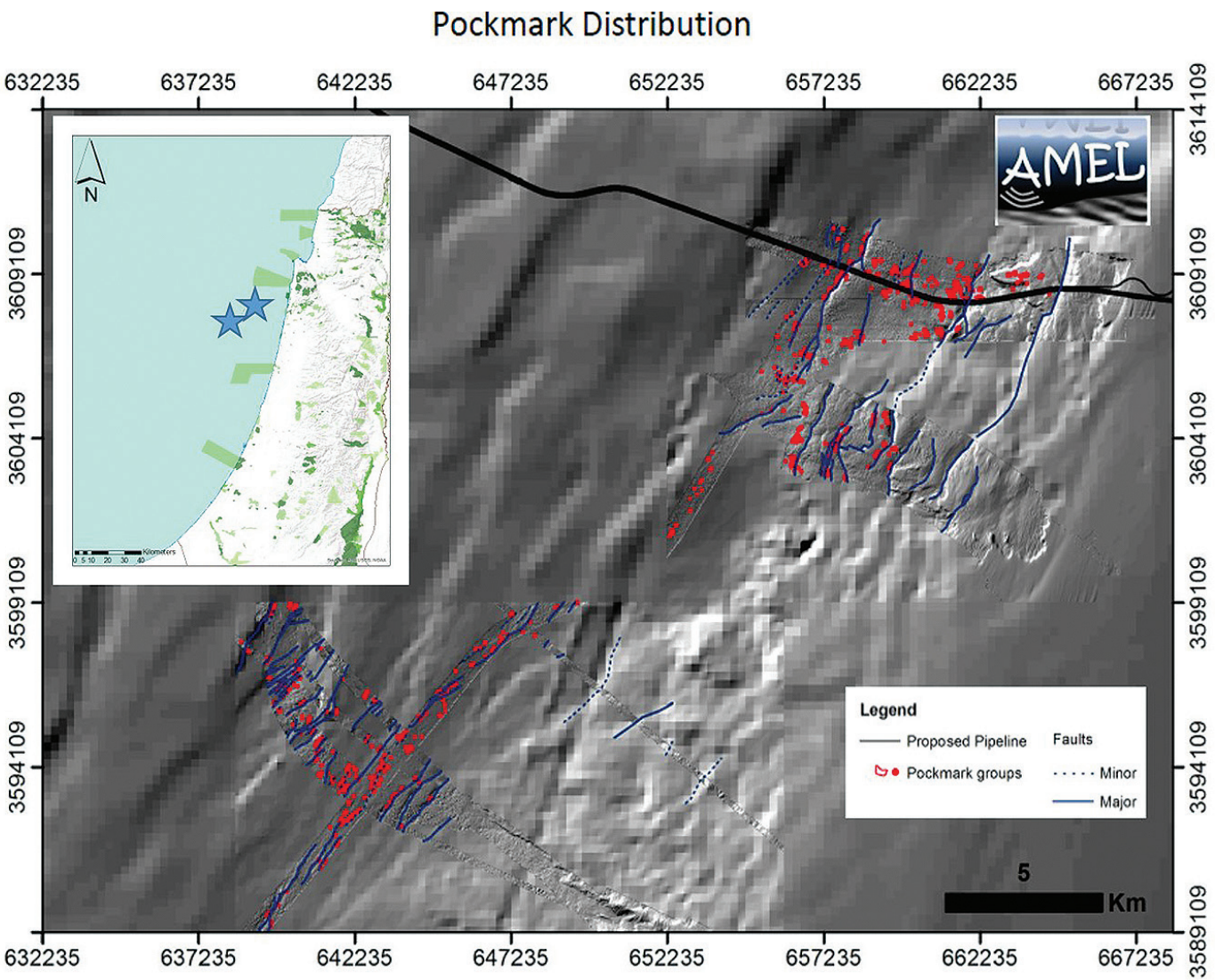


איור 7. חלוקה לאזורים על-פי הרמה היחסית של גורם הסיכון הגיאולוגי הנובע מתנועה של חומר במורד מדרון היבשת (landslide hazard) [17].

עדכון בתי גידול

כלל המידע שנאסף מסקרים ומחקרים על-ידי חיא"ל, האקדמיה וחברות הגז הטבעי, מעובד על-ידי חוקרי חיא"ל ובהתאם לממצאים שעולים מתהליך העיבוד נערכים עדכונים עיתיים בבתי הגידול שהוגדרו בסא"ס. עדכונים אלו יוצאים בדוחות תקופתיים המהווים בעצם את היותו של הסא"ס מסמך חי ומתעדכן, ומפורסמים באתר משרד האנרגיה והתשתיות[18]. להלן מספר דוגמאות לעדכונים שנערכו בבתי הגידול:

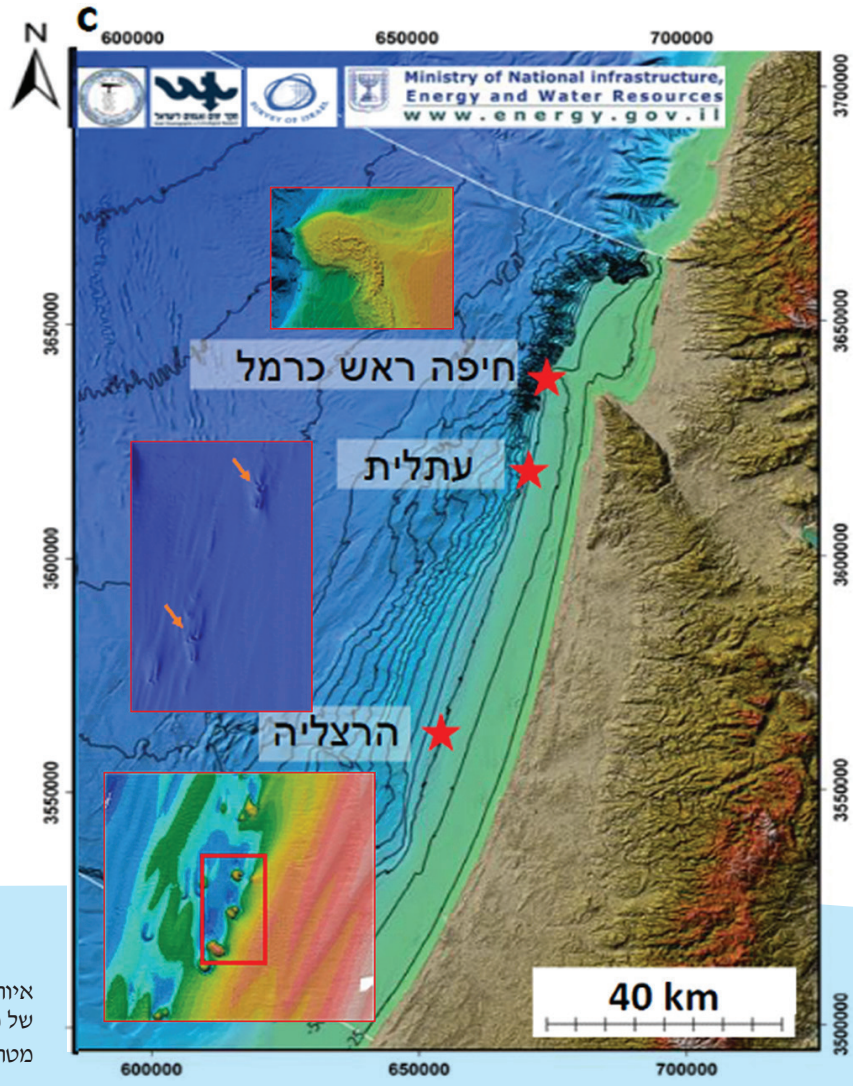
הוספת בתי גידול רגישים בצורת אבעבועים (pockmarks) במים העמוקים (1000-700 מטרים) שמול הפרעת דור בהסתמך על מידע מסקר רקע לפני הנחת תשתיות, שהוכן עבור חברת נובל אנרגי (איור 8)[19].



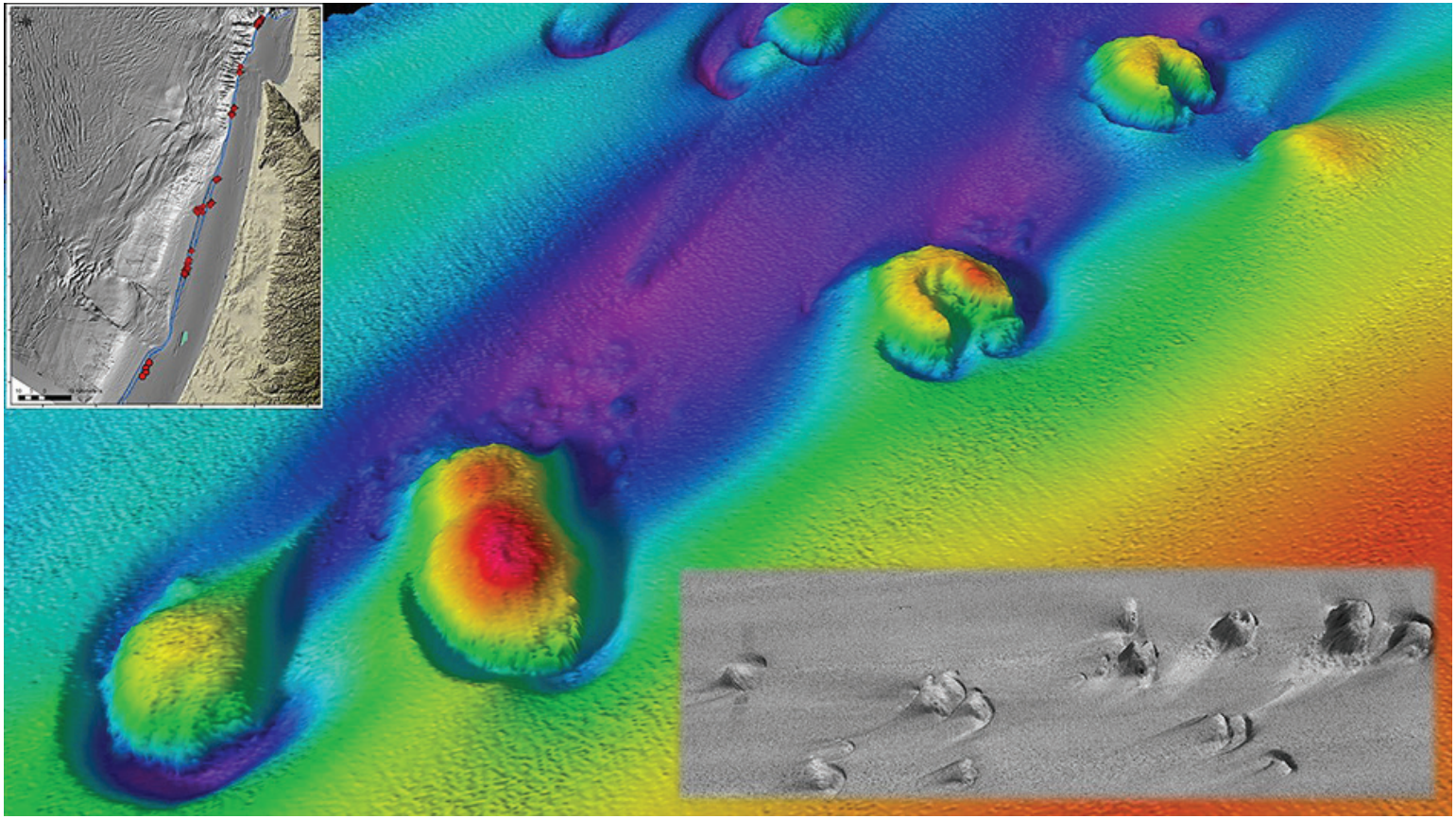
איור 8. אזורים בעלי תצורת אבעבועים (pockmarks) באזור חוף דור אשר בחלקם נמצאו בעלי חיים כימוסינתטיים בעיקר תולעים רב-זיפיות (Lamellibrachia). האיור הוכן עבור חברת נובל אנרג'י וחלקים מהעבודה הוצגו בכנס: המפה המוקטנת מראה את מיקום צברי האבעבועים במרחב הימי [19,20].

בית גידול עשיר בספוגים על רכסי כורכר בעלי מצע קשה זוהו והוספו בעומק 130-90 מטרים מול דור, הרצליה, עתלית וראש כרמל (איור 9)[20,21].

מבני שביט גיאולוגיים ברצועת העומקים 130-90 מ' אותרו ומופו על-ידי חקר ימים ואגמים לישראל באתרים רבים לאורך כל מדף היבשת הישראלי. שמם נובע מצורתם בקרקעית הים המזכירה כוכב שביט במעופו בשל רכס הסלע הקשה וסביבו זנב צלקת גריפה של הסדימנט הרך שמסביבו. מבנים אלה עשירים מאד בבעלי חיים ייחודיים: ספוגים, אלמוגים, תמנונים ועוד, ומוגדרים כבתי גידול ייחודיים (איור 10)[23,24].



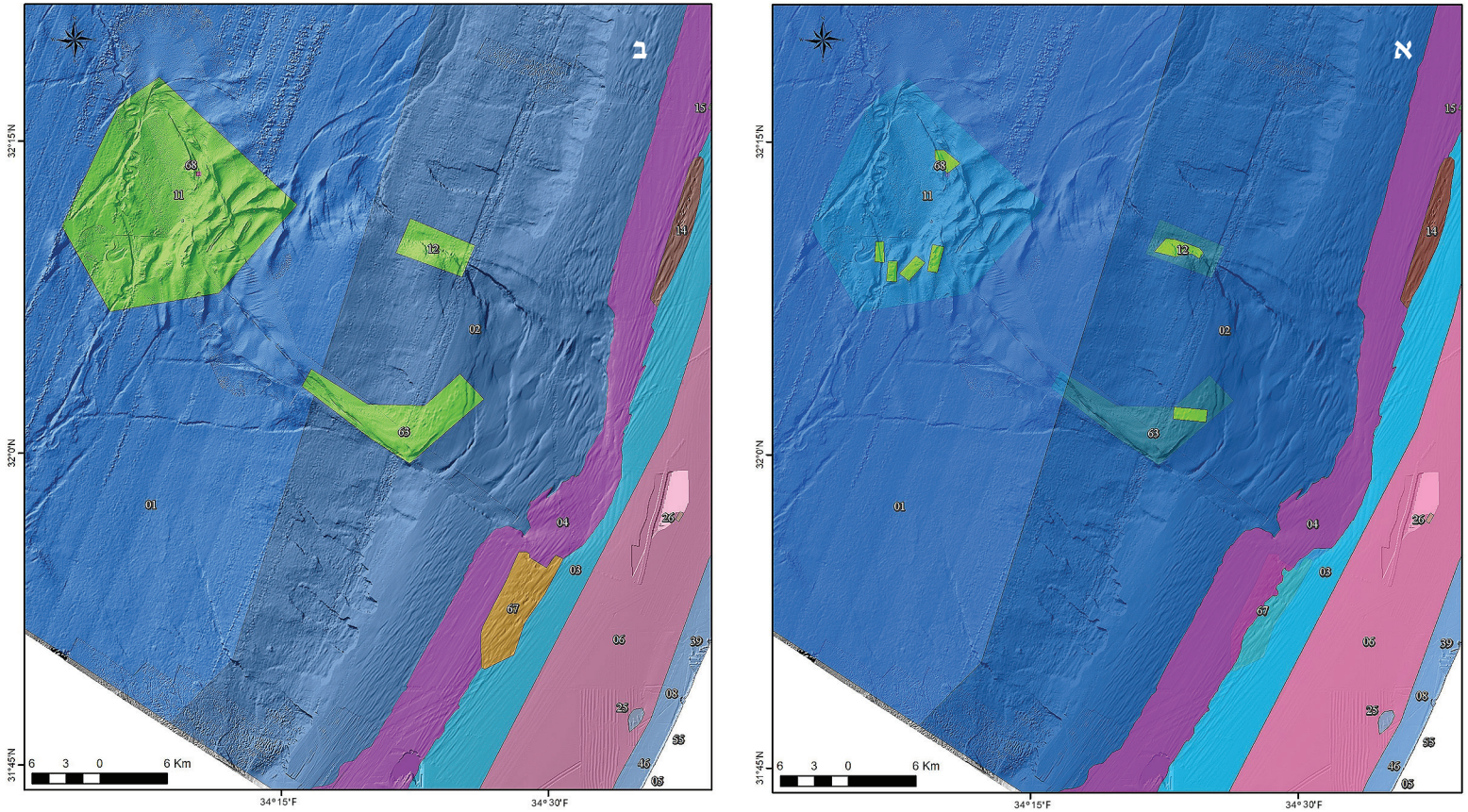
איור 9. אתרים שבהם נמצאו רכסי כורכר עשירים בספוגים (מתוך מחקר מעבדתו של מיכה אילן). ראש כרמל 130-100 מטר, עתלית 120-95 מטר והרצליה 127-92 מטר[21,22].



איור 10. רכסי הכורכר ומבני השביט הנוצרים מצלקות הסחיפה של הסדימנט סביבם. מבנים אלו נתגלו ומופו באתרים רבים ברצועת העומקים 130-90 מ' לאורך כל מדף היבשת הישראלי[23,24].

עדכונים והרחבת בתי הגידול באזור "גלישת פלמחים"

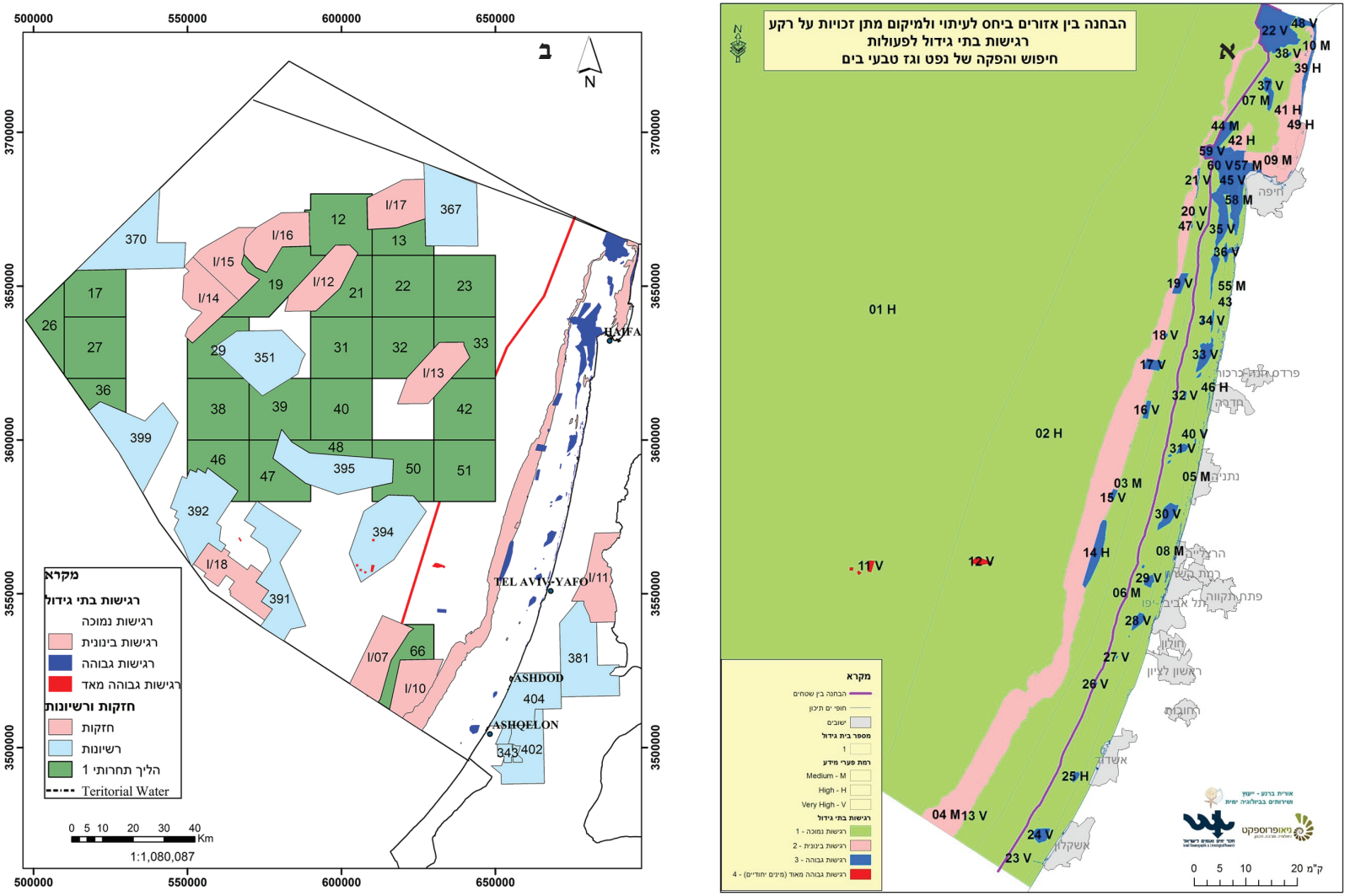
בהסתמך על נתונים שהתקבלו ממספר הפלגות מחקר, שבוצעו במהלך 2019 ו-2020, ועיבוד נתונים חוזר של הפלגות מחקר קודמות, בתי הגידול באזור "גלישת פלמחים" עודכנו בשנת 2021 על-ידי כנרי ותום[22] . בתי הגידול הנוספים במרחב זה עודכנו והוגדרו כבעלי רגישות גבוהה ביותר, לאחר שאותרו 3 אזורים עם מאפיינים יחודיים: 1 – אזור עם אלמוגי עומק על מצע קשה; 2 – אזור עשיר בפוקמרקס (אבעבועים). בחלקו נמצאו נביעות תמלחת בהתאמה לפעפוע גז מתאן רדוד בשילוב ביו-טורבציה. באזור זה נמצאו בריכות תמלחת שמהוות אזורי רבייה לכרישי עומק; 3 – מסלע קרבונטי עם צפיפות קטנה של אלמוגי עומק (איור 11).



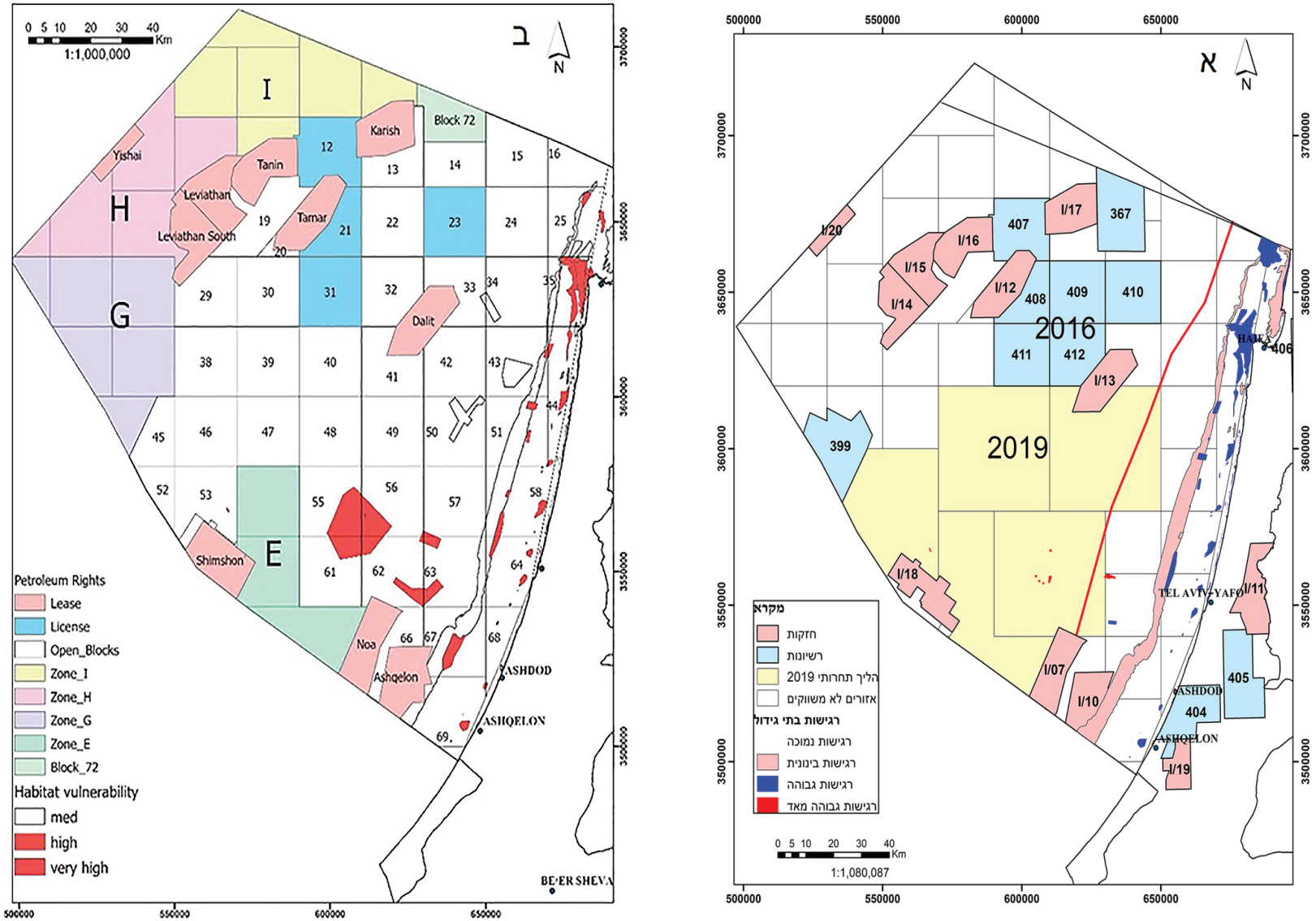
איור 11. מפת בתי הגידול בים העמוק – עדכון 12.2021. א. מיפוי בתי הגידול לפני העדכון, כולל העדכון המופיע בירוק שקוף לשם השוואה. ב. עדכון בתי הגידול לאור עבודת צוות הפרעת פלמחים והממצאים החדשים. שינויים עיקריים: 1. הרחבת השטח של בית הגידול באזור המערבי של גלישת פלמחים לכ-250 קמ"ר; 2. הגדרת בית גידול חדש אשדוד 100 מ' ממזרח לגלישת פלמחים. 3. הגדרת בית גידול המאופיין בקומפלקס בריכות תמלחת הפרעת פלמחים שבו נמצאו אזורי רבייה של כרישי עומק; 4. הגדלת שטח בית הגידול שבדרום גלישת פלמחים לשטח של כ-42 קמ"ר; 5. עדכון מינורי בגבולות בית גידול הצפון מזרחי בגלישה [22]

השפעת הסא"ס והמידע ממקורות שונים על תהליכי קבלת ההחלטות, עיתוי ומיקום מתן זכויות בשיווק בלוקים בתהליכים התחרותיים

מניתוח המרחב הימי שנסקר בסא"ס נמצא כי יש הצדקה להתייחסות שונה לאזור הקרוב לחוף לעומת אזור המרוחק ממנו ולפיכך, הומלץ לתת רישיונות בשטחים הרחוקים כשבעה ק"מ ממערב לחוף, כך שהאזורים שיפורסמו בתהליכים התחרותיים ימוקמו במרחב הימי שממערב לו, לכל הפחות. לאור המלצה זו, בתהליך התחרותי שפורסם בנובמבר 2016 (התהליך התחרותי הראשון) פורסמו 23 בלוקים, כולם במרחק הגדול מ- 22 ק"מ מהחוף (איור 12), ובמרחב הימי שבו



איור 12. א. מפה המדגימה את המלצת מתן זכויות במרחק העולה על קו 7 ק"מ (המסומן בקו עבה סגול) ממערב לחוף; ב. 23 בלוקים שפורסמו בהליך התחרותי הראשון, בנובמבר 2016 , מסומנים בצבע ירוק וממוקמים מערבית לקו 7 הק"מ.



איור 13. א . בצהוב, בלוקים שפורסמו בתהליך התחרותי השני (2019), בתכלת מופיעים בלוקים שניתנו להם רישיונות בתהליך התחרותי הראשון (2016) וכן בלוק 72 שפורסם בתהליך השלישי (2021); ב. מקבצים שפורסמו בתהליך התחרותי הרביעי (2023), בלוק E בירוק בהיר, בלוק G בסגול, בלוק H בורוד ובלוק I בצהוב. בתכלת רישיונות חיפוש תקפים, בוורוד חזקות תקפות ובאדום, בתי גידול ברגישות גבוהה .

לפי העיקרון שבהמלצות הסא"ס, כל האזורים שפורסמו בכל התהליכים התחרותיים, שפורסמו גם לאחר ההליך התחרותי הראשון, ממוקמים במרחב הימי המרוחק מקו החוף, כשרובם במרחק העולה על 20 ק"מ, זאת חרף הימצאותם של משאבים מוכחים גם באזורים הממוקמים בסמוך יותר לחוף, שנמצאו בעבר וטרם פותחו. בתהליך התחרותי השני, לאחר פרסום הסא"ס, בשנת 2019 שווקו 19 בלוקים, בתהליך השלישי בשנת 2021 פורסם בלוק בודד (מספר 72) ובתהליך התחרותי הרביעי שפורסם בשנת 2023 פורסמו 20 בלוקים, חלק מהשטחים חזרו במספר תהליכים תחרותיים כיוון שלא התקבלו להם הצעות (איור 13).

באיור 13 ב' ניתן לראות אזורים נוספים המסומנים כבתי גידול ברגישות גבוהה מאוד, לאלה שמופו ב-2016 (איור 12, איור 13 א'), ולכן לא שווקו בהליך התחרותי הרביעי בשנת 2023. זאת כיוון שהסא"ס הוא "תהליך נושם", המתעדכן באופן קבוע, תוך בקרה וניטור של ההשפעות על הסביבה ומעקב אחר יישום ממצאי הסקר בתהליך קבלת ההחלטות ואופן יישומן, וכחלק מהמלצה נוספת בסא"ס שהתמקדה בסגירת פערי מידע.

בהתאם להמלצה נוספת בסא"ס, בעת הענקת רישיון החיפוש ולאחריו, במתן אישורים לסקרים, לקדיחה ולהקמת תשתיות משרד האנרגיה והתשתיות, מנחה את מבקשי רישיון החיפוש בדבר רגישות בתי הגידול המצויים בתחום הרישיון, ההשפעות האפשריות על רמת הפיתוח שתתאפשר והאמצעים שיידרשו והמגבלות שיוטלו לצורך שימור בתי הגידול.

שינויים בהקמת תשתיות הפקה לשמירת הסביבה הימית

בהתאם להמלצות הסא"ס הנחת צנרת במרחק הקטן מ-150 מטרים מבית גידול שהוכח שהינו רגיש, תלווה בהאטה של העבודות, בהנחה איטית וזהירה תוך ניטור מצב בתי הגידול תוך כדי העבודה וכן לאחריה.

במהלך סקר רקע שהוכן על ידי חברת אנרג'יאן זוהה רכסי כורכר בעומק של 126 מטרים בנתיב הצינור המתוכנן. החברה ערכה סקרים ויזואליים באמצעות ROV, זיהתה בתי גידול רגישים והעתיקה את תוואי הצינור לשטח שבין הרכסים [19]. חברת נובל זיהתה במהלך סקר רקע בתוואי המתוכנן להנחת צנרת ההולכה משדה לוויתן לאסדת ההפקה, אזור נרחב המכיל אבעבועים (פוקמארקס). בבחינה מפורטת באמצעות ROV אותרו מספר אבעבועים המכילים אוכלוסיות כמוסינטטיות. לאור הממצאים הממונה על עניני הנפט הנחה את החברה להזיז את הצנרת ולהאט את מהירות הנחת הצנרת תוך כדי ניטור של אותם אבעבועים. בניטור שבוצע לאחר ההנחה של הצנרת נמצא כי בתי הגידול לא נפגעו[19].

השפעות נוספות במדיניות הממשלה ומגזרים נוספים

שימוש בידע והמידע שנוצר בסא"ס על ידי בעלי עניין בממשלה, במגזר הפרטי והמגזר השלישי.

תכנון המרחב הימי

במקביל להכנת הסא"ס שתי קבוצות עבודה, האחת של מינהל התכנון והשנייה בטכניון, החלו בהכנת תכנון למרחב הימי של ישראל והשתמשו בסא"ס כבסיס להבנת המערכות האקולוגיות ומיקומן במרחב וקביעת השימושים במרחב הימי.

1) מסמך מדיניות למרחב הימי של ישראל – ים תיכון – מינהל התכנון

מינהל התכנון השלים הכנת מסמך מדיניות במאי 2020, אשר נערך על ידי צוות תכנון רב-תחומי, הכולל מומחים מחו"ל בשיתוף ועדת היגוי רחבה הכוללת משרדי ממשלה וקשת רחבה של גורמים ובעלי עניין. הכנת המסמך כללה גם שיתוף ציבור, זאת כחלק ממגמה עולמית של הכנת תכניות ומסמכי מדיניות להסדרה ותכנון של המרחב הימי. המסמך עודכן, לאחר עתירה, ב-2022 למסמך חזון ומדיניות למרחב הימי של ישראל – ים תיכון[25].

2) התוכנית הימית לישראל - הטכניון

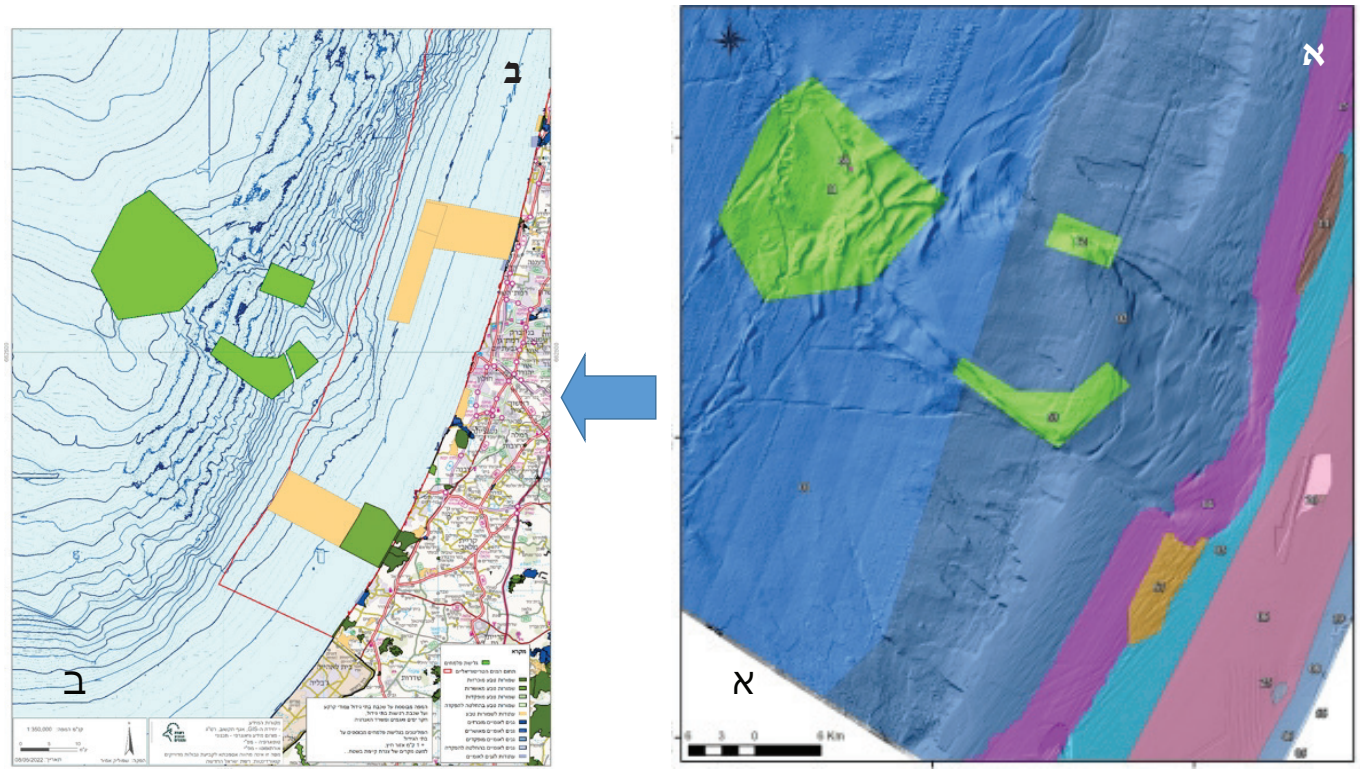
התוכנית הוכנה על ידי קבוצת חוקרים ומתכננים במרכז לחקר העיר והאזור בפקולטה לארכיטקטורה בטכניון, רב תחומי הכולל מומחים מחו"ל, אשר נעזרו במיפוי בתי הגידול שהוכן במסגרת הסא"ס, לגיבוש התוכנית שהושלמה, לאחר הליך של שימוע ציבורי בנובמבר 2015[26].

הסא"ס מהווה בסיס ידע לקביעת שמורות ימיות במים הריבוניים ואזורים ימיים מוגנים במים הכלכליים.

האכרזה על מרחב "גלישת פלמחים" כאזור מוגן בשטח של 450 קמ"ר על ידי השרה להגנת הסביבה ורשות הטבע והגנים (רט"ג) בספטמבר 2022 (איור 14), בוצעה על בסיס עדכון בתי הגידול שבוצע בסא"ס בסוף 2021, שבו הורחבו בתי הגידול הרגישים במרחב גלישת פלמחים, והמגבלות שמשרד האנרגיה והמים הטיל על חיפוש והפקת נפט וגז טבעי במרחב. זהו האזור הראשון במרחב המים הכלכליים הבלעדיים של ישראל שהוכרז כאזור מוגן בשל ערכי הטבע הייחודיים שמופו בו.

הקמת מרכז מידע ביוטי בחיא"ל

באוגוסט 2023 פורסמה לציבור מערכת אינטגרטיבית של מידע ביוטי מן הסביבה הימית של ישראל[27] הכוללת את מפת בתי הגידול המעודכנת, בנוסף לכמות גדולה של נתוני דיגום ביוטי ומפות עזר רבות. מערכת זו מנוהלת על-ידי חיא"ל ומשמשת ככלי מרכזי לשמירה וחשיפה לציבור של מידע ביוטי ואקולוגי עדכני במרחב הימי של ישראל וזמינה לציבור הרחב בדף ייעודי באתר חיא"ל [28] וכל עדכון עתידי של מפת בתי הגידול ומידע ביוטי או מידע רלבנטי אחר יהיו זמינים באמצעות מערכת זו[27].



איור 14. א. עדכון בתי הגידול באזור גלישת פלמחים כפי שנעשה בדצמבר 2021 כחלק מעדכוני הסא"ס ב. מפת האכרזה מיום 21 בספטמבר 2022 על אזור גלישת פלמחים כאזור מוגן.

סיכום ומסקנות

בפרק זה מוצגת מדיניות משרד האנרגיה והתשתיות של פיתוח משאבי הגז הטבעי והנפט תוך שמירה על הסביבה הימית וכן, מדיניות קבלת החלטות מבוססת מדע. מעת ביצוע סקר הרקע בשנים 2012-2013 הידע והמידע על הים העמוק הלכו וגדלו. מקורות המידע נשענו בעיקר על הצורך בבסיס מדעי וסביבתי לצד פיתוח משאבי הגז הטבעי, הדרישות הרגולטוריות לסקרים וניטור המתבצעים על-ידי חברות הגז והנפט, סקרים וניטור לאומי שנערכים על-ידי חיא"ל ומחקרים המתבצעים על-ידי חוקרים מהאקדמיה, שחלקם נתמך על-ידי משרד האנרגיה והתשתיות.

המידע שהצטבר הוטמע, כחלק מתהליך אסדרתי, בהנחיות הסביבתיות של חיפוש והפקה של נפט וגז טבעי בים והיווה גם את בסיס הידע המדעי, שתמך והשפיע על קבלת ההחלטות בפיתוח משאבי הגז הטבעי בים וכן בקבלת החלטות בנושאים נוספים כגון תכנון הים (מינהל התכנון והטכניון), אכרזה על אזורים עם ערכי טבע מוגנים במים הכלכליים ואכרזה על שמורות ימיות במים הריבוניים על-ידי רט"ג, בסיס לגיבוש מדיניות והכנת סא"ס לפיתוח אנרגיות מתחדשות בים. לאחרונה הוחלט במשרד האנרגיה והתשתיות על הכנת סא"ס חדש להפקת אנרגיה מתחדשת במרחב הימי של ישראל, כדי להבין את השפעת הפיתוח על הסביבה הימית ולנקוט בפעולות הנדרשות כדי להגן על הסביבה הימית ולשמר את המגוון הביולוגי שבה. הסא"ס הנוכחי ובתי הגידול שבו יהוו בסיס מדעי ראשוני להכנת הסא"ס החדש.

רשימת מקורות

1. משרד האנרגיה והתשתיות. הנחיות סביבתיות לפעולות חיפוש והפקה של נפט וגז טבעי בים. משרד האנרגיה והתשתיות. https://www.gov.il/he/pages/enviromental_sea_drill_instructions.
2. חרות, וחובריו. סקר רקע סביבתי באזור המים הכלכליים של ישראל בים התיכון, היבטים הקשורים בפעילויות חיפוש וקידוח נפט וגז בים – דוח סופי. 2015. חקר ימים ואגמים לישראל המכון הגיאולוגי לישראל, GS34/2014 H61/2014. (2015).
3. משרד האנרגיה והתשתיות. סקר אסטרטגי סביבתי לחיפוש ולהפקה של נפט ושל גז טבעי בים. דוח סופי לאחר הערות הציבור. (אוקטובר 2016). https://www.gov.il/he/departments/guides/enviromental_info?chapterIndex=3.
4. תום, מ., וכנרי, מ. ניטור ים עמוק בשנים 2017-2018, בסיס מידע ביו-גאוגרפי סא"ס. חקר ימים ואגמים לישראל, H16/2019. (2019).
5. טיבור, ג., וחובריו. ניטור ים עמוק בשנים 2017-2018 ניטור שלמות הקרקעית/סדימנטולוגיה. חקר ימים ואגמים לישראל, H13/2019. (2019).
6. סילברמן, י. וחובריו. ניטור ים עמוק בשנת 2017, ניטור איכות סדימנטים בים העמוק בשנת 2017. חקר ימים ואגמים לישראל, H25/2019. (2019).
7. רילוב, ג. ניטור ים עמוק בשנים 2017-2018, ניטור אקולוגי של רכסים עמוקים. חקר ימים ואגמים לישראל, H15/2019. (2019).
8. גטרמן, א. י. וחובריו. ניטור ים עמוק בשנים 2017-2018, היבטים פיזיקליים בעמודת המים. חקר ימים ואגמים לישראל, H20/2019. (2019).
9. שטרן, נ. ניטור ים עמוק בשנים 2017-2018, ניטור חי על המצע. חקר ימים ואגמים לישראל, H18/2019. (2019).
10. לובינבסקי, ה. ניטור ים עמוק בשנים 2017-2018, ניטור חי תוך המצע. חקר ימים ואגמים לישראל, H17/2019. (2019).
11. סילברמן, י. וחובריו. ניטור ים עמוק בשנת 2017, ניטור מתכות כבדות ומיקרו מזהמים אורגניים ברקמות החי על המצע בים העמוק בשנת 2017. חקר ימים ואגמים לישראל, H23/2019. (2019).
12. רהב, א. וחובריו. ניטור ים עמוק בשנים 2017-2018, היבטים כימיים וביולוגיים בעמודת המים. חקר ימים ואגמים לישראל, H19/2019. (2019).
13. סילברמן, י. וחובריו. ניטור ים עמוק בשנת 2018, ניטור איכות סדימנטים בים העמוק בשנת 2018. חקר ימים ואגמים לישראל, H44/2019. (2019).
14. סילברמן, י. וחובריו. ניטור ים עמוק בשנת 2018, ניטור מתכות כבדות ומיקרו מזהמים אורגניים ברקמות החי על המצע בים העמוק בשנת 2018. חקר ימים ואגמים לישראל, H48/2019. (2019).
15. Hall, J.K. et al. A new multibeam bathymetric map of the Israeli exclusive economic zone: Israel Oceanographic and Limnological Research ,IOLR-H24/2017.(2017) .
16. Kanari, M. et al. Sediment transport mechanisms revealed by quantitative analyses of seafloor morphology: New evidence from multibeam bathymetry of the Israel exclusive economic zone. *Mar. Petrol. Geolo.* **114,** 104224 (2020).
17. גבירצמן, ז. וחובריו. גורמי סיכון גיאולוגיים במרחב הימי של ישראל: מידע גיאולוגי לתכנון דוח סופי מוגש למשרד האנרגיה. המכון הגיאולוגי לישראל, (2023) https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/gvirtzman-et-al-2023.
18. סקרים סביבתיים ביוזמת משרד האנרגיה. משרד האנרגיה והתשתיות. [צוטט: 02 06 2024.] https://www.gov.il/he/pages/enviromental_info?chapterIndex=3.

19. משרד האנרגיה, אגף סביבה, מינהל אוצרות טבע. עדכון הסקר האסטרטגי הסביבתי לחיפוש ולהפקה של נפט ושל גז טבעי בים, דוח דו-שנתי (דצמבר 2018). משרד האנרגיה והתשתיות, מדינת ישראל, (2018). https://www.gov.il/BlobFolder/guide/enviromental_info/he/SEA_2018_update.pdf.

20. Gadol, O. Lifshiz, I. Bialik, O. Zeidner, G. & Makovsky, Y. Multi-scale geophysical observation of seafloor pockmarks along the base of the southeastern margin of the Levant.14 th International Conference on Gas in Marine Sediments (GIMS 14). (Haifa, Israel2018) .

21. Idan, T. Shefer, S. Feldstein, T. Yahel, R. Huchon, D. & Ilan, M. Shedding light on an East-Mediterranean mesophotic sponge ground community and the regional sponge fauna. *Medit. Mar. Sci.* **19**:4-106 (2018).

22. כנרי, מ. ותום, מ. עדכון מפת בתי הגידול – דצמבר 2021 עדכון בתי גידול רגישים בהפרעת פלמחים ובסביבתה. משרד האנרגיה והתשתיות חקר ימים ואגמים לישראל, 47/2021H. (2021).

23. Kanari M., Giladi, A .Spatial analysis of underwater comet structures along the Israeli shelf reveals trends in the sediment transport system .Saint-Gilles-Les-Bains, La Réunion, France. International Symposium on Marine Geological and Biological Habitat Mapping (GeoHab '23) (2023).

24. כנרי, מ. ותום, מ. עדכון מפת בתי הגידול – ינואר 2024: שרשרת מצוקי הכורכר בעומק של 100 מטר, בתי גידול פלגיים ומפות עזר, מוגש למשרד האנרגיה והתשתיות, ינואר 2024. חיא"ל. משרד האנרגיה והתשתיות חקר ימים ואגמים לישראל H01/2024. (2024).

25. מינהל התכנון. מסמך חזון ומדיניות למרחב הימי של ישראל- ים תיכון (2022). https://www.gov.il/he/pages/sea_policy_suggest.

26. הטכניון. התוכנית הימית לישראל . https://msp-israel.net.technion.ac.il .

27. Tom, M. Lubinevsky, H. & Kanar, M. Integrative data system for monitoring biota and natural habitats in the Israeli Eastern Mediterranean marine environment. Environ. Monit. Asse. **195**, 1068 https://doi.org/10.1007/s10661-023-116.

28. חקר ימים ואגמים לישראל.
https://experience.arcgis.com/experience/40e86605ff4d4e5096ed2c901fec2a2f.ISRAMARBIOdatabase

משטחי אלמוג רך ססגונית המפריך (*Dendronephthya hemprichi*), בים תיכון מול מעגן מיכאל, בעומק של 42 מטר. באחד מאתרי הניטור ארוך הטווח של הריף הסלעי המבוצע על ידי תחנת מוריס קאהן לחקר הים. צילום: חגי נתיב.

5 תפקידן ותפקודן של שמורות הטבע הימיות בים התיכון הישראלי: תובנות מסקרי הביובליץ הימי בשנים 2015-2023

רותי יהל[1], אורי פריד-לנדאו[2,1], מאי לצרוס[2], רעי דיגה[3,2], עדנה גוק[1]

[1] חטיבת המדע, רשות הטבע והגנים
[2] בית הספר לזואולוגיה, אוניברסיטת תל אביב
[3] בית הספר למדעי הים, המרכז האקדמי רופין

ruthy@npa.org.il,
orif@npa.org.il,
mai.lazarus@gmail.com,
diga.boker@gmail.com,
ednag@npa.org.il

תקציר

הימים והאוקיינוסים בעולם מצויים בתהליך הידרדרות עקב השפעתן הגוברת של פעילויות אנושיות ונגזרותיהן. לשמורות טבע ימיות תפקיד מרכזי בשימור ושיקום מערכות אקולוגיות באמצעות הגנה על בתי גידול ועל החי והצומח המאכלסים אותם. השמורות משמשות גם ככלי לאישוש אוכלוסיות דגים, בדגש על מינים מסחריים. בים התיכון הישראלי הוכרזו מספר שמורות טבע ימיות, מהן כאלה שקודמו בשנים האחרונות. החל מ-2015 בוצעו מדי שנתיים סקרים ויזואליים של דגים, חסרי חוליות ואצות, בארבע שמורות טבע ימיות צפוניות בעלות קרקעית סלעית בים התיכון הישראלי בשתי עונות דיגום, אביב וסתיו.

תוצאות סקרי הדגים מעידות על הצלחתה של שמורת ראש הנקרה-אכזיב בהגנה על מיני דגים מסחריים בכלל, ועל מיני הדקרים, מינים שהם סמנים ביולוגיים לבריאות המערכת, בפרט. נצפתה עלייה לאורך השנים בשכיחות ובביומסה של מיני הדקרים ושל מינים מסחריים בכלל, וכן עלייה במספר הפרטים הגדולים בשמורות ראש הנקרה-אכזיב, שקמונה וגדור.

תוצאות הסקרים מעידות גם על הבדלים במבנה חברת הדגים בין האתרים השונים, ובעיקר בין האתרים הצפוניים (שקמונה וראש הנקרה-אכזיב) לאתרים הדרומיים (דור-הבונים וגדור), בין עומקי הקרקעית ועונות השנה. מתוך 83 מיני הדגים שנצפו בסקרים, 25% הינם מינים פולשים, והפרטים השייכים להם מהווים בסה"כ 44% משכיחות הפרטים הכללית ו-47% מהביומסה הכללית. מתוך המינים הפולשים בולטים בשכיחותם הגבוהה מיני הסיכנים הפולשים: סיכן משויש וסיכן הודי, שאוכלוסיותיהם כבר מבוססות לאורך חופי הים התיכון הישראלי.

מבין האורגניזמים בחברת הקרקעית (הבנתוס – חסרי חוליות ישיבים ואצות) נמדד עושר מינים גבוה יותר בתוך השמורות לעומת שטחי הביקורת בספוגים, אצטלנים ואצות. נצפו הבדלים גם בהרכב חברת הספוגים, בשכיחות ובאחוזי הכיסוי של הקרקעית בין אתרים שונים ובין עומקים שונים, אולם לא נצפו הבדלים במבנה החברה בין שטחי השמורות לשטחי הביקורת עבור קבוצות טקסונומיות נבחרות.

הממצאים מדגישים את חשיבותן של שמורות הטבע הימיות ככלי מרכזי לשימור ושיקום המערכות האקולוגיות הימיות בישראל. ניטור קבוע, ובפרט ניטור ארוך טווח, מהווה כלי חיוני להערכת מצבם של השטחים המוגנים ולמדידת השפעותיהם על המערכות האקולוגיות. באמצעות ניטור מתמשך ניתן לזהות מגמות לאורך זמן, להעריך את אפקטיביות השמורות ולספק מידע מבוסס שיסייע בקבלת החלטות לניהול מיטבי של השטחים המוגנים.

מבוא

הימים והאוקיינוסים בעולם מצויים בתהליך הידרדרות עקב השפעתן הגוברת של פעילויות אנושיות כגון דיג, הרס פיזי של בתי גידול, זיהום, שינויים אטמוספריים ואוקיינוגרפיים גלובליים ופלישת מינים זרים[1-4]. מלבד הפגיעה הברורה במערכת האקולוגית הימית על כל מרכיביה, מצטמצמים גם שירותי המערכת שהיא מספקת לאדם[5]. שירותים אלו תלויים בקיומן של מערכות אקולוגיות בריאות[6]. על מנת לשמור על משאבי טבע הנחוצים לקיומנו ועומדים לרשותנו, עלינו להגן על הסביבה הימית. שמורות טבע ימיות הן אזורים בעלי גבולות מוגדרים אשר בשטחן מוגנים הסביבה הפיזית, וכל האורגניזמים החיים בה, באמצעות איסור פעולות פוגעניות כגון דיג, חקלאות ימית, חפירה, כרייה וקידוחים, הזרמת מזהמים ועוד. לעומת זאת, פעילויות שהשפעתן מועטה כגון שיט לא מנועי, שחייה וצלילה מותרות בשמורות הימיות בישראל. השמורות מאפשרות לשמר ולשקם בתי גידול על כלל מרכיבי מארג המזון המתקיים בהם ואת התפקוד האקולוגי של השטח[7] ומהוות כלי מרכזי להגנה ולשיקום של מינים ספציפיים[8]. הצלחתן של שמורות ימיות בעולם שבהן אסורה כל פעילות של ניצול או פגיעה במשאבי טבע, בהשוואה לאזורים שנמצאים מחוץ לשמורות, מתבטאת בעלייה מובהקת בביומסה כללית, צפיפות פרטים, גודל פרטים ועושר מינים[7]. בתוך שמורות שבהן מתבצעת אכיפה על הדיג בים התיכון נצפתה עלייה בצפיפות ובביומסה של דגים, במיוחד של מינים בעלי חשיבות מסחרית גבוהה ו/או כושר תנועה מוגבל יחסית[8]. דגים אינם האורגניזמים היחידים המושפעים מההגנה שמספקות שמורות ימיות. בשמורת ראש הנקרה-אכזיב מצוי המין כפן גושמני *(Scyllarides latus)*, סרטן ארוך בטן, טורף בעל ערך מסחרי גבוה וכושר תנועה נמוך יחסית. בעשורים האחרונים מין זה הפך נדיר בים התיכון עקב דיג יתר[9] וכיום מוגדר בישראל כערך טבע מוגן. במחקר נמצא כי שכיחות פרטי הכפן בשמורה הייתה גבוהה פי שישה בממוצע בתחומי השמורה לעומת שטח הביקורת שמחוץ לה. אורך הגוף של הפרטים בשמורה היה גבוה יותר באופן מובהק בכ-8% מזה של הפרטים שנמדדו בשטח הביקורת[10].

ממצאים אלה ממחישים את החשיבות של ניטור אקולוגי המאפשר לעקוב אחר תפקוד השמורות, שינויים בהרכב המינים, מצבן של אוכלוסיות רגישות ולפיכך לבצע התאמות נדרשות בניהול השמורות.

מבין מדדי התפקוד האקולוגיים המקובלים בעולם עבור שמורות ימיות, ישנם כאלו הנחשבים לסמנים עיקריים להצלחתן, כגון עלייה בביומסה הכללית של דגים בשמורה ובשכיחות מינים מסחריים הנתונים ללחצי דיג משמעותיים, במיוחד במינים טורפים בעלי ערך מסחרי גבוה[11], דוגמה למינים כאלו הם מיני דגים מתת-משפחת הדקרים הנחשבים כסמנים לתפקוד שמורות ימיות ברחבי העולם הודות למספר מאפיינים: מינים אלו נחשבים טורפי-על במערכות האקולוגיות הים-תיכוניות ולכן יש להם חשיבות אקולוגית רבה במערכת[12]; הדקרים הם מינים טריטוריאליים החיים לבד או בקבוצות קטנות ונוטים להישאר במקומות יחסית קבועים[13] ולכן קל יותר לתעד אותם בסקרים ויזואליים ולהעריך את גודלי האוכלוסייה שלהם; הדקרים הינם מיני מטרה מבוקשים מאוד לדיג בשיטות מגוונות, הן מסחריות והן ספורטיביות. לדקרים ערך מסחרי גבוה ולכן הם נדוגים באופן סלקטיבי. הם רגישים לדיג וההשפעה של הדיג על רבייתם ועל גודל האוכלוסיות שלהם גבוהה. הדקרים הם מינים מאריכי חיים ולוקח להם כמה שנים להגיע לגודל רבייה, אשר משתנה בין מיני הדקרים השונים. הם מתחילים את חייהם כנקבות ובהמשך החיים יהפכו לזכרים[13].

לשמורות טבע ימיות השפעה משמעותית על מבנה חברת הדגים כולה, שכן שמורות לרוב משפרות את מצב האוכלוסיות של מיני דגים בעלי ערך מסחרי, בעיקר טורפים, וכך מינים המשמשים כטרף מושפעים מהשמורה באופן בלתי ישיר[14].

פעולות לשמירת הטבע בים

במקביל לקידום שמורות הטבע הימיות בשני העשורים האחרונים, התרחשו תמורות נוספות בהגנה על הים בישראל: תיקון תקנות הדיג: בשנת 2016 אישרה ועדת הכלכלה של הכנסת תיקון לתקנות הדיג בהתייחסה לדיג המסחרי והספורטיבי[15]. מטרת התקנות החדשות היא לשפר את מצב ענף הדיג בישראל באמצעות ניהול מקיים של משאב הדגה. השינויים המרכזיים שחלו בתקנות הדיג המסחרי כללו, למשל, הגבלות על דיג בספינות מכמורת, כולל איסור מוחלט לדוג בספינות מכמורת בחלקה הצפוני של ישראל, איסור לדוג בשיטה זו באזורים סלעיים במים הריבוניים של ישראל ואיסור דיג בספינות מכמורת בעונת הגיוס. בנוסף חל איסור על דיג חופי בעונת הרבייה, איסור מוחלט על דיג באמצעות מתקני נשימה מלאכותיים לצלילה והחלת מכסות שלל יומיות. אכיפתן של התקנות החדשות החלה בפועל בקיץ 2018 עם כניסתה לפעולה של היחידה הימית של רשות הטבע והגנים.

יחידה זו הוקמה לאחר שנים רבות שבהן כמעט ולא נאכפו תקנות הדיג. בשנת 2018 הוסמכה רשות הטבע הגנים על-ידי משרד החקלאות לאכוף את פקודת הדיג שעליה אחראי אגף הדיג. עבודת פיקוח ואכיפה אינטנסיבית של פקודת הדיג (כולל תקנות הדיג החדשות משנת 2016) החלה כאמור בקיץ 2018. כיום מונה מערך הפיקוח הקבוע בים התיכון 12 פקחים ימיים ו-4 סירות פיקוח, וכן מטה המנהל את פעילות היחידה. יחד עם פעולות הפיקוח והאכיפה של תקנות הדיג, שאותן מתקן אגף הדיג במשרד החקלאות וביטחון המזון, עוסקים פקחי היחידה הימית בניהול השמורות הימיות המוכרזות בים התיכון בפיקוח על ממשקי השמורות (כולל אכיפת איסור הדיג בהתאם לתקנון של כל שמורה המגדיר את פעולות הדיג המותרות והאסורות בה) וכן באכיפת חוקי שמירת הטבע (כגון תקנות ערכי טבע מוגנים) גם מחוץ לשטחי השמורות. איסור דיג בחכות מהחוף בשמורת טבע ימית ראש הנקרה-אכזיב: החל מאפריל 2017 חל איסור דיג באמצעות חכה מהחוף בשמורה, למעט בחלקה הדרומי של השמורה.

עדכון רשימת ערכי טבע מוגנים: בשנת 2019 עודכנו רשימות המינים המוגנים בישראל (אכרזת גנים לאומיים, שמורות טבע, אתרים לאומיים ואתרי הנצחת ערכי טבע מוגנים, התשס"ד, 2004). לרשימה נוספו, למשל, כל מיני הספוגים, עשבי-ים, מיני סרטנים וכן מספר מיני דגים בים התיכון. מאוחר יותר הוכרז גם המין דקר אלכסנדרוני (*Epinephelus costae*) כערך טבע מוגן.

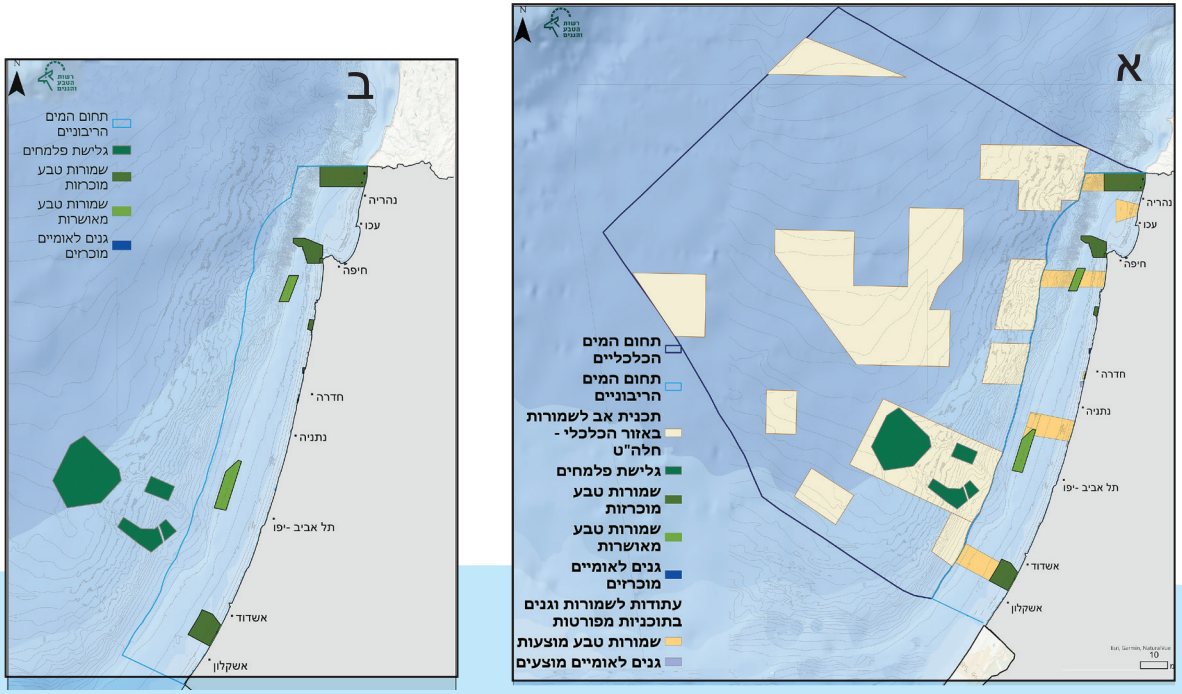
שמורות טבע ימיות בישראל

מאמצע שנות ה-60 ועד ראשית שנות ה-2000 הוכרזו בישראל שבע שמורות ימיות קטנות ששטחן הכולל היווה כרבע אחוז משטחה הימי של ישראל בים התיכון, והן השתרעו ברובן מקו החוף ועד לכמה מאות מטרים מערבה לתוך הים. שמורות אלה הגנו על מרבית האיונים מול חופי ישראל ועל בתי הגידול של אזור הגאות והשפל ושל סביבת המים הרדודים, אך לא ייצגו את כל בתי הגידול הקיימים בסביבה הימית. עקב העלייה בהיקפי הפעילות הכלכלית בים ובעוצמת האיומים על הסביבה הימית התחזקה ההבנה, הן בקרב ארגוני סביבה והן במוסדות התכנון והשלטון, כי יש צורך לנקוט בפעולות לשימור של הסביבה הימית בכלל ושל ערכי הטבע ובתי הגידול הימיים בפרט[16-19].

תוכנית-האב לשמורות ימיות הוכנה על-ידי רשות הטבע והגנים[16]. התוכנית נסמכת על פרוטוקול אמנת ברצלונה לשמירה על הים התיכון והעקרונות המופיעים בנושא "אזורים מוגנים במיוחד והמגוון הביולוגי בים התיכון"

Barcelona Convention Protocol concerning Specially Protected Areas and Biological) Diversity in the Mediterranean, 1995). עקרונות אלו כוללים הגנה על חלקים מייצגים של כלל בתי הגידול הימיים בהיקף שטח כולל של 30% עד שנת 2030 במים הריבוניים והכלכליים. יעד מחודש זה הורחב ועודכן על-ידי אמנת ברצלונה ואמנת המגוון הביולוגי של האו"ם (Convention on Biological Diversity, CBD) שבעבר הציבו יעדי השימור של 10% מכלל השטח הימי בלבד.

מדיניות כוללת לתכנון השטח הריבוני של הים התיכון הישראלי פורסמה בשנת 2020 על-ידי מינהל התכנון, וסימנה 8.6% משטח המים הריבוניים כאזורי חיפוש לשמורות טבע ימיות. בהתאם לתוכנית האב ולמסמך המדיניות מקדמת רשות הטבע והגנים, בשיתוף עם החברה להגנת הטבע וארגוני סביבה נוספים, הכרזת שמורות טבע ימיות (איור 1). כיום (2024) משתרעות שמורות הטבע המוכרזות רק על כ-5.7% משטח המים הריבוניים של ישראל בים התיכון ו-2.3% משטח המים הכלכליים. פרק זה מציג את תוצאות הסקרים שנערכו בשנים 2015-2023 בארבע שמורות טבע ימיות סמוכות לקו החוף במרכז וצפון הארץ: ראש הנקרה-אכזיב, שקמונה, דור-הבונים וגדור, ובשטחי ביקורת סמוכים להן, בהתייחס למאפייני חברת הדגים – במיוחד מינים בעלי ערך מסחרי, חסרי החוליות והאצות על גבי המצע הסלעי באתרים שנסקרו[20-22].



איור 1. א. שמורות הטבע המוכרזות, המאושרות והמוצעות כיום במים הריבוניים, וכן הצעת החברה להגנת הטבע לאזורים ימיים מוגנים במים הכלכליים של ישראל. ב. שמורות הטבע, הגנים הלאומיים והאזורים הימיים המוגנים המוכרזים והמאושרים בים התיכון הישראלי. כל הגנים והשמורות נמצאים בתחום המים הריבוניים של ישראל מלבד גלישת פלמחים במימיה הכלכליים.

סקרים

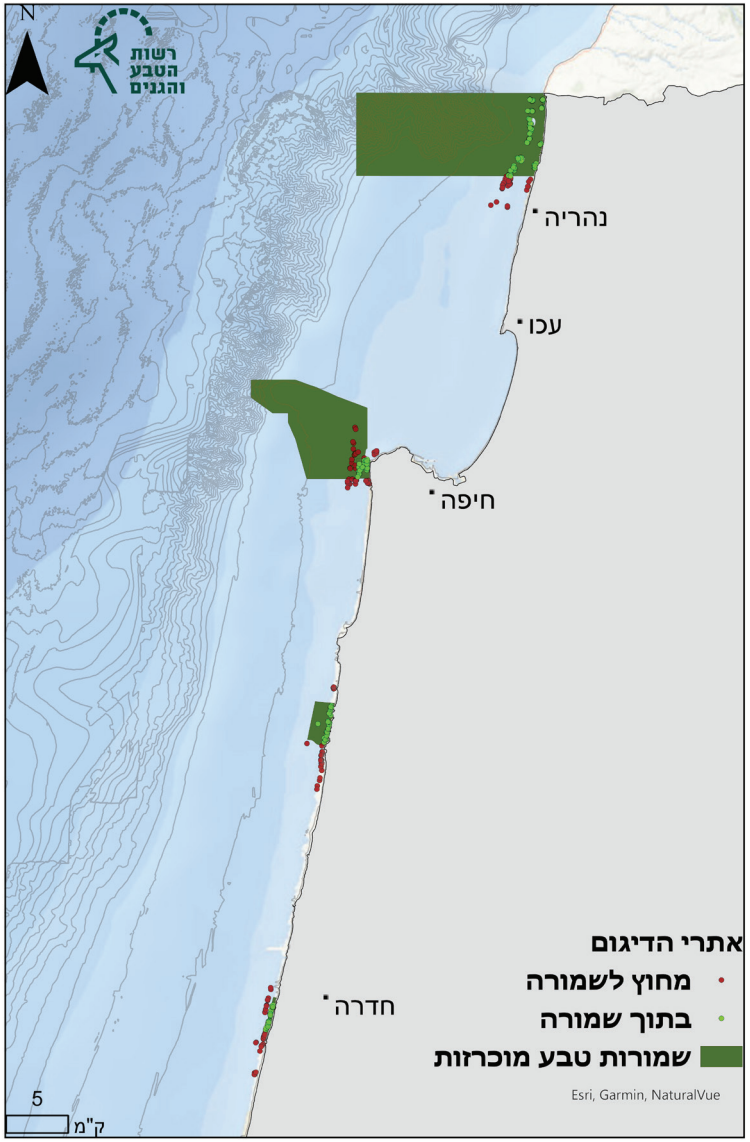
סקרי הניטור של שמורות הטבע הימיות נועדו לבחון האם שמורות הטבע הימיות המוכרזות כיום מגינות על חברת החי והצומח בשטחן, ולהעריך, האם הן תורמות לאישוש המערכת האקולוגית בים גם מעבר לגבולותיהן. לסקרים הוגדרו ארבע מטרות כלליות: (1) ליצור רשימות מצאי למינים המצויים בשמורות טבע ימיות ומחוץ להן, (2) לתאר את הדגמים המרחביים של חברות החי והצומח הימיים עד לעומק של כ-25 מ' לאורך קו החוף הישראלי, (3) להשוות בין חברות החי והצומח בתוך שמורות הטבע בים התיכון לשטחי ביקורת סמוכים הדומים להן באופי הקרקעית, (4) ליצור בסיס נתונים כמותי של החי והצומח המצויים כיום בשמורות הטבע לצורך השוואה עתידית.

ארבע מטרות נוספות הוגדרו בהקשר של השפעת השמורות, בהיותן שטח אסור לדיג, על מיני דגים בעלי ערך מסחרי: (1) לאמוד את השפעת השמורות על נוכחות מינים מסחריים, (2) לאמוד את השפעת השמורות על נוכחות פרטים גדולים של דגים, (3) לבחון את תפקוד השמורות בהגנה על חברת הדגים באמצעות מיני דגים אינדיקטוריים, (4) להעריך האם השמורות תורמות לדיג מחוץ לגבולותיהן.

הסקרים התבצעו החל משנת 2015 מדי שנתיים, בשתי עונות – אביב וסתיו – בכל שנת דיגום, למעט שנת 2023 שבה התקיים סקר מלא רק באביב עקב המלחמה שפרצה ב-7 באוקטובר. בסך הכול נערכו עד כה תשעה סקרים מלאים בגישת ה-BioBlitz – תיעוד ודיגום ויזואלי אינטנסיבי ובו-זמני של קבוצות טקסונומיות שונות: דגים, חסרי חוליות ואצות על הקרקעית. הסקרים נערכו על-ידי חוקרים מומחים לזיהוי דגים, חסרי חוליות ואצות ממגוון מוסדות אקדמיים שיוצאים יחד לסקרים בשטח, בארבעה אתרים: ראש הנקרה-אכזיב, שקמונה, דור-הבונים וגדור. אתרים אלה כוללים שמורות טבע ימיות מוכרזות וכן ושטחי ביקורת במרחקים של עשרות מטרים עד קילומטרים בודדים מגבולות השמורות, שהם בעלי מאפייני קרקעית דומים בהיבטי עומק, סוג המצע (סלעי) ומורכבותו (איור 2). לכל אתר (שמורה ימית ושטחי הביקורת) הוקצה יום עבודה אחד בכל עונה.

גודל השמורות, עומק הקרקעית המרבי, המרחק מהחוף ומאפייני בית הגידול משתנים מאתר לאתר. גם התקנון הקובע את הפעולות המותרות והאסורות (כולל פעולות הדיג) משתנה בין שמורה לשמורה. בנוסף, משך הזמן שבו מתבצעים פיקוח ואכיפה בשמורות משתנה מפיקוח ארוך טווח (כשלושה עשורים, החל משנות התשעים בשמורת ראש הנקרה-אכזיב) ועד פיקוח המתקיים שנים בודדות בלבד (למשל, החל משנת 2016 בשמורת שקמונה).

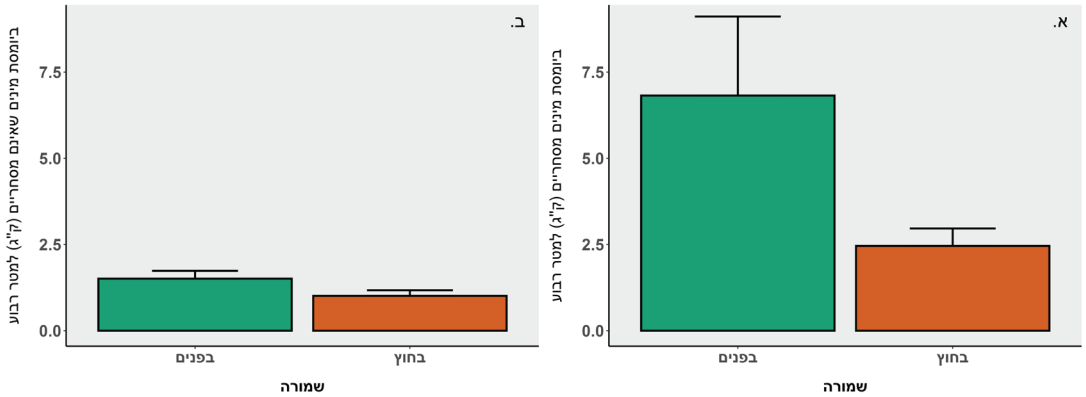
הדיגום, התיעוד, הגדרת המינים, בניית בסיס הנתונים של הסקר וניתוח הממצאים נערכו בשיתוף פעולה של אנשי רשות הטבע והגנים עם חוקרים וסטודנטים ממספר מוסדות וגופים: בית הספר לזואולוגיה, אוניברסיטת תל אביב; מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב; תחנת מוריס קאהן לחקר הים; בית הספר למדעי הים, אוניברסיטת חיפה; בית הספר למדעי הים, המרכז האקדמי רופין והמכון לחקר ימים ואגמים. הדיגום בכל שמורה ושטחי הביקורת שלה נערך בנקודות סלעיות בעלות מורכבות דומה של המצע, מרחק דומה מהחוף ועומקים דומים (לפירוט השיטות[20-22]).



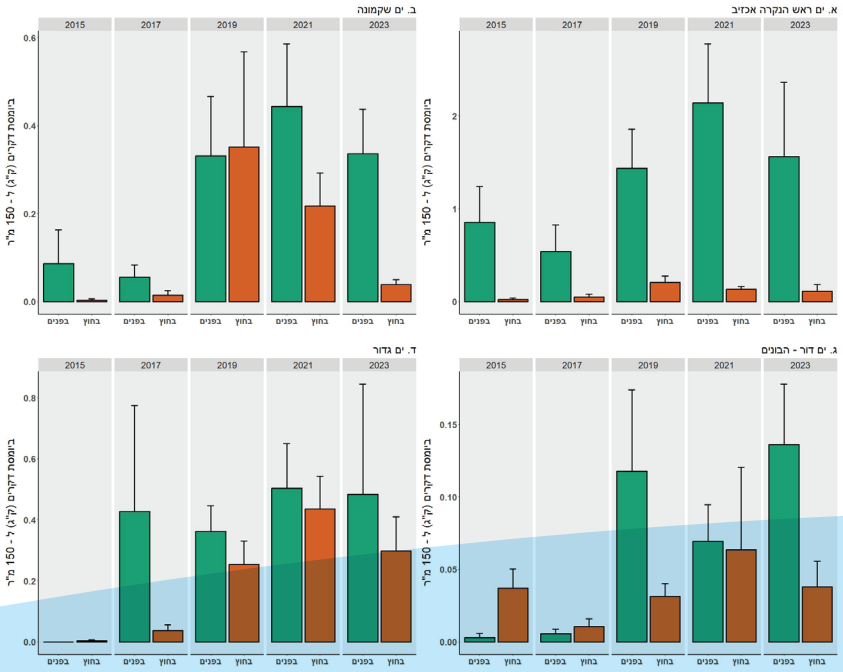
איור 2. אתרי הדיגום בסקרי הביובליץ בארבע השמורות המוכרזות: ראש הנקרה-אכזיב, שקמונה, דור-הבונים וגדור, בתוך השמורה (ירוק) ומחוץ לשמורה (אדום).

תפקוד שמורות הטבע בהגנה על מיני דגים מסחריים

תוצאות הסקרים מעידות על הצלחתה של שמורת ראש הנקרה-אכזיב בהגנה על מיני דגים מסחריים בכלל, ועל מיני הדקרים בפרט (איורים 3 ו-4 בהתאמה).

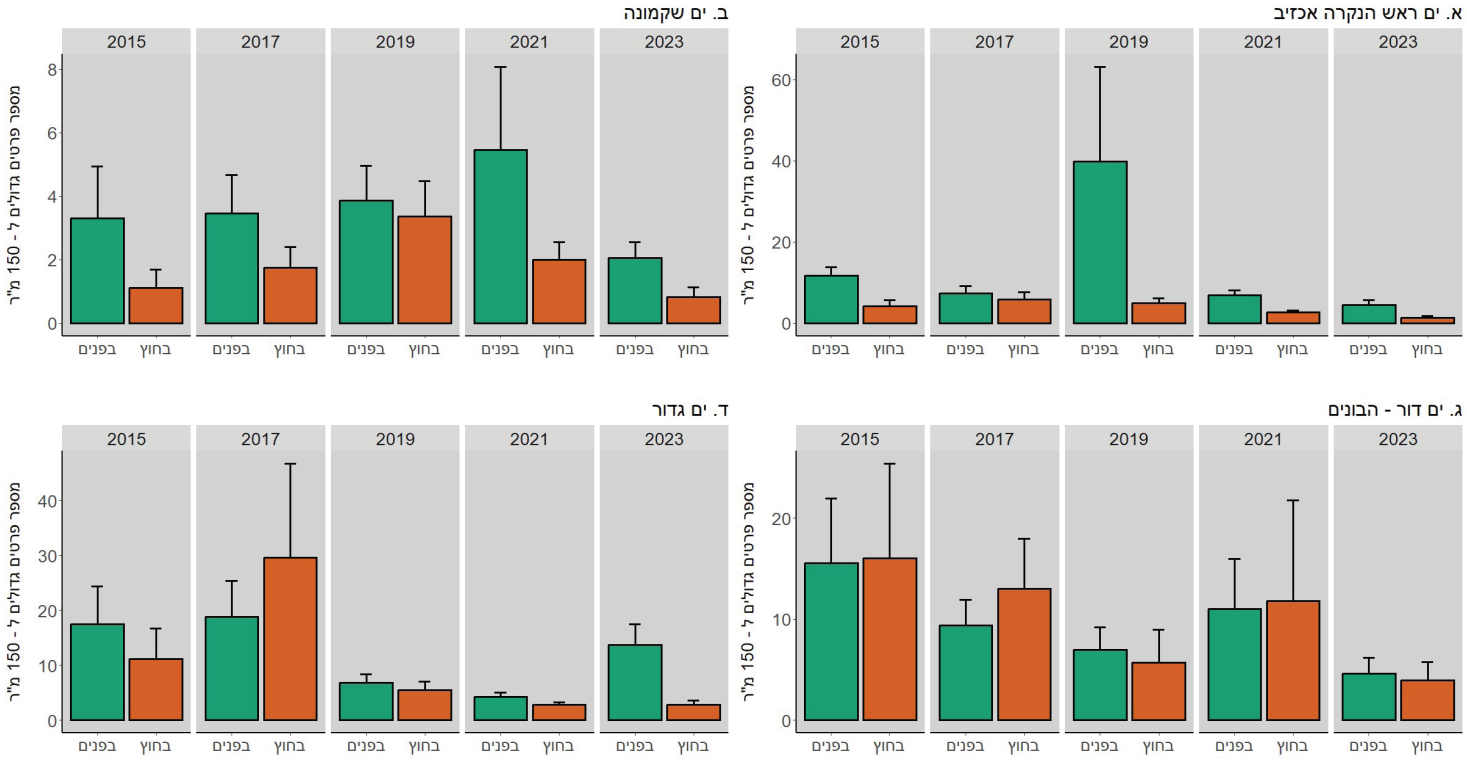


איור 3. ביומסה ממוצעת וסטיות תקן בחתך בתוך שמורת ראש הנקרה-אכזיב ומחוץ לה בכל הסקרים בשנים 2015-2021. א. ביומסת מינים מסחריים ב. ביומסת מינים שאינם מסחריים. ציר ה-X מציין אם הדיגום נערך בתוך השמורה (ירוק) או מחוץ לה (כתום) וציר ה-Y מציג את ערכי הביומסה הכללית הממוצעת בקילוגרמים לשטח חתך (150 מ"ר). רווח בר סמך של 95% מוצג על גבי העמודות.

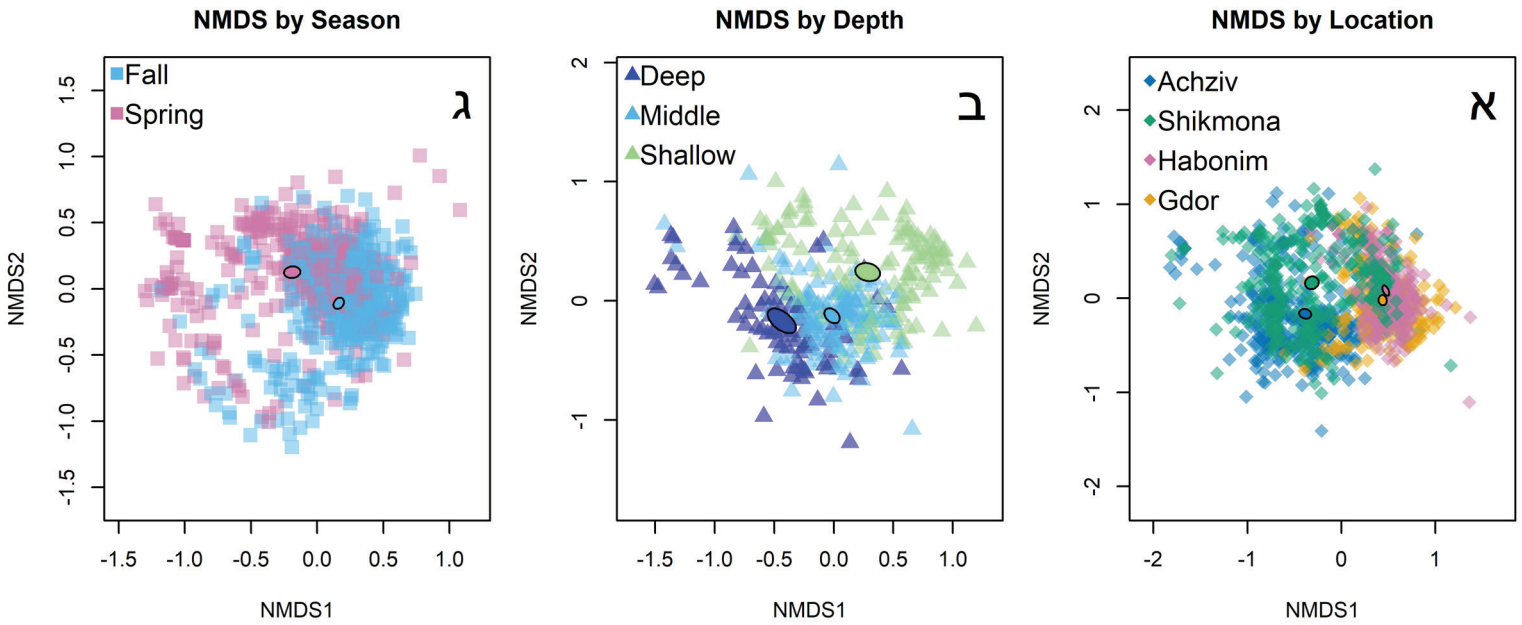


איור 4. ביומסה ממוצעת וסטיות תקן לחתך של דקרים בתוך שמורות טבע ימיות ומחוץ להן: א. ראש הנקרה-אכזיב ב. שקמונה ג. דור-הבונים ד. גדור בכל הסקרים שבוצעו בין 2015-2023. ציר ה-Y מציג את הביומסה הממוצעת לחתך (150 מ"ר) של כלל הפרטים ממיני הדקרים: דקר הסלעים, דוקרנית אדומה ודקר אלכסנדרוני. ציר ה-X מציין אם הדיגום נערך בתוך השמורה (ירוק) או מחוץ לה (כתום). רווח בר סמך של 95% מוצג על גבי העמודות. שימו לב לטווח הערכים השונה עבור כל שמורה.

הביומסה הכללית של מיני הדגים המסחריים הייתה גבוהה יותר בתוך השמורה בהשוואה לשטחי הביקורת שמחוץ לה גם בשמורות גדור ושקמונה, וכך גם שכיחות הפרטים הגדולים (איור 5). יש לציין כי פרטים מהמין דקר הסלעים (*Epinephelus marginatus*) שהגיעו לגודל רבייה (כ- 40 ס"מ) נצפו רק בתוך שמורת ראש הנקרה-אכזיב, וכמעט ולא נצפו בשמורות האחרות. פרטים מהמין דוקרנית אדומה (*Mycteroperca rubra*) שהגיעו לגודל רבייה נצפו בעיקר בתוך שמורה זו[20].



איור 5. שכיחות ממוצעת לחתך של פרטים גדולים מכל מיני הדגים בתוך השמורות ומחוץ להן, לאורך השנים. א. ראש הנקרה-אכזיב ב. שקמונה ג. דור-הבונים ד. גדור. ציר ה-Y מציג ערכי שכיחות ממוצעים לחתך (150 מ"ר) וציר ה- X מציין אם הדיגום נערך בתוך השמורה (ירוק) או מחוץ לה (כתום). רווח בר סמך של 95% מוצג על גבי העמודות עבור כל שנת סקר. שימו לב לטווח הערכים השונה עבור כל שמורה.

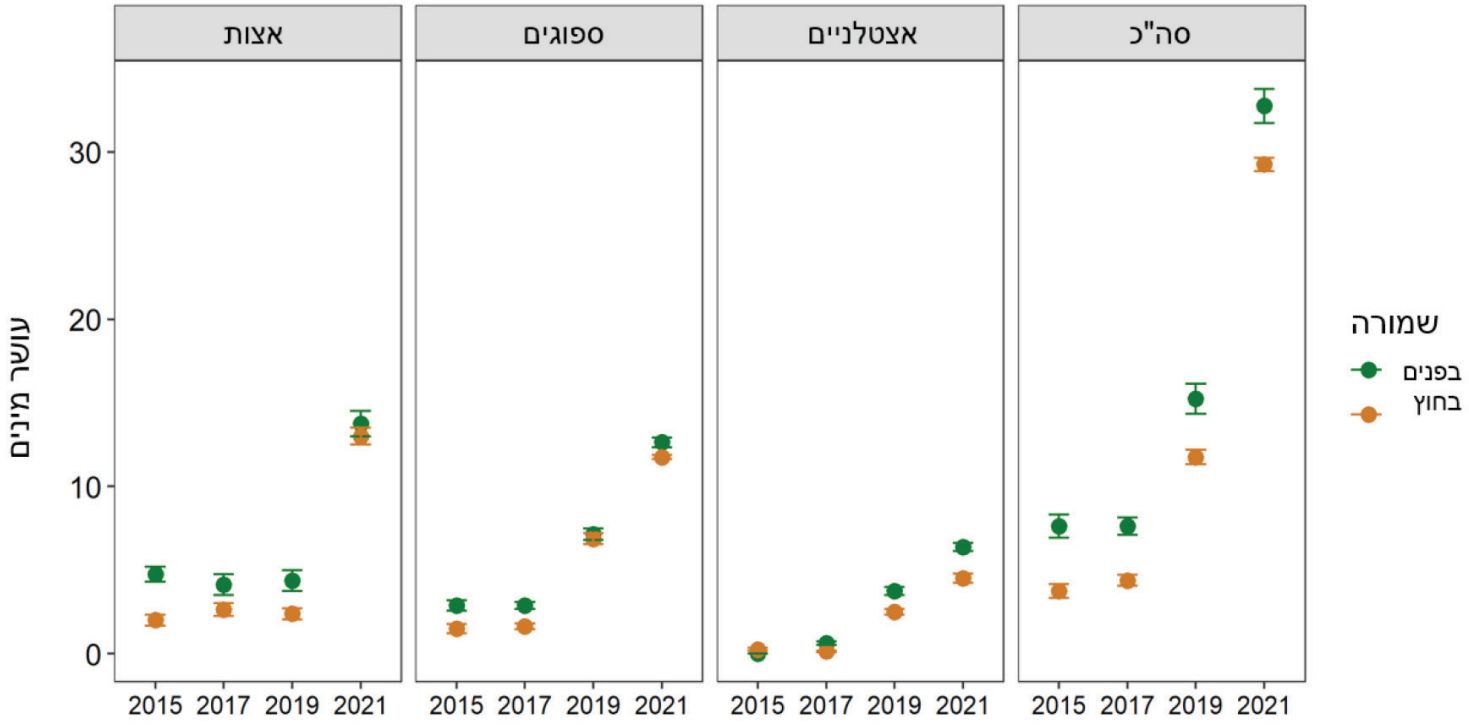


איור 6. אורדינציות nMDS המציגות את המרחקים בין חברות הדגים (נתוני הסקרים בשנים 2015-2021 בלבד) חושבו באמצעות אינדקס Bray-Curtis. כל נקודה במרחב מייצגת חתך וממוקמת לפי ערכי השכיחות של כל מין. הערכים עברו טרנספורמציית log. אליפסות בצבעים תואמים מייצגות את ההפרדה בין חברות הדגים א. באתרים השונים, בכל הסקרים, בשתי עונות הדיגום, בתוך ומחוץ לשמורות, בכל עומקי הדיגום. הצבעים מייצגים את האתרים השונים, Stress=0.17. ב. בעומקים השונים בראש הנקרה-אכזיב, בכל הסקרים, בתוך ומחוץ לשמורה. הצבעים מייצגים את העומקים השונים, Stress=12. ג. בעומק הרדוד בלבד בשתי עונות הדיגום, בכל השנים, בכל האתרים, בתוך ומחוץ לשמורות. הנתונים כוללים רק סקרים שבוצעו בעומק רדוד לשם ההשוואה. הצבעים מייצגים את עונות הדיגום Stress=0.2.

יש לציין כי 25% מהמינים שנצפו בסקרים הינם מינים פולשים, המהווים בסך הכול כ-44% מהשכיחות הכללית ו-47% מהביומסה הכללית. מתוך המינים הפולשים בולטים בשכיחותם הגבוהה מיני הסיכנים הפולשים: סיכן משויש (*Siganus rivulatus*) וסיכן הודי (*Siganus luridus*), שאוכלוסיותיהם כבר מבוססות לאורך חופי הים התיכון הישראלי. לאורך שנות הסקר נראו שינויים בשכיחותם של מינים אלו. לאורך שנות הסקר נצפתה עלייה ברורה בשכיחות המין בינתן פורסקל (*Parupeneus forsskali*), מין פולש שתועד לראשונה בחופי הארץ בשנת 2013.

חברת הקרקעית - אצות וחסרי חוליות

הסקרים של חברת הקרקעית הניבו רשימות מצאי עדכניות של מיני אצות וחסרי חוליות בקרקעית הסלעית של שמורות הטבע ואזורי הביקורת הסמוכים להן. לאורך כל שנות הסקר אצות כיסו אחוזים ניכרים משטח הקרקעית הסלעית (40-90%), אולם הרכב חברת האצות משתנה בין העונות. בתוך השמורות נצפו בממוצע יותר מיני אצות מאשר בשטחי הביקורת (איור 7). כמו כן, קיימת שונות בהרכב חברת האצות בין השמורות לבין שטחי הביקורת, אך לא נצפה דגם קבוע של הרכב מינים, כנראה בשל הדינמיות הגדולה במרחב ובזמן.



איור 7. עושר מינים הממוצע של אצות, ספוגים, אצטלנים ושלוש הקבוצות יחד בכל האתרים בכל שנת דיגום. הצבעים מייצגים את פנים השמורה (ירוק) וחוץ השמורה (כתום). קווי שגיאה מייצגים את שגיאת התקן (SE). גודל המדגם הינו n=8 לכל קבוצה.

חסרי החוליות שנסקרו משתייכים לשמונה קבוצות טקסונומיות שונות: חי-טחביים, צורבים, סרטנים, קווצי-עור, רכיכות, תולעים טבעתיות, ספוגים ואצטלנים. סקרים אלה איפשרו לדווח הן על השכיחות של כל קבוצה בקרקעית והן על מבנה חברת הקרקעית כולה. נמצא, שכלל חסרי החוליות מכסים בין 8-18% משטח הקרקעית הסלעית כאשר ספוגים, חי-טחביים וצדפות מהווים את הקבוצות הדומיננטיות ביותר מבחינת אחוזי הכיסוי והשכיחות. לא נראה הבדל באחוז הכיסוי הכללי של חסרי החוליות בשטחי השמורות לעומת שטחי הביקורת, אך קיימים הבדלים בהרכב החברה בין אתרים שונים לאורך החוף.

סיכום ומסקנות

פרק זה מסכם תשעה סקרים שהתבצעו בשנים 2015-2023 בארבע שמורות טבע ימיות בים התיכון הישראלי ובשטחי ביקורת דומים מחוץ להן: ראש הנקרה-אכזיב, שקמונה, דור-הבונים וגדור. בעוד שבשמורת ראש הנקרה-אכזיב התקיימו פעולות פיקוח ואכיפה החל מסוף שנות התשעים, בשאר שמורות הטבע הימיות לא היה פיקוח ימי ייעודי. בשנת 2018 הוקמה היחידה הימית של רשות הטבע והגנים שהגבירה את מאמצי הפיקוח בשמורות הימיות שקמונה, דור-הבונים וגדור, ואת אכיפתן של תקנות הדיג החדשות מחוץ לשמורות.

הנתונים שנאספו לאורך השנים מעידים על הצלחתה הברורה של שמורת ראש הנקרה-אכזיב בהגנה על מיני הדגים המסחריים המצויים בה. בנוסף, ניתן לראות עלייה בביומסה המסחרית הכללית ובגודל הפרטים גם בתחומי השמורות שקמונה וגדור. בכל השמורות נצפתה עלייה בשכיחות פרטים המשתייכים למיני הדקרים השונים ובגודלם. עלייה בשכיחות הדקרים נצפתה אומנם גם בשטחי הביקורת שמחוץ לשמורות, אולם במידה פחותה. נתונים אלה משמעותיים במיוחד, שכן לדקרים חשיבות אקולוגית רבה, והם מהווים סמנים לבריאות המערכת ושלמות חברת הדגים. על רקע הירידה הכללית בגודלן של אוכלוסיות הדגים המסחריים בעולם, תפקודה המוצלח של שמורת ראש הנקרה-אכזיב והשיפור במצבן של אוכלוסיות הדגים בשמורות שקמונה וגדור מעודדים במיוחד ומחזקים את ההכרה בשמורות הטבע הימיות כאמצעי להגנה הן על חברת הדגים והן על משאב הדגה.

הסקרים סיפקו גם רשימות מצאי עדכניות של אצות וחסרי חוליות בשמורות הטבע הרדודות ובסביבתן. בית הגידול הסלעי שנסקר בקרקעית השמורות מאופיין בחברת קרקעית עשירה ומגוונת של אצות וחסרי חוליות המשתייכים לקבוצות טקסונומיות שונות, הנבדלות זו מזו במיקום במארג המזון ובתפקודן האקולוגי. המורכבות בתגובותיהן של קבוצות אלו להגנה על השטח מקשה על אפיונן, אך התייחסות לשוכני הקרקעית הינה חיונית להבנת המערכת האקולוגית הימית בשמורות. עושר המינים הגבוה של אצות וחסרי חוליות בתוך השמורות לעומת שטחי הביקורת מעיד על יעילותן של השמורות בהגנה על המגוון הביולוגי ומחזק את חשיבותן ככלי מרכזי לשמירת הטבע הימי. הסקרים בים התיכון תיעדו את הופעתם של מינים פולשים חדשים באזור, כולל שינוי משמעותי בחברת הצדפות המקומיות שהוחלפה ברובה בצדפות פולשות. מעקב רב-שנתי מאפשר לזהות שינויים בחברת חסרי חוליות הנובעים מלחצי פעילות אנושית ומהשפעות שינויי האקלים, ובכך תורם להבנת הדינמיקה של המערכת האקולוגית לאורך זמן.

ממצאי הסקרים מעידים על כך ששמורות טבע ימיות גדולות ומפוקחות, שבהן נאכף איסור הדיג, יעילות בהגנה על חברות בעלי החיים והצמחים בים התיכון הישראלי. במטרה להבטיח את יציבותה של המערכת האקולוגית ואת שירותי המערכת הימית בצורה יעילה, עלינו להכריז על 30% משטח הים התיכון הישראלי כשמורות טבע ימיות בהתאם לאמנות בינלאומיות, ובכללן אמנת ברצלונה להגנה על הים התיכון. רשת השמורות צריכה להשתרע מצפון לדרום ובכל טווח העומקים. אכיפה קפדנית של איסור הדיג ופעילויות אנושיות פוגעניות נוספות בשמורות הטבע תאפשר לחברות בעלי החיים והצמחים המצויות בהן להתאושש ואף לזלוג אל מחוץ לשטחן.

ניהול שמורות טבע ימיות דורש תכנון מבוסס מדע וניטור ארוך טווח, המאפשר קבלת החלטות מושכלת ומבוססת מידע. תוכנית הניהול של השמורות מתבססת על הנתונים הנאספים באופן שוטף, תוך הערכת השפעת המדיניות המיושמת בשטח כמו למשל אכיפה על דינמיקת המינים והאוכלוסיות בשמורות. מידע זה מסייע בזיהוי מגמות ארוכות טווח ומאפשר לרשויות להתאים את אמצעי הפיקוח והאכיפה, להתמודד עם איומים חדשים כגון פלישות ביולוגיות ושינויי אקלים, ולוודא שהשמורות ממשיכות לספק את ההגנה הנדרשת לשמירת המגוון הביולוגי הימי.

רשימת מקורות

1. He, Q. & Silliman, B.R. Climate change, human impacts, and coastal ecosystems in the Anthropocene. *Curr Biol*, **29**, 1021-1035 (2019).
2. Hoegh-Guldberg, O. & Bruno, J.F. The impact of climate change on the world's marine ecosystems. Science **328**, 1523-1528 (2010).
3. Stachowicz, J.J., Terwin, J.R., Whitlatch, R.B. & Osman, R.W. Linking climate change and biological invasions: ocean warming facilitates nonindigenous species invasions. *PNAS* **99**.15497-15500 (2002).
4. Islam, M.S. & Tanaka, M. Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis. *Mar. Pollut. Bull.* **48**, 624-649 (2004).
5. Worm, B. et al. Impacts of biodiversity loss on ocean *ecosystem services. Science* 314, 787-790 (2006).
6. Palumbi, S.R. et al. Managing for ocean biodiversity to sustain marine ecosystem services. *Front. Ecol. Environ.* **7**, 204-211 (2009).
7. Lester, S.E. et al. Biological effects within no-take marine reserves: a global synthesis. Mar. Ecol.- Prog Ser. **384**, 33-46 (2009).
8. Giakoumi, S. et al. Ecological effects of full and partial protection in the crowded Mediterranean Sea: a regional meta-analysis. *Sci. Rep.* **7**, 8940 (2017).
9. Spanier, E. & Lavalli, K.L. Natural history of Scyllarides latus (Crustacea: Decapoda): a review of the contemporary biological knowledge of the Mediterranean slipper lobster. *J. Nat. Hist.* **32** 1769-1786 (1998).
10. Miller, E., Spanier, E., Diamant, R. & Yahel, R. Nature reserves facilitate conservation of the Mediterranean slipper lobster Scyllarides latus. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **714**, 57-69 (2023).
11. Edgar, G.J. et al. Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature* **506**, 216-220 (2014).
12. Heithaus, M.R., Frid, A., Wirsing, A.J. & Worm, B. Predicting ecological consequences of marine top predator declines. *TREE*, **23**, 202-210 (2008).
13. Lembo, G., Fleming, I.A., Økland, F., Carbonara, P. & Spedicato, M.T. Site fidelity of the dusky grouper Epinephelus marginatus (Lowe, 1834) studied by acoustic telemetry. Mar. *Life* **9**, 37-43 (1999).
14. Micheli, F., Halpern, B.S., Botsford, L.W. & Warner, R.R. Trajectories and correlates of community change in no-take marine reserves. *Ecol. Appl.* **14**, 1709-1723 (2004).
15. תקנות הדיג, משרד החקלאות ופיתוח הכפר. (2016).
16. יהל, ר., ואנגרט, נ. מדיניות שמירת הטבע בים התיכון, רשות הטבע והגנים (2012).
17. גורן, מ. מצב הסיכון של דקר הסלעים בישראל והמלצות לשמירתו. הוגש לחברה להגנת הטבע. הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל, הפקולטה לארכיטקטורה ובניין ערים (2015). תוכנית ימית לישראל (2020).
18. סקר אסטרטגי סביבתי לחיפוש והפקה של נפט וגז טבעי בים. משרד האנרגיה (2016).

19. מנהל התכנון מסמך מדיניות למרחב הימי של ישראל - ים תיכון. (2020).
20. פריד-לנדאו, א., לצרוס, מ., יהל, ר. סקר שמורות הטבע הימיות דוח מסכם פרק א': דיג ושמורות טבע. רשות הטבע והגנים (2022).
21. לצרוס, מ., פריד-לנדאו, א., יהל, ר. סקר שמורות הטבע הימיות דוח מסכם פרק ב': מבנה חברת הדגים. רשות הטבע והגנים (2022).
22. דיגה, ר. ויהל, ר. סקר שמורות הטבע הימיות דוח מסכם פרק ג': מבנה חברת הקרקעית. רשות הטבע והגנים (2022).

צב-ים חום *Caretta caretta* צב שהוא אוכל כל. על הקרקע, בשונית בת גלים, רואים התחלת צימוח של אצות חומיות מהסוג ציסטנית *Cystoseira* ומהסוג דוקרנית *Dictyota*. שונית בת גלים היא שונית סלע גדולה רדודה למרגלות ראש הכרמל והינה ייחודית בחוף הים התיכון הישראלי. השונית היא בית ליערות ימיים הנוצרים על ידי אצות רב שנתיות נדירות, צבי-ים, מינים רבים של בטאים ("חתולי-ים") ומגוון רחב של דגים וחסרי חוליות. בשונית בת גלים מתועדות בשנים האחרונות שתי אוכלוסיות צבי-ים: צבי-ים חומים בוגרים וצבי ים ירוקים צעירים. עד כה זוהו מעל לשלושים פרטים אינדיבידואלים מכל מין. הצב מוגן על פי חוק. בארץ מופעל המרכז הארצי להצלת צבי-ים על ידי רשות הטבע והגנים. צילום: איתי גריסרו.

6 מ"מערב פרוע" לניהול מערכתי: הישגים ואתגרים באסדרת ניהול המערכות האקולוגיות בים התיכון בעשור האחרון (2010-2023)

אלון רוטשילד, עתרת שבתאי

החברה להגנת הטבע,
מיזם "החצי הכחול"

alon@spni.org.il,
aterets@spni.org.il

תקציר

הים התיכון הוא המרחב הטבעי הגדול והרציף ביותר באחריות מדינת ישראל ובו מגוון חי, כולל מיני דגל מרשימים. הטבע בים התיכון מספק תועלות סביבתיות, כלכליות וחברתיות ומדינת ישראל מחויבת להגן עליו. לאחר עשורים של היעדר אסדרה נאותה בתחומי שמירת הטבע, למעט בתחום מניעת זיהום הים והחופים, מתחולל בעשור האחרון שינוי משמעותי באסדרה. מהלכי שמירת הטבע בעשור האחרון מתמקדים בהפחתת לחצים מקומיים על המערכת האקולוגית בכדי להגן על המבנה והתפקוד שלה, ולהגביר את שרידותה ללחצים סביבתיים גלובליים המתעצמים בעשורים האחרונים. בין מהלכים אלו קודמו אסדרה בניהול הדיג, תכנון והכרזת שמורות ימיות בהיקף רחב, הגנה על מיני מפתח, בניית יכולות פיקוח ואכיפה ותכנון מרחבי המאזן בין צורכי פיתוח ושימור. בהתאם לגישות המתקדמות בעולם לשמירת הטבע, מובילה כיום ישראל מדיניות שמירת טבע ימית מבוססת מדע ואפקטיבית. אף-על-פי-כן, הדרך למימוש המדיניות וחזון שמירת הטבע עוד ארוכה ודורשת יישום אמצעים נוספים שיבטיחו פיתוח בר-קיימה של פעילות כלכלית ואת שלמות ובריאות המערכת האקולוגית לאורך זמן. הפער גדול במיוחד בתחום האזור הכלכלי הבלעדי, הים העמוק, שבו האסדרה והמשילות הסביבתית לוקות בחסר משמעותי, ובו גם מקדם משרד האנרגיה והתשתיות מהלכים להרחבה דרמטית של תעשיית דלקי המאובנים, ללא תכנון מרחבי מתכלל או התייחסות להמלצות הנוגעות למיתון ההשפעות על שינוי האקלים. בנוסף, יש להרחיב את היקף השטחים המוגנים בכל תחום המרחב הימי בכדי להגיע ליעד ההגנה על 30% משטחה הימי של ישראל, יעד המעוגן באמנות בינלאומיות, לבסס מערך תומך החלטות לניהול דיג באמצעות ניטור וועדה מדעית מייעצת לפקיד הדיג, ולתקצב באופן רב-שנתי את הניטור והפיקוח באותם אזורים ימיים מוגנים. עוד נדרש לשמור על הישגים קיימים ולשפרם, לרבות איסור גורף על דיג מכמורת והרחבת ההגנה על מינים של דגים טורפי-על במידת הצורך.

מבוא - יעדי שימור הטבע בים התיכון

הים התיכון נחשב לאחד מהאזורים הימיים בעלי המגוון הביולוגי העשיר ביותר בעולם. למרות גודלו הקטן יחסית (שטחו מהווה פחות מ-1% מסך כל הימים והאוקיינוסים ברחבי העולם), למעלה מ-7% מכלל מיני האורגניזמים הימיים שוכנים במימיו, רבע מתוכם אנדמיים[1]. עושר טבעי זה כלכל לאורך ההיסטוריה שורה ארוכה של תרבויות ששכנו לחופי הים התיכון.

הסביבה הימית של ישראל בים התיכון מהווה את שטח הטבע הגדול והרציף ביותר שבאחריות המדינה. שטח זה אף גדול משטחה היבשתי של ישראל: המים הריבוניים משתרעים על פני 4,000 קמ"ר והאזור הכלכלי הבלעדי על 21,000 קמ"ר נוספים. שטח זה מאכלס מגוון של בתי גידול האוצרים בתוכם מגוון ביולוגי עשיר הראוי להגנה. חלק מבתי הגידול מוגדרים "מערכת אקולוגית ימית רגישה" (Vulnerable Marine Ecosystem) כמו גני ספוגים, אבעבועים (Pockmarks), גני אלמוגי מים עמוקים, קניון תת-ימי וטבלאות גידוד. במרחב מתקיימות תופעות ייחודיות כמו התקבצויות כרישים במים רדודים (אזור חדרה) ובמים עמוקים (הפרעת פלמחים) ומוקדי רבייה של בטאים.

הטבע הימי מספק שירותי מערכת אקולוגית החיוניים לאדם: מקור מים להתפלה, תשתית לאספקת דגה, תשתית מיתון אקלימי, תמיכה בחקלאות ימית, מקור לתרופות חדשות, מרחב ספורט, פנאי ונופש בחיק הטבע ועוד. מציאת האיזון בין שימושי האדם לשמירה על הסביבה הרגישה של הים התיכון מהווה אתגר ראשון במעלה המחייב גיבוש מדיניות ניהול משולבת, תוך התאמה לסטנדרטים הבינלאומיים, ובהתבסס על יעדי שימור מוגדרים.

למרות אלפי שנים של פעילות אנושית בים, דווקא פעילות האדם במאתיים השנים האחרונות שינתה חלק מהמאפיינים האקולוגיים – בעיקר במים הרדודים[1-3]. על-פי ממצאים ארכיאולוגיים ומודלים, בעבר הרחוק שגשגו אוכלוסיות הדגה בכלל והדגים הטורפים בפרט[4-6]. בבואנו להגדיר יעדי שימור, עלינו להתחשב ב"הסטת נקודת הייחוס" (Shifting baselines) מתוך הבנה שכבר לפני עשורים בודדים המערכת האקולוגית הייתה במצב מדורדר. לפיכך, יעדי שמירת הטבע צריכים להיגזר מפוטנציאל המערכת למארג מזון בריא, שבו ריבוי של טורפים, וביומסה משמעותית של טורפי-על[7,8]. זאת, תוך שקלול השפעת השינויים האקלימיים ופלישת המינים המסיבית למזרח הים התיכון[9].

נקודת המוצא לקידום מהלכי אסדרה לשמירת טבע: האיומים על המערכת האקולוגית בים התיכון הישראלי בתחילת המילניום השני

המערכות האקולוגיות של הים התיכון הישראלי נתונות זה שנים ללחצים סביבתיים רבים, הן מקומיים כמו דיג, זיהום והקמת תשתיות, והן אזוריים כמו התחממות מהירה של הים, אירועי טמפרטורות קיצון ופלישה של מאות מינים[10-13].

לכן, נקודת המוצא למאמצי האסדרה שהחלו סביב שנת 2012, היא ניתוח האיומים על הטבע הימי בתקופה זו, ובחינת אופן ההתמודדות היעיל עמם כמדינה.

דירוג האיומים המקומיים חושף את המרכזיות של פעילות הדיג בכלל, ודיג המכמורת בפרט, לפגיעה במערכת האקולוגית[14]. פעילות זו מביאה לפגיעה ישירה באוכלוסיות ובתי גידול ולהשפעות עקיפות על מבנה ותפקוד המערכת האקולוגית דרך פגיעה במיני דגים שאינם מסחריים הנתפסים כשלל לוואי[15], פגיעה במינים מוגנים[16-18], הרס בתי גידול

על-ידי ציוד דיג הבא במגע עם הקרקעית[19], ואובדן ציוד דיג הממשיך ללכוד בעלי חיים גם באין שימוש[20].
על אף השיפור המשמעותי במדדי זיהום ים בשני העשורים האחרונים, הנובע מפעילות רגולטורית יעילה, הסיכון למערכת האקולוגית כתוצאה מאירוע זיהום קטסטרופלי כמו דליפת פחמימנים, הוא משמעותי, ויש למזערו[21].
ענף דלקי המאובנים משפיע על המערכת האקולוגית, בעיקר בים העמוק: סקרים סֵיסמים מסכנים בעלי חיים בקרקעית ובעמודת המים[22], קידוחים, הנחת צנרת ותשתיות פוגעים באופן ישיר אך נקודתי בבתי גידול בקרקעית ובאופן עקיף דרך הרחפת סדימנט הפוגעת ביכולת הסינון וההזנה של בעלי חיים[23] ונגרם זיהום כרוני של הסביבה הקרובה לתשתיות הפקת הגז[21].
פעילויות אחרות המפעילות לחץ על הסביבה הימית הטבעית כוללות תעבורה ימית, המהווה מקור לפליטות מזהמים לאוויר ולים ומקור אפשרי לזיהום כתוצאה מהתפזרות מטען[24]. זיהום פלסטיק ונגזרותיו ניכר כמעט בכל בתי הגידול הימיים ובגופם של בעלי חיים ימיים[25]. מוצא תמלחות ממתקני התפלה יכול לשנות את המאפיינים הכימיים והפיזיקליים של הקרקעית ועמודת המים וכן את החברות הביולוגיות באזור[26,27]. חקלאות ימית מהווה מקור אפשרי לזיהום, העשרה מלאכותית בנוטריינטים, מקור לטפילים ולמחלות, מקור לזליגת פרטים מבויתים לבר, מקור הסתבכות של דגים, עופות ויונקים ברשתות הכלובים[28-31]. לפעילויות עתידיות, כמו אנרגיות מתחדשות או תעשיות חדשניות, השפעה סביבתית שעדיין אינה ברורה, ולכן הן מחייבות תכנון סביבתי קפדני[32-34].
בנוסף להשפעות המקומיות, המערכת האקולוגית של הים התיכון הישראלי נתונה ללחצים סביבתיים אזוריים ועולמיים. מזרח הים התיכון נחשב לאזור רגיש במיוחד להשפעות שינויי האקלים כיוון שאזור זה מתחמם בקצב מהיר יחסית וכבר היום שוררים בו תנאים שנחשבים לקיצוניים כגון עוני בנוטריינטים, שיעור יצרנות נמוך, מליחות גבוהה וטמפרטורה גבוהה[35-37]. בעקבות תנאים אלו, מינים רבים באזור (שמוצאם הביו-גיאוגרפי מהאוקיינוס האטלנטי) נמצאים קרוב לסף הסבילות שלהם ולכן רגישים במיוחד להקצנה של התנאים אשר עלולה לדחוק אותם אל מחוץ למערכת האקולוגית[11,38]. כמו כן, המערכת האקולוגית חשופה לפלישה של מאות מינים זרים, בעיקר מים סוף והאוקיינוסים ההודי והשקט[12,39,40]. השילוב של התחממות ופלישת מינים באופן מואץ בחופי ישראל, יחד עם הלחצים המקומיים, למשל דיג, מביא לכך שמינים מקומיים הולכים ונעלמים ומינים זרים הולכים ומשתלטים על המערכות האקולוגיות, בעיקר במים בעומקים רדודים[11,41-43].

מהלכי אסדרה כמענה לאיומים על הטבע: 2021–2023

אסטרטגיית שמירת הטבע במזרח הים התיכון הישראלי נשענת על ההנחה שהלחצים האזוריים של שינוי אקלים ופלישות ביולוגיות אינם בשליטתה הישירה של מדינת ישראל. לפיכך, עיקר האסטרטגיה ממוקדת במזעור הלחצים המקומיים, אשר יתרום לאישוש של המערכת האקולוגית באופן ישיר, במקביל להגדלת החוסן (Resilience) של המערכת האקולוגית לשינויים הגלובליים[44]. זאת לצד פעילות להפחתת פליטות גזי חממה כדי לתרום למיתון השינויים הגלובליים.
בעשור האחרון הונעו מספר מהלכי אסדרה משמעותיים שנועדו להתמודד עם תמונת האיומים שנסקרה לעיל, בהתאם

לכלי מדיניות שנמצאו כיעילים בעולם, ובהם צמצום מאמץ הדיג וניהולו, הקמת רשת שטחים מוגנים, תכנון מרחבי ימי בגישת המערכת האקולוגית, הגנה ישירה על מינים, פיקוח ואכיפה. כל זאת תוך רתימת קובעי המדיניות, גורמי התכנון והציבור הרחב. מהלכים אלה, שחלקם הבשילו וחלקם עדיין בתהליכי גיבוש, ייסקרו להלן, תוך ציון הפערים שעוד נותרו. כותבי פרק זה הינם עובדי החברה להגנת הטבע אשר יזמו או היו מעורבים פעילים ביותר במרבית המהלכים ולכן הסקירה כוללת במקומות מסוימים הרחבה לגבי עבודת החברה להגנת הטבע בתוך תהליכי האסדרה.

ניהול דיג

מדיניות דיג מיטבית שואפת להתמודד עם האתגרים הסביבתיים שמציבה פעילות הדיג למערכת האקולוגית הטבעית, תוך הבנת הצימוד הכלכלי-סביבתי הכרוך בפעילות. מאמצע המאה ה-20, מדיניות דיג בגישת המערכת האקולוגית[45,46] החליפה בהדרגה בעולם את ניהול הדיג בגישת מכסות למינים מסחריים[47]. הגישה העדכנית כוללת הפחתה של מאמץ הדיג, ניהול דיג מבוסס ידע והפחתה משמעותית של לחץ הדיג דרך הגנה מרחבית על בתי גידול, הגנה עיתית על אוכלוסיות בשלבי רבייה וגיוס, ומזעור השפעות הדיג על בתי גידול ומינים שאינם מיני המטרה[48]. מדיניות הדיג מתייחסת לרוב גם לרכיבים חברתיים-כלכליים של הענף ושואפת להגדיל את הצדק החלוקתי בין בעלי המקצוע, לשמר את ערך השוק של הדגים ולהבטיח רווחים כלכליים שאינם נתמכים בסובסידיות המעודדות דיג יתר[49].

משק הדיג בים התיכון הישראלי סבל מתת-ניהול קיצוני אשר התבטא בהיעדר ניהול הדיג בזמן ובמרחב, היעדר מכסות דיג, התרת דיג בשיטות הרסניות ואכיפה חלקית. בנוסף, המדינה מסבסדת את הוצאות הדלק של ספינות המכמורת באמצעות הטבת מס. כתוצאה מכך, הידלדל משאב הדגה ונפגעו בתי גידול ומינים מוגנים. פגיעה זו הביאה לפגיעה כלכלית-חברתית: ירידה בשלל הדיג ליחידת מאמץ דיג, ירידה באיכות השלל ושחיקה ברווחיות הדייגים[50]. על רקע כישלון ניהולי זה, פורסם בשנת 2010 דוח מבקר המדינה בנושא ענף הדיג בישראל.

כתוצאה משורת מהלכים ששיאם בשנים 2015-2018, התחוללה מהפכה בניהול הדיג כשעוגנה סמכותו של פקיד הדיג להטיל מגבלות במסגרת רישיונות הדיג, אושרו תקנות דיג חדשות שקבעו לראשונה ממשק דיג בר-קיימה בישראל, והוקם מערך פיקוח ייעודי. שינויים אלה נבעו מפעולה משולבת של הממשלה עם החברה האזרחית: בשנת 2012 יזמה החברה להגנת הטבע (חלה"ט) מהלך לקידום רפורמה בניהול הדיג בים התיכון. במסגרת זו נעשתה עבודת מטה נרחבת ובוצע ניתוח אקולוגי, חברתי, כלכלי ורגולטורי, תוך דיאלוג עם בעלי העניין השונים בממשלה, ארגוני סביבה, מדענים וקבוצות דייגים. על בסיס הניתוח גובשה הצעה לרפורמה מקיפה בענף[51] אשר כללה שורת המלצות לניהול שיטות הדיג, ניהול עונתי, הגדרת מכסות שלל יומיות לדיג פנאי, הגנה על טורפים רגישים, הקמת מערך ניטור מקצועי וועדה מקצועית מייעצת לפקיד הדיג.

לאחר שהמלצות אלה לא קודמו ברמה הפוליטית, הגישה חלה"ט בשנת 2015 עתירה לבג"צ נגד פקיד הדיג הראשי, בדרישה להטיל מגבלות דיג במסגרת תנאי רישיון הדיג, כמענה אסדרתי דחוף נוכח המצב. לאחר התערבות היועץ המשפטי לממשלה, קיבלה המדינה את עמדת חלה"ט, והוטלו מגבלות מינוריות על הדיג במסגרת רישיונות שנת 2015. בנוסף, בעקבות העתירה, פורסמה טיוטה של תיקון תקנות הדיג להערות הציבור. בהמשך עתרה חלה"ט שוב לבג"צ

נגד פקיד הדיג, כדי שיממש את סמכותו ויטיל מגבלות דיג בתנאי הרישיונות לשנת 2016. בעקבות העתירה הוטלו לראשונה מגבלות דיג משמעותיות וכנגדן הוגשו 4 עתירות נגדיות של דייגי מכמורת ודייגים ספורטיביים. כל העתירות הנגדיות נדחו ובפסק דין תקדימי (בג"צ 16/2677, 3366/16, 3237/16) קבע בית המשפט כי לפקיד הדיג סמכות מלאה ואף חובה להגביל את הדיג במסגרת הרישיונות, ללא קשר לקיומן או היעדרן של תקנות, וכי ההגבלות שהוטלו הן מידתיות. עוד קבע בג"צ כי *"תכליתה העיקרית של פקודת הדיג – אין חולק עליה – היא להבטיח כי משאבי הדגה של מדינת ישראל – שהם משאב מתכלה-מתחדש, שזמינותו תלויה, בין השאר, בדרכי השימוש וברמת הפעילות הננקטת – **ינוהלו בצורה מיטבית, בת-קיימה ובאופן העולה בקנה אחד עם האינטרס הציבורי הרחב**".*

בעקבות העתירה ובקשת בית המשפט לקבל עדכונים בנוגע לקידום התקנות, הוגשו לאישור הכנסת תקנות דיג מעודכנות על-ידי שר החקלאות (באמצעות פקיד הדיג). לאחר שורת דיונים שהתקיימו בוועדת הכלכלה של הכנסת נחתם התיקון לתקנות בדצמבר 2016 על-ידי שר החקלאות. עדכון התקנות הובל על-ידי יו"ר ועדת הכלכלה, כשברקע קמפיין של חלה"ט לקידומן, והתאפשר גם בזכות תמיכת משרדי האוצר, הגנת הסביבה ורשות הטבע והגנים אשר תקצבו את מהלך ההשבתה של שליש מצי המכמורת. גופים אלו, כמו גם מדענים מהאקדמיה, אף היו מעורבים מאוד מקצועית בקידום התקנות ובכך הונחה לראשונה התשתית לניהול דיג מקיים בים התיכון. התקנות החדשות קבעו:

1. מתי לדוג – איסור דיג חופי, דיג הקפה ודיג ספורטיבי במהלך עונת הרבייה למשך 90-60 יום ואיסור דיג מכמורת בעונת הגיוס של הדגיגים הצעירים למשך עד 90 יום.
2. היכן לדוג – איסור דיג מכמורת במים רדודים, באזורים סלעיים ומצפון לחוף דור, ואיסור דיג הקפה במים רדודים.
3. כיצד לדוג – איסור מוחלט על דיג רובה בעזרת מיכלי צלילה ודיג מכמורת באמצעות ציוד ייעודי למצע סלעי, הגדלת גודל העין ברשתות עמידה והכפלת גודל הפרט המינימלי שאותו מותר לדוג עבור מספר מינים רגישים.
4. כמה לדוג – מכסת שלל יומית לדייגי פנאי בכדי למנוע פגיעה בשלל וברווחי הדייגים המסחריים.

יישום תקנות הדיג

פיקוח: תקנות הדיג נכנסו אומנם לתוקף במרץ 2017, אולם בפועל מרבית מגבלות הדיג לא נאכפו בשנתיים הראשונות, בזמן שאחריות האכיפה הייתה בידי משרד החקלאות. בתגובה, החלה"ט ביצעה קמפיין שכלל דיווחי ציבור על עבירות דיג באמצעות יישומון ייעודי (Sea Watch) שחשף את מחדל הפיקוח[52] לצד פניות למבקר המדינה, הפעלת לחץ תקשורתי[53] וגיבוש מסמך מדיניות להקמת יחידת פיקוח ימית ייעודית ברשות הטבע והגנים[54]. כתוצאה מכך, באמצע שנת 2018 הועברו סמכויות הפיקוח ממשרד החקלאות אל יחידה ימית חדשה שהוקמה ברשות הטבע והגנים. יחידה זו פועלת בצורה יעילה ומקצועית (לדוגמה, איור 1) ולאחרונה אף הצטיידה בכלים המאפשרים פיקוח מעבר לתחום ארבעת המיילים הימיים הסמוכים לחוף.

השבתת דיג עונתית: תקנות הדיג קבעו שני מנגנונים להשבתה עונתית: עונת הגיוס לדיג המכמורת, ועונת הרבייה לשאר שיטות הדיג. סעיף החרגה בתקנות הדיג נועד לאפשר גמישות בהתרת דיג בשיטות ובמינים שייקבעו באופן חריג, ביחס לכלל הקובע כי לא יתקיים דיג בעונת הרבייה. בשנים 2017-2021 פקיד הדיג עשה שימוש נרחב בסעיף זה והתיר בפועל דיג בהיקף משמעותי במהלך עונת הרבייה. בשנים 2017-2019, למרות שהוראת המעבר של התקנות

התירה להגביל את הדיג ל-45 יום, הדיג הוגבל ל-30 יום בלבד בעונת הרבייה. בשנת 2020, רק 32 ימים נאסרו לחלוטין לדיג. השבתת דיג המכמורת בעונת הגיוס הייתה גם היא קצרה ממשך הזמן שמתירות התקנות וקצרה משמעותית מהתקופה שהומלצה בעבודות מקצועיות[55]. רק 60 יום נקבעו כאסורים בדיג מכמורת. על אף שפקיד הדיג טען כי ההחרגה נעשתה בשנת 2020 בגלל משבר הקורונה, גם בשנת 2021 הותרו הקלות רבות לדיג בעונת הרבייה. החלטות אלה חרגו בצורה משמעותית מכוונת המחוקק, כפי שהבהירו מסמכי עמדה של המשרד להגנת הסביבה ורשות הטבע והגנים.

בתגובה, עתרה חלה"ט לבית המשפט לעניינים מינהליים, ובהמשך הגישה ערעור לבית המשפט העליון (עע"ם 3509/21). בית המשפט העליון עיגן בפסיקתו הבהרות חשובות של המדינה, לפיה על פקיד הדיג לשקול החלטותיו לגבי עונת הרבייה "בשים לב לתכלית המרכזית של שימור ואישוש משאב הדגה" וכי עליו להביא בחשבון עמדות גורמים מאסדרים אחרים שיש להם נגיעה לסוגיה, קרי, המשרד להגנת הסביבה ורשות הטבע והגנים. כתוצאה מכך, בשנים 2022-2023, לראשונה, צומצמו באופן ניכר היתרי הדיג בעונת הרבייה, נאסר שימוש בשיטות לא בררניות במיוחד כמו רשתות עמידה ומערך קרסים שוקע, והיתרי דיג חריגים ניתנו בשיקול דעת, כך שרק בשנים אלה התקיימה לראשונה השבתת דיג יעילה בעונת הרבייה. אולם, בשנים 2024-2025 התיר פקיד הדיג שימוש בשיטות לא סלקטיביות כמו רשתות עמידה, חכות, ומערך קרסים צף, במהלך עונת הרבייה, תוך הגדרת עומקי מינימום לדיג.

צעדי השלמה נדרשים בניהול הדיג

אף-על-פי שתקנות הדיג החדשות (2016) חוללו מהפכה באופן שבו מנוהל הדיג ומאמצע שנת 2018 מתקיימת אכיפה אפקטיבית, הדיג בים התיכון עדיין לא מנוהל באופן בר-קיימה. שיקום משאב הדגה הוא תהליך שצפוי להימשך עוד זמן רב, בגלל זמן התגובה האיטי של המערכת האקולוגית למהלך השיקום. חלק מהסיבות לכך קשור לאי מימוש מלא של הגבלות הדיג הנחוצות ולרכיבים נוספים החסרים:

1. ניטור כבסיס לקבלת החלטות ניהול דיג: כיום לא מתבצע ניטור ייעודי ומקצועי של הדיג והדגה. נדרש מעקב מתמשך אחר מצב הדגה, המערכת האקולוגית ומדדים סוציו-אקונומיים במסגרת תוכנית הניטור הלאומית לים התיכון – אשר רק לאחרונה (2022) החלה לכלול מדדים לניטור דיג.
2. הקמת גוף מייעץ לניהול ממשק דיג הכולל ועדה שבה חברים דייגים, גורמי סביבה ממשלתיים ולא ממשלתיים ומדענים.
3. צמצום צי דיג המכמורת עד לביטולו בכדי להשלים את תהליך שיקום משאב הדגה ואישוש המערכת האקולוגית. השבתת הענף תלווה בתועלות משקיות רבות וצפויה להגדיל את רווחי כלל הדייגים בשיטות הדיג האחרות[56].
4. חקיקה לשיפור הפיקוח וחיוב ספינות דיג מעל גודל מסוים בהתקנת אמצעי איכון ייעודיים.

איור 1. שלל דיג דקרים שאותר על-ידי פקחי היחידה הימית של רשות הטבע והגנים במהלך עונת הרבייה שבה חל איסור על דיג.
צילום: אלון פן. רשות הטבע והגנים.

שמורות טבע ימיות

שמורות טבע ימיות נחשבות לכלי היעיל ביותר להשגת מטרות שמירת טבע ימית. לשמורות יעילות המנוהלות היטב יש היכולת להחזיר את המערכת האקולוגית למצב בריא ומתפקד כפי שהייתה בעידן הטרום-תעשייתי ובכך לתמוך בכלכלה ובחברה[57]. לשמורות חשיבות רבה למיתון שינויי האקלים (מיטיגציה) ולמיתון השפעות שינויי האקלים על המערכת האקולוגית (אדפטציה) [58,59].

בכדי ששמורות ימיות יספקו את התועלות הצפויות, עליהן להיות גדולות מספיק (גודל רצוי לפחות 100 קמ"ר), ללא דיג ושימושים פוגעניים, ותחת ניהול ופיקוח יעילים[58,60]. היקף השמורות ואופן ניהולן הם אפוא האתגר המרכזי העומד כיום בפני יישום שמירת הטבע הימית באמצעות שמורות[57]. בסוף שנת 2022, הגדילה אמנת המגוון הביולוגי[61] את יעד ההגנה מ-10% ל-30% משטחי הים עד שנת 2030. האמנה מדגישה את חשיבות ההגנה על שטחים בעלי חשיבות

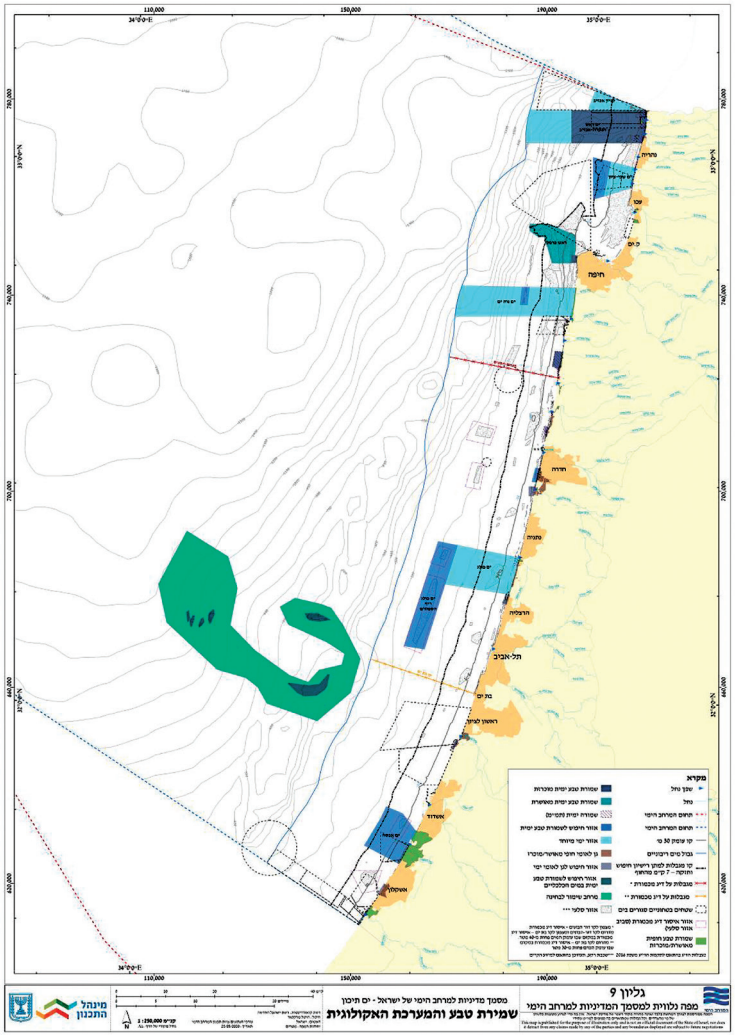
מיוחדת למגוון הביולוגי, במסגרת רשת של שטחים מוגנים המייצגים את כלל בתי הגידול, מקושרים היטב ביניהם ומנוהלים בצורה יעילה ושוויונית[61]. יעד ההגנה על 30% נגזר ממחקרים אשר הציעו כי הגנה על היקף שטח זה תאפשר מצד אחד שמירה יעילה על המערכת האקולוגית ותמתן את השפעות שינויי האקלים, ומצד שני תאפשר מימוש של מטרות סוציואקונומיות[62].

שמורות ימיות במים הריבוניים

בשנת 2012 פרסמה רשות הטבע והגנים תוכנית-אב שאפתנית להגנה על כ-20% משטח המים הריבוניים של ישראל במסגרת 6 שמורות טבע ימיות גדולות, ועוד מספר שמורות חופיות וגנים לאומיים ימיים בסמוך לחוף[63]. באותה עת, רק 0.3% מהמים הריבוניים הוגדרו כשמורות ימיות, מתוכן רק בשמורת ראש הנקרה-אכזיב התקיים פיקוח יעיל יחסית. שאר שמורות הטבע השתרעו על פני שטח של מאות מטרים רבועים בלבד, כללו שטח חופי בעיקר, התאפשר בהן דיג (חכות חוף בכלל השמורות ודיג מסחרי בדור-הבונים) ולא התקיים בהן פיקוח ימי יעיל.

שנים ספורות לאחר מכן, החל קידום מסמך המדיניות למרחב הימי בהובלת מינהל התכנון[64]. בשנת 2020 אימץ מסמך המדיניות את מרבית השטחים שהוצעו על-ידי רשות הטבע והגנים

בתוכנית-האב כשטחים מוגנים (איור 2). בנוסף, לאחר הגשת חוות דעת מקצועית[65] ומידע מדעי עדכני שהונגש לקובעי המדיניות במוסדות התכנון, קבע מסמך המדיניות המאושר כי הדיג ייאסר בשמורות הימיות. כך הוחלט גם במסגרת אישור מוסדות התכנון לתוכניות המפורטות לשמורות ראש הנקרה-אכזיב, ראש כרמל, ים אבטח, ים פולג וים עתלית. מדיניות זו היא מהמתקדמות בעולם וחשיבותה מקבלת הכרה גוברת בעקבות מחקרים עדכניים מהעולם ומישראל המצביעים על כך שהתרת דיג בשמורה פוגעת בהשגת תועלות סביבתיות וחברתיות [58,66-68].



איור 2. אימוץ תוכנית-האב לשמורות ימיות של רשות הטבע והגנים במסמך המדיניות למרחב הימי. כ-8.6% מתחום המים הריבוניים סומנו כמרחב חיפוש לשמורות ימיות (כחול כהה). 8.7% נוספים סומנו כ"אזור ימי מיוחד", ייעוד שכשלעצמו לא מספק הגנה יעילה לשטח, אך מהווה עתודה לקידום שמורות טבע נוספות (תכלת). בנוסף, כלל המסמך הצעה ראשונית לקידום שמורת טבע ימית באזור הכלכלי הבלעדי, בהתאם להצעת החברה להגנת הטבע ואוניברסיטת חיפה (ירוק – אזור שימור לבחינה, כחול בתוך הירוק – אזור חיפוש לשמורה במים הכלכליים).

לקראת עדכון מסמך המדיניות למרחב הימי נערכה בחינה של הפערים בייצוג נאות של בתי הגידול הימיים, לאור עדכון יעד השטחים המוגנים באמנת המגוון הביולוגי מ- 10% ל-30% , ונוכח איתור בתי גידול חדשים במסגרת הסקר האסטרטגי הסביבתי של משרד האנרגיה, חיא"ל (חקר ימים ואגמים לישראל) והמכון הגיאולוגי[69] (לדוגמה איור 3). נמצא כי קרוב למחצית מבתי הגידול הייחודיים לא מיועדים כרגע לשימור במסמך המדיניות. בנוסף, חלקים נרחבים מבתי הגידול המייצגים של המצע הסלעי והמצע הרך נמצאים בתת-ייצוג בשמורות. שינוי ייעוד השטחים המוגדרים כ"אזור ימי מ יוחד" ל"שטח חיפוש לשמורת טבע ימית" ישפר משמעותית את העמידה ביעדי השימור שאליהם מחויבת ישראל עבור בתי גידול ייחודיים ומייצגים[70]. כיום, קרוב ל-8% משטח המים הריבוניים מוגדרים כשמורות וגנים לאומיים מוכרזים או מאושרים.

איור 3. גני ספוגים בשונית העמוקה של שמורת ים פולג. עושר הספוגים יוצר מבנים תלת-ממדיים מרהיבים המהווים בית גידול לבעלי חיים רבים. צילום: טל אידן, מעבדת פרופ' מיכה אילן, אוניברסיטת תל אביב.

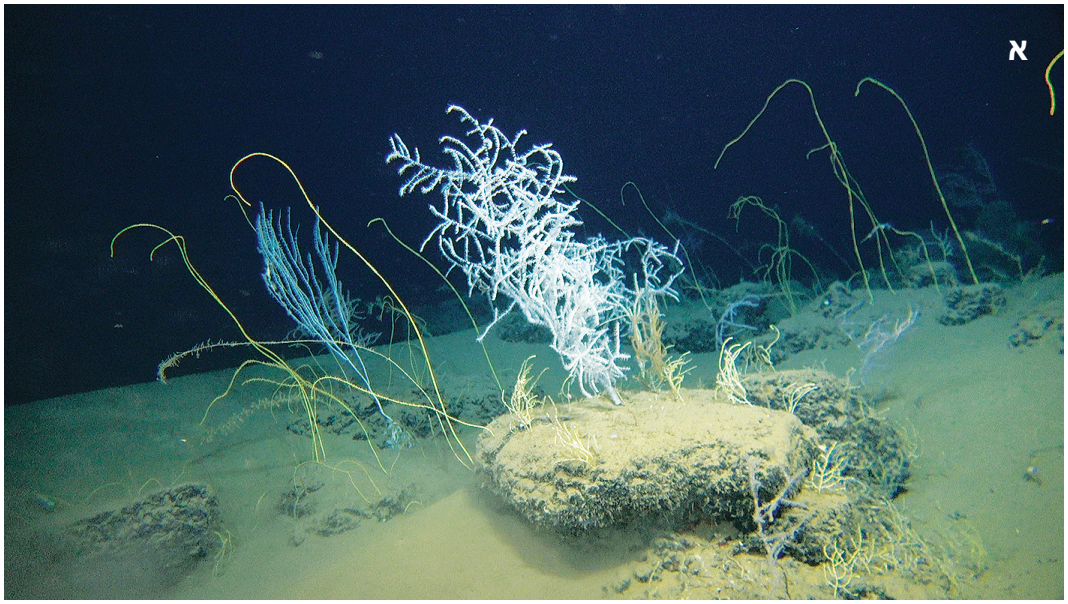
שמורות ימיות באזור הכלכלי הבלעדי – מ"מרחב אחיד של בוץ", לרשת שמורות ימיות

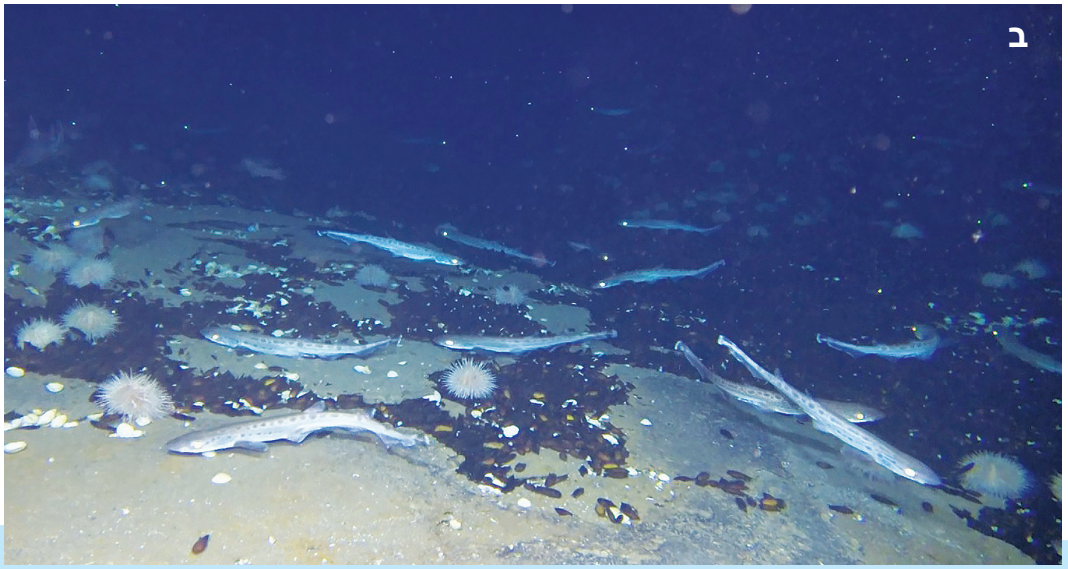
שטח האזור הכלכלי הבלעדי של ישראל הוא 21,000 קמ"ר – פי חמישה גדול יותר משטח המים הריבוניים. מרחב זה לא זכה להתייחסות שמירת טבע או אסדרה סביבתית במשך שנים רבות. כחלק מהאצת פיתוח משק הגז בים, יזם משרד האנרגיה והתשתיות סקר אסטרטגי סביבתי (סא"ס), שפורסם בשנת 2016 ומעודכן באופן עיתי[71]. בסקר זה אופיינו במרחב האזור הכלכלי הבלעדי מעט בתי גידול: מדרון היבשת, הבתיאל ומספר בתי גידול נקודתיים בהיקף שטח מזערי של אלמוגים ונביעות גז, רובם בהפרעת פלמחים. כלומר, רק מספר נקודות הוכרו כרגישות מבחינה אקולוגית "הוד הים" - איתנות ותמורות במערכות הימיות של ישראל 101 באזור הכלכלי הבלעדי, בעוד מסמך הסקר ציין כי קיימים פערי ידע גבוהים באפיון המרחבי של בתי הגידול .

גלישת פלמחים – השטח המוגן הראשון באזור הכלכלי הבלעדי

בשנת 2018 פרסמו חלה"ט ואוניברסיטת חיפה הצעה ראשונית לקידום שמורת טבע ימית ראשונה באזור הכלכלי הבלעדי, בהיקף של מאות קמ"ר בהפרעת פלמחים. השטח שהוצע לשימור התבסס על הידע שנאסף על-ידי חוקרי אוניברסיטת חיפה [72] . הצעה זו עוגנה במסגרת מסמך המדיניות למרחב הימי של מינהל התכנון, שהגדיר חלק מהשטח כ"אזור חיפוש לשמורה" וחלק מהשטח כ"אזור שימור לבחינה" (איור 2). אולם, בשנת 2019 העניק משרד האנרגיה רישיון חיפוש גז במרחב הפרעת פלמחים, בטענה שרק חלק מזערי מהמרחב מוכר כרגיש. חלה"ט עתרה לבג"צ נגד הרישיון, בצירוף מידע נוסף שנאסף לגבי בתי גידול רגישים בשטח. העתירה אומנם נדחתה, אולם חודשים ספורים לאחר מכן עדכן משרד האנרגיה את מסמך הסא"ס והרחיב את גבולות בתי הגידול הרגישים בהפרעת פלמחים בשני סדרי גודל לעומת גרסת הסא"ס הקודמת, להיקף של מאות קמ"ר [73].

במקביל, גיבשה חלה"ט חוות דעת משפטית לפיה ניתן, בהתאם לחקיקה הקיימת ופרשנותה, לקדם אכרזה שתגן על השטח הרגיש כ"ערך טבע מוגן". חוות דעת זו אומצה גם על-ידי גורמי המדינה, בהובלת המשרד להגנת הסביבה ורשות הטבע והגנים. תוך כדי התהליך, אימצה הוועדה המדעית של נציבות הדיג הים תיכונית (GFCM) את הצעת חלה"ט והמליצה להכריז על אזור הפרעת פלמחים כאזור מוגבל דיג 74 (Fisheries Restricted Areas - FRA), וארגון Mission Blue אימץ את הצעת חלה"ט והכריז על הפרעת פלמחים כ-"Hope spot" (הכרזה הצהרתית) שכן זהו אזור ייחודי ולכן קריטי לבריאות הסביבה הימית (איור 4א- 4ב). המאמצים נשאו פרי, כשבסוף 2022 הכריזה השרה להגנת הסביבה על השטח כשטח ערך טבע מוגן (שכן המנגנון להכרזת שמורת טבע כהגדרתה בחוק הישראלי אינו חל כיום בתחום האזור הכלכלי הבלעדי), בהיקף 450 קמ"ר ללא דיג וללא קידוחים (איור 5). במקביל, רישיון חיפוש הגז הוחזר למשרד האנרגיה – מבלי שבוצעו פעולות קידוח.

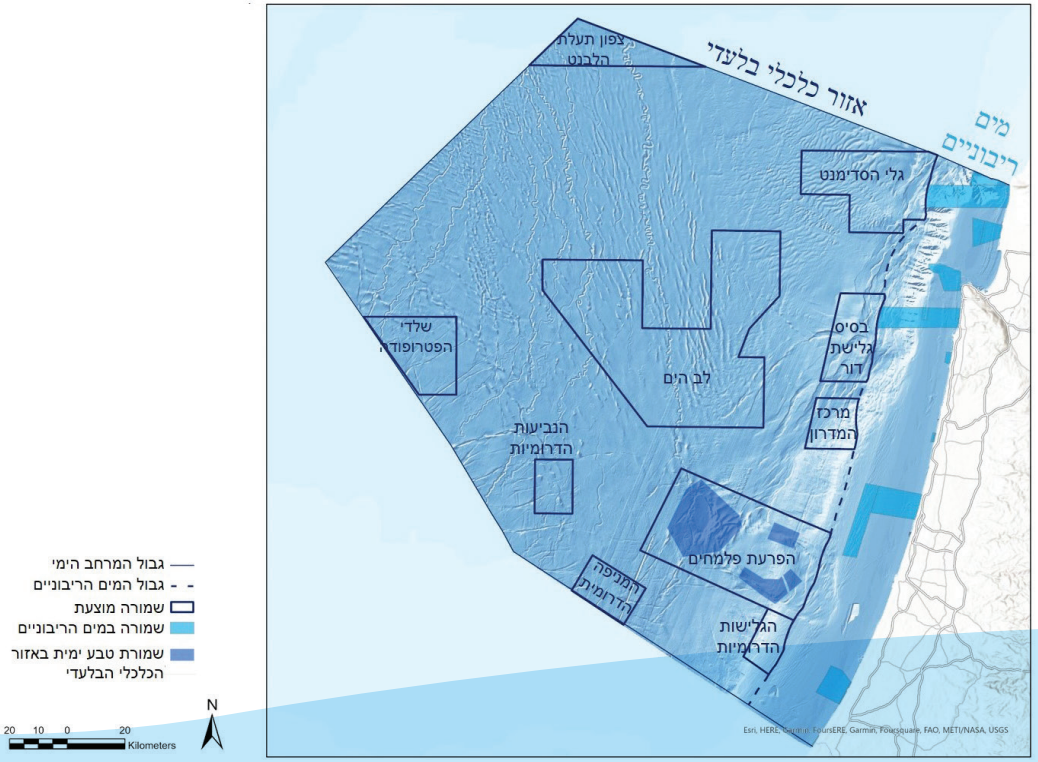




איור 4 . א. גני אלמוגי עומק בהפרעת פלמחים. צילום: אדם וייסמן, יצחק מקובסקי, דני צ'רנוב. אוניברסיטת חיפה. ב. התקבצות כרישי עומק בהפרעת פלמחים מסביב לבריכות התמלחת שהתגלו בקרקעית. באזור ההתקבצות ניתן לראות מיליוני ביצי כרישים (בשחור-ירקרק) וקונכיות של צדפות כימוסינתטיות. צילום: צוות המחקר בהובלת אוניברסיטת חיפה, חקר ימים ואגמים לישראל והמוסדות השותפים במרכז לחקר הים התיכון.

תוכנית-האב לרשת שמורות באזור הכלכלי הבלעדי

ככל שהצטברו עדויות ומחקרים על המגוון הביולוגי בים העמוק הישראלי, התברר כי שטח האזור הכלכלי הבלעדי של ישראל אינו מרחב אחיד של בוץ וכי קיימים בו אזורים מגוונים הנבדלים זה מזה במאפיינים פיזיים וביולוגיים. בשנת 2023 פורסמה תוכנית-האב לשמורות ימיות באזור הכלכלי הבלעדי (איור 5)[75]. התוכנית מבוססת על שיתוף רחב של בעלי עניין מהממשלה, רשויות, אקדמיה וארגוני סביבה בתהליך תכנון שארך כשנתיים וכלל מאמץ מחקרי רב של חוקרים מהחלה"ט, אוניברסיטת חיפה, חקר ימים ואגמים לישראל ואוניברסיטת תל-אביב. במסגרת תהליך התכנון אופיינו מעל 20 יחידות אקולוגיות ובתי גידול בקרקעית ובעמודת המים באמצעות ניתוח נתונים בשיטות סטטיסטיות מתקדמות ומודלים לחיזוי מרחבי. על בסיס שכבת בתי הגידול, יעדי השימור שנקבעו להם, והפעילות האנושית הקיימת והחזויה במרחב, הוצעו 10 שמורות ימיות בהיקף של 30% מהאזור הכלכלי הבלעדי. רשת שמורות זו תגן על מרבית בתי הגידול הרגישים, ועל נתח מייצג מבתי הגידול האחרים, תוך שמירה על קישוריות ביניהם. התוכנית אומצה על-ידי המשרד להגנת הסביבה, רשות הטבע והגנים ורשות העתיקות.



איור 5. תוכנית-האב לשמורות ימיות באזור הכלכלי הבלעדי בים התיכון.

צעדי השלמה נדרשים

יש להרחיב משמעותית את השטחים המיועדים לשמורות טבע ימיות, במסגרת עדכון מסמך המדיניות למרחב הימי, להיקף השואף ל-30% מהמרחב הימי, בדגש על בתי גידול ייחודיים ורגישים (Vulnerable Marine Ecosystems - VME) ועל בתי גידול המצויים בפער ייצוגיות. במקביל, יש לאגם משאבי מדינה על מנת לאפשר לרשות הטבע והגנים לקיים ניטור, פיקוח וניהול בשטחי שמורות נרחבים ומרוחקים אלה.

1. במים הריבוניים – שינוי ייעוד "אזור ימי מיוחד" ל"אזור חיפוש לשמורת טבע". מעבר לכך, יש לייעד שטחים נוספים כשמורות, בדגש על בתי גידול של מצע רך מעל עומק 30 מ', ומספר אתרים ייחודיים שלא מיועדים להגנה כרגע, כמו אבעבועים, רכסי כורכר מזופוטיים, ואיונים[70].
2. באזור הכלכלי הבלעדי – יש להטמיע את תוכנית-האב לשמורות ימיות[75] במסגרת תכנון מרחבי ימי לאזור זה, לכשיתבצע. עד אז, יש לתקצב סקרים לאיפיון מפורט של בתי הגידול בגבולות השמורות, למנוע חיפושי גז בשטחים הרגישים ולקדם הגנה עליהם במסגרת סמכות השרה להגנת הסביבה לאכרזת ערכי טבע מוגנים ברמה המרחבית.

תכנון מרחבי ימי

תכנון מרחבי ימי המייצר אסדרה מרחבית של פעילות אדם במרחב הימי מאפשר מניעת קונפליקטים בין שימושים שונים לבין הסביבה הימית הטבעית, במיוחד מחוץ לשמורות[76]. תוכנית מרחבית יכולה לשקף מכלול שיקולים כלכליים, סביבתיים וחברתיים ולתעדף סוגי פעילות במרחב הימי בהתאם, תוך העדפת האינטרס הציבורי.

מסמך החזון והמדיניות למרחב הימי, בהובלת מינהל התכנון[64], ביצע לראשונה תהליך מקיף של חשיבה מרחבית מערכתית במרחב הימי, ויצר אזור של מרחב המים הריבוניים, תוך ניסיון למזעור קונפליקטים בין השימושים ובין הסביבה, חשיבה על צרכים עתידיים, וניתוח צורכי הסקטורים השונים. המסמך אומנם אינו בעל תוקף סטטוטורי, אך הוא משמש כמנחה עבור מוסדות התכנון. רכיבים רבים במסמך תואמים את גישת המערכת האקולוגית לתכנון ימי.

צעדי השלמה נדרשים

למרות איכותו של המסמך והחשיבה המקיפה שהושקעה בו, ניתן לזהות מספר פערים המומלצים לגישור במסגרת תהליך עדכון מסמך המדיניות:

1. צמצום היקף השטח המוקצה לדלקי מאובנים והידוק האסדרה הסביבתית עליהם. ההנחה השמרנית, שלפיה סקטור הגז ימשיך להיות בעל דומיננטיות ומרכזיות עבור המשק בישראל, נוגדת את הצפי של סוכנות האנרגיה הבינלאומית שלפיו סקטור זה יתכווץ במהירות על רקע חדירת אנרגיות מתחדשות וטכנולוגיות משבשות, ועל רקע השפעתו השלילית על האקלים המחייבת את הפסקת פיתוח מאגרים חדשים החל משנת 2022[77].
2. במרחב האזור הכלכלי הבלעדי, בהיעדר חקיקת מסגרת ומוסדות תכנון, משרד האנרגיה והתשתיות מתנהל כרגולטור-על, ומקצה שטחים עצומים לחיפושי והפקת גז בעוד ההשלכות האקלימיות ברורות. כך גם בשנת 2022, שבה יצא משרד האנרגיה והתשתיות להליך להרחבת חיפושי הגז בכ-6,000 קמ"ר חדשים, ללא תכלול שיקולים אקלימיים או תכנוניים. על הליך זה הוגשו עתירות לבג"צ של חלה"ט וגרינפיס.

3. יצירת חיץ הולם ומנגנוני בקרה סביבתית, בין חקלאות ימית ובין שמורות טבע, לצורך מזעור השפעה אפשרית על הסביבה הטבעית. שטחי חיפוש לחקלאות ימית מתוכננים כרגע בצמידות לשלוש שמורות טבע.
4. הידוק מנגנוני בקרה סביבתית במסגרת תכנון שימושים ניסיוניים ותשתיות מעל פני הים, כגון צמצום שטח המתקנים והגבלות על גובהם, נדרש ביתר שאת עם קידום אנרגיה מתחדשת בים [34].
5. קידום "חוק אזורים ימיים" לאסדרה של האזור הכלכלי הבלעדי, כך שיכלול הקמת מוסד תכנון מתכלל לכל השימושים המרחביים. באזור זה לא חל חוק התכנון והבנייה ואין בו חקיקת מסגרת מערכתית. חוק זה תקוע מזה שנים במסדרונות הממשלה והכנסת. בתנאים אלה, אין תכנון מרחבי ימי, אין מוסד תכנון, אין מנגנון להסדרת קונפליקטים בין שימושים ואין מנגנוני פיקוח וניהול מרחביים. החוק יאזן בין פיתוח לשימור, ישמור על שקיפות ועל האינטרס הציבורי ויחיל אסדרות נדרשות כמו פקודת הדיג ושמורות טבע ימיות.

הגנה על מינים

כרכיב משלים להגנה מרחבית על בתי גידול, הגנה על מינים מסוימים במערכת האקולוגית יכולה לתרום לאישוש חברות ביולוגיות. לרוב, מתמקד אמצעי זה בהגנה על מיני מפתח, מיני מטרייה, מינים אינדיקטורים או מינים שנפגעו מניצול יתר [78].

קבוצות המגהפאונה הימיות (יונקים, צבים, כרישים ובטאים וכן חלק מהדגים), כמו גם קבוצות של חסרי חוליות כמו קווצי עור, צורבים ורכיכות, מוכרזות שנים רבות כערכי טבע מוגנים בישראל. אומנם לא מתקיימת אכיפה נגד פגיעה אגבית בהם מציוד דיג, אך האכיפה נגד מכירת דגי סחוס ונגד אחזקת ציוד לדיג ייעודי שלהם השתפרה מאוד בשנים האחרונות. לעומת זאת, קבוצה חשובה מאוד לבריאות ולתפקוד המערכת האקולוגית – תת-משפחת הדקרים – לא הייתה מוגנת כלל בים התיכון הישראלי. קבוצה זו רגישה במיוחד לדיג, בין השאר בגלל הגעתם המאוחרת לבגרות, שיעור גיוס שנתי נמוך של צעירים לאוכלוסייה והתנהגות המקלה על איתורם[79]. מעבר לחשיבותם לבריאות המערכת האקולוגית כטורפי-העל של השוניות הסלעיות, לדקרים גם חשיבות חברתית וכלכלית כאטרקציה לצוללים ומשנרקלים [80].

בשנת 2017 עתרה חלה"ט לבג"צ בדרישה להורות לשר להגנת הסביבה להכיר בחמישה מינים מתת-משפחת הדקרים כערכי טבע מוגנים. בתגובה, המשרד להגנת הסביבה פרסם טיוטת אכרזה שכללה מינים אלה כמיועדים להגנה. לאחר השימוע הציבורי, חתם השר להגנת הסביבה דאז על האכרזה, כשהיא כוללת מהדקרים את דקר הסלעים בלבד. אולם, בעקבות לחצים של דייגים, משך השר את חתימתו, ולבסוף נחתמה רשימת העדכון ללא דקרים וללא דגי גרם חדשים בכלל בים התיכון (העדכון כלל הגנה על כלל הספוגים כערכי טבע מוגנים, והרחבה משמעותית של הגנה על דגים בים האדום – מהלך חשוב ומשמעותי). בעקבות כך, עתרה חלה"ט לבג"צ בשנת 2019, ודרשה להגן על דקר הסלעים, המוגדר כמין בסכנת הכחדה בים התיכון וכמין שעתידו בסכנה ברמה הגלובלית. בתגובה לעתירה, הכריזה השרה להגנת הסביבה דאז על הדקר האלכסנדרוני כעל מין מוגן. דקר הסלעים הוכרז כמוגן, אך לשנה אחת בלבד, והותר לדיג בכלל השיטות חוץ מרובה – הוראה שבפועל כלל לא נאכפה. כיום הדקר האלכסנדרוני הוא מין הדקר היחיד שמוגן בים התיכון הישראלי.

צעדי השלמה נדרשים

לאחר שהוכרז כמוגן מין דקר אחד, עמדת החלה"ט היא שיש להשלים את ההגנה על מיני הדקרים האחרים – דקר הסלעים, דקר חיפני, ודקר המכמורת, מפאת רגישותם לדיג וחשיבותם האקולוגית והחינוכית-תיירותית. זאת, על בסיס בחינת נתונים עדכניים לגבי מצב האוכלוסייה, קצב גידולה ותפוצתה לאורך החוף. יש לשקול להכריז גם על הדקרנית האדומה כמין מוגן, בגלל תפקודה האקולוגי כטורף ובגלל דמיונה למראה של דקרים האחרים בשלב הצעיר, שיקשה על ציות ואכיפה של איסור הפגיעה בדקרים האחרים.

פיקוח ואכיפה במרחב הימי בהיבטי שמירת טבע

עד אמצע שנת 2018 לא הייתה יחידה ייעודית לפיקוח בנושאי שמירת טבע ודיג (בניגוד למערך הפיקוח הקיים למניעת זיהום ים של המשרד להגנת הסביבה). משזו הוקמה ברשות הטבע והגנים, בשיתוף משרד החקלאות, משרד האנרגיה והתשתיות ומשרד האוצר, התבצעה מהפכה באכיפת דיני שמירת הטבע והדיג עד טווח 4 מיילים ימיים מהחוף. עם הקמת היחידה הימית אף השתדרג משמעותית המענה לדיווחי איכות ביישומון SeaWatch של החלה"ט, כשפקחי רשות הטבע והגנים מספקים מענה לדיווחים רבים בתחומי שמורות, פגיעה בערכי טבע מוגנים, עבירות דיג, רשתות רפאים, צבי-ים במצוקה ועוד. מאז השקת היישומון, הועברו בו כ-5,000 דיווחים, ובעקבותיהם, בין השאר, הוסרו כ-60 רשתות רפאים ומפגעי פסולת, ובוצעו פעולות פיקוח ואכיפה על כ-80 אירועים. אתגרי הפיקוח על הדיג, כמו גם הכרזת שמורות טבע רחוקות מהחוף, מחייבות התעצמות משמעותית של יכולות הפיקוח והמעקב. צעד חשוב וראשון התבצע בסוף שנת 2023, כשהיחידה הצטיידה בשתי סירות פיקוח ייעודיות המאפשרות פעילות לטווח של עשרות קילומטרים מהחוף.

איור 6. התקבצות מיני דקרים בקרבת החוף בעונת הרבייה. צילום: אנדריי אהרונוב.

צעדי השלמה נדרשים

על מנת להיערך לאתגרים הנוכחיים והבאים נדרשים צעדים נוספים:

3. עיגון תקציב היחידה הימית של רשות הטבע והגנים בבסיס תקציב המדינה, ברמה רב-שנתית, על מנת לייצר יציבות ואופק אסטרטגי לפעילות.
4. הרחבת מערך הפיקוח של היחידה, באופן רב-שנתי, באופן שיהלום את היקף השטח והמשימות המתרחב עם הרחבת רשת השטחים המוגנים המפוקחים והמשימות השונות.
5. הקמת מערך ייעודי לפיקוח על התנאים הסביבתיים הקבועים בהיתרים ותוכניות מכוח חוק התכנון והבנייה במרחב הימי (למשל בהיבטי זיהום אור, מניעת מינים פולשים ועוד). לחילופין, הסמכת ותקצוב פקחי היחידה הימית ברשות הטבע והגנים לביצוע משימה זו.

אינדיקציות להשפעת מהלכי האסדרה על המערכת האקולוגית

מהלכי האסדרה לאישוש והגנה על המערכת האקולוגית הימית החלו להתממש בשטח רק לאחרונה, וחלקם עדיין לא מומשו או מומשו חלקית, כמתואר לעיל. גם מהרגע שמהלכי אסדרה אלה ממומשים, זמן התגובה וההתאוששות של המערכת האקולוגית, מטבע הדברים, הוא ארוך, ונע בין מספר שנים למספר עשורים[58,81]. בנוסף, לצורך הערכת ההשפעה של האסדרה על הטבע, נדרשת נקודת ייחוס אמינה. הניטור הלאומי של הים התיכון מבוצע במתכונתו הנוכחית רק שנים בודדות, ולא ייצר נתוני רקע (baseline) מקיפים מספיק של מצב המערכת האקולוגית, למשך זמן ארוך מספיק לפני התחלת מהלכי האסדרה שתוארו בסקירה זו. הערכת ההשפעה של האסדרה היא אף מורכבת יותר, מכיוון שבמקביל בוצעו מספר מהלכי אסדרה, אשר יש ביניהם השפעות הדדיות, וייתכן שמהלך אסדרה אחד משפיע על אינדיקטורים של מאמץ אסדרה שני.

למרות זאת, אינדיקציות ראשוניות מלמדות על ניצני התאוששות של רכיבי המערכת האקולוגית, ועל כך שמאמצי האסדרה המקודמים מתחילים לשאת פירות:

1. שכיחות וביומסה של מיני הדקרים עלתה עם השנים בשטח השמורות לעומת שטחי הביקורת שמחוץ לשמורות וכך גם הביומסה הכללית של מיני הדגים המסחריים. עלייה זו היא כפי הנראה תוצר של ניהול דיג יעיל בתוך ומחוץ לשמורות, השבתת הדיג בעונות הרבייה של הדגים המסחריים ובשילוב עם אכיפה קפדנית[82]. כמו כן, ייתכן שאיסור דיג הרובה בצלילת מיכלים תרם במיוחד לאישוש אוכלוסיות הדקרים שהיוו את מיני מטרה מרכזיים של שיטת דיג זו.
2. אוכלוסיית הלובסטר כפן גושמני מראה שכיחות וצפיפות פרטים גבוהות יותר וגודל פרטים רב יותר בתוך השמורה לעומת שטח שאינו מוגן כתוצאה מאיסור הדיג הנמשך כבר בערך 30 שנים בשטח השמורה[83].
3. התאוששות אוכלוסיות דגים מקומיים לצד ירידה בשכיחות מיני דגים פולשים ברצועת העומקים הרדודה בדרום הארץ[84]. שינויים אלו הם כפי הנראה תוצאה של איסור דיג המכמורת באזורים הרדודים החל משנת 2017.
4. מספר ההטלות של צבי-ים עלה בצורה דרמטית בשנים 2020 ו-2021 לאחר עלייה הדרגתית מאז החלה ברשות הטבע והגנים תוכנית הממשק לאישוש אוכלוסיית צבי-הים. ההשערה היא כי עלייה זו היא בין השאר תוצאה של תוכנית הממשק המוצלחת וניהול דיג יעיל[85].

סיכום ההישגים ואתגרים להמשך

בכדי לעמוד ביעדי שמירת הטבע ולהבטיח את שרידות המערכת לשינויים גלובליים ואקלימיים, מדינת ישראל נדרשת להרחיב משמעותית את היקף השטחים הימיים המוגנים, לאסור כליל שיטות דיג הרסניות ולבטל את הסובסידיות המאפשרות את קיומן. כמו כן, המדינה נדרשת לקדם פעילות כלכלית בת-קיימה שאינה נשענת על ניצול משאבים מתכלים או מזהמים (כמו דלקי מאובנים) ולקדם הגנה על מיני מפתח, בדגש על הדקרים, שתפקידם חשוב ביותר לבריאות המערכת האקולוגית. כל זאת תוך אסדרת האזור הכלכלי הבלעדי, והעצמת יכולות הפיקוח והניטור.

יחד עם זאת, לאחר עשור של עשייה, מדינת ישראל מובילה כיום מדיניות שמירת טבע ימית מתקדמת ביחס לרוב מדינות העולם. בעיקר בולט ניהול יעיל של שמורות הטבע הימיות שאינו מתיר פעילות הרסנית בשטח השמורות, מדיניות דיג מערכתית המתאימה את המגבלות לפי רמת הסיכון של שיטות הדיג השונות, ופיקוח יעיל. כמו כן, כבר היום מוגנים בישראל מינים רבים החשובים לבריאות ולתפקוד המערכת האקולוגית. תהליכי התכנון המרחבי משקפים את הרכיבים הדרושים לפיתוח בר-קיימה של פעילות כלכלית ואיזון בין צורכי הפיתוח והשימור, אך מבחנם יהיה ביישום גישת המערכת האקולוגית נוכח לחצי הפיתוח הצפויים להתעצם במרחב הימי, וזאת במיוחד באזור הכלכלי הבלעדי, אשר בו חסרה אסדרה חקיקתית ותכנונית מתכללת והוא כיום בשליטה של סקטור הגז באופן שאינו כפוף למנגנוני התכנון.

לפיכך, הדרך להשלמת מהלכי האסדרה כבר ברורה ורוב האמצעים למימוש המהלכים כבר קיימים. השלמת המהלכים שכבר הוחל בהם, והשגת רשת יעילה של 30% שטחים מוגנים לצד ניהול ממשק דיג בר-קיימה, תכנון מאוזן ורגיש לטבע, ופיקוח יעיל, יספקו תועלות לא רק למערכת האקולוגית הימית אלא גם לחברה האנושית התלויה בבריאות המערכת לקיומה ושגשוגה.

רשימת מקורות

1. Coll, M. et al. The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats. *PLoS One* **5**, e11842 (2010).
2. Coll, M. et al. The Mediterranean Sea under siege: spatial overlap between marine biodiversity, cumulative threats and marine reserves. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **21**, 465-480 (2012).
3. Rilov, G. et al. A fast-moving target: achieving marine conservation goals under shifting climate and policies. *Ecol. Appl.* **30**, e02009 (2020).
4. Pinnegar, J. K. & Engelhard, G. H. The 'shifting baseline' phenomenon: a global perspective. *Rev. Fish Biol. Fish.* **18**, 1-16 (2008).
5. Prato, G., Guidetti, P., Bartolini, F., Mangialajo, L. & Francour, P. The importance of high-level predators in marine protected area management: consequences of their decline and their potential recovery in the Mediterranean context. *Adv. Oceanogr. Limnol.* **4**, 176-193 (2013).
6. Pollard, D. et al. Epinephelus marginatus. *The IUCN Red List of Threatened Species* (2018).
7. Sala, E. et al. The structure of Mediterranean rocky reef ecosystems across environmental and human gradients, and conservation implications. *PLoS One* **7**, e32742 (2012).

8. Guidetti, P. et al. Large-scale assessment of Mediterranean marine protected areas effects on fish assemblages. *PLoS One* **9**, e91841 (2014).
9. Rilov, G. et al. Adaptive marine conservation planning in the face of climate change: what can we learn from physiological, ecological and genetic studies? *Glob. Ecol. Conserv.* **17**, e00566 (2019).
10. Corrales, X. et al. Hindcasting the dynamics of an Eastern Mediterranean marine ecosystem under the impacts of multiple stressors. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **580**, 17-36 (2017).
11. Rilov, G. Multi-species collapses at the warm edge of a warming sea. *Sci. Rep.* **6**, 1-14 (2016).
12. Galil, B. S. Seeing red: alien species along the Mediterranean coast of Israel. *Aquat. Invasions* **2**, 281-312 (2007).
13. van Rijn, I., Buba, Y., DeLong, J., Kiflawi, M. & Belmaker, J. Large but uneven reduction in fish size across species in relation to changing sea temperatures. *Glob. Change Biol.* **23**, 3667-3674 (2017).
14. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Global Biodiversity Outlook 5. (CBD, 2020).
15. שפניר, א., אדליסט, ד וגולני, ד. אינדיקטורים אקולוגיים לדיג יתר בדיג המכמורת בישראל. המכון ללימודי ים באוניברסיטת חיפה, המדען הראשי, המשרד להגנת הסביבה (2013).
16. Barash, A., van Rijn, I., Lubinevski, H., Goren, M. & Tchernov, D. Long-term bottom trawl fishery surveys of elasmobranchs off the Israeli Mediterranean coast. *21st European Elasmobranch Association Annual Scientific Conference* 49 (2017).
17. Levy, Y. et al. A small fishery with a high impact on sea turtle populations in the eastern Mediterranean. *Zool. Middle East* **61**, 300-317 (2015).
18. Kent, R., Leibovitch, M., Goffman, O., Elasar, M. & Kerem, D. Bycatch of dolphins in Israeli fisheries. *19th Annual Conference of ECS, La Rochelle, France* (2005).
19. Hiddink, J. G. et al. Global analysis of depletion and recovery of seabed biota after bottom trawling disturbance. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **114**, 8301-8306 (2017).
20. Richardson, K., Hardesty, B. D. & Wilcox, C. Estimates of fishing gear loss rates at a global scale: a literature review and meta-analysis. *Fish Fish.* **20**, 1218-1231 (2019).
21. Cordes, E. E. et al. Environmental impacts of the deep-water oil and gas industry: a review to guide management strategies. *Front. Environ. Sci.* **4**, 58 (2016).
22. Weilgart, L. in CBD Expert Workshop on Underwater Noise and Its Impacts on Marine and Coastal Biodiversity. London, United Kingdom. 1-10 (2013).
23. Ellis, J., Fraser, G. & Russell, J. Discharged drilling waste from oil and gas platforms and its effects on benthic communities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **456**, 285-302 (2012).
24. Culin, J., Grbic, L. & Bielic, T. Substandard ships as a threat to the Adriatic Sea biodiversity. *J. Marit.Transp. Eng.* **23** (2018).
25. Anastasopoulou, A. & Fortibuoni, T. Impact of plastic pollution on marine life in the Mediterranean Sea, in *Plastics in the Aquatic Environment - Part I: Current Status and Challenges* 135-196 (Springer, 2022).

26. Kress, N., Gertner, Y. & Shoham-Frider, E. Seawater quality at the brine discharge site from two mega-size seawater reverse osmosis desalination plants in Israel (Eastern Mediterranean). *Water Res.* **171**, 115402 (2020).
27. Grossowicz, M. et al. Modeling the effects of brine outflow from desalination plants on coastal food-webs of the Levantine Basin (Eastern Mediterranean Sea). *Desalination* **496**, 114757 (2020).
28. Barrett, L. T., Swearer, S. E. & Dempster, T. Impacts of marine and freshwater aquaculture on wildlife: a global meta-analysis. *Rev. Aquac.* **11**, 1022-1044 (2019).
29. Methion, S. & Díaz López, B. Natural and anthropogenic drivers of foraging behavior in bottlenose dolphins: influence of shellfish aquaculture. *Aquat. Conserv.* **29**, 927-937 (2019).
30. Lafferty, K. D. et al. Infectious diseases affect marine fisheries and aquaculture economics. *Annu. Rev. Mar. Sci.* **7**, 471-496 (2015).
31. Halpern, B. S. et al. The environmental footprint of global food production. *Nat. Sustain.* 1-13 (2022).
32. Johnson, K. & Dalton, G. *Building industries at sea: 'Blue Growth' and the new maritime economy*. (River Publishers, 2018).
33. Brent, Z. W. The Blue Fix: What's driving blue growth? *Sustain. Sci.* **15**, 31-43 (2020).
34. רוטשילד, א. וחוב', ניתוח סיכונים לבעלי כנף ממתקנים ימיים מול חופי ישראל. *אקולוגיה וסביבה*. **14** (2023).
35. Sisma-Ventura, G., Bialik, O. M., Yam, R., Herut, B. & Silverman, J. pCO_2 variability in the surface waters of the ultra-oligotrophic Levantine Sea: exploring the air-sea CO_2 fluxes in a fast warming region. *Mar. Chem.* **196**, 13-23 (2017).
36. Sisma-Ventura, G., Yam, R. & Shemesh, A. Recent unprecedented warming and oligotrophy of the eastern Mediterranean Sea within the last millennium. *Geophys. Res. Lett.* **41**, 5158-5166 (2014).
37. Hecht, A. Abrupt changes in the characteristics of Atlantic and Levantine intermediate waters in the Southeastern Levantine Basin. *Oceanol. Acta* **15**, 25-42 (1992).
38. Chaikin, S., Dubiner, S. & Belmaker, J. Cold-water species deepen to escape warm water temperatures. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **31**, 75-88 (2021).
39. Galil, B. S., Mienis, H. K., Hoffman, R. & Goren, M. Non-indigenous species along the Israeli Mediterranean coast: tally, policy, outlook. *Hydrobiologia* **848**, 2011-2029 (2021).
40. Galil, B. S., Marchini, A. & Occhipinti-Ambrogi, A. East is east and West is west? Management of marine bioinvasions in the Mediterranean Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **201**, 7-16 (2018).
41. Rilov, G. & Galil, B. S. Marine bioinvasions in the Mediterranean Sea – history, distribution and ecology. In *The Mediterranean Sea: its history and present challenges* 549-575 (Springer, 2014).
42. Galil, B. S. & Zenetos, A. A sea change—exotics in the Eastern Mediterranean Sea. *Invasive Aquatic Species of Europe: Distribution, Impacts and Management* 325–336 (2002).
43. Yeruham, E., Shpigel, M., Abelson, A. & Rilov, G. Ocean warming and tropical invaders erode the performance of a key herbivore. *Ecology* **101**, e02925 (2020).

44. Roberts, C. M. *et al.* Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **114**, 6167–6175 (2017).
45. Townsend, H. *et al.* Progress on implementing ecosystem-based fisheries management in the United States through the use of ecosystem models and analysis. *Front. Mar. Sci.* **6**, (2019).
46. Baum, J. K. & Worm, B. Cascading top-down effects of changing oceanic predator abundances. *J. Anim. Ecol.* **78**, 699–714 (2009).
47. Pikitch, E. K. *et al.* Ecosystem-based fishery management. *Science* **305**, 346–347 (2004).
48. FAO. Fisheries Management. 2: The Ecosystem Approach to Fisheries. FAO Fisheries Technical Guidelines for Responsible Fisheries. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (2003).
49. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Vol. 3 Agriculture Organization of the United Nations. Fisheries Department (2020).
50. אדליסט, ד. ורילוב, ג. מגמות בדיג הישראלי. *אקולוגיה וסביבה*. **1**, 90–97 (2014).
51. רוטשילד, א. וחוב'. מפסיקים לכרות את הענף שאנו יושבים עליו - הרפורמה הנחוצה בניהול הדיג בים התיכון. *אקולוגיה וסביבה*. **5**, 98–105 (2014).
52. רוטשילד, א. *SeaWatch דוח מסכם לשנת 2017*. מוקד (2017).
53. בן-דוד, ע. המדינה לא אוכפת את האיסור של עצמה לדוג. *ידיעות אחרונות - ממון* (2017).
54. רוטשילד, א. ויאיון, נ. הקמת יחידת אכיפה ימית ברשות הטבע והגנים - פתרון לשימור הים התיכון בדגש חוקי הדיג שימור הטבע והבטיחות הימית. החברה להגנת הטבע .(2016).
55. שטרן, נ. עונתיות הרבייה של הדגה בחופי ישראל ובחינת פיזור הפאונה במרחב ובזמן: המלצות לממשק דיג לשמירה מיטבית על הדגה ועל הטבע הימי בחופי ישראל .(2016).
56. רוטשילד, א. הפסקת דיג המכמורת בישראל- צעד חיוני לתכנון ימי מושכל ולשמירת משאב הדגה והסביבה הימית. החברה להגנת הטבע. החברה להגנת הטבע .(2019).
57. Gonçalves, E. J. Marine Protected Areas as Tools for Ocean Sustainability. in *Blue Planet Law: The Ecology of Our Economic and Technological World* (eds Maria da Glória Garcia & António Cortês) 131–141 (Springer International Publishing, 2023).
58. Grorud-Colvert, K. *et al.* The MPA Guide: A framework to achieve global goals for the ocean. *Science* **373**, eabf0861 (2021).
59. Sala, E. *et al.* Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. *Nature* **592**, 397–402 (2021).
60. Edgar, G. J. *et al.* Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature* **506**, 216–220 (2014).
61. CBD. Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework. Draft decision submitted by the President in Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity (2022).
62. O'Leary, B. C. *et al.* Effective coverage targets for ocean protection. *Conserv. Lett.* **9**, 398–404 (2016).
63. יהל, ר. ואנגרט, נ. מדיניות שמירת הטבע בים התיכון- שמורות טבע ימיות ככלי לשימור הסביבה והמגוון בים התיכון (2012).
64. מינהל התכנון. מסמך מדיניות למרחב הימי של ישראל- ים תיכון- דוח שלב ב'- מדיניות למרחב הימי, מאי 2020 (2020).
65. ירוחם, א. דיג בשטחים ימיים מוגנים: האם ניתן לאכול את העוגה ולהשאיר אותה שלמה? החברה להגנת הטבע (2019) .

66. Ohayon, S., Granot, I. & Belmaker, J. A meta-analysis reveals edge effects within marine protected areas. *Nat. Ecol. Evol.* **5**, 1301–1308 (2021).
67. Frid, O. *et al.* Marine protected areas' positive effect on fish biomass persists across the steep climatic gradient of the Mediterranean Sea. *J. Appl. Ecol.* **60**, 638–649 (2023).
68. Turnbull, J. W., Johnston, E. L. & Clark, G. F. Evaluating the social and ecological effectiveness of partially protected marine areas. *Conserv. Biol.* **35**, 921–932 (2021).
69. משרד האנרגיה והתשתיות. עדכון הסקר האסטרטגי הסביבתי לחיפוש ולהפקה של נפט ושל גז טבעי בים. דוח דו-שנתי .(2020).
70. רוטשילד, א. וחוב'. מידת הייצוג של יחידות אקולוגיות של קרקעית הים התיכון בשטחים מוגנים (מים ריבוניים) – מצב קיים והמלצות לעדכון מסמך המדיניות למרחב הימי. *אקולוגיה וסביבה* **14** (2024).
71. משרד האנרגיה. סקר אסטרטגי סביבתי לחיפוש ולהפקה של נפט ושל גז טבעי בים. 259. (2016).
72. Coleman, D. F., Austin Jr, J. A., Ben-Avraham, Z., Makovsky, Y. & Tchernov, D. Seafloor pockmarks, deepwater corals, and cold seeps along the continental margin of Israel. *Oceanography* **25**, 40–41 (2012).
73. כנרי, מ. ותום, מ. עדכון בתי גידול רגישים בהפרעת פלמחים ובסביבתה- עדכון מפת בתי הגידול - דצמבר 2021, הוגש למשרד האנרגיה. חקר ימים ואגמים לישראל. (2021).
74. SPNI & University of Haifa. Fisheries Restricted Area (FRA) proposal for the Palmahim Disturbance Cold Water Coral Gardens and Cold Seeps. Submitted to the GFCM on April 2021, https://mafish.org.il/fra/ (2021).
75. שבתאי, ע. וחוב'. תוכנית-אב לשמורות טבע ימיות באזור הכלכלי הבלעדי של ישראל בים התיכון. החברה להגנת הטבע, אוניברסיטת חיפה, אוניברסיטת תל אביב, המשרד להגנת הסביבה, רשות הטבע והגנים, חקר ימים ואגמים לישראל, רשות העתיקות. (2023) .
76. Ehler, C. & Douvere, F. Marine Spatial Planning: a step-by-step approach toward ecosystem-based management. UNESCO, Paris (2009).
77. IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. Report No. CC BY 4.0, IEA, Paris (2023).
78. Roff, J. *Marine Conservation Ecology*. Routledge (2013).
79. Heppell, S. S., Heppell, S. A., Read, A. J. & Crowder, L. B. Effects of fishing on long-lived marine organisms. in *Marine Conservation Biology: The Science of Maintaining the Sea's Biodiversity* (eds. Norse, E. A. & Crowder, L. B.) 211–231 (Island Press, Washington, DC, 2005).
80. Rudd, M. A. & Tupper, M. H. The impact of Nassau grouper size and abundance on scuba diver site selection and MPA economics. *Coastal Manag.* **30**, 133–151 (2002).
81. Garcia, S., Yimin, Y., Rice, J. & Charles, A. Rebuilding of marine fisheries. FAO (2018).
82. לזרוס, מ. פריד,א. ויהל, ר. סקר שמורות הטבע הימיות בים התיכון הישראלי. דוח מסכם לסקרים שנערכו בשנים 2015, 2017, 2019. רשות הטבע (2020).
83. Miller, E., Spanier, E., Diamant, R. & Yahel, R. Nature reserves facilitate conservation of the Mediterranean slipper lobster *Scyllarides latus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **714**, 57–69 (2023).
84. רהב, א. וחוב'. תוכנית הניטור הלאומית בים התיכון לשנת 2021- ניטור המגוון הביולוגי. חקר ימים ואגמים לישראל (2022).
85. לוי, י. וריבק, א. סיכום עונת הרבייה של צבי-הים 2021. רשות הטבע והגנים (2021).

7 הערכה כלכלית של שירותי המערכת האקולוגית הימית, תיאוריה והדגמה ביחס לים התיכון

שירי צמח שמיר[1], יעל שקד מנדלברג[2,1], זיו צמח שמיר[4,3]

[1] בית הספר לקיימות, אוניברסיטת רייכמן (המרכז הבינתחומי הרצליה)
[2] המחלקה לסביבה, תכנון וקיימות, אוניברסיטת בר אילן
[3] החוג לביולוגיה ימית והחוג לביוטכנולוגיות כחולות וחקלאות ימית מקיימת, בית הספר למדעי הים ע"ש ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה
[4] תחנת מוריס קאהן לחקר הים, אוניברסיטת חיפה

shiri.zemahshamir@runi.ac.il, yaelmandelberg@gmail.com, zzemah@univ.haifa.ac.il

תקציר

פרק זה עוסק בהצגה והגדרה של המושג שירותי מערכת אקולוגית ובפרט שירותי המערכת האקולוגית הימיים בים התיכון. בתחילת הפרק מוצגים סוגי שירותי המערכת השונים ונסקרת אבולוציית הגדרתם. הפרק מתאר את האיומים והאתגרים הרבים העומדים בפני שירותי המערכת הימיים בים התיכון, הנובעים מהשפעות שינויי האקלים ומפעילות אנושית אינטנסיבית. הפרק דן בשיטות שונות להערכה כלכלית של שירותי המערכת, כולל מדדים כלכליים וכלים בולטים לכימות התועלות הנובעות מהם. כלים ושיטות אלו מספקים בסיס חיוני לפיתוח מדיניות ניהול ושימור בר-קיימה, כפי שמוצג באמצעות מקרי חקר נבחרים מהים התיכון, הממחישים את החשיבות בביצוע הערכה כלכלית של שירותי מערכת אלו ביצירת קיימות אקולוגית-חברתית-כלכלית.

שירותי המערכת האקולוגית - פירוט והגדרות

שירותי המערכת האקולוגית (Ecosystem Services) הינם תהליכים ורכיבים במערכות האקולוגיות המשפיעים באופן ישיר או עקיף על רווחת האדם, ושמופקות מהם תועלות לקיום האדם[1,2]. השירותים האלה כוללים אספקה של מוצרים שהאדם צורך באופן ישיר כמו מזון ומים, שירותי ויסות כמו בקרת אקלים וטיהור מים, ושירותים תרבותיים כמו השראה רוחנית ופנאי.

טבלה 1. האבולוציה של הקלסיפיקציה של שירותי המערכת האקולוגית

פרויקט העוסק בשירותי מערכת והגדרתם	תיאור הפרויקט	תיאור שירותי המערכת האקולוגיים וייחודיות הפרויקט
הערכת המערכות האקולוגיות של המילניום (MEA) 2005 [3] Millennium Ecosystem Assessment	פרויקט אקולוגי שהושק ב-2001 תחת מטריית תוכנית הסביבה של האו"ם (UNEP-UN environment program).	שירותי המערכת האקולוגיים הם התועלות שבני אדם מפיקים ממערכות אקולוגיות, המחולקות לארבע קטגוריות: אספקה, רגולציה, תמיכה, ושירותים תרבותיים. ייחודיות: לראשונה נערכה סינתזה עולמית של מצב המערכות האקולוגיות והשירותים שהן מספקות, תוך חיבור בין מדע, חברה וכלכלה.
פרויקט TEEB 2012 [4] The Economics of Ecosystems and Biodiversity	יוזמה בינלאומית שמטרתה לקדם את ההבנה הכלכלית של המערכות האקולוגיות והשירותים שהן מספקות לאנושות. פרויקט כלכלת המערכות האקולוגיות והמגוון הביולוגי שהחל בגרמניה ובנציבות האירופית ואומץ לאחר מכן על-ידי UNEP, הוסיף היבטים כלכליים של שירותי המערכת האקולוגית.	שירותי מערכת אקולוגית כ"תשתית כלכלית" המספקת ערכים כלכליים ישירים (כגון מזון, מים, תיירות) ועקיפים (כגון איכות סביבה ובריאות). ייחודיות: הפרויקט כלל את הממד הכלכלי להערכת שירותי המערכת, כדי להמחיש את העלות של אובדן המערכות האקולוגיות.
סיווג משאבי טבע וניהול טבעי של הסביבה (CICES) 2018 [5] Common International Classification of Ecosystem Services	סיווג מדעי להערכת ההון הטבעי עבור מטרות חשבונאיות.	שירותי המערכת האקולוגיים מסווגים לפי תרומות ישירות (אספקה ורגולציה) וערכים תרבותיים. ייחודיות: יצירת סיווג מדעי אחיד, מותאם לניהול כלכלי וחשבונאי של משאבי טבע.
פלטפורמת המדע-מדיניות הבין-ממשלתית למגוון ביולוגי ושירותי מערכות אקולוגיות (IPBES) 2019 [6] The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services	המאמץ הגלובלי הגדול ביותר כיום ביצירת סינתזה של הידע על שירותי מערכות אקולוגיות ומגוון ביולוגי.	"תרומות הטבע לאנשים" (Nature's Contributions to People) דגש על תרומות חיוביות ושליליות הכוללות ערכים חומריים, לא חומריים ותרבותיים. ייחודיות: תפיסה הוליסטית הכוללת תרומות שליליות (למשל, שיטפונות) ושימת דגש על ערכים תרבותיים ולא חומריים.
מערכת סיווג השירותים האקולוגיים והמשאבים הטבעיים הסופיים (FEGS) 2020 [7] The Final Ecosystem Goods & Services	מערכת סיווג שהוכנה על-ידי סוכנות הסביבה של ארה"ב.	התמקדות בזיהוי השירותים האקולוגיים הסופיים המוענקים ישירות למשתמשי קצה, תוך הבחנה בין שירותים תומכים לסופיים והשפעתם הישירה על רווחת האנושות. ייחודיות: הדגשת השירותים הנתפסים ישירות על-ידי משתמשי קצה, מה שהופך את הערכת המערכת לשימושית יותר למדיניות ציבורית.

שירותי המערכת השונים

שירותי המערכת האקולוגית מחולקים לארבע קבוצות עיקריות, כפי שהוצעו על-ידי ה-Millennium Ecosystem Assessment בשנת 2005 [3]:

שירותי אספקה (Provisioning Services) – תהליכים ורכיבים המספקים תוצרים מוחשיים כמו מזון, מים, עץ, סיבים. דוגמה בהקשר הימי – שירותים אלו כוללים דגים ואצות המשמשים כמזון.

שירותי ויסות (Regulating Services) – תהליכים התורמים לשיפור בתנאי הסביבה עבור האדם כמו בקרת שיטפונות, ויסות זרימה ואיכות המים, בקרת מחלות, שיפור איכות אוויר, האבקה, בקרת מזיקים. דוגמה בהקשר הימי – שירות וויסות אקלים גלובלי ומקומי המתקבל מלכידת פחמן של עשב-הים.

שירותי תרבות (Cultural Services) – תרומתם של תהליכים המספקים תועלות לבני האדם באופן שאינו חומרי, כמו פנאי ונופש, אסתטיקה, מחקר, חינוך, זהות תרבותית ותחושת מקום. דוגמה בהקשר הימי – הנאת צוללים מצפייה בשונית האלמוגים.

שירותי תמיכה (Supporting Services) – הנקראים גם תהליכים אקולוגיים תומכים (Supporting Ecosystem Processes) אלו התהליכים האקולוגיים הבסיסיים שבלעדיהם מערכת אקולוגית לא יכולה להתקיים כלל. כמו היווצרות קרקע, ייצור ראשוני, ומחזורי חומרים כמו חמצן ופחמן דו-חמצני. דוגמה בהקשר הימי – מיקרואורגניזמים המפרקים חומר אורגני בגוף המים ובקרקעית הים, בתהליך משתחררים חומרים חיוניים (כמו חנקן וזרחן) שהינם חומרי הזנה התומכים בתפקוד המערכת האקולוגית הימית. שירותים אלה תורמים באופן עקיף לרווחת האדם בכך שהם מקיימים את התהליכים והתפקודים במערכת האקולוגית הנחוצים לשירותי אספקה, ויסות ותרבות. קבוצה זו כונתה על-ידי TEEB (The Economics of Ecosystem and Biodiversity) [4] כ"שירותי בית גידול ותמיכה", המהווים בסיס כמעט לכל שאר השירותים. מערכות אקולוגית מספקות מרחבי מחיה לאורגניזמים השונים ושומרות על המגוון הגנטי. טבלה 1 מתארת את האבולוציה של הקלסיפיקציה של הגדרת שירותי המערכת האקולוגית.

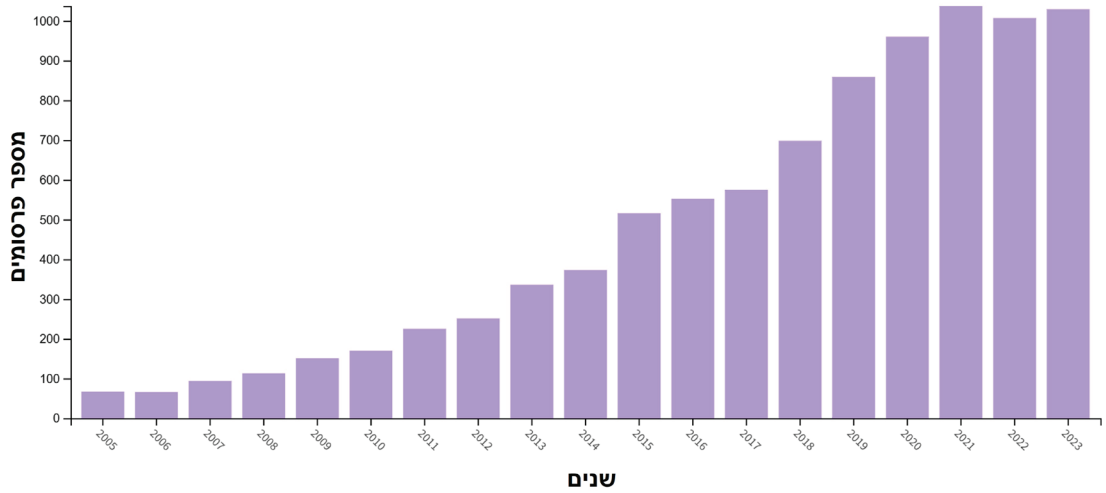
בפרויקט IPBES הושם דגש על הממשק בין המערכות האקולוגיות לאדם ולכן התמקדו בשירותים שזוהו כמשפיעים ישירות על רווחת בני האדם. שירותי התמיכה נתפסו כתשתית המניעה את כל שאר השירותים ואינם נצרכים ישירות על-ידי בני האדם ולכן לא נשמרו כקטגוריה נפרדת. IPBES שילב את שירותי התמיכה במונח רחב יותר של תהליכים ותפקידים אקולוגיים שהינם בסיס לשאר שירותי המערכת האקולוגיים. הסיווג של IPBES קשור להגדרות הקודמות שהוצגו על-ידי MEA, אך ביישום שפה המדגישה את הקשר בין המערכות האקולוגיות לרווחת האדם ומבנה מחדש את הקטגוריות כך:

- תועלות חומריות (Material Contribution) – שירותים שמספקים משאבים מוחשיים, כמו מזון, מים וחומרי גלם. אלו מקבילים לשירותי אספקה.
- תועלות לא חומריות (Contribution Non-material) – שירותים שמספקים ערכים תרבותיים, רוחניים, חינוכיים או אסתטיים. אלו מקבילים לשירותי תרבות.
- תועלות רגולטיביות (Contribution Regulating) – שירותים שמווסתים תהליכים טבעיים לטובת האדם, למשל ויסות אקלים וטיהור מים. אלו מקבילים לשירותי ויסות.

כיום, סיווג שירותי מערכת על-פי MEA (הכולל את ארבעת השירותים) עדיין נמצא בשימוש בתחומים שונים שבהם חוקרים ממשיכים להשתמש במושגים הקלאסיים. יחד עם זאת, סיווג שירותי המערכת על-פי שלושה שירותים, זוכה לתפוצה הולכת וגוברת, הן בשימוש שמות השירותים הראשונים (שירותי אספקה, תרבות וויסות) והן בשימוש הקטגוריות של IPBES. סיווג זה ניכר בעיקר במחקרי מדיניות וניהול מבוסס מערכות אקולוגיות, כאשר הוא מדגיש את התרומות הישירות של שירותי המערכת לרווחת האדם ובכך מתקשר בין מדע למדיניות.

מחקרי שירותי המערכת האקולוגית הימית לאורך זמן

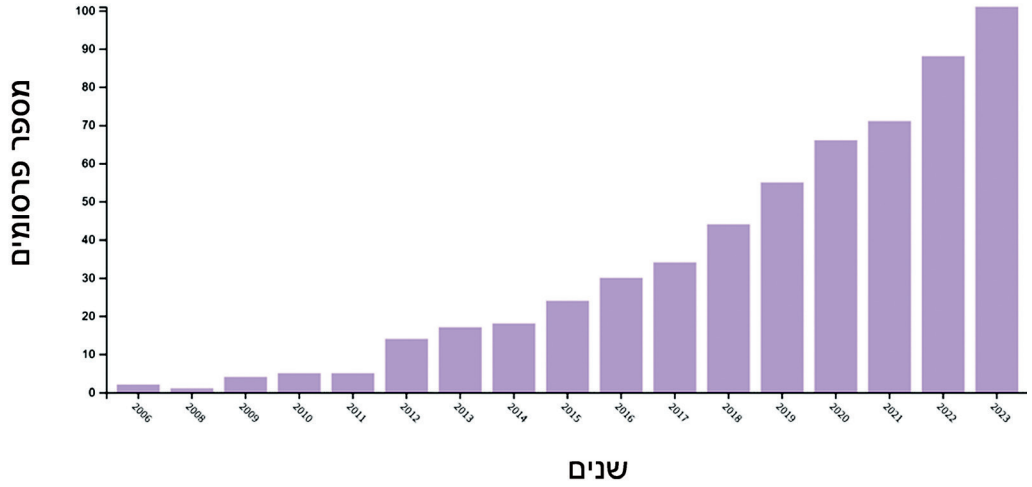
בעשורים האחרונים, גישת שירותי המערכת האקולוגית זוכה לעניין רב בקרב אנשי אקדמיה, גורמי ממשל וגופים המנהלים שטחים פתוחים מתוך הבנה שגישה זו יכולה לשמש כמסגרת ניהולית המאפשרת לכרוך יחד היבטים סביבתיים וחברתיים. בעזרת יישום גישה זו, ניתן למקסם תועלות, לזהות תמורות הנובעות מיישום מדיניות סביבתית ולספק מידע וכלים עבור מקבלי ההחלטות לצורך קביעת מדיניות מיטבית[8-10]. למרות זאת, עד כה, המערכות האקולוגיות הימיות כמעט לא זכו להתייחסות מחקרית בתחום שירותי המערכת האקולוגית. באזור מזרח הים התיכון, שבו המערכת האקולוגית מצויה תחת לחצים אנתרופוגניים וסביבתיים רבים, המחקר בתחום זה חסר באופן ניכר [11-15].



איור 1. השתנות לאורך זמן של פרסום מאמרים העוסקים בשירותי המערכת האקולוגית הימית (מבוסס על WoS).

בבחינת ההשתנות לאורך הזמן בכמות פרסום המאמרים העוסקים בשירותי המערכת האקולוגית הימית (מבוסס על חיפוש ב-WoS שבוצע ביולי 2024 עם מילות המפתח: marine ecosystem services ו-Mediterranean) נמצא כי כמות המאמרים השנתית העוסקים בשירותי המערכת האקולוגית הימית הולכת וגדלה משמעותית (איור 1) לאורך

השנים, בעוד שכמות המאמרים העוסקים בנושאים אלה בים התיכון באותן שנים מועטה יחסית (איור 2). יחד עם זאת יש לציין כי בשנים האחרונות (2022-2023), נראית מגמת עלייה במספר המאמרים (איור 2).



איור 2. השתנות לאורך זמן של פרסום מאמרים העוסקים בשירותי המערכת האקולוגית הימית במזרח התיכון (מבוסס על WoS).

בנוסף למחקרים מקומיים המתמקדים לרוב בשירותי מערכת אקולוגית יחידים[16-18], קודמה יוזמה אסטרטגית רב-לאומית, ה-MAP (Mediterranean Action Plan) של האו"ם (UNEP). יוזמה זו, מהווה את הפלטפורמה המחקרית הנרחבת והכוללת ביותר המתמקדת בשירותי המערכת האקולוגית הימית בכלל ארצות הים התיכון[19]. יוזמה זו כללה הערכה של מספר שירותי מערכת אקולוגית עבור ארצות הים התיכון ביניהם אספקת מזון, שירותי נופש ופנאי, ויסות אקלימי וויסות איכות מי הים. שירותים אלו הוערכו בכ-26 מיליארד אירו בשנה עבור הים התיכון כולו ועבור ישראל בכ-1.1 מיליארד אירו לשנה. אולם, ערכים אלה מהווים הערכה כלכלית גסה ולא מדויקת. ראשית, עבור ישראל, בהיעדר מידע קיים, הונחו הנחות המבוססות על מדדים הקשורים במדינות אחרות. שנית, הנתונים הכלכליים מהווים נתון מצרפי בעל רזולוציה גסה לכלל השטח ולא מספקים תובנות באשר לשונות המרחבית באספקה של שירותי המערכת השונים. שלישית, המתודולוגיות שיושמו במחקר הובילו לעיתים להערכות יתר כלכליות (כמו במקרה של שירות וויסות האקלים העולמי). מחקרים שנערכו בישראל בדגש על שירותי המערכת האקולוגית הימית הינם מועטים ולרוב מתמקדים בהיבט יחיד של המערכת האקולוגית, אינם מספקים מבט נרחב לכלל המערכת הימית ונעדרים התייחסות לתרחישים עתידיים והשפעתם על המשך אספקת השירותים[19,20]. בעשור האחרון התבצע פרויקט מחקרי מקיף במסגרת "המארג" (התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע בישראל, בחסות האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים https://hamaarag.org.il), למיפוי וכימות כלל השירותים המסופקים מכלל המערכות האקולוגיות בישראל, וביניהן גם המערכות הימיות. הערכה זו של שירותי המערכת האקולוגית מספקת תמונת מצב נוכחית וזיהוי מגמות

עבר באספקת שירותי מערכת, אולם היא אינה כוללת התייחסות לפוטנציאל האספקה ולהשפעתם של תרחישי פיתוח עתידיים. יתר על כך, חלק הארי של ההערכה הכלכלית המיושמת בפרויקט נסמך על שיטת Benefit Transfer, שבה ההערכה הכלכלית מתבססת על הערכות קודמות לשירותי מערכת שבוצעו באזורים אחרים בעולם תוך התאמה לפרמטרים המקומיים בישראל. שיטה זו הינה חסכונית, אך זכתה לביקורת רבה בשל אי דיוקים הנגזרים מההטרוגניות הרבה בין אזורי המחקר השונים. מרבית המחקרים העוסקים בשירותי המערכת האקולוגית בכלל, ובמערכת הימית בפרט, מציגים ניתוח כלכלי כולל המספק לרוב מבט-על מצרפי לכלל השטח הנבדק, ללא התעמקות בהבדלים המרחביים הקשורים לאופן אספקת התועלות למשתמשים השונים.

איומים ואתגרים על שירותי המערכת האקולוגית הימית

שירותי המערכת האקולוגית בים התיכון ניצבים בפני איומים ואתגרים רבים הנובעים מפעילות אנושית ושינויי אקלים. שינויי האקלים גורמים לעליית טמפרטורות הים ולעלייה בחומציות המים, ואלה משפיעים רבות על המערכת האקולוגית הימית, למשל, גורמים לשינוי בתפוצת המינים הימיים. תופעות אלו פוגעות בחוסן וביציבות של המערכת האקולוגית ומסכנות אספקת שירותים חיוניים כמו אספקת מזון ושימור המגוון הביולוגי. לדוגמה, במאמר של (Malhi et al 2020)[21] מודגש כי שינויי האקלים מאיימים על תפקוד המערכת האקולוגית בשל שינוי בתנאי האקלים הממוצעים, כמו גם בשל עלייה בתדירותם של אירועים קיצוניים כמו גלי חום וסופות עוצמתיות, אשר פוגעים קשות במערכות אקולוגיות ימיות. זיהום ימי מהווה איום נוסף וקריטי, כאשר פלסטיק, כימיקלים ושפכים מזהמים את המים ופוגעים במגוון הביולוגי[22,23]. זיהום זה לא רק מסכן את המינים המקומיים אלא גם פוגע באיכות השירותים שמספקת המערכת האקולוגית, כמו דיג ותיירות. השילוב של זיהום ימי עם שינויי האקלים מגביר את הפגיעות של המערכת האקולוגית ויוצר אתגרים גדולים לניהול בר-קיימה[21].

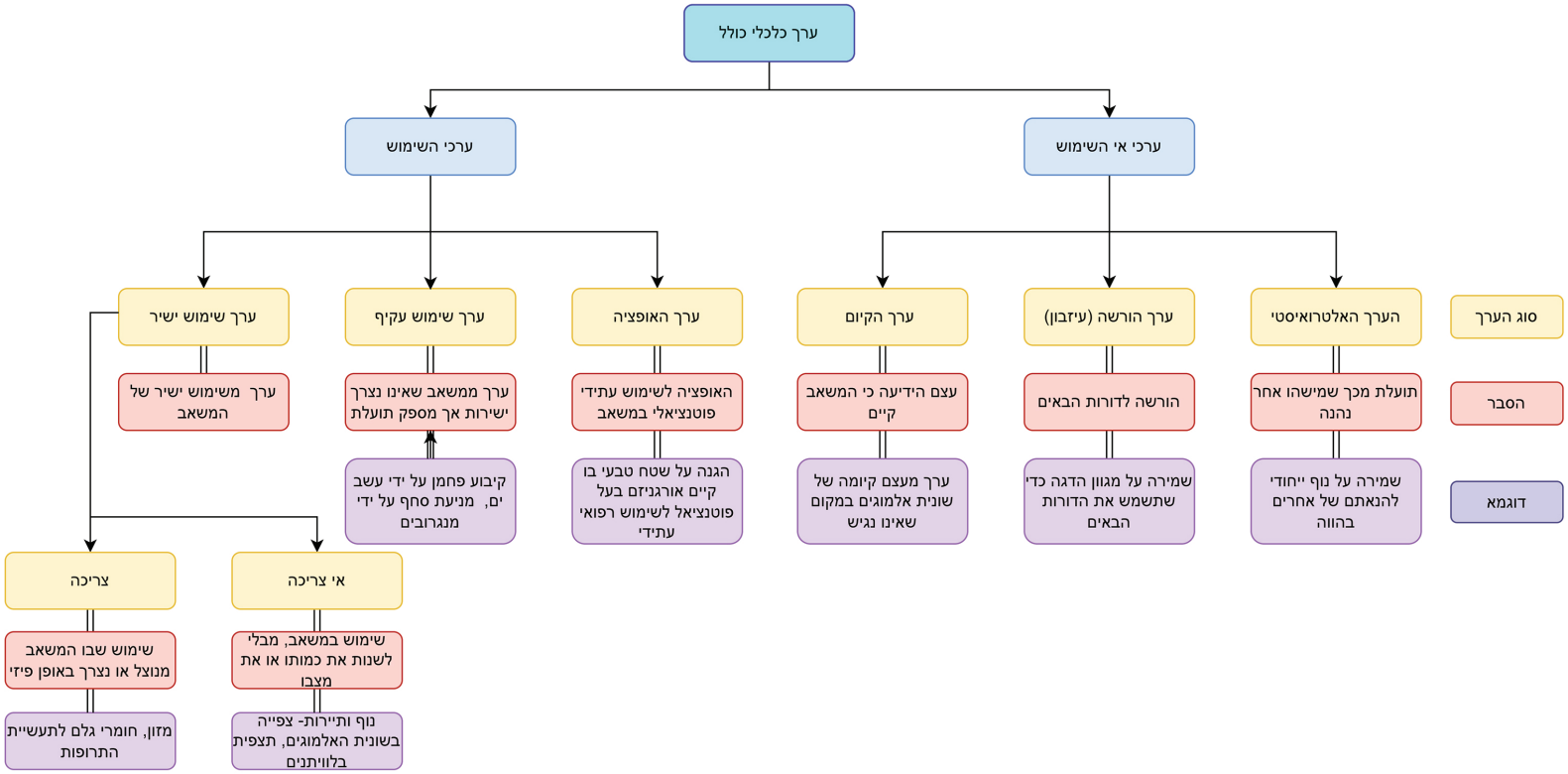
בנוסף, דיג יתר וחוסר פיקוח נאות מובילים לדלדול מאגרי הדגה ופוגעים במערכת האקולוגית ובשירותיה[24,25]. הרס בתי גידול ימיים כתוצאה מפעילויות כמו בנייה על קו החוף וחקלאות ימית לא מבוקרת גם הם מסכנים שירותי מערכת אקולוגית חיוניים כמו ויסות אקלים והגנה על החוף [23,26]. האיומים הללו מתוארים כגורמים היכולים להוביל לשינויים פתאומיים ובלתי הפיכים במערכת האקולוגית[27,28]. שינויים אלו עלולים להיגרם בעקבות איום קיצוני אחד או משילוב מספר איומים יחד.

איום נוסף ומשמעותי בים התיכון הינו הגירתם של מינים פולשים. מינים פולשים ימיים מהווים איום משמעותי על המגוון הביולוגי ועל תפקוד המערכת האקולוגית הימית. הם עלולים להתחרות במינים מקומיים, לשנות בתי גידול ולשבש מארגי מזון כתוצאה ממנגנונים כמו תחרות על משאבים, טריפה והנדסת מערכות אקולוגיות[29]. הגירת מינים פולשים אל הים התיכון לרוב מתרחשת דרך תעלת סואץ (הגירה לספסיאנית), לאחר מכן באמצעות הובלה בכלי שיט וסחר באקווריומים[30-32]. מספר המינים שאינם מקומיים בים התיכון הוכפל בשנים האחרונות[30,32]. השפעות שינויי האקלים מעצימות את בעיית המינים הפולשים הימיים, ומגדילות את פוטנציאל הפלישה של מינים שונים למים קרירים יותר בים התיכון[32]. שילוב של איומים נוספים עם השפעות שינויי האקלים, אף צפויים להעלות את רמת סיכון

המינים הפולשים ולהגביר את פגיעותם של מינים מקומיים מאוימים כגון צבי-ים, יונקים ימיים ואלמוגים[33,34].
אסטרטגיות ניהול יעילות, הכוללות הערכות סיכונים ואמצעי מניעה, חיוניות לצמצום האיומים הנובעים ממינים פולשים ימיים. לשם כך נדרשים נתונים מקיפים על ההשפעות הכוללות של המינים הפולשים ועל הדרכים שבהן הם מגיעים לאזור. בנוסף לנחקר עד כה, יש צורך במחקרים נוספים ומשלימים בכדי לספק תשתית ידע עדכנית שתסייע בגיבוש אסטרטגיות לניהול ולשימור המערכות האקולוגיות הייחודיות של הים התיכון [30,31,35].
ניהול בר-קיימה של מערכות אקולוגיות ימיות מחייב איזון בין ניצול שירותי המערכת האקולוגית לבין שמירה על יציבותן. דוגמה בולטת לכך היא התפלת מי ים, אשר ממלאת תפקיד מרכזי במשק המים של ישראל (ואף אצל שכנותיה). התפלת מי הים בים התיכון מהווה מרכיב חיוני בביטחון אספקת מי השתייה, בהתמודדות עם המחסור במים וביצירת יתרונות כלכליים משמעותיים, שכן ערכו הכלכלי של כל מ"ק מים מותפל עולה על עלות הפקתו הישירה[36].
כיום, בישראל פועלים מספר מתקני התפלה לאורכו של חוף הים התיכון, לרבות חדרה, שורק, פלמחים, אשדוד ואשקלון. מתקנים אלו מספקים חלק ניכר מצריכת מי השתייה במדינה ותורמים לשיפור איכות המים[37]. עם זאת, לצד תרומתה המשמעותית, ההתפלה כרוכה באתגרים סביבתיים מהותיים. בין ההשלכות הסביבתיות ניתן למנות את הצורך בהקצאת שטחים נרחבים להפקת אנרגיה מתחדשת לשם הפעלת מתקני ההתפלה וכן את פליטת רכז המים המלוחים (תמלחת) לים, אשר עלולה להשפיע לרעה על המערכת האקולוגית הימית המקומית[38-40]. נוסף על כך, תהליך ההתפלה מוביל לעלייה בפליטת גזי חממה ולהשפעות שליליות על אוכלוסיות ימיות שונות[41].
יתרה מכך, ההתפלה עשויה להשפיע על מדיניות ניהול משק המים בכך שהיא מפחיתה את המוטיבציה לשימור מים ועלולה לשנות את מאזן הכוחות בקביעת מדיניות בתחום[41]. יחד עם זאת, חרף השלכותיה הסביבתיות, ההתפלה תורמת תרומה משמעותית לביטחון המים של ישראל ולשמירה על מקורות מים מתוקים טבעיים[41]. לפיכך, פיתוחה וניהולה של טכנולוגיית ההתפלה מחייבים התייחסות זהירה להיבטים הסביבתיים, הכלכליים והחברתיים הכרוכים בה, מתוך שאיפה לאיזון בין צורכי אספקת המים לבין שמירה על המערכות האקולוגיות הימיות.

שיטות להערכה כלכלית של שירותי המערכת האקולוגית

שירותי המערכת האקולוגית הם מוצר ציבורי, כאשר ללא התערבות הרגולטור, הם חשופים לפגיעה ולדלדול משאבים. אמידת ערך שירותים אלו חשובה הן לקבלת החלטות הקשורות לשימור או פיתוח סביבתי והן לגבי הקצאת המשאבים באופן אופטימלי בין שימושים כלכליים לשימושים סביבתיים. הערך הכלכלי הכולל של שירותי המערכת בנוי מערכי שימוש וערכי אי שימוש, כל אחד מאלו בנוי משלושה ערכים מרכזיים כפי שניתן לראות באיור 3. הקצאת משאבים לשימוש סביבתי מתמקדת בקיומם של ערכי שימוש עקיף (כדוגמת שירותי תרבות, כדוגמת שמורת האלמוגים באילת) וערכי שימוש ישיר, שהינם ללא צריכה בפועל (Non-extractive) (כדוגמת שירותי בריאות, למשל קיבוע פחמן על-ידי עשב-הים באילת). שימושים אלו מאפשרים אספקה של שירותים תוך שימור המערכת האקולוגית הימית ומשאביה.



איור 3. ערך כלכלי כולל, שבו נכללים ערכי שימוש וערכי אי-שימוש.

הערכה כלכלית של שירותי מערכות אקולוגיות ימיות מספקת תמיכה בפיתוח מדיניות ובהחלטות ניהול ימי [42-43]. הצמדת ערכים כספיים לתועלות המסופקות על-ידי מערכות אקולוגיות אלו מאפשרת למקבלי החלטות להבין את הוויתורים והאיזונים בין שימור לבין פעילות כלכלית[44]. בנוסף, הינה חיונית להשוואת שירותי מערכות אקולוגיות שונים ולבחינת הוויתורים שבין השירותים לבין פעילויות כלכליות אחרות העשויות להשפיע על המערכות האקולוגיות הימיות[45]. תהליך זה מאפשר בחינה רחבה ותמיכה בניהול בר-קיימה, כדוגמת ניהול מבוסס מערכות אקולוגיות (Ecosystem -Based Management)[46,47]. יחד עם זאת, הערכה כלכלית מקיפה של שירותי המערכות האקולוגיות הימיות נתקלת באתגרים מהותיים, בהם מורכבות ודינמיות המערכות האקולוגיות הימיות, האתגר בקישור השינויים במבנה ובתפקוד המערכות האקולוגיות אל תפוקת השירותים המתקבלים ומחסור בנתונים ומידע[48,49].

קיימים שיטות וכלים שונים שבהם ניתן להשתמש בהערכות כלכליות של שירותי המערכת האקולוגית בכדי להתמודד עם אתגרים אלו, עיקרם מוצגים להלן.

טבלה 2. שירותי מערכת אקולוגית נבחרים ושיטת הערכה תואמות.

סוג שירות מערכת אקולוגית	שירות מערכת אקולוגית	שיטת הערכה	תיאור
אספקה	אספקת ביומסה מאצות להפקת תחליפי דלקים לתחבורה (ביואתנול)	מחיר שוק - Market price	הערכה לפי מחיר ביואתנול ומוצרים נלווים
	משאבים גנטיים לתעשיית התרופות על בסיס מחקר אורגניזמים ימיים	מחיר שוק - Market price ערך אופציה Option value ערך ביטוחי Insurance value שיטת הערכה מותנית - Contingent valuation method	אומדן הפוטנציאל המסחרי לתרכובות ביולוגיות על בסיס מחיר תרופות פרמבצטיות
	אספקת גז / נפט משדות ימיים	מחיר שוק – Market price שיטת העלות האלטרנטיבית Opportunity Cost Method שיטת הרווחיות – Net Present Value	אומדן התרומה הכלכלית של הפקת גז / נפט מאזורים ימיים, תוך התחשבות הן בערך המיידי של המשאבים והן בהשלכות ארוכות הטווח על הכלכלה, החברה והסביבה
ויסות	הפחתת מזהמים על-ידי המערכת האקולוגית הימית – עשב-הים פועל כמסנן ביולוגי במים רדודים על-ידי קליטת עודפי חומרים מזינים (כגון ניטרטים וזרחן) שמגיעים כתוצאה מהזרמת שפכים או חקלאות. בנוסף, מיקרואורגניזמים בקרקעית החולית הסמוכה לשדות עשב-ים מבצעים תהליכי דנטריפיקציה, המפחיתים ריכוזי חנקן שמזיקים למערכת האקולוגית הימית	עלות החלפה - Replacement cost העברת תועלת - Benefit transfer עלות נזקים שנמנעו - Avoided damage cost	טיפול ביולוגי בזיהום הקשור במתכות כבדות
	ויסות איכות האוויר – פלנקטון פוטי, אצות ועשב-ים הקולטים פחמן דו-חמצני ופולטים חמצן מסייעים בוויסות איכות האוויר	עלות החלפה -Replacement cost	ספיחה וטיפול במזהמים באטמוספרה על-ידי המערכת הביולוגית הימית
תרבות	מורשת – למשל המערכות הימיות הנושאות ערך תרבותי רב ומשמעותי המשקף קשר היסטורי, חברתי ואף דתי של קהילות עם הים. שונית האלמוגים כסמל תרבות, מוקד לתיירות חינוך וחקר. מורשת הקשורה לים ומהווה השראה לדורות הבאים.	שיטת הערכה מותנית - Contingent valuation ניסוי בחירה בדיד - Discrete choice experiment	ערכי הורשה וקיום הנובעים מהמערכת האקולוגית הימית

מדדים כלכליים

את מרבית התועלות הנובעות משירותי המערכת האקולוגית ניתן לבטא על-ידי מדדים כלכליים בעזרת שיטות הערכה המותאמות לשירות המערכת האקולוגית הנבדקת. להלן שיטות הערכה כלכלית המשמשות במחקר: **מחיר שוק** (Market Price) – שיטה זו משתמשת במחירים נפוצים של סחורות ושימושים הנסחרים בשווקים מקומיים או בינלאומיים. מחירי השוק משקפים את הנכונות לשלם של פרטים עבור עלויות תועלות נסחרות. **עלות החלפה** (Replacement Cost) – שיטה זו משתמשת בעלויות של תחליפים מלאכותיים של מוצרים ושירותים אקולוגיים. השיטה הינה שימושית בהערכת תועלת משימוש עקיף, כאשר נתונים אקולוגיים אינם נגישים להערכת פונקציות נזק. **שיטת הערכה מותנית** (Contingent Valuation) – שיטה זו יוצרת שווקים מובנים על-ידי שימוש בתרחישים ומחירים היפותטיים על מנת לבדוק את נכונות האוכלוסייה לשלם עבור שירותי המערכת האקולוגית. **עלות נזקים שנמנעו** (Avoided Damage Cost) – שיטה זו מבצעת הערכה של הנזקים שייווצרו כתוצאה מאובדן/פגיעה בשירותי מערכת. **ניסוי בחירה בדיד** (Discrete Choice Experiments) – שיטה זו אומדת את הערך הכלכלי של תכונות שונות של מוצרים סביבתיים שאין להם שוק. **שיטת העלות האלטרנטיבית** (Opportunity Cost) – הערכת שווי שירות מערכת אקולוגי על בסיס ההכנסות הפוטנציאליות שהיו יכולות להיווצר משימושים אחרים באותו משאב או שטח. **שיטת הערך הביטוחי** (Insurance Value Method) – משמשת להערכת הערך הכלכלי של שירותי מערכת אקולוגית על בסיס תרומתם להפחתת סיכונים ולשמירה על יציבות סביבתית וחברתית. **שיטת הרווחיות** (Net Present Value – NPV) – שיטה זו משמשת להערכת כדאיות כלכלית של ניצול משאבי טבע מול השקעות בשימור. בטבלה 2 מוצגות דוגמאות לשירותי מערכת אקולוגית הנבחרים ושיטות ההערכה המתאימות להם.

מיפוי מרחבי של שירותי המערכת האקולוגית

ניתוח ומיפוי מרחבי של שירותי מערכת אקולוגית הינו תחום מתפתח בשנים האחרונות[50]. היכולת להצביע על אזורים קריטיים כ"נקודות חמות" (Hotspots) לאספקה של שירותי מערכת, לצד יכולת הערכת השטפים הנובעים ממערכות אקולוגיות שונות, מספקות כלי ניהול נוחים ותשתית מבוססת עבור בעלי עניין ומנגנוני רגולציה בתהליך קבלת ההחלטות[51]. יחד עם זאת, ביצוע מיפוי מרחבי וניתוח של שירותי המערכת האקולוגית הימית כולל אתגרים נרחבים יותר משל מיפוי ביבשה. ביבשה סקאלות המיפוי לרוב מבוססות על גבולות פיזיים או מינהליים מוגדרים ואילו בים הסקאלות עשויות להיות גדולות יותר ופחות מוגדרות בשל האופי הדינמי והרציף של הסביבה הימית. כך גם גבולות בין מערכות אקולוגיות שונות ביבשה נוטים להיות מוגדרים יותר (למשל בין יער לשטח חקלאי) ואילו בים גבולות אלו מטושטשים יותר, מקושרים ודינמיים (למשל השפעת זרמים ותנאים אוקיינוגרפיים משתנים). בנוסף, איסוף נתונים וניטור בסביבה הימית מורכבים יותר מבחינה טכנית, ואף שיטות המיפוי מצריכות לרוב שילוב של טכנולוגיות ייחודיות כמו סונארים, מצופים אוקיינוגרפיים וחישה מרחוק המותאמת לסביבה הימית אשר לא תמיד זמינה, לעומת שיטות המיפוי ביבשה, המבוססות על טכנולוגיות מבוססות קרקע וחישה מרחוק, כאשר איסוף הנתונים וניטור קלים יותר לביצוע וקיים יותר מידע זמין.

אל מול אתגרים אלו, כיום קיימות מספר יוזמות שונות המספקות לחוקרים כלים מבוססי מיפוי וניתוח מרחבי לביצוע הערכת שירותי המערכת האקולוגית הימית. בחירת הפלטפורמה המתאימה תיקבע על-ידי מבצעי המחקר בהתבסס על כמות הנתונים הקיימים והחסרים, על מאפייני האזור הנחקר ועל-פי מטרות המחקר והממצאים הנדרשים. פלטפורמה נוחה ויעילה למיפוי מרחבי והערכת שירותי המערכת האקולוגית היא InVEST - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, מערכת זו מספקת כלים ייעודיים למקבלי ההחלטות, תוך שימוש במיפוי ובערכים המוניטריים הנגזרים מהם[52]. יתרונה הגדול של InVEST הוא היכולת לייצר מודלים בתנאי אי-ודאות ומידע חלקי, ללא צורך במשאבים רבים, כמו איסוף מידע ישירות מן השטח, השקעת זמן ו/או כספים שמאפשרים התאמה קלה לאזור המחקר הספציפי. InVEST משתמשת במידע מרחבי קיים (כתלות במודל, כולל שימוש בשכבות ממ"ג GIS - Geographic Information System כגון תפרוסת בתי גידול במרחב, מפה בתימטרית, מיקום גורמי איום במרחב ומרחבי עניין) – ואיסוף נתונים המוצבים במודלים על מנת לפתור את המודל שנתפר על-ידי המשתמש לאזור המחקר. בנוסף, ניתן על-ידי הכנסת תרחישים עתידיים למודל, למפות את השתנות האספקה, הן כמותית והן מרחבית, בהתאם לפרמטרים הנבחנים[53,54]. ביצוע הערכות שירותי מערכת תחת תרחישים עתידיים משמעותי במיוחד לאור שינויי האקלים והשפעותיהם העתידיות ומאפשר הערכות מרחבית ניהולית למצב עתידי אפשרי[55]. למרות יכולתה של המערכת לספק אומדן מרחבי וכלכלי למגוון שירותים, היא מבוססת על מודלים דטרמיניסטיים וקבועים אשר מקשים על התאמתם לתנאים מקומיים ובכך עלולים להביא לעיוות התוצאות הסופיות המתקבלות. פלטפורמת מידול חלופית הינה ARIES (ARtificial Intelligence for Ecosystem Services), מערכת להערכת שירותי מערכת אקולוגית המשתמשת במודלים מבוססי תהליכים (Process-Based Models), המנתחים אינטראקציות דינמיות בין אספקת שירותי מערכת, זרימה (Flow), וביקוש. המערכת משלבת נתונים מרחביים ודינמיים ממגוון מקורות ומשתמשת בבינה מלאכותית כדי להתאים את המודלים לנתונים הזמינים לאזור המחקר הספציפי[56]. לאור מגבלות הידע הזמין והקיים, ARIES מספק כלי המסוגל להתמודד עם תנאי אי-ודאות רבים לשם ניתוח פיזי ומרחבי של שירותי המערכת האקולוגית הימית. פלטפורמת ARIES מאפשרת למשתמש ליצור מודלים אד-הוק, המותאמים לפי ההקשר (הקונטקסט) הנחקר ולעדכנם במידה שמידע חדש הופך לזמין. ARIES משתמשת במידע מרחבי קיים (שכבות GIS) או בדעת מומחה, על מנת להריץ את המודל בצורה דטרמיניסטית או בצורה הסתברותית, על-ידי שימוש בהסתברות בייסיאנית[57,58]. על-ידי הכנסת תרחישים עתידיים למודל, ניתן למפות את השתנות האספקה, הן כמותית והן מרחבית, בהתאם לפרמטרים הנבחנים[59]. מלבד היכולת למידול שירותי מערכת, ARIES מציעה גם אפשרות למפות את המשתמשים השונים הנהנים משירותי המערכת (לדוגמה: אוכלוסייה הנהנית מהמגוון הביולוגי הקיים במערכת אקולוגית הסמוכה למקום מגוריה) ובכך להצביע על אזורי אספקה קריטיים של שירותי המערכת.

הערכת שירותי המערכת האקולוגית הימית בים התיכון - מקרי חקר

להלן מקרי חקר העוסקים בהערכת שירותי מערכת באזור הים התיכון. מחקרים אלו כוללים דוגמאות שונות לשירותי המערכת הימיים ומדגישים את החשיבות בביצוע הערכה כלכלית לקידום שמירת משאבים ותמיכה בתכנון וניהול בר-קיימה בים התיכון.

הערכה כלכלית של שירותי המערכת האקולוגית במים הכלכליים של ישראל, בים התיכון

בעשור האחרון בוצע מחקר להערכת שירותי מערכת אקולוגית בים התיכון לאורך המים הכלכליים של מדינת ישראל[60,61]. במסגרת המחקר, בוצעה הערכה כלכלית לשירותי המערכת האקולוגית הבאים:

אספקת מזון: יכולת המערכת האקולוגית לספק ביומסה למאכל מדיג וחקלאות ימית.

ויסות אקלים גלובלי: מיתון השפעות שינויי אקלים על-ידי שאיבה ביולוגית של פחמן אטמוספרי לקרקעית הים.

טיפול בפסולת: ספיחה וטיפול בשפכים בסביבה החופית והימית.

מניעת בלייה חופית: יכולתם של מבנים ביוגניים (טבלאות גידוד) למנוע ולווסת בלייה חופית.

נופש ופנאי: יכולת המערכת האקולוגית לספק חוויות אטרקטיביות עבור דייגים חובבים וצוללנים.

המחקרים בים התיכון הישראלי מצאו כי: 1. הערך הכלכלי של אספקת הדגים באזור המים הכלכליים של ישראל נאמד בכ-53 מיליון דולר בשנה. 2. שירותי הטיפול בשפכים הוערכו בכ-143 מיליון דולר בשנה. 3. ההגנה על החופים שסופקה על-ידי המערכות האקולוגיות הימיות הוערכה בכ-39 מיליון דולר בשנה. שילוב כל השירותים האקולוגיים שנבחנו במאמר נאמד בכ-235 מיליון דולר לשנה. בנוסף, הערכת השירות האקולוגי של ויסות אקלים גלובלי בים התיכון הישראלי, המתבצע על-ידי קיבוע פחמן אטמוספרי על-ידי אורגניזמים ימיים, הוערכה כלכלית בטווח של 265.1 עד 1270.9 אירו לקמ"ר לשנה. הערכה זו נמוכה משמעותית, בהשוואה לשיטות הערכה קודמות, בשל שילוב של ערכים ספציפיים לאזור והשפעת הזמן על ההערכה. הערכות אלו מדגישות את החשיבות של שמירה על המערכות האקולוגיות הימיות כדי להמשיך ולספק את השירותים הכלכליים הקריטיים הללו[29,30].

הערכה כלכלית של הון טבעי ושירותי המערכת בבתי גידול ימיים בים התיכון

המחקר התמקד בהערכה כלכלית של הון טבעי ימי ושירותי מערכת המסופקים על-ידי בתי גידול משטחי עשב-ים (*Posidonia oceanica*) ובית גידול ביוגני (Coralligenous bioconstructions) הנמצאים במרחב אזור ימי מוגן בים התיכון[62]. המחקר הדגיש את חשיבותם האקולוגית ותמיכתם ברווחת האדם ומצא כי ההערכה הכספית של ההון הטבעי באזור הימי המוגן הינו כ-12 מיליון יורו.

במחקר זיהו והעריכו מספר שירותי מערכת:

- **אספקת חומרי גלם**: תמיכתם של בתי הגידול באספקה של חומרים שונים ממקור טבעי לשימוש האדם למטרות שונות, כדוגמה, אצות ים כחומר גלם להאכלת דגים.
- **אספקת מזון**: תמיכתם של בתי הגידול באורגניזמים ימיים כגון דגים וצדפות, החיוניים לביטחון תזונתי.
- **אספקת בית גידול וסביבה לרבייה ולגידול צאצאים**: שימוש כמקום מקלט לדגים צעירים ואורגניזמים ימיים אחרים מאפשר להם לשגשג ומקדם שמירה על מגוון מינים.
- **מחזורי נוטריינטים**: יכולת הספיגה והמיחזור של חומרים מזינים החיוניים לשמירה על איכות המים ובריאות המערכת האקולוגית.

- **קיבוע פחמן** : יכולת קיבוע הפחמן של עשב-הים.
- **תיירות**: מוקד משיכה תיירותי עבור צוללים ומשנרקלים.

במחקר זה נערכה הערכה של הערך הביו-פיזי של ההון הטבעי בבתי הגידול הנחקרים, אשר הומר לאחר מכן לשווי כספי. ממצאי המחקר מדגישים את חשיבותו של בית הגידול עשב-הים כמאגר ביומסה משמעותי וכמקור חיוני למידע גנטי. כמו כן, הודגשה תרומתו של בית הגידול הביוגני ליצירת מורכבות אקולוגית, המספקת תשתית למגוון רחב של מינים ולמערכות אקולוגיות יציבות. הערכת הערך הביו-פיזי והכלכלי של מלאי ההון הטבעי התבססה על ניתוח כלכלי של שירותי מערכת נבחרים המיוצרים על-ידי בתי גידול אלו. אחת המסקנות המרכזיות של המחקר היא כי השילוב בין הערכים הביו-פיזיים והכלכליים של ההון הטבעי לבין המיפוי המרחבי של ערכים אלו בשמורה, מספק כלי שימושי עבור מנהלי שטח וקובעי מדיניות מקומיים. כלי זה מאפשר תכנון אסטרטגי שמטרתו הגנה על המגוון הביולוגי הימי ועל שירותי המערכת האקולוגית המהותיים לרווחת האדם. מקרה חקר זה מדגיש את הפוטנציאל של הערכות מסוג זה לתמוך בניהול בר-קיימה של אזורים מוגנים ימיים נוספים. כמו כן, הוא מספק מסגרת עבודה לשילוב הערכות כלכליות בתהליכי תכנון וקבלת החלטות במרחב הימי, תוך קידום מדיניות מבוססת ידע להגנה על מערכות אקולוגיות חיוניות.

הערכת שירותי מערכת באזור חופי-ימי בים התיכון למען ניהול משאבים אקולוגיים

המחקר העריך את שירותי המערכת האקולוגית במערכת החופית-ימית (coastal) בים האדריאטי הצפון-מרכזי[63]. המחקר התמקד בהבנת היחסים בין יכולת אספקת שירותי המערכת לזרימתם (Flows), משמע, בחן כיצד יכולת המערכת לספק שירותים (קיבולת) משפיעה על כמות השירותים שנמסרים בפועל (זרימה). במחקר התמקדו בשירותי המערכת הבאים המוצגים על-פי סוגם:

- **אספקה**: חקלאות ימית של צדפות ודגים – תספוקת של מזון.
- **ויסות**: 1. מניעת בלייה חופית – תרומה במניעת בלייה חופית. 2. קיבוע פחמן – מתייחס לתהליך שבו המערכות אקולוגיות קולטות פחמן דו-חמצני מהאטמוספרה ומאחסנות אותו בצמחים ובקרקע. תהליך זה מפחית את רמות הפחמן באטמוספרה ותורם לשמירה על איזון האקלים הגלובלי.
- **תרבות** : 1. תיירות – נופש שבו תיירים נחשפים למערכת האקולוגית הימית (למשל ביקור ורחצה). 2. שיט תיירותי – נופש של שיט תענוגות וניווט.

המחקר מדגיש את הצורך בניהול מקיף ובר-קיימה של משאבים אקולוגיים, תוך התחשבות בהשפעות השימושים האנושיים עליהם ובקשרים המורכבים שבין שירותי המערכת השונים. במסגרת המחקר נאספו נתונים הנוגעים ליכולת האספקה ולזרימת שירותי המערכת האקולוגיים, ויושם ניתוח מרחבי על מנת לזהות דפוסים מורכבים במידע זה. הניתוח כלל התייחסות למאפיינים סביבתיים ולשימושים האנושיים השונים באזור המחקר. יחד עם זאת, ניתוח שכזה מתאים לביצוע גם במערכות חופיות- ימיות (coastal) במקומות אחרים, על-פי נתוני ומאפייני אזור המחקר הספציפי.
בנוסף, נבחנו הקשרים בין יכולת האספקה של שירותי המערכת לבין זרימתם, תוך הבחנה בין שירותי מערכת

המשולבים זה בזה לבין אלו הפועלים באופן נפרד. הממצאים שהתקבלו שימשו לבניית תובנות שנועדו לתמוך בניהול בר-קיימה של המשאבים האקולוגיים באזור, תוך שימת דגש על הצורך לשלב גורמים כלכליים וחברתיים בתהליך קבלת ההחלטות.
לשם גיבוש אסטרטגיות ניהול מקיימות לשירותי המערכת, בדגש על שירותי אספקה ותרבות, מדגיש המחקר את החשיבות של שילוב מניעים כלכליים וחברתיים. שילוב זה יכול לתרום לקידום קיימות אקולוגית, חברתית וכלכלית באופן משולב, תוך תמיכה ברווחת האדם ובשמירה על המערכת האקולוגית הימית.

סיכום

שירותי המערכת האקולוגית הימית מספקים מגוון תועלות חיוניות לאדם ולסביבה, כולל אספקת משאבים, ויסות תהליכים אקולוגיים ותמיכה במערכות ביולוגיות. שירותים אלו כוללים, בין היתר, אספקת מזון ומשאבים ביולוגיים, ויסות איכות המים, ויסות אקלים, ספיחת פחמן, וכן תרומה לתיירות, תרבות ופנאי. יכולתן של מערכות ימיות לספק שירותים אלו תלויה באיזון האקולוגי שלהן וביציבותן לאורך זמן.
עם זאת, המערכות האקולוגיות הימיות והשירותים שהן מספקות מצויים תחת איומים גוברים, הנובעים בעיקר מהשפעות אנושיות כגון דיג יתר, זיהום, שינויי אקלים, פיתוח חופי והגירת מינים פולשים. לחצים אלו מובילים להידרדרות מערכות אקולוגיות ולפגיעה בתפקודן, מה שעלול לגרום לאובדן בלתי הפיך של שירותים קריטיים. ההשלכות כוללות פגיעה בביטחון תזונתי, עלייה בתדירות אירועי קיצון אקלימיים, ושינויי דינמיקה במארג המזון הימי.
יחד עם חשיבותם הכלכלית והאקולוגית של שירותי המערכת האקולוגית הימית, קיים קושי מובנה בהערכת ערכם, בעיקר בשל אופיים הדינמי והמורכב של המערכות האקולוגיות בים ומאפייני הסביבה הימית. מחקרים בתחום מדגישים את החשיבות הגוברת של פיתוח שיטות כמותיות ואיכותניות להערכת שווי שירותי המערכת האקולוגיים, תוך שימוש במודלים מבוססי נתונים, ניתוחים כלכליים ושימוש בכלי מיפוי מרחביים. הערכות אלו מספקות תובנה נרחבת על חשיבותם הכלכלית והסביבתית של המערכות האקולוגיות הימיות ושל השירותים שאותם הן מספקות. שילוב בין תובנות מחקריות אלו עם חקיקה וניהול מרחבי מאפשר יצירת איזון בין שימור המערכות הימיות לבין ניצול מושכל של משאביהן, תוך צמצום הפגיעה בסביבה הימית ושמירה על חוסנה לטווח הארוך.

רשימת מקורות

1. כהן-שחם ע', וגרוסברד ש' שידותי מערכות אקולוגיות בישראל-מבט-על. המארג-התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב, (2021)
2. Costanza, R.et al. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosyst. Serv.* **28,** 1–16 (2017).
3. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. *Island Press* (2005).
4. TEEB, R.O. Mainstreaming the Economics of Nature. TEEB Geneva, Switzerland (2010).
5. Haines-Young, R. & Potschin, M.B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and guidance on the application of the revised structure. (2018).
6. IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Brondizio, E.S., Settele, J., Díaz, S. & Ngo, H.T. (eds). IPBES Secretariat, Bonn, Germany (2019). https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673.4o
7. DeWitt, T.H. et al. The Final Ecosystem Goods & Services (FEGS) approach: a beneficiary-centric method to support ecosystem-based management. In: O'Higgins, T., Lago, M., DeWitt, T. (eds) Ecosystem-based management, ecosystem services and aquatic biodiversity. *Springer, Cham* (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-45843-0_7.
8. Polasky, S. What's nature done for you lately: measuring the value of ecosystem services. *Choices* **23,** 42–46 (2008).
9. Daily, G. C. et al. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Front. Ecol. Environ.* **7,** 21–28 (2009).
10. Jordan, S. J. et al. Accounting for natural resources and environmental sustainability: linking ecosystem services to human well-being. *Environ. Sci. Technol.* **44,** 1530–1536 (2010).
11. Albano, P. G. et al. Native biodiversity collapse in the eastern Mediterranean. *Proc. R. Soc. B* **288,** 20202469 (2021).
12. Ofir, E. et al. Evaluation of fisheries management policies in the alien species-rich Eastern Mediterranean under climate change. *Front. Mar. Sci.* **10**, 1155480 (2023).
13. Coll, M. et al. The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats. *PLoS One* **5,** e11842 (2010).
14. Lejeusne, C., Chevaldonné, P., Pergent-Martini, C., Boudouresque, C. F. & Pérez, T. Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea. *Trends Ecol. Evol.* **25,** 250–260 (2010).

15. UNEP/MAP. State of the Mediterranean Marine and Coastal Environment. UNEP/MAP – Barcelona Convention, Athens (2012).
16. Jones, N., Sophoulis, C. M. & Malesios, C. Economic valuation of coastal water quality and protest responses: a case study in Mitilini, Greece. J. Socio-Econ. **37,** 2478–2491 (2008).
17. Brenner, J., Jiménez, J. A., Sardá, R. & Garola, A. An assessment of the non-market value of the ecosystem services provided by the Catalan coastal zone, Spain. Ocean Coast. Manag. **53,** 27–38 (2010).
18. Murillas-Maza, A., Virto, J., Gallastegui, M. C., González, P. & Fernández-Macho, J. The value of open ocean ecosystems: a case study for the Spanish exclusive economic zone. Nat. Resour. Forum **35,** 122–133 (2011).
19. UNEP/MAP. UNEP/MAP – Mediterranean Action Plan. https://www.unep.org/unepmap/ (accessed 14 Aug 2024).
20. Becker, N. & Lavee, D. Commercial development and conservation value: the case of Rosh Haniqra marine reserve in Israel. J. Infrastruct. Dev. **1,** 193–217 (2009).
21. Canu, D. M. et al. Estimating the value of carbon sequestration ecosystem services in the Mediterranean Sea: an ecological economics approach. Glob. Environ. Change **32,** 87–95 (2015).
22. Cappelletto, M. et al. The Mediterranean Sea we want. Ocean Coast. Res. ***69***, e21031 (2021).
23. Spanier, E. & Zviely, D. Key environmental impacts along the Mediterranean coast of Israel in the last 100 years. J. Mar. Sci. Eng. **11**, 2 (2022).
24. Fiorentino, F. & Vitale, S. How can we reduce the overexploitation of the Mediterranean resources? Front. Mar. Sci. **8**, 674633 (2021).
25. Demirel, N., Zengin, M. & Ulman, A. First large-scale eastern Mediterranean and Black Sea stock assessment reveals a dramatic decline. Front. Mar. Sci. **7**, 103 (2020).
26. Tičina, V., Katavić, I. & Grubišić, L. Marine aquaculture impacts on marine biota in oligotrophic environments of the Mediterranean Sea–a review. Front. Mar. Sci. **7**, 217 (2020).
27. Malhi, Y.et al. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. Philos. Trans. R. Soc. B **375,** 20190104 (2020).
28. Jetoo, S. & Lahtinen, V. The good, the bad and the future: a SWOT analysis of the ecosystem approach to governance in the Baltic Sea region. Sustainability **13,** 10539 (2021).
29. Tsirintanis, K. et al. Bioinvasion impacts on biodiversity, ecosystem services, and human health in the Mediterranean Sea. Aquat. Invasions **17,** 308–352 (2022).
30. Gerovasileiou, V. et al. Introduced species in Mediterranean marine caves: an increasing but neglected threat. Mediterr. Mar. Sci. **23**, 995–1005 (2022).
31. Occhipinti-Ambrogi, A. Biopollution by invasive marine non-indigenous species: a review of potential adverse ecological effects in a changing climate. Int. J. Environ. Res. Public Health **18**, 4268 (2021).

32. Zenetos, A. & Galanidi, M. Mediterranean non-indigenous species at the start of the 2020s: recent changes. Mar. Biodivers. Rec. **13**, 1–17 (2020).
33. Yapici, S. A risk screening of potential invasiveness of alien and neonative marine fishes in the Mediterranean Sea: implications for sustainable management. Sustainability **13**, 13765 (2021).
34. Killi, N. et al. Risk screening of the potential invasiveness of non-native jellyfishes in the Mediterranean Sea. Mar. Pollut. Bull. **150**, 110728 (2020).
35. Sliškovi**ć**, M., Gudelj, A. & Piria, M. A Systematic Analysis of the Mediterranean Sea (IHO Sea Area) in the WRiMS Database. Diversity **16**, 358 (2024).
36. Palatnik, R. R. The Economic Value of Seawater Desalination—The Case of Israel. Econ.-Wide Model. Water Reg. Glob. Scales 193–208 (2019).
37. Tenne, A., Hoffman, D. & Levi, E. Quantifying the actual benefits of large-scale seawater desalination in Israel. Desalination Water Treat. **51**, 26–37 (2013).
38. Roth, M. B. & Tal, A. The ecological tradeoffs of desalination in land-constrained countries seeking to mitigate climate change. Desalination **529**, 115607 (2022).
39. Grossowicz, M. et al. Modeling the effects of brine outflow from desalination plants on coastal food-webs of the Levantine basin (eastern Mediterranean Sea). Desalination **496**, 114757 (2020).
40. Sirota, R. et al. Impacts of Desalination Brine Discharge on Benthic Ecosystems. Environ. Sci. Technol. **58**, 5631–5645 (2024).
41. Feitelson, E. On the implications of seawater desalination: some insights from the Israeli case. In Tapping the Oceans 60–75 (Edward Elgar Publishing, 2018).
42. Haines-Young, R., Potschin-Young, M. & Czúcz, B. Report on the use of CICES to identify and characterise the biophysical, social and monetary dimensions of ES assessments. Deliverable D**4** 2 (2018).
43. Austen, M. et al. Valuing Marine Ecosystems—Taking into account the value of ecosystem benefits in the Blue Economy (2019).
44. Friedrich, L. A. et al. Using ecosystem service assessments to support participatory marine spatial planning. Ocean Coast. Manag. **188**, 105121 (2020).
45. Milon, J. W. & Alvarez, S. The elusive quest for valuation of coastal and marine ecosystem services. Water **11**, 1518 (2019).
46. Bryhn, A. et al. A model for disentangling dependencies and impacts among human activities and marine ecosystem services. Environ. Manag. **65**, 575–586 (2020).
47. Riisager-Simonsen, C. et al. Using ecosystem-services assessments to determine trade-offs in ecosystem-based management of marine mammals. Conserv. Biol. **34**, 1152–1164 (2020).
48. Zemah-Shamir, S. et al. Economic Valuation of Fish Provision, Wastewater Treatment, and Coastal Protection in the Israeli Mediterranean Sea. Fishes **8**, 236 (2023).

49. Santos, A. R. et al. Linking ecosystem pressures and marine macroinvertebrate ecosystem services in mangroves and seagrasses. Mar. Ecol. Prog. Ser. **732**, 15–32 (2024).
50. Bitoun, R. E., Trégarot, E. & Devillers, R. Bridging theory and practice in ecosystem services mapping: a systematic review. Environ. Syst. Decis. **42**, 103–116 (2022)
51. Maes, J. et al. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. Ecosyst. Serv. **1**, 31–39 (2012).
52. Caro, C., Cunha, P. P., Marques, J. C. & Teixeira, Z. Identifying ecosystem services research hotspots to illustrate the importance of site-specific research: an Atlantic coastal region case study. Environ. Sustain. Indic. **6**, 100031 (2020).
53. Arkema, K., Fisher, D. & Wyatt, K. Economic valuation of ecosystem services in Bahamian marine protected areas. BREEF by The Natural Capital Project, Stanford University, **22** (2017).
54. Mukhopadhyay, A. et al. Global trends in using the InVEST model suite and related research: A systematic review. Ecohydrol. Hydrobiol. (2024).
55. González-García, A. et al. National blue carbon assessment in Spain using InVEST: Current state and future perspectives. Ecosyst. Serv. **53**, 101397 (2022).
56. Villa, F. et al. A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment. PLoS One **9**, e91001 (2014).
57. Marcot, B. G., et al. Guidelines for developing and updating Bayesian belief networks applied to ecological modeling and conservation. Can. J. For. Res. **36**, 3063–3074 (2006).
58. McCann, R. K., et al. Bayesian belief networks: applications in ecology and natural resource management. Can. J. For. Res. **36**, 3053–3062 (2006).
59. Rivadeneyra, P. et al. Multi-platform assessment of coastal protection and carbon sequestration in the Venice Lagoon under future scenarios (2024).
60. Peled, Y. et al. A new perspective on valuating marine climate regulation: the Israeli Mediterranean as a case study. Ecosyst. Serv. **29**, 83–90 (2018).
61. Zemah-Shamir, S. et al. Economic valuation of fish provision, wastewater treatment, and coastal protection in the Israeli Mediterranean Sea. Fishes **8**, 236 (2023).
62. Buonocore, E. et al. Marine natural capital and ecosystem services: an environmental accounting model. Ecol. Model. **424**, 109029 (2020).
63. Basconi, L. et al. Ecosystem services for supporting coastal and marine resources management: An example from the Adriatic Sea (Central Mediterranean Sea). *Ocean & Coastal Management* **235**, 106486 (2023).

8 צמיחת הכלכלה הכחולה - זווית רגולטורית ירוקה

ציפי איסר-איציק,
טל גרנות, שגיא אגמון
ליפא מאיר ושות'

tzipi@lipameir.co.il,
talg@lipameir.co.il,
sagi@lipameir.co.il

תקציר

הסיכונים הסביבתיים המתרבים במרחב הימי כתוצאה מריבוי האינטרסים הכלכליים והתפתחותה של הכלכלה הכחולה, מדגישים את הצורך ביישום מדיניות יעילה ואחראית להתמודדות עם האתגרים האלו. לשם כך, נדרשת בין היתר אסדרה מתכללת בעלת ראייה רחבה של מגוון השימושים השונים, אשר נשענת על מידע מקצועי, המאפשר בחינת כל השפעות הגומלין, ויצירת איזון אינטרסים מושכל. בשנים האחרונות החלו תהליכי חשיבה לגיבוש מדיניות לתכנון ולניהול המרחב הימי של ישראל, ואימוץ חקיקה אשר תקבע את תחולת הדין הישראלי באזורים הימיים השונים. תהליכים אלה טרם הושלמו. במרבית תחומי הפעילות במרחב הימי עדיין שורר ביזור רגולטורי, אשר יוצר כשלים בצמיחה בת-קיימה של הכלכלה הכחולה. אף שננקטו בשנים האחרונות צעדים רגולטוריים קונקרטיים להגנה על משאבי הטבע במרחב הימי, אין די בכך. הספרות המקצועית עוסקת בצורה נרחבת בגישת הניהול המשולב של המרחב הימי (במובחן מהמרחב היבשתי), כמתודולוגיה אפקטיבית, אשר יש בה כדי לתת מענה לאתגרים הקיימים, לספק הגנה למרחב הימי מפני סיכונים סביבתיים, ולעודד צמיחה בת-קיימה של הכלכלה הכחולה. ייחודו של המרחב הימי (בהשוואה למרחב היבשתי), אופיו הגלובלי, הדינמיות של המערכות האקולוגיות שבו, והמורכבות הנובעת מריבוי שימושים, מחייבים את אימוץ גישת הניהול המשולב כדי להתמודד עם אתגרים סביבתיים וכלכליים בצורה הוליסטית. מאמר זה ימחיש את האתגרים האמורים, ינתח חלק מהסוגיות העולות נוכח אתגרים אלה, ויתייחס לאפיקי פעולה רלוונטיים ברוח גישת הניהול המשולב של המרחב הימי.

מבוא

"כלכלה כחולה" היא מונח רווח, המתייחס (על-פי הצהרת משלחת האיחוד האירופאי לאזור הים התיכון[1]) לסקטורים שונים ובהם: חקלאות ימית וחוות דגים; דיג; נמלים; ספנות; תיירות חוף; תעבורה ימית; קידוחי גז ונפט; התפלה; ביוטכנולוגיה ימית; אנרגיה ימית וטורבינות רוח ימיות, והגנה על הסביבה הימית. בשנים האחרונות ישנו עיסוק הולך וגובר בקידומה של הכלכלה הכחולה, ולצד זה גם עיסוק ב"צמיחה כחולה", כאשר הכוונה היא לקדם, לצד פעילויות הכלכלה הכחולה, גם מדיניות אסטרטגית ארוכת טווח למיצוי מושכל, מקיים ומוסדר של הפוטנציאל הכלכלי בים. מדיניות זו אמורה להוביל להסדרת פיתוח מיטבי, הנסמך על משאבי הים לקידום וחיזוק כלכלה בת-קיימה, תוך

שימור הסביבה הימית ומזעור הפגיעה בה, ככל הניתן.

צמיחתה של הכלכלה הכחולה בשנים האחרונות מבטאת את תלותו הגוברת של האדם בשירותיו החיוניים של הים: מים (אידוי טבעי, התפלה), מזון (דיג), אקלים (גורם ממתן, קליטת גזי חממה), פנאי (שיט, מלונאות, חופים, ערכי טבע), מקור אנרגיה ועוד. ואולם, פוטנציאל הניצול של משאבי הים עומד בסכנה בשל השינויים הדרמטיים הנגרמים לים ולאזורי החוף כתוצאה ישירה או עקיפה של שימושי האדם: התחממות גלובלית/שינויי אקלים; שינויים במגוון הביולוגי והתבססות מינים פולשים; בנייה והתערבות בסביבה הטבעית; זיהומים מעשה ידי אדם (פלסטיק, דליפות של מזהמים שונים, דלקים ושמנים) ועוד.

במשך שנים שררה בעולם התפיסה של "חופש הים", שמקורה באמנת חוק הים 1982[2], לפיה מדינות חופשיות לפעול כרצונן בעומק הים. אנו מבינים כיום, שתפיסה זו אינה בת-קיימה, ועלולה להביא תוך שנים מעטות לקריסה אקולוגית, שעשויות להיות לה השלכות קשות למין האנושי לאור התלות האנושית בשימושי הים. ניצול מקיים של המשאבים הימיים, שיאפשר צמיחה כחולה תוך מיצוי של ההזדמנויות שמספקת הכלכלה הכחולה, והתמודדות עם האיומים על המרחב הימי, דורש שינוי בתפיסה הקיימת של ניהול המרחב הימי. לפיכך נדרש מעבר לניהול הוליסטי של משאבי הים, מבחינה רגולטורית ותכנונית, הן במסגרת שיתופי פעולה בינלאומיים ברמה העולמית והאזורית, והן במישור הפנים מדינתי, באמצעות חיזוק התיאום בין הגופים הרגולטוריים האמונים על תכנון, שימוש, פיקוח ואכיפה של השימושים השונים.

בישראל, הולכת ומתפתחת תחרות עזה על המשאב הימי המוגבל. על מרחב זה מתחרים מגוון אינטרסים מנוגדים בהם ביטחון, דיג, נופש ופנאי, תחבורה, תיירות, שמירת טבע ועוד. למרות חשיבותו האסטרטגית והאקולוגית של המרחב הימי, נמנעה ישראל במשך שנים מגיבוש גישה הוליסטית לניהולו, ועד היום חסרה אסדרה מתכללת של המרחב הימי, שתאפשר איזון מושכל בין השימושים השונים, תוך התחשבות בהשפעות הגומלין ביניהם.

אחת הסוגיות המרכזיות שיש להסדיר במסגרת אסדרת המרחב הימי היא, החלת כל החקיקה הישראלית הנדרשת לפעילות בתחום "האזור הכלכלי הבלעדי". לעניין זה יצוין כי לפי אמנת חוק הים 1982[2] מקובל להבחין בין אזורים ימיים שונים: המים הריבוניים (הטריטוריאליים), המשתרעים עד 12 מיילים ימיים (כ-22 ק"מ) מקווי הבסיס (החוף) ובהם נמשכת ריבונות המדינה החופית; האזור הסמוך, המוגדר כעד 24 מייל ימי (כ-44 ק"מ) מקו המוצא, שבו יש למדינה החופית שליטה על מנת למנוע הפרה של מנהגיה, חוקיה ותקנותיה הבריאותיים, למנוע הגירה בלתי חוקית ולשמור על כספי הציבור; והאזור הכלכלי הבלעדי, שהינו רצועת ים עד 200 מייל ימי (370.4 ק"מ) מקו המוצא של המדינה החופית, לגביה יש לה זכויות לחיפוש, ניצול, ניהול ושימור אוצרות הטבע המצויים בה בסמיכות לקרקע הים או תחתיה. מאחר שעד היום לא נקבעה בחקיקה הסדרה מפורשת לתחולת חוקי מדינת ישראל באזור הכלכלי הבלעדי, נוצרת לקונה משפטית באשר לתחולת הדין הישראלי באזור זה. פער זה משפיע באופן ישיר על יכולת הפיקוח והאסדרה של הפעילויות באזור זה, המשמש זירה מרכזית לפעילויות הכלכלה הכחולה.

בשנים האחרונות ניכרת התקדמות מסוימת בכיוון תכלול וניהול המרחב הימי בישראל, המתבטאת בעיקר בשני מהלכים מרכזיים: מסמך המדיניות לתכנון ולניהול המרחב הימי של ישראל (אשר פורסם בנובמבר 2022) שהוכן על-ידי מינהל התכנון ואושר על-ידי הולחו"ף[3], ובהצעת חוק האזורים הימיים.[4] מסמך המדיניות נועד להתוות חזון וקווי מדיניות לתכנון וניהול המרחב הימי, תוך התייחסות לצורך בפיתוח מדיניות וכלים לקידום הכלכלה הכחולה, אך הוא נותר בשלב של

קביעת עקרונות בלבד ואינו מגובה עדיין בכלים רגולטורים- פרקטיים. בשל כך, טרם הונחה תשתית ארגונית ומקצועית לאסדרה אפקטיבית של המרחב הימי.

באשר להצעת חוק האזורים הימיים, אשר נועדה להסדיר את המסגרת המשפטית החלה על שטחי הים, להגדיר את גבולותיהם, ולבסס את סמכויות המדינה ורשויותיה באזורים אלה – התקדמותה נעצרה, והיא אינה מקודמת נכון להיום. במסגרת ההצעה, תוכנן להעניק סמכויות סטטוטוריות לרשויות קונקרטיות שינהלו את הפעילות באזורים הימיים, אך בהיעדרה נותר המרחב הימי ללא אסדרה ברורה.

משמעות הדברים היא שלמרות ההתקדמות המשמעותית בגיבוש מסמך המדיניות, היעדר הגדרה ברורה של סמכויות ואחריות על-פי דין יוצר קושי משמעותי בניהול מושכל של המרחב הימי בישראל. מצב זה פוגע ביכולת לקדם את הצמיחה הכחולה, ובהתפתחות של הכלכלה הכחולה בישראל באופן מיטבי.

השימושים והלחצים המתגברים על המרחב הימי, בעיקר בעקבות עליית החשיבות של קידום הכלכלה הכחולה בשנים האחרונות, חושפים אותו לסיכונים סביבתיים משמעותיים. אף שלכלכלה הכחולה קיימים יישומים שיכולים להשתלב במערכות האקולוגיות הימיות תוך מניעת פגיעה בהן, כגון פרויקטים של אנרגיה ימית, תיירות אקולוגית ומיזמי טכנולוגיה כחולה (Blue-Tech), פוטנציאל זה נותר, נכון ליום, רחוק ממימוש – ובוודאי בישראל. בהתאם לכך, האתגר המרכזי נותר צמצום הסיכונים הסביבתיים המיידיים, אשר ממשיכים להוות אתגר מרכזי בניהול המרחב הימי. כפי שיפורט בהמשך, אסדרת המרחב הימי סובלת מכשלים רגולטוריים, המקשים על ההתמודדות עם הסיכונים הסביבתיים, ומעכבים את פיתוחן וקידומן של הכלכלה והצמיחה הכחולה. במאמר זה נבחן שתי דוגמאות מרכזיות, מבין רבות אחרות, הממחישות כיצד כשלי אסדרה מסוגים שונים, המתייחסים לפגיעות שונות במרחב הימי, מסכלים את היכולת לממש את הצמיחה הכחולה הנדרשת – קרי, פיתוח כלכלי בר-קיימה במרחב בימי, המתנהל באופן המגן על המערכות האקולוגיות ואינו מסכן את הסביבה הימית.

כשלי האסדרה של תחום הדיג

אחת הפעילויות המשפיעות ביותר על המרחב הימי היא פעילות הדיג, המתבצעת בהיקפים נרחבים ובפריסה גיאוגרפית כמעט בכל המרחב הימי. ענף הדיג בישראל כולל שני סוגים עיקריים: דיג מסחרי אינטנסיבי ודיג "מסורתי", המבוצע לצורכי פנאי או לפרנסתם של דייגים חובבים.

על-פי נתוני האו"ם משנת 2018, 90% מאזורי הדיג בעולם מתקרבים לקריסה או כבר נמצאים במצב של קריסה, בעקבות דיג יתר. מצב הדגה בים התיכון ובים השחור נחשב לאחד החמורים בעולם: כשני שליש ממיני הדגים המסחריים סובלים מניצול יתר, הפוגע בהתחדשותם הטבעית ומציב סכנה ממשית לשרשרת המזון הימית ולמגוון הביולוגי [5].

גם בישראל, ענף הדיג מהווה אחד השימושים המשפיעים על הכלכלה הכחולה, ויש להתייחס אליו במסגרת התכלול של המרחב הימי, במטרה לקדם כלכלה וצמיחה כחולה. הדיג בישראל מספק פרנסה למאות מועסקים, ומשרת ערכים נוספים כגון תרבות ופנאי. עם זאת, מבחינת אספקת מזון, לפי נתוני משרד החקלאות לשנת 2021, הדיג בים התיכון מספק כ-20 ק"ג דגים לנפש[6], ותורם רק כ-3% מאספקת הדגה לשוק המקומי[7]. חרף תרומתו הכלכלית המוגבלת, טביעת הרגל האקולוגית שלו משמעותית ביותר: הדיג בישראל גורם לפגיעה נרחבת במערכת האקולוגית הימית, הן

בהיקף השטח המושפע והן בעוצמת הנזק הנגרם לטבע. לצד חשיבותו של הדיג לביטחון התזונתי בישראל, הוא גורם לפגיעה בסביבה הימית הטבעית: בתי הגידול הימיים, המארג האקולוגי הימי, מינים מוגנים ומלאי הדגה סובלים כולם מהשפעותיו השליליות[7]. בנוסף, ציוד הדיג עצמו מהווה איום משמעותי על המערכות האקולוגיות והחופים. ציוד זה נסחף לים והופך לפסולת ימית, שוקע לקרקעית, ומתפרק למיקרופלסטיק, או מצטבר כפסולת הפוגעת בחופים ובאיכות הסביבה הימית.

דיג בלתי מבוקר הוביל, על-פי נתוני החברה להגנת הטבע לשנת 2022, לירידה של 25% בשלל הדיג בים התיכון (כולל בישראל) בעשור האחרון[8]. יתרה מכך, כ-50% מהשלל שנלכד במכמורות מורכב ממינים שאינם מסחריים, המושלכים מתים בחזרה לים, תוך בזבוז משאבים ופגיעה נוספת במארג האקולוגי[7]. בנוסף, מדי שנה נלכדים בציוד דיג בישראל כ-3000 צבי-ים, המצויים בסכנת הכחדה ופגיעות בהם אסורות[7], עובדה שמדגישה את ההשפעה ההרסנית של הדיג על המגוון הביולוגי הימי.

התוצאה היא מאבק מתמיד בין הצורך לשמר ולחזק את אוכלוסיות הדגה הקיימות לבין הדרישות המיידיות של הדייגים ותעשיית הדיג. הדיג נמצא בהתנגשות מתמשכת עם שימושים אחרים במרחב הימי, ובעיקר עם תשתיות ימיות כמו מתקני התפלה, קידוחי נפט וגז, אשר הולכים ומתפשטים במרחב הימי בישראל. מציאות זו יוצרת חיכוך מתמיד ופוגעת ביכולת לנהל את השימושים בים באופן מתואם ובר-קיימה.

בעבר, המשפט הבינלאומי כמעט לא הגביל את הדיג במים בינלאומיים שמחוץ לאזור הכלכלי הבלעדי, למעט שמירה על מינים מוגנים. גישה זו הובילה לניצול יתר של משאב הדגה ולתופעה הידועה כ"טרגדיה של נחלת הכלל". במציאות זו, היה משתלם לדייגים למצות את האינטרס המיידי שלהם ולדוג ללא הגבלה, מתוך מטרה להקדים מתחרים באזורים עשירים בדגה. התוצאה הייתה התעלמות מההשלכות ארוכות הטווח: דלדול חמור של מלאי הדגה ופגיעה רחבת היקף במערכות האקולוגיות הימיות. ואולם ריבוי התביעות הסותרות על המרחב הימי, בישראל ובעולם, הביא להבנה כי יש צורך דחוף בשינוי התפיסה המסורתית של "הים הפתוח" (High seas).

ההבנה הגלובלית כי נדרשת מסגרת בינלאומית כוללנית להסדרת הים הפתוח, לצד הצורך בתכנון רב-לאומי ושמירת הטבע באזורים שמחוץ לתחום האזור הכלכלי הבלעדי, הובילה לאחרונה לחתימה על אמנת BBNJ (Biodiversity Beyond National Jurisdiction)[9]. אמנה זו נועדה לקדם שימור ושימוש בר-קיימה של המגוון הביולוגי הימי באזורים שמעבר לתחום השיפוט הלאומי. במסגרת האמנה נקבעו מנגנונים להכרזה על אזורים מוגנים באוקיינוס, שבהם ניתן להגביל שימושים, כגון דיג, כרייה ופעילויות נוספות, במטרה להגן על המערכות האקולוגיות הימיות והמגוון הביולוגי הייחודי שלהן.

גם בישראל התחולל לאורך השנים שינוי תפיסתי במדיניות ניהול ענף הדיג, שהתבטא במעבר מגישה מסורתית ששמה דגש על פיתוח הענף לשם מקסום השלל בטווח הקצר, אל מדיניות מאוזנת יותר, המגבילה את פעילות הדיג במטרה לשמר את משאבי הדגה ולהגן על הסביבה הימית בטווח הארוך[3].

הרגולטור המרכזי האמון על ניהול ענף הדיג בישראל הוא משרד החקלאות, הפועל מכוח פקודת הדיג, 1937 ותקנותיה[10]. הפקודה מעניקה סמכויות אסדרה נרחבות לפקיד הדיג הראשי, המשמש כמנהל אגף הדיג במשרד החקלאות. עיקר הרגולציה בענף מתבצע באמצעות מתן רישיונות דיג, הן לדיג מסחרי והן לדיג ספורטיבי[11], לצד פיקוח ואכיפה על

פעילות הדיג. בנוסף, סמכויות שונות הנוגעות לניהול המרחב הימי הוקנו למשרד התחבורה, רשות הטבע והגנים, משרד הבריאות, המשרד להגנת הסביבה, משרד האנרגיה והתשתיות והמים, משרד הביטחון ולרשויות נוספות[12], מה שמדגיש את המורכבות הרגולטורית בענף.

במהלך השנים נמתחה ביקורת נרחבת על אופן ניהול ענף הדיג בישראל, ובפרט בדוח מבקר המדינה[13] משנת 2010, שהצביע על שורה של ליקויים חמורים בתחום זה: בחקיקה, בתכנון, בביצוע, במחקר ובאכיפה. הדוח הדגיש את הקשיים בפיקוח ובאכיפה מול עבריינות דיג, שמובילה להידלדלות מדאיגה של הדגה. עוד צוין כי פקודת הדיג לא נאכפה לאורך השנים, בעיקר בשל הזנחה מתמשכת של הענף והיעדר תקציבים ייעודיים. נוסף על כך, דוח מבקר המדינה הצביע על כך שרבים מהדייגים כלל לא היו מודעים למגבלות הרגולטוריות הקיימות ולמטרות שביסודן. השילוב בין היעדר אכיפה לבין חוסר מודעות יצר תנאים שאיפשרו דיג יתר, פגעו בקיימות הענף, והביאו לצמצום הדרגתי ומתמשך באוכלוסיות הדגה לאורך השנים.

מרבית המלצות המדיניות בתחום הדיג לאורך השנים התמקדו בהגבלות על פעילות הדיג מבחינת זמן ומרחב, אך יישומן נבלם עקב היעדר מימון לרפורמות הנדרשות. בשנת 2005 חל שינוי מסוים, שהתבטא בהקפאת מתן רישיונות דיג לספינות דיג. עם זאת, בתחום דיג החובבים, נמשכת תופעת הדיג הבלתי חוקי, כולל שימוש בשיטות אסורות כמו רשתות גרירה מן החוף, אשר זוכה לאכיפה מוגבלת בלבד.

במרץ 2017 נכנס לתוקפו תיקון משמעותי לתקנות הדיג[14] אשר הגדיר לראשונה את מטרת-העל של ניהול ענף הדיג – שמירה על הדגה ועל הסביבה הימית לטובת כלל הציבור. במסגרת התיקון הוגבלו פעילויות הדיג מבחינת אזורי הפעולה והיקף השלל המותר במטרה להבטיח את שימור המערכות האקולוגיות הימיות ואת משאבי הדגה לטווח הארוך.

בבג"צ 2677/16 שדן בילו נ' פקיד הדיג הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר[15] נקבע כי תכליתה העיקרית של פקודת הדיג היא *"להבטיח כי משאבי הדגה של מדינת ישראל – שהם משאב מתכלה-מתחדש, שזמינותו תלויה, בין השאר, בדרכי השימוש וברמת הפעילות הנקטת – ינוהלו בצורה מיטבית, בת-קיימה ובאופן העולה בקנה אחד עם האינטרס הציבורי הרחב"*.

על פני הדברים, מדיניות הדיג בישראל עוצבה בהתאם לעקרונות הקיימות: שימור הענף, צמצום נזקים אקולוגיים והפחתת קונפליקטים עם שימושים אחרים[3].

עם זאת, למרות מגבלות דיג שנקבעו בתיקון לתקנות[14] – כמו איסור דיג בשליש מהמים הטריטוריאליים של ישראל, בעונת הרבייה ובעונת גיוס הדגיגים למשך שלושה חודשים, לצד הגבלת שיטות ומכסות לדיג ספורטיבי – התיקון אינו מספק. הדילול המתמשך באוכלוסיות הדגה והפגיעה בבתי הגידול ממשיכים, ללא צעדים פרואקטיביים לשיקומם. בנוסף, הרגולציה המבוזרת בתחום הדיג מקשה על הגנה אפקטיבית על המרחב הימי והמערכת האקולוגית.

הקושי במצב הקיים מתבטא בשורה של עתירות שהוגשו בשנים האחרונות על-ידי החברה להגנת הטבע. כך, בבג"צ 8221/21 החברה להגנת הטבע נ' ממשלת ישראל[16] דרשה החברה להגנת הטבע תיקון ואסדרה של האכיפה הקיימת על פעילות של ספינות דיג-מכמורת בקרבת צנרת הגז בים התיכון. העתירה הוגשה על רקע ריבוי קידוחי הגז והנפט במרחב הימי, היוצרים התנגשות עם ענף הדיג בשל צמצום שטחי הדיג ובשל הזיהום הסביבתי.

ביצוע קידוחים במים הריבוניים של ישראל מתבצע כיום בהתאם לתקנות הנפט (הרשאה לסטייה מהוראות חוק

התכנון והבנייה) תשע"ב- 2012[17], ודורש אישור של ועדה מחוזית, והיתר מכוח תקנות התכנון והבנייה (עבודה ושימוש הטעונים היתר), תשכ"ז-1967[18]. לעומת זאת, קידוחים באזור הכלכלי הבלעדי, אינם מחייבים אישור של ועדה מחוזית, אלא רק אישור של הממונה על ענייני הנפט.

כדי להתמודד עם הסכנה שבפגיעה בצינורות הולכת הגז שבקרקעית הים בידי ספינת הדיג וכדי למנוע פליטת מזהמים לים, קבעה תוכנית המתאר הארצית לקבלה וטיפול בגז טבעי (תמ"א 37/ח) כי *"לא יורשו פעולות עגינה ודיג מכמורתיים לאורך תוואי הצנרת ובמרחק של עד 500 מ' מהצנרת הימית"*[19]. עם זאת, נטען בעתירה, כי איסור זה אינו בר אכיפה, שכן הוועדות המקומיות לתכנון ולבנייה, הרשות הארצית לאכיפה במקרקעין ויחידותיה המחוזיות, אינן פועלות במעמקי הים, ואין להן תשתית לוגיסטית המאפשרת אכיפה בים.

לעומת זאת, ליחידת הפיקוח הימית של רשות הטבע והגנים, הפועלת בים מטעם פקיד הדיג לאכיפת מגבלות דומות מאוד על פעילות כלי דיג, אין סמכות חוקית לאכוף את האיסור שמקורו בתמ"א, כל עוד אין הוא מוסדר ברגולציית הדיג – בתקנות הדיג או ברישיונות הדיג.

כך נוצר מצב אבסורדי: הגופים בעלי סמכות האכיפה כמו גופי התכנון והבנייה, חסרי יכולת בשל היעדר אמצעים לפעול בעומקי הים, ואילו לגוף שהוא בעל היכולת והאמצעים לאכוף, כמו רשות הטבע והגנים, אין את הסמכות החוקית הנדרשת. כאמור, בשל היעדר אסדרה מפורטת, לא ניתן לאכוף את האיסור על דיג-מכמורת בקרבת צנרת הגז. בעתירתה דרשה החברה להגנת הטבע לתקן את תקנות הדיג, כך שתיאסר גרירת רשתות דיג בסמוך לצנרת הגז. בנוסף, הוצע לחייב את ספינות הדיג בהתקנת אמצעים ייעודיים שיאפשרו אכיפה ופיקוח, כולל חובת התקנת מערכות איכון על ספינות המכמורת לצורך מעקב ואיתור הפרות.

העתירה נדחתה מן הטעם שהיא מוקדמת, שכן ממשלת ישראל טענה כי היא פועלת לתיקון תקנות הדיג, אם כי תקנות אלה טרם הותקנו עד היום. אומנם משרד החקלאות ורשות הטבע והגנים (רט"ג) מודיעים מעת לעת לדייגים על תקופות איסור על דיג בים התיכון במהלך עונות הרבייה והגיוס, אך המקרה ממחיש את הבעייתיות שנובעת מהיעדר תיאום רגולטורי בין מערכות הרגולציה והרגולטורים. חוסר תיאום זה יוצר מצב אבסורדי, שבו גם כאשר קיימות הוראות מחייבות, אכיפתן נותרת בעייתית.

בהערת אגב, יצוין כי מחקר שפורסם לאחרונה[20] חשף כי שיטת דיג המכמורת גורמת לפליטת פחמן, אשר יותר ממחציתו ישתחרר לבסוף לאטמוספרה בכמות שעלולה להכפיל את הפליטות השנתיות הנגרמות משריפת דלק על-ידי צי הדיג העולמי כולו. ממצאים אלה ממחישים את הצורך בהגבלת שיטת דיג זו, הן לשם הגנה על המרחב הימי והן כחלק מן הצורך להפחתת פליטות. בנוסף, הם מדגישים את החשיבות של גישה כוללת לבחינת כלל הפעילות במרחב הימי והשלכותיה הרחבות.

מלבד האמור, ראוי לציין כי תחולת החקיקה הישראלית באזור הכלכלי הבלעדי סובלת מליקוי משמעותי. בחוות דעת של המשנה ליועמ"ש משנת 2013[21] נקבע כי הדין הישראלי הנוגע לניצול אוצרות הטבע, להגנה על הסביבה ולהסדרת התחום הפיסקאלי חל גם באזור הכלכלי הבלעדי, וזאת עד לחקיקת חוק האזורים הימיים – חוק שטרם נחקק. עם זאת, לא ברור מה המשמעות המעשית של קביעה זו, ויש אי בהירות בנוגע לפרשנות מונחים כמו "הדין הנוגע להסדרת ניצול אוצרות הטבע" או "הדין הנוגע להגנה על הסביבה". כך, לדוגמה, קיימת עמימות באשר לתחולת

חוק התכנון והבנייה באזור הכלכלי הבלעדי. נוסף על כך, חוק שמירת הסביבה החופית[22] שנועד להגן על הסביבה הימית, אינו חל באזור הכלכלי הבלעדי. כתוצאה מכך, חיפושי הנפט והגז, שמרביתם מתבצעים מעבר למימי החופים ומוסדרים באמצעות רישיונות חיפוש והפקה לפי חוק הנפט[23] אינם נתונים לפיקוח של הולחו"ף.

דוגמה נוספת לכשלים במערכת הרגולטורית נוגעת לסמכויות הרשויות המקומיות החופיות. רשויות מקומיות אלה מחזיקות בסמכויות רגולטוריות ביחס להסדרת הפעילות בחופים בהתאם לחוק הסדרת מקומות רחצה[24] אך אינן מחזיקות בסמכות לפקח או להסדיר את פעילות הדיג באותם חופים.

לעיתים, גם כאשר קיימת סמכות רגולטורית להגנה על משאבי הטבע במרחב הימי, רגולציה זו נחלשת ומתמודדת בקושי מול לחצים כלכליים מנוגדים. דוגמה לכך ניתן למצוא בעת"מ 48776-03-21 החברה להגנת הטבע נ' פקיד הדיג הראשי[25] שבמסגרתה עתרה החברה להגנת הטבע לביטול החלטת פקיד הדיג שהתירה דיג בהיקף מוגבל בעונת הרבייה בשנת 2021, זאת בניגוד לאיסור הקבוע בתקנות.

במקרה זה נקבע כי פקיד הדיג הראשי פעל כדין, שכן על-פי תקנות הדיג הוא מוסמך להתיר דיג בהיקף מוגבל גם בעונת הרבייה, למרות האיסור הכללי. בית המשפט קבע כי ההיתר ניתן תוך איזון בין האינטרסים המתנגשים: הדגה, הדייגים והציבור. ההיתר איפשר לדייגים להמשיך להתפרנס, ולציבור ליהנות מאספקת דגים טריים, לצד שמירה על משאב הדגה, מתן אפשרות לדגים להתרבות, הגנה על מינים בסיכון, וצמצום הפגיעה בערכי טבע מוגנים כגון צב-ים.

עתירה זו, שנדחתה כאמור, ממחישה את חולשתם של עקרונות הקיימות שנועדו לתמוך בשיקום בתי הגידול ובמעבר לדיג בר-קיימה, אל מול לחצים ודרישות כלכליות מיידיות, הבאים על חשבון מאמצי השיקום ארוכי הטווח. בנוסף היא מדגימה את ההשפעה של היעדר עקרונות ברורים לניהול המרחב הימי, המשלבים איזון מתכלל וקבוע בין אינטרסים שונים, על ההתמודדות עם לחצים אלה. לצד זאת, ישנם איומים חיצוניים המשפיעים על אוכלוסיית הדגה.

נוכח התנגשות פעילות הדיג עם פעילויות ימיות נוספות מתחום הכלכלה הכחולה, כגון קידוחי גז ותשתיות ימיות, ולצד הצורך לאזן בין לחצים כלכליים למגבלות רגולטוריות על פעילות הדיג כמתואר לעיל, עמדתנו הינה, כי צמיחה כחולה, הכוללת הגנה אמיתית על המערכת האקולוגית ויישום עקרון הזהירות המונעת, מחייבים נקיטת צעדים נוספים: עדכון תקנות הדיג מעת לעת על בסיס מידע מדעי עדכני המתחשב במכלול הסיכונים; ניטור מצב ובריאות הדגה ויישום המדיניות בהתאם; החלה מוגבלת של פקודת הדיג באזור הכלכלי הבלעדי; אסדרת סמכויות הפיקוח באזורים הימיים ועוד, ובעיקר: קביעת מדיניות כוללת, המבוססת על סדרי עדיפויות ברורים במרחב הימי, לצד יצירת מערכת אחידה של פיקוח ואכיפה, והגברת שיתופי הפעולה והתיאום בין הגופים האמונים על הסדרת המרחב הימי, תוך חיזוק הראייה המתכללת לניהול המרחב הימי.

כשלי האסדרה של זיהום ים

תחום נוסף שבו ניכרים כשלי האסדרה של המרחב הימי הוא ההגנה מפני זיהום הים, שמקורותיו הפוטנציאליים מתרבים ככל שהכלכלה הכחולה מתפתחת. זיהום זה נגרם הן ממקורות יבשתיים, כגון הזרמת שפכים תעשייתיים וביוב עירוני, זרימה טבעית של נחלים מזוהמים והשלכת פסולת, והן ממקורות ימיים, הכוללים זיהום מכלי שיט ותעבורה ימית, פעילות אסדות גז, ודליפות מתשתיות ימיות של גז ונפט.

הזיהום פוגע בצמחייה, בבעלי חיים ימיים, ובמערכת הטבעית כולה תוך גרימת נזק גם לאדם. הנזקים כוללים פגיעות בריאותיות, כמו הימצאות ריכוזים גבוהים של מתכות כבדות בדגים; דרך פגיעה באיכות חיים, למשל באמצעות זפת ופסולת בחופים; שיבוש יכולות התפלה או הפקת מזון מהים, כגון באמצעות דיג או חקלאות ימית; ולבסוף, השלכות כלכליות משמעותיות הנובעות מהפגיעה במערכות אלה[13]. בפרק זה נתמקד בעיקר בזיהום הנגרם כתוצאה מפעילות כלכלית המתקיימת בים עצמו, כחלק מן הכלכלה הכחולה. עם זאת, חשוב לזכור שהתמונה השלמה מורכבת יותר ומשלבת גורמים נוספים.

ניתן ללמוד על הביזור הרגולטורי השורר בתחום זה מההבנות שנחתמו בשנת 2020 בין החברה הממשלתית קצא"א (חברת קו צינור אירופה אסיה) לחברת RED-MED, הנמצאת בבעלות משותפת של חברה פרטית ישראלית וחברה מאיחוד האמירויות. הבנות אלה עוסקות בהובלה ימית של נפט גולמי מאזור המפרץ הפרסי ושווקים אסייתיים לאגן הים התיכון, תוך שימוש בתשתית ההובלה והאחסון של קצא"א בתוואי שבין נמלי הנפט באילת ובאשקלון. מסמך ההבנות עורר חששות משמעותיים בנוגע להשלכות הסביבתיות, בעיקר בשל הסיכון הייחודי למפרץ אילת – אזור ימי רגיש במיוחד – אך גם בשל הגדלת היקפי הנפט המובל בצינור היבשתי באשקלון, פריקתו והעמסתו על מכליות נפט בדרכן לאירופה. סיכונים אלה כוללים חשש לדליפת נפט בעקבות תקלה, תאונה או פגיעה מכוונת של גורמים עוינים העלולים לפגוע במרחב הימי באזור נמל אשקלון. בנושא זה הוגשה עתירה לבג"ץ (בג"ץ 3072/21 החברה להגנת הטבע ואח' נגד ממשלת ישראל ואח'[26]) על-ידי ארגוני הסביבה, אליהם הצטרפו הרשויות המקומיות אילת ואשקלון. בעתירה נמתחה ביקורת על מסמך ההבנות, שנחתם למרות התנגדותם של רשות הטבע והגנים והמשרד להגנת הסביבה – הרגולטורים האמונים על שמירת הטבע הימי והיבשתי. המסמך גובש בהובלת משרד ראש הממשלה ובתמיכת משרד האוצר, משיקולים כלכליים ואסטרטגיים, אך ללא שיתוף המשרד להגנת הסביבה או הרשויות המקומיות, ללא ידיעתם, ומבלי שניתנה להם האפשרות להביע את עמדתם טרם החתימה על המסמך.

המקרה ממחיש היטב את הבעייתיות הנובעת מחוסר הסנכרון בין הגופים הרגולטוריים, כאשר כל גוף פועל מתוך נקודת מבטו הצרה, ללא גורם רגולטורי מרכזי שיבחן את המרחב הימי באופן כולל ויתאם בין האינטרסים השונים. כך, משרד האוצר מתמקד בקידום הכלכלה ושיקולים כלכליים רחבים, המשרד להגנת הסביבה שם דגש על שמירת ערכי הטבע והמערכת האקולוגית, ואילו הרשויות המקומיות פועלות לטובת רווחת האוכלוסייה המקומית באזורי החוף. היעדרו של גוף מתכלל לניהול המרחב הימי מוביל לקונפליקטים ולחוסר איזון בין המטרות והשימושים השונים, ומדגיש את הצורך בגורם מרכזי שיאזן בין השיקולים הכלכליים, האקולוגיים והחברתיים, תוך ראייה כוללת של כלל האינטרסים.

בעת כתיבת שורות אלו, כאשר ישראל נמצאת במלחמת "חרבות ברזל", מתחדדת ביתר שאת הסכנה שאליה חשוף המרחב הימי כתוצאה מלחימה. דוגמאות לכך כוללות תקיפת מתקני תשתיות הסמוכים לים, כמו מכלל קצא"א באשקלון, שפורסם כי היה יעד לתקיפה (שסוכלה) ב-7 באוקטובר 2023[27], או תקיפת אוניות סוחר ומכליות המשנעות דלקים בכמויות גדולות, שעלולה להביא לדליפת דלקים ולגרום לזיהום ים חמור ונרחב.

גם בשגרה, שינוע דלקים בים, מהווה סיכון משמעותי לסביבה הימית[28]. כל תקלה בתהליכי השינוע או ההזרמה, עלולה לגרום לאסון אקולוגי כבד, הממחיש את החשיבות שבהגברת הפיקוח והאכיפה, לצד פיתוח תשתיות בטוחות ואמצעי מניעה יעילים.

לפיכך, גם אם לא ניתן למנוע לחלוטין אירועי זיהום בים, קיימת חשיבות רבה בקביעת מנגנון רגולטורי אשר יעסוק בניהול הסיכונים השונים לזיהום המרחב הימי, ובמזעור הנזקים ככל שניתן, באמצעות היערכות מוקדמת ויעילה. כפי שיפורט בהמשך, גם בתחום ההגנה על המרחב הימי מפני זיהום, בדומה לתחום הדיג, ולתחומים נוספים במרחב הימי, החלת הוראות רגולטוריות מתאימות המבוססות על מדיניות סדורה לניהול המרחב הימי עשויה הייתה להוביל לתוצאות אפקטיביות יותר, ולשיפור יכולת ההתמודדות עם האתגרים הסביבתיים.

סוגיית הביזור הרגולטורי בתחום זיהום הים והיעדר התיאום בין הרשויות המוסמכות זכתה להתייחסות בפסיקת בתי המשפט בישראל. כך למשל, בפסק דין ת"צ (מינהליים ת"א) 29117-03-13 דב יעקובוביץ נ' מי הרצליה בע"מ משנת 2017[29] עמד בית המשפט על הבעייתיות המובנית במשטר הרגולטורי הקיים, בקובעו כי *"...הרגולציה החלה על הים וחופיו מקורה בתקופות שונות, והפיקוח עליה נתון בידי גופים רגולטוריים שונים"*. בית המשפט עמד על כך שהסמכויות בתחום הטיפול והמניעה של זיהום ים מפוזרות בין מספר גופים רגולטורים, ובהם המשרד להגנת הסביבה, הרשויות המקומיות, רשות הטבע והגנים, ומשרד הבריאות. ביזור סמכויות זה, כך נקבע, יוצר קשיים משמעותיים בתיאום ובאכיפה. חרף הרצון הכן והאמיתי של הרשויות השונות לאכוף את החקיקה הסביבתית ולמנוע זיהום ים, המבנה המוסדי המבוזר, המאופיין בכפילויות סמכויות ובהיעדר מנגנוני תיאום אפקטיביים, מהווה חסם משמעותי בפני אכיפה יעילה של הדין הסביבתי בתחום זה.

אירוע "זפת בסערה" שאירע בשנת 2021, ממחיש את המורכבות המוסדית והרגולטורית בטיפול באירועי זיהום ים בישראל. במסגרת אירוע זה, דליפת נפט גולמי באזור הכלכלי הבלעדי של ישראל הובילה לזיהום זפת נרחב לאורך חופי המדינה, אשר גרם לנזק אקולוגי משמעותי בשל היקפו הנרחב ורמת הרעילות גבוהה של החומר המזהם. חומרת האירוע הובילה את המשרד להגנת הסביבה להכריז על מצב חירום סביבתי. תחקיר מקיף שערך ופרסם המשרד להגנת הסביבה בעקבות האירוע[30], אף שהתמקד בפעילות היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית, חשף פערים מהותיים במערך התיאום הבין-מוסדי. התחקיר הצביע על היבט מרכזי של הבעיה בהקשר של סקרי החוף, אשר האחריות לביצועם מוטלת על בעלי תוכניות החירום המקומיות (תח"מ) ברשויות המקומיות. סקרים אלה מהווים נדבך מרכזי בגיבוש אסטרטגיית הפעולה ובמעקב אחר יישומה בשטח. ממצא משמעותי נוסף בתחקיר נוגע להיעדר עיגון סטטוטורי של חובות הרשויות המקומיות בתחום המוכנות לאירועי זיהום ים. כך, הכנת תוכניות החירום המקומיות, תרגולן, ההצטיידות הנדרשת והפעלתן בעת חירום מתבססים כיום על מנגנוני הסברה ושכנוע בלבד, ללא מסגרת חקיקתית מחייבת. מצב זה, כך עולה מהתחקיר, אינו מספק מענה הולם לאתגרים העומדים בפני המערכת. לאור זאת, התחקיר הדגיש את הצורך בהעמקת שילובן של הרשויות המקומיות החופיות במערך הטיפול בזיהומי ים, תוך מעבר ממודל וולונטרי למודל סטטוטורי מחייב. המלצות התחקיר כללו עדכון והרחבה של ההנחיות לביצוע סקרי חוף, לצד קידום תיקוני חקיקה שיעניקו למשרד להגנת הסביבה סמכויות מוגדרות בתחום המוכנות והמענה לאירוע זיהום ים.

התחקיר העלה פער משמעותי נוסף בהיבט התשתיתי של הטיפול בזיהומי ים, הנוגע למערך הלאומי לטיפול ופינוי בפסולת שמנית מהחופים. הממצאים הצביעו על כך שההנחיות המקצועיות בדבר איתור, הקמה ותחזוקה של אתרי אחסון חופיים זמניים לפסולת שמנית לא יושמו באופן מספק. לאור זאת, התחקיר המליץ על הסדרת המערך הלאומי באמצעות התקשרות קבועה עם זרוע ביצוע ממשלתית, אשר תבטיח מענה מערכתי ויציב לאתגר זה.

התחקיר העלה סוגיות מהותיות הנוגעות למערך הסמכויות והפיקוד בעת התמודדות עם אירועי זיהום ים משמעותיים. היבט מרכזי אחד נגע למעורבות הצבאית באירועים מסוג זה, כאשר התחקיר הצביע על הצורך בגיבוש פקודה מטכ"לית שתסדיר את אופן הפעלת צה"ל במסגרת מערך התגובה הלאומי לאירועי זיהום ים. היבט קריטי נוסף שעלה מהתחקיר נגע למערך הסמכויות של מנהל האירוע מטעם המשרד להגנת הסביבה. בהקשר זה, התחקיר חשף פער משמעותי בין האחריות המוטלת על מנהל האירוע לבין הסמכויות החוקיות העומדות לרשותו. פער זה בא לידי ביטוי בולט במקרים שבהם רשויות מקומיות לא מילאו אחר ההנחיות לביצוע פעולות הניקוי. היעדר סמכות חוקית ברורה הגביל את יכולתו של מנהל האירוע לאכוף את ביצוע ההנחיות ולהבטיח תגובה מהירה ואפקטיבית מצד כלל הגורמים הרלוונטיים.

ממצאים אלה מדגישים את הצורך בהסדרה מקיפה של מערך הסמכויות בתחום הטיפול באירועי זיהום ים, הן בהיבט של שילוב המערכת הצבאית והן בהיבט של חיזוק סמכויות הפיקוח והאכיפה של הגורמים המופקדים על ניהול האירוע. הסדרה כזו נדרשת על מנת להבטיח מענה מערכתי יעיל ומתואם לאירועי זיהום ים עתידיים.

הכשלים הרגולטוריים שהתגלו הובילו, בין היתר, להכרה בצורך לעדכן את התוכנית הלאומית למוכנות ולתגובה לאירועי זיהום ים בשמן (התלמ"ת)[31], ולהטמיע את עקרונותיה באופן אפקטיבי בקרב משרדי הממשלה ורשויות נוספות. ביטוי מעשי לתהליך הפקת הלקחים ניתן למצוא בפרסום תזכיר חוק מוכנות ותגובה לתקריות של זיהום הים והסביבה החופית בשמן[32], שנועד להסדיר באופן מקיף את היערכותה של מדינת ישראל לאירועי זיהום ים בשמן. תזכיר זה משקף גם את מחויבותה של ישראל ליישום אמנת International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Cooperation [33] – "אמנת ה-OPRC", אשר עליה היא חתומה, ואשר אושררה בישראל ב-1999 ותכליתה שיפור מוכנותן של מדינות החוף להתמודדות עם תקריות של זיהום ים בשמן.

בהמשך לצעדי המדיניות שנסקרו לעיל, נדבך משמעותי נוסף בהתמודדות המערכתית עם אתגרי זיהום הים בא לידי ביטוי בהחלטת הממשלה 832 מיום 23.2.2021[34] שנקבעה לאחר אירוע "זפת בסערה". החלטה זו ותזכיר החוק שגובש בעקבותיה, משקפים תפיסה כוללת המשלבת היבטים תקציביים ומבניים. במישור התקציבי, הוטל על הקרן למניעת זיהום הים במשרד להגנת הסביבה להקצות תקציב משמעותי בסך 45 מיליון ש"ח לטובת שיקום החופים – צעד המעיד על ההכרה בצורך בהשקעת משאבים ממשיים בהגנה על הסביבה הימית. במישור המבני-ארגוני, החלטת הממשלה הובילה להקמת ועדת מנכ"לים בינמשרדית בראשות מנכ"ל המשרד להגנת הסביבה. הקמת ועדה זו מהווה ניסיון להתמודד עם אתגר הביזור הרגולטורי שנדון לעיל, באמצעות יצירת פורום בכיר לתיאום בינמשרדי. תפקידה של הוועדה – גיבוש המלצות להתמודדות עם תרחישי אסון ימיים והיערכות למניעתם – משקף גישה פרואקטיבית המדגישה את חשיבות התכנון המקדים וההיערכות המערכתית לאירועי חירום סביבתיים.

בהמשך להערכת הכשלים הרגולטוריים והצעדים שננקטו לתיקונם, ראוי להתייחס לממצאי מסמך הערכת השפעת הרגולציה [35](RIA, Regulatory Impact Assessment) שנערך לקראת פרסום תזכיר החוק הממשלתי. מסמך זה מחזק את הטענה בדבר חוסר האפקטיביות של המסגרת הרגולטורית הקיימת בקובעו מפורשות כי המצב הנורמטיבי הנוכחי אינו מספק מענה הולם לשני היבטים מרכזיים: האחד, היערכות מספקת של הגופים הרלוונטיים – הן אלה שבתחום שיפוטם מצויים חופים, והן אלה המקיימים פעילות בסביבה החופית והימית – לטיפול מיטבי באירועי זיהום ים בשמן; והשני, היעדר מנגנוני תיאום אפקטיביים בין גופים אלה.

ישנה חשיבות מיוחדת לקביעת המסמך כי בהיעדר מסגרת רגולטורית מחייבת, המוכנות והתגובה לאירועי זיהום ים מתבססות כיום על מנגנוני שיתוף פעולה וולונטריים בלבד. מצב דברים זה, כפי שעולה מן המסמך, אינו מספק מענה ראוי לאתגרים המורכבים הניצבים בפני מערך ההגנה על הסביבה הימית, ומחדד את הצורך ברפורמה רגולטורית מקיפה.

במסגרת התפתחות המענה המערכתי לאתגרי זיהום הים, המלצות הוועדה הבינמשרדית שהוקמה לאחר החלטת הממשלה, שיקפו תפיסה מקיפה של היערכות משולבת. תפיסה זו כללה שילוב מערכתי של גופים מגוונים ובהם משרד הבריאות, רשות חירום לאומית, רשות המים, חברת החשמל, והרשויות המקומיות. נדבך מרכזי בהמלצות אלה התמקד בקידום השלמת הליכי החקיקה הנדרשים לעיגון החלטת הממשלה 3542 משנת 2008 [36], אשר אימצה את עקרונות התוכנית הלאומית למוכנות ולתגובה לאירועי זיהום ים בשמן ("חוק התלמ"ת").

התלמ"ת, כמסגרת ארגונית מקיפה, נועדה לאגד תחת קורת גג אחת את כלל הגורמים הרלוונטיים להתמודדות עם אירועי זיהום ים בשמן. חשיבותה של מסגרת זו נעוצה ביכולתה לבנות מערך תגובה אינטגרטיבי המשלב שורה ארוכה של גורמים, ובהם המשרד להגנת הסביבה, משרד התחבורה (רשות הספנות והנמלים), משרד האנרגיה והתשתיות, רשויות מקומיות, מתקני התפלה, צה"ל, תחנות כוח, חברות הנמל, רשות הטבע והגנים, משטרת ישראל וגורמים פרטיים העשויים להיות מעורבים בזיהום ים. עם זאת, ראוי לציין כי עקרונות אלה טרם מצאו את ביטויים במסגרת חקיקתית מחייבת. הצורך בהסדרה חקיקתית של המערך המוצע בתלמ"ת קיבל משנה תוקף בהחלטות ממשלה מאוחרות יותר. כך למשל, החלטת הממשלה 2381 משנת 2014 [37] הדגישה את החיוניות שבהשלמת ההיערכות האסטרטגית של המשרד להגנת הסביבה לטיפול בתקריות זיהום ים בשמן ולניהולן, זאת במטרה להבטיח הגנה אפקטיבית על המרחב הימי והסביבה החופית.

בהמשך להתפתחות המענה המערכתי שתואר לעיל, אירוע "זפת בסערה" הוביל להכרה משמעותית נוספת בדבר הצורך בהרחבת היקף התוכנית הלאומית למוכנות ולתגובה לאירועי זיהום ים. ההתמודדות עם אירוע זה המחישה כי המיקוד הבלעדי בזיהום ים בשמן, כפי שנקבע במסגרת התלמ"ת המקורית, אינו נותן מענה מספק למגוון התרחישים העלולים לסכן את הסביבה הימית והחופית. תובנה זו משקפת את ההבנה המתפתחת כי נדרשת תפיסה רחבה יותר של איומי זיהום ים, המביאה בחשבון מגוון רחב של תרחישים אפשריים ומחייבת התאמה של המסגרת הרגולטורית והמערך התפעולי בהתאם. הרחבת היקף התלמ"ת מהווה, אפוא, נדבך חיוני נוסף בתהליך שיפור המוכנות הלאומית להתמודדות עם אירועי זיהום ים על מופעיהם השונים.

חרף ההכרה המערכתית בצורך ברפורמה מקיפה של המערך הרגולטורי בתחום זיהום הים, כפי שבאה לידי ביטוי בשורת החלטות הממשלה שנסקרו לעיל, המציאות מלמדת כי עד למועד כתיבת מסמך זה, טרם חל שינוי מהותי במצב המשפטי הקיים. החלטות ממשלה אלו נותרו ברמה ההצהרתית בלבד, כאשר התלמ"ת - על אף חשיבותה כמסמך מדיניות רוחבי – טרם עוגנה במסגרת חקיקתית מחייבת, ותזכיר החוק שנועד להסדיר סוגיה מחייבת ותזכיר החוק מחייבת, ותזכיר החוק שנועד להסדיר סוגיה זו לא התפתח לכדי הליך חקיקה של ממש.

לסיכום, היעדר עיגון חקיקתי של התלמ"ת מעורר קושי כפול: ראשית, הוא מותיר חלל משמעותי בכל הנוגע להגדרת סמכויות רגולטוריות הכרחיות להתמודדות עם אירועי זיהום ים; שנית, הוא מקשה על עדכון והתאמת המסגרת הנורמטיבית לאתגרים המתפתחים בתחום זה. חשיבות מיוחדת נודעת בהקשר זה לעמדה שהובעה בפסק הדין בעניין יעקובוביץ [29] אשר הדגיש, כי פתרון יסודי לבעיית הביזור הרגולטורי מחייב התערבות חקיקתית, ואף ציין מודל קונקרטי

בדמות הקמת רשות סטטוטורית עצמאית לניהול האזור הימי. מודל זה, אשר עשוי היה לספק מענה מערכתי לכשלים שזוהו, טרם זכה לבחינה מעמיקה.

מכלול הדברים מצביע על פער משמעותי בין ההכרה התיאורטית בצורך ברפורמה מקיפה, לבין היכולת לישמה הלכה למעשה, פער המדגיש את הצורך הדחוף בקידום הליכי חקיקה שיעגנו את המסגרת הרגולטורית הנדרשת להתמודדות אפקטיבית עם אתגרי זיהום הים.

בחינת המסגרת החקיקתית הקיימת מעלה כי המחוקק הישראלי התייחס באופן ספציפי למספר מקורות זיהום ים מוגדרים. התייחסות זו באה לידי ביטוי בשלושה דברי חקיקה מרכזיים: פקודת מניעת זיהום מי-ים בשמן [נוסח חדש], התש"ם-1980[38], המתמקדת בזיהום ימי שמקורו בשמן; חוק מניעת זיהום הים (הטלת פסולת), התשמ"ג-1983[39], המסדיר את סוגיית הטלת הפסולת לים מכלי שיט וטיס, כאשר שני דברי חקיקה אלה והתקנות שהותקנו מכוחם חלים גם על כלי שיט ישראליים מחוץ למימי החופין של ישראל; וכן חוק מניעת זיהום הים ממקורות יבשתיים התשמ"ח-(1988)[40], האוסר הטלת פסולת ממקורות יבשתיים או הזרמת שפכים לים ללא היתר מהוועדה למתן היתרי הזרמה לים. מסגרת חקיקתית זו מהווה למעשה את יישומה של אמנת ברצלונה[41] להגנה על הסביבה הימית וחופי הים התיכון בדין הישראלי, שעליה חתומה ישראל, בדין הישראלי, ומשקפת התייחסות נקודתית למקורות זיהום ספציפיים, להבדיל ממסגרת רגולטורית כוללת להגנה על הסביבה הימית.

בנוסף, בשנת 1983 חתמה ישראל על אמנת International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)[42], האמנה לזיהום ים מאוניות, שהוטמעה בדין הישראלי באמצעות תקנות מניעת זיהום מי ים בשמן (ביצוע האמנה)[43] התשמ"ז-1987, ותקנות הנמלים (מניעת זיהום משפכים מכלי שיט) התשפ"ד- 2024[44] אשר נכנסו לתוקף לאחרונה. מכלול התקנות הללו מעגן את המסגרת הנורמטיבית למניעת זיהום הים כתוצאה מפעילות ימית, כאשר דגש מיוחד ניתן לזיהום הנובע מכלי שיט. חקיקת המשנה בתחום זה הושלמה בתקנות הנמלים (השלכת אשפה מכלי שיט), תשפ"ב-2022[45] אשר משלימות את המארג הרגולטורי בנושא.

אף-על-פי שהמסגרת הרגולטורית הקיימת מספקת הנחיות בסיסיות, היא אינה מהווה תחליף למערך ארגוני מקיף ואינטגרטיבי הנדרש להתמודדות עם אירועי זיהום ים. המסגרת הנוכחית מתאפיינת בחסר משמעותי בכל הנוגע להגדרת סמכויות וחובות של גורמים מרכזיים בשרשרת התגובה לאירועי זיהום.

היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית, הפועלת תחת המשרד להגנת הסביבה, מהווה גורם מפתח בניהול ושמירת הסביבה הימית והחופית של ישראל. היחידה, אשר פריסתה משתרעת לאורך כל החופים הישראליים, הוסמכה בסמכויות סטטוטוריות נרחבות בתחומי הפיקוח, האכיפה והרגולציה הסביבתית[40, 46–48]. תחומי אחריותה כוללים מגוון רחב של משימות, ובהן: מניעת זיהום ים ממקורות שונים; גיבוש והפעלת מערך היערכות ותגובה לאירועי זיהום ים בשמן; התוויית מדיניות סביבתית לתשתיות ימיות וחופיות; הסדרת הפיתוח בסביבה החופית באמצעות מנגנוני תכנון ופיקוח; ניהול הוועדה למתן היתרי הזרמה והטלה לים; הובלת תוכנית ניטור ומחקר בסביבה הימית; וקידום יישומן של אמנות והתחייבויות בינלאומיות בתחום הגנת הסביבה הימית[13]. ואולם, על אף המנדט הרחב והסמכויות המשמעותיות שהוענקו ליחידה מכוח מגוון דברי חקיקה, קיים פער מהותי בין היקף האחריות והסמכויות המוטלות עליה לבין המשאבים המוקצים למימושן[13]. פער זה מעלה שאלות מהותיות באשר ליכולתה האפקטיבית של היחידה

לממש את ייעודה במלואו ולהגשים את מטרות החקיקה הסביבתית בתחום הימי.

בעשור האחרון, התרחבה תפיסת הסיכון הסביבתי בזירה הימית מעבר לחשש המסורתי מזיהום ימי הנובע מתעבורת אוניות. המגמה המואצת של פיתוח משאבי אנרגיה בים התיכון, המתבטאת בהרחבת פעילות החיפוש וההפקה של נפט וגז, יצרה מוקד סיכון משמעותי נוסף. על אף הפוטנציאל לנזק סביבתי משמעותי, המסגרת הרגולטורית הקיימת מפקידה את האחריות העיקרית להליכי הרישוי והפיקוח אחר הפעלת הקידוחים בידי משרד האנרגיה והתשתיות, באמצעות הממונה על ענייני הנפט. סמכות זו נשענת על שני מקורות חקיקה מרכזיים: חוק הנפט, התשי"ב- 1952[23] ותקנות הנפט (עקרונות פעולה לחיפושי נפט והפקתו בים) תשע"ז-2016 [49]. מבנה רגולטורי זה מעורר שאלות מהותיות באשר לאיזון הראוי בין שיקולי פיתוח כלכלי לבין ההגנה על הסביבה הימית. במסגרת הפרוצדורה הרגולטורית הקיימת, נדרשת אומנם הגשת מסמך סביבתי כחלק מהליכי הרישוי, אולם, הסמכות לבחינתו ולאישורו נתונה בידי הממונה על ענייני הנפט שאינו הרגולטור המקצועי המובהק בתחום ההגנה על הסביבה. מבנה מוסדי זה מעורר שאלות מהותיות באשר ליכולת לקיים הערכה סביבתית מקיפה ומקצועית של ההשלכות הפוטנציאליות של פעילות הקידוח. הפיצול המוסדי הקיים במרחב הימי, המתאפיין בביזור סמכויות בין גופים רגולטוריים שונים, כאשר כל אחד מהם פועל לקידום האינטרס הציבורי הספציפי שעליו הוא מופקד, יוצר מציאות רגולטורית מורכבת. היעדרה של ראייה אינטגרטיבית וכוללת מקשה על קיומו של הליך מובנה לאיזון בין האינטרסים המתחרים המתעוררים כתוצאה מן הפעילויות המגוונות במרחב הימי. דוגמה מובהקת לקושי זה ניתן למצוא בתחום חיפושי והפקת הנפט בים. כבר בשנת 2013, עמד מבקר המדינה[50] על הצורך בגיבוש הנחיות מוסכמות להסדרת ההיבטים הסביבתיים הכרוכים בפעילות זו. הצורך בהנחיות אלו נבע, בין היתר, מהקושי המובנה של המשרדים השונים להגיע להסכמה בדבר האיזון הראוי בין האינטרסים המתחרים. קושי שבא לידי ביטוי במחלוקות שהתגלעו סביב ההתייחסות להיבטים סביבתיים בחוק הנפט.

בעקבות המלצות מבקר המדינה ופעילות אינטנסיבית של ארגוני סביבה, אשר התמקדה בסוגיית קידוחי הגז והנפט בים, פרסם הממונה על ענייני הנפט בשנת 2016 (עם עדכון בשנת 2019)[51] מסגרת רגולטורית מקיפה להסדרת ההיבטים הסביבתיים בפעילות חיפוש והפקת נפט וגז טבעי בים. המסמך מבסס מערכת דרישות סביבתיות דיפרנציאלית, המותאמת לשלבים השונים בתהליך החיפוש וההפקה, החל משלב הסקרים הסיסמיים, דרך שלב הרישיון וכלה בשלב החזקה. במסגרת זו נדרשים בעלי הזכויות להכין מסמכים סביבתיים מקיפים הכוללים, בין היתר, תוכניות ניטור, הערכות השפעה סביבתית, תוכניות חירום מפעלית לטיפול בזיהום ים, וכן לקבל היתרי הזרמה לים, היתרי רעלים והיתרי פליטה בהתאם לשלב וסוג הפעילות. ההנחיות מדגישות את הצורך בהתייחסות מיוחדת לרגישות הסביבתית של הים התיכון, המתאפיין בתחלופת מים איטית, מגוון ביולוגי ייחודי ושימושים מרובים. המסמך מעגן את הדרישות הסביבתיות כחלק בלתי נפרד מתנאי הרישיון או החזקה, תוך קביעה כי סטייה מהן עלולה להוביל לביטול זכות הנפט בהתאם לסעיף 55 לחוק הנפט. עם זאת, חרף היקפן המקיף של ההנחיות ורמת הפירוט הגבוהה שלהן, מעמדן הנורמטיבי נותר בגדר הנחיות מינהליות בלבד, ללא עיגון בדבר חקיקה ראשית או משנית. היעדר עיגון סטטוטורי פורמלי של ההנחיות האמורות מעלה סוגיות משפטיות ומעשיות מהותיות. ראשית, בהיותן הנחיות מינהליות בלבד, כוחן המשפטי המחייב מוגבל ביחס לחקיקה ראשית או משנית, דבר העלול להקשות על אכיפתן האפקטיבית. שנית, היעדר מעמד חקיקתי פורמלי חושף את ההנחיות לשינויים תכופים או להחלשה פוטנציאלית בעקבות חילופי ממשל או שינויים במדיניות, ובכך מערער את יציבותן לטווח ארוך. מצב דברים זה עלול ליצור אי-ודאות משפטית ורגולטורית,

הן עבור הגורמים המפוקחים והן עבור הגופים האמונים על הגנת הסביבה הימית.
כאמור, בשנת 2016 הותקנו תקנות הנפט (עקרונות פעולה לחיפושי נפט והפקתו בים), תשע"ז-2016[49] אשר ביקשו להסדיר היבטים מסוימים של ההגנה על הסביבה הימית במסגרת פעילות חיפושי והפקת נפט. התקנות משלבות שיקולים סביבתיים בשלושה מישורים עיקריים: בהגדרת המסגרת הנורמטיבית של תפקידי המפעיל, בקביעת אמות המידה לניסיון המקצועי הנדרש לצורך אישור מפעיל, ובהסדרת מנגנון הבטוחות הכספיות. ואולם, המסגרת הרגולטורית שנקבעה בתקנות מתאפיינת ברמת הפשטה גבוהה ונעדרת התייחסות מפורטת לדרישות סביבתיות אופרטיביות או להנחיות הסביבתיות שפורסמו באותה שנה. היעדר אינטגרציה נורמטיבית בין התקנות להנחיות הסביבתיות מחליש את האפקטיביות של המשטר הרגולטורי בכללותו.
לסיכום, המבנה המוסדי הקיים בתחום הרגולציה הסביבתית של פעילות חיפושי והפקת נפט וגז בים מעלה קשיים מהותיים. מחד, הממונה על ענייני הנפט, הפועל במסגרת משרד האנרגיה והתשתיות, מחזיק בסמכויות הרישוי והפיקוח המרכזיות על פעילות הקידוחים, כולל הסמכות לאשר את המסמכים הסביבתיים. מאידך, המומחיות המקצועית בתחום ההגנה על הסביבה הימית מרוכזת במשרד להגנת הסביבה, אשר מעורבותו בתהליכי קבלת ההחלטות מוגבלת יחסית ומתמקדת בעיקר במתן היתרי הזרמה לים, היתרי רעלים והיתרי פליטה. פיצול סמכויות זה, המלווה בהיעדר מנגנון פורמלי לתיאום ואיזון בין האינטרסים המתחרים, עלול להוביל להחלטות שאינן משקפות באופן מיטבי את מכלול השיקולים הסביבתיים. הדבר מדגיש את הצורך ברפורמה מבנית שתסדיר מחדש את חלוקת הסמכויות בין הגופים הרגולטוריים, או לחלופין, תיצור מנגנוני תיאום ושיתוף פעולה אפקטיביים ביניהם.
הניתוח שהוצג לעיל של הסיכונים הסביבתיים של זיהום המרחב הימי של ישראל חושף את המורכבות המבנית והאתגרים הרגולטורים הטמונים במציאות הרגולטורית הקיימת. ריבוי השימושים והאינטרסים המתחרים במרחב הימי המוגבל, לצד התגברות הסיכונים הסביבתיים והיעדר מנגנוני תיאום אפקטיביים, מעלים שאלות יסוד באשר להתאמת המסגרת המשפטית הנוכחית למציאות המשתנה. לפיכך, בפרק הבא נבחן את האפשרות והנחיצות של מעבר ממשטר רגולטורי מבוזר ומקוטע, המאופיין בחפיפה ובסתירות בין סמכויות רגולטוריות שונות, למסגרת משפטית אינטגרטיבית המאפשרת ניהול כולל ומתואם של המרחב הימי על מכלול האתגרים הסביבתיים הכרוכים בו.

מהמצוי לרצוי - ניהול סביבתי משולב

סקירת מקרי המבחן שהוצגה בפרקים הקודמים חושפת את חולשותיה המבניות של המסגרת הרגולטורית הנוכחית בניהול ההיבטים הסביבתיים במרחב הימי של ישראל. הכשלים שנחשפו – החל מפיצול סמכויות רגולטורי, דרך היעדר ראייה מערכתית, וכלה בחסר בהסדרה סטטוטורית מקיפה – משקפים תפיסה מיושנת של ניהול סקטוריאלי, שאינה מותאמת למורכבות ולדינמיות המאפיינות את המרחב הימי המודרני. לפיכך, מתחדדת שאלת הצורך ברפורמה רגולטורית מקיפה המבוססת על גישה הוליסטית, אשר תאפשר ניהול אינטגרטיבי של המרחב הימי על מכלול השימושים, האינטרסים והאתגרים הכרוכים בו.
סקירת הכשלים הרגולטוריים שהוצגה בפרקים הקודמים חשפה שלושה מוקדי כשל מרכזיים במשטר הנוכחי של ניהול המרחב הימי בישראל.

ראשית, היעדר ניהול אינטגרטיבי של פעילויות הכלכלה הכחולה, הכוללות מיזמי אנרגיה, תיירות, חקלאות ימית, התפלה ועוד. פעילויות אלו, חרף פוטנציאל הפגיעה הסביבתית הטמון בהן, מנוהלות כיום באופן מבוזר וסקטוריאלי, ללא התייחסות מערכתית למכלול הסיכונים הסביבתיים והאינטרסים המתנגשים.

שנית, קיים פער משמעותי בין קיומה של רגולציה פורמלית לבין היכולת לאכוף אותה באופן אפקטיבי. דוגמאות בולטות לכך ניתן למצוא בהיעדר אכיפה של מגבלות הדיג בקרבת תשתיות גז, ובהתנהלות הרשויות השונות באירוע זיהום הזפת, אשר פעלו ללא תיאום וללא מסגרת ארגונית מאחדת. מצב זה מוביל לכך שכל גוף רגולטורי מאמץ מדיניות צרה המתמקדת באינטרס ציבורי בודד, תוך התעלמות מהשלכות רוחב ומשיקולים החורגים מתחום סמכותו הישיר.

שלישית, ביזור הסמכויות הרגולטוריות יוצר לא רק חפיפה וקונפליקטים בין רשויות, אלא גם "חורים רגולטוריים" – תחומים שאינם מוסדרים כלל או שהסדרתם חלקית בלבד[52]. מצב זה מקבל משנה חומרה לנוכח הפוטנציאל הכלכלי העצום הגלום בפיתוח הכלכלה הכחולה. הכשלים הרגולטוריים הופכים לחסם משמעותי בפני יזמות וחדשנות במרחב הימי, שכן המורכבות הבירוקרטית והסיכונים הסביבתיים הבלתי מנוהלים מרתיעים משקיעים ויזמים פוטנציאליים.

תופעת הביזור הרגולטורי והיעדר אסדרה מתכללת אינה מאפיינת רק את ישראל; היא מהווה אתגר מרכזי במשפט הסביבתי שאיתו מתמודדות מדינות רבות, נוכח הצורך לאזן בין אינטרסים מורכבים ומתחרים[53-59]. ואולם, בהקשר של הכלכלה הכחולה, המשמעויות של כשלים אלו חורגות מעבר להיבטים המינהליים גרידא. ההשלכות הכלכליות והסביבתיות של המבנה הרגולטורי המבוזר מייצרות עלויות משקיות משמעותיות, הן במישור הישיר של עיכוב ומניעת יוזמות כלכליות חדשניות, והן במישור העקיף של נזקים סביבתיים פוטנציאליים. הפרדוקס הטמון במצב הנוכחי הוא שדווקא המבנה הרגולטורי שנועד להסדיר ולקדם את הפעילות במרחב הימי, הפך בפועל לגורם מעכב ומרתיע. לאור זאת, מתחדד הצורך בבחינה מחודשת ומעמיקה של המשטר הרגולטורי הראוי לניהול המרחב הימי בישראל, תוך שימת דגש על יצירת מסגרת אינטגרטיבית שתאפשר פיתוח בר-קיימה של הכלכלה הכחולה.

לאור הכשלים שנסקרו, נראה כי המענה הרגולטורי המיטבי טמון באימוץ גישת הניהול הסביבתי המשולב (Integrated Environmental Management). גישה זו, המבקשת ליצור איזון אופטימלי בין פיתוח המרחב הימי לבין שימור המערכת האקולוגית, זכתה להכרה נרחבת במשפט הבינלאומי ובמשפט המשווה. היא מעוגנת בחקיקה במדינות רבות, לרבות ארצות הברית[60] והאיחוד האירופי[61] וקיבלה ביטוי פורמלי בפרוטוקול הניהול המשולב של האזורים החופיים שנלווה לאמנת ברצלונה (2008)[62], אשר אושרר על-ידי ישראל בשנת 2016, וכן במסמך המדיניות של מנהל התכנון[3].

הניהול הסביבתי המשולב מציע מסגרת קונספטואלית המאפשרת התמודדות אפקטיבית עם אתגרי הרגולציה הסביבתית במרחב הימי. יתרונותיו המרכזיים כוללים הפחתת קונפליקטים בניהול משאבי טבע והגברת הסיכויים לפיתוח בר-קיימה, בעיקר באמצעות יצירת מנגנוני תיאום מוסדיים בין-מגזריים. מנגנונים אלה מאפשרים סנכרון בין הגופים בעלי הסמכות במרחב הימי והחופי, תוך יצירת מסגרת ניהולית מקיפה המסדירה את הממשק בין הסמכויות המבוזרות.

בהקשר של פיתוח הכלכלה הכחולה, אימוץ גישת הניהול המשולב מחייב יצירת תשתית רגולטורית המעודדת חדשנות ויזמות באמצעות מערך תמריצים כלכליים ורגולטוריים. תשתית זו צריכה להתבסס על שלושה נדבכים מרכזיים: ראשית, קביעת מסגרת רגולטורית ברורה ויציבה המגבירה את הוודאות להשקעות במרחב הימי; שנית, יצירת מנגנוני

תיאום בין-מוסדיים המשלבים את כלל הגורמים הרלוונטיים כבר בשלב קביעת המדיניות; ושלישית, פיתוח מערכת פיקוח ואכיפה אחידה ואפקטיבית. שילובם של נדבכים אלה יאפשר יצירת תנאים מיטביים להתפתחות ענפי כלכלה קיימים וחדשים במרחב הימי.

המאמצים הראשוניים של ישראל לאימוץ פרדיגמה רגולטורית חדשה במרחב הימי התבטאו בשני מהלכים מרכזיים. הראשון, ניסיון לעיגון סטטוטורי באמצעות הצעת חוק האזורים הימיים[4], שנועדה ליצור מסגרת נורמטיבית מאוזנת לניהול האינטרסים המתחרים במרחב הימי. ואולם, יוזמה חקיקתית זו נותרה בשלבי טיוטה במשך שנים ארוכות, ללא התקדמות משמעותית בהליכי החקיקה. המהלך השני התבטא בגיבוש מסמך מדיניות מקיף על-ידי מינהל התכנון[3], אשר שילב תובנות ממחקרים ועבודות מקבילות בתחום.

ואולם, במבט על המצב הנוכחי, ניכר כי מרבית היוזמות לרפורמה רגולטורית נותרו בגדר הצהרות מדיניות או טיוטות חקיקה, מבלי שהבשילו לכדי כלים רגולטוריים אופרטיביים. הפער בין ההכרה בצורך בשינוי לבין היישום בפועל מקבל משנה חומרה לנוכח ההתפתחות המואצת של הכלכלה הכחולה בזירה הגלובלית. לפיכך, קיימת דחיפות מיוחדת בחידוש המאמצים לרפורמה במנגנוני הניהול הרגולטוריים של המרחב הימי, על מנת לאפשר לישראל למצות את הפוטנציאל הכלכלי הטמון בפיתוח בר-קיימה של משאביה הימיים.

יישום עקרונות הניהול המשולב במרחב הימי מקבל ביטויים מוסדיים מגוונים במשפט המשווה. ניתן למפות שלושה מודלים מרכזיים: המודל המתאם, המודל המועצתי, והמודל הריכוזי. המודל המתאם, המיושם לדוגמה בהולנד, מתבסס על יצירת מנגנוני תיאום בין גופים רגולטוריים קיימים. במסגרת זו הוקמה בהולנד בשנת 1990 "הרשת האקולוגית הלאומית"[63], פלטפורמה המאגדת את כלל הגופים הרלוונטיים למרחב הימי והאקולוגי, במטרה לייצר מדיניות מתואמת תוך דגש על שמירת המסדרונות האקולוגיים.

המודל השני, המיושם בארצות הברית, מתבסס על הקמת גוף מתכלל בדמות הלשכה לניהול אוקיינוסים ומשאבים חופיים (NOAA)[63]. גוף זה, הפועל מכוח חקיקה פדרלית ייעודית ונתמך בתקציבים ייעודיים, אחראי על תיאום הפעילויות במרחב הימי בין הגופים השונים, תוך קידום עקרונות הניהול המשולב.

המודל השלישי, הריכוזי, מיושם בבריטניה מכוח ה-Marine and Coastal Access Act 2009[64]. במסגרת זו הוקמה רשות סטטוטורית עצמאית המרכזת סמכויות רגולטוריות מהותיות בתחומים מגוונים, החל מאסדרת הדיג, דרך שימור המגוון הביולוגי, ועד לתכנון ובנייה במרחב הימי. מודל זה הוכיח את יעילותו בהפחתת כפילויות רגולטוריות והגברת השקיפות והעקביות בפעילות הרגולטורית.

בהקשר הישראלי, על אף שמאמר זה אינו מתיימר לספק ניתוח ממצה של היתרונות והחסרונות של כל מודל, ניתן להצביע על יתרונות משמעותיים באימוץ המודל הריכוזי. הקמת רשות ים עצמאית עשויה לספק מענה אופטימלי לאתגרים הייחודיים של ישראל, ובפרט לאור הגידול בביקושים למיזמי כלכלה כחולה והצורך בראייה אסטרטגית ארוכת טווח. רשות כזו תוכל לנהל את מכלול השימושים במרחב הימי מתוך ראייה הוליסטית, תוך איזון בין האינטרסים המתחרים והבטחת פיתוח בר-קיימה של הכלכלה הכחולה. עם זאת, חשוב להדגיש כי העיקרון המנחה צריך להיות יישום אפקטיבי של ניהול משולב, ללא קשר למודל המוסדי הנבחר, כל עוד זה מספק מענה הולם לאתגרי הכלכלה הכחולה ומבטיח פיתוח בר-קיימה של משאבי הים.

סיכום

במאמר זה נעשה ניסיון לבחון את האתגרים העומדים בפני ישראל בפיתוח הכלכלה הכחולה, תוך התמקדות במסגרת הרגולטורית הנדרשת לניהול בר-קיימה של המרחב הימי. בעוד שהכלכלה הכחולה העולמית מתפתחת במהירות וכוללת מגוון רחב של פעילויות חדשניות, הפעילות הכלכלית במרחב הימי של ישראל עדיין מתמקדת בעיקר בתשתיות, דיג ותיירות חופים. פער זה מדגיש את הפוטנציאל הבלתי ממומש לפיתוח כלכלי, כפי שמשתקף בתוכנית לצמיחה כחולה של מינהל התכנון.

בשנים האחרונות ניכרת מגמת שיפור מסוימת בניהול המשאב הימי בישראל, המתבטאת בשורה של צעדים רגולטוריים כגון רפורמה במדיניות הדיג והרחבת תחולתה של אמנת MARPOL. ואולם, צעדים אלה, חשובים ככל שיהיו, מהווים פתרונות נקודתיים שאינם מספקים מענה מערכתי לאתגר הכולל של פיתוח כלכלה כחולה בת-קיימה. המעבר מניצול קצר-טווח של משאבי הים לפיתוח בר-קיימה המשמר את יכולת ההתחדשות של המערכת האקולוגית הימית מחייב שינוי פרדיגמטי בתפיסת הניהול הרגולטורי.

שינוי זה צריך להתבסס על שלושה נדבכים משלימים: ראשית, אימוץ גישה הוליסטית המתייחסת למרחב הימי כמכלול אינטגרטיבי ומאזנת בין האינטרסים המתחרים בראייה ארוכת טווח. שנית, הקצאת משאבים משמעותית למחקר ופיתוח הדרושים לקבלת החלטות מבוססות-מדע. שלישית, רפורמה יסודית במבנה הארגוני והמשפטי של מערך הרגולציה הימית, תוך מעבר ממדיניות תגובתית למדיניות יוזמת המדגישה מניעה וחיזוק החוסן האקולוגי.

רשימת מקורות

1. Declaration of the union for the mediterranean ministerial conference on blue economy (2015). https://ufmsecretariat.org/wp-content/uploads/2015/11/2015-11-17-declaration-on-blue-economy_en.pdf
2. The united nation convention on the law of the sea article 87 https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf
3. מסמך חזון ומדיניות למרחב הימי של ישראל, ים תיכון, מינהל התכנון, (נובמבר 2022).
4. הצעת חוק אזורים ימיים, התשע"ח-2017, ה"ח הממשלה 1165. https//:www.gov.il/he/pages/sea_policy_suggest
5. 90% of fish stocks are used up, UNCTAD,(2018) https://unctad.org/news/90-fish-stocks-are-used-fisheries-subsidies-must-stop
6. אגף הדיג, משרד החקלאות. עתיד ענף הדיג בישראל. מצגת שהוצגה בדיון בוועדת הכלכלה בכנסת. (6 במרץ 2022.)
7. החצי הכחול והחברה להגנת הטבע. הדיג בים התיכון- לאן? https://mafish.org.il/fishing-reform/the-problem/
8. פרי נ., ים בסכנה- חמשת האיומים הגדולים ביותר על הים בישראל, גרינפיס (2022).
9. Agreement under the United Nations Convention on the Law of the Sea on the Conservation and Sustainable Use of Marine Biological Diversity of Areas beyond National Jurisdiction ,(June 2023) https//:documents.un.org/doc/undoc/ltd/n24/222/06/pdf/n2422206.pdf
10. פקודת הדיג, 1973.
11. מינהל התכנון. מסמך חזון ומדיניות למרחב הימי של ישראל ים תיכון: דוח שלב א' - סקירה וניתוח מצב קיים; כרך א', עיקרי

הממצאים. 2015.
12. אלגום-מזרחי א. היערכות לאירועי זיהום ים בישראל: רקע לדיון. מרכז המחקר והמידע של הכנסת, (פברואר 2022).
13. דוח שנתי 61ב לשנת 2010 ולחשבונות שנת הכספים 2009, מבקר המדינה ונציב תלונות הציבור (מאי 2011).
14. תקנות הדיג (תיקון), התשע"ז-2016, ק"ת 7746.
15. בג"צ 2677/16 דן בילו נ' פקיד הדיג הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר (נבו, 28.8.2016).
16. בג"צ 8221/21 החברה להגנת הטבע נ' ממשלת ישראל (נבו,9.12.2021).
17. תקנות הנפט (הרשאה לסטייה מהוראות חוק התכנון והבניה), תשע"ב- 2012.
18. תקנות התכנון והבניה (עבודה ושימוש הטעונים היתר), תשכ"ז-1967.
19. החלטה מס' 2112 של הממשלה "תמ"א 37/ח" (23.10.2014).
20. McVeigh k. Carbon released by bottom trawling 'too big to ignore', *The Guardian* (18.1.2024)
21. ליכט א. חוות דעת- הדין החל באזורים הימיים, משרד המשפטים (ינואר 2013).
22. חוק השמירה על הסביבה החופית, התשס"ד-2004, ס"ח 540.
23. חוק הנפט, התשי"ב- 1952, ס"ח 109.
24. חוק הסדרת מקומות רחצה, תשכ"ד-1964, ס"ח 172.
25. עת"מ 48776-03-21 החברה להגנת הטבע נ' פקיד הדיג הראשי, (נבו, 29.04.2021).
26. בג"צ 3072/21 החברה להגנת הטבע וח' נגד ממשלת ישראל ואח (נבו, 23.12.2021).
27. 35 מחבלי קומנדו דרך הים: המתקפה שסיכלו לוחמי זרוע הים בשבת השחורה. רשת 13, (7 בנובמבר 2023).: https://13tv.co.il/item/news/politics/security/day-32-903791250/#903792206Item
28. אדלסון ד. למנוע אסון סביבתי: המבצע לסילוק ה"פצצה המתקתקת" מים סוף, https://www.ynet.co.il/environment-science/article/b1nsggrq3. Ynet (2023)
29. ת"צ (מינהליים ת"א) 29117-03-13 דב יעקובוביץ נ' מי הרצליה בע"מ (נבו, 27.12.2017).
30. דוח סיכום תחקיר אירוע זפת בסערה, המשרד להגנת הסביבה (פברואר 2022). https://fs.knesset.gov.il/24/Committees/24_cs_bg_627200.pdf
31. תוכנית לאומית למוכנות ותגובה לאירועי זיהום ים בשמן (תלמ"ת) המשרד להגנת הסביבה (2008).
32. תזכיר חוק מוכנות ותגובה לתקריות של זיהום הים והסביבה החופית בשמן, התשפ"א-2021.
33. International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation, 1990., United Nations Treaty Series.
https//:treaties.un.org/doc/publication/unts/volume/201891%volume-1891-i-32194-english.pdf
34. החלטת ממשלה 832 -טיפול באירוע זיהום חופי הים התיכון בישראל ("זפת בסערה"), (23.02.2021) https://www.gov.il/he/pages/dec832_2021
35. דוח הערכת השפעות רגולציה בנושא מוכנות ותגובה לזיהומי ים משמן, המשרד להגנת הסביבה (2021).
36. החלטת ממשלה 3542 - תוכנית לאומית למוכנות ותגובה לאירועי זיהום ים בשמן (תלמ"ת) (18.05.2008).
37. החלטת הממשלה 2381 - שיקום הערבה והיערכות לאומית לטיפול באירועי זיהום סביבתיים בעקבות אירוע פריצת צינור הנפט בבאר אורה (28.12.2014).

38. פקודת מניעת זיהום מי הים בשמן (נוסח חדש) (התש"ם-1980).
39. חוק מניעת זיהום הים (הטלת פסולת) (התשמ"ג-1983).
40. חוק מניעת זיהום ים ממקורות יבשתיים (התשמ"ח-1988).
41. Barcelona Convention for the Protection of the Marine Environment and the Coastal Region of the Mediterranean (1976).
42. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), 1973.
43. תקנות מניעת זיהום מי ים בשמן (ביצוע האמנה) (התשמ"ז-1987).
44. תקנות הנמלים (מניעת זיהום משפכים מכלי שיט) (התשפ"ד- 2024).
45. תקנות הנמלים (השלכת אשפה מכלי שיט) (תשפ"ב-2022).
46. חוק הגנת הסביבה (סמכויות פיקוח ואכיפה) (התשע"א-2011).
47. חוק שמירת הניקיון (התשמ"ד-1984).
48. חוק איסור נהיגה ברכב בחוף הים (התשנ"ז-1997).
49. תקנות הנפט (עקרונות פעולה לחיפושי נפט והפקתו בים), ק"ת 142 (תשע"ז-2016).
50. דוח שנתי 64א, מוכנות והיערכות להשפעות סביבתיות של קידוחי גז ונפט בים, מבקר המדינה ונציב תלונות הציבור (15 באוקטובר 2013).
51. הנחיות הממונה על הנפט: הנחיות סביבתיות לחיפוש ולהפקה של נפט וגז טבעי בים, משרד האנרגיה, עדכון (אפריל 2019).
52. איסר-איציק, צ. האסדרה של המרחב הימי בישראל: הפער בין הרצוי למצוי. אקולוגיה וסביבה. **5** (2014).
53. Stephenson, R. L., et al. A practical framework for implementing and evaluating integrated management of marine activities. *Ocean & Coastal Management* **177**, 127-138 (2019).
54. Cicin-Sain, B. & Belfiore, S. Linking marine protected areas to integrated coastal and ocean management: A review of theory and practice. *Ocean. Coast. Manag.* **48**, 847-868 (2005).
55. Cicin-Sain, B. Sustainable development and integrated coastal management. *Ocean. Coast. Manag.* **21**, 11-43 (1993).
56. Read, P. & Fernandes, T. Management of environmental impacts of marine aquaculture. Europe. *Aquaculture* **226**, 139-163 (2003).
57. Craik, N. & Gu, K. Strategic environmental assessment in marine areas beyond national jurisdiction: Implementing integration. *Int. J. Mar. Coast. Law* **37**, 189-216 (2022).
58. Kearney, J., et al. The role of participatory governance and community-based management in integrated coastal and ocean management in Canada. *Coast. Manag.* **35**, 79-104 (2007).
59. Elliott, M., Borja, Á. & Cormier, R. Managing marine resources sustainably: A proposed integrated systems analysis approach. *Ocean. Coast. Manag.* **197**, 105315 (2020).
60. Coastal Zone Management Act, 16 U.S.C. §§1451-146.
61. Recommendation 2002/413/EC of the European Parliament and of the Council of 30 May 2002 concerning the implementation of Integrated Coastal Zone Management in Europe, OJ L 148/24 (June 6, 2002).

62. Protocol on Integrated Coastal Zone Management (ICZM, 21.1.2008) https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:22009A0204(01)&from=EN
63. איסר-איציק, צ. הרגולציה הסביבתית בישראל: אתגרים של תיעוש, הפרטה וגלובליזציה - המרחב הימי של הים התיכון כמקרה מבחן, מכון ון ליר, ירושלים, (פברואר 2016).
64. Marine and Coastal Access Act2009 https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2009/23/content.

9 חינוך, מדע וקהילה: פעילות עמותות לשמירה על הסביבה הימית והחופית - עמותת אקואושן כדוגמה

תמר טננבאום, איתמר אבישי, עינת צוקרמן-טל, מיכל שטרן, יניב בלייכר, אסף אריאל

עמותת אקואושן

tamar@ecoocean.org,
itamar@ecoocean.org,
einat@ecoocean.com,
michal.stern@ecoocean.com,
yaniv@ecoocean.com,
asaf@ecoocean.org

תקציר

לארגוני הסביבה תפקיד חשוב במארג בעלי העניין המשפיעים על הטבע והסביבה ופועלים לשמירתם. ארגונים אלו מדרבנים את הרשויות, גופים כלכליים ואת הציבור לשמור על הסביבה ויש להם יכולת לקיים קשר הדוק עם התושבים בשטח. בארץ קיימים מספר ארגונים העוסקים בשמירת הטבע והסביבה הפועלים באסטרטגיות שונות. רובם אינם ממוקדים בים. עמותת אקואושן היא ארגון הפועל לקדם שמירת טבע ימי וחופי. העמותה נסמכת על בסיס מדעי-מקצועי איתן תוך קיום שיתופי פעולה עם חוקרים בתחום מדעי הים, גורמי מקצוע בתחום ניהול הטבע והסביבה, רשויות מקומיות ובעלי עניין נוספים. בנוסף לפעילות התמיכה במחקר הימי, העמותה פועלת בתחום החינוך וההסברה ותחום המתנדבים והקהילה, הכולל את הרשת הארצית של מתנדבי חירום ים ופעילויות "מדע אזרחי". העמותה מפעילה גם את תוכנית "הדגל הכחול", תוכנית לניהול סביבתי של חופי רחצה ומרינות. פעילות עמותת אקואושן וארגוני סביבה אחרים נדרשת כיום ותידרש אף יותר בעתיד לאור האתגרים הסביבתיים המקומיים והגלובליים הרבים שבפניהם אנו ניצבים והשלכותיהם.

מבוא

העולם ניצב היום בפני אתגרים סביבתיים גדולים ובראשם שינוי האקלים והשלכותיו ההרסניות, זיהום הולך וגובר בפסולת פלסטיק ופגיעה קשה בבתי הגידול ובמגוון הביולוגי. הסביבה החופית והימית נפגעה קשות מפעילות האדם ונדרשת פעילות נמרצת ומשולבת של כלל החברה על מנת למתן הפרעות הרסניות אלו ולשקם את בתי הגידול הטבעיים. פעילות החברה האזרחית בנושאי סביבה ואקלים מתקיימת בתוך מרובע הכולל את הממשל, המגזר העסקי, האקדמיה וארגוני החברה האזרחית. לכל אחד מהמגזרים הללו תפקיד חשוב בהנעת תהליכי קבלת החלטות, קביעת מדיניות וניהול ציבורי. גופי הממשל מספקים את המסגרת הרגולטורית, המגזר העסקי הוא הקטר הכלכלי המניע את התהליך, האקדמיה מייצרת ידע וארגוני הסביבה מדרבנים, דורשים, ממריצים ושומרים שהתהליך לא יהיה רק כלכלי, טכני ובירוקרטי אלא יכלול גם אותנו, האזרחים. ארגוני סביבה שונים פועלים באסטרטגיות שונות על מנת לקדם שמירת טבע והגנה על הסביבה. חלק מהארגונים כדוגמת "אדם טבע ודין", החברה להגנת הטבע וארגונים נוספים תומכים

בפעילות בציר מעלה-מטה (Top-Down) במהותה באמצעות הצעות חוק, הפעלת לובי לקידום חקיקה, נציגות בוועדות התכנון ובוועדות מקצועיות ופעילויות דומות נוספות. דוגמאות להצלחות של ארגונים לא ממשלתיים לנושא הסביבתי הם הקמת רשות שמורות הטבע, חוק שמירת הסביבה החופית ואף תקנות הדיג. ארגונים אחרים פועלים באמצעות פעילות מטה-מעלה (Bottom-Up) כגון פעילויות הסברה וחינוך, פעילות קהילתית המכוונת לשמירת טבע או ליצירת לחץ ציבורי באמצעות מחאות או אירועים הזוכים לחשיפה תקשורתית. החשיבות של פעילות מטה-מעלה נובעת מכך שארגוני החברה האזרחית מקיימים קשר רציף, מייצגים פעילי סביבה וקהילות ונותנים הד לנושאים כגון צדק סביבתי וקהילות חלשות, אשר לעיתים קרובות נדחקים מסדר היום הציבורי. השפעתם של ארגוני הסביבה ניכרת ברמה המקומית, הארצית, העולמית וכן בהשפעתם על גופים מסחריים[1,2,3].

עמותת אקואושן היא ארגון שהוקם בשנת 2002 על מנת לקדם שמירת טבע ימי. בסיס הפעולה המקצועי של העמותה הינו מדעי-סביבתי והיא מפעילה ספינת מחקר המשמשת את החוקרים הימיים בישראל ובאזור. בנוסף לפעילות התמיכה במחקר הימי, העמותה פועלת במספר זירות שבהן היא מגדירה כי יש צורך אמיתי ומשמעותי ב"שחקני חיזוק" מהחברה האזרחית: תחום החינוך וההסברה, תחום המתנדבים והקהילה, תוכניות "מדע אזרחי" והפעלת תוכניות לניהול סביבתי ברשויות החוף כאשר המרכזית שבהן היא תוכנית "הדגל הכחול".

חינוך סביבתי חופי וימי

בעשרות השנים האחרונות, החינוך הסביבתי מוכר יותר ויותר כמרכיב חיוני בתפיסת הקיימות והיכולת העתידית של האנושות לקיים אורח חיים בר-קיימה לנוכח תהליכים גלובליים כמו שינויי אקלים ואובדן של מגוון מינים. כחלק משמעותי מהחינוך הסביבתי, לחינוך הנוגע לסביבת הים והחוף תפקיד ייחודי וקריטי. גופים בינ"ל רבים ובראשם האו"ם, כבר הכירו בחשיבותה של חברה אזרחית בעלת ידע ומודעות לתחומים ימיים (An ocean-literate civil society), אשר באה לידי ביטוי בפרויקטים שונים ברחבי העולם כמו "עשור האוקיינוסים" (The Ocean Decade). האו"ם גם מקדם את "יעדי הפיתוח בר-הקיימה" (SDG's, Sustainable Development Goals), אשר מטרתם לספק תבנית משותפת לשגשוג של בני האדם על פני כדור הארץ עד שנת 2030, ביניהם יעד מספר 14 הנוגע לחיים במים ומתמקד בשימור ושימוש מקיים בימים, באוקיינוסים ובמשאבים שבהם[4,5,6].

לצורך השגת יעד זה ויעדים נוספים מיעדי ה-SDG's, ברור כי חינוך ילדים ובני נוער, כמו גם הציבור הרחב להיכרות ולשמירה על הסביבה הימית, הוא צעד הכרחי.

לתוכניות העשרה לבתי ספר הנוגעות לים והסביבה החופית, ובייחוד לפעילויות שטח, פוטנציאל משמעותי להעלאת מודעות, ליצירת שינוי בדפוסי התנהגות ובהנעה לפעולה של ילדים ובני נוער. אצל בני נוער המשתתפים בתוכניות העשרה שונות נראה לא רק שינוי במידת הידע שהם רוכשים אלא גם ברמת מעורבותם בפעולות סביבתיות שונות כמו הפחתת שימוש במוצרים חד-פעמיים או פלסטיק. פעילויות אלו יוצרות לעיתים קרובות גם מוטיבציה אצל רבים מהמשתתפים לפעול למען הסביבה, וההשפעה המתעצמת של שגרירים צעירים כאלו, המשתפים בידע ובהתלהבות את בני משפחתם או חבריהם, היא משמעותית בפני עצמה[7].

השפעתן של תוכניות המתמקדות בהתנסות חוץ כיתתית מעשית, למידה חקרנית ומנהיגות נוער כבר הוכחה לא פעם ככלי יעיל לחיבור עמוק יותר לסביבה הימית, ולהעלאת המחויבות והנכונות לפעולה למען כדור הארץ בכלל[8]. בהתאם לכך, חשיפה לתוכניות העשרה ולתכנים הנוגעים לסביבה הימית והחופית בגילאי בית הספר היא מרכיב הכרחי וחשוב לא רק בטיפוח ההבנה בחשיבות הסביבה הימית, אלא גם כחלק מתהליך משמעותי של בניית חברה המעורבת יותר בהשגת יעדי פיתוח בר-קיימה ובפרט יעד 14 – החיים במים[4,5]. מעבר לטיפוח מודעות, חינוך סביבתי ימי מספק באופן ייחודי גם הזדמנויות לבני נוער לעסוק בלימוד רב תחומי מדעי[8], לחבר אנשים לטבע וכך גם לתמוך ברווחתם האישית והנפשית[10], לקדם שינויי מדיניות ולתמוך בקהילות במעבר לכלכלה כחולה בת-קיימה[11]. בעולם פועלות תוכניות ויוזמות רבות ומגוונות לחינוך סביבתי ימי, כמו הרשת לחינוך ימי[12], הנותנת מסגרת לחינוך למדעי הים בכיתות בצפון אמריקה ובאירופה, יום האוקיינוסים[13] ועוד.

תוכניות לקהל הרחב, המנגישות ידע סביבתי ימי או חופי, מספקות לבני כל הגילאים הזדמנות להתחבר ולהבין טוב יותר את עולם הים, נושאי אקלים וקיימות[14]. חמישה עשורים של מחקר על חינוך סביבתי לילדים ולבני נוער, מראים שחינוך סביבתי מספק אמצעי יעיל לשיפור הידע הסביבתי, שינוי עמדות, כוונות לפעולה והתנהגות, וככל שעולה המודעות האישית לקשר שבין פעילות האדם לבריאות הסביבה ולחיבור של בריאות הסביבה למגוון אתגרים העומדים בפני החברה האנושית, כך עולה גם הנכונות האישית לפעול לשינוי[15,16]. נכונות הציבור לפעול למען הסביבה וליצור שינוי היא מרכיב חשוב בשינוי החברתי-תפיסתי הנחוץ על מנת להתמודד עם אתגרי הסביבה והאקלים. לשם כך נדרש שיתוף פעולה בין אנשי חינוך, אנשי מדע, מקבלי החלטות וקהילות פעילים על מנת שיפעלו יחד לצייד את הדור הנוכחי ואת בני ובנות הדורות הבאים בכלים הדרושים להם ליצירת חיים מקיימים יותר[17]. יש לציין ששינוי התנהגות הוא עניין מורכב שבד"כ מונע על-ידי נורמה, חוק, פיקוח, הסברה, תמריצים שליליים וחיוביים ובכל זאת החינוך וההסברה הם נדבך ראשוני בתהליך השמירה על הסביבה הימית.

בישראל, חלק מרכזי מהוויית התושבים במדינה קשור לים ולחופיו. בהתייחסות הסביבתית, חיזוק הזיקה בין תושבי ישראל לים הוא מרכיב חשוב בקידום עקבי ובר-קיימה של השמירה על הסביבה הימית[17]. טיפוח המודעות לסביבת הים והחוף ולאחריות סביבתית אישית פעילה נעשית באמצעות חשיפה וחיבור רגשי לסביבה הקרובה והעמקה בסוגיות סביבתיות העולות במפגש בין אדם וים. התבססות על הגישה של החינוך הסביבתי (environmental education) מדגישה את חשיבות הקשר בין האדם לסביבתו[18], בשאיפה להקנות ידע על הסביבה הפיזית והאנושית-חברתית, לקדם אכפתיות וכבוד לסביבה, לאדם ולחברה, במטרה לפתח מיומנויות ומוטיבציה לפעולה[19]. פיתוח אחריות אישית ומנהיגות סביבתית הוא תהליך שבבסיסו מצויים החוויה, הידע והמיומנות, לאחריה פיתוח תחושה של שייכות, מיומנות חשיבה, ערכים ועמדות ובסופו עשייה סביבתית אזרחית ופיתוח מנהיגות סביבתית[19]. החיבור בין החוויה והחיבור הרגשי לבין אימון במיומנויות חשיבה ביקורתית מסייע לגיבוש עמדות וערכים ביחס לסביבה ולחברה ומסייע ליצירת תפיסת עולם אישית. ערכים ועמדות המתבססים על תפיסת עולם, ידע ומיומנויות, והמלווים בתחושת שייכות ואכפתיות, עשויים להוביל לפעולה. התנסות בפעולה תורמת לתחושת מסוגלות עצמית והעצמה, שהם מרכיבים חשובים ליצירתה של מנהיגות סביבתית[19]. בין העקרונות המנחים להנחלת החינוך הסביבתי ישנם עקרונות הרלוונטיים עבור החינוך הימי הסביבתי. אלו כוללים, בין השאר: חינוך מבוסס ידע ומחקר מדעי; למידה על נושאים הקרובים לליבם של הלומדים וקשורים למקום

שבו הם חיים; למידה חוץ כיתתית (outdoor education); למידה פעילה וחינוך סביבתי המתקיים בהקשר חברתי-תרבותי. מהאמור לעיל נובע שישנה חשיבות שהפעילות החינוכית תיעשה באמצעות מפגש בלתי אמצעי בין המודרכים לבין אנשי מקצוע מתחום הסביבה הימית (מהאקדמיה, ארגונים סביבתיים, גורמי ממשל וכדומה), המאפשר העברת ידע ישיר ואותנטי מחזית העשייה תוך חיבור לעשייה רלוונטית, עכשווית, בתחום הסביבתי והימי. על הלמידה להיות מבוססת על הקניה וטיפוח של למידה משמעותית עצמאית באמצעות תהליכי פתרון בעיות, חקר ושימוש במאגרי מידע מקצועיים והיוועצות עם מומחים. רבות מהפעילויות של ארגונים סביבתיים וגופים אקדמיים וממשלתיים העוסקים גם בחינוך סביבתי מבוססות על עקרונות אלו, מתוך שאיפה לפתח ולטפח אצל הלומד כלים ערכיים ואקדמיים עדכניים וכלים מקצועיים מתאימים שבאמצעותם יוכלו לתרום לשמירת הטבע והסביבה בישראל ובעולם. כך לדוגמה, בחברה להגנת הטבע, אקואושן, רשות הטבע והגנים ובמכון לחקר ימים ואגמים לישראל, נערכים סיורים וסדנאות חקר בחוף ובים המאפשרים היכרות וחקר של בית הגידול הימי והחופי תוך התנסות בהגדרת שאלות חקר ובחינתן באמצעות ביצוע דיגום בשטח (איורים 1,2).

באקואושן הפעילות מתבצעת בהובלת מדריכים המגיעים מרקע בתחום הים והסביבה והחיבור הבלתי אמצעי לסוגיות אמיתיות ועכשוויות משפיע ישירות על רמת המוטיבציה של המשתתפים ועל הבנתם את החשיבות של איסוף נתונים ביולוגי ואקולוגי כבסיס לקבלת החלטות. אותם העקרונות מונחלים גם בפעילות במרכזי המבקרים של רשות הטבע והגנים (רט"ג) כדוגמת המרכז להצלת צבי-ים ובתוכניות מתמשכות, כדוגמת תוכנית "חופים", של אקואושן, שבהן המדריך "מביא את הים לכיתה" באמצעות פעילות מגוונת של למידה מבוססת פרויקטים, למידה מבוססת בעיות, למידת עמיתים ולמידה שיתופית, למידת חקר באמצעות ניסויים, למידה דרך משחק ויצירה ועוד. סדרת המפגשים המובלת על-ידי אותו המדריך לאותם משתתפים מאפשרת היכרות וחיבור עמוק בין התלמידים למדריך ויצירה של תהליכי למידה. בנוסף, החיבור בין המדריך לתלמידים מאפשר חשיפה לתכנים נוספים, עדכניים ורלוונטיים, הקשורים לסביבה הימית מתוך עולמו של המדריך, אם בתחום שבו הוא עוסק בעבודתו, לימודיו, במחקר האקדמי שלו או בתחביביו.

איור 1. סיור היכרות עם הסביבה החופית והימית. צילום: אקואושן.

איור 2. סיור חקר. צילום: אקואושן.

איור 3. סטודנטים מתנדבים בניקוי זפת מהמצע הסלעי. שקמונה, חיפה, מאי 2021. צילום: אקואושן.

קהילה

תפיסת העולם הקהילתית גורסת כי שינויים עמוקים וארוכי-טווח דורשים עבודה רב מגזרית מקומית, אזורית וארצית[20,21]. תושבים רבים פוקדים את הים והחופים ומחפשים דרך לתרום, לקחת חלק ולהשפיע בכל הנוגע לשימור והגנה על בתי הגידול הייחודיים של אזור הים והחוף. לפיכך יש חשיבות לקיומה של פלטפורמה מקצועית וארגונית המאפשרת ומעודדת השפעת תושבים על מרחב זה. קהילה היא מערכת חברתית, הכוללת רשת של התארגנויות, מערכות יחסים ודפוסי תקשורת אישיים ומתמשכים[21], ולכן יש צורך בהשקעה, בניהול ובגיבוש הקהילות ובהקשבה לצרכים על מנת להוות מוקד להזדהות ומשמעות מבחינת השותפים בה. העבודה נעשית בשני צירים: בציר "מטה-מעלה" (Bottom-Up) מופעלים מתנדבים כך שישפיעו בדרכים שונות על הציבור הרחב, מובילי דעת קהל ומקבלי החלטות. בציר "מעלה-מטה" (Top-Down) מתקיים קשר ישיר ושיתופי פעולה של הקהילה עם מגוון בעלי עניין כגון רשות שמורות הטבע והגנים (רט"ג), החברה להגנת הטבע, המשרד להגנת הסביבה (הגנ"ס), האקדמיה וגופים

מסחריים על מנת לייצר שפה משותפת, לייצר מהלכים מקבילים וסינרגטיים, ללמוד על הצרכים של בעלי העניין ולהפיק את התועלת המרבית מפעילות הקהילות. אסטרטגיית פעולה זאת מופעלת על-ידי ארגוני חברה אזרחית רבים במגוון תחומים. פעילות עמותת אקואושן בתחום הקהילה כוללת את הרשת הארצית של מתנדבי חירום ים, קהילת מתנדבי מדע אזרחי וקהילות מתנדבים יחידים ומטעם חברות עסקיות. המתנדבים פועלים בחופי המדינה וכן בסיוע לפעילות ספינת המחקר של העמותה.

הרשת הארצית של מתנדבי חירום ים

שמנים ונפט אשר נפלטים לים יוצרים כתם המתפשט למרחקים וגורם נזק חמור לנוצות עופות ים, לעור ולמערכות הנשימה של דגים ויונקים החיים במים. יצורים נושמי אוויר כצבי-ים ויונקים ימיים עלולים לשאוף את הנוזל המסוכן לריאותיהם בעת הציפה. כתמי שמנים ונפט גולמי עלולים להיות מוסעים עם הזרמים והגלים לחוף או לשקוע לקרקעית הים בצורת זפת. לעיתים קרובות, שמן שדלף לסביבה הימית יהיה קל מהמים ולכן יצוף על פניהם. שמנים כבדים או שמנים קלים השוהים במשך זמן בסביבה הימית ועוברים תהליכים כמו אידוי וערבוב עם משקעים, עשויים לאבד את יכולת הציפה שלהם ולחדור לעמודת המים או לשקוע לקרקעית. במקרים רבים נגרם נזק כבד לא רק לעמודת המים אלא גם לבתי גידול מוצקים של הקרקעית והחוף על יושביהם[23]. בנוסף לפגיעה הסביבתית, עלולים להיגרם נזקים כלכליים בשל פגיעה בתשתיות חוף, תחנות כוח, מתקני התפלה וכן בתעשיות הדיג, החקלאות הימית והתיירות.

מהניסיון הנרכש מאסונות נפט ברחבי העולם, התברר שגם בתנאים המיטביים ביותר והפעלה אופטימלית של ציוד לטיפול בדליפה בעודה בים, כ-50%-85% מכתם שמן שדולף בלב ים יגיעו בסופו של דבר אל החוף[24]. לממדי הזמן והמרחב יש חשיבות עליונה: ככל שיטופלו כתמי השמן ושאר הזיהומים המסוכנים קרוב יותר למקור האירוע וסמוך יותר למועד התרחשותו, כך יצטמצמו הנזקים הסביבתיים והכלכליים הנגרמים בעטיים[23]. הבעיה העיקרית בעת טיפול באירוע זיהום ים וחופים בשמן בקנה-מידה בינוני וגדול, שעלול להימשך שבועות ואף חודשים, היא מחסור בתקני כוח אדם מקצועי לניהול אופטימלי של האירוע. במקרה של אירועי זיהום ים וחופים בקני-מידה כאלה נדרשת "מכפלת כוח" זמינה ומקצועית של מתנדבים שהינה חלק הכרחי בהצלחתן של תוכניות תגובה.

הניסיון מלמד גם, שהכלי המדויק ביותר והפחות מזיק לסביבה לניקוי חופים מזוהמים בשמן, הוא ניקוי ידני של מתנדבים בעלי הכשרה וליווי מקצועי. ניקוי ידני באמצעים פשוטים כגון מגרפות, אתים ודליים מאפשר פגיעה מינימלית בבתי הגידול החופיים, כמו כן הפסולת שנאספת מכילה בעיקר נפט / זפת ופחות חול, ומאפשרת טיפול יעיל יותר בפסולת השמנית[25].

מתנדבים עשויים להוות כוח עזר פוטנציאלי בעל ערך רב להתמודדות עם אירועי זיהום ים וחופים בשמן, בשל הזמינות והפריסה הגיאוגרפית שלהם, שמאפשרות גמישות בזמן ובמיקום העבודה. במידה שינוהל נכון, מערך המתנדבים יפנה זמן יקר של אנשי המקצוע והמומחים המעורבים בתגובה. המתנדבים לרוב הינם בעלי ידע מקומי רב, מוטיבציה גבוהה ומגוון רחב של יכולות והקהילה המקומית מכירה אותם וסומכת עליהם. סיוע של מתנדבים עשוי לשפר את יחס הציבור לפעולות הטיפול באירוע, מאחר שהם נתפסים בעיני התקשורת והקהילות המקומיות באופן אוהד[26].

באירועי זיהום ים וחופים בשמן, נהוג לשייך מתנדבים לאחת משתי קטגוריות: מתנדבים מקצועיים ומתנדבים

"ספונטניים" (מתנדבי "אד-הוק"). שמירה על מאגר גדול של מתנדבים בעלי הכשרה מקצועית מקדימה ותרגול רציף, מאפשרת השמה מהירה ויעילה שלהם בצוותי העבודה של מערך התגובה לאירוע, תוך חיסכון הזמן הנדרש לגיוס והכשרה. מתנדבים ספונטניים הינם מתנדבים מקרב הציבור שלא עברו הכשרה מקדימה, אך סיוע שלהם, כאשר הוא מנוהל נכון, יכול לקצר באופן משמעותי את משך הטיפול בזיהום[28,27].

שיתוף פעולה בין עמותת אקואושן והמשרד להגנת הסביבה הביא להקמת "הרשת הארצית של מתנדבי חירום ים". מטרת היוזמה הינה להגביר את רמת המוכנות וההיערכות של רשויות וקהילות מקומיות לטיפול באירועי זיהום ים וחופים בשמן. הרשת הארצית של מתנדבי חירום ים, שהקמתה בקרב רשויות החוף החלה ב-2019, כוללת קבוצות איכות של מתנדבים ומתנדבות המהווים כוח עזר מהותי במקרה של אירוע זיהום ימי וחופי בשמן, בכל קנה-מידה, לגורמים האחראיים ברשות והמעורבים בתגובה לאירוע זיהום ים וחופים בשמן[29].

במסגרת היוזמה, מתנדבי חירום ים עוברים הכשרות מקצועיות של המשרד להגנת הסביבה, משתתפים בפעילויות העשרה מגוונות בנושאי שמירת הסביבה הימית והחופית ובתרגילים מקומיים וארציים לטיפול בזיהום שמן. מתנדבות ומתנדבי חירום ים הינם בעלי רקע מגוון; רבים מהם פעילים בארגוני שימור הסביבה, עוסקים בספורט ימי כגון צלילה, שיט וגלישה, יוצאי חיל הים, שייטת ויחידות מבצעיות נוספות, סטודנטים ואנשי אקדמיה, יזמים וגמלאים ממגוון מקצועות ובעלי מגוון יכולות, כאשר המשותף לכולם הוא אהבת הים והארץ וכן רצון עז לתרום ולהגן על הסביבה הימית והחופית.

בפברואר 2021 התרחש אירוע חמור של זיהום בזפת, שכונה "זפת בסערה" ושהוגדר על-ידי המשרד להגנת הסביבה (הגנה"ס) כאירוע ברמה TIER2b – אירוע בין־מקומי אשר המזהם אינו ידוע, דרגה אחת מתחת לאסון סביבתי בדרגה המרבית (TIER3). הפגיעה הייתה נרחבת וקשה, כ-165 ק"מ מרצועת החוף הישראלית שאורכה 195 ק"מ כוסו בחומר השחור, מראש הנקרה שבצפון ועד ניצנים בדרום. במהלך האירוע הרשת הארצית של מתנדבי חירום ים מנתה כ-250 מתנדבות ומתנדבים שעברו הכשרות מקדימות ונקראו לסייע. מתנדבי חירום ים השתלבו במגוון פעולות וצוותי עבודה: צוות הסברה, רישום ותדרוך של מתנדבי אד-הוק בחופים, צוות סוקרי חוף, צוות ניקוי מצע סלעי, סיוע על ספינת המחקר ה-Mediterranean Explorer שאותה מפעילה עמותת אקואושן, סיוע בחדר המצב הלאומי ובחמ"ל עמותת אקואושן לתיאום מאמצי הניקוי מול המשרד להגנה"ס, רשויות החוף, רשות הטבע והגנים (אשר הובילה את מאמצי הניקוי בשמורות הטבע והגנים הלאומיים אשר באחריותה) וארגוני הסביבה. בנוסף, גויסו מעל 16,000 מתנדבי אד-הוק, כ-200 חברות מהמגזר העסקי ועשרות קבוצות וארגונים (איורים 3,4).

איור 4. מתנדבי חירום ים בתרגיל לאומי לטיפול בזיהום ים וחופים בשמן. אשדוד, נובמבר 2020. צילום: אקואושן.

ספינת המחקר של העמותה, ה-Mediterranean Explorer, המוגדרת כספינת תגובה ראשונית במקרי זיהום ים וחופים בשמן, ביצעה סקר ניטור ימי לחיפוש כתמי נפט/זפת נוספים ופעלה בשיתוף עם חוקרי המכון לחקר ימים ואג־מים לישראל ואוניברסיטת חיפה בשיגור כלי מחקר אוטונומי ("גליידר") לבדיקת הימצאות הידרו-קרבונים מזהמים בעמודת המים ובדיקות נוספות של מי הים והסדימנט[30].

אירוע זה הוכיח ששיתוף הפעולה ההדוק בין רשויות החוף למשרד להגנת הסביבה ותגבור הכוחות המגיבים במתנדבים מקצועיים במסגרת מיזם הרשת הארצית, שאותו מובילה עמותת אקואושן, מהווה נדבך חשוב והכרחי בהיערכות ובמוכנות לאירועי זיהום ים וחופים בשמן ברמה המקומית והלאומית.

"אנשי הים התיכון" ופעילות מדע אזרחי

ניהול יעיל של משאבי טבע בכלל ושמורות ימיות בפרט דורש מידע עדכני ואמין על מצב הסביבה הטבעית, כולל בתי הגידול והמגוון הביולוגי, מידע על מפגעים, שימושים ועוד. עם זאת, לעיתים קרובות המשאבים וכוח האדם העומדים לרשות הרשויות האחראיות על ניהול משאבי הטבע, לצורך איסוף המידע, הינם מוגבלים. פעילויות "מדע אזרחי" מרחיבות את אפשרויות איסוף המידע המדעי ולעיתים גם ניתוח הנתונים בעזרת הציבור הרחב או קבוצות ייעודיות של מתנדבים. גודל מדגם גדול, הכשרה מתאימה ובקרת איכות נתונים קפדנית יכולים לשפר משמעותית את איכות הנתונים וערכם המדעי[32,31]. בנוסף, לתוכניות מדע אזרחי ממד חינוכי-הסברתי והן מאפשרות גישה של הציבור למידע ולתכנים מדעיים, ומקדמות את מעורבות ושותפות הציבור ובעלי עניין בנושאי שמירת טבע[33,34]. "אנשי הים התיכון", קואליציית קהילות בפריסה ארצית של ארגוני הסביבה אקואושן, דלפיס, החברה להגנת הטבע, צלול ו"שומרי החוף והים – גליל מערבי", הוקמה בשנת 2018 על מנת לקדם את השמורות הימיות בישראל. במסגרת הפעילות, עמותת אקואושן הקימה את קהילת "ים שרון", על מנת לקדם את אכרזת השמורה הימית המוצעת "ים פולג". הקהילה פעלה באמצעות אירועי חינוך והסברה להעלאת המודעות, סיורי שטח והרצאות העשרה, מבצעי ניקיון, פעילות ימית, ועוד. נדבך מרכזי בפעילות מתנדבי הקהילה היה פעילות "מדע אזרחי". צוותי המתנדבים היוו "עיניים בשטח" לאורך השנה ואספו מידע חיוני על מצב המגוון הביולוגי בשמורה, זיהו השפעות שליליות, שינויים בהרכב המינים והופעה של "מינים פולשים". לאורך תקופת הפעילות התקיימה היוועצות עם אנשי מקצוע ברשות שמורות הטבע והגנים, החברה להגנת הטבע, המשרד להגנת הסביבה, האקדמיה ועוד על מנת לייצר שפה משותפת ולמקד את הניטור במידע חיוני ונדרש.

לצורך המשימה הוקמו שלוש קבוצות: קבוצה אחת עסקה בניטור בצלילה של רכסי כורכר שקועים בשטח השמורה המוצעת, קבוצה שנייה ניטרה את סלעי החוף באזור געש וקבוצה נוספת, שפעלה במשך כשנה בליווי אסף בן דוד, מומחה בגישוש חיות-בר ומחבר "מגדיר עקבות ישראלי", ניטרה קולות ציפורים ועקבות חיות-בר באזור המצוק ותרמה לסקר ארצי בדבר פריסה והימצאות חיות-בר. לפני תחילת הניטור, נערכה למתנדבים הכשרה מקיפה, בשיתוף פעולה וליווי של פרופ' גיל רילוב, ראש המעבדה לאקולוגיה של חברות ימיות בחקר ימים ואגמים לישראל, במהלכה למדו המתנדבים את שיטות העבודה והכירו את האורגניזמים הנסקרים. סוקרי הצלילה השתתפו גם בהתמחות "צולל שונית" ו"סוקר ימי" של ההתאחדות הישראלית לצלילה ואילו סוקרי החוף עברו הכשרה ייעודית לביצוע סקרי חוף. הסקרים בוצעו בשיטות סקר מדעיות "קלאסיות" – סרטי מדידה, ריבועי דיגום, זיהוי וספירת פרטים (או % כיסוי), תיעוד בלוחות רישום וצילום.

ניטור סלעי הכורכר השקועים – הניטור החל בסתיו 2020 ונמשך כשנתיים (איור 5), במהלכן בוצעו 4 צלילות סקר בשנה. הסקרים נערכו בשלושה אתרים סלעיים ימיים: שונית סלעית מול חוף פולג, בעומק של כ-6 מ', שונית מול מכון וינגייט בעומק של כ-12 מ', ושונית נוספת וגדולה, בעומק של כ-20 מ', מול געש. הסקרים הימיים כללו סקר חסרי חוליות וסקר דגים. במהלך השנה השנייה הניטור התמקד בסקרים ייעודיים לדקרים, טורפים נפוצים המהווים מין מפתח בחברה הימית וסקרים ייעודיים לאצות.

איור 5. ניטור שוניות סלעיות בצלילה. צילום: אקואושן.

ניטור סלעי החוף – הסקרים, שהחלו ביוני 2020, נערכים בסלעי החוף (Beach rock) בחוף געש (איור 6). המתנדבים סוקרים אחת לחודש מקטעים קבועים בסלעי החוף ועוקבים אחר מינים מייצגים של אצות וחסרי חוליות. בנוסף נלקחים מדדים פיזיקלים שונים ונתונים על מצב הים כגון טמפ' המים והסלע, תיעוד אירועי יובש קיצוניים, נוכחות זיהום שמן, זפת ועוד.

הניטור מעל ומתחת למים הראה שבאמצעות פעילות המדע האזרחי ניתן לקבל מידע חשוב ועדכני הנדרש לצורך הגנה על ערכי טבע. כך לדוגמה זוהתה וניערך מעקב אחר השתלטות הצדפה הפולשת *Perna perna*, אשר כפי הנראה דחקה כמעט לחלוטין את הבוציות שהיו נפוצות בעבר באזור (איור 7). פעילות הניטור של המתנדבים שעברו הכשרה מרחיבה את היכולת למעקב צמוד / נקודתי בקנה-מידה רחב על שינויים סביבתיים ומאפשרת התראה מהירה במקרים של שינויים חריגים בסביבה הימית.

מעבר לאיסוף מידע חשוב, ניכר שפעילות המדע האזרחי משתלבת ותומכת ב"סל הפעילויות" למען הסביבה ומתנדבים רבים מקהילת "ים שרון" שלוקחים חלק בפעילות המדע האזרחי מעורבים גם בפעילויות נוספות לקידום שמירת טבע וסביבה.

איור 6. ניטור סלעי החוף. צילום: עודד וינר, אקואושן.

איור 7. המין הפולש *Perna perna*. צילום: אקואושן.

תוכנית הדגל הכחול

ניהול חופי הרחצה הוא אחד האתגרים המורכבים העומדים בפני רשויות החוף בישראל. לרוב הרשויות המקומיות, ובמיוחד לאלו הנמנות עם אשכולות חברתיים-כלכליים נמוכים, משאבים מוגבלים, ובאמצעותם הן מספקות שירותים גם למתרחצים שאינם מתגוררים ברשות. למעשה, 25 רשויות החוף של ישראל (כולל איגוד ערים כנרת המאגד מספר רשויות), ובהן 157 חופי רחצה מוכרזים, נושאות בעול לבדן ומספקות שירותי חוף לתושביהן של כל 256 הרשויות המקומיות בישראל ולתיירים מחו"ל. מהערכות שנעשו על-ידי מספר עיריות עולה כי כשליש ממתרחצי החופים אינו מתגורר בעיר. האתגרים שאיתם מתמודדות הרשויות המקומיות כוללות שמירה על ניקיון החופים, תחזוקה, ניהול פסולת, נגישות, בטיחות ועוד.

תוכנית הדגל הכחול, תוכנית בינלאומית מטעם ארגון Foundation for Environmental Education (FEE) מספקת מסגרת עבודה וכלים מעשיים לניהול בר-קיימה של חופי רחצה ומרינות. התוכנית, שנוסדה בשנת 1987, פועלת ב-51 מדינות בכל רחבי העולם ומופעלת בישראל על-ידי עמותת אקואושן. היא מאפשרת שיתופי פעולה ושיתוף ידע בין רשויות חוף בישראל ובעולם, מעודדת את הרשויות לשיפור מתמיד ומאפשרת תהליכי ייעול בניהול החופים במגוון רחב של היבטים. עד היום הוענק הדגל הכחול ליותר מ-5,000 אתרים ברחבי העולם, ובישראל הוא הוענק בשנת 2023 ל-59 אתרים, מנהריה בצפון ועד אילת בדרום (איור 8).

איור 8. חוף נווה ים, מועצה אזורית חוף הכרמל. צילום: אקואושן.

תו הדגל הכחול ניתן לחוף למשך עונת רחצה אחת, לאחר שהוכח כי הוא עומד בתנאי התוכנית, ויש לחדש את התו מדי שנה. כדי שחוף יזכה להניף את הדגל הכחול עליו לעמוד ב-34 קריטריונים מחמירים ועל הרשויות להשקיע מאמצים ותקציבים כדי לעמוד בכל תנאי התוכנית. בין הקריטריונים הנבדקים, כאלה הנוגעים ישירות לחוויית הביקור בחוף כגון שמירה על הניקיון ועל רמת תחזוקה נאותים, נגישות לאנשים עם מוגבלויות ועוד. דגש מיוחד ניתן לקריטריונים סביבתיים כגון הפרדת פסולת, איסור שימוש בכלים חד-פעמיים על-ידי צוותי החוף, שימור המערכת האקולוגית בחוף ובסביבתו, בדיקת איכות מי הרחצה, קידום אמצעי תחבורה ציבוריים ובלתי מזהמים אל החוף והכנת תוכנית חירום להתמודדות עם אירועי זיהום חוף בשמן. קריטריונים אחרים נוספים נוגעים לניהול החוף, לדוגמה הקמת ועדה לניהול החוף, וכן לפעילויות חינוך והסברה, כגון קיום פעילויות חינוך סביבתי ומסירת מידע סביבתי לציבור.

בכדי לקבוע האם חוף עומד בקריטריונים לקבלת הדגל הכחול, פועלת בישראל ועדה לאומית שתפקידה הוא לבחון את בקשות המועמדות ולהעביר את המלצותיה לוועדה בינלאומית בקופנהגן, הדנה בכלל ההמלצות מכל המדינות. בוועדה הלאומית חברים נציגים של משרדי ממשלה (הגנת הסביבה, הפנים, החינוך, הבריאות והתיירות), השלטון המקומי (מרכז השלטון המקומי, מרכז השלטון האזורי ופורום רשויות החוף), ארגוני סביבה (אקואושן והחברה להגנת הטבע) ואיגוד המצילים הארצי. סביב שולחן הוועדה נוצר שיח פורה בין הגופים השונים, מוצפים אתגרים ובעיות בניהול החופים, ולא פעם גם עולים פתרונות. במקרים מסוימים מותנית הענקת הדגל הכחול לחוף בהצגת תוכניות עבודה או בביצוע שיפורים כאלה ואחרים בו.

מאז שנת 2012, שבה אומצה התוכנית בישראל לראשונה, מצטרפים כמעט מדי שנה חופים חדשים לתוכנית. ההבנה שהדגל הכחול מספק מסגרת עבודה וכלים מעשיים באמצעות פעולות פשוטות, מהווה חלק מכריע בהחלטת הרשויות המקומיות להצטרף לתוכנית. כך למשל, התוכנית קובעת כי יש להקים ועדה לניהול חוף, שבה יהיו חברים כל בעלי העניין הרלוונטיים לניהולו. על הוועדה להתכנס כדי לדון בצעדים שננקטים בחוף לשמירה על הסביבה, בקשיים ובאתגרים, לחתור להשגת פתרונות ולייצר שיתופי פעולה בתוך הרשות המקומית ועם גורמים מחוץ לרשות. למרבה הפליאה, נוהל עבודה שכזה אינו קיים בחופים רבים שאינם בתוכנית הדגל הכחול, וברשויות מקומיות רבות הוא הוטמע רק לאחר הצטרפותן לתוכנית. הדגל הכחול מספק הנגשת מידע לציבור באופן קל ופשוט. אחד הקריטריונים של התוכנית קובע כי על המידע להיות מונגש לציבור בחוף עצמו: מפה של החוף ומתקניו, תוצאות דיגומי המים שהתבצעו בחוף, אפשרויות ההגעה לחוף באמצעות תחבורה ציבורית, מידע על מערכות אקולוגיות ועל אתרי מורשת באזור, פעילויות חינוכיות בחוף, קודי התנהגות, דרכי תקשורת עם הגוף האחראי על ניהול החוף ועם עמותת אקואושן ומידע על תוכנית הדגל הכחול. הפורמט שבו מוצג המידע בכלל חופי הדגל הכחול בישראל הוא אחיד, על גבי לוח המוצב בכניסה לחוף כשהדגל הכחול מתנוסס לידו. בשנים האחרונות אוסרות עוד ועוד רשויות מקומיות הכנסה של פלסטיק חד-פעמי לחופי הים, אולם ברוב חופי ישראל עדיין לא קיים איסור על שימוש בכלים חד-פעמיים. כדי להפחית את השימוש בפלסטיק חד-פעמי ולהטמיע הרגלי שימוש ידידותיים לסביבה, החליטה עמותת אקואושן המפעילה את הדגל הכחול בישראל להוסיף קריטריון מקומי, האוסר על שימוש בציוד חד-פעמי בקרב צוותי החוף (בסוכות ההצלה, במרפאות, במשרדי החוף וכו'). הקריטריון נאכף באמצעות ביקורות צוות הדגל הכחול וככל שמתגלה שחוף לא עומד בו הוא מתבקש לתקן את הליקוי. בביקורות שהתקיימו בעונת הרחצה 2023 נמצאו חופים בודדים בלבד שלא עמדו בקריטריון והם נתבקשו

לתקן את הליקוי כתנאי לקבלת הדגל הכחול בעונת הרחצה הבאה. אחד האתגרים המשמעותיים ביותר העומדים בפני מנהלי החופים הוא נושא הנגישות. על-פי חוק חובה על כל רשות מקומית להנגיש את חלק מחופי הרחצה שלה לאנשים עם מוגבלויות וגם תוכנית הדגל הכחול קובעת כללים בעניין. למרות זאת, בביקורות הדגל הכחול נמצאים לא פעם ליקויים מהותיים בתחום ההנגשה, החל מבעיות תחזוקה, כגון ברזים לא נגישים לאנשים עם מוגבלות פיזית במקלחות החוף, ועד להיעדר סככות מוצלות או שבילים מונגשים עד לחול הרטוב. מביקורות הדגל הכחול ניתן לקבוע כי תחום הנגישות בחופים הוא התחום שבו הפער בין המצוי לרצוי הוא הגדול ביותר מבין כל התחומים הנבדקים בתוכנית, עם זאת, בזכות הביקורות מתבצעים שיפורי נגישות בחופים – החל משיפורים קלים כגון שילוט בסככות המונגשות ועד לתוספות של משטחים נגישים ושל שבילי גישה פריקים.

תוכנית הדגל הכחול אינה רק תוכנית לניהול סביבתי, זהו ארגז כלים המלווה במעטפת תמיכה מטעם גוף מקצועי, וזהו גם כלי ליצירת שיתופי פעולה פנים וחוץ ארגוניים ולשיתוף הקהילה. לא בכדי צוברת התוכנית תאוצה בישראל ובעולם כולו, יש לקוות כי בשנים הקרובות נראה את הדגל הכחול מתנוסס בעוד ועוד חופים מוכרזים בישראל. יש גם לקוות שבעתיד יאומץ תו הדגל הכחול כתקן מחייב בחופי ישראל וכי כל חוף רחצה מוכרז יחויב בעמידה בקריטריונים המתחייבים מהתוכנית. כך ניתן יהיה לגשר על פערים בין הדרישות הנוכחיות לניהול החופים, הנגזרות מהרגולציה הקיימת כיום, לבין המצב הרצוי – ניהול המביא בחשבון את צורכי כלל משתמשי החופים לצד שיקולי שמירה על הסביבה.

סיכום

פעילות ארגוני סביבה, המתקיימת בתוך המרובע הכולל גם את הממשל, המגזר העסקי והאקדמיה, הינה פעילות המשלימה את הפעילות להגנת וניטור הסביבה של השלטון, וממלאה תפקיד חשוב במארג בעלי העניין המשפיעים על הטבע והסביבה ופועלים לשמירתם.

בישראל מפעילים ארגוני סביבה אסטרטגיות שונות לצורך קידום היעדים הסביבתיים שבתחום עיסוקם. חלקם פועלים בגישת Top-Down בעיקר ברמת המדיניות, באמצעות קידום חקיקה, נציגות בוועדות מקצועיות של הממשלה ובאמצעות פעילות לובי, בעוד ארגונים אחרים פועלים באמצעות פעילות Bottom-Up תוך קיום קשר הדוק עם ה"שטח" ופעילותם בולטת במיוחד בזירות החינוך, ההסברה, הקהילה והרשויות המקומיות. בבסיסה של גישה זו מיוחסת חשיבות רבה לחינוך הסביבתי בטווח הארוך להעלאת המודעות הסביבתית, הן של הדור הצעיר והן של הציבור הרחב, והנכונות לפעול למען הסביבה. תוכניות חינוך והסברה לקהלים מגוונים ככל האפשר, הפעלת מתנדבים ופעילויות מדע אזרחי הינם מרכיבים מרכזיים בפעילות זו.

חיזוק הקשר המקצועי בין ארגוני הסביבה, הרשויות המוניציפליות, רשויות שמירת הטבע והסביבה וגורמי שלטון רלוונטיים אחרים חשוב אף הוא לפעילות סינרגטית ומתואמת התורמת לשמירת טבע וסביבה בישראל. לאור החמרת המשבר הסביבתי, פעילות נמרצת וסינרגטית של כלל ארגוני הסביבה תוך שימוש במגוון אסטרטגיות הפעולה שלהם, הינה חיונית ותידרש אף יותר בעתיד, לאור האתגרים הסביבתיים המקומיים והגלובליים הרבים שבפניהם אנו ניצבים, והשלכותיהם.

רשימת מקורות

1. Johnson, M., Campbell L. & Svendsen, E. Conceptualizing, analyzing, and supporting stewardship: examining the role of civil society in environmental governance. *Ecol. Soc.* **2** (2020).
2. Hutter, B. M. & O'Mahony, J. *The role of civil society organizations in regulating business*. (Centre for Analysis of Risk and Regulation, London School of Economics and Political Science, 2004).
3. Gerdung, A. Global environmental governance and the role of civil society groups. *NZJEL*55 ,**8** (2004).
4. United Nations. Transforming our World: The 2030 agenda for sustainable development. (2015).
5. United Nations. The first global integrated marine assessment: World Ocean Assessment I. United Nations Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea. (2017).
6. United Nations. United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030). https://www.oceandecade.org/ (2021).
7. Mokos, M., Giulia R. & Čižmek, I. Z. How to increase ocean literacy for future ocean sustainability? The influence of non-formal marine science education. *Sustainability* **12**, 24 (2020).
8. Rayon-Viña, F., Miralles, L., Fernandez-Rodríguez, S., Dopico, E. & Garcia-Vazquez, E. Marine litter and public involvement in beach cleaning: Disentangling perception and awareness among adults and children, Bay of Biscay, Spain. *Mar. Pollut. Bull.* **141**, 112-118 (2019).
9. Hoffman, M. & Barstow, D. Revolutionizing earth system science education for the 21st century. Report and recommendations from a 50-state analysis of earth science education standards. (TERC, Cambridge, MA, 2007).
10. Ashbullby, K. J., Pahl, S., Webley, P. & White, M. P. The beach as a setting for families' health promotion: A qualitative study with parents and children living in coastal regions in Southwest England. *Health & place* **23**, 138-147 (2013).
11. Paredes-Coral E., Mokos M., Vanreusel A. & Deprez T. Mapping global research on ocean literacy: Implications for science, policy, and the Blue Economy. *Front. Mar. Sci.* **8** (2021).
12. Ocean Literacy Network. Ocean literacy: The essential principles and fundamental concepts of ocean sciences for learners of all ages, Version 2. (NOAA, 2013).
13. World Oceans Day Youth Advisory Council. https://worldoceansday.org/get-involved/youth-advisory-council/ (2022).
14. Monroe, M. C., Andrews, E. & Biedenweg, K. A Framework for Environmental Education Strategies. *Appl. Environ. Edu. Comm.* **6**, 205–216 (2008).
15. Monroe, M. C., Plate, R. R., Oxarart, A., Bowers, A. & Chaves, W. A. Identifying effective climate change education strategies: A systematic review of the research. *Environ. Educ. Res.* **25**, 791-812 (2019).

16. Van de Wetering, J., Leijten, P., Spitzer, J. & Thomaes, S. Does environmental education benefit environmental outcomes in children and adolescents? A meta-analysis, *J. Environ. Psychol.* **81**, 101782 (2022).
17. UNESCO. Schools in action, global citizens for sustainable development: a guide for teachers. (UNESCO, 2016).
18. Sauve, L. Currents in environmental education: Mapping a complex and evolving pedagogical field, *Can. J. Enviro. Educ.* **10**, 11-37 (2005).
19. טל, ט. חינוך סביבתי וחינוך לקיימות: עקרונות, רעיונות ודרכי הפעלה.)המשרד להגנת הסביבה בשיתוף הטכניון, החברה להגנת הטבע ומשרד החינוך, 2009).
20. Laverack, G. & Wallerstein, N. Measuring community empowerment: a fresh look at organizational domains. *Health promot. Int.***16**, 179-185 (2001).
21. Kongprasertamorn, K. Local wisdom, environmental protection and community development: The clam farmers in Tambon Bangkhunsai, Phetchaburi Province, Thailand. *Manusya: Journal of Humanities* **10**, 1-10 (2007).
22. Clark, D. B. The concept of community: A re-examination. *Sociol. Rev.* **21**, 397-416 (1973).
23. אלגום-מזרחי, א. היערכות לאירועי זיהום ים בישראל - רקע לדיון. (מרכז המחקר והמידע, הכנסת, 2022).
24. הזמט בע"מ ופארטו הנדסה בע"מ. הערכת סיכונים לתקריות העלולות לגרום לזיהום ים בחופי ישראל. תרחישי יחוס וניתוח חלופות להיערכות לאומית. (2007).
25. IPIECA. A. guide_to_shoreline_clean-up_techniques. IOGP Report 521. (2015).
26. Tucker, A. & O'Brien, M. Volunteers and oil spills- a technical perspective. *A paper presented at the International Oil Spill Conference, Portland Oregon, USA, 23-26 May 2011.*
27. IPIECA. Volunteer management. (2015).
28. POSOW. Oiled shoreline cleanup manual. www.posow.org. (2013).
29. שטרן, מ. אסדות הגז הפכו ליעד ביטחוני, אך הסכנה היא קודם כל סביבתית. *עיתון הארץ* (2022).
30. שטרן, מ. מתנדבים באסון זיהום הזפת, ישראל 2021.https://www.ecoocean.org/sea-emergency (עמותת אקואושן, 2021).
31. Schmeller, D.S. et al. Advantages of volunteer-based biodiversity monitoring in Europe. *Cons. Biol.* **23**, 307–316 (2009).
32. Pasternak, G. Nearshore survey and cleanup of benthic marine debris using citizen science divers along the Mediterranean coast of Israel. *Ocean & Coast. Manag.* **175**, 17-21 (2019).
33. Dickinson, J. L. et al. The current state of citizen science as a tool for ecological research and public engagement. *Front. Ecol. Environ.* **10**, 291-297 (2012).
34. Branchini, S. et al. Participating in a citizen science monitoring program: implications for environmental education. *PloS one*, **10**, (e01318122015).

10 הזרמים בים התיכון באגן המזרחי - מבט כללי

סטיב ברנר

המחלקה לסביבה, תכנון וקיימות,
אוניברסיטת בר אילן

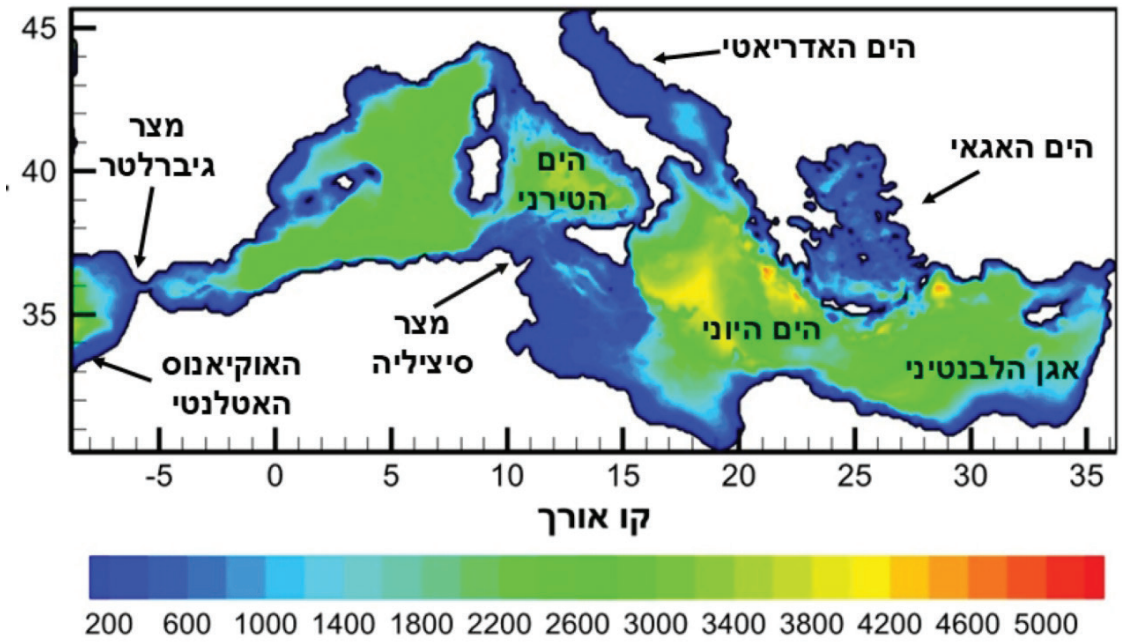
sbrenner@mail.biu.ac.il

תקציר

הים התיכון הינו ים סגור למחצה שמחובר לאוקיינוס האטלנטי דרך מצר גיברלטר עם מפתן רדוד יחסית. בממוצע השנתי האידוי מפני הים גובר על כמות המשקעים ושפך נחלים לים ולכן מבחינה אוקיינוגרפית הים התיכון מוגדר כאגן ריכוז שבו מים פחות מלוחים נכנסים מהאוקיינוס האטלנטי בשכבה העליונה ומי הים התיכון המלוחים יוצאים בשכבת הביניים. בממוצע האגן המזרחי חם יותר ומלוח יותר מהאגן המערבי. משטר הזרימה בשני האגנים מאופיין על-ידי גושי מים שונים ומורכב מתופעות זרימה רבות המתרחשות במגוון רחב של קני-מידה הן במרחב והן בזמן. תופעות אלו כוללות יצירת גושי מים עמוקים ומי ביניים על-ידי ערבוב אנכי והתפשטותם במרחב, זרמי סילון שמתפתלים ומייצרים מערבלים, סביבונים תת-אגניים ומערבלים. אחד מגושי המים החשובים ביותר הוא מי ביניים לבנטיניים מפני שהוא מהווה הרוב ממי ים התיכון המלוחים שיוצאים לאוקיינוס האטלנטי. במובן זה ניתן לראות את הסירקולציה התרמוהלינית בים התיכון כמיני-אוקיינוס. בעשורים האחרונים נמדדו עליות בטמפרטורה, במליחות ובמפלס פני הים בים התיכון כולו. באגן המזרחי העליות היו גדולות יותר מהממוצע הכלל ים תיכוני ומהממוצע הגלובלי. בעשורים הבאים מגמות אלו צפויות להמשיך בתגובה להתחממות והתייבשות באקלים האזורי.

מבוא

הים התיכון הינו האב-טיפוס של ים סגור למחצה שמחובר לאוקיינוס האטלנטי דרך מצר גיברלטר עם מפתן רדוד יחסית בעומק של כ-300 מ'. אורכו של הים הינו כ-4000 ק"מ ממצר גיבלטר ועד חופי ישראל, לבנון, וסוריה ורוחבו מדרום לצפון כ-1000 ק"מ. העומק הממוצע של הים הינו כ-1500 מ' עם עומק מרבי של יותר מ-5200 מ' באזור האיים כריתים ורודוס. מבחינה גיאוגרפית הים מחולק לאגן המערבי ולאגן המזרחי שמחוברים דרך מצר סיציליה. שטחו של הים התיכון הינו כ-2.5 מיליון קילומטרים מרובעים כאשר האגן המזרחי מהווה כשני שליש משטח זה והאגן המערבי כשליש. מפה של הים התיכון עם עומק קרקעית הים ושמות התת-אגנים מוצגת באיור 1.



איור 1. מפת הים התיכון עם עומק קרקעית הים (מ').

בממוצע השנתי הפסד מים דרך האידוי מפני הים גובר על כניסתם דרך משקעים ושפך נחלים לים ולכן הים התיכון מוגדר כאגן ריכוז שבו נוצרים מים מלוחים יחסית. מאזני המסה (מים) והמלח של אגן ריכוז נקבעים בעיקר על-ידי תחלופת המים במצר – כניסה של מים פחות מלוחים מהאוקיינוס האטלנטי בשכבה העליונה (150-0 מ') ויציאה של מים ים תיכוניים היותר מלוחים בשכבת הביניים (300-150 מ') יחד עם רכיב מאוד קטן של הפסד מים (יציאה) דרך האידוי הנטו בפני הים. קצב תחלופת המים במצר גיברלטר נע בסביבות 0.86 מיליון מטר מעוקב מים בשנייה בכל כיוון[1] עם הפרש קטן של אחוזים בודדים לטובת המים שנכנסים. ההפרש הקטן הזה מפוצה על-ידי הפסד המים מפני השטח שהוא כ-0.70-0.65 מ' בממוצע שנתי[2]. בדרכם מזרחה המים האטלנטיים הופכים להיות מלוחים יותר כתוצאה מאידוי בפני הים, אך עדיין ניתן להבחין באות (בסיגנל) שלהם בקצה המזרחי של האגן הלבנטיני[3]. המים המלוחים יחסית באגן המזרחי שוקעים לעומק הביניים (300-150 מ'), זורמים חזרה לכיוון מערב ויוצאים דרך מצר גיברלטר לאוקיינוס האטלנטי. המים האלה צפופים יותר ממי האוקיינוס האטלנטי באותו עומק ולכן ביציאתם דרך המצר הם שוקעים עד לעומק של כ-1000 מ' באוקיינוס ושם הם מתפזרים, בעיקר מערבה, כ"עדשות" גדולות (בקוטר של עשרות קילומטרים) של מים מלוחים המכונים meddies (בערבלים ים תיכוניים). ניתן להבחין באות של המים המלוחים האלה אפילו במרחקים של כמה אלפי קילומטרים ממצר גיברלטר.

בנוסף לתא הזרימה התרמוהליני הכלל אגני הנ"ל, משטר הזרימה מאופיין על-ידי גושי מים שונים (מסות של מים

שמאופיינות בשילובים ספציפיים של טמפרטורה ומליחות הקשורים לאזורי יצירתן) ומורכב מתופעות זרימה רבות המתרחשות במגוון רחב של קני-מידה הן במרחב והן בזמן. תופעות אלו כוללות יצירת גושי מים עמוקים ומי ביניים על-ידי ערבוב אנכי בחורף, זרמי סילון שמתפתלים (meandering jets), סביבונים תת-אגניים (sub-basin gyres) ומערבלים (eddies) בסקלות המזוסקייל (קוטר מכמה עשרות ק"מ ועד כ-150-100 ק"מ) והסוב-מזוסקייל. כל אלה מהווים "מזג האוויר" והאקלים הפנימי של הים.

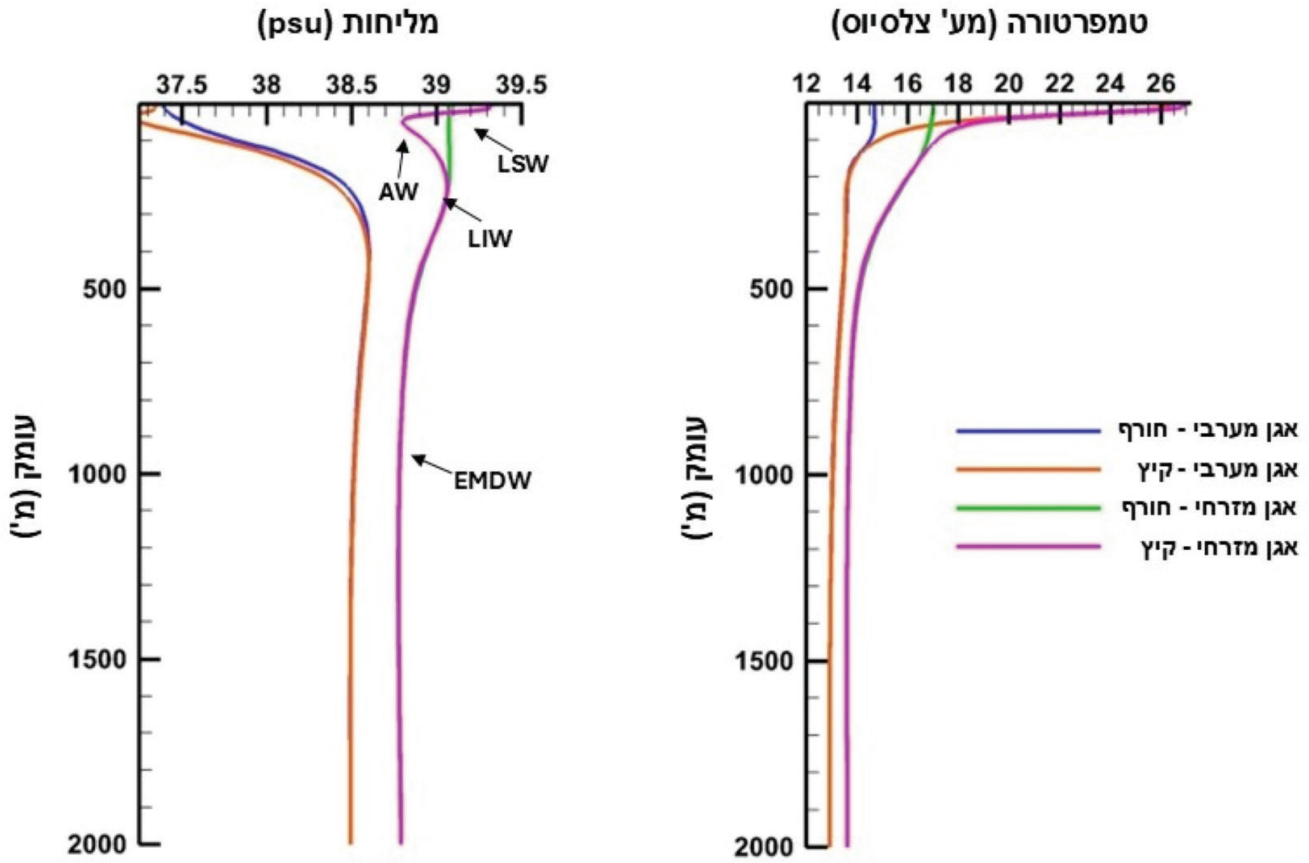
משטר הזרימה בעבר ובהווה

משטר הזרימה במזרח הים התיכון מעוצב ונקבע על-ידי שילוב מסובך של אילוצים אטמוספריים כולל מאמץ הרוח (wind stress), קרינת השמש, קרינה אינפרה-אדומה מפני השטח, שטף חום, ההפרש בין האידוי והמשקעים, ספיקות מנהרות ונחלים, וכמובן תחלופת המים דרך המצרים שמחברים את האגן עם הים השחור, הים האדריאטי והאגן המערבי של הים התיכון. הצורה הגיאומטרית של האגן וכן עומק ושיפוע קרקעית הים משפיעים גם הם. המשתנים הפיזיקליים הבסיסיים שמאפיינים את משטר הזרימה הינם טמפרטורה, מליחות, זרמים וגובה מפלס פני הים. בפסקה זו אנו נציג את משטר הזרימה המוכר לנו במשך 100-50 השנים האחרונות על בסיס שילוב של תצפיות אוקיינוגרפיות מודרניות ותוצאות ממודלים הידרודינמיים ספרתיים. בכל זאת חשוב לציין שמהעבר הרחוק, קיימות עדויות בעקיפין שלפני כ-6,000 ועד 13,000 שנים הים התיכון היה אגן דילול ולכן התא הכלל ים תיכוני התהפך. במצב הקדום נוצרו גושי מים פחות מלוחים בתוך האגן והם זרמו החוצה לאוקיינוס האטלנטי בשכבה העליונה[4]. הערבוב האנכי היה רדוד יחסית, בשכבות העמוקות היה מחסור בחמצן, וככה נוצרו שכבות של בוץ עשיר בחומר אורגני הנקראות ספרופלים.

טמפרטורה ומליחות

העקומות הטיפוסיות של השתנות הטמפרטורה עם העומק (פרופילים) בים הפתוח לחודשי פברואר ואוגוסט באגן המזרחי (ובאגן המערבי, להשוואה) של הים התיכון[5] מוצגות בפאנל הימני באיור 2. ככלל, האגן המזרחי חם יותר מהאגן המערבי מפני שהאגן המערבי ממוקם בקווי רוחב צפוניים יותר ולכן מגיעה אליו קרינת שמש בהספק נמוך יותר. באגן המערבי טמפרטורת פני הים נעה בין 14°C בחורף ועד C26° בקיץ. באגן המזרחי משרעת טמפרטורת פני הים הינה כ-17°C עד 27°C אך בשנים האחרונות גילו מגמת התחממות וטמפרטורה בקיץ שמתקרבת ל-28°C ואפילו גבוהה יותר בקרבת החוף[6]. כמו כן, בקרבת החוף טמפרטורת פני הים בחורף נמוכה יותר ב-2°C-1 מזו שבים הפתוח. מפני הים ועד כ-200 מ' עומק חלה ירידה תלולה בטמפרטורה בקיץ בשכבה המכונה תרמוקלינה. ההתקררות ואידוי מפני הים בחורף מעלים את צפיפות המים העליונים ומזה נוצרת אי יציבות גרביטציונית שגורמת לערבוב אנכי והתקררות של השכבה העליונה של עמודת המים. לכן מפל הטמפרטורה בתרמוקלינה מתון יותר יחסית לקיץ וקל יותר לערבב את עמודת המים. החל מעומק של כ-300-200 מ' כמעט לא מבחינים בהבדלים בין העונות. הטמפרטורה בשכבה זו הינה כ-14.5°C ו-15.5°C באגן המערבי ובאגן המזרחי, בהתאמה. מ-300 מ' ועד כ-1000 מ' נפילת הטמפרטורה מתונה יותר ומ-1000 מ' והלאה היא כמעט אחידה ב-12.9°C באגן המערבי ו-13.6°C באגן המזרחי. הטמפרטורה של גושי

המים העמוקים נקבעה לפי אזורי יצירת גושי המים (המקום שבו היו במגע עם האטמוספרה) שהם מפרץ ליאון ליד חוף צרפת באגן המערבי וצפון הים האדריאטי באגן המזרחי.



איור 2. השתנות של הטמפרטורה (פאנל ימני) ומליחות (פאנל שמאלי) עם העומק באגן המערבי ובאגן המזרחי של הים התיכון עם סימון גושי המים באגן המזרחי (בעקומות המליחות) – מי שטח לבנטיניים (LSW), מים אטלנטיים (AW), מי ביניים לבנטיניים (LIW) ומי עומק של מזרח הים התיכון (EMDW).

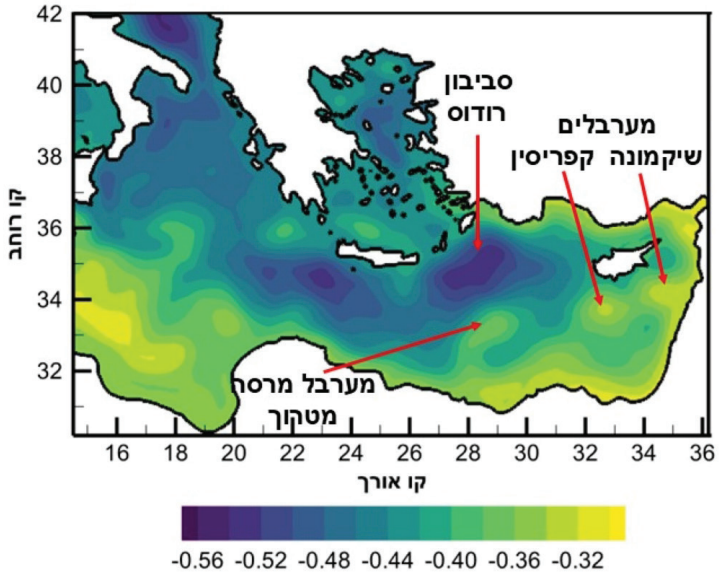
העקומות הטיפוסיות של השתנות המליחות עם העומק בים הפתוח לחודשי פברואר ואוגוסט באגן המערבי ובאגן המזרחי של הים התיכון[5] מוצגות בפאנל השמאלי באיור 2. צורת עקומות המליחות מסובכת יותר מאלו של הטמפרטו־רה וקשורה להופעתם של גושי מים שמאופיינים בעיקר על-ידי המליחות שלהם. באופן כללי האגן המזרחי מלוח יותר

מהאגן המערבי כתוצאה מהפסד מים (ההפרש בין אידוי ומשקעים) חזק יותר מפני השטח לעומת באגן המערבי. כמו כן ההבדלים במליחות בפני הים בין העונות גדולים יותר באגן המזרחי. באגן המערבי המליחות הנמוכה יחסית בפני הים נעה בסביבותpsu 37.4 ומשקפת את הזרימה של המים האטלנטיים שנכנסו דרך מצר גיברלטר. בעומק 380 מ' מופיע מקסימום של 38.6 psu שקשור למי ביניים לבנטיניים (Levantine Intermediate Water, LIW) שמגיעים מהאגן המזרחי. במים העמוקים (מתחת ל-1000 מ') המליחות כמעט אחידה ב-38.5 psu. באגן המזרחי קיים מחזור עונתי בולט יותר. המליחות הגבוהה ביותר בפני הים מופיעה בקיץ כתוצאה מאידוי וחימום של פני הים. גוש מים זה נקרא מי שטח לבנטיניים (Levantine Surface Water, LSW) עם מליחות של יותר מ-39.3 psu. מינימום המלי־חות בעומק של כ-70 מ' מייצג את האות של המים האטלנטיים (Atlantic Water, AW) הפחות מלוחים עם מליחות של 38.8 psu או פחות. ההסעה של המים האטלנטיים קשורה קשר הדוק עם משטר הזרימה בכלל ובמסלולם של זרם סילון המרכז אגני (Mid-Mediterranean Jet) ומערבלים אנטיציקלוניים[3]. באופן עקרוני המים האלו אמורים להופיע גם בפני השטח, אבל שכבת מי שטח הלבנטיניים מכסה את המים האטלנטיים מפני שהם חמים יותר ולכן קלים יותר מהמים האטלנטיים. בעומק של כ-230 מ' מופיע מקסימום מליחות של כ-39 psu שמייצג מי ביניים לבנטיניים (LIW) שהוא גוש המים שנוצר בעיקר בקטע הצפוני-מרכזי של האגן הלבנטיני (האגן המזרחי ביותר של הים התיכון) כתוצאה מהתקררות חורפית של פני השטח והערבוב האנכי של עמודת המים. גוש מים זה מהווה המרכיב העיקרי של מי הים התיכון שיוצאים דרך מצר גיברלטר לאוקיינוס האטלנטי. בחורף, כתוצאה מערבוב בשכבות העליונות האותות של מי השטח ומים האטלנטיים נעלמים ונוצרת שכבה עם מליחות כמעט אחידה של כ-39 psu מפני הים ועד לעומק של מי הביניים. במים העמוקים המליחות כמעט אחידה בסביבות 38.75 psu ומשקפת את גוש מי עומק של מזרח ים התיכון (Eastern Mediterranean Deep Water, EMDW), שמקורו העיקרי הוא ים האדריאטי. ניתן למצוא תיאור מפורט של תהליכים אלו ותכונות גושי המים במאמרם של Hecht et al.[7]. חשוב לציין שמדי פעם הים האגאי הופך להיות המקור העיקרי למים העמוקים במשך תקופה של כחמש שנים, כפי שקרה בתחילת שנות התשעים[8]. היפוך זה נגרם על-ידי שילוב של גורמים הקשורים, בין היתר, לתנודות אקלימיות באזור וככל הנראה המלחה של המים הע־ליונים באגן הלבנטיני כתוצאה מחסימת זרימת מים מתוקים מהנילוס.

מערכת הזרמים

בתחילת המאה העשרים ממחקריו של Nielsen[9] התקבלה התמונה הראשונה של מערכת הזרמים בים התיכון. תמונה זו תיארה שילוב של תא הזרימה הכלל ים תיכוני עם זרם כללי מתון שסובב את כל האגן בקרבת החוף נגד כיוון השעון (ציקלוני). תמונה זו הייתה התיאור המקובל במשך כשבעים שנים. בארבעת העשורים האחרונים בוצעו מספר מחקרים אינטנסיביים במטרה להבין בפירוט את התהליכים הבסיסיים שמעצבים את מערכת הזרימה במזרח הים התיכון[3,7,10]. בניגוד לתמונה המסורתית, מחקרים אלו גילו מגוון רחב של תופעות זרימה כולל זרמי סילון שמתפתלים ומייצרים מערבלים, סביבונים תת-אגניים ומערבלים שמתרחשים ומשתנים בקני-מידה שונים הן בזמן והן במרחב. תופעות אלו מתבטאות דרך אותות של השתנות אופקית ובזמן בטמפרטורה ומליחות (צפיפות), בגובה מפלס פני הים ובזרמים,

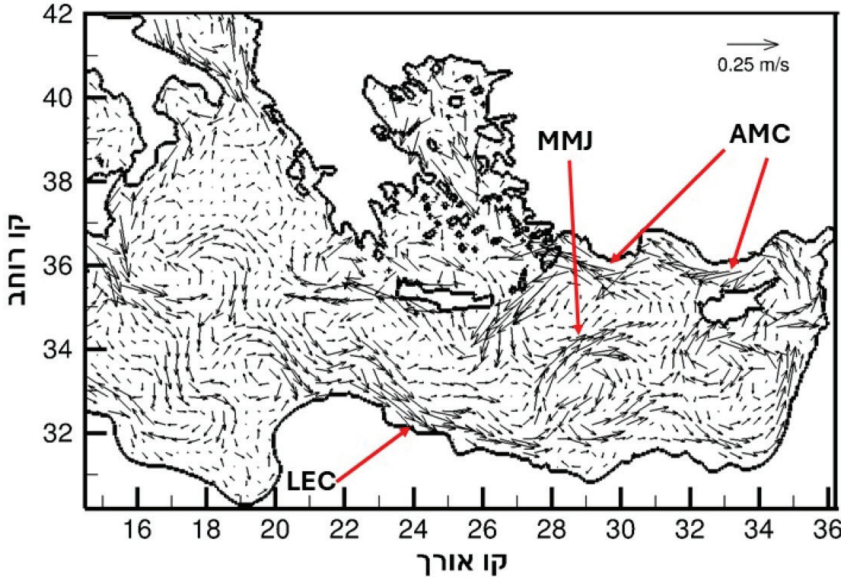
כולם בקני-מידה בזמן שארוכים יותר מזמן המחזור התת-יממתי כמו גאות ושפל החצי-יממתי (12.42שעות) או המחזור האינרציאלי (כ-20.5 שעות). כמו כן כאן איננו מתייחסים לשינויים מחזוריים של גובה מפלס פני הים בגלל גלים בפני השטח עם זמני מחזור (שניות עד עשרות שניות) ואורכי גל (עשרות עד מאות מטרים) קצרים יחסית.
דוגמה למערכת הזרימה, באיורים 3 ו-4 מוצגות מפות אופקיות של גובה מפלס פני הים (איור 3) והזרמים בעומק 10 מ' (איור 4) ממוצעים במשך חמש השנים 2016-2020. מפות אלו מתבססות על מאגר נתוני רה-אנליזה לים התיכון CMEMS [5] שפותחה במקור במסגרת מערכת חיזוי אוקיינוגרפי ים תיכוני.



איור 3. גובה מפלס פני הים הממוצע (במטרים) לתקופה 2016-2020[5]

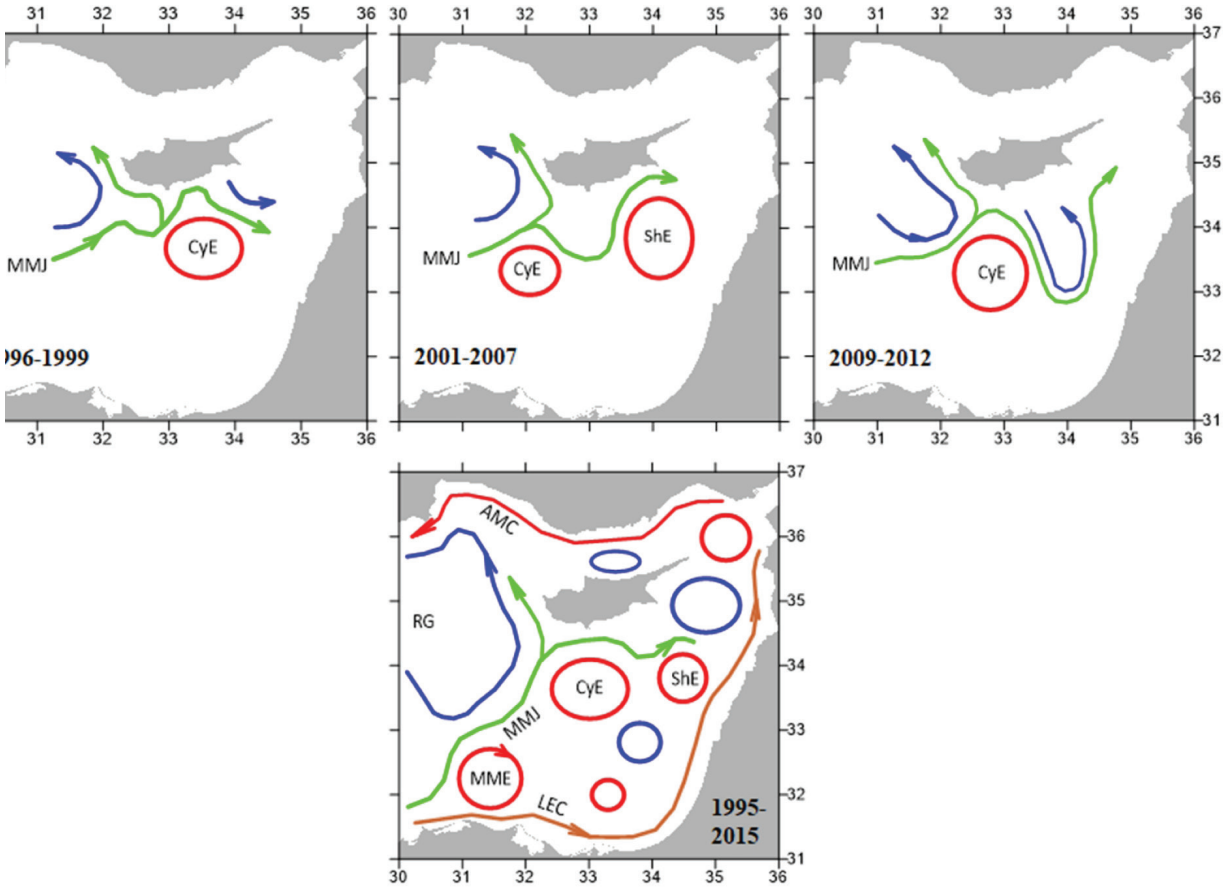
בדומה לרמות ושקעים באטמוספרה שמייצגים את משטר הרוחות במערכות מזג האוויר, ככה הפרשים בגובה מפלס פני הים מייצגים מערכות זרימה בים. אזורים עם מפלס גבוה יחסית מקבילים לרמות באטמוספרה ולכן כיוון הזרימה יהיה עם כיוון השעון (אנטיציקלוני) ובאזורים עם מפלס נמוך יחסית כיוון הזרימה יהיה נגד כיוון השעון (ציקלוני). חשוב לציין שמדובר בהפרשי גובה של עשרות סנטימטרים בלבד. באיור 3 ישנן מספר תופעות באגן הלבנטיני שבולטות בעוצמתן כולל סביבון רודוס הציקלוני (האליפסה הכחולה מזרחה לאיים רודוס וכרתים)[5,10], מערבל מרסה מטרוך האנטיציקלוני (האליפסה הירוקה דרומה לסביבון רודוס) וצמד המערבלים האנטיציקלוניים (שני עיגולים ירוקים-צהובים דרומה לקפריסין) – מערבל קפריסין (המערבי יותר) ומערבל שקמונה (המזרחי יותר)[3]. במשך שניים-שלושה העשורים האחרונים נצפו היפוכים בין זרימה ציקלונית לזרימה אנטיציקלונית בים היוני עם זמן מחזור של כ-10 שנים[11]. להיפוכים אלו יש השלכות חשובות בדפוסי ההסעה והפיזור של מים אטלנטיים (AW) ומים עמוקים (מהים

האדריאטי) ברחבי מזרח הים התיכון בכלל ובאגן הלבנטיני בפרט. מרכז סביבון רודוס ידוע כמקור עיקרי של גוש מי ביניים הלבנטיניים[10]. ניתן להבחין בכיווני הזרמים מסביב למערכות אלו (ציקלוני ואנטיציקלוני) במפת הזרמים הממוצעים בעומק 10 מ' המוצגת באיור 4.



איור 4. זרמים הממוצעים בעומק 10 מ' לתקופה 2016-2020[5] עם סימון זרמי סילון העיקריים[3] – ענפי זרם הגבול: Libyo-Egyptian LEC Current ו-Asia Minor Current-AMC וזרם המרכז אגני Mid-Mediterranean Jet-MMJ.

לאורך חופי לוב, מצרים, ישראל, לבנון וסוריה ישנה רצועה של מפלס ים גבוה יחסית שקשור לזרם הסילון שזורם במקביל לחוף בקצה מדף היבשת (זרם הגבול)[10,12]. הזרם חובק את החוף וזורם מזרחה החל מאזור לוב ומצרים (Libyo-Egyptian Current, LEC), פונה צפונה לאורך הקצה המזרחי של האגן וממשיך לזרום לכיוון מערב לאורך חוף טורקיה (Asia Minor Current, AMC). כאשר זרם הסילון AMC מתקרב לאזור רודוס הוא מתפצל לשני ענפים – הענף העיקרי שממשיך דרומה לכרתים לכיוון הים היוני והענף המשני שנכנס לים האגאי. מהירות הזרם הטיפוסית הינה כ-30-25 ס"מ לשנייה.

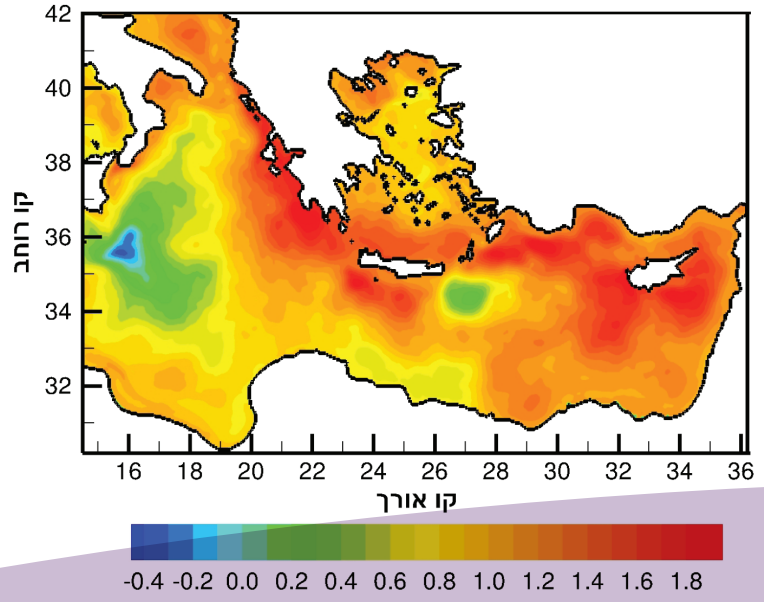


איור 5. סיכום סכמתי של מערכות הזרימה התת-אגניות ומערבלים גדולים לתקופה 1995-2015 עם חלוקה לפי תת-תקופות בשלושת הפאנלים העליונים וממוצע האגני לכל התקופה בפאנל התחתון, אחרי Zodiatis et al.[3] מערכות ציקלוניות בכחול (סביבון רודוס, RG) ואנטיציקלוניות באדום (מערבל קפריסין, CyE; מערבל שקמונה, ShE; מערבל מרסה מטרוך, MME). ענפים של זרם הגבול לאורך כל חוף האגן הלבנטיני (LEC ו-AMC) בחום-אדום וזרם סילון המרכז אגני (MMJ) בירוק.

כמובן קיימת השתנות עונתית ובין-שנתית במערכות הזרימה האלו. ישנן תופעות עמידות שמופיעות הן בקיץ והן בחורף, ואפילו לאורך שנים, כמו סביבון רודוס הציקלוני ושני המערבלים האנטיציקלוניים הגדולים דרומה לקפריסין[3]. סיכום סכמתי של המערכות הבולטות והשתנותן בזמן במשך שני העשורים 1995-2015 מוצג באיור 5. בפאנלים העליונים מוצגות שלוש תת-תקופות כאשר כל אחת מייצגת מערכת זרימה שמאופיינת על-ידי קונפיגורציות שונות של צמד המערבלים האנטיציקלוניים דרומה לקפריסין על בסיס נתוני שדה[3]. מערבל קפריסין מופיע בכל שלוש תת-התקופות עם תנודה במיקומו על הציר מזרח-מערב. הוא ממוקם הכי מערבה כאשר מערבל שקמונה מופיע. הפאנל התחתון מציג את משטר הזרימה הממוצע בכל האגן הלבנטיני במשך כל עשרים השנים על בסיס שילוב של נתוני שדה[3] ונתוני רה-אנליזה[5].

מגמות בעשורים האחרונים

בנוסף למשטר הזרימה שמתואר לעיל, חשוב גם להבין את השינויים שהתרחשו בעשורים האחרונים. משטר הזרימה מושפע הן משינויים אקלימיים והן מהתערבות של האדם. כאשר מדובר בשינויים אקלימיים אנו נוטים לחשוב במונחים של מגמות ליניאריות לטווח ארוך, אבל ישנם שינויים שמתרחשים במגוון רחב של קני-מידה בזמן. למשל, בחינה של הטמפרטורה והמליחות הממוצעות של הים התיכון כולו בחצי השני של המאה העשרים מגלה תנודות כמעט מחזוריות של עליות וירידות עם זמן מחזור של כעשרים שנים. יחד עם זאת מדי פעם בפעם מתרחשים אירועים פתאומיים כמו החלפת מקור גוש מי עומק באגן המזרחי (EMDW) מהים האדריאטי לים האגאי בחצי הראשון של עשור שנות התשעים המכונה ה-Eastern Mediterranean Transient[8]. לעומת זאת, חוקרים גילו מגמות של עלייה הדרגתית גם בטמפרטורה וגם במליחות של השכבות העליונות. בין השנים 1982-2018 קצב העלייה בטמפרטורת פני הים היה 0.041°C±0.006 לשנה לים התיכון כולו ו-0.048±0.006°C מע' צלסיוס לשנה באגן הלבנטיני ובים האגאי[13]. בין השנים 1993-2019 קצב העלייה במליחות בשכבה 0-300 מ' היה 0.0056 psu לשנה לים התיכון כולו ו-0.0061 psu לשנה במזרח הים התיכון[14]. הפרישה המרחבית של השינויים בטמפרטורה בעומק 10 מ' בין השנים 1991 ו-2020 מוצגת באיור 6[5]. בכל האגן הטמפרטורה עלתה חוץ מאזור קטן בקצה המערבי של הים היוני. ברוב האגן הלבנטיני הטמפרטורה עלתה ב-1 מע' צלסיוס או יותר. בשנים 2011-2021 מול חופי הארץ בקצה מזח הפחם בחדרה נמדדו עליות של 0.048°C לשנה ו-0.006 psu לשנה בטמפרטורה ובמליחות, בהתאמה[15]. מגמות אלו תואמות לערכים שדווחו לכלל מזרח הים התיכון[14].



איור 6. הפרישה המרחבית של השינויים בטמפרטורה בעומק 10 מ' בין השנים 1991 ו-2020[5].

ישנם גם שינויים ומגמות שנובעים מהשפעתה הישירה של פעילות האדם. הדוגמה הבולטת ביותר לתהליך זה בים התיכון הינה ההטיה והחסימה של נהרות על-ידי סכרים. בשנת 1964 באגן המזרחי ספיקת הנילוס הוקטנה לפחות מעשרה אחוז של הספיקה לפני הקמת סכר אסואן ובאגן המערבי ספיקת נהר האיברו הוקטנה בשני שליש. על פניו חסימות אלו אמורות לגרום לעלייה במליחות, אבל ייתכן שמגמות אלו מוסתרות על-ידי מגמות הנובעות משינויים אקלימיים.

בנוסף, ככל שמערכת האקלים מתחממת צפויה עלייה הדרגתית בגובה מפלס פני הים הגלובלי כתוצאה מתוספת מים לאוקיינוסים על-ידי הפשרת קרחונים וכתוצאה מהתרחבות נפח המים כאשר הטמפרטורה עולה. כמובן עלייה זו תורגש גם בים התיכון. על בסיס מדידות מלוויינים בין השנים 1993-2015 נמדדה עלייה כללית במפלס פני הים בקצב של 2.6 מ"מ לשנה לים התיכון כולו[16] ויותר מ-4 מ"מ לשנה בחצי הדרומי של האגן הלבנטיני בהשוואה לקצב עולמי של 3.3 מ"מ לשנה במשך אותה תקופה[17]. בתחנת מדידת מפלס פני הים בקצה מזח הפחם בחדרה[18] המפלס עלה בקצב ממוצע של 5.8 מ"מ לשנה במשך השנים 1992-2009 שתואם לנתוני הלוויינים.

משטר הזרימה בעתיד

כדי לנבא את השינויים הפוטנציאליים שעלולים להתרחש במשטר הזרימה העתידי, אין ברירה אלא להתבסס על התוצאות של מודלים ספרתיים שמנבאים את השינויים שצפויים להתרחש במערכת האקלים במשך המאה ה-21. לפי דוח ההערכה השישי של הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים, ה-IPCC, באזור הים התיכון צפויות עלייה בטמפרטורת האוויר וירידה במשקעים[19]. ללא ספק שינויים אלה ישפיעו על משטר הזרימה וסביר להניח שיובילו להמשך במגמות התחממות וההמלחה של מי הים התיכון שנצפו בעשורים האחרונים. מתוך מחקר השוואתי בין יותר מעשרים מודלים אקלימיים, עד סוף המאה ה-21 צפויה עלייה בטמפרטורת השכבה העליונה (150-0 מ') שתנוע בין 1.25-2.41°C לים התיכון כולו ובין 1.32-2.53°C באגן המזרחי, תלוי בתרחיש התחממות האקלימי הספציפי שהורץ במודלים[20]. בשכבת הביניים (600-150 מ') צפויה עלייה של 1.41-2.19°C באגן המזרחי. גם המליחות בשכבה העליונה צפויה לעלות ב-0.1 psu בים התיכון כולו וב-0.08-0.30 psu באגן המזרחי. בשכבת הביניים צפויה המלחה חזקה יותר של 0.14-0.32 psu באגן המזרחי. לשינויים אלה יש השלכות לגבי תכונות גושי המים שייווצרו בעתיד כאשר הם יהיו חמים ומלוחים יותר מגושי המים שנוצרו בעבר[3] ובהמשך ייתכן שישפיעו על משטר הזרימה בשכבת הביניים בצפון האוקיינוס האטלנטי כתוצאה משינויים בתכונות של גוש המים LIW.

לגבי עלייה במפלס פני הים לפי מחקרים שמסוכמים בדוח ה-IPCC[19] צפוי המשך במגמת העלייה לטווח ארוך (במשך העשורים הבאים) במפלס פני הים התיכון בכלל ובפרט באגן הלבנטיני שבו צפויה עלייה נוספת של 0.4-0.7 מ' שהיא דומה לעלייה הגלובלית הצפויה[21,22] של 0.45-0.88 מ' עד סוף המאה ה-21. העלייה הצפויה תלויה בתרחיש ההתחממות הספציפי שהורץ במודלים. יש לציין שקיימת אי ודאות מדעית ברמות שונות בתוצאות המודלים לתרחישי התחממות שונים ובמיוחד ביטחון נמוך בתרחישי הקיצון. לעומת זאת על בסיס מגמת העלייה שנמדדה בתחנת המדידה בחדרה רוזן[18] יש להעריך שייתכן שקצב העלייה יהיה תלול יותר ומפלס הים לאורך חופי הארץ יעלה מטר אחד עד שנת 2100. בכל מקרה עלייה כזו, אפילו בטווח המתון יותר, עלולה לגרום להצפה של שטחים נרחבים לאורך רצועת החוף עם כל הנזק המשתמע מכך.

רשימת מקורות

1. García Lafuente, J. et al. Hotter and weaker Mediterranean outflow as a response to basin-wide alternations. *Front. Mar. Sci.* , **8**, 61344, doi: 10.3389/fmars.2021. 613444 (2021).
2. Pettenuzzo, D., Large, W.G. & Pinardi, N., On the corrections of ERA-40 surface flux products consistent with the Mediterranean heat and water budgets and the connection between basin surface total heat flux and NAO. *J. Geophys. Res.***115**, C06022, doi: 10.1029/2009JC005631 (2010).
3. Zodiatis, G. et al. Twenty years of in-situ monitoring in the south-eastern Mediterranean Levantine basin: Basic elements of the thermohaline structure and of the mesoscale circulation during 1995-2015. *Front. Mar. Sci.* **9**, 1074504, doi: 10.3389/fmars.2022.1074504 (2023).
4. Rohling, E.J. Review and new aspects concerning the formation of eastern Mediterranean sapropels. *Mar. Geol.* **22**, 1-28 (1994).
5. Clementi, E. et al. Mediterranean Sea physical analysis and forecast (CMEMS MED-Currents, EAS6 system) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS), doi: 10.25423/CMCC/MEDSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_006_013_EAS6 (2021).
6. Ozer, T., Gertman, I., Kress, N. & Silverman, J., Interannual thermohaline (1979-2014) and nutrient (2002-2014) dynamics in the Levantine surface and intermediate water masses, SE Mediterranean Sea. *Glob. Planet. Change.* **151**, 60-67 (2017).
7. Hecht, A., Pinardi, N. & Robinson, A.R. Currents, water masses, eddies, and jets in the Mediterranean Levantine Basin. *J. Phys. Ocean.* **18**, 1320-1353 (1988).
8. Roether, W., Klein, B., Manca, B.B., Theocharis, A. & Kioroglou, S., Transient Eastern Mediterranean deep waters in response to the massive dense-water output of the Aegean Sea in the1900's. *Progr. Ocean.* **74**, 540-571 (2007).
9. Nielsen, J.N. Hydrography of the Mediterranean and adjacent seas. Danish Oceanographic Expeditions 1908-10, Report I, pp. 72-191 (1912).
10. POEM Group, General circulation of the Eastern Mediterranean. *Earth Sci. Rev.* **32**, 285-309 (1992).
11. Gacic, M., Eusebi Borzelli, G.L., Civitarese, C., Cardin,V. & Yari, S., Can internal processes sustain reversals of the upper ocean circulation? The Ionian Sea example. *Geophys. Res. Lett.* **37**, L09608, doi: 10.1029.2010GL043216 (2010).
12. Rosentraub, Z. and Brenner, S., Circulation over the southeastern continental shelf and slope of the Mediterranean Sea: Direct current measurements, winds, and numerical model simulations. *J. Geophys. Res.* **112**, C11001, doi:10.1029/2006JC003775, 21 pp. (2007).
13. Pisano A. et al. New evidence of Mediterranean climate change and variability from sea surface temperature. *Remote Sens.* **12**, 132. doi: 10.3390/rs12010132. (2020).

14. Aydogdu, A., Miraglio, P., Escudier, R., Clementi, E. & Masina, S., The dynamical role of upper layer salinity in the Mediterranean Sea. State of the Planet, 1-osr7,6, 9 pp. doi: 10.5194/sp-1-osr7-6-2023 (2023).
15. Ozer, T., I. Gertman, I., Gildor, H. & Herut, B. Thermohaline temporal variability of the SE Mediterranean Coastal waters (Israel) – long term trends, seasonality, and connectivity. *Front. Mar. Sci.* **8**, 799457. doi:10.3389/fmars.2021.799457 (2022).
16. Marcos, Marta, et al. "Sub-Chapter 2.2.1. Sea level rise and its impacts on the Mediterranean". The Mediterranean region under climate change, edited by Jean-Paul Moatti and Stéphane Thiébault, IRD Éditions, https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.23454 (2016).
17. Willis, J.K., Hamlington, B.D. & Fournier, S. Global mean sea level time series, trajectory and extrapolation. Dataset access [2025-02-15] at 10.5281/zenodo.7702314 (2023).
18. Rosen, S.D., Assessing present and future Mediterranean sea level rise impact on Israel's coast and mitigation against beach and cliff erosion. Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering, Shanghai, 12 pp. (2010).
19. Ali, E., Cramer, W., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Hilmi, N.J.M., Le Cozannet,, G. & Lionello, P. Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean region. In: Climate change impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner,D.C. et al., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2233–2272, doi:10.1017/9781009325844.021 (2022).
20. Soto-Navarro, J. et al. Evolution of Mediterranean sea water properties under climate change scenarios in the Med-CORDEX ensemble. *Clim. Dyn.* **54**, 2135-2165, doi:10.1007/s00382-019-05105-4 (2020).
21. Fox-Kemper, B., et al, Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. et al (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362, doi:10.1017/9781009157896.011 (2021).
22. Garner, G. G., et al. IPCC AR6 Sea Level Projections. Version 20210809. Dataset accessed [2025-02-27] at https://doi.org/10.5281/zenodo.5914709 (2021).

11 זרם הגבול וספקטרום המערבלים במזרח הים התיכון

אביב סולודוך[1], רועי ברקן-חזי גילדור[1]

[1] המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים
[2] המחלקה לגיאופיזיקה, אוניברסיטת תל אביב

aviv.solodoch@mail.huji.ac.il,
rbarkan@tauex.tau.ac.il,
hezi.gildor@mail.huji.ac.il

תקציר

הזרימה במזרח הים התיכון מורכבת מספקטרום של מערבלים וזרמים בסקאלות (קני-מידה) שונות אך עד לאחרונה תשומת הלב הייתה בעיקר על סקאלות מערבלי מזוסקייל (mesoscale; שגודלם ~30 ק"מ ומעלה), סקאלה שבה יש בקירוב מאזן גיאוסטרופי, כלומר מאזן בין כוח קוריוליס ובין גראדיינט (מפל) הלחץ. בפרק זה אנו מכמתים את ספקטרום המערבלים בסקאלות השונות, כולל בסקאלה הקטנה יותר (הסב-מזוסקייל; submesoscale), ואת האינטראקציות בין מערבלים ועם זרם הגבול. מערבלי סב-מזוסקייל פעילים בעיקר בחורף אך יכולים להיווצר בזרם הגבול גם בקיץ, ומסוגלים להיפרד מזרם הגבול ובכך להסיע חומרים צפים או מומסים כגון מזהמים ונוטריינטים בין מדף היבשת והים העמוק.

מבוא לסירקולציה במזרח הים התיכון ולמערבלים

הסירקולציה האופקית בפני הים במזרח הים התיכון (איור 1) מאופיינת בסביבונים תת-אגניים כגון סביבון רודוס; בזרם גבול ציקלוני (נגד כיוון השעון) סמוך למדף היבשת (בקצרה זרם הגבול); במערבלים המופיעים בעקביות במיקומים גיאוגרפיים מסוימים כגון האנטיציקלון הקפריסאי; ובמערבלים טרנזיאנטיים (זמניים)[1,2,3]. סביבונים הם זרימות סגורות (באופן טיפוסי במסלולי זרימה דמויי אליפסה) בסקאלת האגן, שמופיעות דרך קבע בהשפעת משטר ודפוס הרוחות או שטפי החום באגן. מערבלים לעומת זאת הם זרימות סגורות בסקאלה קטנה מסקאלת האגן הנוצרים בשל אילוץ חיצוני כגון רוחות או אי יציבות של הזרימה הקבועה, אך בניגוד לסביבונים יכולים לאחר מכן להתקיים ביציבות ללא כוח מאלץ חיצוני. בפרק זה נתמקד בזרם הגבול ובמערבלים טרנזיאנטיים, ובקשרים ביניהם ובין דפוסי זרימה בגדלים שונים. סביבונים ומערבלים קבועים במזרח הים התיכון מתוארים בפרק של פרופ' ברנר בספר זה.

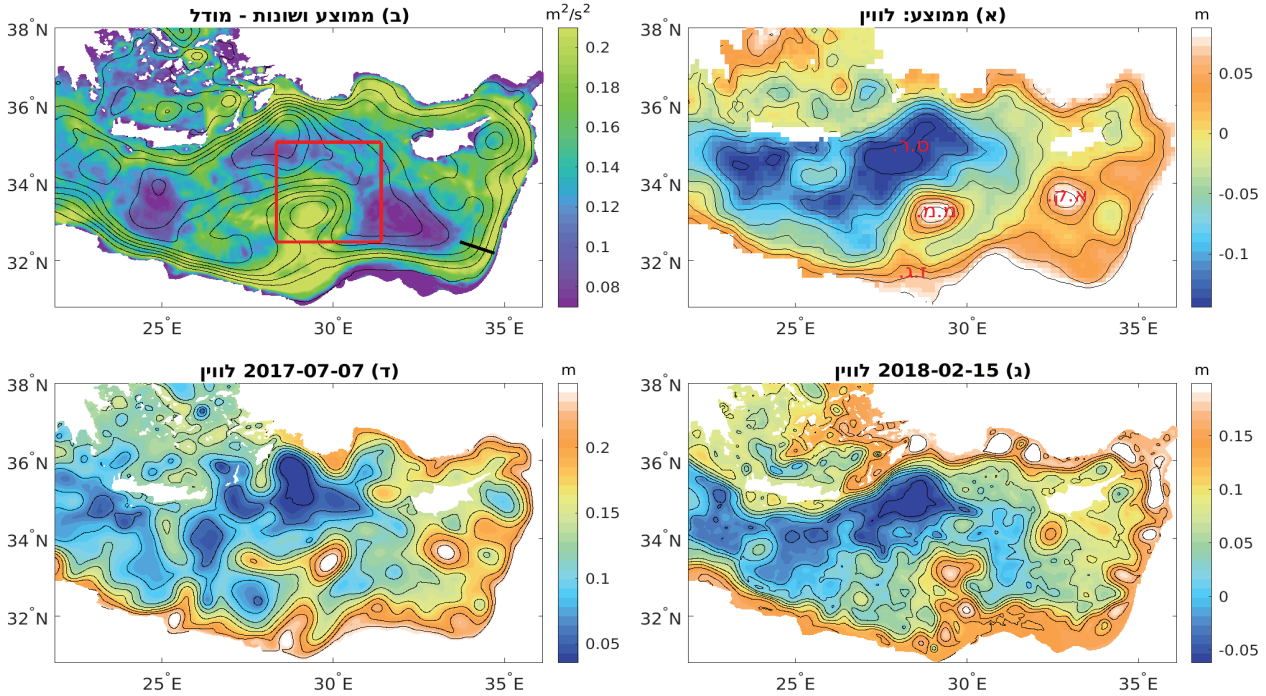
מערבלים הינם תופעה שכיחה בים (ובאטמוספרה), שבה זרימה סובבת מרכז עם לחץ נמוך או גבוה. חשיבותם של מערבלים היא בין היתר בכך שהם דפוס נפוץ מאוד של שדה הזרימה, וגם ביכולתם להסיע חום וחומרים מומסים או מרחפים, כגון נוטריינטים ומזהמים, במקרים מסוימים למרחקים ארוכים של עד אלפי ק"מ. ההשלכות האקולוגיות והחברתיות של התקדמויות בהבנת המערבלים בזרימה בים הן משמעותיות. בין היתר, בעקבות אסונות שפך נפט או גז בקידוחים ימיים, זרמי המערבלים קובעים במידה רבה את המסלול והפיזור של נפט לאורך מדף היבשת או אל החופים. בנוסף, זרמי המערבלים שמסיעים חומר ממדף היבשת החוצה עשויים להעשיר את הים העמוק האוליגוטרופי במזרח הים התיכון בנוטריינטים ממדף היבשת[4].

ניתן לסווג מערבלים על-פי גודלם. במערבלים המסווגים כגודל "מזוסקייל" (באופן טיפוסי מעל כ-30 ק"מ במזרח הים התיכון), כוח קוריוליס מאזן את כוח גרדיאנט הלחץ כלומר המערבל הוא ב"מאזן גיאוסטרופי". מערבלים מסוג זה נחקרו באינטנסיביות בעולם מאז שנות ה-70 של המאה ה-20. מערבלים קטנים יותר ("סב-מזוסקייל") לא נמצאים בדיוק במאזן גיאוסטרופי. בהשוואה למזוסקייל, מערבלי סב-מזוסקייל מאופיינים במהירויות גבוהות יותר, אם כי בעומק חדירה קטן יותר (העומק מוגבל לרוב לשכבה המעורבבת היטב). המהירות האנכית כמו גם קצב ההתכנסות והגזירה של שדה הזרימה האופקי הם גדולים יותר בסדרי גודל בסב-מזוסקייל מאשר במזוסקייל. משמעות הבדלים אלה היא שבזרמים מגודל סב-מזוסקייל תהיה נטייה גדולה יותר משמעותית להצטברות חומר ובמיוחד חומר צף (בחזיתות) ולהסעה של חומרים. בנוסף, זרמים אלו משפיעים בצורה ישירה על עומק שכבת הערבוב האוקיינית, ועל ערבוב אנכי, ולכן על מעבר חום וגזים מן האטמוספרה אל הים העמוק. הסב-מזוסקייל הינו נושא מדעי חדש יותר בהשוואה למזוסקייל[5,6], והחל להיחקר במזרח הים התיכון רק לאחרונה[7] על אף שצילומים ממעבורת החלל האמריקאית הראו עדויות לכך עוד לפני עשרות שנים[8,9]. אחד הגורמים לכך הוא הקושי היחסי לבצע תצפיות ברזולוציה מתאימה, וגורם נוסף הוא הסיבוכיות הגדולה יותר של הסב-מזוסקייל לעומת המזוסקייל. כאן נדון בהתפלגות המערבלים ובאינטראקציות ביניהם במזרח הים התיכון, ובקשרים שנמצאו בין זרם הגבול לבין היווצרות מערבלים. זאת באמצעות סקירה של נתוני לוויין, צילומים ממעבורת החלל, ומודל נומרי של הזרימה בים התיכון. חישת הזרימה בים בלוויין מוגבלת בעיקר לפני השטח ולרזולוציה של עשרות ק"מ ומעלה[10] ולכן מרב האיורים המובאים הינם ממודל נומרי ברזולוציה גבוהה[7].

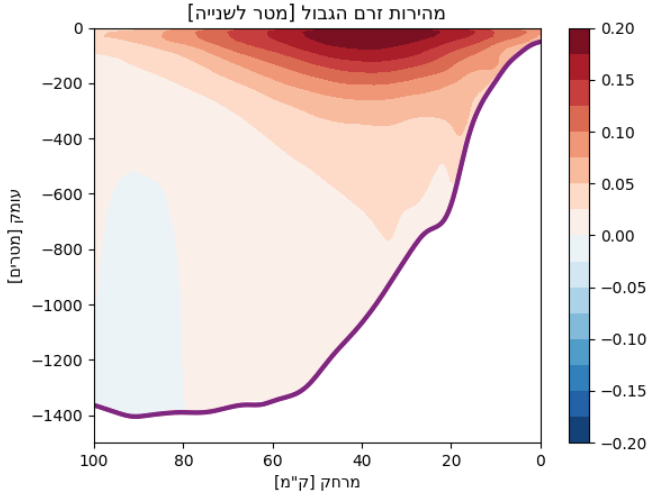
פנומנולוגיה של מערבלים בגודל מזוסקייל וזרם הגבול המזרח תיכוני

השפעת זרם הגבול על שדה הזרימה במזרח הים התיכון נראית בבירור במהירות הגבוהה (הצפיפות הגדולה יותר של קווי הזרימה) לאורך קו החוף עד למרחק של כ-100 ק"מ ממנו בשדה הזרימה הממוצעת בפני השטח (איור 1) ובעומק (איור 2). שטף הזרימה הכולל של זרם הגבול הוערך בכ-2 מיליון מטרים מעוקבים לשנייה ע"פ הסימולציה הנומרית[11]. זהו גודל משמעותי, ולצורך השוואה זהו בערך 10% משטף הזרימה הכולל של הסירקולציה התרמוהלינית המרידיונאלית באוקיינוס האטלנטי. בנוסף לשדה הזרימה הממוצע הדומיננטי בזרם הגבול, ערך השונות הזמנית של הזרימה בזרם הגבול, $0.5(<(V-<V>)^2>)$הוא בין הגבוהים במזרח הים התיכון (סוגריים <> מסמנים ממוצע זמני, ומהירות וקטורית מסומנת ב-V). השונות במהירות שווה לפעמיים האנרגיה הקינטית של הפרעות לזרימה הממוצעת, כלומר מרב האנרגיה של סטיות מהזרימה הממוצעת היא באזור זרם הגבול. המהירות הממוצעת בכיוון הזרימה הממוצע בליבת זרם הגבול היא כ-20 ס"מ (איור 2), אולם ברור מאיור 1ב שסטיית התקן בזרם הגבול גדולה פי 2 לערך מהממוצע. הפרעות אלה ניתנות לייחוס למערבלים או באופן כללי ליותר זרימה בסקאלות סב-מזוסקיל ומזוסקייל (גלים פנימיים לא נכללים מכיוון שהשונות חושבה כאן מתוך ממוצעים יומיים של הזרימה). מהירויות הזרימה של המערבלים בגודל מזוסקייל הן באופן טיפוסי 5-20 ס"מ לשנייה. בסב-מזוסקייל למערבלים יש מהירויות דומות או גבוהות יותר, אך הגרדיאנטים האופקיים במהירות (התורמים לגזירה, ערבוליות וכו') גדולים בסדר גודל בשל כך שרדיוסי המערבלים קטנים פי כמה בסב-מזוסקייל. דוגמאות לשדה הזרימה המכיל אנומליות רבות מהזרימה הממוצעת ניתן לראות באיורים 3 ו-5. דפוסי הזרימה הטיפוסיים של אנומליות בזרם הגבול הם הטיות קשתיות של מסלול הזרימה ("meandering") ומהם נוצרים מערבלים בגודל מזוסקייל או סב-מזוסקייל בתהליכים של אי יציבות דינמית של זרם הגבול[11-13]. אירועים כאלה של יצירת מערבלים והפרדות שלהם ממדף היבשת דווחו מספר פעמים בספרות[14,15] ונראה שלעיתים קרובות מערבלים אלה מזינים

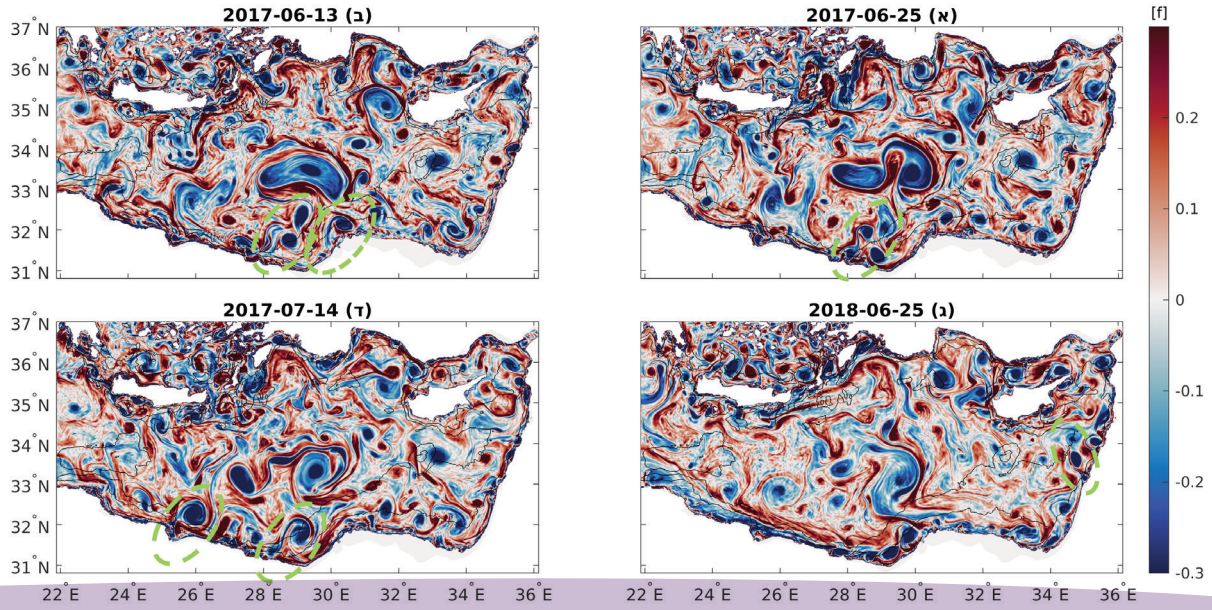
את המערבלים הקבועים למחצה באגן (לדוגמה, מערבל מרסה-מטרו (Mersa-Matruh) באיור 1ג; ע"ע הפרק של פרופ' ברנר בספר הנוכחי). בנוסף, היפרדות המערבלים מהגבול מסיעה חומרים כגון מזהמים ונוטריינטים אל הים העמוק[4]. על-פי הסימולציה הנומרית מקרים רבים של הפרדת מערבלים יכולים לקרות בטווח זמן של חודש או חודשיים. ניתן לראות דוגמה לתקופה שבה מתרחשות היפרדויות מרובות באיור 3, שם מוצגות מפות של ערבוליות, משתנה דומה במידה מסוימת למהירות זוויתית אך שימושי יותר במכניקת זורמים. במרכזי מערבלים יש מקסימום מקומי לגודל הערבוליות, וכך ניתן להבחין בהם בקלות. במערבל עם ערבוליות חיובית (שלילית) במרכזו הזרימה היא נגד (עם) כיוון השעון סביבו, כלומר ציקלונית (אנטי-ציקלונית). הערבוליות מוצגת כאן ובאיורים הבאים ביחידות של f, פרמטר קוריוליס, שגודלו , כלומר, גודלו באזור הנדון הינו בקירוב $8*10^{-5}$ ביחידות של אחד חלקי שנייה. מערבלי מזוסקייל מאופיינים בערבוליות בסדר *גודל* של 0.1f או פחות, ומערבלי סב-מזוסקייל מאופיינים בערבוליות בסדר גודל של 1f או יותר.



איור 1. גובה פני הים במזרח הים התיכון (במטרים). בסקאלות של מעל כ-10 ק"מ הזרימה קרובה למאזן גיאוסטרופי ולכן עקומים שווי ערך של גובה פני הים הם בקרוב קווי זרימה של הים בפני השטח. א. גובה פני הים הממוצע בין השנים 1994-2016 על-פי מדידות לווייניים[16] מיוצג בצבע ובעקומים. זרם הגבול ניכר בקווי זרימה לאורך ובסמוך (מרחק עשרות ק"מ) לקו החוף ומסומן באזור אחד לדוגמה באותיות ז.ג. באדום. סביבון רודוס (מסומן באותיות ס.ר.) וכן מספר מערבלים נשנים (גודל עשרות עד מאה ק"מ) כגון האנטיציקלון הקפריסאי (א.ק.) ומערבל מרסה-מטרו (מ.מ.) נראים גם כן בקווי זרימה סגורים ומעגליים או אליפטיים. ב. גובה פני הים (מיוצג רק בעקומים) ע"פ המודל הנומרי ברזולוציה של 1 ק"מ[7] - ממוצע בין השנים 2017-2018. האנרגיה הקינטית של סטיות מהירות בפני השטח (כלומר חצי ערך השונות של המהירות, ביחידות של מטר בריבוע לשנייה בריבוע) מוצגת בצבעים. הקו השחור היוצא בניצב לקו החוף של ישראל מסמן את מיקום החתך המוצג באיור 2. הריבוע האדום מסמן את גבולות האזור שבו בוצעו החישובים הספקטראליים המוצגים באיורים 8-9. ג. ו-ד. גובה פני השטח (ועקומי זרימה) בתאריכים מסוימים בחורף (ג) ובקיץ (ד) על-פי מדידות הלווייניים. המרווח בערכי עקומי גובה פני ים עוקבים הינו 2.5 ס"מ בכל הפאנלים.



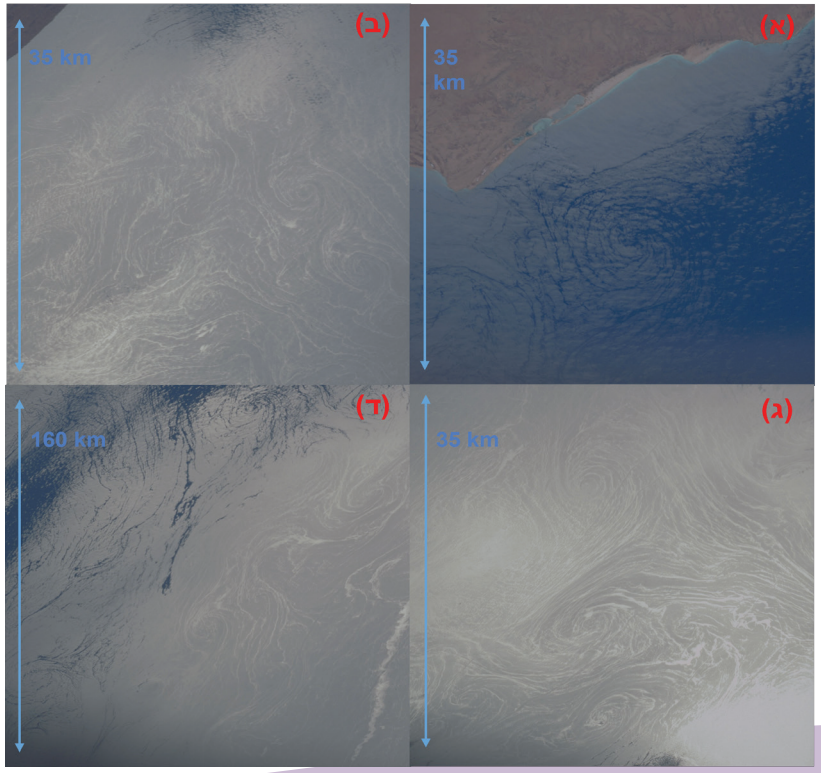
איור 2. הזרימה בזרם הגבול של מזרח הים התיכון. באיור מוצגת מהירות הזרימה בניצב לחתך מקצה היבשת החוצה במודל הנומרי ברזולוציה 1 ק"מ, ממוצע של שנת 2018 במודל. הנקודה הקרובה ביותר לחוף המוצגת באיור היא בקו רוחב 32.2° וקו אורך 34.7° (בקירוב מול חוף הרצליה, ראה קו שחור המסמן את המיקום באיור 1ב). כיוון החתך הוא בקירוב הכיוון שבו הנפילה בעומק הים היא ה"מהירה" ביותר (הכיוון בו גרדיאנט הבתימטריה הוא מקסימלי), בקירוב אזימוט 290° כלומר כמעט מערבה. המהירות המוצגת היא רכיב המהירות המאונך לחתך הנ"ל, כלומר בקירוב צפונה עבור ערכים חיוביים.



איור 3. ערבוליות (ביחידות של פרמטר קוריוליס f - כמוסבר בגוף הפרק) בגובה פני הים במזרח הים התיכון במודל הנומרי ברזולוציה 1 ק"מ. כל תת-איור מראה את הערבוליות במודל בתאריך שונה בקיץ, כמצוין בכותרות. זרם הגבול הזורם לאורך מדף היבשת והמדרון היבשתי (ראה איורים 1 ו-2) נוטה ליצור מערבלים, להסיעם במורד הזרם (נגד כיוון השעון), ולנתקם ממנו אל הים הפתוח במיקומים טיפוסיים המאופיינים בהתרחבות המדרון היבשתי ו/או בשינויי כיוון של קווי העומק. קווי העומק של 1 ו-2 ק"מ מסומנים בקווים שחורים. אירועי ניתוק של מערבלים, לדוגמה, מסומנים באליפסות ירוקות.

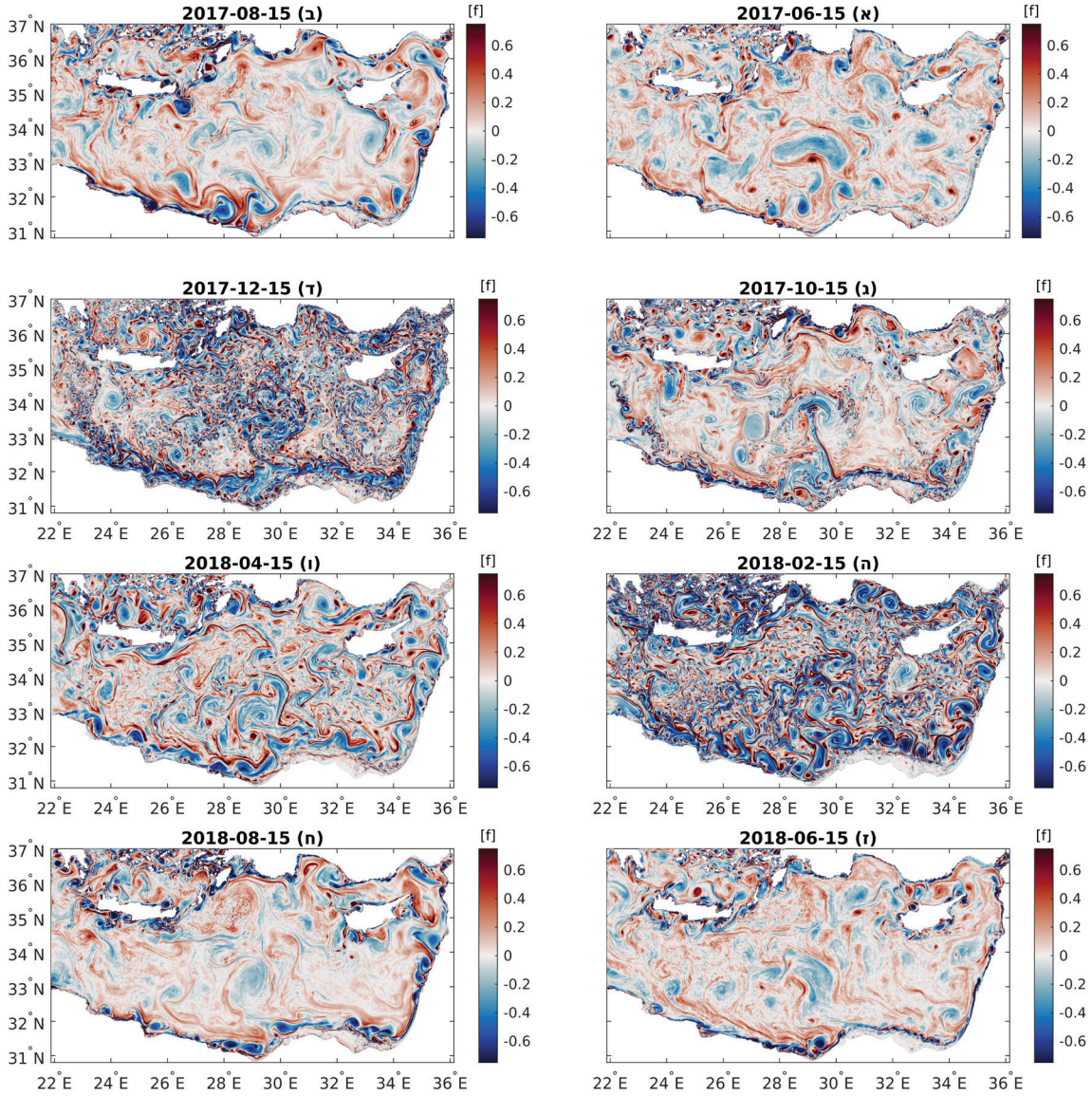
פנומנולוגיה של מערבלים בגודל סב-מזוסקייל

בחלק הקודם הוצגו ממוצעים שנתיים של הזרימה ובסטיות ממנה בסקאלות גדולות (איור 1). הסטיות מתבטאות כמערבלי מזוסקייל בעיקר, שגודלם עשרות ק"מ ומעלה והקרובים למאזן גיאוסטרופי. בתצפיות סמינליות[8,9] זוהה שמערבלים קטנים יותר משמעותית, למשל בגודל קילומטרים ספורים, נפוצים גם הם באוקיינוסים ובימים כולל במזרח הים התיכון. זה התאפשר בזכות תצפיות אופטיות (צילומים ממעבורת החלל) שהרזולוציה שלהם טובה לאין ערוך לעומת רזולוציה בת עשרות עד מאה ק"מ מאלטימטריה – חישת גובה פני הים מלוויין (לדוגמה איור 1א). למערבלי סב-מזוסקייל יש חתימה אופטית מכיוון שהתנועה בהם מרכזת חומרים פעילי שטח (surfactants), חומרים שמנחיתים גלים קפילריים בפני השטח ולכן משנה את כמות הקרינה המוחזרת. אנו מביאים כמה דוגמאות לתצלומי נאס"א של סב-מזוסקייל באיור 4. מערבלי הסב-מזוסקייל נראים כתצורות ספירליות לבנות, בזכות ערבול ו"טווייה" של החומרים פעילי השטח סביבם בידי שדה הזרימה של כל מערבל.

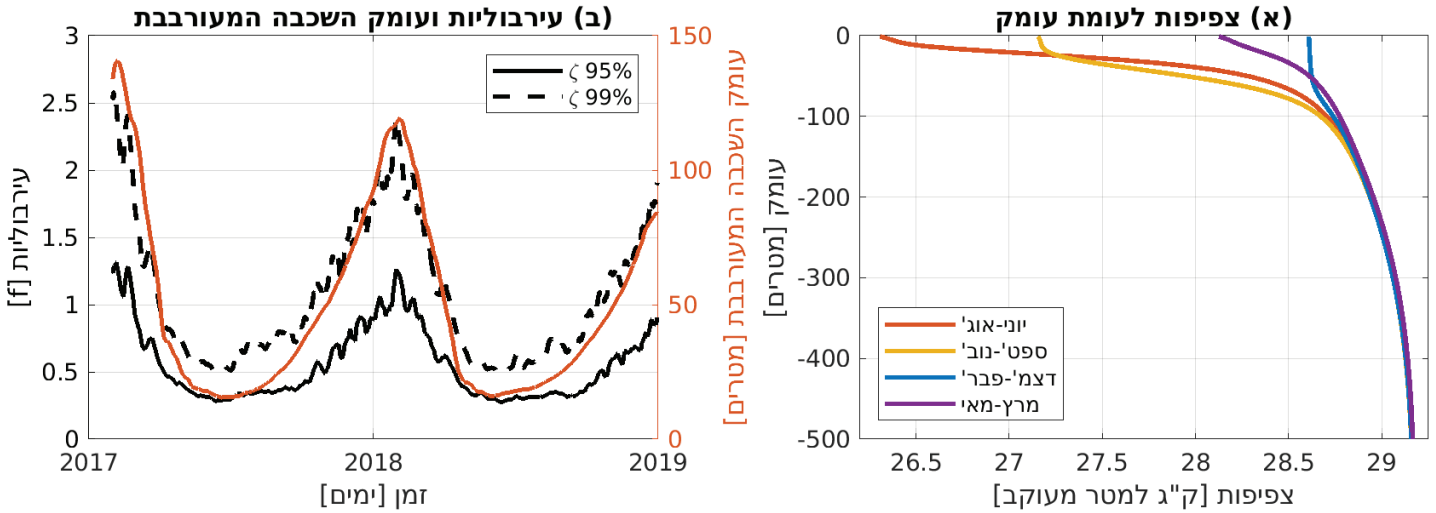


איור 4. מערבלים בגודל סב-מזוסקייל במזרח הים התיכון כפי שהם נראים בתמונות ממצלמות ידניות שנלקחו בידי אסטרונאוטים על מעבורת החלל של נאס"א באוקטובר 1984. א. תמונה מספר STS41G-94-35 של נאס"א. ב. תמונה מספר STS41G-65-38 של נאס"א. ג. תמונה מספר STS41G-83-35 של נאס"א. ד. תמונה מספר STS41G-89-35 של נאס"א. גודל שדה הראייה האנכי בכל תמונה מצוין בצידן השמאלי. התמונות הורדו (02.2024) מהאתר eol.jsc.nasa.gov, באדיבות היחידה למדע כדור הארץ וחישה מרחוק במרכז החלל ג'ונסון של נאס"א.

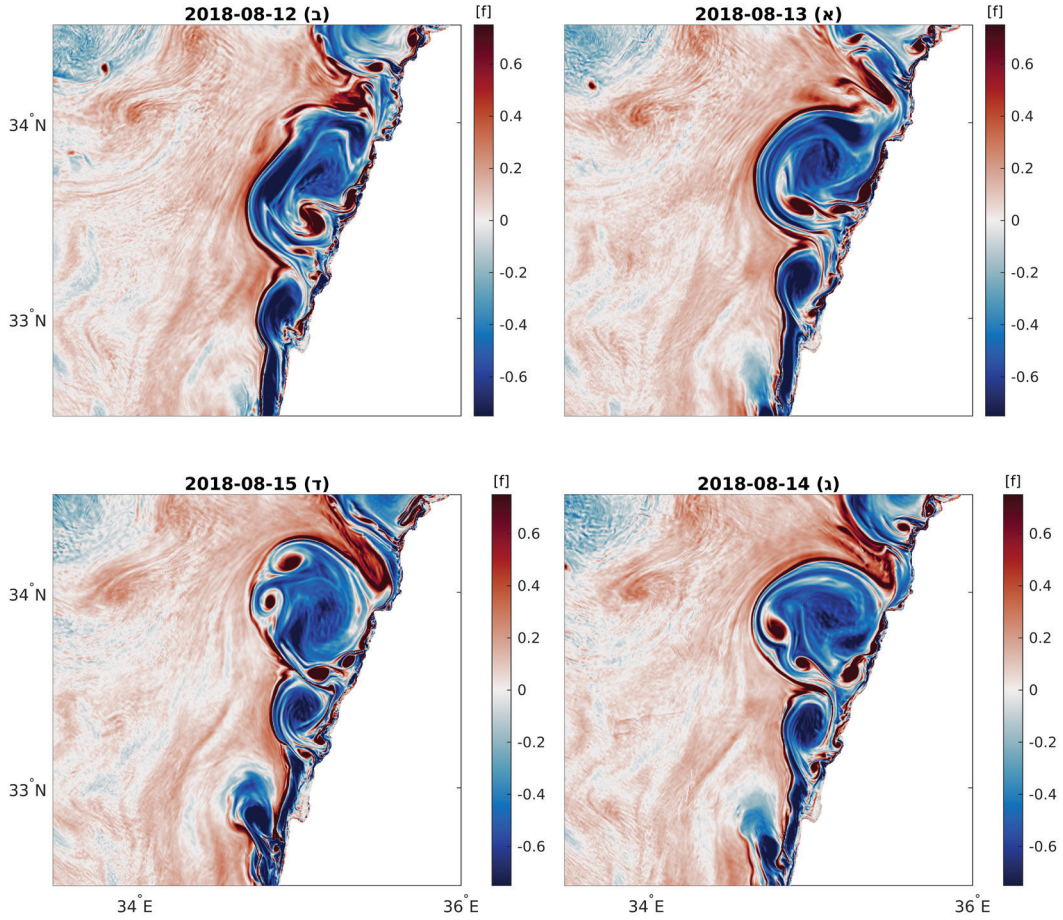
כמו במקרה של מערבלי המזוסקייל, רבים ממערבלי הסב-מזוסקייל שנצפו בשיטה הנ"ל היו בקרבת זרם הגבול (אף-על-פי שלא ברור אם לזרם הגבול יש חתימה אופטית בתמונות הללו). ב-3 מ-4 המקרים המוצגים באיור 4 המערבלים הנראים הם במרחק של עד כ-50 ק"מ מהיבשת, כלומר בתוך או בסמוך לזרם הגבול. כלומר, נראה שזרם הגבול משחק תפקיד חשוב גם ביצירת מערבלי סב-מזוסקייל, תוצאה שלאחרונה גם הודגמה ונחקרה בפירוט בסימולציות נומריות[7,11]. בניגוד למערבלי מזוסקייל שנוצרים וקיימים בכל עונות השנה, הסב-מזוסקייל מוגבל בעיקר לעונות החורף ובמידה פחותה לעונות המעבר, כפי שניתן לראות בתוצאות המודל הנומרי באיור 5. הסיבה לכך היא שעומק השכבה המעורבבת היטב גדול יותר משמעותית בחורף (איור 6). גרדיאנטים אופקיים בעומק השכבה המעורבבת היטב מתרחשים בשל מפגש בין גופי מים שונים. גרדיאנטים אלה מהווים מצב לא יציב מכיוון ש"סידור מחדש" אנכי של הגרדיאנטים מהווה מצב עם אנרגיה פוטנציאלית נמוכה יותר[5]. עוצמת הערבוליות, מדד ל"חוזק" המערבלים, גדול יותר משמעותית בחורף, ואכן בהתאמה זמנית עם השינוי בעובי השכבה המעורבבת היטב (איור 6ב). הערבוליות הגבוהה במערבלי הסב-מזוסקייל בחורף משמעה שהם פחות נתונים לאילוצים גיאוסטרופיים ממערבלי מזוסקייל, ולמשל בעלי פוטנציאל גבוה יותר לחצות את המדרון היבשתי ובכך להסיע ולהחליף חומרים בין הים הרדוד לעמוק. נדגיש שוב שבחורף מערבלי סב-מזוסקייל נוצרים גם הרחק מזרם הגבול (בשל מאגר האנרגיה הפוטנציאלית המגולם בשכבה המעורבבת העמוקה יותר בחורף), ואילו בקיץ מערבלי סב-מזוסקייל יכולים להיווצר בעיקר בזרם הגבול (בשל גזירת המהירויות המשמעותית בו בכל עונות השנה; איור 7). מערבל סב-מזוסקייל שנוצר בזרם הגבול בקיץ ונפלט ממנו אל הים העמוק אכן נצפה ונמדד בפירוט לאחרונה[17].



איור 5. ערבוליות בגובה פני הים במזרח הים התיכון במודל הנומרי ברזולוציה 1 ק"מ. כל תת-איור מראה תאריך שונה במודל, כמצוין בכותרות. בקיץ הזרמים והמערבלים הטיפוסיים הם בגודל מזוסקייל (בקרוב יותר מ-10 ק"מ), כפי שרואים גם באיור 1 בגובה פני המים שנמדד מלוויינים או במודל, מלבד הופעה גם של מערבלים קטנים יותר (סב-מזוסקייל) בזרם הגבול. מערבלים חזיתות ופילמנטים בגודל סב-מזוסקייל נעשים נפוצים החל מאוקטובר ובהדרגה עד פברואר מכסים חלקים גדלים והולכים מהאגן. הצבעים (המציינים את גודל וסימן הערבוליות) הם ברוויה (כלומר גודל הערבוליות גבוה מערך הערבוליות הגדול ביותר במפת הצבעים) עבור רבים מהמערבלים, ובמיוחד בחורף.



איור 6. א. השינויים בפרופיל הצפיפות בעונות השנה: השכבה המעורבבת היטב מעמיקה משמעותית ממטרים ספורים בקיץ לכ-100-50 מטר בחורף. המשתנה המוצג הוא סטיית הצפיפות מערך של 1000 ק"ג למטר מעוקב. האנרגיה הזמינה למערבלי סב-מזוסקייל פרופורציונאלית לעומק השכבה המעורבבת.[5] בהתאם לכך, עוצמת וכמות המערבלים באגן עולות בחורף עם עומק השכבה המעורבבת, כפי שניתן לראות בגרף בפאנל. ב. המציג את השינוי העונתי בעומק השכבה המעורבבת ובגובה האחוזון ה-95 והאחוזון ה-99 של הערבוליות באגן מתוך המודל הנומרי.[7] אחוזוני הערבוליות הגבוהים הנ"ל הם אינדיקציה לגובה הערבוליות בתוך מערבלים (או זרמים טרנזיאנטים אחרים). המשתנים חושבו באזור שבו העומק הבתימטרי גדול מ-500 מטר במזרח הים התיכון מדרום ל-37 מעלות צפון וממזרח ל-22 מעלות מזרח. המקור לנתונים באיור א הינו הראנליזה של סוכנות CMEMS של האיחוד האירופי (ראנליזה היא שכלול של תצפיות עם מודל נומרי דינמי), הניתנת להשגה בכתובת הקבועה (doi) הבאה: https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1



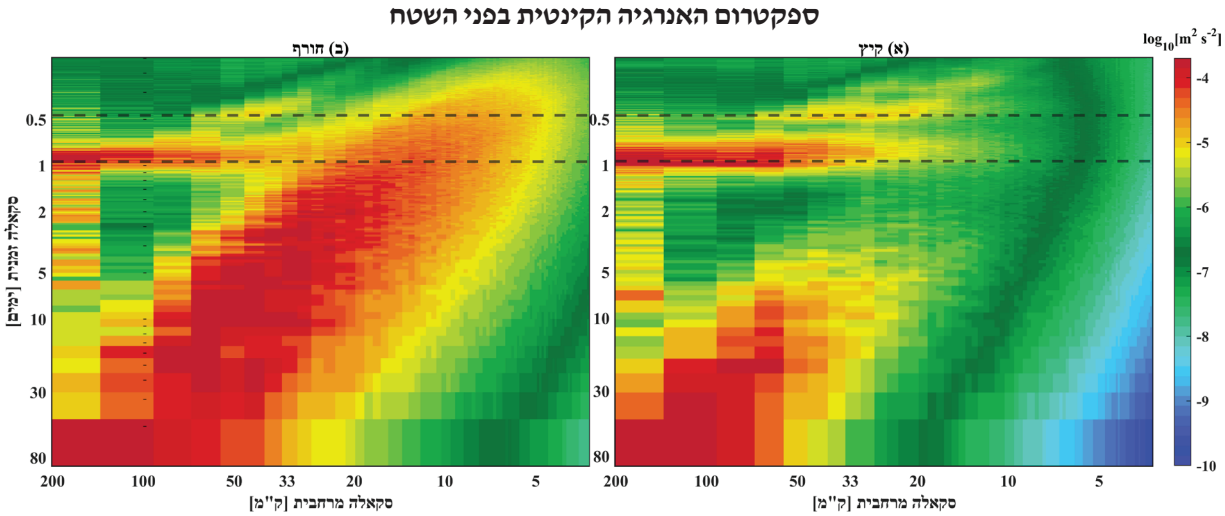
איור 7. ערבוליות בגובה פני הים במזרח הים התיכון במודל הנומרי ברזולוציה 300 מטר ובארבעה ימי קיץ עוקבים במודל כמצוין בכותרות. יצירה של מספר מערבלים בגדלי סב-מזוסקייל ומזוסקייל ניכרת בזרם הגבול ב-12-13 לאוגוסט תוך אינטראקציה עם מערבל מזוסקייל, ובימים העוקבים המערבלים נפרדים מזרם הגבול.

התפלגות המערבלים - ספקטרום האנרגיה

על מנת לחקור את התפלגות האנרגיה הקינטית בין גדלים שונים מהסב-מזוסקייל, דרך המזוסקייל ועד לגודל האגן, וכנ"ל בקבועי זמן שונים, אנו מציגים את ספקטרום פורייה (Fourier Spectrum) של המהירות בפני השטח מהמודל הנומרי באיור 8 (ע"ע [7] לפירוט על השיטה והיבטים נוספים). התוצאות המוצגות חושבו על פני האזור המוצג באיור 1ב, אם כי הן מייצגות את מזרח הים התיכון העמוק בכללותו באופן טיפוסי[7].

בקיץ, מרב האנרגיה היא אכן במזוסקייל, בגדלים של מעל ל-30 ק"מ. קבועי הזמן המתאימים הם מעל 5 ימים. חשוב לשים לב שסקאלת הצבע באיור היא לוגריתמית, כלומר ההבדלים הם בסדרי גודל. ישנו "רכס" אנרגטי נוסף קרוב לקבוע זמן של יום בודד. זאת החתימה של תנודות אינרציאליות[7] והמחזור היממתי.

בחורף הרכס האנרגטי של מערבלי המזוסקייל מוארך עד לקבועי זמן קצרים מחצי יום וקבועי מרחק של כ-5 ק"מ. האנרגיה המוגברת (בסדרי גודל) בסקאלות קטנות בחורף היא בשל זרימת סב-מזוסקייל בדמות מערבלים חזיתות ופילמנטים צרים. ניתן לראות זאת ויזואלית באיורים 4-5 ומגולם בערבוליות הגבוהה בחורף (ערבוליות בסדר גודל של $1f$, כאופייני לסב-מזוסקייל) בסדרה הזמנית באיור 6. מצופה כי סקאלות אפילו קטנות יותר (מאות מטרים) מעוררות בחורף למעשה, אך המודל הנומרי מוגבל מבחינה זו בשל הרזולוציה שלו (1 ק"מ). לסיכום, אנליזת הספקטרום מהמודל מראה מעבר חד בעירור הסב-מזוסקייל בחורף ומכמתת את התפלגות האנרגיה בסקאלות גודל וזמן שונות.

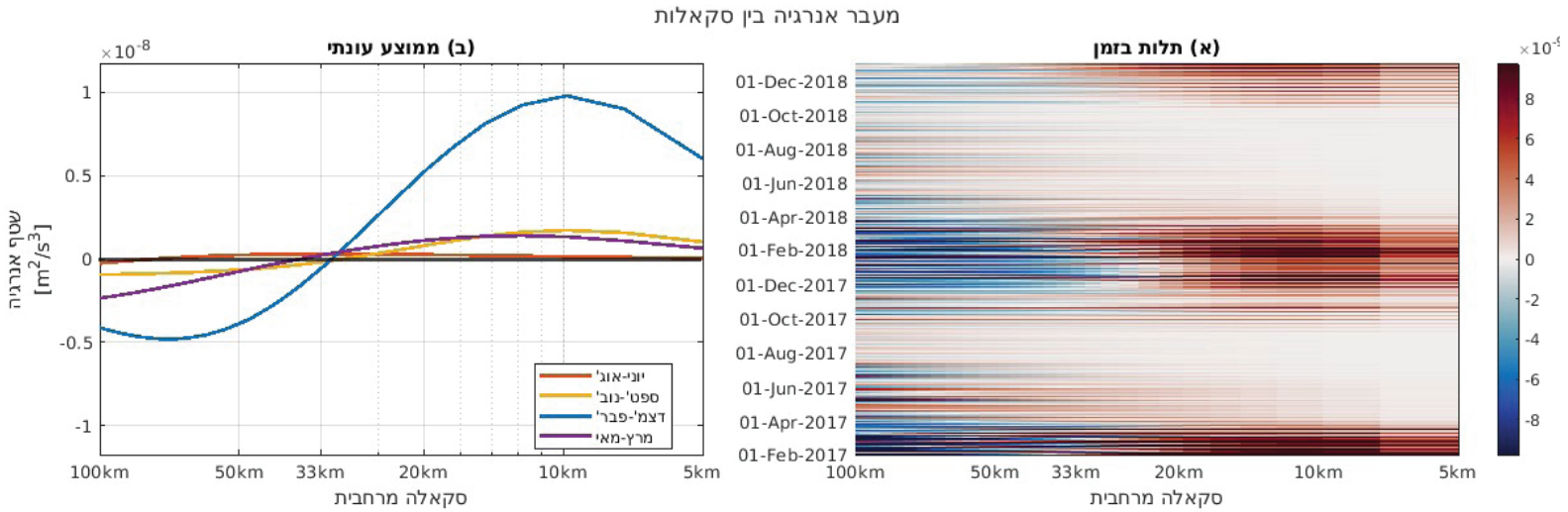


איור 8. ספקטרום האנרגיה בפני השטח א. בקיץ וב. בחורף. הספקטרום חושב על פני שטח בין קפריסין לכרתים (ראה [7]). ה"רכס" בזמני מחזור ארוכים יותר מ-5 ימים בקיץ מיוחס למערבלי מזוסקייל. התוספת לרכס זה בזמני מחזור קצרים יותר בחורף מיוחסת למערבלים, חזיתות, ופיל־מנטים מגודל סב-מזוסקייל.

אינטראקציה בין סקאלות - שטף האנרגיה הספקטראלי

התוצאות שהצגנו עד כה הראו פנומנולוגית את ההתפלגות המרחבית והעונתית של מערבלים בגדלים שונים, ואת האינטראקציה שלהם עם זרם הגבול, והראו כמותית את ההתפלגות המרחבית והזמנית (ספקטרום) בכל עונה. נותר לחקור כמותית את האינטראקציה בין סקאלות זרימה שונות, למשל, בין זרם הגבול למערבלים הקטנים יותר הנוצרים ממנו, או בין שני מערבלים בגדלים שונים. אנו מציגים כאן ניתוח כזה, בהתבסס על שיטת ה- Coarse Graining המוצגת ב-[18]. שיטה זאת מאפשרת לחשב את קצב או שטף מעבר האנרגיה (שטף האנרגיה) בין סקאלות שונות בשל

אינטראקציות ביניהן. התוצאות (לפרטים נוספים ע"ע [7]) מוצגות באיור 9. התוצאה הראשונה היא ששטפי האנרגיה בין סקאלות שונות גדולים בסדר גודל שלם בחורף לעומת הקיץ. התוצאה השנייה היא שבסקאלות של מעל כ-30 ק"מ השטפים הם שליליים, כלומר מסקאלות קטנות לגדולות, ולעומת זאת בסקאלות קטנות יותר שטף האנרגיה הוא חיובי, כלומר אל סקאלות קטנות עוד יותר. תוצאות אלה הן עקביות עם אנליזה דומה מאזורים אחרים בעולם (למשל [19]). מעבר האנרגיה לסקאלות גדולות יותר קורה במידה רבה בשל התמזגויות בין מערבלים לאחר היווצרות מערבלי סב-מזוסקייל בחורף. לעומת זאת מעבר אנרגיה מהסקאלות מתחת ל-30 ק"מ אל סקאלות קטנות יותר קורה במידה רבה בשל התכנסות שדה הזרימה בחזיתות סב-מזוסקייל (ע"ע [11]). אנו מוצאים, בנוסף, שהמעבר ממאפייני שטפים אנרגטיים של קיץ לחורף הינו קצר מאוד (מספר שבועות בודדים, איור 9ב) ביחס לאורך העונות ומתחיל בסביבות דצמבר, בעוד שהיווצרות מערבלי סב-מזוסקייל מתחילה חודשים מספר קודם לכן ועוצמתם הממוצעת גדלה בהדרגה (איורים 6-5). הדבר מצביע על כך שייתכן שיש צורך בצפיפות סף של מערבלים באגן לאחר מספר חודשי היווצרות בטרם המרחק הממוצע ביניהם הינו מספק לצורך אפקטיביות האינטראקציות.



איור 9. שטף האנרגיה בין סקאלות מרחביות שונות א. כפונקציה של הזמן וב. בממוצע עונתי על-פי המודל הנומרי. ערכים חיוביים של שטף (צבע בפאנל א וציר y בפאנל ב) מתייחסים להעברת אנרגיה לסקאלות קטנות יותר ("ימינה" באיורים הנ"ל), ואילו ערכים שליליים מתייחסים להעברת אנרגיה לסקאלות גדולות יותר.

סיכום

הסירקולציה במזרח הים התיכון מורכבת בכל רגע נתון מאוסף של מערבלים, חזיתות, ופילמנטים, במגוון של גדלים; מזרם הגבול הדומיננטי, ומספר סביבונים ומערבלים קבועים למחצה (כפי שמתואר בפרק של ברנר בספר זה). המערבלים הטרנזיאנטיים נוצרים במידה רבה בזרם הגבול, אשר הינו תא הזרימה המשמעותי ביותר בסקאלת האגן, וכאשר הם נפרדים ממנו יש להם את הפוטנציאל להסיע חומרים מועילים או מזיקים לסביבה ולהחליפם בין הים הרדוד והעמוק. בחורף נוצרים מערבלים קטנים יותר בגודל סב-מזוסקייל (10 ק"מ) ומטה. מערבלים קטנים אלה מאופיינים בשדות ערבוליות והתכנסות גדולים יותר ולכן נוטים לשאת חומרים במידה רבה יותר ומסוגלים לנוע באופן אפקטיבי יותר החוצה מזרם הגבול. בנוסף, הם נוטים לבצע אינטראקציה חזקה יותר אלה עם אלה ולהתמזג, בעוד שחזיתות סב-מזוסקייל נוטות להתחדד, ומצופה ששניהם יחד תורמים לדיספרסיה משמעותית ומורכבת של חומרים בים. נמצא שהאינטראציה המשמעותית בין סקאלות שונות מתחילה די בפתאומיות בראשית החורף בדצמבר, כאשר שדה הסב-מזוסקייל הינו בשיאו מבחינת צפיפות המערבלים.

רשימת מקורות

1. Robinson, A. et al. General circulation of the Eastern Mediterranean. *Earth-Sci. Rev.* **32**, 285-309 (1992).
2. Rosentraub, Z. & Brenner, S. Circulation over the southeastern continental shelf and slope of the Mediterranean Sea: direct current measurements, winds, and numerical model simulations. *J. Geophys. Res. Oceans* **112** (2007).
3. Amitai, Y., Lehahn, Y., Lazar, A. & Heifetz, E. Surface circulation of the eastern Mediterranean Levantine basin: Insights from analyzing 14 years of satellite altimetry data. *J. Geophys. Res. Oceans* **115** (2010).
4. Fadida, Y., Verma, V., Barkan, R., Biton, E., Solodoch, A. & Lehahn, Y. Submesoscale horizontal stirring enhances seasonal enrichment of low-chlorophyll surface waters (submitted for publication).
5. McWilliams, J. C. (2016). Submesoscale currents in the ocean. *Proc. R. Soc. Lond. A:* **472** (2189), 20160117.
6. Taylor, J. R. & Thompson, A. F. (Submesoscale dynamics in the upper ocean. *Ann. Rev. Fluid Mech.* **55**, 103-127 (2023).
7. Solodoch, et al. Basin scale to submesoscale variability of the East-Mediterranean Sea upper circulation. *J. Phys. Ocean.* 53(9), 2137-2158 (2023).
8. Scully-Power, P. Navy Oceanographer Shuttle observations, STS 41-G Mission Report. Naval Underwater Systems Center, NUSC Technical Document 7611 (1986).
9. Munk, W., Armi, L., Fischer, K. & Zachariasen, F. Spirals on the sea. *Proc. R. Soc. Lond. A:* **456**, 1217-1280 (2000).

10. Ballarotta, M. et al. On the resolutions of ocean altimetry maps. *Ocean Sci.* **15**(4), 1091-1109 (2019).
11. Verma, V., Barkan, R., Solodoch, A., Gildor, H., Toledo. The eastern Mediterranean boundary current: seasonality, stability, and spiral formation. *J. Phys. Ocean.* **54**, 1971-1989 (2024).
12. Feliks, Y. & Itzikowitz, S. Movement and geographical distribution of anticyclonic eddies in the Eastern Levantine Basin. *Deep Sea Res. I: Oceanogr. Res. Pap.* **34**(9), 1499-1508 (1987).
13. Feliks, Y. & Ghil, M. Downwelling-front instability and eddy formation in the Eastern Mediterranean. *J. Phys. Ocean.* 23(1), 61-78 (1993).
14. Gertman, I. et. al. Generation of Shikmona anticyclonic eddy from an alongshore current. *Rapp. Comm. int. Mer Medit. CIESM Congress Proceedings*,**39**, 114 (2010).
15. Efrati, S. et al., Intrusion of coastal waters into the pelagic eastern Mediterranean: in situ and satellite-based characterization. *Biogeosciences*, **10**(5), 3349-3357 (2013).
16. Taburet, G. et al. DUACS DT2018: 25 years of reprocessed sea level altimetry products. *Ocean Sci.*, **15**(5), 1207-1224 (2019).
17. Solodoch, A., Gildor, H., Toledo, Y., Barkan, R., Lhehan, Y .Cross-shore material exchange by a submesoscale eddy. *Israel Aquatic Sciences Association annual meeting* (2024).
18. Eyink, G. L. & Aluie, H. Localness of energy cascade in hydrodynamic turbulence. I. Smooth coarse graining. *Phys. Fluids*, **21**(11) (2009).
19. Srinivasan, K., Barkan, R. & McWilliams, J. C. A forward energy flux at submesoscales driven by frontogenesis. *J. Phys. Ocean.* **53**(1), 287-305 (2023).

מזח בית ינאי נבנה בשנות ה-40 של המאה ה-20, במטרה לייצא ממנו פירות הדר ופריקת דשן לחקלאות. אורכו היה כ-200 מטרים והוא כמעט ולא היה בשימוש. בתקופה הבריטית סייע להעברת מעפילים מ- 16 אוניות, כולל 'אלטלנה'. המזח עבר שחיקה של הגלים במהלך השנים. בגלל המשמעות ההיסטורית שלו הכוונה לשקמו בעתיד. על עמודי המזח מתיישבים בעלי חיים שונים בהתאם לתנודות הגאות והשפל והשינויים בגובה המים במהלך היממה. צילום: רמי קליין.

12 שילוב גישה סביבתית במבני הגנה חופית

אלמוג בן נתן[2,1], נדב ששר[3,1]

[1] המגמה לביולוגיה וביוטכנולוגיה ימית, המחלקה למדעי החיים, אוניברסיטת בן גוריון באילת
[2] המכון הבין אוניברסיטאי למדעי הים באילת
[3] בית הספר לקיימות ושינויי אקלים ע"ש גולדמן זוננפלד, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

almog100560@gmail.com,
nadavsh@bgu.ac.il

תקציר

הגידול באוכלוסייה הפוקדת את חופי הים ברחבי העולם מוביל לצורך בפיתוח תשתיות חופיות ובבנייה אורבנית קרובה לחוף. כדי להגן על תשתיות מגורים, תעשייה, ומסחר נבנים מבני הגנה חופית לאורך ובקרבת קו החוף. אותם מבני הגנה חופית (הכוללים: שוברי גלים, מזחים וקירות ים) הינם מבנים מלאכותיים מסיביים המשתרעים על חלקים נרחבים של קו החוף. בנייתם של אותם מבנים מגיעה על חשבון בתי גידול חופיים הנהרסים במהלך הבנייה. מלבד הרס במהלך תהליך הבנייה למבני ההגנה החופית ישנה השפעה ארוכת טווח העלולה אף להשליך על בתי גידול סמוכים. שינוי משטר זרמים, אגירת חול, ריכוז מזהמים ועוד הינם רק חלק מההשפעות האפשריות של מבנה הגנה חופית ברמה המקומית והאזורית. בנוסף לכך, כיוון שמבנים מלאכותיים אלו, כגון שוברי גלים, נבנים מסלעי מחצבה ומיחידות בטון, הם מספקים מצע גידול ירוד ובית גידול נוקשה עבור אורגניזמים רבים. מספר מבנים מרחבי העולם נחקרו ונמצאו כלוקים בשירותים אקולוגיים זמינים ועל כן הם מאופיינים בשפע ומגוון ביולוגי ירוד.

עם זאת, מגמה המתפתחת בעשורים האחרונים משלבת גישות אקולוגיות והנדסיות במטרה למגר ולצמצם את ההשפעות השליליות של מבני הגנה חופית בעזרת פתרונות מלאכותיים. פתרונות אלו נועדו למתן ואף לבטל את חלק או כלל הכשלים האקולוגיים במבנים מלאכותיים אלו. שיפורים אלו כוללים התאמות ברמת המצע (חריצה וקידוח), ברמת שטח הפנים (מתקני מורכבות ואגירת מים), ברמת החומר (תערובות בטון ידידותיות לסביבה, תחליפים למצעים קשים) וברמת המבנה עצמו (יחידות בנייה אקולוגיות). דרישה חוקית-תקנונית לשילוב גישות אקולוגיות הנדסיות אלו נדרשת לשם הטמעתם של פתרונות אקולוגיים כמו אלה בכל פעילות בנייה ימית עתידית. זאת מבלי לוותר על התפקידים של המבנה הימי ותוך לקיחה בחשבון של נושאי בטיחות, צרכים הנדסיים ועמידות יחידות השריון לאורך זמן. הרחבת היישום של פתרונות אלו בעיקר במבנים עתידיים נותנת תקווה כי גם מבנים ימיים מלאכותיים יוכלו לתרום למגוון המינים החופי וליציבות החברה הטבעית.

בנייה חופית והים התיכון

קו החוף מושך אליו מתיישבים משחר האנושות בשל העושר במזון ומשאבים. עם תחילת השימוש בסירות בים התיכון, המוכר לפחות משנת 7000 לספירה[1], מגורים על קו החוף הפכו לנכס ליישובים העוסקים בדיג או במסחר. הצורך בהגנה על כלי השיט מפני איתני הטבע הוביל בהדרגה לבניית שוברי גלים אשר הוסיפו נדבך הגנה ויצרו או הרחיבו מעגנים קיימים. כך בהדרגה התרחבה התיישבות בני האדם לאורך החופים והביקוש להם גדל. כיום, מתוך 46,000 ק"מ של קו חוף בים התיכון יותר מחצי (כ-25,000 ק"מ) הם אזורים אורבניים (אזורים בקרבת ערים או יישובים) המאכלסים כ-150 מיליון איש בלא פחות מ-60 ערים. דבר ההופך את קו חוף הים התיכון, ובמיוחד את החופים הצפוניים והמערביים שלו, לאחד מאזורי המחיה הצפופים בעולם[2]. תופעה זו, של הרחבת המגורים והפעילות לאורך החופים, אינה ייחודית לים התיכון. כיום קו החוף הינו אחד מאזורי המחיה המבוקשים ביותר בעולם[3].

חוף הים מספק ערך נדרש לתעשיות רבות, כגון: נמלים, תחנות כוח, מתקני התפלה, דיג, חקלאות ימית ועוד[4]. בנוסף לאלו, התיירות מרחיבה את הביקוש לחופים אך גם מפזרת אותו. בעוד אשר לצורכי ספנות ודיג יש צורך להתמקד באזורים בעלי הגנה טבעית, תיירים נוטים לפקוד את כל צורות החוף ואף מעדיפים לעיתים חופים חוליים פתוחים או חופים סלעיים ומצוקים. אכן, מלבד התושבים עצמם, חופי הים התיכון מהווים מוקד תיירותי פופולרי כאשר בכל שנה כ-500 מיליון איש נופשים ועושים שימוש במלונות ובאתרי נופש לאורכם[5]. בשל אלו ועם גדילת האוכלוסייה האנושית הרי זה בלתי נמנע שהביקוש והבנייה לאורך קו החוף ימשיכו לגדול[6].

בהתאמה למגמה העולמית, גם בארץ ההתרחבות לאורך קו החוף נמשכת עם גדילת האוכלוסייה והמשק. עם ביקוש זה עולה דרישה להמיר שטחים פתוחים וטבע חופי כולל בעורף החוף לאזורי מגורים ותעשייה. הביקוש לבנייה חופית הוא רב כאשר לא רק שקרבה לים מעלה משמעותית את ערך הנכס (תוספת של 26-59% לדירות בקו ראשון לים גם בתוך ערים רוויות), כי אם גם נוף לים, מלא או חלקי, מוסיף כ-5-26% לשווי הדירה, (בהשוואה לנוף לאזור פתוח אחר)[7]. כיום מוערך שמתוך כ-190 ק"מ חוף בארץ ישראל, במעל 70 ק"מ קיימות תשתיות חוף, כאשר חלקן הגדול נמצא בנמלים ובשוברי גלים שונים (איור 1)[8]. בהכוונת המחוקק והרשויות, חלק מהשימושים חולקים את אותה רצועת חוף.

איור 1. שימושי החוף (בקילומטרים) לאורך ישראל לפי נתוני גלובס[9]. יש לציין כי חלק מהשימושים חולקים את אותה רצועת חוף ועל כן ישנן חפיפות. גרפיקה: אלמוג בן נתן.

עם זאת, בנייה ומחיה על קו החוף מכילות אתגר הנובע מעצם הקרבה לים; רוחות, מליחות, לחות וסערות ימיות מובילות לשחיקה והריסה של תשתיות, מבנים וכלים. תופעות כמו סופות ים, שיטפונות וגלים עוצמתיים מתחזקות בשנים האחרונות, בין היתר בגלל ההתחממות הגלובלית המעלה את כוחן ותדירותן בכל שנה[10]. כמו כן, בשל הגברת הפעילות החופית וכן עליית שווי הקרקע והמגורים בקרבת החוף, פוטנציאל הנזק של תופעות אלו גדל אף הוא. הביקוש הרב, כמו גם השווי של הנכסים לאורך החוף, מספקים תמריץ כלכלי משמעותי להגנה על החופים ועל מתקני החוף (ראה דוגמת פרויקטים של החברה להגנת מצוקי החוף)[11].

כדי להגן על שימושי החוף השונים, נבנים מבני הגנה חופית מלאכותיים לאורך החוף, מולו ואף מתחתיו. מבנים אלו נועדו לשכך, להטות ואף לבלום את עוצמת הים ולהרחיקה מהפעילות האנושית, כמו גם לווסת תהליכים כמו שחיקת חופים או הסעת חול. גודלם ואופיים של מתקנים אלו נקבע לפי מטרתם. בנוסף, מבנים קיימים רבים עוברים תהליכי הרחבה ומודרניזציה לצד תחזוקה סדירה[12]. ואכן מבני הגנה חופית הופכים להיות חלק בלתי נפרד מקו החוף (איור 2. קו החוף הישראלי).

איור 2. בנייה אורבנית על קו החוף בישראל. א. קו החוף בתל אביב. צילום: Konrad Summers. ב. המרינה בהרצליה. צילום: Meronim.

בנייה חופית - סוגי מבנים ושיטות בנייה

מבנים רבים ושונים משמשים ונבנים בים. החל מצינורות, שוברי גלים, דורבנות ומזחים ועד לאסדות בלב ים[13]. בסקירה זו התמקדנו בעיקר במבני הגנה חופית מסוגים שונים. תפקידם של מבני הגנה חופית הינו, כמשתמע משמם, להגן ולסוכך על החוף מגלים, רוחות, סחף, וסערות. הדבר נעשה על-ידי בלימת, הטיה ופיזור וספיגה של אנרגיית הזרמים והגלים.

בהכללה, למבני הגנה חופית ישנם שלושה תפקידים עיקריים: הגנה על מתקנים חופיים מפני סערות; יצירת אזור מים שקט מגלים כגון מעגנות, נמלים ובריכות השקטה; ומניעת שחיקה של קו החוף. בשל כך המבנים, והחומרים שמהם הם נבנים, נבנים בהתאם לתפקידם ולתנאי השטח שבהם הם מוצבים. מבנים שנועדו לשמור על נמלים ולבלום סערות וגלים נבנים מחומרים קשים ויחידות שריון כבדות, שמספקים להם עמידות לאורך זמן. לעומתם מבנים הנבנים באזורים בעלי

תנאי שטח קלים (כגון אזורים מוגנים, קו החוף וכד') עושים שימוש גם בחומרים רכים (כגון: עץ ושקי חול).
את תפקודי מבני הגנה חופית ניתן לחלק על-פי מיקומם ביחס לקו החוף, כלומר, מבנים שנמצאים על קו החוף עצמו ולאורכו, מבנים בנויים הצמודים ל קו החוף.

מבנים אלו כוללים (איור 3 [14]):

- קירות ים (Sea wall) – בנויים בצורת קיר אנכי, מדורג או משופע. מטרתם למנוע הצפות בשל עליית מפלס פני הים, וכן למנוע את הצפת החוף שמאחוריהם ואת שחיקת החוף. כמו כן משמשים כקירות בתעלות ובנמלים או כחלק ממזחים.
- חומות ים (Revetments) – מבנה הבנוי בשיפוע המכסה את פרופיל קו החוף ובכך מונע את שחיקתו.
- סוללות ים (Sea Dikes) – בנויות במקביל, ולעיתים בקרבת רצועות חוף. לרוב הן בנויות כתלולית או בשיפוע מחומרים פשוטים (סלעים ושקי חול). סוללות אלו משמשות כמחסום אחרון בפני הצפת האזורים המיושבים (hinterland) על-ידי גלים או עליית מפלס מי הים. ידועות במיוחד סוללות הים המגינות על האזורים הנמוכים של הולנד.
- מבנים החודרים מהחוף אל הים:
- דורבנים (Groynes) – מבנים מחוזקים (עשויים חלק פנימי של אבן מחצבה ושריון חיצוני העשוי מסלעים או יחידות בטון בעלות צורות שונות) החודרים לים בניצב לקו החוף, אשר עיקר תפקידם למנוע גריעת חול מהחוף במקרה של חופים עם הסעת סדימנטים ניכרת לאורך החוף. לרוב נבנים כסדרות כדי להגן על שטח רב יותר, אך כמעט תמיד ישנה תופעת קצה, במורד הזרם שם נוצרת גריעה מוגברת וכן לפני הדורבן הראשון במעלה הזרם החופי, שם נוצרת צבירה ניכרת של חול בחוף.
- מזחים (Jetties) – במובן של הגנה חופית, מבנים אלו נועדו לשמר ולהגן על כניסות לתעלות ומעברי מים. נבנים מסלעים, בטון, ברזל או עץ. אלו הם מבנים מחוזקים המשתרעים מקו החוף אל עומק הים[15].
- שוברי גלים (Breakwater) – כפי שתוארו לעיל, מבנים כבדים עשויים גרעין פנימי המורכב מאבני מחצבה, שכבת ביניים מסלעים קטנים ושכבות (1 או 2) של יחידות שריון עשויות סלעים גדולים או יחידות בטון בעלות צורות שונות הסופגים את אנרגיית הגלים באמצעות החללים שביניהם והמשקל והחיבור של בין היחידות. משמשים להשקטת תחומי מים וכן להגנה על מתקני חוף מפני גלים וסערות.
- שוברי גלים מנותקי חוף (Detached breakwaters) – שוברי גלים אשר אינם מחוברים לחוף. לרוב בזמן הקמתם מייצרים מזח אשר משמש לשינוע היחידות להקמה וכלי העבודה. לעיתים, כתלות ביחס בין אורך שובר הגלים למרחק מהחוף ומיקומו מקו המשברים, כמו גם הרום היחסי של שובר הגלים ביחס לרום פני הים, נוצרת לשונית חול, המקשרת בין שובר הגלים לחוף (טומבולו, שרטום). שוברי גלים מנותקים נפוצים מאוד בים התיכון, כדוגמת איטליה וצרפת, מצרים וישראל, והם נבנו להגנת חופי הרחצה בערים רבות בישראל.
- שוברי גלים צף (Floating breakwater) – מתקנים אלו נועדו לשבירה ו/או הטיה של גלים בגובה פני המים. מחולקים למספר קטגוריות לפי חומר, צורה ומשימה, שוברי גלים צפים בנויים מפלטפורמה צפה המקורקעת אל קרקעית הים בעזרת בסיסים תת-ימיים, לרוב מבטון. מספר תצורות שכיחות הן: קופסה, פונטון, מסגרת, "שטיח", יחידות המחוברות בשרשרת ויחידות משטחים אנכיים או אופקיים[16]. שובר גלים שכזה, למרות היותו צף, מחייב עיגון חזק מאוד והוא אף דורש תחזוקה רבה.

שוברי גלים שקועים (Submerged breakwaters) – מבנים אשר אינם בולטים מעל פני הים ומטרתם לשכך גלים חזקים ולהביא לשבירתם במרחק מהחוף. מאחר שגלים נשברים כאשר עומק המים הוא כ-80% מגובה הגל, הרי שניתן לכייל את עומק שובר הגלים השקוע כך שיתאים לגלים בגבהים שונים. במקרים מסוימים, שוברי גלים מטובעים עלולים להיות מוצפים זמן רב על-ידי הגלים, דבר שיכול להביא בזמן סערות לעלייה זמנית של מפלס פני הים בתחום המוגן ואף לגרום לגריעה ונסיגה של החוף המקומי.

איור 3. מבני הגנה חופית לפי מיקומם ביחס לקו החוף ואופיים. מתקנים צמודי חוף א. קיר ים, צילום: Geert Schotanu. ב. חומת ים, צילום: Oikos-team. ג. סוללת ים, צילום: Evelyn Simak ד. דורבן, צילום: Andy Beecroft. ה. מזחים, צילום: Dan Brau. ו. שוברי גלים, צילום: אלמוג בן נתן. ז. שוברי גלים שקועים. צילום: חברת Reefball. ח. שובר גלים צף. צילום: Gordon Brown. ט. שוברי גלים מנותקי חוף. צילום: Prtaylor.

הצלחתו של מבנה הגנה חופית נמדדת ביכולתו לשמר את קו החוף בתנאים קשים ולאורך זמן. כדוגמה, מבנה ההגנה החופית העתיק והנפוץ ביותר, שובר הגלים, החל עם תחילת השימוש בנמלים ומעגנות. מבנים אלו נשמרו לאורך השנים וחלקם עדיין פעילים עד היום[17]. כדוגמה, שובר הגלים בקיסריה (איור 4) שנבנה בשנת 21 לספירה, כמו גם שוברי הגלים של יפו, עכו, צור וצידון, שכולם פעילים כיום. אם כי מרביתם עברו שיפוצים וחיזוקים שונים במהלך השנים.

איור 4. א. נמל קיסריה כדוגמה לנמל עתיק הפעיל גם היום, הריסות נמל קיסריה המשתרעות אל תוך הים לפני 183 שנה. איור של הצייר וויליאם הנרי שלאחר מכן הוטבע בעץ על-ידי צ'ארלס קוזן. ב. נמל קיסריה כיום (2014). צילום: Zairon.

שוברי גלים נבנים כקשת שעיקרה נמצא במקביל לחוף ובסיסה בחוף, או לחלוטין במקביל לחוף כדוגמת שוברי הגלים להגנה על חופי רחצה. בעבר שוברי גלים נבנו בעיקר מאבני מחצבה או אבנים מקומיות בעוד שכיום הם נבנים הן מסלעים והן מיחידות בטון מסוגים שונים[18,19].

השפעה סביבתית

בנייה מלאכותית על גבי סביבה טבעית כרוכה בהכרח בשינוי הסביבה, וככל שהמבנה בעל שטח גדול יותר ומאפייניו שונים מהסביבה הטבעית שבה נבנה, רמת ההשפעה שלו עולה. שוברי גלים וסוללות ים, הנבנים מהחוף אל הים, או ישירות בים, תופסים לעיתים עשרות ומאות דונמים מהסביבה הטבעית[20]. מבנים אלו משנים את הכיוון ואת גישתם של הזרמים, הגלים והרוחות המקומיות בסביבה האורבנית והטבעית הצמודה. שינוי במשטר הזרמים מכיל בתוכו השפעה רב מערכתית באקוסיסטמה הכוללת הפחתה בזמינות מזון, הגברה או החלשה של עוצמת גלים, שחיקת קו החוף, סדימנטציה, יצירת מערבולות מקומיות, פגיעה בקישוריות האקולוגית, שינויים בתנאי המים (טמפרטורה ואף מליחות)[21,22].

דוגמה לשינויים פיזיקליים אלו היא יכולתם להוביל לעצירת ובניית חול במקרים מסוימים ולגריעת חול במקרים אחרים, כאשר אנרגיית הגלים המוחזרת בעת סערה ממבני הגנה חופית יוצרת זרמים חזקים, שמסלקים לים את החול מאזור רצועת החוף. תהליך זה מצר בצורה משמעותית את חופי הרחצה ובתי הגידול הטבעיים. תצפיות רבות מראות כי במרבית החופים החוליים בישראל, שבהם הוקמו תשתיות ומתקנים לים במרחק הקצר מ-30 מטר מקו המים, התפתחה עם הזמן סחיפה שהצרה את רצועת החוף[23]. דוגמה לעצירת חול על-ידי שוברי גלים ניתן לראות בשובר הגלים הצפוני והמרכזי בחופי תל אביב והטומבולי שנוצר שם (יש לציין כי לעיתים עצירת החול אף מתוכננת בזמן ההקמה). מתקנים/ מבנים אלו מביאים לשינוי בבית הגידול המקורי, בין אם בשל נסיגה ושחיקה של החוף, או בשל כיסויו בחול שנערם.

בנייה ימית מטבעה קרובה יותר לבית גידול סלעי ופחות לבית גידול חולי. בבתי גידול רכים, המכוסים בחול, בוץ או סדימנט אחר, אשר לעיתים משמשים בית לעשבי-ים, הוספה של אותם אלמנטים נוקשים משנה בהכרח את אופיו של בית הגידול המוביל לשינוי בהרכב החברה שבהם[24]. כיוון שהיחידות שמהן נבנים מבנים מלאכותיים הן לרוב יחידות בטון או סלעי מחצבה, יש להן יכולת אכלוס נמוכה מאשר סלע טבעי בעל שטח דומה. דבר זה נובע מכמה גורמים:

- שטח הפנים של סלעי מחצבה או של תבניות בטון הוא לרוב חלק וחסר מורכבות, דבר המקשה על ההיאחזות וההתיישבות של מינים צמודי מצע, כגון אלמוגים וצדפות.
- בטון ימי נבנה במיוחד כך שלא ייסדק ולא יישבר לאורך זמן. כדי לעמוד במטרה זו בתנאי הים הרכב הבטון יוצר תנאים כימיים המצמצמים היאחזות של בעלי חיים עליו.
- רמות האלקליניות והבסיסיות של חומרים מבוססי מלט הן גבוהות והן אף זולגות לסביבה הימית[24]. אומנם רמות אלו יורדות במהירות ככל שהבטון מתייבש באוויר לפני ההכנסה למים וכן ככל שהוא שוהה בים[25], אך עדיין הן מגבילות לעיתים את קצב ההתיישבות על המבנה, לפחות בשנים הראשונות לקיומו.

כיוון שבתי גידול סלעיים הינם עשירים במגוון מינים בזכות ההטרוגניות המבנית והיציבות שלהם בעת סערות, לעומת בתי גידול חוליים, לאחר הכנסת המבנה המלאכותי הקשיח נמצא לעיתים קרובות עלייה בשפע, בעושר ובמגוון הביולוגי בסקאלה המקומית. תופעה זו מוסברת בשל משיכת דגים לאזור ולבית הגידול החדש. אכן, לאורך זמן, נצפתה התיישבות ניכרת של בעלי חיים על מבנים מלאכותיים רבים. לא תמיד בעלי חיים אלו שוהים במבנה המלאכותי בכל או ברוב מחזור חייהם. כאמור, מבני הגנה חופית מושכים אליהם חברות דגים עשירות ומגוונות. אולם, סקרי אוכלוסיות דגים בשוברי גלים מצאו שעיקר הפרטים הינם צעירים המשתמשים במתקני ההגנה חופית כמקלט עבור שלבי החיים הראשוניים בלבד[27]. יתרה מכך, תהליכי האכלוס של מבנים מלאכותיים אורכים בדרך כלל שנים לא מועטות[28] והם תלויים בגיוס שרשרת הסוקצסיה הטבעית של כל בית גידול.

אך היכן שהאחד מפסיד השני מרוויח ומבני הגנה חופית רבים הפכו לבתי גידול עשירים במינים פולשים אשר מוצאים מפלט ואזור דל בתחרות בסביבה המלאכותית[26,29]. מינים אלו מסוגלים לגדול ואף לשגשג במבני בטון/סלע קשים וחלקים. כניסה של מינים פולשים עלולה ליצור בית גידול שוקק חיים. אולם, במספר מקרים, המינים הפולשים דחקו את המינים המקומיים ולעיתים אף הקטינו את המגוון הביולוגי בסביבת המבנה[26].

בנייה סביבתית

בשל ההשפעות הסביבתיות המשמעותיות של מבני הגנה חופית על הסביבה הימית וכיוון שמגמת הבנייה החופית צפויה להימשך, החשיבות של שילוב שיקולים סביבתיים בבניית מבני הגנה חופית הינה ברורה מתמיד.

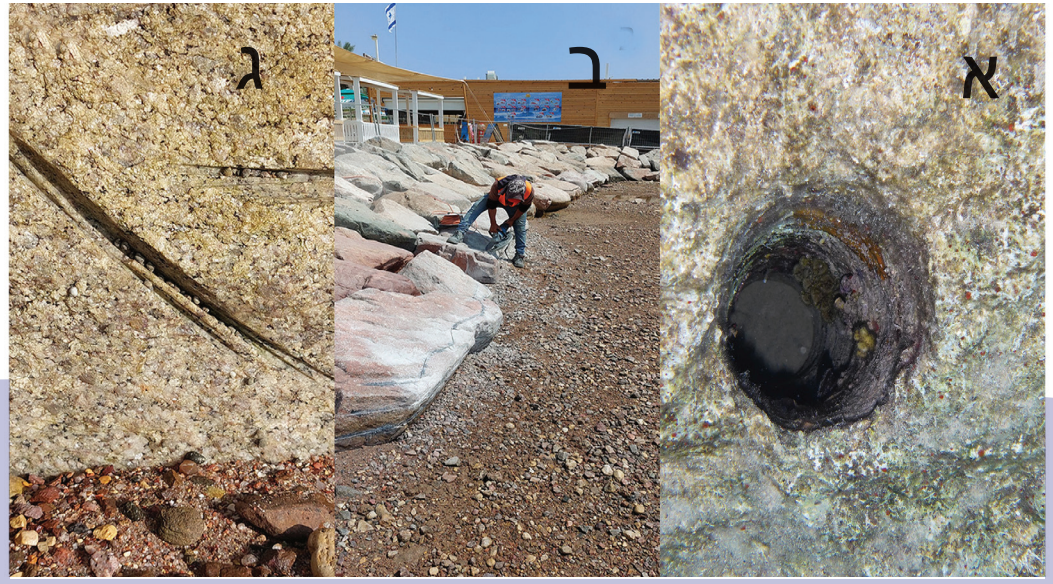
אכן, בשני העשורים האחרונים ישנה עלייה בביקוש לחדשנות ולמחקר בתחום שיפור השירותים האקולוגיים של מבנים אלו לצד צמצום השפעותיהם השליליות על הסביבה הטבעית, כל זאת לצד שימור ושיפור תפקודם ועמידותם של מבנים אלו[30]. חוקרים רבים וחברות הנדסה שונות ניגשו אל משימה זו בשתי גישות עיקריות: חדשנות הנוגעת לבנייה ירוקה של מבני הגנה חופית עתידיים ושיפור מלאכותי של מבנים קיימים.

בנייה ירוקה בים (או שמא בנייה כחולה) כוללת מספר גישות:

- הוספת מורכבות לשטח הפנים של המבנה הימי
- מעבר לפתרונות הנדסיים רכים
- שימוש בתערובות בטון ידידותיות יותר להתיישבות בעלי חיים
- החלפת יחידות במבנה (הקיים או הנבנה) ביחידות ידידותיות לבעלי חיים
- בניית שוברי גלים המעוצבים מראש להיות ידידותיים לבעלי חיים ימיים

הוספת תוספות ומורכבות למבנה ימי

אחד השירותים החשובים של כל בית גידול הינו ביכולתו לגייס אליו אורגניזמים ופרטים מגוונים. אורגניזמים אלו דורשים תנאי מצע ומחיה ייחודיים ולכן מחקרים רבים מתמקדים בשינוי מאפייני פני השטח של היחידות המרכיבות את המבנים ואת שירותיהם. שיטה נפוצה לשינוי מאפייני שטח הפנים הינה דרך יצירת חריצים וחורים שנועדו להוסיף חספוס ומורכבות ליחידות[31] (איור 5).



איור 5. דוגמאות למודיפיקציות (שינויים) פיזיות לפני השטח של יחידות הגנה חופית. א. חור בסלע גרנית שובר הגלים "תור ים" באילת, ישראל. צילום: אלמוג בן נתן ב. הוספה של חריצים לסלעי סוללת ים וגיוס של חלזונות אל החריצים, "חוף קיסוסקי" אילת, ישראל. צילום: נדב ששר. ג. חריצים על סלעי סוללת ים ב"חוף קיסוסקי" אילת, ישראל. צילום: נדב ששר.

יתרונות פתרון זה נעוצים בנגישותו, שכן הוא אינו דורש ייצור ובשל כך גם עלויותיו נמוכות בהשוואה לשיטות אחרות, וניתן ליישמו על פני כל סוג או צורה של מבנה הגנה חופית מעל ומתחת לפני המים.

שיטה נוספת הינה הוספה של אלמנטים מלאכותיים המיועדים להעלאת המורכבות ושיפור יכולת שמירת מים בין משטרי גאות. שיטה זו פותחת פתח לאפשרויות עיצוב ותכנון רבות המנצלות אספקטים שונים (כמו: צורה, עומק, טקסטורה, חומר ועוד) הנמצאים תחת הכותרת הרחבה של "מורכבות". מלבד הוספת מורכבות, מבנים אלו הכוללים לוחיות בטון, אדניות, מבוכים ועוד, הינם בעלי יכולת אגירת מים בין זמני גאות שונים[8]. את האלמנטים הללו ניתן להתקין כיחידות בודדות (לדוגמה, לוחיות קרמיקה מעוצבות) או כ"מרבדים" הכוללים מספר יחידות סמוכות (איור 6).

מבנים שונים הוצעו לשילוב והוספה על גבי שוברי גלים בכדי לייצר בתי גידול לבעלי חיים מקומיים, במיוחד באזורי הכרית[32]. כך עוצבו בריכות שונות אשר בהן מים ייקוו או יעוכבו ויוכלו לשמש בית גידול לבעלי חיים[33]. דוגמה לכך הן בריכות הכרית שמיוצרות על-ידי חברת Econcretetech ומשולבות בשוברי גלים במקומות שונים בעולם[32,34].

עם זאת, בתכנון הוספת מבנים להצבה בשובר גלים, יש לקחת בחשבון גם את התנהגות בעלי החיים שיגויסו. בניסוי שאותו ביצענו באילת, הוספו מבנים לשובר גלים לשם אכלוסם בדגים (איור 6). אולם המתקנים אוכלסו במהרה בדגים טריטוריאליים, *Pomacentrus trichrourus* שוניתן לבן זנב, אשר מנעו התבססות של דגים אחרים.

דוגמה לניסוי העוסק בהוספת אלמנטים למבנה ימי בוצע בנמל סידני על-ידי מעבדת Reefdesignlab שם נבדקו חמש לוחיות במורכבות שונה[35], כחלק מפרויקט Seawalls Living . הלוחיות כללו עיצובים שונים: בקרה (חלקות), חריצים ותעלות, בריכות אגירת מים, תצורת כוורת, ותעלות מעבר. הלוחיות התוקנו על קירות ים באזורי גאות משתנה. אחרי תקופה של 24 חודשים נמצא כי הלוחיות בעלות האלמנטים של מורכבות הכילו מגוון ביולוגי גבוה מזה של לוחיות הביקורת, ושמספר עיצובים אף אוכלסו במינים הנחשבים לנדירים בסביבה הטבעית. בין כל העיצובים העיצוב המוצלח ביותר מבחינת מגוון ועושר מינים היו לוחיות אגירת המים שאיפשרו גדילה של אצות עליהן גם בזמני גאות נמוכה.

איור 6. דוגמאות לאלמנטים בעלי מורכבות. א. ניסוי להעלאת מורכבות בשובר הגלים הרודס אילת, ישראל, בעזרת מתקני בטון המספקים מחסה. צילום: אלמוג בן נתן ב. התקנה של מרבד יחידות בטון בעלות מורכבות של חברת "אקונקריט" מותקנות לצורך הגנה חופית בניו ג'רזי, ארצות הב־ רית. צילום: חברת Econcrete. ג. לוחיות מורכבות של קבוצת "Living Seawallls" על קיר הים בשמורת המנסרים (Sawmillers Reserve), סידני, אוסטרליה. צילום: Alex Goad. ד. בריכת אגירת מים תוצרת חברת "אקונקריט". צילום: חברת Econcrete.

מעבר לפתרונות הנדסיים רכים

בנייה סביבתית מתרכזת תחילה בחומר שממנו נבנים מבנים להגנה חופית, כאשר השאיפה הגורפת הינה להתרחק מבנייה קשיחה ולעבור לפתרונות הנדסיים "רכים"[36]. אחת הסיבות לרצון לעבור להנדסה "רכה" הינה העובדה שבנייה חופית דורשת תחזוקה שוטפת הכוללת החלפת יחידות ותיקון מקטעים. כאשר מדובר במתקן קשיח, עצם פעולת התחזוקה והכלים הנדרשים לכך, יוצרת הפרעה המתרחשת באופן קבוע ומקשה על השיקום הטבעי של בית הגידול[29]. אחד התחליפים "הרכים" ליחידות בטון, הוא שימוש בגיאוטקסטיל (איור 7ג). גיאוטקסטיל הינו חומר חדיר למים עשוי בד פולימר המשמש בבניית דרכים, עבודות נמל, שוברי גלים ועבודות תשתית נוספות. בעבר השימוש העיקרי ליצירת גיאוטקסטיל היו בדים פולימריים סינטטיים לא מתכלים שהיוו סכנת זיהום. כיום נעשה מאמץ לעבור לשימוש בחומרים ידידותיים לסביבה[37]. שימוש בגיאוטקסטיל לשוברי גלים שנוסה בישראל היה בעזרת גיאוטיובות. אלו שקי ענק מלאים בחול אשר מוצבים ליצירת שובר גלים. בישראל הוקם שובר גלים שכזה מול חופי אשקלון ב-2018-2019. גיאוטקסטיל נחשב לפתרון הנדסי "רך" אך בשל הבלאי הגבוה והתחזוקה הגבוהה הנדרשת, החברה להגנות מצוקי החוף רואה בשיטה זו פתרון זמני עד למציאת דרך יציבה יותר להגנה על החוף (**אתר החברה הממשלתית להגנות מצוקי החוף בים התיכון**)[38].

איור 7. דוגמאות לפתרונות מבניים למבני הגנה חופית. א. בניית שובר גלים חדש בנמל תל אביב הישן, ישראל, מיחידות OBS ידידותיות לסביבה. צילום: חברת Ocean Break System. ב. התקנה של יחידות אנטיפרים מתערובות בטון מעודדת התיישבות של חברת "אקונקריט" בנמל חיפה, ישראל. צילום: חברת Econcrete. ג. התקנה של גיאוטיובה בחופי מניטובה (Manitoba), קנדה, בתור דורבן. צילום: Classenc. ד. יחידות בניית מזחים מעוצבות להעלאת מגוון מינים מתוצרת "אקונקריט" בנמל רוטרדם, הולנד. צילום: Christoff Schroll. ה. סלעי לקט כתחליף לסלעי מחצבה. צילום: עמוס גזית.

שימוש בתערובות בטון ידידותיות להתיישבות בעלי חיים

במבנים מודרניים, הנבנים עם שיקולים אקולוגיים, נעשה שימוש בתערובות חלופיות של בטון ידידותי לסביבה. בטון הינו חומר זמין וקל לשימוש עבור מבנים רבים בים וביבשה. אולם, כפי שתואר קודם לכן, ההרכב הכימי של הבטון ותגובתו למי הים יכולים ליצור סביבה בסיסית המגבילה את הגיוס למצע[39].

הסביבה הימית פוגעת בעמידות חומרי בנייה לאורך זמן ולכן מבנים רבים משתמשים בתערובות בטון מותאמות לתנאי הים ולא לתפקוד האקולוגי. אולם, קיימים תוספים שנועדו לחזק את עמידותו של הבטון למרכיבי המים ולמתקפות כימיות. כיום ישנן תוספות חדשות הממלאות, בנוסף לשיפור החוק המכני של הבטון, תפקיד סביבתי. תוספות אלו כוללות:

- Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) – תוסף בטון, מכיל לרוב סילקת קלציום או אלומיניום, המוסיף עמידות מפני שחיקה ואריכות ימים ליחידות בטון. מוריד את רמת פליטת הפחמן הדו-חמצני (הפד"ח).
- Perfluoralkoxy (PFA) – תוסף המוסיף עמידות כימית לתערובות בטון ובכך מצמצם מעבר כימיקליים מהבטון לסביבה הימית[40].
- ECO-P – תוספת שנוצרה על-ידי חברת Econcretetech עבור Arc Marine והיא משמשת כמילוי אינרטי עבור תערובות אפר פחם (Fly Ash-FA)[41].

למרות זאת, מרבית יחידות הבטון הקיימות בים כיום נבנות מבטון פורטלנד ימי (הנפוץ ביותר בבנייה חופית). בטון זה הינו בעל רמת חומציות (pH) גבוהה, הנעה בין 9-13 (כלומר שמדובר בחומר בסיסי), והוכח כדוחה התיישבות. בשל כך הבטון משמש כמצע סלקטיבי עבור מינים אלקליפילים (Alkaliphiles – אורגניזמים החיים בתנאי בסיסיות גבוהים)[34] תערובות מודרניות מחפשות להפחית את רמת הבסיסיות עם מספר תוספי בטון המעורבבים בשלב היצירה ולאחר יציקה:

- יוני מגנזיום – כתחליף ליוני קלציום בתערובת לטובת הורדת רמת האלקליניות בנקבוביות.
- אפר פחם (Fly Ash) – תחמוצת סיליקון, אלומיניום או ברזל עם קלציום המורידה את רמת האלקלי בתערובת[42].
- החלקה בשכבת שעווה – יוצרת שכבה חלקה המכסה את נקבוביות הבטון וממתנת את רמת האלקליניות של הבטון[43].

למרות האמור, בחינה בת שנה של רמות כיסוי ביחידות בטון בנמל בצרפת, הראתה הבדלים מזעריים בין 5 תוספות בטון שונות[44].

מעבר להרכב הכימי, מרקם הבטון מהווה כאמור גורם משפיע על ההתיישבות של אורגניזמים צמודי קרקע ולכן תערובות בטון המכילות בתוכן מרכיבים ייעודיים לעידוד התיישבות נבחנות. שתיים מהשיטות הנפוצות כיום הינן:

- סיבי קנביס – בתור חומר תאית טבעי סיבי צמח הקנביס מייצרים חומר עמיד במיוחד המעודד התיישבות של אורגניזמים ימיים[45].
- קונכיות ושלדים ממוחזרים – חלקי קונכיות או שלדי אלמוגים המדמים את שטח פני הריף ומעודדים בכך התיישבות של אורגניזמים ימיים[46].

שימוש בתערובת שמטרתה להוריד את רמת הבסיסיות ושיפור ההתיישבות נוסתה בנמל חיפה כאשר במהלך פעולת הרחבה הוכנסו יחידות קוביות אנטיפרים (Antifer) מתערובות ידידותיות לסביבה, שנועדו לעודד התיישבות של מינים

צמודי מצע, תוך שינוי פני המצע והוספת נישות חדשות[35,34] (איור 7ב). סקירות תקופתיות (3, 6, 12 ו-24 חודשים) השוו את היחידות האקולוגיות אל היחידות הסטנדרטיות שהותקנו בשובר הגלים במדדים של גיוס ומגוון ביולוגי של מינים בנטיים ומיני דגים. התוצאות הראו העדפה ניכרת ליחידות האקולוגיות במדדי מגוון, שפע ועושר מינים בנטיים.
בהתאמה לכך גם המגוון והשפע של מיני דגים היה גבוה יותר בסביבת היחידות האקולוגיות, כאשר מספר המשפחות היה כמעט כפול. יש לציין כי היחס בין מינים מקומיים למינים מהגרים היה נמוך יותר בקרב האנטיפרים החדשים[35].

החלפת יחידות במבנה (הקיים או הנבנה) ביחידות ידידותיות לבעלי חיים

שוברי גלים וקירות ים בנויים מיחידות החוזרות על עצמן, בין אם אלו סלעים ובין אם אלו יחידות שנוצקו במיוחד. ניתן להחליף חלק מהיחידות במבנה ביחידות שהן עדיפות ביולוגית, או פשוט להוסיף יחידות כאלה על גבי המבנה הקיים[46].
אכן כחלק ממגמת החדשנות בבנייה ירוקה של מבני הגנה חופית פתרונות רבים מוצעים כתחליף בעל רמת מורכבות גבוה ליחידות הבטון והסלע הסטנדרטיות (איור 7).
שוברי גלים רבים נבנים לרוב מסלעי מחצבה. עמוס גזית ז"ל (תקשורת אישית) המליץ להשתמש בסלעי שדה ולא בסלעי מחצבה, ולהעדיף שימוש בסלעי גיר. זאת משום שסלעים שהיו בשדה זמן רב עשירים בחורים ובסדקים היכולים לשמש כבית לדגים ובעלי חיים אחרים. שימוש בסלעים אלו בשוניות מלאכותיות בקורסאו, אכן הביא לגיוס מהיר של דגים (איור 7ה).
גישה אחרת היא ביצירת יחידות אינטגרליות למבנה הימי הכוללות התאמות אשר יעודדו התיישבות של בעלי חיים. הכוונה כאן היא ליחידות כגון אנטיפרים, טטרפודים, עמודים וכד' הדרושים לבנייה אך נבנים בהתאמה[34,35]. כך למשל עוצבו עמודים בעלי מורכבות חיצונית גבוהה לתמיכה בגשרים מעל ובתוך נהר ההדסון[35].

בניית שוברי גלים המעוצבים מראש להיות ידידותיים לבעלי חיים ימיים

במספר מקרים שוברי גלים וקירות ים הפכו לבתי גידול המשתווים במגוון ובשפע הביולוגי לבתי גידול טבעיים שכנים[47,48]. ברוח זו נעשה שימוש בשוברי גלים שנועדו מראש, כחלק מתפקידם, לשמש בית גידול לבעלי חיים ימיים. לשם כך, אותם שוברי גלים נבנים מיחידות המשמשות כשוניות מלאכותיות המספקות מורכבות ומחסה. דוגמה לכך הינה שימוש ביחידות Reef-Balls™ (RB) (Reefbeach) לבניית סדרת שוברי גלים מול רצועת חוף המשמשת מספר בתי מלון ברפובליקה הדומיניקנית ב- 1998[49]. RB הן יחידות בטון הבנויות בצורת כיפה חלולה עם מספר חורים רחבים המספקים כניסה ויציאה אל ולתוך המבנה, שנועדו לאזורים בעלי משרעת גאות/שפל קטנה ועוצמת גלים נמוכה. כחלק מניסוי, 450 יחידות כאלה שימשו כמרכיב העיקרי של שוברי גלים. לאחר תקופת בחינה של שלוש שנים, שכללה סופת הוריקן, שוברי הגלים לא רק סיפקו בית גידול מלאכותי אלא גם הצליחו לצמצם את שחיקת החוף לעומת חופים שכנים ללא מתקן הגנה חופי. על אף ההצלחה בצל הסופה, מתקנים אלו לא נועדו לעוצמות גבוהות ולכן יש חשיבות בהתאמת המוצר לתנאי השטח.
דוגמה נוספת ניתן למצוא בסטטן איילנד, ניו יורק, ב"שובר גלים החי" (Living breakwater)[50]. לאחר סופות ההוריקן "קטרינה" ו"סנדי" משרד הבינוי והפיתוח העירוני בארה"ב יצא בקול קורא להצעות עבור שיקום וחיזוק

קו החוף באזור. פרויקט של קבוצת SCAPED ל"בניית שובר גלים חי" נבחר בשל השילוב בין פתרונות הנדסיים, אקולוגיים וחברתיים[51]. טרם תחילת הבנייה בוצעה סקירה מקדימה של תנאי השטח והאקוסיסטמה המקומית במטרה לצמצם את הפגיעה הסביבתית בתהליך הבנייה ולאחריה. קו החוף בניו יורק הינו מגוון בשטחי גאות ושפל וביצות, ולכן דרש מהמתכנן מבחר פתרונות הנדסיים וסביבתיים כאחד. בהתאם לכך אומץ שימוש במגוון פתרונות, כגון: בנייה של קירות ים מוגבהים, שוברי גלים הבנויים מאנטיפרים ובריכות אגירת מים, ואף פתרונות היברידיים המשלבים חומרים טבעיים והנדסיים. אחד הקווים המנחים בפרויקט זה היה, מלבד שמירה על הטבע הקיים, לשקם את החי לאורך קו החוף. "שובר הגלים החי" מכיל אמצעי שיקום של אוכלוסיית הצדפות והדגה הצעירה המקומית בעזרת "כלובי צדפות", מחסות מלאכותיים, ובריכות אגירת מי ים.

מלבד השיקול ההנדסי והאקולוגי, פרויקט "שובר גלים חי" חרט על דגלו שילוב של האוכלוסייה המקומית במטרה לייצר חיבור ומוטיבציה מקומית לשמירה על הטבע. פעילויות ופרויקטים מרוכזים בשטח ובכיתות תהליך הבנייה והניטור שלאחר הבנייה עירבו את חברי הקהילה המקומית בתהליכי בניית השובר[51]. כיום "שובר הגלים החי" עומד כדוגמה לשילוב פתרונות ירוקים לצד צרכים אורבניים בצורה שתיטיב עם הסביבה והאדם. כך כללים והנחיות בשלבי התכנון כמו גם תקינה או הנחיה ממשלתית אכן מאפשרים שילוב כלים ירוקים בבנייה בימים שבהם יש אפשרות לקיום בר-קיימה (sustainable ecology) בין אוכלוסיית האדם הגדלה והחיים בקו החוף.

הנחיות ותקנים בהקמת מתקני הגנה חופית ושוברי גלים

סיכוייהם של כלל הפתרונות שהוצגו להשתלב בפרויקט בנייה/שיקום של מבנה ימי תלויים ברצון/בצורך המזמין. פרויקטים מקומיים של בנייה ימית והרחבת תשתיות אורבניות חופיות, נקבעים ומבוצעים במרבית המקרים על-ידי גורמי שלטון מקומיים או בעלי עניין. מועצות, ועדות, בעלי ממון ועוד נמנים עם מקבלי ההחלטות בפועל. במקרים כאלו של "רודנות ההחלטות הקטנות", שיקולים סביבתיים מקבלים לרוב משקל נמוך לעומת שיקולים פיננסיים ופוליטיים[52]. מחקר שנעשה בחוף הצפוני באירלנד מצא שחלק ממבני ההגנה החופית (שוברי גלים וקירות ים) נבנו ללא תכלית וללא יכולת השפעה מעשית על הסביבה. לאחר בדיקה התברר שמבנים אלו נבנו מתוך לחץ ציבורי וקבלת החלטות לא מלומדת[51]. זאת על אף העלייה במודעות הסביבתית בעשור האחרון[53] ובמאמץ הציבורי/מחקרי לשלב שיקולים ובנייה סביבתית, כמו בנייה המבוססת על הטבע (Nature based solutions). באין קווים מנחים ותקנות מחייבות, רצון זה נופל לעיתים קורבן לשיקולים כלכלים ופוליטיים מקומיים. במדינת ישראל, פרויקטי בנייה משמעותיים בחופים, כגון הרחבת נמלים או הגנת מצוקי החוף, מבוצעים על-ידי רשויות ממשלתיות. אולם גם אלו נתונות ללחצים כלכליים רבים. כדי להתמודד עם הבעיה, מספר מדינות וגופים בינלאומיים מקדמים מסמכי מדיניות שנועדו לבסס ולדרוש התחשבות בשיקולים אקולוגיים וסביבתיים.

הלך הרוח של מדיניות זו דוגל במעבר מבנייה אפורה (תעשייתית-קלאסית) לבנייה ירוקה (סביבתית)[53]. המדרג "אפור-ירוק" נועד לספק למתכנן פתרונות מעשיים לצד שיקולים אקולוגיים של שיקום ושמירה על הסובב הימי ובמיוחד על המגוון הביולוגי (Net Gain Biodiversity). מספר מדינות וארגונים בינלאומיים הוציאו מסמכי מדיניות שמטרתם לספק הנחיות העוסקות ישירות או המשיקות לתחום הפיתוח החופי.

להלן מספר צווים ודוחות שאומצו בזירה האירופאית:

- EU Environmental Impact Assessment (EIA) Directive (85/337/EEC) –הערכה של נזקים סביבתיים הנגרמים על-ידי פרויקטים ציבוריים ופרטים שהתקבל על-ידי האיחוד האירופאי[54].
- Birds Directive (79/409/EEC) – חקיקה המחייבת את מדינות האיחוד האירופאי לפעול לטובת הגנה, שמירה ושליטה על אזורי מחיה של מיני ציפורים מקומיים, כולל ציפורי חוף וים[55].
- Habitats Directive (92/43/EEC) – הרחבה של החוק הקודם המחייב מדינות חברות לאכוף מדיניות שמירה נוקשה באזורים מוגנים ומחוצה להם[56].
- Integrated Coastal Zone Management (2002/413/EC) – קריאה לאיזון צרכים סביבתיים, כלכליים, חברתיים, תרבותיים ותיירותיים במסגרת המגבלות שנקבעו על-ידי הטבע, כלומר בתחומי הטבע ולא בתחום האורבני[57].
- EU Marine Strategy Framework Directive (2008/56/EC) – מדיניות חקיקה שנועדה להגן על הסביבה הימית. החקיקה כוללת שימוש בשיטות תלויות אקוסיסטמה וניהול פעילות אנושית כדי לשמר מצב בר-קיימה עבור האוכלוסייה האנושית והסביבה הימית[58].

בין מובילות התנועה לשינוי חקיקתי/מדיני בבנייה ימית נמצאות מדינות כמו הולנד, איטליה, ארה"ב ובריטניה. בבריטניה, הושקה ב-2018 תוכנית 25 Year Environment Plan (25YEP) שנועדה לבסס את התנאים הפיננסיים והחוקתיים לפיתוח ושמירה על קו החוף הבריטי דרך שילוב בין פתרונות אפורים וירוקים[59]. בכנס ה-COP15 של האו"ם אומצה תוכנית ה-25YEP של בריטניה[59]. בכך יצרו מערכת עולמית הנבנית דרך אימוץ מסקנות והמלצות של גופים אחרים. לדוגמה, ארגון ה-OSPAR המאחד מספר מדינות צפון אטלנטיות אימץ מספר המלצות ומסקנות של האו"ם בנוגע לבנייה אורבנית בקו החוף[60].

מדינת ישראל אימצה גם היא חלק מהמלצות ומדיניות הבנייה האפורה-ירוקה, לצד מדיניות מקומית שנועדה לשמור על קו החוף הישראלי. בתוכנית המתאר הארצית (תמ"א) 13 נקבע כי "חוף הים הוא נחלת הכלל" וזאת במטרה להגן על קו החוף מיזמים פרטיים והתרחבות יתרה של מועצות. ב-2004 חוקק "חוק שמירת הסביבה החופית" (התשס"ד 2004 www.gov.il) שמטרתו הינה להגן על הסביבה הטבעית ואוצרות הטבע המקומיים לטובת ולתועלת הציבור הרחב על-ידי הגדרת מגבלות על בנייה חופית. החוק, שאינו חל על חופי ים המלח, קובע כי תחום חוף הים שהם 100 מטר מקו המים אל תוך החוף ובים עד לעומק 30 מ' הינם שטח אסור לבנייה חדשה, וכי בנייה במרחק 300 מטר מקו החוף דורשת אישור מיוחד. עם זאת החוק מאפשר בנייה בהיתר חריג או סביב מתקני תשתית, נמלים ומתקנים ביטחוניים – החרגה אשר כמעט אינה מגבילה את בניית הגנות חופיות.

בהתאם למדיניות הבנייה האפורה-ירוקה שיקולים סביבתיים אכן הולכים ונכנסים להנחיות בנייה חופית בישראל. דוגמה לכך ניתן למצוא בתוכנית "שימור מצוקי חוף נתניה קטע סירנות – ארגמן" (תוכנית מס': 408-0153510). בכתב ההצעה, מצוין כי תכנון הבנייה מחויב להתבצע בהתאם לתקן העולמי וההחלטה על פתרון ההגנה חופי תלוי בסקרים מקדימים ובדוחות סביבתיים. יתרה מכך, בכתב ההצעה אף מומלץ לבחון את השימוש בשוברי גלים או בגיאוטיובות, וכן בבנייה קלה.

קו החוף הישראלי הינו בעל ערך גבוה ויזמים ועיריות יחדיו ממשיכים לקדם תוכניות פיתוח והרחבה על רצועות החוף. כדוגמה, חמש מרינות חדשות מתוכננות להיפתח באשדוד, אשקלון, הרצליה, תל אביב, חיפה ועכו. לשם הגדלה ובניית מרינות חדשות תידרש בניית מקטעי שוברי גלים נוספים. אולם, נכון לכתיבת מאמר זה, אפריל 2024, אין עדיין בישראל תקנה מחייבת לשימוש בבנייה "ירוקה" או המעודדת את החברה הימית בבנייה החופית.

ללא שינוי בהנחיות ובתקנה שתחייב שימוש בפתרונות ירוקים, רבים מהפרויקטים נוטים לפתרונות אפורים מיושנים בשל עלותם הנמוכה, והניסיון ארוך השנים בהם, בהשוואה לפתרונות עדכניים[1]. גיוס כספים נותר אחד הגורמים המקבילים בבנייה ירוקה. כדי להתמודד עם בעיה זו חלק נכבד ממסמכי המדיניות כוללים התייחסות לתקצוב ותגמול עבור בנייה ירוקה[61] (כפי שהוזכר בתוכנית YEP25 בבריטניה).

כלל השיטות המוצעות עונות בצורה כזו או אחרת על העיקרון המנחה שהוא הרחבת שירותי המערכת שתשתיות הגנה חופית מספקות, ללא הפרעה לשימוש ההנדסי המקורי שלהם (עגינת כלי שיט, הגנה חופית או כל פעילות תעשייתית או עירונית אחרת). שילוב עקרונות של הנדסה אקולוגית בתכנון ובבנייה של תשתיות חופיות וימיות מעלה את ערכן האקולוגי. יחידות אקולוגיות חדשות משפרות את איכות המים במעגנות ובנתיבי השיט. אלמנטים מוסיפי מורכבות מלאכותית יוצרים אזורי מסתור לדגים ולחסרי חוליות שמאפשרים הגנה להם ולצאצאיהם. חריצת חריצים וקדיחת חורים משנה את פני השטח של מבני הגנה חופית ובכך מקנה בית גידול הדומה בקצת לזה המאפיין בתי גידול חופיים טבעיים[62]. עם זאת, בכל ההתאמות האקולוגיות, יש להקפיד כי לא ייפגע השימוש המקורי, העיקרי של המבנה כגון הגנה על מתקני חוף, וכי ההתאמות השונות לא יפחיתו משרידותו בתנאי הים השוררים במקום.

מעבר מאפור לירוק – עתיד אפשרי

בנייה חופית הינה חלק בלתי נפרד מההתפתחות של אוכלוסיית האדם ברחבי העולם. הבנייה החופית התפתחה והתקדמה לאורך השנים לטובת שיפור יכולת ההגנה לאורך זמן על המשאבים האנושים, כגון תעשייה, פנאי ומגורים. העלייה בביקוש לאזורי החוף ובשווי הכספי של מגורים על החוף מספקת תמריץ כלכלי להגנת החופים וכל אשר עליהם. עם זאת, לאור תהליכים גלובליים הכוללים גידול בתדירותן ובעוצמתן של סופות ימיות, הצורך במבנים חדשים ועמידים יותר מקודמיהם יוצר דרישה להמשך פיתוח והרחבה של מבני הגנה חופית.

בנייה חופית מכילה את הסיכון בקיבוע שינויים סביבתיים למשך עשרות שנים. בזכות עמידותם ההיסטורית ופיתוח כלים ושיטות בנייה מתקדמות, מתקני הגנה חופית רבים הופכים להיות, מרגע הקמתם, לחלק בלתי נפרד מקו החוף. נדירים מאוד הם המבנים הימיים אשר הוצאו מהים, זאת גם במקרים שבהם השימוש שלהם כבר הסתיים או כאשר ההשפעה הסביבתית השלילית שלהם הוכחה. הצרת חופים, הרחקת מינים מקומיים וזיהום ימי הינם חלק קטן מההשפעות השליליות שנידונו במאמר זה. תופעות שכאלו משנות בתי גידול ופוגעות באינטרסים הסביבתיים והאנושים כאחד.

מתוך הכרה ברצון והצורך לחיות ולהתקיים ממשאבי הטבע הנמצאים על קו החוף או בקרבתו (חופי רחצה, דגה, חקלאות ימית ועוד), מתפתחת הבנה בקרב מתכננים, חוקרים ומהנדסים ששיקולים אקולוגיים וסביבתיים צריכים לקבל משקל נכבד בתכנון ובתחזוקה של מבני הגנה חופית. מחקרים שנעשו בעשורים האחרונים וכאלו המתנהלים

כיום מפנים יותר ויותר תשומת לב אל ההשפעות הסביבתיות של בנייה חופית ואל דרכים לצמצם את פגיעתם. עם זאת כל שינוי תפיסתי צריך להיות מלווה ומגובה בשינוי חוקתי המחייב מתכננים ויזמים פרטיים וציבורים כאחד לפעול תחת התחשבות בהשפעות סביבתיות. כאמור, כיום החוק בארץ אומנם מקשה על הבנייה לאורך קו החוף, אך אינו עוצר אותה. בנוסף, על אף שהחוק מכיר בפגיעה האפשרית ברצועת החוף ובסביבה הימית, החוק אינו נותן מענה לאופי הבנייה. בעוד שהחוק בישראל דורש מכל פעילות אחרת לצמצם את ההשפעה על הסביבה, הוא גם מסייג את נושאי הבנייה ומפנה לחוק התכנון והבנייה. ללא התאמה ודרישה של בנייה כזו בתקנות ובחקיקה ברמה המקומית והארצית, הבנייה העתידית של מתקני הגנות החוף עלולה לחזור ולהשתמש בשיטות המיושנות והמוכרות אשר הן פוגעניות לסביבה הימית.

שיטות ופתרונות שונים מפותחים, באופן שוטף, לשיפור שירותי המערכת וההתאמות הסביבתיות של הבנייה הימית. אלו נחלקים ל: א) שיפור מתקנים קיימים, כגון הגדלת מורכבות פני השטח, או תוספות של יחידות וציפויים מעוצבים להגברת התפקוד הביולוגי ו- ב) בנייה מותאמת סביבה במהלך הקמת המבנה. גם כאן מדובר לעיתים בתוספת של יחידות מעוצבות או בכיסוי פני השטח, אך לעיתים גם בשימוש בבנייה רכה, שימוש בחומרים ידידותיים לסביבה, או עיצוב המבנה כולו כך שבנוסף לתפקידו ההנדסי הוא יוצר בית גידול ימי עשיר (דוגמת המזח בנמל תל אביב).

הידע הקיים והמתפתח וההבנה המתרחבת של הגורמים המשפיעים ומעודדים התיישבות של מינים צמודי מצע וגיוס של מינים ניידים (כגון, דגים) אל מתקני הגנה חופית, מהווים את חזית הידע של הבנייה הימית. שימוש מושכל באמצעים אלו מציג הזדמנות ייחודית, הפיכת בנייה והתערבות שהיא נטל על הסובב – לנכס סביבתי ארוך טווח.

תודות

פרק זה מוקדש לזכרם של: שחר גל קדמן, איש טבע, מדע וטוב לב (1989-2023), ועמוס גזית – איש ים וחזון. (1949-2024).

רשימת מקורות

1. Bruun, P. Developments in geotechnical engineering. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands (https://doi.org/10.1016/b978-0-444-42391-7.50010-8 (1985).
2. Facts & figures - Med Sea Alliance. Med Sea Alliance https://www.medseaalliance.org/resources/facts-figures. (2021)
3. Lansu, E. M. et al. A global analysis of how human infrastructure squeezes sandy coasts. *Nat. Commun.* **15**, 432 (2024). https://doi.org/10.1038/s41467-023-44659-0
4. Rao, N. S. Ghermandi, A. Portela, R. & Wang, X. Global values of coastal ecosystem services: A spatial economic analysis of shoreline protection values. *Ecosyst. Serv.* **11**, 95–105 https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.11.011 (2015).

5. Mejjad, N. Rossi, A. & Pavel, A. B. The coastal tourism industry in the Mediterranean: A critical review of the socio-economic and environmental pressures & impacts. *Tour. Manag. Perspect.* **44**, 101007 https://doi.org/10.1016/j.tmp.2022.101007(2022).
6. Neumann, B. Vafeidis, A. T. Zimmermann, J. & Nicholls, R. J. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding-a global assessment. *PLoS One* **10**, e0118571 https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571(2015).
7. אודיש, י. ופליישמן, ל. השפעת הנוף על שווין של דירות מגורים. לשכת השמאות הממשלתית (2006).
8. Sella, I. et al. Design, production, and validation of the biological and structural performance of an ecologically engineered concrete block mattress: A Nature-Inclusive Design for shoreline and offshore construction. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 18, 148–162 https://doi.org/10.1002/ieam.4523 (2021).
9. מורן, מ. זה לא אותו הים: לאפשר או למנוע בנייה בחופי ישראל? גלובוס https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001066559 (2015).
10. Nicholls, R. J. & Cazenave, A. Sea-Level rise and its impact on coastal zones. *Science* **328**, 1517–1520 https://doi.org/10.1126/science.1185782 (2010).
11. החברה הממשלתית להגנת מצוקי חוף הים התיכון בע"מ. https://www.mccp.co.il/page.php?type=projectsGroups
12. Foti, E., Musumeci, R. E. & Stagnitti, M. Coastal defence techniques and climate change: a review. *Rend. Lincei Sci. Fis. Nat.* **31**, 123–138 https://doi.org/10.1007/s12210-020-00877-y (2020).
13. ששר, נ. ושליו, ש. בניה ומבנים מלאכותיים בחופי הים של ישראל. בתוך: הוד הים: יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל (עורכת: סטמבלר, נ.) (2014).
14. Schoonees, T., et al. Hard structures for coastal protection, towards greener designs. *Estuaries Coasts* **42**, 1709–1729 https://doi.org/10.1007/s12237-019-00551-z (2019).
15. Coastal Engineering Research Center. Shore protection manual. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center (1984).
16. Dai, J., Wang, C. M., Utsunomiya, T. & Duan, W. Review of recent research and developments on floating breakwaters. *Ocean Eng.* **158**, 132–151 https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.083 (2018).
17. De Graauw, A. Ancient port structures. Méditerranée/MeDiterranéE https://doi.org/10.4000/mediterranee.12715 (2022).
18. Bakker, P. et al. Development of concrete breakwater armour units. Presented at the 1st coastal estuary and offshore engineering specialty conference of the canadian society for civil engineering, (June 2003).
19. Muttray, M. & Reedijk, B. Design of concrete armour layers. Hansa Int. Marit. J. 6, 111-118 (2009).

20. Connell, S. D. & Glasby, T. M. Do urban structures influence local abundance and diversity of subtidal epibiota? A case study from Sydney Harbour, Australia. *Mar. Environ. Res.* **47**, 373–387 https://doi.org/10.1016/S0141-1136(98)00126-3 (1999).
21. Barbier, E. B. Georgiou, I. Y. Enchelmeyer, B. & Reed, D. J. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol. Monogr.* **81**, 169–193 https://doi.org/10.1890/10-1510.1(2011).
22. Bishop, M. J. et al. Effects of ocean sprawl on ecological connectivity: impacts and solutions. J. *Exp. Mar. Biol. Ecol.* **492**, 7–30 https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.01.021 (2017).
23. צביאל, ד. וחובריו השפעת תהליכים טבעיים ופעילות האדם על חופי הרחצה החוליים של ישראל בים התיכון. *אקולוגיה וסביבה* **5**, 84-85. (2022 https://magazine.isees.org.il/?p=15818).
24. Masucci, G. D., Acierno, A. & Reimer, J. D. Eroding diversity away: Impacts of a tetrapod breakwater on a subtropical coral reef. *Aquat. Conserv.* **30**, 290–302 https://doi.org/10.1002/aqc.3249 (2019).
25. Feng, Y., Yang, J. & Zhang, P. Effects of carbonation curing regimes on alkalinity of self-compacting concretes for marine artificial reef. *Constr. Build. Mater.* **369**, 130614 https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130614 (2023).
26. Melchers, R. E. Carbonates, Carbonation and the durability of Reinforced Concrete Marine Structures. *Aust. J. Struct. Eng.* **10**, 215–226 https://doi.org/10.1080/13287982.2010.11465046 (2010).
27. Airoldi, L., et al. An ecological perspective on the deployment and design of low-crested and other hard coastal defence structures. *Coast. Eng.* **52**, 1073–1087 https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.09.007 (2005).
28. Svane, I. & Petersen, J. K. A Review of the Problems of Epibioses, Fouling and Artificial Reefs, a Review. *Mar. Ecol.* **22**, 169–188 https://doi.org/10.1046/j.1439-0485.2001.01729.x (2001).
29. Fowler, A. M. & Booth, D. J. Seasonal dynamics of fish assemblages on breakwaters and natural rocky reefs in a temperate estuary: consistent assemblage differences driven by Sub-Adults. *PLoS One* **8**, e75790 https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075790 (2013).
30. Masucci, G. D., Acierno, A. & Reimer, J. D. Eroding diversity away: Impacts of a tetrapod breakwater on a subtropical coral reef. *Aquat. Conserv.* **30**, 290–302 https://doi.org/10.1002/aqc.3249 (2019).
31. Strain, E. M., et al. Eco-engineering urban infrastructure for marine and coastal biodiversity: Which interventions have the greatest ecological benefit? *J. Appl. Ecol.* **55**, 426–441 https://doi.org/10.1111/1365-2664.12961(2017).
32. Firth, L. B. et al. Between a rock and a hard place: Environmental and engineering considerations when designing coastal defence structures. *Coast. Eng.* **87**, 122–135 https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.015 (2014).
33. Krasna, R. & Rella, A. Nature-inclusive shoreline protection installed in San DiegoASCE https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/article/2023/10/nature-inclusive-shoreline-protection-installed-in-san-diego. (2023).

34. Naylor, L. A., Venn, O., Coombes, M. A., Jackson, J. & Thompson, R. C. Including ecological enhancements in the planning, design and construction of hard coastal structures: A process guide. Report to the Environment Agency (PID 110461). University of Exeter(2011) .
35. Ido, S. & Shimrit, P.-F. Blue is the new green – Ecological enhancement of concrete based coastal and marine infrastructure. *Ecol. Eng.* **84**, 260–272 https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.016 (2015).
36. Bishop, M. J., Vozzo, M. L., Mayer-Pinto, M. & Dafforn, K. A. Complexity–biodiversity relationships on marine urban structures: reintroducing habitat heterogeneity through eco-engineering. *Philos. Trans. R. Soc.* B **377**, 20210393 https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0393 (2022).
37. Masria, A., Iskander, M. & Negm, A. Coastal protection measures, case study (Mediterranean zone, Egypt). *J. Coast. Conserv.* **19**, 281–294 https://doi.org/10.1007/s11852-015-0389-5 (2015).
38. החברת הממשלתית להגנת מצוקי חוף הים התיכון בע"מ. https://www.mccp.co.il/page.php?type=projectsGroups.
39. Prambauer, M., Wendeler, C., Weitzenböck, J. & Burgstaller, C. Biodegradable geotextiles – An overview of existing and potential materials. *Geotext. Geomembr.* **47**, 48–59 https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.09.006 (2019).
40. Hosseinzadeh, N et al. Concrete seawalls: A review of load considerations, ecological performance, durability, and recent innovations. *Ecol. Eng.* **178**, 106573 https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106573 (2022).
41. McManus, R. S., Archibald, N., Comber, S., Knights, A. M., Thompson, R. C. & Firth, L. B. Partial replacement of cement for waste aggregates in concrete coastal and marine infrastructure: A foundation for ecological enhancement? *Ecol. Eng.* **120**, 655–667 https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.062 (2018).
42. Kenny, A. & Rozovsky, E. O. Six-Year-Old ecological concrete in a marine environment: a case study. Sustainability **15**, 13780 https://doi.org/10.3390/su151813780 (2023).
43. Yi, Y., Zhu, D., Guo, S., Zhang, Z. & Shi, C. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cem. Concr. Compos.* **113**, 103695 https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695 (2020).
44. Li, S., Yin, J., Zhang, G. & Gao, T. Research on reducing alkalinity of an ecological porous concrete mixture with carbonization. *Mater. Tehnol.* **53**, 575-581(2019).
45. Dennis, H. D., Evans, A. J., Banner, A. J. & Moore, P. J. Reefcrete: Reducing the environmental footprint of concretes for eco-engineering marine structures. *Ecol. Eng.* **120**, 668–678 https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.031 (2018).

46. Lapinski, M., Perrot, M. & Sauleau, P. Can port concrete infrastructures be optimized to promote algal and macrofaunal colonisation in the marine intertidal zone? Case study of Port Haliguen (Brittany, France). *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **1245**, 012001 (2022). https://doi.org/10.1088/1757-899X/1245/1/012001
47. Viyakarn, V., Chavanich, S., Raksasab, C. & Loyjiw, T. New coral community on a breakwater in Thailand. *Coral Reefs* **28**, 427 (2009).
48. Wen, C. K.-C., Chen, K.-S., Hsieh, H. J., Hsu, C.-M. & Chen, C. A. High coral cover and subsequent high fish richness on mature breakwaters in Taiwan. *Mar. Pollut. Bull.* **72**, 55–63 https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.04.031 (2013).
49. Harris, L. E. & Woodring, M, P. Artificial reefs for submerged and sub-aerial habitat protection, mitigation, and restoration. https://aquadocs.org/handle/1834/29510 (2003).
50. Living Breakwaters - SCAPE. SCAPE https://www.scapestudio.com/projects/living-breakwaters/ (2024).
51. Moosavi, S. Ecological Coastal protection: Pathways to living shorelines. Procedia Eng. **196**, 930–938 https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.027 (2017).
52. Cooper, J. A. G., O'Connor, M. C. & McIvor, S. Coastal defences versus coastal ecosystems: A regional appraisal. *Mar. Policy* **111**, 102332. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.02.021 (2020).
53. Directive - 85/337 - EN - Environmental Impact Assessment (EIA) - EUR-LEX. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31985L0337 (1985).
54. Directive - 1979/409- EN - Conservation of wild birds - EU monitor. https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j4nvk6yhcbpeywk_j9vvik7m1c3gyxp/vitgbggthkxt (1979).
55. Directive - 92/43 - EN - Habitats Directive - EUR-Lex. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31992L0043 (1992).
56. Directive - 2002/413 - EN - Integrated Coastal Zone Management - EUR-LEX. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32002H0413 (2002).
57. Directive - 2008/56 - EN - EU Marine Strategy Framework Directive - EUR-LEX. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/56/oj (2008).
58. Singhvi, A., Luijendijk, A. P. & Van Oudenhoven, A. P. E. The grey – green spectrum: A review of coastal protection interventions. *J. Environ. Manag.* **311**, 114824 https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114824 (2022).
59. Chaplin, L. The 15th Biodiversity Conference. Soc. Law. **92**, 30–332023)).
60. OSPAR Commission. QSR 2010 - Other Human Uses and Impacts - Land reclamation, coastal defence and other structures https://qsr2010.ospar.org/en/ch09_05.html (2010).
61. סלע, ע. פרקול-פינקל, ש. חושבים ירוק בונים כחול – השבחה אקולוגית של תשתיות ים וחוף - *אקולוגיה וסביבה* **5**, 10-13 (2014). https://magazine.isees.org.il/?p=15800 .

13 מגמות ארוכות טווח של השפעת שינויי אקלים ורמות מזהמים בסביבה הימית - מממצאי הניטור הלאומי של ישראל

ברק חרות, טל עוזר, יעל סגל, איזק גרטמן, אלי ביטון, איה לזר, רון גולדמן, ג'ק סילברמן, ירון גרטנר, הגר האוזר, גיא סיסמה-ונטורה, איל רהב

חקר ימים ואגמים לישראל, המכון הלאומי לאוקיינוגרפיה

barak@ocean.org.il,
tal@ocean.org.il,
ron@ocean.org.il,
ayahlazar@ocean.org.il,
jacobs1@ocean.org.il
elib@ocean.org.il,
yaron@ocean.org.il,
yael_segal@ocean.org.il,
isaac@ocean.org.il,
hagarh@ocean.org.il,
guy.siv@ocean.org.il,
eyal.rahav@ocean.org.il

תקציר

אגן הלבנט בדרום מזרח הים התיכון, המאופיין כמערכת אקולוגית רגישה, חשוף להשפעה משולבת של שינויי האקלים ופעילויות אנטרופוגניות (מעשה ידי אדם) מסוגים שונים, ובכלל זה זיהום ים. פרק זה מציג מגמות ארוכות טווח של שינויים, הקשורים בהשפעות שינויי אקלים והחדרת מזהמים לשפכי הנחלים ומימי החופין של ישראל בים התיכון, משנות ה-80 של המאה ה-20 ועד 2022. המידע שמוצג נאסף במסגרת הניטור הלאומי של ישראל בים התיכון. מוצגות דוגמאות של שינויי טמפרטורה, מליחות וחומציות, שנמדדו כולם במי הים, וכן שינויים במפלס מי הים, הקשורים בהשפעת שינויי האקלים. כמו כן, מובאות דוגמאות של שינויים ברמת המתכות הכבדות וחומרי הדשן (נוטריינטים) במרכיבי מערכת מימי החופין ושפכי נחלי החוף. מבחינת שינויי האקלים – בעשורים האחרונים ניכרת עלייה משמעותית של מפלס פני הים, טמפרטורה, מליחות וחומציות מי הים. בחלק מהמדדים קצב השינוי גבוה בהשוואה לממוצע הגלובלי באוקיינוסים. מבחינת שינויים ברמות מזהמים במימי החופים ושפכי הנחלים, בניגוד למגמת הירידה ברמות המזהמים שנצפתה עד לסיום האלף הקודם, בשנים האחרונות ניכרת עלייה בחלק מהמזהמים. במיוחד נצפית עלייה ברמות כספית וקדמיום בקרקעית שפך נחל הקישון, עלייה בריכוזי כספית בדגים חופיים מצפון מפרץ חיפה ועלייה בריכוז הנוטריינטים בחלק משפכי נחלי החוף. בולטת חריגת ריכוז כספית ביחס לתקן, שנמצאה בכ-30% מהדגים החופיים שנאספו בשנים האחרונות בצפון מפרץ חיפה. המצב הנוכחי של איכות המים בשפכי נחלים חריג ועומד על רמה בינונית עד חמורה, לפי המדדים של זיהום אקולוגי המוצעים בפרק זה. הממצאים המוצגים בפרק מלמדים שבעשור האחרון אין מגמת שיפור ברמות המזהמים ובחלקן יש אף החמרה, וכן ניכרת מגמת עלייה משמעותית בכל המדדים הקשורים בשינויי האקלים. שילוב מגמות אלה משפיע לרעה על המערכת האקולוגית באגן הדרום מזרחי של הים התיכון.

מבוא

במהלך העשורים האחרונים נצפו שינויים דרמטיים במים הלאומיים והכלכליים של ישראל בים התיכון, במדף היבשת הרדוד ולאורך כ-190 ק"מ של חופי ישראל. שינויים אלה קשורים בהשפעות: 1) שינויי אקלים, במיוחד התחממות, המלחה, החמצה ועליית מפלס הים; 2) פתיחת תעלת סואץ בשנת 1873, שגרמה במיוחד למעבר של מאות מינים פולשים/אינודפסיפיים לים התיכון; 3) הפעלת סכר אסואן בנהר הנילוס בשנת 1965, שגרמה לחסימה של הסעת סדימנטים דקים ונוטריינטים בעת שיטפונות למדף היבשת של ישראל; 4) פעילות אנושית (אנטרופוגנית) במרחב הימי של ישראל.

המרחב הימי של ישראל בים התיכון הפך למשאב המרכזי של אנרגיה ומי שתייה באמצעות הפקת גז טבעי בים העמוק ותחנות כוח, והקמת מתקני התפלה של מים ים לאורך החופים. תהליך הפיתוח ממשיך באופן אינטנסיבי בהקמת מתקני התפלה נוספים, גידול בהיקף התעבורה הימית לאחר הקמת נמלים חדשים נוספים בחיפה ובאשדוד, המשך קידוחי חיפוש גז והנחת תשתיות נלוות, מוצאים ימיים להזרמת שפכים ותמלחות, תכנון לפיתוח והקמה של חוות לחקלאות ימית, בחינה של הקמת איים מלאכותיים לתשתיות ועוד.

ניטור הסביבה הימית הוא מרכיב חיוני של מערכת המִנהל הסביבתי, בייחוד לאור הפיתוח המואץ והלחץ הסביבתי הכבד. הניטור מספק מידע על מצב הסביבה ועל ההשפעות הסביבתיות של פעילות אנושית. המידע הנאסף יוצר בסיס מדעי לקבלת החלטות על נקיטת אמצעים לשמירת איכות הסביבה הימית, החלטות מושכלות על אופי והמשך הפיתוח, ומאפשר להעריך את התוצאות של יישומן.

יישום תוכנית הניטור הלאומית של ישראל החל בשנות ה-80 של המאה הקודמת בהתייחס לזיהום הים ולאיכות מימי החופין בלבד. במהלך העשור האחרון נוספה פעילות בתחום ניטור המגוון הביולוגי, ובשנת 2018 אושרה החלטת ממשלה להרחבת תוכנית הניטור הלאומי בים התיכון של ישראל. התוכנית הרחבה נותנת מענה להיבטים הקשורים בשינויי אקלים ורב-תחומיות הנדרשת ליישום "גישת המערכת האקולוגית" (Ecosystem Approach, EcAp) של מוסדות אמנת ברצלונה (מדינות הים התיכון), שיאפשרו להעריך את מצב הסביבה הימית (Environmental Status) ולשפר את התמיכה המדעית לשימור, ניצול וניהול מושכל של הסביבה הימית של ישראל ומשאביה. הרחבה זו איפשרה גם להיערך להתאמה של ישראל למדדים הסביבתיים – אימוץ האינדיקטורים והיעדים האקולוגיים למצב סביבתי טוב (Good Environmental Status), כפי שאימצו מוסדות אמנת ברצלונה (המיושמת על-ידי תוכנית הפעולה לים התיכון [MAP] באמצעות ארגון MEDPOL) והקהילה האירופאית (Water Framework Directive; Marine Strategy Framework Directive)[1]. תוכנית הניטור מיושמת בעזרת אגף ים וחופים של המשרד להגנת הסביבה ומשרד האנרגיה והתשתיות, והיא רכיב של מערכת המינהל הסביבתי שמפעילה הממשלה.

ממצאי הניטור הלאומי בים התיכון מדווחים מדי שנה באמצעות חמישה כרכים נפרדים: ניטור שינויי אקלים והמערכת ההידרוגרפית; ניטור זיהום ים; ניטור המגוון הביולוגי; ניטור שלמות הקרקעית והיבטים סדימנטולוגיים; ניטור פסולת ימית.

פרק זה מתייחס רק למדגם היבטים הקשורים בהשפעות שינויי אקלים והשפעות זיהום ים: מתכות כבדות וחומרי דשן (נוטריינטים) בלבד. באמצעות דוגמאות שונות הפרק מציג תמונת מצב ומגמות של השינויים בזמן משנת 1980

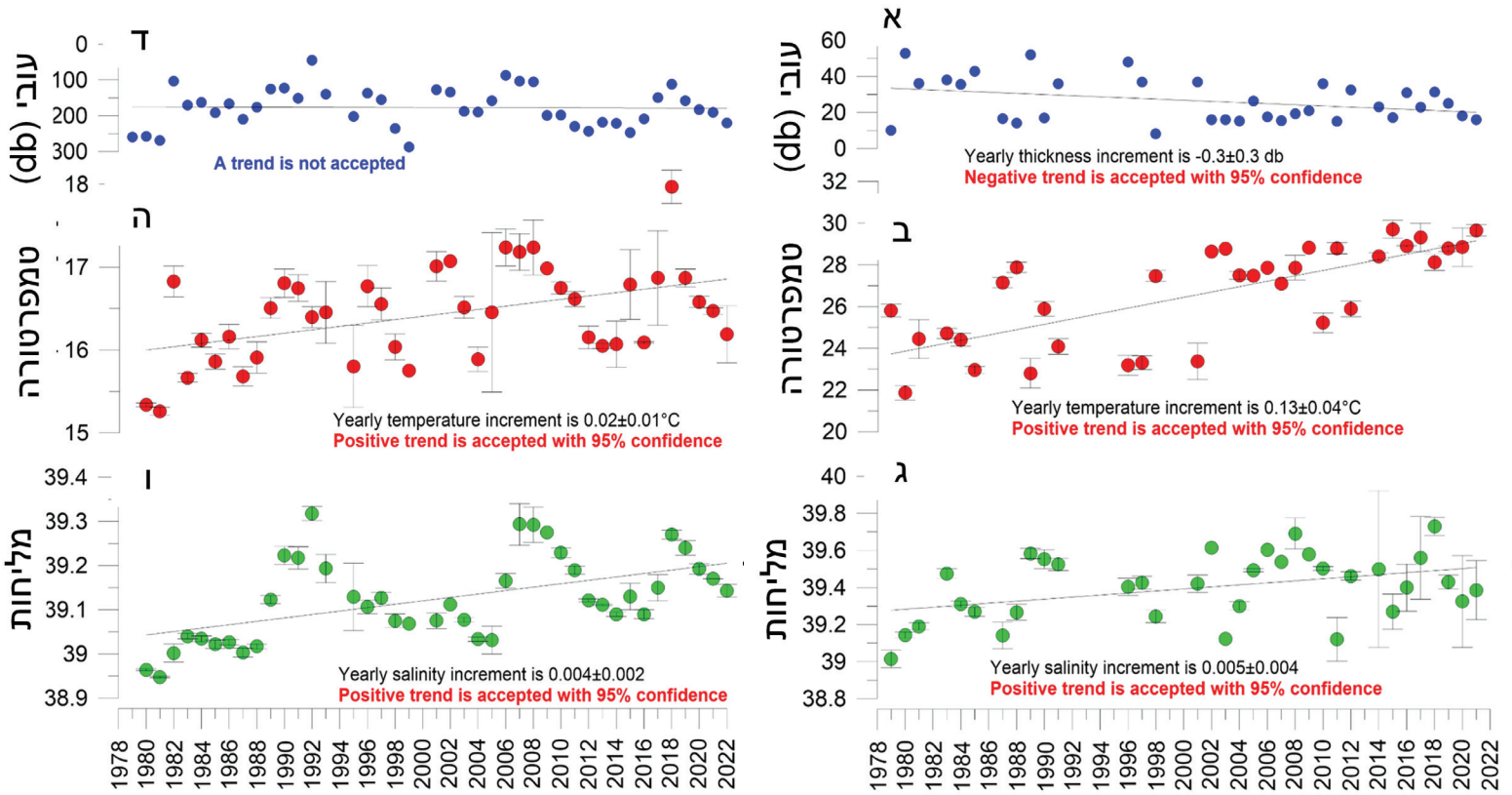
ועד 2022, במספר פרמטרים הקשורים לשינויי אקלים וברמת הזיהום של מתכות כבדות ונוטריינטים במימי החופין ובשפכי נחלי החוף. המידע נסמך על נתונים רב-שנתיים של הניטור הלאומי[2,3] ועל מחקרים נלווים, שהתבצעו על-ידי "חקר ימים ואגמים לישראל" (חיא"ל). ניתן לצפות בדוחות הניטור הלאומי בים התיכון באתר חיא"ל[2].

השפעות שינויי אקלים על מי הים התיכון של ישראל

שינויי האקלים משפיעים על מדדים שונים במערכת האקולוגית הימית. להלן מדגם של תצפיות על מגמות ארוכות טווח של טמפרטורה, מליחות וחומציות מי הים, ומפלס הים, במרחב הימי של ישראל באגן הדרום מזרחי של הים התיכון.

שינויי טמפרטורה ומליחות מי הים

עמודת המים בדרום מזרח אגן הלבנט מאופיינת בערכי קיצון גבוהים של טמפרטורה (כ-30°C בקיץ) ומליחות (כ-40psu) ביחס לאזורים אוקייניים אחרים בעולם (25 ו-35, בהתאמה). עמודת המים מורכבת ממספר מסות מים המוגדרות על בסיס המאפיינים התרמוהלינים (טווחי טמפרטורה ומליחות) הייחודיים לכל אחת. להלן מוצגות מגמות של שינויי טמפרטורה ומליחות במסת המים העליונה, המצויה בד"כ עד עומק של כ-100 מטר, בשם Levantine Surface water (LSW) ובמסת מי הביניים בשם Levatine Intermidiate Water (LIW), שמצויה בד"כ בעומקים שבין 100 ל-350 מטר. מגמות השינוי בטמפרטורה ומליחות מי הים מתבססות על מדידות שנעשו במסגרת הפלגות לים הפתוח מאז שנות ה-80 של האלף הקודם. מגמות הטמפרטורה ומליחות המים החופיים המוצגות, מתבססות על תחנת מדידה רציפה הממוקמת במרחק של כ-2.2 ק"מ מהחוף, מול חדרה. התצפיות מראות מגמת עלייה בטמפרטורה (0.04±0.13°C לשנה) ובמליחות (0.004±0.005 לשנה) של מסת המים העליונה (LSW) במהלך 40 שנים באזור דרום מזרח אגן, הלבנט בעונה החמה (יולי-אוקטובר). עליית הטמפרטורה של מי השטח גדולה מהתחזית של הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים (IPCC 2021) העומד על בין 0.055°C ל- 0.069°C (איור 1).
נצפית ירידה משמעותית סטטיסטית בעובי שכבת ה-LSW בקיץ בקצב של כ-0.3db לשנה (בקירוב 30 ס"מ בשנה) (איור 1). בנוסף, ניתן להתרשם כי במשך 15 השנים האחרונות, השינויים בעובי שכבת LSW (סביב קו המגמה) התמתנו ל-±10db. ניתן לשייך ממצאים אלו להמשך מהלך ההתחממות התומך ביציבות גבוהה יותר בפני השטח.



איור 1. (א-ג) מראה מגמת השינוי בעובי, בטמפרטורה (מעלות צלזיוס) ובמליחות (psu) של מסת המים העליונה (LSW) כפי שהתקבלה בעונת הקיץ (יולי-אוקטובר) בין 1978-2022. עובי שכבת LSW חושב כעומק שבו הצפיפות הייתה גבוהה מ-$0.08 kg/m^3$ מהצפיפות בפני השטח. רווח בר-סמך לא חושב עבור שנים שבהן נאספו פחות משלושה פרופילים (חתכי עומק) בקרבת תחנה H05 (50 ק"מ מערבית לחיפה). (ד-ו) מראה את מגמת השינוי בעומק, בטמפרטורה ובמליחות של שכבת מי הביניים (LIW) בקרבת תחנה H05 (נמצאת כ-50 ק"מ מהחוף בעומק מים של 1.5 ק"מ) בין השנים 1978-2023. מיקום אנכי של LIW נבחר לפי מקסימום מליחות בפרופיל העומק.

מגמות ארוכות טווח של התחממות (0.02±0.01C° בשנה) והתמלחות (0.004±0.002 בשנה) נשמרות גם בשכבת מי הביניים הלבנטיניים (LIW)[4] (איור 1). ערכי המליחות והטמפרטורה במי השטח במדף היבשת הרדוד, שנמדדו בתחנת המדידה הרציפה מול חדרה (GLOSS #80; ממוקמת כ- 2.2 ק"מ מהחוף), החל משנת 2011, תומכים במגמות ההתמלחות וההתחממות החיוביות שנמצאו בנתונים מהפלגות בים הפתוח. יצוין כי קצב עליית הטמפרטורה בסמוך לחוף הינו כמחצית מזה שנמצא בשכבת LSW והוא בהתאמה טובה לפרסומים שונים על קצבי ההתחממות באגן המזרחי של הים התיכון ולמדידות ב-LIW[5]. הסיבה לקצב התחממות מהיר יותר במי הים הפתוח לעומת המים החופיים לא ברורה.

מפלס ים

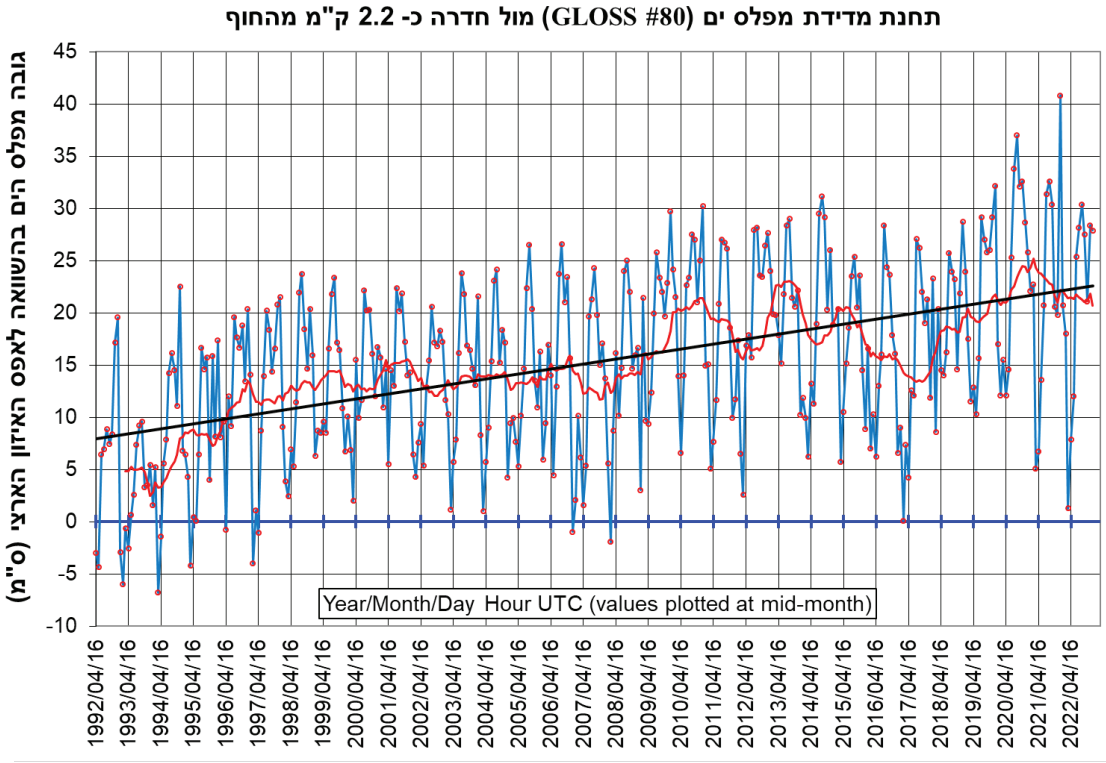
מפלס מי הים הוא מדד לגובה הממוצע של פני הים (ממוצע הגאות והשפל) ומשמש כנקודת ייחוס לגבהים על פני כדור הארץ. שינויים במפלס הים קשורים להתחממות המים והתפשטותם והמסת קרחונים יבשתיים כתוצאה ממגמת ההתחממות הגלובלית, כמו גם בגלל שינויים גיאולוגיים. שינויים במאזן הנפחי של הים התיכון הנקבעים בעיקר על-ידי השטפים במצרי גיברלטר ושטפי אידוי-משקעים בפני הים, וגם שינויים בזרימה התרמוהלינית. מדידות מפלס הים המוצגות בפרק זה נעשו בתחנת מדידה הממוקמת כ-2.2 ק"מ מהחוף מול חדרה (תחנה GLOSS #80 שהינה חלק מהרשת העולמית). מדידות נוספות נעשות על-ידי המרכז למיפוי ישראל. שינויים חודשיים במפלס הים (מוצגים להלן) מושפעים בעיקרם מהתחממות המים בשכבה העליונה בימות הקיץ והתקררותם בחודשי החורף, ומשינויים במאזן הנפחי של הים התיכון.

במהלך השנים 1992-2022 נמדדה עלייה ממוצעת של כ-4.6 מ"מ בשנה (איור 2) בהשוואה ל-3.69 מ"מ בשנה בממוצע גלובלי בשנים 2006-2018. יחד עם זאת, העלייה הממוצעת שנמדדה אצלנו בשנים 2006 עד 2018 קרובה לממוצע הגלובלי.

קצב העלייה שגדול מהעלייה הגלובלית נגרם מהעלייה החדה בתחילת תקופת המדידה, הנובעת ככל הנראה מאפקטים מקומיים בים התיכון, ובפרט ה-Eastern Mediterranean Transient (EMT). ה-EMT הוא האירוע המתאר שינוי במיקום יצירת המים העמוקים של האגן המזרחי בים התיכון, מאזור הים האדריאטי לים האגאי ולתנאים שקדמו לשינוי זה, שינויים בצפיפות עמודת המים ובתבניות הסירקולציה באגן המזרחי. שינויי צפיפות אלו התבטאו בירידה חדה במפלס בין השנים 1987-1993 (בשנים שקדמו לתחילת איסוף הנתונים בתחנה בחדרה) ולאחריה בעלייה חדה במפלס עד תחילת שנות האלפיים, זאת בדומה למדווח בספרות עבור אגן הלבנט.

מפלסי הים הנמדדים לאורך חופיו הדרום מזרחיים של אגן הלבנט מציגים ערכי מינימום בחורף ומקסימום בחודשי הקיץ, בהתאם לשינויי הטמפרטורה העונתיים בשכבה העליונה. מאז קיץ 2020, המשרעת העונתית הייתה מעט מעל 30 ס"מ, בעוד שבמשך רוב שנות המדידה המשרעת העונתית הממוצעת במפלס הים הייתה רק מעט מעל 20 ס"מ (איור 2). שינויים בעונתיות מפלס הים באזורנו נובעים משונות פנימית במערכת בהשפעת לחץ אטמוספרי, רוחות, זרמים, והמאזן ההידרולוגי, וכן ממגמת ההתחממות הגלובלית הכללית והתחממות האגן המזרחי בפרט.

חלק ניכר מעליית מפלס הים קשור לפעילות האדם שגורמת לשינוי אקלים, וצפויה באזורנו לגרום, בין היתר, להצפה של שפכי נחלים/אזורים לאורך החופים, פגיעה במבנים ובתשתיות לאורך החוף, עלייה בבסיס הניקוז של נחלים, הצפות, המלחת אקוויפרים וסיכון מוגבר לסערות ימיות/צונאמי. על-פי רוב המחקרים, מגמת עליית מפלס הים צפויה להימשך שנים רבות.



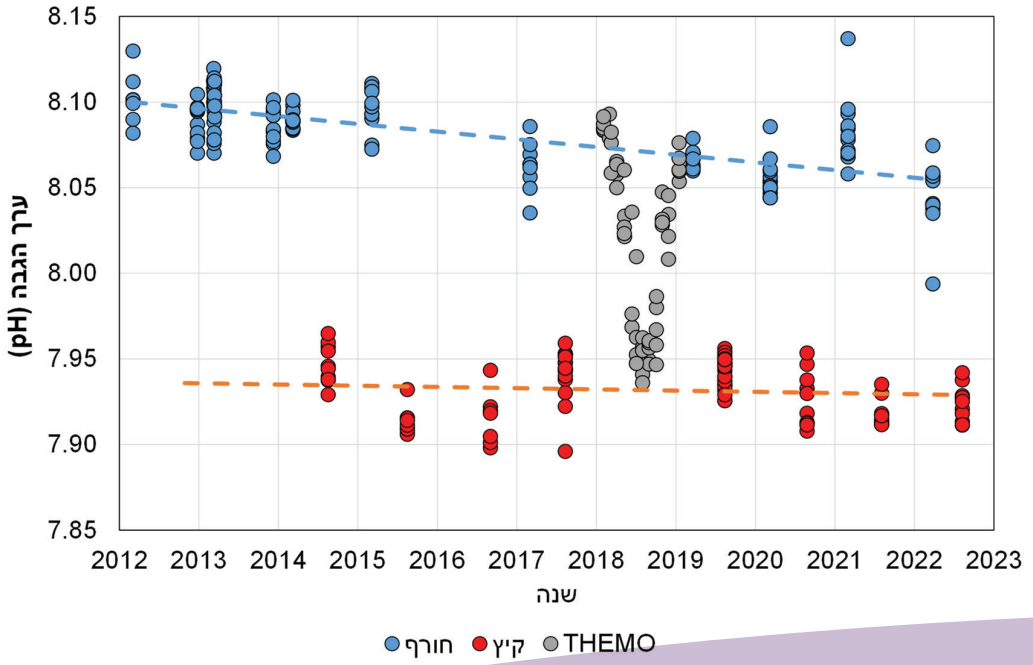
איור 2. נתוני מפלס ים בממוצעים חודשיים כפי שנמדדו בתחנת הניטור הממוקמת בקצה מזח הפחם של תחנת הכוח אורות רבין בחדרה (במרחק של כ- 2.2 ק"מ מהחוף) בין אפריל 1992 ועד מאי 2022 (כחול), ממוצע רץ שנתי (אדום), וקו מגמה לכל התקופה (שחור). הערכים המוצגים מיוחסים לאפס האיזון הארצי.

החמצת מי הים

חומציות מי הים נמדדת ביחידות pH, שמתייחסות לריכוז הפרוטונים (אטומי מימן בעלי מטען חשמלי חיובי) במי הים. לפי ההערכה, מאז תחילת המהפכה התעשייתית ירד ה-pH של הים מכ-8.25 לכ-8.14, כלומר המים הפכו לפחות בסיסיים ויותר חומציים (ערך של 7 הוא ניטרלי). מגמת "החמצת אוקיינוסים" או ירידה בערכי ההגבה (pH) של מי הים נגרמת בעיקר כתוצאה מעלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה, שנובע ממקור אנושי (אנטרופוגני) מאז המהפכה התעשייתית. במסגרת הניטור הלאומי מתבצעות מדידות של pH במי הים הפתוח ובמים חופיים, בקצה טבלאות הגידוד. מאחר שאגן הלבנט מאופיין בטמפרטורות גבוהות וביצרנות ראשונית נמוכה (ביחס לשאר אזורי הים התיכון) הוא אינו משמש כמבלע לפחמן הדו-חמצני (פד"ח) אטמוספרי. להלן המגמות שהתקבלו במהלך העשור האחרון:

- במים הפתוחים באגן הלבנט נצפית עלייה בחומציות מי הים בקצב ממוצע של 0.003- יחידות pH לשנה או 0.03- יחידות pH לעשור (2014-2022) (איור 3), זאת במקביל למגמת העלייה בלחץ החלקי של פחמן דו-חמצני (ערכי pCO_2, בקצב של כ-3.7+ (חלקיקים למיליון נפחית לשנה (ppmV/yr), שהינו גבוה פי 1.5 מקצב עליית הפחמן הדו-חמצני (פד"ח) באטמוספרה). שינוי ממוצע זה גבוה מקצב ההחמצה הממוצע באוקיינוסים (0.002- יחידות pH לשנה).
- במים בקצה טבלאות הגידוד ניתן לראות עונתיות ברורה של הלחץ החלקי של דו-תחמוצת הפחמן (ערכי pCO_2) בשנים 2013 עד 2022 – לחץ גבוה בקיץ ונמוך בחורף. המגמה הממוצעת של כל טבלאות הגידוד עם הזמן היא 3 ± 4ppmV/yr, בדומה לקצב הגידול של פחמן דו-חמצני באטמוספרה. המגמה הממוצעת של pH בכל טבלאות הגידוד עם הזמן היא 0.003 ± 0.002-, הדומה מאוד לקצב הירידה הממוצע של pH באוקיינוסים.
- בשקלול כללי, ערכי ה-pCO_2 מעידים על כך שהמים הפתוחים באגן הלבנט מהווים מקור לפחמן דו-חמצני אטמוספרי ולא מבלע, בגלל המאפיינים הכימיים והביולוגיים הייחודיים שלו.

האגן הדרום מזרחי בים התיכון מאופיין כמערכת אולטרה-אוליגוטרופית וחמה במיוחד, ולפיכך קצב יצירת הפד"ח על-ידי היצרנים הראשוניים קטן, כמו גם מסיסות הפד"ח האטמוספרי במים החמים יחסית. לפיכך אזור זה אינו תורם להפחתת הפד"ח האטמוספרי, אולם המשך הצטברותו באטמוספרה גורם לירידת ה-pH של המים.



איור 3. ערכים מחושבים של pH (ערכי הגבה) בסקאלה Total Hydrogen מתוקנים לטמפרטורת מי הים מ-2012 עד 2022 פעם עד פעמיים בשנה בעונת הקיץ (עיגולים אדומים) ובעונת החורף (עיגולים כחולים) במים הפתוחים של מדינת ישראל בים התיכון (עד עומק מים של 30 מ'). העיגולים האפורים מציינים את המדי־דות שנעשו בתחנות THEMO במהלך פרויקט משותף עם אוניברסיטת חיפה על בסיס חודשי בשנים 2018-2019. קצב השינוי של pH בתקופת החורף הינו 0.0045 לשנה, קצב הגבוה בפקטור של 2 מהממוצע במי השטח של האוקיינוסים. (https//:www.eea.europa.eu/ims/ocean-acidification)

התחזיות מצביעות על המשך הפליטות ועליית הפד"ח באטמוספרה ובהתאם, המשך החמצת מי הים. בהנחה שפליטות הפד"ח יימשכו בקצב הנוכחי, ערכי ההגבה של מי הים ירדו לסביבות 7.8 בסוף המאה הנוכחית. עליית חומציות מי הים עלולה לפגוע בשרידותם של אורגניזמים ימיים משקיעי שלד גירני, כמו אלמוגים ויצורים פלנקטוניים רבים.

מגמות שינוי בזמן של מזהמים במימי החופין

כמויות משמעותיות של מזהמים (מתכות כבדות, מזהמים אורגניים ונוטריינטים) מוחדרות למימי החופין של ישראל בים התיכון, הן ממקורות נקודתיים (מוצאי שפכים, נקזים ונחלי החוף) והן ממקורות מבוזרים (מי נגר, דליפת מי תהום והסעה אטמוספרית) כתוצאה מפעילות אנושית (תעשייתית, חקלאית, ביוב ועוד). במשרד להגנת הסביבה קיים מידע על מקורות זיהום נקודתיים, המבוסס בעיקר על היתרים להזרמת שפכים לים (על-פי חוק מניעת זיהום הים ממקורות יבשתיים) ועל ניטור ההזרמות. יחד עם זאת, יש צורך באומדן כמותי משופר וכולל של עומס המזהמים שמגיעים למערכת הימית[6]. להלן תצפיות על מגמות ארוכות טווח של ריכוזי מתכות כבדות ונוטריינטים במימי החופין ושפכי הנחלים.

מתכות כבדות

מתכות כבדות כמו כספית, קדמיום, עופרת, אבץ ומתכות נוספות מצויות באופן טבעי במרכיבי המערכת הימית (מים, סדימנטים ובעלי חיים ימיים). יחד עם זאת פעילות אנושית (במיוחד תעשייתית) מזהמת את הסביבה בכמויות נוספות של מתכות כבדות, שעלולות לפגוע הן בבריאות המערכת האקולוגית, כולל תמותה של מינים ושינויים במגוון מינים, והן בבריאות הציבור, במיוחד באמצעות צריכת מזון ימי מזוהם. להלן מוצגים ממצאים הנוגעים בשינויים של ריכוזי הכספית והקדמיום בסדימנטים וברכיכות מאזור מפרץ חיפה, שבעבר היה חשוף לזיהום משמעותי של מתכות אלה. כמו כן, מוצגים השינויים ברמות הכספית בדגים. הכספית מאופיינת כמתכת שמצטברת בדגים/בע"ח ימיים (bioaccumulation) ומוגברת במעלה שרשת המזון (biomagnification), ועלולה להזיק לבריאות בצריכת מזון ימי מזוהם.

במפרץ חיפה תפוצת ריכוזי הכספית בסדימנטים ממשיכה לשקף את השפעתם של שני מוקדי זיהום עיקריים: 1) מפעל "התעשיות האלקטרוכימיות" (פרוטרום) בצפון ליד עכו, שנסגר בנובמבר 2004) שפך נחל הקישון בדרום המפרץ[7,8]. למרות מגמת ההפחתה ביחס למצב בשנות ה-80 (בפקטור של פי 3 לערך), הסדימנטים בחלקו הצפוני של המפרץ (עד כ-3-4 ק"מ דרומית לעכו), מראים דרגת זיהום בינונית של כספית, לפי הקריטריונים לאיכות סדימנטים של מינהל האוקיינוסים והאטמוספרה של ארה"ב (NOAA) והמדד שאומץ על-ידי אמנת ברצלונה (איור 4)[9].

ריכוזי הכספית והקדמיום בסדימנטים בשפך נחל הקישון/דרום מפרץ חיפה היו גבוהים מהלך שנות ה-90, משנת 1998 עד שנת 2011 נצפתה ירידה בריכוזים, ובשנים 2012 עד 2022 נצפית מגמת עלייה (איור 4). נראה שהירידה בריכוזי הקדמיום בשפך הנחל משמעותית יותר מהירידה בריכוזי הכספית (פקטור של כ-50 לעומת 6, בהתאמה), ונובעת, ככל הנראה, מההפחתה הדרסטית בהזרמת הקדמיום אל נחל הקישון החל משנת 2000. השינויים שנצפים בשנים האחרונות קשורים לשילוב של שינויים בהזרמות לנחל הקישון, במשטר ההידרולוגי של הנחל ומוצאו הימי, ופעולות החפירה ובניית הנמל החדש. לעומת שנות ה-90 שבהן נמדדו ריכוזים בסדימנט הגורמים להשפעות אקולוגיות מזיקות על-פי הקריטריונים לאיכות סדימנט של NOAA, מאז שנת 2003 הריכוזים שנמדדים קטנים משמעותית ולרוב אינם חורגים מהקריטריונים לאיכות סדימנטים להשפעות מזיקות.

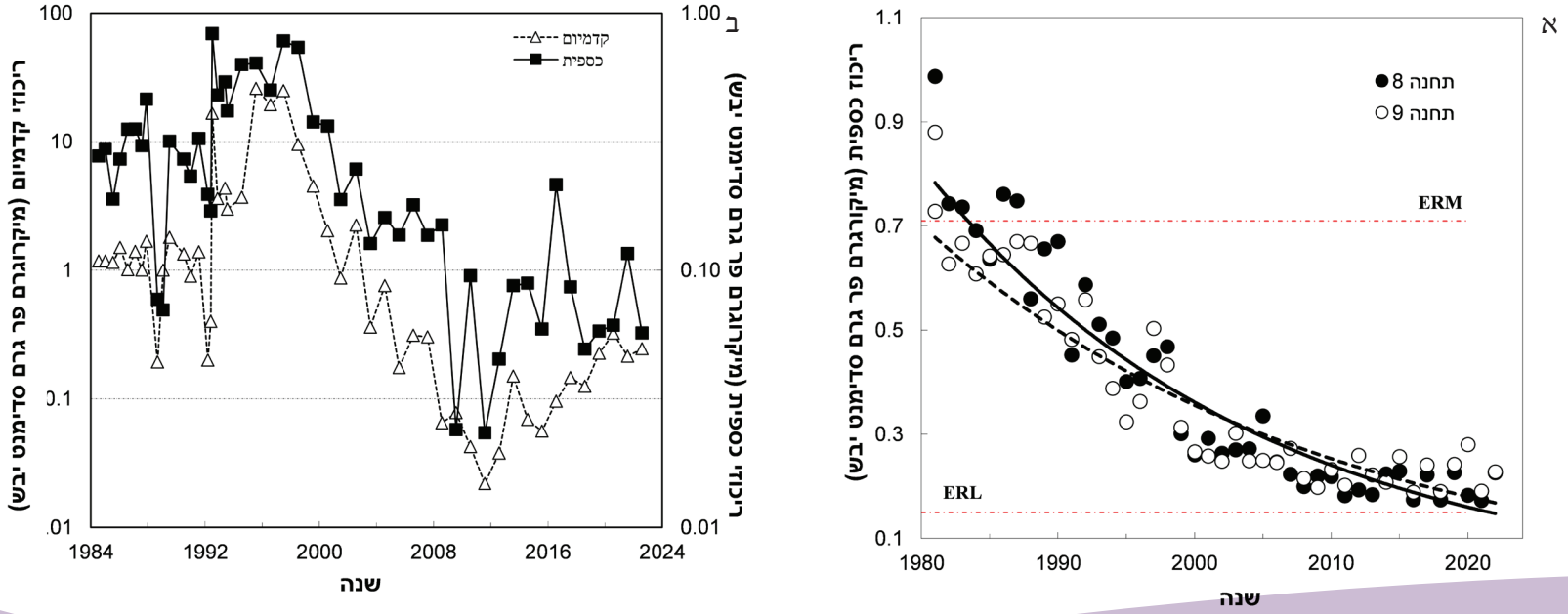
בהתאמה לשינויים בסדימנט, נצפית מגמת ירידה בריכוזי הקדמיום בפרטים של החילזון מהסוג צלחית *Patella sp*. מחוף שמן (שפך הקישון) וקריית ים משנת 1997 עד 2001[10] והתייצבות עד 2022 (איור 5).

משנת 1980 ועד שנות ה-2000 (במהלך שני עשורים) חלה ירידה ניכרת ברמות הכספית (ובכספית המנורמלת למשקל הדג) בדגים חופיים ממפרץ חיפה. אולם ב-14 שנות הדיגום אחר כך (משנת 2001 עד 2013) רמות הכספית בדגים ברקן אדום *Sargocentron rubrum*, סרגוס משורטט *Diplodus sargus* ו-שישן משורטט *Lithognathus mormyrus* מהמפרץ עלו באופן משמעותי. משנת 2014, לערך, חלה שוב ירידה אולם בשנים האחרונות (בדיגום נרחב במפרץ חיפה), נמצאה שוב עלייה משמעותית (איור 6)[9].

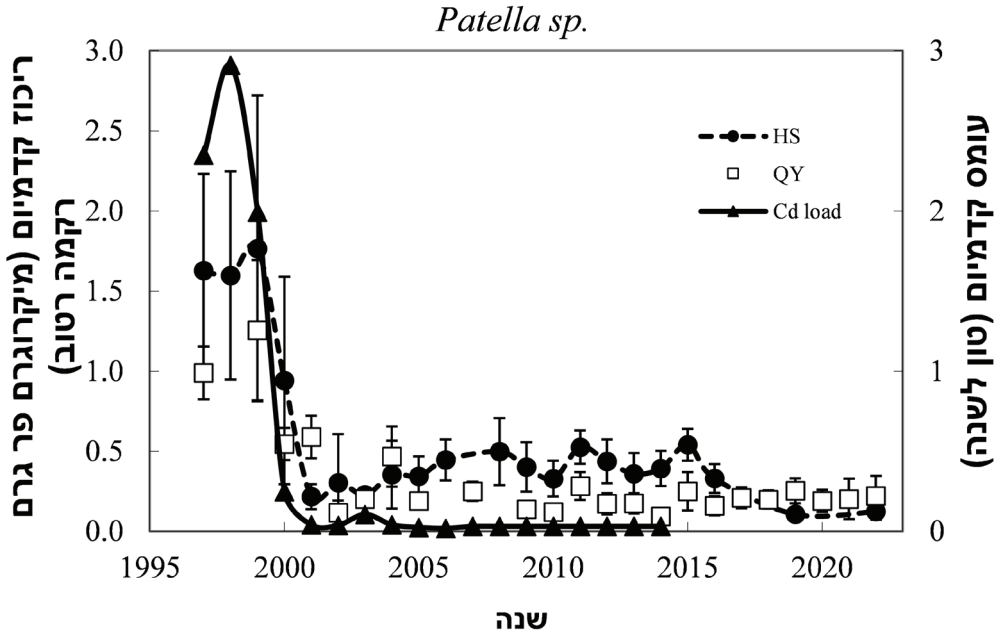
במחקר נלווה לניטור הלאומי שהתקיים בשנים האחרונות בצפון המפרץ התגלה מקור הזיהום בכספית. נמצא שמי החללים ומי התהום בחוף הים ובאתר מפעל "התעשיות האלקטרוכימיות" בצפון המפרץ (שנסגר בשנת 2004 וקודם לכן הזרים לים שפכים מטופלים הכוללים כספית) מזוהמים בכספית (נמדדו ערכים חריגים של ריכוזי כספית). נראה שדליפת מי תהום מזוהמים בכספית אל הים גורמים לעלייה בזיהום בשנים האחרונות, וקודם לכן בשנים 2000-2014 [11,12].

חריגות בריכוזי הכספית של דגים ממפרץ חיפה בשנת 2022 – סה"כ מדובר על 32% מהדגים שנדגמו. עיקר החריגות נמצאו בדגים מהמינים: ברקן אדום *Sargocentrum rubrum* (50%); גממית ים תיכונית; *Pomadasys incises* (33%); סילגו נודד *Sillago suezensis* (45%). הומלץ לשקול הפסקת השיווק של דגים אלה.

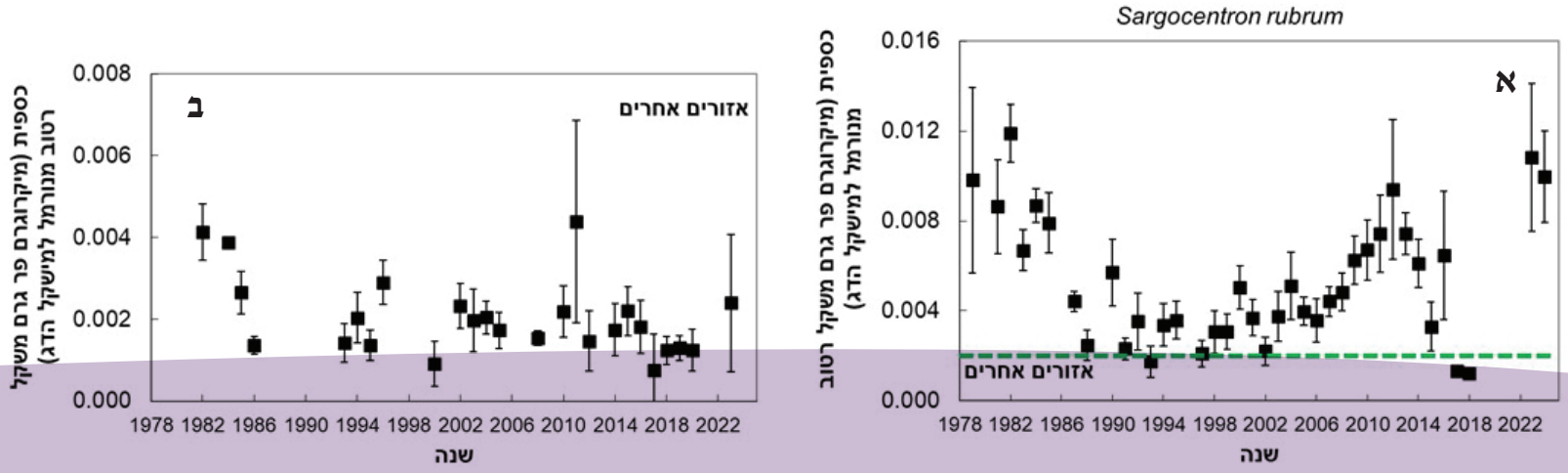
במסגרת דוחות הניטור הוצע לפרסם המלצות תזונתיות לכמות מקסימלית רצויה של צריכת דגים לפי אוכלוסיות (נשים בהיריון, ילדים לפי גיל) ולפי קבוצות של מיני דגים, כמקובל בארה"ב, על-ידי Food and Drug Administration (FDA) ו-Environmental Protection Agency (EPA)[13], בעיקר בהקשר לכספית. זאת ללא קשר לפרסום הקווים המנחים של ריכוז מרבי מותר של מתכות בדגים על-ידי משרד הבריאות (עודכן לאחרונה ב- 1.5.2016).



איור 4. א. ריכוזי כספית ($\mu g\ g^{-1}$ dry wt.) בסדימנטים בתחנות 8 ו-9 בצפון מפרץ חיפה (מול אתר "התעשיות האלקטרוכימיות"), בעומקי מים של 3 ו-6 מ', בשנים 1981-2022. ב. ריכוזי קדמיום וכספית (מיקרוגרם פר גרם חומר יבש) בסדימנטים בשפך נחל הקישון (תחנה מס' 27) בשנים 1984-2022 מוגדרות שתי רמות זיהום: ריכוז חומרים שמתחתיו השפעות מזיקות צפויות רק לעיתים רחוקות (ERL, Effect Range Low); ריכוז חומרים שמעליו השפעות מזיקות צפויות לעיתים קרובות (ERM, Effect Range Median).



איור 5. ריכוזי קדמיום ($\mu g\ g^{-1}$ wet wt) בחלזונות *Patella sp*. צלחית מחוף שמן בשפך נחל הקישון (HS) ומקריית ים (QY) בשנים 1997-2022.
הקו הרציף מציג את השינויים בכמויות הקדמיום שהוזרמו במשך השנים לנחל הקישון.



איור 6. היחס כספית/משקל דג ברקמות השריר של דגי ברקן אדום (*Sargocentron rubrum*) (ממוצע שנתי ± סטיית תקן) בשנים 1979-2023,
א. בדגים ממפרץ חיפה ב. מאזורים חופיים אחרים (דרומית למפרץ חיפה).

חומרי דשן (נוטריינטים)

ריכוזים חריגים של זרחה ואמוניום בשפכי הנחלים ומימי החופין קשורים בעיקר להזרמה של שפכים ביתיים ומי קולחים ואילו ריכוזי ניטראט חריגים קשורים בדרך כלל להזרמות של מי נגר חקלאיים, מי טיוב בארות / התפלת מי תהום וגלישות מבריכות לחמצון שפכים. הצורן (חומצה סיליצית/סיליקה) במימי החופין ובשפכי הנחלים נובע משני מקורות עיקריים: בליה של סלעים והזרמות של שפכים המכילים חומרי ניקוי (צורן הוא מרכיב ראשי בתערובות חומרים המשמשים לניקוי). פירוט מקורות הזיהום במעלה חלק מהנחלים (נעמן, קישון, תנינים, אלכסנדר, איילון-ירקון, שורק, לכיש) מוצג בדוח ניטור מים ונחלים של המשרד להגנת הסביבה ורשות הטבע והגנים, הכולל דיווחים מרשות נחל הקישון ומרשות נחל הירקון[14]. להלן תצפיות על המצב האקולוגי ומגמות ארוכות הטווח של ריכוזי נוטריינטים בשפכי הנחלים (בשנים 1995-2022) ובמימי החופין[9].

מגמות בזמן (~20 שנה) של איכות מים (נוטריינטים, חמצן ואצות, כולל רעילות) בשפך נחל הקישון, כמייצג אסוטארים קטנים ומשוכבים לאורך החוף, הוצגו במאמר שיצא לאור לאחרונה[15]. המאמר מציג את הסטטוס האקולוגי על בסיס קריטריונים שאומצו על-ידי מדינות אירופאיות שונות (במסגרת Water Framework Directive) (טבלה 1), והמגמות בזמן של ריכוז ועומסי הנוטריינטים (שחושבו על בסיס משוואות ערבוב). בהתייחס לתקנים (ערכי סף) המוצעים של ריכוזי הנוטריינטים בטבלה 1, הסטטוס האקולוגי של שפכי הנחלים שורק, קישון, אלכסנדר, לכיש, ירקון, בשנת 2022 סווג כ"רע" ושל שפכי נחלים אחרים הוגדר במצב "בינוני".

לאחר מגמת שיפור רב-שנתית, נראה שבשנים האחרונות (מאז 2019) חלה החמרה בסטטוס האקולוגי של שפך נחל הקישון (ובכלל זה בריכוזי תאי פיטופלנקטון בעלי פוטנציאל רעילות)[15,16], שקשורה ככל הנראה להאטת תחלופת המים (הגדלת זמן השהות) בגלל בניית נמל המפרץ, אולם יש צורך לאשש מסקנה זו. לחלופין ייתכן שחל שינוי בהזרמות/מקורות.

נצפית מגמת עלייה בריכוזי הניטרט בשפכי הנחלים: ירקון (2011-2022) (איור 7); תנינים (2000-2022) ונעמן (2017-2022), ובמידה מסוימת גם בשפך נחל אלכסנדר.

נצפית מגמת ירידה בריכוזי הפוספט בנחל שורק (1995-2012) ובהמשך התייצבות (איור 7).

נצפית מגמת עלייה בריכוזי אמוניום בנחל אלכסנדר (2012-2021), ככל הנראה מהגברת הזרמות קולחים/ביוב. בהתאם נצפית בנחל אלכסנדר גם עלייה מסוימת בריכוזי הפוספט.

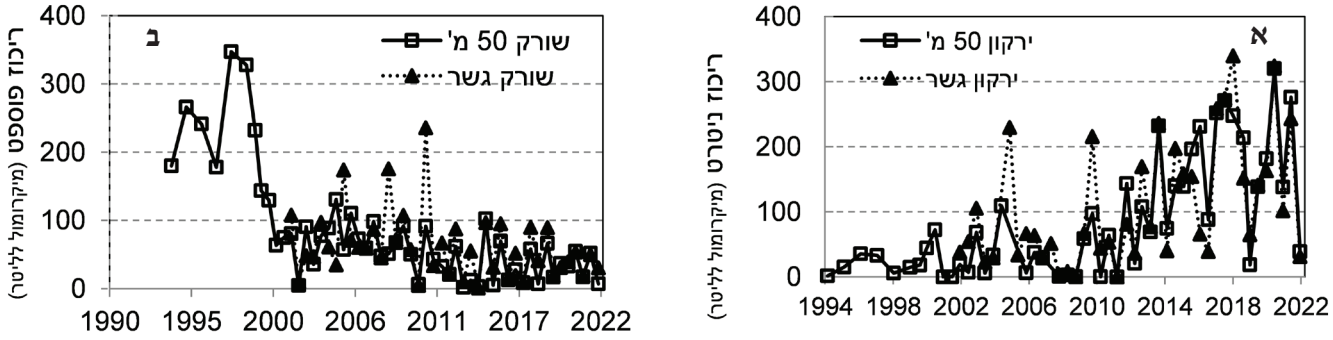
תפוצת ריכוזי הנוטריינטים, בעיקר חנקן וזרחן (צורונים מומסים של ניטרט, פוספט וחומצה סיליצית/סיליקה), באזור הרדוד של מימי החופין מראה בד"כ שריכוזי הנוטריינטים יורדים ככל שמתרחקים מהחוף. אולם, במקומות מסוימים, בסמוך לשפכי נחלים והזרמות של קולחים, קיימים מוקדי העשרה. התפוצה מוכתבת בעיקר על-ידי מקורות זיהום יבשתיים מצד אחד, וקצב צריכתם על-ידי היצרנים הראשוניים מצד שני. למרות שלא נצפתה מגמה ברורה לאורך השנים לרוב נראית העשרה של פוספט וניטרט מול נחל הירקון ובדרום מפרץ חיפה והעשרה של סיליקה לאורך החלק הדרומי של מימי החופין (אשקלון-אשדוד).

מפרץ חיפה מועשר בנוטריינטים ביחס לאזורים אחרים לאורך החוף, במיוחד בחלקו הדרומי. באזור זה נצפתה מגמת ירידה בריכוזי הנוטריינטים ביחס לשנות ה-90 (איור 8) כתוצאה מהפחתה בעומס הנוטריינטים בנחל הקישון.

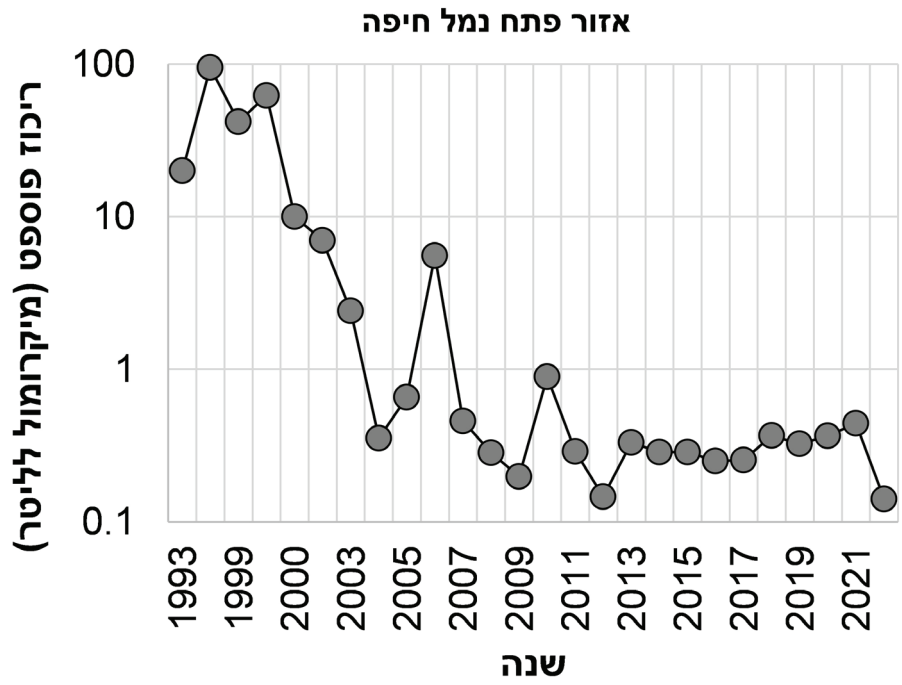
במי טבלאות הגידוד (קו החוף) נראים הבדלים משמעותיים בין אכזיב בצפון לבין פלמחים בדרום, 2010-2022. קיימת העשרה של ריכוזי הניטרט באכזיב ביחס לפלמחים, ככל הנראה בגלל השפעה של זליגת מי תהום מועשרים בתחמוצות חנקן אל הים. ריכוזי הפוספט מועשרים בפלמחים לעומת אכזיב, הסיבה לכך לא ברורה.
מעקב אחר ריכוזי הכלורופיל (מדד לביומסת האצות) באמצעות צילומי לוויין מראה השפעה אפשרית של הדלתא של הנילוס, ובנוסף, של הזרמת ביוב מעזה אל החופים הדרומיים של ישראל, ובכלל זה באזור היניקה של מתקן ההתפלה באשקלון, כמוצג בדוחות הניטור הלאומי.

ערך סף / קריטריון	מקור	פוספט (מיקרומולר)	ניטרט (מיקרומולר)	אמוניום (מיקרומולר)	כלורופיל-a (מיקרוגרם לליטר)	חמצן מומס (מיליגרם לליטר)
רע	Herut et al 2023 [3]	>10	>400	>110	>60	≤2
בינוני		2.2–10	71–400	28–110	5–60	2–5
טוב		<2.2	<71	<28	<5	≥5

טבלה 1. הצעה ראשונית של ערכי סף אקולוגיים לאיכות מי שפכי הנחלים, המתבססת על הצעות של גורמים שונים כמפורט ב-[15].



איור 7. א. ריכוזי ניטראט בשפך נחל הירקון וב. ריכוזי פוספט בשפך נחל שורק, בשנים 1990-2022 (מרץ וספטמבר).



איור 8. ריכוזי פוספט (זרחן) בפתח נמל חיפה (דרום מפרץ חיפה) בשנים 1993-2022 (מדי יולי-אוגוסט).

סיכום

האזור הדרום מזרחי של אגן הלבנט בים התיכון חשוף להשפעות שינויי האקלים באופן דומה או מוגבר ביחס להשפעה הממוצעת הגלובלית באוקיינוסים. אגן זה מאופיין כגוף מים דל בנוטריינטים ובעל יצרנות נמוכה (אוליגוטרופי), ולפיכך כמערכת אקולוגית רגישה לשינויים (הן טבעיים והן כתוצאה מפעילות אנטרופוגנית). במהלך השנים ניכרת עלייה משמעותית של טמפרטורה, מליחות וחומציות מי השטח, וכן עלייה במפלס פני הים. שינויים אלה משפיעים על המערכת האקולוגית באגן, ומתווספים ללחץ סביבתי הנובע מהיבטים הקשורים בזיהום ים ובפעילויות אנטרופוגנית אחרות בסביבה הימית והחופית.

מגמת הירידה ברמות הזיהום שנצפתה עד למחצית העשור האחרון נעצרה בחלק מן המזהמים. רמות הזיהום של מתכות כבדות וחומרי דשן התייצבו (דבר שלא בהכרח מעיד על מצב טוב) או שאף חלה עלייה מסוימת ברמתם. הרמה הנוכחית של חומרי דשן (נוטריינטים) בשפכי הנחלים עומדת על רמה "בינונית" עד "חמורה" של זיהום אקולוגי לפי המדדים המוצעים בפרק זה ולפי מדדים של מינהל האוקיינוסים והאטמוספרה בארה"ב (NOAA), זאת למרות ההפחתה בעומסי הנוטריינטים בהשוואה לשנות ה-90. בעשור האחרון נצפו מגמות שונות במוצאי נחלי החוף, ובכלל זה נחלים שבהם מסתמנת הרעה במצבם.

נצפו מגמות שונות של זיהום במתכות כבדות, אולם התצפית המשמעותית ביותר היא מגמת עלייה בריכוזי כספית

אצל דגים מצפון מפרץ חיפה, שנצפתה בשנים האחרונות. נמצאה חריגה מהקו המנחה של שירות המזון הארצי (או מתקנים מקובלים במדינות אחרות) לריכוז כספית אצל כ-30% מהדגים החופיים שנבדקו מאזור מפרץ חיפה. מומלץ להמשיך לחקור את מקור הזיהום בכספית במפרץ חיפה בצד המשך הניטור ולפעול לפרסום המלצות תזונתיות לכמות מקסימלית רצויה של צריכת דגים לפי אוכלוסיות (נשים בהיריון, ילדים לפי גיל) ולפי קבוצות של מיני דגים, כמקובל במספר מדינות בעולם.

תודות

תוכנית הניטור הלאומית של מימי החופין בים התיכון ממומנת על-ידי המשרד להגנת הסביבה ומשרד האנרגיה והתשתיות. תודות לכל עוזרי המחקר במחלקות לכימיה ופיזיקה ימית מחקר ימים ואגמים לישראל על תרומתם לדגימות ולבדיקות. תודות לחוקרי חיא"ל שפרשו ותרמו בעבר למדידות המוצגות בפרק זה (ד"ר נורית קרס; ד"ר אפרת שוהם פרידר; דב רוזן; חוה הורנונג ז"ל; ואחרים). תודה לד"ר דרור צוראל מהמשרד להגנת הסביבה, ד"ר אולגה זלוטקין, ד"ר עינת מגל ואילן נסים ממשרד האנרגיה והתשתיות (בהווה ובעבר) ולוועדת המומחים (חברי אקדמיה מהארץ) שבוחנת את דוחות הניטור הלאומי מדי שנה, על הליווי והתובנות.

רשימת מקורות

1. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive, 2008).

2. חרות, ב. וחובריו. תוכנית הניטור הלאומית בים התיכון לשנת 2022. ניטור זיהום ים. חקר ימים ואגמים לישראל H26/2023 (2023). https://www.ocean.org.il/%d7%93%d7%95%d7%97%d7%95%d7%aa-%d7%9c%d7%a6%d7%9 %d7%91%d7%95%d7%a8/.

3. חרות, ב. וחובריו. תוכנית הניטור הלאומית בים התיכון לשנת 2022. ניטור שינוי אקלים והמערכת ההידרוגרפית. חקר ימים ואגמים לישראל H26/2023 (2023).

4. Ozer T., Gertman I., Gildor H.& Herut B. Thermohaline Temporal Variability of the SE Mediterranean Coastal Waters (Israel) – Long-Term Trends,Seasonality, and Connectivity. *Front. Mar. Sci.* **8**,799457 (2022).

5. Ozer T. et al. Relationship between thermohaline and biochemical patterns in the Levantine upper and intermediate water masses, Southeastern Mediterranean Sea (2013-2021). *Front. Mar. Sci.*, **9**, 958924 (2022).

6. חרות ב. ושפר ע. מה נשתנה? איכות מימי החופין של ישראל בים התיכון, משנות ה- 80 ועד היום. אקולוגיה וסביבה **5**, 16- 24 (2014).

7. Herut B., Hornung, H., Kress, N. & Cohen Y. Environmental relaxation in response to reduced contaminant input: The case of mercury pollution in Haifa bay, Israel. *Mar. Poll. Bull.* **32**, 366-373 (1996).

8. Bareket, M.M., Bookman, R., Katsman, R., de Stiger, H. & Herut, B. The role of transport processes of particulate mercury in modifying marine anthropogenic secondary sources, the case of Haifa bay, Israel. *Mar. Poll. Bull.* **105**, 286-291 (2016).
9. חרות ב. וחובריו. תוכנית הניטור הלאומית של ישראל בים התיכון לשנת 2023. ניטור זיהום הים. חקר ימים ואגמים לישראל דוח H18/2024 (2024).
10. Shefer E., Silverman J., Herut B. Trace metal bioaccumulation in Israeli Mediterranean coastal marine mollusks. *Quat. Int,* **390**, 44-55 (2015).
11. Shoham-Frider, E., Gertner, Y., Guy-Haim, T., Herut, B., Kress, N., Shefer, E. & Silverman, J. Legacy groundwater pollution as a source of mercury enrichment in marine food web, Haifa Bay, Israel. *Science of the Total Environmen*t, 714, 136711 (2020).
12. Sisma-Ventura, G., et al. Long-term (1979-2024) trends and remobilization process of mercury pollution, the case study of Haifa Bay, Southeast Mediterranean Sea. *Journal of Hazardous Materials*, 137760 (2025).
13. Advice Refers to Fish and Shellfish Collectively as "FISH" / Advice Revised October 2021 ,https//: www.fda.gov/food/consumers/advice-about-eating-fish
14. דוחות ניטור מים ונחלים (2005-2016) .https//:www.gov.il/he/pages/water_and_stream_monitoring
15. Herut B. et al. ELong-Term (2002–2021) trend in Nutrient-Related Pollution at Small Stratified InlandEstuaries, the Kishon SE Mediterranean Case. *Water.* **15**, 484 (2023).
16. רהב, א. וחובריו. תוכנית הניטור הלאומית של ישראל בים התיכון לשנת 2022. ניטור המגוון הביולוגי. חקר ימים ואגמים לישראל דוח H26/2023 (2023).
https//:www.ocean.org.il%/d7%93%d7%95%d7%97%d7%95%d7%aa-%d7%9c%d7%a6%d7%99%d7%91%d7%95%d7%a8/.)

הספוג *Axinella polypoides* מהסוג סעיפנית נפוץ בעיקר בים התיכון ומצוי גם באוקיינוס האטלנטי בעומקים של 25 עד 100 מטר.
בתמונה יחד עם האצה שלוחית משוננת *Caulerpa scalpelliformis*. צולם בים התיכון מול שדות ים בעומק 25 מטר. צילום חגי נתיב.

14 פסולת ימית בחופי הים של ישראל

גליה פסטרנק

המכון ללימודי ים ע"ש ליאון רקנאטי, אוניברסיטת חיפה

galia_ps@hotmail.com

תקציר

הפסולת הימית ובעיקר פסולת הפלסטיק, הפכה לבעיה סביבתית המאיימת על מערכות אקולוגיות ימיות וחופיות, ובעלת השפעה שלילית על הכלכלה והבריאות. במחקרים שנערכו בשנות השמונים והתשעים נמצא כי פסולת הפלסטיק היוותה 71% מכלל הפסולת הימית, ומרביתה הגיעה מהיבשה, בעיקר מנופשים. בעשור הראשון של שנות האלפיים הפלסטיק היווה יותר מ-90% הפסולת בחופי ישראל, אולם במחקרים שנערכו בעשור האחרון פלסטיק היווה 85% מהפסולת בחופי הים התיכון בישראל, ובאילת הפלסטיק 83% מהפסולת. חופי הים התיכון נמצאו נקיים יותר מבעבר, כיוון שבשנים האחרונות חופי הארץ מנוקים בתדירות גבוהה. עם זאת הימצאות של פסולת קטנה, בעיקר בדלי סיגריות, מצביעה על כך שמרבית החופים לא מנוקים בצורה יסודית. הפסולת ממקור ימי מהווה 16% מכלל הפסולת בחופי הים התיכון של ישראל, וישנה ירידה קלה בכמות הפסולת ממקור ימי מדרום לצפון. בחופי אילת רק 1% מהפסולת הוגדר כמגיע מהים, זאת עקב מיעוט פסולת בים סוף ומשטר הרוחות באילת. כיום כמו בעבר מרבית הפסולת מגיעה מנופשים, לכן יש לצמצם את השלכת הפסולת בחופים, ולחנך את הציבור לצמצם את השימוש בפלסטיק, בעיקר חד-פעמי. שמירה על הניקיון בערים ומניעת הגעת פסולת לניקוזים ולנחלים תצמצם אף היא את כמות הפסולת הימית.

מבוא

נקודת המפגש בין הים ליבשה מהווה חלון לעולם אחר, של יבשות רחוקות, איים בודדים, מעמקי הים המסתוריים, או ספינות מסחר ושודדי-ים. שוטטות לאורך החוף, בעיקר אחרי סערה, מתוגמלת בהצצה לעולם הזה, כשהים פולט את אוצרותיו, בין אם הם מטען אבוד, חלקי עץ מכוסים ב"ברווזוני ים" או "מפלצות ים מסתוריות" (שברוב המקרים מתבררות כמין ידוע שעבר תהליך ריקבון). אולם, בעשורים האחרונים ה"מציאות" הן בעיקר אריזות פלסטיק כגון עטיפות חטיפים, פקקים של בקבוקים, בדלי סיגריות וכלים חד-פעמיים.

בעיית הפסולת הימית

בסוף שנות השישים של המאה העשרים התחילו בעלי חיים להיפגע מפריטי פסולת הנמצאים בסביבה הימית ובשנות השבעים התגלו במרכזי האוקיינוסים אזורים נרחבים מאוד מלאים בפסולת בכל הגדלים, שמרביתה עשויה מחומרים מלאכותיים (סינתטיים). אלה, בשילוב עם פסולת לא מתכלה שהושארה על-ידי נופשים בחופים, הביאו להכרה

שפסולת ימית מהווה בעיה סביבתית[1]. פסולת ימית הוגדרה בשנת 2008 בפרוטוקול להגנת הים התיכון מפני זיהום ממקורות יבשתיים, של אמנת ברצלונה, כ**"כל חומר מוצק, עמיד, מיוצר או מעובד אשר הושלך, נזרק או ננטש בסביבה הימית או החופית. פסולת ימית כוללת פריטים עשויים בידי בני האדם או ששימשו אותם והושלכו בכוונה או אבדו ללא כוונה בים או בקו החוף, כולל חומרים כאלה שהוסעו לסביבה הימית מהיבשה על-ידי נהרות, מערכות ביוב או ניקוז, או רוח. דוגמאות אופייניות הן פלסטיק, עץ, מתכת, זכוכית, גומי, בד ונייר"[2].**

פגיעה בסביבה הימית

ההשפעה הבולטת ביותר של פסולת ימית ובעיקר פלסטיק על יצורים ימיים היא הסתבכות של בעלי חיים בפסולת ימית שפוגעת ביכולתם לנוע, לאכול ולנשום (איור 1). אורגניזמים ימיים רבים טועים ורואים בפסולת מזון ובולעים אותה. פסולת בלתי ניתנת לעיכול כגון פלסטיק עשויה להצטבר בקיבה ולהשפיע על הרבייה וההישרדות של יצורים רבים, גם אם אינה גורמת ישירות לתמותה[3]. פריטי פלסטיק ששוקעים לקרקעית עלולים לשבור אלמוגים עדינים, או לחנוק בעלי חיים על קרקעית הים ולשנות את תנאי בית הגידול[4]. פסולת נמצאה בכל מקום בים, כולל בקרחונים צפים, ובאיים מרוחקים מכל אדם שבהם נצפו ציפורים ימיות כגון אלבטרוסים מאכילות את הגוזלים בפקקים, מצתים וחלקי פלסטיק[5].

איור 1. צב-ים חום (*Caretta caretta*) שנמצא בחוף מעיין צבי בעת סערה כששק כרוך סביב זרועו, פגע בה ומנע ממנו לצלול. צב-הים שסבל מרעב ומהיפותרמיה טופל במרכז להצלת צבי-ים של רשות הטבע והגנים, ושוחרר חזרה לים לאחר חמישה חודשי החלמה. (צולם ב-5.12.2016 על-ידי גליה פסטרנק).

רשתות דיג מודרניות, חבלים, מצופים, מלכודות וחוטי דיג עשויים מפלסטיק חזק המיועד לעמידות לזמן רב בתנאי הים. לכן, לציוד דיג נטוש יש השפעה משמעותית ולטווח ארוך יותר על הסביבה הימית. "דיג רפאים" מתרחש כאשר הרשתות

והמלכודות, שאבדו או ננטשו בים על-ידי דייגים, ממשיכות ללכוד בעלי חיים שמתים בסופו של דבר בתוכם[6].
הפסולת נודדת, ובעלי חיים שונים "מאמצים" חפצים שצפים בים כמקום מחסה, קינון או סתם תופסים עליהם טרמפ ונסחפים איתם מחוץ לאזורי המחיה הטבעיים שלהם. אם בעבר היו אלה בעיקר חלקי צמחים שהתפרקו עם הזמן, כיום מדובר בחומרים מלאכותיים כמו פלסטיק, שעמידותם לתנאי הסביבה גבוהה, ולכן טווח הנדידה שלהם גדול יותר, עד הגיעם לחופים מרוחקים. כניסת מינים זרים למערכות אקולוגיות חדשות מפירה את האיזון באותן מערכות[6,7].

פגיעה חברתית וכלכלית

פסולת ימית פוגמת באיכות החיים של הציבור, גורמת לירידת הערך האסתטי של חופי הרחצה, ולעיתים לאובדן הנאה ורווח עקב אי-שימוש בחופים מלוכלכים. חפצים כמו זכוכית שבורה, פסולת רפואית, חבלים וחוטי דיג מהווים סיכון מיידי לבריאות האדם כאשר הם מגיעים לחופים ולמי החופים[2]. הרשויות המקומיות החופיות נושאות בעלות ניקוי החופים, וכך גם נמלים ומעגנות, שבתוכם מצטברת פסולת רבה מהים[7]. חופים מזוהמים פוגעים בענף התיירות ובגורמים הנשענים על פעילות חופית וימית לפרנסתם[9]. רשתות דיג, חבלים וציוד אחר שנלכדים במדחפי כלי השיט או בהגה ושקיות פלסטיק שסותמות את פתחי יניקת מי הקירור גורמים סכנה לכלי השיט ולאנשי הצוות[10]. ענף הדיג, סובל מהפחתה בשלל, אובדן זמן בהוצאת הפסולת מהרשתות, ופגיעה ברשתות וציוד דיג נוסף.

פסולת פלסטיק

כמויות פסולת הפלסטיק בים גדלות במהירות עקב ייצור הולך וגובר של פלסטיק, והשלכת פסולת בלתי מבוקרת. צריכת הפלסטיק העולמית עמדה על 5 מיליון טונות לשנה ב-1950, על 100 מיליון טונות בשנת 2007[11], ובשנת 2022 ייצור הפלסטיק הוערך ב-400 מיליון טונות לשנה, מתוכם 362 מיליון טונות פלסטיק מבוסס נפט[12]. בשל אי יכולת למדוד ישירות את כמות הפסולת המגיעה לסביבה ולים, נתונים אלו מוערכים על סמך כמות הפסולת הלא מטופלת, שמהווה מרכיב עיקרי בזיהום הסביבה, אולם בשל חוסר בנתונים אין לכך הערכה אחידה[13]. לפיכך, הנתונים המקובלים בעולם הם שכ-9-14 מיליון טונות של פלסטיק הגיעו לים בשנת 2016 ולפי קצב ייצור וצריכת הפלסטיק הנוכחיים, הם יעלו ל-23-37 מיליון טונות בשנת 2040[14]. מוערך שעד כה הצטברו בין 75-199 מיליון טונות של פלסטיק בים[13].
מעבר לבעיה הסביבתית שפסולת פלסטיק יוצרת, היא גם מתפוררת למיקרופלסטיק (פלסטיק קטן מ-5 מ"מ) שמגיע ממקורות נוספים ועל כך ניתן לקרוא בהרחבה בפרק של יעל סגל ומתן אורן בספר זה.
אומנם הפלסטיק שיפר את איכות חיינו בדרכים רבות, מהפחתת התמותה כתוצאה משיפור הסטריליות בבתי חולים ועד חיסכון באנרגיה ואריזה, אבל אין ספק שיש לו גם חסרונות סביבתיים. התכונות הפיזיקליות שהופכות את הפלסטיק לאידיאלי למוצרים כמו אריזות מזון – מחיר נמוך, משקל נמוך, חוזק וגמישות – הופכות אותו לעמיד מאוד, בעיקר בסביבה הימית, שבה הטמפרטורות הנמוכות והחשיפה לקרני UV מועטה. מחקרים הראו שהפלסטיק נמצא בכל מקום בסביבה החופית והימית, ויש חוקרים הקושרים את זיהום הפלסטיק בים למשבר האקלים[15].

פסולת ימית בחופי ישראל - סוף המאה ה-20

במחקרי פסולת ימית בחופי הים התיכון של ישראל שנערכו בסוף שנות ה-80 ותחילת שנות ה-90 של המאה הקודמת על-ידי באומן, גוליק וחוקרים ונוספים[16-18] נמצאה הפסולת הימית בחופים בצפיפות של בין 3-38.5 פריטים ל-100 מ"ר (טבלה 1). פסולת הפלסטיק היוותה 71% מהפסולת בחופים (אם כי ייתכן שמחקרים אלה לא כללו בדלי סיגריה הנספרים כיום כפריטי פלסטיק). מרבית הפסולת הגיעה מהיבשה, ויוחסה בעיקר לנופשים: שקיות, בקבוקי שתייה ומכלי מזון, תכשירי שיזוף ומצופי קלקר, וככל שחוף קרוב יותר לאזורים מאוכלסים, כמות הפסולת שבו עלתה. היעדר מוחלט של שאריות ציוד דיג ומיעוט פריטים האופייניים לפסולת אוניות כגון עץ מעובד, חבלים, מכלי שמן, ורצועות פלסטיק ומתכת, וכן פריטים עם כיתוב בשפות זרות, תמך בהשערה שרוב הפסולת החופית בחופי ישראל היא ממקור יבשתי[18]. בחוף אכזיב נמצא ריכוז פסולת גבוה ומספר רב יחסית של פריטי הפסולת שהגיעו מלבנון. מספר מזבלות עירוניות פעלו לאורך חופי לבנון, כולל בצור וצידון ופסולת גלשה מהם לים לעיתים קרובות. כאשר הרוח צפונית או שהזרמים המקבילים לחוף היו דרומיים, הפסולת הגיעה לחופי ישראל, ובעיקר לחוף אכזיב.

ניקוי חופי ישראל - תוכנית חוף נקי

במשך שנים רבות היו החופים הבלתי מוכרזים הפתוחים, המהווים את מרבית רצועת החוף של ישראל, מלוכלכים, זאת בשל השארת פסולת על-ידי נופשים ופריטי פסולת שהגיעו מהים לחופים ולא נוקו. החובה החוקית לשמירת כל החופים נקיים – לרבות הבלתי מוכרזים – מוטלת על הרשויות המקומיות החופיות ורשות הטבע והגנים ומשרד הביטחון, בחופים שבאחזקתם. בעוד שניקוי חופים מוכרזים ממומן על-ידי משרד הפנים כחלק מהתפעול השוטף, רוב הרשויות החופיות התקשו כלכלית לשמור על ניקיון החופים הלא מוכרזים, מאחר שחוף הים הפתוח לציבור משרת עורף עמוק בהרבה מתחומי הרשות המקומית והעול הכספי נופל רק על הרשות שבתחומה החוף[11].

ביוני 2005 הושקה תוכנית "חוף נקי" של המשרד להגנת הסביבה, המשלבת מספר דרכי פעולה ומדד להצלחה, על-פי גישת פתרון בעיות סביבה[19]. התוכנית נועדה לא רק ליצור רצף של פעולות ניקיון בלבד, אלא להביא לשינוי מהותי במצב ניקיון החופים ושמירה על ניקיונם לאורך זמן, תוך יצירת שינוי מבוקש במודעות הציבור והרשויות האחראיות לניקיון החופים.

המרכיב העיקרי בתוכנית הוא ניקוי שגרתי של החופים הלא מוכרזים על-ידי הרשויות המקומיות, בהתבסס על "תיאוריית החלונות השבורים"[20], לפיה הזנחה נותנת לגיטימציה להמשך הזנחה. ציבור שמגיע לחוף שנראה כמו מזבלה, ירגיש נוח להשליך פסולת לחוף, אך יימנע מהשארת אשפה אם החוף נקי. התוכנית מסבסדת עד 70% מעלות ניקוי החופים של הרשויות המקומיות, האחראיות לניקיון החוף ועבודת הקבלנים ששכרו[11]. המימון לרשויות ניתן על סמך אורך החוף, מדרג חברתי כלכלי, היחס בין גודל אוכלוסיית הרשות המקומית לבין אורך קו החוף, וכן על-פי רמת ניקיון החוף, המדורג על-פי "מדד חוף נקי"[21]. בנוסף למימון ניקוי החופים הלא מוכרזים לרחצה, הוקצה תקציב עבור הפחתה במקור של פסולת ימית על-ידי הקמת תשתיות לאיסוף פסולת בחופים, מניעת הגעת פסולת מנקזי נגר עילי, פיקוח על איסור שימוש בפלסטיק חד-פעמי בחופים (לשם כך על הרשות ליישם חוק עזר עירוני) והקמת מתקני תשתית או ציוד לעידוד בשימוש כלים רב-פעמיים[21], כגון כיורים לשטיפת כלים ביציאה מהחוף.

פעולות נוספות במסגרת תוכנית "חוף נקי", כוללות אכיפה נגד מלכלכים במהלך סופי השבוע בקיץ והוצאת מכתבי התראה וצווי ניקוי בהתאם לחוק הנקיון, 1984, לראשי הרשויות שחופיהן נמצאו מלוכלכים לפי "מדד חוף נקי". התוכנית פועלת להגברת המודעות באמצעות מסעות פרסום תקשורתי, כמו "חד-פעמי – לא בים שלי!" הקורא להימנע מהבאת כלים החד-פעמיים לחוף הים[21], וכתיבת תוכניות

חינוכיות לבתי הספר ולתנועות נוער מתוך הכרה שיהיה קל יותר להעביר את החשיבות של שמירה על חוף נקי לילדים, ומשם להורים. בעבר פעלה יחידת מתנדבים "משמר החוף" שעזרה בהסברה ובהדהוד מסרי "חוף נקי" לקהילות המקומיות[11,21]. מדד חוף נקי הצלחת תוכנית "חוף נקי" נבחנת ברמת הניקיון של החופים, ולשם כך פותח "מדד חוף נקי", המודד את רמת ניקיון החוף בצורה אובייקטיבית ופשוטה ללא תלות בגורם המבצע את המדד[10]. "מדד חוף נקי" נקבע לפי מספרי פריטי פלסטיק הגדולים מ-2 ס"מ ל-20 מ"ר: 0-2 – נקי מאוד, 2-5 – נקי, 5- 10 – בינוני, 10-20 – מלוכלך, מעל 20 – מלוכלך מאוד[22]. הפלסטיק נבחר כסמן לרמת הניקיון בחוף, בהסתמך על בדיקה מקדמית שנערכה במהלך חורף שנת 2004-2005, שבה פלסטיק היווה כ-90% מהפסולת בחוף הישראלי של הים התיכון. "מדד חוף נקי" מבוצע ברצועות באורך של 10 מטר, במקביל לקו המים והרוחב מקו המים בזמן הדיגום ועד לקצה החוף המיוצג על-ידי מכשול, דיונה, מצוק, קו צמחייה, כביש או גדר. בכל רשות מקומית נקבעו 1-3 חופים (בהתאם לאורך החוף ברשות והשוני בין מקטעי החוף השונים) שבהם מבוצעים המדדים בכל שבועיים על-ידי מפקחי היחידה להגנת הסביבה הימית במשרד להגנת הסביבה.

תוצאות "מדד חוף נקי" מפורסמות באתר האינטרנט של המשרד להגנת הסביבה, ובערוצי התקשורת השונים, בכדי ליצור לחץ של הציבור על הרשויות המקומיות לנקות את חופיהן. מעבר לשימוש בתוכנית חוף נקי, הפך "מדד חוף נקי" לכלי מדעי מקובל ברחבי העולם לקביעת רמת ניקיון בסיסית של החופים, לצד ביצוע סקרים של סוגי הפסולת המגיעה לחופים[23].

פסולת ימית בחופי הים התיכון של ישראל - בין השנים 2012-2023

בכדי לשפר את ההתמודדות עם בעיית הפסולת בחופים, עלה צורך להבין אלו פריטים מגיעים לחופים ומה מקורם. לשם כך נערך בשנים 2012-2018 מחקר בשישה חופים, במסגרת עבודת דוקטורט בנושא "פסולת ימית מוצקה בחופים הים-תיכוניים של ישראל: סוגים, מקורות, פיזור והולכה"[24]. מחקר נוסף בנושא "מקורות פסולת הפלסטיק הימית בחופי ישראל" נערך בין נובמבר 2020 לינואר 2023 עבור לשכת המדענית במשרד להגנת הסביבה[25]. המחקר התבצע בתשעה-עשר חופים חוליים לא מוכרזים שמתבצע בהם באופן קבוע "מדד חוף נקי", לאורך הים התיכון ולראשונה בשני חופים באילת, המייצגים את כל הרשויות המקומיות החופיות.

המדידה בשני המחקרים התבצעה ברצועת חוף של 100מ' על-פי הנחיות UNEP/IOC[26], מקו המים עד לקצה החוף הנקבע על-פי המכשול הראשון. פריטי פסולת בגודל העולה על 2.5 ס"מ מוינו לפי טבלאות בינלאומיות המבוססות על זיהוי המוצר המקורי והחומר שממנו הוא עשוי[26], ולפי המקור שלהם: יבשה, ים או לא ודאי[27]. פריטים שמקורם לא ודאי עברו במחקר שנערך בין 2020-2023 מיון משני המבוסס על סוג הפסולת, תנאי מזג האוויר והים, מיקום החוף ופריטי פסולת נוספים שנמצאו בחוף[28].

במהלך המחקר של 2020-2023 היו מספר אירועים חריגים, שהיו עשויים להשפיע על כמות הפסולת בחופים: מגפת הקורונה, שהקטינה את כמות המבקרים בחופים וכן את תדירות הניקוי בחוף; אירוע זיהום הים בשמן בפברואר 2021, שבעקבותיו נוקו מרבית חופי הארץ מזפת וכן מפסולת שהייתה עליהם (בשל האירוע הזה לא נערכו סקרי החורף והם הושלמו בינואר 2023); נפילת 9 מכולות מטען מחוץ לנמל אשדוד בדצמבר 2022, שמתוכן 6 מכולות נסחפו לחופי העיר אשקלון והמועצה האזורית חוף אשקלון, ותכולתן שכללה כלים חד-פעמיים, שמיכות וביגוד, בקבוקים, מוצצים וציוד לתינוקות, ומכשירי חשמל התפזרה בחופים, נאספה על-ידי הציבור ונוקתה על-ידי מתנדבים מארגונים ירוקים, קבלני ניקיון שנשכרו על-ידי החברה המזהמת, וכן עובדי רט"ג ועיריית אשקלון.

צפיפות הפסולת בחופים

במחקר שנערך בין 2012-2018 השכיחות הממוצעת של הפסולת בחופי הים התיכון הייתה 11.6 פריטים ל-100 מ"ר (SE=0.045)[24], ובמחקר שנערך בין 2020-2023 ניכרה ירידה של 40% בכמות הפסולת בחופים, 6.89 פריטים ל-100 מ"ר (SE=0.38)[25] (טבלה 1). בשני המחקרים כמות הפסולת בחופים, שנעה במחקר שנערך בין 2012-2018 בין 5-15 ובמחקר שנערך בין 2020-2023 בין 2-17 פריטים ל-100 מ"ר, הייתה פחותה מזאת שדווחה בשנות ה-90 של המאה הקודמת, שנעה בין 35-5 פריטי פסולת ל-100 מ"ר[15] (טבלה 1).

טבלה 1. השוואה בין תוצאות המחקרים שנערכו בחופי הים התיכון של ישראל בתקופות השונות.

	תקופת המחקר	1988-1989[17,18]	1990-1991[16]	2012-2018[24]	2020-2023[25]
צפיפות	ממוצע (פריטים ל-100 מ"ר)	18-38.5	3-32	11.60	6.89
חומרים	פלסטיק	70.9%	70.6%	89.7%	85.7%
	ספוג וקלקר	3.5%	*	1.5%	5.2%
	בדים	2.1%	*	0.6%	0.8%
	זכוכית וקרמיקה	2.8%	3.9%	0.6%	0.6%
	מתכת	4.8%	2.5%	1.3%	2.1%
	גומי	0.0%	*	0.4%	0.9%
	נייר	*	0.4%	2.1%	1.8%
	עץ	8.4%	18.0%	0.6%	0.9%
	אחר	7.5%	*	3.2%	0.9%

*מידע לא מופיע בספרות

הירידה בכמות הפסולת תואמת גם את דיווחי תוכנית חוף נקי על כך שישנה עלייה במספר החופים שנמצאו "נקיים" או "נקיים מאוד" מאז תחילת התוכנית ובעיקר החל משנת 2017[21]. נראה שהשיפור בניקיון החוף נובע מניקוי יותר אינטנסיבי של החופים על-ידי הרשויות. בעוד שבעבר היו חופים שנוקו בתדירות נמוכה, אם בכלל, במהלך הסקרים היה ניתן לראות שכל החופים שנסקרו במהלך המחקר נוקו בתדירות גבוהה, למעט חוף אשדוד צפון. לכן עיקר הפסולת שנמצאה בחופים במחקר שנערך בין השנים 2020-2023 היה פריטים קטנים כגון בדלי סיגריות, קשיות שתייה ופקקי בקבוקים[25]. לא ניכרה השפעה של מגפת הקורונה על כמות הפסולת בחופים, שהמשיכה במגמת הירידה שהחלה בשנת 2016 עם הגדלת תקציב ניקוי החופים[21].

פיזור הפסולת בחוף

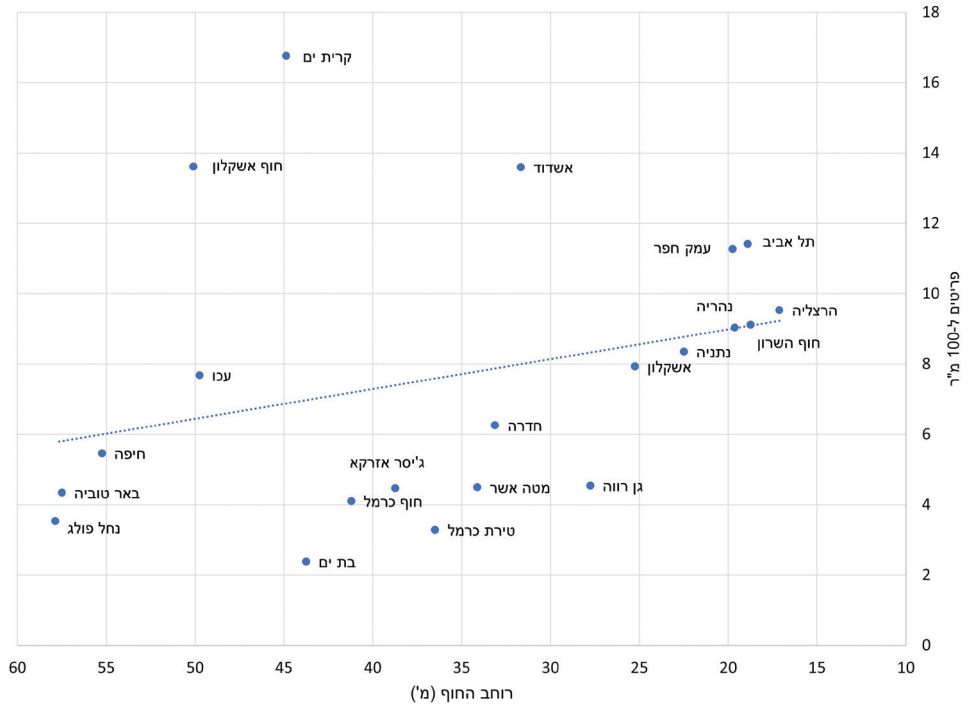
פסולת מגיעה לים מהיבשה בעיקר מהחופים, מזרימת נחלים או נקזים והתעופפות ברוח. פסולת חופית מופיעה לרוב בערימות (במקום שבו ישבו נופשים), שאם אינן מפונות, מתפזרות על-ידי בעלי חיים והרוח או נשטפות על-ידי הגלים לכיוון החוף או לים[25]. פסולת מנקזים או נחלים מגיעה לרוב לקו המים ומושפעת מתנועת הזרמים והגלים. במדידות שנערכו בסתו 2020 ו-2021, לאחר אירוע גשם ראשון, ניתן היה לזהות בחוף תל ברוך בתל אביב פסולת שהגיעה מנחל הירקון, בחופי נתניה ועמק חפר פסולת שמגיעה מנחל פולג ובחופי קריית ים ואשקלון (איור 2) פסולת המגיעה מהנקזים העירוניים הצמודים לאתרי המדידה[25].

איור 2. פסולת מהנקז שמדרום לחוף (ניתן לראות את הפס הכהה של שפך הנקז בקצה העליון של התמונה) בחוף אשקלון צפון (צולם ב-21.11.21 על-ידי גליה פסטרנק).

פסולת מהים נובעת מפעילות ספינות מסחריות, דיג ושיט (רשתות דיג, מלכודות, מצופים וכו'), תעשיות הנפט וחקלאות ימית, או מחופים אחרים. צורת (מורפולוגיית) קו החוף, עומק המים בקרבת החוף ויחסי הגומלין (אינטראקציה) עם ההידרודינמיקה הימית: רוחות, גלים, גאות ושפל, משפיעים על הגעת הפסולת לחוף[29]. פסולת המגיעה מהים מצטברת

באזורי שבירת הגלים, לרוב ב"פסי פסולת", אבל עשויה גם להילקח חזרה לים על-ידי הגלים בתהליך של שטיפה הפוכה (backwash) ועל-ידי הרוח, או להידחף במעלה החוף על-ידי גלים גבוהים יותר או רוח מהים[29,30].

במחקר בשנים 2020-2023 נמצא מתאם הפוך בין רוחב החוף לכמות הפסולת[25] (איור 3). בחופים רחבים מ-28 מ' בים התיכון – מטה אשר, עכו, חיפה עד חדרה, שפך נחל פולג, בת ים, גן רווה ובאר טוביה – נמצא ריכוז הפסולת נמוך מ-6 פריטים ל-100 מ"ר, פרט לחופי קריית ים, אשדוד צפון וזיקים (חוף אשקלון) הרחבים, שאליהם הגיעה פסולת רבה מהממוצע ותדירות הניקוי בהם לא הייתה מספיקה. בחופים צרים מ-25 מ' – נהריה, עמק חפר עד תל אביב (למעט שפך נחל פולג) ואשקלון שגם מתוחמים במצוק – שכיחות הפסולת הייתה מעל 7 פריטי פסולת ל-100 מ"ר. בחופים צרים, "פסי פסולת" בעורף החוף מצביעים על כך שהחוף נשטף, והפסולת מצטברת שם (איור 4).



איור 3. היחס בין רוחב החוף לצפיפות הפסולת (מספר פריטים ל-100 מ"ר) במחקר שנערך בין 2020-2023[25].

מקורות הפסולת בחופים

בחלוקת הפסולת למקורות, מוערך ש-16% מהפסולת שנמצאה בחופי הים התיכון הגיעו מהים ו-84% מהיבשה[25]. לפי מראה הפסולת בחוף, מקור הפסולת היבשתית הוא בעיקר נופשים בחוף, עם תרומה מסוימת של פסולת מנחלים או נקזים לאחר אירועי גשם. יותר פסולת ממקור ימי נמצאה בחופי הדרום, בעיקר זיקים, וכמותה ירדה ככל שעולים צפונה[25].

איור 4. "פס פסולת" בעורף חוף צוקי ים בעמק חפר (צולם ב-20.2.22 על-ידי גליה פסטרנק).

הים התיכון מוגדר כאזור בסיכון (Hotspot) כתוצאה מזיהום הים בפלסטיק, בעיקר בגלל מבנהו הסגור[31]. שכיחות הפסולת הימית הצפה במזרח הים התיכון משמעותית וגבוהה יותר מערכי הצפיפות שכומתו במרכז ומערב הים התיכון, ככל הנראה בשל פסולת רבה שמגיעה ממקורות יבשתיים מקומיים ודפוסי זרמים בפני הים[32]. מודל תנועת פסולת צפה בים התיכון, המבוסס על פיזור חלקיקים וירטואלים ממוקדי זיהום בים התיכון, שפורסם על-ידי Liubartseva et al בשנת 2018, מדרג את ישראל כשלישית בפוטנציאל הגעת הפסולת הימית לחופיה, כתוצאה מהרוחות והזרמים העיליים בים התיכון המסיעים את הפסולת מזרחה. על-פי מודל זה, מגיעים לחופי ישראל כ-21 ק"ג פלסטיק לק"מ ליום, אולם 90% מהפסולת היא מקומית, החוזרת לחופים ב"אפקט בומרנג", 10% מגיעה מפעילות ימית ו-5% פסולת חוצת גבולות ממדינות אחרות[33].

בשני המחקרים האחרונים, קצת פחות מ-10% מהפריטים נשאו תווית שניתן לזהות ממנה את מדינת המקור של הפסולת. פריטים נושאי תוויות הם לרוב אריזות מזון (בעיקר חטיפים), שקיות, בקבוקים ומכלי שתייה, וייתכן שניקוי החופים המוגבר "ממסך" את התוצאות, כיוון שפריטים אלה הם הראשונים להיאסף. בשני המחקרים, פריטים מישראל היוו כ-75% מהפסולת שנשאה תווית, 2% הגיעו מהצפון (לבנון, סוריה, קפריסין ויוון) ו-10% מהפסולת המזוהה הגיעו מהדרום (מצרים ורצועת עזה)[24,25]. מצרים נחשבת כתורמת העיקרית של פסולת הימית בים התיכון, בעיקר מהנילוס[34]. פסולת שמקורה ברצועת עזה או מצרים נמצאה בעיקר בחופי הדרום, אולם הגיעה גם צפונה לכל החופים עד מטה אשר (למעט נהריה וחוף קריית חיים). בחוף זיקים, נמצאה לפעמים יותר פסולת ממצרים ורצועת עזה מאשר פסולת ישראלית[25]. 5% מהפסולת הגיעה מטורקיה, אולם קשה לדעת אם היא מגיעה מהמדינה או מכלי שיט בים התיכון.

הירידה בכמות הפסולת המגיעה מלבנון בשני המחקרים האחרונים, ובעיקר ביחס למה שנצפה בעבר (במחקרים של גוליק ובאומן[16,18], ובמספר אירועים כמו באוקטובר 2010, במהלכו נצפו בחופים מהצפון ועד לתל אביב, כמויות גדולות של פריטי פסולת מלבנון), נובעת ככל הנראה מסילוק חלק מהמזבלות שהיו לאורך חופי לבנון, והפיכת מזבלת צידון, שהייתה מקור פסולת ימית משמעותי, לפארק בשנת 2013[35].

הרכב הפסולת בחופים

פלסטיק הוא החומר הנפוץ ביותר מכלל הפסולת בחוף הישראלי, בדומה לחופים ברחבי העולם, שבהם נמצא הפלסטיק בריכוזים הנעים בין 66%-91% מסך הפסולת הימית[36]. ריכוז הפלסטיק עלה מ-71% בשנות התשעים, ל-90% מהפסולת בחופים בשנת 2004[22] (טבלה 1), ככל הנראה מהעלייה בשימוש במוצרי פלסטיק, בעיקר כלים חד-פעמיים. ב-2020-2023 פלסטיק היווה רק 86% מהפסולת בחופי הים התיכון[25], ירידה הנובעת מהעלייה היחסית בכמות הקלקר שנמדדה (5% מהפסולת בים התיכון) בחופים העירוניים שלא נסקרו בעבר.

בדלי סיגריות היוו 17% מהפסולת בשנים 2012-2018, אולם בשנים 2020-2023 עלתה כמותם היחסית ל-24% מכלל הפסולת בחופי הים התיכון של ישראל, והם היו הפסולת הנפוצה ביותר בלמעלה ממחצית החופים (איור 5). העלייה בחלקם היחסי של בדלי הסיגריות נובעת בעיקר מירידה בחלקם היחסי של פריטים אחרים כגון שקיות ניילון ובקבוקים. בדלי סיגריות הם פריטי הפסולת הימית הנפוצים ביותר בים התיכון[34] ונראה שריכוז גבוה של בדלי סיגריות נובע משילוב של חופים הומי נופשים, הימצאות נקזים עירוניים שמסיעים פסולת מהעיר, ותדירות ניקוי גבוהה של פרטי פסולת גדולים, עם הזנחת בדלי סיגריה ופקקים הנשארים בתוך המצע[25].

כלים חד-פעמיים (חד"פ) מפלסטיק היוו 24% מהפסולת במחקר שנערך בין 2012-2018 ו-18% מסך הפסולת בחופי הים התיכון במחקר שנערך בין 2020-2023 (איור 5). בהשוואה בין נתונים שנאספו בין 2015-2018 לאלו שנאספו בין 2020-2023, לא היה שינוי בחלקם היחסי של פריטי הפסולת הקטנים כמו קשיות השתייה והסכו"ם שהיוו 6% מהפסולת ו-1% מהפסולת, בהתאמה; לעומתם חלקם היחסי של פריטים גדולים יותר, כוסות וכלי אוכל חד"פ ירד מ-10% ל-9% ומ-6% ל-1% מהפסולת, בהתאמה[25,37]. ניכר שההבדל נובע מניקוי החופים שהשתפר עם השנים, אך עדיין מזניח את הפריטים הקטנים יותר. ייתכן גם שהירידה נובעת מהפחתת השימוש בכלים חד-פעמיים בעקבות מסע הפרסום, או המיסוי על כלים אלו שחל בשנת 2022. הימצאות כלי חד"פ מהווה לרוב סימן לפסולת מנופשים, אולם בחופים הדרומיים חלק ניכר מכלי החד"פ הגיע מהים (ומחופי עזה ומצרים).

בכמותן היחסית של **אריזות ועטיפות מזון** ניכרה עלייה מ-9% מכלל הפסולת במחקר שנערך בין 2012-2018 ל-12% במחקר שנערך בין 2020-2023[25,24]. עטיפות רבות נמצאו בחופים הדרומיים ונשאו תוויות ממצרים ומרצועת עזה.

פקקי בקבוקים מהווים 12% מהפסולת, ועיקרם פקקי פלסטיק (11% מהפסולת), פקקי מתכת (1% מהפסולת) ופקקי שעם (פחות מ-0.1%). הכמות שלהם בכל החופים נעה בין 0.7-1.4 פקקים ל-100 מ"ר (עם חריג של 2.55 פקקים ל-100 מ"ר בעמק חפר) וגם בהשוואה עונתית שמרו הפריטים האלה על ריכוזים ואחוזים דומים בשני המחקרים. מרבית פקקי הבקבוקים (במיוחד ממתכת, שרובם היו ממקור מקומי) מושארים על-ידי נופשים בחוף, ובמקרים רבים לא מנוקים. בהיותם קטנים יותר מבקבוקים, פקקים המגיעים ממערכות הניקוז או נחלים נוטים פחות להילכד על-ידי רשתות ניקוז או בצמחיית גדות בדרכם לים[37].

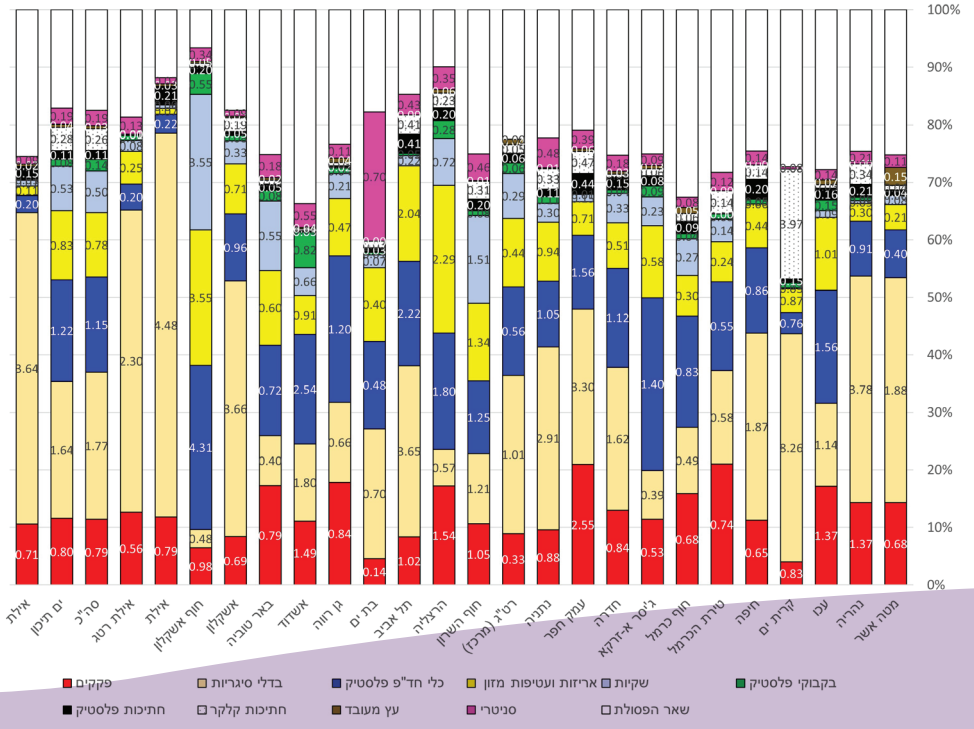
שכיחות **שקיות הפלסטיק** בחוף ירדה מאז שנת 2017, שבה הוחל "חוק השקיות", שהוביל בשנתו הראשונה לירידה של 75% ברכישת שקיות חד-פעמיות ברשתות בגדולות. בתקופה שבין 2012-2015 השקיות היוו 23% מכלל הפסולת ובתקופה שבין 2015-2018 השקיות היוו 14%[37]. במחקר שנערך בין 2020-2023, חלקם היחסי ירד ל 8% מכל הפסולת. שקיות נמצאו בעיקר בחופים מבודדים שהייתה בהם הרבה פסולת מהים: חוף אשקלון (3.55 פריטים ל-100 מ"ר), חוף

השרון (1.51 פריטים ל-100 מ"ר), צפון הרצליה (0.72 פריטים ל-100 מ"ר), ובאר טוביה (0.55 פריטים ל-100 מ"ר)[25].

חתיכות קלקר גדולות מ-2.5 ס"מ היוו 0.5% מהפסולת במחקר שנערך בין 2012-2018[24] ו-5% מכל הפסולת במחקר שנערך בין 2020-2023[25]. העלייה היחסית בכמות הקלקר נובעת כנראה מדיגום חופים בלתי מוכרזים עירוניים, שבהם נמצאו מרבית חתיכות הקלקר, שנערך רק במחקר בין 2020-2023 (איור 5). 51% מחתיכות הקלקר הגיעו לחופים בסתיו 2020, ו-21% בסתיו 2021, בעיקר מנקזים עירוניים (הזורמים ישירות לחוף, או לנחלים ומהם לחוף), ככל הנראה בשל פירוק של בידוד תשתיות[39]. עיקר חתיכות הקלקר נמצא בחוף קרית ים (3.94 פריטים ל-100מ"ר, 24% מהפסולת בקריית ים)[25].

בקבוקי פלסטיק היוו 4% מהפסולת במחקר שנערך בין 2012-2018[24] ובמחקר שנערך בין 2020-2023 1% בלבד מכל הפסולת (איור 5). הירידה המשמעותית יכולה לנבוע מעלייה בתדירות הניקוי של החופים או מהפחתה בהשלכת בקבוקים בעקבות הרחבת חוק הפיקדון[25].

פריטים המקושרים לקורונה (מסכות וכפפות גומי) היוו פחות מ-1% מכלל הפריטים, כאשר בכל סקר נמצאו פריט או שניים. לא ניתן לקשר את המסכות למקור ספציפי. בהינתן שלא הייתה חובת לבישת מסכות בחוף הים, ניתן לשער שהמסכות הגיעו לחוף על-ידי נופשים בודדים ששכחו להסירן לפני שהגיעו לחוף, התעופפו מהיבשה או זרמו עם נחלים וניקוזים או שהגיעו מהים או ממדינות אחרות.



איור 5. התפלגות פריטי הפסולת העיקריים בחופים באחוזים בין השנים 2020-2023[25].

פסולת ימית בחופי מפרץ אילת של ישראל - בין השנים 2020-2023

פסולת ימית בחופי אילת נחקרה לראשונה בין נובמבר 2020 לינואר 2023, במקביל למחקר של חופי הים התיכון של ישראל[25].

צפיפות הפסולת בחופים

בחופי אילת הצפיפות הממוצעת של הפסולת בחופים היא 6.37 פריטים ל-100 מ"ר (SE=1.55), הדומה לזאת שנמצאה בחופי הים התיכון של ישראל, ורמת הניקיון בשני החופים שנמדדו הייתה תמיד "נקי" או "נקי מאוד" לפי "מדד חוף נקי"[25].

פיזור הפסולת בחוף

חופי אילת מנוקים מספר פעמים ביום, ולכן לא נמצאו ערימות פסולת. מרבית הפסולת בחופי אילת התרכזה בעורף החוף, ככל הנראה כתוצאה מניקוי לא יסודי של פסולת קטנה. בחוף מפרץ השמש, הנמצא מזרחית לתעלת הקינט, נצפתה פסולת קטנה רבה כמו בדלי סיגריות לאורך קו המים ליד התעלה (איור 6).

איור 6. "פס פסולת" קטנה, המורכבת בעיקר מבדלי סיגריות, בחוף מפרץ השמש באילת, ליד תעלת הקינט (צולם ב-22.12.2021 על-ידי גליה פסטרנק).

מקורות הפסולת בחופי אילת

99% מהפסולת באילת הגיעה מהחוף ו-1% מהים. רק 2% מהפריטים שנסקרו באילת היו עם תוויות, מתוכם 80% מישראל, 5% ממצרים ומירדן כל אחת ו-10% ממדינות אחרות, שהגיעו ככל הנראה מתיירים בחוף. באילת שולטת רוב

השנה רוח צפונית, ולכן הסעת הפסולת היא מאילת והלאה ולא אליה. ממעט המחקרים שנעשו בים סוף, עולה כי כמות הפסולת הצפה בים סוף נמוכה פי 40 מבים התיכון[4] והפסולת ממצרים ומירדן נמצאה בסקר שנערך ביום שבו היו רוחות דרום-מערביות.

הרכב הפסולת בחופי אילת

פלסטיק הוא החומר הנפוץ ביותר מכלל הפסולת גם בחופי אילת, והיווה 83% מהפסולת. פסולת ממתכת, שהייתה מורכבת בעיקר מפקקים, יתדות ומסמרים, היוותה 9% מהפסולת.

בדלי סיגריה היוו 55% מכלל הפסולת באילת, בעוד שאר פרטי הפסולת נמצאו בכמויות קטנות. נראה שחלק גדול מבדלי הסיגריות מגיע מתעלת הקינט, המנקזת חלקים מהעיר (איור 6).

באילת הפריט השכיח הבא היה **ציוד נלווה לאוהלים** הכולל יתדות, מיתרים ואזיקונים ומוטות אוהלים, שהיווה כ-13% מהפסולת, בעיקר באזור ששימש כאתר קמפינג.

פקקי בקבוקים מהווים 11% מסך הפסולת באילת, ומחולקים שווה בין פקקי פלסטיק ומתכת, עם מעט מאוד פקקי שעם (פחות מ-0.1%). מרבית פקקי הבקבוקים (במיוחד ממתכת, שהיו ממקור מקומי) הושארו על-ידי נופשים בחוף, ולא נוקו.

כלים חד"פ מפלסטיק מהווים באילת רק 3% מהפסולת, וכוללים קשיות שתייה (2% מהפסולת באילת) וסכו"ם (1% מהפסולת באילת). **אריזות ועטיפות מזון** באילת היוו רק 2%.

שקיות פלסטיק ו**בקבוקי פלסטיק** היוו באילת רק 1% כל אחד (איור 5).

הכמות הגדולה של בדלי סיגריות ופריטי פסולת קטנה מצביעה על כך שהחוף מנוקה אך לא ברמה יסודית, ופרטים קטנים נטמעים בין אבני החוף. ייתכן גם שרוחות צפוניות שמעיפות לים פסולת פלסטיק קלה כמו אריזות פלסטיק וכלים חד"פ, משאירות את הפסולת הקטנה. לרוח חזקה יש פוטנציאל לשאת פסולת, בעיקר פלסטיק קל משקל בעל מבנה מסוים כגון שקיות ניילון, בלונים[29] ואריזות מזון.

פתרונות לבעיית הפסולת בחופים

כל עוד האנושות תמשיך להשתמש במוצרי פלסטיק, הם ימשיכו להגיע לסביבה, לחופים ולים. אין ספק שתוכנית "חוף נקי" הפחיתה את כמות הפסולת בחופים, אולם יש מקום לשיפור במרבית הרשויות, בדגש על איסוף פריטים קטנים וניקוי "פסי פסולת". תקצוב ניקוי החופים לא לוקח בחשבון שונות בכמות הפסולת המצטברת בחופים השונים, ולכן לא תמיד יש התאמה בין תדירות הניקוי לכמות הפסולת. בחופים צרים ובחופים מרוחקים ופחות נגישים כדאי להגביר את תדירות הניקוי, כיוון שהם נוטים לצבור פסולת מהים.

כיוון שחלק ניכר מהפסולת מגיע מהיבשה, מומלץ להתקין מערכות למניעת הגעת הפסולת לנקזים העירוניים, ולהציב רשתות או חוסמים במוצאי הנקזים והנחלים לים. ניקוי מדרכות הערים ומערכות הניקוז יימנע הצפת ערים והגעת פסולת לים.

בחופים שבהם מקור הפסולת הוא נופשים, יש להמשיך לפעול למניעת השלכת פסולת באמצעות הסברה ו/או אכיפה בחופים, או איסור שימוש בכלים חד-פעמיים.

עם ההבנה שמרבית הפסולת הימית היא פלסטיק, שזמן ההיעלמות הארוך שלו והפירוק שלו למיקרופלסטיק יוצרים בעיה סביבתית ובריאותית, הטיפול העולמי בבעיית הפסולת הימית מתרכז בהפחתת פסולת הפלסטיק בכלל, לא רק בים.

צריכת הפלסטיק המוגברת בישראל התחילה בשנות התשעים, כפי שעולה מדוח משרד המסחר והתעשייה משנת 1996 לפיו חל גידול של 85% בצריכת פלסטיק ומוצריו בישראל, קצב הגידול השני בעולם[40]. בשנת 2021, הצריכה הביתית של כלי פלסטיק חד"פ לנפש בשנה הוערכה ב-1.5 ק"ג באיחוד האירופי, בעוד שבישראל היא עמדה על 7.5 ק"ג כלי פלסטיק חד"פ לנפש[22]. לכן הגברת המודעות לבעיית הפסולת הימית ולהשפעת הפלסטיק על סביבה, ועידוד לצמצום צריכת פלסטיק, בעיקר של כלים חד"פ, הם צעדים הכרחיים. חינוך לשלוש הפעולות הבסיסיות: הפחתה, שימוש חוזר ומיחזור פסולת (3R's – Reduce, Reuse, Recycle), צריך להיטמע במערכת החינוך הפורמלי, בתנועות הנוער ובמסגרת השירות הצבאי והלאומי.

אירוע נפילת המכולות לים היווה תזכורת לכמויות הפלסטיק, בעיקר החד"פ, המובל לארץ דרך הים. על אף השיפור במניעת זיהום אוויר מאוניות שהושג באמצעות אמנות בינלאומיות, התובלה הימית אחראית לכ-10% מתחמוצות הגופרית (SOx), כ-20% מתחמוצות חנקן (NOx)[41], ולכ-3.3% מסך פליטת דו-תחמוצת הפחמן (CO_2) בעולם, שצפויים לעלות ב-150%-250% עד 2050[42].

במקביל לחקיקה מקומית ובינלאומית יש לפעול באפיקים נוספים, כגון: הגברת אחריות היצרנים ועידוד לצמצם את הפלסטיק כבר בשלב הייצור, כמו הפחתת אריזות פלסטיק או יצירת אריזות שמאפשרות שימוש חוזר; הגברת מיחזור הפלסטיק על-ידי קידום כלכלה מעגלית, וקביעת תקנים לסוגי פלסטיק שניתן למחזר באחוזים ואיכות טובים יותר; מציאת חלופות אמיתיות לפלסטיק, שעלותן הסביבתית והכלכלית אינן גבוהות.

פסולת ימית היא בעיה שנוצרה על-ידינו, ואנחנו צריכים לפתור אותה. זה בידיים של כל אחד ואחת מאיתנו.

רשימת מקורות

1. Ryan, P. G. Brief History of Marine Litter Research. M. Bergmann et al. (eds.), *Marine Anthropogenic Litter*, p 1-19. DOI 10.1007/978-3-319-16510-3_1 (2015).
2. UNEP/MAP. Draft decision on the adoption of the strategic framework for marine litter management. Mediterranean Action Plan. UNEP(DEPI)/MED WG.363/13 (2011).
3. Laist, D. W. Impacts of marine debris: Entanglement of marine life in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion records. In Coe, J. M. & Rogers, D. B. (Eds.), *Marine Debris: Sources, Impacts, and Solutions*, New York: Springer, p 99–139 (1997).
4. Diem, A., Tesfaldet, J. T., Hocherman T., Hoon V. & Zijlemans, K. Marine litter in the Red Sea: Status and policy implications. *Mar. Pollut. Bull.* **187**, 114495. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114495 (2023).

5. Thushari, G.G.N. & Senevirathna, J.D.M. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon,* **6,** e04709. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04709 (2020).
6. Kiessling, I. Finding solution - derelict fishing gear and other marine debris in northern Australia. National Ocean Office (2003).
7. Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environment. *Philos. Trans. Roy. Soc. B.* **364**, 1985-1989 (2009).
8. Gold, M., Mika, K., Horowitz, C., Herzog, M. & Leitner, L. Stemming the tide of plastic marine litter: A global action agenda. *Tulane Environ. Law J.* **27**, 165-203 (2014).
9. Mouat, J. & Lozano, R. L. Bateson H Economic Impacts of Marine Litter. KIMO Report. *KIMO*, Shetland (2010).
10. Jang, Y. C., Hong, S., Lee, J., Lee, M. J. & Shim, W. J. Estimation of lost tourism revenue in Geoje Island from the 2011 marine debris pollution event in South Korea. *Mar Pollut. Bull.* **81**, 49–54 (2014).
11. אלקלעי, ר. &פסטרנק, ג. חוף נקי – חוברת מחליטים. המשרד להגנת הסביבה. 81 עמודים. 18 עמודים. (2008)
12. PlasticsEurope. Plastics - the facts 2022. https//:plasticseurope.org/wp-content/uploads/2023/10/Plasticsthefastfacts2023-1.pdf (2023).
13. Edelson, M., Håbesland, D. & Traldi, R. Uncertainties in global estimates of plastic waste highlight the need for monitoring frameworks. *Mar Pollut Bull*, **171**, 112720. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112720 (2021).
14. UNEP. From Pollution to Solution. A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. (2021).
15. Ford H. V., Jones, N. H., Davies, A. J., Godley, B. J., Jambeck, J. R., Napper, I. E., Suckling, C. C., Williams, G. J., Woodall, L. C. & Koldewey, H. J. The fundamental links between climate change and marine plastic pollution. *Sci. Total. Environ.* **806**, 150392. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150392. (2022).
16. Bowman. D., Manor-Samsonov, N. & Golik, A. Dynamics of litter pollution on Israeli Mediterranean beaches: A Budgetary, Litter Flux Approach. *J. Coastal Res.* **14**, 418-432 (1998).
17. Gabrielides, G. P., Golik, A., Loizides L., Marino, M. G., Bingel, F &, Torregrossa, M. V. Man-Made Garbage Pollution on the Mediterranean Coastline. *Mar. Pollut. Bull.* **23**, 437-441. (1991).
18. Golik, A. & Gertner, Y. Litter in the Israeli coastline. *Mar Environ Res*, **33**, 1-15 (1992).
19. Sparrow, M.K. The Regulatory Craft: Controlling Risks, *Solving Problems and Managing Compliance* (Brookings Institute, 2000). Sparrow, M.K. The Regulatory Craft: Controlling Risks, Solving Problems and Managing Compliance (Brookings Institute, 2000).
20. Kelling, J. L. & Wilson, J. Q. Broken Windows - The police and neighborhood safety. *The Atlantic Monthly*. (March 1982).
21. המשרד להגנת הסביבה (2023) סיכום תוכנית "חוף נקי" 2022.

22. Alkalay, R., Pasternak, G. & Zask, A. Clean-Coast Index - a new approach for beach cleanliness assessment. *Ocean Coast Manage*, **50**, 352-362 (2007).
23. Bekova, R. & Prodanov, B. Assessment of beach macrolitter using unmanned aerial systems: A study along the Bulgarian Black Sea Coast. *Mar. Pollut. Bull.* **196**, 115625. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115625 (2023).
24. פסטרנק, ג. פסולת ימית מוצקה בחופים הים-תיכוניים של ישראל: סוגים, מקורות, פיזור והולכה. עבודת דוקטורט, אוניברסיטת חיפה. 104 עמ' (2019).
25. פסטרנק, ג. (2023) מקורות פסולת הפלסטיק הימית בחופי ישראל. לשכת המדענית הראשית, המשרד להגנת הסביבה. 93 עמ'. https://www.gov.il/he/departments/news/marine-plastic-waste (2023).
26. Cheshire, A. C., Adler, E., Barbiere, J., Cohen, Y., Evans, S., Jarayabhand, S., Jeftic, L., Jung, R. T., Kinsey, S., Kusui, E. T., Lavine, I., Manyara, P., Oosterbaan, L., Pereira, M. A., Sheavly, S., Tkalin, A., Varadarajan, S., Wenneker, B. & Westphalen, G. UNEP/IOC Guidelines on survey and monitoring of marine liter. UNEP Regional Seas Reports and Studies, No. 186; IOC Technical Series No. 83 (2009).
27. Pasternak, G., Zviely, D., Ribic, C. A., Ariel, A.& Spanier, E. Sources, composition, and spatial distribution of marine debris along the Mediterranean coast of Israel. *Mar. Pollut. Bull.* **114**, 1036–1045. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.023 (2017).
28. Tudor, D. T. & Williams, A. T. Development of a 'Matrix Scoring Technique' to determine litter sources at a Bristol Channel beach. *J. Coastal. Conserv.* **9**, 119-127 (2004).
29. Lechthaler, S., Waldschläger, K., Stauch, G. & Schüttrumpf, H. The Way of Macroplastic through the Environment. *Environments*, **7, 73**. doi:10.3390/environments7100073. (2020).
30. Turrell, W. R. A simple model of wind-blown tidal strandlines: How marine litter is deposited on a mid-latitude, macro-tidal shelf sea beach. *Mar. Pollut. Bull.* **137**, 315–330. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.024 (2018).
31. UNEP. From Pollution to Solution. A global assessment of marine litter and plastic pollution Nairobi. 150 pp. (2021).
32. Constantino, E., Martins, I., Salazar-Sierra, J. M. & Bessa, F. Abundance and composition of floating marine macro litter on the eastern sector of the Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull,*. **138**, 260–265. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.008 (2019).
33. Liubartseva, S., Coppini, G., Lecci, R. & Clementi, E. Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model. *Mar. Pollut. Bull.* **129**, 151–162. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.019 (2018).
34. UNEP/MAP. Marine litter assessment in the Mediterranean. ISBN No: 978-92-807-3564 2 (2015).
35. UNDP. From Shame to Fame... Saida Trash Mountain to Green Park. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/lb/9dc44d4f6ce2130ba818a041f2b7c33ef78590e0b5bf8641ea0a2dc3f43bea4e.pdf (2016).

36. Galgani, F., Hanke, G. & Maes, T. Global Distribution, Composition and Abundance of Marine Litter. In Bergmann, M., Gutow, L. & Klages M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Berlin: Springer, p 29–56 (2015).
37. פסטרנק, ג., שפניר, א., אריאל א. & צביאלי, ד. שינויים בהרכב פסולת הפלסטיק בחופי הים התיכון של ישראל בשנים 2012–2018. *אקולוגיה וסביבה* **11** (2020).
38. Ryan, P. O., Pichegru, L. & Connan, M. Tracing beach litter sources: Drink lids tell a different story from their bottles. *Mar. Pollut. Bull.* **201**, 116186. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116186 (2024).
39. Pasternak, G., Ribic, C. A., Spanier, E. & Zvieli, D. Stormwater systems as a source of marine debris: a case study from the Mediterranean coast of Israel. *J Coast Conserv.* **25(1)**, 27. https://doi.org/10.1007/s11852-021-00818-3 (2021).
40. אלקלעי, ר. זבל זבלים הכל זבל, או - למה החוף כל כך מלוכלך. ים וחופים מאמרים 2000. המשרד לאיכות הסביבה, אגף ים וחופים (2000).
41. IPPC 2021, Szopa, S., Naik, V., Adhikary, B., Artaxo, P., Berntsen T., Collins, W. D., Fuzzi, S., Gallardo, L., Kiendler-Scharr, A., Klimont, Z., Liao, H., Unger, N. & Zanis, P. Short-Lived Climate Forcers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/figures/IPCC_AR6_WGI_Figure_6_3.png (2021).
42. Lindstad, H., Asbjørnslett, B. E. & Strømman, A. H. The importance of economies of scale for reductions in greenhouse gas emissions from shipping. *Energy Policy* **46**, 386-398. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.077 (2012).

אלמוג מסוג שיטית (*Acropora hyacinthus*) בעת רבייה: שחרור צברים אדמדמים של ביציות וזרע הנסחפים עם הזרמים, עוברים הפריה ומתפתחים במים הפתוחים. רביית אלמוגים היא תופעה מהפנטת, המתרחשת עבור כל מין במפרץ אילת לרוב רק פעם בשנה — בחודש, לילה ואף שעה מדויקים. בתוך דקות ספורות בלבד, אלפי אלמוגים מאותו מין לאורכה של השונית משחררים לגוף המים את תאי המין הצבעוניים שלהם. צפייה באירועים נדירים אלו מעניקה חוויה אסתטית עוצרת נשימה, המזכירה סופת שלג צבעונית והפוכה המתפשטת ברחבי הים. צילום: תום שלזינגר.

15 המערכת האקולוגית של חלקיקי המיקרופלסטיק הצפים בים התיכון מבט ישראלי

יעל סגל[1], מתן אורן[2]

[1] מחלקה לכימיה ימית, חקר ימים ואגמים לישראל
[2] המחלקה לביולוגיה מולקולרית, אוניברסיטת אריאל

Yael_segal@ocean.org.il,
Matanor@ariel.ac.il

תקציר

זיהום פסולת הפלסטיק בים הוא אחד האיומים האקולוגיים המרכזיים בכדור הארץ כיום. זיהום זה משפיע על הסביבה הימית בצורות שונות. שברי פלסטיק, רשתות ופסולת ימית אחרת יכולים לפגוע ואף לסכן את חייהם של אורגניזמים ימיים מהפלנקטון הקטן ועד לגדול הלווייתנים. ריכוז המיקרופלסטיק הצף בחלקו המזרחי של הים התיכון הוא מהגבוהים בעולם. מהממצאים שהתקבלו מניטור המיקרופלסטיק הצף מול חופי ישראל, עולה כי ריכוז חלקיקי המיקרופלסטיק גבוה יותר בסמוך לחוף (34±18 חלקיקים למ"ר, עד 4 ק"מ מקו החוף) ויורד ככל שמתרחקים ממנו (0.4±0.5 חלקיקים למ"ר, מעל 15 ק"מ מקו החוף). הרכב החלקיקים כולל בעיקר חלקי שקיות ואריזות בצורה של יריעות (films), ושברי פלסטיק קשיח רסיסים (fragments) על-פי רוב לבנים או חסרי צבע. מסקירה של 1,473 צבי-ים חומים וירוקים (חיים ומתים), נמצא כי 566 מהם נפגעו מפסולת פלסטיק. תוכן קיבתם של 21 צבים נבדק ובכולם נמצאו חלקיקי מיקרופלסטיק. מניתוח הרכב החברות האאוקריוטיות שעל גבי המיקרופלסטיק הצף בים התיכון של ישראל בשנים 2020-2021 בשיטת מטהברקודינג של דנ"א עולה כי הוא נבדל ושונה מהותית מזה של מי הים בסביבת המיקרופלסטיק. דגימות המיקרופלסטיק הכילו קבוצות טקסונומיות שכמעט לא הופיעו כלל במים כדוגמת מערכת ה-Retaria הכוללת את החוריריות (Foraminifera) וקבוצת ה-Florideophyceae שעמה נמנות אצות אדומיות רב-תאיות. מנגד, קבוצות אחרות, כגון הדינופלגלטים (Dinoflagellates) נעדרו מדגימות המיקרופלסטיק והופיעו אך ורק במים. קבוצות אחרות נוספות הופיעו ביחס שונה על גבי המיקרופלסטיק שנאסף. בלטה במיוחד קבוצת האצות הצורניות (Diatoms) שהיוותה כ-32% מסך רצפי הברקוד בדוגמאות המיקרופלסטיק לעומת 9.5% בלבד במי הים. ממצאים אלה מראים כי משטחי הפלסטיק בים התיכון, בדומה לסביבות ימיות נוספות בעולם, משמשים כבר פורה להתיישבות של מגוון נרחב של מיקרואורגניזמים, אצות, פטריות וחסרי חוליות היוצרים מערכת אקולוגית חדשה ונבדלת המכונה הפלסטיספירה. אנו מניחים כי מעבר לפגיעה של שברי הפלסטיק עצמם באורגניזמים ימיים, ישנה השפעה משמעותית של החברות שעל גבי הפלסטיק הצף על הסביבה הימית, ובכלל זה על המעגלים הביוגיאוכימיים המתקיימים בה.

מבוא

הפלסטיק כסמן לעידן גיאולוגי חדש – האנתרופוקן.

" וַיִּקַּח ה' אֱלֹהִים אֶת הָאָדָם וַיַּנִּחֵהוּ בְּגַן עֵדֶן לְעָבְדָהּ וּלְשָׁמְרָהּ." (ספר בראשית, ב, טו).

עידן האנתרופוקן (Anthropocene Epoch) הוא עידן גיאולוגי חדש שבו ניכרת השפעתו של האדם בצורה כזו שהפריעה את היציבות היחסית של המערכת הגלובלית שאפיינה את עידן ההולוקן (Holocene) שקדם לו, ובכלל זה הופעתן של מגמות קיצוניות כהתחממות האקלים[1]. מאז מלחמת העולם השנייה, ניכרת האצה משמעותית בפעילות האדם והשפעתו על כדור הארץ[2,3]. אחד הסמנים המרכזיים של תחילת עידן האנתרופוקן הוא הימצאותו של סוג חומר חדש בסביבה – הוא הפלסטיק. השימוש במוצרי פלסטיק באופן מסחרי החל באמצע המאה ה-20 ובמקביל, העדויות הראשונות לזליגתו לסביבה. מאז ועד היום, מחקרים שונים הדגימו נוכחות הולכת וגוברת של חלקיקי פלסטיק במים, בקרקע בסדימנט ובגופם של בעלי החיים (לדוגמה: [4]).

מהו פלסטיק?

פלסטיק הוא שם כללי לקבוצה רחבה של פולימרים אורגניים סינתטיים המיוצרים במקור ברובם מנפט גולמי. עקב התכונות המיוחדות של הפלסטיק, ובכללן חוזק מכני, עמידות, האפשרויות הרבות להתאמת תכונותיו לצרכים שונים ועלות הייצור הנמוכה, יחסית לחומרים מקבילים, הפך את הפלסטיק למרכיב מרכזי בחייו של המין האנושי. כ-400 מיליון טונות של מוצרי פלסטיק יוצרו בעולם בשנת 2022, מתוכם כ-128 מיליון טונות בסין לבדה[5]. כמות ייצור מוצרי הפלסטיק עולה באופן עקבי, מאז הופעתם של חומרי הפלסטיק הראשוניים בשנות ה-40 המאוחרות של המאה ה-20 ועד היום, ויש להניח שקצב הייצור העולמי ימשיך במגמה זו גם בשנים הקרובות. חומרי הפלסטיק מגוונים ביותר ובעלי תכונות שונות. ניתן לסווגם באופן כללי לפי המבנה הכימי של הפולימר הגולמי. נכון ל-2022, פולימרי הפלסטיק הנפוצים ביותר הם הפוליאתילן (PE) המהווה כ-26.3% מסך הייצור העולמי, מתוך זה 14.1% פוליאתילן בדחיסות נמוכה (LD-PE) או נמוכה מאוד (LLD-PE) ו-12.2% בדחיסות גבוהה (HD-PE) ופוליפרופילן (PP) המהווה כ-18.9%. פולימרים אלה, PP ו- PE המכונים גם פוליאולפינים, הם החומרים הנפוצים ביותר במוצרי אריזה ובכלים החד-פעמיים, המהווים את עיקר שיעור הצריכה. פולימרים נפוצים נוספים בעולם הם: פוליוינילכלוריד (PVC) המהווה 12.7% מסך הייצור, פוליאתילן תראפטלט (PET) 6.2%, פוליאוריתן (PUR) 5.3%, ופוליסטרן (PS) 5.2%. למרות המאמצים המושקעים כיום בטיפול בפסולת, ובכלל זה מחזור פולימרים מסוימים של פלסטיק, פלסטיק על סוגיו השונים עדיין מהווה גורם זיהום ראשי בסביבה הימית.

פסולת הפלסטיק בסביבה הימית

פסולת הפלסטיק מהווה מפגע אקולוגי, בריאותי ואסתטי. פסולת יבשתית מוסעת לים באמצעות נחלים ומערכות ניקוז, בייחוד באירועי גשם. פסולת שהושלכה בקרבת החוף יכולה אף היא להיות מוסעת לים על-ידי הגשם, הגאות והשפל, או במקרה של פסולת קלה אף ממרחקים גדולים יותר על-ידי הרוח. ניהול לא מושכל

של הפסולת ביבשה עלול להגביר באופן ניכר את זליגתה לסביבה הימית. מרבית פסולת הפלסטיק בים מקורה ביבשה, אך חלק ממנה מגיע ישירות מהים. כלי שיט, בייחוד סירות דיג, מהווים מקור משמעותי לפסולת בים הכוללת רשתות רפאים, מצופים או פסולת שהושלכה או עפה מהסיפון[6]. צפיפותם הנמוכה של הפולימרים הנפוצים של הפלסטיק מביאה לציפתם החיובית קרוב לפני המים, המאפשרת את פיזור הפסולת הימית במרחב, אף לאתרים מרוחקים מאוד ממקור הזיהום[7]. אורך חייו הארוכים של הפלסטיק (עשרות עד מאות שנים) הופך אותו למזהם עמיד במיוחד המצטבר בים לאורך שנים. באוקיינוסים, ישנם בגוף המים מצבורי ענק (plastic ocean gyres) שבהם מצטברים חלקיקי הפלסטיק עקב תנועתם המעגלית של הזרמים[8]. הים התיכון הוא אחד האזורים המזוהמים ביותר בפסולת ימית בעולם[9-11]. מודלים של זרמים, ששימשו לבחינת מקורות הפסולת הימית ופיזורה בים התיכון, מצאו כי מקורות הזיהום העיקריים להצטברות הפסולת הימית בים התיכון כוללים ערים ושפכי נהרות כדוגמת שפך נהר הנילוס[11,12]. מחקרים בישראל הראו כי מרבית הפסולת החופית והימית, מורכבת ממוצרי פלסטיק[13,14].

מיקרופלסטיק

על אף עמידות הפלסטיק בסביבה הימית, במשך הזמן עוברים מוצרי הפלסטיק המקוריים תהליכי בליה ומתפרקים לחלקיקים קטנים יותר ויותר, בעיקר בהשפעת קרינת השמש, ובכללה קרינת אולטרה-סגול (UV) וכן בהשפעת כוחות הגזירה של הגלים והזרמים בים[15]. בנוסף, חלים על הפלסטיק תהליכי פירוק ביולוגיים באמצעות מיקרואורגניזמים, ובעיקר חיידקים המשתמשים בפלסטיק כמקור פחמן[16]. חלקיקים קטנים אלו מוגדרים כחלקיקי "מיקרופלסטיק" בטווח הגדלים שבין חצי סנטימטר ועד ל-1 מיקרומטר (מיקרון) או ננופלסטיק בטווח הגדלים של למטה מ-1 מיקרון[17]. חלקיקי המיקרופלסטיק יכולים להיות ממקור ראשוני או שניוני. חלקיקי המיקרופלסטיק הראשוניים מקורם בתעשיית הפלסטיק והקוסמטיקה, והם מופיעים בסביבה הימית בצורתם המקורית, בעוד שפסולת שניונית, כשמה כן היא, מקורה מפירוק פסולת גדולה יותר כתוצאה מתהליכי הבליה שתוארו למעלה. בשל משקלם הנמוך ונטייתם לצוף, חלקיקי המיקרו והננופלסטיק הם בעלי יכולת הסעה גבוהה בים ובאוויר. לפיכך חלקיקים כאלה נמצאו באתרים מרוחקים מאוד ממקור הזיהום ביבשה, בים, בחופים ובקרקעית האוקיינוס (לדוגמה [18]).

זיהום פלסטיק כגורם סיכון לבעלי חיים ימיים

זיהום פלסטיק הוא גורם סיכון משמעותי בסביבה הימית הפוגע לעיתים קרובות באורגניזמים ימיים. כך למשל נתונים שנאספו בין השנים 1999 ל-2021 במרכז להצלת צבים הראו כי מעל לשליש מצבי-הים החומים והירוקים שנדגמו (חיים ומתים) נפגעו ממפגעים הקשורים בפלסטיק (566 פרטים מתוך 1,473 צבים שנחקרו). מרבית הפגיעות כללו הסתבכות והיקשרות לפסולת למיניה, בין השאר שקי מזון, שככל הנראה נזרקו או עפו מספינות הנושאות בע"ח. ההסתבכויות גרמו לפגיעות בגפיים, לחנק ולסתימת מעי[19]. רשתות רפאים שנזנחו

בים מהוות מלכודות לדגים וליונקים ימיים ויריעות פלסטיק עלולות לכסות בתי גידול. שברי פלסטיק ימיים, הסופחים מזהמים אורגניים, יכולים לשחרר חומרים רעילים למים וכן משמשים כווקטורים להסעת מזהמים, מינים פולשים[20](Invasive species) ומחוללי מחלות בים[21]. חלקיקי המיקרופלסטיק הקטנים יכולים להגיע למערכות הסינון העיכול והנשימה של בעלי חיים ימיים מזואופלנקטון[22] ורכיכות[23], ועד לבעלי חיים גדולים כדגים[24], עופות ימיים[25], צבי-ים[26] ולווייתנים[27] אם באופן ישיר או על-ידי העברה טרופית מאכילה של אורגניזמים מזוהמים במיקרופלסטיק[28]. כל אלה הם מפגעים הגורמים לעיתים קרובות לפגיעה בבריאותם ואף למותם של אורגניזמים ימיים וכתוצאה מכך לפגיעה ישירה ועקיפה במערכות האקולוגיות הימיות[29].

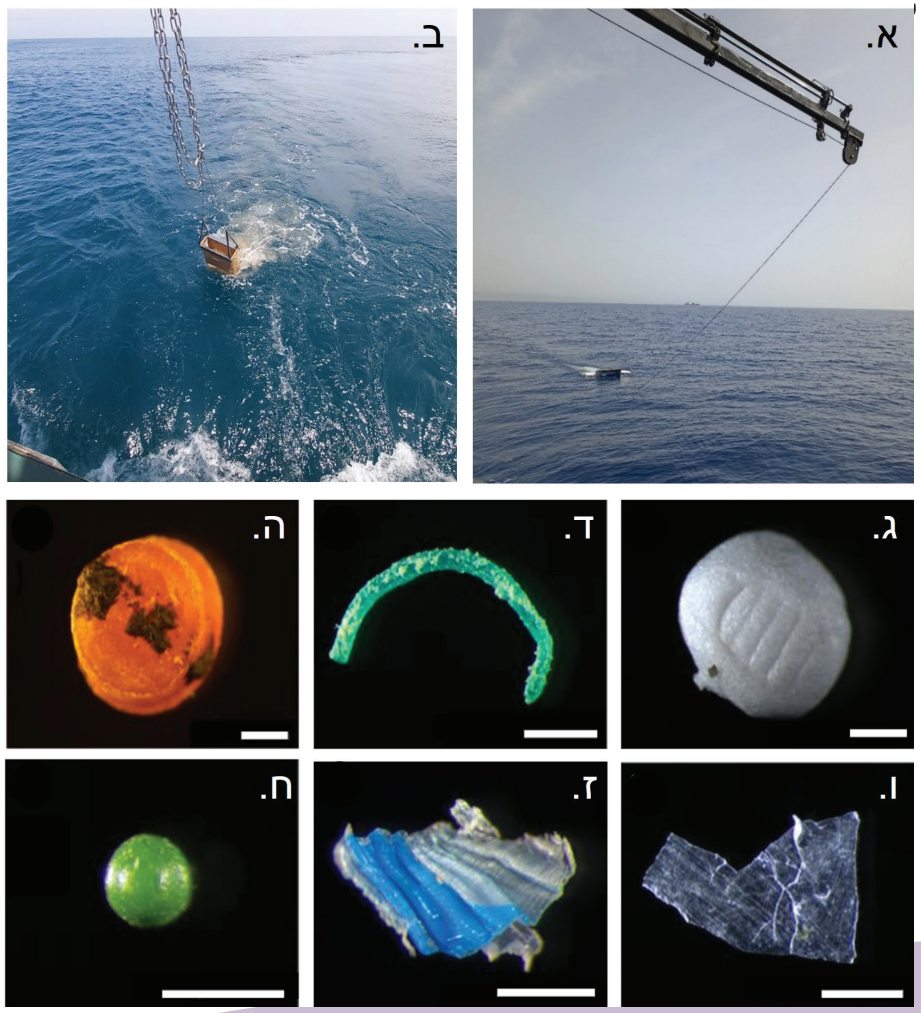
דיגום המיקרופלסטיק

ההכרה בחשיבות הניטור והמעקב אחרי פלסטיק ומיקרופלסטיק הובילה להנחיות דיגום וטיפול בדוגמאות המיקרופלסטיק הצף שנכתבו על-ידי האו"ם והאיחוד האירופי[30,31]. השיטה המקובלת לדיגום מיקרופלסטיק צף בים היא בעזרת רשת מנטה, בצפיפות 300 מיקרון (איור 1). לרשת המנטה מעין "כנפיים" שבאמצעותן היא מרחפת על פני המים ואוספת את חלקיקי הפלסטיק הצפים, תוך כדי גרירתה מכלי שיט. בעמודת המים מקובל לדגום מיקרופלסטיק באמצעות רשת פלנקטון הנסגרת בעומקים שונים. מיקרופלסטיק מהקרקעית נדגם, בדומה לדיגום סדימנט, באמצעות מחפר קופסה (box-correr) . חלקיקי המיקרופלסטיק הנאספים מופרדים מהסדימנט בעזרת הרחפה עם תמיסת מי מלח רוויה או הפרדה פיזית על-ידי נפות בגדלים שונים. במידה שישנו ריבוי חומר אורגני בדוגמה מקובל להפריד את חלקיקי המיקרופלסטיק מהמקטע האורגני על-ידי עיכול החומר האורגני בעזרת מי חמצן (H_2O_2) או קלציום הידרוקסיד ($Ca(OH)_2$). על מנת לכמת את חלקיקי הפלסטיק, מפרידים על-פי רוב את חלקיקי המיקרופלסטיק על-פי גודלם בעזרת נפות, בדרך כלל בגודל חורים של 100, 300, 1000 ו 5000 מיקרון. בהמשך, תחת בינוקולר או מיקרוסקופ סופרים את החלקיקים ומסווגים אותם לפי צבעם, שקיפותם וצורתם.

אפיון המיקרופלסטיק

אפיון המיקרופלסטיק מתחת לבינוקולר/מיקרוסקופ מאפשר זיהוי של צורות המיקרופלסטיק השונות המחולקות על-פי רוב לקטגריות הבאות: קצף (foam), סיב (filament/fiber), פלט (pellet), יריעה (film), רסיס (fragment) וכדור מיקרוני (microbead) (איור 1 ג'-ח'). הקצף מייצג בד"כ חלקיקים שניוניים של קלקר או פולימר מוקצף אחר. דגם הסיב מקורו בסיבים סינתטיים, למשל מטקסטיל ובגדים, ומחוטי דיג. פלט הוא מיקרופלסטיק ראשוני מתעשיית הפלסטיק. היריעה היא בדרך כלל פלסטיק שניוני שמקורו בשקיות פלסטיק ואריזות מזון כגון חטיפים. רסיס מייצג פלסטיק שניוני שמקורו משברי מוצרי פלסטיק קשיחים כגון צעצועים, ריהוט ועוד, והכדור המיקרוני הוא לרוב מיקרופלסטיק ראשוני מתעשיית הקוסמטיקה. על מנת לאפיין ברזולוציה גבוהה את פני משטח חלקיק הפלסטיק ניתן להיעזר במיקרוסקופ אלקטרונים סורק (SEM, Scanning Electron Microscope). את הרכב הפולימר, שממנו עשויים חלקיקי המיקרופלסטיק

ניתן לקבוע באמצעות ספקטרופוטומטר מיוחד באורכי גל אינפרא אדום (FTIR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy). תוצר המדידה הוא ספקטרום בליעה, באורכי גל אופייניים, המייצגים קשרים כימיים בפולימרים. על-ידי השוואה לספקטרומי בליעה ידועים של פולימרים טהורים של פלסטיק, ניתן לזהות ברמת ודאות גבוהה את סוג הפולימר. שיטה נוספת המשמשת לזיהוי פולימרים של פלסטיק היא שיטת ספקטרוסקופיית ראמן (Raman) המתבססת על החתימה הספקטראלית המתקבלת בזמן הקרנת קרן לייזר



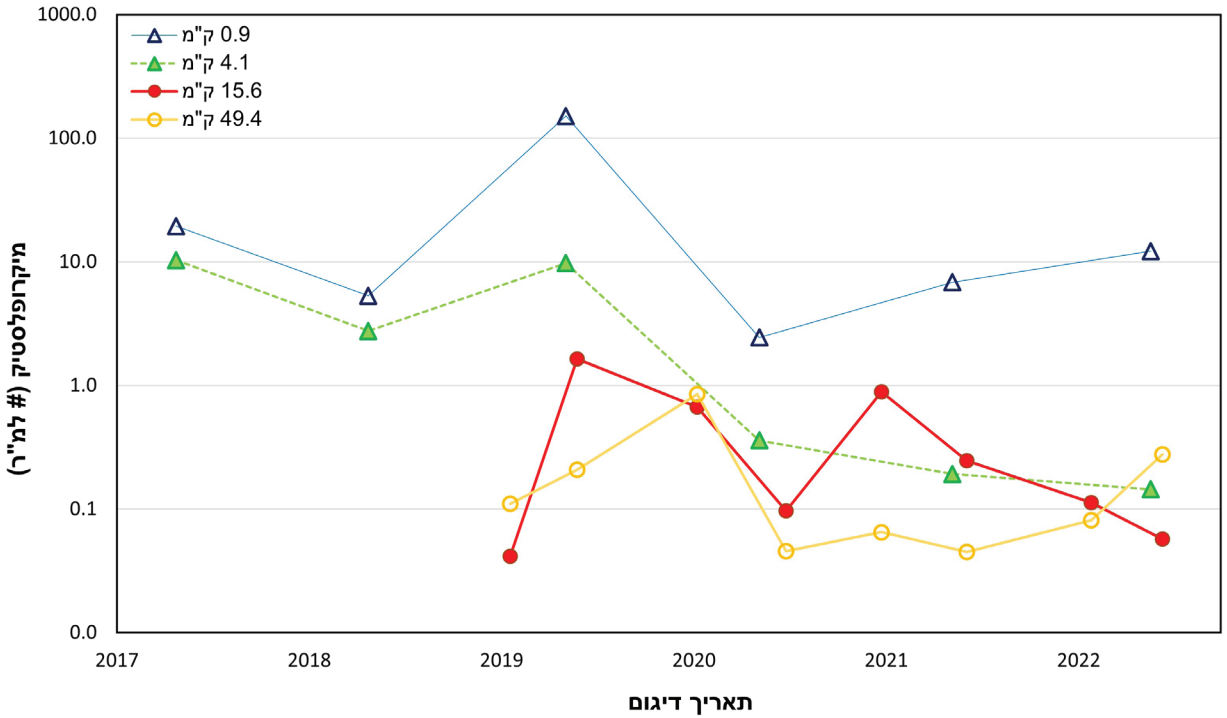
איור 1 . א. דיגום מיקרופלסטיק צף על פני המים בעזרת רשת מנטה. צילום: יעל סגל. ב. דיגום מיקרופלסטיק מקרקעית הים באמצעות רשת נגררת, צילום: מתן אורן. ג-ח. צורות הופעת חלקיקי המיקרופלסטיק. צילום: אנה סילבה. ג. קלקר מוקצף (foam). ד. סיב סינתטי (filament). ה. פלט (pellet) מתעשיית הפלסטיק. ו. יריעה (film) – מקטע משקית אריזה ז. רסיס (fragment) – שבר פלסטיק קשיח. ח. כדור מיקרוני (microbead) – תעשיית הקוסמטיקה. קנ"מ - 1 מ"מ

זיהום המיקרופלסטיק בסביבה הימית של ישראל

משנת 2017 מתקיים ניטור פסולת ימית במרחב הימי של ישראל בים התיכון ומשנת 2019 גם בים סוף, בהתאם להנחיות האו"ם והאיחוד האירופי[30,31]. הניטור מבוצע על-ידי חקר ימים ואגמים לישראל, במימון המשרד להגנת הסביבה, ובוחן מגמות בזמן ובמרחב של זיהום הים והחופים על-ידי פסולת ימית בגדלי מיקרו (בפני המים, בקרקעית ובחופים) ומקרו (בחופים ובקרקעית). הניטור נועד לעקוב אחרי מופעי זיהום חריגים בזמן ובמרחב ולחשוף מקורות זיהום[32]. מטרה נוספת וחשובה של הניטור היא לסייע למקבלי החלטות בקביעת מדיניות ובבחינת היעילות של יישומי חוקים וקווי מדיניות חדשים כגון חוק השקיות, מיחזור הבקבוקים, תדירות הניקיון בחופים וכיוצא בזה. משנת 2021 נוסף לניטור פרק העוסק בהשפעת הפסולת הימית על צבי-הים בישראל. דוח מסכם ראשון יצא לאור בשנת 2022 בשיתוף פעולה בין המרכז להצלת צבים והמכון לחקר ימים ואגמים לישראל. הדוח דן בהשפעת פסולת המקרו על צבי-הים בשנים 1999-2022 ובזיהום מערכות העיכול של צבים על-ידי חלקיקי מיקרופלסטיק. במקביל לניטור הפסולת הימית בוצעו גם מספר מחקרים העוסקים בתפוצת המיקרופלסטיק בים ובחופי ישראל[33-35]. מהמחקרים עולה כי המקורות לפסולת הימית בשילוב עם כיוון הזרמים בים התיכון הופכים את אזור החוף הישראלי לפגיע במיוחד.

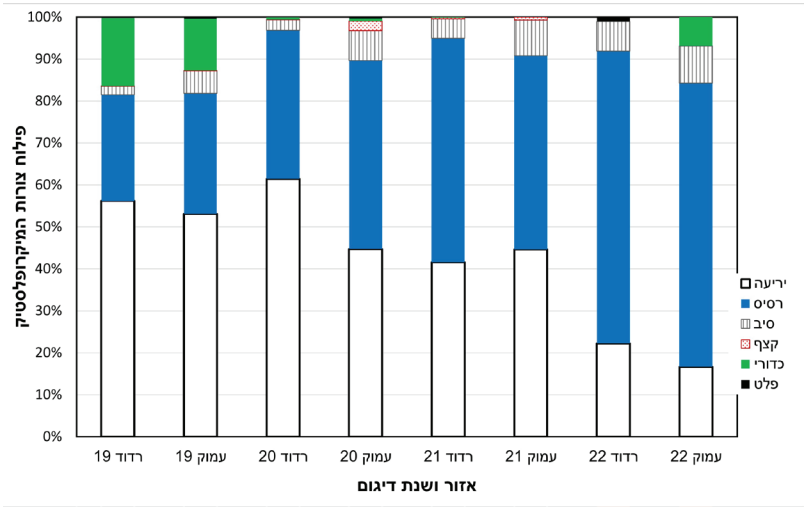
מיקרופלסטיק צף בישראל - תמונת מצב

זיהום הפלסטיק המסוכן ביותר לסביבה הימית הוא מחלקיקי המיקרופלסטיק והננופלסטיק. גודלם הקטן או הזעיר של חלקיקים אלה מאפשר את כניסתם למארג המזון ואף מעבר בין רמות טרופיות שונות[36]. בשנת 2024 פרסם האו"ם סיכום נתוני ניטור הפסולת הימית שבוצע על-ידי מדינות הים התיכון בשנים האחרונות (2017-2022). התוצאות מראות כי ריכוז המיקרופלסטיק הצף עולה ככל שנעים מזרחה לאורך הים התיכון, כאשר הריכוזים המקסימליים נמצאו באזורנו. תוצאות ניטור המיקרופלסטיק הצף במרחב הימי של ישראל שבוצע על-ידי חקר ימים ואגמים במימון המשרד להגנת הסביבה[32] הראו ריכוזים גבוהים יותר בסמוך לחוף, בהשוואה לתחנות העמוקות יותר והמרוחקות יותר מקו החוף (איור 2). כך לדוגמה, מול חיפה נמדדו 34±18 חלקיקים למ"ר באזור הרדוד (30-10 מ' עומק מים, 4-0.9 ק"מ מהחוף) בהשוואה ל-0.4±0.5 חלקיקים למ"ר בתחנות העמוקות (1500-650 מ' עומק מים, 49-16 ק"מ מהחוף). הריכוז המקסימלי נמדד בעומק 10 מ' ביולי 2019 (151 חלקיקים למ"ר). בנוסף, נמצא כי ריכוז המיקרופלסטיק בתחנות הים התיכון הקרובות לחופי ישראל גבוה בהשוואה לריכוזים אחרים שהתקבלו במרכז ובמערב הים התיכון[33,37], אך נמוך מריכוזים שהתקבלו לאחרונה מול חופי לבנון[38]. לעומת זאת, ריכוזי המיקרופלסטיק בתחנות העמוקות והמרוחקות יותר מהחוף דומים לריכוזים שהתקבלו במחקרים נוספים בים התיכון ובעולם, עובדה המצביעה על קיומם של מקורות חופיים לזיהום המיקרופלסטיק. בשנת 2020 נצפתה ירידה משמעותית בריכוזי המיקרופלסטיק, בהשוואה לשנים קודמות, בסמוך לחוף וכן בתחנות העמוקות והמרוחקות מהחוף, שנבעה ככל הנראה מירידה בפעילות החופית בישראל ובערי החוף בים התיכון בתקופת מגפת הקורונה[37].



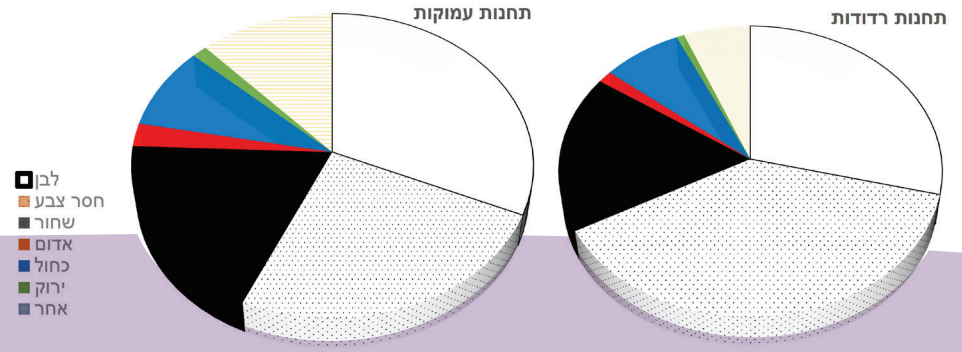
איור 2. ריכוז המיקרופלסטיק הצף מול רכס כרמל לאורך חמש השנים 2017-2022 ביחס למרחק מקו החוף[32].

מרבית המיקרופלסטיק שנמצא צף באזור ישראל מורכב מחלקי שקיות ואריזות (יריעות) ושברי פלסטיק קשיח (רסיסים, איור 3). הממוצע לשנים 2019-2022 היה 16%±43 חלקיקי יריעה ו-17%±47 חלקיקי רסיס מכלל פרטי המיקרופלסטיק שנמצאו. בשנים 2021-2022 נצפתה ירידה באחוז חלקיקי היריעה מכלל חלקיקי המיקרופלסטיק שנאספו, בהשוואה לשנות דיגום שקדמו להן, הן באזור החופי הרדוד (10-30 מ' עומק מים, 0.9-4 ק"מ מקו החוף) והן באזור העמוק יותר (> 300 מ' עומק מים, עד 49 ק"מ מהחוף). הירידה בייצוג היריעות מכלל החלקיקים נובעת ככל הנראה מהפחתה מתמשכת בשימוש בשקיות הפלסטיק החד-פעמיות בעקבות חוקים, כגון חוק השקיות, שיושם בישראל בשנת 2017 וכן מחוקים ושינויי מדיניות במדינות הים התיכון, שגם הם הפחיתו את השימוש בשקיות הפלסטיק בערי הים התיכון ובהתאמה, את הזיהום בחלקיקי היריעות[11,39]. חלקיקי המיקרופלסטיק הראשוניים, שמקורם בתעשיית הפלסטיק, הקוסמטיקה והניקיון (כדור מיקרוני ופלט, איור 1) הופיעו במקרים בודדים בלבד, ובכמויות קטנות ביחס לכלל החלקיקים שנדגמו (איור 3). עם זאת, חלקיקים אלו נמצאו הן בתחנות העמוקות והן בתחנות הרדודות בעכו (10 מ'), ובחיפה (30 מ'). במקביל למיקרופלסטיק, לאורך כל שנות הדיגום (2019-2022) נמצאה עדות, הן בתחנות העמוקות והן בתחנות הרדודות, לזפת, המהווה מפגע אקולוגי נוסף. פסולת שניוני שמקורה במוצרי קלקר וספוג (קצף) הופיעה במקרים בודדים בלבד ובייצוג נמוך.



איור 3. פילוח צורות חלקיקי המיקרופלסטיק הצף בסמוך לחוף בשנים 2019-2022 (0.7-4 ק"מ מקו החוף) – רדוד ובתחנות עמוקות יותר (עד 49 ק"מ מקו החוף) – עמוק.

צבעים הנפוצים ביותר של חלקיקי המיקרופלסטיק הצף, שנאספו בשנים 2019-2022, הם לבן וחסר צבע, הן בתחנות העמוקות והן בתחנות הרדודות (איור 4). ההעדפה לצבע הלבן והחסר צבע ככל הנראה קשורה לצבעים הנפוצים של השקיות במשק (הנושא דורש המשך בדיקה). חלקיקי המיקרופלסטיק הלבנים וחסרי הצבע הצפים על פני המים מהווים 18%±61 באזור הרדוד ו-18%±47 באזור העמוק. חלקיקים אלו עלולים להגיע למארג המזון בשל דמיונם לפלנקטון[40], אך נמצא כי גם חלקיקים בצבע שחור וכחול עלולים להיבלע על-ידי חיות ימיות ולהיכנס למארג המזון[41].

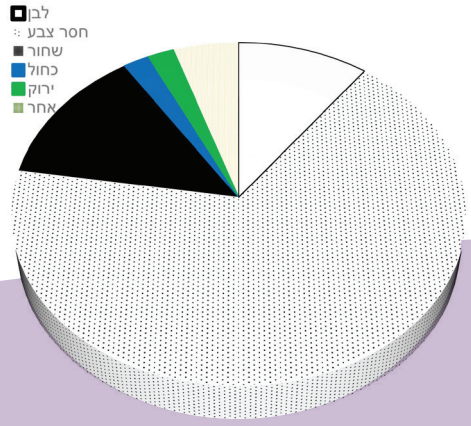


איור 4. פילוח צבעי המיקרופלסטיק בתחנות הרדודות (קרובות לקו החוף) והעמוקות (המרוחקות מקו החוף) בשטח הכלכלי של ישראל בים התיכון. הנתונים מציגים ממוצע רב-שנתי בשנים 2019-2022.

מיקרופלסטיק כגורם סיכון לבעלי חיים ימיים מבט אל צבי-הים בישראל

בשנת 2021 בוצעה ביופסיה לבדיקת תכולות מערכת העיכול של 21 פרטי צבים מתים. העבודה בוצעה בשיתוף פעולה בין חקר ימים ואגמים והמרכז להצלת צבים ובמימון המשרד להגנת הסביבה[19]. מערכת העיכול חולקה לוושט, קיבה ומעי. כל חלק נשטף והוצאו חלקיקי המיקרופלסטיק. חלקיקי המיקרופלסטיק אופיינו לצבע, שקיפות וצורה, בהתאם לפרוטוקולים מקובלים בעולם. בכל הצבים, ללא יוצא מהכלל, נמצאה פסולת ימית בקיבה ובפרט חלקיקי מיקרופלסטיק. החלקיקים נמצאו בחלקיה השונים של מערכת העיכול של הצבים. החלקיקים שנמצאו היו בעיקרם בטווח גדלים של 5-1 מ"מ. בחלק מהמקרים מסתמן כי הפסולת היא שגרמה לתמותת הצב עקב סתימת המעי והרעבה[22].

בהתאמה לנתוני המיקרופלסטיק הצף באזורנו, גם בקיבות הצבים מרבית חלקיקי המיקרופלסטיק היו חסרי צבע. בממוצע עבור 20 צבים נמצא כי 66±23% מכלל שברי הפלסטיק שנמצאו בקיבה היו חסרי צבע (איור 5). לעומת זאת, על אף שצורות המיקרופלסטיק שנמצאו בקיבות הצבים היו דומות לצורות הנפוצות בים, חלקם היחסי בקיבות הצבים היה מעט שונה מזה שבסביבה. חלקיקי שקיות ואריזות (יריעה) היו הנפוצים ביותר ואחריהם שברי הפלסטיק (רסיסים) (50±25% ו-26±19% בהתאמה). הסיבים, לעומת זאת, הופיעו בקיבות הצבים באחוזים גבוהים מאלו שנמצאו בדוגמאות המים (22±18%). הסיבים מייצגים הן חוטי דיג, שהופיעו אצל 60% מהצבים שנבחנו, והן סיבים שיכולים להגיע ממקור סינתטי, כגון רשתות דיג, פרטי ביגוד וטקסטיל. הייצוג הגבוה של הסיבים בצבים, בהשוואה לייצוגם בים, מעיד על חפיפה בין אזורי המחיה של הצבים לאזורי הדיג[42] או לאזורי שפכי נחלים שבהם מוזרם ביוב (מטופל או שלא) המסיע שיירי סיבים מהביוב הביתי (תוצרי מכונות כביסה ומייבשים). פלט כדורי פלסטיק (מתעשיית הפלסטיק, הקוסמטיקה וחומרי הניקוי) הופיע אצל 15% מהצבים בדומה לזפת שהופיעה אצל 20% מהצבים. התוצאות מראות בבירור כי לזיהום הסביבה הימית על-ידי פסולת ימית השפעה משמעותית מזיקה והרסנית על צבי-הים בחופי הארץ.



איור 5. פילוח צבעי המיקרופלסטיק שנמצא במערכת העיכול של צבי-ים בישראל. הנתונים מציגים ממוצע עבור 20 צבים

החברות הביולוגיות שעל גבי המיקרופלסטיק הצף בים התיכון המיקרופלסטיק הימי כמצע גידול לאורגניזמים ימיים

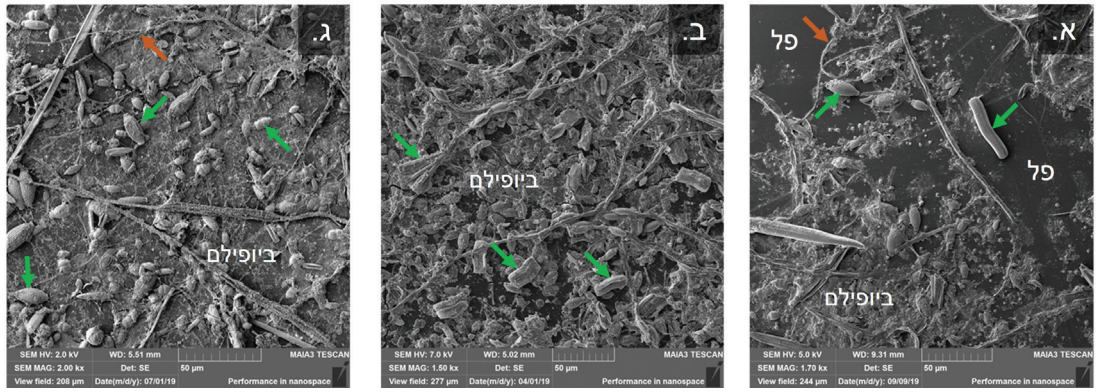
שברי הפלסטיק בים מהווים מצע נוח להתיישבות ולקיום של אורגניזמים שונים החל מווירוסים, חיידקים וחד-תאיים אאוקריוטים ועד לרב-תאיים כגון אצות, פטריות ובעלי חיים חסרי חוליות[43]. יתרונו של הפלסטיק כמצע הוא בהיותו עמיד ויציב בסביבה הימית בניגוד למצע ביולוגי אשר עובר פירוק לאחר זמן קצר יחסית. בנוסף, המיקרופלסטיק הצף, המורכב ברובו מפולימרים בעלי צפיפות נמוכה, ומכיל בעיקר חלקיקים שקופים או שקופים למחצה, מאפשר חשיפה מרבית לאור השמש ולקיומה של פוטוסינתזה. אורגניזמים פוטוסינתטיים, המקיימים יצרנות ראשונית, מהווים בסיס לקיומה של חברה ביולוגית מורכבת, הכוללת גם אורגניזמים הטרוטרופים, טורפים, סימביונטים ומפרקים[15]. על מנת להגן על עצמם מהסביבה העוינת, חיידקים מתקבצים יחדיו על משטחים ויוצרים שכבת ביופילם משותפת, העשויה חומר חוץ-תאי פולימרי שאותו הם מפרישים. מחקרים רבים הראו כי הרכב החברות הביולוגיות שעל שברי הפלסטיק בים שונה באופן מובהק מזה של מי הים הסובבים אותם ומכיל אורגניזמים בעלי יכולת התיישבות[44], ועל כן יכולות להיות מוגדרות כמערכת אקולוגית נפרדת. מערכת אקולוגית זו, הכוללת בתוכה את שברי הפלסטיק והאורגניזמים היושבים עליהם מכונה "פלסטיספירה"[45]. במהלך הזמן הקצר שעבר, במונחים אבולוציונים, מתחילת הופעתם של מזהמי הפלסטיק בסביבה הימית, פיתחו אורגניזמים רבים התאמות לחיים בנוכחותו של הפלסטיק ועל שברי פלסטיק. הדוגמה הטובה ביותר היא התפתחותה של היכולת לפרק פלסטיק ולנצלו כחומר גלם במטבוליזם של חיידקים ופטריות ימיות[46].

מחקרים השוואתיים בנושא הפלסטיספירה הימית מראים כי גורמים שונים משפיעים על הרכב המינים שעל גבי הפלסטיק, ובמרכזם המיקום הגיאוגרפי והעונתיות[47]. הפלסטיספירה הים תיכונית מגוונת ובעל הרכב משתנה בין אזורים שונים במרחבו[48]. במחקר השוואתי שבוצע בים התיכון של ישראל ובאוקיינוס האטלנטי של פורטוגל נמצאו הבדלים מהותיים בהרכב הפלסטיספירה בין המיקומים השונים ובין החורף לקיץ של אותו המיקום[35]. ההבדלים יכולים לנבוע מגורמים סביבתיים רבים ובכלל זה התנאים הפיזיקליים (כגון טמפרטורה ואור), הכימיים (כגון מליחות) והביולוגיים (מתחרים, טורפים, פתוגנים ועוד) וכן גם מהשוני בין מקורות הזיהום, הרכב החלקיקים והתוספים שלהם וזמן שהותם במים.

כיצד מאפיינים את המיקרוביום שעל גבי שברי הפלסטיק?

כאשר מביטים במיקרוסקופ בכיסוי הביופילם שעל משטחי פלסטיק מהים, ניתן להבחין ולזהות קבוצות מסוימות של אורגניזמים ולבחון את היחסים ביניהן על המצע. בתמונות מיקרוסקופ אלקטרונים של פני השטח של משטחי פלסטיק שהוצבו קרוב לפני הים במרינה הרצליה (איור 6) בולטת קבוצת מיקרואורגניזמים אחת במיוחד – קבוצת האצות הצורניות (Diatoms). השלד (frustule) של אצות אלה עשוי מתחמוצת צורן סיליקה (SiO_2) ומקנה להן את צורתן הייחודית. טקסונומים יודעי דבר יודעים למיין את האצות הצורניות על-פי מאפייני השלד הזעירים ביותר, עד לרמת הסוג ואף לרמת המין. לעומת זאת מיקרואורגניזמים רבים שבמיקרוביום של

שברי הפלסטיק הצפים אינם ניתנים לאפיון טקסונומי, וזאת משתי סיבות עיקריות: ראשית, צורתם של רוב המיקרואורגניזמים אינה ייחודית מספיק על מנת לקבוע במדויק את סיווגם הטקסונומי, לדוגמה – חיידקים רבים נראים כספירה או מתג פשוט ללא מאפיינים ייחודיים. הסיבה השנייה היא שמיקרואורגניזמים רבים, ובמיוחד חיידקים וארכאונים, מכסים את עצמם בשכבת חומר חוץ תאי המסתירה אותם לחלוטין ועל כן אינם ניתנים לאיפיון מורפולוגי כלל (איור 6).

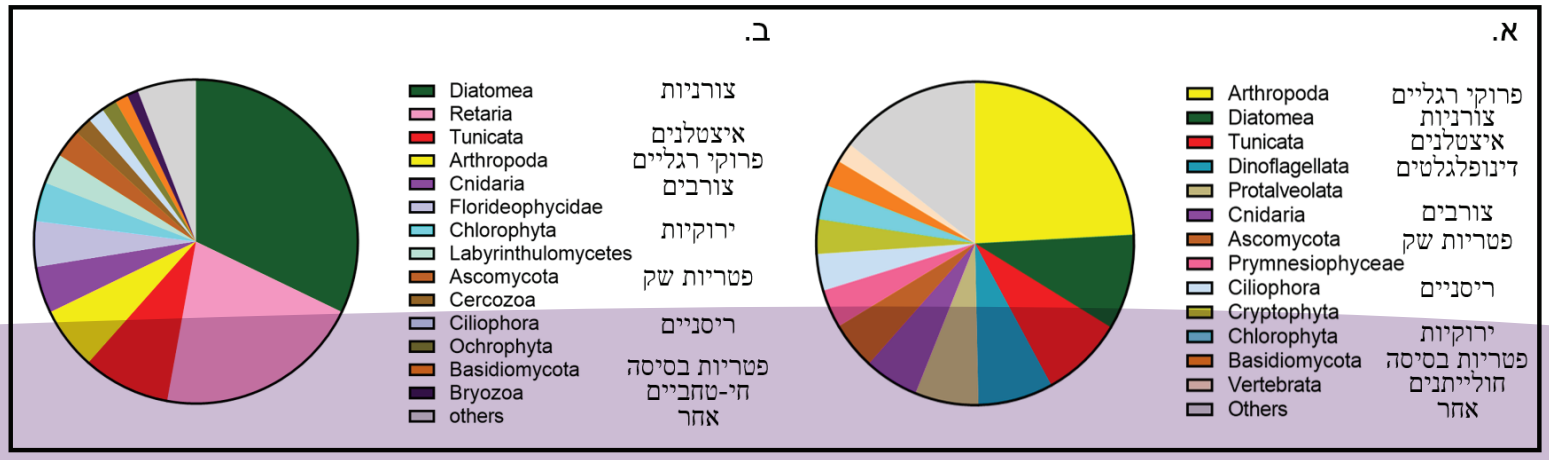


איור 6. תמונות מיקרוסקופ אלקטרונים (MES) של כיסוי מיקרוביום שעל משטחי פוליאתילן (EP) שהוצבו לתקופות זמן שונות במרינה הרצליה. א. הכיסוי הביולגי לאחר חודש. ב. לאחר שלושה חודשים. ג. לאחר חצי שנה. חיצים ירוקים – אצות צורניות, חיצים חומים – קורים של פטרייה ימית. גושי החומר הנראים בין האורגניזמים השונים עשויים מחומר חוץ תאי המופרש ממושבות החיידקים החיים בתוך שכבת הביופילם, המכסה את משטח הפלסטיק. פל – משטח הפלסטיק החשוף.

את הקושי באפיון הרכב המינים על בסיס מראה בלבד פותרת באופן חלקי שיטת תיוג דנ"א (DNA barcoding) השיטה מתבססת על הפקת דנ"א מהדגימה, הגברת אתר גנטי מסוים (ברקוד) בריאקציית PCR, ריצוף התוצרים והשוואת הרצפים שהתקבלו למאגרי המידע כדוגמת NCBI, Silva, ו-BOLD לשם זיהוי מינים רבים בדגימה בעלת הרכב טקסונומי לא ידוע, ועל כן ניכר יתרונה במחקרים אקולוגיים[49]. כאשר התיוג נעשה על מספר רב של אורגניזמים במקביל הוא מכונה מטהברקודינג (Metabarcoding). חיסרון אפשרי של השיטה הוא הסתמכות על רצפי ברקודים קצרים יחסית, המותאמים לשיטות ריצוף הדור השני כדוגמת אילומינה (Illumina) אשר לעיתים לא מספיקים לסיווג טקסונומי ודאי. ניתן להתמודד עם בעיה זו כאשר מסתמכים על רצפים ארוכים יותר המתאפשרים בשיטות ריצוף הדור השלישי – Single Molecule Real Time sequencing (SMRT) ו- Nanopore sequencing המאפשרות ריצוף של ברקודים ארוכים יותר[43]. עם זאת, לעיתים הדיוק בזיהוי הטקסונומי תלוי באיכות ובהיקף מאגרי המידע הקיימים שאליהם מושווים רצפי הברקודים מהדוגמה הסביבתית. יש לזכור כי מאגרי המידע הם חלקיים בלבד ומסתמכים רק על רצפי ברקודים שהופקדו. לדוגמה, קבוצות אורגניזמים כפטריות ימיות המיוצגות פחות במאגרי המידע[50] יזוהו רק ברמות הטקסונומיות הגבוהות יותר (רמת מערכה למשל) או לא יוגדרו טקסונומית כלל.

הרכב החברות האאוקריוטיות שעל המיקרופלסטיק הצף בים התיכון של ישראל

על מנת לאפיין את הרכב החברות הביולוגיות האאוקריוטיות שעל המיקרופלסטיק לעומת המים בסביבתם, התבצע דיגום עונתי (אביב, קיץ, סתיו, חורף) של מיקרופלסטיק ומים באזור קבוע מול חופי הרצליה במהלך השנים 2020-2021. מחקר זה בוצע באוניברסיטת אריאל ומומן על-ידי משרד המדע באמצעות קרן דו-לאומית ישראל-פורטוגל. לאחר מיצוי דנ"א מהדוגמאות השתמשנו בשיטת המטהברקודינג על בסיס רצפי התת-יחידה הריבוזומלית הקטנה 16S באורגניזמים פרוקריוטים ותת-היחידה הריבוזומלית הקטנה 18S באורגניזמים אאוקריוטים ויצרנו פרופיל טקסונומי מקיף של הדגימות. מהשוואת הרצפים למאגר המידע SILVA 51 התגלו הבדלים ניכרים בהרכב המינים שעל גבי המיקרופלסטיק לזה שבמים (איור 7). בקבוצת האאוקריוטים שעלו מניתוח דגימות המיקרופלסטיק, ובהתאם לתצפיות במיקרוסקופ, בלטה קבוצת האצות הצורניות (Diatomea) גליה שהיוותה כ-32% מסך כל הרצפים (7ב, בירוק כהה) לעומת 9.5% בלבד במי הסביבה (7א, בירוק כהה). יש להניח כי השכיחות היחסית של קבוצה זו גבוהה אף יותר מייצוגה בניתוח זה מכיוון שמדובר באורגניזמים חד-תאיים המכילים עותק גנומי יחיד. במי הים, לעומת זאת, בלטה קבוצת פרוקי הרגליים (Arthropoda) שהיוותה כ-24% מהסך הכול הכללי (7א, בצהוב), לעומת כ-6% בלבד על משטחי המיקרופלסטיק. קבוצת החורייריות (Retaria) הופיעה במקום השני בין הקבוצות הבולטות על גבי המיקרופלסטיק (7ב, בוורוד) ולא הופיעה כלל בקבוצות הבולטות בדגימות המים. מצד שני קבוצת הדינופלגלטים (Dinoflagellata) הופיעה בין הקבוצות המרכזיות במים (7א, בכחול) ולא הופיעה בקבוצות המרכזיות שעל גבי הפלסטיק.



איור 7. שכיחות יחסית (ספירות למיליון) של רצפים שמופו למערכות אורגניזמים אאוקריוטים על סמך ריצוף 18S.

במשך השנים 2020-2021. א. חלוקת המערכות העיקריות במי ים שבסביבת הפלסטיק שנדגם. ב. חלוקת המערכות העיקריות שעל גבי המיקרופלסטיק שנדגם קרוב לפני המים.
מתוצאות אלה, בדומה למחקרים קודמים, ניתן לראות כי בנוסף ליצירתו של ביופילם חיידקי, מהווה הפלסטיק כר להתיישבות של מגוון רחב של מינים אאוקריוטים וליצירתן של חברות ביולוגיות בעלות הרכב ייחודי השונה ממי הים בסביבתן.

סיכום

המרחב הימי של ישראל בים התיכון מכיל פסולת ימית רבה הכוללת ריכוז גבוה במיוחד של חלקיקי מיקרופלסטיק, באזור הרדוד, הסמוך לחוף. הנתונים שהצגנו מראים כי הפסולת מהווה גורם סיכון מרכזי עבור צבי-הים בים התיכון של ישראל ועלולה להשפיע על בריאות הסביבה הימית. כמו כן משפיעה פסולת הפלסטיק על הרכב החברות הביולוגיות הקיימות בים התיכון, שכן היא מהווה תווך צף חדש שלא היה קיים בעבר הלא רחוק. לצד השפעותיה השליליות של פסולת הפלסטיק הרבה לאורך חופי ישראל, ניתן להצביע על מגמות חיוביות בחקיקה וביישום תקנות ואכיפה בנוגע לשימוש, ניקיון וטיפול בפסולת. התמדה במאבק כנגד זיהום הפלסטיק בים תוביל לחיזוק מגמות אלה, ובסופו של דבר להפחתה בזיהום הפסולת הימית ובטווח הארוך יותר לירידה בריכוז המיקרופלסטיק בים התיכון בכלל ובישראל בפרט.

רשימת מקורות

1. Waters, C. N. *et al.* The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science* **351**, aad2622 (2016).
2. Lewis, S. L. & Maslin, M. A. Defining the anthropocene. *Nature* **519**, 171-180 (2015).
3. Subramanian, M. Anthropocene now: influential panel votes to recognize Earth's new epoch. *Nature* (2019).
4. Brandon, J. A., Jones, W. & Ohman, M. D. Multidecadal increase in plastic particles in coastal ocean sediments. *Sci. adv.* **5**, eaax0587 (2019).
5. Platics Europe, *Plastics – the fast Facts 2023*, https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/ (2023).
6. Bergmann, M., Gutow, L. & Klages, M. *Marine anthropogenic litter*. (Springer Nature, 2015).
7. Van Sebille, E. *et al.* The physical oceanography of the transport of floating marine debris. *Env. Res. Let.* **15**, 023003 (2020).
8. Cózar, A. *et al.* Plastic debris in the open ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111**, 10239-10244 (2014).
9. Cózar, A. *et al.* Plastic accumulation in the Mediterranean Sea. *PloS one* **10**, e0121762 (2015).
10. Ramirez-Llodra, E., De Mol, B., Company, J. B., Coll, M. & Sardà, F. Effects of natural and anthropogenic

processes in the distribution of marine litter in the deep Mediterranean Sea. *Prog. Oceanogr.* **118**, 273-287 (2013).
11. Sharma, S., Sharma, V. & Chatterjee, S. Microplastics in the Mediterranean Sea: sources, pollution intensity, sea health, and regulatory policies. *Front. Mar. Sci.* **8**, 634934 (2021).
12. Soto-Navarro, J. *et al.* 3D hotspots of marine litter in the Mediterranean: a modeling study. *Mar. Pollut. Bull.* **155**, 111159 (2020).
13. Segal, Y. & Lubinevsky, H. Spatiotemporal distribution of seabed litter in the SE Levantine Basin during 2012–2021. *Mar. Pollut. Bull.* **188**, 114714 (2023).
14. Pasternak, G., Zviely, D., Ribic, C. A., Ariel, A. & Spanier, E. Sources, composition and spatial distribution of marine debris along the Mediterranean coast of Israel. *Mar. Pollut. Bull.* **114**, 1036-1045 (2017).
15. Amaral-Zettler, L. A., Zettler, E. R. & Mincer, T. J. Ecology of the plastisphere. *Nat. Rev. Microbiol.* **18**, 139-151 (2020).
16. Shaji, A. *et al.* Microbial degradation of marine plastic debris: A comprehensive review on the environmental effects, disposal, and biodegradation. *Biochem. Eng. J.* **201**, 109133 (2024).
17. Frias, J. P. & Nash, R. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Mar. Pollut. Bull.* **138**, 145-147 (2019).
18. Doyle, M. J., Watson, W., Bowlin, N. M. & Sheavly, S. B. Plastic particles in coastal pelagic ecosystems of the Northeast Pacific ocean. *Mar. Environ. Res.* **71**, 41-52 (2011).
19. 19 Sassoon, S., Suari, Y. & Levy, Y. Eastern Mediterranean Sea Turtles in Their Epipelagic Phase: First Records of Monthly Growth Rates and Polypropylene Sacks as a Major Threat. *Available at SSRN 4332416* (2022).
20. García-Gómez, J. C., Garrigós, M. & Garrigós, J. Plastic as a vector of dispersion for marine species with invasive potential. A review. *Front. Ecol. Evol.* **9**, 629756 (2021).
21. Viršek, M. K., Lovšin, M. N., Koren, Š., Kržan, A. & Peterlin, M. Microplastics as a vector for the transport of the bacterial fish pathogen species Aeromonas salmonicida. *Mar. Pollut. Bull.* **125**, 301-309 (2017).
22. He, M. *et al.* Bioavailability and toxicity of microplastics to zooplankton. *Gondwana Res.* **108**, 120-126 (2022).
23. Sendra, M., Sparaventi, E., Novoa, B. & Figueras, A. An overview of the internalization and effects of microplastics and nanoplastics as pollutants of emerging concern in bivalves. *Sci. Tot. Environ.* **753**, 142024 (2021).
24. Wootton, N., Reis-Santos, P. & Gillanders, B. M. Microplastic in fish–a global synthesis. *Rev. Fish. Biol. Fish.* **31**, 753-771 (2021).

25. Battisti, C. *et al.* Interactions between anthropogenic litter and birds: a global review with a 'black-list'of species. *Mar. Pollut. Bull.* **138**, 93-114 (2019).
26. Duncan, E. M. *et al.* Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Glob. Chang. Biol.* **25**, 744-752 (2019).
27. Kühn, S. & Van Franeker, J. A. Quantitative overview of marine debris ingested by marine megafauna. *Mar. Pollut. Bull.* **151**, 110858 (2020).
28. Huang, W. *et al.* Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *J. Hazard. Mater.* **405**, 124187 (2021).
29. Gregory, M. R. Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* **364**, 2013-2025 (2009).
30. Noij, F. UN Environment Programme. *Synthesis* **2** (2021).
31. Gago, J., Cronin, R., Mira Veiga, J. et al. Identifying sources of marine litter – MSFD GES TG marine litter thematic report. (2016).
32. סגל, י. תוכנית הניטור הלאומית בים התיכון לשנת 2022. ניטור פסולת ימית (כולל מפרץ אילת). חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ דוח חיא"ל H28/2023.
33. van der Hal, N., Ariel, A. & Angel, D. L. Exceptionally high abundances of microplastics in the oligotrophic Israeli Mediterranean coastal waters. *Mar. Pollut. Bull.* **116**, 151-155 (2017).
34. Rubin, A. E., Omeysi, L. & Zucker, I. Mediterranean microplastic contamination: Israel's coastline contributions. *Mar. Pollut. Bull.* **183**, 114080 (2022).
35. 35 Marsay, K. S. *et al.* The geographical and seasonal effects on the composition of marine microplastic and its microbial communities: The case study of Israel and Portugal. *Front. Microbiol.* **14**, 1089926 (2023).
36. 36 Carbery, M., O'Connor, W. & Palanisami, T. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environ. internat.* **115**, 400-409 (2018).
37. 37 Segal, Y., Gertner, Y., Sisma-Ventura, G., Zurel, D. & Herut, B. The state of beach litter pollution during the COVID-19 pandemic: A case study of the israeli coasts. *Coast. Manag.* **50**, 372-384 (2022).
38. Jemaa, S. *et al.* Floating marine litter in Eastern Mediterranean from macro to microplastics: the Lebanese coastal area as a case study. *Front. Environ. Sci.* **9**, 699343 (2021).
39. Yalvac, M., Saleh, M., Melis, G. & Arslan, H. The effect of bags law on environmental behavior and habits-Mersin example. *Environ. Res. Technol.* **6**, 196-205 (2021).
40. Shaw, D. G. & Day, R. H. Colour-and form-dependent loss of plastic micro-debris from the North Pacific Ocean. *Mar. Pollut. Bull.* **28**, 39-43 (1994).

41. Botterell, Z. L. *et al.* Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: A review. *Environ. Pollut.* **245**, 98-110 (2019).
42. Levy, Y. *Eastern Mediterranean Sea Turtle Ecology and Conservation: Spatiotemporal Patterns, Fishing Impacts, Health Diagnostics and Husbandry*. (University of Haifa (Israel), 2019).
43. Davidov, K. *et al.* Identification of plastic-associated species in the Mediterranean Sea using DNA metabarcoding with Nanopore MinION. *Sci. rep.* **10**, 17533 (2020).
44. Jacquin, J. *et al.* Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the "plastisphere". *Front. Microbiol.* **10**, 865 (2019).
45. Zettler, E. R., Mincer, T. J. & Amaral-Zettler, L. A. Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris. *Environ. Sci. Technol.* **47**, 7137-7146 (2013).
46. Vaksmaa, A., Hernando-Morales, V., Zeghal, E. & Niemann, H. Microbial degradation of marine plastics: current state and future prospects. In: Joshi, S.J., Deshmukh, A., Sarma, H. (Eds.), *Biotech. Sustain. Environ.* Springer Singapore, Singapore, pp. 111–154. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1955-7_5. (2021).
47. Oberbeckmann, S., Osborn, A. M. & Duhaime, M. B. Microbes on a bottle: substrate, season and geography influence community composition of microbes colonizing marine plastic debris. *PLoS One* **11**, e0159289 (2016).
48. Amaral-Zettler, L. A. *et al.* Diversity and predicted inter-and intra-domain interactions in the Mediterranean Plastisphere. *Env. Pollut.* **286**, 117439 (2021).
49. Porter, T. M. & Hajibabaei, M. Scaling up: A guide to high-throughput genomic approaches for biodiversity analysis. *Mol. Ecol.* **27**, 313-338 (2018).
50. Gonçalves, M. F., Esteves, A. C. & Alves, A. Marine fungi: Opportunities and challenges. *Encyclopedia* **2**, 559-577 (2022).
51. Pruesse, E. *et al.* SILVA: a comprehensive online resource for quality checked and aligned ribosomal RNA sequence data compatible with ARB. *Nucleic acids res.* **35**, 7188-7196 (2007).

16 המיקרובים בים וחשיבותם בעולם משתנה

נגה סטמבלר

נגה סטמבלר ייעוץ מדעי

drnogas@gmail.com

תקציר

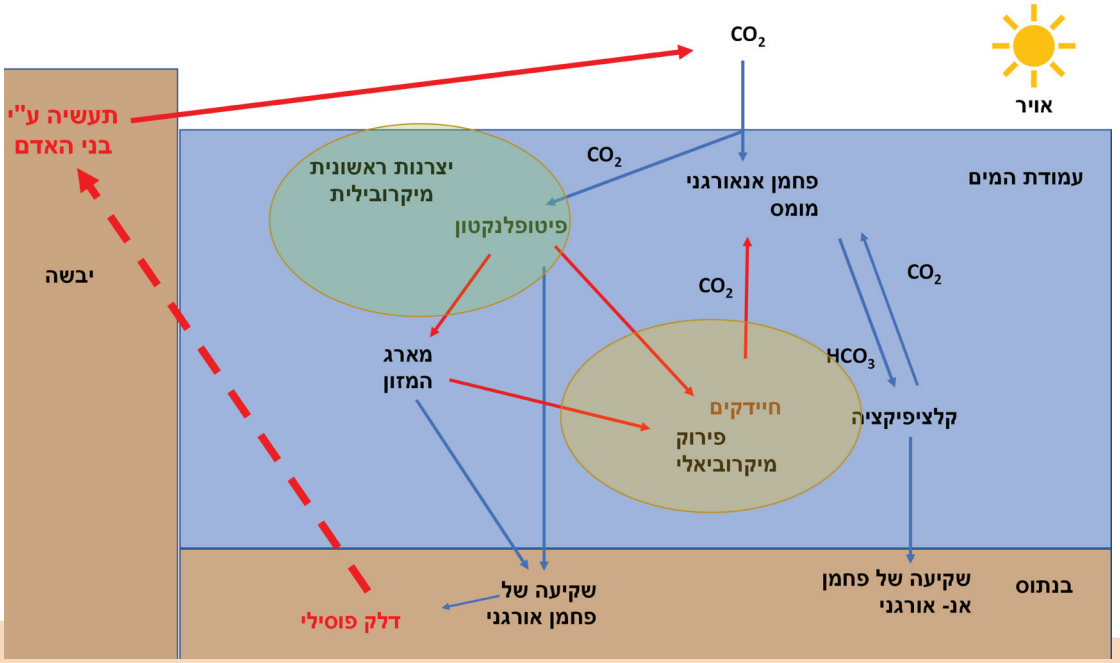
בים התיכון ובמפרץ אילת כמו בשאר הימים והאוקיינוסים בעולם יש מגוון גדול וכמות רבה של מיקרובים. במיקרובים נכלול שתי על-ממלכות של חיידקים (בקטריה וארכיאה), אאוקריוטים זעירים, כגון אצות ופטריות ובנוסף להם נכלול גם את הנגיפים (וירוסים). למיקרובים תפקיד מרכזי בחיים על כדור הארץ: הם יצרנים חשובים בבסיס מארג המזון, המשתמשים באנרגיית שמש או אנרגיה כימית בשביל לייצר חומר אורגני. הם גם ממחזרים חומר אורגני וכך מתחזקים יצרנות שניונית (יצרנות של אורגניזמים הטרטרופים). מיקרובים הם חלק עיקרי במחזורים הביוגיאוכימיים בים, כגון אלו של פחמן, חנקן, צורן וגופרית. לכן, מיקרובים מהווים בסיס לחיים על כדור הארץ, כאשר הם גם מווסתים את שינויי האקלים העולמי. למיקרובים ולנגיפים מהים יש שימושים בחקלאות ובתעשייה ממזון, תרופות, קוסמטיקה, דלקים ועוד. הפרק בא לתת רקע כללי בסיסי על חשיבות המיקרובים בים ולבחון כיצד ישפיעו שינויי האקלים על המיקרובים.

למי אכפת מהמיקרובים?

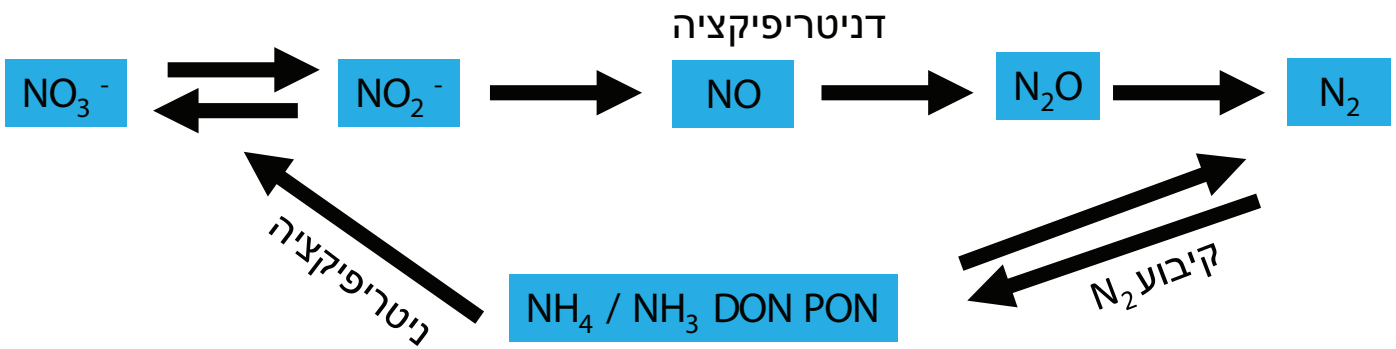
החשיבות האקולוגית של הקבוצות השונות של המיקרובים רבה. בלעדיהם כדור הארץ שאותו אנו מכירים היה אחר: 1) החיידקים הפוטוסינתטיים וביניהם החיידקים הכחולים (ציאנובקטריה, cyanobacteria), שהתפתחו לפני מיליארדי שנים, עיצבו את כדור הארץ שלנו בכך שהם ייצרו חמצן שהצטבר באטמוספרה ואיפשר את התפתחות החיים[1-3]. 2) המיקרובים חשובים במחזור הפחמן בעיקר עקב יכולתם לקלוט ולקבע פחמן דו-חמצני. קצב תהליך הקיבוע של פחמן חמצני על-ידי היצרנים הראשונים ובהמשך, הפיכת הפחמן האורגני לדלק מאובנים (פוסילי), נמוך כיום בהרבה מקצב שריפת הדלקים בתעשייה. המיקרובים משחררים פחמן דו-חמצני למי הים בתהליך הנשימה אך קצב תהליך זה נמוך בהשוואה לקצב שריפת הדלקים[4,5] (ראו איור 1). 3) חלק מהחיידקים מקבעים חנקן אטמוספרי והופכים אותו לנוטריינט (חומר הזנה, דשן) זמין לשאר האורגניזמים (איור 2). 4) החיידקים, הפרוטיסטים והפטריות מפרקים את החומר האורגני למינרלים ומאפשרים מחזור חומרים בטבע[5]. 5) חלק מהמיקרובים מהווים את בסיס מארג המזון[4,6]. 6) חלק מהנגיפים, מהחיידקים, מהאצות ומהפטריות הם מחוללי תמותה (מחלה) גם באוקיינוסים ובכך מווסתים את האוכלוסיות בהם. חיידקים ופטריות גורמים למחלות ולתמותה של אלמוגים, חיידקים ונגיפים מחוללי מחלות ופוגעים בכל האורגניזמים הימיים, כולל אצות, דגים ויונקים ימיים[7-9]. 7) מיקרובים הם בעלי משמעות קריטית בשינוי האקלים שכן הם משפיעים על המחזורים של פחמן, חנקן, זרחן, גופרית, ברזל ועוד[4,10].

מי הם המיקרובים?

עידן הקורונה חשף את כולנו לעובדה שאפילו מיקרובים נעלמים מהעין, כמו נגיפים (וירוסים), יכלו, יכולים ויוכלו לשנות את כדור הארץ. מיהם המיקרובים? בפרק זה נתייחס במיקרובים למיקרואורגניזמים (יצורים חיים) ונגיפים שגודלם לרוב קטן מ-50 מיקרומטר. נכלול בהם: 1) נגיפים, למרות שיש מי שיגידו שהם אינם יצורים חיים, 2) פרוקריוטים, אורגניזמים חסרי ממברנות סביב אברונים: ארכאות, 3) פרוקריוטים: חיידקים (בקטריות), כולל חיידקים פוטוסינתטים, כגון חיידקים כחולים, (ציאנובקטריה), 4) אאוקריוטים, אורגניזמים חסרי ממברנות סביב אברונים פרוטיסטים אוטוטרופיים: אצות, 5) אאוקריוטים פרוטיסטים הטרוטרופיים דוגמת דינופלגלטה (שוטניות), 6) אאוקריוטים פרוטיסטים הטרוטרופיים: פטריות (טבלה 1)[4]. המיקרובים כוללים אורגנזימים אוטוטרופים (מייצרים את מזונם בעצמם) והטרוטרופים (כאלה שלא יכולים לייצר מזון בעצמם מחומר אנאורגני אלא מנצלים חומר אורגני). הם כוללים אורגנזימים פוטואוטוטרופים – יצרנים, מיקסוטרופים (שהם גם הטרוטרופים וגם אוטוטרופים), סימביונטים, טורפים, פריזיטים וטפילים[5,11] וחלקם פתגונים.



איור 1. מחזור ומיחזור הפחמן באוקיינוסים. האיור מתאר את זרימת הפחמן במערכת האקולוגית הימית. מוצג תיאור סכמתי של התהליכים בחלוקה לעמודת המים ולבנתוס (הקרקעית). בעמודת המים היצרנות הראשונית על-ידי הפיטופלנקטון מבוצעת רק בעומקים שבהם יש מספיק אור לקיבוע פחמן בתהליך הפוטוסינתזה. בעתיד, עם העלייה בפליטות גזי החממה, כמות הפחמן שתגיע אל מי הים מהאטמוספרה צפויה לעלות. בעקבות שינויים בזמינות נוטריינטים בעמודת המים, בחומציות מי הים ועליית הטמפרטורה, קצבי התהליכים הביולוגיים צפויים לרדת (ע"פ תחזית זו)[10]. האיור לא מציג הבדלים שצפויים בין אזורים שונים בים. באדום פליטת פחמן דו-חמצני, בכחול קליטה.



איור 2. התהליכים במחזור החנקן המבוצעים על-ידי מיקרובים. קיבוע החנקן והניטריפיקציה מתבצעים באזור הפלגי (אזור הים הפתוח) שבו יש חמצן. שאר התהליכים מתבצעים בעיקר באזור הבנתי (בנתוס) והאנוקסי (חסר חמצן). על-פי Hutchins and Fu, 2017[10] כל התהליכים, למעט הפיכת ניטריט (חנקית, NO_2^-) לניטראט (חנקה, NO_3^-), יוגברו ככל הנראה בעתיד[10]. DON = Dissolved organic Nitogen חנקן אורגני מומס, פחמן אורגני מומס DOC = Dissolved Organic Carbon.

למה התעלמו בעבר ממיקרובים?

המיקרובים חיוניים לקיום החיים בכדור הארץ כבעלי תפקידי מפתח במחזורי החמצן, הפחמן והחנקן כמו גם בבריאות בעלי חיים, אדם וצומח, ייתכן שהסיבה נבעה מחוסר במידע בגלל גודלם הזעיר ומקשיים בהגדרות טקסונומיות[4]. עם זאת, יש לציין כי בשנים האחרונות הורחב המחקר של המיקרובים בזכות יכולת הזיהוי המולקולרית[12,13]. והיום ברור שאין להתעלם מהם גם בהקשרים של שינויי אקלים.

טבלה 1. מיקרובים בים – חלוקה טקסונומית*.

הקבוצה	תת-קבוצה	מאפיינים	תפוצה	חשיבות
נגיפים (וירוסים)[71,61,21]		בנויים ממולקולות דנ"א או רנ"א וחלבונים. ללא יכולת התרבות עצמאית. חלק מהמדענים לא רואים בנגיף יצור חי.	בכל האוקיינוסים	ידועים כגורמי מחלות ותמותה של חיידקים, אצות ואורגניזמים אחרים.
ארכאות[81]	(Marine Groups I (MGI Marine Groups II Marine Groups III	פרוקריוטים, חד-תאיים, בעלי-RNA ריבוזומלי (rRNA) ייחודי. MGI כימואוטוטרופים, MGII חלקם הטרוטרופים וחלקם פוטואוטוטרופים MGIII הטרוטרופים.	הנפוצים באוקיינוסים כולל בתנאים קיצונים. II נמצאים באזור הפוטי (שכבת המים העליונה אליה מגיע עד 0.1-1% מהאור). III נמצאים בכל עמודת המים ובמיוחד בעומק המים.	Marine group I (Nitrososphaerales) - תפקיד במחזורים הביוגיאוכימיים של פחמן וחנקן, תפקיד בקיבוע פחמן ובניטריפקציה (הפיכת אמוניה לניטרט). ל-III, Marine Groups II יש תפקיד במחזור חומרים אורגניים.
חיידקים[9]	חיידקים	פרוקריוטים חד-תאיים	בכל מקום	חיידקים מהווים את מרבית המגוון הביולוגי בעלי תפקיד חשוב בפירוק ומחזור חומרים אורגניים, אך גם בקיבוע פחמן בחושך כימוסינתזה.
	חיידקים פוטוסינתטיים (בעיקר חיידקים כחולים, כחוליות (cyanobacteria)	פרוקריוטים, חד-תאיים ורב-תאיים. רובם פוטואוטוטרופים אבל יש גם פוטוהטרוטרופים	באזור הפוטי כולל ב"עומק של הכלורופיל המקסימלי" עד 200 מטר.	יצרנות ראשונית, בסיס מארג המזון, קיבוע חנקן, חמצון ברזל, קליטת פחמן דו-חמצני, פליטת חמצן. הפוטוהטרוטרופים אף ממחזרים / מקבעים חומר אורגני באמצעות קרינת השמש.
פרוטיסטים (Protista) פוטוטרופים אצות	ירוקיות	אאוקריטים (חד-תאיות ומושבתיות)	באזור הפוטי	יצרנות ראשונית, בסיס מארג המזון, קליטת פחמן דו-חמצני, פליטת חמצן.
	צורניות	אאוקריטים (חד-תאיות ומושבתיות)	באזור הפוטי	יצרנות ראשונית, בסיס מארג המזון, קליטת פחמן דו-חמצני, פליטת חמצן קליטת כספית, מעגל הצורן.
	דינופלגלטה	אאוקריטים (חד-תאיות)	באזור הפוטי	יצרנות ראשונית קליטת פחמן דו-חמצני, פליטת חמצן, בסיס מארג המזון. חלקן יוצרות פריחות רעילות באוקיינוסים.
פרוטיסטים הטרוטרופיים אצות[5]	דינופלגלטה (שוטניות)	אאוקריטים (חד-תאיות)		מעגל פחמן, רעיה, טריפה מארג המזון.
פרוטיסטים הטרוטרופיים פטריות[91,31]	נחקרו מעט ועיקר הזיהוי מולקולרי	אאוקריטים	בכל עמודת המים בים העמוק וסמוך לחוף	פירוק חומר אורגני

*הטבלה היא חלקית ובאה להציג מאפיינים של חלק מהמיקרובים בים.

מה הקשר בין זיהוי ותפוצה של מיקרובים ונגיפים?

ללא זיהוי ודאי לא ניתן לדעת מי המינים באזור מסוים, האם המינים טבעיים או אנדמיים לאזור ולפיכך קשה גם להעריך איזה מינים מהגרים / פולשים בכל אזור. המיקרובים נעים עם הזרמים ויש להם וקטורי תנועה נוספים כגון על-ידי אורגניזמים אחרים, לדוגמה, תנועת אורגניזמים דרך תעלת סואץ מהים האדום לים התיכון, המאפשרת תפוצה שלהם והגירה באופן פשוט יחסית[14]. דרך תפוצה זו על-ידי אורגניזמים ייתכן שנותנת יתרון הישרדותי, שכן המינים ינועו לאזורים אחרים יחסית בקלות בעקבות שינוי האקלים. בעבר הזיהוי בוצע באמצעות ראייה, מיקרוסקופ או זריעות ע"ג מצעים, היום הזיהוי הוא בשיטות מולקולריות גנטיות שאפילו מאפשרות אפיון של מנגנוני תנועה. (ראו פרק של אורנה שוויצר-נתן וחובריה בספר זה, וכן נספח [15]).

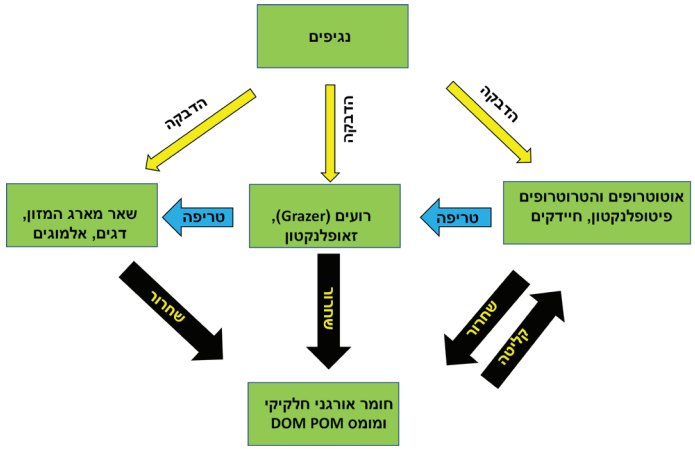
איפה המיקרובים נמצאים?

המיקרובים מהווים 70-90% מהביומסה באוקיינוסים. אוכלוסיות המיקרובים בקרקעית הים מהווים 12-45% מכלל הביומסה שהם כ-0.6-2% מכלל החיים על פני כדור הארץ[20]. מיקרובים מצויים לא רק בעמודת המים או בקרקעית הים, בתוך ומעל הסדימנט[21], אלא על ובתוך אורגניזמים ימיים במגוון מערכות יחסים, מפרזיטיות (חיידקים) לבין סימביוזה (כדוגמת הסימביוזה של דינופלגלטים עם אלמוגים, שושנות-ים, צדפות ועוד). בתוך השלדים החיים של האלמוגים ניתן למצוא גם אצות אנדוליטיות (כגון אצות ירוקיות), חיידקים כחולים, פטריות ואף נגיפים[22]. מערכות אקולוגיות במעמקי הים מבוססות על בעלי חיים שונים שמאכסנים חיידקים כימוסינתטיים (פרק של מקסים רובין-בלום וחובריו בספר זה). המיקרובים נמצאים גם על/בתוך עצמים מלאכותיים בים כגון כלי שיט, מזחים ואפילו פלסטיק[23]. אוכלוסיית המיקרובים, הבקטריות פלנקטון בים התיכון, סמוך לחופי ישראל ועד לעומק 1,880 מטר, נמצאת כקשורה למסות מים ותלויה במדדים פיסקלים-כימיים[24]. תפוצתם ומגוון המינים מהווה אינדקטורים לתנאי סביבה לרוב אינדיקציה להשפעות אנתרופוגניות[21,25]. על תפוצתם בים התיכון / מפרץ אילת ניתן לקרוא בפרק של אורנה שוויצר-נתן וחובריה בספר זה ובמאמרים שונים[21,25-28].

מה חשיבות הנגיפים באוקיינוסים ?

נגיפים הבנויים ממולקולות דנ"א או רנ"א וחלבונים, ללא יכולת רבייה עצמאית ולכן לעיתים אינם נחשבים יצורים חיים (אורגניזמים), הם מרכיב ביולוגי נפוץ ביותר בכדור הארץ ורק לאחרונה נמצאו כ-200 אלף נגיפים חדשים במחקר באוקיינוסים מקוטב לקוטב[12]. וירוסים גם באוקיינוסים ידועים כמחוללי מחלות[7,29] התוקפים אצות כדוגמת *Emiliania huxleyi*, חיידקים כחולים דוגמת *Synechococcus* ו-*Prochlorococcus*[16] ואפילו את הזואכלורלות, אצות ירוקיות שנמצאות בסימביוזה באורגניזמים שונים כגון הידרה (במים מתוקים) וספוגים (במים מלוחים) ומארחיהן. חשיבות הנגיפים מבחינה אקולוגית היא לא רק באופן ישיר אלא באופן עקיף, בהתאם למי שהם מדביקים או לא מדביקים[30]. כמחוללי מחלות באצות, בבעלי חיים (אלמוגים[31], דגים), הם גורמים לשינוי של המגוון הביולוגי. הנגיפים מובילים לשינויים גנטיים (חדשנות והעברת גנים) ואבולוציוניים של האורגניזמים המאחסנים

ובכך משנים את המגוון הביולוגי של הסביבה[32]. הפגיעה של הנגיפים בגידולים ימיים חקלאיים כגון דגים וצדפות מפחיתה את היבולים ומובילה לפגיעה כלכלית[33] . נגיפים, בנוסף על היותם מחוללי מחלות, מהווים מרכיב קריטי בתהליכים קו-אבולוציוניים. הנגיפים, ה-bacterivorous והאאוקריוטים הם רועים grazers ולכן בעלי חשיבות במארג המזון[16]. תוצאת ההדבקה של וירוסים את האורגניזמים השונים משחררת לסביבה חומר אורגני חלקיקי ומומס (DOM dissolved organic matter, POM particulate organic matter), חומר אורגני שמנוצל על-ידי הרמות הטרופיות השונות (איור 3). הנגיפים שהם חלק מהתהליכים הביוגיאוכימיים הגלובליים של שטפי פחמן ומחזור חנקן משפיעים על כמות וקצב הפחמן שמתפרק ומגיע לקרקעית האוקיינוסים. הנגיפים בחלק מהמקרים מתפקדים כבקרים של תהליכים אקלימיים. לנגיפים יש פוטנציאל גנטי ומטבולי אדיר שרובו טרם נחקר. המחקר של הנגיפים בים הוא חדש יחסית ויש להרחיב אותו וכן לנסות ולהקים אוסף ותרביות שלהם[16,17].



איור 3. נגיפים במארג המזון ומחזור חומרים אורגניים. נגיפים הם טפילים בכל האורגניזמים כולל יצורים אוטוטרופיים והטרוטרופיים, רועים ושאר מארג המזון. תוצאת ההדבקה של וירוסים את האורגניזמים השונים מובילה לתמותה וזו משחררת לסביבה חומר אורגני חלקיקי ומומס (DOM dissolved organic matter, POM particles organic matter). חומרים אורגניים אלה נקלטים בחלקם על-ידי היצורים האוטוטרופיים וההטרוטרופיים (האצות והפטריות). הרועים ניזונים מהיצורים האוטוטרופיים ומהווים מקור מזון לשאר מארג המזון. כלומר, מעבר של חומר אורגני מרמה לרמה[17,34]

באיזה תהליכים מעורבים הארכאות והחיידקים באוקיינוסים?

יש בכדור הארץ כ-10^{30} בקטריות וארכאות[35].(*Pelagibacter*) SAR-11 הוא החיידק ההטרוטרופי הנפוץ באוקיינוסים כ-2.4×10^{28}[24]. למרות שכיחותם הגבוהה וחשיבותם בתהליכי פירוק ומחזור של חומרים, לרוב מתעלמים מהם, לעיתים מסיבות טכניות[36]. בקרקעית הים, כולל סמוך לחופי ישראל[37] מצויים מיקרובים רבים, כולל ארכאה וחיידקים שמגוון המינים שלהם וצפיפותם משתנה מאזור לאזור ויש להם פעילויות ביוגיאוכימיות שונות. למשל, חלקם אחראים על חמצון אמוניה[8,18,37].

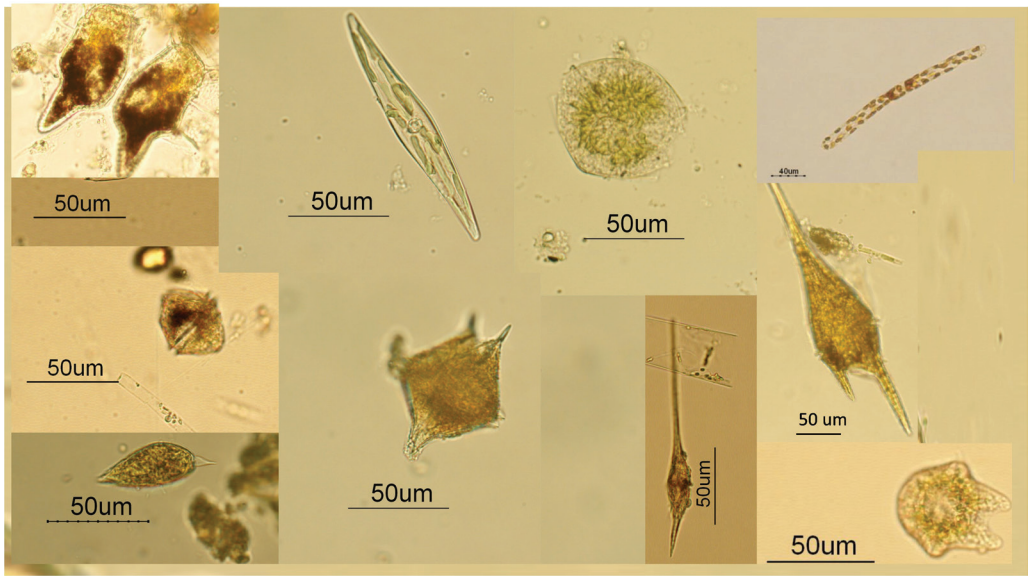
חיידקים בנביעות הידרותרמיות מבצעים כימוסינתזה המתבססת על הפיכת חומרים אי-אורגניים לחומרים אורגניים (כמקור לאנרגיה). גם בתנאי חושך מוחלט במעמקים ובפני השטח בקטבים בחורף ארכאות וחיידקים מקבעים פחמן דו-חמצני. לארכאות ולחיידקים חשיבות בגלל נשימתם ובמחזור ומיחזור של אלמנטים שונים. לדוגמה, בקרקעית הים נמצאים חיידקי methanotrophs מקבעי מתאן[38] (הרחבה על המיקרוביאליות של נביעות הגז והתמלחת ראו פרק של מקסים רובין-בלום וחובריו בספר זה). מידת השפעתם על האטמוספרה לא ברורה. החיידקים נמצאים ביחסי גומלין שונים עם אורגניזמים בים כולל עם אצות, אלמוגים ודגים ולעיתים הם גורמי מחלות[9,39]. דוגמה ספציפית כזו היא חיידקי *Streptococcus agalactiae* שזוהו בכרישים מהמין כריש סנפירתן (*Carcharhinus plumbeus*)[40]. מינים המהווים מקור מזון לרמות מעליהם נמצאו כצפוי בים התיכון ובמפרץ אילת[36].

מהו התפקיד של חיידקים ופרוטיסטים אוטוטרופיים באוקיינוסים?

חיידקים כחולים ואצות הם בעלי חשיבות גדולה רבה במערכת הימית העולמית. הם מהווים את היצרנים הראשונים העיקריים במערכת הימית (נוספים אליהם חיידקים פוטוסינתטיים אחרים), חלקם הגדול נמצא בעמודת המים וכאשר הם אינם נעים נגד הזרם נכנה אותם פיטופלנקטון (אותו ניתן לחלק לפיקופיטופלנקטון, ננופיטופלנקטון ומיקרופיטופלנקטון בהתאם לגודל). מגוון האצות והחיידקים הכחולים בים הוא עצום (דוגמה באיור 4) ולמעשה, למרות שלא ניתן לראותם, צבעם הירוק של המים בחופים קרוב ליבשת מלמד על צפיפותם. *Synechococcus* ו-*Prochlorococcus* שהם החיידקים הכחולים הנפוצים ביותר באוקיינוסיים ולפיכך בכדור הארץ, הם יצרנים ראשונים חשובים במערכות ימיות. האצות והחיידקים הכחולים חיוניים לקיום כלל המערכות האקולוגיות באוקיינוסים. הפיטופלנקטון הימי, האצות והחיידקים הכחולים, אחראים על מעל 50% מייצור החמצן העולמי (למרות שמבחינת ביומסה הם פחות מ-1% הצומח היבשתי)[41-44]. הפיטופלנקטון המצוי בכל המים העליונים של האוקיינוסים, כלומר בכ-70% משטח כדור הארץ, עד לעומק של 200 מטר, מאופיינים במחזור (תחלופה turnover) גדול, קצב גידול מהיר מאוד (ימים בהשוואה לשנים/ עשורים בצמחים עילאיים). לכן השפעת הפיטופלנקטון גדולה. הצד הנוסף של הפוטוסינתזה, היצרנות הראשונית, היא קיבוע פחמן דו-חמצני לפחמימות תוך הפיכת אנרגיית השמש לאנרגיה כימית שזורמת בכל מארג המזון. לפיטופלנקטון תרומה של כ-50% בקליטת הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספרה. השקיעה של חומר אורגני אל מעמקי הים והתגבשותו לסדימנטים, מהווה את התהליך הטבעי העיקרי להרחקת פחמן דו-חמצני מהאטמוספרה[45]. החיידקים הכחולים והאצות משתתפים בתהליכים ביוגיאוכימיים רבים נוספים באוקיינוס, לדוגמה: חלק מהחיידקים הכחולים מקבעים חנקן[38,46]. הברזל מסלעי היסוד החל להיות מחומצן כבר לפני מיליוני שנה על-ידי החיידקים הכחולים[47]. אצות צורניות החיות בסדימנט באנטארקטיקה הן הקולטות העיקריות של כספית אנתרופוגנית[48]. האצות והחיידקים הכחולים מהווים את הבסיס של מארג המזון כשהם המזון לשאר האורגניזמים בכל הגדלים, מזואופלנקטון ועד דגי ענק[49,50]. אצות דוגמת *Phaeocystis* מייצרות כמות עצומה (2 מיליארד טון בשנה) של פוליסכריד ההופך באוקיינוס לחומר אורגני מומס המשמש להתפתחות בקטריות ואאוקריוטים (פרוטסטים) אחרים[51]. כאשר אצות מתפרקות נוצר די-מתיל סולפיד (dimethylsulfide DMS) ונגזרות של סולפט, גז גופרית (הריח שמריחים בחוף ים בסוף עונות המעבר כשפריחת אצות מסתיימת). הגופרית הזו מנוצלת על-ידי חיידקים

הטרוטרופיים. כאשר DMS, הנמצא מעל רוויה בשכבת האוקיינוסים העליונה, עובר חמצון, הוא יוצר ארוסולים ימיים שהם תערובת של מלח ים וחומרים אורגניים. ארוסולים אלה יכולים להוות גלעינים להיווצרות עננים, הקובעים את כמות קרינת השמש המגיעה לשטח פני כדור הארץ[52,53]. אורגניזמים אלה השפיעו, ישפיעו ויושפעו משינויי האקלים בכדור הארץ.

לפיטופלנקטון בים התיכון ולאצות וציאנובקטריה רעילות בסביבה הימית של ישראל מוקדשים שלושה פרקים בספר, האחד של איל רהב וחובריו, של אורנה שוויצר-נתן ושל פלג אסטרחן וחובריו.



איור 4. תמונות של מינים שונים של מיקרואצות מחופי ישראל, צורניות ודיופלגלטה (צילומים במיקרוסקופ אור).

כיום מנצלים את האצות והחיידקים הכחולים כמקור לביודיזל, תרופות, תוספי מזון לאדם (חלבון, אומגה, חומצות שומן), מזון לבעלי חיים וקוסמטיקה. כמו כן הם משמשים בתהליכים לטיהור מקורות מים, להרחקת נוטריינטים ומתכות, לטיהור אוויר[54].

מי הם הפרוטיסטים ההטרטרופים?

הפרוטיסטים ההטרוטרופים היא קבוצה גדולה של אורגנזימים השייכים למערכות שונות מבחינה טקסונומית. ביניהם נציין את הפלגלטים (Flagellates) הכוללים את הדינופלגטה[5,55], האמבות (Amoebae), הריסניות (Ciliates), הפורמניפרה (Foraminifera) להם מוקדש בספר פרק שלם של אורית חיימס-קפצן וחובריה, ועוד קבוצות רבות[56,57]. מגוון רחב של פרוטיסטים הטרוטרופים נפוצים בכל עמודת המים כולל במים עמוקים כולל בים התיכון[56,57] והם בעלי פרודוקטיביות גבוהה. לפרוטיסטים הללו חשיבות רבה במעגלים הביוגיאוכימיים באוקיינוסים, ביצרנות, במיחזור

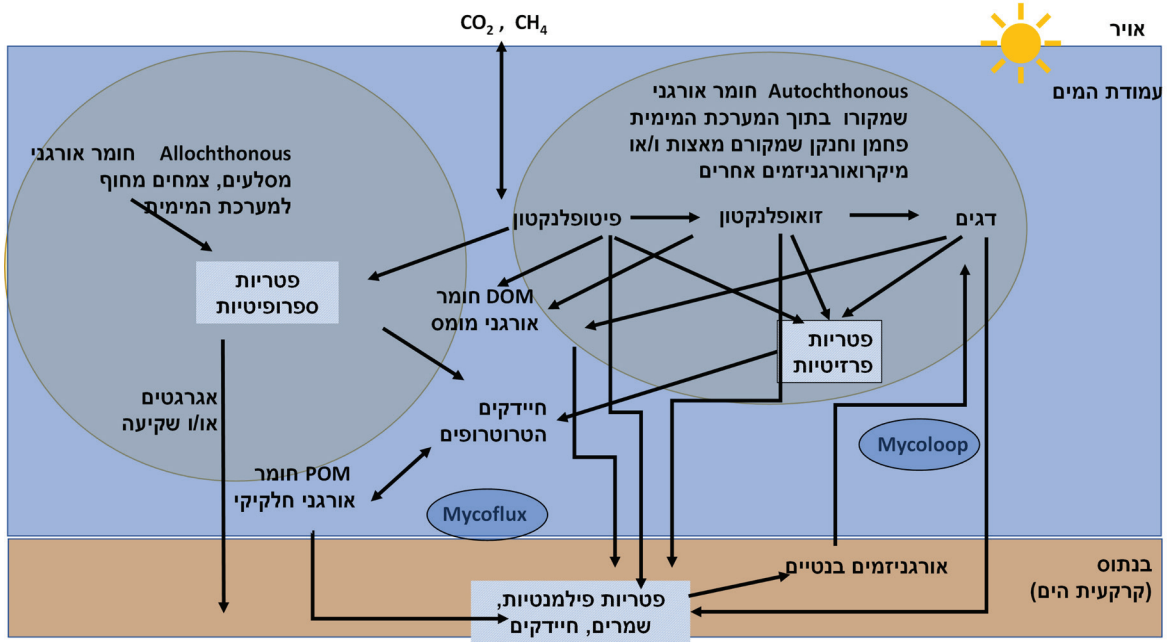
נוטריינטים, במחזור הפחמן, במארג המזון כשיש להם אסטרטגיות תזונה שונות וחלקם ניזונים מחומר אורגני בסדימנט(ditritus). במים העמוקים הם ניזונים בנוסף ל-ditritus גם ממיקרו-אאוקריוטים, פרוקיוטים וארכאה. הם נחשבים כקריטיים בתפקוד אקוסיסטמות ימיות[57].

מה הקשר בין מיחזור חומרים ופטריות באוקיינוסים?

פטריות, יחד עם החיידקים, אחראים על מיחזור חומרים – הפיכת חומר אורגני לחומרים אנאורגניים. רוב הידע שלנו על פטריות הוא מהיבשה. ביבשה הפטריות מעודדות גידול של הצמחים העילאיים שהן נמצאות איתם ביחסי סימביוזה המכונים מיקוריזה. פטריות משמשות בני אדם למזון ולתרופות (לדוגמה: אנטיביוטיקה), אולם חלקן גורמות לנזק כטפילות או כבעלות חומרים רעלניים המחוללים מחלות בצמחים, בפטריות ובעלי חיים (כולל האדם)[4,13].

במערכות ימיות רק בשנים האחרונות, עת התחילו להשתמש בטכנולוגיות המולקולריות, למדו על הימצאותן באוקיינוסים. מרבית הפטריות שדווחו שייכות ל-Dothideomycetes, Eurotiomycetes, Saccharomycetes, Sordariomycetes[19], פטריות מקבוצות שונות: Ascomycota, Basidiomycota, Chytridiomycota, Mortierellomycota, Entorrhizomycota, Monoblepharomycota, Rozellomycota, Zoopagomycota זוהו באופן מולקולרי בסדימנטים של קרקעית הים התיכון סמוך לחופי ישראל בסדימנטים: ממדף היבשת ממים רדודים ומסדימנטים ממים עמוקים[37]. פטריות בים התיכון זוהו גם ע"ג פלסטיק (ראו פרק של יעל סגל ומתן אורן[23]).

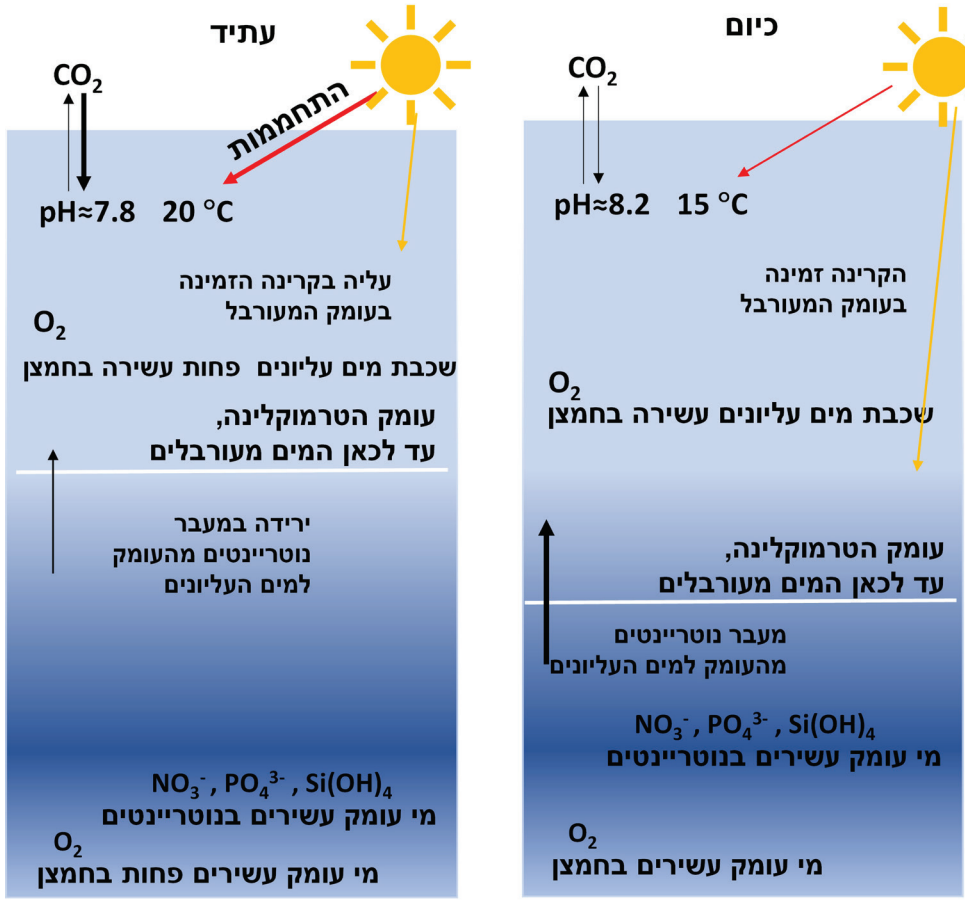
תפקודן וחשיבותן האקולוגית באוקיינוסים כמעט ולא נחקרו – לא יודעים מה תפקידן במארג המזון הימי ומה קצב נשימתן. למרות מיעוט הידע והמחקר בנושא פטריות באוקיינוסים, הוצע שהן משפיעות על מארג המזון מפרזיטיות ועד syntrophic (תזונה יחדיו) ונמצאות באינטראקציות עם אורגניזמים ימיים אחרים. יש פטריות שנמצאו פרזיטיות על-גבי פיטופלנקטון. למרות שבמים מתוקים פטריות יכולות להוות 50% מכלל האאוקריוטים, במים מלוחים הן לעיתים פחות מ-1% מהאאוקריוטים: פטריות נמצאו במים עמוקים; פטריות פילמנטיות ושמרים נמצאו בנביעות הידרותרמית; במים חופיים נמצאו פטריות מקבוצות שונות[13,19]. בים האדום, למשל, במצרים נמצאו פטריות מקבוצת ה-Ascomycetes אפיביוטיות יחד עם מקרו-אצות[58]. פטריות יכולות לשנות את הרכב הפיטופלנקטון, הן מנצלות חומר אורגני הנוצר על-ידי הפיטופלנקטון ובכך משפיעות על מחזור החומר האורגני (איור 5) ומכאן חשיבותן. פטריות בים משפיעות על הדינמיקה של מארג המזון. הן משפיעות לא רק על הפיטופלנקטון אלא גם על הזואופלנקטון והלולאה המיקרוביאלית (microbial loop)[13,19]. הלולאה המיקרוביאלית מתארת מנגנון טרופי במערכות ימיות שבו חומר אורגני מומס מועבר לרמה טרופית גבוהה יותר דרך הפיכתו לביומסה חיידקית ומשם לשאר הרמות הטרופיות של פיטופלנקטון, זואופלנקטון ונקטון.



איור 5. הפטריות הספרופיטיות (ניזונות מרקב), הפרזיטיות (טפיליות) והפילמנטיות כחלק בלולאה ובזרימת חומרים (mycoflux, mycoloop), בעמודת המים ובקרקעית הים (הבנתוס). הפטריות קולטות חומר אורגני מומס, חומר אורגני חלקיקי שממוחזר ומועבר אל שאר האורגניזמים. מבוסס על[13].

מהם השינויים הצפויים בים בעקבות שינוי האקלים ?

האקלים בכדור הארץ משתנה. באוקיינוסים השינוי מתבטא בעלייה בטמפרטורה ובחומציות של מי הים. בעקבות עליית הטמפרטורה שכבת המים העליונה מתחממת יותר ולכן תיווצר הפרדה, שכוב בין עמודת המים העליונה לשכבה התחתונה. שינויי הטמפרטורה יובילו לשינויים בטרמוקלינה (שכבת המעבר בגוף מים משוכב, בתוכה משתנה הטמפרטורה באופן חריף עם העומק) ובזרמים ויקטינו את עומק הערבול. בעקבות השכוב והקטנת עומק הערבול הנוטריינטים ששוקעים למעמקים ועולים בעת ערבול יישארו בקרקעית כך, שפני המים העליונים, שבהם מתבצעת היצרנות הראשונית, יהפכו לדלים בנוטריינטים. באוקיינוסים קיימים אזורים עם מינימום חמצן (Oxygen Minimum Zones, OMZs). בעקבות ההתחממות מסיסות החמצן יורדת, ולכן רוחבם של אזורים עם מינימום חמצן גדל בעשורים האחרונים ובנוסף, ריכוז החמצן במי העומק צפוי לרדת[38]. בעתיד, המיקרובים, בעיקר עקב הימצאותם במים רדודים, ייחשפו לקרינה גבוהה. ייתכנו שינויים נוספים בקרינה בהתאם לצפיפות וריכוז חומרים וחלקיקים בעמודת המים שישתנו בעתיד (איור 6)[10].



איור 6. מדדים המאפיינים את האוקיינוסים (בממוצע) כיום ובעתיד. בעקבות העלייה בריכוזי הפחמן הדו-חמצני צפויה התחממות של שכבת המים העליונה, ירידה בעומק הערבול (השכבה העליונה רדודה יותר). יהיה פחות מעבר של נוטריינטים ממי העומק למים העליונים. מי העומק וגם המים העליונים צפויים להיות פחות עשירים בחמצן מבוסס על[10].

כיצד ישפיעו שינויי אקלים על המיקרובים?

השאלה הגדולה היא כיצד ישפיעו השינויים האקלימיים האנתרופוגניים הגלובליים והמקומיים על המיקרובים השונים וכיצד הם ישנו את האקלים כתוצאה מכך. למעשה יש הרואים במיקרובים גורם ביולוגי עיקרי שיכתיב את יציבות המערכות האקולוגיות בעתיד[4]. מיקרובים משפיעים על האקלים ושינוי האקלים משפיע על המיקרובים מבחינת מגוון מינים ואוכלוסיות, וכן על התפקוד, הפיזיולוגיה והאבולוציה שלהם. יש לזכור ששינוי האקלים משולב עם שינויים אחרים שיוצר האדם כגון זיהום ו/או העשרה בנוטריינטים משפיעים במקביל על המיקרובים, לעיתים במגמה דומה ולעיתים הפוכה.

האם צפויים שינויים במחזורים הביוגיאוכימיים בעקבות שינוי האקלים?

שינוי האקלים ישפיע על תפקודם של כל המיקרובים, כולל על ארכאה וחיידקים בקרקעית הים שהם בעלי פעילויות ביוגיאוכימיות שונות[20]. כבר כיום, באוקיינוס הדרומי, שינויים בריכוז ומגוון הפיטופלנקטון המשחררים DMS מביאים לשינוי בכמות העננים[59].

שינוי האקלים ישפיע על מחזור החנקן. ריכוזי הניטריט והנטראט צפויים לרדת בפני המים בעקבות שכוב בעומק רדוד של עמודת המים בעקבות התחממות הים. כמויות האמוניה, חומר אורגני חנקתי מומס וחלקיקי, צפויות גם הן לרדת בעתיד. החמצת האוקיינוסים תגרום לחמצון האמוניה, שבשילוב עם הגברת הירידה בחמצן יקטינו גם הם ככל הנראה את ריכוזי הניטריט והנטראט בים. כמויות אלה צפויות לרדת גם באם תהיה עלייה בכמות מקבעי החנקן בעקבות העלייה בריכוז הפחמן דו-חמצני והטמפרטורה[10].

בעתיד יחולו שינויים במחזור הפחמן. אומנם כמות הפחמן שתגיע אל מי הים מהאטמוספרה צפויה לעלות, אבל בעקבות שינויים בעמודת המים, בזמינות נוטריינטים, בחומציות מי הים ובעליית הטמפרטורה התהליכים הביולוגיים עשויים גם לרדת[10].

מה השפעת שינוי אקלים על היצרנות הראשונית ועל מארג המזון?

שינוי האקלים מוביל לשינויים ביצרנות ובמארג המזון. למיקרובים אין תנועה עצמאית ותפוצתם היא בעיקר באמצעות זרמים (או יחד עם האורגניזם המארח). כאמור, שינוי האקלים מוביל לשינוי בזרמים באוקיינוסים ולפיכך לשינוי בתפוצת המקרואורגניזמים.

קשה לחזות כיצד תושפע היצרנות הראשונית משינוי האקלים שכן היא תלויה במידת היווצרות פריחות. פריחות של פיטופלנקטון מושפעות ממספר גורמים/בקרות שלעיתים פועלים בכיוונים מנוגדים: א. בקרה מהרמה התחתונה (יצרנים) אל הרמה העליונה ה-bottom-up control. כלומר גורמים מגבילים, כגון זמינות נוטריינטים, ערבול של המים. ב. בקרה על הרמה העליונה, למשל על טורפי-על, שמשפיעה בהמשך על הרמה התחתונה מה שמכונה Top down control. בקרה הכוללת השפעה על יחסי רעייה, יחסי טורף-נטרף ומחלות הנובעות למשל מנגיפים[4]. מצד אחד עלייה בקרינה המגיעה מהשמש (בעיקר באזורים של הפשרת הקרח) באוקיינוסים, בשילוב עם עלייה בטמפרטורה וכניסת מים מתוקים לסביבה הימית, יובילו לשכוב של עמודת המים. שכוב זה יגביל את כמות הנוטריינטים הזמינה לפיטופלנקטון ולכן יוריד את היצרנות הראשונית. מצד שני עלייה בריכוזי הפחמן הדו-חמצני תעלה את קצב הפוטוסינתזה (היצרנות הראשונית), אולם זאת בתנאי שהנוטריינטים לא יהוו גורם מגביל.

אצות צורניות מהוות בין 25-45% מהיצרנות הראשונית באוקיינוסים. השלד הצורני שלהן גורם לקצב שקיעה מהיר ולכן הן מהוות כ-40% מכמות הפחמן החלקיקי שמיוצא למעמקים. שינויים עונתיים ובעיקר שינוי באוטרופיקציה (העשרה בנוטריינטים, Eutrophication) מכתיבים את הפריחות שלהן. יש עדויות מלוויינים שיש ירידה בפריחות בצפון האוקיינוס השקט בעקבות שכוב של מים עליונים וירידה בזמינות הנוטריינטים[60]. שינויי האקלים עשויים להביא

לפריחה של אצות וחיידקים כחולים בפני המים, שעלולים לגרום לקריסה מוחלטת של מערכות אקולוגיות שלמות, בעיקר קרוב לחוף או/ ו בימים סגורים[15]. מצד אחד, רמות פחמן דו-חמצני גבוהות יכולות להביא לפריחה של אצות רעילות שעשויות לפגוע במעבר החומר האורגני בין הרמות הטרופיות השונות[61]. מצד שני, קצב הפוטוסינתזה וכמות האצות והחיידקים הכחולים תעלה בעקבות עלייה בפחמן הדו-חמצני וקצב קיבוע החנקן שיואץ על-ידי החיידקים הכחולים[4]. באזורים עם מינימום חמצן ישנה פעילות חיידקית מוגברת שבה נוצר גז חנקן (N_2) מ-N_2O. באזורים אלה נמצא מאגר המתאן הגדול של האוקיינוסים המשפיע על מחזור המתאן בכדור הארץ. ההרחבה של אזורים עם מינימום חמצן תשפיע על מאגרי גזי החממה והנוטריינטים ועל התפוצה של אורגניזמים תלויי חמצן[4,38].

שינויי האקלים שיובילו לשינויים במגוון המינים ובצפיפותם ישפיעו על יחסי טורף-נטרף, כולל על יחסי וירוסים ומארחים ולכן על המחזורים הביוגיאוכימיים בכדור הארץ.

מהן ההשפעות של שינוי אקלים על הפרט, החברה והמערכת האקולוגית כולה?

התגובות של מיקרובים לעליית הטמפרטורה, עלייה בחומציות (ירידה ב-pH) תלויה במין המיקרואורגניזם, בשילוב בין הגורמים המשתנים וכן ברמות הנוטריינטים[4]. שינויי האקלים משפיעים על המיקרובים השונים, על יחסי הגומלין ביניהם ומוביל לאקלימיזציה (הסתגלות של הפרט), אדפטציה (הסתגלות אבולוציונית, גנטית), הגירה או הכחדה. התגובה לשינוי האקלים של המיקרובים יכולה לכלול שינויים בהרכב החברות, במגוון המינים, בשינויים מרחביים ביוגיאוגרפיים וכן אדפטציה. אוכלוסיות המיקרובים, שהן בגדלים עצומים מבחינה מספרית, יש להן זמן דור קצר ומגוון גנטי גדול, אפשרות לשיחלוף גנטי (horizontal gene transfer) וגם תכונות אחרות שחלקן אינן ידועות, הן בעלות יכולת תיאורטית לתגובה אבולוציונית מהירה לשינוי אקלים. לחצים אנתרופוגניים הם בעלי פוטנציאל לגרום לשינויים משמעותיים באוכלוסיות ולסלקציות שיאפשרו אדפטציות (הסתגלות גנטית) שבעקבותיהן יחולו שינויים באוכלוסיות הפלנקטון[10]. למיקרובים חיידקים, ארכאה, אצות ונגיפים שיש להם אוכלוסיות ענק וקצבי גידול מהירים א-מיניים (וגטטיביים) יש ככל הנראה יכולת אדפטציה מהירה יחסית שטרם נחקרה[10]. מיקרובים ארוביים ואנארוביים הנשמרים בסדימנט בקרקעית בים מצליחים לשמור על פוטנציאל מטבולי ברמות אנרגיה נמוכות מאוד אפילו במשך כ-100 מיליוני שנה כשהם אינם מתחלקים אלא רק שורדים. אורגניזמים אלו מעומק של 5,700 מטר, שעברו אינקובציה לתנאים טובים יותר, קבעו חנקן ופחמן והגדילו את קצב התרבותם עד פי 4[20]. מינים אלה עברו אדפטציה להישרדות בתנאים יציבים מאוד. האם ישרדו בעקבות קצב השינויים המהיר הצפוי?

מה הקשר בין שינויי אקלים, מיקרובים והכחדת שוניות אלמוגים?

הסימביוזה בין הזואוקסנטלות (האצות בגודל כ-10 מיקרון החיות ברקמות האלמוגים) לבין האלמוגים היא הבסיס לקיום שונית אלמוגים. שינויי האקלים בכדור הארץ כבר הובילו לשינויים גדולים ולהכחדה של שוניות אלמוגים[15]. העלייה בטמפרטורת מי הים הביאה לתופעת ההלבנה (bleaching) שבה אלמוגים מתים. כשהטמפרטורה גבוהה

מאוד נגרמת תמותה של האלמוג והאצות כמעט בו זמנית. במקרים אחרים האצות השיתופיות (הסימביונטיות), הזואוקסנטלות, מתות או יוצאות או מורחקות מרקמות האלמוג, וכתוצאה מכך בפרק זמן קצר אחר-כך האלמוג מת גם כן. מאחר שעל-גבי האלמוג החי יש באופן טבעי אוכלוסיות גדולות ומגוונות של מיקרובים (חיידקים) שחיוניים לקיומו, שתפקידם להרחיק חומרי הפרשה ולהגן מפני פתוגנים, אלמוגים שהמקרוביום שלהם נפגע חולים יותר ועמידים פחות לעקות ולשינויים סביבתיים. כאשר האלמוגים מתים, השוניות מתכסות במקרואצות ובמשטחים של חיידקים כחולים, כל המערכת האקולוגית של השונית משתנה. האלמוגים מתקשים לעבור אדפטציה (הסתגלות גנטית) מהירה לשינויי הסביבה כשאחת הדרכים היא להחליף את האצות השיתופיות (הסימביונטיות) המצויות ברקמות, באצות מסוג אחר, שמותאם יותר לטמפרטורות גבוהות[62]. ככל הנראה, למרות האקלימציה והאדפטציה, שינויי האקלים העתידיים צפוי שיגרמו לעלייה נוספת בטמפרטורת מי הים, להחמצה (עלייה בחומציות) של האוקיינוסים ולהתגברות מחלות באלמוגים על-ידי חיידקים ופטריות שיובילו בעתיד הקרוב מאוד להכחדה של מרבית השוניות בכדור הארץ[22]. הנזק מתמותת אלמוגים איננו רק אקולוגי, אלא גם גיאולוגי וטופוגרפי. כששונית אלמוגים נפגעת ביולוגית היא נהרסת מבנית ואז חושפת את היבשה להשפעות הרסניות של הים, כולל גלי צונמי. אלמוגי הים האדום ומפרץ אילת ככל הנראה מעט יותר עמידים לעלייה בטמפרטורת מי הים בגלל שינויים אבולוציוניים, איטיים מטבעם, שעברו[63] – ראו פרק של נעמה-רוז קוכמן, מעוז פיין בספר. אבל גם באוכלוסיות המיקרובים של הים האדום, כמו גם בשונית האלמוגים, צפויים שינויים בעקבות שינויי האקלים.

סיכום

המידע הקיים על מיקרובים בכדור הארץ בכלל ובים בפרט מוגבל. למרות חוסר המידע בזיהוי האורגניזמים תפקודם, לפחות בחלקו, ידוע. הם יצרנים ראשונים, מפרקים, פולטי חמצן, קולטי פחמן דו- חמצני, הם משתתפים במרבית המחזורים הביוגיאוכימיים (חנקן, פחמן, גופרית ועוד), הם מהווים את בסיס מארג המזון, ומשמשים מקור לתרופות, מזון ועוד.

מעט ידוע על מיקרובים בים התיכון לחופי ישראל ובמפרץ אילת. באופן קבוע יש ניטור (על-ידי משרד הבריאות) של אוכלוסיות חיידקים מחוללי מחלות (פתוגנים) בחופים, אולם אלה אינן אוכלוסיות שמקורן בים. במסגרת הניטור הלאומי בים התיכון ובמפרץ אילת יש דיגום של חיידקים, חיידקים כחולים ואצות. למיטב ידיעתי, אין דיגום של נגיפים או של פטריות, למעט בסדימנט[37]. במעט המחקרים שבהם יש דיגום של נגיפים, חיידקים ואצות, הדיגום הוא לרוב באמצעות זיהוי מולקולרי ולא יורד לרמת המין או מתמקד במין מסוים. היציבות של המיקרובים חשובה לקיומו של כדור הארץ ולאקלים שבו. בתחזיות של השפעות האדם על הסביבה הימית ושינויי האקלים יש לקחת בחשבון את ההשלכה של השינויים על פעילות המיקרובים, כולל על כמות הפחמן המתאן וחנקן דו-חמצני שישוחררו על ידם.

רשימת מקורות

1. Canfiel, D. E. *Oxygen: A four billion year history.* (Princeton University Press, 2014). doi:10.1038/242587c0.
2. Kaufman, A. J. Cyanobacteria at work. *Nat. Geosci.* **7**, 253–254 (2014).
3. Knoll, A. H., Bergmann, K. D. & Strauss, J. V. Life: The first two billion years. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **371**, (2016).
4. Cavicchioli, R. *et al.* Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. *Nat. Rev. Microbiol.* **17**, 569–586 (2019).
5. Worden, A. Z. *et al.* Rethinking the marine carbon cycle: Factoring in the multifarious lifestyles of microbes. *Science (80-.).* **347**, (2015).
6. Azam, F. & Malfatti, F. Microbial structuring of marine ecosystems. *Nat. Rev. Microbiol.* **5**, 782–791 (2007).
7. Middelboe, M. & Brussaard, C. P. D. Marine viruses: Key players in marine ecosystems. *Viruses* **9**, 1–6 (2017).
8. Morris, R. M., Cain, K. R., Hvorecny, K. L. & Kollman, J. M. Lysogenic host–virus interactions in SAR11 marine bacteria. *Nat. Microbiol.* **5**, 1011–1015 (2020).
9. Burge, C. A. *et al.* Climate change influences on marine infectious diseases: Implications for management and society. *Ann. Rev. Mar. Sci.* **6**, 249–277 (2014).
10. Hutchins, D. A. & Fu, F. Microorganisms and ocean global change. *Nat. Microbiol.* **2**, 1–11 (2017).
11. Keeling, P. J. & Campo, J. del. Marine Protists Are Not Just Big Bacteria. *Curr. Biol.* **27**, R541–R549 (2017).
12. Gregory, A. C. *et al.* Marine DNA Viral Macro- and Microdiversity from Pole to Pole. *Cell* **177**, 1109-1123.e14 (2019).
13. Grossart, H. P. *et al.* Fungi in aquatic ecosystems. *Nat. Rev. Microbiol.* **17**, 339–354 (2019).
14. Pyšek, P. *et al.* Scientists' warning on invasive alien species. *Biol. Rev.* (2020) doi:10.1111/brv.12627.
15. סטמבלר וחובריה. פריחות של מיקרו-אצות וחיידקים כחולים בסביבה המימית והסיכונים מהן. *אקולוגיה וסביבה* **1**, 18–29 (2018).
16. Nissimov, J. I. *et al.* Aquatic virus culture collection : an absent (but necessary) safety net for environmental microbiologists. *Appl. Phycol.* **00**, 1–15 (2020).
17. Sandaa, R. A. & Bratbak, G. Is the virus important? And some other questions. *Viruses* **10**, 6–9 (2018).
18. Santoro, A. E., Richter, R. A. & Dupont, C. L. Planktonic marine archaea. *Ann. Rev. Mar. Sci.* **11**, 131–158 (2019).
19. Wijayawardene, N. N. *et al.* Ecological and Oceanographic Perspectives in Future Marine Fungal Taxonomy. *J. Fungi* **8**, 1141 (2022).

20. Morono, Y. *et al.* Aerobic microbial life persists in oxic marine sediment as old as 101.5 million years. *Nat. Commun.* (2020) doi:10.1038/s41467-020-17330-1.
21. Lalzar, M. *et al.* Sediment Microbiota as a Proxy of Environmental Health: Discovering Inter- and Intrakingdom Dynamics along the Eastern Mediterranean Continental Shelf. *Microbiol. Spectr.* **11**, 1–17 (2023).
22. Bourne, D. G., Morrow, K. M. & Webster, N. S. Insights into the coral microbiome: Underpinning the health and resilience of reef ecosystems. *Annu. Rev. Microbiol.* **70**, 317–340 (2016).
23. Davidov, K. *et al.* Identification of plastic-associated species in the Mediterranean Sea using DNA metabarcoding with Nanopore MinION. *Sci. Rep.* **10**, 1–11 (2020).
24. Keuter, S., Rahav, E., Herut, B. & Rinkevich, B. Distribution patterns of bacterioplankton in the oligotrophic south-eastern Mediterranean Sea. *FEMS Microbiol. Ecol.* **91**, 1–11 (2015).
25. Yanuka-Golub, K. *et al.* Allochthonous Groundwater Microorganisms Affect Coastal Seawater Microbial Abundance, Activity and Diversity. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* **129**, (2024).
26. Belkin, N. *et al.* Influence of cyclonic and anticyclonic eddies on plankton in the southeastern Mediterranean Sea during late summertime. *Ocean Sci.* **18**, 693–715 (2022).
27. Rubin-Blum, M. *et al.* Active microbial communities facilitate carbon turnover in brine pools found in the deep Southeastern Mediterranean Sea. *Mar. Environ. Res.* **198**, 106497 (2024).
28. Givati, S. *et al.* Diversity in the Utilization of Different Molecular Classes of Dissolved Organic Matter by Heterotrophic Marine Bacteria. *bioRxiv* 2024.02.13.580157 (2024).
29. Munn, C. B. Viruses as pathogens of marine organisms - From bacteria to whales. *J. Mar. Biol. Assoc. United Kingdom* **86**, 453–467 (2006).
30. Vincent, F. & Vardi, A. Viral infection in the ocean—A journey across scales. *PLoS Biol.* **21**, 1–14 (2023).
31. Howe-Kerr, L. I. *et al.* Viruses of a key coral symbiont exhibit temperature-driven productivity across a reefscape. *ISME Commun.* **3**, 1–12 (2023).
32. Avrani, S. & Sher, D. Viruses—Agents of Change in the Oceans. *Front. Young Minds. 9569372.* (2021) doi:10.3389/frym.2021.569372tle.
33. Lopez, C. Defining Risk : Hepatitis A Virus in Philippine Shellfish (Oyster and Mussels). doi:10.21203/rs.3.rs-2986597/v1.
34. Weinbauer, M. G., Chen, F. & Wilhelm, S. W. Virus-mediated redistribution and partitioning of carbon in the global oceans. *Microb. Carbon Pump Ocean.* 54–56 (2011).
35. Flemming, H. C. & Wuertz, S. Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms. *Nat. Rev. Microbiol.* **17**, 247–260 (2019).
36. Dadon-Pilosof, A. *et al.* Surface properties of SAR11 bacteria facilitate grazing avoidance. *Nat. Microbiol.* **2**, 1608–1615 (2017).

37. Rubin-Blum, M. *et al.* Diversity, activity, and abundance of benthic microbes in the Southeastern Mediterranean Sea. *FEMS Microbiol. Ecol.* **98**, 1–14 (2022).
38. Wakeham, S. G. Organic biogeochemistry in the oxygen-deficient ocean: A review. *Org. Geochem.* **149**, 104096 (2020).
39. Apprill, A. The role of symbioses in the adaptation and stress responses of marine organisms. *Ann. Rev. Mar. Sci.* **12**, 291–314 (2020).
40. Morick, D. *et al.* Fatal infection in a wild sandbar shark (Carcharhinus plumbeus), caused by streptococcus agalactiae, type Ia-ST7. *Animals* **10**, 1–7 (2020).
41. Falkowski, P. G. & Behrenfeld, M. J. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* **42**, 1–20 (1997).
42. Behrenfeld, M. J. Climate-mediated dance of the plankton. **4**, (2014).
43. Biophysics, E., Program, M. E., Science, C. & Brunswick, N. Human Footprints in the Ecological Landscape. (1872).
44. Callieri, C., Cabello-Yeves, P. J. & Bertoni, F. The "Dark Side" of Picocyanobacteria: Life as We Do Not Know It (Yet). *Microorganisms* **10**, 1–18 (2022).
45. Richardson, T. L. Mechanisms and pathways of small-phytoplankton export from the surface ocean. *Ann. Rev. Mar. Sci.* **11**, 57–74 (2019).
46. Zehr, J. P. & Kudela, R. M. Nitrogen Cycle of the Open Ocean : From Genes to Ecosystems. (2011) doi:10.1146/annurev-marine-120709-142819.
47. Schad, M., Konhauser, K. O., Sánchez-Baracaldo, P., Kappler, A. & Bryce, C. How did the evolution of oxygenic photosynthesis influence the temporal and spatial development of the microbial iron cycle on ancient Earth? *Free Radic. Biol. Med.* **140**, 154–166 (2019).
48. Zaferani, S., Pérez-Rodríguez, M. & Biester, H. Diatom ooze—A large marine mercury sink. *Science (80-.).* **361**, 797–800 (2018).
49. Zamora-Terol, S., Novotny, A. & Winder, M. Reconstructing marine plankton food web interactions using DNA metabarcoding. *Mol. Ecol.* **29**, 3380–3395 (2020).
50. Andreeva, N. A., Melnikov, V. V. & Snarskaya, D. D. The role of cyanobacteria in marine ecosystems. *Russ. J. Mar. Biol.* **46**, 154–165 (2020).
51. Schoemann, V., Becquevort, S., Stefels, J., Rousseau, V. & Lancelot, C. Phaeocystis blooms in the global ocean and their controlling mechanisms: A review. *J. Sea Res.* **53**, 43–66 (2005).
52. Lizotte, M. *et al.* Phytoplankton and dimethylsulfide dynamics at two contrasting Arctic ice edges. *Biogeosciences* **17**, 1557–1581 (2020).
53. Brooks, S. D. & Thornton, D. C. O. Marine aerosols and clouds. *Ann. Rev. Mar. Sci.* **10**, 289–313 (2018).
54. Levasseur, W., Perré, P. & Pozzobon, V. A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. *Biotechnol. Adv.* **41**, 107545 (2020).

55. Bachy, C. *et al. Marine Protists: A Hitchhiker's Guide to their Role in the Marine Microbiome*. (2022). doi:10.1007/978-3-030-90383-1_4.
56. Schoenle, A. *et al.* High and specific diversity of protists in the deep-sea basins dominated by diplonemids, kinetoplastids, ciliates and foraminiferans. *Commun. Biol.* **4**, 1–10 (2021).
57. Cadena, L. R., Edgcomb, V. & Lukeš, J. Gazing into the abyss: A glimpse into the diversity, distribution, and behaviour of heterotrophic protists from the deep-sea floor. *Environ. Microbiol.* **26**, (2024).
58. Abdel-Gawad, K. M., Hifney, A. F., Issa, A. A. & Gomaa, M. Spatio-temporal, environmental factors, and host identity shape culturable-epibiotic fungi of seaweeds in the Red Sea, Egypt. *Hydrobiologia* **740**, 37–49 (2014).
59. Wang, S., Maltrud, M., Elliott, S., Cameron-Smith, P. & Jonko, A. Influence of dimethyl sulfide on the carbon cycle and biological production. *Biogeochemistry* **138**, 49–68 (2018).
60. Rousseaux, C. S. & Gregg, W. W. Recent decadal trends in global phytoplankton composition. *Global Biogeochem. Cycles* **29**, 1674–1688 (2015).
61. Riebesell, U. *et al.* Toxic algal bloom induced by ocean acidification disrupts the pelagic food web. *Nat. Clim. Chang.* **8**, 1082–1086 (2018).
62. Webster, N. S. & Reusch, T. B. H. Microbial contributions to the persistence of coral reefs. *ISME J.* **11**, 2167–2174 (2017).
63. Kleinhaus, K. *et al.* Science, Diplomacy, and the Red Sea's Unique Coral Reef: It's Time for Action. *Front. Mar. Sci.* **7**, 1–9 (2020).

17 המיקרוביום של מים מתוקים בישראל

אורנה שוויצר-נתן[2,1], אשרף אל-אשהב[4,3,2], אסף סוקניק[1], דניאל שר[2]

[1] המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל
[2] החוג לביולוגיה ימית, בית הספר למדעי הים על שם צ'רני, אוניברסיטת חיפה
[3] מו"פ מדבר וים המלח, מצדה
[4] אוניברסיטת בן גוריון, קמפוס אילת

ornanatan29@gmail.com, ashraf@adssc.org, assaf@ocean.org.il, dsher@univ.haifa.ac.il

תקציר

מים מתוקים (freshwater, כגון אגמים, נחלים, מעיינות, מאגרי מים וקולחים, ביצות, שפכים ועוד) הם מרכיב חשוב בכל מערכת אקולוגית יבשתית. מקורות מים כאלה מספקים מי שתייה ומשמשים לחקלאות, תחבורה, נופש וקיט. כל מקורות המים מכילים אוכלוסיות של מיקרואורגניזמים (חיידקים, ארכאות וחד-תאיים אאוקריוטיים) שנמצאות בקשר הדוק עם סביבתן. אוכלוסיות אלה משפיעות במידה רבה על איכות המים שבתוכם הן חיות, ובה במידה מושפעות מאיכות המים. מיקרו-אצות וציאנובקטריה מהוות את הבסיס למארג המזון במים, וחיידקים הטרוטרופיים מפרקים חומר אורגני, כולל מולקולות מזיקות כגון שאריות תרופות, חומרי הדברה ומזהמים אחרים. בכך מיקרואורגניזמים אלה מספקים שירותים אקולוגיים קריטיים. יחד עם זאת, מיקרואורגניזמים יכולים גם להשפיע בצורה שלילית על האדם ועל הסביבה, לדוגמה על-ידי ייצור רעלנים. פרק זה מתאר כיצד ניתן, בשיטות גנטיות, לאפיין את האוכלוסיות המיקרוביאליות (ה"מיקרוביום") בסביבות אקווטיות (מימיות) שונות – לזהות אילו מיקרואורגניזמים חיים במים ומה היכולות שמקודדות בגנומים שלהם. ישראל מהווה "מעבדה טבעית" לחקר קהילות מיקרוביאליות במים מתוקים, בשל העושר באזורים אקלימיים והידע שנצבר בניהול מקווי מים מסוגים שונים. הפרק הנוכחי מציג ודן בתוצאות מחקר שאפיין את המיקרוביום של מגוון גופי מים מתוקים בישראל על פני זמן ומרחב.

מערכות אקולוגיות של מים מתוקים וחשיבותן לביוספרה ולאנושות

מערכות אקולוגיות של מים מתוקים כוללות בתי גידול מגוונים, חלקם טבעיים כגון אגמים, נהרות, מעיינות, ביצות ונחלים, וחלקם מעשה ידי אדם כגון מאגרי מים, קולחים ושפכים. גופי מים מתוקים קשורים באופן הדוק לסביבות היבשתיות המקיפות אותם, ומספקים לא רק מים לבעלי חיים ולצמחים אלא גם מזון, מחסה וטווח התפשטות למגוון רחב של אורגניזמים, ובכך מהווים מוקדי מגוון ביולוגי. למרות שבתי גידול של מים מתוקים מהווים פחות מאחוז אחד משטח פני כדור הארץ, הם תומכים בכמעט 10 אחוזים מכל המינים הידועים ובכמעט שליש ממיני החולייתנים[1,2]. בנוסף, הם ממלאים תפקיד מכריע בוויסות מחזור המים, בהפחתת שיטפונות ובצורות, ובשמירה על איכות המים דרך תהליכי סינון טבעיים[3]. בקנה-מידה גלובלי, לסביבות מים מתוקים השפעה משמעותית על מחזורים ביו-גיאו-כימיים של יסודות כגון פחמן, חנקן וזרחן[4,5].

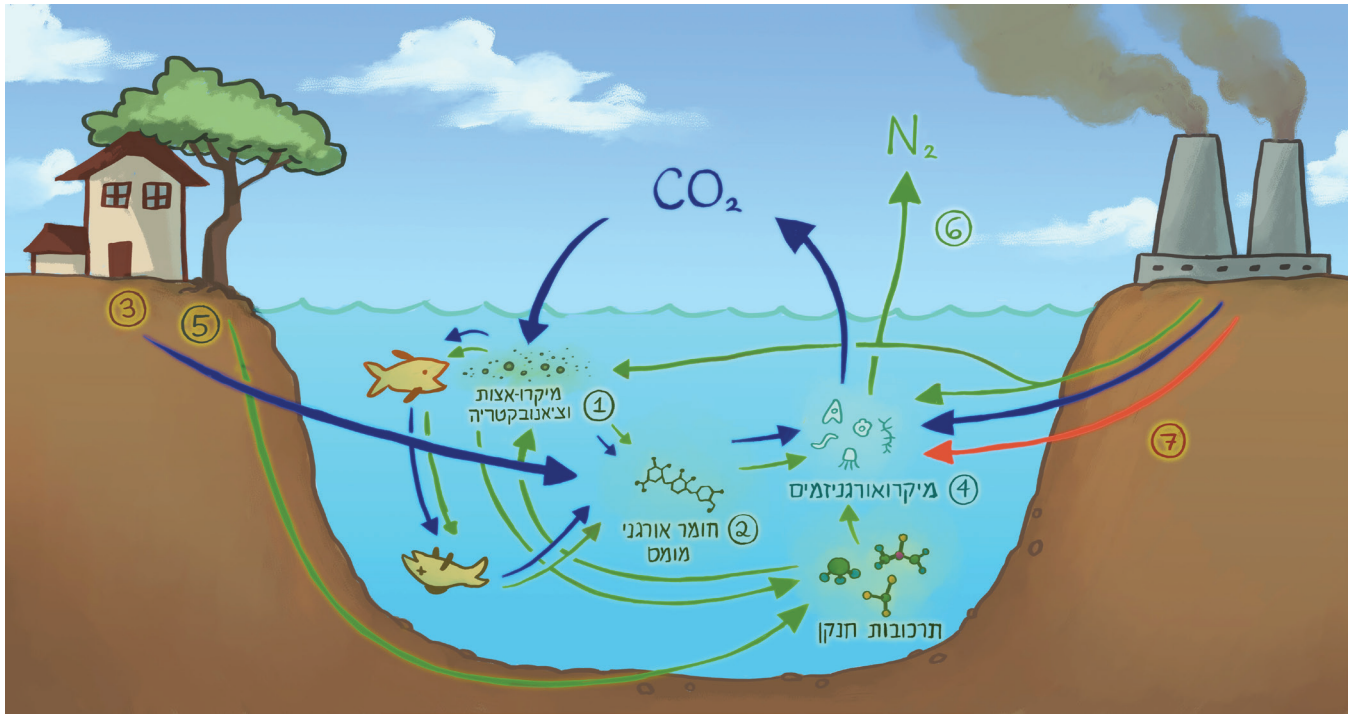
האנושות תלויה בגופי מים מתוקים כמקור למי שתייה. מים מתוקים נקיים ואיכותיים הם משאב נדיר ברחבי העולם, כאשר ליותר מ-780 מיליון אנשים (כ-11% מאוכלוסיית העולם) עדיין אין גישה מספקת למים מתוקים בטוחים (http//:www.unicef.org/wash). בנוסף, בשל הגידול באוכלוסיית העולם, הפיתוח העירוני והתעשייתי, ושינויי האקלים, המחסור במים מתוקים צפוי להחמיר. התלות במים מתוקים טבעיים ברורה במיוחד בסביבות צחיחות וצחיחות למחצה כגון המזרח התיכון, שבו יותר מ-85% מהמים המתוקים הזמינים משמשים לחקלאות, כל זאת בזמן שהאוכלוסייה גדלה במהירות והתחרות מצד המגזרים התעשייתי, הביתי והחקלאי על מים הולכת וגוברת. נגר חקלאי ופסולת אנושית עירונית ותעשייתית הם המקורות העיקריים לזיהום מים – חומרים מזינים (נוטריינטים ומזהמים אורגנים) מזהמים כימיים כמו שאריות שמנים ודלקים, אנטיביוטיקה ותרופות. ריבוי מקורות הזיהום מחייב אסטרטגיה קפדנית לניטור ולהגנה על מקורות מים לשימוש בר-קיימה.

קהילות מיקרוביאליות קשורות באופן הדוק לאיכות המים

כל מקורות המים הטבעיים מכילים אוכלוסיות מיקרוביאליות פעילות ותוצרי פעילותן קובעים במידה רבה את איכות המים (בפרק זה אנו משתמשים במילה "מיקרואורגניזם" או "אוכלוסייה מיקרוביאלית" לתאר יצורים מיקרוסקופיים פרוקריוטיים (חיידקים וארכאה) ויצורים חד-תאיים בעלי גרעין (אאוקריוטיים) כולל מיקרו-אצות. בדרך כלל, דגימות של מים טבעיים מכילות בין 10^6 ל-10^7 חיידקים למ"ל, רובם אאובקטריה, ובין 10^4 ל-10^6 מיקרו-אצות למ"ל, בנוסף לכמות רבה של וירוסים (10^6 ל-10^8 למ"ל), רובם בקטריופאזים (וירוסים שטורפים חיידקים)[6]. המגוון (מספר ומינים) של קהילות מיקרוביאליות אלו משתנה בזמן ובמרחב ומושפע במידה רבה מגורמים סביבתיים ביוטיים ואביוטיים (איכות המים, נוכחות מזהמים, מליחות טמפרטורה וכדומה)[7,8]. מיקרואורגניזמים מנצלים וממחזרים כמעט כל משאב אפשרי במים, ובכך משפיעים רבות על ריכוז החומר האורגני במים, על תרכובות חנקן וזרחן, על ריכוז החמצן המומס, על ערך ההגבה (pH) ועוד (איור 1). חומר אורגני מגיע לסביבות מים מתוקים ממקורות טבעיים שונים וממקורות מעשה ידי אדם: תוצרי פוטוסינתזה של אצות, פירוק של צמחים ובעלי חיים, נגר (מי גשמים שלא נספגים בקרקע) משטחים חקלאיים ועירוניים ושפכים מטופלים או גולמיים. מיקרואורגניזמים מפרקים את החומר האורגני, מנצלים את האנרגיה האצורה בו לגידול וממחזרים יסודות נוספים כמו חנקן וזרחן שיכולים לשמש מחדש צמחים ואצות. פסולת אנושית ותעשייתית מכילה תרכובות חנקן, כגון אמוניום, חנקות ואוראה, לעיתים קרובות בריכוזים גבוהים שיכולים להיות רעילים לאדם ולסביבה. האוכלוסיות המיקרוביאליות במקווי מים טבעיים כמו גם במתקני טיהור שפכים מנצלות תרכובות אלו לייצור ביומסה, ממחזרות אותן ומאפשרות לאורגניזמים אחרים לנצלן, ולעיתים משחררות לאטמוספרה גז חנקן (N_2 איור 1). פסולת חקלאית, עירונית ותעשייתית מכילה גם מגוון רחב של מולקולות שעלולות לגרום נזק לבעלי חיים ולסביבה כגון תרופות, חומרי הדברה והורמונים. מיקרואורגניזמים ממלאים תפקיד חשוב בפירוק חלק מהרעלים הפוטנציאליים הללו ובהפחתת השפעתם הסביבתית. לפיכך, קהילות מיקרוביאליות במים מתוקים מספקות שירותים אקולוגיים קריטיים.

עם זאת, למיקרואורגניזמים במים מתוקים עשויות להיות גם השפעות שליליות על הסביבה ועל בריאות האדם ובעלי החיים. המים עלולים לשמש כמאגר למיקרואורגניזמים פתוגניים שונים, ולהוות מקור לתחלואה. בנוסף, מינים שונים

של מיקרו-אצות וציאנובקטריה (חיידקים כחוליים) יכולים לייצר רעלנים ולהשפיע על איכות המים לצרכנים ועל יציבות המערכת האקולוגית[9,10]. הדוגמה הנחקרת ביותר היא "פריחת אצות מזיקות" (harmful algal blooms), בעיקר כאלה שנגרמות על-ידי ציאנובקטריה[11]. בתנאים מתאימים, מינים רבים של ציאנובקטריה יכולים לגדול בקצב מהיר וליצור "פריחות" מסיביות המהוות איום מרכזי על איכות המים ברחבי העולם, ומשפיעות על גופי מים רבים בעלי חשיבות אקולוגית וכלכלית. על היקף הבעיה בעולם ובארץ והמשמעויות הסביבתיות שלה, ניתן לקרוא בהרחבה במהדורה הקודמת של "הוד הים" ובספר זה[12,13].



איור 1. תהליכים נבחרים שבהם מיקרואורגניזמים משפיעים על איכות מים. תהליכים שקשורים למחזור הפחמן מסומנים כחיצים כחולים, וכאלה שקשורים למחזור החנקן כחיצים ירוקים, למרות שבמציאות רבות מהמולקולות שנמצאות במים מכילות גם פחמן וגם חנקן. מספר תהליכים עיקריים מסומנים במספרים: 1) מיקרו-אצות וציאנובקטריה מקבעות פחמן דו-חמצני בתהליך הפוטוסינתזה, ומהוות את הבסיס לחלק גדול ממארג המזון בגופי מים מתוקים. 2) חומר אורגני מומס משוחרר ממיקרו-אצות וכן מהאורגניזמים שאוכלים אותן (כגון זואופלנקטון ודגים). 3) חומר אורגני מומס מגיע למים גם ממקורות אנושיים, כגון ביוב וקולחים עירוניים, חקלאיים ותעשייתיים. 4) מיקרואורגניזמים (בעיקר חיידקים) מפרקים את החומר האורגני המומס וממחזרים אותו, לעיתים קרובות באמצעות נשימה שמשחררת פחמן דו-חמצני מומס למים ומהם לאטמוספרה. 5) סוג משמעותי במיוחד של זיהום ממקור אנושי הוא תרכובות חנקן המשמשות כדשן בחקלאות (כגון אמוניה, חנקות ואוריאה), ומגיעות לגופי מים דרך נגר (מי גשמים ששוטפים את הקרקע). 6) מיקרואורגניזמים במים מנצלים את תרכובות החנקן הללו לנשימה או ליצירת ביומסה חדשה, לעיתים תוך שחרור גז חנקן לאטמוספרה בתהליך הנקרא דה-ניטריפיקציה. 7) לבסוף, מיקרואורגניזמים מסוגלים לפרק מולקולות מזהמות רבות שמגיעות ממקורות כגון שפכים תעשייתיים, ולהשתמש בפחמן ובחנקן שמרכיבים אותן. כמובן שיש גם תהליכים שבהם מיקרואורגניזמים במים פוגעים באיכות המים, לדוגמה על-ידי יצירת רעלנים. תהליכים אלו אינם מיוצגים באיור. איור על-ידי ירדן בן טבו דה לאון.

במהלך העשורים האחרונים חלה עלייה משמעותית בתדירות ובעוצמת אירועי פריחות ציאנובקטריה מזיקות, ונצפו פריחות רעילות בגופי מים שבהם לא נרשמו בעבר אירועים כאלה[14]. כיום ברור שהתופעה קשורה לשינויים מקומיים-אזוריים, כולל השפעה ישירה של האדם (לדוגמה שימוש בחומרי דשן בחקלאות, נגר עירוני, פעולות ממשק וכדומה), או לתהליכים גלובליים כגון התחממות ושינויים הידרוגרפיים. עד כה, לא ידוע אם פריחות אלו שהופיעו לאחרונה התבססו על ציאנובקטריה שהיו תמיד חלק מאוכלוסיית המיקרואורגניזמים (ואולי פרחו בעבר אך לא דווחו), או שמא אורגניזמים אלו פלשו והתבססו לאחרונה בגוף המים המדובר (ואז הם מוגדרים כמינים פולשים). אם האפשרות השנייה נכונה, לא ברור אם המינים הפולשים הגיעו לגוף המים באופן טבעי – למשל, נישאו ברוח, בבעלי חיים או בציפורים[14,15], או הובאו על-ידי האדם, כגון באמצעות הכנסת דגים או מים לגוף המים[16].

כיצד חוקרים אוכלסיות מיקרוביאליות במים?

כדי להבין את הקשר בין איכות המים לבין המיקרואורגניזמים החיים בהם יש לענות על מספר שאלות: מה הרכב אוכלוסיות המיקרואורגניזמים במים והשונות במרחב ובזמן? כיצד מתפקדים האורגניזמים שבאוכלוסיות השונות בהינתן תנאים סביבתיים מסוימים (למשל, אילו תרכובות הוא מנצל), וכיצד הפעילות המשולבת של האוכלוסיות כולן משפיעה על איכות המים? בשל גודלם הזעיר, קשה מאוד לעקוב אחר חיידקים בודדים ולחקור אותם בדומה לדרך שבה אקולוג יכול לחקור חברה של צמחים או בעלי חיים. על מנת לקבל מידע על אוכלוסיות מיקרואורגניזמים והפעילויות שלהם, חוקרים בדרך כלל מתחילים במדידת פעילות כללית של האוכלוסייה והשפעתה על תנאים סביבתיים, לדוגמה על-ידי מדידת פוטוסינתזה ונשימה וכיצד הן משפיעות על ריכוזי פחמן (אורגני ואנאורגני) וחמצן מומסים. ניתן גם לספור מיקרואורגניזמים, תוך שימוש במיקרוסקופ או באמצעות מכשיר כגון ציטומטר זרימה (שבו הגודל והפלואורוסצנציה של תאים בודדים במדיום נוזלי נמדדים באמצעות קרן לייזר). טכניקות אלו, יחד עם חקר מיקרואורגניזמים ספציפיים שניתן לבודד ולגדל כתרבית במעבדה, מספקים את הבסיס להבנת השפעת המיקרואורגניזמים על איכות המים, אבל עדיין לא מאפשרים להבין את מבנה האוכלוסייה – אילו מיקרואורגניזמים נמצאים בדגימה ספציפית. על מנת להשיג מטרה זו חוקרים משתמשים היום במידע הגנטי שמקודד בגנום של כל אורגניזם.

המידע הגנטי הצפון בכל מיקרואורגניזם (הגנום שלו) הוא שונה ברמת המין הסוג והסדרה. אם נוכל "לקרוא" (לקבוע את רצף הנוקלאוטידים) של גן ספציפי שהרצף שלו שונה בין אורגניזמים שונים, כגון הגן שמקודד לתת היחידה הקטנה של הריבוזום –(16S ribosomal DNA (16S rDNA, נוכל לזהות אילו אורגניזמים נמצאים בדוגמה (איור 2). אם נקרא את כל החומר הגנטי שמקודד בגנומים של המיקרואורגניזמים בדוגמה נוכל גם לשער מה הם יכולים לבצע (לדוגמה, אילו ריאקציות אנזימטיות מקודדות בגנום שלהם). עד לפני כ-15 שנה אנליזה כזו הייתה יקרה מאוד, מכיוון שאוכלוסיות מיקרוביאליות יכולות להיות מורכבות מאוד (אלפי מיקרואורגניזמים שונים) ולכן צריך לקבוע את הרצף של עשרות אלפי או מיליוני מולקולות DNA. מהפכת ריצוף ה-DNA בשיטות של "ריצוף מהדור הבא" (next generation sequencing, לדוגמה בטכנולוגיית Illumina) איפשרה בפעם הראשונה לחקור את הקהילה

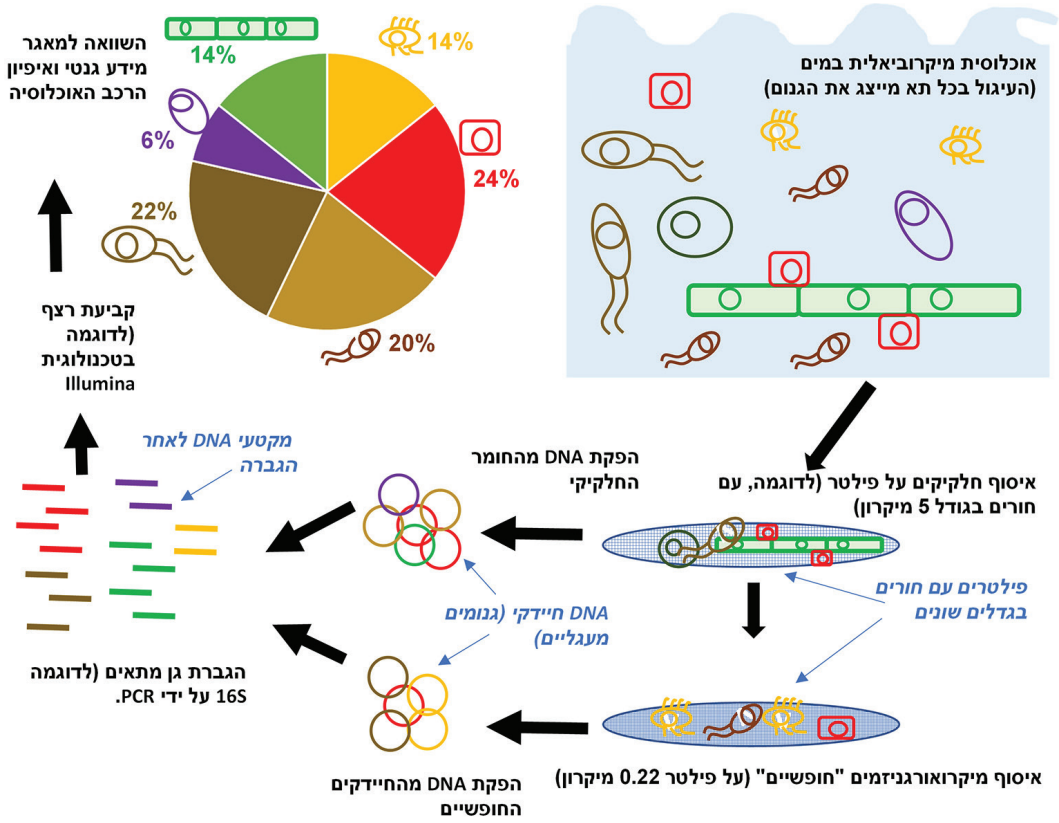
האקולוגית של מיקרואורגניזמים (מיקרוביום) של סביבות שונות, בעלות שכמעט כל מעבדה יכולה לעמוד בה, וכלים כאלה מהווים היום נדבך בסיסי גם בחקר בריאות האדם, בביוטכנולוגיה ובחקלאות, וכן במדעי הסביבה.

ניתוח מיקרוביום מתחיל באיסוף דגימה של קהילה מיקרוביאלית (קהילה מיקרוביאלית היא אוסף של אוכלוסיות). בחקר אוכלוסיות מיקרוביאליות במים מתחילים בד"כ בסינון מים באמצעות פילטרים – "מסננים" שלהם חורים בגודל ספציפי. לעיתים קרובות משתמשים במספר פילטרים שונים – לדוגמה, פילטר שלו חורים בגודל 5 מיקרון יכול ללכוד חלקיקים קטנים ואת החיידקים שצמודים לחלקיקים אלה, ואם מעבירים את הנוזל שעבר את הפילטר הזה דרך פילטר עם חורים קטנים יותר (לדוגמה, בקוטר 0.22 מיקרון) הוא ילכוד את החיידקים ה"חופשיים" – שאינם צמודים לשום מצע (איור 2). לאחר מכן מפיקים DNA מהפילטרים הללו, ואם המטרה היא לאפיין את מבנה האוכלוסייה באמצעות גן ספציפי אחד כגון 16S rDNA מגבירים את אותו הגן באמצעות תהליך שנקרא PCR (polymerase chain reaction - תגובת שרשרת פולימראזית). אח"כ קובעים את הרצף של הגן המוגבר. בדרך כלל, מקבלים לפחות 10,000 רצפים של גן זה מכל דגימה, ואז משתמשים בתוכנות מחשב שמשוות את הרצפים המתקבלים לבסיסי נתונים מתאימים כדי לקבוע, עבור כל רצף, מאיזה אורגניזם הוא הגיע ומה התפוצה היחסית של כל אחד מהאורגניזמים.

אפשרות אחרת היא לקבוע את רצף כל ה-DNA שנאסף, מתוך מטרה להבין מה היכולות שמקודדות בגנומים של כל האורגניזמים באוכלוסייה ("מטאגנום"). במקרה כזה לא מגבירים גן יחיד אלא שוברים את ה-DNA לחתיכות קטנות וקובעים את הרצף שלהן באופן אקראי. לאחר מכן מנסים לזהות, עבור כל רצף DNA מאיזה אורגניזם הוא הגיע, ולאיזה גן הוא מקודד (לדוגמה, אם הוא אנזים, תעלת יונים, רצפטור וכו'). ריצוף "מטאגנומי" כזה יקר יותר ומסובך יותר להבנה מאשר אנליזה של גן בודד, אך הוא מספק מידע רב על מה שהאוכלוסייה "יכולה לעשות". ניתן לשלב טכניקות אלו עם ריצוף RNA או חלבונים מאותה דגימה (מטא-טרנסקריפטומים או מטא-פרוטאומים), דבר המאפשר לזהות לא רק מה הקהילה "יכולה לעשות", אלא גם מה היא "עושה" במועד איסוף הדגימה (אילו גנים שועתקו ל- RNA ואילו תורגמו לחלבונים).

ישראל - מעבדה טבעית לחקר קהילות מיקרוביאליות במים מתוקים

הטכניקות הגנטיות שתוארו למעלה משמשות כיום בעיקר למחקר בסיסי – להבנת מיקרואורגניזמים ימיים בסביבותיהם הטבעיות. יחד עם זאת, מחקרים כאלה יכולים לזהות אורגניזמים, גנים או חלבונים מרכזיים שניתן להשתמש בהם בעתיד כ"סמנים ביולוגיים" ("ביו-מרקרים" – biomarkers) במערכות ניטור מולקולריות לאיכות המים. מחקרים כאלו מבוצעים ברחבי העולם, במיוחד באירופה ובצפון אמריקה, שיש בהם מגוון רחב של גופי מים (אגמים ונחלים) ושבהם קיימת תשתית מדעית נרחבת לניטור אותם גופי מים[17,18]. יחד עם זאת, לישראל ידע מקצועי מתקדם בניהול משק מים, ובמיוחד בניצול חוזר של מי קולחין, ופוטנציאל ייחודי לקדם את תחום איכות המים בעולם. ישראל, למרות גודלה הגיאוגרפי הקטן, עשירה באזורים אקלימיים וגיאוגרפיים שונים: מאקלים ים תיכוני (חורפים קרירים וגשומים – עד 600 מ"מ משקעים בשנה – וקיצים חמים ויבשים) ועד לאקלים מדברי (עם ממוצע שנתי של פחות מ-25 מ"מ משקעים בשנה), מאזורים עירוניים צפופים ועד דלילי אוכלוסייה, ומאזורים תעשייתיים ועד

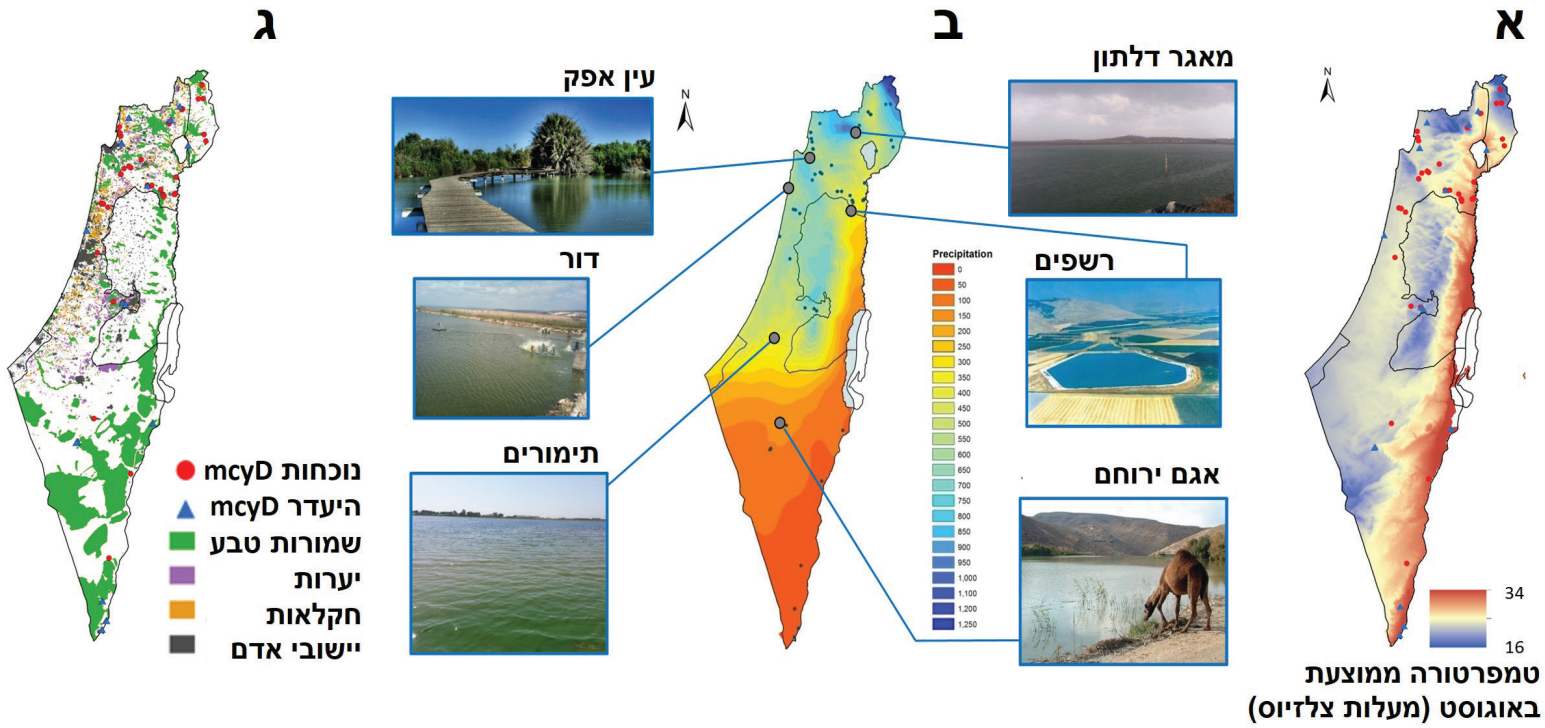


איור 2. שלבים באיפיון אוכלוסייה מיקרוביאלית בדוגמת מים באמצעות קביעת הרצף של "גן סמן" כגון תת-היחידה הקטנה של הריבוזום – 16S ribosomal DNA.

לאזורים חקלאיים או טבעיים. בתוך פסיפס זה של תנאי סביבה מקומיים ואזוריים, נמצאים מקורות מים קטנים רבים, כגון מעיינות, מאגרי השקיה ומתקני חקלאות ימית (איור 3). רוב מקורות המים בארץ מבודדים יחסית, כלומר אינם מחוברים ישירות זה לזה (למשל דרך תעלות או נחלים). תנאים דומים קיימים באזורים ים תיכוניים ובאזורים צחיחים למחצה רבים. גודלה הקטן של המדינה, השינויים הגדולים בתנאי הסביבה, והידע המדעי שנצבר לאורך כמה עשורים בניהול מים מתוקים ושפכים, מספקים מעבדה טבעית ייחודית לניתוח הגורמים הסביבתיים המשפיעים על איכות המים המתוקים, וכיצד אלו קשורים ומשפיעים על הקהילות המיקרוביאליות המימיות.

על מנת לבנות מסד נתונים שיתמוך בחקר המיקרוביום של מים מתוקים בישראל, מספר חוקרים מאוניברסיטאות ומכוני מחקר שונים בארץ התאגדו על מנת לאסוף נתונים ממספר אתרים המייצגים סוגים שונים של גופי מים (כותבי המאמר וכן פרופ' דרור מינץ ופרופ' אדי ציטרין ממכון וולקני, פרופ' שמואל כרמלי מאוניברסיטת ת"א ופרופ' רותי הירשברג מהטכניון). גופי המים הללו כללו שמורות טבע, מתקני חקלאות ימית, מאגרי השקיה ובריכות טיפול בשפכים

– שכל אחד מהם מאופיין באיכות מים שונה[19] (איור 3). במחקר התמקדנו בשני אתרים לניתוח מעמיק יותר של מבנה המיקרוביום ויחסי הגומלין בין האוכלוסיות: 1) הכנרת, גוף המים המתוקים הגדול בישראל, שנחקר במשך עשרות שנים בשל חשיבותו האקולוגית, הכלכלית והחברתית[20]. 2) מתקן חקלאות ימית בתחנת המחקר של משרד החקלאות בדור, המייצג מערכת אקולוגית המושפעת במידה רבה מפעילות אנושית[21,22]. ברוב האתרים הללו קיימת היסטוריה של פריחות רעילות של ציאנובקטריה[23–26]. באמצעות מידע זה ניסינו לענות על השאלות הבאות: (1) כיצד משתנות אוכלוסיות מיקרוביאליות במרחב (בין האתרים) ובזמן (על פני עונות שונות, או במהלך פריחת ציאנובקטריה)? (2) האם פרמטרים של איכות מים, כולל נוכחות אצות מזיקות, משפיעים על מבנה קהילת החיידקים? (3) האם ישנם ביו-מרקרים מיקרוביאליים ספציפיים המאפיינים מים מאיכויות שונות?



איור 3. גופי המים שנדגמו על מנת להבין את המיקרוביום של מים מתוקים בארץ, על רקע חלק מהתנאים הסביבתיים ומאפייני שימושי קרקע שיכולים להשפיע עליהם. המפות מציגות: א. את הטמפרטורה הממוצעת בשעות היום באוגוסט. ב. ממוצע המשקעים השנתי. ג. סוגי שימושי הקרקע. ג. הנקודות האדומות והכחולות מייצגות 58 גופי מים שנדגמו על-ידי מרמן ושותפיה[26] כדי לזהות באמצעות שיטות גנטיות נוכחות של גנים שמקודדים לרעלנים של ציאנובקטריה (מיקרוציסטינים). העיגולים האפורים הגדולים מייצגים שישה גופי מים המייצגים שמורות טבע, מתקני חקלאות ימית, מאגרי השקיה ובריכות טיפול בשפכים, שנדגמו כחלק מפרויקט "המיקרוביום של מים מתוקים בישראל". האיורים מבוססים על מאמר[26]. mcyD – גן המקודד למרכיב ספציפי בסינתזה של מיקרוציסטינים.

מהם הגורמים המשפיעים על אוכלוסיות מיקרוביאליות במים מתוקים ברחבי ישראל?

כדי לקבל "מבט על" שמתאר את האוכלוסיות במקווי המים השונים ואיך אוכלוסיות אלה משתנות עם עונות השנה, דגמנו שישה אתרים במהלך חורף, אביב, קיץ וסתיו של 2015 (איור 3, טבלה 1). אתרים אלו מייצגים סוגים ספציפיים של גופי מים (למשל שמורות טבע, מאגרי מים לשקיה, מערכת חקלאות ימית, ומאגרים לטיפול בשפכים/קולחים), ונבדלים גם ברמה הטרופית שלהם, שהיא אחד המדדים לאיכות מים – באיזו מידה יש בהם ריכוזים גבוהים של חומר אורגני, חומרים מזינים וביומסה של אצות (טבלה 1). ששת אתרי הדגימה ממחישים שמערכות אקולוגיות של מים מתוקים אינן ניתנות לחלוקה פשוטה על-פי קריטריון בודד: רבים מגופי המים ניזונים ממקורות מים שונים, ומימיהם משמשים את האדם למספר מטרות שונות. לדוגמה, אגם דלתון הוא מאגר השקיה שמקבל את מימיו ממקורות מגוונים, כולל מי גשמים ושפכים מהיישובים הסמוכים שעברו טיהור חלקי. איכות המים באגם דלתון משתנה משמעותית לאורך השנה, ככל הנראה כתוצאה מהכמות היחסית של מים המגיעה ממקורות שונים, ומחקרים קודמים תיעדו פריחות אצות רעילות משמעותיות[27]. בנוסף, משיחות עם מנהלי האתר מטעם חברת מקורות עלה כי פריחות משמעותיות של אצות גורמות גם לסתימה של מערכות ההשקיה שבהן משתמשים כדי להוביל את מימי המאגר למטעי הגליל העליון. באופן דומה, המאגר הגדול ברשפים, שמוזן בעיקר ממעיינות, משמש הן לחקלאות מים (גידול דגים) והן להשקיה, וכתוצאה מכך מפלסי המים משתנים – בסוף הקיץ המאגר כמעט יבש. לבסוף, עין אפק היא אומנם שמורת טבע יפה ובה בריכות וביצות, אולם מפלס המים שלה מנוהל באופן אינטנסיבי על-ידי רשות הטבע והגנים. שימוש אינטנסיבי במעיינות הטבעיים שמזינים את השמורה גורם בעונות מסוימות לירידה במפלס המים, ורשות הטבע והגנים מפצה על כך באמצעות הזרמת מי בארות המתקבלים מרשת המים הארצית.

הניתוח של הקהילות המיקרוביאליות בששת גופי המים הראה שכל גוף מים שונה במידה מסוימת, וגם קיימים הבדלים עונתיים בין החודשים החמים והקרים. נמצאו גם הבדלים בין סוגי גופי המים השונים, כאשר בריכות טיהור השפכים בתימורים היו שונות בבירור מכל סוגי המים האחרים. הפרמטר הסביבתי שנראה שהשפיע באופן העקבי ביותר על מבנה הקהילה המיקרוביאלית היה ריכוז הפוספט (PO_4^-) , שמהווה מקור מרכזי לזרחן עבור חיידקים ואצות ומהווה גם מרכיב מרכזי בדשן לחקלאות. באופן מפתיע, ההבדל בין חיידקים חופשיים לבין חיידקים הקשורים לחלקיקים היה קטן מהמצופה, בניגוד לתוצאות שהתקבלו מהכנרת (ראו להלן).

טבלה 1. אתרי הדגימה למיקרוביום של מים מתוקים בארץ, מסודרים מהצפון לדרום.

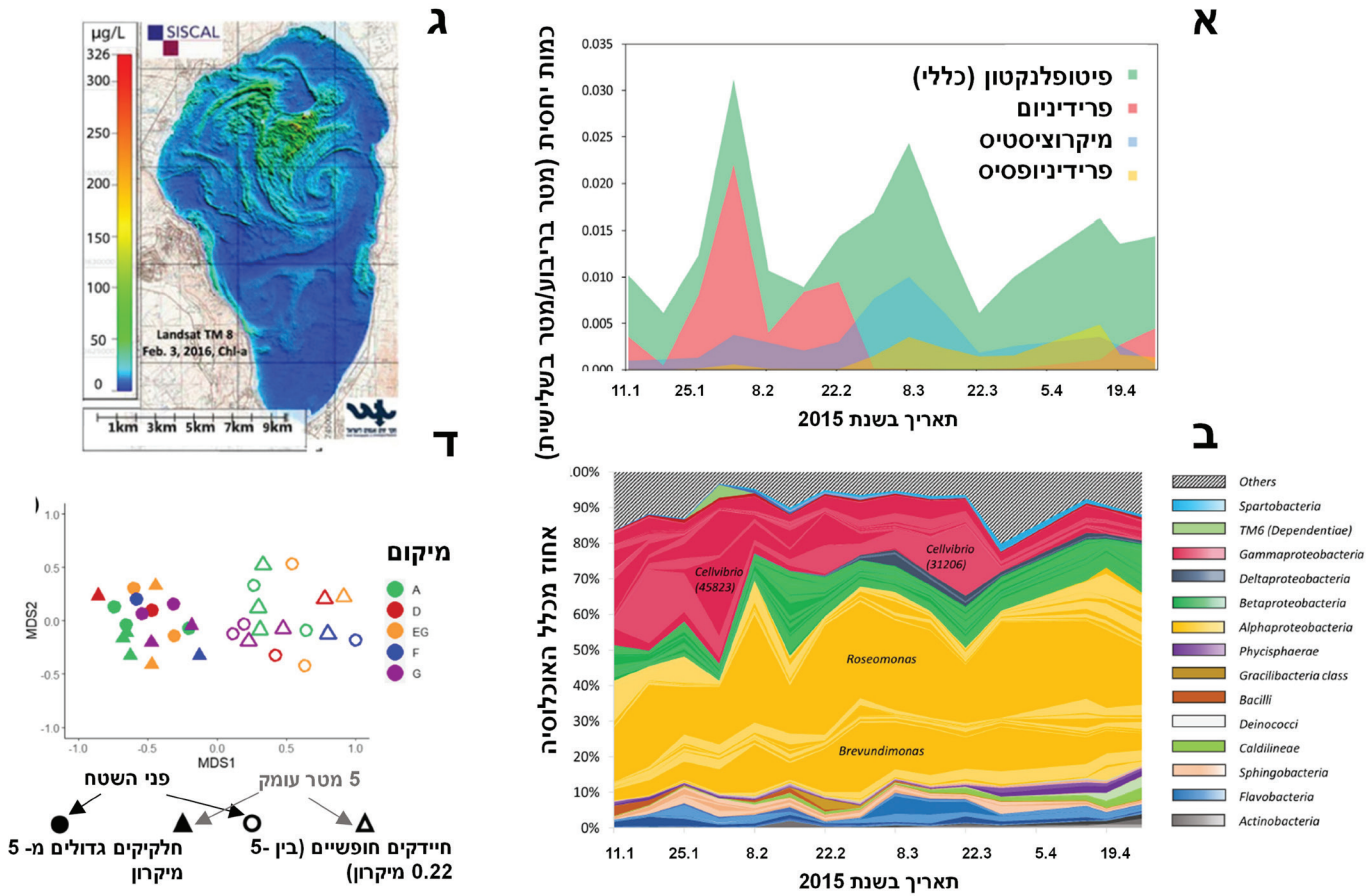
מיקום	קואורדינטות	סוג השימוש העיקרי במים	מקורות המים העיקריים	רמה טרופית*	ריכוז כלורופיל (מיליגרם לליטר)
דלתון	33.013770 N 35.459780 E	השקיה	מי גשמים, מעיינות מליחים, מי שופכין אחרי טיהור חלקי	היפר-אאוטרופי	62 - 508
עין אפק	32.852979 N 35.112041 E	שמורת טבע	מעיינות טבעיים, בארות	אוליגוטרופי	0.1-9.1
רשפים	32.488516 N 35.482737 E	השקיה, חקלאות מים (מדגה)	מעיינות	מזוטרופי	4.4-126
דור (3 בריכות)	32.606414 N 34.929266 E	חקלאות מים – תחנת מחקר	מי גשמים, באר	מזוטרופי-סופראאוטרופי (בהתאם לבריכה ולעונה)	9.5-929
תימורים	31.715260 N 34.771648 E	טיפול בשפכים, השקיה	שפכים	היפר-אאוטרופי	0.5-1,013
אגם ירוחם	30.988393 N 34.896356 E	מאגר מדברי	מי גשמים (שיטפונות), מי שופכין מטוהרים	אאוטרופי	27-98

* הרמה הטרופית של גופי מים מתייחסת לסיווגם על-פי כמות הנוטריינטים המומסים במים, המשפיעים על כמות האצות והיצורים החיים במים. רמות טרופיות נעות מאוליגוטרופי (דל בנוטריינטים) ועד להיפרטרופי (עשיר מאוד בנוטריינטים).

פריחות פיטופלנקטון בכנרת וכיצד הן משפיעות על אוכלוסיות מיקרוביאליות

הכנרת היא אגם המים המתוקים היחיד בישראל, ושימשה במשך שנים רבות מקור המים המרכזי של המדינה. כדי לשמר מקור מים זה הכנרת נחקרה בהרחבה במשך למעלה מ-50 שנה, בעיקר על-ידי המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון, ששייכת למכון לחקר ימים ואגמים לישראל[20]. מחקר ארוך טווח זה מאפשר נקודת מבט ייחודית המאפשרת לזהות תהליכים אקולוגיים שהכנרת עברה על פני עשורים רבים, וכן לנסות להבין את הקשר בין תהליכים אלה ובין השינויים באופן ניהול משק המים בישראל. השינוי האקולוגי הכי דרמטי שהכנרת עברה בחצי המאה האחרונה היה ככל הנראה היעלמות פריחות האביב של המיקרו-אצה *Peridinium* (סוג של דינו-פלגלט, dinoflagellate), שהיווה את הבסיס למארג המזון באגם. עד אמצע שנות ה-90 פרחה אוכלוסייה זו בכל אביב, אולם החל מ-1994 עוצמתה פחתה ובשנים מסוימות היא נעלמה לחלוטין. במקומה הופיעו פריחות של ציאנובקטריה רעילות מהסוג *Microcystis* מיקרוציסטיס, שמתרחשות בד"כ בחודשים פברואר-אפריל, בעקבות תקופה של מעט רוחות והתחממות יומית באמצע החורף. מינים רעילים אחרים כמו *Aphanizomenon ovalisporum (Chrysosporum)* מתפתחים גם הם בכנרת ועשויים לייצר פריחות רעילות לקראת סוף הקיץ[28]. בשל חשיבות הכנרת כמקור מים אסטרטגי, ובגלל שהמים זורמים לירדן כחלק מהסכם השלום מ-1994, ניסו מחקרים רבים להבין את הגורמים השולטים באוכלוסיות הציאנובקטריה הרעילות [29]. מחקרים אלו הראו כי אוכלוסיית מיקרוציסטיס מורכבת לפחות מ-25 גנוטיפים, שרק חלקם רעילים.

חוקרים נוטים להגדיר פריחות של אצות על-ידי האורגניזם הנפוץ ביותר בפריחה, בעוד שלעיתים קרובות פריחות אלה מורכבות ממספר אורגניזמים שונים, שיכולים להופיע בזה אחר זה בתהליך הנקרא סוקסציה (succession). ציאנובקטריה מסוימות, כמו מיקרוציסטיס, יכולות לשלוט בצפיפות המאסה שלהן (על-ידי יצירת בועיות גז) ולצוף על פני המים. ציפה כזו יכולה לגרום להופעת שכבות ירוקות או חומות על פני השטח, שמושפעות מהרוח ומזרמי המים, ועשויות לגרום לכך שהפריחה לא תהיה אחידה במרחב. השינויים באוכלוסיית הפיטופלנקטון בזמן ובמרחב עשויים לגרום לשינויים בשאר המיקרוביום, שתלוי באורגניזמים הפוטוסינתטיים כמקור לפחמן אורגני, ואילו השינויים במיקרוביום עשויים בעצמם להשפיע על אוכלוסיית האצות. לדוגמה, מספר מחקרים הראו שחיידקים מסוימים עשויים לעודד ספציפית גדילה של אצות רעילות, בעוד שחיידקים אחרים, בעיקר גמא פרוטאובקטריה, עשויים לעכב את צמיחת אותן אצות או לפרק את הרעלים שלהם[30]. על מנת לראות אם תהליכים אלה מתרחשים גם בכנרת, עקבנו אחרי מבנה המיקרוביום בשני חורפים – 2015 ו- 2016 (איור 4). החורף הראשון התאפיין בפריחה יחסית חלשה של מיקרוציסטיס, מלווה בפריחות של אצות אחרות (איור 4א), ואילו החורף השני אופיין בפריחה מסיבית שהתפשטה על פני האגם בצורה לא הומוגנית (איור 4ג).



איור 4. שינויים באוכלוסיות מיקרוביאליות בכנרת בזמן ובמרחב, כתלות באוכלוסיות המיקרו-אצות. שינויים באוכלוסיית א. האצות וב. החיידקים במהלך חורף 2015. ג. תמונת לוויין של הפריחה המסיבית של מיקרוציסטיס בכנרת בחורף 2016. ד. גרף אורדינציה של מבנה האוכלוסייה המיקרוביאלית במהלך הפריחה של שנת 2016. בגרף זה, המרחק בין כל שתי נקודות מייצג את הדמיון במבנה האוכלוסייה (נקודות קרובות יותר = אוכלוסיות דומות יותר). הגרף יוצר באמצעות שיטה סטטיסטית שנקראת NMDS. ניתן לראות שתי קבוצות עיקריות – אוכלוסיות שחיות על פני חלקיקים גדלים מ-5 מיקרון, ואוכלוסיות קטנות יותר (בין 5-0.22 מיקרון). ישנם גם הבדלים על-פי אתר הדגימה ועומק המים, אולם אלה פחות בולטים. איורים א ו-ב נלקחו ממאמר[31] ואיורים ג ו-ד מתוך מאמר[32].

מצאנו כי תקופת החורף-אביב היא זמן דינמי מאוד בחיי האגם, שבו הטמפרטורה, ה-pH וריכוזי החמצן והחומרים המזינים משתנים בצורה דרמטית[31]. השינויים בתנאי הסביבה היו קשורים לשינויים משמעותיים באוכלוסיית הפיטופלנקטון, כאשר פריחות קטנות יחסית של *Peridinium, Microcystis* ו-*Peridiniopsis* התרחשו זו אחר זו (איור 4א). עם זאת, בניגוד לציפיותינו, הקהילה המיקרוביאלית שנמצאה על חלקיקים גדולים מ-20 מיקרון השתנתה בצורה הדרגתית יותר מאשר קהילת הפיטופלנקטון, והושפעה יותר מתנאי הסביבה (pH וריכוז אמוניה) מאשר מסוג הפיטופלנקטון הנוכח (איור 4ב). ייתכן כי הדבר מרמז שהחיידקים הקשורים לחלקיקים מושפעים יותר מתנאי הסביבה

הסובבים אותם מאשר מסוג החלקיק שעליו הם גדלים. לחלופין, ייתכן כי קיימים סוגי חלקיקים שלא מדדנו, כמו זואופלנקטון מסוים, אבק או אבקת צמחים (לדוגמה זיתים), והם אלו שהיו הגורמים המשפיעים בפועל על אוכלוסיות החיידקים. עם זאת, זיהינו מספר קבוצות חיידקים שהיו קשורות לפיטופלנקטון מסוים, כולל *Bdellovibrio*, שהיא קבוצה מעניינת של חיידקים שטורפים חיידקים אחרים.

תוצאות דומות התקבלו כאשר ניתחנו דגימות שנאספו מאזורים שונים במהלך אירוע מסיבי של פריחת מיקרוציסטיס בכנרת, שניתן היה לראות בתור "מערבל" בצילומי לוויין (איור 4ג)[32]. כאן, החיידקים הקשורים לחלקיקים והחיידקים החיים חופשי היו שונים בבירור (איור 4ד) אך שתי האוכלוסיות השתנו עם המיקום הגיאוגרפי ועם עומק הדגימה, אך לא עם הביומסה של מיקרוציסטיס (במחקר זה לא היו לנו מדידות של ריכוזי חומרים מזינים, ולכן לא יכולנו לבדוק אם בדומה למחקר הקודם מבנה המיקרוביום היה קשור לתנאים סביבתיים אלה). שני המחקרים הללו מצביעים על כך שבעוד שאוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת משפיעות על החיידקים שסביבן, ייתכן כי השפעת תנאי סביבה אחרים גדולה יותר.

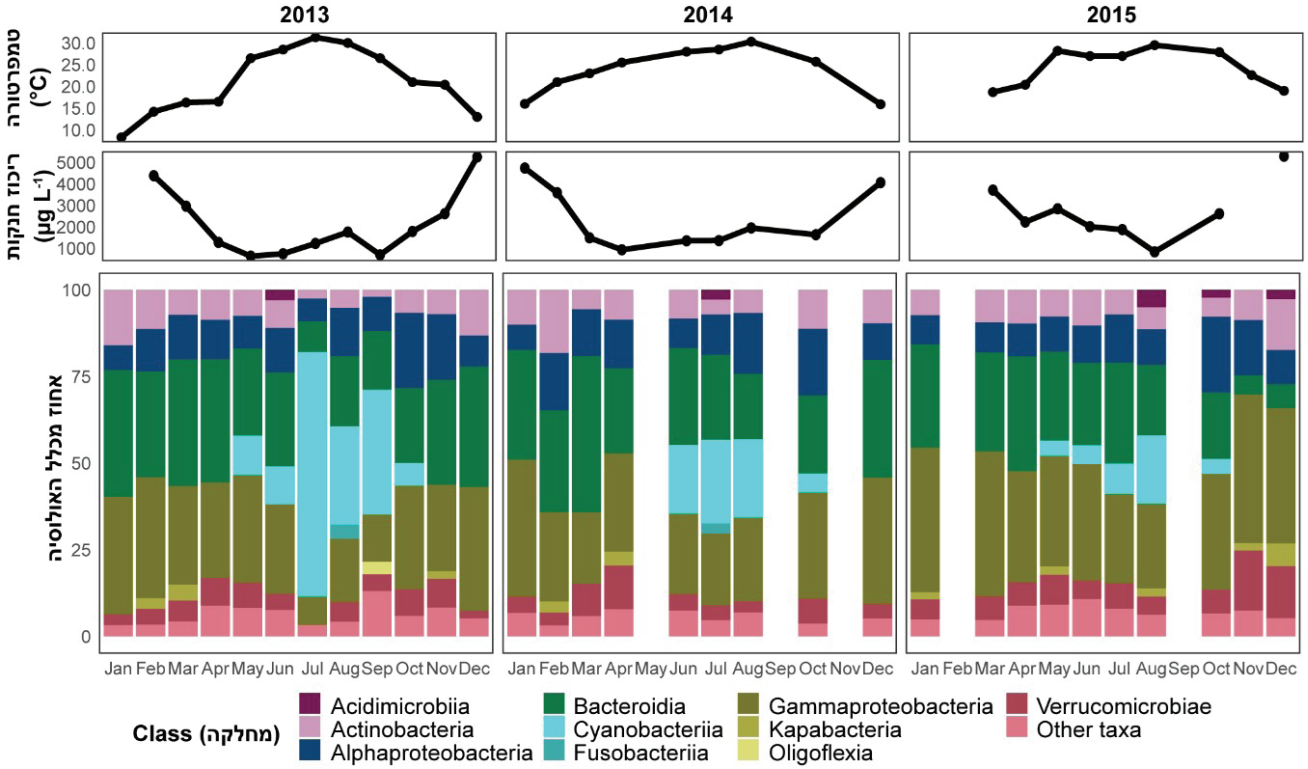
מתקני חקלאות ימית - דוגמאות למערכות אקולוגיות של מים מתוקים המושפעות במידה רבה מפעילות אנושית

מתקני חקלאות מים, כגון בריכות דגים, מהווים דוגמה למערכת אקולוגית מימית המושפעת באופן קיצוני מפעילות אנושית. שיטות חקלאות אינטנסיביות, הנחוצות כדי לעמוד בביקוש לחלבון בעקבות הגידול באוכלוסייה העולמית, מתבססות על גידול כמויות גדולות (ביומסה גבוהה) של דגים או אורגניזמים מימיים אחרים בשטח מוגבל. להשגת יעד זה נעשה שימוש במזון רב, שחלקו לא נצרך על-ידי הדגים ושוקע לקרקעית הבריכה. יחד עם הפרשות הדגים ושאריות המזון נוצר מצב שבו יש ריכוזים גבוהים של חומר אורגני חלקיקי ומומס, אוכלוסיות גבוהות של חיידקים ומיקרו-אצות, היפר-אאוטרופיקציה, ולעיתים תנודות גבוהות בריכוזי חמצן (ריכוז גבוה מאוד ביום – כאשר אצות מבצעות פוטוסינתזה הגבוהה מנשימת האצות ושאר המיקרואורגניזם והחיים בכלל – ולחוסר חמצן בלילה כאשר הן האצות והן שאר המרכיבים הביולוגיים מבצעים נשימה). כמו כן, לעיתים מגדלי הדגים משתמשים באנטיביוטיקה או בחומרים כימיים קוטלי אצות כדי לשמור על בריאות הדגים. יחד עם זאת, בריכות חקלאות מים קשורות לסביבה המקיפה אותן ועשויות להשתנות עונתית בעקבות שינויים בטמפרטורה או במים המוזרמים אליהם (לדוגמה, מי גשמים, מי נגר או מי באר). על מנת להבין באיזו מידה גורמים אנושיים וטבעיים משפיעים על הקהילות המיקרוביאליות במערכות של חקלאות מים בחרנו לעבוד בתחנה לחקר המדגה של משרד החקלאות וביטחון המזון, ליד מושב דור.

תחנת המחקר בדור היא בעיקרה מתקן מחקר, שבו נחקרים היבטים שונים של חקלאות ימית – למשל, תוכניות רבייה מבוססות גנטיקה, שיפור בריאות הדגים על-ידי בדיקת שיטות חיסון חדשות ופיתוח שיטות גידול דגים אינטנסיביות בריאות יותר ואקולוגיות יותר[33]. בנוסף, תחנת המחקר היא גם מתקן גידול חצי-מסחרי, שבו מגדלים קרפיון מצוי *Cyprinus carpio* וכסיף שפל עין (Silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*), המשמשים בין היתר לאכלוס מחדש של הכנרת בכל שנה. בדור ישנן בריכות רבות בגדלים שונים, אך בחרנו להתמקד בשתי בריכות המשמשות לגידול חצי-מסחרי, כלומר הן מאוכלסות בדגיגים (דגים צעירים שבקעו במקום אחר), שגדלים במשך

כמה חודשים עד שהם גדולים מספיק למכירה. שתי הבריכות מחוברות למאגר תפעולי, המשמש לוויסות מפלסי המים והטמפרטורה בבריכות הדגים, דרך מערכת של תעלות[21]. עקבנו אחר הקהילות המיקרוביאליות בתחנת המחקר בדור במשך שלוש שנים, תוך ביצוע דיגום חודשי. השערת העבודה שלנו הייתה שתהליכי החקלאות הימית ישפיעו בצורה משמעותית על המיקרוביום, למשל בעקבות הזנת יתר ככל שהדגים גדלים. עם זאת, התוצאות שלנו הראו בבירור כי דפוסים עונתיים היו הגורמים המשפיעים ביותר על מבנה הקהילה, אפילו בבריכות הגידול (שבהן הדגים מקבלים כמויות אוכל גדולות). בבריכות נמצאו אוכלוסיות שונות מאוד בין הקיץ לחורף (איור 5). ההבדלים הללו נגרמו ככל הנראה הן על-ידי הטמפרטורה והן על-ידי כניסת חומרים מזינים מהשדות וממטעי הבננות הסמוכים דרך נגר מי גשמים, מה שממחיש את הקשר בין בריכות הדגים לסביבה שלהן. במהלך הקיץ, זיהינו פריחות של ציאנובקטריה רעילות, כפי שנמצא גם בבריכות דגים ברחבי העולם[19], מה שמצביע על הצורך במחקרים נוספים להערכת השפעת החשיפה לרעלים אלו על העובדים בתחום החקלאות הימית.

הבדלים מסוימים נמצאו גם בין הבריכות, שעשויים להיות קשורים לסוג הדגים, לצפיפותם או להיבטים אחרים של חקלאות ימית. לדוגמה, לעיתים נעשה שימוש באנטיביוטיקה במהלך גידול הדגים, ומצאנו עדויות לעלייה בריכוז גנים לעמידות לאנטיביוטיקה בבריכה שבה נעשה שימוש באנטיביוטיקה[22]. תגלית זו התאפשרה הודות לשילוב של אנליזות של גנים מוכרים לעמידות לאנטיביוטיקה עם אנליזה מטא-גנומית, כפי שתוארה לעיל. גנים לעמידות לאנטיביוטיקה יכולים לעבור בין חיידקים באמצעות החלפת אלמנטים גנטיים ניידים כמו פלסמידים. באופן תיאורטי, החלפה כזו יכולה להתרחש גם בין החיידקים במתקני החקלאות הימית לבין פתוגנים אנושיים, מה שעלול להפוך את הפתוגנים לעמידים לטיפול אנטיביוטי. תוצאות אלו מצביעות על הצורך לנטר בקפידה את השימוש באנטיביוטיקה בחקלאות ימית (ובחקלאות בכלל).



איור 5. שינויים בתנאי הסביבה (טמפרטורה וריכוז חנקות מומסות) ובאוכלוסיות המיקרוביאליות בתחנת המחקר למדגה בדור על פני שלוש שנים. בתחנת המחקר עקבנו אחרי 3 בריכות, אולם כאן אנחנו מראים רק את השינויים העונתיים במאגר המים הגדול, מכיוון ששם יש דוגמאות כמעט רציפות (בבריכות האחרות היו תקופות שבהן הבריכה הייתה יבשה). ניתן לראות פריחות של ציאנובקטריה במהלך הקיץ בכל שנה. האיור נלקח מתוך מאמר [21].

מגבלות המחקרים ומבט לעתיד

פרק זה עסק בניסיון להבין את הקשר בין אוכלוסיות מיקרוביאליות במקווי מים מתוקים לבין איכות המים. התמקדנו במגוון גופי מים בישראל, מהאגם הגדול ביותר ועד לבריכות דגים קטנות יחסית, תוך שימוש בטכנולוגיות ובגישות ניסיוניות שונות, ובמיוחד בשיטות גנטיות וגנומיות. למחקרים הללו יש מספר מגבלות משמעותיות. ראשית, רוב הנתונים שהוצגו התבססו על אנליזה של גן יחיד – 16S – שמאפשר להבין "מי נמצא שם", אך לא "מה הם יכולים לעשות". כדי להתחיל לענות על שאלה זו, אספנו גם כמות גדולה של נתוני מטאגנום, אשר זמינים לכלל הקהילה המדעית[19]. שנית, בכל המחקרים המוצגים (וברוב המחקרים שמנסים לקשר בין איכות מים לבין אוכלוסיות מיקרוביאליות), התנאים הסביבתיים שנמדדו (למשל טמפרטורה, חומרים מזינים) הצליחו להסביר רק חלק קטן

מהשונות באוכלוסיות המיקרוביאליות. הדבר מצביע על כך שייתכנו גורמים סביבתיים אחרים, אולי חשובים יותר, שעלינו למדוד, כמו ריכוזים של חומר אורגני מומס (או מולקולות ספציפיות), סוגים ושכיחויות של טורפים (לדוגמה ריסניות או אורגניזמים חד-תאיים אחרים שטורפים חיידקים), ובקטריופאג'ים (וירוסים שטורפים חיידקים). לבסוף, במחקר שלנו שהוצג אספנו דגימות רק לאורך תקופה קצרה יחסית, ו(למעט המחקר בדור) הדבר אינו מאפשר לנו לזהות שינויים שמתרחשים בקנה-מידה ארוך יותר, למשל כתוצאה משינויי אקלים גלובליים.

חשוב לציין שהמחקר המדווח כאן התרכז במערכות מים יבשתיות ולא בחן גופי מים רבים אחרים בישראל שלהם חשיבות מנקודות מבט אקולוגיות, כלכליות וחברתיות: 1) בארץ קיימים מאות גופי מים קטנים (לדוגמה מעיינות ובריכות עונתיות), המספקים מקורות מים לבעלי חיים (כולל לעיתים בעלי חיים מבויתים) וגם משמשים לפעילויות נופש. מחקר קודם הראה כי גופי מים אלו עלולים להכיל ציאנובקטריה מזיקות, וכי הסבירות לזיהוי אוכלוסיות כאלה תלויה בתנאי הסביבה אך גם בשימושי הקרקע סביב גוף המים. עם זאת, מעט ידוע על הדינמיקה של אוכלוסיות המיקרואורגניזמים בהם[26]. 2) בישראל אין נהרות גדולים, אולם במישור החוף ישנם מספר נחלים קטנים. נחלים אלה מושפעים מזיהום לפחות בחלק מהשנה, לדוגמה מנגר חקלאי או מפסולת של המסיק (מי עקר) שמקורה מהרשות הפלסטינאית. צוות מחקר מבית הספר למדעי הים במכמורת (מכללת רופין) חוקר את נחל אלכסנדר והשפך שלו כבר כמעט 10 שנים, ובמסגרת המחקר אפיין לדוגמה את המזהמים שנמצאים בנחל ואת השפעת הערבוב עם מי הים בשפכו[34–36]. מאגר הנתונים העשיר של המחקר הזה, לאורך נחל אלכסנדר עד לשפכו, זמין כולו לקהילה בכתובת https://www.estuaries.org.il/en/home. 3) מי תהום חיוניים במיוחד באזורים צחיחים וצחיחים-למחצה, אולם ניצול-יתר של מי תהום עשוי לגרום להידלדלותם, המלחתם והם נתונים לזיהום על-ידי מי קולחין או מי ביוב. מי תהום מכילים עושר גדול של מיקרואורגניזמים, אולם הגורמים שקובעים את מבנה האוכלוסייה המיקרוביאלית במי תהום אינם ברורים[37]. מחקרים רבים בארץ עקבו אחר פירוק מזהמים שונים במי התהום, ולאחרונה גם החלו לאפיין כיצד מי תהום והמיקרואורגניזמים שנמצאים בהם משפיעים על סביבות אחרות, כגון חוף הים התיכון[38]. זיהום מי תהום הוא בעיה משמעותית במיוחד בשטחי יהודה ושומרון (הגדה המערבית) וברשות הפלסטינאית, שלהם אקוויפר מי תהום משותף עם ישראל, בעיה שדורשת מחקר וניהול משותפים[39]. 4) ישראל היא מובילה עולמית בטיפול בשפכים ובמיחזורם – למעלה מ-93% ממי השפכים מטופלים, ו-86% מנוצלים אחרי הטיפול להשקיה בחקלאות, יחסית ל-34% בסינגפור, 18% באוסטרליה ורק 9% בארה"ב[40]. מיקרואורגניזמים חיוניים לטיהור מי שופכין[41], ואיכות המים המטוהרים עשויה להשפיע במידה רבה על תוצאות התוצרת החקלאית בכך שהיא משפיעה על מיקרוביום אחר מזה של המים – המיקרוביום של שורשי הצמחים[42].

סיכום

הבנה מעמיקה יותר של הקשר בין אוכלוסיות מיקרוביאליות ואיכות מים חיונית לניצול מושכל של משאבי המים שנעשים יותר ויותר חשובים ויקרים, בארץ ובעולם. אירועים עולמיים במהלך העשור האחרון, כגון שינויי אקלים ומגפת הקורונה, הדגימו בצורה ברורה מאוד את החשיבות של הבנת אוכלוסיות מיקרוביאליות במים וניטורן[41,43]. מחקר רב-תחומי, שמשלב שיטות ותובנות מתחומים שונים כגון אקולוגיה, מיקרוביולוגיה, לימנולוגיה (חקר אגמים ומקווי מים מתוקים אחרים), ביואינפורמטיקה ומדעי הנתונים, חיוני להמשך התפתחות תחום חשוב זה.

תודות

רוב המידע שהוצג כאן נאסף במסגרת מחקר שמומן על-ידי משרד המדע (מענק 3-10342). כותבי המאמר מודים לכל צוות המחקר, ובעיקר לסופי מרמן, דיטי וינר-מוזיני, רותי הרשברג, דרור מינץ ואדי ציטרין. אנו מודים גם למנהלי מקווי המים שעבדנו בהם, ובעיקר לצוות תחנת המחקר בדור.

רשימת מקורות

1. Strayer, D. L. *et al.* Freshwater biodiversity conservation: Recent progress and future challenges. *Freshwater biodiversity* **29**, 344–358 (2010).
2. Tickner, D. *et al.* Bending the curve of global freshwater biodiversity loss : An emergency recovery plan. *BioScience* **70**, 330-342 (2020).
3. Grizzetti, B. *et al.* Relationship between ecological condition and ecosystem services in European rivers, lakes and coastal waters. *Sci. Total Environ.* **671**, 452–465 (2019).
4. Cole, J. J. *et al.* Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* **10**, 171–184 (2007).
5. Carpenter, S. R., Stanley, E. H. & Vander Zanden, M. J. State of the world's freshwater ecosystems: Physical, chemical, and biological changes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **36**, 75–99 (2011).
6. Bergh, Ø., BØrsheim, K. Y., Bratbak, G. & Heldal, M. High abundance of viruses found in aquatic environments. *Nature* **340**, 467–468 (1989).
7. Newton, R. J., Jones, S. E., Eiler, A., Mcmahon, K. D. & Bertilsson, S. A guide to the natural history of freshwater lake bacteria. Microbiol. Mol. Biol. *Rev.* **75**, 14–49 (2011).
8. Azam, F. & Malfatti, F. Microbial structuring of marine ecosystems. *Nat. Rev. Microbio.* **5**, 782–791 (2007).
9. Paerl, H. W., Otten, T. G. & Kudela, R. Mitigating the expansion of harmful algal blooms across the freshwater-to-marine continuum. *Environ. Sci. Technol.* **52**, 5519–5529 (2018).
10. Wurtsbaugh, W. A., Paerl, H. W. & Dodds, W. K. Nutrients, eutrophication and harmful algal blooms along the freshwater to marine continuum. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* **6**, (2019).

11. Paerl, H. W. & Paul, V. J. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research* **46**, 1349–1363 (2011).
12. סוקניק, א. & גורדון, נ. אצות ובקטריות כחוליות (Cyanobacteria) רעילות בסביבה הימית והמימית של ישראל. in *הוד הים: יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל* עורכות סטמבלר, נ., לוטן, ת. & גודמן-צ'רנוב, ב. העמותה הישראלית למדעי הימים, ישראל (2014).
13. אסטרחן, פ., ניניו, ש. & סוקניק, א. אצות וציאנובקטריה רעילות בסביבה הימית של ישראל – תמונת מצב ואתגרים. *הוד הים: איתנות ותמורות במערכות הימיות של ישראל. עורכת סטמבלר, נ.* העמותה הישראלית למדעי הימים (2025).
14. Sukenik, A., Hadas, O., Kaplan, A. & Quesada, A. Invasion of Nostocales (cyanobacteria) to subtropical and temperate freshwater lakes – physiological, regional, and global driving forces. *Front. Microbiol.* **3**, (2012).
15. van Leeuwen, C. H. A., van der Velde, G., van Lith, B. & Klaassen, M. Experimental quantification of long distance dispersal potential of aquatic snails in the gut of migratory birds. *PLoS One* **7**, (2012).
16. Padilla, D. K. & Williams, S. L. Beyond ballast water: Aquarium and ornamental trades as sources of invasive species in aquatic ecosystems. *Front.Ecol. Environ.* **2**, 131–138 (2004).
17. Kröger, B., Selmeczy, G. B., Casper, P., Soininen, J. & Padisák, J. Long-term phytoplankton community dynamics in Lake Stechlin (north-east Germany) under sudden and heavily accelerating eutrophication. *Freshw. Biol.* **68**, 737–751 (2023).
18. Schindler, D. W. Lakes as sentinels and integrators for the effects of climate change on watersheds, airsheds, and landscapes. *Limnol. Oceano.* **54**, 2349–2358 (2009).
19. Al-Ashhab, A. *et al.* Freshwater microbial metagenomes sampled across different water body characteristics, space and time in Israel. *Scientific Data* **9**, 1–7 (2022).
20. Zohary, T., Sukenik, A., Berman, T. & Nishri, A. *Lake Kinneret: Ecology and Management.* (Springer Heidelberg, 2014).
21. Marmen, S. *et al.* Seasonal dynamics are the major driver of microbial diversity and composition in intensive freshwater aquaculture. *Front. Microb.* **12**, 1–16 (2021).
22. Patil, H. J. *et al.* Temporal resistome and microbial community dynamics in an intensive aquaculture facility with prophylactic antimicrobial treatment. *Microorganisms* **8**, 1–17 (2020).
23. Hasan-Amer, R. & Carmeli, S. Inhibitors of serine proteases from a *Microcystis* sp. bloom material collected from timurim reservoir, Israel. *Mar. Drugs* **15**, (2017).
24. Hasin, O. & Carmeli, S. Isolation and structure elucidation of secondary metabolites from a Microcystis sp. bloom material collected in southern Israel. *Nat. Prod. Commun.* **13**, 1313–1318 (2018).
25. Marmen, S. *et al.* The role of land use types and water chemical properties in structuring the microbiomes of a connected lake system. *Front. Microb.* **11**, 1–16 (2020).

26. Marmen, S. *et al.* Distribution and habitat specificity of potentially-toxic Microcystis across climate, land, and water use gradients. *Front. Microb* **7**, (2016).
27. Adiv, S., Aharonv-Nadborny, R. & Carmeli, S. Micropeptins from Microcystis aeruginosa collected in Dalton reservoir, Israel. *Tetrahedron* **66**, 7429–7436 (2010).
28. Sukenik, A., Hadas, O. & Kaplan, A. Cyanobacteria. in *Lake Kinneret: ecology and management* (eds. Zohary, T., Sukenik, A., Berman, T. & Nishri, A.) 213–226 (Springer Heidelberg, 2014).
29. Ninio, S., Lupu, A., Viner-Mozzini, Y., Zohary, T. & Sukenik, A. Multiannual variations in Microcystis bloom episodes – Temperature drives shift in species composition. *Harmful Algae* **92**, (2020).
30. Coyne, K. J., Wang, Y. & Johnson, G. Algicidal Bacteria: A review of current knowledge and applications to control harmful algal blooms. *Front. Microb.* **13**, Preprint at https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.871177 (2022).
31. Schweitzer-Natan, O., Ofek-Lalzar, M., Sher, D. & Sukenik, A. Particle-associated microbial community in a subtropical lake during thermal mixing and phytoplankton succession. *Front. Microb.* **10**, (2019).
32. Schweitzer-Natan, O., Ofek-Lalzar, M., Sher, D. & Sukenik, A. The microbial community spatially varies during a *Microcystis* bloom event in Lake Kinneret. *Freshw. Biol.* **68**, 349–363 (2023).
33. Patil, H. J. *et al.* Evidence of increased antibiotic resistance in phylogenetically-diverse aeromonas isolates from semi-intensive fish ponds treated with antibiotics. *Front. Microb.* **7**, (2016).
34. Topaz, T. *et al.* Ecological risk dynamics of pharmaceuticals in micro-estuary environments. *Environ. Sci. Technol.* **54**, 11182–11190 (2020).
35. Topaz, T. *et al.* Environmental risk dynamics of pesticides toxicity in a Mediterranean micro-estuary. *Environ.l Pollut.* **265**, 114941 (2020).
36. Suari, Y. *et al.* Sandbar breaches control of the biogeochemistry of a micro-estuary. *Front. Mar. Sci.* **6**, (2019).
37. Magnabosco, C. *et al.* The biomass and biodiversity of the continental subsurface. *Nat. Geosci.* **11**, 707–717 (2018).
38. Levakov, I., Ronen, Z. & Dahan, O. Combined in-situ bioremediation treatment for perchlorate pollution in the vadose zone and groundwater. *J. Hazard. Mater.* **369**, 439–447 (2019).
39. Hejaz, B., Al-Khatib, I. A. & Mahmoud, N. Domestic groundwater quality in the northern governorates of the West Bank, Palestine. *J. of Environ. Public Health* **2020**, (2020).
40. Abraham, D., Ngoga, T., Said, J. & Yachin, M. *How Israel became a world leader in agriculture and water insights for today's developing countries acknowledgements.* (2019).
41. Christou, A. *et al.* Sustainable wastewater reuse for agriculture. *Nat. Rev. in Earth & Environ.* **5**, 504–521 (2024).

42. Zolti, A., Green, S. J., Ben Mordechay, E., Hadar, Y. & Minz, D. Root microbiome response to treated wastewater irrigation. *Science of The Total Environment* **655**, 899–907 (2019).
43. Bogler, A. *et al.* Rethinking wastewater risks and monitoring in light of the COVID-19 pandemic. *Nature Sustainability* **3**, 981–990 (2020).

צריינט (*Cerianthus*), בעומק 10 מטר מול יציאת המים החמים בתחנת הכוח בחדרה. צילום: חגי נתיב.

18 פיטופלנקטון במזרח הים התיכון מגמות בזמן ובמרחב

איל רהב, נורית גורדון, נטליה בלקין, תום רייך, חימנה וולסקז-דובינסקי, מקסים רובין-בלום, ברק חרות

המכון הלאומי לאוקיינוגרפיה, חקר ימים ואגמים לישראל

eyal.rahav@ocean.org.il,
ngordon@ocean.org.il,
tashabelkin@gmail.com,
reichtom@gmail.com,
ximvel@ocean.org.il ,
mrubin@ocean.org.il,
barak@ocean.org.il

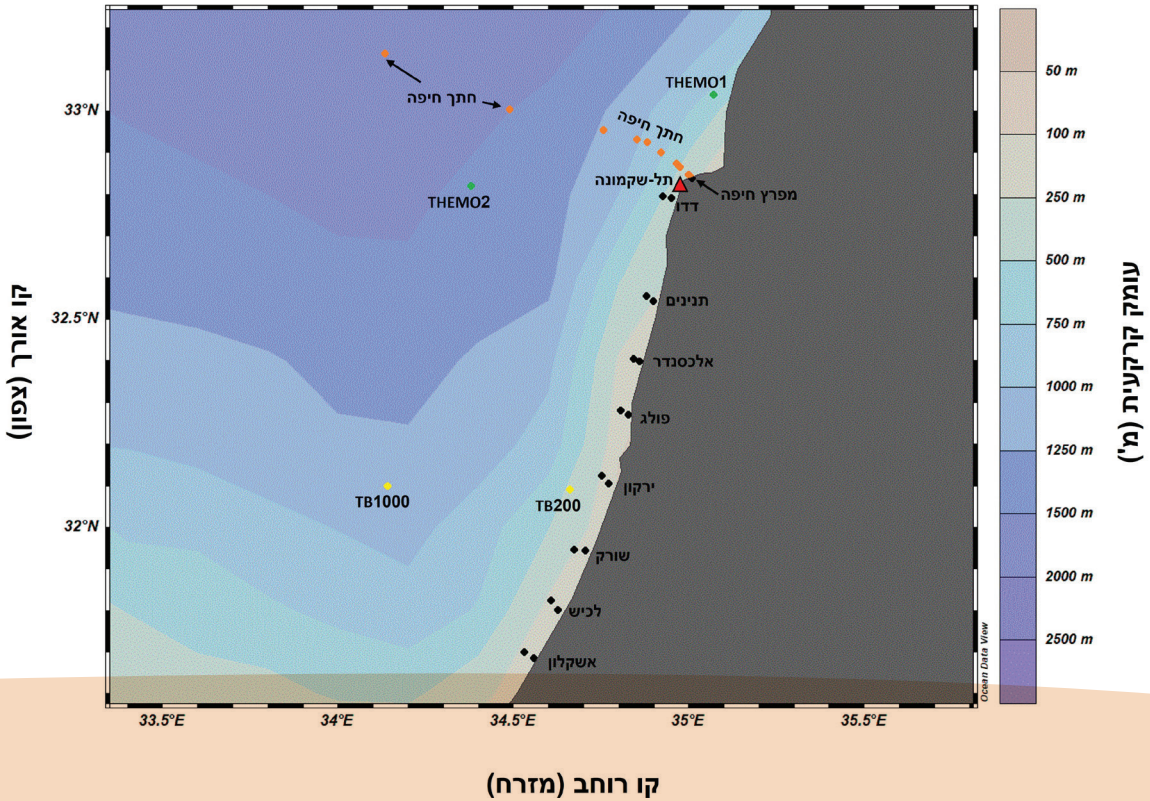
תקציר

פיטופלנקטון הינם מיקרואורגניזמים הנמצאים בבסיס מארג המזון הימי ואחראים לקיבוע פחמן דו-חמצני אטמוספרי ושחרור חמצן. פיטופלנקטון מגיב מהר לשינויים סביבתיים, ולכן מעקב אחר הביומסה שלהם, קצב פעילותם (יצרנות ראשונית), ומגוון המינים הינו מושא למחקרים רבים ומהווה נדבך מרכזי ברוב תוכניות הניטור הימי בעולם. פרק זה יסקור את ההשתנות המרחבית, העונתית, האנכית (לעומק עמודת המים המוארת) והרב-שנתית של פיטופלנקטון במרחב הימי של ישראל במזרח הים התיכון על בסיס תוכנית הניטור הלאומית (2003-2023), ומידע משלים ממחקרים שונים שפורסמו באזור. כמו כן, פערי ידע שעולים מסקירה זו. תוצאות הסקירה מראות דומיננטיות מספרית של פיקו-פיטופלנקטון כדוגמת ציאנובקטריות (פרוקריוטים, חסרי גרעין תא מוגדר) ואצות אאוקריוטיות (בעלי גרעין תא) במדף הרדוד לאורך החוף ובים הפתוח לאורך כל השנה. במהלך הקיץ ריכוזי חומרי ההזנה (נוטריינטים) נמוכים במיוחד, ולכן כמות מיני פיטופלנקטון וגודלם קטן, עם פיזור מרחבי ואנכי שונה מאשר בחורף/אביב. עלייה חדה ומהירה בביומסת מיקרואצות – תופעה המכונה "פריחה", בעיקר של דינופלגלטים, קשורה על-פי רוב לאירועי זיהום בנוטריינטים. אולם מינים אלה נמצאים לאורך החוף בכמויות קטנות לאורך כל שנות הדיגום גם ללא קשר לזיהום, דבר המצביע על הסכנה לפריחות מזיקות במרחב הימי. מאחר שמזרח הים התיכון הינו מהימים החמים והעניים ביותר בחומרי הזנה בעולם, הוא מהווה "מעבדה טבעית" לבחינת שינויי האקלים באוקיינוסים החזויים עד סוף המאה הנוכחית. לפיכך יש חשיבות אקולוגית ומדעית רבה למעקב אחרי התפוצה והפעילות של פיטופלנקטון דווקא במרחב הימי של ישראל, במיוחד לאור היותם מדד לבריאות הסביבה הימית.

מבוא

פיטופלנקטון הינם אורגניזמים מיקרוסקופיים הנפוצים בשכבות המים המוארות של האוקיינוסים והימים (לרוב עד עומק של 100-150 מ'), אחראים לשחרור חמצן, לכמחצית מקיבוע הפחמן הדו-חמצני בעולם בתהליך הפוטוסינתזה[1], ומהווים את בסיס מארג המזון הימי[2]. מיני פיטופלנקטון מסווגים באופן כוללני לשלוש קבוצות גודל: פיקו-

פיטופלנקטון (גודל התא קטן מ-2 מיקרון), ננו-פיטופלנקטון (2-20 מיקרון), ומיקרו-פיטופלנקטון (20-200 מיקרון). מיני פיקו-פיטופלנקטון כגון הציאנובקטריות *Synechococcus* ו-*Prochlorococcus* הם הדומיננטיים מספרית באוקיינוסים, בעיקר הודות לקוטנם המקנה להם יחס מיטבי בין שטח הפנים של התא לנפחו, דבר המאפשר קליטה מיטבית של חומרי הזנה (נוטריינטים) מהסביבה בהשוואה לתאים גדולים יותר. ננו-פיטופלנקטון כדוגמת קוקוליטופורים (coccolithophores), ומיקרו-פיטופלנקטון כדוגמת צורניות (diatoms) ודינופלגלטים (dinoflagellates), מתבססים על-פי רוב במים עשירים יחסית בנוטריינטים, למשל במי החוף ובמוצאי נחלים[3]. למרות היותם "פלנקטון", קרי אורגניזמים, הנעים בעיקר עם זרם המים, ישנם מגמות ודפוסים מרחביים בפיזור פיטופלנקטון בעמודת המים, התלויים בתנאים הסביבתיים. חריגות או שינויים ממגמות אלו יכולים להשפיע על כל הסביבה הימית לאור היותם בסיס מארג המזון. לפיכך, מעקב אחר כמות, מגוון, פעילות, היחס בין מיני הפיטופלנקטון השונים, והאם נמצאים מינים רעילים (ורעלנים), מהווה סמן לבריאות המערכת האקולוגית של הים ומושא לרוב תוכניות הניטור הימי בעולם[4].



איור 1. מפה המראה את אזורי דיגום פיטופלנקטון במרחב הימי של ישראל בים התיכון במסגרת הניטור הלאומי (נקודות שחורות וכתומות) ומחקרים נלווים בשיתוף חוקרים מהאקדמיה (נקודות ירוקות וצהובות)[8,12]. לפרטים נוספים על עומקי הדיגום, רזולוציית דיגום וכו' ראה טבלה 1.

האגן המזרחי של הים התיכון, כולל מדף היבשת הרדוד של ישראל, נחשב לסביבה ענייה בנוטריינטים[5], בעיקר הודות למשטר הזרמים הכללי (הסעת מי שטח רדודים ממצרי גיברלטר לכיוון ישראל[3]), ערבול חורף רדוד[6], כמו גם מיעוט מקורות נוטריינטים חיצוניים כדוגמת נחלים[7]. כפועל יוצא מכך, הביומסה של פיטופלנקטון קטנה על-פי רוב ונשלטת בעיקר על-ידי מיני פיקו-פיטופלנקטון[8]. הביומסה של פיטופלנקטון באזור המדף מוגבלת בעיקר על-ידי מקורות חנקן[9] בעוד שבים הפתוח על-ידי חנקן וזרחן יחד (נקרא גם co-limitation)[10].
פרק זה מציג מגמות רב-שנתיות ומרחביות בביומסה, בפעילות ובמגוון מיני הפיטופלנקטון במרחב הימי של ישראל, מזרח הים התיכון. המידע נאסף במסגרת תוכנית הניטור הלאומית של הים התיכון המבוצעת על-ידי המכון לחקר ימים אגמים (חיא"ל) ומאוגד בכרך "המגוון הביולוגי" המוגש למשרד להגנת הסביבה ומשרד האנרגיה והתשתיות[11], כמו גם במחקרים נלווים (איור 1, טבלה 1). בנוסף, פרק זה דן בשאלות פתוחות ובפערי ידע הקשורים לתפוצת פיטופלנקטון במזרח הים התיכון בכלל ובמים הכלכליים הבלעדיים של ישראל בפרט.

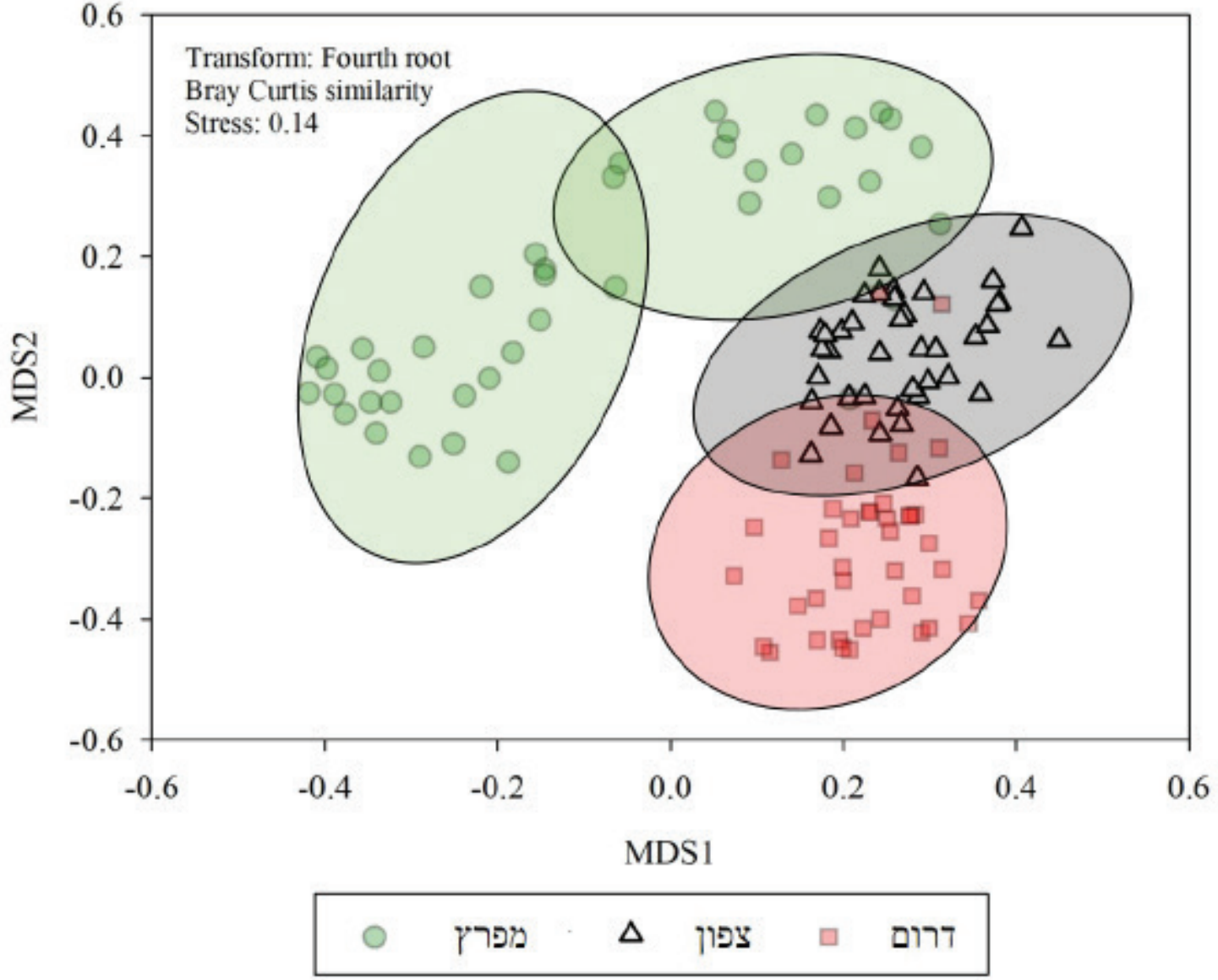
טבלה 1. פירוט דיגומי פיטופלנקטון במרחב הימי של ישראל בים התיכון במסגרת הניטור הלאומי ומחקרים נלווים.

מיקום	פרויקט	שנות דיגום	עונה	עומקי דיגום	שיטת דיגום	מקור
מדף רדוד (דדו-אשקלון, עד כ- 5 ק"מ מהחוף)	ניטור לאומי	2002-2023	קיץ	פני שטח	מיקרוסקופיה, ציטומטר זרימה, גנטיקה	9
מפרץ חיפה	ניטור לאומי	2002-2023	קיץ	פני שטח	מיקרוסקופיה	13
מפרץ חיפה עד הים הפתוח	ניטור לאומי	2002-2023	קיץ+חורף	עמודת המים	מיקרוסקופיה, ציטומטר זרימה, גנטיקה	14
כרית (תל שקמונה)	ניטור לאומי	2013-2023	חודשי	פני שטח	מיקרוסקופיה, ציטומטר זרימה	15
מים חופיים + ים פתוח	מחקר	2006-2008	חודשי	עמודת המים	מיקרוסקופיה	12
מים חופיים + ים פתוח	מחקר	2018-2019	חודשי	עמודת המים	ציטומטר זרימה, גנטיקה	8

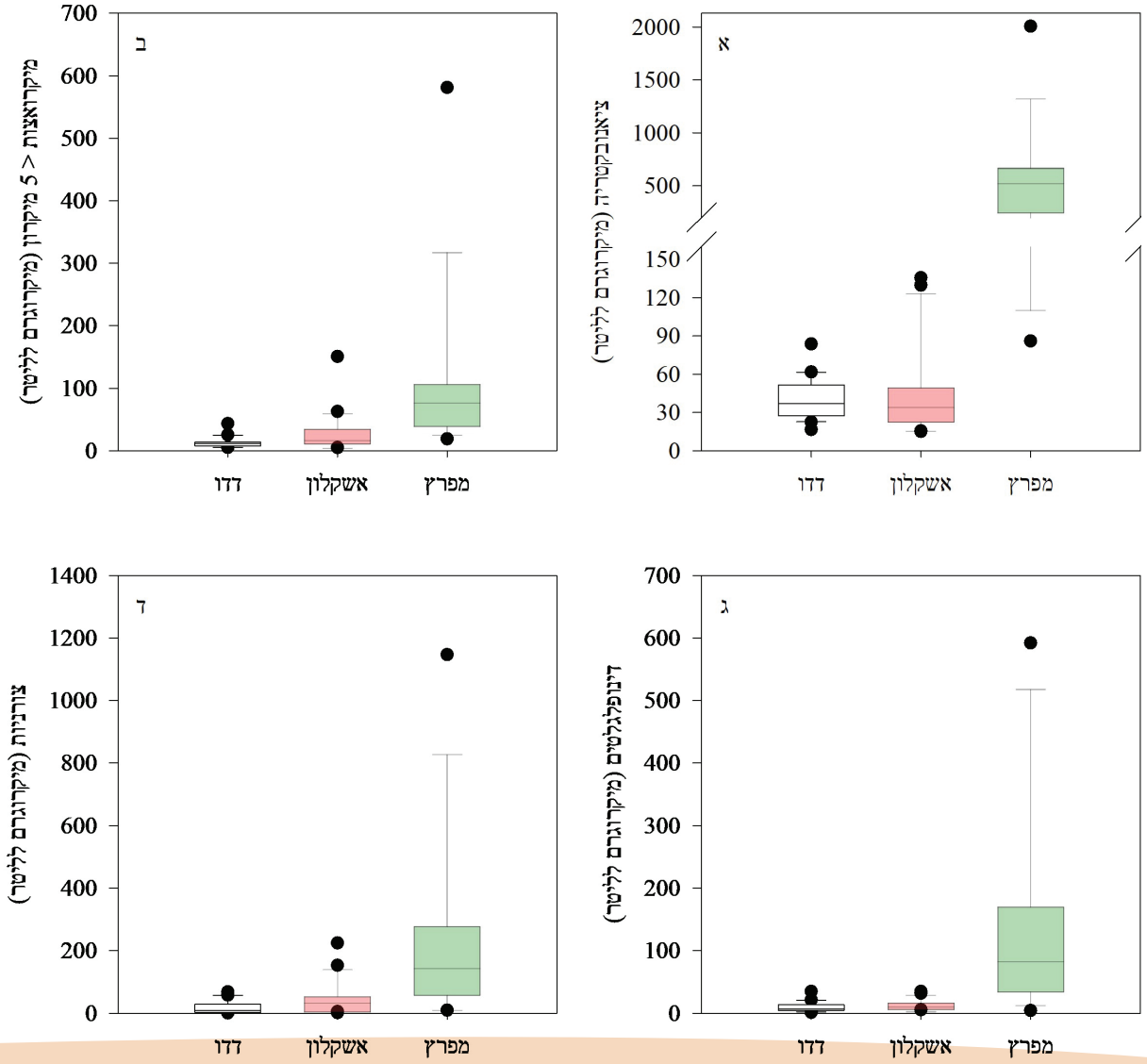
מגמות מרחביות (מדף רדוד בקיץ)

מבנה אוכלוסיות הפיטופלנקטון שהוגדר בעזרת טקסונומיה מיקרוסקופית וחלוקה למיני אצות/ציאנובקטריות במדף הרדוד (עד כ-5 ק"מ מהחוף) בקיץ 2003-2023 מתחלק סטטיסטית לארבע קבוצות הנבדלות אחת מהשנייה על-פי המיקום הגיאוגרפי לאורך החוף (איור 2). חלוקה זו מראה כי אוכלוסיות פיטופלנקטון בתחנות הדיגום הדרומיות (שורק-אשקלון) נבדלות מהצפוניות (דדו-ירקון) ומאלה שבמפרץ חיפה (במפרץ מזהים שתי קבוצות, אך נתייחס כאן לשתיהן יחד בגלל מאפיינים פיזיקו-כימיים דומים). על בסיס חלוקה זו, בחרנו להציג נתוני ביומסה, פעילות (קצבי יצרנות ראשונית – הטמעה של פחמן דו-חמצני לביומסה ושחרור חמצן), ומגוון המינים של פיטופלנקטון בתחנה מייצגת בכל אחד מהאזורים: 1) מפרץ חיפה, 2) חוף דדו, ו-3) אשקלון. ככלל, במפרץ חיפה נמדדה הביומסה הגבוהה ביותר של קבוצות הפיטופלנקטון השונות (~120-4300 מיקרוגרם לליטר) ביחס לשאר תחנות החוף (איור 3, 23-545 מיקרוגרם לליטר), ככל הנראה הודות לריכוזי הנוטריינטים הגבוהים במפרץ[5]. בחלוקה לקבוצות השונות, הביומסה של ציאנובקטריות, מיקרואצות קטנות מחמישה מיקרון, דינופלגלטים ואצות צורניות גבוהה פי 7-19 מאשר בשורק-אשקלון או דדו-ירקון (השוואת חציונים). כמו כן, ישנם הבדלים מובהקים בין תחנות שורק-אשקלון לבין דדו-ירקון, עם ביומסת תאים כפולה בתחנות הדרומיות, למעט ציאנובקטריה עם ביומסה דומה בין שני אתרי הדיגום. לסיכום, עבור ציאנובקטריה – "מפרץ חיפה">"דדו"="אשקלון", עבור צורניות – "מפרץ חיפה">"דדו"<"אשקלון", ועבור שאר קבוצות הפיטופלנקטון – "מפרץ חיפה">"דדו"="אשקלון".

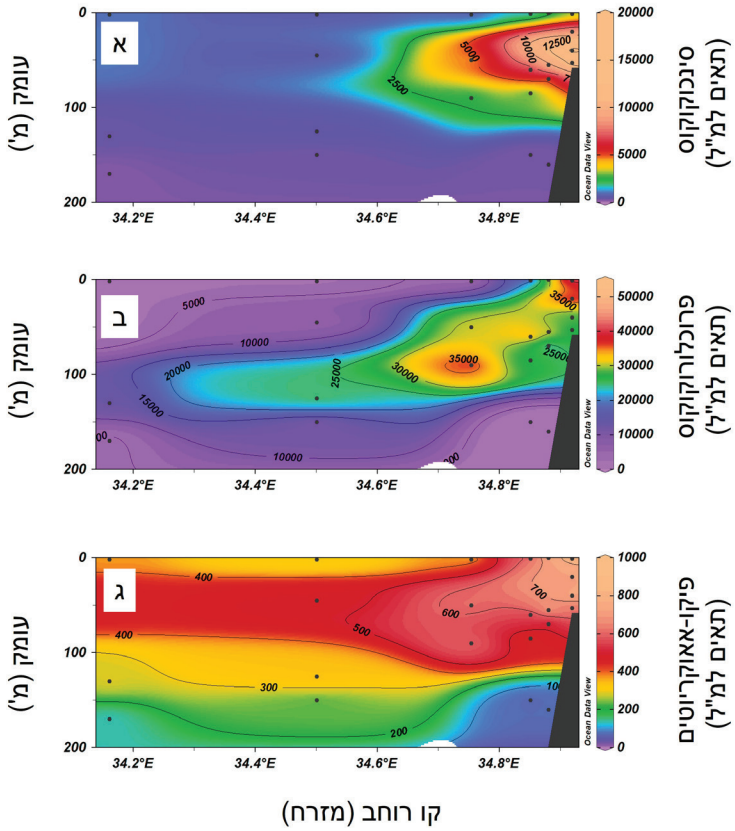
עיקר הציאנובקטריות משתייכות לסוג *Synechococcus*. אצות כללו צורניות בעיקר מהמין *Thalssiosira pseudonana, Chaetoceros* spp., *Asterionellopsis glacialis, Navicula Leptocylindrus* spp., *Pseudo-nitzschia*. מבין הדינופלגלטים היו שכיחים מיני *Protoperidinium* spp. בהם לדוגמה המין *Protoperidinium bipes*, מיני *Gymnodinium* spp., מיני *Ceratium* spp., מיני *Prorocentrum* spp., ומספר מיני דינופלגלטים בעלי פוטנציאל טוקסי כגון *Prorocentrum minimum, Akashiwo sanguinea, Dinophysis caudata* ו-*Ostreopsis* sp. שנמצאו כמעט בכל דיגום. שכיחות פיקו-פיטופלנקטון הייתה גדולה יותר במים חופיים (55,000-800 תאים במ"ל) מאשר בים הפתוח (44,000-70 תאים במ"ל), כפי שאפשר לראות מחתך ממפרץ חיפה לים הפתוח בקיץ (איור 4). יש לציין שבים הפתוח ישנו מיעוט מידע על מגמות מרחביות לכלל קבוצות הפיטופלנקטון (בעיקר חסר מידע על מיני מיקרופיטופלנקטון). ישנו פיילוט שמבוצע על-ידי חוקרי המכון לחקר ימים ואגמים להשלים פער ידע זה, תוך הטמעת כלים מיקרוסקופיים מבוססי בינה מלאכותית יוצרת (generative AI) וכלים גנטיים שונים בשילוב של טקסונומיה "קלאסית" ושימוש בציטומטר זרימה (flow-cytometry).



איור 2. אורדינציה רב ממדית של פיזור אוכלוסיות פיטופלנקטון במדף הרדוד בין 2003 ל-2022 בתחנות המדידה השונות במפרץ חיפה (ירוק), דדו-ירקון (לבן) ושורק-אשקלון (אדום). אנליזה סטטיסטית זו נעשתה על-ידי השוואת מיני הפיטופלנקטון (אצות וציאנובקטריות) במי השטח שזוהו בשיטות מיקרוסקופיות טקסונומיות.



איור 3. גרף קופסה המראה את הביומסה של א. ציאנובקטריות (בעיקר מהסוג *Synechococcus*). ב. מיקרואצות קטנות מחמישה מיקרון. ג. דינופלגלטים. ד. אצות צורניות. בחוף דדו (לבן), אשקלון (אדום) ומפרץ חיפה (ירוק) כאזורים מייצגים לאורך החוף כפי שהוגדרו סטטיסטית באיור 2 בין השנים 2003-2022. גבולות הקופסה מראים את האחוזונים ה-25 ו-75 והקו בתוכה את ערך החציון. הנקודות השחורות מייצגות עשירונים שונים בהתפלגות המדידות וערכי מינימום ומקסימום.



איור 4. מגמות מרחביות בשכיחות תאי א. סינכוקוקוס *Synecococcus* ב. פרוכלורוקוקוס *Prochlorococcus* ג. פיקו-אאוקריוטים בחתך ממפרץ חיפה לים הפתוח בחודשי הקיץ. הגרפים נעשו בעזרת תוכנת Ocean Data View (ODV) גרסה 4.1 על-ידי שימוש באלגוריתם מסוג VG gridding . הנקודות השחורות מייצגות את עומקי הדיגום.

עונתיות

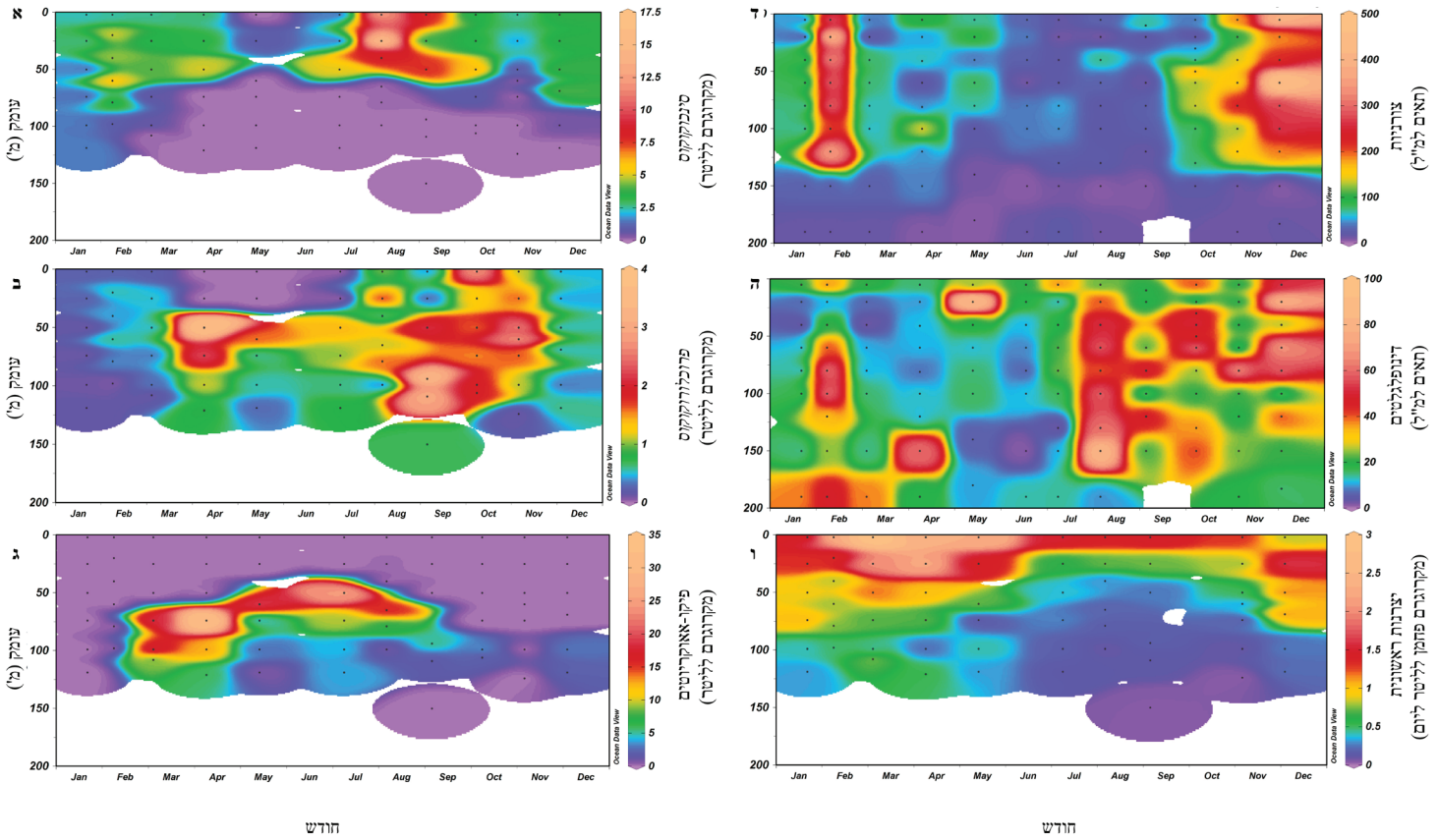
שינויים עונתיים (מדידות על בסיס חודשי) של אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכל קבוצות הגודל במרחב הימי של ישראל בים התיכון נחקרו בשני פרויקטים ייעודיים: 1) ניטור אוכלוסיות פיקו-פיטופלנקטון ויצרנות ראשונית במסגרת פרויקט SoMMoS, 2) ניטור ננו-/מיקרו-פיטופלנקטון כחלק ממחקר ייעודי בין 2006 לבין 2008[12]. בכל פרויקט נדגמו שתי תחנות: האחת על מדף היבשת (עומק קרקעית 125-200 מ') והשנייה בים הפתוח (עומק קרקעית 1500-1000 מ'). איורים 5 ו-6 מציגים איחוד של שני המחקרים שהוזכרו לעיל, למרות שנערכו בשנים שונות, ונועדו להדגים מגמות כלליות של השתנות שנתית ואנכית של פיטופלנקטון במדף היבשת (איור 5) ובים הפתוח (איור 6). מיני הפיקו-פיטופלנקטון מוצגים כביומסה (מיקרוגרם פחמן לליטר) מאחר שמדובר על תאים בעלי גודל ידוע ומכאן שניתן להמיר את מספר תאים לביומסה לפי יחסים ספרותיים מקובלים. לחלופין, ישנו קושי טכני בהערכת ביומסה של ננו/מיקרופלנקטון משום שגודלם עשוי להשתנות, אפילו באותו המין, בסדרי גודל, דבר שישפיע מאוד על אומדן הביומסה שלהם. לפיכך, אצות צורניות ודינופלגלטים מוצגים כשכיחות תאים (מספר תאים למיליליטר) ולא כביומסה. התוצאות מראות כי עיקר הביומסה של ציאנובקטריות מהסוג *Synechococcus* (סינכוקוקוס) מתרכזת במים העליונים (0-80 מ' לערך), בעוד ש-*Prochlorococcus*

(פרוכלורוקוקוס) נמצאים במים עמוקים יותר – על-פי רוב יחד עם ה-Deep Chlorophyll-*a* Maxima – DCM, 120-80מ'. פיקו-אאוקריוטים נמצאים בעיקר בין 100-50 מ' בחודשי הקיץ, אולם לעיתים נמצאים בגבול העומק המואר (איורים 6-4), דבר המרמז על תזונה מיקסוטרופית (mixotrophy – תזונה אוטוטרופית או הטרוטרופית על-ידי אותו תא התלויה במשתנים סביבתיים ומטבוליים שונים) של חלק מהתאים. בחודשי החורף ריכוז ה-*Prochlorococcus* יחסית אחיד על פני כל עמודת המים המוארת. מאידך, *Synechococcus* על-פי רוב "שומר" על מיקומו בחלק העליון של עמודת המים, גם בעונת החורף כשעמודת המים מעורבלת, ככל הנראה בגלל שהוא זקוק לרמות גבוהות יותר של אור ו/או שמיני ציאנובקטריות אלה משגשגים במים עניים יחסית בנוטריינטים (במים העליונים ריכוז הנוטריינטים הוא בדרך כלל הנמוך ביותר). במדף היבשת הביומסה של *Synechococcus* ופיקו-אאוקריוטים גבוהה מאשר בים הפתוח – פי 3 ו-1.5 בהתאמה. הדבר משקף ככל הנראה את ההבדלים בזמינות נוטריינטים בין האזורים, בעיקר של חנקות[16] שהן אחד הגורמים המגבילים גדילה ויצרנות של פיטופלנקטון במדף היבשת[9]. לעומת זאת, אין הבדלים מובהקים בריכוז ה-*Prochlorococcus* בין אתרי הדיגום, ככל הנראה בגלל מגבלות אחרות מחנקן[17], ו/או בגלל קשיי דיגום וזיהוי על-ידי שיטות מקובלות כדוגמת ציטומטר זרימה.

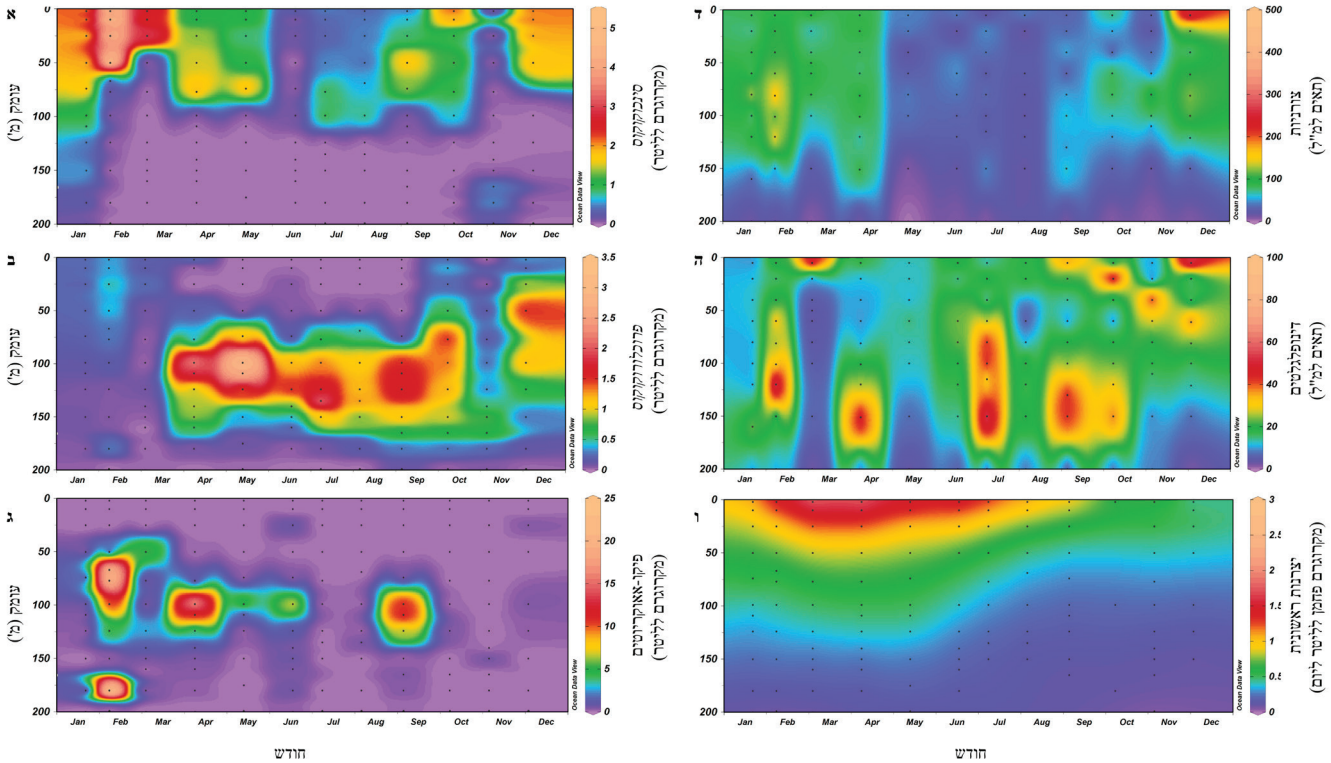
ריכוז אצות צורניות נמוך על-פי רוב בחודשי הקיץ וגבוה יותר בחודשי החורף. כאשר בחורף ריכוזן אחיד על פני כל עמודת המים המוארת, ובמהלך חודשי הקיץ פיזורן לא מוגדר וכתמי (patchy). במדף היבשת ריכוז האצות הצורניות גבוה פי 2-2.5 מאשר בים הפתוח (איורים 5,6). לעומת אצות צורניות, ריכוז הדינופלגלטים כתמי ואינו מציג דפוס עונתי או אנכי ברור, או הבדל סטטיסטי מובהק בין אזורי הדיגום (איורים 5,6). מעניין לציין כי ישנו ריכוז דינופלגלטים גבוה יחסית בקצה השכבה המוארת ואף מתחתיה (200-150 מ'). הדבר ככל הנראה מוסבר על-ידי תזונה מיקסוטרופית של דינופלגלטים שונים בים התיכון, שאמורה להקנות להם יתרון בסביבות דלות בחומרי הזנה.

יצרנות ראשונית נמדדת בעיקר במים העליונים (50-0 מ') מאחר ששם זמינות האור יחסית גבוהה, דבר המאפשר אנרגטית לבצע את התהליך הפוטוסינתיזה. יצרנות ראשונית בחושך (dark carbon fixation) מדידה אף היא לעומק כל עמודת המים, אולם בקצבים נמוכים מאוד, והינה מושא של מחקר בהתהוות (ראה/י פרק שאלות פתוחות למטה). כמו כן, ערכי היצרנות הראשונית היו גבוהים יותר בחודשי החורף/אביב מאשר בקיץ שם ערכי היצרנות הראשונית שנמדדו היו נמוכים מאוד (איורים 5,6), כולל בהשוואה למקומות/אגנים אחרים בים התיכון[8]. בדומה למדידות הביומסה, הסיבה להבדלים העונתיים/מרחביים ביצרנות הראשונית קשורה לזמינות נוטריינטים, ובעיקר, כאמור, חנקות. היצרנות הראשונית השנתית, המחושבת על בסיס הדיגומים החודשיים, דומה בין מדף היבשת לים הפתוח ונמצאת בהלימה עם המדידות במדף הרדוד/אזור הכרית (איור 7); כ-40-30 גרם פחמן למטר מרובע. אנליזות גנטיות בים הפתוח מראות הבדלים בתפוצת פיטופלנקטון בין החורף לקיץ, בדומה לנתוני הספירות/ביומסה שתוארו לעיל. למשל, ישנה העשרה של צורניות (Mediophycea) ואאוקריוטים פוטוסינתטיים מסדרת Cryptomonadales בחורף, וריכוז גבוה יחסית של Prymensiaceae בקיץ בסביבת מקסימום כלורופיל (120-90 מ') (איור 8).

הבנה של ההיבטים המרחביים בביומסה של מיקרואצות ופעילותן חשובה לבחינת "בריאות המערכת" ו"שירותי המערכת", ולכן מנוטרת במסגרת תוכנית הניטור הלאומי. למשל, הבנה של סוגי האצות שנמצאות והתזמון מתי הן "פורחות" חשובה להימצאות דגים מסחריים שניזונים מפלנקטון. במי החוף, חשוב לדעת אם ישנה ביומסה חריגה של אצות מסוימות שעלולות להפריע להתפלת מי הים, משמע עלויות תפעול גבוהות, הפרשת רעלנים שיכולה לסכן מתרחצים ועוד.



איור 5. פיזור חודשי ואנכי של א. *Synechococcus*. ב. *Prochlorococcus*. ג. אצות אאוקריוטיות שנמדדו על-ידי ציטומטר זרימה ומשתייכות בעיקר לקבוצת הגודל הקטנה מ-5 מיקרון. ד. אצות צורניות ה. דינופלגלטים ו. ערכי יצרנות ראשונית במדף היבשת (עומק קרקעית 200-125 מ'). המידע נאסף במסגרת הפלגות מחקר חודשיות על פני כשנתיים. תאי הפיקו-פיטופלנקטון מוצגים כביומסה (א-ג), בעוד שמיקרו-פיטופלנקטון כריכוז (ד,ה). שימו לב להבדלים בצירי ה-Y בין הממצאים במדף היבשת (איור זה) לבין הים הפתוח (איור 6).



איור 6. פיזור חודשי ואנכי של א. *Synechococcus* ב. *Prochlorococcus* ג. אצות אאוקריוטיות שנמדדו על-ידי ציטומטר זרימה ומשתייכות בעיקר לקבוצת הגודל הקטנה מ-5 מיקרון. ד. אצות צורניות. ה. דינופלגלטים ו. ערכי יצרנות ראשונית בים הפתוח (עומק קרקעית 1500-1000 מ'). המידע נאסף במסגרת הפלגות מחקר[8,12]. תאי הפיקו-פיטופלנקטון (א-ג) מוצגים כביומסה, בעוד שמיקרו-פיטופלנקטון כריכוז (ד,ה). שימו לב להבדלים בצירי ה-Y בין הממצאים במדף היבשת (איור 5) לבין הים הפתוח (איור זה).

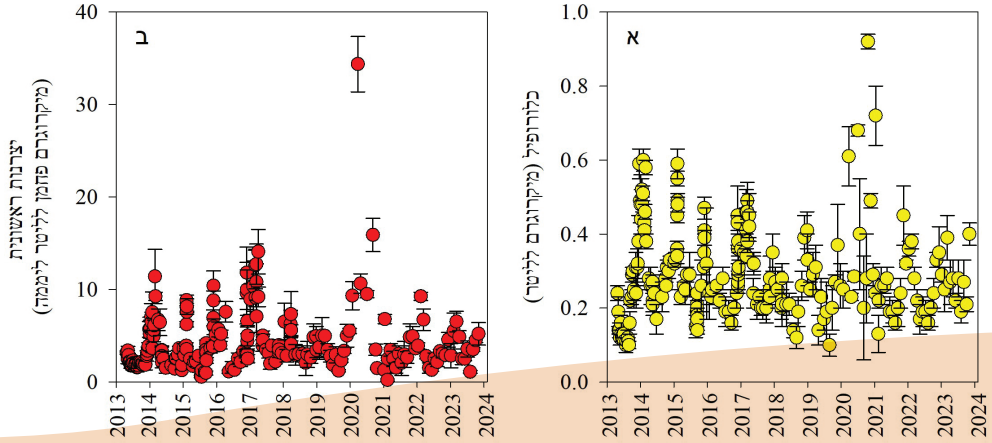
מגמות רב-שנתיות

כרית/מדף רדוד: ריכוזי כלורופיל, כמדד לביומסת הפיטופלנקטון הכללית במדף הרדוד/אזור הכרית באתר ניטור מייצג בחוף שקמונה (חיפה) היו נמוכים על-פי רוב, בהתאמה למאפיינים האוליגוטרופיים של המים באזורנו, וקטנה מ-1 מיקרוגרם בליטר, ללא מגמה רב-שנתית (איור 7 א). בדומה לכך, ערכי היצרנות הראשונית היו נמוכים אף הם (איור 7 ב), בהתאמה לזמינות הנוטריינטים הנמוכה בדרך כלל – כולל בעונות החורף. כאשר מחשבים את ה-assimilation number שהינו מדד המשקלל את היצרנות הראשונית ליחידת כלורופיל, מתקבל ערך נמוך ביחס למים חופיים (~13 מיקרוגרם פחמן לכלורופיל ליום) בדומה לימים אוליגוטרופיים. יחד עם זאת לעיתים מתועדים שינויים בכלורופיל וביצרנות הראשונית שחורגים מהתנודתיות הרב-שנתית, וקשורים לאירועים נקודתיים כמו הזרמת ביוב[18], סופות אבק [19]ועוד. מדידות אלה מעלות משמעותית את הערכים "הטיפוסיים", כולל ה-assimilation number שיכול להגיע לערך הגבוה פי חמישה מהערך הממוצע למימי החוף (כ-80 מיקרוגרם פחמן לכלורופיל ליום).

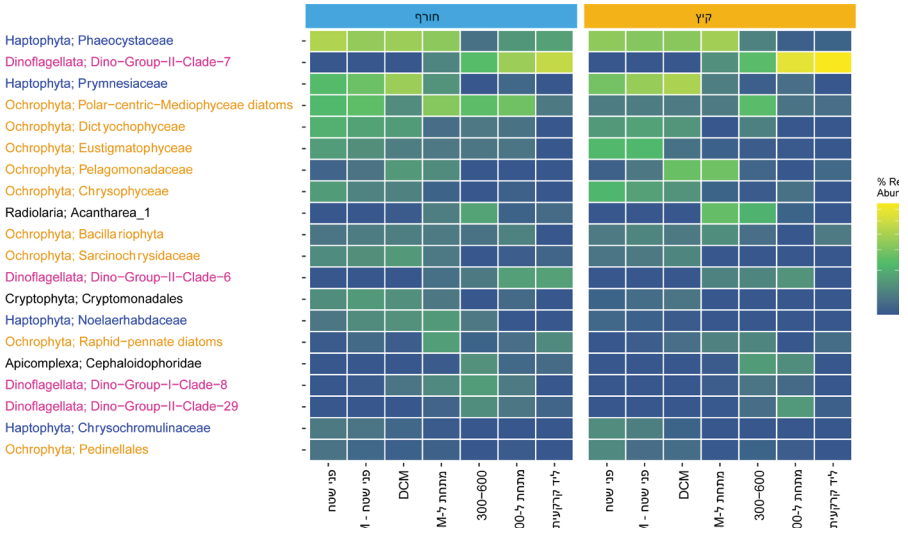
ריכוזי הכלורופיל של קבוצות הפיטופלנקטון השונות לאורך החוף לא מראים מגמה רב-שנתית ברורה. לעומת זאת,

במפרץ חיפה נראו שנים שבהן הייתה עלייה בריכוזי הכלורופיל (נקודות "שיא" באיור 9). עוצמת הפיקים במפרץ פחתו עם הזמן בציאנובקטריה וגדלו באצות אוקריוטיות קטנות מ-5 מיקרון (איור 9). בדומה לים הפתוח, הביומסה של אצות צורניות ודינופלגלטים "כתמית" ללא דפוס רב-שנתי ברור בכל תחנות הדיגום (איור 9). אירועים של ריכוזים גבוהים או פריחות בד"כ קשורים להזרמה חריגה של חומרי דשן ממקורות יבשתיים והמאפיינים הפיזיקליים של עמודת המים (שיכוב, זמן שהות). למשל, חריגה של הזרמת ביוב גולמי לים כתוצאה מכשל במערכת הביוב עירונית בחיפה בפברואר 2016 גרם לסוקסציה מהירה (תוך שעות/ימים) במיני הפיטופלנקטון באזור הזיהום, עם עלייה חדה בריכוז אצות צורניות ודינופלגלטים, כמו גם של ציאנובקטריות, כולל של מקבע החנקן בעל הפוטנציאל הטוקסי טריקודזמיום (*Trichodesmium sp.*)[18] לעומת הביומסה, מדדי מגוון מיני הפיטופלנקטון מראים ככלל עלייה כללית ב 15 השנים האחרונות תוך התייצבות מסוימת החל מ-2015, דבר שמרמז על שיפור כללי באיכות המים, ככל הנראה כתוצאה מהפחתה בעומסי הנוטריינטים ממקורות יבשתיים. במפרץ חיפה מגוון המינים המנורמל לביומסה (Shannon index) נמוך, כצפוי, משאר תחנות החוף הודות לעומס האורגני הגדול יותר במפרץ (איור 10).

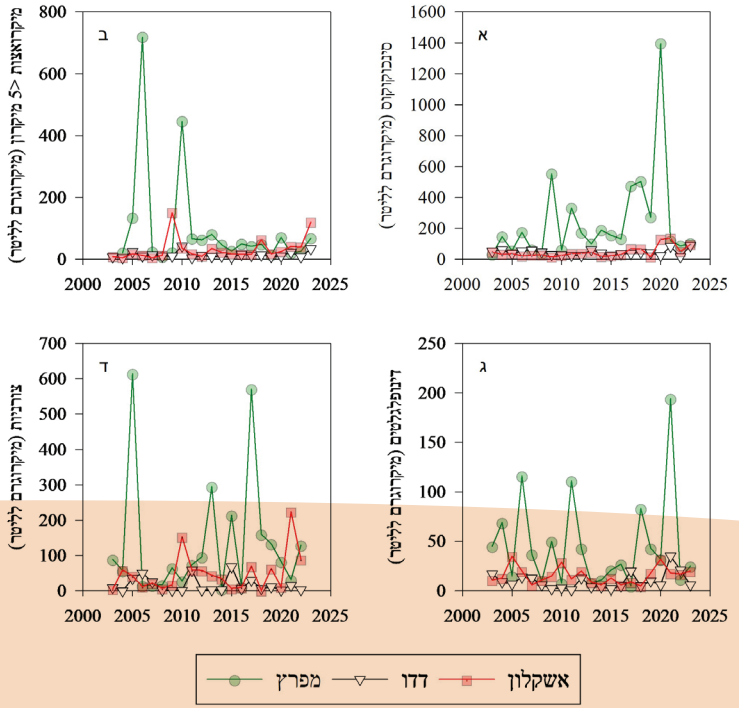
אצות בעלות פוטנציאל לרעילות, בעיקר דינופלגלטים, נמצאות לכל אורך מדף היבשת הרדוד, ובכל הדיגומים בשני העשורים האחרונים (איור 11). מיני הדינופלגלטים בעלי פוטנציאל לרעילות הנפוצים הנם *Akashiwo sanguinea, Dinophysis caudata, Heterosigma cf. akashiwo, Prorocentrum minimum* ו-*Alexandrium* minutum, אולם קיימים מינים נוספים של צורניות וציאנובקטריה, אך בריכוז נמוך עד כה. לא נצפתה מגמה רב-שנתית ברורה של המינים הרעילים, אולם נמדדו פריחות/חריגות בביומסה של דינופלגלטים רעילים (איור 11). למשל הפריחה של הדינופלגלט בעל הפוטנציאל הטוקסי *Alexandrium minutum* ביולי 2021 במפרץ חיפה ($6x10^5$ תאים לליטר). יש לציין כי אין בהכרח מתאם בין ריכוז אצות בעלות פוטנציאל טוקסי וריכוז רעלנים במים[20]. במקרה של *Alexandrium minutum* מיולי 2021 נמצא מתאם חיובי בין ריכוז התאים לריכוז חלבון כללי במים (מידע לא פורסם), דבר המרמז באופן נסיבתי שהפריחה לוותה בשחרור רעלנים למים על-ידי אצה זו.



איור 7. ריכוז כלורופיל כמדד כללי ל- א. ביומסה של פיטופלנקטון. ב. ערכי יצרנות ראשונית בפני השטח (עומק מים ~0.5 מטר) בחוף שקמונה בין 2013 ל-2023.



איור 8. השכיחות היחסית של 15 משפחות/סדרות הפיטופלנקטון הנפוצים ביותר בעמודת המים על בסיס ריצוף גן ה-16S הריבוזומלי ומיון בעזרת בסיס הנתונים https://pr2-database.org/ PR2 מדגימות מים שנלקחו בהפלגות ניטור ב-2018-2022.



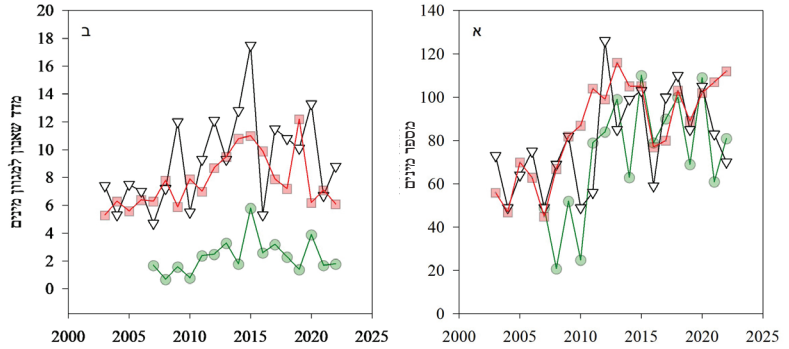
איור 9. ביומסה של א. ציאנובקטריות מהסוג *Synechococcus*. ב. מיקרואצות קטנות מחמישה מיקרון. ג. דינופלגלטים ד. אצות צורניות. בחוף דדו (לבן), אשקלון (אדום) ומפרץ חיפה (ירוק) כאזורים מייצגים לאורך החוף כפי שהוגדרו סטטיסטית באיור 2 בין השנים 2003-2023.

ים פתוח

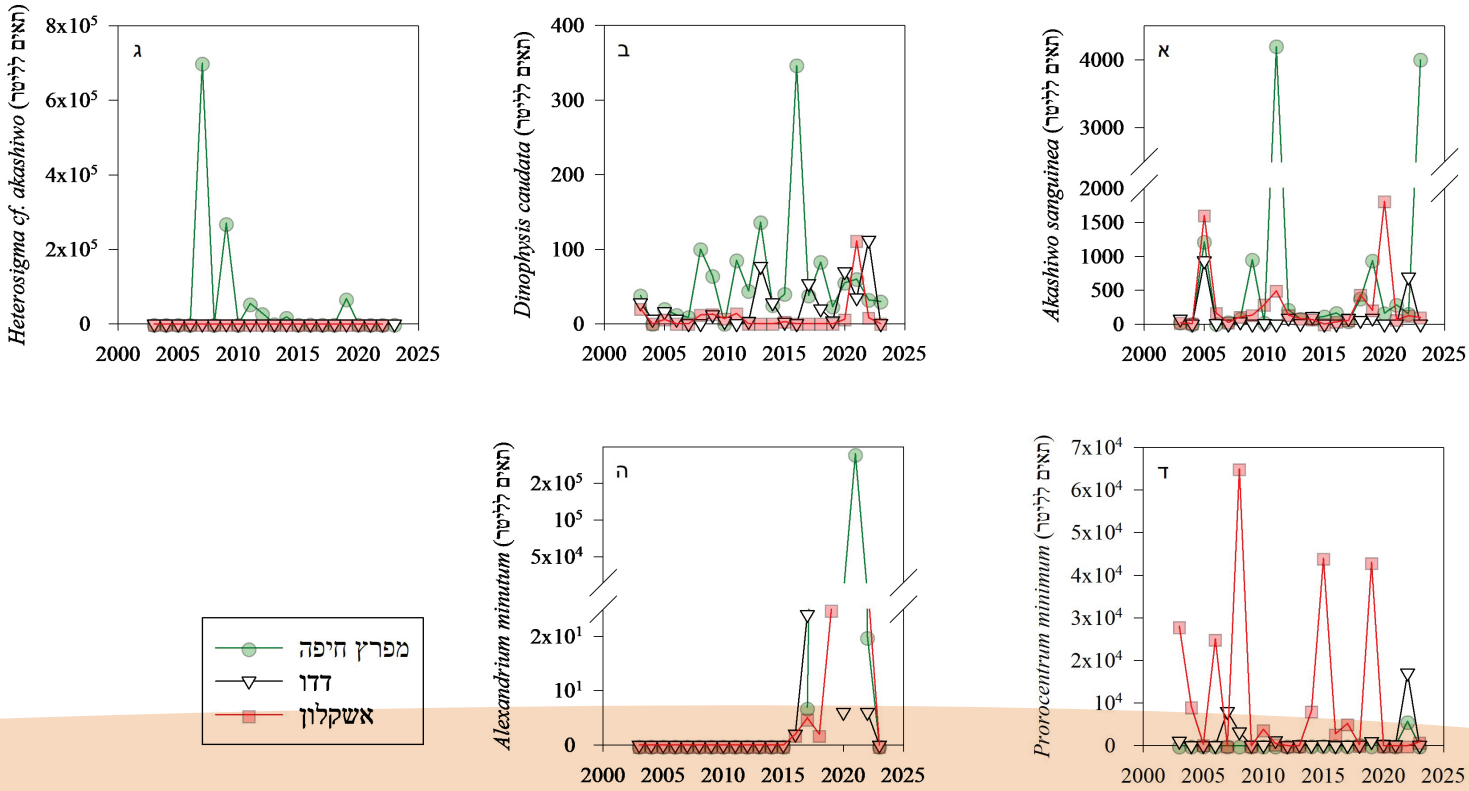
מעקב אחר שינויים רב-שנתיים באוכלוסיות פיקו-פיטופלנקטון החל ב-2013 אבל לא קיים כמעט מידע על ננו-/ומיקרו-פיטופלנקטון בסקאלה רב-שנתית במרחב המים הכלכליים של ישראל למעט מידע על מגוון הפיטופלנקטון שנמדד באמצעים מולקולריים (איור 8). אצות חומות-צהובות (Haptophyta, בעיקר Paeocystaceae ו-Prymnesiaceae) הינן שכיחות ביותר בעמודת המים העליונה. דינופלגלטים המייצרים ציסטות סידן פחמתי נמצאו בתחתית העומק המואר. לא נמצא שינוי רב-שנתי מובהק בביומסת הציאנובקטריה *Prochlorococcus* ואצות פיקו-אאוקריוטיות על פני כל עמודת המים המוארת (אינטגרל המתכלל בתוכו מפני השטח ועד 180 מ'). לעומת זאת, נראה שישנה מגמת עלייה מסוימת באוכלוסיות *Synechococcus* משנת 2017 עד 2022 (איור 12).

כצפוי בים אוליגוטרופי, ערכי היצרנות הראשונית נמוכים יחסית לאוקיינוסים רבים (איור 13), עם ערך קיבוע פחמן דו-חמצני שנתי של כ-30-39 גרם פחמן למטר רבוע לשנה. משמע שקליטת פחמן דו-חמצני אטמוספרי על-ידי אצות נמוך ביותר, ומכאן מארג מזון שמתבסס בעיקר על מיני בעלי חיים קטנים, מיעוט דגה וכיו"ב. במילים אחרות, "שירותי המערכת" של הים הפתוח, כגוף מים גדול, מוגבל, כולל בפיתוח חוות דיג לחקלאות ימית ועוד. לאחר הירידה ההדרגתית בערכי היצרנות הראשונית מ-2016 ל-2019 ישנה עלייה מחודשת "לערכי הרקע" (=ערך החציון של סך המדידות מ-2013 עד 2023). לא ברור אם זו תנודתיות טבעית הנגרמת בגלל תהליכים אוקיינוגרפיים שונים, שינויים במשטר הזרמים (ראה/י למשל [21]), או סיבות אחרות כגון השפעות התחממות וכיו"ב.

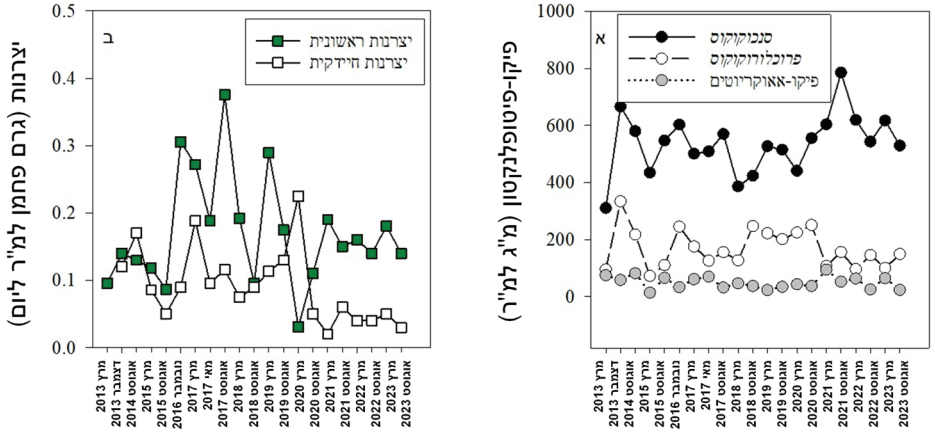
יצרנות החיידקית הינה מדד נוסף להערכת האוליגוטרופיות של המים. מדובר על קצב הטמעה של פחמן אורגני (במקרה זה חומצת האמינו לאוצין) על-ידי חיידקים שאינם פוטוסינטטים (בשונה מרוב המיקרואצות). שיווי המשקל (יחס) בין יצרנות ראשונית (כמוזכר לעיל) לבין יצרנות חיידקית הינה מדד נפוץ להערכת "בריאות המערכת", שיחס של 10:1 לערך (לטובת היצרנות הראשונית) נפוץ על-פי רוב באוקיינוסים. במזרח הים התיכון, היצרנות החיידקית ככלל גבוהה, ולעיתים דומה לקצב היצרנות הראשונית (איור 12) – ממצא חריג המצביע על יתרון בפעילות חיידקים הטרוטרופים על פני אצות. אנו סבורים כי שינויי האקלים, התחממות המים, והאוליגוטרופיקציה של פני השטח (כלומר כשריכוז הנוטריינטים במים יורד), מגבירים את ה"תחרות" בין יצרנים ראשונים לחיידקים הטרוטרופים, דבר שיגרום לשינויים במארג המזון (באופן שאינו ניתן לחיזוי) ואובדן "שירותי מערכת". בשונה מכך, לא נמצאו שינויים רב-שנתיים ברורים במגוון האצות בין 2018 ל-2022, זאת מאחר שאין בהכרח קשר בין הרכב חברה (כלומר מי "נמצא שם") לבין מידת הפעילות שלהם.



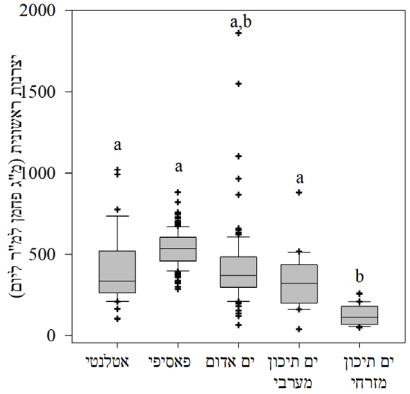
איור 10. א. עושר ב. מגוון. של מיני פיטופלנקטון בתחנות חיפה (לבן), אשקלון (אדום) ומפרץ חיפה (ירוק) כאזורים מייצגים לאורך החוף כפי שהוגדרו סטטיסטית באיור 2 בין השנים 2003-2023.



איור 11. ריכוז דינופלגלטים בעלי פוטנציאל רעילות בתחנות חיפה (לבן), אשקלון (אדום) ומפרץ חיפה (ירוק) כאזורים מייצגים לאורך החוף כפי שהוגדרו סטטיסטית באיור 2 בין השנים 2003-2022. א. *Akashiwo sanguinea*. ב. *Dinophysis caudate*. ג. *Hetrosigma cf. akashiw*. ד. *Prorocentrum minimum*. ה. *Alexandrium minutum*.



איור 12. א. אינטגרל של ריכוז תאי פיקו-פיטופלנקטון ב. ערכי יצרנות ראשונית וחיידקית בעמודת המים בים הפתוח (0-180 מ') בין 2013-2022.



איור 13. השוואה של קצב יצרנות ראשונית במקומות שונים בעולם כמוצג ברייך וחובריו, 2022 [8].

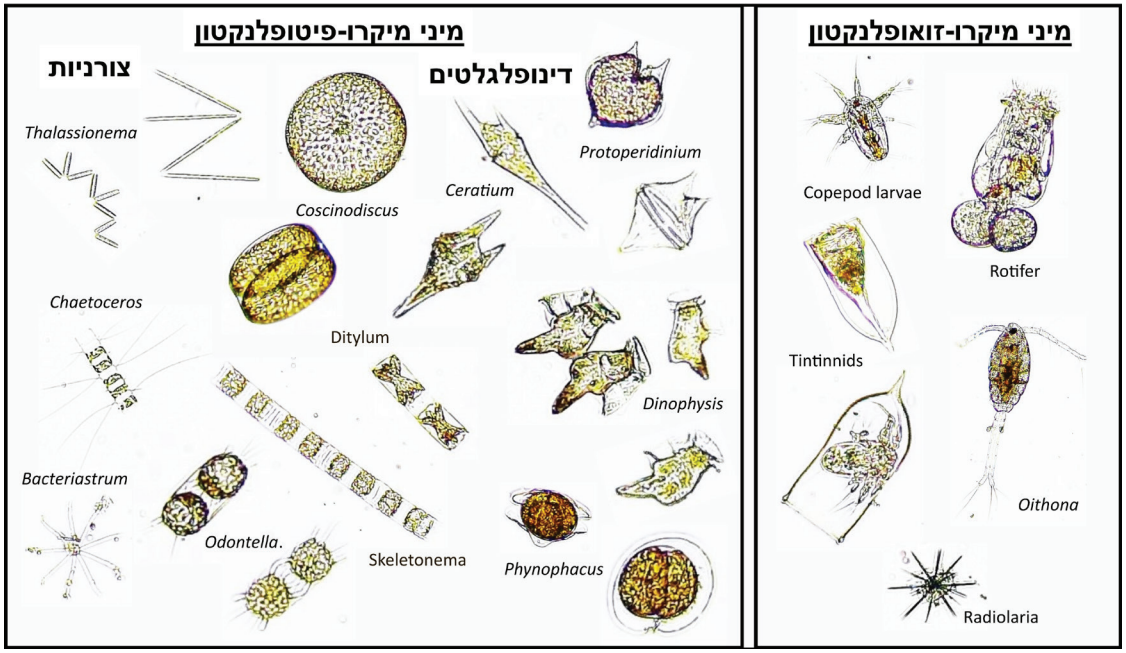
פערי ידע

תוכנית הניטור הלאומי של הים התיכון תוכננה לעקוב אחרי מצב הסביבה הימית בסקאלות זמן של עשרות שנים לצורך ניהול מושכל של המרחב הימי על-ידי משרדי הממשלה (למשל משרדי הגנת הסביבה, אנרגיה ותשתיות, חקלאות, בריאות וכו'). מבנה התוכנית מתבסס בעיקר על מחויבויות בינלאומיות שונות (למשל אמנת ברצלונה) שמדינת ישראל מחויבת אליה, וכוללת "מדדים" ספציפיים (descriptors) שאומצו בכדי לעמוד ביעדים אלו[11], ועל מדדים הקשורים בשינויי אקלים. יחד עם זאת, ישנם רכיבים שאינם כלולים בתוכנית בגלל תקציב, ומומלץ להשלימם במסגרת הרחבת התוכנית ו/או במחקרים נלווים. הפערים כוללים:

- בחינת הגורמים לפריחות דינופלגלטים (ופיטופלנקטון אחר) רעילים לאורך החוף. בכלל זה, האם נוטריינטים מסוימים ו/או תנאים אוקיינוגרפיים ואחרים משפיעים סלקטיבית על אורגניזמים רעילים

וגורמים לשגשוגם על פני אצות אחרות. כמו כן, יש לבסס את הקשר בין ריכוז מיני אצות בעלות פוטנציאל טוקסי שנמצאו בניטורים השונים לבין שחרור רעלנים למים על סוגיהם השונים. מחקר שפורסם לאחרונה הראה כי אין בהכרח מתאם בין תרביות של הדינופלגלט *Alexandrium minutum* (כמו זה שפרח בצורה מסיבית ביולי 2021 במפרץ חיפה) לבין ביטוי גנים הקשורים לרעילות[20]. משמע, ייתכן כי יימצא ריכוז נמוך של דינופלגלט זה, ובמקביל יהיה שחרור של רעלנים למים וההפך. התנאים שמובילים לשחרור הרעלים בעלי חשיבות עליונה לניהול האזור החופי, סגירת חופים, השפעה אפשרית של מתקני התפלה (בעבר משרד הבריאות עצר פעילות מתקנים בגלל פריחות אצות "חשודות") וכיו"ב.

- השלמת מידע חסר הקשור בתפוצה, ריכוז ומגוון פיטופלנקטון בעונות חורף/סתיו (הניטור באתרים לאורך החוף מתקיים בקיץ בלבד). באופן דומה, לא קיים כמעט מידע על פיטופלנקטון צפונית למפרץ חיפה – אזור שמושפע במידה רבה מכניסה של מי תהום עשירים בחנקות[22].
- מחקרים שונים מצביעים שמי חוף (עם המאפיינים הכימיים והביולוגיים שלהם) מוסעים לעיתים כמסת מים אחת לים הפתוח[23]. לפי שעה, לא ידוע כיצד פיטופלנקטון ממדף היבשת משפיע (או לא) על האקולוגיה של אורגניזמים בים הפתוח. כך למשל, לא ברור האם הסעה של אורגניזמים בעלי פוטנציאל טוקסי תוכל לגרור לשחרור רעלני אצות בים הפתוח, ואם כן מתי ובאילו תנאים.
- יש לבחון כמה מהפחמן הדו-חמצני שמקובע בתהליך היצרנות הראשונית על-ידי פיטופלנקטון מסולק לקרקעית (carbon sequestration) ולכמה שנים, וכמה "ממוחזר"/נלקח/"נאכל" בעמודת המים על-ידי בעלי החיים שנמצאים שם. מעבר לאתגר המדעי שבשאלה הנ"ל, שנבחן חלקית בעזרת סדרה של מלכודות סדימנט מעומקים שונים שמוצבות באופן קבוע בים על גבי מערכת ה-DeepLev[24], יש למידע זה חשיבות פוטנציאלית לפיתוח טכנולוגיות blue carbon במימי החוף והים הפתוח.
- שילוב והטמעה של שיטות מהירות לזיהוי פיטופלנקטון בתוכנית הניטור הלאומי, ובכלל זה שימוש בטכנולוגיות צילום ופיענוח מבוססות בינה מלאכותית יוצרת (למשל: פלנקטוסקופ, איור 14), שימוש בכלים גנומיים, וחיישני חישה מרחוק למינים ספציפיים.



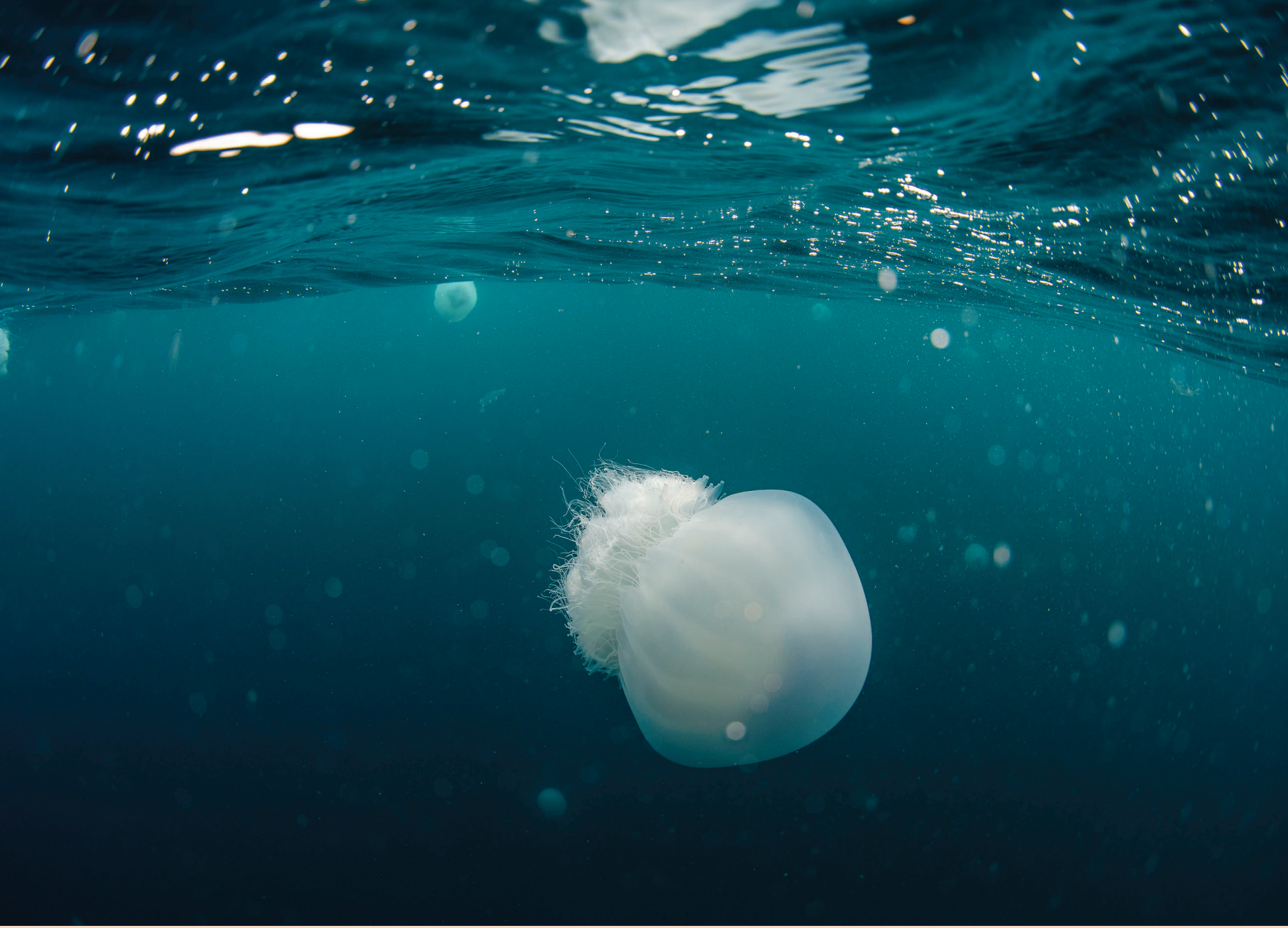
איור 14. דוגמה למאסף מיני מיקרופיטופלנקטון ומיקרוזואופלנקטון ממזרח הים התיכון במאי 2024 בעזרת פלנקטוסקופ המאפשר זיהוי אוטומטי ומהיר של תאים. התמונה מראה מאסף של תאים שנאספו בעזרת רשת פלנקטון, "התמקמו" מול מצלמת הפלנקטוסקופ, זוהו על-ידי מערכת AI, ועברו סגמנטציה (חיתוך) של הרקע. שימוש במערכת מאפשר זיהוי וכימות מהיר ויעיל של מיני מיקרופיטופלנקטון ומיקרוזואופלנקטון – דבר הכרחי לניטור בר-קיימה.

רשימת מקורות

1. Raven, J. Phytoplankton productivity. in *Marine Plankton: A practical guide to ecology, methodology, and taxonomy* (eds. Castellani, C. & Edwards, M.) 24–33 (Oxford University Press, 2017). doi:10.1093/oso/9780199233267.003.0003.
2. Fenchel, T. Marine plankton food chain. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **19**, 19–38 (1988).
3. Siokou-Frangou, I. *et al.* Plankton in the open Mediterranean Sea: a review. *Biogeosciences* **7**, 1543–1586 (2010).
4. Ferreira, J. G. *et al.* Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **93**, 117–131 (2011).
5. Kress, N., Rahav, E., Silverman, J. & Herut, B. Environmental status of Israel's Mediterranean coastal waters: Setting reference conditions and thresholds for nutrients, chlorophyll-a and suspended particulate matter. *Mar. Pollut. Bull.* **141**, (2019).

6. Hazan, O. *et al.* Mesopelagic prokaryotes alter surface phytoplankton production during simulated deep mixing experiments in Eastern Mediterranean Sea waters. *Front. Mar. Sci.* **5**, (2018).
7. Krom, M., Kress, N., Berman-Frank, I. & Rahav, E. Past, present and future patterns in the nutrient chemistry of the eastern mediterranean. in *The Mediterranean Sea: Its History and Present Challenges* 49–68 (2014). doi:10.1007/978-94-007-6704-1_4.
8. Reich, T. *et al.* A year in the life of the Eastern Mediterranean : Monthly dynamics of phytoplankton and bacterioplankton in an ultra-oligotrophic sea. *Deep. Res. Part I* **182**, 103720 (2022).
9. Rahav, E. *et al.* Impact of nutrient enrichment on productivity of coastal water along the SE Mediterranean shore of Israel - A bioassay approach. *Mar. Pollut. Bull.* **127**, 559–567 (2018).
10. Zohary, T. *et al.* P-limited bacteria but N and P co-limited phytoplankton in the Eastern Mediterranean - A microcosm experiment. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **52**, 3011–3023 (2005).
11. רהב א', חרות ב' וחוקרים נוספים מחיא"ל - ממצאי תוכנית הניטור הלאומי כרך מגוון מינים דוח H27/2023.
12. Rahav, E. & Berman-Frank, I. Temporal and vertical dynamics of diatoms and dinoflagellates in the southeastern Mediterranean Sea. *J. Plankton Res.* 1–11 (2023) doi:10.1093/plankt/fbad025.
13. Herut, B., Tibor, G., Yacobi, Y. Z. & Kress, N. Synoptic measurements of chlorophyll-a and suspended particulate matter in a transitional zone from polluted to clean seawater utilizing airborne remote sensing and ground measurements, Haifa Bay (SE Mediterranean). *Mar. Pollut. Bull.* **38**, 762–772 (1999).
14. Kress, N., Gertman, I. & Herut, B. Temporal evolution of physical and chemical characteristics of the water column in the Easternmost Levantine Basin (Eastern Mediterranean Sea) from 2002 to 2010. *J. Mar. Syst.* **135**, 6–13 (2014).
15. Raveh, O., David, N., Rilov, G. & Rahav, E. The temporal dynamics of coastal phytoplankton and bacterioplankton in the Eastern Mediterranean Sea. *PLoS One* **10**, 1–23 (2015).
16. Ben-Ezra, T. *et al.* Nutrient dynamics across the Israeli coastal shelf: An unusual oligotrophic coastal system. *Cont. Shelf Res.* **266**, 105103 (2023).
17. Rahav, E. & Silverman, J. CobalaminCo-limits phytoplankton and bacterial biomass and activity in Eastern Mediterranean coastal waters. *Geophys. Res. Lett.* **49**, e2022GL100602 (2022).
18. Rahav, E. & Bar-Zeev, E. Sewage outburst triggers Trichodesmium bloom and enhance N_2 fixation rates. *Sci. Rep.* **7**, 4367 (2017).
19. Krom, M. D. *et al.* Response of the Eastern Mediterranean microbial ecosystem to dust and dust affected by acid processing in the atmosphere. *Front. Mar. Sci.* **3**, (2016).
20. Rahav, E. & Herut, B. Impact of combined seawater warming and triazine-type herbicide pollution on the physiology and potential toxicity of the dinoflagellate Alexandrium minutum. *Mar. Pollut. Bull.* **115612**, (2023).
21. Ozer, T. *et al.* Relationship between thermohaline and biochemical patterns in the levantine upper and intermediate water masses , Southeastern Mediterranean Sea. *Front. Mar.* **9**, 958924 (2022).

22. Weinstein, Y. *et al.* What is the role of fresh groundwater and recirculated seawater in conveying nutrients to the coastal ocean? *Environ. Sci. Technol.* **45**, 5195–5200 (2011).
23. Efrati, S. *et al.* Intrusion of coastal waters into the pelagic eastern Mediterranean: In situ and satellite-based characterization. *Biogeosciences* **10**, (2013).
24. Katz, T. *et al.* The first deep-sea mooring station in the eastern Levantine basin (DeepLev), outline and insights into regional sedimentological processes. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **171**, (2020).



מדוזה חוטית נודדת *Rhopilema nomadica*, בנחיל הקיץ של 2020 במפרץ חיפה.
צילום: חגי נתיב.

19 אצות וציאנובקטריה רעילות בסביבה הימית של ישראל - תמונת מצב ואתגרים

פלג אסטרחן, שירה ניניו, אסף סוקניק

המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל

peleg.astrahan@ocean.org.il,
shira.ninio@ocean.org.il,
assaf@ocean.org.il

תקציר

פיטופלנקטון, אצות וציאנובקטריה (חיידקים כחולים), מהווים נדבך של יצרנים ראשוניים במערכות מים ימיות ויבשתיות. תנאים סביבתיים של העשרה בנוטריינטים והתחממות גלובלית מעודדים התפתחות של פריחות פיטופלנקטון שלעיתים כוללות מינים המייצרים רעלנים. לרעלנים השפעה על האדם וסביבתו, החל בפגיעה באיכות מי שתייה, דרך הרעלות מזון וכלה בצמצום המגוון הביולוגי. בישראל, בעיקר בכנרת דווח על פריחות רעילות של ציאנובקטריה. הסקירה שלפנינו מציגה תמונת מצב עדכנית על אירועי פריחות מזיקות בסביבה המימית של ישראל תוך דגש על פיתוח אמצעים חדשניים לזיהוי אירועי פריחה וגיבוש גישות חדשניות לטיפול בפריחות מזיקות וצמצום השפעתן על המערכות האקולוגיות ועל משתמשי המערכת.

הקדמה

מיקרואורגניזמים פוטוסינתטיים – אצות וציאנובקטריה (חיידקים כחולים), מהווים מרכיב עיקרי של הפיטופלנקטון הנפוץ בים הפתוח ובגופי מים יבשתיים (מים מתוקים) בעומקים שאליהם חודר האור. הפיטופלנקטון הוא הבסיס של מארג המזון ואחראי לקליטת פחמן דו-חמצני מהאטמוספרה בתהליך הפוטוסינתזה תוך פליטת חמצן. כמחצית מהיצרנות הראשונית הגלובלית מקורה בפעילות הפיטופלנקטון הימי. התפתחות אוכלוסיות תלויה בזמינות חומרי דשן (נוטריינטים) אור וטמפרטורה מתאימה. בתנאים של העתרה (Eutrophication, אוטרופיקציה), מוגברת הפעילות הפוטוסינתטית ואוכלוסיות הפיטופלנקטון גדלות בהתאמה, גידול המתבטא בעלייה בריכוז הכלורופיל ופיגמנטים פוטוסינתטיים אחרים במים. להתחממות הגלובלית ולאירועי אקלים קיצוניים תרומה נוספת לתופעה זו המתוארת בספרות כ"פריחת אצות" ("algal bloom"). לפריחה של אצות במערכות ימיות/מימיות, עלולה להיות השפעה שלילית על המערכת האקולוגית, שבאה לידי ביטוי בכשל של אספקת שירותי המערכת וכוללת השפעות על בריאות הציבור, נופש, תיירות, דיג, חקלאות ימית ואספקת מים לשתייה ולחקלאות. פריחות אלו של אצות הוגדרו כפריחות מזיקות HABs, (Harmful Algal) Blooms. כאשר הפריחות הן של ציאנובקטריה הן תוגדרנה כ-CyanoHAB- Cyanobacterial Harmful Bloom.

משנות השישים של המאה הקודמת דווח על פריחות מזיקות של אצות וציאנובקטריה הן בסביבה הימית והן בגופי מים יבשתיים כאשר פריחות מזיקות של ציאנובקטריה נפוצות בעיקר במערכות מים מתוקים. בעשורים האחרונים,

מספר האירועים של פריחות מזיקות (HABs) הלך וגדל, וכך גם הדיווחים על השפעות של פריחות אלו על בריאות הציבור, התיירות, הדגה והמערכות האקולוגיות[1]. דיווחים אלו הובילו לתשומת לב מדעית ורגולטורית מוגברת, ופיתוח של טכנולוגיות וגישות חדשות רבות לניטור, מחקר וניהול התופעה[2]. לאחרונה, Dai et al (2023), מיפו על בסיס יומי פריחת אצות באזורי החוף בעולם בין השנים 2003 ל-2020, באמצעות תצפיות לוויין גלובליות ברזולוציה מרחבית של קילומטר אחד[3]. הם דיווחו שפריחת אצות התרחשה ב-126 מתוך 153 מדינות החוף שנבדקו במהלך תקופת המחקר, כאשר ההיקף הגלובלי המרחבי (+13.2%) והתדירות (+59.2%) של הפריחה גדלו במידה ניכרת בתקופה של שני עשורים. במקביל, עלתה התדירות והעוצמה של פריחות מזיקות של ציאנובקטריה CyanoHAB בגופי מים יבשתיים (אגמים נחלים מאגרי מים וכדומה), ואלו דווחו מאזורים נרחבים על פני כדור הארץ[3-5].

המחקר העוסק בתחום של פריחות רעילות של אצות משלב תחומי ידע רבים (אוקיינוגרפיה, לימנולוגיה, מדעי האקלים והאטמוספרה, כימיה אנליטית, אקופיזיולוגיה וביולוגיה מולקולרית של אצות וציאנובקטריה, טוקסיקולוגיה, הנדסת מים, טיפול במים ועוד). כתבי-עת ייחודיים כמו Harmful Algae וכנסים בינלאומיים ייעודיים לתחום כמו International Conference on Toxic Cyanobacteria ו-International Conference on Harmful Algae מרכזים מידע עדכני על אירועי פריחה, הגורמים הסביבתיים המעורבים בתהליך, זיהוי ואפיון הרעילות של החומרים המיוצרים על-ידי האצות והגישות לזיהוי ולהתמודדות עם אירועי פריחה, כמו גם גישות למניעה וטיפול באירועי פריחה.

בעשור האחרון פורסמו שני מאמרי סקירה בשפה העברית, האחד במהדורה הקודמת של "הוד הים"[6] והשני בכתב-העת "אקולוגיה וסביבה"[7]. מאמרים אלו כללו סקירה של ספרות המחקר בנושא פריחות ומינים רעילים של מיקרו-אצות וציאנובקטריה בעולם ובארץ, פירוט של המינים הנפוצים של אצות וציאנובקטריה רעילות, והרעלנים שאותם הם מייצרים. דגש ניתן לסקירת התפוצה של מינים רעילים והשפעתם על הסביבה הימית והמימית בישראל, הובהר הצורך במעקב רציף ובניטור של אוכלוסיות הפיטופלנקטון, ובמיוחד של פריחות ופריחות רעילות, והוסברו אמצעי הניטור הקיימים. לפיכך הסקירה שלפנינו נועדה לספק תמונת מצב עדכנית על אירועי פריחות מזיקות בסביבה המימית של ישראל תוך דגש על פיתוח אמצעים חדשניים לזיהוי אירועי פריחה וגיבוש גישות חדשניות לטיפול בפריחות מזיקות וצמצום השפעתן על המערכות האקולוגיות ועל משתמשי המערכת.

פריחות מזיקות/רעילות של אצות וציאנובקטריה (BAH) בסביבה המימית בישראל

הים התיכון - מזרח הים התיכון נחשב לאזור אוליגוטרופי, דהיינו, עני יחסית בנוטריינטים (מזינים או חומרי דשן) כך שאירועי זיהום בנוטריינטים שמקורם בפעילות אנושית עלולים להביא לפריחות מקומיות של פיטופלנקטון כולל פריחות מזיקות המייצרות רעלנים. אירועי HABs אלה עלולים לגרום לבעיות בריאות שונות של האדם (למשל, תסמינים נשימתיים ונוירולוגיים, פגיעה בתפקוד הכבד ומוות), אך גם לתמותה המונית של דגים, פגיעה קשה בתעשיית הצדפות והרכיכות והשפעה על תפעול מתקני התפלת מי ים.

מי החוף הרדודים בישראל מושפעים ממזינים שמקורם בשפכי נחלים, בהזרמת שפכים מטוהרים, ובהזרמת תמלחות שמקורם בהשבחת מי בארות עשירים בחנקות, בסילוק בוצת ביוב פעילה ובהזרמה מקרית של שפכים לא מטופלת ונגר עירוני[7]. תנאים אלו, על רקע של התחממות גלובלית[8] מהווים סביבה מתאימה להתבססות ופריחה של מיני פיטופלנקטון מזיקים ובמקרים מסוימים גם רעילים. בנוסף, פעילות אנתרופוגנית מגוונת כמו העמקת הנמלים, כרייה והפעלה של תעלות ימיות חדשות (למשל, התוואי החדש של תעלת סואץ) ושחרור מי נטל ממכליות, תורמים לחדירה של מינים פולשים, חלקם ידועים כיצרנים של רעלנים, המתבססים באזור ועלולים לשנות את הדינמיקה של מארג המזון בסביבות חופיות ולגרום לפריחות מזיקות[9].

תוכנית הניטור הלאומית של הים התיכון כוללת גם את ניטור הפיטופלנקטון, ונוכחות של מינים בעלי פוטנציאל רעילות מדווחת מעת לעת[10]. בנוסף, מחקרים ממוקדים וסקרים סביבתיים מביאים מידע משלים על התבססות מינים אלו בסביבת החוף של ישראל[11]. מיקרו-אצות וציאנובקטריה שעלולים להיות רעילים במי החופים של ישראל כוללים את הדינופלגלטים *Ostreopsis* sp., *Dinophysis* sp. ו-*Prorocentrum* sp.. ואת הציאנובקטריום *Microcystis* sp. ו-*Trichodesmium erythraeum* (טבלה 1). קרס וחובריה[11] דיווחו שדליפה של שפכים גולמיים בחופים הצפוניים של ישראל גרמה לפריחה של דינופלגלאט רעיל *Gymnodinium breve*, הידוע כמייצר סדרה של Brevetoxins ושל הציאנובקטריום הימי *Trichodesmium erythraeum*, שדווח כיצרן פוטנציאלי של Palytoxins. ב- 2021, דווח של פריחה של הדינופלגלאט הרעיל *Alexandrium catenella* במפרץ חיפה כאשר ריכוז התאים הגיע ל-10^5 תאים לליטר[10]. דינופלגלאט זה, ידוע כיצרן של נוירוטוקסינים מקבוצת ה-Saxitoxins האחראית להרעלה מסוג PSP- שיתוק מהרעלת צדפות[6].

טבלה 1. רשימת מיני פיטופלנקטון הידועים כיצרני רעלנים וזוהו בחופי הים התיכון של ישראל (מתוך[6,7,10]).

Species מין	Taxonomic group קבוצה טקסונומית	Reported toxins רעלנים שדווחו
Ostreopsis sp.	Dinoflagellate דינופלגלאט	Ostreotoxins 1&3
Dinophysis sp.	Dinoflagellate דינופלגלאט	Okadaic acid (dinophysis toxins)
Prorocentrum minimum	Dinoflagellate דינופלגלאט	Okadaic acid
Protoceratium reticulatum	Dinoflagellate דינופלגלאט	(Yessotoxins YTXs)
Karenia brevis (נקרא בעבר *Gymnodinium sanguineum*)	Dinoflagellate דינופלגלאט	Brevetoxins
Alexandrium catenella	Dinoflagellate דינופלגלאט	Saxitoxins
Alexandium minutum	Dinoflagellate דינופלגלאט	PSP Paralytic Shellfish Poisoning (GTX4, neoSTX, GTX3)
Ostreopsis sp.	Dinoflagellate דינופלגלאט	Palytoxin
Akashiwo sanguinea (נקרא בעבר *Gymnodinium breve.*)	Dinoflagellate דינופלגלאט	Surfactants
Pseudonitzschia spp.	Diatoms צורניות	Domoic acid
*Trichodesmium erythraeu*m	Cyanobacterium חיידק כחול	Palytoxin
Microcystis spp.	Cyanobacterium חיידק כחול	Microcystins

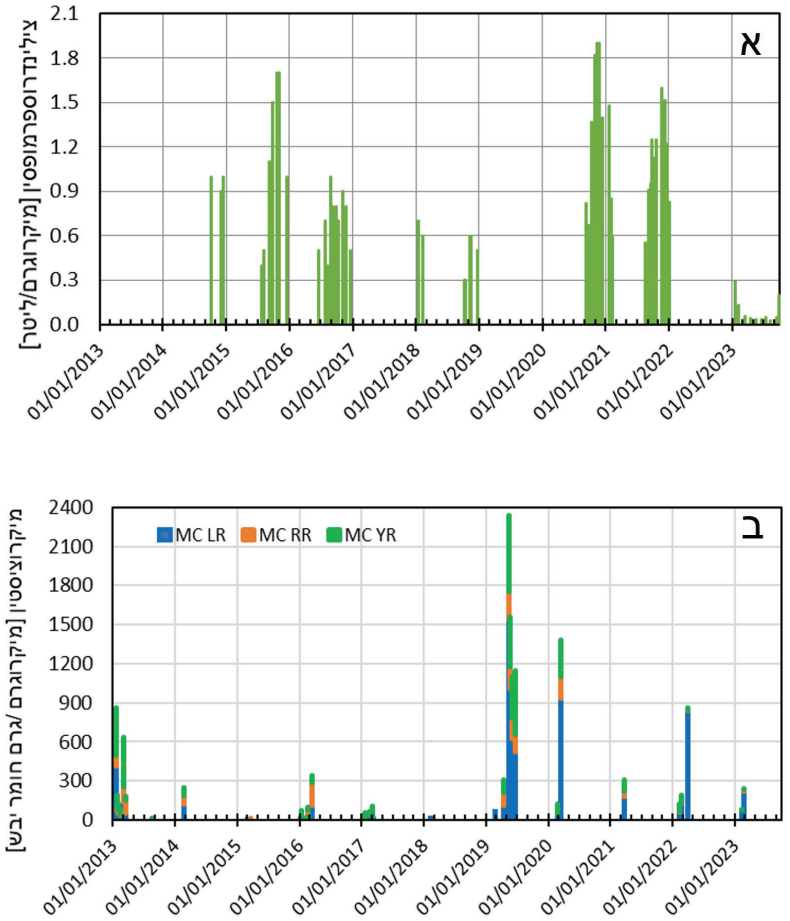
ממצאי תוכנית הניטור בעשור האחרון[10] והסקירה של רהב וחובריו במהדורה זו של "הוד הים"[12], מצביעים על נוכחות מיני פיטופלנקטון שזוהו כיצרנים של רעלנים לאורך החופים הרדודים של ישראל. לפיכך עולה השאלה האם השימוש בחופי ישראל לנופש ובמיוחד במי החופים כמקור למים להתפלה, דורש תגבור של מערך הניטור לבדיקת הימצאות רעלנים של אצות (בדומה למערך הניטור בכנרת, ראה להלן). חשוב לציין שרעלני אצות מסולקים ביעילות גבוהה בתהליכים של אוסמוזה הפוכה ו/או תהליכים תרמיים[13], אבל פריחת אצות, כולל אצות רעילות, עלולה ליצור בעיות תפעוליות כמו סתימה של מערכות סינון קדם והגברת הגידול המיקרוביאלי של ממברנות הסינון[14,15]. לפיכך, פיתוח התאמה ויישום של גישות ניטור מתקדמות לזיהוי מוקדם של פריחות פיטופלנקטון בסביבה הימית מהווה אתגר למערך הניטור הקיים, וצורך מיידי למקבלי ההחלטות של משק המים והסביבה הימית.

איור 1. צילומים של צופת טיפוסית של פריחת מיקרוציסטיס שהתפתחה בכנרת בחורף-אביב בשנים שונות. תשומת הלב מופנית לשינויים בצבע של הצופת, מירוק לחום בין 2009 ל-2016. (הסבר לתופעה בטקסט. האיור לקוח מ[18], באישור ההוצאה לאור).

כנרת, מאגרי מים ומקורות מים יבשתיים – הכנרת היא גוף המים הטבעי העילי היחיד המשמש מקור למי שתייה בישראל. אוכלוסיות הפיטופלנקטון באגם מנוטרת ונחקרת ברציפות מזה עשרות שנים. משנות ה-70 ועד אמצע שנות התשעים של המאה הקודמת, ציאנובקטריה לא היוו מרכיב משמעותי באוכלוסיית הפיטופלנקטון באגם. רק במספר מקרים בודדים דווח על התפתחות אוכלוסיות של ציאנובקטריה מהסוג מיקרוציסטיס *Microcystis*. בשלהי הקיץ של שנת 1994 דווחה פריחה של ציאנובקטריה מקבעות חנקן מהמין *Chrysosporum ovalisporum* שבעבר נקרא *Aphanizomenon ovalisporum*- אפניזומנון אובליספורום. מין זה מופיע בכנרת מאז אותה פריחה, במועד דומה בכל שנה, אך בתפוצה נמוכה בהרבה מזו שנצפתה ב-1994[16]. אפניזומנון פורח בכנרת בעונת הקיץ-סתיו, מייצר את הרעלן Cylindrospermopsin (צילינדרוספרמופסין). רעלנים אחרים בעלי מבנה פפטיד ציקלי הידועים כמיקרוציסטינים זוהו בכנרת בתקופות שבהן נצפתה עלייה משמעותית באוכלוסיות של מיקרוציסטיס, בעיקר בסוף החורף ותחילת האביב (פברואר-אפריל). במועדים אלו, במיוחד בימים שבהם טמפרטורת פני המים עולה מעט, העננות נמוכה, קרינת השמש מרבית והרוחות קלות, אוכלוסיית המיקרוציסטיס צפה אל פני המים ולעיתים יוצרת משטחים רציפים (צופת) על פני המים המוסעים על-ידי הרוח אל החופים, שם הצופת עלולה להצטבר (איור 1). בעוד מולקולות הרעלן צילינדרוספרמופסין מופרשות למים ובעלות מסיסות גבוהה, רעלנים מקבוצת המיקרוציסטינים הם בעלי מסיסות נמוכה ומתרכזים בביומסה, לכן הינם מצויים ביתר שאת בצופת המתרכזת על פני המים. ריכוזי הרעלנים שנמדדים במי האגם ובצופת (איור 2) מדווחים מדי שנה בדוח המעבדה לחקר הכנרת "ניטור ומחקרי כנרת"[17].

ריכוז הרעלנים במי הכנרת בעשור האחרון, כמעט ואינם חוצים את סף ה-2 מיקרוגרם לליטר (איור 2). במרבית המקרים הרעלן הדומיננטי במים הינו צילינדרוספרמופסין תוצר האפניזומנון שפורח בכנרת בשלהי הקיץ (עם הירידה בריכוז החנקן האי-אורגני במים). לעומת זאת, צופת של מיקרוציסטיס הנאספת באגם כוללת בתוכה מיקרוציסטינים מהסוגים MC-LR, MC-RR ו MC-YR בריכוז מצטבר שמגיע לעיתים למעל 2000 מיקרוגרם לגרם חומר יבש (איור B2). בנוסף לסוגים אלו נצפו בצופת מיקרוציסטיס מהכנרת גם הסוגים MC-3ASP RR, MC-LA, MC-LF ו-MC-LW, אך בריכוזים נמוכים יחסית. ריצוף גנטי של אוכלוסיות מיקרוציסטיס שבוצע בדגימות מהכנרת, שנאספו במהלך עשור, הראה שהפריחות מורכבות מתערובת של כ-25 גנוטיפים שונים המשתנים בתפוצתם היחסית לאורך השנים.

עוד נמצא, שהשינוי בהרכב המינים[18], השינויים בהרכב אוכלוסיית המיקרוציסטיס בכנרת, ממינים רעילים ותכולה נמוכה יחסית של פיקואריתרין ("ירוקים") למינים לא רעילים בעלי תכולה גבוהה של פיקואריתרין ("חומים"), נובעים ככל הנראה מתגובה של האוכלוסייה לעלייה הדרגתית בטמפרטורת מי האגם הנרשמת משנה לשנה. עליית טמפרטורת המים נגזרת משינויי אקלים ובמיוחד מעלייה בטמפרטורת האוויר, המשפיעה ישירות על טמפרטורת המים.



איור 2. ריכוזי רעלנים של ציאנובקטריה בכנרת בין השנים 2013 ל-2023. (א) צלינדרוספרמופסין CYN (מיקרוגרם לליטר) במי הכנרת (תחנה A עומק 1 מ') ו (ב) ריכוז מיקרוציסטינים עיקריים MC-LR, MC-RR ו MC-YR (מיקרוגרם לגרם חומר יבש) בצופת שנאספה מהכנרת מאתרים שונים באגם. בשני האיורים ציר ה-X מייצג שנים מתחילת 2013 ועד סוף 2023.

בעשורים האחרונים, הוקמו בישראל מאגרים מים רבים למי השקיה המשמשים מגוון גידולי שדה. מרבית המאגרים הם מאגרים תפעוליים המנקזים נגר עילי, ומי קולחין בדרגות טיפול שונות. מי המאגרים עשירים בתרכובות חנקן

וזרחן המעודדות פריחה של אוכלוסיות מגוונות של אצות וציאנובקטריה. ציאנובקטריה מהוות מרכיב משמעותי באוכלוסיות אלו ככל שריכוז הנוטריינטים במאגר גבוה יותר, ובמיוחד כשעולה היחס של זרחן לחנקן. במקרים רבים, נמצאו אוכלוסיות מהסוגים מיקרוציסטיס, אנבנה (*Anabaena*), אוסילטוריה (*Oscillatoria*) ואפניזומנון, שידועים כיצרני רעלנים[19], אולם לא מתקיים מעקב סדיר אחר תפוצתם והרכב הרעלנים במים. עדויות על פוטנציאל הרעילות במגוון מקורות מים טבעיים וגופי מים באזורים גיאוגרפיים שונים בישראל נאספו לאחרונה, כאשר מינים רעילים זוהו בבריכות דגים ובמאגרי קולחים. גורמים סביבתיים המשפיעים על תפוצה של מיני מיקרוציסטיס רעילים בגופי מים בישראל זוהו בעזרת אנליזה של נוכחות ותפוצה של הגנים *mycD* ו-*mcyA* המשתתפים במסלול הביוסינתזה של מיקרוציסטינים. כ-65% מגופי המים שנבדקו נמצאו חיוביים לנוכחות של מינים של מיקרוציסטיס בעלי פוטנציאל רעילות, והסיכוי למצוא מינים רעילים נמצא בקורלציה חזקה עם ריכוז הזרחן בגופי המים[20].

התרחבות האירועים של פריחת ציאנובקטריה רעילות בכנרת ובמאגרי מים מעלה את הצורך בהגדרה של תקנות וסטנדרטים אשר יקבעו את נוהלי הטיפול במים ואת ערכי הריכוז המרבי של הרעלנים שמותר שיימצאו במי שתייה ובמי הגלם המשמשים לקיט ונופש. ועדת מומחים של ארגון הבריאות העולמי (WHO, World Health Organization) קבעה כי הריכוז המקסימלי של מיקרוציסטינים ושל צלינדרוספרמופסין המומלץ במי שתייה לא יעלה על 1 מיקרוגרם לליטר, ואילו לרחצה וקיט הומלץ על ערך מרבי של 10 מיקרוגרם מיקרוציסטינים לליטר, לכן המליצה הוועדה לסגור את האתר לשימוש קייטנים, בהימצא ערכים החורגים מ-10 מיקרוגרם לליטר[21]. בישראל נקבע בתקנות ערך מרבי של מיקרוציסטין מסוג LR במי שתייה אך אין תקן לסוגים אחרים במי שתייה, כמו גם לשימושי קיט ונופש. בנוסף, אין תקן לצלינדרוספרמופסין במי שתייה ו/או לשימושי קיט ונופש. עם זאת הרשויות, בעידוד וסיוע אנשי המקצוע, עוקבים אחר ריכוזי הרעלנים בכנרת ונוקטים פעולות אופרטיביות בהתאם.

אתגרים ופתרונות

שיפור מערך הניטור בסביבה הימית ובגופי מים מתוקים (כנרת) – שיפור מערך הניטור לזיהוי התפתחות של HABs ו- cyanoHABs נדרש להבנת הבסיס המדעי להתפתחות פריחות ולקבלת החלטות תפעוליות להפחתת הנזקים לסביבה ושימור השירותים שמספקות המערכות המימיות. זיהויי פריחה של מיקרו־אצות וציאנובקטריה יכול להיעשות במספר גישות: א. זיהוי מורפולוגי וגנטי של מיקרו־אצות וציאנובקטריה והערכת ריכוזם במים; ב. מעקב אחר שינויים בריכוז פיגמנטים של אצות וציאנובקטריה (כלורופיל, פיקוציאנין ופיקואריתרין) בהתבסס על אנליזה ספקטרלית; ג. זיהוי הפוטנציאל הגנטי לייצור רעלנים וכימות של רעלני אצות וציאנובקטריה בגוף המים. להלן נתייחס לגישות אלו תוך התמקדות בגישות חדשניות לזיהוי אירועי פריחה בעזרת מעקב ספקטרלית, שיטות גנטיות, ואנליזות כימיות ואימונולוגיות כאמצעי זיהוי וכימות מהירים של התפתחות אוכלוסיות פיטופלנקטון מזיקות.

זיהוי וכימות אוכלוסיות הפיטופלנקטון – זיהוי אוכלוסיות פיטופלנקטון מזיקות מתבצע בדגימות מים שנאספו באתרים לאחר שעברו תהליך שימור ונבחנו תחת מיקרוסקופ אור או מיקרוסקופ פלואורוסנטי. הזיהוי המיקרוסקופי של מיני הפיטופלנקטון מתבסס על קריטריונים מורפולוגיים וספקטרליים לרמה הטקסונומית הרצויה (מין או סוג) וכולל ספירת הפרטים בכל קטגוריה. מיקרוסקופ איכותי חיוני לספירה ולזיהוי של מיני פיטופלנקטון, אבל זיהוי הפרטים לרמת המין והסוג דורש מיומנות וידע טקסונומי רב, והיכרות עם מצאי הפיטופלנקטון בדגימה. גישה לספרות

מקצועית ולמידע טקסונומי מגוון זמין באינטרנט ובהשתלמויות בקורסי הכשרה לזיהוי פיטופלנקטון נדרשים לזיהוי נכון של מגוון מיני הפיטופלנקטון, כולל מינים רעילים/מזיקים.

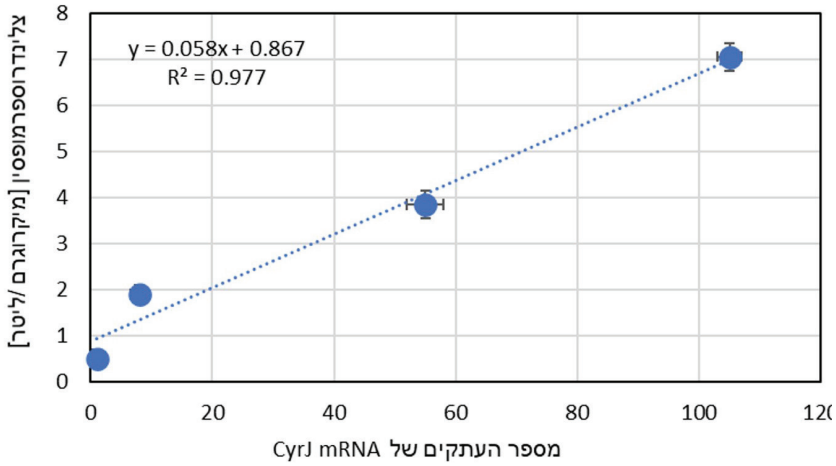
זיהוי ספירה וניתוח אוכלוסיות הפיטופלנקטון בעזרת מיקרוסקופ אור עשויים לקחת זמן רב והצוות המקצועי חייב להיות בעל הכישורים הדרושים כדי לאפשר זיהוי של תאים באמצעות תכונות מורפולוגיות. שכלול אמצעים אופטיים ופיתוח כלים חישוביים הובילו לפיתוח יכולות מתקדמות לזיהוי, ספירה וניתוח אוטומטי של דגימות פיטופלנקטון. מכשירים כמו Flow Cytometer או FlowCAM מאפשרים סקירה מהירה של דגימות פיטופלנקטון[22-24], בעוד מיומנות הזיהוי המיקרוסקופי מקבלת מענה על-ידי יישום שיטות חישוביות כגון רשתות עצביות מלאכותיות (ANN-Artificial Neural Network) המיועדות לזהות מינים באופן אוטומטי שמבוסס על זיהוי דפוסים. תוכנות ANN כוללות פונקציות המאמנות את המערכת לזיהוי מינים מסוימים על בסיס מידע קיים ולספק מידע אמין על מבנה אוכלוסיות הפיטופלנקטון בדגימות בלתי ידועות[25,26]. חשוב לציין שגם שיטות אלה דורשות מומחיות בזיהוי פיטופלנקטון, וזאת בשלבים של אימון התוכנה לזיהוי טקסונומי אמין וביצוע בקרת איכות (מיקרוסקופית על-ידי מומחה) על התוצאות של ניתוח התמונה האוטומטי.

במקביל לשימוש בשיטות הקונבנציונליות המבוססות על ספירה מיקרוסקופית וזיהוי וכימות של תאים, פותחו כלים אנליטיים, המבוססים על שיטות מולקולריות לאיתור וכימות של מיני פיטופלנקטון מזיקים ורעלניהם. גישות אלה מבוססות על הרצף הגנטי של המינים ונשענות על שיטות של Polymerase Chain Reaction (PCR) ועל טכנולוגיות של ריצוף גנטי עמוק וטכניקות כמו *quantitative PCR* (qPCR), Reverse Transcription PCR (RT-PCR) גישות אלה מספקות זיהוי של המין הרלוונטי, גילוי מוקדם בסביבה, קרוב לזמן אמת *(near real time)*, ואף יכולות לשמש לקביעת ריכוז התאים ממין מסוים, כמו גם להעריך את חלקם של גנוטיפים מייצרי רעלן ולא מייצרי רעלן מתוך כלל האוכלוסייה[27]. בישראל קיים אוסף אצות לאומי המכיל מינים רבים יחד עם רצף גנטי המזהה אותם וכולל גם מידע חלקי על הרעילות של כל מין, לכן במקרים מסוימים מסייע מאגר המידע של האוסף בזיהוי מינים על סמך הרצף[28].

ניטור פריחות רעילות על-ידי מעקב אחר גנים חיוניים במסלול מטבולי של טוקסינים עשוי להיות מאתגר בשל המורכבות הגנטית של מסלולים אלה ובשל הימצאות מינים שאיבדו את היכולת לייצר טוקסינים, אך עדיין מקודדים חלק מהגנים במסלולי הביוסינתזה[29]. חשוב לציין שמעקב אחר גנים של ביוסינתזה מעיד על פוטנציאל ייצור רעלנים אך אינו לוקח בחשבון את רמות הביטוי של הגנים ותהליכי הבקרה על הביוסינתזה של הרעלנים[27], ולכן נוכחות הגנים הרלוונטיים אינה מצביעה בהכרח על ריכוז הרעלן, אולם בשילוב עם שיטות ניטור כימיות, קיים יתרון גדול למעקב אחר נוכחות של גנים לביוסניתזה של טוקסינים בגופי מים, כיוון שהדבר מאפשר זיהוי מדויק של המינים עם פוטנציאל לרעילות מתוך כלל המינים המופיעים בסביבה[2]. ניתוח כזה נעשה בגופי מים בישראל בעזרת ריצוף הגן *mycA* לאפיון מגוון מיני מיקרוציסטיס טוקסיקוגנים, והצביע על קבוצה פילוגנטית של מיני מיקרוציסטיס הייחודיים בעיקר לבריכות לגידול דגים ואינם נפוצים בגופי מים אחרים בישראל[20]. לפיכך, דיוק גבוה יותר צפוי כשהניטור מתבצע על שלבי הביטוי הגנטי. תוצאות מניסוי שנעשה עם תרבית של אפניזומנון נתן תוצאות מבטיחות המדגימות מתאם גבוה בין רמות השעתוק של גן הביוסינתזה *cyrJ* לבין רמות הטוקסין שנמדדו בתרבית בשיטות כימיות (איור 3). בשלב זה, נדרשת עבודה נוספת לבחינת רגישות ודיוק השיטה למעקב אחר רעילות בגופי מים, שם הדוגמאות מורכבות בהרבה

מבחינה כימית וביולוגית.

לסיכום, שיטות מולקולריות לניטור פריחות רעילות בגופי מים נראות מבטיחות מאוד, אך עד כה השימוש בהן נותר מוגבל למחקר. הצורך בתיקוף לשימוש שגרתי והעלות של שיטות אלה עדיין מעכבים את השימוש בהן בתוכניות ניטור. גישות ספקטרליות – בהתבסס על התכונות הספקטרליות של פיגמנטים פוטוסינתטיים, פותחו כלים אנליטיים לאנליזה כמותית ואיכותית של אוכלוסיות הפיטופלנקטון. פלואורומטרים המותקנים באתרים בגוף המים (*in situ*) אוספים נתונים ספקטרליים ומשגרים אותם בזמן אמת למרכז איסוף ועיבוד המידע, הפכו בשנים האחרונות אמצעי אמין לזיהוי פריחות פיטופלנקטון. היתרונות והחסרונות של אמצעים אלו נסקרו לאחרונה עבור ניטור ציאנובקטריה בזמן אמת[30]. נמצא שכיול אמין של המערכות מול תרביות של מינים שונים מאפשר כימות בדיוק גבוה במדידת כלורופיל A ופיקוציאנין (פיגמנט של ציאנובקטריה) באתר בזמן אמת, אולם ריכוז גבוה של חומר אורגני מסיס, בעל תכונות ספקטרליות קרובות לאלו של הפיגמנטים, עלול לשבש את אמינות המערכת במיוחד במהלך הדעיכה והתמוטטות הפריחות[30].

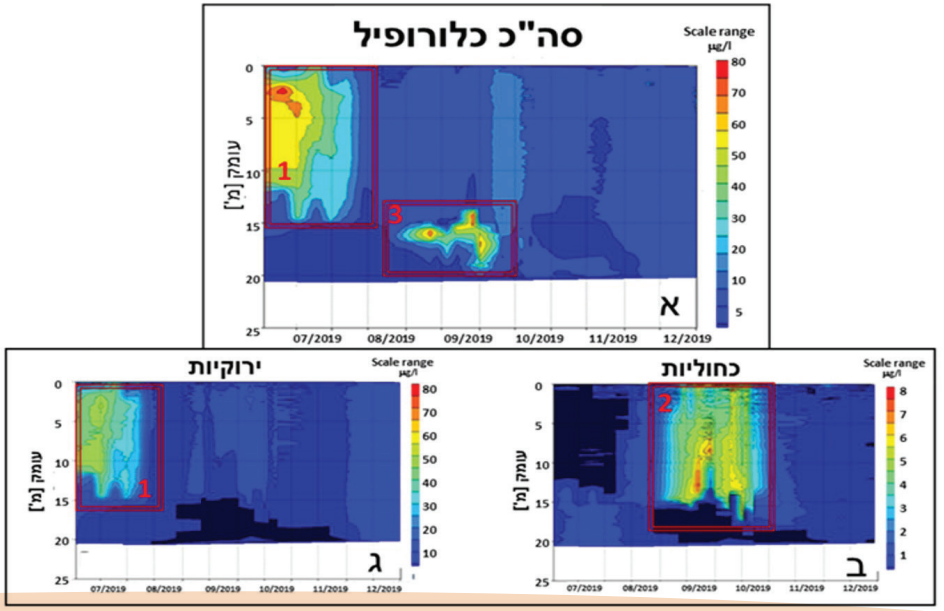


איור 3. מתאם בין ריכוז mRNA של הגן *cyrJ* (מספר עותקים) וריכוזי הרעלן צלינדרוספרמופסין (מיקרוגרם לליטר) בתרבית של *A. ovalisporum* (מתוך דוח המעבדה לחקר הכנרת לשנת 2020[31])

בשני העשורים האחרונים, מיושם בכנרת מערך חיישנים מבוססי פלואורוסנציה רבת ערוצים, שמשולב בפעילות הניטור השבועית. המידע נאסף ומנותח לזיהוי אירועי פריחה של אוכלוסיות הפיטופלנקטון, תוך התמקדות באירועי פריחה של ציאנובקטריה כפי שמודגם באיור 4 ומבוסס על נתוני שדה שנאספו בתדירות שבועית עם פרופילר פלואורסנטי מסוג פלואורופרוב (FluoroProbe, bbe Moldaenke GmbH, Germany). במהלך יוני 2019 תועד בעמודת המים בצפון הכנרת (תחנה G) ריכוז גבוה של כלורופיל (עד 80 מיקרוגרם לליטר) (סימון 1 באיור 4א) שזוהה על-פי הסיגנל הספקטרלי וזיהוי מיקרוסקופי, כאוכלוסייה דומיננטית של ירוקיות (סימון 1 באיור 4ג). מאוגוסט ועד סוף אוקטובר זוהתה אוכלוסייה של ציאנובקטריה (סימון 2 באיור 4ב) שהתפרסה באופן שווה לכל עמודת המים (עד לעומק התרמוקלינה). ריכוז הכלורופיל המיוחס לציאנובקטריה התקבל במועד שבו דווח על התבססות אוכלוסייה

של ציאנובקטריה מהסוגים אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס. מעניין לציין את אוכלוסיית החיידק הפוטוסינתטי כלורוביום *Chlorobium*, שהתפתחה מתחילת אוגוסט ועד אמצע ספטמבר – סימון 3 באיור 4א, במטלימניון (שכבת המים המפרידה בין האפילימניון החם והמחומצן ובין ההיפולימניון הקר וחסר החמצן. המטלימניון מאופיין במפל טמפרטורה והמשטח שבו מפל הטמפרטורה הוא מקסימלי נקרא תרמוקלינה). התופעה מוכרת ותועדה בעבר ומתקיימת בכנרת בקיץ באזורים שבהם קיימת תרמוקלינה יציבה[32].

היתרון של מערכות מדידה מבוססות פלואורוסנציה רב-ערוצית הוא בזיהוי מהיר וכימות של אוכלוסיות פיטופלנקטון על בסיס הרכב הפיגמנטים, וכאן גם מגבלת השיטה. קיים צורך בכיול המערכת מול אוכלוסיות מגוונות של אצות מקבוצות טקסונומיות שונות ובמיוחד מול אוכלוסיות שלהן תפוצה ושליטה בסביבה המנוטרת. בנוסף, למספר קבוצות טקסונומיות מאפיינים ספקטרליים דומים. כך לדוגמה יש קושי להפריד בין אוכלוסיות של דינופלגלטים וצורניות או בין ציאנובקטריה עשירות בפיקואריתרין ובין מינים של אצות אדומיות או קריפטופיטה או חיידקים פוטוסינתטיים (כפי שמודגם באיור 4A סימון 3). במקרים אלו נדרש זיהוי טקסונומי מורפולוגי או גנטי של האוכלוסייה המתפתחת. היישום באתר (*in situ*) של מערכת פלואורוסנציה רב-ערוצית מוגבל לנקודת המדידה וגם אם הוא מופעל כפרופילר ואוסף מידע לעומק עמודת המים, הוא אינו מספק מידע על תפוצת אוכלוסיות הפיטופלנקטון במרחב גוף המים.



איור 4. שינויים בריכוז כלורופיל בעמודת המים בצפון הכנרת (תחנה G) בין יוני לנובמבר 2019 (קיץ-סתיו). א. ריכוז כלורופיל כללי, המלבן המסומן 1 מייצג בעיקר כלורופיל של אוכלוסיית של ירוקיות כפי שניתן ללמוד מגרף ג. האוכלוסייה המסומנת במלבן 3 היא של *כלורוביום* (חיידק פוטוטרופי). ב. כלורופיל שמקורו בציאנובקטריה מסומן 2 ומייצג התפתחות של אוכלוסיות מהסוגים *אפניזומנון* ו*צלינדרוספרמופסיס*. ג. כלורופיל של אוכלוסיית של ירוקיות מסומן 1. סולם הצבעים ל-א ול-ג מייצג ריכוז כלורופיל בין 0 ל-80 מיקרוגרם לליטר ואילו ל ב סולם הצבעים הוא בין 0 ל 8 מיקרוגרם לליטר. המידע נאסף בתדירות שבועית עם מכשיר פלואורופרוב, פרופילר פלואורומטר רב-ערוצי.

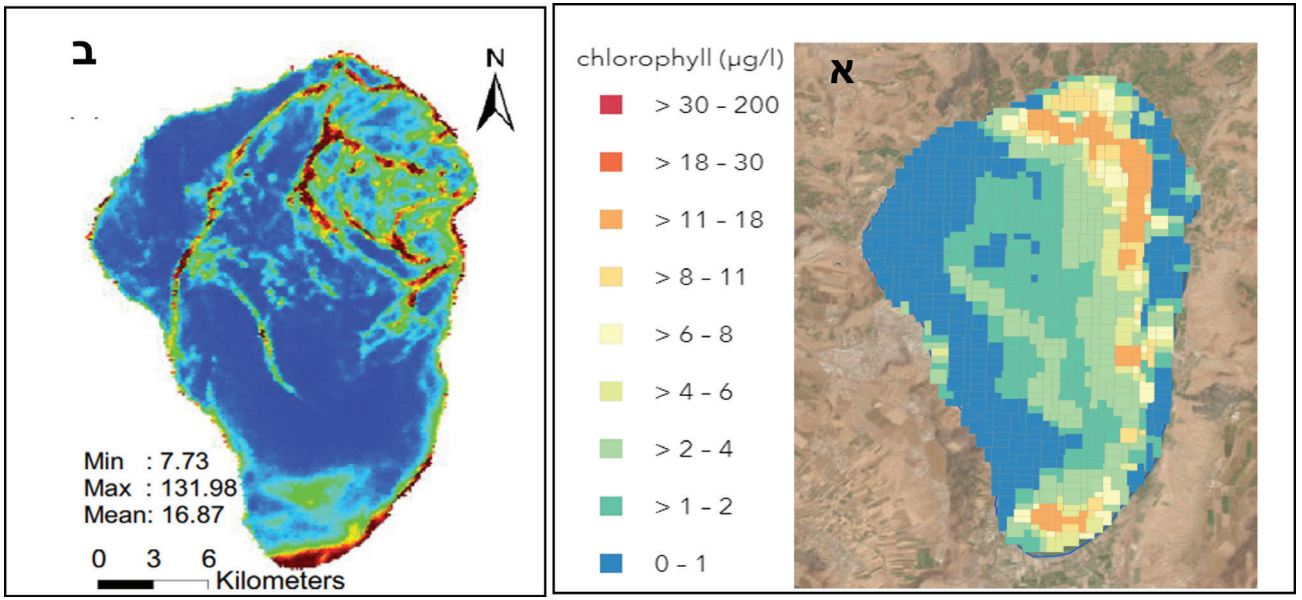
פתרון נאות לשאלת הפיזור המרחבי של אוכלוסיית הפיטופלנקטון באוקיינוסים, באגמים ובגופי מים יבשתיים, ניתן על-ידי יישום אמצעי חישה ספקטרליים על פלטפורמות מרחפות, כגון לוויינים, מטוסים, וכלי טיס בלתי מאוישים (כטב"מים Unmanned Aerial Vehicle UAV). אמצעים אלו מאפשרים ניטור בזמן אמת של פריחת אצות בשטחים נרחבים. בעשורים האחרונים מתקיים מאמץ עולמי למיפוי פריחות של פיטופלנקטון (תוך התמקדות ב HAB) באזורים רחבים של אוקיינוסים וגופי מים יבשתיים באמצעות חישה מרחוק. לשם כך הוצבו מערכות צילום מתקדמות על לווייניים ופותחו אלגוריתמים שונים לחישוב ריכוז הכלורופיל. חישוב זה מתבסס על מדידות ספקטרום ההחזרה מפני המים, ומאפשר זיהוי פריחות של פיטופלנקטון, מהשלבים הראשונים של היווצרות הפריחה ועד היעלמותה[33,34]. מגוון לווייניים בעלי יכולות חישה מתקדמות (רזולוציה ספקטרלית, פריסה מרחבית גבוהה ותדירות מעבר מהירה), בשילוב כיולים מקומיים הכוללים דגימות מים ואנליזות מעבדה, מדידות ספקטרום מעל ומתחת למים וצילום עם מצלמות מולטי והיפר-ספקטרליות משפרים מאוד את יכולות הזיהוי ומאפייני הפריחות של פיטופלנקטון בכנרת ובחופי ישראל.

לרוב, החיישנים הנישאים מספקים מידע בספקטרום הנראה ובספקטרום ה-Near IR (NIR) הרלוונטי לפיגמנטים של פיטופלנקטון, לדוגמה 433 ,686 ננומטר (כלורופיל-*a*) ו-550-650 ננומטר (פיקוציאנין)[35]. שיטות להערכת התפוצה של פיטופלנקטון עושות שימוש בהחזר אור בפסים ספקטרליים מוגדרים וחישוב אינדקסים מבוססי מספר קווים ספקטרליים כמו: Maximum Chlorophyll Index –MCI, Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI), Floating Algae Index -FAI ועוד. לאימות ועיבוד נתוני החישה מרחוק נעשה שימוש בגישות סטטיסטיות כמו Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) כאשר נתוני הייחוס נלקחים בעיקר משני מקורות: האחד הוא מדידות מעבדה לקביעת ריכוזי כלורופיל-a ופיקוציאנין בדגימות מים שנאספו באתר במועד איסוף נתוני הלוויין, והשני הוא על-ידי מדידות ספקטרליות באתר[36].

בנוסף, נתוני החישה מרחוק דורשים תיקונים סביבתיים, אטמוספריים, והתאמה גיאוגרפית. כיום ניתן להשתמש במספר לווייניים לזיהוי ומיפוי פריחות של פיטופלנקטון במרחב מזרח הים התיכון ובכנרת כאשר ללווייניים שונים רזולוציה מרחבית ותדירות מעבר שונה והם נושאים אמצעי חישה ספקטרליים שונים. המחקר בכנרת מתמקד בפיזור המרחבי של cyanoHABs, ובמיוחד פריחות של מיקרוציסטיס, שמאופינות בשונות מרחבית גבוהה כפי שניתן לראות באיור 5 עבור הפיזור של כלורופיל ופיקוציאנין (PC) בשני מועדים שונים של פריחת מיקרוציסטיס בכנרת. חשוב להדגיש שטכניקות של חישה מרחוק מיושמות למחקר הים התיכון ומפרץ אילת אך אינן מתמקדת באירועים של פריחה רעילה של ציאנובקטריה.

הלווייניים, עם תדירות המעבר היומית הקיימת כיום, והפרעות מתנאים אטמוספריים כמו עננות ואובך, אינם מספקים פתרון טוב למיפוי גופי מים קטנים ולמעקב קרוב לזמן אמת אחר התפתחות פריחות מזיקות. לפיכך, המגמה בשנים האחרונות היא ליישם מצלמות רב ערוציות ברזולוציה מרחבית גבוהה המותקנות בתחנה נייחת או על כלים אוטונומיים כגון רחפנים (UAVs), עליהם מצלמה רב-ערוצית או מערכות ספקטרוסקופיה שלהן יכולת כיסוי של שטח נרחב בזמן קצר יחסית[37]. מחקרים שנערכו לאחרונה על חישה מרחוק באמצעות חיישנים מתוחכמים המותקנים על כלי טיס בלתי מאוישים (AUV כטב"מים) חוללו מהפכה בזיהוי וניטור איכות המים. אלגוריתמים לעיבוד תמונה המבוססים על בינה

מלאכותית (AI) שופרו, ולכן לזיהוי וחיזוי פריחת אצות על בסיס שיטות אלו תפקיד מפתח בתיעוד פריחות מזיקות של פיטופלנקטון בכלל וציאנובקטריה בפרט[38].



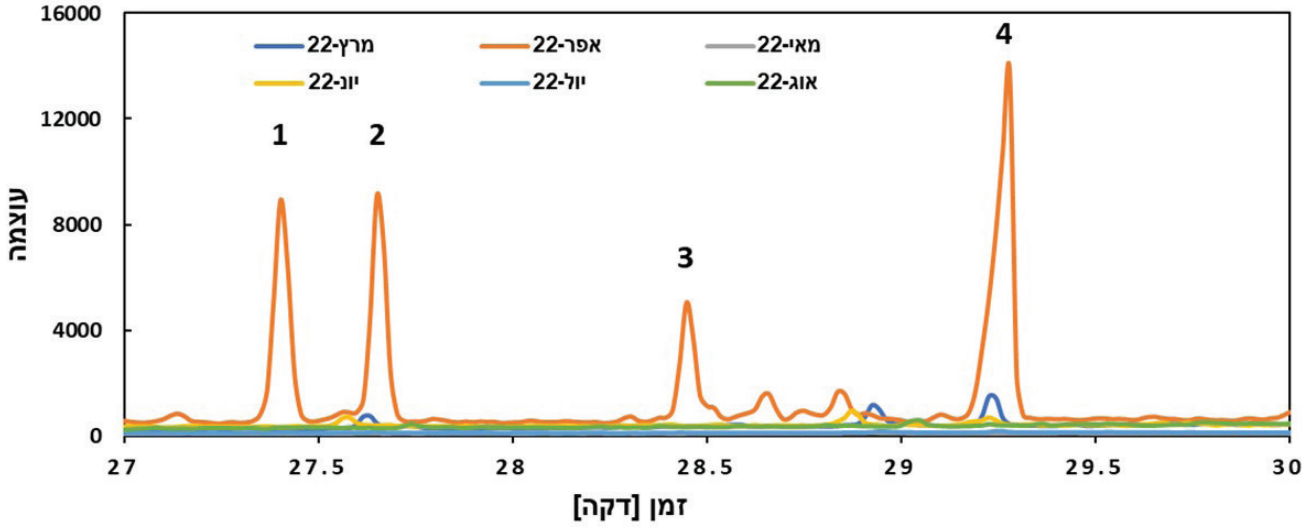
איור 5. הדמיות לוויין לפיזור המרחבי של פריחת מיקרוציסטיס בכנרת א - דוגמה של מפת ריכוזי כלורופיל (Chl-a) כפי שעובדה ממצלמת לוויין Sentinel-3 מתאריך 8/03/2020 והועלתה לפלטפורמת ArcGIS-WEB (מרכז מידע כנרת data satellite Kinneret).ריכוז הכלורופיל מיוצג על-ידי סקלת הצבעים משמאל. ב - התפלגות מרחבית של ריכוז פיקוציאנין (PC, מיצג ציאנובקטריה) במהלך אירוע פריחה של מיקרוציסטיס בכנרת ב-11 במרץ 2013. הנתונים נאספו ממערכת Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO) שהופעלה מתחנת חלל בין השנים 2009-2014 ואספה נתונים ב-128 ערוצים ספקטרליים בתחום האור הנראה ו-NIR במרווח של כ-6 nm ורזולוציה מרחבית גבוהה. צבעי המפה מייצגים ריכוזי PC בין 0 (כחול) ל 50 (אדום) מיקרוגרם לליטר. לקוח מ[39], באישור ההוצאה לאור.

אנליזה של רעלנים – בחינה אנליטית להימצאות הרעלנים מתבצעת באמצעות מגוון שיטות, כשלכל אחת מהשיטות חסרונות ויתרונות משלה. השיטה המדויקת ביותר שבה מבוצע שימוש במעבדה לחקר הכנרת, מבוססת על מערכת כרומטוגרפית נוזלים HPLC הצמודה לגלאי ספקטרלי רב-ערוצי והחל מ-2021, אנליזה באמצעות כרומטוגרף נוזלים המוצמד לגלאי מסות (LC-MS/MS) . שיטה זו בעלת דיוק רב ומסוגלת להבחין בין מספר רב של רעלנים באותה דוגמה. תוצאות של מצאי הרעלנים במי כנרת מוצגות באיור 2 עבור העשור האחרון. שיטה נוספת הקיימת ונמצאת בשימוש במעבדת מקורות מבוססת על גישה אימונולגית ELISA (Enzyme-Linked Immunosorbent Assay). הבדיקה מתבצעת בצלחות פלסטיק המזהות רעלן נבחר, או קבוצת רעלנים לא סלקטיבית באמצעות נוגדן. שיטה זו בעלת יכולת כימות וסלקטיביות נמוכות מהשיטה הקודמת (LC-MS/MS) אך בעלת רגישות גבוהה וביצוע מהיר יחסית. מהלך הבדיקות בשיטות אלו הותאם למעבדות רבות בעולם על-ידי ארגוני סביבה כגון הארגון האמריקאי להגנת הסביבה (EPA). שתי השיטות הללו שתוארו בוחנות את המים והצופת בכנרת באופן תדיר כל השנה תוך

שיתוף פעולה בין מעבדת מקורות והמעבדה לחקר הכנרת. אנליזות הרעלנים בכנרת מתמקדות במספר מצומצם של רעלנים המופיעים מעת לעת באגם. עם זאת כפי שדווח בספרות המקצועית, קיים מספר רעלנים גדול הנמצא במקומות שונים בעולם, שמופרשים על-ידי מגוון ציאנובקטריה שחלקם נמצאו גם בחופי ישראל. מכאן עולה הצורך לאמת את הימצאותם של ציאנובקטריה נוספים בעלי פוטנציאל הפרשת טוקסינים באגם הכנרת ואף במקורות מים אחרים (חופי הים התיכון, מפרץ אילת, מאגרים וכו'). בעוד התאמת מערך בדיקות אימונולוגיות לביסוס אנליזות לרעלן חדש תלוי בהיצע הקיים של נוגדנים מתאימים, ביסוס מערך אנליזות לרעלן חדש בעזרת LC-MS/MS הינו, במרבית המקרים, תהליך פשוט יחסית גם אם לא קיים הליך מיצוי תואם המומלץ על-ידי ארגונים סביבתיים דוגמת ה-EPA.

לאחרונה אומצו מספר שיטות נוספות בעלות דיוק נמוך יותר אך מהירות ופשוטות יחסית. השיטה הראשונה כוללת שימוש במקלוני זיהוי דוגמת היערכות לבחינת הימצאות וירוס הקורונה. שיטה זו מבוססת על זיהוי של הרעלן בעזרת נוגדנים, ונמצאת בשימוש כיום כחלק ממערך פיילוט הממוקם בין המעבדה לחקר הכנרת לבין איגוד ערים כנרת ורשות המים במספר חופי אגם הכנרת. יישום האנליזות מבוצע על-ידי מנהלי החופים דוגית, אמנון, צינברי וצמח וכולל בדיקת מי החופים באמצעות המקלונים וקבלת תוצאות שאותן ניתן לצלם. באמצעות שיטה זו ניתן להבדיל בין ריכוזים שאינם מוגדרים כבעייתיים על-ידי ה-EPA לחשיפת רוחצים וקייטנים ובין ריכוזים שבהם יש לטפל במי האגם ו/או לאסור כניסת מתרחצים מחשש לבריאותם.

שיטה נוספת, פרי פיתוח מעבדת ד"ר אסטרחן ובמימון רשות המים, כוללת זיהוי סממנים מולקולריים נדיפים המצביעים על נוכחות מיני ציאנובקטריה במי האגם. בעזרת כלי דיגום פשוטים המבוססים על שאיבת אוויר דרך חומר סופח, ניתן לאסוף דוגמאות אוויר מאזור החשוד בנוכחות ציאנובקטריה. את החומר הסופח ניתן למצות ולבחון בעזרת גז כרומטוגרף הצמוד לספקטרוגרף מסות ולזהות מולקולות נדיפות הנפלטות מציאנובקטריה. כך אובחנו חומרים נדיפים אופייניים בתרביות של מספר מינים שונים של ציאנובקטריה, חלקם אובחנו שוב במרכז האגם בזמנים שבהם נצפו מוקדי צופת רבים המכילים תאי מיקרוציסטיס. שיטה זו פשוטה יחסית ויתרונה הוא בכך שהיא מאפשרת ניטור נרחב שבעתיד יוכל להיות משולב גם במערך הניטור החופי באגם לאבחון נוכחות ציאנובקטריה ללא צורך תכוף בסירות. באיור 6, המציג תוצאות גז כרומטוגרף מסות של דגימות אוויר מהכנרת, ניתן לזהות ארבעה מרכיבים נדיפים ייחודיים למיקרוציסטיס שריכוזם משתנה במועדים שונים, כאשר ריכוזם הגבוה באגם נמדד בחודש אפריל 2022, למרות שריכוז מושבות המיקרוציסטיס היה נמוך בשנה זו. ניתן לציין את יציאתו של חומר מספר 2 בתרשים שזוהה בעזרת סטנדרט מתאים כחומר β cyclocitral הידוע ספרותית כחומר הקיים ספציפית במיני מיקרוציסטיס. בשל רגישות השיטה ופשטות איסוף הדגימות, מסתמן כי זוהי שיטה יעילה ואמינה לזיהוי אוכלוסיות מיקרוציסטיס בכנרת גם כשתפוצת התאים נמוכה.

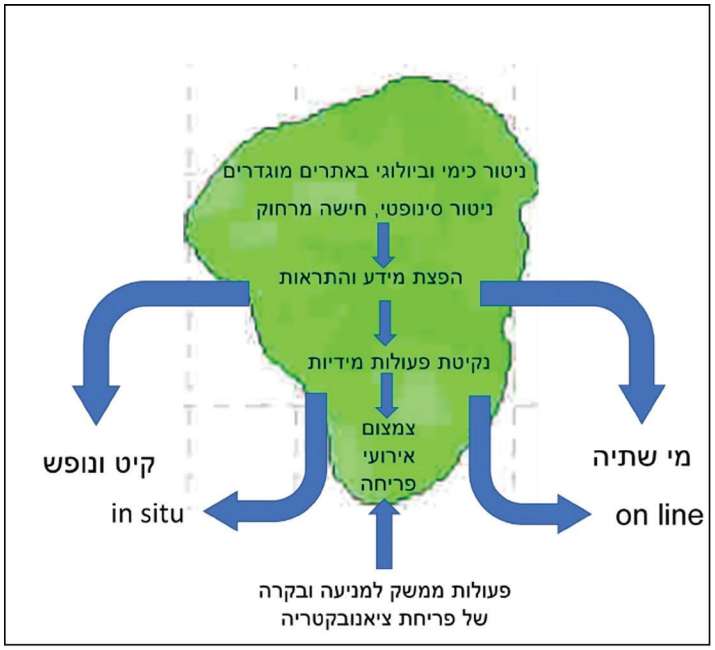


איור 6. תוצאות גולמיות לאנליזת גז כרומטוגרף שבוצעה לסריקת דגימות חומרים נדיפים (VOC) שנדגמו במרכז הכנרת: ממרץ ועד אוגוסט 2022. המספרים מייצגים חומרים נדיפים שונים, המאובחנים בזמני יציאה שונים במערכת גז כרומטוגרף. מרכיבים נדיפים אלו נמצאו כאופייניים לתרביות מיקרוציסטיס. מערכת הצירים כוללת זמני יציאה (ציר ה X) ואבחון רמות החומרים ביחידות שרירותיות (ציר Y).

שליטה ובקרה בפריחות מזיקות של פיטופלנקטון בדגש על ציאנובקטריה

הפעולות הנדרשות לשליטה ובקרה של פריחות פיטופלנקטון מזיקות (אירועים של cyanoHAB) מתוארות סכמתית באיור 7, החל מזיהוי התופעה על בסיס מערך ניטור מתקדם, דרך פעולות ממשק לצמצומה וכלה בנקיטה של צעדי חירום במערכי אספקת מים לשתייה וטיפול באזורים נגועים. הסכמה המתוארת באיור 7 מתמקדת בכנרת אך העקרונות הם כללים והפעולות המפורטות בה נדרשות על מנת לצמצם את התופעה ולאפשר אספקת שירותי מערכת, כולל קיט ונופש. הנחת היסוד היא שפריחות של פיטופלנקטון לא יתקיימו ללא אספקה עודפת של נוטריינטים. בנוסף לכך, ההתחממות הגלובלית נותנת יתרון לציאנובקטריה על פני קבוצות פיטופלנקטון אחרות[40-43]. במטרה לצמצם אירועי פריחה, נדרשת פעולה להפחתת עומס חומרי ההזנה המגיעים אל גופי המים מאגן ההיקוות[44]. לביצוע פעולה זו נדרשים זמן ומשאבים, והיא עשויה להוביל להפחתה משמעותית של אירועי פריחה של פריחות מזיקות ושל עוצמת הפריחות בטווח זמן ארוך. מאידך, פריחות חריגות של ציאנובקטריה בגופי מים המשמשים כמקור למי שתייה ולצורכי קיט ונופש דורשות התייחסות וטיפול מיידיים במטרה להמשיך ולספק מים באיכות קבילה, ולספק את שרותי המערכת האחרים, תוך כדי אירועים של פריחות. הגישה לאבחון וטיפול באירועי פריחה מזיקה/רעילה במערכות אגמיות מוצגת

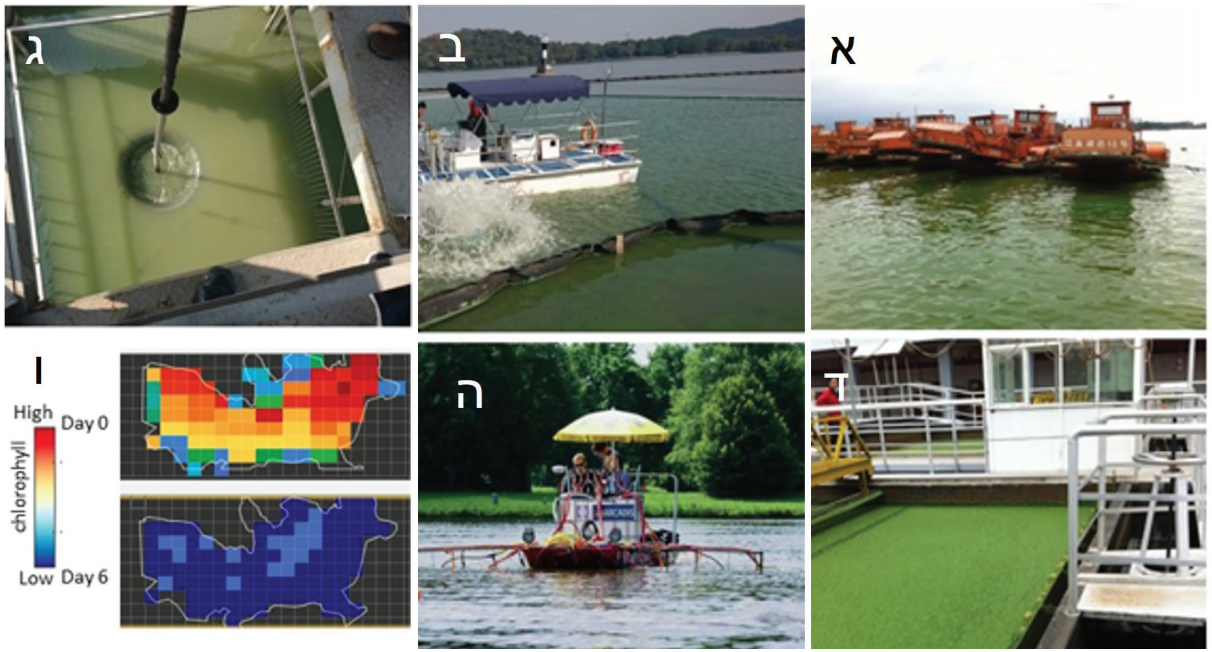
באיור 7 על רקע מפת הכנרת כוללת ניטור באתרים מוגדרים וניטור סינופטי שתוצאותיהם מופצים כמידע לציבור ולמקבלי ההחלטות ומהווים בסיס להתראה במקרה של ערכים חריגים של ריכוזי ציאנובקטריה ורעלנים. בתגובה להתראות אלו תידרש נקיטת פעולות מיידיות הכוללות פנייה לציבור המשתמשים בשירותי האגם ויישום פעולות לצמצום הפריחה והשלכותיה. הטיפול במי האגם שמשמשים כמי גלם למי שתייה יתמקד במערכות השאיבה והטיפול במים (on line) בשיטות של תהליכי חמצון מתקדמים (advanced oxidation processes) AOP או בשיטות ספיחה, לסילוק הרעלנים. בנוסף יידרש טיפול במי האגם באתר או אתרים שבהם מתרכזת הפריחה (in situ), במטרה לצמצם את אוכלוסיית הציאנובקטריה והרעלנים הנלווים ולהנגיש את האגם לצורכי קיט ונופש (איור 7).



איור 7. הצגה סכמתית של כלל הפעולות הנדרשות לשליטה ובקרה של פריחות מזיקות של פיטופלנקטון, מערכת הכנרת כמודל. מערך ניטור מתקדם המספק מידע קרוב לזמן אמת שמפיץ מידע לרשויות ולמקבלי ההחלטות ומגבש המלצות לנקיטת פעולות מיידיות במצבי חירום (מערכי אספקת מי שתייה מהאגם ושירותי מערכת אחרים כמו קיט ונופש) וכן המלצות לניהול המערכת האגמית (אגם - אגן היקוות) לצמצום עומסי נוטריינטים ומניעה של פריחות מזיקות (פירוט נוסף בטקסט).

בעולם וגם בישראל פותחו, נבחנו ויושמו גישות טיפול מגוונות שניתן ליישמן בגוף המים על מנת לשלוט ו/או לצמצם אירועים של cyanoHABs, החל מסילוק הביומסה התאית, הפעלת אמצעים פיזיקליים לאיסוף הביומסה וכלה בטיפולים כימיים ישירים כפי שמודגם באיור 8. בסקירה מקיפה, שערכו Matthijs ועמיתיו[45], הם שללו יישומים של קוטלי עשבים נפוצים כגון נחושת גופרתית, דיורון (diuron) או אנדותל (endothall) כדי להשיג שליטה בפריחות של ציאנובקטריה. בגלל ההשפעות השליליות של חומרים אלו על מכלול מרכיבים של המערכת האקווטית הם המליצו להחליף אותם במי

חמצן שלהם ספציפיות גבוהה בעיכוב ההתפתחות של ציאנובקטריה ופגיעה שולית באוכלוסיות אחרות במערכת. היתרון שהציגו לתרכובות החלופיות הוא שהן מתכלות או ניתנות להפיכה למוצרים לא רעילים לאחר היישום.

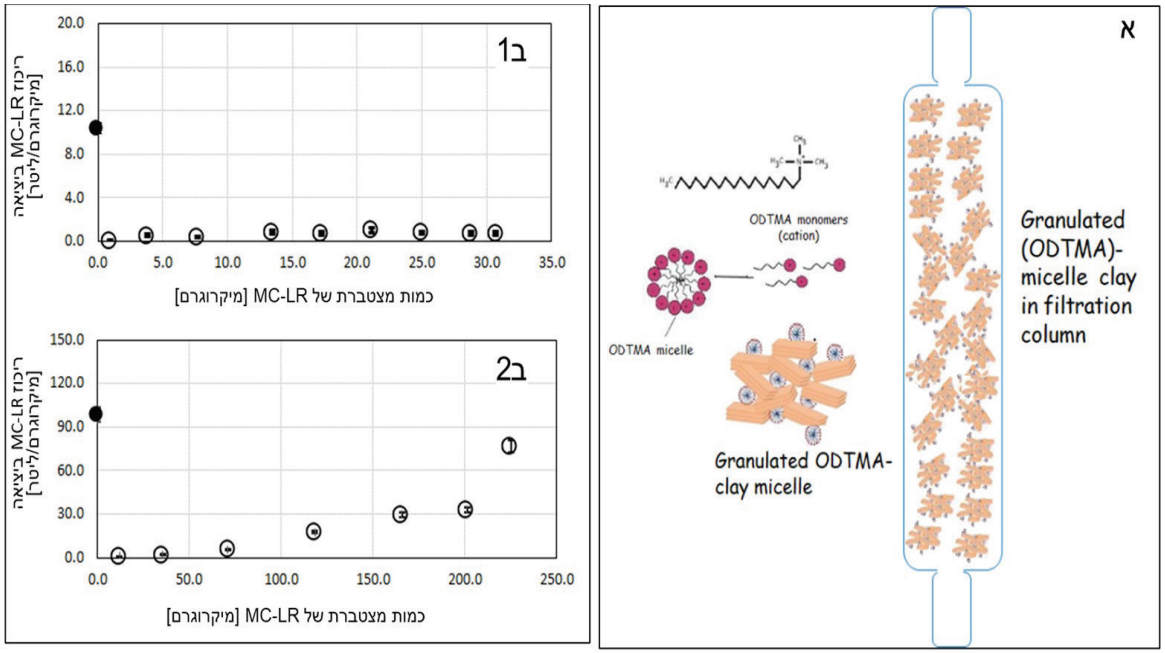


איור 8. טכניקות שונות המשמשות לטפל בפריחות של ציאנובקטריה בגופי מים. א - צי של סירות הנושאות מכשירי סינון לפינוי מושבות מיקרוציסטיס (דיאנצ'י, סין). ב - סירה הנושאת ומפעילה מכשירי אולטרסאונד באגם טאי, סין). ג - בור ניסיוני להפעלת לחץ הידרוסטטי במטרה למוטט את שלפוחיות הגז ולעכב את הציפה של מושבות מיקרוציסטיס (אגם טאי, סין). ד - טיפול Flocculation להסרת ביומסה ממים עמוסי מיקרוציסטיס במהלך אירוע פריחה באגם טאי, סין. ה - סירה המותאמת לפיזור מי חמצן במהלך פריחה באגם קוטשוי[49]. ו-הערכה של פיזור מרחבי של כלורופיל מבוססת תצלומי לוויין מאגם ננהו, סין, ביום 0 וביום ה-6 לאחר טיפול בתכשיר צף המכיל נחושת גופרתית (מקור: האיור מתוך [59] .(https//:bgtechs.com).

השראה של עקה חמצונית מהווה כיום גישה מרכזית למיתון פריחות רעילות. באופן כללי, ציאנובקטריה רגישים לעקה חמצונית, שמקורה ביישום מי חמצן (H_2O_2), הרבה יותר מאשר פיטופלנקטון אאוקריוטיים רבים[46-50]. ציאנובקטריה מראים יכולת מוגבלת לפרק H_2O_2 יחסית לאצות אאוקריוטיות[51,52]. מי חמצן נחשבים למחמצן יעיל הגורם לעקה חמצונית בתנאים סביבתיים, וניתן לספק אותם כתמיסה נוזלית[49,53]. נבדקו גם חלופות אחרות כמו נתרן פר-קרבונט (SPC) המשחרר H_2O_2 ומייצר צורוני חמצן[54]. באופן דומה, הוצע היישום של גרגירי פאראוקסידים מתכתיים כגון סידן פראוקיד[55] וחומצה פרה-אצטית[13]. בניסויים, שבהם יושמו ריכוזי H_2O_2 שונים כדי להעריך את הריכוז היעיל, נמצאה רגישות דיפרנציאלית של ציאנובקטריה ל-H_2O_2: פלנקטוטריקס הראה את הרגישות הגבוהה ביותר, מיקרוציסטיס היה רגיש למדי, וצלינדרוספרמופסיס היה עמיד ביותר[48,56]. "טביעת האצבע האקולוגית" של טיפולי H_2O_2 נבדקה בניסויי מעבדה וניסויי שדה בקנה-מידה קטן. מערך בדיקות זה כלל את ההשפעה על חיידקים, זואופלנקטון ופיטופלנקטון, במיוחד בריכוז H_2O_2 מעל 4 מ"ג/ל, שהוא מינון הסף הקטלני למיקרוציסטיס[34,57,58]. אף-על-פי שהייתה שונות מסוימת

בין הדיווחים, שככל הנראה שיקפה את התנאים הביוטיים והאביוטיים המקומיים, המסקנה הכוללת הייתה שמינון H_2O_2 הנדרש כדי להקטין באופן משמעותי את אוכלוסיית הציאנובקטריה משפיע גם על אורגניזמים אחרים.
בנוסף, חומרים פעילי שטח סינתטיים כגון תרכובות אמוניום רבעוניות הנפוצות בתעשיית המזון, דווחו כאלגיצידים Quaternary ammonium compounds, QACs, ובקטריוצידים פעילים[60,61], ולאחרונה נמצאו כיעילים כנגד ציאנובקטריה[62]. תרכובות כמו Alkyltrimethylammonium (ATMAs) שהם חומרים פעילי שטח קטיוניים מסוג QAC מעכבים פוטוסינתזה בציאנובקטריה ובאצות עם סלקטיביות ברורה לעיכוב ופגיעה בציאנובקטריה[62]. QACs מייצגים סוגים יעילים של חומרי חיטוי במשך כמעט מאה שנה[63] ויש להם מנגנון פעולה בדומה לחומרים פעילי שטח אחרים המבוססים על אינטראקציות אלקטרוסטטיות בין הראש הטעון חיובית של המולקולה לבין קרום תאי החיידקים הטעון שלילית. מהלך זה מוביל לחדירה של שרשראות הצד ההידרופוביות לתוך האזור התוך-ממברנלי, ובסופו של דבר לפריצת הממברנה, להתפרקות התא ולדליפה של מומסים וחלבונים[64].

אירועים חריגים של פריחת ציאנובקטריה רעילות באגמים המשמשים מקור למי שתייה, ופגיעה משמעותית במערכות אספקת מי שתייה לאוכלוסייה של אלפי צרכנים, דווחו בעשורים האחרונים בסין[65] ובמדינת אוהיו בארה"ב[66,67]. בישראל, פריחות של ציאנובקטריה רעילות מהסוגים *Microcystis* ו-*Aphanizomenon* דווחו בכנרת בשני העשורים האחרונים[68] (מוצג באיור 2), והביאו לגיבוש מערך ניטור ודיווח. עד היום, בכל האירועים של פריחת ציאנובקטריה רעילות בכנרת, הרעלנים סולקו במתקני הטיפול הקיימים. אולם, מתקיים מחקר לפיתוח ובחינה של מערכות טיפול ייחודיות/חדשניות לסילוק מטרדים אלו ממי הגלם, וזאת ככלי שיעמוד לרשות ספק המים לעת הצורך. לאחרונה נבחנו אמצעים פיזיקו-כימיים לסילוק יעיל של ביומסה של פיטופלנקטון ובמיוחד של ציאנובקטריה והרעלנים המיוצרים על-ידי אורגניזמים אלו. במסגרת זו יושמו חומרים מרוכבים גרנולריים של חרסית ומיצלות QAC (Quaternary Ammonium Compounds) מסוג Octadecyltrimethyl Ammonium (ODTMA), לסילוק מיקרוציסטינים (MCs) ממים, לרמה שהיא מתחת לסף המותר במי שתייה של 1 מיקרוגרם/ליטר, באמצעות סינון (איור 9). נמצא שלמרוכב חרסית מיצלה קיבולת של 1500 מ"ג MC-LR לק"ג מרוכב. יכולות דומות הוערכו עבור הסרת מיקרוציסטינים נוספים (MC-WR, MC-3aspWR ו- MC-YR), בעוד שיכולות נמוכות משמעותית נרשמו עבור מיקרוציסטינים בעלי מטען חיובי יותר, כגון MC-RR ו-MC-3aspRR. את תוצאות הסינון ניתן היה להתאים למודל סינון המתייחס להסעה ולספיחה/שחרור של רעלן אחד או מספר רעלים ולחשב סילוק של מיקרוציסטינים ממים במגוון מצבים. בעבודה זו הודגם שמרוכבים על בסיס ODTMA-בנטוניט יעילים בהסרת מיקרוציסטינים ממי השתייה[69].



איור 9 . א. תיאור סכמתי של מערכת סינון המכילה מצע גרנולרי מיצלה-חרסית המבוסס על QAC מסוג Octadecyltrimethyl Ammonium (ODTMA). מוצג המבנה כימי של ODTMA, המיצלה והגרנולות חרסית מיצלה שמשמשות למילוי עמודת סינון. ב. תוצאות הסינון של תמיסות מימיות המכילות מיקרוציסטין מסוג MC-LR על קולונה המכילה מצע גרנולרי מיצלה-חרסית, ריכוז MC-LR ביציאה מהקולונה כתלות בכמות הרעלן שהוזרמה. ב1. ריכוז MC-LR בהזנה, 10 מיקרוגרם לליטר. ב2. ריכוז MC-LR בהזנה, 100 מיקרוגרם לליטר (נקודות שחורות בגרפים).

סיכום ומסקנות

פריחות של פיטופלנקטון רעיל ושאינו רעיל ימשיכו להתקיים הן בסביבה הימית בחופי ישראל והן בכנרת ובגופי מים מתוקים בשל העתרה נמשכת של הסביבה הימית וגם בשל מגמת ההתחממות הגלובלית.

פריחות של מיני פיטופלנקטון, כולל פריחות מזיקות המייצרות רעלנים, עלולות לגרום לבעיות בריאות לאדם כמו תסמינים נשימתיים ונוירולוגיים, פגיעה בתפקוד הכבד ומוות, פגיעה באקוסיסטמה, לתמותה המונית של דגים, פגיעה קשה בתעשיית הצדפות והרכיכות (כשתתפתח) והשפעה על תפעול מתקני התפלת מי ים.

נוכחות של מיני פיטופלנקטון רעילים זוהתה ודווחה במי החופים של ישראל. החשש לפגיעה במערכות התפלת מי ים באירועים של פריחות מינים אלו הוא בעיקר בפגיעה במערכות סינון הקדם של מתקני ההתפלה. מאחר שרעלני אצות מסולקים ביעילות גבוהה בתהליכים של אוסמוזה הפוכה ו/או תהליכים תרמיים, הסיכוי של דליפת רעלני אצות למים המיוצרים הוא נמוך.

מזה שלשה עשורים, פריחות רעילות של ציאנובקטריה הן תופעה עונתית בכנרת וללא מעקב וטיפול מתאים עלולה

להיות לה השפעה על צרכני המים. לפיכך בכנרת מופעלת תוכנית ניטור ממוקדת בפריחות רעילות של ציאנובקטריה. שכלול מערך הניטור הן בהיבט של זיהוי והערכת מצאי הפיטופלנקטון, והן בשילוב ושדרוג אמצעים מולקולריים וגישות כימיות וספקטרליות, מהווה יעד חשוב לבניית מערך התראה בזמן אמת וטיפול באירועי פריחה.
הכנת אמצעים אמינים ויעילים לטיפול באירועי פריחה באגם, ולסילוק רעלני ציאנובקטריה מהמים המסופקים מהכנרת נדרשת לטיפול באירועי קיצון של פריחת ציאנובקטריה בכנרת.

רשימת מקורות

1. Gobler, C. J. Climate change and harmful algal blooms: insights and perspective. *Harmful algae* **91**, 101731 .(2020)
2. Anderson, D. M., Cembella, A. D. & Hallegraeff, G. M. Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. *Ann. Rev. Mar. Sci.* **4**, 143-176.(2012).
3. Dai, Y. *et al.* Coastal phytoplankton blooms expand and intensify in the 21st century. *Nature* **615**, 280-284 .(2023).
4. Plaas, H. E. & Paerl, H. W. Toxic cyanobacteria: a growing threat to water and air quality. *Environ. Sci. Technol.* **55**, 44-64.(2020).
5. Sukenik, A., Quesada, A. & Salmaso, N. Global expansion of toxic and non-toxic cyanobacteria: effect on ecosystem functioning. *Biodivers. Conserv.* **24**, 889-908.(2015).
6. סוקניק, א. & גורדון, נ. אצות ובקטריות כחוליות Cyanobacteria רעילות בסביבה הימית והמימית של ישראל. *הוד הים* יציבות ושיוני במערכות הימיות של ישראל (עורכת נ סטמבלר) 125-111 (2014).
7. סטמבלר, נ. וחובריו. פריחות של מיקרו-אצות וחיידקים כחולים בסביבה המימית והסיכונים מהן. *אקולוגיה וסביבה* **9**, 29-18 .(2018)
8. Griffith, A. W. & Gobler, C. J .Harmful algal blooms: A climate change co-stressor in marine and freshwater ecosystems. *Harmful Algae* **91**, 1015902 (2020). https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.03.008
9. Rombouts, I. *et al.* Changes in marine phytoplankton diversity: Assessment under the Marine Strategy Framework Directive. *Ecol. Indic.* **102**, 265-277. (2019).
10. תוכנית הניטור הלאומית, <https://www.ocean.org.il/%d7%93%d7%95%d7%97%d7%95%d7%aa-%d7%9c%d7%a6%d7%99%d7%91%d7%95%d7%a8>)
11. Kress, N. & Herut, B. Hypernutrification in the oligotrophic eastern Mediterranean: A study in Haifa Bay (Israel). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **46**, 645-656. (1998).
12. רהב, א., גורדון, נ., בלקין, נ., רובין-בלום, מ. וחרות, ח. הוד הים איתנות ותמורות עורכת נ. סטמבלר (2024).
13. Buley, R. P. *et al* .Field evaluation of seven products to control cyanobacterial blooms in aquaculture. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1-13. (2021).

14. Villacorte, L. O. *et al.* Seawater reverse osmosis desalination and (harmful) algal blooms. *Desalination* **360**. 61-80 (2015).
15. Alotaibia, G. F., Alasmarib, R. S. & Alzowaidc, A. N. A review of harmful algal blooms (HABs) and their potential impacts on desalination facilities. *Desalin. Water Treat.* **252**, 1-17. (2022).
16. Hadas, O. *et al.* Appearance and establishment of diazotrophic cyanobacteria in Lake Kinneret, Israel. *Fresh. Biol.* **57**, 1214-1227. (2012).
17. דוח ניטור ומחקרי כנרת, <www.ocean.org.il/wp-content/uploads/2023/07/%D7%93%D7%95%D7%97%20%D7%A0%D7%99%D7%98%D7%95%D7%A8%20%D7%95%D7%9E%D7%97%D7%A7%D7%A8%D7%99%20%D7%9B%D7%A0%D7%A8%D7%AA%20%D7%9C%D7%A9%D7%A0%D7%AA%202021_compressed.pdf> (2021).
18. Ninio, S., Lupu, A., Viner-Mozzini, Y., Zohary, T. & Sukenik, A. Multiannual variations in Microcystis bloom episodes–Temperature drives shift in species composition. *Harmful Algae* **92**, 101710. (2020)
19. Marmen, S. *et al.* Seasonal dynamics are the major driver of microbial diversity and composition in intensive freshwater aquaculture. *Front. Microbiol.* **12**, 679743. (2021).
20. Marmen, S. *et al.* Distribution and habitat specificity of potentially-toxic *Microcystis* across climate, land, and water use gradients. *Front. Microbiol.* **7**, 271. (2016).
21. Chorus, I. & Welker, M. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management.* (CRC Press, 2021).
22. Hrycik, A. R., Shambaugh, A. & Stockwell, J. D. Comparison of FlowCAM and microscope biovolume measurements for a diverse freshwater phytoplankton community. *J. Plank. Res.* **41**, 849-8. (2019).
23. Karlson, B., Cusack, C. & Bresnan, E. Vol. 55 - Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis *Manuals and Guides* (Intergovernmental Oceanographic Commission, 2010).
24. Olson, R. J., Zettler, E. R. & DuRand, M .D. in *Handbook of methods in aquatic microbial ecology* 175-186 (CRC Press, 2018).
25. 25 Ma, P. *et al.* A state-of-the-art survey of object detection techniques in microorganism image analysis: from classical methods to deep learning approaches. *Artif Intell. Rev.* **56**, 1627-1698. (2023).
26. 26 Pu, S., Zhang, F., Shu, Y. & Fu, W. Microscopic image recognition of diatoms based on deep learning. *J. Phycol.* (2023).
27. Humbert, J.-F., Quiblier, C. & Gugger, M. Molecular approaches for monitoring potentially toxic marine and freshwater phytoplankton species. *Anal. Bioanal. Chem.* **397**, 1723-1732. (2010).
28. Kaplan-Levy, R. N., Alster, A., Shlichter, M. & Zohary, T. The Israel National Culture Collection of Algae (INCCA) for biodiversity conservation. *Nova Hedwigia*, 231-243. (2020).
29. Dittmann, E. & Börner, T. Genetic contributions to the risk assessment of microcystin in the environment. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **203**, 192-200. (2005).

30. Bertone, E., Burford, M. A & .Hamilton, D. P. Fluorescence probes for real-time remote cyanobacteria monitoring: A review of challenges and opportunities. *Water Research* **141**, 152-162 (2018). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.001

31. דוח ניטור ומחקרי כנרת, https/:www.ocean.org.il/wp-content uploads/2023/07/%D7%93%D7%95%D7%97%20%D7%A0%D7%99%D7%98%D7%95%D7%A8%20%D7%95%D7%9E%D7%97%D7%A7%D7%A8%D7%99%20%D7%9B%D7%A0%D7%A8%D7%AA%20%D7%9C%D7-%A9%D7%A0%D7%AA%202020_compressed.pdf> (2020).

32. Ninio, S. *et al.* Metalimnetic chlorophyll maxima in Lake Kinneret-*Chlorobium* revisited. *Freshw. Biol.* **66**, 468-480.(2021).

33. Carvalho, G. A., Minnett, P. J., Fleming, L. E., Banzon, V. F. & Baringer, W. Satellite remote sensing of harmful algal blooms: A new multi-algorithm method for detecting the Florida Red Tide (*Karenia brevis*). *Harmful algae* **9**, 440-448. (2010).

34. Sinha, A. K., Eggleton, M. A. & Lochmann, R. T. An environmentally friendly approach for mitigating cyanobacterial bloom and their toxins in hypereutrophic ponds :Potentiality of a newly developed granular hydrogen peroxide-based compound. *Sci. Tot. Environ.* **637**, 524-537 (2018). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.023

35. Page, B. P., Kumar, A. & Mishra, D. R. A novel cross-satellite based assessment of the spatio-temporal development of a cyanobacterial harmful algal bloom. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **66**, 69-81.(2018)

36. Seegers, B. N. *et al.* Satellites for long-term monitoring of inland US lakes: The MERIS time series and application for chlorophyll-a. *Remote Sens.Environ.* **266**, 112685. (2021)

37. Kwon, Y. S. *et al.* Drone-based hyperspectral remote sensing of cyanobacteria using vertical cumulative pigment concentration in a deep reservoir. *Remote Sens. Environ.* **236**, 111517 .(2020).

38. Rolim, S. B. A., Veettil, B. K., Vieiro, A. P., Kessler, A. B. & Gonzatti, C. Remote sensing for mapping algal blooms in freshwater lakes: A review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **30**, 19602-19616.(2023).

39. Dev, P. J., Sukenik, A., Mishra, D. R. & Ostrovsky, I. Cyanobacterial pigment concentrations in inland waters: Novel semi-analytical algorithms for multi-and hyperspectral remote sensing data. *Sci. Total Environ.* **805**, 150423.(2022).

40. Huang, J. C. *et al.* The magnitude and drivers of harmful algal blooms in China's lakes and reservoirs: A national-scale characterization. *Water Res.* **181** (2020). https://doi.org/10.1016/j.watres. 2020.115902

41. Huisman, J. *et al.* Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology* **16**, 471-483.(2018).

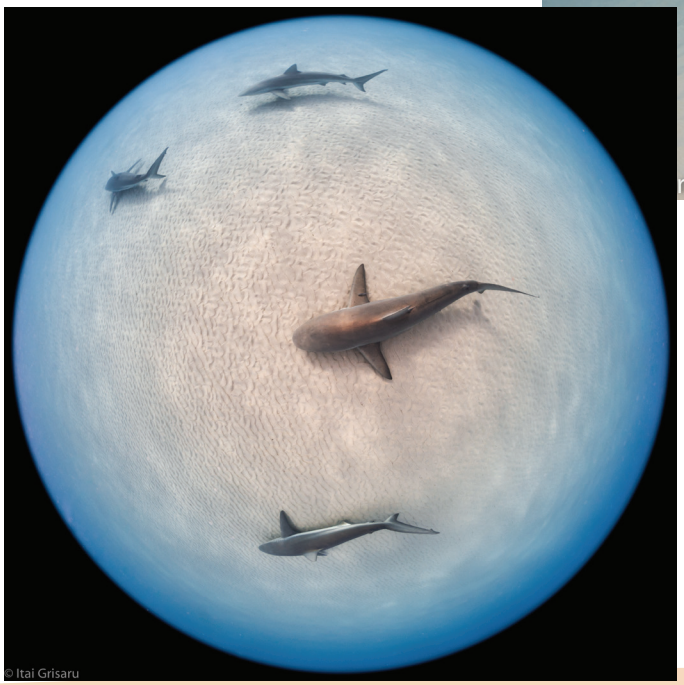
42. Sha, J. *et al.* Harmful algal blooms and their eco-environmental indication. *Chemosphere* **274**, 129912 (2021). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere. 2021.129912.

43. Woolway, R. I. *et al.* Lake heatwaves under climate change. *Nature* **589**, 402-407. (2021). https://doi.org/10.1038/s41586-020-03119-1

44. Chorus, I. & Zessner, M. Assessing and controlling the risk of cyanobacterial blooms. *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*, 433. (2021).
45. Matthijs, H. C., Jančula, D., Visser, P. M. & Maršálek, B. Existing and emerging cyanocidal compounds: new perspectives for cyanobacterial bloom mitigation. *Aqu. Ecol.* **50**, 443-460. (2016).
46. Barroin, G. & Feuillade, M. Hydrogen peroxide as a potential algicide for *Oscillatoria rubescens* D.C. *Water Res* **20**, 619-623 (1986). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354(86)90026-6
47. Drábková, M., Matthijs, H. C. P., Admiraal, W. & Maršálek, B. Selective effects of H_2O_2 on cyanobacterial photosynthesis. *Photosynthetica* **45**, 363-369 (2007). https://doi.org/10.1007/s11099-007-0062-9
48. Lusty, M. W. & Gobler, C. J. The efficacy of hydrogen peroxide in mitigating cyanobacterial blooms and altering microbial communities across four lakes in NY, USA. *Toxins* **12**, 428. (2020).
49. Matthijs, H. C. P. *et al.* Selective suppression of harmful cyanobacteria in an entire lake with hydrogen peroxide. *Water Res* **46**, 1460-1472.(2012).
50. Xu, H., Pang, Y., Li, Y., Zhang, S. & Pei, H. Using sodium percarbonate to suppress vertically distributed filamentous cyanobacteria while maintaining the stability of microeukaryotic communities in drinking water reservoirs. *Water Res* **197**, 117111 (2021). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117111
51. Tichy, M. & Vermaas, W. *In vivo* role of catalase-peroxidase in *Synechocystis* sp. strain PCC 6803. *J. Bacteriol.* **181**, 1875-1882.(1999).
52. Weenink, E. F. J. *et al.* Interspecific protection against oxidative stress: green algae protect harmful 3 cyanobacteria against hydrogen peroxide. *Environ. Microbiol.* **23**, 2404–2419 (2021). https://doi.org/10.1111/1462-2920.15429
53. Piel, T. *et al.* Resilience of microbial communities after hydrogen peroxide treatment of a eutrophic lake to suppress harmful cyanobacterial blooms. *Microorganisms* **9**, 1495.(2021).
54. Thoo, R., Siuda, W. & Jasser, I. The effects of sodium percarbonate generated free oxygen on *Daphnia*—Implications for the management of harmful algal blooms. *Water* **12**, 1304. (2020).
55. Keliri, E. *et al.* Occurrence of a single-species cyanobacterial bloom in a lake in Cyprus: monitoring and treatment with hydrogen peroxide-releasing granules. *Environ. Sci. Eur.* **33**, 1-14.(2021).
56. Yang, Z. *et al.* Hydrogen peroxide treatment promotes chlorophytes over toxic cyanobacteria in a hyper-eutrophic aquaculture pond. *Environ. Pollut.* **240**, 590-598 (2018). https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.012
57. Reichwaldt, E. S., Zheng, L., Barrington, D. J. & Ghadouani, A. Acute toxicological response of *Daphnia* and *Moina* to hydrogen peroxide. *J Environ Engineer* **138**, 607-611 (2012). https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000508
58. Lin, L. Z. *et al.* The ecological risks of hydrogen peroxide as a cyanocide: its effect on the community structure of bacterioplankton. *J Oceanol Limnol* **36**, 2231-2242 (2018). https://doi.org/10.1007/s00343-018-7233-3

59. Sukenik, A. & Kaplan, A. Cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems: A comprehensive outlook on current and emerging mitigation and control approaches. *Microorganisms* **9**, 1472. (2021).
60. Di Nica, V., Gallet, J., Villa, S. & Mezzanotte, V. Toxicity of quaternary ammonium compounds (QACs) as single compounds and mixtures to aquatic non-target microorganisms: experimental data and predictive models. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **142**, 567-577. (2017).
61. Jing, G., Zhou, Z. & Zhuo, J. Quantitative structure–activity relationship (QSAR) study of toxicity of quaternary ammonium compounds on *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus quadricauda*. *Chemosphere* **86**, 76-82. (2012).
62. Wu, X., Viner-Mozzini, Y., Jia, Y., Song, L. & Sukenik, A. Alkyltrimethylammonium (ATMA) surfactants as cyanocides-Effects on photosynthesis and growth of cyanobacteria. *Chemosphere* **274**, 129778.(2021).
63. Jennings, M. C., Minbiole, K. P. & Wuest, W. M. Quaternary ammonium compounds: an antimicrobial mainstay and platform for innovation to address bacterial resistance. *ACS Infectious Diseases* **1**, 288-303. (2015).
64. Dewey, H. M., Jones, J. M., Keating, M .R. & Budhathoki-Uprety, J. Increased use of disinfectants during the COVID-19 pandemic and its potential impacts on health and safety. *ACS Chem. Health Saf.* **29**, 27-38. (2021).
65. Qin, B. *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management. *Environ. Manag.* **45**, 105-112. (2010).
66. Jetoo, S., Grover, V. I. & Krantzberg, G. The Toledo drinking water advisory: suggested application of the water safety planning approach. *Sustainability* **7**, 9787-9808. (2015).
67. Wynne, T. T. & Stumpf, R. P. Spatial and temporal patterns in the seasonal distribution of toxic cyanobacteria in western Lake Erie from 2002–2014. *Toxins* **7**, 1649-1663. (2015).
68. Sukenik, A., Hadas, O. & Kaplan, A. in *Lake Kinneret* (eds Zohary,T. Sukenik, A. Berman, T.& Nishri, A.) Ch. cyanobacteria, 213-226 (Springer, 2014).
69. Sukenik, A. *et al.* Removal of cyanotoxins-microcystins from water by filtration through granulated composites of bentonite with micelles of the cation octadecyltrimethyl ammonium (ODTMA) Appl. Nano 2, 67-81. (2021).

כריש עפרורי - *Dusky Shark - Carcharhinus obscurus*
התמונה צולמה בנובמבר 2022 בעומק של כ-3 מטרים דרומית
לתחנת הכוח "אורות רבין".



רביעיית כריש עפרורי *Dusky Shark - Carcharhinus obscurus*. הכריש העפרורי נחשב לטורף-על הניזון מדגים קטנים. התמונה צולמה, בנובמבר 2021 בעומק של כ-3 מטרים דרומית לתחנת הכוח "אורות רבין", חוף חדרה, באמצעות עדשת עין הדג Canon lens 8-15mm f/4 L USM על 8 מ"מ מה שאיפשר תמונה עגולה. צילום: איתי גריסרו.

20 מערכת אקולוגית ייחודית של נביעות גז ותמלחות בהפרעת פלמחים, הים העמוק באגן הלבנט

מקסים רובין-בלום[2,1], ברק חרות[2,1], יצחק מקובסקי[2,1]

[1] המכון הלאומי לאוקיינוגרפיה, חקר ימים ואגמים לישראל
[2] בית הספר למדעי הים ע"ש ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה

mrubin@ocean.org.il,
yizhaq@univ.haifa.ac.il,
barak@ocean.org.il

תקציר

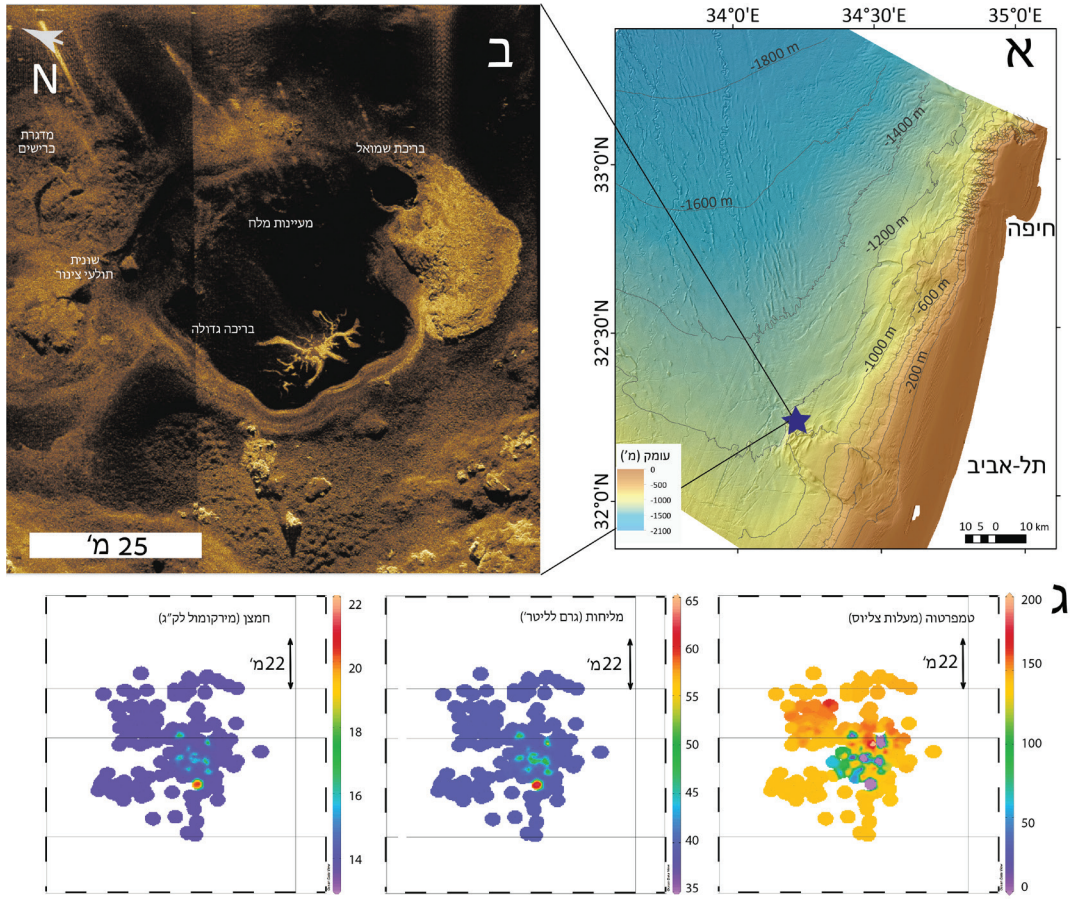
הקרקעית העמוקה באוקיינוסים בכלל ובאגן הלבנט בדרום-מזרח הים התיכון בפרט, חסרת אור שמש, מועטה באנרגיה זמינה ולכן מהווה מדבר דל חיים. התזונה של רוב צורות החיים בסביבה זו תלויה בשטף אנכי של חלקיקים עתירי פחמימות מהאזור הפוטי, השכבה המוארת העליונה שבה מצויים היצרנים הראשוניים. שטף זה נמוך מאוד בים התיכון המזרחי, שדל בחומרי ההזנה (נוטריינטים). בהתאם, היצרנות במרבית שטח הקרקעית העמוקה מוגבלת. יחד עם זאת, נאות מדבר עם ריכוז ומגוון חיים עשיר וייחודי נמצאו בסביבות מיוחדות בים העמוק, שבהן זליגה של תרכובות עתירות באנרגיה מקרקעית הים מאפשרת תהליכי כימוסינתזה. בדומה לפוטוסינתזה – קיבוע פחמן על בסיס אנרגיה של אור, כימוסינתזה היא תהליך של קיבוע פחמן ממולקולות עם פחמן בודד כגון פחמן דו-חמצני או מתאן, לבניית מרכיבים אורגניים, כגון סוכרים וחלבונים, בעזרת אנרגיה כימית. האנרגיה הכימוסינתטית טמונה בתרכובות כגון מימן גופרתי, אמוניה, ברזל וגז המתאן עצמו. החומרים הללו נפלטים מקרקעית הים בשל פעילות געשית לאורך רכסים מרכז-אוקייניים או טקטוניקת לוחות מתכנסים, או בשל זליגת גז טבעי ממאגרי פחממנים מאובנים לאורך שוליים יבשתיים. בשנים האחרונות התגלו נביעות גז טבעי ובריכות תמלחת בחלק העמוק של הפרעת (גלישת) פלמחים, בעומק קרקעית של כ-1,150 מ', ובמרחק של כ-60 ק"מ מול חופי תל אביב. בסביבת נביעות התמלחת, גילינו מערכת אקולוגית עשירה וייחודית, המבוססת על כימוסינתזה. לנביעות אלו, המהוות בין היתר אזור אומנה של כרישי עומק גלדן שחור פה (*Galeus melastomus*), יש תפקיד ייחודי ומרכזי בכלל המערכת האקולוגית של הים התיכון המזרחי מול חופי ישראל. פרק זה עוסק ב: 1) הבסיס הגיאולוגי לנביעות הגז והתמלחת בהפרעת פלמחים 2) המערכת המיקרוביאלית של הנביעות ו-3) סימביוזה בין בעלי חיים לחיידקים כימוסינטתיים כבסיס לשגשוג החיים בנביעות.

גילוי הבסיס הגיאולוגי לנביעות הגז והתמלחת בהפרעת פלמחים

הפרעת פלמחים היא גלישה תת-ימית רחבת היקף מול חופיה הדרומיים של ישראל, הנעה על גבי שכבת מלח מתקופת המסיניאן[1]. מעוותים (מבנים גיאולוגיים) שנוצרו במהלך הגלישה מובילים גז ממאגרי פחממנים פוסיליים בעומקים שונים ותמלחות מהמלח המסיני נביעות הגז בהפרעת פלמחים נצפו לראשונה בשנת 2011, במסגרת הפלגת ספינת הנאוטילוס המצוידת ברובוטים תת-ימיים משוכללים[4]. אלו היו התצפיות הראשונות של המערכת האקולוגיות הייחודיות של נביעות הגז מול חופי ישראל. לאחר עשור, בשנת

2021, בוצעו ההפלגות הראשונות על בסיס תשתית ישראלית בלבד – ספינת המחקר בת-גלים (של חקר ימים ואגמים לישראל – חיא"ל) וציוד רובוטי של אוניברסיטת חיפה – רכב תת-ימי אוטונומי (Autonomous Underwater Vehicle - AUV, סנפיר) ורובוט תת-ימי הנשלט מרחוק – (Remotely Operated Vehicle – ROV, יונה). סריקות של נביעות פוטנציאליות (על בסיס ניתוח מידע גיאופיזי), בעזרת סונר סורק חדשני (Synthetic Aperture Sonar) המורכב על רכב תת-ימי אוטונומי וממפה את קרקעית הים ברזולוציה של 3 ס"מ, גילו מטרה ייחודית על קרקעית הים של הפרעת פלמחים, בעומק של 1,150מ' (איור 1 א ו-ב). צלילות עם הרובוט התת-ימי יונה גילו תופעת טבע מרתקת, בעלת חשיבות רבה בים התיכון העני בחיים – נביעות גז ותמלחת, ומערכת אקולוגית ייחודית משגשגת סביבן[5].

התמלחות בהפרעת פלמחים בעלות מליחות גדולה פי 1.5 ויותר ממי הים הסובבים (73 לעומת 39 גרם מלח מומס בליטר מים), הינן חמות (21.6 מעלות צלזיוס מול כ-14 במי העומק), ללא חמצן ועשירות במימן גופרתי, גז מתאן ואמוניה. מיפוי של התמלחות על בסיס דיגום ישיר עם מכשיר CTD (Conductivity, Temperature, Depth – מודד מליחות, טמפרטורה, חמצן מומס ועוד) מוצג באיור 1ג. מדידות של ההרכב הכימי בתמלחות העשירות בנתרן וכלור, אך עניות במגנזיום, הצביעו על כך שמקור התמלחת הוא בהמסה של מלח מסיני מלווה בתהליכים נוספים[5]. התמלחות ככל הנראה מגיעות מעומק של כ-350 מ' מתחת לקרקעית הים. בדרכן מעלה, התמלחות מגיבות עם תת-קרקעית הים, ומושפעות מתהליכי חמצון-חיזור הגורמים לשינויים בהרכבן הכימי. הגזים המומסים והמינרלים שהתמלחות מובילות משמשים בסיס אנרגטי למערכת האקולוגית הייחודית באזור העמוק של גלישת פלמחים.

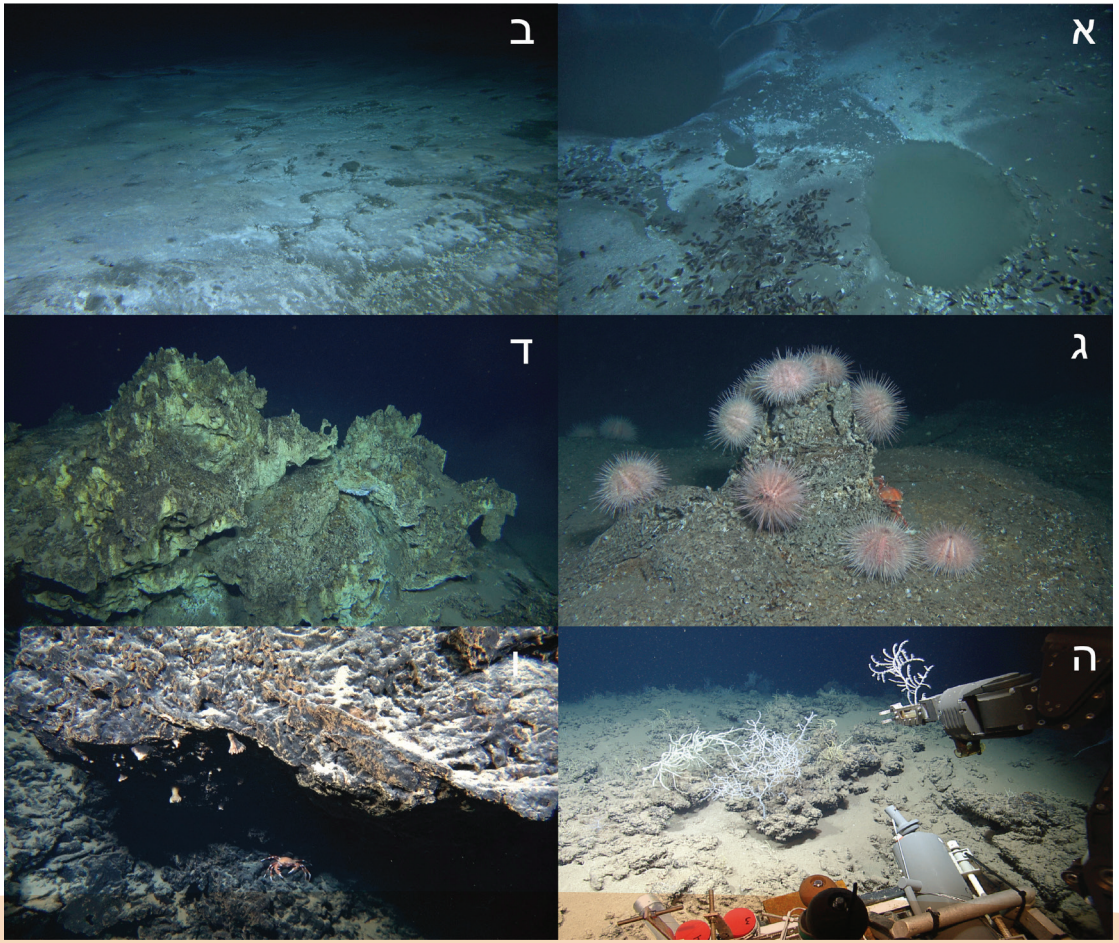


איור 1. מיפוי של נביעות הגז והתמלחת בהפרעת פלמחים. א. מיקום בריכות התמלחת בעומק של כ-1150 מ', בקצה המערבי של הגלישה – כ-60 ק"מ מערבית לתל-אביב. ב. מיפוי של בריכות התמלחת בעזרת סונר סורק צד. ג. מיפוי של טמפרטורה, מליחות וריכוז חמצן בבריכות התמלחת.

המערכת המיקרוביאלית של הנביעות הגז והתמלחת

חמצון מתאן אנארובי: נביעות הגז והתמלחת פולטות גזים מומסים ממאגרים של דלק מאובנים (פחמימנים פוסיליים). מתאן (CH_4) הוא גז חממה רב-עוצמה, היכול להגביר את אפקט החממה פי כ-30 יותר מפחמן דו-חמצני (CO_2) בטווח הארוך של כ-100 שנים, ופי 85 בטווח הקצר של 20 שנים. למרות שקרקעית הים מהווה מאגר משמעותי המכיל כ-2000 גיגהטון של גז המתאן, פליטות מהים מהוות רק בין 1% ל-5% של מתאן הנפלט לאטמוספרה מכדור הארץ, ורק 0.02 גיגהטון מתאן נפלטות כל שנה מנביעות גז ימיות[6,7]. הפליטות מהים נמוכות בזכות ה"מסנן" המיקרוביאלי בשכבות בקרקעית הים ומעליה: בתוך הקרקעית שכבות הדלות בחמצן, על פני הקרקעית, שם החמצן זמין, וגם לאורך עמודת

המים שם החמצן זמין בריכוז עולה ככל שמתקרבים לפני השטח. שני תהליכים עיקריים מסלקים מתאן והופכים אותו לפחמן אי-אורגני, פחמן דו-חמצני או ביקרבונט: חמצון מתאן אנארובי (בסביבה ללא חמצן) ואירובי (סביבה עם חמצן). שני התהליכים הללו שונים מאוד פונקציונלית, מונעים על יד חלבונים (אנזימים) שונים, ובעיקר מתבצעים על-ידי קבוצות מיקרוביאליות שונות. חמצון מתאן אנארובי מבוצע ברובו על-ידי ארכיאה (על-ממלכה של יצורים זעירים ללא גרעין התא, האבות הקדומים של האוקריוטים בעלי הגרעין, כולל אדם עצמו), כאשר חמצון מתאן האירובי מבוצע לרוב על-ידי חיידקים (על-ממלכה בקטריה).



איור 2. מופעים שונים של נביעות גז טבעי בהפרעת פלמחים. א. בריכות תמלחת הקטנות (כותר 1-3 מ'). ב. סדימנטים רוויי גז ותמלחת הסובבים את בריכות התמלחת, שבהן מתרחש חמצון מתאן אנארובי (א,ב). ג. וד. מסלע קרבונטי הנוצר עקב חמצון מתאן אנארובי, נבנה בנביעות פעילות. ה. מסלע בנביעות שחדלו מלפלוט גז מאוכלסים על-ידי אלמוגים רכים במדרון בעומקים בין 400 ל-800 מ'. ו. בעומקים גדולים יותר, נצפו אלמוגי אבן בדידים.

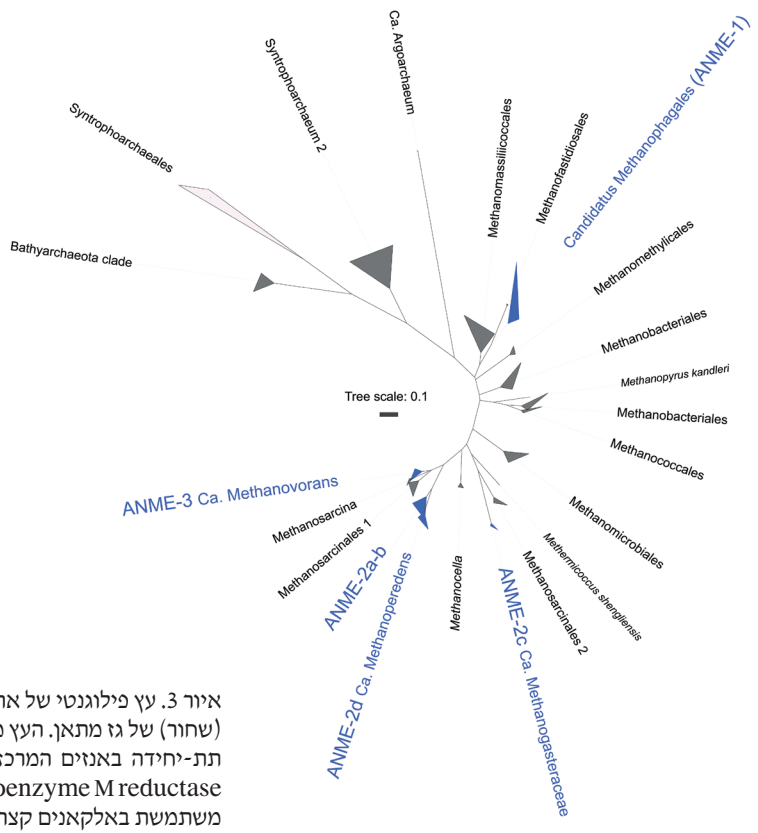
חמצון מתאן אנארובי מסלק כ-80% מגז מתאן הטמון בקרקעית הים, בסדימנטים של מדף היבשת ונביעות הגז העמוקות[8]. בסביבות ימיות העניות בחמצן, חמצון מתאן מתבצע בצמוד לחיזור גופרה (סולפט SO_4^{2-}), שנמצאת בריכוזים של כ-2,700 מ"ג לליטר מי ים. לרוב, רק כך חמצון מתאן אנארובי ישים מבחינה אנרגטית (תגובה אקסרגונית, אקסותרמית אנרגיה חופשית 20 = (ΔG)- עד 74- קילוג'אול למול מתאן[9]),
התוצרים הם מים (H_2O), סולפיד (HS, מימן גופרתי), וביקרבונט (HCO_3, מימן פחמתי).

משוואה 1. $CH_4 + SO_4^{2-} \rightarrow HCO_3^- + HS^- + H_2O$

לכן, חמצון מתאן אנארובי מתרחש בשכבות סדימנט שבהן המתאן "פוגש" את הסולפט המחלחל מעמודת המים שמעל הקרקעית. השכבות שבהן מצויים ומגיבים שני הצורונים הנ"ל נקראות אזורי מעבר סולפט-מתאן (Sulfate-Methane Transition Zone, SMTZ). בנביעות המאופיינות על-ידי שטף אנכי (ורטיקלי) חזק של נוזלים עם גזים מומסים, אשר לעיתים מבעבע לתוך עמודת המים, שכבה זו של מעבר סולפאט-מתאן נמצאת בצמוד לפני שטח קרקעית הים. לדוגמה, בשכבות העליונות (סנטימטרים עליונים) בבוצה השחורה הסובבת את בריכות התמלחות של הפרעת פלמחים (איור 2, א-ב) מתרחש חמצון מתאן אנארובי. כאשר השטף האנכי (הוורטיקלי) של מתאן מהקרקעית נמוך יותר, ביקרבונט שנוצר כתוצאה מחמצון מתאן האנארובי מגיב עם סידן מומס (Ca^{2+}) ליצירה של מסלע קרבונטי (משוואה 2). מסלע זה נמצא בשפע באזורים פעילים של זליגת הגז מהקרקעית וגם בנביעות שחדלו מלפעול (איור 2, ג-ד) באזור הפרעת פלמחים. מסלע קרבונטי קדום שנוצר עקב חמצון מתאן[10,11] מהווה בסיס להתיישבות אלמוגי עומק, והתבססות של אלמוגי מים קרים (איור 2, ה-ו).

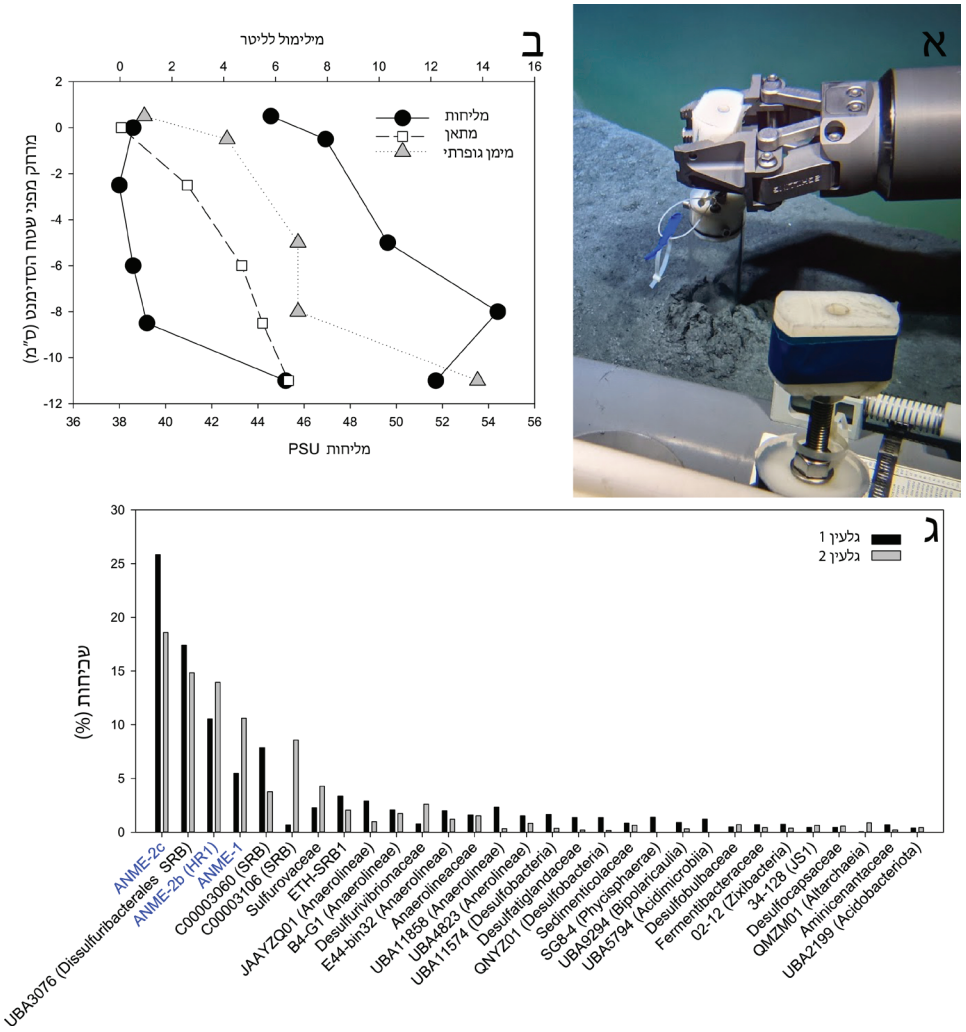
משוואה 2. $Ca^{2+} + HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + H^+$

חמצון מתאן אנארובי בנביעות הגז מתבצע על-ידי מספר קבוצות של ארכיאה, שנקראות ANME (Anaerobic Methanotroph, זוללי-מתאן אנארוביים). אנליזות איזוטופים יציבים של פחמן בחומצות שומן ייחודיות לארכיאה הראו ערכים חריגים שהצביעו על מתאן כמקור של פחמימנים ב-ANME, וקישרו את האורגניזמים הללו לתהליך של חמצון מתאן[12]. ANME מתחלקים למספר קבוצות טקסונומיות (איור 3). ארכיאות השייכות לקבוצות ANME-1 (סוג Syntropharchaeia), וגם ANME-2a-c ו-ANME-3(סוג Methanosarcinia), מחמצנות מתאן בצמוד לחיזור סולפט[13-16]. לקבוצה נוספת, ANME-2d, הידועה גם כ-Ca. Methanoperedens, יש יכולת לחמצן מתאן תוך כדי חיזור ניטרט, ברזל ומנגן[17-19]. כל האורגניזמים הללו הופכים את כיוונו של המסלול המטבולי של יצירת מתאן – מתאנוגנזה, כדי לחמצן מתאן. היפוך המתאנוגנזה מצריך השקעה של אנרגיה, ויכול להתקיים לרוב רק תוך כדי שיתוף פעולה עם אורגניזמים נוספים, בדרך כלל בקטריה מחזרת סולפט ממערכה Desulfobacterota, הידועה בשם Seep-SRB (חיידק נביעות מחזר סולפט)[14]. המנגנון של שיתוף אלקטרונים בין ANME ל-Seep-SRB עוד לא ידוע במלואו, אך לאחרונה נמצאו מספר עדויות לכך שחלק מה-ANME, בעיקר אלו השייכים לסוג Methanosarcinia, יכולים להעביר אלקטרונים ישירות לחיידקים השותפים, בעזרת ציטוכרומים (חלבונים פעילים בריאקציות של חמצון-חיזור), ממברנליים ומומסים[20,21]. תגליות מרתקות חדשות מצביעות על כך שקונסורציום של ארכיאות ובקטריות בנביעות הגז יכול לצרוך לא רק מתאן, אלא גם אלקאנים נוספים כגון בוטאן C_4H_{10}, פרופאן C_3H_8 ואתאן C_2H_6 (גז בישול)[22].



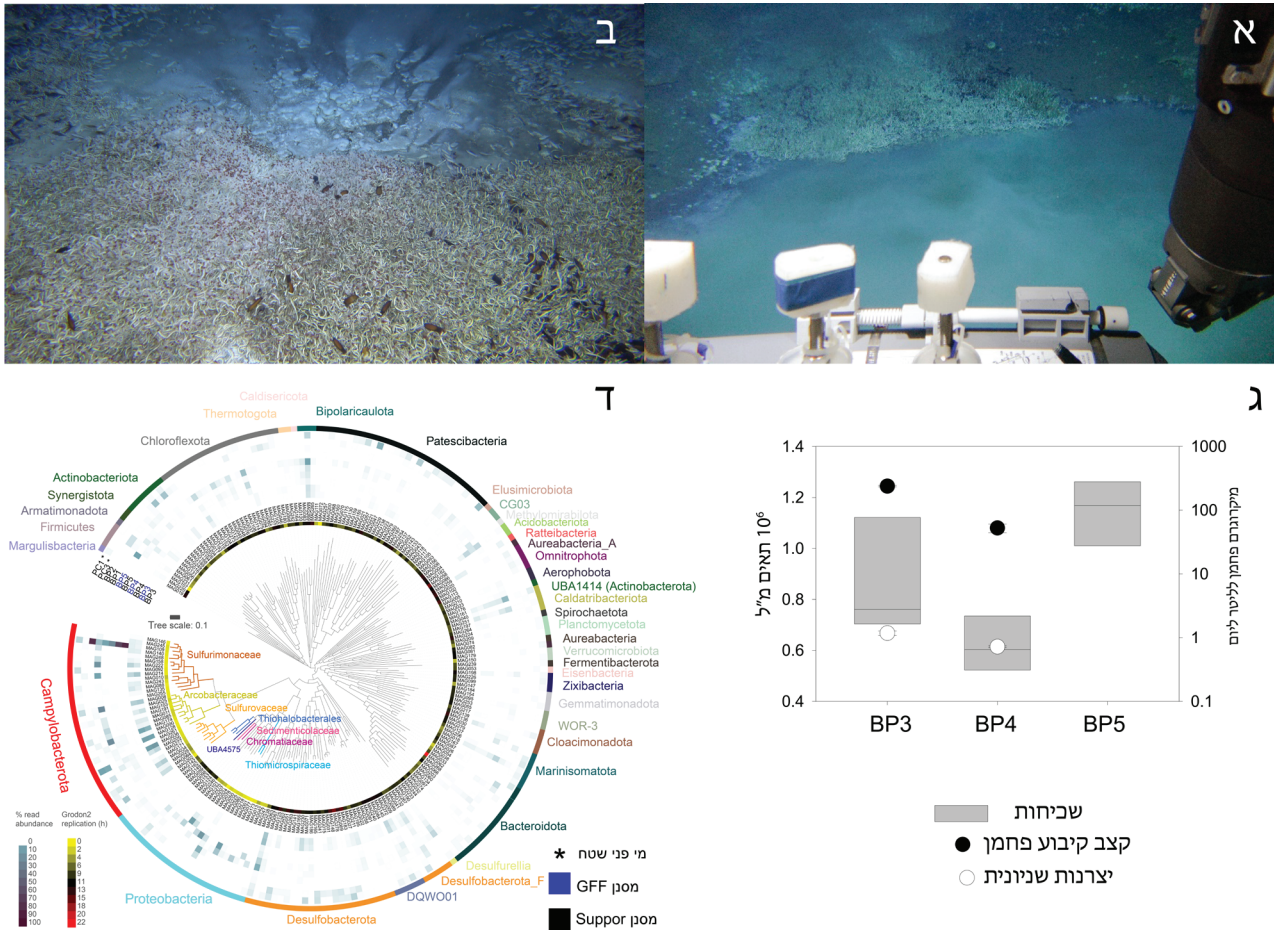
איור 3. עץ פילוגנטי של ארכיאות המשתתפות בפירוק (ANME, כחול) ויצור (שחור) של גז מתאן. העץ מבוסס על השוואה של רצפי גן ה-*mcrA*, המקודד תת-יחידה באנזים המרכזי המניע את חמצון ויצירה של מתאן (methyl coenzyme M reductase). ארכיאה מקבוצת ה-Syntropharchaeales משתמשת באלקאנים קצרים שאינם מתאן.

חמצון מתאן אנארובי הינו תהליך מרכזי בסדימנטים רוויי התמלחות בהפרעת פלמחים העמוקה. בשני גלעינים קצרים שנדגמו, מדדנו מליחות של עד 55 גרם מלח לליטר מים אשר מצביעה על חדירת התמלחות מתת-הקרקע (כ-60 גרם מלח לליטר מים). כמו כן, ריכוזים גבוהים של מתאן ומימן גופרתי, בסדר גודל של מספר מילימול לליטר, נמדדו בתוך הבוצה (איור 4), ללא חמצן החל מפני שטח הסדימנט ומטה. ארכיאות הזוללות מתאן (ANME-1, ANME-2b, 2c) היוו 44-49% מכלל האוכלוסייה. אפיון ביטוי גנים ברמת רנ"א וחלבון באוכלוסיות הללו מהווה בסיס להבנת הפונקציות במערכת אקולוגית, שהרי חיידקים נוטים להגביר ביטוי של גנים חיוניים למסלולים המטבוליים החשובים ביותר עבורם. לדוגמה, החלבון השכיח ביותר בסדימנטים הללו היה McrA (עד 16% מכלל החלבונים שזוהו בדוגמה), תת-יחידה הגדולה של אנזים מתיל-קואנזים-M-רדוקטאז (methyl-coenzyme M reductase), האנזים העיקרי בחמצון מתאן ללא חמצן[23]. חלבונים של חיידקים שותפים שמחזרים סולפט גם נמצאו כשכיחים (כ-2% מכלל החלבונים, עבור תת-יחידות של אנזימים עיקריים בחיזור סופלפאט, כגון dissimilatory (bi) sulfite reductase (DsrAB), adenosine 5'-phosphosulfate reductase (AprAB) ו-ATP-sulfurylase (Sat).



איור 4. ארכיאה ובקטריה מניעות תהליכים ביוגיאוכימיים בסדימנטים רוויי גז טבעי בשולי בריכות התמלחת. א. דיגום סדימנט בבריכת התמלחת – גלעין מספר 1, שנת 2021. ב. פרופילי מליחות (גלעינים 1 ו-2), ריכוז מימן גופרתי (גלעין 1) ומתאן (גלעין 2). ג. 30 קבוצות החיידקים השכיחות בסדימנט, כולל שלוש קבוצות של ארכיאות מחמצנות מתאן (ANME-1, ANME-2b, ANME-2c, כחול).

קיבוע פחמן על-ידי חיידקים אוטוטרופיים (חיידקים המייצרים מזון ממולקולות אנאורגניות): במזרח הים התיכון, העני בנוטריינטים, הקרקעית העמוקה מאוכלסת על-ידי אוכלוסיות מיקרוביאליות שמתרבות בקצב נמוך, משום שהחיידקים ניזונים משאריות מועטות של חומרים אורגניים קשים לפירוק[24]. נביעות הגז מזינות את המערכות האקולוגיות בתרכובות עתירות אנרגיה, כגון הגז הטבעי ומימן גופרתי, המשמשות כתורמי אלקטרונים בנוכחות חמצן. אנרגיה זו היא המקור לתהליך הכימוסינתזה – קיבוע פחמן ללא אנרגיית אור השמש.



איור 5. יצרנות מוגברת בשכבות הגבול של התמלחות ובוצה רווית התמלחת. א. "ענן" לבן של חיידקים נראה על פני שטח של בריכת התמלחת, שממנה נלקחו דוגמאות BP4 ו-BP5 בפאנל ג'. ב. משטחים לבנים של חיידקי ה-Campylobacterota כל פני השטח של סדימנטים שחורים, ליד שונית של תולעי צינור. ג. שכיחות חיידקים, יצרנות ראשונית ושניונית, כפי שנמדדו בדוגמאות שונות של תמלחות. ד. מגוון, שכיחות וקצב גידול של חיידקים שנמצאו בתמלחות פלמחים ובמי פני שטח מגלעינים, על בסיס מטאגנומיקה. מרבית הדוגמאות מוצגות כשתי חזרות, על שני סוגי מסננן שונים (0.2 מיקרון Supor ו-GF/F). קצבי החלוקה המקסימליים חושבו על בסיס גנטי[32]. דוגמאות BP3-BP5 מייצגות דוגמאות נפרדות של תמלחות.

חיידקים כימוסינתטיים באוקיינוסים משתייכים למגוון רחב של קבוצות טקסונוטמיות. מחמצני גופרית (בעיקר מימן גופרתי, אך גם תרכובות אחרות ברמות חיזור שונות, כגון S^0 ו-תיוסולפט $(S_2O_3$ שכיחים במערכות Campylobacterota ו-(Proteobacteria (Pseudomonadota – בעיקר במחלקות Gammaproteobacteria ו-Alphaproteobacteria[15]. מחמצני מתאן כימוסינתטיים שייכים בעיקר לסדרה Methylococcales (Gammaproteobacteria), וחלקם ל-Alphaprotobacteria ו-Verrucomicrobia, כאשר לכל קבוצה יש מנגנון מטבולי ייחודי לשימוש בגז המתאן[25]. גופרית ומתאן הם כאמור חומרים עתירי אנרגיה עיקריים המניעים את קיבוע

הפחמן מסביבת נביעות הגז. כימוסינתזה בקרקעית הים יכולה גם להתבצע על בסיס חמצון מתכות (דוגמה שכיחה היא חמצון ברזל על-ידי Zetaproteobacteria, כגון אלו שנמצאו בקרקעית הים העמוקה בים התיכון המזרחי[26]) ואמוניה, על-ידי בקטריה, ובעיקר על-ידי ארכאונים Nitrososphaeria (בעבר Thaumarchaeota)[27].

היצרנות הראשונית בנביעות הגז והתמלחת של פלמחים מבוססת על כימוסינתזה, המזינה שוניות של בעלי חיים ומניעה תהליכים ביוגיאוכימיים בשכבת הגבול בין התמלחת חסרת החמצן למי הים המאווררים[28] (איור 5, א-ב). בדגימות מים שנלקחו משכבת הגבול, נמדדו קצבי קיבוע פחמן יוצאי דופן (151-685 מיקרוגרם פחמן לליטר ליום, איור 5ג). קצבים אלו עולים בסדרי גודל על קצבי הרקע (כ-0.2 מיקרוגרם פחמן לליטר ליום), ועל אלו שנמדדו בעמודת המים העליונה המוארת (האזור הפוטי) (כ-1 מיקרוגרם פחמן לליטר ליום). התהליכים הללו מבוצעים על-ידי חיידקים רבים שנמצאו בריכוזים של 0.03±0.09 מיליון תאים למיליליטר (איור 5ג).

בתמלחות של פלמחים, חיידקי ה-Campylobacterota (בעבר ידועים כאפסילונפרוטאובקטריה), ולא Gammaproteobacteria, הם מקבעי הפחמן העיקריים (איור 5ד). 32 גנוטיפים (genotype) אפיינו את המגוון של Campylobacterota, עם ייצוג למשפחות Arcobacteraceae, Sulfurimonadaceae ו-Sulfurovaceae. חיידקים מקבעי הפחמן על בסיס חמצון גופרית נמצאו בחלקה העליון של שכבת הגבול (ממערכה Gammaproteobacteria, בעיקר Thiohalobacterales, Thiomicrospirales ו-Chromatiales, איור 5ד). Campylobacterota מותאמים טוב יותר לקיבוע פחמן בסביבות העניות בחמצן מאשר Gammaproteobacteria. סיבה אחת לכך היא שימוש במעגלים מטבוליים שונים לקיבוע פחמן: Gammaproteobacteria לרוב משתמשים במעגל קלווין, שיכול להתקיים בנוכחות חמצן, אך לא יעיל אנרגטית, כאשר Campylobacterota מקבעים פחמן על-ידי היפוך מעגל קרבס[29]. מעגל קרבס הפוך הינו יעיל יותר ממעגל קלווין, מצריך כרבע אנרגיה בצורה של אדנוזין תלת-זרחתי (ATP), אך רגיש ביותר לנוכחות החמצן[29]. בשל ההתאמה המטבולית, וגם בשל הגודל הקטן של הגנום (כ-1.5 מיליון בסיסים), החיידקים הללו כנראה מתחלקים מהר מאוד (קצבי חלוקה מקסימליים של כמה שעות, איור 5ד). לכן, דווקא ה-Campylobacterota הם אלו שמייצרים את המשטחים הלבנים על פני השטח של הבוצה השחורה בקרקעית ליד בריכות התמלחת (איור 5 ב). בהתאם, חיידקים דומים נמצאו בנביעות גז אחרות בעולם[30-33].

סימביוזה בין בעלי חיים לחיידקים כימוסינתטיים כבסיס לחיים בנביעות הגז והתמלחת

במהלך האבולוציה, בעלי חיים ממערכות שונות פיתחו התאמה מרשימה, המאפשרת להם לאכלס מערכות כימוסינתטיות, כגון נביעות הגז והתמלחת. התאמה זו היא שיתוף פעולה (סימביוזה) עם חיידקים כימוסינתטיים, המהווים מקור מזון עיקרי לבעלי החיים הללו, אשר משגשגים בנביעות העמוקות[34,35]. בעלי חיים סימביוטיים של מערכות כימוסינתטיות מהווים ביומסה כבירה בקרקעית הים, כנראה הגדולה ביותר בים העמוק, ומשמשים כמינים מהנדסי סביבה, המבססים את המערכות האקולוגיות המשגשגות בסביבת הנביעות[36] (איור 5ב', איור 6). רק בזכות שיתוף הפעולה עם חיידקים המשתמשים באנרגיה כימית לקיבוע פחמן מתרכובות כמו מימן גופרתי וגז מתאן, בעלי

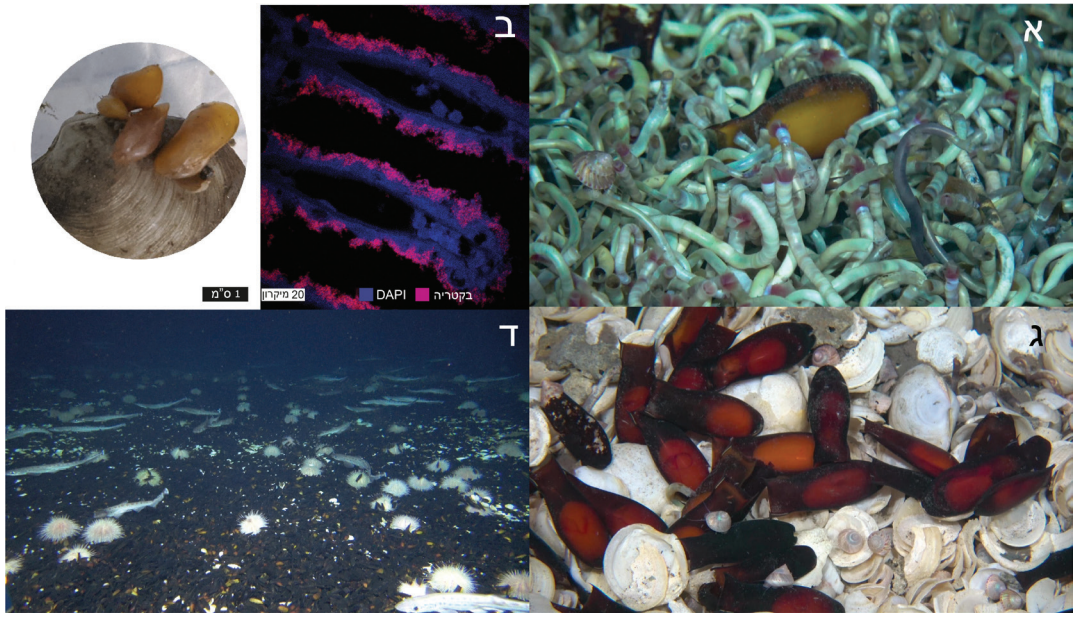
החיים הללו יכלו להתקיים בסביבה מיוחדת שכזו, בחושך מוחלט, בלחץ של יותר מ-100 אטמוספרות, עם ריכוזי מימן גופרתי רעילים למרבית בעלי החיים. לעיתים קבוצות בעלי חיים רחוקות טקסונומית, כגון ספוגים ומולים, מאכסנים חיידקים דומים, לדוגמה, מחמצני גופרית ממשפחת ה-Thioglobaceae, או מחמצני מתאן ממשפחת ה-Methylococcaceae[37,38]. שיתופי הפעולה הללו נבדלים ברמת נאמנות בין המאכסן לחיידק (זאת אומרת, האם אותם מינים או זנים של חיידקים נשארים עם אותו מאכסן לדורות), וגם שיטת ההעברה מדור לדור ; ורטיקלית: מהורה – ישירות לצאצא, או הוריזונטלית: מהורה – לסביבה – לצאצא.

בעלי חיים מגוונים מאכסנים חיידקים כימוסינתטיים[34]. שלושת העיקריים שנמצאו בהפרעת פלמחים הם תולעת הצינור *Lamellibrachia anaximandri* (למליברכיה, איור 6א), מולים *Idas modiolaeformis* (אידס, איור 26ב) וצדפות *Lucinoma kazani* (לוסינומה, איור 6ג). לכל אחד מבעלי החיים הללו יש סיפור מרתק של שיתוף פעולה עם חיידקים.

בעל החיים הכימוסינטטי המוכר ביותר כיום הינו תולעת הצינור (משפחת הסיבוגלינידה, Siboglinidae). במהלך התגליות הראשונות של מערכות הכימוסינתטיות של נביעות הידרוטרמליות בים העמוק ליד איי הגלפגוס, בסוף שנות השבעים, נצפו לראשונה תולעי צינור ענקיות, ריפטיה (*Riftia*). מאז נתגלו תולעי צינור בכלל המערכות הכימוסינתטיות בים העמוק. כיום ידוע שרק בזכות הסימביוזה, ריפטיה גדלה בקצב הגבוה ביותר מכל חסרי החוליות, כ-85 סמ' בשנה[39]. תולעים בנביעות גז גדלות לאט יותר, אך מגיעות לגילאים של מאות שנים[40]. במהלך האבולוציה, מערכת העיכול התנוונה אצל סיבוגלינידה, ובמקומה התפתח איבר הטרופוזום (trophosome) שמאכסן חיידקים בתוך תאים מיוחדים – בקטריוציטים (bacteriocytes). הסימביונטים עוברים הוריזונטלית מהורה לצאצא, שנולד עם מערכת עיכול, ונדבק בסימביונטים רק לאחר ההתיישבות בסביבת הנביעה[41]. המאכסן מספק את האנרגיה לכימוסינתזה בעזרת מערכת כלי דם מסועפת, ובעזרת המוגלובין ייחודי שיכול לקשור ביעילות חמצן ומימן גופרתי בו-זמנית. הסימביונטים של תולעי הצינור הינם קרובי משפחה של מחמצני גופרית פוטוסינתטיים, ושייכים לסדרה כרומציאלס (Chromatiales). קבוצה זו מכילה סימביונטים רבים, כולל אלו של צדפת הלוסינומה, המתוארים בהמשך. בניגוד למרבית החיידקים האחרים, כולל רוב הכרומציאלס, לסימביונטים של תולעי הצינור מטבוליזם ייחודי – הם יכולים לקבע פחמן בשני המעגלים שתוארו מעלה, מעגל קלווין ומעגל קרבס הפוך[29]. היכולת לקיבוע פחמן במנגנון היברידי זה מאפשר אדפטציה לשינויים בריכוזי החמצן הזמין, תוך כדי מיקסום קיבוע הפחמן.

תולעת הצינור השכיחה בנביעות הגז של פלמחים היא למליברכיה אנקסימנדרי (*Lamellibrachia anaximandri*). תולעת זו היא הנציגה העיקרית של סיבוגלינידה בים התיכון (מין אנדמי לים זה). לעומת תולעי צינור אחרות, המאכסנות בד"כ מין אחד של חיידקים, אנו מצאנו שמספר מינים ותת-מינים קרובים מאכלסים את הטרופוזום של למליברכיה בים התיכון[42,43]. זה ממצא מרתק, הרי שאירוח של מספר מינים של חיידקים יכול לגרום לתחרות, שתוביל לבזבוז משאבים, וירידה ברמת ההתאמה (fitness) של בעל החיים כולו. מצד שני, בשל כמות המשאבים הגדולה שזמינה לתולעי הצינור בנביעות (ריכוזים גבוהים של מימן גופרתי ונוטריינטים), כנראה שהמאכסן יכול לאפשר לחיידקים לבזבז אנרגיה על תחרות, כאשר הוא מרוויח מגוון גדול יותר של חיידקים חיוניים בעלי התאמות סביבתיות שונות. בסופו של דבר, בשל הסימביוזה, משטחים צפופים של למליברכיה מאכלסים את הסביבה של נביעות התמלחת, והם מין מפתח בסביבה זו.

שני מיני רכיכות כימוסינתטיות שנמצאו בסביבת נביעות התמלחות והגז בהפרעת פלמחים הם צדפה לוסינומה (*Lucinoma*) ומולים בהסוג אידס (*Idas*) (איור 26ב,ג), המאכסנים חיידקים בתוך הבקטריוציטים הנמצאים בזימים המוגדלים (לדוגמה – איור 26ב'). לוסינומה בפלמחים מאכסנת מין אחד של חיידק, בשם *Thiodiazotropha*, קרוב משפחה של סימביונטים של תולעי הצינור[44,45]. לחיידק זה יכולות רבות: למשל, הוא יודע להשתמש באנרגיה אגורה במימן,



איור 6. סימביוזה כימוסינתטית מהווה בסיס לחיים בנביעות הגז והתמלחות העמוקות של הפרעת פלמחים. א. תולעי צינור למליברכיה הן מין מפתח שמייצר אוכלוסיות צפופות, ומבסס מינים נוספים. בפאנל זה ניתן לראות ביצה של הכריש גלדן שחור-פה, וגם חילזון הטרוטרופי מהסוג *Clelandella* (קללנדלה), הניזון ממשטחים חיידקיים וחומרי רקב. כלל התזונה של תולעי הצינור מגיעה מחיידקים אוטוטרופיים המקבעים פחמן על בסיס אנרגיה של חמצון מימן גופרתי. ב. מולים קטנים מהסוג *Idas* (אידס), נראים צמודים לצדפת הלוסינומה הגדולה יותר. בפאנל הימני ניתן לראות את החיידקים שמאכלסים את הזימים בתצלום מיקרוסקופי (צביעת רנ"א ריבוזומלי בצבען פלואורסנטי, שיטה שנקראת FISH, הכחול זה צבע DAPI שצובע את כלל הדנ"א, ומצביע על תאי המאכסן). ג. צדפות לוסינומה הלבנות הן מין מפתח בסביבת הרבייה של כרישי גלדן שחור-פה. ד. משטחי הטלה נרחבים של גלדן שחור-פה נמצאו במערכות הכימוסינטתיות של פלמחים. ניתן לראות ביצים (חום) מכסות משטחים של צדפת הלוסינומה, פרטים בוגרים של גלדן שחור-פה, והמוני קיפודי-ים מהסוג גרצילאכינוס (*Gracilechinus gracilis*).

וגם בתוצרים של חימצון גז מתאן, כגון מתנול וחומצה פורמית. בניגוד למרבית הסיביונטים של צדפות בים העמוק[44], אנליזה של גנומים הראתה שסימביונטים של לוסינומה בפלמחים מקודדים חלבונים הנדרשים לקיבוע לא רק של פחמן, אך גם חנקן, שיכול להוות מקור נוטריינטים נוסף (הנושא בבדיקה). בניגוד ללוסינומה, המאכסנת מין בודד, מולים מהסוג אידס מאכסנים לפחות שישה מינים של חיידקים, שמתחלקים במטלות המטבוליות[46]. מלבד מחמצני הגופרית, בזימים של אידס נמצאו חיידקי הסוג מתילוקוקלס (Methylococcales), שמשתמשים בגז המתאן כמקור פחמן ואנרגיה. חיידקי מתילופאגה (*Methylophaga*) ניזונים מתוצרי הפירוק של מתאן, בעיקר מתנול. אידס מאוכלסים גם על-ידי חיידקים הטרוטרופיים, המאפשרים לאידס לקבל תזונה נוספת מתרכובות אורגניות, על בסיס ריקבון של חומר צמחי, או אפילו מביצי הכרישים. מגוון החיידקים מאפשר לאידס לגוון את סביבת מחייתם, וככל הנראה שימש כמנגנון אבולוציוני לאכלוס הים העמוק על-ידי רכיכות[47].

התפקיד המרכזי של נביעות הגז והתמלחת במערכת האקולוגית של אגן הלבנט

האקולוגית של הים התיכון. החיים השוקקים בנאות המדבר הללו, המהווים אזור קריטי עבור כרישי העומק השכיחים (כמו גלדן שחור-פה, *Galeus melastomus*), שכנראה מטילים את הביצים באזור זה בשל: א) טמפרטורות גבוהות יותר מהסביבה בשל זליגת התמלחות מתת- הקרקע, ב) הגנה מפני טורפים בסבך תולעי הצינור, ג) זמינות מזון, למשל צדפות הלוסינומה הרבות. אומנם אזורי אומנה של כרישים אלו נצפו גם נביעות גז במניפת הנילוס[48], אולם לעולם לא נצפתה צפיפות ביצים כמו באזור הנביעות של הפרעת פלמחים. הביצים הצפופות מהוות מזון לטורפי-על נדירים, הנמצאים בסכנת הכחדה – כמו כרישי העומק טריזן צניני (*Oxynotus centrina*). כיום, הנביעות של הפרעת פלמחים מוגדרות כאזור חיוני לשמירה על כרישים על-ידי קהילת הכרישים ובטאים הבינלאומית.

התגליות של בית הגידול הייחודי בנביעות התמלחת בפלמחים בשנת 2021 הוסיפו מידע והבנה על תפקוד המערכת האקולוגית של הים התיכון. החיים השוקקים בנאות המדבר הללו, המהווים אזור קריטי עבור כרישי העומק השכיחים (כמו גלדן שחור-פה, *Galeus melastomus*), שכנראה מטילים את הביצים באזור זה בשל: א) טמפרטורות גבוהות יותר מהסביבה בשל זליגת התמלחות מתת- הקרקע, ב) הגנה מפני טורפים בסבך תולעי הצינור, ג) זמינות מזון, למשל צדפות הלוסינומה הרבות. אומנם אזורי אומנה של כרישים אלו נצפו גם נביעות גז במניפת הנילוס[48], אולם לעולם לא נצפתה צפיפות ביצים כמו באזור הנביעות של הפרעת פלמחים. הביצים הצפופות מהוות מזון לטורפי-על נדירים, הנמצאים בסכנת הכחדה – כמו כרישי העומק טריזן צניני (*Oxynotus centrina*). הנביעות של הפרעת פלמחים מוגדרות כאזור חיוני לשמירה על כרישים על-ידי קהילת הכרישים ובטאים הבינלאומית.

סיכום

הבנתנו לגבי ההשפעה האקולוגית של נביעות הגז והתמלחת עדיין מוגבלת. מצד אחד, הנביעות משפיעות על תהליכים ביוגיאוכימיים בסביבתן הקרובה[49], אך השפעתן המרחבית עדיין לא ברורה. הים התיכון המזרחי עני בחומרי ההזנה ומוגבל גם על-ידי פחמן[50], ובהתאם נצפו גרדיאנטים גיאוכימיים חדים בין הנביעות היצרניות לבין סביבתם הענייה. יחד עם זאת, אזור הנביעות מהווה מוקד לייצוא של חומרים הן באמצעות בועות גז המתאן העולות מתוך הנביעות לעמודת המים, והן באמצעות נדידה של בעלי בחיים, כגון גלדן שחור-פה, ופגיות (לארוות) פלנקטוניות מהנביעות למרחב הימי[51]. ללא ספק, נביעות הגז והתמלחת בהפרעת הפלמחים הן תופעת טבע ייחודית, עם ביולוגיה מרתקת, אשר מהווה בסיס למחקר רב-תחומי עתידי.

תודות

המחקרים מומנו על-ידי: הקרן הלאומית למדע (מענקים 913/19 ו-1359/23), משרד האנרגיה והתשתיות (מענקים 221-17-004, 217-17-004), משרד המדע (מענק 3-17403), Europe – Horizon REDRESS (Restoration of deep-sea habitats to rebuild European Seas), (מענק 101135492), המרכז הישראלי לחקר הים התיכון (MERCI), בי"ס למדעי הים ע"ש צ'רני באוניברסיטת חיפה, תוכנית הניטור הלאומית של ישראל בים התיכון. אנו מודים לצוות של ספינת המחקר בת גלים, וצוות התפעול של חקר ימים ואגמים לישראל. תודה לצוות המדעי המורחב שהשתתף בכלל ההפלגות. תודה לשמואל כהן, בן הרצברג ועודד עזרא המפעילים ומתחזקים את הציוד הרובוטי של אונ' חיפה והמרכז לחקר הים התיכון. הפלגת EUROFLEETS 2 SEMSEEP מומנה על-ידי מענק EUROFLEETS 312762. הפלגת NA019 של ספינת הנאוטילוס מומנה על-ידי אוניברסיטת רוד איילנד (Institute for Exploration, University of Rhode Island) בי"ס למדעי הים ע"ש צ'רני באוניברסיטת חיפה.

רשימת מקורות

1. Garfunkel, Z., Arad, A. & Almagor, G. The Palmahim disturbance and its regional setting. *Geol. Surv. Isr. Bull.* **56** (1979).
2. Eruteya, O. E., Reshef, M., Ben-Avraham, Z. & Waldmann, N. Gas escape along the Palmachim disturbance in the Levant Basin, offshore Israel. *Mar. Pet. Geol.* **92**, 868–879 (2018).
3. Lawal, M. A. *et al.* Modes of gas migration and seepage on the salt-rooted Palmahim Disturbance, southeastern Mediterranean. *Mar. Pet. Geol.* **153**, 106256 (2023).
4. Coleman, D. F., Austin Jr., J. A., Ben-Avraham, Z., Makovsky, Y. & Tchernov, D. Seafloor pockmarks, deepwater corals, and cold seeps along the continental margin of Israel. *Oceanography* **25**, 40–41 (2012).
5. Herut, B. *et al.* Discovery and chemical composition of the eastmost deep-sea anoxic brine pools in the Eastern Mediterranean Sea. *Front. Mar. Sci.* **9**, 1040681 (2022).
6. Egger, M., Riedinger, N., Mogollón, J. M. & Jørgensen, B. B. Global diffusive fluxes of methane in marine sediments. *Nat. Geosci.* **11**, 421–425 (2018).
7. Boetius, A. & Wenzhöfer, F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps. *Nat. Geosci.* **6**, 725–734 (2013).
8. Reeburgh, W. S. Oceanic methane biogeochemistry. *Chem. Rev.* **107**, 486–513 (2007).
9. Taupp, M., Constan, L. & Hallam, S. J. The Biochemistry of Anaerobic Methane Oxidation. *Handb. Hydrocarb. Lipid Microbiol.* 887–907 (2010) doi: 10.1007/978-3-540-77587-4_63.
10. Spiro, B. *et al.* Mineralogical, chemical and stable C and O isotope characteristics of surficial carbonate structures from the Mediterranean offshore Israel indicate microbial and thermogenic methane origin. *Geo-Marine Lett.* **41**, 17 (2021).

11. Weidlich, R. *et al.* Occurrence and genesis of cold-seep authigenic carbonates from the South-Eastern Mediterranean Sea. *Depos. Rec.* 239 (2023) doi: 10.1002/dep2.239.
12. Hinrichs, K. U., Hayes, J. M., Sylva, S. P., Brewer, P. G. & DeLong, E. F. Methane-consuming archaebacteria in marine sediments. *Nature* **398**, 802–5 (1999).
13. Knittel, K. & Boetius, A. Anaerobic oxidation of methane: progress with an unknown process. *Annu. Rev. Microbiol.* **63**, 311–34 (2009).
14. Chadwick, G. L. *et al.* Comparative genomics reveals electron transfer and syntrophic mechanisms differentiating methanotrophic and methanogenic archaea. *PLOS Biol.* **20**, e3001508 (2022).
15. Ruff, E. S. Microbial Communities and Metabolisms at Hydrocarbon Seeps. in *Marine Hydrocarbon Seeps* (eds. Teske, A. P. & Carvalho, V.) 1–19 (Springer Nature Switzerland AG, 2020). doi: 10.1007/978-3-030-34827-4_1.
16. Boetius, A. *et al.* A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. *Nature* **407**, 623–6 (2000).
17. Haroon, M. F. *et al.* Anaerobic oxidation of methane coupled to nitrate reduction in a novel archaeal lineage. *Nature* **500**, 567–570 (2013).
18. Cai, C. *et al.* A methanotrophic archaeon couples anaerobic oxidation of methane to Fe(III) reduction. *ISME J.* **12**, 1929–1939 (2018).
19. Ettwig, K. F. *et al.* Archaea catalyze iron-dependent anaerobic oxidation of methane. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **113**, 12792–12796 (2016).
20. Knittel, K., Wegener, G. & Boetius, A. Anaerobic Methane Oxidizers. in *Microbial Communities Utilizing Hydrocarbons and Lipids: Members, Metagenomics and Ecophysiology* 1–21 (Springer International Publishing, 2018). doi: 10.1007/978-3-319-60063-5_7-1.
21. Zhang, X. *et al.* Multi-heme cytochrome-mediated extracellular electron transfer by the anaerobic methanotroph '*Candidatus* Methanoperedens nitroreducens'. *Nat. Commun.* **14**, 6118 (2023).
22. Wegener, G., Laso-Pérez, R., Orphan, V. J. & Boetius, A. Anaerobic degradation of alkanes by marine archaea. *Annu. Rev. Microbiol.* **76**, 553–577 (2022).
23. Hallam, S. J., Girguis, P. R., Preston, C. M., Richardson, P. M. & DeLong, E. F. Identification of methyl coenzyme M reductase A (*mcrA*) genes associated with methane-oxidizing archaea. *Appl. Environ. Microbiol.* **69**, 5483–5491 (2003).
24. Rubin-Blum, M. *et al.* Diversity, activity, and abundance of benthic microbes in the Southeastern Mediterranean Sea. *FEMS Microbiol. Ecol.* **98**, fiac09 (2022).
25. Kalyuzhnaya, M. G., Puri, A. W. & Lidstrom, M. E. Metabolic engineering in methanotrophic bacteria. *Metab. Eng.* **29**, 142–152 (2015).
26. Rubin-Blum, M. *et al.* First evidence for the presence of iron oxidizing Zetaproteobacteria at the

Levantine continental margins. *PLoS One* **9**, e91456 (2014).
27. Könneke, M. *et al.* Ammonia-oxidizing archaea use the most energy-efficient aerobic pathway for CO_2 fixation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **111**, 8239–44 (2014).
28. Rubin-Blum, M. *et al.* Active microbial communities facilitate carbon turnover in brine pools found in the deep Southeastern Mediterranean Sea. *Mar. Environ. Res.* **198**, 106497 (2024).
29. Rubin-Blum, M., Dubilier, N. & Kleiner, M. Genetic evidence for two carbon fixation pathways (the Calvin-Benson-Bassham Cycle and the reverse tricarboxylic acid cycle) in symbiotic and free-living bacteria. *mSphere* **4**, 00394–18 (2019).
30. Omoregie, E. O. *et al.* Biogeochemistry and community composition of iron- and sulfur-precipitating microbial mats at the Chefren mud volcano (Nile Deep Sea Fan, Eastern Mediterranean). *Appl. Environ. Microbiol.* **74**, 3198–215 (2008).
31. Grünke, S. *et al.* Niche differentiation among mat-forming, sulfide-oxidizing bacteria at cold seeps of the Nile Deep Sea Fan (Eastern Mediterranean Sea). *Geobiology* **9**, 330–48 (2011).
32. Inagaki, F., Takai, K., Nealson, K. H. & Horikoshi, K. *Sulfurovum lithotrophicum* gen. nov., sp. nov., a novel sulfur-oxidizing chemolithoautotroph within the E-Proteobacteria isolated from Okinawa Trough hydrothermal sediments. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **54**, 1477–1482 (2004).
33. Felden, J. *et al.* Anaerobic methanotrophic community of a 5346-m-deep vesicomyid clam colony in the Japan Trench. *Geobiology* **12**, 183–199 (2014).
34. Sogin, E. M., Kleiner, M., Borowski, C., Gruber-Vodicka, H. R. & Dubilier, N. Life in the dark: phylogenetic and physiological diversity of chemosynthetic symbioses. *Annu. Rev. Microbiol.* **75**, 695–718 (2021).
35. Dubilier, N., Bergin, C. & Lott, C. Symbiotic diversity in marine animals: the art of harnessing chemosynthesis. *Nat. Rev. Microbiol.* **6**, 725–740 (2008).
36. Levin, L. A. Ecology of cold seep sediments: interactions of fauna with flow, chemistry and microbes. *Oceanogr. Mar. Biol. An Annu. Rev.* **43**, 1–46 (2005).
37. Rubin-Blum, M. *et al.* Fueled by methane: deep-sea sponges from asphalt seeps gain their nutrition from methane-oxidizing symbionts. *ISME J.* **13**, 1209–1225 (2019).
38. Rubin-Blum, M. *et al.* Short-chain alkanes fuel mussel and sponge *Cycloclasticus* symbionts from deep-sea gas and oil seeps. *Nat. Microbiol.* **2**, 17093 (2017).
39. Bright, M., Klose, J. & Nussbaumer, A. D. Giant tubeworms. *Curr. Biol.* **23**, R224–R225 (2013).
40. Durkin, A., Fisher, C. R. & Cordes, E. E. Extreme longevity in a deep-sea vestimentiferan tubeworm and its implications for the evolution of life history strategies. *Sci. Nat.* **104**, 63 (2017).
41. Nussbaumer, A. D., Fisher, C. R. & Bright, M. Horizontal endosymbiont transmission in hydrothermal vent tubeworms. *Nature* **441**, 345–348 (2006).

42. Rubin-Blum, M. *et al.* Distribution of the *Lamellibrachia* spp. (Siboglinidae, Annelida) and their trophosome endosymbiont phylotypes in the Mediterranean Sea. *Mar. Biol.* **161**, 1229–1239 (2014).
43. Zvi-Kedem, T., Shemesh, E., Tchernov, D. & Rubin-Blum, M. The worm affair: fidelity and environmental adaptation in symbiont species that co-occur in vestimentiferan tubeworms. *Environ. Microbiol. Rep.* **13**, 744–752 (2021).
44. Osvatic, J. T. *et al.* Gene loss and symbiont switching during adaptation to the deep sea in a globally distributed symbiosis. *ISME J.* **17**, 453–466 (2023).
45. Ratinskaia, L. *et al.* Metabolically-versatile *Ca.* Thiodiazotropha symbionts of the deep-sea lucinid clam Lucinoma kazani have the genetic potential to fix nitrogen. *ISME Commun.* **4**, 2024.04.05.588213 (2024).
46. Zvi-Kedem, T., Vintila, S., Kleiner, M., Tchernov, D. & Rubin-Blum, M. Metabolic handoffs between multiple symbionts may benefit the deep-sea bathymodioline mussels. *ISME Commun.* **3**, 48 (2023).
47. Laming, S. R. *et al.* Fickle or faithful: The roles of host and environmental context in determining symbiont composition in two bathymodioline mussels. *PLoS One* **10**, e0144307 (2015).
48. Treude, T., Kiel, S., Linke, P., Peckmann, J. & Goedert, J. L. Elasmobranch egg capsules associated with modern and ancient cold seeps: A nursery for marine deep-water predators. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **437**, 175–181 (2011).
49. Sisma-Ventura, G. *et al.* Cold seeps alter the near-bottom biogeochemistry in the ultraoligotrophic Southeastern Mediterranean Sea. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* **183**, 103744 (2022).
50. Rahav, E. *et al.* The deep water of Eastern Mediterranean Sea is a hotspot for bacterial activity. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **164**, 135–143 (2019).
51. Arellano, S. M., Van Gaest, A. L., Johnson, S. B., Vrijenhoek, R. C. & Youn, C. M. Larvae from deep-sea methane seeps disperse in surface waters. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **281**, 20133276 (2014).

21 פורמיניפרה בנתונים במים הכלכליים של ישראל בים התיכון - תפוצה, מאפיינים וסמנים לתנאי הסביבה

אורית חיימס-קפצן[1], אהובה אלמוגי-לבין[1], מיכאל קיטין[1], סופיה זולוטרבסקי[1] עירית גפן-סיזבסקי[1], הדר אלישיב[1], עודד כץ[1], ברק חרות[2]

המכון הגיאולוגי, ירושלים

orithy@gsi.gov.il, almogi@gsi.gov.il, misha.kit@gsi.gov.il, sofiazolot@gmail.com, iragefen@gmail.com, hadarely@post.bgu.ac.il, odedk@gsi.gov.il, barak@ocean.org.il

תקציר

פורמיניפרה (בעברית חוריריות) בנתונים מהווים קבוצה עיקרית וחשובה בקרב המיופאונה החיים במים העמוקים מ 200 מ'. בפרק זה תובא סקירה איכותית וכמותית המתארת את קבוצת הפורמיניפרה החיה במצע הרך בקרקעית הים העמוק, במים הכלכליים של ישראל בים התיכון המזרחי בטווח העומקים שבין 100 ל-1900 מ'. אפיון מאפייני הפורמיניפרה החיים והמתים בקרקעית העליונה התבצע לראשונה כחלק מסקר הרקע האסטרטגי הסביבתי שנעשה באזור (בשנת 2013) בשל הפיתוח המואץ של משאבי האנרגיה בים העמוק בחופי הלבנט מאז שנתגלו מאגרי הגז הגדולים מול חופי ישראל בשנת 2009. במסגרת הסקר, על מנת לבדוק את הקשר בין המאפיינים לתנאים הסביבתיים במדרון היבשת ובבתיאל, נדגם סדימנט מ- 50 תחנות באמצעות מחפר קופסא ומאספי הפורמיניפרה הגדולים מ 250 מיקרון נאספו מ 10 הס"מ העליונים והוגדרו עד לרמת המין. נמצאו בסה"כ 100 מינים חיים ו-197 מינים מתים, בהם 97 מינים שנמצאו הן במאסף החי והן במאסף התמותה. צפיפות הפרטים החיים המרבית היתה במדרון היבשת והיא נשארה גבוהה יחסית גם בבתיאל. לעומת זאת מספר הפרטים המתים עלה ככל שעומק המים גדל וזאת בגלל הצטברות השלדים במים העמוקים. מגוון המינים (מספר המינים ופישר אלפא) קטן עם עומק המים: הוא גבוה במדרון היבשת ויורד חדות לכיוון הבתיאל. בבתיאל, המין הנפוץ ביותר, *Ammolagena clavata*, מהווה לעיתים למעלה מ-70% מהמאסף כשהוא צמוד כמין אפיבנתי לשלדים מתים של כנפרגלאים פלנקטונים (pteropoda). באמצעות ניתוח אשכולות (Cluster Analysis) היררכי של המאסף החי הוגדרו שישה בתי גידול : שולי מדף היבשת, שתי סביבות במדרון יבשת עליון, מדרון יבשת תחתון, בתיאל מזרחי ובתיאל מערבי ואילו ניתוח האשכולות שנעשה על מאסף התמותה, הממצע את הנתונים, הגדיר ארבעה בתי גידול: שולי מדף היבשת, מדרון עליון, מדרון תחתון ובתיאל. בים העמוק (בתיאל) נמצאו 56 מינים אגלוטיננטים, כשמרביתם הוגדרו לראשונה במסגרת הסקר. באופן דומה הוגדרו 31 מיני פורמיניפרה השייכים למחלקת הנודוסרידים (Nodosarids) שנחשבו עד כה נדירים באזור הלבנט. נמצא קשר ישיר בין עלייה בריכוז הקלציום קרבונט ובגודל הגרגר בקרקעית הבתיאל לשליטה המלאה של המין *A. clavata*.

המינים *Globobulimina pseudospinescens* ו-*Uvigerina* sp.1 היו נפוצים בעיקר במדרון היבשת העליון באזורים שבהם ריכוז החומר האורגני היה הגבוה ביותר, כולל באזורים הסמוכים לפליטות מתאן. במספר תחנות במדרון ובבתיאל נמצאו מינים מתים של פורמיניפרים שמקורם ממדף היבשת הרדוד, שהוסעו לים העמוק ככל הנראה באמצעות זרמי עכירות, מנגנון שממשיך להיחקר.

מאספי הפורמיניפרה הבנתונים החיים והמתים במדרון היבשת והבתיאל בים התיכון של ישראל מאופיינים במינים ייחודיים, ומשמשים כסמנים רגישים לתנאי הסביבה ולשינויים מעשה ידי אדם.

מבוא

פורמיניפרה (Foraminifera) בנתונים (החיים בקרקעית הים) מהווים מרכיב חשוב של המיאופאונה החיה בקרקעית הים והם נפוצים בכל הסביבות הימיות, החל מביצות מלוחות וטבלאות גידוד במים הרדודים ביותר ועד לאזורים העמוקים ביותר בכל האוקיינוסים[1]. הפורמיניפרה נמנים עם קבוצת-העל Rhizaria, שהוגדרה באמצעות כלים מולקולריים הכוללים גם את הרדיולריה (Radiolaria) בעלי השלד הסיליקטי ועוד אורגניזמים חד-תאים רבים חסרי שלד מינרלי שלמרביתם "רגליים מדומות" (pseudopodia) מסועפות[2]. לרוב מיני הפורמיניפרה יש שלד (test) גירני (קרבונטי), הבנוי מהמינרל קלציט (פחמת הסידן ($CaCO_3$) דל או רב-מגנזי או ארגוניט שהם משקיעים ממי הים, או שלד אגלוטיננטי המורכב מחלקיקים המודבקים על ידם באמצעות דבק (צמנט) גירני או אורגני[3]. מרבית הפורמיניפרים בעלי השלד הקלציטי מייצגים שתי סדרות המשתייכות לשתי מחלקות המייצגות אסטרטגיות שונות לבניית שלד: מיליולידים (Tubothalamea) ורוטלידים (Globothalamea). לעומת זאת, שלד אגלוטיננטי המיוצר באופנים שונים, קיים בכל אחת מהמחלקות של הפורמיניפרה ולכן אינו מייצג תכונה אבולוציונית מתפתחת. שלדי הפורמיניפרה מסודרים במבנים טיפוסיים ברמה של מין/משפחה והם מכילים מינים עם חדר אחד או כאלה שגידולם דו-טורי, תלת-טורי או סיבובי. בנוסף קיימים מיני פורמיניפרה רבים חסרי שלד הנמנים על המחלקה Monothalamous[4].

פורמיניפרה ידועים ברגישותם הרבה לשינויים סביבתיים. במים העמוקים הם מגיבים בעיקר לשינויים בריכוזי חמצן ושטפי מזון, וניתן לזהות באמצעותם מגוון נרחב של סביבות מחיה בקרקעית הים[6,5]. בסביבה דלה בחומרי הזנה (אוליגוטרופית) הפורמיניפרה חיים לרוב על הקרקעית העליונה כאפיפאונלים. מינים עמוקים, החיים עד לעומק של מספר סנטימטרים בתוך הסדימנט, נמצאים בעיקר בסביבה עשירה יותר בחומרי הזנה (מזוטרופית). קבוצה של מינים החיים במעמקי הסדימנט ("אינפאונלים עמוקים") מסוגלים להתקיים גם בתנאי אנאוקסיה[8,7].

במרבית העבודות שבוצעו עד כה בים התיכון המזרחי, שמטבעו עני מאוד בנוטריינטים, מאפייני הפורמיניפרה הבנתונים החיים והמתים נבדקו מול חופי ישראל בעיקר במים הרדודים של מדף היבשת עד לעומק של 100 מטר. באזורים רדודים אלה זוהו מאספים הטיפוסיים לסביבה הסלעית, בעיקר פורמיניפרים גדולים (מעל 500 מיקרון) נושאי סימביונטים, חלקם מינים מהגרים מהים האדום ומרביתם בעלי אורח חיים אפיפיטי (חיים על גבי מאקרו-אצות). בנוסף, זוהו מאספי פורמיניפרה המאפיינים את הסביבה החולית (עד 30 מ' עומק מים) עם אנרגיית גלים גבוהה וריכוז חומר אורגני נמוך וכן מאספים המאפיינים את הסביבה הסילטית-חרסיתית (עד 100 מ' עומק מים) המאופיינת בריכוז חומר אורגני גבוה יחסית ובאנרגיית גלים נמוכה. כמו-כן, מאספי הפורמיניפרה (מגוון המינים

ומספר הפרטים) שתוארו לעיל מציגים שני בתי גידול עיקריים: מדרום למפרץ חיפה – הסביבה הנילוטית העשירה בקרקעית סיליסיקלסטית (עשירה בקוורץ), מושפעת בעיקר מהנילוס ומסכירתו לאחר 1965, וצפונה לראש כרמל – הסביבה הלבנטינית העשירה בשוניות סלעיות ובקרבונטים[9,10,11]. עבודות חדשות המתרכזות בהשפעת השינויים הסביבתיים מעשה ידי אדם כדוגמת עליית טמפרטורת ומליחות מי הים, עלייה בהרעבה (oligotrophication), החמצת מי הים, זיהומים שונים ופלישת מינים מים סוף לים התיכון, על מאספי הפורמיניפרה החיים בים הרדוד[12-17] מצביעות על רגישותה הגבוהה של קבוצה זו ועל שימושה כסמן (bioindicator) המעיד על השינויים החלים בעמודת המים התחתונה ובתנאי קרקעית הים ועוזר בתיעודם של השינויים. עד לאחרונה, מידע על מאספי הפורמיניפרה בים העמוק של ישראל היה נדיר, הן בגלל קשיים לוגיסטיים וכלכליים והן בגלל חוסר עניין מתוך מחשבה שקרקעית הים העמוק עניה בחומרי מזון ולכן הומוגנית ודלה ביצורים חיים.

שלדי הפורמיניפרה הקרבונטים הבנויים מפחמת הסידן נשמרים היטב בקרקעית הים ולכן ניתן באמצעות אנליזות גיאוכימיות של שלדים אלו לשחזר את תנאי העבר הקרוב והרחוק, דבר שלא ניתן לעשות באמצעות יצורים חסרי שלד. יחד עם זאת, במרבית האוקיינוסים במים העמוקים, מתחת לעומק הרוויה של הקרבונט, שלדים העשויים מקרבונט נוטים לעבור המסה, ואת מקומם תופסים מיני פורמיניפרה בעלי שלד אגלוטיננטי, שלד המורכב מחלקיקים המודבקים על ידם באמצעות צמנט קרבונטי או אורגני. לאחר מותם, מינים אלו לרוב אינם משתמרים זמן רב בקרקעית הים, ולכן מספרם במאספים החיים גבוה ובמאספי התמותה נמוך מאוד[18].

כדי לשחזר את תנאי קרקעית הים בעבר הרחוק, בוצעו מספר עבודות שהשתמשו במאספים מתים של פורמיניפרים שהשתמרו בגלעיני סדימנט ארוכים שהוצאו ממעמקי מזרח הים התיכון. ההתעניינות העיקרית הייתה בתחילת ההולוקן בפרק הזמן שבין 6500-10,000 שנים לפני ההווה, תקופה שבה קרקעית הים הייתה חסרת חמצן (אנאוקסית) והפכה לרוב לחסרת חיים מתחת לעומק מים של 700-1000 מ'[19]. בתקופה זו הצטבר במעמקי הים התיכון המזרחי ספרופל (sapropel) S1, הוא סדימנט עשיר בחומר אורגני, שניתן לזהותו על-פי צבעו הכהה והתכולה הגבוהה של החומר האורגני (>2%), וזאת בניגוד לצבע הסדימנט הבהיר והתכולה הנמוכה של החומר האורגני המאפיינת את הסדימנט הטבעי כיום בים אוליגוטרופי. דבר זה בא לידי ביטוי גם בשינויים מהירים בהרכב מאסף הפורמיניפרה לפני ובסיום הצטברות הספרופל[20,21]. על-פי השחזורים הסביבתיים השונים שבוצעו, נראה כי ב-5000 השנים האחרונות החלק המזרחי של הים התיכון הפך ליותר אוליגוטרופי בהשוואה להולוקן המוקדם.

בהמשך לתהליך האוליגוטרופיקציה (הרעבה) המתעצם של הים התיכון המזרחי, החל משנת 1965, עם בניית סכר אסואן והפסקת זרימת הנילוס לים התיכון, נחסמה ההסעה של נוטריינטים וחלקיקים דקים לעבר אזורים רחוקים, תהליך שנמשך גם כיום[17], וצפוי להשפיע על היצורים החיים בהווה בקרקעית הים העמוק[22]. עד כה בוצעו רק מחקרים ספורים ובהיקף מצומצם על מאפייני קבוצת הפורמיניפרה החיים בים העמוק. Parker (1958)[23] ו-Jannink (2001)[24] היו הראשונות שבדקו את מגוון ושכיחות הפורמיניפרה בסדימנטים שהוצאו בים התיכון המזרחי מעומקי מים שבין 50-4000 מ' ו-40-700 מ' בהתאמה. הן מצאו מאספים שונים כתלות בעומק המים והגדירו 38 ו-50 מינים בהתאמה. de Rijk et al. (1999, 2000)[25,26] שבדקו את שכיחות הקבוצה באזורנו ב-2 חתכי עומק מתוך 16 חתכי עומק שנבדקו בכל רחבי הים התיכון מצאו הרדדה משמעותית של המינים הנפוצים במזרח הים התיכון ביחס לעומק מחייתם במערב

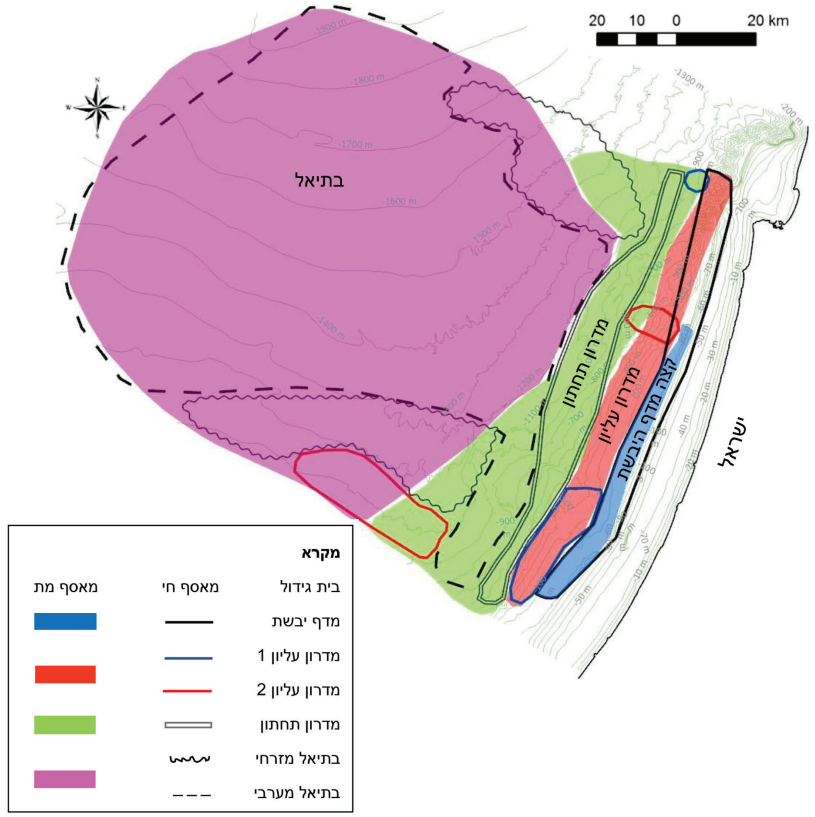
הים התיכון. הם ייחסו זאת לאוליגוטרופיות ההולכת וגדלה ככל שהולכים ממערב למזרח הים התיכון. מאז מציאת מאגרי הגז הגדולים מול חופי ישראל החל משנת 2009 (תמר, לווייתן וכריש), הפך השטח הכלכלי הבלעדי של המדינה (22,000 קמ"ר) לאזור בעל עניין כלכלי ותכנוני, כמו כן זהו אזור בו הולכת ומתעצמת הפעילות הימית (הנחת כבלי תקשורת, צינורות להובלת גז ועוד). לפיכך היה צורך מיידי בקיומו של סקר רקע אסטרטגי סביבתי שכלל 50 תחנות במים הכלכליים של ישראל, במטרה להשלים את פערי הידע ולמצוא בתי גידול בעלי עניין לשימור ולהגנה. במסגרת הסקר שנערך בקיץ 2013 נחקרה לראשונה גם קבוצת הפורמיניפרה מפני שטח הקרקעית (10 ס"מ עליונים) באמצעות קופסת מחפר 0.0625 מ^2 וזאת במטרה לקבל תמונה מלאה על תפוצת כלל המינים, כולל המינים האגלוטיניננטים שעד כה כמעט ולא הוגדרו[27]. בסקר הרקע האסטרטגי מיני הפורמיניפרה נבדקו גם בהקשר למאפייני התשתית שבה הם חיים (גדלי הגרגר, אחוז קרבונט ואחוז החומר האורגני הכללי) ולטופוגרפיה במרחב הימי[28]. בנוסף לבדיקת הפורמיניפרים החיים בפרקציית (מקטע) גודל מעל 250 מיקרון, שהופרדו על ידי צבען רוז בנגל, בכל תחנה נבדק גם מאסף התמותה שמשקף מיצוע (time-averaging) ונותן תמונה מדויקת ומלאה יותר של קבוצת הפורמיניפרה שחיו לאחרונה באזור (מאות שנים בודדות על סמך קצב סדימנטציה מוערך של 3 ס"מ לאלף שנה), דבר שלא ניתן להשיגו מדיגום חד פעמי (snap shot) של קרקעית הים העמוק.

שכיחות, מגוון המינים ובתי הגידול של הפורמיניפרה בים העמוק

בסקר בוצעו הגדרות טקסונומיות שהתבססו על עבודותיהם של[29-33] עד לרמת המין של כלל מיני הפורמיניפרה, הן במאספים החיים והן במאספי התמותה מכל תחנות הדיגום, ספירה של כלל הפרטים מאותו המין ואנליזות סטטיסטיות[34].

במחקרי פורמיניפרה חיים מקובל לעבוד על פרקציית גודל של 63 או 125 מיקרון[35] ואילו בסקר הזה התמקדנו דווקא על פרקציית גודל מעל 250 מיקרון במטרה להשוות את הפורמיניפרים עם אורגניזמים נוספים, גדולים יותר (מאקרופאונה), החיים בתוך קרקעית הים (תולעים, סרטנים ועוד). יחד עם זאת, בזכות העבודה על פרקציית הגודל הזו זיהינו בית גידול חדש, "שלדי הפטרופודה", עליו נדון בהרחבה כשנפרט על הבתיאל כבית גידול.

באופן מפתיע נוכחנו לדעת כי קרקעית הים העמוק אינה הומגנית כפי שחשבו תחילה וכי רגישותם הגבוהה של הפורמיניפרים לתנאים בקרקעית באה לידי ביטוי בכך שהמאספים החיים אפשרו לחלק את אזור המים הכלכליים של ישראל ל-6 בתי גידול הטרוגניים השונים זה מזה סטטיסטית על-פי ניתוח אשכולות (מקבצים). בתי הגידול שהוגדרו על סמך מגוון המינים ושכיחות הפרטים החיים בכל תחנה הם: (1) קצה מדף היבשת (601-105 מטר עומק מים); (2) מדרון עליון ראשון (994-400 מ'); (3) מדרון עליון שני (1113-422 מ'); (4) מדרון תחתון (1128-682 מ'); (5) בתיאל מזרחי, בקצוות הצפון מזרחיים והדרום מזרחיים של הבתיאל (1730-991 מ'); (6) בתיאל מערבי (1901-875 מ') (איור 1). מאסף התמותה הממצע שינויים של עונתיות, רביה, זיהום וכדומה, חילק את אותו אזור לארבעה בתי גידול בלבד על פי עומק המים: קצה מדף היבשת (214-105 מ'), מדרון עליון (601-400 מ'), מדרון תחתון (1453-682 מ') ובתיאל (1901-1113 מ') (איור 1).



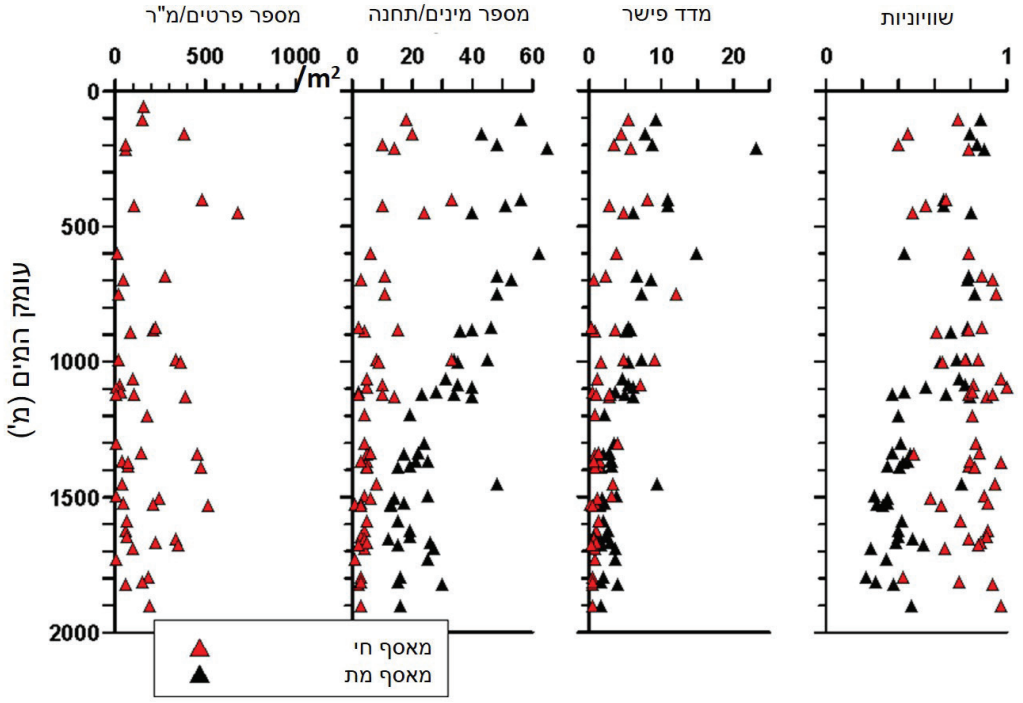
איור 1. מפה המציגה את אזורי הדיגום במים הכלכליים של ישראל ומראה את גבולות 6 בתי הגידול שהוגדרו סטטיסטית על ידי מאספי הפורמיניפרה החיים (קוים) ו-4 בתי הגידול שהוגדרו סטטיסטית על סמך המאספים המתים (כתוב וצבוע). אי התאמות קטנות בהשוואה בין גבולות המאסף החי ובין שטחי המאסף המת הצבועים נובעים מפיזור תחנות הדיגום, מגבלות ה-GIS ואקסטרפולציה. לפירוט נוסף על בתי הגידול ניתן לעיין ב-Hyams Kaphzan et al. (2018)[34].

מגוון המינים הכללי שהוגדר לראשונה בסקר הזה היה גבוה בפרקציית גודל של מעל 250 מיקרון, עם 100 מינים במאסף החיים ו-197 מינים במאסף התמותה, מתוכם 97 מינים משותפים[34]. מספר המינים החיים לתחנה נע בין 1-33 מינים, כאשר מספר המינים הגבוה ביותר היה במים הרדודים, ואילו בתחנות העמוקות מ-1000 מ' מספר המינים היה נמוך מ-5 מינים לתחנה (איור 2).

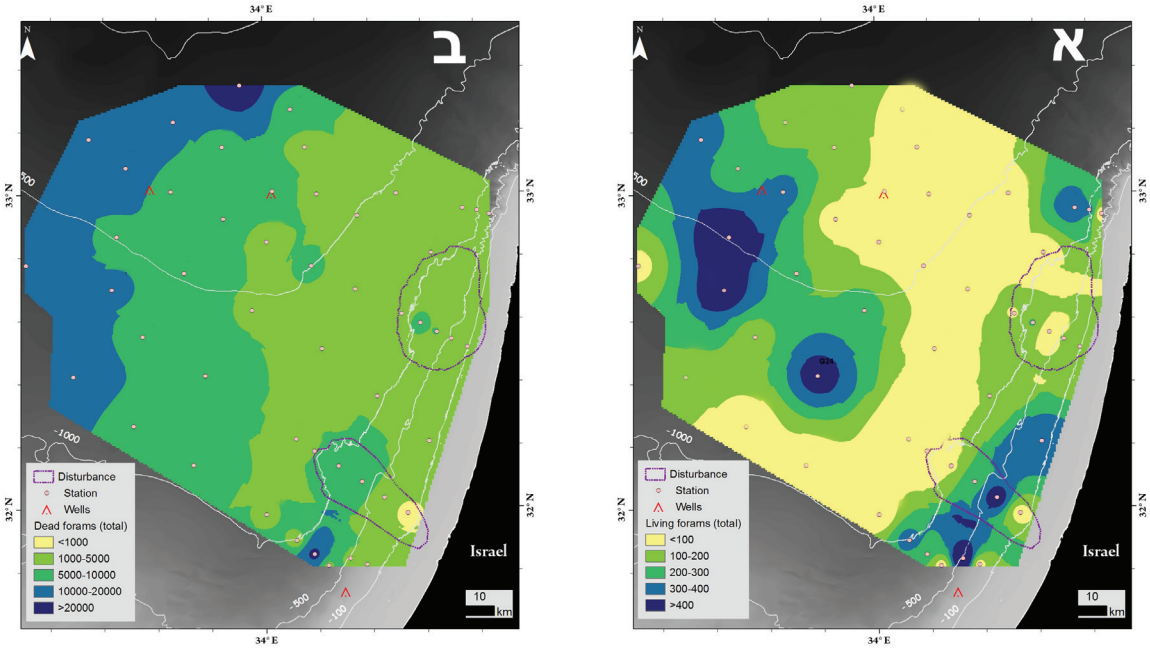
מאסף התמותה התאפיין במגוון מינים כפול מהמאסף החי והגיע עד 60 מינים לתחנה בעומקי המים הרדודים. בדומה למאסף החי, ככל שעומק המים גדל, מספר המינים המתים לתחנת דיגום ירד בצורה ניכרת. המספר הגבוה יותר של מינים במאסף התמותה בהשוואה למספרם במאסף החי מראה בברור את הספקטרום המלא של מינים שחי לאחרונה והשתמר באזור המחקר. מגוון המינים המיוצג גם על ידי מדד פישר-אלפא, מצביע על מגמה דומה של ירידה במגוון עם עלייה בעומק המים (איור 2).

ערכי השיוויוניות המתארים את פיזור פרטי הפורמיניפרה בין המינים השונים נעים בין 0-1, כאשר ערכים נמוכים מייצגים שליטה (דומיננטיות) של מין אחד או יותר ואילו ערכים הקרובים ל-1 מייצגים מספר דומה של פרטים המחולקים בין מספר המינים. מעניין לראות כי בעומקי הבתיאל השיוויוניות נשארה גבוהה ואוכלוסיית הפורמיניפרה עדיין מגוונת (איור 2). מספרי הפרטים החיים המירבי מצוי במדרון העליון ומגיע ל-700 פרטים חיים/מ"ר. מספר הפרטים החיים מוסיף להיות גבוה יחסית גם במים העמוקים (500 פרטים חיים/מ"ר), בעיקר בחלק מהתחנות הדרום מערביות ומצביע על בתיאל לא הומוגני המאופיין בכתמיות (איורים 2, 3א).

מספר הפרטים במאסף התמותה משתנה מאוד ונע בין 350 ל-30,000 פרטים לתחנה ובדר"כ מספר הפרטים המרבי גדל מערבה במקביל לעלייה בעומק המים (איור 3ב). מספר הפרטים במאסף התמותה גבוה ב-2-1 סדרי גודל ביחס למאסף הפורמיניפרים החיים וקשה לקבוע מה מכתיב את היחס המשתנה בין שני המאספים. ייתכן שקצבי רבייה גבוהים ומחזור חיים קצר של חלק מהמינים יכול להוביל לשונות כזו בין שני המאספים.



איור 2. אפיון מאספי הפורמיניפרה החיים והמתים בכל תחנות הדיגום מעומקי מים שבין 100-1900 מ'.



איור 3. מספר פרטי הפורמיניפרה החיים באזור הסקר א. ומספרם במאסף התמותה ב. פרטים חיים רבים יחסית נמצאו הן בתחנות מדרון היבשת וכן בתחנות במערב/דרום-מערב. במאסף התמותה יש עלייה ברורה במספר הפרטים לכיוון מערב וכן לדרום-מזרח.

מאפייני מאספי הפורמיניפרה החיים והמתים בבתי הגידול במים הכלכליים של ישראל

כל אחד משש בתי הגידול שהוגדרו סטטיסטית על סמך מאספי הפורמיניפרה החיים וארבעת בתי הגידול שהוגדרו על סמך מאפייני מאספי התמותה מתוארים בטבלה 1.

טבלה 1 - מאפייני הפורמיניפרה במאסף החי ובמאסף המת על פי חלוקה לבתי הגידול

מאפייני בית הגידול				מאפייני הפורמיניפרה			מינים דומיננטיים
מאספי הפורמיניפרה	בית גידול	מספר התחנות שנדגמו	טווח עומק (מ')	מספר הפרטים שנאספו	מספר הפרטים למטר רבוע	Chao-Sørensen - מדד דמיון	
מאסף חי	שולי מדף היבשת	5	105-601	668	2219±2468	0.58±0.23	*Amphicoryna scalaris, Astacolus crepidulus*
	מדרון עליון 1	3	400-994	1498	8295±2854	0.84±0.08	*Globobulimina pseudospinescens, Uvigerina* sp. 1, *Bulimina inflata*
	מדרון עליון 2	4	422-1113	159	660±735	0.22±0.19	*Gyroidina orbicularis, Lenticulina cultrata*
	מדרון תחתון	6	682-1128	1124	3112±2171	0.49±0.21	*Uvigerina* sp. 1, *Hemisphaerammina marisalbi, Ammolagena clavata*
	בתיאל מזרחי	7	991-1730	101	241±199	0.57±0.21	*Ammolagena clavata, Ammolagena minuta, Gyroidina altiformis*
	בתיאל מערבי	25	875-1901	4522	3130±2377	0.66±0.21	*Ammolagena clavata, Ammolagena minuta, Placopsilinella aurantiaca*
מאסף מת	שולי מדף היבשת	4	105-214	8240	34240±22880	0.70±0.12	*Reophax scorpiurus, Amphicoryna scalaris, Reophax fusiformis, Globobulimina affinis*
	מדרון עליון	4	422-601	8270	34330±25970	0.76±0.22	*Cibicides pachyderma, Globobulimina pseudospinescens, Uvigerina* sp. 1
	מדרון תחתון	17	682-1453	88060	97520±84610	0.87±0.07	*Uvigerina* sp. 1, *Ammolagena clavata*

מאסף הפורמיניפרים החיים בשולי מדף היבשת ובמדרון העליון-התחתון (100-1100 מ')

במים הרדודים יחסית של הים העמוק, המינים הנפוצים ביותר הם המין האגלוטיננטי *Reophax scorpiurus* השייך למחלקת הנודוסרידים (Nodosariata) בהתבסס על WoRMS (2024)[36] ונפוץ בעיקר בטווח העומקים של 100-200 מ' (איור 4 תמונה 15). המין Amphicoryna scalaris השייך גם הוא למחלקת הנודוסרידים[36] נמצא בעיקר בעומק של 100-750 מ' עם מספר מרבי בעומק 200 מ' (איור 5 תמונה 11). מבין הרוטליידים (סדרה Rotaliida), המינים הנפוצים ביותר מקצה המדף ועד למדרון התחתון הם *Globobulimina affinis* שנפוץ בעומק של 450-150 מ'; המין *Globobulimina pseudospinescens* הנפוץ בעומק של 900-450 מ' עם מספר גבוה של פרטים בעומקים 450 ו-750 מ' (איור 5 תמונה 19) והמין *Uvigerina* sp. 1 הנפוץ בעיקר בעומק של 1100-450 מ' (איור 5 תמונה 21). שלושת המינים האחרונים שייכים למחלקת הגלובוטלמאה (Globothalamea)[36] ומופיעים לרוב במופע כתמי באזורים בעלי ריכוז חומר אורגני (TOC) גבוה, למשל באזורים של פליטות מתאן[37] שהם אזורים נבחרים במדרון העליון (איור 6א, 6ב). תופעה ייחודית נוספת שנמצאה בסקר זה היא ההופעה של מינים רבים חיים של מחלקת הנודוסרידים, סדרת הלגנידים[36]

(Vaginulinida) שאת חלקם ניתן לראות באיור 5 (תמונות 11-15) בשיעור הרבה יותר גבוה ממספרם במאסף התמותה. יש קושי להסביר את ההבדל הגדול בשכיחות המספרית של מינים אלה בין המאסף החי למאסף התמותה. יתכן שהופעה זו קשורה לכך כי מינים אלה מאריכי חיים.

מאסף הפורמיניפרים החיים במדרון התחתון ובבתיאל (1900-700 מ')

המינים האגלוטיניננטים הם קבוצה נפוצה מאוד במים העמוקים מול חופי ישראל (איור 4) כשבמרביתם המרכיב האגלוטיננטי מודבק על ידי צמנט (דבק) אורגני (proteins) ולא מינרלי (פחמת הסידן). חלק גדול מהמינים חי בבית גידול ייחודי בסביבה הבתיאלית שבה יש עושר רב של שלדי פטרופודה שמורים היטב העשויים מהמינרל ארגוניט. ארגוניט נוטה בדרך כלל להתמוסס במים עמוקים ויש חשש שעם העלייה בהחמצת מי האוקיינוסים סביבה ייחודית זו תיעלם. מינים אגלוטיניננטים רבים צמודים לחלק החיצוני או הפנימי של שלדי הפטרופודה. בדר"כ הם חיים על מיני פטרופודה כגון *Clio pyramidata* ו-*Styliola subula* הנמנים על ה-*Cavolinioidea*. המין האגלוטיניננטי הנפוץ ביותר בסביבה זו בעומקי מים מעל 700 מ' הוא *Ammolagena clavata*, הצמוד לרוב לדופן החיצונית של שלד הפטרופוד (איור 4 תמונות 3-4). המין *Ammolagena minuta* נמצא גם הוא בטווח עומקים זהה והוא צמוד לחלק הפנימי של שלד הפטרופוד (איור 4 תמונות 5-6). גם המין *Hemisphaerammina bradyi* צמוד לדופן הפנימית של הפטרופוד והוא חי בעיקר בעומקים שבין 1700-900 מ' (איור 4 תמונה 10). מין נוסף שנמנה על מאסף זה הוא *Placopsilinella aurantiaca* (איור 4 תמונות 13-14). מין זה נמנה על ה-*Allogromiida* והוא חי על שלדי פטרופודה ושלדי פורמיניפרה פלנקטונים, לרוב בעומק של 1700-1300 מ'. שלדי הפטרופודה השייכים לקבוצת המאקרופאונה הנערמים לאחר מותם על קרקעית הבתיאל תורמים הן לעלייה באחוז הקרבונט בים העמוק והן לעליה משמעותית בגודל הגרגר[28,34]. מבין המיליולידים המין הנפוץ ביותר במים העמוקים הוא *Nummulopyrgo globulus*, הנפוץ בעומק של 1500-700 מ', ומבין הרוטלידים יש לציין את המין *Gyroidina altiformis*, שנפוץ בעומק של 1800-900 מ' ואת ה-*Gyroidina orbicularis* אשר הינו בעל טווח מחיה רחב, בין 1800-450 מ' (איור 5 תמונה 20).

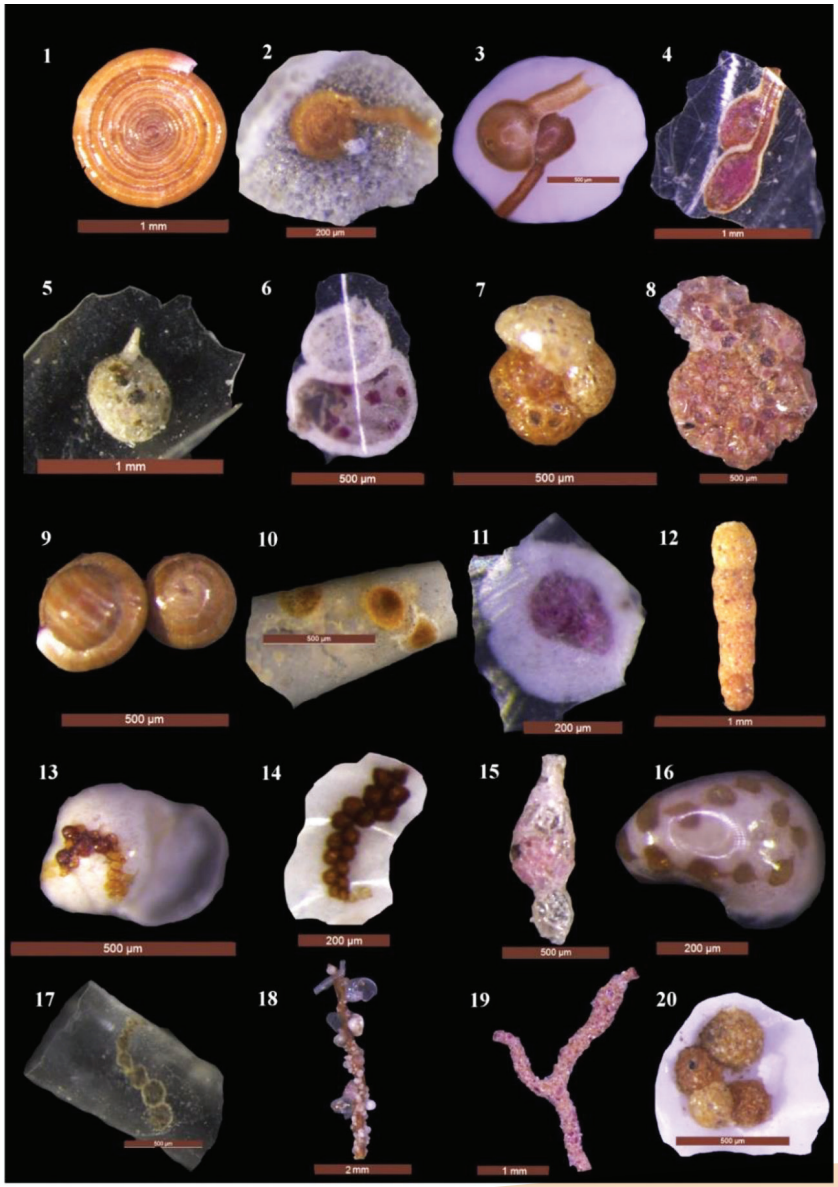
מאסף הפורמיניפרים המתים

בבתיאל העמוק הפורמיניפרים הנפוצים ביותר היו אגלוטיניננטים עם צמנט אורגני כגון *A. clavata*, שהיווה לעיתים מעל 70% ממאסף התמותה. העלייה במספר הפרטים של מין זה עם העומק קשורה כנראה לעלייה בריכוז הקרבונט בקרקעית הים, כפי שעולה מהדמיון הרב בין מפת ריכוזי הקרבונט בסדימנט לתפוצת המין (איור 7). אחוז הקרבונט הגבוה מאידך בסביבה הבתיאלית של מזרח הים התיכון, מקורו במספר הרב של שלדי פטרופודה ופורמיניפרה פלנקטוניים המהווים מצע אידיאלי עבור מין זה, שחי כמין אפיבנתי (epibenthic), כלומר צמוד על הצד החיצוני של שלד הפטרופוד (איור 7א). הפורמיניפרים האגלוטיניננטים נשמרים בסביבה זו היטב בדומה למים העמוקים בים האדום[18]. רק סביבות עניות בחומר אורגני ובפעילות מיקרוביאלית יכולות לשמר מינים אלו. במדרון התחתון נפוץ המין *Uvigerina sp.* 1 ובמספר מקרים מין זה מהווה חמישית עד שליש מכל מאסף התמותה. מינים נוספים הנפוצים במאסף התמותה במדרון היבשת הם *Globobulimina pseudospinescens* המהווה 66% מכלל המאסף בעומק 600 מ', ו-*Globobulimina affinis* המהווה 34% בעומק 422 מ'. בקצה מדף היבשת מופיעים מינים רבים כדוגמת, *Bigenerina nodosaria, Reophax scorpiurus, Reophax fusiformis, Amphicoryna scalaris* *Textularia agglutinans* וריכוז כל אחד מהם לרוב אינו עולה על 10%.

שינויים בזמן ובמרחב של תפוצת הפורמיניפרה – נקודות עניין להמשך מחקר

כאשר משווים את ששת בתי הגידול על פי המאספים החיים לארבעת בתי הגידול על פי מאספי התמותה, מצטיירת תמונה מעניינת שדורשת המשך מחקר. מאסף התמותה מראה כי מינים שחיו עד לאחרונה בעומקים גדולים יותר, נמצאים היום במאסף החי בעומקים רדודים יותר (איור 1). הרדדה זו בעומק המחיה יכולה לנבוע כתוצאה מתהליך אוליגוטרופיקציה (מחסור בנוטריינטים) הולך ומחמיר במזרח הים התיכון כתוצאה מסכירת הנילוס ב 1965 וירידה חדה ביצרנות הראשונית ובסדימנטים הדקים (בגודל חרסית) כפי שהציעו גם de Rijk et al. ,(2000)[26]. בכוונתנו להמשיך ולעקוב אחר תופעה זו, בזמן ובמרחב כאשר נשווה את תפוצת הפורמיניפרה החיים והמתים, מספר המינים ועומק המחיה שלהם בסדימנט גם בפרקציית הגודל מעל ל-125 מיקרון, הן במזרח הים התיכון האוליגוטרופי והן במערב הים התיכון המועשר בנוטריינטים. תשומת לב מיוחדת תינתן גם לבית הגידול "שלדי הפטרופודה" שהכיל מינים יחודיים אפיבנתים בבתיאל, ונבדוק את תפוצתו ושימורו גם במערב הים התיכון. בית גידול ייחודי זה עשוי להפוך בחלקו לשמורת טבע בים העמוק.

בנוסף, הרכב המינים במאסף התמותה בים העמוק חשף במפתיע גם הימצאות של מינים המוכרים מהמדף הרדוד (עומק מים קטן מ-100 מ') של ישראל[10,11] שנמצאו מעורבבים יחד עם המינים של המים העמוקים בחלק מתחנות הדיגום העמוקות בין 800-1900 מ', בעיקר מצפון למפרץ חיפה. ערבוב זה יכול לספק מידע על הובלה עכשווית של מיני פורמיניפרה ממים רדודים לעמוקים, דבר שקשור כנראה לאירועי הסעה באמצעות זרמי עכירות (Turbidites[38]) שמקורם במים רדודים יחסית, או הטלה של מצעים שנחפרו במים רדודים באתרים מסויימים. מידע זה יכול גם לסייע בזיהוי אזורים המועדים להפרעות ביציבות התשתית[39].



איור 4. מינים נבחרים של פורמיניפרים בנתונים אגלוטיננטים עם צמנט אורגני/ברזלי, שנמצאו בתחנות הדיגום במדרון היבשת ובבתיאל.

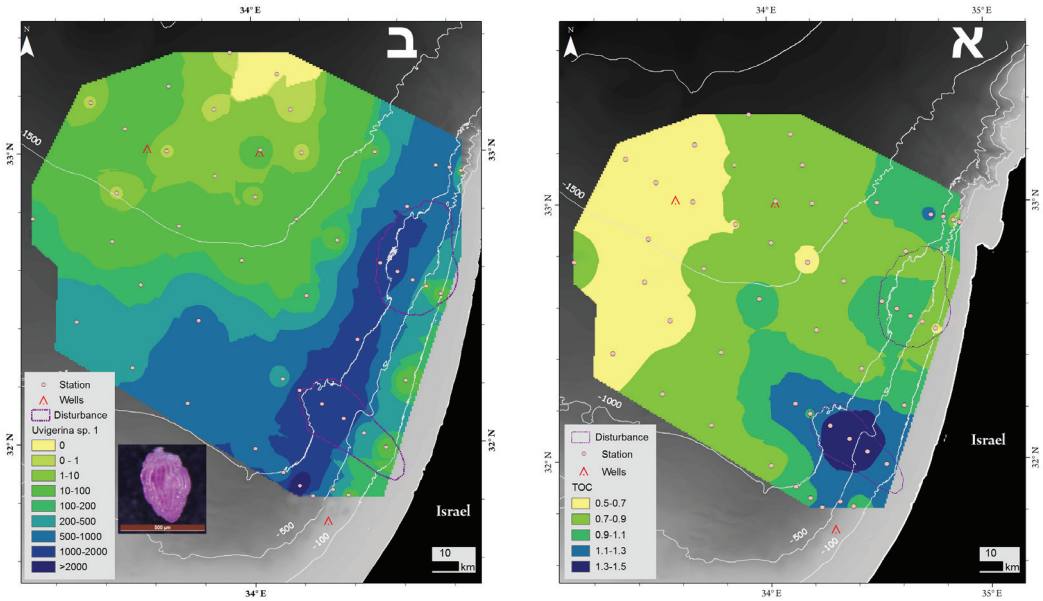
1. *Ammodiscus planorbis Höglund*, 1947 - מבט לטרלי;
2. *Ammodiscus tenuis* Brady, 1884 - צמוד לחלק פנימי של צדפה;
3. *Ammolagena clavata* (Jones & Parker, 1860) - שני פרטים צמודים לאוטוליט (מבט על);
4. *Ammolagena clavata* (Jones & Parker, 1860) - שני פרטים חיים (צבועים ברוז בנגל) צמודים לשבר של פטרופוד (מבט מתוך השלד השקוף על הצד שבו הפרט נצמד לפטרופוד);
5. *Ammolagena minuta* Zheng & Fu, 2001 - פרט צמוד לשבר של פטרופוד (מבט על הצד הפנימי של הפטרופוד שאליו נצמד הפורמיניפר);
6. *Ammolagena minuta* Zheng & Fu, 2001 - שני פרטים חיים צמודים לשבר של פטרופוד (מבט מהצד החיצוני של הפטרופוד על הפרט שנצמד לדופן הפנימית שלו);
7. *Cribrostomoides subglobosum* (Cushman, 1910) - מבט לטרלי;
8. *Discammina compressa* (Goës, 1882) - פרט חי, מבט לטרלי;
9. *Usbekistania charoides* (Jones & Parker, 1860) - שני פרטים, מבטים שונים;
10. *Hemisphaerammina bradyi* Loeblich & Tappan, 1957 - שלושה פרטים חיים צמודים לשבר של פטרופוד (מבט מהצד החיצוני של שלד הפטרופוד על הפרטים שנצמדים מבפנים);
11. *Hemisphaerammina* marisalbi (Schedrina, 1962) - פרט חי צמוד לשבר של פטרופוד; מבט מהצד החיצוני של הפטרופוד);
12. Liebusella goesi Höglund, 1947 – פרט חי, מבט לטרלי;
13. *Placopsilinella aurantiaca* Earland, 1934 – פרט חי, צמוד לפטרופוד (מבט על);
14. *Placopsilinella aurantiaca* Earland, 1934 – פרט חי, צמוד לשבר של צדפה (מבט על);
15. *Reophax scorpiurus* de Montfort, 1808 – פרט חי, שני חדרים, מבט לטרלי;
16. *Reophax* sp. 2 de Montfort, 1808 – פרט חי? בצבע כתום בתוך פטרופוד (מבט מהצד החיצוני של השלד על הצד הנצמד);
17. *Reophax* sp. 3 de Montfort, 1808 – פרט חי? בצבע ירוק בתוך פטרופוד (מבט מהצד החיצוני של השלד על הצד הנצמד);
18. *Rhizammina algaeformis* Brady, 1879 – פרט חי, מדביק על עצמו שברי פורמיניפרה ופטרופודה;
19. *Rhizammina* sp. Brady, 1879 – פרט חי;
20. *Saccammina socialis* Brady, 1884 – פרט חי, צמוד על צדפה (מבט על).

קנ"מ: תמונות 2, 11, 14, 16 – 200 מיקרון; תמונות 3, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 17, 20 – 500 מיקרון; תמונות 1, 4, 5, 12, 19 – 1000 מיקרון; תמונה 18 – 2000 מיקרון.

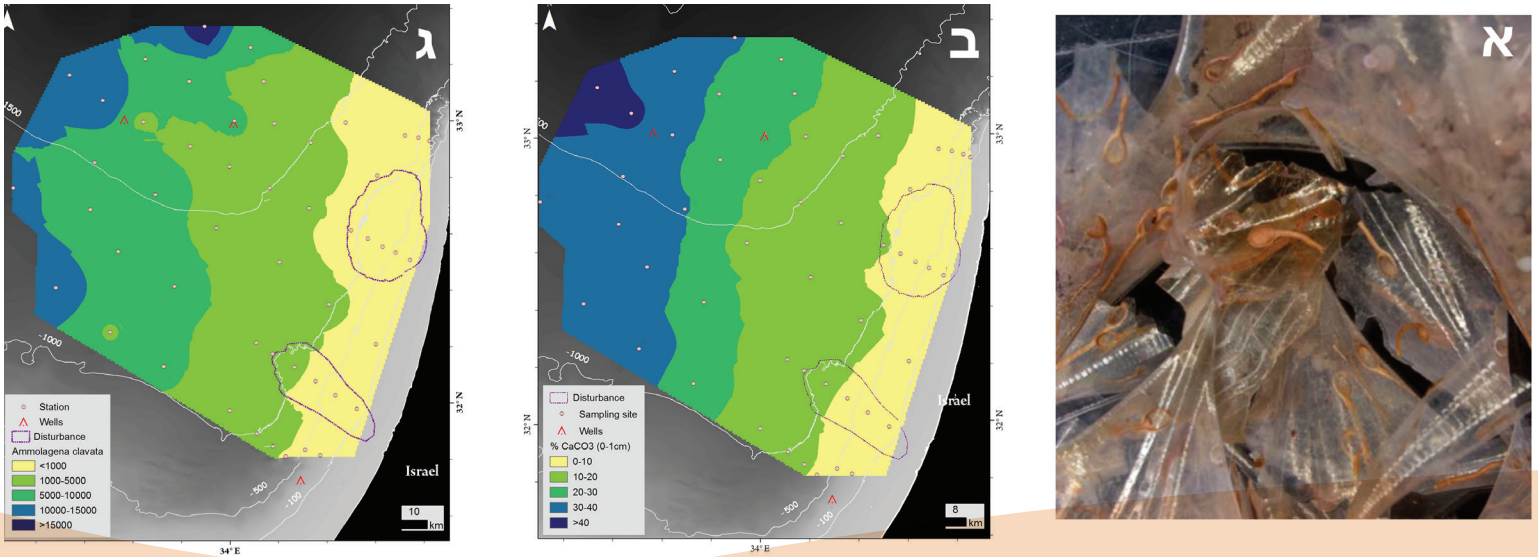
איור 5 - מינים נבחרים של פורמיניפרים בנתונים שהיו נפוצים בתחנות הדיגום במדרון היבשת. 1-4 – שלדים אגלוטיננטים עם צמנט אורגני; 5-21 – שלדים קרבונטים.

1. *Sphaerammina ovalis* Cushman, 1910 - מבט על הפתח;
2. *Tolypammina vagans* (Brady, 1879) – הפרט מתפתל על שלד הפטרופוד;
3. *Tritaxis fusca* (Williamson,1858) - צד ספירלי;
4. *Veleroninoides scitulus* (Brady, 1881) - מבט לטרלי;
5. *Cornuspira foliacea* (Philippi, 1844) - פרט חי, מבט לטרלי;
6. *Pyrgo depressa* (d'Orbigny, 1826) - פרט חי, מבט לטרלי;
7. *Pyrgoella sphaera* (d'Orbigny, 1839) - פרט חי, מבט לפתח;
8. *Spiroloculina excavata* d'Orbigny, 1846 - פרט חי, מבט לטרלי;
9. *Hoeglundina elegans* (d'Orbigny, 1878) - שני פרטים חיים, משמאל – צד ספירלי, מימין – צד אומביליקלי, שלד ארגוניטי;
10. *Robertinoides bradyi* (Cushman & Parker, 1936) - פרט חי, מבט לטרלי לכיוון הפתח, שלד ארגוניטי;
11. *Amphicoryna scalaris* (Batsch, 1791) - פרט חי, מבט לטרלי;
12. *Astacolus crepidulus* (Fichtel & Moll, 1798) - פרט חי, מבט לטרלי;
13. *Lenticulina cultrata* (Montfort, 1808) - פרט חי, מבט לטרלי;
14. *Lenticulina iota* (Cushman, 1923) - פרט חי, מבט לטרלי;
15. *Lingulina seminuda* Hantken, 1875 - פרט חי, מבט לטרלי;
16. *Bulimina inflata* Seguenza, 1862 - פרט חי, מבט לטרלי;
17. *Chilostomella oolina* Schwager, 1878 - פרט חי, מבט לטרלי מצד הפתח;
18. *Cibicides pachyderma* (Rzehak, 1886) - פרט חי, צד ספירלי;
19. *Globobulimina pseudospinescens* (Emiliani - פרט חי, מבט לטרלי;
20. *Gyroidina orbicularis* d'Orbigny, 1826 - פרט חי, צד ספירלי;
21. *Uvigerina* sp. 1 d'Orbigny, 1826 - פרט חי, מבט לטרלי;

קנ"מ: תמונות 10, 17, 20, 21 – 200 מיקרון; תמונות 1-9, 11, 12, 16 – 500 מיקרון; תמונות 13-15 – 1000 מיקרון.



איור 6. א. מפת ריכוזי הפחמן האורגני בסדימנט ב. מפת מספרי פרטים של המין *Uvigerina sp.*1 (מאסף תמותה) עם תמונה של המין כאשר הוא צבוע ברוז בנגל, חי.



איור 7. א. תמונה המראה פרטי פורמיניפרה מהמין *Ammolagena clavata* מתים צמודים לצד החיצוני של הפטרופוד *Clio pyramidata* הנפוץ מאוד במזרח הים התיכון. ב. מפת ריכוזי הקרבונט באחוזים במים הכלכליים של ישראל; ג. מפת מספרי הפרטים של *Ammolagena* clavata (מאסף תמותה).

סיכום

מאספי הפורמיניפרה החיים והמתים הייחודיים שהתגלו בים העמוק של ישראל מעידים כי הפורמינפרים הם סמנים רגישים לתנאי הסביבה. הדבר בא לידי ביטוי בהגדרת בתי גידול שאינם הומוגנים בעלי מאפיינים שונים בתנאי קרקעית המדרון והים העמוק. יש להמשיך ולבחון קבוצה זו בהקשר של שמורות טבע ימיות, הפרעה לתשתית כתוצאה מזרמי עכירות וגלישות מדרון, התקדמות האוליגוטרופיות במזרח הים התיכון כתוצאה מסכירת הנילוס, החמצת מי הים, שינויי אקלים ועוד.

תודות

ברצוננו להודות למינהל אוצרות הטבע ובראשו למר אילן ניסים שמימן עבודה זו. תודות לעובדי המכון הגיאולוגי סטיבן אברהמס וגלינה פירשטיין על עזרתם הרבה במיון הפורמיניפרה, ולבת-שבע כהן על עזרתה המקצועית עם האיורים. תודה לד"ר משה תום, חיא"ל חיפה, על העזרה בסטטיסטיקה והכנת מפת הדיגום של בתי הגידול.

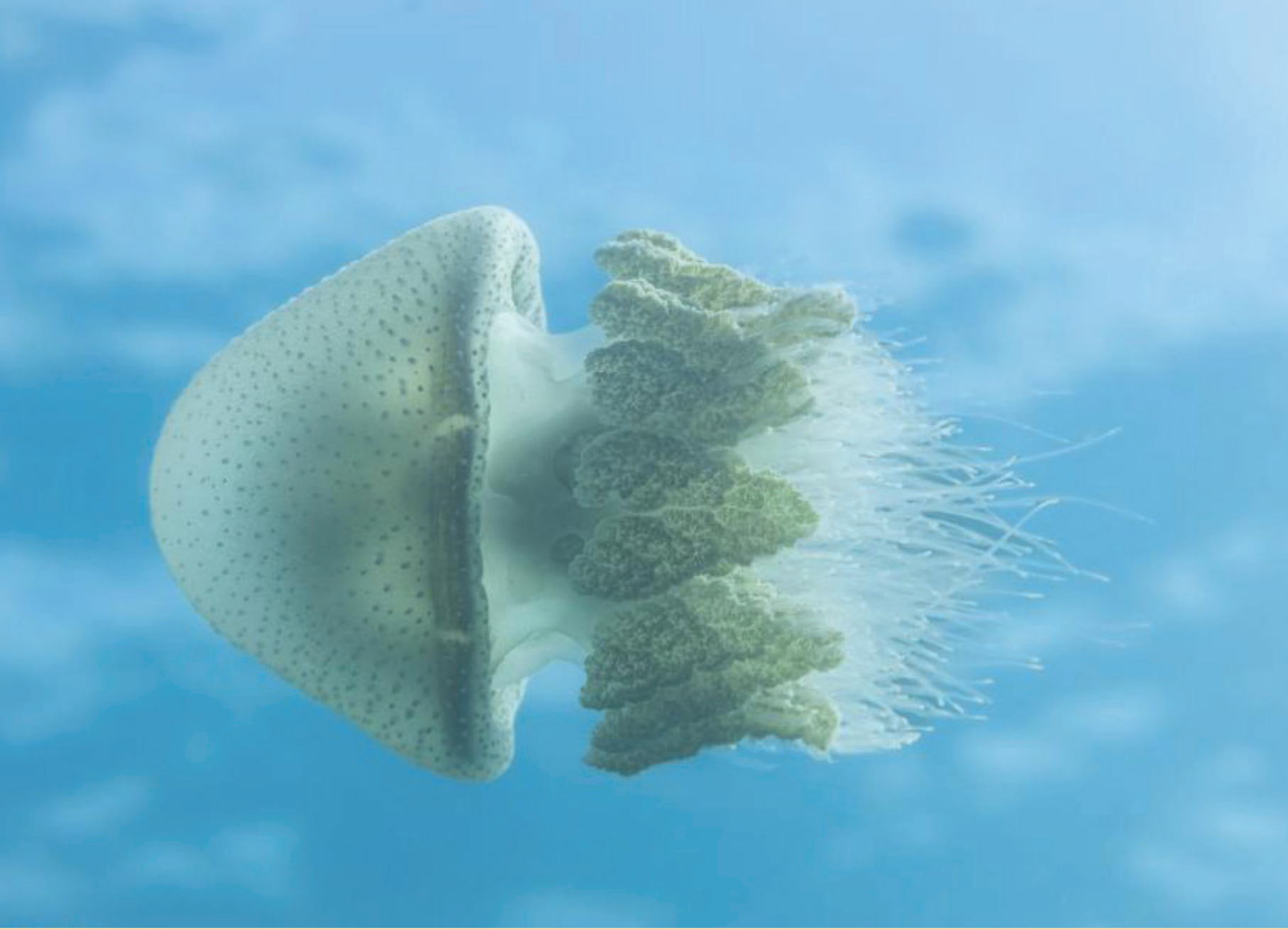
רשימת מקורות

1. Danovaro, R., *et al.* Deep-Sea Biodiversity in the Mediterranean Sea: The Known, the Unknown, and the Unknowable. *PLoS One* **5**, e11832 (2010).
2. Pawlowski, J. & Burki, F. *J.* Untangling the Phylogeny of Amoeboid Protist. Eukaryot. *Microbiol.* **55**, 16-25 (2009).
3. Sen Gupta, B.K. Modern Foraminifera. Kluwer *Academic Publishers* 371 pp. (1999).
4. Habura, A., Goldstein, S.T., Broderick, S. & Bowser, S.S. A bush, not a tree: the extraordinary diversity of cold-water basal foraminiferans extends to warm-water environments. *Limnol. Oceanogr.* **53**, 1339-1351 (2008).
5. Jorissen, F.J., De Stigter, H.C. & Widmark, J.G.V. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Mar. Micropaleontol.* **26**, 3-15 (1995).
6. de Stigter, H.C., Jorissen, F.J. & Van der Zwaan, G.J. Bathymetric distribution and microhabitat partitioning of live (Rose Bengal stained) benthic foraminifera along a shelf to bathyal transect in the southern Adriatic Sea. *J. Foraminifer. Res.* **28**, 40-65 (1998).
7. Corliss, B.H. Morphology and microhabitat preferences of benthic foraminifera from the northwest Atlantic Ocean. *Mar. Micropaleontol.* **17**, 195-236 (1991).
8. Piña-Ochoa, E., Høgslund, S., Geslin, E., Cedhagen, T., Revsbech, N.P., Nielsen, L.P., Schweizer, M., Jorissen, F., Rysgaard, S. & Risgaard-Petersen, N. Widespread occurrence of nitrate storage and denitrification among Foraminifera and Gromiida. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **107**, 1148-1153 (2010).

9. Hyams, O., Almogi-Labin, A. & Benjamini, C. Larger foraminifera of the southeastern Mediterranean shallow continental shelf off Israel. *Isr. J. Earth Sci.* **51**, 169-179 (2002).
10. Hyams-Kaphzan, O., Almogi-Labin, A., Sivan, D. & Benjamini, C. 2008. Benthic foraminifera assemblage change along the southeastern Mediterranean inner shelf due to fall-off of Nile-derived siliciclastics. *Neues Jahrb. Geol. Palaeontol. Abh.* **248**, 315-344 (2008).
11. Avnaim-Katav, S., Almogi-Labin, A., Herut, B., Kanari, M. & Guy-Haim, T. Benthic foraminifera from the Southeastern Mediterranean shelf: Dead assemblages and living-dead comparisons recording consequences of Nile River damming. *Mar. Micropaleontol.* **164** (2021).
12. Hyams-Kaphzan, O., Almogi-Labin, A., Benjamini, C. & Herut, B. Natural oligotrophy vs. pollution-induced eutrophy on the SE Mediterranean shallow shelf (Israel): environmental parameters and benthic foraminifera. *Mar. Pollut. Bull.* **58**, 1888-1902 (2009).
13. Hyams-Kaphzan, O., Perelis Grossowicz, L. & Almogi-Labin, A. Characteristics of benthic foraminifera inhabiting rocky reefs in northern Israeli Mediterranean shelf. The Ministry of National Infrastructure, Chief Scientist office, Report no. ES-20-14, 30 pp. (2014).
14. Titelboim D., *et al.* Selective responses of benthic foraminifera to thermal pollution. *Mar. Pollut. Bull.* **105**, 324-336 (2016).
15. Avnaim-Katav, S., Almogi-Labin, A., Kanari, M. & Herut, B. Living benthic foraminifera of southeastern Mediterranean ultra-oligotrophic shelf habitats: Implications for ecological studies. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **234**, Article 106633 (2020).
16. Kenigsberg, C., *et al.* The combined effects of rising temperature and salinity may halt the future proliferation of symbiont-bearing foraminifera as ecosystem engineers. *Sci. Total Environ.* **806**, 150581 (2022).
17. Herut, B., *et al.* Marine oligotrophication due to fine sediments and nutrient starvation caused by anthropogenic sediment and water retention in large rivers: the Nile damming case. *Front. Mar. Sci.* 10:1226379 (2023).
18. Edelman-Furstenberg, Y., Scherbacher, M., Hemleben Ch, Almogi-Labin, A. Deep-sea benthic foraminifera from the central Red Sea. *J. Foramin. Res.* **31**, 48-59 (2001).
19. de Lange, G.J., Thomson, J., Reitz, A., Slomp, C.P. Principato, M.S., Erba, E. & Corselli, C. Synchronous basin-wide formation and redox-controlled preservation of a Mediterranean sapropel. *Nat. Geosci.* **1**, 606-610 (2008).
20. Avnaim-Katav, S. Benthic foraminifera as a tool for reconstructing Holocene climate changes in the eastern Mediterranean basin, in an attempt to correlate them to the historical and archaeological record *M.A thesis*, Haifa University (2005).
21. Schmiedl, G., *et al.* Climatic forcing of eastern Mediterranean deep-water formation and benthic ecosystems during the past 22 000 years. *Quat. Sci. Rev.*2010) 3006-3020 ,**29**).

22. Katz, T., Bookman, R., Herut, B., Goodman-Tchernov, B. & Sisma-Ventura, G. Far-field effects of the Nile damming on the silica cycle in the Southeastern Mediterranean Sea. *Sci. Total Environ.* **921**, 171274 (2024).
23. Parker, F.L. Eastern Mediterranean Foraminifera. *Deep Sea Exped.* **8**, 217-283 (1958).
24. Jannink, N.T. Seasonality, biodiversity and microhabitats in benthic foraminiferal communities. Geol. Ultra, **203**, 1-192 (2001).
25. de Rijk, S., Troelstra, S.R. & Rohling, E.J. Benthic foraminiferal distribution in the Mediterranean Sea. *J. Foraminifer. Res.* **29**, 93-100 (1999).
26. de Rijk, S., Jorissen, F.J., Rohling, E.J. & Troelstra, S.R. Organic flux control on bathymetric zonation of Mediterranean benthic foraminifera. *Mar. Micropaleontol.* **40**, 151-166 (2000).
27. חרות, ב. וחובריו, סקר רקע סביבתי באזור המים הכלכליים של ישראל בים התיכון, פרק 9 – פורמיניפרה בנתונים כסמנים לתנאי קרקעית הים העמוק מול חופי ישראל דוח חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל) IOLR Report H61/2014; דוח מכון גיאולוגי GSI/34/2014 (2014).
28. תום, מ. וחובריו, איסוף וניתוח מידע סביבתי קיים, מיפוי בתי גידול והצעה למדדים לפגיעות אקולוגית בהקשר לפעילות הנדסית של חיפוש והפקת נפט וגז טבעי במרחב הימי של ישראל בים התיכון. דוח חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל) IOLR Report H20/2015; דוח מכון גיאולוגי GSI/11/2015 (2015).
29. Loeblich, A.R. & Tappan, H. Foraminiferal Genera and Their Classification. Van Nostrand Reinhold, 2v. 970 pp. (1987).
30. Loeblich, A.R. & Tappan, H. Foraminifera of the Sahul shelf and Timor Sea. Cushman Foundation for Foraminiferal Research. Special Publication **31**, 661 pp. (1994).
31. Murray, J.W. & Alve, E. The distribution of agglutinated foraminifera in NW European Seas: Baseline data for the interpretation of fossil assemblages. *Palaeontologia Electronica*, **14.2.**14A, 41 pp. (2011).
32. Milker, Y. & Schmiedl, G. A taxonomic guide to modern benthic shelf foraminifera of the western Mediterranean Sea. *Palaeontologia Electronica* **15**, 16A, 134 pp. (2012).
33. Hayward, B.W., Cedhagen, T., Kaminski, M. & Gross, O. World Foraminifera Database. http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=112857 on 2015-01-06 (2014).
34. Hyams-Kaphzan, *et al.* Live and dead deep-sea benthic foraminifera of the Levantine basin (SE Mediterranean) and their ecological characteristics. *Deep-Sea Res.* Part I, **136**, 72-83 (2018).
35. *Schönfeld, J.,* et *al.* Members of the FOBIMO group. *Mar. Micropalontol.* **94-95**, 1-13 (2012).
36. WoRMS Editorial Board . World Register of Marine Species. (2024). www.marinespecies.org.
37. Basso, D., *et al.* Macro- and micro-fauna from cold seeps in the Palmahim Disturbance (Israeli offshore), with description of *Waisiuconcha corsellii* n.sp. (Bivalvia, Vesicomyidae). *Deep Sea Res.* Part II **171** 104723 (2020).
38. Jaijel, R., Biton, E., Weinstein, Y., Ozer, T. & Katz, T. Observations of turbidity currents in a small, slope-confined submarine canyon in the Eastern Mediterranean Sea. *Earth Planet. Sci.* **604**,118008 (2023).

39. Ashkenazi, L., *et al.* Benthic foraminifera as indicators of recent mixed turbidite-contourite sediment transport systems in the Eastern Mediterranean upper continental slope offshore Israel. *Mar. Geol.* **445**, 10106756 (2022).



המדוזה פעמונית נקודה *Phyllorhiza punctata* - White-spotted jellyfish.
חוף קיסריה בעומק של כ-2 מטרים, יולי 2022. מין שמקורו בחופי אוסטרליה ובשנים האחרונות נצפה יחד עם נחילי הקיץ של המדוזה חוטית נודדת *(Rhopilema nomadica)*. לפעמונית נקודה צריבה יחסית חלשה ביחס לחוטית הנודדת. צילום: איתי גריסרו.

22 חי-טחביים - זעירים אך מרתקים

נגה סוקולובר

מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, המרכז הלאומי לחקר מגוון ביולוגי, אוניברסיטת תל אביב.

nogasoko@tauex.tau.ac.il

תקציר

חי-טחביים היא מערכה של חסרי חוליות בסביבות ימיות ואקווטיות ולמרות הימצאותם של מינים מהמערכה בסביבות חיים רבות ועל אף חשיבותה האקולוגית של המערכה, היא אינה ידועה מספיק ואינה נלמדת ונחקרת בהיקף משמעותי. הפרטים במערכה זו קשים לזיהוי טקסונומי ובמקרים רבים הם לא בולטים וסביר שזו אחת הסיבות ל"הזנחת" המערכה.

בפרק זה מובאת סקירה קצרה מי הם החי-טחביים, מהי משמעותם האקולוגית ומהם תחומי המחקר המובילים היום, כולל טקסונומיה כללית ומה ידוע על מינים בישראל. הסקירה מהווה היכרות עם המערכה ונוגעת בנושאים כללים ומכילה רשימת ספרות מפורטת שמאפשרת למעוניינים להעמיק יותר.

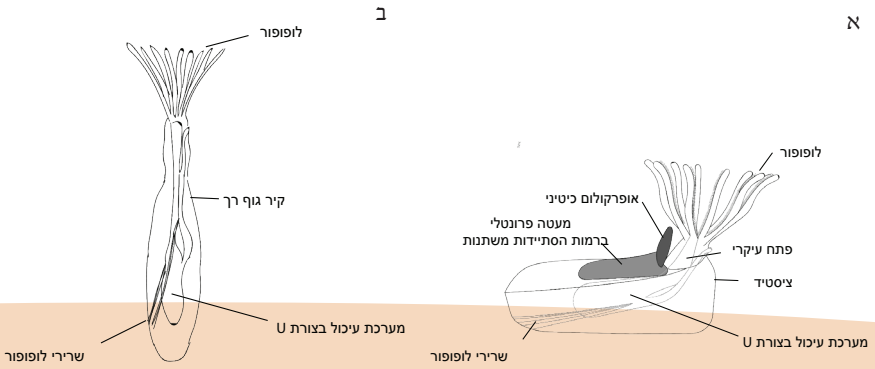
מבוא

חי-טחביים (Bryozoa) היא מערכה של חסרי חוליות ימיים ואקוואטים, מושבתיים, מסננים וישיבים (אם כי ידועים כ-35 מינים שאינם ישיבים ממשפחת ה-Cupuladriidae). למערכה ישנם נציגים בכל גופי המים ותפוצתם קוסמופוליטית: במים מתוקים, מליחים ומלוחים, באוקיינוסים הטרופיים והסוב-טרופיים ועד הקטבים ובטווח עומקים גדול[1]. ניתן למצוא מושבות של חי-טחביים על גבי מגוון של מצעי התיישבות, בעיקר סלעים ואפילו בין גרגרי סדימנט (interstitial)[2-4] ובקרקע חולית. יש מינים המתיישבים על צמחים, ומינים הגדלים על בעלי חיים אחרים (אפיזואים, בעיקר על סרטנים ורכיכות וכן על קווצי עור, אצטלנים ואפילו על שריונם של צבי-ים)[5–8]. המורפולוגיה של המושבות מגוונת מאוד: ישנן מושבות מרפדות, שיחניות ודמויות טחב ומושבות דמויות תחרה. בשל צורתם, לעיתים קרובות מבלבלים אותם עם אורגניזמים אחרים כמו הידרתיים, אלמוגים, איצטלנים מושבתיים ואצות[9]. בעבר התייחסו למערכה בשמות שונים, כשחלק מהמינים שנאספו יובשו וקוטלגו בכלל בעשביות (Herbarium) ובאופן כללי המערכה נחשבה ל"קטנה ולא חשובה" וקוטלגה ונלמדה יחד עם מערכות שמכילות מינים מועטים (כגון Gastrotricha; גלגיליות=Rotifera; זרוע-רגליים= Brachiopoda; תולעי חץ=Chaetognatha, Phoronida)[10]. במהלך מאה השנים האחרונות הוכפל מספר המינים העכשוויים (הרצנטיים) המוכרים במערכה ונכון להיום מתוארים

מעל 6500 מינים רצנטיים וכ-15,000 מינים מאובנים[11].
כמעט כל החי-טחביים הינם מושבתיים כשהמושבות מורכבות מיחידות הנקראות זואידים (Zooids). ישנם מספר מינים בודדים שמורכבים מזואיד ניזון יחיד אבל עם ניצנים של זואידים נוספים ולכן עדיין נחשבים כמושבתיים. המושבה גדלה בהנצה של זואידים חדשים מתוך אלו הקיימים. הזואידים נושאים איבר סינון הנקרא לופופור (Lophophore) המורכב מזרועות ריסניות ובעזרתו נעשה סינון אקטיבי של חלקיקי מזון קטנים מהמים. הלופופור יכול להתכנס לתוך הזואיד במהירות בעזרת שרירים כהגנה מטורפים[12]. כאשר השרירים לא מכווצים, נוזל הצלום למעשה דוחף ויוצר את הפריסה של הלופופור חזרה לגוף המים[9]. גודל ממוצע של זואיד נע בין 0.5 לבין 1 מ"מ[10]. מרבית המינים משקיעים שלד גירני.

מבנה כללי ואנטומיה

המורפולוגיה של המושבות מגוונת מאוד: החל ממה שנראה כציפוי דק על סלע או אצה, דרך צורה של עלעלים (fronds) רכים, דמויות שיחים, רשתות תחרה קשיחות ועד מבנים קשים דמויי שונית[13]. גם הרכב השלד של המושבות מגוון, כשמינים המשתייכים לסדרת ה-Cheilostomata או לסדרת Cyclostomata משקיעים שלד גירני ברמות שונות לעומת מינים מהמחלקה Phylactolaemata ומהסדרה Ctenostomata אשר אינם משקיעים שלד גירני ומעטה הגוף מורכב משלד חלבוני, לעיתים ג'לטיני ולעיתים קוטיקולרי[12].
מושבות החי-טחביים בנויות מיחידות קטנות (קטנות מ-1 מ"מ) הנקראות זואידים. המבנה הבסיסי של הזואיד מורכב מהגוף הרך הנושא את הלופופור שהוא כתר של זרועות ריסניות שבמרכזו פתח פה, הפה מוביל לתעלת עיכול עם מעי בצורת U, שרירים וגנגליון עצבי. אלה ממוקמים בתוך הציסטיד (Cystid) או הזואציום (Zooecium) הנראה כמעין קופסית. הציסטיד כולל גם את השלד החיצוני[1] (איור 1).



איור 1. דוגמה סכמטית למבנה של זואיד תזונה כללי: א. זואיד מהסדרה Cheilostomata בעל קיר גוף גירני. ב. זואיד מהסדרה Ctenostomata בעל גוף רך ללא גיר. זואידים בסדרות האחרות לא מובאים באיור זה אך בנויים באופן דומה עם הבדלים המובאים בהסבר על הסדרות השונות.

זואידים בסדרה Cheilostomata, הסדרה הגדולה בחי-טחביים היום המאופיינת בשלד חיצוני ופולימורפיזם (Polymorphism) המפותחים ביותר, נחלקים לשני סוגים פונקציונליים: אוטוזואיד (Autozooid) – המבצע את הפעילויות הבסיסיות של תזונה ורבייה והטרוזואיד (Heterozooid) – זואיד עם התמחות מוכרים לנו. ההטרוזואידים הבאים: קנוזואיד (Kenozooid) שיש לו תפקיד מבני, אביקולריום (Avicularuim) המשמש להגנה וסילוק מתיישבים, ויברקולום (Vibraculum) המשמש לתנועה במינים החופשיים ולניקוי מחול וכן זואיד המשמש כחדר הדגרה לעוברים ונקרא אוביצל (Ovicell).

בסדרה זו התפתח גם מעטה פרונטלי (frontal shield) שבו ממוקם הפתח העיקרי (primary orifice) שדרכו הלופופור יוצא ונפרס במים או מתכנס פנימה לתוך הזואיד. בד"כ קיים אופרקולום (Operculum) שהוא מכסה כיטיני הסוגר את הפתח העיקרי כשהלופופור מכונס פנימה. בהטרוזואידים שעברו מודיפיקציה כמו באביקולריה, האופרקולום הכיטיני התפתח למעין לסת כיטינית עם יכולת תנועה[14].

דרגת ההשקעה של השלד הגירני החיצוני (Calcification) משתנה ומשמשת במיון הסיסטמתי/טקסונומי של פרטים במערכה. למעשה מתייחסים לקיומם של שני סוגי שלד חיצוני: 1. גימנוציסט (Gymnocyst) – יצירת שכבה גירנית מחוץ לשלד הקוטיקולרי. 2. קריפטוציסט (Cryptocyst) – שכבה גירנית התחומה משני הצדדים באפידרמיס ולכן היא נראית קצת כמו שלד פנימי. לרוב שני הסוגים קיימים בפרופורציות שונות באותו המין ובמיעוט המינים יהיה רק אחד מהשניים. תכונה זו משמשת במיון הסיסטמטי של פרטים במערכה[15].

טקסונומיה ופילוגנזה

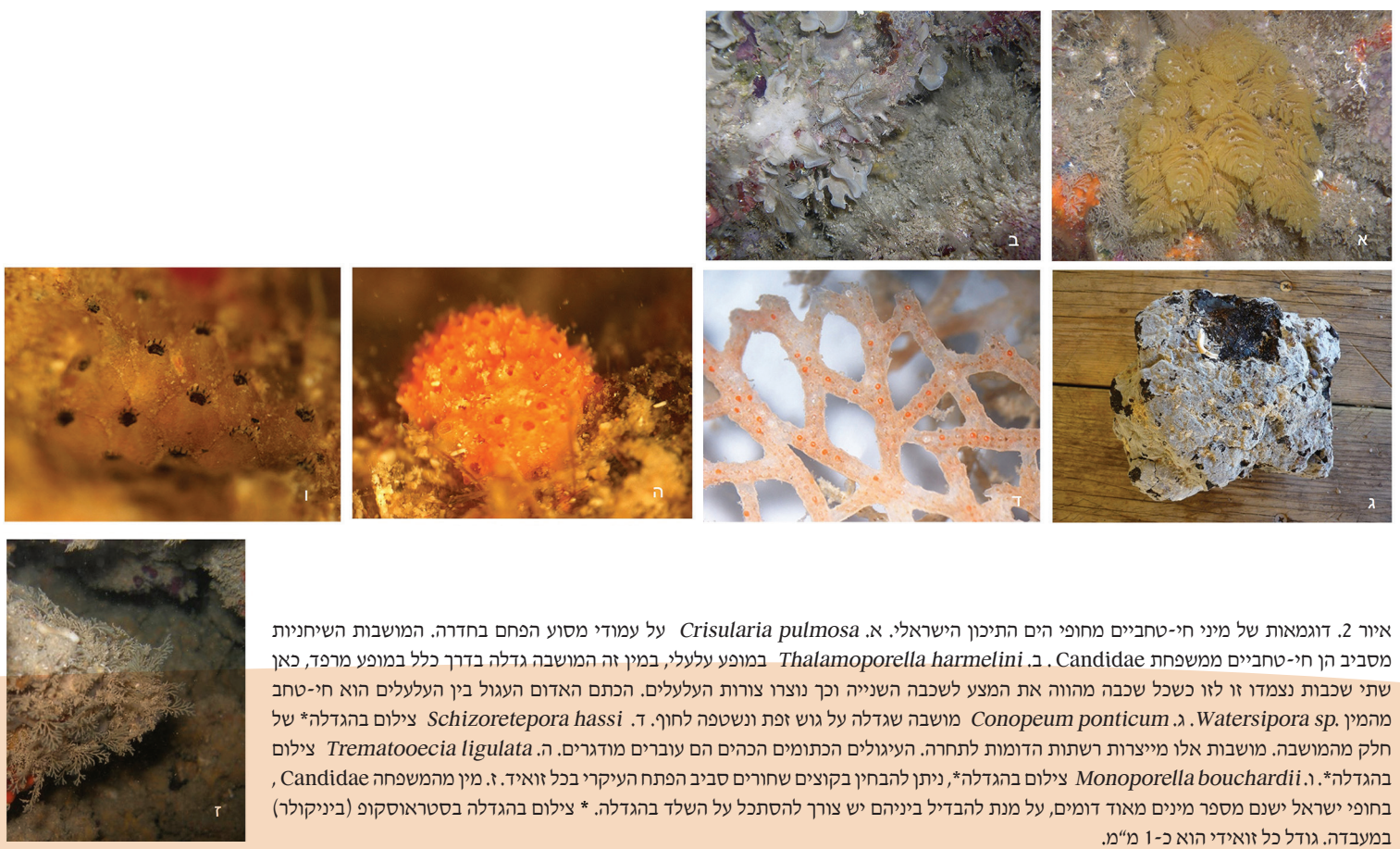
המיקום של מערכת החי-טחביים בעץ החיים והקשרים למערכות אחרות עוררו כמה דיונים אך באופן מסורתי, בעיקר על בסיס מורפולגי, החי-טחביים מקושרים למערכות ברכיופודה ופורונידה (Brachiopoda & Phoronida). מערכות אלו מאופיינות אף הן בכתר של זרועות ריסניות ובתעלת עיכול בצורת U, ויחד הם נקראים לופופורטה (Lophophorate). מחקרים מולקולריים מחזקים את הקשר לברכיופודה ולפורונידה ומראים שהם שייכים ללופוטרוכוזאה (Lophotrochozoans) קבוצה של ראשוני פה[12].

במערכת החי-טחביים ישנן שלוש מחלקות עם מינים רצנטיים[9]:

1. Phylactolaemata – מכילה סדרה אחת Plumatellida המצויה במים מתוקים בלבד ובה מוכרים כ-90 מינים. למרות שאין כמעט תיעוד מאובנים, מחלקה זו נחשבת לבסיסית ביותר על סמך מחקרים פילוגנטיים. במושבות של Phylactolaemata הלופופור בנוי בצורת פרסה בדרך כלל עם מספר גבוה של זרועות ריסניות, מצב זה שונה מהלופופור בשתי המחלקות האחרות. כמו כן אין הפרדה של קירות בין הזואידים (בניגוד לשאר המחלקות) אך ניתן למצוא מחיצות חלקיות (septa) המשמשות ליציבות ותמיכה מבנית במינים מעונפים או צינוריים. רבייה מתקיימת בהשרצה של לרוות וברבייה א-מינית על-ידי גופי קיימה מטיפוס סטטובלסטים (Statoblasts). הרבייה באמצעות סטטובלסטים חשובה מאוד כדי לשרוד תנאי קיצון ולאפשר הפצה בין מקווי מים שונים.
2. Stenolaemata – קיימת בה רק סדרה אחת עם מינים חיים Cyclostomata המצויה במי ים בלבד

וכוללת כ-540 מינים חיים. (ישנן סדרות נוספות המוכרות רק בשרידי מאובנים). מקור המחלקה בתחילת תקופת האורדוויקיאן (Ordovician) לפני כ-485 מיליון שנים. המינים מאופיינים בשלד גירני והזואידים בצורת צינורות עם פתח עיקרי (Orifice) עגול וללא אופרקולום. פולימורפיזם קיים אבל לא מאוד מפותח. בקיר הגוף נוצר מעין שק פנימי מוקף שרירים דקים שמתכווץ בזמן פריסת הלופופר. רבייה מינית מתרחשת בזואידים נקביים מוגדלים שמייצרים תאי הדגרה.

3. Gymnolaemata – המחלקה הכוללת את מרבית המינים. נציגי המחלקה מצויים בעיקר במי ים, כשרק 6 סוגים ו-24 מינים מצויים במים מתוקים ומספר מועט של מינים מצויים במים מליחים. המינים במחלקה מאופיינים בזואידים בצורת קופסה או גליל עם אופרקולום בפתח העיקרי (Orifice). פולימורפיזם מאוד מפותח ברוב המינים. קיר הגוף נמשך ונמתח בעת כיווץ השרירים המפעילים את הלופופור. אסטרטגיות הרבייה מגוונות בתוך המחלקה, אך רוב המינים מדגימים מושבות הרמפרודיטיות, מדגירים עוברים ומשחררים למים לארוות שחייניות. תמיד ריסניות, אך בצורות מגוונות.

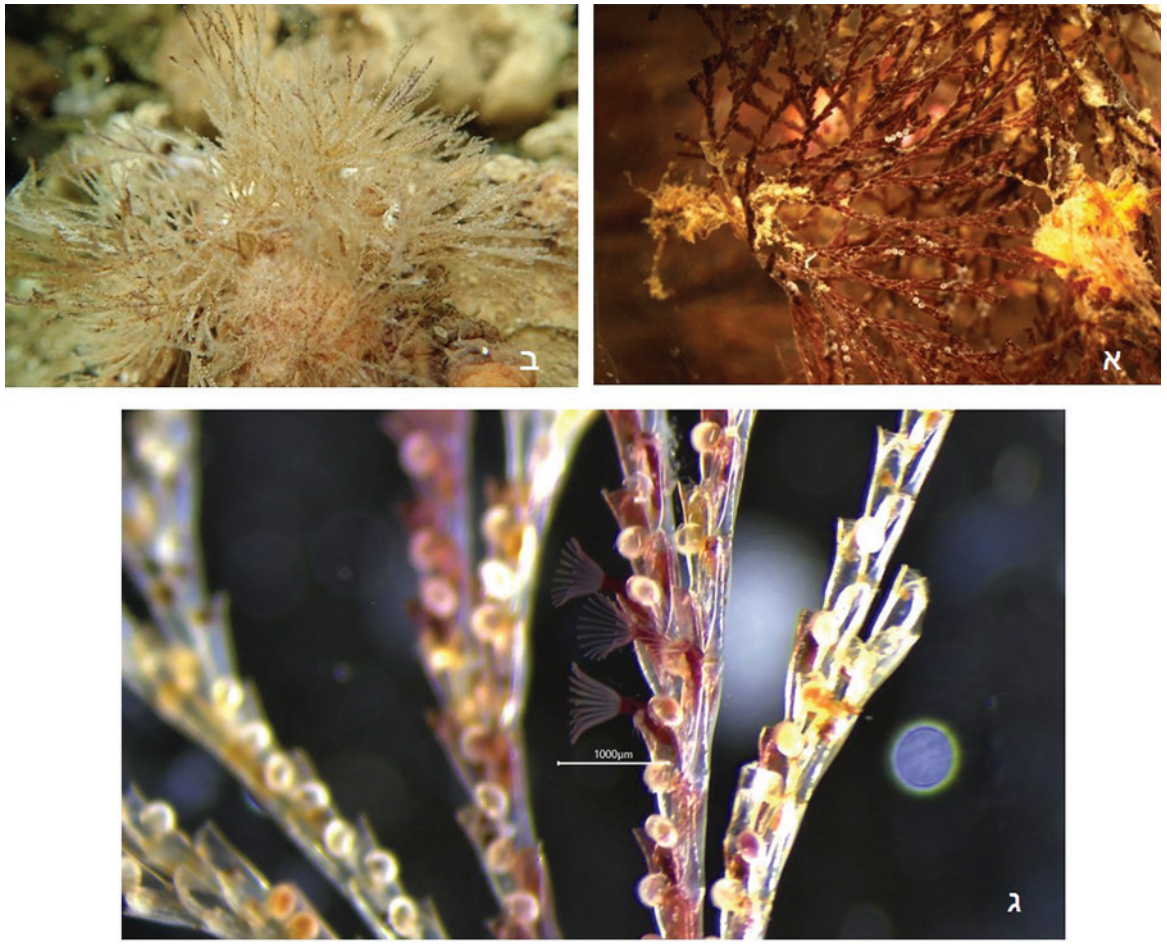


איור 2. דוגמאות של מיני חי-טחביים מחופי הים התיכון הישראלי. א. *Crisularia pulmosa* על עמודי מסוע הפחם בחדרה. המושבות השיחניות מסביב הן חי-טחביים ממשפחת Candidae . ב. *Thalamoporella harmelini* במופע עלעלי, במין זה המושבה גדלה בדרך כלל במופע מרפד, כאן שתי שכבות נצמדו זו לזו כשכל שכבה מהווה את המצע לשכבה השנייה וכך נוצרו צורות העלעלים. הכתם האדום העגול בין העלעלים הוא חי-טחב מהמין *Watersipora sp.* . ג. *Conopeum ponticum* מושבה שגדלה על גוש זפת ונשטפה לחוף. ד. *Schizoretepora hassi* צילום בהגדלה* של חלק מהמושבה. מושבות אלו מייצרות רשתות הדומות לתחרה. העיגולים הכתומים הכהים הם עוברים מודגרים. ה. *Trematooecia ligulata* צילום בהגדלה*. ו. *Monoporella bouchardii* צילום בהגדלה*, ניתן להבחין בקוצים שחורים סביב הפתח העיקרי בכל זואיד. ז. מין מהמשפחה Candidae , בחופי ישראל ישנם מספר מינים מאוד דומים, על מנת להבדיל ביניהם יש צורך להסתכל על השלד בהגדלה. * צילום בהגדלה בסטראוסקופ (ביניקולר) במעבדה. גודל כל זואידי הוא כ-1 מ"מ.

שתי סדרות במחלקה:

סדרת ה-Ctenostomata – המאפיין המגדיר את הסדרה הוא היעדר שלד גירני ולכן קירות הגוף החשופים בזואידים רגילים, מתכווצים ונמתחים בזמן כיווץ השרירים. הזואידים סוגרים את הפתח העיקרי על-ידי התכווצות או בעזרת אופרקולום קוטיקולרי. פולימורפיזם מוגבל לזואידים ניזונים (אוטוזואיד) ולזואידים מבניים – קנוזואידים (שם כללי למספר תפקידים הכוללים תמיכה במבנה המושבה, יש זואידים שהפכו לסגמנטים של "גבעול" או כאלה שמהווים "שורשים" המשמשים להיצמדות למצע). במינים מסוימים יש זואידים אוגרי נוטריינטים. למושבות יש מגוון צורות, כולל משטחים גדולים ובשרניים. ישנן מושבות שיחניות וגם מושבות שטוחות של שרשרת זואידים בשכבה דקה. בנוסף ישנם גם מינים קודחים הנחשבים אנדוליתיים (Endolithic). מינים אלו קודחים בעיקר בקונכיות של רכיכות וגיר (calciun carbonate).

סדרת ה-Cheilostomata – הסדרה מכילה את הרוב הגדול של המינים הקיימים היום, מעל 80% והיא כמעט לחלוטין ימית. המושבות מציגות מגוון רחב של גדלים צורות ומבנים ופולימורפיות גבוהה. אחד הזואידים הפולימורפיים הייחודיים לסדרה זו הוא האביקולריום (Avicularium), הנושא אופרקולום מיוחד שהפך למעין לסת, להגנה מפני מתיישבים כנראה. המינים השונים מאופיינים בקירות גוף משקיעי שלד גירני. על מנת להתגבר על איבוד הגמישות של קירות הגוף, קיים מעין שק פיצוי מתחת לשכבה הגירנית, שאליו מחוברים השרירים והוא מאפשר את התנועה לפריסת וכיווץ הלופופור (איור 1). באיורים 2 ו-3 ניתן לראות דוגמאות למינים מסדרה זו.



איור 3. Bugula neritina, מין קוסמופוליטי, נפוץ במעגנות ועל גבי מצעים מלאכותיים. א. מופע כהה, בריא ב. מופע בהיר, מושבה לא בריאה ג. צילום בביניקולר, ניתן לראות מספר לופופורים פעילים, העיגולים על גבי ענפי המושבה הם חדרי הדגרה לעוברים. קנה-מידה = 1 מ"מ.

אקולוגיה

חי-טחביים מהווים רכיב משמעותי במערכות בנתיות כשבאזורים מסוימים הם מהווים את המרכיב העיקרי. למרות זאת אין להם כמעט משמעות כלכלית והם גם לא מהווים מקור למזון לבני אדם. יחד עם זאת יש להם חשיבות אקולוגית רבה. חי-טחביים בעלי שלד גירני הם בין מקבעי הפחמן החשובים במדפי יבשת לא טרופיים[16]. ישנם מינים שמתפקדים כ"מהנדסי סביבה" (Bioengineers). הם תורמים למורכבות המצע ובכך משפיעים על המגוון הביולוגי באותו בית גידול[17]. הידע על התזונה של החי-טחביים מצומצם, הם ניזונים בעיקר מפיטופלנקטון, מיקרואצות וחיידקים

(ציאנובקטריה), ואפילו מרקב וחומר אורגני מומס. אצל מינים גדולים ממחלקת ה-Phylactolaemata המצויים במים מתוקים, נמצאו גם רוטיפרים שלמים בחלל העיכול[12]. יש להם מספר טורפים כשהידועים ביותר הם חשופיות אבל גם עכבישני-ים (Pycnogonida), וכן דגים שחותכים חתיכות מהמושבה או קיפודי-ים המלחכים את הקרקעית[16].

תחומי מחקר במערכת החי-טחביים מתרכזים בטקסונומיה וסיסטמטיקה (עם התמקדות במאפייני שלד) וחקר מאובנים (Paleontology) כשני התחומים הבולטים ביותר, אבל גם מחקרים אקולוגיים, כמו ניתוח פרמטרים של התיישבות; תנאים ביוטיים ואביוטיים המשפיעים על גדילה, העדפת מצע, תחרות תוך-מינית ובין-מינית ואינטראקציות עם אורגניזמים אחרים. עם התקדמות הטכנולוגיה בתחום המחקר המינרולוגי, הנושא ממשיך להתפתח כתחום עניין חשוב במחקר של חי-טחביים[12]. חי-טחביים מהווים דוגמה בולטת וככל הנראה המורכבת ביותר מבין חסרי החוליות המושבתיים ל- Polymorphism (רב-צורתיות) וחלוקת עבודה בתוך המבנה המודולרי של המושבה (תכונה זו מוכרת היטב גם בנציגים ממערכת הצורבים). תכונה זו הופכת את נציגי המערכה הרלוונטיים למועמדים מצויינים לענות על שאלות ומחקרים בתחומי האבולוציה ברמות שונות[10,18].

תחומי המחקר העיקריים הקשורים בבריאות וכלכלת האדם הם[12]:

1. צמדה (Biofouling) – חי-טחביים מהווים מרכיב משמעותי באוכלוסיות צמדה (אוכלוסיות של אצות ובעלי חיים ימיים הנצמדים למצעים מלאכותיים בים) ומינים רבים מהם תועדו על גבי ספינות, דבר המוביל בהן לעלייה בכוח הגרר וצריכת דלק מוגברת. מינים כמו *Bugula neritina, Schizoporella errata, Watersipora subvoidea, Zoobotryon verticillatum* מצויים במים חמים ויוצרים מטרד על-ידי סתימה של צינורות במערכות קירור של מתקנים תעשייתיים[1,19]. המשמעות הנוספת של היותם אוכלוסיות צמדה היא הפצת מינים בעיקר במי נטל[20,21] לאזורים שלא היו בהם קודם. חי-טחביים ידועים גם כ"רפסודאים" טובים, בזכות התכונה של מינים רבים לגדול על משטחים צפים. באופן טבעי משטחים אלו הן מקרואצות אך בעידן הנוכחי הם גדלים גם על שפע של מצעים צפים מלאכותיים ומופצים באופן זה לאזורים חדשים[22–25].
2. מקור לחומרי טבע – הפוטנציאל הקיים בחי-טחביים לתחום הפרמבצטיקה הוא אדיר ועדיין לא נחקר כראוי. בריוסטטינים (Bryostatins) הם החומרים המפורסמים ביותר שבודדו מחי-טחביים, במבחני מעבדה (*in vitro*), חומרים אלו הראו פעילות כנגד סוגים של סרטן ונבדקים גם לטיפול ב-HIV ואלצהיימר[26].
3. מחקרים בנושא שינויי אקלים והחמצת האוקיינוסים – בזכות השלד הגירני של מרבית החי-טחביים ותיעוד המאובנים שלהם, חי-טחביים מתאימים למחקרים סביבתיים הקשורים בשינויי אקלים: שינויים במפלס פני הים, תנודות בטמפרטורת המים, שינויים בהרכב הכימי של האוקיינוסים והחמצת האוקיינוסים[13,27–30].

חי-טחביים בישראל

הרכב חברת המינים בחופי ישראל כמעט ולא נחקר והידע שלנו מוגבל. באופן כללי האגנים של מזרח הים התיכון וצפון ים סוף הוזנחו בהקשר החי-טחבים, לאורך שנים למרות שהאגן המערבי של הים התיכון דווקא זוכה לתשומת לב רבה יחסית[31,32] ובים סוף הצטבר גוף ידע משמעותי בסוף המאה השמונה-עשרה ובמחצית הראשונה של המאה התשע-עשרה בעיקר בזכות המשלחות של נפוליאון והחומר שנאסף בהן[33].

רשימת מינים מהים התיכון וים סוף (כולל סיני) שהתפרסמה בשנת 1988, והתבססה למעשה על פריטים מהאוסף של אוניברסיטת תל אביב (היום האוסף של מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, המרכז הלאומי לחקר מגוון ביולוגי, אוניברסיטת תל אביב) שנאספו בעיקר בשנות השישים והשבעים של המאה הקודמת, היוותה את המקור המקיף ביותר במשך שלושה עשורים[34].

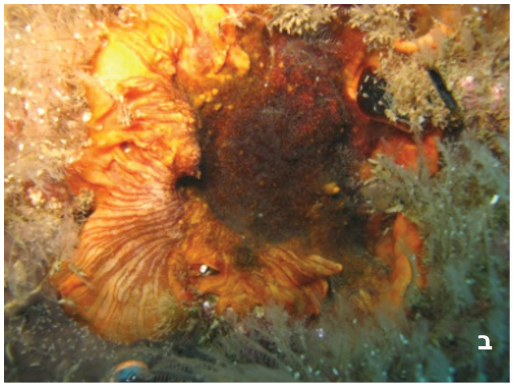
הים התיכון

הרשימה העדכנית ביותר שפורסמה בישראל היא של מינים ממים רדודים (עד 30 מטר) מהים התיכון בלבד שפורסמה בשנת 2016 וכוללת 47 מינים. מתוך 47 המינים המדווחים ברשימה, רק 16 חופפים ל-51 המינים הים תיכוניים המדווחים ברשימה מ- 1988 של D'hondt[34]. בנוסף, למרות שהממצאים לא פורסמו, מתבצעת העמקה בדוגמאות ישנות וחדשות מאוסף החי-טחביים במוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט ומספר דוגמאות מהאוסף של האוניברסיטה העברית בירושלים. עד כה הוגדרו 17 מינים נוספים מחופי הים התיכון הישראלי (ידע אישי). ניתן אם כך להעריך שיש בחופי הים התיכון לפחות 100 מינים של חי-טחביים וכך הוערך גם לגבי המצאי בלבנון[35]. בהתחשב בכך שהמינים בים לא מודעים לגבולות המדיניים, שווה להביא בחשבון גם מינים שתועדו במדינות שכנות ובעיקר את העבודות של Jean-Georges Harmelin הצרפתי שעבד רבות על מינים מלבנון[35–44].

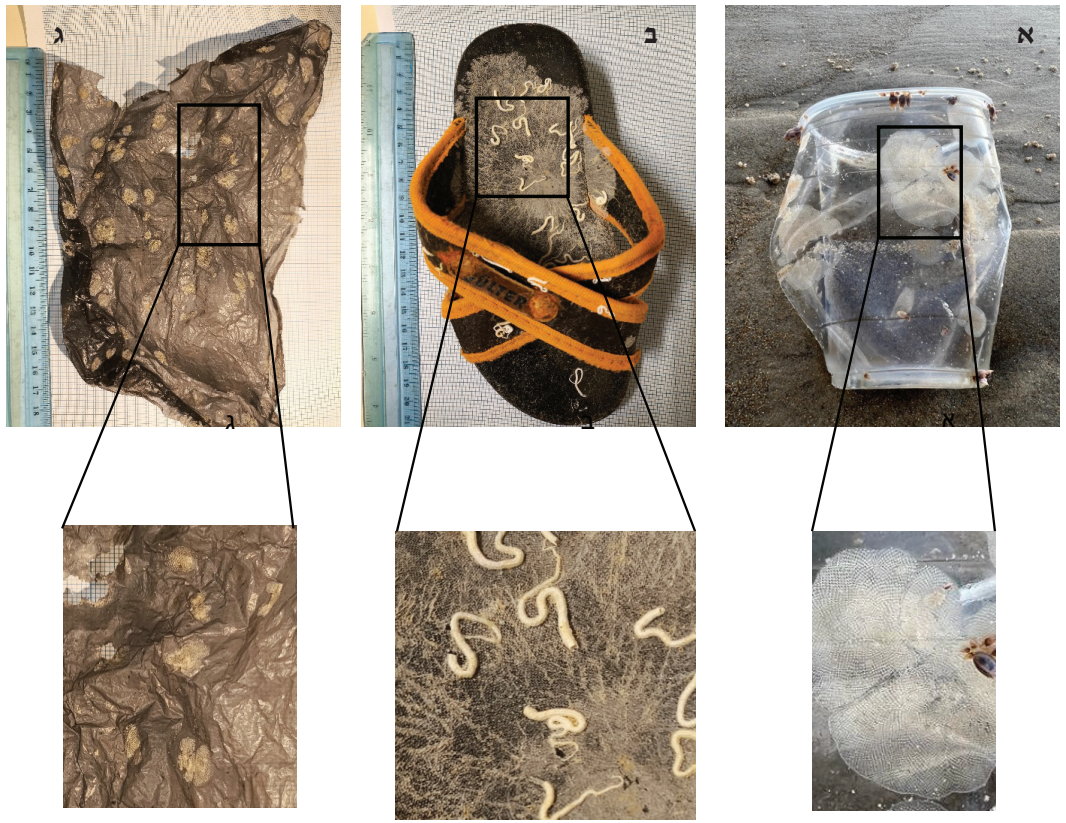
מחקר שהתמקד במינים לא מקומיים ממוצא אינדו-פסיפי בישראל ופורסם לפני כחמישה עשורים[46], התייחס לארבעה מינים בלבד בעוד שבמחקר של Sokolover *et al.* [47] המינים הלא מקומיים מהווים רבע מכלל המינים. יש לציין שהמחקרים שנעשו בלבנון ובחוף הים התיכוני של מצרים מתייחסים גם הם לאחוז גבוה של מינים לא מקומיים[35,36,42,43,45,48], מצד אחד ייתכן שעם השנים מספר המינים הלא מקומיים עולה, ומצד שני ייתכן שהמגמה היא תוצאה של מודעות ועלייה במאמץ הדיגום.

המין *Schizoporella errata* (נקרא בעבר "נקצולית" אבל השם לא נקבע על-ידי האקדמיה ללשון עברית ולא הפך לשימושי ברבות השנים) הוא מין נפוץ מאוד בחופי ישראל (איור 4). הוא קל לזיהוי ומייצר מושבות גדולות, מרפדות שטוחות או בנות עמודים, הנוצרים למעשה מגידול של המושבה על גבי מיני הידרוזואה. המין מאופיין בצבע חלודה עם שוליים בהירים. ניתן למצוא אותו על מצעים טבעיים ומלאכותיים וכאשר הוא גדל על חבלים, המושבה מקיפה את החבל, מייצרת שכבות רבות ולמעשה נותר מבנה חזק מאוד[49].

בחופי הים התיכון ניתן למצוא מינים שיחניים רבים וההבחנה בין המינים השונים בעין בלתי מזוינת קשה מאוד. אלו מינים המשתייכים למשפחה Candidae d'Orbigny, 1851. בנמלים ומעגנות על מצעים מלאכותיים קל למצוא את המין *Bugula neritina*. מין שיחני, בעל צבע חום עד שחור, הידוע כמין קוסמופוליטי (איור 3). בשיטוט על החוף ניתן לזהות גם מושבות לבנות עדינות של חי-טחביים על פסולת פלסטיק שנשטפה מהים (סביר להניח שמדובר במין *Arbopercula tennela*) (איור 5).



איור 4. מופעים שונים של המין *Schizoporella errata* מין נפוץ וקל לזיהוי. המופעים השונים הינם תוצאה של זרמים ומצע הגידול. א. גידול על מושבה של הידרוזואה (Hydrozoa). ב. באופן מרפד. ג. מושבה שגדלה כנראה על הידרוזואה שכבר מתה תחת המבנה המסיבי, ד. מרפד. ה+ו. מושבה שגדלה על חבל, בשכבות רבות שגדלות זו על גבי זו ומייצרות מבנה חזק.



איור 5. דוגמאות לפסולת על החוף עם מושבות של *Arbopercula tennela*, המשטחים הלבנים הם המושבה שגדלה על אותו פריט. הריבוע מסמן את החלק המוגדל המאפשר הבחנה בצורת זואידים במושבה (או לפחות בצורת הרשת שהזואידים יוצרים) א. כוס שתייה חד-פעמית על החוף. ב. נעל של ילד. הפסים העבים יותר שייכים לתולעת ישיבה. ג. חתיכה משקית ניילון דקה שחורה עם מספר רב של מושבות.

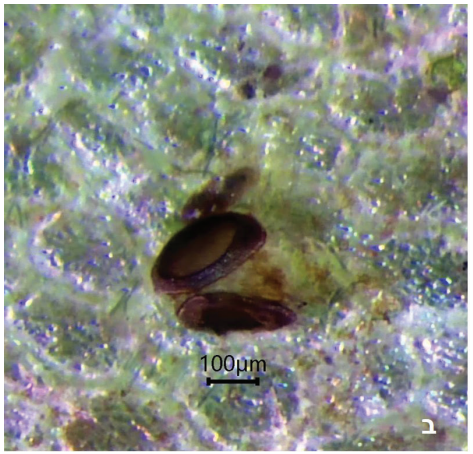
מפרץ אילת

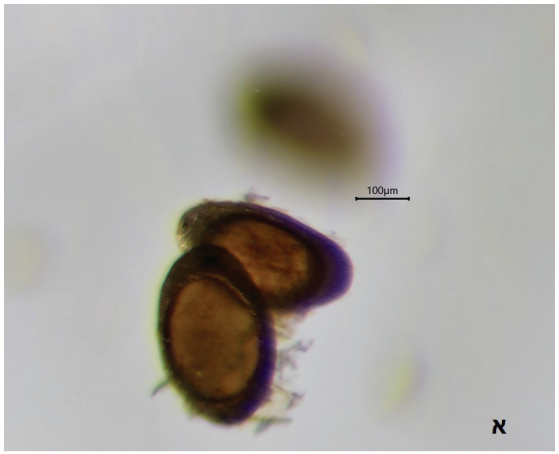
חי-טחביים אינם בולטים בשוניות אלמוגים. גם במפרץ אילת הידע לגבי חי-טחביים מועט. ברשימה של D'hondt מפורטים כ-22 מינים מאילת[34], ובאוסף במוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט ישנם כ-40 מינים. רשימות הספרות שכוללות איזכור או פירוט של מיני חי-טחביים מאזור מפרץ אילת כוללות מאמרים ספורים החל מ-1826 ועד שנת 2002[33], כשחלק מהמאמרים התרכזו מראש רק בקבוצה מסוימת של חי-טחביים או שבחנו התיישבות של אוכלוסיות צמד באופן כללי וכך תיעדו גם חי-טחביים. כך למשל במאמר של [50] Brood מתועדים 5 מינים של Cyclostomata ובמאמרים של Sternhall ושל Goren שבחנו התיישבות של אוכלוסיות צמד על מצעי אלומיניום ותהליכי סוקסציה מתוארים 11 או 14 מינים (בהתאמה)[51,52]. באיור 6 ניתן לראות שתי דגמאות למינים נפוצים על מצעים מלאכותיים במרינה באילת.

איור 6. שני מיני חי-טחביים על גבי מצעים מלאכותיים במרינה אילת. א. ו- ב. *Schizoporella errata* על גבי צינור שנמשה מהמים. בב' תקריב. ג. ו- ד. *Amathia verticillata* המוכרת כ"פסטה/ספגטי בריוזואה" על תחתית סירה. באיור ד הגדלה מתוך התמונה המקורית.

מים מתוקים

נכון להיום, רשמית, מתועדים עשרה מינים של חי-טחביים ממים מתוקים בישראל שנאספו מ-5 אתרים, מרמת הגולן בצפון ועד נחל אלכסנדר המהווה את האתר הדרומי ביותר[53]. למרות שמינים מסוימים נחשבים כמינים אינדיקטורים במים מתוקים, חי-טחביים אינם מהווים רכיב בתוכניות ניטור בישראל. בשנים האחרונות החלו להגיע תצפיות ותיעוד של חי-טחביים של מים מתוקים, בבריכות נוי עירוניות ובסדימנטים של בריכות חורף (התכתבויות אישיות) כולל אפילו מבור חמת שבנגב. לאור התצפיות הללו ופער הידע הגדול בתחום, יש צורך גדול להתמחות בקבוצה זו ולתעד את הפאונה המקומית.





איור 7. סטטובלסטים (גופי קיימה) מבריכת נוי אקולוגית, אוניברסיטת תל אביב. א. שני סטטובלסטים.
ב. סטטובלסט פתוח על גבי עלה של צמח מים. קנה-מידה= 100 מיקרומטר

רשימת מקורות

1. Ryland, J. S. *Bryozoans*. 175 (Hutchinson Univ. Library, London, 1970).
2. Hirose, M. Orientation and righting behavior of the sand-dwelling bryozoan *Conescharellina catella*. *Invertebr. Biol.* **130**, 282–290 (2011).
3. Winston, J. E. & Håkansson, E. The interstitial bryozoan fauna from Capron Shoal, Florida. *American Museum Novitates* (1986).
4. Winston, J. E. & Migotto, A. E. A new encrusting interstitial marine fauna from Brazil. *Invertebr. Biol.* **124**, 79–87 (2005).
5. Key Jr, M. M., Jeffries, W. B., Voris, H. K. & Yang, C. M. Epizoic bryozoans, horseshoe crabs, and other mobile benthic substrates. *Bull. Mar. Sci* **58**, 368–384 (1996).
6. Key Jr., M. M., Jeffries, W. B. & Voris, H. K. Epizoic bryozoans, sea snakes, and other nektonic substrates. *Bull. .Mar. Sci.* **56**, 462–474 (1995).
7. Key Jr., M. M., Jeffries, W. B., Voris, H. K. & Yang, C. M. Epizoic bryozoans and mobile ephemeral host substrata. in *Bryozoans in space and time* (eds. Gordon, D. P., Smith, A. M. & Grant-Mackie, J. A.) 157–165 (NIWA, Wellington, 1995).
8. Frazier, J. G., Winston, J. E. & Ruckdeschel, C. A. Epizoan communities on marine turtles. III. Bryozoa. *Bull. Mar. Sci.* **51**, 1–8 (1992).
9. *Australian bryozoa volume 1: Biology, Ecology and Natural History*. (CSIRO Publishing, 2018). doi: 10.1071/9781486306831.

10. Gordon, D. & Costello, M. Bryozoa—not a minor phylum. *nzsr* **73**, 63–66 (2023).
11. WoRMS Editorial Board. World Register of Marine Species. https://www.marinespecies.org at VLIZ. Accessed 2024-07-26. doi:10.14284/170. *WORMS* https://www.marinespecies.org.
12. *Phylum Bryozoa*. (De Gruyter, 2020). doi:10.1515/9783110586312.
13. Smith, A. M. Bryozoans as southern sentinels of ocean acidification: a major role for a minor phylum. *Mar. Freshwater Res.* **60**, 475 (2009).
14. Carter, M. C., Gordon, D. P. & Gardner, J. P. A. Polymorphism and variation in modular animals: morphometric and density analyses of bryozoan avicularia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **399**, 117–130 (2010).
15. Hayward, P. J. & Ryland, J. S. *Cheilostomatous Bryozoa: part 1 Aeteoidea - Cribrilinoidea.* vol. 10 (Field Studies Council (FSC), 1998).
16. McKinney, F. K. & Jackson, J. B. *Bryozoan evolution.* (University of Chicago Press, 1991).
17. Cocito, S. Bioconstruction and biodiversity: their mutual influence. *Sci. Mar.* **68**, 137–144 (2004).
18. Schack, C. R., Gordon, D. P. & Ryan, K. G. Modularity is the mother of invention: a review of polymorphism in bryozoans. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* **94**, 773–809 (2019).
19. Wood, T. S. & Lore, M. Moss animals. A growing nuisance in industrial cooling systems. *ppchem* (2009).
20. Piola, R. F. & Johnston, E. L. Differential resistance to extended copper exposure in four introduced bryozoans. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **311**, 103–114 (2006).
21. McCann, L. D., Hitchcock, N. G., Winston, J. E. & Ruiz, G. M. Non-native bryozoans in coastal embayments of the Southern United States New records for the western Atlantic. *Bull. Mar. Sci.* **80**, 319–342 (2007).
22. Thiel, M. & Gutow, L. The ecology of rafting in the marine environment. II. the rafting organisms and community. in *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review, Volume 43* (eds. Gibson, R., Gordon, J. & Atkinson, R.) vol. 20051650 279–418 (CRC Press, 2005).
23. Winston, J. E. Dispersal in marine organisms without a pelagic larval phase. *Integr. Comp. Biol.* **52**, 447–457 (2012).
24. Mancini, E. *et al.* Macrozoobenthic fauna associated with benthic marine litter (Northern Tyrrhenian Sea, Italy) and first report of two bryozoan species in Italian waters. Reg. Stud. Mar. Sci. **47**, 101912 (2021).
25. Subías-Baratau, A., Sanchez-Vidal, A., Di Martino, E. & Figuerola, B. Marine biofouling organisms on beached, buoyant and benthic plastic debris in the Catalan Sea. *Mar. Pollut. Bull.* **175**, 113405 (2022).
26. Ciavatta, M. L. *et al.* The phylum Bryozoa: from biology to biomedical potential. *Mar. Drugs* **18**, (2020).
27. Lombardi, C. *et al.* Influence of seawater temperature on growth bands, mineralogy and carbonate production in a bioconstructional bryozoan. *Facies* **54**, 333–342 (2008).
28. Taylor, P. D., James, N. P., Bone, Y., Kuklinski, P. & Kyser, T. K. Evolving mineralogy of cheilostome bryozoans. *Palaios* **24**, 440–452 (2009).
29. Smith, A. M. Bryozoans and ocean acidification. in *Australian Bryozoa Volume 1: Biology, Ecology and Natural History* (eds. Cook, P., Bock, P., Gordon, D. & Weaver, H.) (CSIRO Publishing, 2018).

30. Fortunato, H. Bryozoans in climate and ocean acidification research: A reappraisal of an under-used tool. *Reg. Stud. Mar. Sci.* **2**, 32–44 (2015).
31. Rosso, A. Bryozoan diversity in the Mediterranean Sea. *Biogeographia* **24**, (2003).
32. Ayari, R., Taylor, P. D., Afli, A. & Aissa, P. A new species of the cheilostome bryozoan Trematooecia Osburn, 1940 from the Mediterranean Sea. *Cah. Biol. Mar.* (2008).
33. Ostrovsky, A. N., Cáceres-Chamizo, J. P. & Vávra, N. Bryozoa of the Red Sea: history and current state of research. *Annals of Bryozoology* **3**, (2011).
34. D'hondt, J. Bryozoa from the coast of Israel. *Bolletino di zoologia* **55**, 191–203 (1988).
35. Harmelin, J. G., Bitar, G. & Zibrowius, H. High xenodiversity versus low native diversity in the south-eastern Mediterranean: bryozoans from the coastal zone of Lebanon. *Medit. Mar. Sci.* **17**, 417 (2016).
36. Harmelin, J.-G. Alien bryozoans in the eastern Mediterranean Sea-new records from the coast of Lebanon. *Zootaxa* **3893**, 301–338 (2014).
37. Harmelin, J.-G., Bitar, G. & Zibrowius, H. Smittinidae (Bryozoa, Cheilostomata) from coastal habitats of Lebanon (Mediterranean Sea), including new and non-indigenous species. *Zoosystema* **31**, 163–187 (2009).
38. Harmelin, J. G., Ostrovsky, A. N., Cáceres-Chamizo, J. P. & Sanner, J. Bryodiversity in the tropics: taxonomy of Microporella species (Bryozoa, Cheilostomata) with personate maternal zooids from Indian Ocean, Red Sea and southeast Mediterranean. *Zootaxa* **2798**, (2011).
39. Harmelin, J., Bitar, G. & Zibrowius, H. *Schizoretepora hassi sp. nov.*(Bryozoa: Phidoloporidae) from Lebanon (Eastern Mediterranean) and reappraisal of *Schizotheca serratimargo* (Hincks, 1886). *Cah. Biol. Mar.* (2007).
40. Abdelsalam, K. M., Taylor, P. D. & Dorgham, M. M. A new species of Calyptotheca (Bryozoa: Cheilostomata) from Alexandria, Egypt, southeastern Mediterranean. *Zootaxa* **4276**, 582 (2017).
41. Abdelsalam, K. M. Fouling bryozoan fauna from Hurghada, Red Sea, Egypt. II. Encrusting species. *Egypt. J. of Aquat. Res.* **42**, 427–436 (2016).
42. Abdel-Salam, K. H. M. & Ramadan, S. H. E. Fouling Bryozoa from some Alexandria harbours, EGYPT. (II) Encrusting species. *Medit. Mar. Sci.* **9**, 5 (2008).
43. Ramadan, S. H. E., Kheirallah, A. M. & Abdel-Salam, K. H. M. Marine fouling community in the Eastern harbour of Alexandria, Egypt compared with four decades of previous studies. *Medit. Mar. Sci.* **7**, 19 (2006).
44. Abdelsalam, K. M. Fouling bryozoan fauna from Hurghada, Red Sea, Egypt. I. Erect species. *IJESE* **7**, 51–62 (2016).
45. Abdel-Salam, K. H. M. & Ramadan, S. H. E. Fouling Bryozoa from some Alexandria harbours, EGYPT. (I) Erect species. *Medit. Mar. Sci.* **9**, 31 (2008).
46. Powell, N. A. Indo-Pacific Bryozoa new to the Mediterranean coast of Israel. *Isr. J. Zool.* **18**, 157–168 (1969).
47. Sokolover, N., Taylor, P. D. & Ilan, M. Bryozoa from the Mediterranean coast of Israel. *Medit. Mar. Sci.* **17**, 440 (2016).

48. Harmelin, J. G., Bitar, G. & Zibrowius, H. Smittinidae (Bryozoa, Cheilostomata) from coastal habitats of Lebanon (Mediterranean Sea), including new and non-indigenous species. *Zoosystema* **31**, 163–187 (2009).
49. Sokolover, N., Ostrovsky, A. N. & Ilan, M. *Schizoporella errata* (Bryozoa, Cheilostomata) in the Mediterranean Sea: abundance, growth rate, and reproductive strategy. *Mar. Biol. Res.* **14**, 868–882 (2018).
50. Brood, K. Note on Cyclostomatous Bryozoa from Eilat, Israel. *Zool. Scr.* **9**, 139–140 (1980).
51. Goren, M. Succession of benthic community on artificial substratum at Elat (Red Sea). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **38**, 19–40 (1979).
52. Sternhell, G., Taylor, P. D. & Itzhak, D. Bryozoans recruited onto aluminum-based galvanic couples in the Red Sea off Elat, Israel. *Isr. J. Zool.* **48**, 221–233 (2002).
53. Massard, J. A., Geimer, G., Bromley, H. J. & Dimentman, C. Additional note on the fresh and brackish water Bryozoa of Israel (Phylactolaemata, Gymnolaemata). *Société des naturalistes luxembourgeois.* **93**, 199–214 (1992).

דג השושנון (*Amphiprion bicinctus*) נח בבטחה בין זרועותיה של שושנת הים (*Entacmaea quadricolor*) המארחת והמגינה עליו, במפרץ אילת. מערכת היחסים הייחודית בין השושנונים לשושנות הים היא מהדוגמאות הבולטות והמוכרות ביותר לסימביוזה בשוניות האלמוגים. צילום: תום שלזינגר

23 ספוגים לחופי הים התיכון של ישראל - עשור של מחקרים ותגליות חדשות

סיגל שפר[2,1], טל אידן[3], לירון גורן[2,1], תמר פלדשטיין[2,1], תום מורב[1], רותי יהל[4], מיכה אילן[1]

[1] בית הספר לזואולוגיה, אוניברסיטת תל אביב
[2] מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב
[3] מכון וייצמן למדע
[4] חטיבת מדע, רשות הטבע והגנים

shef@tauex.tau.ac.il, taltul.idan@gmail.com, goren.liron@gmail.com, tfeldste@tauex.tau.ac.il, 123tom00@gmail.com, ruthy@npa.org.il, milan@tauex.tau.ac.il

תקציר

מערכת הספוגים (Porifera) היא מערכה עשירה ומגוונת של בעלי חיים ישיבים המאכלסים בעיקר בתי גידול סלעיים בכל גופי המים ברחבי העולם. כיום ידועים מעל 9500 מיני ספוגים בעלי מגוון רחב של צורות גוף, חלקם יוצרים מבנים תלת-ממדיים מורכבים. מגוון הצורות של הספוגים משנה את מורכבות המצע, מגדיל את מספר הנישות הזמינות, ומעלה את עושר הדגים וחסרי-החוליות, המוצאים מפלט מטורפים וכן יוצר אזור לרבייה ולגידול של צעירים. בנוסף, הם תורמים לצימוד הבנתי-פלגי (בין עמודת המים לקרקעית הים) ומשפיעים על כל מארג המזון על-ידי סינון חומר חלקיקי (Particulate Organic Matter - POM) קטן וקליטת חומר אורגני מומס מהמים בכמויות גדולות.

בשל ההשפעה הרבה של ספוגים על סביבתם ושירותי המערכת האקולוגית המגוונים שהם מספקים, הם נחשבים למינים "מהנדסי סביבה". מערכת הספוגים היא אחת המערכות הבולטות בחברת קרקעית הים התיכון. עם זאת, חקר הספוגים לחופי מזרח הים התיכון בכלל ובחופי ישראל בפרט, היה מצומצם עד לפני כעשור. לפני כ-15 שנה התגלו מספר גני ספוגים מזופוטיים (בעומק 90-130 מ') לאורך חוף הים התיכון הישראלי ובהם חברות ספוגים עשירות ומגוונות מאוד, השונות מאוד מאלו המצויות במים הרדודים. נמצאו בהם מינים חדשים לחופי ישראל, לאגן הלבנט וכן מינים חדשים למדע. ההבדל בתנאים האביוטיים בין בתי הגידול המזופוטיים והרדודים משפיע על תפוצת הספוגים וגם על אסטרטגיות הרבייה שלהם. למשל, ניסוי שבחן את שרידותו של מין של ספוג שנעלם מבתי הגידול הרדודים, אך נפוץ מאוד בגני הספוגים המזופוטיים, הראה שעלייה בטמפרטורת מי הים מעל 28°C גרמה לתמותה של כלל הספוגים בניסוי.

בחינה של רביית הספוגים בעומק המזופוטי הראתה שהם מתרבים בעומק זה בתהליך של רבייה מינית ולעיתים אף ברבייה אל-מינית. כמו כן נמצא שהקישוריות הגנטית לאורך החוף הישראלי ובין העומקים היא גבוהה ושיש זרימת גנים בין כל האוכלוסיות. עוד נמצא שבתי גידול אלה יוצרים מעין "נווה מדבר" ומעלים באופן מקומי את מגוון ועושר המינים של בעלי חיים רבים נוספים, המתקיימים בתוך או על הספוגים עצמם או ביניהם. ממצאים אלה מחזקים את ההשערה שגני הספוגים יכולים להוות מקלט למינים רבים שלא יכולים כיום או לא יוכלו בעתיד להתקיים במים

הרדודים עקב שינויי האקלים וההשפעות האנתרופוגניות ההולכות וגוברות. לנוכח המידע שהצטבר בעקבות המחקרים שנסקרו בפרק זה, והאיומים הגוברים על בתי הגידול הימיים בכלל וגני הספוגים בפרט, ברור שיש לעשות מאמצים כדי להגן על אזורים עשירים אלו. הכרזה על הספוגים כערך טבע מוגן וכן ההכרזה על שמורות טבע ימיות, הכוללות את גני הספוגים, הן חלק מהפעולות שנוקטות רשות הטבע והגנים במטרה לשמור ולהגן על בתי גידול אלה.

ספוגים (Porifera) - מבוא

מערכת הספוגים (Porifera) מונה כיום מעל 9,500 מינים המאכלסים את האוקיינוסים, הימים ומקווי המים המתוקים והם מבין בעלי החיים הקדומים ביותר החיים על פני כדור הארץ[1,2]. שרידותם הרציפה ונוכחותם במספרים גבוהים בגופי המים השונים מעידה אולי יותר מכל על המותאמות הגבוהה שלהם ועל יכולתם להסתגל לשינויים מרחיקי לכת במאפייני סביבתם. הספוגים ישיבים (צמודים למצע), בעלי מבנה גוף פשוט, ויש בהם תאים המתמחים בתפקודים שונים, אך אינם מאורגנים ברקמות או איברי גוף. שטח הפנים החיצוני של הספוג בנוי משכבה של תאים שטוחים (pinacoderm) ובו פתחים זעירים לכניסת מים (ostia) ופתחים גדולים ליציאת מים שבמרבית המקרים נראים לעין (oscula). חלקו הפנימי של הספוג כולל מערכת תעלות פנימית וחללי סינון מיקרוסקופיים (choanoderm). חללי הסינון מצופים בתאי סינון ייחודיים הנקראים תאי רביד (choanocytes), שמזרימים מים דרך גוף הספוג באמצעות תנועת השוטון שלהם (flagellum) ומסננים מהם חלקיקי מזון זעירים באמצעות שלוחות ממברנליות דקיקות (microvilli), היוצרות סביב השוטון מבנה דמוי כתר (מכאן שמם של התאים, תאי רביד). בין השכבה החיצונית לבין מערכת הסינון מצוי תווך (מטריקס) הקרוי מזוהיל (mesohyl) ובתוכו תאים שונים, ולרוב גם קולגן, המשמשים לתמיכה מבנית. בנוסף, המזוהיל מכיל במרבית המקרים גם מרכיבי שלד אנאורגניים, מעין מחטים (spicules) מגוונות בצורתן העשויות מתחמוצת צורן SiO_2 או מסידן פחמתי $CaCO_3$[3]. לעיתים, שלד הספוג כולל גם חומרים מינרליים זרים שמקורו בסביבת הספוג, כגון גרגירי סדימנט ומחטים של ספוגים אחרים שהוא רוכש

איור 1. ספוגים בעלי צורות גידול שונות. א. ספוג גושי מהמין *Sarcotragus foetidus*. ב. ספוג מעונף מהמין *Axinella verrucosa*. ג. ספוג מרפד מהמין *Spirastrella cunctatrix*.

מינים שונים של ספוגים יכולים להיות בעלי מרקם שונה, בהתאם לצפיפות של מרכיבי השלד: רך, פריך, גמיש, דחיס או קשיח. כל אלה מאפשרים לספוגים לגדול במגוון רחב של צורות ובגדלים, שנעים החל ממילימטרים בודדים ועד לממדים מרשימים של כ-3.5 מטרים. מבחינת צורות הגידול מוכרים ספוגים גושיים, מרפדים, מעונפים, צינוריים, כדוריים, דמויי גביע, ספוגי ענק דמויי חבית ועוד (איור 1). צורות הגידול אופייניות למין הביולוגי של הספוג אך מושפעות גם מתנאי הסביבה.

הספוגים ניזונים באמצעות סינון מיקרואורגניזמים מעמודת המים, כגון: חיידקים ווירוסים, חומר אורגני חלקיקי (Particulate Organic Matter – POM) ואף קולטים חומר אורגני מומס (Dissolved Organic Matter – DOM) מתוך גוף המים המקיף אותם[4,5]. ישנם מקרים יוצאי דופן של ספוגים הניזונים מטריפה של יצורים קטנים הנלכדים על פני שטח הפנים של הספוג[6].

ספוגים מתרבים ברבייה אל-זוויגית וזוויגית. אין להם מערכת רבייה לכן תהליך היצירה של תאי הרבייה (גמטוגנזה) נעשה על-ידי תאי גוף (תאים סומטים) מסוימים, בדומה לחסרי חוליות פשוטים אחרים כמו אלמוגים ותולעים שטוחות[7]. מרבית הספוגים הם דו-מיניים – חד-ביתיים (הרמפרודיטים) המדגירים עוּבּרים בגופם (במזוהיל), שמתפתחים לפגיות (larvae) ואלו משתחררות למים דרך תעלות מערכת הסינון של הספוג ונישאות עם הזרמים במשך ימים עד שבועות בטרם יתיישבו על המצע ויהפכו לספוג בוגר. לעומתם, מיני ספוגים בהם הזוויגים נפרדים (גונוכורים) משחררים למים תאי ביצה ותאי זרע. במקרה זה, ההפריה, ההתפתחות העוברית ויצירת הפגיות מתקיימים בגוף המים. מועד הרבייה משתנה בהתאם למין הביולוגי של הספוג, אך גם מושפע מתנאי הסביבה ויכול להשתרע על פני כל השנה או להתקיים בחלון זמן צר במועד מסוים. רבייה אל-זוויגית נפוצה במספר מינים של ספוגים, והיא עשויה להתבצע במנגנונים שונים, בהתאם למין הספוג: יצירת ניצנים (buds) שנפרדים מגוף הספוג, יצירת מקטעים (fragmentation) בעקבות סערות, ופעילות בעלי חיים ובני אדם, ויצירת גופי קיימה (gemmules), שמאפיינת בעיקר ספוגים החיים במים מתוקים או במים מליחים.

מגוון גדול מאוד של יצורים חיים בצוותאות (סימביוזה) עם הספוגים. אורגניזמים סימביונטיים עשויים להימצא על גבי גוף הספוג, בתוך מערכת הסינון שלו או בתוך המזוהיל. מוצאים בהם החל ממיקרואורגניזמים מיקרוסקופיים ועד בעלי חיים נראים לעין, כמו נחשוני־ים, תולעים רב־זיפיות, סרטנים ואפילו דגים[8-11]. התופעה כה מרשימה עד כי נהוג לכנות את הספוגים "בתי מלון חיים"[12]. טיב הקשר בין הספוג למרבית הסימביונטים לא תמיד ברור, והוא כולל מגוון יחסי גומלין: הדדיות, קומנסליות וטפילות[8].

ספוגים מאכסנים חברה מיקרוביאלית מגוונת שבה מיוצגות שלוש ממלכות: חיידקים (Bacteria), חיידקים קדמונים (Archaea) וחד-תאים (Protozoa), ואלו יכולים להוות עד 40% מנפח הספוג[13,14]. הספוג, יחד עם חברת המיקרואורגניזמים המאכלסת אותו, נקרא הולוביונט (holobiont)[15]. בחלק מהמקרים הספוג ניזון מאותם מיקרואורגניזמים, או שנוכחותם מסייעת לו לשרוד. לדוגמה, חיידקים מייצרים ומשחררים לגוף הספוג המארח תרכובות שונות המגינות עליו מפני חיידקים מחוללי מחלות, טורפים ומתחרים. יש מקרים שבהם האינטראקציות בין הספוג לבין החיידקים עלולות להזיק לו[13,15-17]. מקובל לחלק את הספוגים לשתי קבוצות עיקריות בהתאם לצפיפות המיקרואורגניזמים בהם:

1. ספוגים המאופיינים בצפיפות גבוהה של מיקרואורגניזמים במזוהיל, שעשויה להגיע ל-10^{10}-10^{8} תאים למ"ל ספוג, נקראים High Microbial Abundance (HMA).
2. ספוגים המאופיינים בצפיפות מיקרואורגניזמים של 10^{6}-10^{5} למ"ל ספוג, בדומה לצפיפותם במי הים, נקראים[18] Low Microbial Abundance (LMA)[21].

חברת המיקרואורגניזמים בספוגים שונה בהרכבה מזו של מי הים בסביבתם, ומעידה על יחסי סימביוזה (צוותאות) ייחודיים עם הספוג המאכסן[22,23]. בנוסף, נמצאו קבוצות חיידקים ייחודיות, כגון המערכה Poribacteria, שאופייניות לספוגים ונדירות במי הים, בסדימנט ובסביבות נוספות[24,25].

לספוגים יש חשיבות אקולוגית רבה ובבתי גידול מסוימים הם נחשבים כ-"מהנדסי סביבה" וזאת בגלל ההשפעה הרחבה שלהם על סביבתם. מלבד היותם בית גידול ליצורים רבים, כושר הסינון של הספוגים גבוה במיוחד ועשוי להגיע לכ-24,000 ל' מים/ק"ג ספוג ליום[26,27]. בזכות כושר הסינון הגבוה ושכיחותם הגבוהה באזורים שונים, הספוגים תורמים לצימוד אקולוגי בין עמודת המים לבין קרקעית הים (benthic-pelagic coupling). צימוד זה מתאפשר על-ידי סינון חלקיקים קטנים וקליטת חומר אורגני מומס (DOM), שאינם זמינים לחברת קרקעית הים והפרשתם בצורת חלקיקים גדולים יותר הניתנים לקליטה על-ידי אורגניזמים אחרים[28,29]. בתי גידול שבהם הספוגים שכיחים במיוחד, מאופיינים במגוון ועושר ספוגים גבוהים ובמינים שיוצרים תשתית תלת-ממדית מעל המצע הסלעי. בתי גידול אלה נקראים "גני ספוגים" (sponge grounds) והם תומכים בחברה ומגוון ביולוגי עשירים במיוחד של יצורים חיים (biodiversity hot spots)[30,31]. חשיבות אקולוגית אחרת קשורה ביכולת של ספוגים מסוימים לקדוח בתשתית הסלעית ולגרום בה לבליה ביולוגית (bioerosion).

ספוגים ידועים כמקור למגוון רחב של חומרי טבע שהפכו אותם ליעד מחקרי מועדף בתחומים שונים, כגון: פרמקולוגיה, ביוטכנולוגיה ואקולוגיה[32]. קבוצות שונות של תרכובות שניוניות (secondary metabolites) בודדו מספוגים, כגון: חומצות אמינו, נוקלאוטידים, סטרולים (שומנים טבעתיים) ועוד[33-35]. מקורן של התרכובות הללו עשוי להיות בספוג עצמו או בסימביונטים שלו, בעיקר בחיידקים[36]. כיום נמצאות בשימוש כמה תרופות שמקורן בתרכובות שהופקו מספוגים והן משמשות לטיפול בסרטן ומחלות חיידקיות ויראליות. דוגמה לכך היא התרופה Halaven® המשמשת לטיפול בסרטן שד ולימפוסרקומה. התרופה מכילה את החומר הפעיל Eribulin שהוא תרכובת סינתטית המחקה את החומר Halichondrin B המצוי בספוג *Halichondria okadai*[37].

מערכת הספוגים כוללת ארבע מחלקות טקסונומיות: ספוגים צורניים (Demospongiae), ספוגי זכוכית (Hexactinellida), ספוגים גירניים (Calcarea) וספוגי Homoscleromorpha. מחלקת הספוגים הצורניים היא הנפוצה ביותר וכוללת את מספר המינים הרב ביותר[38]. הטקסונומיה של המחלקה עברה עדכון משמעותי לפני כעשור[39] וממשיכה להתעדכן כל העת, בעיקר לנוכח הגישה הרב-תחומית המשמשת כיום לסיווג ולתיאור מינים. זיהוי הספוגים כיום מתבסס על מגוון שיטות וגישות, כמו השיטה המורפולוגית הקלאסית, שיטות מולקולריות, מיקרוביאליות וכימיות[40,41]. עם זאת, הידע לגבי מגוון הספוגים עדיין אינו שלם ומינים חדשים מתגלים כל הזמן בסביבה הימית והאקווטית.

ספוגים בים התיכון ואפיון חברת הספוגים לחופי ישראל

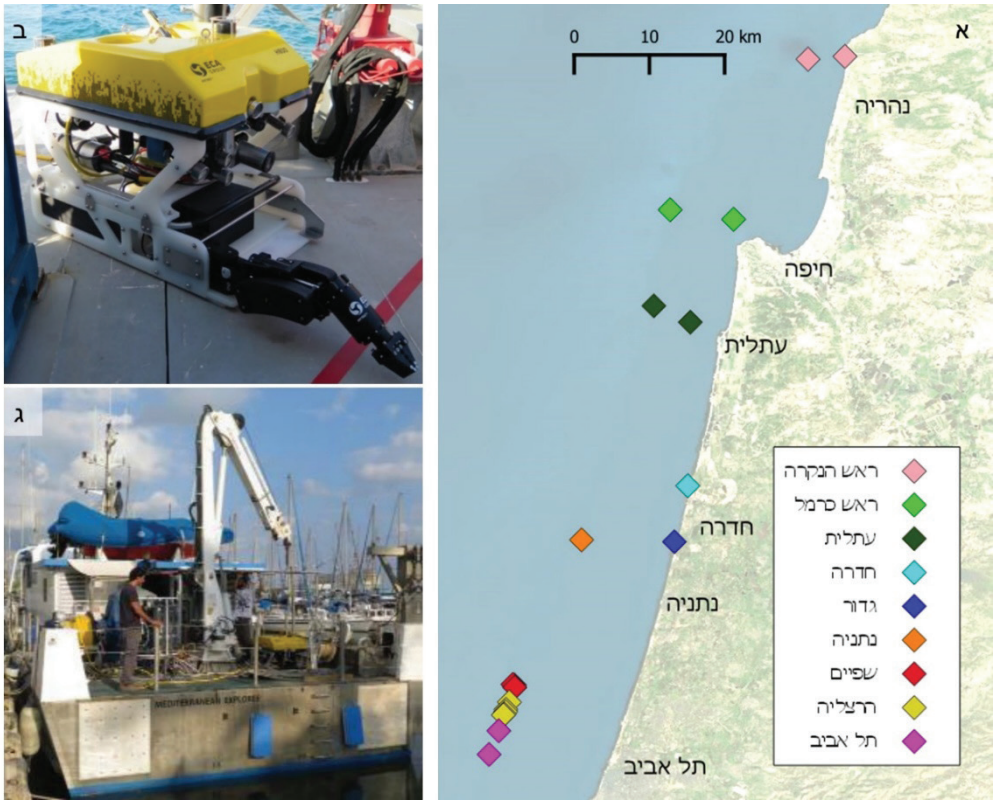
הים התיכון נחשב לאחד מגופי המים העשירים ביותר בספוגים והם מהווים מרכיב דומיננטי במיוחד בחברת קרקעית הים. למרות ששטחו של הים התיכון מהווה פחות מ-1% מכלל שטח האוקיינוסים, נמצאו בו עד כה כ-800 מיני ספוגים המהווים כ-10% מעושר הספוגים העולמי, קרוב למחציתם מינים אנדמיים[42,43]. מינים רבים של ספוגים בים התיכון יוצרים מבנים תלת-ממדיים המעלים את מורכבותו של בית הגידול ומושכים אליהם מיני דגים וחסרי חוליות שמוצאים בהם מקלט מפני טורפים. כמו כן, הם משמשים כאתרי רבייה ואומנה לבעלי-חיים בשלבים הצעירים במחזור החיים[31,44,45]. בעוד שחברת הספוגים במערב הים התיכון נחקרה ביסודיות, המידע לגבי החברה במזרח הים התיכון היה מצומצם עד לפני כעשור וכלל כמה מחקרים מחופי ישראל, לבנון, טורקיה, ויוון[46-55].

במחקרים שבוצעו על-ידי Voultsiadou[48, 49], נמצאה מגמת ירידה במגוון מיני הספוגים בים התיכון מצפון-צפון מערב לדרום-דרום מזרח, זאת בדומה למגמת ירידה דומה ממערב למזרח המקובלת במחקרים אחרים[56,57]. חלקו המזרחי ביותר של הים התיכון, אגן הלבנט, נחשב לעני ביותר מבחינת עושר המינים. ההסבר המקובל לירידה במגוון מיני הספוגים הוא הגרדיאנט הקיים בתנאים הסביבתיים: לפיכך, ככל שנעים ממערב הים התיכון למזרחו, טמפרטורת המים והמליחות עולות, ריכוז הנוטריינטים יורד והתנאים פחות מיטביים למינים אטלנטיים-ים תיכוניים. אולם, ייתכן מאוד שהסבר נוסף הוא השוני במאמץ המחקרי באזורים השונים של הים התיכון וחוסר במידע לגבי חברות ספוגים באזורנו[49,50,53,54]. מחקרים שבוצעו באזור זה בשנים האחרונות הוסיפו מינים שלא תוארו בעבר וכן מינים חדשים למדע[50,52,58-60].

עד לפני כ-15 שנה המידע לגבי ספוגים לחופי הים התיכון הישראלי היה מצומצם, לא עדכני, מוגבל בעיקר למים הרדודים, והתבסס על מספר מועט של פרסומים, שכללו בין השאר סקרים של קרקעית הים במפרץ חיפה שבוצעו בשנות החמישים[60,61]. במאמרו של Levi[62] דווח על 31 מיני ספוגים, מתוכם שלושה בלבד ממים עמוקים מ-42 מ'. באמצע שנות ה-60 בוצע מחקר מקיף על-ידי משה צורנמל, שכלל את חופי ישראל מצפון הארץ ועד דרומה, אך התבצע בעומק רדוד, עד שבעה מטרים בלבד. ממצאיו פורסמו בעבודת הדוקטורט שלו בעברית וכללו רשימה של 77 מיני ספוגים[63], כאשר רק לגבי חלק מהם ניתן למצוא פרסומים מדעיים באנגלית[58,64,65]. עד ראשית שנות ה-2000 לא התקיים מחקר יסודי על ספוגים בבתי גידול עמוקים יותר לחופינו, והפרסומים הקיימים מבוססים על דגימות אקראיות שמקורן בדיגומים כלליים יותר[60,66,67]. משנת 2009 ועד היום אנו מקיימים מחקרים המתמקדים בספוגים לחופי הים התיכון של ישראל, בדגש על מחקר ספוגים בבתי הגידול המזופוטיים.

בית הגידול המזופוטי מהווה את החלק העמוק של מדף היבשת ובאזורים טרופיים וסוב-טרופיים משתרע בטווח העומקים 150-30 מ'[68]. אזור זה נחקר פחות בגלל הקושי להגיע אליו בצלילה ספורטיבית ולכן חסר מידע בסיסי לגביו בכל גופי המים על פני כדור הארץ המתייחס לחברת הספוגים, הרכבה, שכיחות המינים בה, תפוצתם האנכית (בתימטרית) והגורמים המשפיעים עליה ומעצבים אותה[69-72]. פיתוחים טכנולוגיים אחרונים, כגון רובוט תת-ימי (Remotely Operated underwater Vehicle – ROV), הפכו את בתי הגידול האלה לנגישים למחקר. הצורך במחקר של אזורים אלה הולך וגובר עם הזמן, לנוכח שינויי האקלים הגלובליים וההשפעות של פעילות האדם בעולם בכלל ובאזורנו בפרט. למשל, קידוחים לאיתור והפקת גז טבעי והספקתו אל החוף, הקמה של מפעלים להתפלת מי

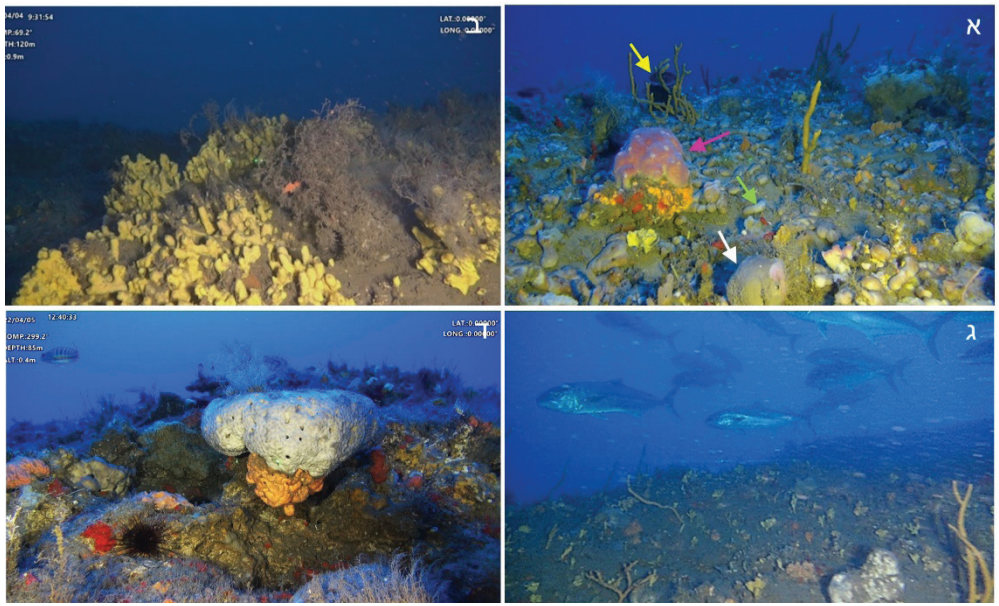
ים ודיג אינטנסיבי. לחופי ישראל קיימים מספר רכסי כורכר המקבילים לקו החוף בעומק הים, חלקם מצויים באזור המזופוטי בעומק של כ-100 מ', כשלרוב הם מכוסים במשקעים רכים (סדימנטים). פסגותיהם או חלקים מהם חשופים ומהווים כ-10% משטח קרקעית הים[73,74]. על הפסגות החשופות של הרכסים התגלו גני ספוגים היוצרים מעין "נווה מדבר" ומעלים באופן מקומי את מגוון ועושר המינים[30,31,75].



איור 2. מפה של אזורי המחקר והאמצעים שבהם השתמשנו. א. מפה של החוף הישראלי שעליה מצוינים אתרי הסקר. ב. הרובוט מצויד בפנסים, מצלמות וזרוע דיגום. ג. הרובוט ממוקם בירכתי ספינת המחקר Mediterranean Explorer של עמותת אקואושן. צילום: טל אידן.

במהלך שנות המחקר (2009-2024) נסקרו אתרים שונים, חלקם סמוכים לחוף ועד עומק של 30 מ' (0.5-3 ק"מ) וחלקם מרוחקים מהחוף (כ-10-15 ק"מ) באזור המזופוטי בעומק של כ-100 מ' (איור 2א). חקר האזור המזופוטי בוצע מספינת המחקר Mediterranean Explorer של עמותת אקואושן שממנה מופעל רובוט תת-ימי (Remotely Operated underwater Vehicle, ROV) המצויד בפנסים ומצלמות המאפשרים ביצוע סקרים כמותיים, וכן זרוע המאפשרת איסוף דגימות לצורך הגדרתן (איור 2 ב-ג). ניתוח כמותי לקביעת מדדי מגוון, עושר והרכב חברת הספוגים באתרים השונים, נעשה באמצעות תמונות וסרטי וידיאו שצולמו במהלך הסקרים.

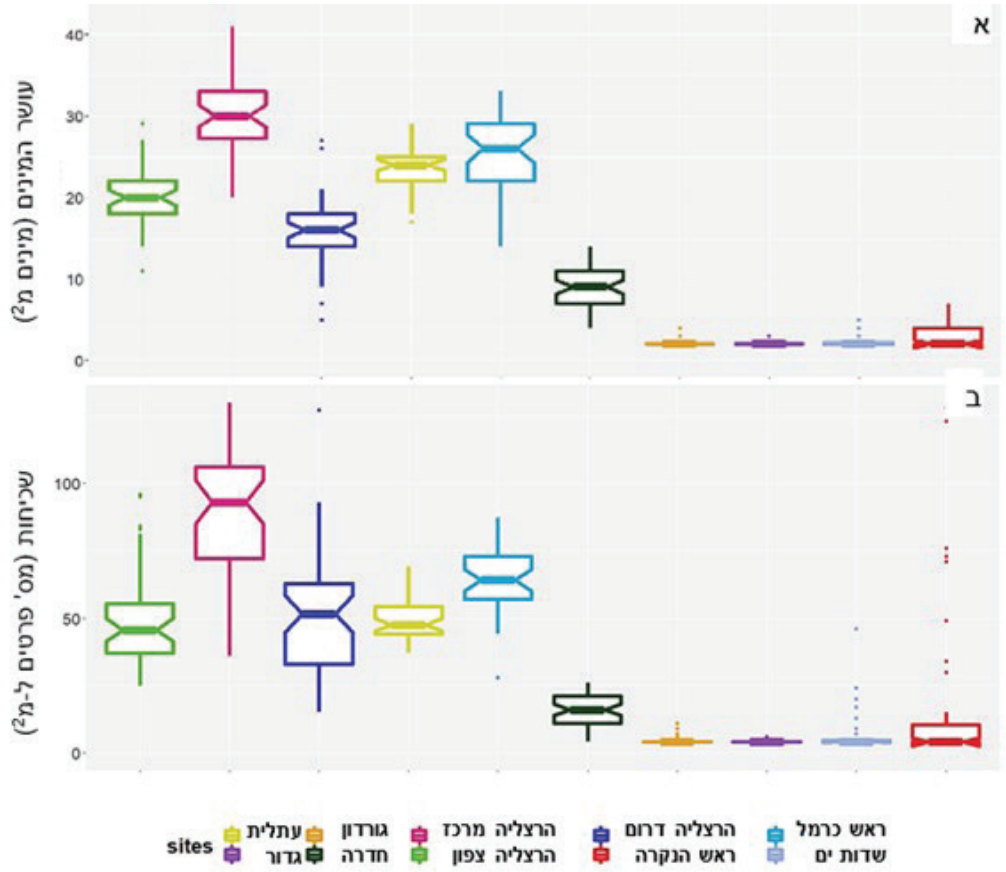
הספוגים זוהו בשיטות מורפולוגיות ומולקולריות. זיהוי מורפולוגי כלל הכנת חתכי רקמה, תתקינים של מרכיבי השלד ובחינתם במיקרוסקופ אור ומיקרוסקופ אלקטרונים סורק. זיהוי מולקולרי כלל הפקת DNA, הגברה (PCR - Polymerase Chain Reaction), ריצוף של הסמנים המולקולריים COI, 18S, 28S והשוואת הרצפים לאלו המצויים במאגרים הגנטיים. ספוגים שלא נדגמו ושלא ניתן היה לזהותם מצילום סווגו על סמך מאפיינים חיצוניים כמינים מורפולוגיים morpho-species, כלומר ללא שיוך טקסונומי.



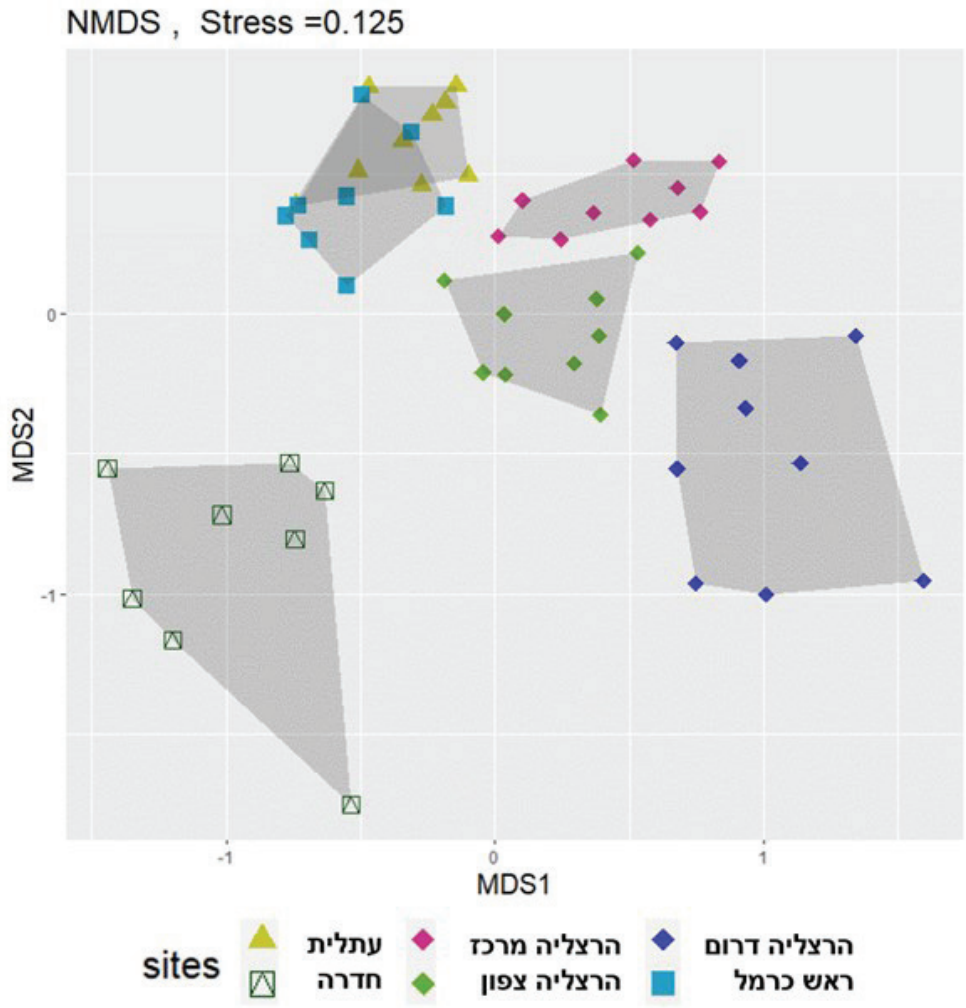
איור 3. נוף טיפוסי בגני ספוגים באתרים שונים לאורך חופי ישראל. א. ים פולג: ניתן להבחין בכיסוי צפוף של הספוג *Chondrosia reniformis* (חץ ירוק), הספוג המעונף *Axinella polypoides*, והספוגים הגושיים *Ircinia variabilis* (חץ ורוד), *I. oros* (חץ לבן) ו-*Calyx nicaeensis* (חץ צהוב). ב. עתלית: הספוג הצהוב *Aplysina cavernicola*. ג. ראש כרמל: להקת דגי סריול אטלנטי *Seriola dumerili* מעל גן הספוגים ד. ראש הנקרה-אכזיב: הספוג *Sarcotragus foetidus* ומתחתיו הספוג *Agelas oroides*.

נתוני הסקרים השונים שבוצעו לאורך השנים במים רדודים ועמוקים והמידע שהיה זמין מהספרות המדעית, אפשרו גיבוש רשימה עדכנית של 121 מיני ספוגים החיים לחופי ישראל[76,77]. הסקרים שבוצעו במסגרת עבודת הדוקטורט של טל אידן[78] בגני הספוגים המזופוטיים, חשפו בפנינו בתי גידול עשירים ומגוונים במיוחד, עם הרכב חברה שונה מאוד מזה של המים הרדודים (איור 3), כאשר רק 14 מיני ספוגים חופפים בין בית הגידול הרדוד והמזופוטי. מרבית האתרים בעומק המזופוטי הינם בלטים העשויים סלע כורכר ומורמים מעל למצע הרך (סדימנט), בטווח עומקים הנע בין 90 ל-127 מ'. במחקר נסקרו 14 בלטים לאורך החוף הישראלי וכן אתר ראש-כרמל שבנוי מסלע גיר המהווה את המשכו של רכס הכרמל היבשתי. בכל האתרים נתגלתה חברה עשירה של בעלי חיים (חסרי חוליות חופשיים וישיבים ודגים) הנשלטת בעיקרה על-ידי ספוגים, המכסים עד 52% מכלל המצע באתרים ומהווים כ-80% מהכיסוי החי (איור 3)[78]. שכיחות הספוגים הייתה גבוהה, בטווח של 16-90 פרטים למ"ר ועושר המינים היה בטווח של 8-30 מינים למ"ר. לעומת זאת, במים הרדודים מדדים אלו היו נמוכים

ונעו סביב פרט/מין אחד למ"ר (איור 4). בנוסף, בתי הגידול המזופוטיים היו שונים זה מזה כשלכל אתר הרכב חברה ייחודי לו (איור 5). בסך הכל, זיהינו 46 מיני ספוגים (ממחלקות הספוגים הצורניים וה-Homoscleromorpha) שנדגמו והוגדרו בשיטות הטקסונומיות המקובלות, מתוכם 35 תועדו לראשונה מחופי ישראל, 14 חדשים לאגן הלבנט, ו-3 הם מינים חדשים למדע (איור 6). [אחד המינים החדשים נקרא *Hemiastrella verae* על שם ורה אידן, סבתא של טל אידן, שורדת שואה בת 99 בעת כתיבת פרק זה[76]]. ברור לנו שקיימים מינים רבים נוספים שכן הגדרנו מעל 100 morpho-species מתוכם מינים מרפדים שאותם קשה או לא ניתן לדגום באמצעות הרובוט התת-ימי.



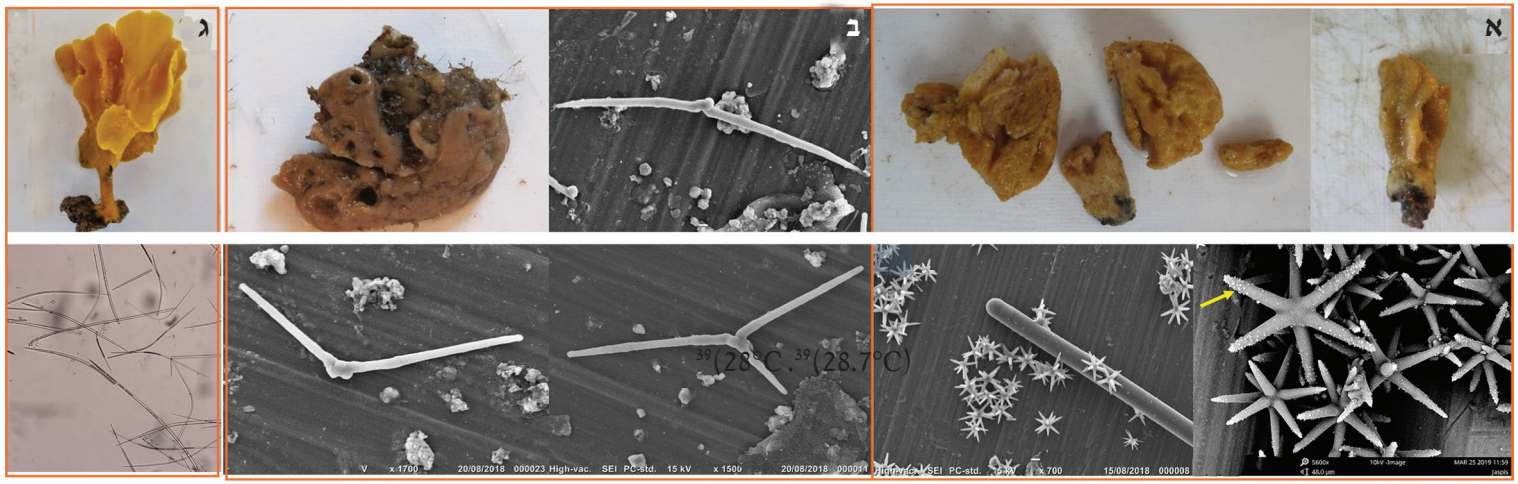
איור 4. עושר ושכיחות הספוגים באתרים הרדודים ומזופוטיים (n= 46 לכל אתר). א. ממוצע עושר המינים למ"ר ורווח בר סמך (95%). ב. ממוצע מספר הפרטים למ"ר ורווח בר סמך (95%).



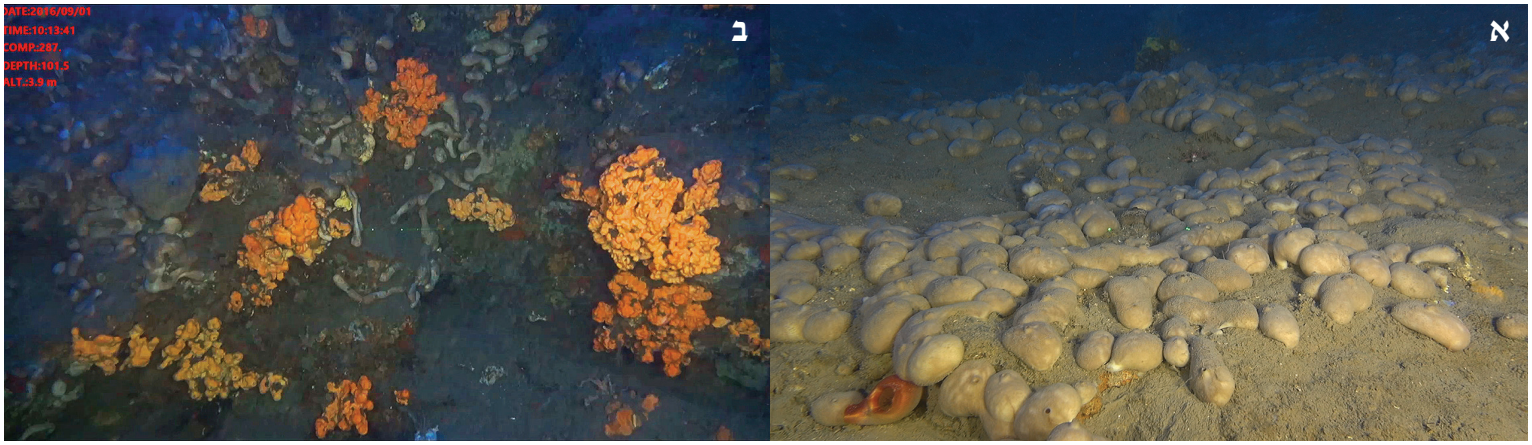
איור 5. אורדינציית NMDS של האתרים המזופוטיים על-פי מיני הספוגים, שחושבה באמצעות Bray-Curtis dissimilarity matrix, K=3. כל 7 ריבועי דיגום קובצו לחתך אחד (לכל אתר n=8). האיור מציג את שני הממדים שהסבירו את מרבית ההבדל בין האתרים.

ממדיהם של הספוגים הגושיים באזור המזופוטי היו גדולים משמעותית ממקביליהם באזור הרדוד. ספוגים גושיים הם מרכיב משמעותי ביותר בחברת החי של קרקעית הים. זה נובע מפעילות הסינון שלהם והצימוד הבנתי-פלאגי שהם מבצעים[44,79,80], ולאור העובדה שהם מהווים בעצמם בתי גידול למגוון רחב במיוחד של מיני חולייתנים וחסרי חוליות[79]. דוגמה טובה לכך היא הספוג מהמין *Stryphnus mucronatus* שבאזורים רדודים במערב הים התיכון מגיע לנפח של כליטר בלבד (מידע שבע"פ –.Cardenas P), ואילו בגני הספוגים המזופוטיים לחופינו נמדדו פרטים שנפחם גדול מ-10 ליטרים. מבין הספוגים הגושיים, *Agelas oroides* היה הנפוץ ביותר (איור 7א), אך ראויים לציון גם המינים הבולטים מבחינת גודלם ושכיחותם: *Ircinia oros, Ircinia variabilis, Fasciospongia cavernosa*

Spongia nitens, Sarcotragus foetidus, Calyx nicaeensis. המין *S. foetidus* נחשב למין מוגן לפי נספח II של פרוטוקול SPA/BD של אמנת ברצלונה[81] (UNEP Barcelona) והוא בעל תפוצה מקוטעת ברחבי הים התיכון, לכן הוצעה אפשרות לנקוט בפעילויות שימור שלו[82]. בגני הספוגים המזופוטיים מין זה שכיח למדי ומגיע לצפיפות של פרט אחד לכל 2 מ"ר[77]. מיני הספוגים שאינם גושיים שהיו הנפוצים ביותר הם *Chondrosia reniformis* (איור 7ב), *Axinella polypoides* ו-*Aplysina cavernicola*. השניים האחרונים מוגדרים כמינים בסיכון על-פי נספח II של פרוטוקול SPA/BD של אמנת ברצלונה[81].



איור 6. שלושה מיני ספוגים חדשים למדע שהתגלו בגני הספוגים המזופוטיים לחופי ישראל. צילום הספוג ומתחתיו מחטי השלד שלו.
א. *Hemiastrella verae* ב. *Plakortis mesophotica* ג. *Axinella venusta*



איור 7. שני מיני ספוגים הנפוצים ביותר בגני הספוגים המזופוטיים. א. *Chondrosia reniformis* על אזור מישורי בבלט הדרומי של הרצליה (94 מ'). ב. *Agelas oroides* על מצוקים בבלט הצפוני של הרצליה (104 מ').

ממצאי המחקר מחזקים את ההשערה שעושר ומגוון הספוגים באגן הלבנט גבוהים מהידוע עד כה, וההנחה היא שככל שנסקור ונעמיק לחקור בתי גידול נוספים לחופי הארץ אנו צפויים לחשוף מינים רבים שעדיין לא התגלו. בתי הגידול העשירים שהתגלו בעומק המזופוטי מעלים את השאלה, מה מאפשר את קיומם רק בעומק הזה ולא בעומקים הרדודים? אחת ההשערות שנבדקו היא שטמפרטורת המים היא גורם משמעותי בעיצוב חברות הספוגים.

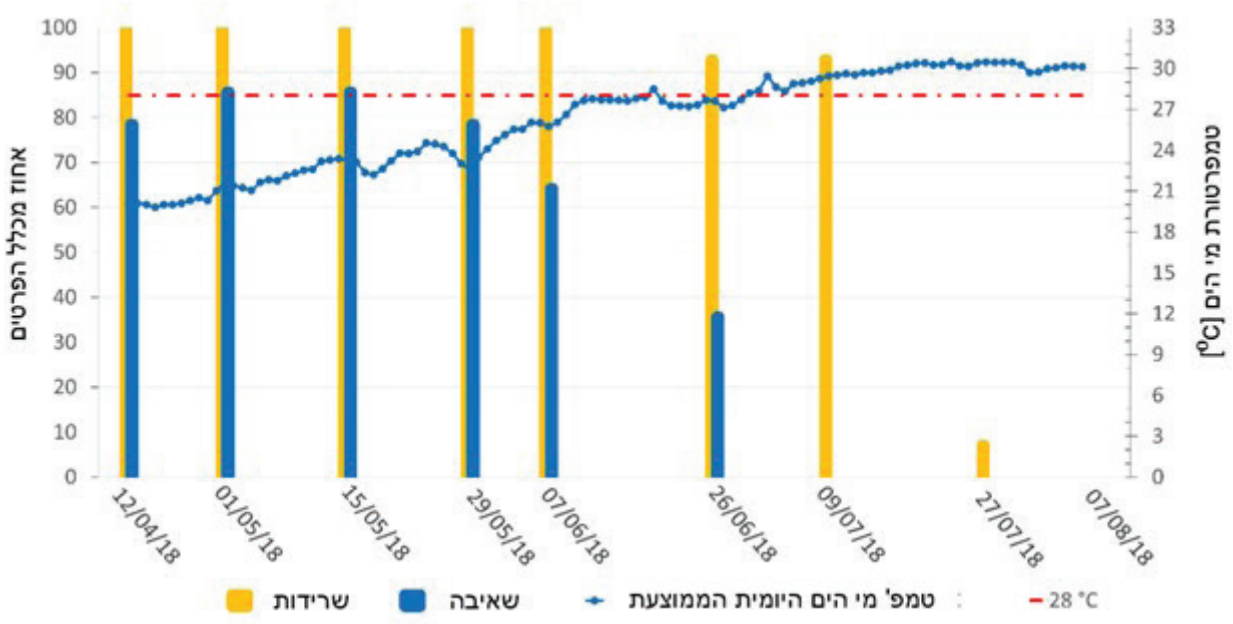
השפעת גורמי סביבה על ספוגים לחופי ישראל

גורמי סביבה בכלל וטמפרטורה בפרט, נחשבים גורמי מפתח המשפיעים על התפוצה והדינמיקה של חברות ספוגים. מחקרים הראו שעלייה בטמפרטורת מי הים לתקופות ממושכות בעונת הקיץ גורמת לתמותה נרחבת של ספוגים[83-86]. במהלך 60 השנים האחרונות חלה עלייה של כ-3°C בטמפרטורת מי הים התיכון לחופי ישראל בקיץ, והיא מגיעה מעבר ל-30°C במים הרדודים, דבר שעשוי להיות בעל השפעה ניכרת על אורגניזמים וחברות שלמות[87-89]. לעומת זאת, בעומק המזופוטי היא לא עולה בצורה ניכרת בעונת הקיץ כפי שקורה במים הרדודים.

הספוג *Agelas oroides* נפוץ בים התיכון בטווח עומקים רחב, ממים רדודים ועד לעומק של כ-150 מטרים[49,55,90,91]. בשנות ה-60 הספוג היה שכיח במים הרדודים של ישראל (עד 7 מ') באזורים מוצלים[63], בעומק של 10-37 מ' במפרץ חיפה[60] ונדגם גם עד עומק של 74 מ' (על-פי דגימות הנמצאות במוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט). במהלך העשורים האחרונים לא מצאנו את הספוג הזה במים הרדודים לחופי ישראל (עד 30 מ') ונראה היה שנכחד באופן מקומי. אולם, במחקרים בגני הספוגים המזופוטיים שנעשו בעשור האחרון, נמצא שהוא אחד הספוגים הנפוצים ומאפיין בעיקר קירות אנכיים ומצוקים. הסיבות האפשריות להיעלמותו מבתי הגידול הרדודים עשויות להיות התחממות מי אגן הלבנט וייתכן שגם ירידה ברמת הנוטריינטים (בעקבות בניית סכר אסואן בשנת 1965), תוך יצירת תנאים של עוני קיצוני בנוטריינטים (אולטרא-אוליגוטרופיים)[89,92-95]. ריכוזי הנוטריינטים השונים נבדקו במים הרדודים ובעומק המזופוטי

(סך הפחמן האורגני TOC, Total Organic Carbon, סך הפחמן האורגני החלקיקי, POC, Particulate Organic Carbon, וסך החנקן TN, Total Nutrient) ונמצא שהיו גבוהים יותר דווקא במים הרדודים בהשוואה לעומק המזופוטי, לכן לא סביר שהנוטריינטים מהווים גורם המגביל את תפוצתו של הספוג במים הרדודים. כדי לבחון האם טמפרטורה גבוהה עשויה לגרום לתמותה של הספוג *A. oroides*, בוצע ניסוי העתקה של פרטים ממין זה שנאספו בגני הספוגים המזופוטיים והועברו אל אתר הניסוי בעומק של 10 מ'[96]. באמצעות רובוט תת-ימי נאספו 20 פרטים במהלך עונת החורף, כאשר טמפרטורת המים נמוכה. מתוכם 14 פרטים הועברו לעומק של 10 מ' מול חופי מכמורת והונחו בתוך ארגזי פלסטיק מחוררים, שסיפקו הגנה מפני טורפים וזרמים חזקים וסביבה מוצלת, בהתאם לתנאי בית הגידול שלהם בעבר. שישה ספוגים הוחזרו אל בית הגידול בגני הספוגים המזופוטיים לשם ביקורת. הניסוי נמשך ארבעה חדשים (אפריל-אוגוסט 2018), במהלכו נערך מעקב אחרי מצב הספוגים כשרקמה שלמה, פתחי יציאת מים פתוחים וזרימת מים דרכם מעידים על ספוג חי ופעיל. בנוסף, נמדדה טמפרטורת מי הים במים הרדודים ובגני הספוגים המזופוטיים. תוצאות הניסוי הראו שהספוגים במים הרדודים סיננו מים ושרדו כל עוד טמפרטורת מי הים לא עלתה מעל 28°C (איור 8). במהלך חודש יולי כאשר הטמפרטורה עלתה מעבר לטמפרטורה זו, כל הספוגים הפסיקו לסנן מים ובאוגוסט כולם מתו. לעומת זאת, בעומק המזופוטי כל הספוגים שרדו גם חמישה חודשים אחרי תחילת הניסוי, כשטמפרטורת מי הים נשארה בטווח שבין 17-19°C. טמפרטורת המים בניסוי הייתה מעל 28°C במשך שלושה חודשים והגיעה למקסימום של 31.5°C, כלומר נוצרה עקת חום קיצונית וממושכת והספוגים לא שרדו.

היכולת של ספוגים לשרוד בעקות חום תלויה במידת ההתחממות ובמשך שלה. בעבר תועד מחופי יוון מקרה שבו ספוגי רחצה מהמין *Spongia officinalis* שרדו אירועי קיצון קצרי טווח (כמה ימים) של טמפרטורת מים גבוהה (30°C)[97]. מספר מחקרים מאזורים אחרים בים התיכון הראו שאוכלוסיות של הספוג *A. oroides* נפגעו מגל חום ארוך במיוחד שנמשך כ-100 ימים[83,98]. במקרה אחר נראה שאוכלוסייתו לא נפגעה מגל חום שהגיע ל-27°C ונמשך חודש[98-100]. המחקר הנוכחי מחזק את ההשערה שלנו שהיעלמות הספוג מהאזור הרדוד לחופי ישראל נובעת מכך שהוא נחשף לגלי חום עוצמתיים הנמשכים מספר חודשים, כמו זה שהתרחש במהלך הניסוי. מגמה זאת צפויה להימשך באזורנו לנוכח שינויי האקלים ההולכים ומתעצמים ולכן יש לבחון את השפעתה על מיני ספוגים נוספים. גני הספוגים עשירים במינים רבים של ספוגים ובעלי חיים רבים נוספים והם עשויים להוות מקלט (refuge), כלומר להוות בעתיד מקור לאוכלוסיות מתחדשות במים הרדודים החשופים למפגעים רבים.



איור 8. שרידות הספוג *Agelas oroides* (באחוזים, עמודות צהובות), אחוז הספוגים המסננים (עמודות כחולות) וטמפרטורת מי הים (C^o, עקום כחול), באתר הניסוי במים הרדודים שאליו הועתקו הספוגים. אחוז השרידות חושב כמספר הפרטים החיים (גם אם לא מסננים) ממספר הספוגים ההתחלתי.

גני הספוגים המזופוטיים כמקלט (Refuge) - רבייה וקישוריות

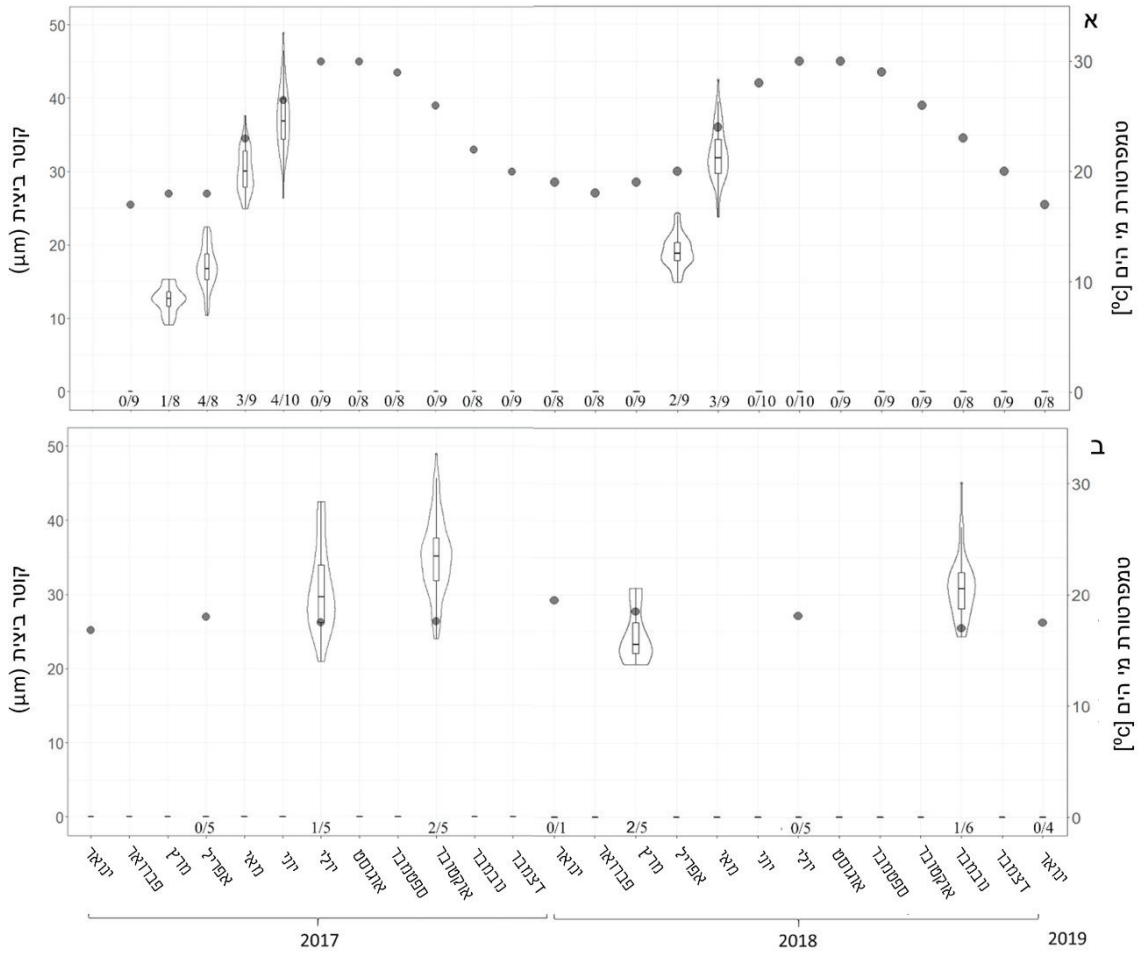
ישנם מחקרים המראים שבתי גידול מזופוטיים מושפעים במידה פחותה מפעילות אדם והפרעות טבעיות בהיותם מרוחקים מהיבשה[101,102]. לחופי ישראל בתי גידול אלה מרוחקים 15-6 ק"מ מהחוף, בעומק הנמצא מתחת לתרמוקלינה העונתית, לכן הם חשופים במידה פחותה להשפעות האדם ולגלי החום בעונת הקיץ[103]. מסיבות אלו, בתי הגידול המזופוטיים (כגון שוניות אלמוגים וגני ספוגים) עשויים להוות מקלט למינים רבים המצויים גם במים הרדודים, כאזורי רבייה ומקור לפגיות (larvae) וכך לתרום לשרידותם[101,104,105]. הוצע בעבר שחברות ספוגים מזופוטיות מהוות שלוחה של החברות במים הרדודים, אולם הדבר מותנה בקיומן של תנועת פגיות וזרימת גנים בין בתי הגידול[68,104,106]. כדי לקבוע האם גני הספוגים המזופוטיים לחופי ישראל יכולים להוות מקלט (מקור לפגיות) לאוכלוסיות הרדודות יש צורך לבחון האם הספוגים מתרבים בבית גידול זה ומה אסטרטגיות הרבייה שלהם. בנוסף, חשוב לבדוק מה מידת הקישוריות בינם לבין אוכלוסיות הספוגים במים הרדודים.

הספוגים *Chondrosia reniformis* ו-*Axinella polypoides* נפוצים בשני בתי הגידול ולכן נבחרו לצורך בחינה של אסטרטגיית הרבייה שלהם. הספוגים נדגמו במשך שנתיים (ינואר 2017-ינואר 2019), כאשר בבית הגידול המזופוטי מול חופי הרצליה הדיגום נעשה כל שלושה חודשים באמצעות רובוט תת-ימי, ובבית הגידול הרדוד מול חופי שדות-ים, כל חודש באמצעות צלילת מכלים. נדגמו חמישה עד עשרה ספוגים כל חודש ומכל אחד מהם הוכנו תתקינים מיקרוסקופיים לבחינת המצב הרבייתי, באמצעות בדיקה של שכיחות האוֹאוֹציטים (תאי ביצה לא בשלים,

oocytes) וקוטרם[107]. נמצא ששני מיני הספוגים מתרבים ברבייה מינית בשני בתי הגידול, אם כי נצפו הבדלים במחזורי הרבייה שלהם בין בית הגידול המזופוטי לעומת בית הגידול הרדוד. נראה שהטמפרטורה השפיעה על התזמון של מחזורי הרבייה ומאפייניה. במים הרדודים, שבהם קיימת עונתיות המתבטאת בשינויים ניכרים בטמפרטורת המים (31-17°C ~), גם מחזור הרבייה של הספוגים היה עונתי. לעומת זאת, בעומק המזופוטי, שבו משרעת הטמפרטורה קטנה מאוד (19.5-16.8°C), לא נצפתה עונתיות ברבייה באף אחד מהמינים[107]. הספוג *C. reniformis* הראה כושר רבייה מינית נמוך יותר בעומק המזופוטי שהתבטא בשכיחות אואוציטים נמוכה בהשוואה לפרטים מבית הגידול הרדוד (ערך מקסימלי של כ-7 אואוציטים לממ"ר לעומת כ-25, בהתאמה), וקוטר אואוציטים גבוה אך בטווח צר יותר (איור 9). אולם, פרטים רבים נראו מתרבים ברבייה אל-מינית על-ידי הנצה (יצירת שלוחות שהתנתקו מפרט ההורה ויצרו פרטים חדשים). לעומת זאת, נמצא שהספוג *A. polypoides* בעומק המזופוטי מתרבה לאורך כל השנה ומציג כושר רבייתי גבוה, שמתבטא בנוכחות רציפה של אואוציטים בצפיפות של כ-2.5-0.5 לממ"ר[107]. במים הרדודים, מחזור הרבייה עקב אחר תנודות הטמפרטורה, עם עלייה בשכיחות האואוציטים כשהטמפרטורה עולה, וירידה בשכיחותם עם הירידה בטמפרטורה (0.28 – 7.04 אואוציטים לממ"ר). בנוסף, שכיחות הפרטים המתרבים הייתה גבוהה יותר בבית הגידול המזופוטי (60%) לעומת בית הגידול הרדוד (21%).

ומה לגבי הקישוריות הגנטית? האם קיימת זרימת גנים בין חברות הספוגים בבתי הגידול השונים? בכדי לענות על שאלה זו, נערך מחקר, אשר במסגרתו נדגמו ספוגים משני מינים ושתי אסטרטגיות רבייה שונות (המחקר מתבצע על-ידי תום מורב במסגרת עבודת הדוקטורט שלה). הקישוריות בין אתרי הדיגום תלויה בתכונות הפיזיולוגיות של פגיות הספוגים, אך גם בזמינות מצע מתאים להתיישבות (במקרה זה, מצע סלעי) ובמשטר הזרמים המקומי. ישנם מינים שבהם הפגיות נוצרות ומודגרות בגוף ספוג ההורה, ולאחר שחרורן הן זוחלות על המצע ומרחק הפצתן קטן. במינים אחרים הפגיות נוצרות לאחר הפרייה בגוף המים, הן מוסעות עם הזרמים ומופצות למרחקים גדולים יותר. המינים שנבחרו למחקר הנוכחי הם *I. variabilis* שמדגיר עוברים והמין *A. polypoides* שמשחרר תאי רבייה לגוף המים וההפריה מקיימת בגוף המים. כדי להשוות את ההרכב הגנטי של האוכלוסיות נדגמו פרטים מאוכלוסיות שונות בארבעה אתרים במים הרדודים וארבעה אתרים בגני הספוגים המזופוטיים. ההנחה הייתה שככל שהקישוריות גבוהה יותר בין האוכלוסיות, ההרכב הגנטי שלהן יהיה דומה.

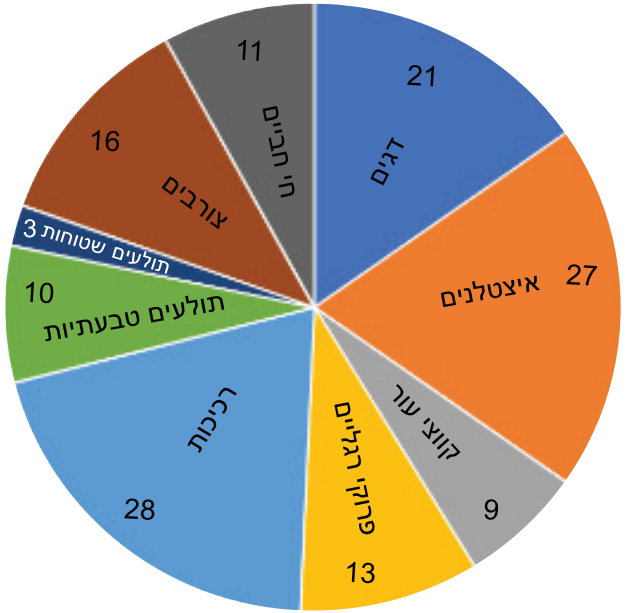
על מנת לזהות את השונות הגנטית בין האוכלוסיות, נעשה שימוש בשיטת Double Digest Restriction-site Associated DNA sequencing (ddRADseq), למציאת רב צורניות של נוקלאוטיד בודד (Single Nucleotide Polymorphism- SNP). שיטה זו מאפשרת להבדיל גנטית בין פרטים מאותו המין תוך התבססות על אתרים מרובים בגנום ולא על רצפי גנים בודדים. לשם כך נדגמו שני מיני הספוגים בארבעה אתרים: הרצליה, עתלית, ראש כרמל וראש הנקרה-אכזיב בעומקים המזופוטי (130-80 מ') והרדוד (40-10 מ'). מהרקמה הופק DNA, ונבנו ספריות גנומיות לפי פרוטוקול ddRADseq [108,109]. הספריות הגנומיות של המין *A. polypoides* רוצפו וההבדלים הגנטיים בין האוכלוסיות נבחנו בשלוש שיטות שונות. השונות הגנטית שהתקבלה בין האוכלוסיות שנבחנו הייתה נמוכה מ-0.001 (Pairwise Fst, $p < 0.05$) מה שמעיד על קרבה גנטית מאוד גבוהה בין האוכלוסיות בכל אתרי הדיגום בכל העומקים. גם אנליזת ה-STRUCTURE הצביעה על כך שאין הפרדה משמעותית במבנה הגנטי בין האוכלוסיות.



איור 9. מחזור הרבייה בספוג *Chondrosia reniformis* וטמפרטורת מי הים, א. במים הרדודים 3 מ'. ב. בעומק המזופוטי 100 מ'. בשנים 2017-2019. הדיגום במים הרדודים התבצע כל חודש ובעומק המזופוטי כל 3 חדשים בכל אחת מעונות השנה. הדיאגרמה מציגה את התפלגות גודל האואוציטים וכן את החציון ואת הרבעונים. החץ מציין הופעה של תאי זרע. המספרים בתחתית העמודות מציינים את מספר הפרטים מתוך המדגם, שהכילו אואוציטים.

עם זאת, בבחינה יותר עדינה נמצא מבנה גנטי שמצביע על קרבה גנטית גבוהה יותר בין האוכלוסיות הרדודות, אחת לבין השנייה ועל כך שהאוכלוסיות המזופוטיות מבודדות באופן יחסי זו מזו ומהאוכלוסיות הרדודות. זאת למעט האוכלוסייה המזופוטית מראש כרמל שהייתה קרובה יותר לאוכלוסיות הרדודות מאשר לשאר האוכלוסיות המזופוטיות (DAPC). ייתכן שההסבר לכך הוא, רציפות המצע הסלעי באתר זה שמהווה המשך רציף לרכס החופי עד לעומק של מאות מטרים, בהשוואה לאתרים האחרים שמהווים אזורים סלעיים המבודדים על-ידי קרקעית חולית[110]. התוצאות מצביעות על כך שהקישוריות בין האזורים לאורך החוף הישראלי ובין העומקים השונים היא גבוהה ושיש זרימת גנים בין כל האוכלוסיות. הבידוד היחסי שנמצא בין האוכלוסיות המזופוטיות מדגיש את הייחודיות הגנטית של

כל אחד מהאתרים המזופוטיים בנוסף לייחודיות בהרכב החברה ומכאן גם החשיבות בהגנה על כל אחד מהם.
ממצאים אלו תומכים ברעיון שבית הגידול המזופוטי עשוי להוות מקלט (refuge) למיני ספוגים שונים, בעלי אסטרטגיות רבייה שונות, שאוכלוסיותיהם במים הרדודים כבר נמצאות, או יימצאו בעתיד, תחת עקות שונות שנובעות משינויי האקלים ומפעילות האדם. ממצאים אלו מעלים ביתר שאת את הצורך להגן על בתי הגידול המזופוטיים האלו לנוכח המגמה הגוברת של התחממות מי הים, ניצול משאבי הים התיכון לצורך קידוח גז, התפלת מי ים, דיג והנחת תשתיות תקשורת.

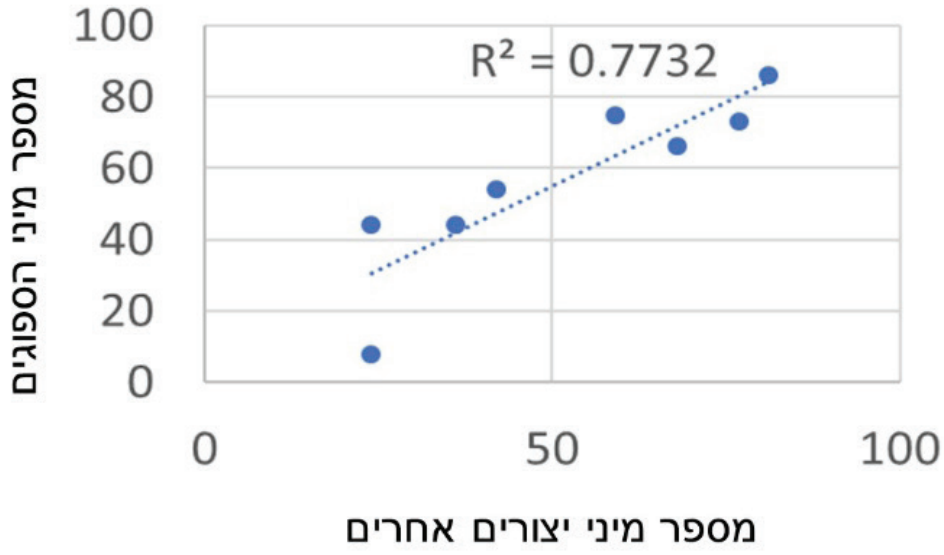


איור 10. מספר המינים של בעלי החיים שנמצאו בגני הספוגים ושייכים לתשע קבוצות טקסונומיות עיקריות: דגים, איצטלנים, תולעים טבעתיות; רב-זיפיות, קווצי עור, תולעים שטוחות, פרוקי רגליים, צורבים, רכיכות וצורבים.

גני הספוגים כבית גידול לבעלי חיים נוספים

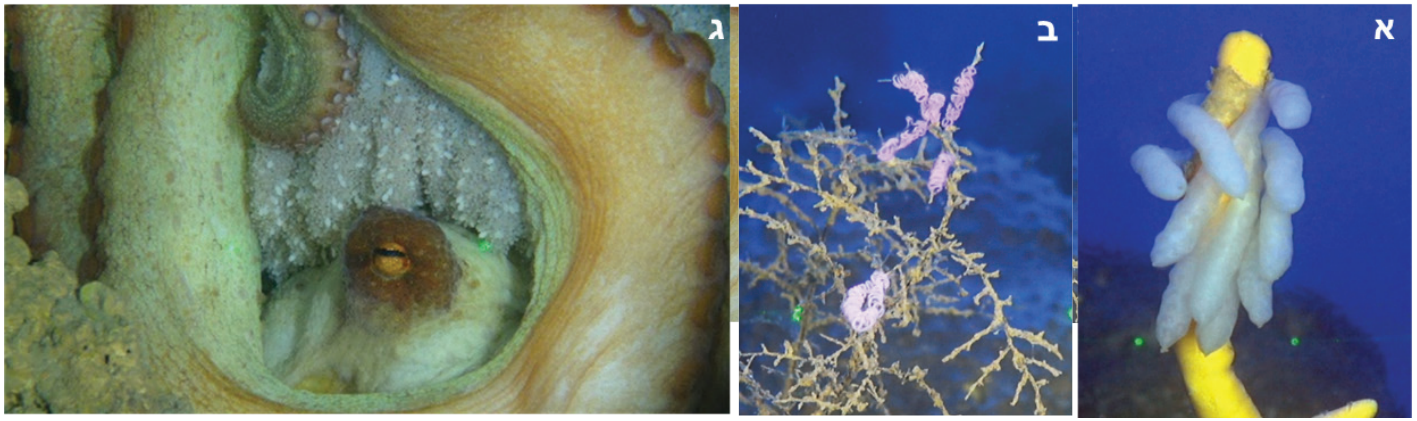
חקר גני הספוגים המזופוטיים חשף עושר גבוה וייחודי של מינים שונים של בעלי חיים הנלווים לספוגים. בכדי לאפיין את חברת הדגים וחסרי החוליות המאכלסת את גני הספוגים, זוהו בעלי חיים המצויים בין הספוגים, עליהם ובנוסף, זוהו גם אלו שנמצאו בתוך ספוגים מסיביים (אנדוסימביונטים) שנאספו בעומק המזופוטי ובבתי גידול רדודים. הממצאים נאספו בין השנים 2016-2022, בהם נבחנה נוכחותם (יש/אין) של דגים וחסרי חוליות מ-20 בלטים מזופוטיים שונים לחופי ישראל. המינים זוהו לרמה הטקסונומית הנמוכה ביותר האפשרית מצילומים, ואלו שלא זוהו,

קוטלגו על-פי צורתם החיצונית. זיהינו 138 מינים של בעלי חיים שנמצאו בגני הספוגים ושייכים לשמונה קבוצות טקסונומיות עיקריות: דגים, איצטלנים, תולעים טבעתיות רב-זיפיות, קווצי־עור, תולעים שטוחות, פרוקי רגליים, צורבים, ורכיכות. הקבוצות העשירות ביותר במינים היו הרכיכות, האיצטלנים והדגים (איור 10). תשעה מינים תועדו בסקרים אלו לראשונה מחופי ישראל (מתוכם 7 מינים של חלזונות). נמצא מתאם בין מספר מיני הספוגים באתר לבין מספר המינים הנלווים, כך שככל שחברת הספוגים עשירה יותר גם עושר המינים הנלווים אליה עולה (איור 11).



איור 11. הקשר (מתאם) בין עושר מיני הספוגים ועושר המינים הנלווים (שחיים בינות לספוגים) בבלטים הסלעיים באזור המזופוטי של החוף הים תיכוני של ישראל ($p<0.001$, Spearman's correlation, $R^2=0.77$).

בגני הספוגים ניתן היה להבחין במקרים רבים בצברים של ביצי חלזונות ודיונונים שהוצמדו לספוגים עצמם ואף נצפתה נקבת תמנון בכוך סלע, כשהיא שומרת ומאווררת את הביצים המופרות (איור 12). מכאן שגני הספוגים משמשים גם כאזורי אומנה חשובים (nursery grounds).

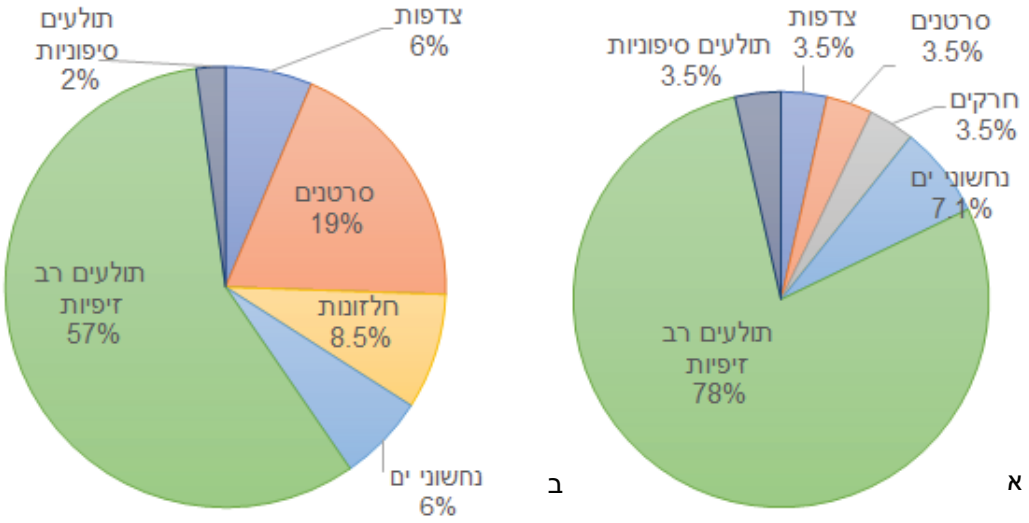


איור 12. צבעי ביצים של רכיכות שונות. א. דיונון. ב. החשופית *Flabellina afinis*. ג. תמנון החוף *Octopus vulgaris* נקבה ברבייה, השומרת על צבר ביצים גדול כשהיא מסתתרת בכוך.

בנוסף, Goren וחובריו[111] בחנו את חברת המינים של בעלי החיים המאכלסים את הספוגים עצמם (אנדוסימביונטים). הבדיקה נעשתה בבתי גידול רדודים ועמוקים כדי לבחון את תפקיד הספוגים כמהנדסי סביבה המהווים מעין "בתי מלון חיים"[9,11,12]. שישים וארבעה פרטים של ספוגים מסיביים השייכים לעשרה מינים שונים, נאספו מאתרים רדודים ומאתרים מזופוטיים (מהמינים *Agelas oroides, Fasciospongia cavernosa, Ircinia variabilis, Ircinia oros, Sarcotragus spinosulus, Sarcotragus foetidus, Stryphnus mucrontaus, Thymosiopsis conglomerans, Spongia nitens, Spongia lamella*). בספוגים אלו נמצאו 1099 פרטים של חסרי חוליות המייצגים כ-60 מינים משש קבוצות טקסונומיות גדולות: רכיכות, קווצי עור, סרטנים, חרקים, תולעי־בוטן, תולעים טבעתיות רב־זיפיות (איור 13). הקבוצה העשירה ביותר הייתה התולעים הטבעתיות שהיוו 57% מכלל המינים באזור המזופוטי ו-78% באזור הרדוד. עבור חלק מהמינים (לדוגמה, כל מיני הרכיכות), זהו התיעוד הראשון שלהם כאנדובסימיונטים בספוגים, בעוד שעבור אחרים (חלק ממיני התולעים הרב־זיפיות) זהו התיעוד הראשון מחופי ישראל. עושר האנדוביונטים היה שונה במיני הספוגים השונים, כאשר הספוג *S. mucronatus* היה הספוג העשיר ביותר עם 29 מינים שונים שנמצאו בו. שלושת מיני הספוגים העשירים ביותר באנדוביונטים נמצאים בישראל אך ורק בבית הגידול המזופוטי *(S. mucronatus, I. oros, T. conglomerans)*. רבים מהמינים שנמצאו בספוגים המזופוטיים, לא ידועים מהמים הרדודים, וחלקם אף מינים חדשים לפאונה הישראלית[111]. הרכב חברת האנדוביונטים שונה בין בית הגידול המזופוטי לבין הרדוד, כשעיקר ההבדל נובע מארבעה מינים שנמצאו בשני בתי הגידול, אך בשכיחויות שונות (שני מיני תולעים רב־זיפיות, מין אחד של סרטן ומין אחד של נחשון־ים).

גני הספוגים התגלו כ"נווה מדבר" במרחבי אגן הלבנט הדל יחסית במינים. לא רק בזכות עושר ומגוון מיני הספוגים, אלא גם בגלל חברת בעלי החיים המגוונת המאכלסת את בית הגידול, שהספוגים הנחשבים כמהנדסי סביבה מהווים את הבסיס שלו (איור 13). קרוב לוודאי שעושר המינים שהוצג עד כה הוא הערכת חסר הנובעת מהקושי להבחין

במינים ניידים ומהירי תנועה בסרטי הווידיאו, והקושי לדגום בעלי חיים ניידים, קטנים או עדינים. סביר להניח שהקשר שנמצא בין עושר מיני הספוגים לעושר המינים הנלווים, נובע מהעובדה שככל שחברת הספוגים עשירה במינים שונים המתאפיינים במורפולוגיה שונה, כך עולה מורכבות בית הגידול עבור המתאכסנים ומצוי עושר נישות המתאימות למגוון רחב יותר של בעלי חיים נוספים. בין בעלי החיים הנלווים לגני הספוגים נמנו גם מינים בסכנת הכחדה או רגישים: קיפוד־הים *Centrostephanus longispinus*, מופיע בנספח II של פרוטוקול BD/SPA של אמנת ברצלונה, הדג דקר הסלעים (*Epinephelus marginatus*) מוגדר כמין בסכנת הכחדה (EN) ברשימה האדומה של ארגון ה-IUCN [13], ומופיע בנספח III של פרוטוקול BD/SPA של אמנת ברצלונה[81]. שלושה מינים של נוצות־הים *Funiculina quadrangularis*, *Ptereoides griseum* ו-*Pennatula rubra*, שנמצאו באזורי המצע הרך שמסביב לגני הספוגים, מוגדרים אף הם כמינים רגישים (VU) על-פי ארגון ה-IUCN[112].



איור 13. הרכב חברת בעלי החיים המאכלסים ספוגים גושיים לאורך חופי הים התיכון של ישראל על-פי מספר הקבוצות הטקסונומיות א. במים הרדודים. ב. בעומק המזופוטי.

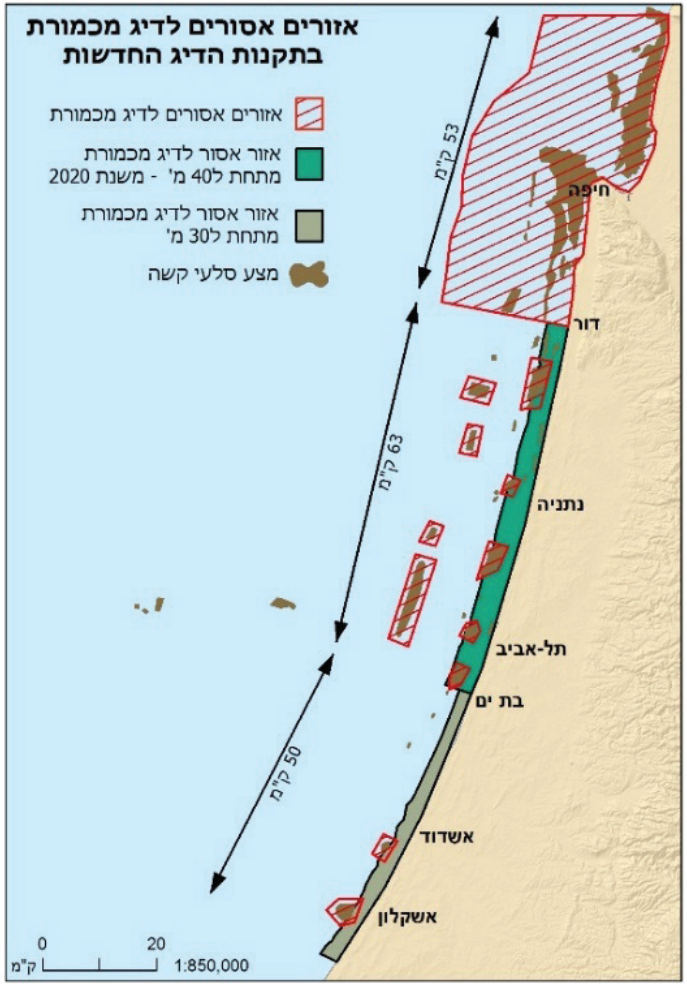
חשיבות בתי הגידול העשירים בספוגים לשמירת הטבע

לבתי הגידול העשירים בספוגים חשיבות אקולוגית רבה והם ראויים להגנה מרבית. המחקרים שבוצעו ב-15 השנים האחרונות מראים כי בתי הגידול הסלעיים בעומק המזופוטי לאורך החוף הישראלי הם בעלי מגוון ביולוגי גדול ויוצא דופן (Biodiversity hotspot) ביחס לאלו בחוף הרדוד. בתי גידול אלו מאופיינים במגוון חברות של בעלי חיים

ישיבים כשהדומיננטית שבהן היא חברת הספוגים ולכן קראנו להם "גני ספוגים". עושר ומגוון הספוגים שנמצאו היו גדולים במיוחד וכללו מינים חדשים לישראל, לאגן הלבנט ואף למדע. כל הפאונה היא מקומית וחלקה אף אנדמית לים התיכון[42]. בין מיני הספוגים נכללים גם כאלו שהוגדרו באמנת ברצלונה כמינים רגישים ובסכנת הכחדה (*Sarcotras foetidus, Axinella polypoides, Aplysina cavernicola, Calyx nicaeensis*) ו/או מינים בעלי חשיבות כלכלית (*Spongia zimocca*). המינים שנאספו והוגדרו עד כה כבר העלו את עושר מיני הספוגים בחוף הישראלי ב-50% וישנם עוד פרטים רבים המחכים להגדרה. נמצאה שונות מובהקת בהרכב חברת הספוגים בין אתרים שונים, כולל אתרים הקרובים מרחבית (הבלטים בהרצליה מרוחקים כ-500 מ' בלבד האחד מהשני). מספר המינים שנצפו בסקרים המצולמים גבוה ביותר (מעל 100 מינים) וסביר שהוא גבוה עוד יותר, זאת מכיוון שלא תמיד ניתן להבדיל בין המינים השונים על סמך תמונה בלבד. לכן יש צורך להמשיך ולחקור, כולל דיגום ולא רק צילום, על מנת לגלות את עושר המינים המדויק.

פרט לספוגים, נצפה בגני הספוגים מגוון גדול של בעלי חיים ממערכות שונות. כ-140 מינים של דגים וחסרי חוליות, בין אם כאלה שחיים בבית הגידול בינות הספוגים (דגים וחסרי חוליות, חופשיים וצמודי מצע), על גבי הספוגים (אפיסימביונטים) או בתוכם (אנדובסימיונטים). רבים מהמינים שנמצאו בספוגים המזופוטיים, לא ידועים מהים הרדוד, וחלקם אף חדשים לפאונה הישראלית. עושר המינים הרב של בעלי החיים בבתי גידול אלו מדגיש את חשיבות הספוגים כמינים מהנדסי סביבה המייצבים את הקרקעית, מעלים את המורכבות המרחבית של בית הגידול, ויוצרים נישות אקולוגיות המאפשרות קיום של יצורים רבים.

גני הספוגים המזופוטיים נמצאים תחת איום אנתרופוגני קבוע, עקב פעילויות דיג והשלכת פסולת. בכל האתרים שנסקרו נמצאו כמויות גדולות של ציוד דיג, החל מחוטי דיג וכלה ברשתות רפאים (רשתות דיג שהושארו או נשכחו על-ידי דייגים בים ועלולות ללכוד דגים ואורגניזמים נוספים ולגרום למותם). כמו כן, נמצאה בהם כמות גדולה של פסולת כגון שקיות פלסטיק, בקבוקים ובגדים. גרירת רשתות בדיג מכמורת על הקרקעית החולית גורמת לפגיעה ממשית בבית הגידול[113]. מחקרים מצביעים על כך שגרירת רשת על המצע הרך באופן אינטנסיבי, מעלה באופן משמעותי את כמות הסדימנט המורחף, בעיקר בשעות ובימי העבודה (השפעה דומה לזו של קידוח תת-ימי), דבר שפוגע במערכת הסינון של הספוג ובנוסף, מוריד את מהירות הזרמים מכיוון שצפיפות המים עולה[114,115]. גרירת רשת המכמורת משנה את כל מבנה הקרקעית ומורידה את מורכבותו ("משטחת" את הקרקע). גם פעילות דיג מכמורת המתבצעת באזור הסלעי יוצרת נזק אקוטי לגני הספוגים. בסופו של דבר גרירת הרשת לאורך זמן יכולה אף לכסות ולהרוס חלקים מבית הגידול הסלעי שקרובים למצע הרך. גרירת רשת ייעודית לעבודה על מצע סלעי תוביל לפגיעה פיזית ישירה ומיידית בבית הגידול ובבעלי החיים שבו.



איור 14. מפת האזורים האסורים בדיג מכמורת לחופי ישראל.

חשוב לציין כי תקנות הדיג בישראל אוסרות על גרירת מכמורת באזורים הסלעיים (איור 14). האכיפה הנעשית החל משנת 2018 צמצמה את הפגיעה, אך לא מנעה אותה לגמרי. בנוסף, תגליות הגז באזורנו כרוכות בפעילויות קידוח המשחררות למי הים חומרי סיכה, שמשמשים לקידוח וידועים בהשפעתם השלילית על הסביבה. במידה שיתקיים קידוח באזור הקרוב לגני הספוגים, צפויים להשתחרר חומרי סיכה שעלולים לפגוע בספוגים. למשל, תרחיף הסדימנט עם חומרי סיכה עלול לסתום את פתחי כניסת המים המיקרוסקופיים של הספוגים (ostia), למנוע מהם סינון מזון ובכך להוביל למותם ולהרס בית הגידול ושאר שוכניו. כמו כן, הנחת תשתיות על קרקעית הים, כגון צנרת להובלת גז, כבלי תקשורת ובניית מתקני התפלה, מהווה גם היא איום מוחשי מאוד על בתי גידול רגישים אלה.

גני הספוגים הינם בתי גידול רגישים מאוד מכיוון שגם פגיעה אקוטית שאינה כרונית תגרום להם לנזק משמעותי. בהתחשב בכך שגני הספוגים מרוחקים זה מזה ותפוצת הפגיות של הספוגים מוגבלת, אנו משערים כי יארך זמן רב עד שבית הגידול הזה יתאושש מפגיעה. בנוסף, קצב הגידול של הספוגים הינו איטי ונע בין 0.001 ס"מ^3 ל-10 ס"מ^3 בשנה, בהתאם למין הספוג[116]. אנו מניחים שללא ויסות ופיקוח מתאימים, הלחץ האנתרופוגני על בתי גידול אלו יתעצם בשנים הקרובות, בהתאם לקצב שבו מדינת ישראל מפתחת את תשתיותיה הימיות. לחץ זה צפוי להשפיע על כל מארג המזון שמתבסס על גני הספוגים ולכן יש צורך דחוף בשמירה על בית גידול זה. עקב הרכב החברה הייחודי בכל אחד מהבלטים, לא ניתן למצוא אתר אחד "מייצג". כלומר, פגיעה בכל אחד מהם תגרור אובדן גדול של מגוון ביולוגי. לכן חשוב לשמר את כולם ולא רק אחדים מהם.

לנוכח המידע שהצטבר בעקבות המחקרים שנסקרו בפרק זה, ולאור האיומים הגוברים על בתי הגידול הימיים בכלל וגני הספוגים בפרט, ברור שיש לעשות מאמצים כבירים כדי להגן על אזורים עשירים אלו. צעד משמעותי וחשוב היה ההכרזה על הספוגים כערכי טבע מוגנים החל משנת 2019 (עד שנה זו ניתן היה לשלות ספוגים על-פי פקודת הדיג). במהלך 15 השנים האחרונות, מקדמת רשות הטבע והגנים (רט"ג) הכרזה על שמורות טבע ימיות שמטרתן לשמור על אזורים מייצגים של בתי הגידול הימיים, כולל תשתית רכה, וכן שמירה על בתי גידול נדירים וייחודיים, כגון: רכסי הכורכר התת-ימיים שעליהם מתפתחים גני הספוגים. שיתוף פעולה הדוק ופורה בין רט"ג למעבדתו של פרופ' מיכה אילן (בית הספר לזואולוגיה באוניברסיטת תל אביב), תרם לקידום של שלוש שמורות טבע ימיות, מתוכן שמורת "ראש כרמל" הוכרזה, והיא כוללת את כל שטח ההר הטבול בים ועד עומק של 360 מ'. שתי שמורות נוספות שמגינות על גני הספוגים המרוחקים מהחוף: "ים פולג-רכס עמוק" ו-"ים עתלית-רכס עמוק", כבר אושרו בוועדות התכנון וממתינות לאישור סופי והכרזה (ראו פרק העוסק בשמורות טבע ימיות של רותי יהל וחובריה בספר).

בימים אלו נעשה מאמץ מחקרי נוסף של מעבדת פרופ' אילן בשיתוף רט"ג, לסקירת בתי גידול סלעיים רחבי ידיים המצויים בעומק ביניים של 35-50 מ' מול בוסתן הגליל וכן מול עתלית. באמצעות הסקרים נוכל לבחון את העושר, המגוון והייחודיות של בתי גידול אלה. לאזורים אלו עשויה להיות חשיבות רבה לקישוריות בגלל מיקומם בין בתי הגידול הרדודים לגני הספוגים המזופוטיים וההנחה שהם יכולים לשמש אבני מדרך (stepping stones) לתפוצת פגיות של ספוגים ובעלי חיים רבים אחרים. מכיוון שרוב חסרי החוליות צמודי המצע זקוקים למסד סלעי על מנת להתיישב, חשוב לשמור על בתי הגידול הסלעיים בעומקים השונים לאורך החוף, באופן זה תהיה קישוריות שתאפשר את העלאת המגוון הגנטי החשוב להישרדות המינים השונים, ואת האכלוס מחדש של בתי גידול רדודים במידה שאלה ייפגעו מאירועי קיצון טבעיים או עקב פעילות האדם.

רשימת מקורות

1. Schultz, D. T. *et al.* Ancient gene linkages support ctenophores as sister to other animals. *Nature* **618**, 110-117(2023).
2. Bergquist, P. R. *Sponges.* (Univ of California Press, 1978).
3. Leys, S. P. & Hill, A. in *Advances in Sponge Science: Physiology, Chemical and Microbial Diversity, Biotechnology* Vol. 62 *Advances in Marine Biology* (eds M. A. Becerro, M. J. Uriz, M. Maldonado & X. Turon)(2012) 1-56 .
4. Hadas, E., Marie, D., Shpigel, M. & Ilan, M. Virus predation by sponges is a new nutrient-flow pathway in coral reef food webs. *Limnol. Oceanogr.* **51**, 1548-1550 (2006).
5. de Goeij, J. M., van den Berg, H., van Oostveen, M. M., Epping, E. H. G. & Van Duyl, F. C. Major bulk dissolved organic carbon (DOC) removal by encrusting coral reef cavity sponges. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **357**, 139-151. (2008).
6. Vacelet, J. & Boury-Esnault, N. Carnivorous sponges. *Nature.* **373**, 333-335 (1995).
7. Maldonado, M. & Riesgo, A. Reproduction in the phylum porifera: a synoptic overview. 29-49 ,**59** (2008).
8. Wulff, J. L. Ecological interactions of marine sponges. *Can. J. Zool.* **84**, 146-166 (2006).
9. Klitgaard, A. B. The fauna associated with outer shelf and upper slope sponge (Polifera, Demospongiae) at the Faroe islnds. Northeastern Atlantics. *Sarsia* **80**, 1-22 (1995).
10. Goren ,L., Idan, T., Shefer, S. & Ilan, M. Sponge-Associated Polychaetes: Not a Random Assemblage. *Front. Mar. Mci.* **8** (2021). https://doi.org/10.3389/fmars.2021.695163
11. Ribeiro, S. M., Omena, E. P. & Muricy, G. Macrofauna associated to *Mycale microsigmatosa* (Porifera, Demospongiae) in Rio de Janeiro State, SE brazil. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **57**, 951-959 (2003).
12. Gerovasileiou, V., Chintiroglou, C. C., Konstantinou, D. & Voultsiadou, E. Sponges as "living hotels" in Mediterranean marine caves. *Sci. Mar.* **80**, 279-289 (2016).
13. Taylor, M. W., Radax, R., Steger, D. & Wagner, M. Sponge-associated microorganisms: Evolution, ecology, and biotechnological potential. *Microbiol. Mol. Biol.* **71**, 295 (2007).
14. Rua, C. P. J. *et al.* Diversity and antimicrobial potential of culturable heterotrophic bacteria associated with the endemic marine sponge *Arenosclera brasiliensis*. *PeerJ* **2**, e419 (2014). https://doi.org0.7717/peerj.419
15. Pita, L., Rix, L., Slaby, B. M., Franke, A. & Hentschel, U. The sponge holobiont in a changing ocean: from microbes to ecosystems. *Microbiome* **6**, 46 (2018).
16. Thomas, T. *et al.* Diversity, structure and convergent evolution of the global sponge microbiome. *Nat. Commun.***7** (2016).
17. Azam, F. *et al.* The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **10**, 257-263 (1983).

18. Hentschel, U., Usher, K. M. & Taylor, M. W. Marine sponges as microbial fermenters. *Fems Microbiol. Ecol*55, 167-177 (2006).
19. Poppell, E. *et al.* Sponge heterotrophic capacity and bacterial community structure in high- and low-microbial abundance sponges. *Mar. Ecol* 35, 414-424 (2014).https://doi.org/10.1111/maec.12098
20. Wilkinson, C. R. Microbial associations in Sponges. II. Numerical analysis of sponges and water bacterial populations. *Mar. Biol.* **49**, 169-176 (1978).
21. Vacelet, J. & Donadey, C. Electron-Microscope study of association between some sponges and bacteria. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* **30**, 301-314 (1977).
22. Hentschel, U. *et al.* Molecular evidence for a uniform microbial community in sponges from different oceans. *Appl. Env. Microbiol*68 **(9),** 4431-4440 (2002).
23. Simister, R. L., Deines, P., Botte, E. S., Webster, N. S. & Taylor, M. W. Sponge-specific clusters revisited: a comprehensive phylogeny of sponge-associated microorganisms. *Environ. Microbiol.* **14**, 517-524 (2012). https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2011.02664.x
24. Taylor, M. W. *et al.* 'Sponge-specific' bacteria are widespread (but rare) in diverse marine environments. *ISME* **7**, 438-443 (2013). https://doi.org/10.1038/ismej.2012.111
25. Fieseler, L., Horn, M., Wagner, M. & Hentschel, U. Discovery of the novel candidate phylum "Poribacteria" in marine sponges. *Appl. Environ. Microbiol.* **70**, 3724-3732 (2004).
26. Vacelet, J. & Boury-Esnault, N. Carnivorous sponges. *Nature* 373, 333-335 (1995).https://doi.org/10.1038/373333a0
27. Vogel, S. Current-induced flow through living sponges in nature. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **74**, 2069-2071 (1977).
28. de Goeij, J. M. *et al.* Surviving in a marine desert: The spongeloop retains resources within coral reefs. *Science* 342 , 108-110 (2013). https://doi.org/10.1126/science.1241981
29. Coma, R., Ribes, M., Gili, J.-M. & Zabala, M. An energetic approach to the study of life-history traits of two modular coclonial benthic invertebrates. *Mar. Ecol .Prog. Ser.* **162**, 89-103 (1998).
30. Bo, M. *et al.* Role of deep sponge grounds in the Mediterranean Sea: a case study in southern Italy. *Hydrobiologia* 687, 163-177 (2012).
31. Hogg, M. *et al.* Deep-seas Sponge grounds: reservoirs of biodiversity. Report No,9280730819 . Cambridge, UK. (2010).
32. Malve, H. Exploring the ocean for new drug developments: Marine pharmacology. *J. pharm. bioallied sci.* **8**, 83-91 (2016).
33. Mayer, A. M. S. *et al.* The odyssey of marine pharmaceuticals: a current pipeline perspective. *Trends Pharmacol. Sci.* **31**, 255-265 (2010). https://doi.org/10.1016/j.tips.2010.02.005
34. 34 Cimino, G. *et al.* Amazing new alkaloid skeletons from the marine sponge *Reniera sarai. Pure Appl. Chem.* **61**, 535-538 (1989).

35. Thakur, N. L., Anil, A. C. & Muller, W. E. G. Culturable epibacteria of the marine sponge *Ircinia fusca*: temporal variations and their possible role in the epibacterial defense of the host. *Aquat. Microb. Ecol.* **37**, 295-304 (2004).
36. Caudal, F., Tapissier-Bontemps, N. & Edrada-Ebel, R. A .Impact of co-culture on the metabolism of marine microorganisms. *Mar. Drugs* **20**, 153 (2022).
37. Jordan, M. A. *et al.* The primary antimitotic mechanism of action of the synthetic halichondrin E7389 is suppression of microtubule growth. *Mol. Cancer Ther.* **4**, 1086-1095 (2005).
38. de Voogd, N.J. *et al.* World Porifera Database (2025). Accessed at https://www.marinespecies.org/porifera on 2025-02-25. doi:10.14284/359
39. Morrow, C. & Cardenas, P. Proposal for a revised classification of the Demospongiae (Porifera). *Front. zool.* **12** (2015). https://doi.org/710.1186/s12983-015-0099-8
40. Raijman-Nagar, L., Shefer, S., Feldstein-Farkash, T., Novak, L. & Ilan, M. New Negombata species discovered: latrunculin mystery solved. *Coral Reefs.* **42**, 343-357 (2023).
41. Grenier, M., Simmler, C., Chevaldonné, P., Callizot, N. & Pérez, T. Searching for Mediterranean bath sponges (Demospongiae: Dictyoceratida: Spongiidae) in the Northeast Atlantic reveals a new species: an integrative taxonomic approach. *Zool. J. Linn. Soc.* **202**, 1-23 (2023). https://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlad166
42. Coll, M. *et al.* The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats. *PloS one* **5**, e11842 (2010). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011842
43. Van Soest, R. W. *et al.* Global diversity of sponges (Porifera). **7**, e35105 (2012).
44. Beazley, L. I., Kenchington, E. L., Javier Murillo, F. & del Mar Sacau, M. Deep-sea sponge grounds enhance diversity and abundance of epibenthic megafauna in the Northwest Atlantic. *ICES Mar. Sci. Symp.* **70**, 1471-1490 (2013). https://doi.org/10.1093/icesjms/fst124
45. Maldonado, M. *et al.* Aggregated Clumps of Lithistid Sponges: A Singular, Reef-Like Bathyal Habitat with Relevant Paleontological Connections. *PLoS One* **10**, e0125378 (2015). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125378
46. Carteron, S. *Etude taxonomique des spongiaires du Liban* M.Sc. thesis, Centre d'Océanologie de Marseille, France (2002).
47. Perez, T., Vacelet, J., Bitar, G. & Zibrowius, H. Two new lithistids (Porifera : Demospongiae) from a shallow eastern Mediterranean cave (Lebanon). *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* **84**, 15-24 (2004).
48. Voultsiadou, E. Demosponge distribution in the eastern Mediterranean: a NW-SE gradient. *Helgol. Mar. Res.* **59**, 237-251 (2005).
49. Voultsiadou, E. Reevaluating sponge diversity and distribution in the Mediterranean Sea. *Hydrobiologia* 628, 1-12 (2009).

50. Vacelet, J., Bitar, G., Carteron, S., Zibrowius, H. & Perez, T. Five new sponge species (Porifera: Demospongiae) of subtropical or tropical affinities from the coast of Lebanon (eastern Mediterranean). *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* **87**, 1539-1552 (2007).
51. Vacelet, J., Bitar, G., Dailianis, T., Zibrowius, H. & Perez, T. A large encrusting clionaid sponge in the Eastern Mediterranean Sea. *Mar .Ecol* 29. 237-246 (2008).
52. Evcen, A. & Cinar, M. E. Sponge (Porifera) species from the Mediterranean coast of Turkey (Levantine Sea, eastern Mediterranean), with a checklist of sponges from the coasts of Turkey. *Turk. J. Zool.* **36**, 460-474 (2012).
53. Gerovasileiou, V. & Voultsiadou, E. Marine Caves of the Mediterranean Sea: A Sponge Biodiversity Reservoir within a Biodiversity Hotspot. *PLoS One* 7, e39873 (2012). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039873
54. Van Soest, R. W. M. *et al.* Global diversity of sponges (Porifera). *PLoS One* ,**7** e35105 (2012).
55. Topaloğlu, B. & Evcen, A. Updated checklist of sponges (Porifera) along the coasts of Turkey. *Turk. J. Zool*38 665-676 (2014).
56. Mouillot, D. *et al.* Protected and threatened components of fish biodiversity in the Mediterranean Sea. *Curr. Biol.* **21**, 1044-1050 (2011).
57. Coll, M. *et al.* The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats. *PLoS One* 5e11842 (2010).
58. Tsurnamal, M. Four new species of Mediterranean Demospongiae and new data on *Callites lacazii* Schmidt. *Cah. Biol. Mar.***10**, 343-375 (1969).
59. Vacelet, J. & Perez, T. *Phorbas topsenti* and *Phorbas tailliezi* (Demospongiae, Poecilosclerida), new names for the Mediterranean '*Phorbas paupertas*' and '*Phorbas coriaceus*'. *Zootaxa* **1873**, 26–38 (2008).
60. Levi, C. Spongiaires des cotes d'Israel. *Bull. Res. Counc. Is.* **6**B, 201-212 (1957).
61. Gottlieb, E. *Study of the benthos in Haifa Bay: Ecology and zoogeography of invertebrates* PhD thesis, Hebrew University, Jerusalem (1959).
62. Levi, C. Spongiaires des cotes d'Israel. *Bull. Res. Counc. Is.* **6**B, 201-212 (1957) .
63. Tsurnamal, M. *Studies on the porifera of the Mediterranean littoral of Israel* Ph.D. thesis, Hebrew Universit.(1968).
64. Tsurnamal, M. *Chelonaplysilla erecta* n. sp. (Demospongiae, Keratosa) from Mediterranean coast of Israel. *Isr. J. Zool.* **16**, 96-100 (1967).
65. Tsurnamal, M. Sponges of red sea origin on the Mediterranean coast of Israel. *Isr. J. Zool.* **18**, 149-15 (1969).
66. Ilan, M., Ben-Eliyahu, N. & Galil, B. Three deep water sponges from the Eastern Mediterranean and their associated fauna. *Ophelia* **39**, 45-54 (1994).

67. Ilan, M., Gugel, J., Galil, B. S. & Janussen, D. Small bathyal sponge species from east Mediterranean revealed by a non-regular soft bottom sampling technique. *Ophelia* **57**, 145-160 (2003).
68. Lesser, M. P., Slattery, M. & Leichter, J. J. Ecology of mesophotic coral reefs. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* **375**, 1- 8 (2009).
69. Bo, M. *et al.* Characteristics of the mesophotic megabenthic assemblages of the Vercelli seamount (North Tyrrhenian Sea). *PLoS One* 6, e16357 (2011).
70. Schönberg, C. H. L. & Fromont, J. in *Ancient animals, new challenges: Developments in sponge research* (eds Maldonado Manuel, Turon Xavier, Becerro Mikel & Uriz Maria Jesús) 143-161 Springer (2012).
71. Slattery, M. & Lesser, M. P. Trophic ecology of sponges from shallow to mesophotic depths (3 to 150 m): Comment on Pawlik et al. (2015). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **527**, 275-279 (2015). https://doi.org/10.3354/meps11307
72. Olson, J. B. & Gao, X. Characterizing the bacterial associates of three Caribbean sponges along a gradient from shallow to mesophotic depths. *Fems Microbiol. Ecol.* **75**, 74-84 (2013).
73. Yahel, R. A., N. Marine reserves as a tool in protecting the environments and diversity of the Mediterranean Sea. Nature conservation policy in the Mediterranean. (Israel Nature and Parks Authority 2012).
74. Assif, S. *et al.* in *Israel Marine Plan* (Technion - Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 2015).
75. Bertolino, M., Bo, M., Canese, S., Bavestrello, G. & Pansini, M. Deep sponge communities of the Gulf of St Eufemia (Calabria, southern Tyrrhenian Sea), with description of two new species. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* **95**, 1371-1387 (2015). https://doi.org/10.1017/s0025315413001380
76. Idan, T., Shefer, S., Feldstein ,T. & Ilan, M. New discoveries in Eastern Mediterranean mesophotic sponge grounds: updated checklist and description of three novel sponge species. *Mediterr. Mar. Sci.* **22**, 270-284 (2021).
77. Idan, T. *et al.* Shedding light on an East-Mediterranean mesophotic sponge ground community and the regional sponge fauna. *Mediterr. Mar. Sci.* **19**, 84-106 (2018). https://doi.org/http://dx.doi.org/10.12681/mms.13853
78. Idan, T. *Mesophotic sponge grounds in the Levant basin: Community composition and dynamics.* (2020).
79. Beazley, L. I., Kenchington, E. L., Murillo, F. J. & Sacau, M. D. Deep-sea sponge grounds enhance diversity and abundance of epibenthic megafauna in the Northwest Atlantic. *ICES Mar. Sci. Symp.* **70**, 1471-1490 (2013). https://doi.org/10.1093/icesjms/fst124
80. Ledda, F. D., Pronzato, R. & Manconi, R. Mariculture for bacterial and organic waste removal: a field study of sponge filtering activity in experimental farming. *Aquac. Res.* **45**, 1389-1401 (2014). https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.12084

81. Protocol, S. Protocol concerning specially protected areas and biological diversity in the Mediterranean. *UNEP. Barcelona, Spain* 9-10. (1995)
82. Aguilar, R. *et al.* 2016 Deep-sea Lebanon Expedition: Exploring Submarine Canyons *Oceana, Madrid.* 94p (2018).
83. Garrabou, J. *et al.* Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: Effects of the 2003 heat wave. *Glob. Change Biol.* **15**, 1090-1103 (2009).
84. Gómez-Gras, D. *et al.* Response diversity in Mediterranean coralligenous assemblages facing climate change: Insights from a multispecific thermotolerance experiment. *Ecol. Evol* 9, 4168-4180 (2019).
85. Di Camillo, C. G., Bartolucci, I., Cerrano, C. & Bavestrello, G. Sponge disease in the Adriatic Sea. *Mar. Ecol.* **34**, 62-71 (2013). https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2012.00525.x
86. Ereskovsky, A., Ozerov, D. A., Pantyulin, A. N. & Tzetlin, A. B. Mass mortality event of White Sea sponges as the result of high temperature in summer 2018. *Polar Biol.* **42**, 1-6 (2019).
87. Lipkin, Y. & Safriel, U. Intertidal zonation on rocky shores at Mikhmoret (Mediterranean, Israel). *J. Ecol.* **59**, 1-30 (1971).
88. Shaltout, M. & Omstedt, A. Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanol.* **56**, 411-443 (2014).
89. Ozer, T., Gertman, I., Kress, N., Silverman, J. & Herut, B. Interannual thermohaline (1979-2014) and nutrient (2002–2014) dynamics in the Levantine surface and intermediate water masses, SE Mediterranean Sea. *Global Planet. Change* **151**, 60-67 (2017).
90. Grenier, M. *et al.* Sponge inventory of the French Mediterranean waters, with an emphasis on cave-dwelling species. *Zootaxa* **4466**, 205-228 (2018).
91. Costa, G. *et al.* Mediterranean sponges from shallow subtidal rocky reefs: Cystoseira canopy vs barren grounds. *Estuar. Coast. Shelf Sci.***207**, 293-302 (2018).
92. Oren, O. Oceanographic and biological influence of the Suez Canal, the Nile and the Aswan Dam on the Levant Basin. *Prog. Oceanogr.* **5**, 161-167 (1969).
93. Azov, Y. Eastern Mediterranean—a marine desert? *Mar. Pollut. Bull.* **23**, 225-232 (1991).
94. Krom, M., Emeis, K. & Van Cappellen, P. Why is the Eastern Mediterranean phosphorus limited? *Prog. Oceanogr.* **85**, 236-244 (2010).
95. Kress, N., Gertman, I. & Herut, B. Temporal evolution of physical and chemical characteristics of the water column in the Easternmost Levantine basin (Eastern Mediterranean Sea) from 2002 to 2010. *J. Mar. Syst.* **135**, 6-13 (2014).
96. Idan, T., Goren, L., Shefer, S. & Ilan, M. Sponges in a changing climate: Survival of *Agelas oroides* in a warming Mediterranean Sea. *Front. Mar. Sci.* **7**, 603593 (2020).

97. Koutsouveli ,V. *et al.* Gearing up for warmer times: transcriptomic response of *Spongia officinalis* to elevated temperatures reveals recruited mechanisms and potential for resilience. *Front. Mar. Sci.* **6**, 786 (2020).
98. Marbà, N., Jordà, G., Agustí, S., Girard, C. & Duarte, C. M. Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota. *Front. Mar. Sci.* **2**, 56 (2015).
99. Cerrano, C. *et al.* A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer1999 . *Ecol. Lett.* **3**, 284-293 (2000).
100. Bertolino, M. *et al.* Changes and stability of a Mediterranean hard bottom benthic community over 25 years. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K* **96**, 341-350 (2016).
101. Hinderstein, L. M. *et al.* Theme section on "Mesophotic Coral Ecosystems: Characterization, Ecology, and Management". *Coral Reefs* **29**, 247–251 (2010). https://doi.org/10.1007/s00338-010-0614-5
102. Locker, S. *et al.* Geomorphology of mesophotic coral ecosystems: current perspectives on morphology, distribution, and mapping strategies. *Coral Reefs* **29**, 329-345 (2010).
103. Idan, T., Goren, L., Shefer, S. & Ilan, M. Sponges in a changing climate: Survival of *Agelas oroides* in a warming Mediterranean Sea. *Front. Mar. Sci* 7, 603593 (2020).
104. Kahng, S. *et al.* Community ecology of mesophotic coral reef ecosystems. *Coral Reefs* 29, 255-257 (2010).
105. Smith, T. *et al.* Benthic structure and cryptic mortality in a Caribbean mesophotic coral reef bank system, the Hind Bank Marine Conservation District, US Virgin Islands. *Coral Reefs* 29, 289-308 (2010).
106. Semmler, R. F., Hoot, W. C. & Reaka, M. L. Are mesophotic coral ecosystems distinct communities and can they serve as refugia for shallow reefs? *Coral Reefs* **36**, 433-444 (2017).
107. Idan, T., Goren, L., Shefer, S., Brickner, I. & Ilan, M. Does depth matter? Reproduction pattern plasticity in two common sponge species found in both mesophotic and shallow waters. *Front. Mar. Sci.* **7**, 61056. (2020).
108. Peterson, B. K., Weber, J. N., Kay, E. H., Fisher, H. S. & Hoekstra, H. E. Double digest RADseq: an inexpensive method for de novo SNP discovery and genotyping in model and non-model species. *PloS one* **7**, e37135 (2012).
109. Taboada, S. *et al.* Long distance dispersal and oceanographic fronts shape the connectivity of the keystone sponge *Phakellia ventilabrum* in the deep northeast Atlantic. *Front. Mar. Sci.* **10**, 1177106. (2023)
110. Sade, A. R. *et al.* The Israel national bathymetric survey—A new look at the seafloor off Israel. *Isr. J. Earth Sci.* **55**, 185-187 (2006).
111. Goren, L., Idan, T., Shefer, S. & Ilan, M. Macrofauna inhabiting massive demosponges from shallow and mesophotic habitats along the Israeli Mediterranean coast. *Front. Mar. Sci.* **7**, 612779 (2021).

112. IUCN. 2024. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2024-2. https://www.iucnredlist.org. Accessed on [26/02/2025]
113. Bo, M. *et al.* Fishing impact on deep Mediterranean rocky habitats as revealed by ROV investigation. *Biol. Conserv.* **171**, 167-176 (2014).
114. Fabri, M.-C. *et al* .Megafauna of vulnerable marine ecosystems in French mediterranean submarine canyons: Spatial distribution and anthropogenic impacts. *Deep-Sea Res. II: Top. Stud. Oceanogr.* **104**, 184-207 (2014).
115. Oberle, F. K., Storlazzi, C. D. & Hanebuth, T. J. What a drag: Quantifying the global impact of chronic bottom trawling on continental shelf sediment. *J. Mar. Syst.* **159**, 109-119 (2016).
116. Olinger, L. K., Scott, A. R., McMurray, S. E. & Pawlik, J. R. Growth estimates of Caribbean reef sponges on a shipwreck using 3D photogrammetry. *Sci Rep* **9**, 18398 (2019). https://doi.org/10.1038/s41598-019-54681-2

24 לובסטרים במזרח הים התיכון ובצפון ים סוף

אהוד שפניר

החוג לציוויליזציות ימיות והמכון ללימודי ים ע"ש ליאון רקנאטי, אוניברסיטת חיפה

spanier@research.haifa.ac.il

תקציר

בחופי ישראל ידועים שבעה מינים מקומיים של לובסטרים. בחופי הים התיכון דווח על שלושה מינים ממשפחת הכפניים – הכפן הגושמני, כפנית דובית וכפנית זוטית. הכפן הגושמני, שכיום הוא מין מוגן, הוא הגדול מכולם והסרטן הגדול ביותר בדרום מזרח הים התיכון. בגלל ערכו המסחרי ומחקרים שנעשו בים התיכון ובמזרח האוקיינוס האטלנטי, הידע הביולוגי עליו גדול יחסית. שני המינים האחרים קטנים ופחות נפוצים, אין להם חשיבות מסחרית בישראל, והידע עליהם מוגבל. במפרץ אילת ידועים ארבעה מינים – כפן הצדפות, כפנית לווינסון והמחושתן הקוצני ממשפחת המחושתנים. כפן הצדפות דומה לבן סוגו מהים התיכון והוא והמחושתן הקוצני, הלובסטר הגדול ביותר בים סוף, היו יעד לדיג אך כיום הם מינים מוגנים. כפנית לווינסון הוא מין קטנטן, נדיר והידע עליו מזערי. לאחרונה נדגמה במפרץ אילת לרווה של מין כפנית נוסף. שלושה מיני לובסטרים נוספים דווחו פעם אחת בלבד מחופינו הים-תיכוניים: המחושתן המקושט והמחושתן ארך-הרגל, שהם מהגרים לספסיים, ולובסטר הצבתות האמריקאי שמוצאו מצפון-מזרח אמריקה.

מבוא

לובסטרים הם סרטנים השייכים, על-פי שיטת המיון הקלסית, לבת-סדרת Macrura Reptantia, ארוכי בטן הלכניים, סדרת מעשירי הרגליים (Decapoda) שלכולם 5 זוגות גפיים, למחלקת סרטנים עילאיים (Malacostraca), בתת-מערכת הסרטנאים (Crustacea), הכלולים במערכת פרוקי-רגליים (Arthropoda). היצורים השייכים למערכת זו מאופיינים בגוף המחולק לפרקים, שני זוגות מחושים וגפיים דו-סעיפיות שעברו התמחויות שונות (לאכילה, תפיסה, הליכה, שחייה, רבייה וחישה). הגוף מכוסה בשלד חיצוני קשיח המורכב בעיקר מכיטין וסידן. מחלקת הסרטנים העילאיים כוללת את הסרטנים הגדולים ביותר ובהם חלק ממיני הלובסטרים.

הלובסטרים מצויים אך ורק במי ים ולרוב מחולקים לשלוש קבוצות (Infraorders). הראשונה (Astacidea) כוללת את משפחת לובסטרי הצבתות ובהם מינים חשובים לדיג, שהידוע בהם הוא הלובסטר האמריקאי (*Homarus americanus*) שחשיבותו הכלכלית גדולה. השנייה (Palinuridea) כוללת את משפחת הלובסטרים המחושתניים שביניהם מינים מסחריים חשובים ואת משפחת הכפנים שלאחדים מהם ערך כלכלי. למעטים מבני הקבוצה השלישית (Thalassinidea) יש ערך כלכלי לאדם[1].

בגישות מיון חדשניות יותר יש המחלקים את הלובסטרים לשתי קבוצות עיקריות – בעלי צבתות (Homarida) וחסרי

צבתות (Achelata) כאשר האחרונה כוללת את המחושתניים (Palinuridae) והכפנים (Scyllaridae)[2].
בחופיה של ישראל יש נציגים של שתי המשפחות האחרונות של הלובסטרים, יש רק אזכור אחד של לובסטרי הצבתות בחוף הים-תיכוני שלנו[3].

לובסטרים מחופי הים התיכון של ישראל

מחופי הים התיכון של ישראל ידועים רק לובסטרים ממשפחת הכפנים כשוכני קבע בחופינו הים תיכוניים. הם כוללים את הכפן הגושמני, *Scyllarides latus*, הכפנית הדובית, *Scyllarus arctus*, והכפנית הזוטית, *Scyllarus pygmaeus*.

כפן גושמני

הכפן הגושמני, Scyllarides latus, (שם באנגלית: Mediterranean slipper lobster) (איור 1) הוא הלובסטר השכיח, יחסית, בחופינו. בגלל גודלו וחשיבותו הכלכלית והאקולוגית, הידע עליו, ממחקרים שנעשו בעיקר בישראל, איטליה, ספרד והאיים האזוריים, מבוסס למדי, יחסית לשאר בני משפחת הכפנים שדווחו בחופי ישראל. אך יש היבטים לא מעטים בביולוגיה ובאקולוגיה שלו שעדיין אינם ידועים.

איור 1. זוג לובסטרים מהמין כפן גושמני. צילום: דני ברחנא.

הכפן הגושמני שייך לסוג כפן, *Scyllarides*, שבו 14 מינים הנפוצים בימים ממוזגים וטרופיים. אלו הם בני תת-משפחת Arctidinae הכוללת, חוץ מהסוג כפן, את הסוג *Arctides* שבו 3 מינים[4]. משפחת הכפניים, Scyllaridae, היא המגוונת ומרובת המינים יותר משאר קבוצות הלובסטרים. היא כוללת 4 תת-משפחות ולפחות 89 מינים. הכפנים קרובים מבחינה טקסונומית ללובסטרים הקוצניים Palinuridae (spiny lobsters), וללובסטרים הפרוותיים Synaxidae (furry lobsters), המהווים יחד את קבוצת הלובסטרים חסרי הצבתות, Achelata[2]. אלו נבדלים משאר הסרטנים מעשירי הרגליים, Decapoda, במספר תכונות אבל בעיקר בשל הפגית (לרווה) המיוחדת שלהם ה-phyllosoma (איור 2). כמו כן הראש-חזה שלהם משוטח ובעל שפות צדדיות וזוג המחושים השני (המחושונים) קצר ומתרחב בצורת לוחית גדולה (אלו קרויים בטעות "כפות" או "סנפירים").

כשאר מיני הלובסטרים, הכפן פעיל בעיקר בשעות החשכה. במשך היום הוא מסתתר במחילות, מערות ונקיקים חשוכים במצע הסלעי[5]. הוא מצוי קרוב לחוף, במדף היבשת הרדוד (עד עומק של כ-30 מ'), רק בחלק מהשנה, בערך מפברואר עד יולי, כאשר מי הים קרירים יחסית. אך ברוב הקיץ ובסתיו נדיר לראותו בחלק הרדוד של מדף היבשת[7,6]. הוא כנראה נודד למים עמוקים יותר וחוזר שוב לבית הגידול הרדוד בחורף הבא.

אורכו המרבי של הכפן עשוי להגיע עד 45 ס"מ, אם כי לרוב אינו עולה על 30 ס"מ, ומשקל של כק"ג וחצי. בעשורים האחרונים דווח על גדלים קטנים יותר, ככל הנראה בגלל דיג והעדפת הדייגים לפרטים גדולים[5]. זהו הסרטן הגדול ביותר בחופינו ובכל דרום מזרח הים התיכון והוא היה, ועודנו, יעד לדיג. הכפן נפוץ בבתי גידול סלעיים, לרוב בעומקים של כ-4 עד 100 מ'[1] (אם כי הוא דווח אף בעומק של 400 מ'[8]), בכל הים התיכון ובמרכז מזרח האוקיינוס האטלנטי מחופי פורטוגל לסנגל, מדירה, והאיים האזוריים, הקנריים וכף ורדה[1]. צבעו חום-צהבהב ושולי מחושיו השטוחים (ה"כפות"), המחושונים והרגליים לרוב בצבע סגול עז (איור 1).

איור 2. א. נקבת כפן גושמני עם ביצים. צילום: סטיב ברייטשטיין, אוניברסיטת חיפה. ב. nisto – שלב קרקעי צעיר של הלובסטר כפן גושמני. צילום: יהונתן גוטליב, אוניברסיטת חיפה. ג. פגית (לרווה) phyllosoma של לובסטר מהסוג כפן (מתוך אוסף *Martin Wiggo Johnson* *Phyllosoma slide collection of the Scripps Institute of Oceanography, Pelagic Invertebrate Collection website*[9]).

רבייה והתפתחות

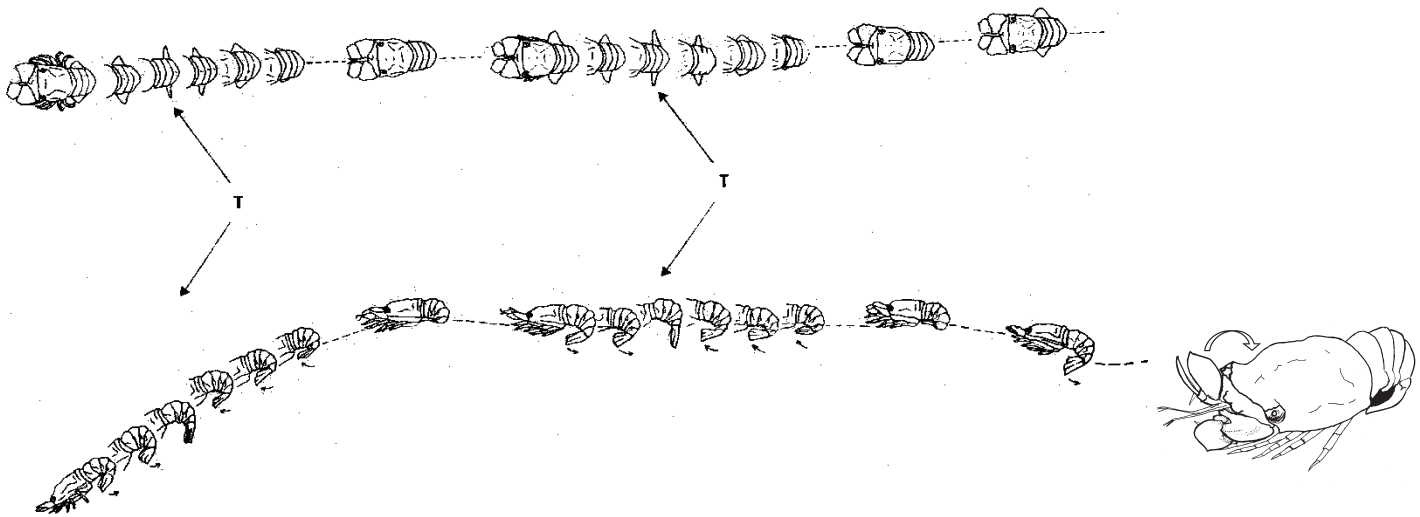
עונת הרבייה בחופינו בחודשים אפריל-יולי. הזוויגים נפרדים ויחס הנקבות לזכרים באוכלוסייה דומה[8,7]. בבוגרים קל להבחין בין הנקבה והזכר על-ידי בדיקת הצד התחתון של הגוף. בנקבה שלוחות הבטן (ה-pleopods), המשמשות להחזקת הביצים, גדולות ורחבות יותר מאשר בזכר. רגל ההליכה החמישית, המשמשת לטיפול בביצים, מסתיימת אצל הנקבה בצבת, בעוד בזכר היא מסתיימת בציפורן. פתחי המין מצויים בבסיס רגל ההליכה השלישית בנקבה והחמישית בזכר. בישראל דווח, בים ובמעבדה, על זכרים עם תיקי זרע, spermatophores, ג'לטיניים לבנים, על בסיס רגלי ההליכה הרביעית והחמישית, באביב המוקדם, כשטמפרטורת המים הגיעה לפחות ל - 17°C ההזדווגות איננה קשורה בהתנשלות כמו במספר מיני לובסטרים אחרים. נקבות במעבדה בישראל נצפו עם תיקי זרע 10-8 ימים לפני הופעת הביצים. נקבות נושאות ביצים דווחו בים ובמעבדה כשטמפרטורת המים הייתה 17-27°C קוטר הביצה כ-0.7 מ"מ ומספר הביצים ביחס ישר לגודל הנקבה כ-100,000-356,000[4,6]. שיעורי פוריות גבוהים כאלה נחשבים כהתאמה לאובדן של פגיות בים הפתוח וגיוס משתנה של צעירים עקב שינויים מחזוריים בים[10]. צבע הביצים צהוב-כתום (איור 2) והוא משתנה לחום כהה. בחופי ישראל הנקבות נושאות את הביצים על בטנן במשך 6-4 שבועות[11], ובאוקיינוס האטלנטי במשך 8-6 שבועות[12] לפני שחרורן למים. דווח כי הנקבות עלולות לאבד חלק או את כל ביציהן לאחר הטרדה על-ידי טורף או אדם בים או במעבדה[4,8]. מהביצה בוקעת פגית ראשונית, naupliosoma, שאורכה כ-1.3 מ"מ. היא איננה ניזונה ומתקיימת לא יותר מחמש שעות עד שהיא מתנשלת לשלב הראשון של פגית phyllosoma[13]. שלב זה חי כ-6 ימים ואורכו כ-1.8 מ"מ. ה-phyllosoma היא פגית שטוחה, שקופה ודמוית עלה (איור 2) הצפה באזור הפלאגי, הרחק מהחוף. היא ניזונה מהחי (בד"כ מיצורים רכים וג'לטיניים) וגדלה במשך קרוב לשנה, במהלכה היא עוברת 11 התנשלויות. השלב הסופי של ה-phyllosoma, שעשוי להגיע עד לאורך 48 מ"מ[13], הופך ל-nisto. שלב זה הוא המעבר מחיים בגוף המים לחיים על המצע. במשך שנים לא נמצא שלב זה בטבע, אך חיפוש ממושך באוספים מוזיאוניים גילה שלב כזה באוסף המוזיאון הזואולוגי בטורינו[14]. פרט זעיר ונדיר זה, באורך 38.7 מ"מ (איור 2) נדגם בדרום איטליה בראשית המאה ה-20, ככל הנראה במים עמוקים יותר מ-800 מטרים. מניחים שבני שלב זה הולכים על הקרקעית העמוקה לעבר המים הרדודים תוך התנשלות וגדילה עד שהם מצטרפים לאוכלוסיית הצעירים והבוגרים במי החופים. למרות שהכפנים מזדווגים, מטילים ביצים ומדגירים אותן בקלות במעבדה, לא עלה בידי החוקרים להשלים את מחזור החיים ולגדלם מביצה בתנאי שבי.

תזונה וטורפים

הכפן הגושמני ניזון בעיקר מצדפות[15] להן הוא משחר בחשכה בשטח הפתוח. לעיתים הוא מביא צדפות לתוך מחילתו, כנראה כאלו שהוא ליקט לקראת שחר[7]. הכפן פותח את הצדפות בעזרת ציפורני רגליו החזקות לאחר שבחן את הצדפות במחושיו וחתך את שרירי הסגירה של הצדפה[16].

הכפן נראה, במבט ראשון, כחסר הגנה. לובסטרי הצבתות, כלובסטר הצבתות האמריקאי (איור 6ג), מצוידים בצבתות גדולות העשויות לשמש להגנה (אך גם לאחיזה ולפיצוח מזון) וגופם של הלובסטרים הקוצניים, כמחושתן הקוצני ממפרץ אילת (איור 9), מכוסה שריון קוצני והם בעלי מחושים ארוכים וקוצניים העשויים לשמש להברחת טורפים.

למרות שלכאורה אין לכפנים התאמות מורפולוגיות כנגד טורפים, התברר שיש להם גם התאמות מורפולוגיות וגם התנהגותיות כנגד טריפה. ראשית הם מסתתרים ביום במחילות אופקיות, שצילן מגן עליהם מאיתור ופגיעה פיזית, בד"כ על-ידי טורפים יומיים. הכפנים מעדיפים מחסות טבעיים, או מלאכותיים (שוניות מלאכותיות) שיש בהם לפחות פתח מילוט אחד נוסף לפתח הכניסה[17]. הם גם נוטים לבחור, בד"כ, מחילות עם פתחים קטנים, המוסיפים להגנה הפיזית של המחילה וגם מגבירים את ההצללה שלה. הם מסתתרים לרוב במחילות יחד עם פרטים אחרים מבני מינם[16]. כשהם יוצאים לפנות ערב לשיחור מזון או לאינטראקציות חברתיות, צבעם מתמזג עם צבע הסביבה הסלעית באור הדמדומים. אם הם מותקפים, שריונם העבה עשוי להגן עליהם בתחילת התקיפה של טורף יומי טיפוסי כמו דג הנצרן הים-תיכוני, *Balistes carolinensis (capriscus)* בעל השיניים החזקות. נמצא ששריונם (השלד החיצוני) המחוספס עבה לפחות פי שניים מזה של לובסטרי צבתות ולובסטרים קוצניים[18]. גם המבנה הפנימי המיוחד של השריון[19] עושה אותו עמיד יותר בפני פגיעה מכנית לעומת שריונם של לובסטרים ממשפחות אחרות. במהלך תקיפה הכפנים מגינים על גפי הפה והמחושים העדינים באמצעות המחושונים השטוחים והנוקשים (ה"כפות"), ועיניהם מתכנסות לתוך ארובות העיניים המוגנות על-ידי קוצים חזקים. רגליהם הקצרות והחזקות, המצוידות בציפורניים חזקות, משמשות להיאחזות בקרקעית הסלעית או בכותלי מחילתם, במאמץ למנוע מהטורף להפכם ולחשוף את חלק גופם התחתון, שם שריונם דק ופגיע יותר. מדידות, באמצעות מאזני קפיץ, הצביעו על כך שכוח ההיצמדות של הכפנים למצע קשה מחוספס (או הכוח הדרוש לניתוק הכפנים ממצע כזה) נע בין 3-15 ק"ג והוא ביחס ישר לגודל (למשקל) הכפן. כוח היצמדות זה שווה ערך לפי 8-29 ממשקל גופו של הלובסטר[7]. ניסיונות בים הראו ששרידותם של כפנים שהסתתרו ביום במחילות בשונית מלאכותית הייתה גבוהה משמעותית מזו של בני מינם ששהו באותו זמן בשטח פתוח, ורובם נטרפו על-ידי נצרנים ים-תיכוניים[20]. אם אסטרטגיה זו של "הגנת מבצר" איננה מועילה, או שעולה בידו של הטורף לחדור למחילה, הכפנים נמלטים מהפתח החלופי שלה ועוברים לשחיית הימלטות. הכפנים שבד"כ הולכים באיטיות על פני המצע, משתמשים בעת חירום בשחייה מהירה באמצעות חבטות הבטן השרירית והגמישה שלהם. שחייה זו, המניעה את הלובסטר במהירות לאחור בתגובה לאיום או להטרדה, היא מסוג "burst and coast". זו מורכבת מתנועות נמרצות במשרעות גדולות של הבטן השרירית ואחריהן גלישה ללא הפעלת כוח (איור 3). מהירויות השחייה בעת ההאצה עשויות להגיע לערכים מרביים של שלושה אורכי גוף בשנייה (עד כמטר אחד לשנייה) בעוד שההאטה במהלך הגלישה פוחתת למהירויות של פחות מאורך גוף אחד לשנייה[21]. הכפנים מסוגלים גם לשנות בפתאומיות את כיוון השחייה שלהם, ככל הנראה כדי לבלבל את הטורף הרודף[4]. שחיית בריחה זו היא קצרת טווח וזמן והכפן משתמש בה רק במצבי חירום כדי להגיע למקום מבטחים (מחילה חלופית), שכן היא דורשת השקעת אנרגיה רבה. המחושונים – זוג המחושים השני הפחוס (ה"כפות"), עם מפרקיהם ברי התנועה (איור 3) משמשים כמייצבים או הגאים לשליטה בתנועת השחייה[21]. ייתכן שגם למניפת הזנב (ה-telson) תפקיד בהיגוי וייצוב השחייה.



איור 3. הדגמה של שחיית ה-"burst and coast" של הלובסטר כפן גושמני במבט מלמעלה (האיור העליון) ומהצד (האיור האמצעי). T- תחילת תנועת הבטן השרירית (מתוך[21]). למטה מימין: הדגמה לשימוש בזוג המחושים השני הפחוס להיגוי בעת שחייה (ציירה, מתוך צילומי וידיאו, רחל פולק, אוניברסיטת חיפה).

התאמות נוספות כנגד טורפים הן "התחזות למת" (חוסר תזוזה בתגובה לטורף מתקרב)[22] ונטייתם של הכפנים להתקבץ בשטח פתוח בלילה, או במחילה משותפת ביום. ההתקבצות עשויה לעכב את התקיפה, לבלבל את הטורף, לזמן קצר, ולספק לכפנים זמן נוסף להימלטות בשחייה. שחיית בריחה כזו, של הלובסטרים למספר כיוונים עשויה לבלבל עוד יותר את מערכת החישה של הטורף ותקשה עליו להתמקד בכפן יחיד[22]. פרטים המתקבצים בקבוצות עשויים להפחית את ההסתברות לטריפה לפרט מאשר כפן בודד, זאת הן עקב "אפקט הדילול" של פרט בתוך קבוצה, או/ו בגלל זיהוי/ערנות מוגברת של טורפים על-ידי קבוצה של כפנים[23].

טורף אפשרי נוסף של הכפנים הוא תמנון החוף, *Octopus vulgaris*. פעמים רבות נצפו כפנים כשהם חולקים אותה מחילה עם מורנה ים תיכונית, *Muraena helena*, ללא כל יחסים של טורף-נטרף ביניהם[17]. משערים שהמחסה המשותף עשוי להועיל לשני המינים כיוון שהתמנון הוא טרף של המורנה. הכפנים עשויים להיות מוגנים מפני התמנון על-ידי שכנם למחילה – המורנה, וזו עשויה ליהנות מכל תמנון הנמשך למחילה בגלל נוכחות הטרף שלו – הכפנים. עם זאת, יש להבהיר יחסי גומלין הדדיים אלו במחקר עתידי.

חישה

העולם החושי של הכפנים הבוגרים ידוע פחות לעומת זה של קבוצות לובסטרים אחרים. החישה הכימית, בשאר הלובסטרים, מחולקת לתחושה כימית מקרוב ("טעם") ומרחוק ("ריח"), בתצפיות בהתנהגות האכילה של הכפנים, נראה שהפרדה זו אצלם אינה ברורה[16]. יש לכפנים גדילים של שערות חישה במקומות רבים בגוף אך לא בקצות הרגליים. למרות זאת הם מסוגלים לאתר ולשלוף, באמצעות ציפורני רגלי ההליכה, צדפות המחופרות גם בעומק של מספר ס"מ

בתוך הקרקע[11] תוך הגברת קצב רפרוף המחושים שלהם. כך גם כאשר מוכנסות צדפות לאקווריום שבו מוחזקים כפנים במעבדה. המחושים מכוסים במספר סוגים של גדילי שערות חישה שהם, כנראה, קולטנים כימיים ומכניים[24]. האחרונים משמשים גם לחישה הידרודינמית בזמן השחייה וכך גם גדילי שערות החישה הרבים על ה"כפות" של הכפן המשמשות להיגוי בעת ה"המראה", ה"נחיתה" ושינוי הכיוון. אלו מספקים משוב חושי חשוב בעת שחיית ההימלטות. הצד התחתון ובעיקר הצד הגבי של השלד החיצוני של הכפנים, כמו אלה של סרטנים מעשירי רגליים אחרים, מכוסים בגדילי שערות חישה נוקשים רבים, שהם כנראה קולטנים מכניים.

העיניים, הממוקמות על גבעולים, מאפשרות מבט גם לאחור. בנוכחות איום ישיר הן מתכנסות לתוך גומות, שכל אחת מהן מוגנת בקוץ נוקשה. ממצאי מחקר אנטומי של עיני הכפן[25] ועיניהם הגדולות הצביעו על כך שהן דומות לאלו של סרטנים מעשירי רגליים ליליים ומותאמות לראייה באור עמום. יש לכפנים, ככל הנראה, גם יכולת ראייה של אור מקוטב. זו התאמה חשובה כנגד טריפה, בהתחשב בכך שגם לכמה מינים של דגי נצרן, שביניהם טורפים של כפנים, יש יכולת כזו.

איברי שיווי משקל (סטטוציסטים statocysts) ידועים במשפחות אחרות של לובסטרים ומשמשים כדי לשמור על איזון, אך הם לא דווחו עדיין בכפנים. העובדה שהכפן מגיב מיד במכת הבטן השרירית אם הופכים אותו על גבו [20] רומזת לכך שהסטטוציסטים שלו מפותחים היטב.

כיוון שנראה שהכפנים מסוגלים לחזור לאותה מחילה מועדפת במצע הקשה לאחר שנה[26] או אף מספר שנים,[6] נשאלת השאלה איך הם מנווטים למרחקים גדולים שכאלה? אפשר שהם משתמשים ברמזים מגנטיים או ב"מפה" גיאומגנטית, כפי שדווח בלובסטרים קוצניים[27] אך גם פן זה לא נחקר עדיין בכפנים. לא ברור גם אם הכפן שומע ומשמיע קולות כבמינים אחרים של לובסטרים. אין ידע על המנגנונים החושיים של שלבים צעירים של כפנים.

השפעות סביבתיות, איומים ושימור

האיומים העיקריים על אוכלוסיות הכפן הגושמני הם דיג יתר, פגיעה בבית הגידול ושינויי אקלים[28,4].

בגלל גודלו ומחירי השוק הגבוהים של הכפן הגושמני, הוא נדוג באופן אינטנסיבי בכל תחום תפוצתו[29], כולל בישראל. הדיג נעשה בעיקר באמצעות צלילה וברשתות. הוצאה של פרטים גדולים, בעלי פוטנציאל רבייתי גבוה, מהים מהווה פגיעה חמורה במין זה. מעריכים שבאזורים מסוימים במערב הים התיכון, כמו איטליה, האוכלוסייה לא תוכל להשתקם כלל[30]. אם כי מחקרים גנטיים שהשוו בין בני מין זה מאתרים שונים במזרח, מרכז ומערב הים התיכון, וממזרח האוקיינוס האטלנטי[31,32] הצביעו על היעדר שונות גנטית בין פרטי הכפן הגושמני על פני טווח התפוצה הרחב שנבדק. זו תופעה של panmixia – היכולת של פרטים באוכלוסייה להתרבות ללא הגבלות על פני טווח גיאוגרפי רחב מאוד של מאות עד אלפי קילומטרים. החוקרים הסבירו זאת בפוריות הרבה של הכפן הגושמני ובשלב הלרוולי הממושך בים הפתוח. לאור ממצאים אלו, שהצביעו על קישוריות גבוהה בין אוכלוסיות מרוחקות גיאוגרפית של הכפן הגושמני, הציעו החוקרים[32] שאסטרטגיות שימור עתידיות צריכות לנהל את כל אוכלוסיות מין זה במשותף (מלאי אחד). למשל לרוות של כפן גושמני מהאיים הבלאריים בספרד עשויות, לפיכך, לאושש בתי גידול מתאימים באיטליה שבהן אוכלוסיות הכפן הידלדלו כמעט לגמרי.

בישראל נחשב הכפן הגושמני לערך טבע מוגן מ-2005 אך עדיין יש דיג לא חוקי שלו. בהתחשב במרחב הימי הגדול

ובמיעוט המפקחים, הדרך היעילה ביותר להגן על מין זה היא באמצעות שמורות טבע ימיות. במחקר שנערך בשמורת-ים ראש הנקרה-אכזיב ובאזור ביקורת דומה[26], נמצא כי מספרם, צפיפותם וגודלם של הכפנים באזור המוגן היה גבוה יותר מאשר בביקורת. לובסטרים מסומנים נטו לחזור חזרה בחורף למחילותיהם בשמורה המוגנת אך לא לאזור הביקורת. מניחים שהשמורות עשויות להועיל גם לאזורים מחוץ להן על-ידי זליגה של בוגרים, צעירים ופגיות לשטחים בלתי מוגנים. הרס בתי גידול מועדפים על הכפנים, כרכסי הכורכר הטבועים המשופעים במערות, נקיקים ומחילות[33], הוא גורם נוסף הפוגע בכפן הגושמני. שמירה על בתי גידול אלו הכרחית לשימור ולאישוש הכפנים ויצורים מאוימים אחרים. שוניות מלאכותיות בטוחות סביבתית ויציבות, המתוכננות בהתאם לאקולוגיה ההתנהגותית של הכפנים, עשויות לספק מקומות מסתור לכפנים ולהוות תחליף מסוים לבתי גידול טבעיים שנהרסו[34].

העלייה התלולה בטמפרטורת מי הים בחופי ישראל בשנים האחרונות, כתוצאה משינויי האקלים, לערכים של מעל 31°C[33] עלולה להזיק לכפנים. התנשלות במעבדה עלולה להיות חלקית, להסתבך[35], ואף הסתיימה במוות של כפנים שהוחזקו במשך חודשיים במעבדה במכל עם מי ים שהטמפרטורה שלהם הייתה 26°C או יותר[16]. אולי לכן נודדים הכפנים בעונות החמות למים עמוקים וקרים יותר שיאפשרו להם התנשלות נורמלית מבחינה פיזיולוגית. השלת השריון וגידול שריון חדש תחתיו, מאפשרת את גידול הכפן, אך בזמן ההתנשלות הכפן, ששריונו החיצוני עדיין רך, חשוף יותר לטריפה. אפשר שהנדידה של הכפנים לעומק קשורה גם בלחץ הטריפה המופחת הקיים בחשכת המעמקים. המידע על זמן ההתנשלות חלקי ביותר ומבוסס על דיווח של נשלים בודדים שנמצאו בחוף הישראלי, בעיקר בין נובמבר לפברואר[7].

מחקר מעבדתי[36] הצביע על כך שהכפן הגושמני מגביר את פעילותו עם עליית טמפרטורת המים. ממצאים אלו עשויים לרמוז כי עליית טמפרטורות המים בדרום מזרח הים התיכון עלולה להשפיע על תנועות הלובסטר וגם על דפוסי התפוצה העונתיים שלו. למשל לגרום לבני מין זה לנדוד למים עמוקים מוקדם יותר בשנה. שינויי האקלים מגבירים גם את תדירותם ועצמתם של אירועי אקלים קיצוניים כמו סערות[33]. החפה (stranding) של כפנים גושמנים בהקשר לשתי סערות גלים עזות דווחה לראשונה בחופים הצפוניים של ישראל בשנים האחרונות[37].

הכפן הגושמני מצוי ברשימה האדומה של מינים מאוימים של האיגוד הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN) ומוגדר שם כ"חסר נתונים"[30]. כדי להגן על מין מאוים, יש צורך במרב המידע על הביולוגיה והאקולוגיה שלו. כיוון שהכפן הגושמני פעיל בלילה ואוכלוסיותיו מפוזרות, קשה למדענים ספורים לקבל תמונה מלאה על האקולוגיה של מין חשוב זה. לכן נעשתה פנייה לקהל הרחב בחופים הים תיכוניים של ישראל, בבקשה לסייע באיסוף מידע (למשל על מיקום וזמן הופעת נשלים וכפנים חיים) בשיטה של "מדע אזרחי"[38]. הקוראים מוזמנים גם הם להעביר מידע כזה לכותב המאמר (spanier@research.haifa.ac.il).

כפניות

הכפניות שייכות לתת-משפחה אחת, Scyllarinae, שכללה סוג אחד בלבד, כפנית, *Scyllarus*, ובו לפחות 40 מינים. רובם קטנים ומיעוטם בעלי חשיבות מסחרית שולית והם נדוגים כשלל לוואי[1]. מ-2002 חלק מהמינים שויכו לסוגים אחרים[39], אבל שני המינים הידועים בחופינו הים תיכוניים נשארו בסוג כפנית.

כפנית דובית

כפנית דובית, *Scyllarus arctus* (שם באנגלית: small European locust lobster) נפוצה בכל הים התיכון, ובמזרח האוקיינוס האטלנטי מהחוף הדרומי של האיים הבריטיים ועד האיים האזוריים, מדיירה והאיים הקנריים. מין זה מצוי עַל מצעים סלעיים, לרוב כאלה שבהם מחילות או מקומות מסתור אחרים, או בוציים ומשטחי עשב-ים, בטווח עומק בין 4 ל-50 מ' ולעיתים אף עמוק מ-200 מ'[8]. הם מצויים גם בשוניות מלאכותיות כטרופות כלי שיט. ישנם דיווחים שבסתיו פרטים ממין זה נודדים למים עמוקים וחוזרים למים רדודים לעונת הרבייה באביב. אורך גוף כולל בדרך כלל בין 5 ל-10 ס"מ, אורך גוף מרבי כ-16 ס"מ. למין זה חשיבות משנית בדיג שם הוא נתפס כשלל לוואי בדיג החופי, למשל בחוף האטלנטי של ספרד[40], אך לא בישראל.

מין זה מאוד צבעוני. הראש-חזה מלבני עם 3 שיניים בולטות במרכזו. צבעו חום-אדמדם עם קשקשים וקוצים לבנבנים בקצותיהם. המחושונים (ה"כפות") משוננים. פרקי הבטן הם בצבע כחול בהיר עם פס כתום, שיוצרים תבנית מורכבת דמוית שרכים (איור 4). הזכרים קטנים יותר מהנקבות. כשאר הכפנים, גם מין זה פעיל לילה ונוטה להסתתר במחילות ומערות שם הוא מוגן יותר מטורפים, בעיקר דגים קרקעיים כדקרים.

איור 4. כפנית דובית. קרדיט: Luis Sánchez Tocino, Granada University[41].

רבייה והתפתחות

בים התיכון נקבות עם ביצים נצפו כל השנה אך בעיקר במרץ/אפריל וביולי/ספטמבר, בדיקות היסטולוגיות אישרו שאלו תקופות הרבייה העיקריות. מספר הביצים 30,000-70,000 לנקבה, קוטרן 0.5-0,4 מ"מ וצבען צהוב-כתום[8]. ללרווה, שאותה הצליחו לגדל במעבדה, 16-12 שלבים והיא מתנשלת לשלב הקרקעי (Nisto) אחרי 192 יום[8]. בסקר אוקיינוגרפי התברר שלרווות של מין זה מצויות לרוב במערבלים (Eddies) כ-250 ק"מ מהחוף הישראלי. כנראה שמערבלים אלו משמשים בית גידול לשלבים הלרווליים של מין זה[42].

איומים, השפעות סביבתיות ושימור

הכפנית הדובית מוגדרת ברשימה האדומה של מינים מאוימים של האיגוד הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN) כ"בעלת עניין מועט מאוד" ("Least Concern")[43]. זאת מכיוון שיש לה תפוצה רחבה והיא נדוגה רק בחלק מתחום תפוצתה. אומנם ידוע שיש ניצול יתר מקומי באזורים מסוימים, אך למרות שחלו ירידות בהיקף האוכלוסיות באזורים אלה, המאפיינים האקולוגיים של לובסטרים אלו הפכו אותם לעמידים בפני הכחדה. זאת מכיוון שהם פוריים מאוד עם אוכלוסיות מקושרות היטב באמצעות לרוות ארוכות חיים (יותר מחצי שנה). הערכה מ-2009 ממליצה לבצע ניטור של רמות הניצול של המין כדי לבדוק עלייה אפשרית בדיג, יחד עם אכיפה מחמירה יותר והתאמה של משטרי ניהול הדיג הנוכחיים[43]. למשל בצפון מערב ספרד, אומנם הגודל המזערי המותר בדיג הכפניות באזור (אורך גוף של 9 ס"מ) הוכח כמאפשר לפרטים בוגרים מינית להתרבות לפחות פעם אחת בשנה. לעומת זאת, מחזור הרבייה הארוך שנצפה באזור (11 חודשים), עם נוכחות של נקבות נושאות ביצים לאורך כל השנה כמעט, לצד האיסור לדוג נקבות עם ביצים, גורם לדיג להיות מוטה מאוד כלפי זכרים. לכן פוטנציאל הרבייה של המלאי עלול להיפגע בגלל מיעוט זכרים[40]. הכפנית הדובית נחשבת לאחד המינים השכיחים בחוף הלבנוני[44] אך כנראה איננה שכיחה בחוף הישראלי. הגנה על משטחי עשב-הים מהסוג *Posidonia* (שאינם מצויים בחופינו), בית גידול מועדף על בני מין זה, מגבירה את ההגנה על הכפניות[43].

כפנית זוטית

כפנית זוטית, *Scyllarus pygmaeus*, (שם באנגלית: Pygmy locust lobster) הוא מין קטנטן של לובסטרים שבו הזכרים מגיעים לאורך מרבי של 54 מ"מ והנקבות עד 65 מ"מ. הכפנית הזוטית מצויה בעומקים בין 5 ל-100 מ'[1] באזורים עם מצעים חוליים, אלמוגי עומק ובין שלוחות צמחי ים מהמינים *Caulerpa prolifera* (שלוחית אזמלנית) ו-*Posidonia oceanica* (פוסידוניה אוקיינית) וכן במערות בים התיכון ובאיים הקנריים, כף ורדה ומדיירה באוקיינוס האטלנטי. לעיתים כפנית זו מתחפרת בקרקע הרכה. היא נדגמה גם בעומקים גדולים עד 1200 מ'[8]. המין דווח כפחות נפוץ בים התיכון, כנראה בגלל שלעיתים תוארו פרטיו בטעות כצעירים של כפנית דובית בגלל השינון הדומה של המחושונים ("הכפות"). צבעם של פרטי המין חום או ורוד (איור 5) עם פסים כחלחלים או כתומים על פרקי הבטן. שריונם מגובשש מאוד ועל פניו צלעות קטנות. הם ניזונים מצדפות קטנות חיות או דגים מתים.

רבייה והתפתחות

במערב הים התיכון נקבות עם ביצים נצפו כל השנה, אך בעיקר בין אפריל ליולי. במזרח הים התיכון תקופת הרבייה ממושכת יותר ונקבות עם ביצים נדגמו אף בחודש דצמבר בעומקים של 82-27 מ'[45]. אין כמעט מידע על הלרוות ועל השלבים הקרקעיים הצעירים אולם בסוף 2022 נדגמה פגית (לרווה) phyllosoma, שלב vii של מין זה, במים הכלכליים של ישראל באמצעות רשת פלנקטון שנגררה אופקית בעומק 1-0.5 מ', כשעומק הקרקעית היה 1100 מ'[46]. הפגית זוהתה באמצעות DNA barcoding ועל-פי המורפולוגיה שלה. זהו הדיווח הראשון של פגית ממין זה במזרח הים התיכון.

איומים, השפעות סביבתיות ושימור

הכפנית הזוטית מוגדרת ברשימה האדומה של מינים מאוימים של האיגוד הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN) כ"בעלת עניין מועט מאוד" ("Least Concern"). זאת הודות לתפוצתה הרחבה בים התיכון ובמזרח האטלנטי, גודלה הקטן וחוסר העניין הכלכלי בה. יש ירידה מקומית באוכלוסייה באזורים מסוימים[47].

איור 5. כפנית זוטית. קרדיט: Luis Sánchez Tocino, Granada University[41].

מינים מזדמנים בחוף הים-תיכוני

יש מספר מינים שנצפו רק פעם אחת בחופינו הים תיכוניים. אלו כוללים את המינים הים סופיים מחושתן מקושט, *Panulirus ornatus* (שם באנגלית: ornate spiny lobster), זכר בוגר נדוג ב-1988 ליד שובר הגלים של נמל חיפה (איור 6-א)[48], כן נמצא בחוף חיפה ב-2018 נשל של נקבה בוגרת של מחושתן ארך-רגל, *Panulirus longipes* (שם באנגלית: long-legged spiny lobster) (איור 6-ב)[49], שניהם כנראה מהגרים לספסיים[33]. בסוף 2022 דווח על שני לובסטרי צבתות אמריקאים, *Homarus americanus* (שם באנגלית: American clawed lobster)[3], בחוף הקשתות בקיסריה, שמקורם כנראה בלובסטרים מיובאים מצפון אמריקה למסעדות בישראל (איור 6 - ג).

איור 6. מינים מזדמנים של לובסטרים בחוף הים תיכוני של ישראל: א. מחושתן מקושט. צילום: Dr. Clive Jones, James Cook University, Australia. ב. נשל של מחושתן ארך-רגל. צילום: אריק פרידמן. ג. לובסטרי צבתות אמריקאים בחוף קיסריה. צילום: מיכאל תובל.

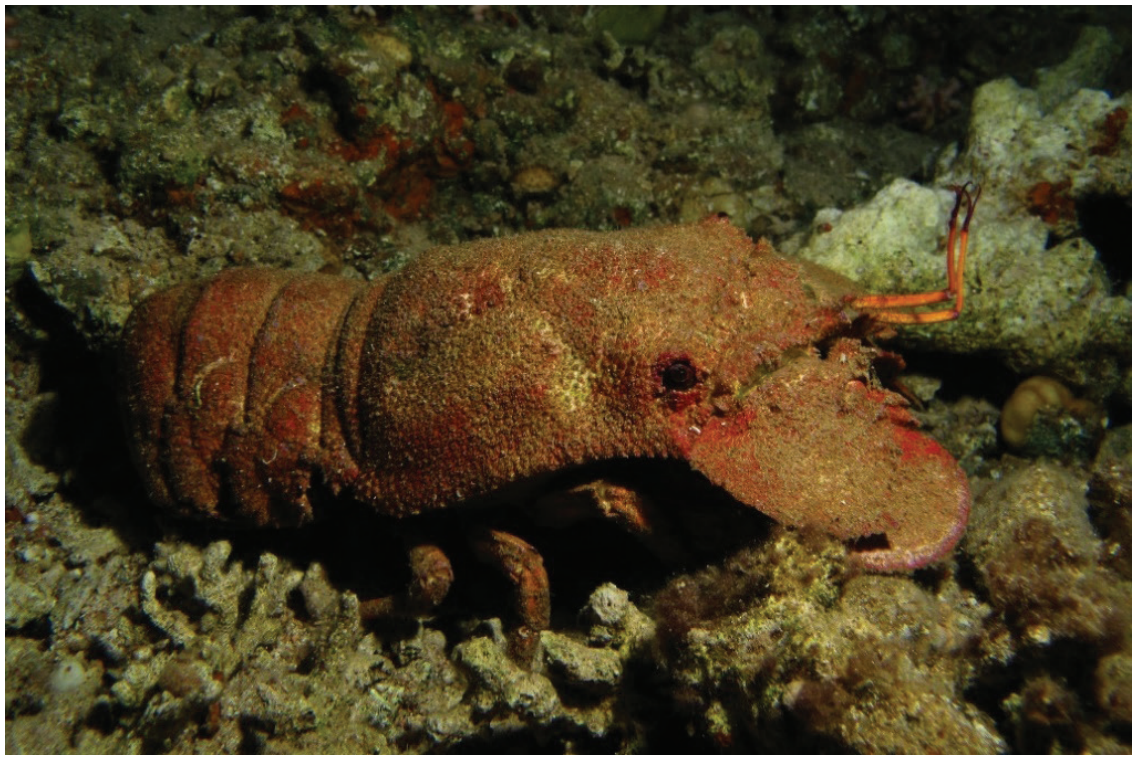
לובסטרים בחופי מפרץ אילת

בחופים הישראלים של מפרץ אילת יש נציגים הן ללובסטרים ממשפחת הכפניים והן ממשפחת המחושתניים, Palinuridae. לובסטרים ממשפחה זו מאופיינים בזוג מחושים שני בעל שוטון ארוך מאוד וארבע רגלי החזה הקדמיות ללא צבתות.

כפן הצדפות

כפן הצדפות, *Scyllarides tridacnophaga* (שם באנגלית: clamkiller slipper lobster), דומה לבן סוגו, הכפן הגושמני, מהים התיכון, וכמוהו פעיל בלילה ומסתתר במחילות ביום[50]. זהו לובסטר גדול שאורכו המרבי עשוי להגיע ל-40 ס"מ אם כי הגודל הממוצע הוא כ-30 ס"מ. חי לרוב באזור שונית האלמוגים או מסלע אחר במים רדודים, בד"כ מ-5-112 מ'. הוא מצליח לפתוח צדפות ענק מהסוג *Tridacna*. בצדפות אלו קיים, קרוב למקום המנעול, פתח שאינו ניתן לסגירה. הכפן הופך את הצדפה בעזרת רגליו המסתיימות בציפורניים חדות, ומחדיר רגל אחת לתוך הפתח. בעזרת הציפורן הוא הורס כנראה את השריר הסוגר או פוגע במערכת העצבים המפקחת על סגירת הקונכייה. לאחר זמן מה נפתחת הקונכייה והלובסטר שב והופך אותה וניזון מגופה החי[51]. הוא ניזון גם מצדפות אחרות ומדגים מתים[1]. תפוצתו הגיאוגרפית היא אינדו-פציפית ממערב האוקיינוס השקט, החוף המערבי של תאילנד והודו, פקיסטן, מזרח אפריקה (סומליה וקניה), מפרץ עדן וים סוף. צבעו של כפן הצדפות הוא חום צהבהב בצד העליון וכתום חיוור בצד התחתון

(איור 7). רוב הגבשושיות על השריון הן בצבע אדמדם וכן שולי המחושים והמחושונים השטוחים. הדגלונים בקצה המחושים הכתומים הם בצבע סגול עמוק. החלק העליון של פרק הבטן הראשון חלק ברובו ונושא שלושה כתמים אדומים גדולים ומוגדרים בחדות, כתם אחד מרכזי ושניים צדדיים, כולם עגולים. המרווחים בין הכתמים רחבים בערך כמו הכתמים עצמם. ואילו בכפן הגושמני הכתם המרכזי הוא אדום ומוקף בטבעת צהובה ובצדדיו, עם מרווח קטן מאוד, שני כתמים אדומים בולטים, שאינם עגולים[50]. הרגליים בכפן הצדפות כתומות ופרקיהן סגולים.



איור 7. כפן הצדפות. צילום: ד"ר קרן לוי, אוניברסיטת תל-אביב.

רבייה

עונת הרבייה חלה בחודשי האביב והקיץ. במהלך החיזור משתמשים הכפנים בחוש הריח והמישוש. ההפריה היא חיצונית, והנקבה נושאת את הביצים עד לבקיעת הפגיות (הלרוות) מהן. במכון לחקר הים בעקבה (MSS) מחזיקים בהצלחה מספר כפני צדפות. במעבדת השדה של המכון לחקר הדיג הימי (CMFI) במדרס, הודו, הוחזקו 4 פרטים, זכרים ונקבות, של כפן הצדפות. הרבייה הייתה בסוף יוני והתקבלו ביצים מופרות עגולות בקוטר של כ-0.5 מ"מ בצבע צהוב בהיר שהפכו בהדרגה לכתומות ולחום חלוד. גידול הבוגרים איטי, בעיקר בזכרים[52].

איומים, השפעות סביבתיות ושימור

כפן הצדפות מוגדר ברשימה האדומה של מינים מאוימים של האיגוד הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN) כ"בעל עניין מועט מאוד" ("Least Concern"), אך בגלל גודלו הגדול הוא נדוג בקניה, בצלילה או כשלל לוואי של דיג המכמורת וסביר להניח שגם באזורים אחרים בתחום תפוצתו ולכן דווח על ירידה מתמשכת במספר פרטים בוגרים[53]. מסתבך לעיתים ברשתות רפאים (רשתות דיג זרוקות או מוזנחות).

כפנית לוינסון

כפנית לוינסון *Scyllarus lewinsohni* [54] קרויה עכשיו *Eduarctus lewinsohni*[55]. מעט מאוד ידוע על מין קטנטן זה. הוא מוגדר ברשימה האדומה של מינים מאוימים של האיגוד הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN) כ"חסר נתונים", אך יש ירידה בפרטים בוגרים באוכלוסייה המקוטעת[55]. בגלל גודלו הקטן אין לו ערך מסחרי והוא לא מאוים על-ידי דיג. הוא נדגם בעומקים של 82-20 מ' בים סוף צפונית מבאב-אל מנדב, בדרום מפרץ סואץ ובאילת. אורך הראשחזה 12-6 מ"מ והערכת הגודל המרבי 4-3 ס"מ. ככפניות אחרות שריונם מגובשש מאוד ועל פניו צלעות קטנות. צבע אדמדם-חום בצידי הראשחזה עם מספר כתמים לבנים גדולים. יש מספר מוטע של נקודות קטנות בצבע דומה במרכז פרקי הבטן[55,54] ובצידן תבנית מורכבת באדום ולבן דמוית שרכים (איור 8).

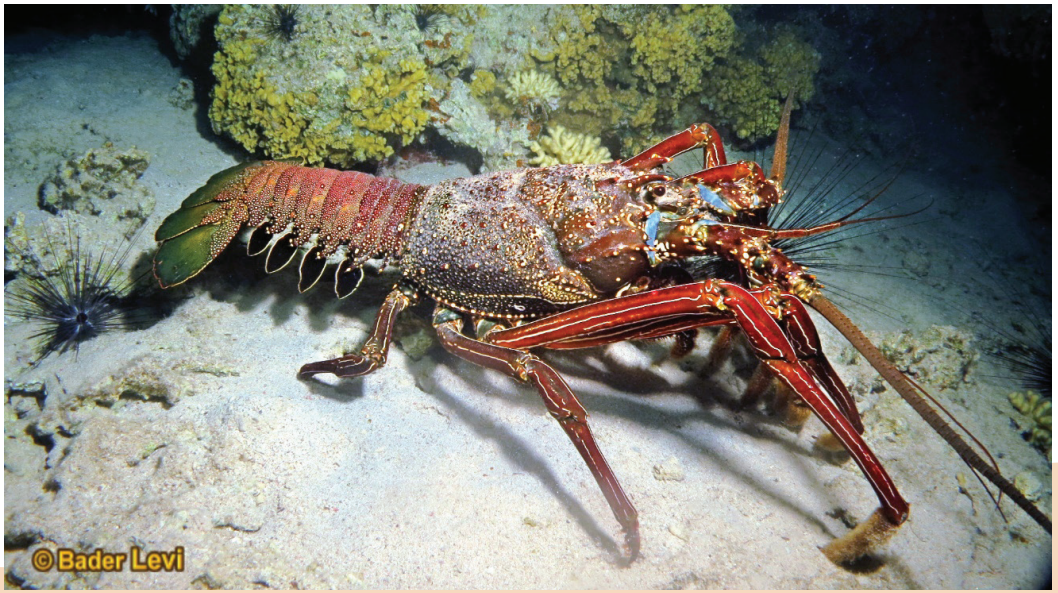
איור 8. כפנית לווינסון. צילום: ד"ר גיל קופלוביץ, המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת.

Biarctus sordidus - עדות למין חדש של כפנית במפרץ אילת

לאחרונה נדגמה בצפון מפרץ אילת פגית (לרווה) phyllosoma של מין של כפנית *Biarctus sordidus*, (שגם הוא נקרא באנגלית pygmy slipper lobster) שלא היה ידוע קודם בים סוף[56]. תפוצתו של מין זה, הייתה ידועה עד כה מהמזרח הרחוק רק עד המפרץ הפרסי[54]. הפגית נדגמה באמצעות רשת פלנקטון שנגררה אופקית בעומק 0.5-1 מ', כשעומק הקרקעית היה 700 מ'. הפגית זוהתה באמצעות DNA barcoding ועל-פי המורפולוגיה שלה כ-phyllosoma שלב iii/v של מין קטנטן זה. החוקרים סבורים שייתכן שסקרי המגוון הביולוגי בים סוף בעבר בלבלו בין *B. sordidus* ובין בן סוגו, *B. pumilus*, הידוע מים סוף[54]. הסבר נוסף/חלופי לאיתור מאוחר של *B. sordidus* בים סוף עשוי להיות שהפגית הוחדרה בזמן האחרון באמצעות מי נטל של ספינת סוחר שהגיעה לנמל אילת או לנמל עקבה בירדן מהמזרח הרחוק. זאת למרות שאין עדיין כל דיווח על העברת לרוות phyllosoma במי נטל.

מחושתן קוצני

מחושתן קוצני, *Panulirus penicillatus* (שם באנגלית: pronghorn spiny lobster) הוא בן ממשפחת המחושתניים, Palinuridae. הוא הגדול מבין הסרטנים ארוכי הבטן במפרץ אילת. אורך גוף מרבי כ-40 ס"מ ואף יותר, אורך ממוצע של לובסטר בוגר כ-30 ס"מ והזכרים גדולים מהנקבות. גופו של לובסטר זה ארוך ואורך זוג המחושים השני עולה על אורך הגוף והם קוצניים מאוד. רגלי החזה חסרות צבתות, ובקדמת הראשחזה קוצים גדולים הבולטים מעל העיניים. מניפת הזנב שבקצה הבטן רחבה מאוד ורובה בצבע כחול זוהר או אפור-ירקרק מוקף בשוליים בהירים כתומים (איור 9).



איור 9. מחושתן קוצני. צילום: בדר לוי.

בשעות היום המחושתן חבוי בנקיקים בסלעים ובשפה החיצונית של שונית האלמוגים במקומות קבועים, ופעיל בעיקר בלילה. מצוי בעומקים רדודים בין 1 ל-16 מ', במצעים סלעיים, במים צלולים הרחק משפכי נהרות, לעיתים קרובות באזור משברי גלים, ובחופים צחיחים ובאיים קטנים. הוא ניזון בעיקר מרכיכות וקיפודי-ים שאת חלקיהם הקשים הוא שובר באמצעות לסתותיו העליונות החזקות. המחושתן מוגן על-ידי הקוצים הרבים בשריונו ועל-ידי מחושיו הקוצניים. למין זה תפוצה גיאוגרפית רחבה ביותר, המשתרעת מים סוף, מערב האוקיינוס ההודי ועד למזרח האוקיינוס השקט[57].

רבייה והתפתחות

יחס הזוויגים 1:1.64 זכרים לנקבות. נקבות מגיעות לבגרות מינית בטבע באורך ראשחזה של 50 מ"מ. עונת הרבייה במפרץ אילת מפברואר עד אוקטובר, ובמהלכה הנקבות הטילו 2-4 פעמים. מספר הביצים הוא ביחס ישר לאורך הראשחזה. תקופת הדגירה של הביצים הייתה כ-35 יום בטמפרטורות של 24-27°C באקווריום[57]. הצליחו לגדל את לרוות ה-phyllosoma של מין זה במעבדה מהבקיעה מהביצה עד שעברו מטמורפוזה ל-puerulus, שלב שבו הם יכולים לשחות באופן פעיל ועשויים להתיישב על המצע, אם הם מגיעים לקרבת בית גידול רדוד מתאים. במעבדה, השלמת מחזור חיים זה נמשכה 8-10 חודשים ו-20 שלבי התנשלות[58].

איומים, השפעות סביבתיות ושימור

המחושתן נדוג בכל תחום תפוצתו הרחב, ביום ולעיתים גם בלילה, בשנרקול, איסוף ביד על פני השונית בלילה, ברובים תת-מימיים וברשתות עמידה[1]. ידוע על ניצול יתר באזורים מסוימים שגרם להידלדלות מקומית, כולל במפרץ אילת. ברשימה האדומה של מינים מאוימים של האיגוד הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN) מוגדר מין זה כ"בעל עניין מועט מאוד" ("Least Concern"). זאת הודות לתפוצתו הרחבה, והערכה מ-2009 הייתה שהדיג לא משפיע על האוכלוסייה העולמית[59]. אולם כיוון שזו נעשתה לפני כמעט 15 שנים, יש לבצע ניטור מחדש של רמות הדיג כדי לבדוק עליות אפשריות בניצול וכדי לספק מדד מדויק של שפע למין זה. יש להחמיר את האכיפה ולהקפיד על ניהול מתאים, כולל הפחתה של הדיג ואיסור הוצאה של נקבות עם ביצים. במפרץ אילת מין זה מוגן.

רשימת מקורות

1. Holthuis, L. B. Marine lobsters of the world. *FAO fisheries synopsis* 13.125 (FAO, Rome, Italy, 1991).
2. Lavalli, K. L. & Spanier, E. Infraorder Palinura Latreille, 1802. Chapter 68 in *Treatise on Zoology-Anatomy, Taxonomy, Biology. The Crustacea, Volume 9 Part A (eds.* Schram, F. & von Vaupel Klein, C.) 425-532 (Brill, 2010).
3. Spanier, E. First record of the American clawed lobster, *Homarus americanus* (H. Milne Edwards, 1837), in the southeastern Mediterranean. *Bioinvasions Rec.* **12**, 775-786 (2023).
4. Lavalli, K. L., Spanier, E. & Goldstein, J. S. Scyllarid Lobster Biology and Ecology. Chapter 3 in *Crustacea* (eds. Diarte-Plata, G. & Escamilla-Montes, R.) 25-51 (IntechOpen, 2019).
5. Spanier, E. & Lavalli, K. L. Commercial Scyllarids. Chapter 13 in *Lobsters: biology, management, aquaculture and fisheries* (ed. Phillips, B. F.) 414-467 (Blackwell, 2013).
6. Spanier, E., Tom, M., Pisanty, S. & Almog, G. Seasonality and shelter selection by the slipper lobster *Scyllarides latus* in the southeastern Mediterranean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **42**, 247-255 (1988).
7. Spanier, E. & Lavalli, K. L. Natural history of *Scyllarides latus* (Crustacea Decapoda): a review of the contemporary biological knowledge of the Mediterranean slipper lobster. *J. Natur. Hist.* **32**, 1769-1786 (1998).
8. Pessani, D. & Mura, M. The Biology of the Mediterranean Scyllarids in *The Biology and Fisheries of the Slipper Lobsters* (eds. Lavalli, K. L. & Spanier, E.) 264-286 (CRC Press, 2007).
9. Martin Wiggo Johnson Phyllosoma slide collection of the Scripps Institute of Oceanography, Pelagic Invertebrate Collection website. https://www.flickr.com/photos/siopiczp/collections/72157641176701533/
10. Sekiguchi, H., Booth, D. & Webber, W. R. Early Life Histories of Slipper Lobsters in *The Biology and Fisheries of the Slipper Lobsters* (eds. Lavalli, K. L. & Spanier, E.) 69-90 (CRC Press, 2007).
11. אלמוג-שטייר, ג. היבטים אקולוגיים-התנהגותיים של לובסטרים מהים התיכון בעבר והכפן הגושמני, *Scyllarides latus* בהווה. עבודת מ.א., אוניברסיטת חיפה (1988).
12. Martins, H. R. Biological studies on the exploited stock of the Mediterranean locust lobster, *Scyllarides latus*, (Latrielle, 1803) (Decapoda, Scyllaridae) in the Azores. *J. Crustac. Biol.* **5**, 294-305. (1985).
13. Martins, H. R. Some observations on the naupliosoma and phyllosoma larvae of the Mediterranean locust lobster, *Scyllarides latus*, (Latrielle, 1803) from the Azores. *Intl. Council for the Exploration of the Sea C.M.K.* 52 Shellfish Committee. (1985).
14. Spanier, E. & Lavalli, K. L. First record of an early benthic juvenile likely to be that of the Mediterranean slipper lobster, *Scyllarides latus* (Latreille, 1802) *Crustaceana* **86,** 259-267 (2013).

15. Spanier, E. Mollusca as food for the slipper lobster *Scyllarides latus* in the coastal waters of Israel. *Levantina* **68**, 713-716 (1987).
16. Lavalli, K.L., Spanier, E. & Grasso, F. Behavior and sensory biology of slipper lobster In *The Biology and Fisheries of the Slipper Lobsters* (eds. Lavalli, K. L. & Spanier, E.) 133-181 (CRC Press, 2007)
17. Spanier, E. & Almog-Shtayer, G. Shelter preferences in the Mediterranean slipper lobster: effects of physical properties. *J. Experiment. Mar. Biol. Ecol.* **164,** 103-116 (1992).
18. Barshaw, D. E., Lavalli, K. L. & Spanier, E. Offense versus defense: responses of three different morphological types of lobsters to predation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **256**,171-182 (2003).
19. Tarsitano, S. F., Lavalli, K. L., Horne, F. & Spanier, E. The constructional properties of the exoskeleton of Homarid, Palinurid, and Scyllarid Lobsters. *Hydrobiologia* **557**, 9-20 (2006).
20. Barshaw, D.E. & Spanier, E. Anti-predator behaviors of the Mediterranean slipper lobster *Scyllarides latus. Bull. Mar. Sci.* 55, 375-382 (1994).
21. Spanier E., Weihs, D. & Almog-Shtayer, G. Swimming of the Mediterranean Slipper lobster *J. Experiment. Mar. Biol. Ecol.* 145, 15-31 (1991).
22. Lavalli, K. L. & Spanier, E. Predator adaptations in Decapods in *The Natural History of the Crustacea, Vol. 2: Lifestyles and Feeding Biology* (eds. Thiel, M. & Watling, L.) 190-228 (Oxford Univ. Press, 2015).
23. Lavalli, K. L. & Spanier, E. Does gregariousness function as an antipredator mechanism in the Mediterranean slipper lobster, *Scyllarides latus*? *Mar. Frehw. Res.* **52**, 1133-1143 (2001).
24. Weisbaum, D. & Lavalli, K. L. Morphology and distribution of antennular setae of scyllarid lobsters (*Scyllarides aequinoctialis, S. latus, and S. nodifer*) with comments on their possible function. *Invert. Biol.* **123**, 324-342 (2004).
25. Lau, S. T. F., Spanier, E. & Meyer-Rochow, V. B. Anatomy and ultrastructural organisation of the eye of the Mediterranean slipper lobster, *Scyllarides latus*: preliminary results. *N. Z. J. Mar. Freshwater Res.* **43**, 233–245 (2009).
26. Miller, E., Spanier, E., Diamant, R. & Yahel R., Nature reserves facilitate the conservation of the Mediterranean slipper lobster, *Scyllarides latus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **714**, 57–69 (2023).
27. Boles, L. & Lohmann, K. True navigation and magnetic maps in spiny lobsters. *Nature* **421**, 60–63 (2003).
28. שפניר, א. הלובסטר הים תיכוני, כפן גושמני – הידוע והנסתר באקולוגיה של מין מאוים. *אקולוגיה וסביבה* **14** (2023).
29. Spanier, E. & Lavalli, K. L. Slipper lobster fisheries—present status and future perspectives in *The Biology and Fisheries of the Slipper Lobsters* (eds. Lavalli, K. L. & Spanier, E.) 377-391 (CRC Press, 2007).
30. Butler, M., MacDiarmid, A. & Cockcroft, A. *Scyllarides latus*, *The IUCN Red List of Threatened Species*.
https://www.iucnredlist.org/search?query=Scyllarides%20latus&searchType=species (2011).

31. Bianchini, M. L., Spanier, E. & Ragonese, S. Enzymatic variability of Mediterranean slipper lobsters, *Scyllaidess latus*, from Sicilian waters. *Ann. Ser. Hist. Nat.* **13**, 43-50. (2003).
32. Faria, J., Froufe, E., Tuya, F., Alexandrino, P. & Pérez-Losada, M. Panmixia in the endangered slipper lobster *Scyllarides latus* from the Northeastern Atlantic and Western Mediterranean. *J. Crustac. Biol.* **33**, 557-566. (2013).
33. Spanier, E. & Zviely, D. Key environmental impacts along the Mediterranean coast of Israel in the last 100 years. *J. Mar. Sci. Eng.* **11**, 1-59 (2022).
34. Spanier, E., Lavalli, K.L. & Edelist, D. Artificial reefs for lobsters – an overview of their application for fisheries enhancement, management, and conservation Chapter 6 in *Artificial Reefs in Fisheries Management* (eds. Bortone, S., Brandini, F. P., Fabi, G. & Otake, S.) 77-109 (CRC Press, 2011).
35. Spanò, S., Ragonese, S. & Bianchini, M. An anomalous specimen of *Scyllarides latus* (Decapoda, Scyllaridae). *Crustaceana* **76**, 885-889 (2003).
36. Goldstein, J. S. & Spanier, E. Increasing seawater temperatures in the Levantine basin, eastern Mediterranean may elicit increased activity in slipper lobsters, *Scyllarides latus* (Latreille, 1803) (Decapoda: Achelata: Scyllaridae). *J. Crustac. Biol.* **42**,1-8 (2023).
37. Spanier, E., Miller, E. & Zviely, D., Winter stranding of Mediterranean slipper lobsters, *Scyllarides latus*. *Reg. Stud. Mar. Sci.* **14**, 126-131 (2017).
38. סילבר, ט., סילבר, י. וברעם-צברי, א. שיתוף הציבור במחקר מדעי: קשת של אפשרויות. *אקולוגיה וסביבה* **12** (2021).
39. *Scyllarus*, World Register of Marine Species https://www.marinespecies.org/ (2009).
40. Alborés, I., García-Soler, C. & Fernández, L. Reproductive biology of the slipper lobster *Scyllarus arctus* in Galicia (NW Spain): Implications for fisheries management. *Fish. Res.* ***212***, 1-11 (2019).
41. Luis Sánchez Tocino, Granada University https://litoraldegranada.ugr.es
42. Fiedler, U. & Spanier, E. Occurrence of larvae of *Scyllarus arctus* (Crustacea, Decapoda, Scyllaridae) in the Eastern Mediterranean — preliminary results. *Ann. Ser. Hist. Nat.* **17**,153–158 (1999).
43. Butler, M., MacDiarmid, A., Wahle, R., Cockcroft, A. & Chan, T.Y. *Scyllarus arctus*, *The IUCN Red List of Threatened Species.* https://www.iucnredlist.org/search?query=Scyllarus%20arctus&searchType=species (2011).
44. Majdalani, S. The present status of fishery and information system in Lebanon. *Enabling participation in the fishery statistics and information system in the Mediterranean (TCP/INT/2904).* MedFisis Technical Document No. 4 (2004).
45. Lewinsohn, C. & Holthuis, L.B. The Crustacea Decapoda of Cyprus. *Zool. Verh.* **230**, 1–64 (1986).
46. Guy-Haim, T., Iakoleva, A., Ermak, K., Spanier, E. & Morov, A. R. First record of the phyllosoma larva of the pygmy locust lobster *Scyllarus pygmaeus* in the Eastern Mediterranean Sea *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* **104**, e49, 1-4 (2024). https://doi.org/10.1017/S0025315424000390

47. Wahle, R., MacDiarmid, A., Cockcroft, A., Chan, T.Y. & Butler, M. *Scyllarus pygmaeus*, *The IUCN Red List of Threatened Species* https://www.iucnredlist.org/search?query=Scyllarus%20pygmaeus&searchType=species (2011).
48. Galil, B., Pisanty, S., Spanier, E. & Tom, M. The Indo-Pacific lobster *Panulirus ornatus* (Fabricius, 1798) (Crustacea: Decapoda) a new Lessepsian migrant to the Eastern Mediterranean *Isr. J. Zool.* **35**, 241-243 (1989).
49. Spanier, E. & Friedmann, E., The collection of an exuvia identified as *Panulirus longipes longipes* (A. Milne-Edwards, 1868) from off Haifa, Israel. *Mediterr. Mar. Sci.* **20**, 227-229 (2019).
50. Holthuis, L.B. Some new species of Scyllaridae. *Proc K Ned Akad Wet C* **70**, 305-308 (1967).
51. Holthuis, L. The second Israel South Red Sea expedition, 1965: Report no. 7. The Palinuridae and Scyllaridae of the Red Sea. *Zool. Meded.* **42**, 281-301 (1968).
52. Kizhakudan, J. K. et al. Growth, maturation and breeding of the clamkiller slipper lobster *Scyllarides tridacnophaga* Holthuis, 1967 in captivity. *The Lobster Newsletter* **31**, 8-11 (2018).
53. MacDiarmid, A., Cockcroft, A. & Butler, M. *Scyllarides tridacnophaga, The IUCN Red List of Threatened Species* https://www.iucnredlist.org/search?query=Scyllarides%20tridacnophaga&searchType=species (2011).
54. Holthuis, L. B. The Indo-Pacific scyllarine lobsters (Crustacea, Decapoda, Scyllaridae). *Zoosystema* **24**, 499-683 (2002).
55. Chan, T.Y. *Eduarctus lewinsohni, The IUCN Red List of Threatened Species* https://www.iucnredlist.org/search?query=Eduarctus%20lewinsohni&searchType=species (2011).
56. Guy-Haim, V. Farstey, T., Iakovleva, A., Spanier, E. & Morov, A.R., First report of the pygmy slipper lobster *Biarctus sordidus* (Crustacea, Decapoda) in the Red Sea following the finding of its phyllosoma larva. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 104, e110, 1–4. https://doi.org/10.1017/S0025315424001085 (2024).
57. Plaut, I. Sexual maturity, reproductive season and fecundity of the spiny lobster *Panulirus penicillatus* from the Gulf of Eilat (Aqaba), Red Sea. *Mar. Freshwater Res.* ***44***, 527-535 (1993).
58. Matsuda, H., Takenouchi, T. & Goldstein, J. S. The complete larval development of the pronghorn spiny lobster *Panulirus penicillatus* (Decapoda: Palinuridae) in culture. *J. Crustac. Biol.* ***26***, 579-600 (2006).
59. Cockcroft, A, MacDiarmid, A. & Butler, M. *Panulirus penicillatus. IUCN Red List of Threatened Species.* https://www.iucnredlist.org/search?query=Panulirus%20penicillatus.&searchType=species (2011).

25 קיפוד סגול מצוי ותרומתו להבנת השפעת הסביבה על התפתחות עוברית של בעלי חיים ימיים

סמדר בן טבו דה לאון

החוג לביולוגיה ימית, בית הספר למדעי הים על שם צ'רני, אוניברסיטת חיפה.

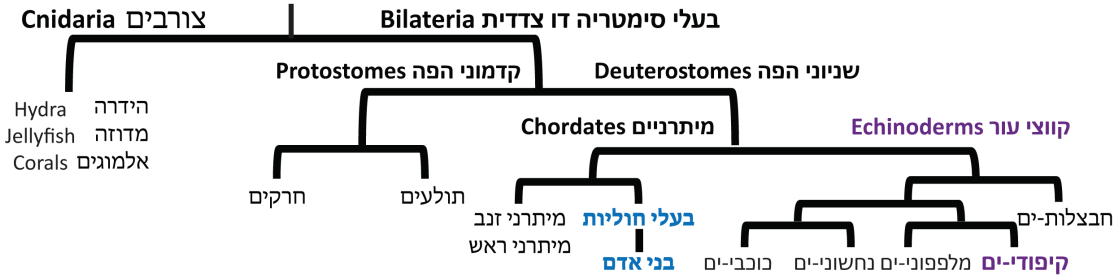
sben-tab@univ.haifa.ac.il

תקציר

גיבור הפרק הזה הוא קיפוד סגול מצוי ובשמו העממי קיפוד-הים הים-תיכוני, *Paracentrotus lividus*. מין זה נפוץ בחופי הים התיכון ובחופים המזרחיים של האוקיינוס האטלנטי. בשנים האחרונות התמעטה אוכלוסייתם לאורך חופי ישראל, ככל הנראה בשל העלייה בטמפרטורת מי הים. הפרק יתאר את התפוצה של קיפוד-הים הים-תיכוני, את התרומה שלו להבנת השפעת שינויים סביבתיים על הבקרה הגנטית של התפתחות עוברית ולחקר האבולוציה של צורות גוף חדשות. מחקרים בקיפוד-הים הים-תיכוני בחנו את השפעתם של שינויים סביבתיים כמו התחממות, החמצה, מחסור בחמצן ועלייה בריכוז המיקרופלסטיק על ההתפתחות העוברית, וגילו מנגנוני הגנה מולקולריים המגינים על העוברים מפני חלק מהשינויים. בפרט, ירידה זמנית בריכוז החמצן בשעות ההתפתחות הראשונות, גורמת לעובר לאבד את ציר הסימטריה בטן-גב, ולהפרעה חמורה בהתפתחות שלו. לעומת זאת, ירידה בריכוז החמצן בשלבים מאוחרים יותר כמעט ואינה משפיעה על התפתחות השלד, בזכות מבנה רשת הבקרה הגנטית המקנה לעובר עמידות מול לחץ סביבתי זה. מחקרים נוספים, שבחנו את יצירת שלד הקלציט של קיפודי-הים תרמו להבנת תהליך הביומינרליזציה, התהליך שבו יצורים חיים משתמשים במינרלים כדי לבנות את השלד, השיניים, או הקונכיות שלהם. המודל של רשת הבקרה הגנטית המבקרת את התמיינות תאי השלד ואת ההתפתחות השלד הוא אחד המודלים המפורטים ביותר לבקרת תהליך התפתחותי כלשהו הידוע בספרות המחקרית. באופן מפתיע, רשת הבקרה הגנטית הזו דומה מאוד לרשת הגנטית המבקרת את התפתחות כלי הדם באדם, במהלך ההתפתחות העוברית ובמחלות, כמו סרטן. השימור הגבוה בין חלבונים של קיפודי-ים לחלבונים אנושיים, הופך את עובר קיפוד-הים למערכת מבטיחה לגילוי תרופות שימנעו התפתחות כלי דם ויעצרו התפשטות של גידולים סרטניים. קיפוד סגול מצוי הוא הרבה יותר מאטרקציה קוצנית בחוף הים, ותרומתו להבנת המערכת האקולוגית, לחקר ההתפתחות העוברית, אבולוציה של החיים בים, ולפיתוח תרופות וחומרים חדשים, רק גדלה עם הזמן.

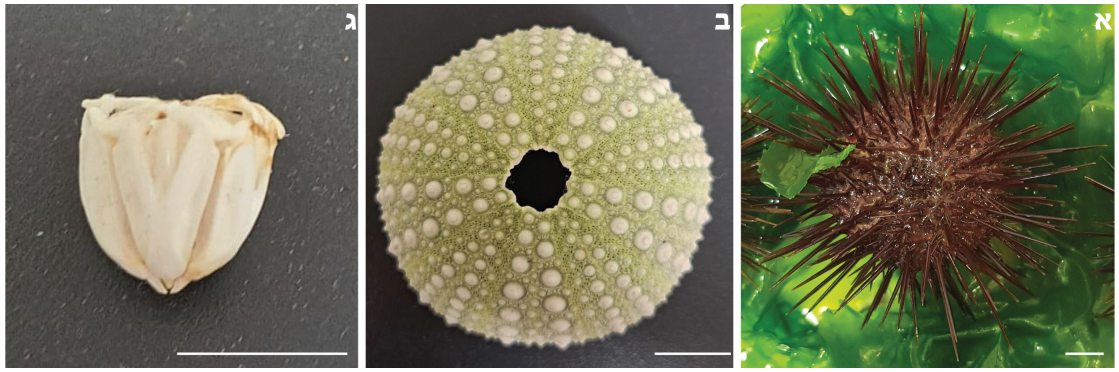
קיפוד סגול מצוי - תפוצה, תפקיד במערכת האקולוגית ואיומים סביבתיים

קיפודי-הים שייכים למערכת קווצי העור, שאליה שייכים גם מלפפוני-הים, נחשונים, כוכבי-ים וחבצלות-ים (איור 1). מערכת זו קרובה אבולוציונית לבעלי החוליות, ומכאן – לבני האדם. אחד המאפיינים הבולטים של מערכה זו הוא מבנה גוף בעל סימטריה מחומשת, השונה מהסימטריה הדו-צדדית של רוב בעלי החיים הבילטרליים. קיפוד סגול מצוי, קיפוד-הים הים תיכוני, *Paracentrotus lividus*, נפוץ בכל חופי הים התיכון ובחופים הצפון מזרחיים של האוקיינוס האטלנטי[1] (איור 2א'). לקיפוד-הים שלד העשוי מקלציט ובו ניכרת הסימטריה המחומשת של מערכת קווצי העור (איור 2ב'). הפה של קיפודי-הים מצוי על-פי רוב בחלקו התחתון של הגוף (הצד הפונה למצע) ומהווה חלק ממערכת מורכבת של לסתות ושיניים עשויות קלציט. הצורה האופיינית של מערכת הלסתות מכונה: "פנס אריסטו" (איור 2ב').



איור 1. עץ פילוגנטי המראה את מיקום קיפוד-הים ביחס לקווצי עור אחרים, בעלי חוליות, ויצורי ים קדומים יותר.

קיפוד סגול מצוי הוא רועה (הרביבור, ניזון מצמחים) דומיננטי בקהילות הבנטיות הרדודות בים התיכון[2]. למין זה תפקיד משמעותי באזור הכרית של החוף הסלעי, שבו הנוכחות של הקיפודים מגבילה את התפשטות האצות[2]. קיפוד סגול מצוי היה בעבר נפוץ מאוד בחופי ישראל, אך בעשרים השנים האחרונות כמעט ונעלם מחופים אלו[3]. הסבר אפשרי להיעלמות של קיפוד-הים קיפוד סגול מצוי, היא ההתחממות המהירה של דרום-מזרח הים התיכון[4,5]. בשלושת העשורים האחרונים, נמדדה עלייה של כ-3 מעלות צלזיוס בטמפרטורת המים בחופי ישראל[5] וניסויים בתנאים מבוקרים הראו שעלייה בטמפרטורה גורמת לתמותה של קיפוד-הים[3]. סיבה אפשרית נוספת להידללות אוכלוסיית הקיפודים היא תחרות עם מינים אחרים של אוכלי עשב, שפלשו מים סוף בשל פתיחת תעלת סואץ[6]. בפרט, דגי סיכן צמחוניים שפלשו מים סוף, התרבו מאוד בחופים המזרחיים של הים התיכון, שם נמצאה קורלציה גבוהה בין צפיפות גבוהה של דגי סיכן, מיעוט בכיסוי האצות ומיעוט במספר קיפודי-הים בחופים המזרחיים של הים התיכון[6]. מינים פולשים של קיפודי-ים שהגיעו לים התיכון, כמו הניזרית ארוכת הקוצים (*Diadema setosum*), יכולים להוות תחרות נוספת למינים המקומיים[7,8]. מכאן, שייתכן שהעלייה המהירה בטמפרטורת המים בחופי ישראל ותחרות עם מיני אוכלי עשב אחרים שפלשו לחופיו המזרחיים של הים התיכון, תרמה להיעלמות קיפוד סגול מצוי מחופי ארצנו.



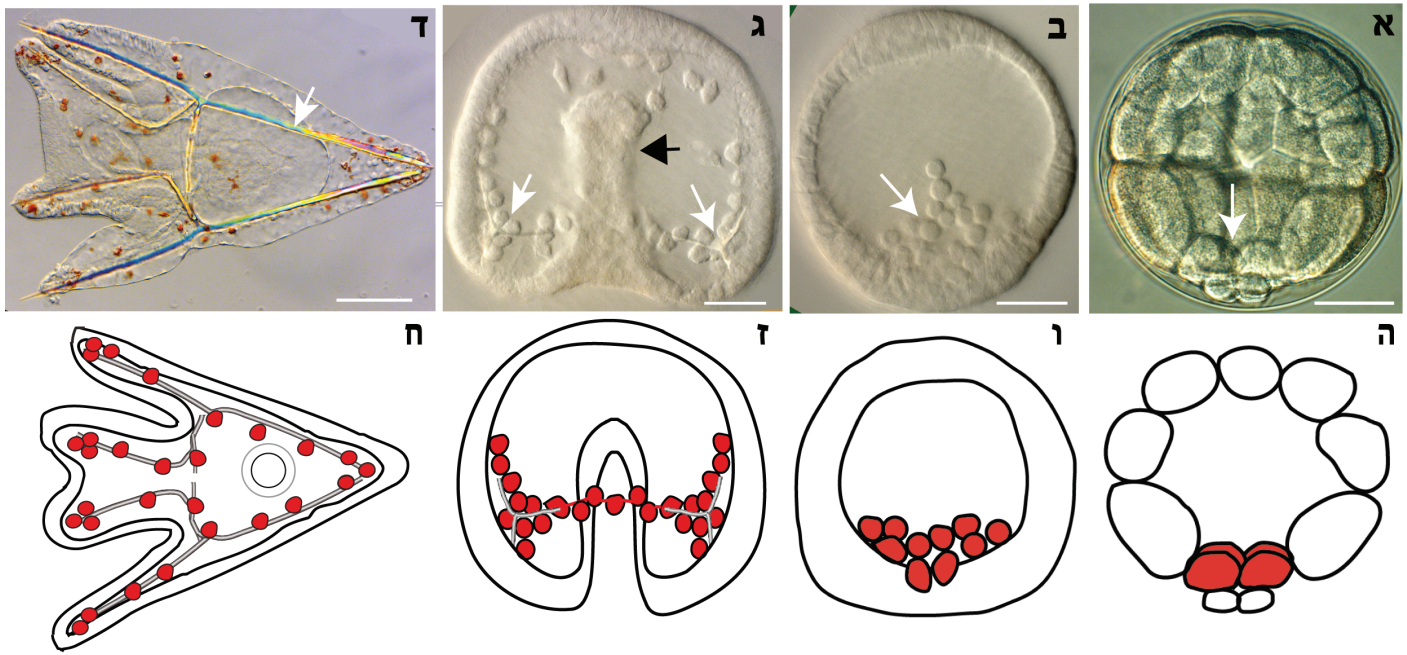
איור 2. קיפוד סגול מצוי, קיפוד-הים הים תיכוני. א. קיפוד סגול מצוי בוגר.צילום: צביה גילדור. ב. שלד של קיפוד סגול מצוי. ג. מבנה הלסתות (פנס אריסטו) של קיפוד סגול מצוי. קנה-מידה: 1 ס"מ.

ההתפתחות העוברית של קיפוד סגול מצוי

קיפוד-הים שימש במשך יותר ממאה שנים כחיית מודל לחקר ההתפתחות העוברית והאבולוציה של מינים חדשים[9]. לקיפוד-הים יתרונות רבים לחקר הבקרה העוברית. ראשית, ניתן לגרום לשחרור יזום של תאי מין בעזרת הזרקת מלחים לקיפודי-ים בוגרים. באיור 3א' ניתן לראות שני פרטים בוגרים במהלך שחרור תאי המין (ביציות כתומות והזרע לבן). בידול בין זכרים לנקבות אפשרי רק לאחר שחרור תאי המין. נקבת קיפוד-הים משחררת עשרות אלפי ביציות בכל השרצה, אותן אפשר לאסוף לתוך מיכלי זכוכית קטנים (איור 3ב'). את הביציות ניתן להפרות במעבדה ולעקוב אחרי ההתפתחות העוברית מתחת למיקרוסקופ (איור 4ג'). העוברים שקופים ומתפתחים בצורה אופיינית, מהירה וקבועה, דבר המאפשר לחקור תהליכים התפתחותיים בקצב מהיר (איור 4א-ד'). יתרון נוסף הוא הקירבה האבולוציונית היחסית של קווצי העור לבעלי החוליות מצד אחד (איור 1), למרות השוני הגדול במבני הגוף בין שתי קבוצות אלו מצד שני. הקירבה האבולוציונית והשוני במבנה הגוף מאפשרים למחקרים השוואתיים לזהות שינויים גנטיים העומדים מאחורי חידושים אבולוציוניים משמעותיים במבנה הגוף[10,11].

איור 3. א. קיפוד סגול מצוי כמודל לחקר התפתחות עוברית. ב. שחרור יזום של ביציות ותאי זרע מקיפודי-ים סגולים אחרי הזרקת מלחים לפרטים הבוגרים. הביציות כתומות והזרע לבן, וכך אפשר להבדיל בין הנקבה לזכר. איסוף ביציות קיפוד סגול מצוי בכוסות מלאות מי ים במעבדה. ג. מיקרו-הזרקה של חומרים גנטיים לביציות של קיפוד סגול מצוי. צילום: א', וג', מירי מורגוליס, ב' צביה גילדור.

העוברים של קיפוד סגול מצוי מתפתחים בקצב מהיר ותוך יומיים הם הופכים ללרווה (פגית) שוחה וניזונה. החלוקות הרביעית והחמישית מתרחשות כארבע שעות לאחר ההפריה ואינן סימטריות מבחינת גודל תאי הבת (איור 4א'). החלק העליון של העובר (איור 4א') מתמיין לשכבת הנבט אקטודרם שממנה מתפתחת שכבת התאים החיצונית של העובר, זו שבאה במגע עם המים, כמו גם תאי העצב של הלרווה. התאים בצד התחתון של העובר מתמיינים לשכבת הנבט אנדודרם שמתפתחת למעיים (חץ שחור באיור 4ג'), ולמזודרם שתורמת ליצירת השרירים, תאי חיסון והשלד (חיצים לבנים באיור 4ג' ו-ד'). באיור 4ב' ניתן לראות עובר בשלב הבלסטולה שבו תאי השלד נכנסים לתוך החלל הפנימי של העובר (חץ). איור 4ג' מראה את שלב הגסטרולה שבו נוצרים המעיים והשלד. יומיים לאחר ההפריה, הלרווה מכילה שלד מפותח, מעיים בעלי שלושה חלקים, נוירונים, תאי חיסון ותאי עצב ומאפשרת התחקות אחרי הבקרה הביולוגית של תהליכי ההתמיינות של סוגי תאים אלו.



איור 4. התפתחות קיפוד סגול מצוי ושלדו. א. שלב 64 תאים (כ-4 שעות אחרי הפריה). ב. שלב הבלסטולה המזנכימלית (כ-14 שעות אחרי ההפריה). ג. שלב הגסטרולציה (כ-25 שעות אחרי הפריה), ד. שלב הפלוטאי (כ-48 שעות אחרי ההפריה). הזמנים מתייחסים לטמפרטורת גידול של 18 מעלות צלזיוס. החיצים הלבנים מצביעים על תאי השלד (א' וב') ועל שלד הקצליט (ג' וד'). החץ השחור בג' מצביע למעיים. קנה-מידה 20 מיקרון ב א-ג', 50 מיקרון ב- ד. ה-ח. איור של שלבי ההתפתחות העוברית המראה את תאי השלד בשלבים השונים (באדום). האיורים מתאימים לשעות הנראות ב א-ד. ה-ח מבוססים על איור מהמאמר[12].

הבקרה הגנטית של התפתחות עובר קיפוד-הים והשפעת שינויים סביבתיים

בעשרות השנים האחרונות, גבר השימוש בעוברים של קיפודי-ים כחיית מודל לחקר הבקרה הגנטית של תהליכים התפתחותיים, מאחר שבנוסף ליתרונות הניסויים של קיפוד-הים כמודל התפתחותי, יש לו גם יתרונות למחקר מולקולרי. העוברים מתפתחים במי ים, וקל להוסיף לתרבית מעכבים כימיים של פעילות חלבונים ולעקוב אחרי השפעת המעכבים על התפתחות העובר ועל ביטוי גנים[13]. ניתן גם להזריק לביצית קיפוד-הים מולקולות מהונדסות המעכבות ישירות את הפעילות של גן ספיציפי וכך ללמוד על תפקיד הגן בהתפתחות (איור 3ג')[13]. דוגמה למולקולות כאלו הן תעתיקים קצרים מהגדיל המשלים בדנ"א, בכיוון 3' ל-5' (אנטי-סנס, Antisense), הנקשרים לרנ"א שליח (Messenger RNA – mRNA) של אותו הגן ומונעים ממנו לעבור תרגום או חיתוך[13]. ניסויים כאלו נערכו במעבדות שונות ובמינים שונים, והביאו לכך שמודלים של רשתות גנטיות המבקרות התמיינות תאים בעובר קיפוד-הים, הם מהמפורטים ביותר שקיימים[9]. השוואה בין הרשתות הגנטיות המבקרות את ההתפתחות העוברית של מחלקות שונות של קווצי עור, עזרה להבנת השינויים הגנטיים העומדים מאחורי הופעת סוגי תאים וצורות גוף חדשות[14]. השוואות כאלו הראו שימור גדול בין מעגלי הבקרה הגנטית המבקרים התמיינות של סוגי תאים דומים, גם בין יצורים הרחוקים זה מזה אבולוציונית[14].

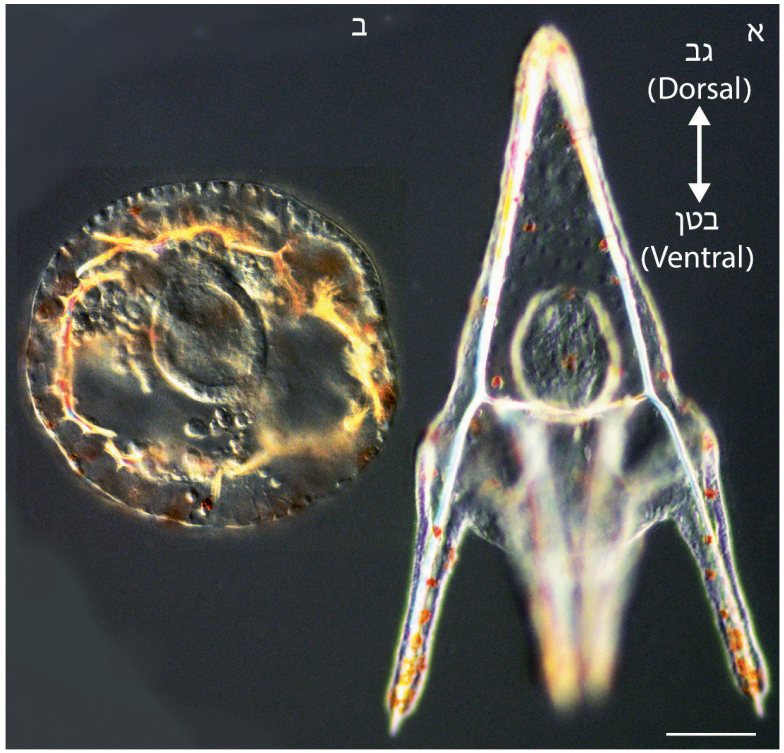
ההבנה העמוקה של רשתות הבקרה הגנטיות המבקרות את התפתחות עובר קיפוד-הים מאפשרת להשתמש בו כמודל למדידת השפעות שינויים סביבתיים על עוברים של אורגניזמים ימיים[15]. בניסויים מבוקרים במעבדה ולעיתים גם בים, מדענים בדקו את השפעתם של שינויים סביבתיים, כמו עלייה בטמפרטורה[16] או עלייה בחומציות[17-19], על התפתחות עוברי קיפוד-הים. ניסויים אלו מלמדים על המנגנונים המולקולריים המאפשרים לעובר קיפוד-הים להסתגל לשינויים הסביבתיים, ומגלים את תחומי השינוי שבהם העובר ישרוד. ניסויים שנעשו בעובר קיפוד-הים הים תיכוני הראו כי לעובר זה עמידות רבה להחמצת המים, כשערכים עד ל-pH של 7.25, אינם פוגעים בהפריה, אם כי הם מעכבים מעט את קצב ההתפתחות[20]. מחקרים אחרים בדקו את ההשפעה של חומרים שונים שהריכוז הסביבתי שלהם עלה בשל פעילות אנושית, על התפתחות עובר קיפוד-הים והבקרה הגנטית שלה, לדוגמה, מיקרופלסטיק[15,21]. מחקרים אלו הראו כי חשיפה למיקרופלסטיק משפיעה על כמה מנגנונים מולקולריים מרכזיים המבקרים את ההתפתחות העוברית של קיפוד-הים וגורמים לפגיעה חמורה בעובר[15]. המנגנונים המולקולריים האלו שמורים בכל בעלי החיים, לכן אפשר להסיק כי השיבוש שלהם בשל חשיפה למיקרופלסטיק עתיד לגרום לנזק כבד בהתפתחות העוברית של מיני בעלי חיים ימיים אחרים.

השפעת היפוקסיה על עובר קיפוד-הים והשלכות הירידה בריכוז החמצן בים על התפתחות בעלי חיים ימיים

במהלך 50 השנים האחרונות, נמדדה ירידה של כ-2% בריכוז החמצן באוקיינוסים, ככל הנראה, בשל ההתחממות הגלובלית והשפעת האדם על הסביבה הימית[22]. עלייה בטמפרטורת המים גורמת לירידה במסיסות החמצן ומכאן, לירידת בריכוז החמצן, עד כדי רמות הנחשבות פתולוגיות לתאי הגוף – היפוקסיה[22]. במקביל, התחממות המים גורמת לעלייה במטבוליזם ובצריכת החמצן של בעלי החיים הימיים, כלומר, לבעלי החיים יש פחות חמצן, כשהם זקוקים ליותר ממנו! מחקרים מראים כי הירידה בריכוז החמצן בשילוב העלייה בטמפרטורה, מסוכנת לבעלי חיים יותר מההתחממות כשלעצמה, וגורמת לתמותה מסיבית באזורים החווים היפוקסיה לאורך זמן[23]. מיעוט החמצן עלול לפגוע יותר בעוברים של בעלי חיים המשתמשים בריכוזים משתנים של חמצן כדי לכוון תהליכים התפתחותיים, כמו עוברים של בעלי חוליות וקיפודי-ים[24,25].

תוצאה מעודדת בהקשר זה נתקבלה ממחקר שנעשה בישראל, בקיפוד סגול מצוי, המראה כי רשת הבקרה הגנטית של עובר קיפוד-הים מאפשרת לו להתגבר על מצב זמני של ירידה בריכוז החמצן, אם הוא קורה אחרי 10 השעות הראשונות להתפתחות[26]. כדי לבחון את תגובת עוברי הקיפוד הסגול לירידת ריכוז החמצן במים, הושוותה התפתחותם בתנאים של היפוקסיה (0.5 מיליגרם חמצן לליטר) להתפתחותם בריכוז חמצן נורמלי (6.5-8 מיליגרם לליטר)[26]. העוברים גודלו בהיפוקסיה למשך 16 שעות משלב ההפריה עד שלב הבלסטולה המזינכמלית (היפוקסיה מוקדמת), או מ-10 שעות אחרי ההפריה ועד לשלב הגסטרולה (היפוקסיה מאוחרת).

תוצאות המחקר הראו כי הרגישות להיפוקסיה משתנה בצורה משמעותית בין השלבים המוקדמים לשלבים המאוחרים יותר של התפתחות קיפוד-הים. היפוקסיה מוקדמת גורמת לפגיעה קשה ביצירת ציר הסימטריה הגבי-בטני (Dorsal-Ventral) של העובר כך שבמקום שני מוטות שלד נפרדים וארוכים, נוצרים הרבה שלדים קטנים שלא מתארכים, מה שנראה כמו שלד עגול (איור 5). לעומת זאת, היפוקסיה מאוחרת אומנם גורמת להאטה בקצב ההתפתחות העוברית אבל אינה משפיעה כמעט על המורפולוגיה שלו. ההסבר לרגישות להיפוקסיה מוקדמת ולעמידות להיפוקסיה מאוחרת הוא מבנה רשת הבקרה הגנטית להתפתחות עוברית. היפוקסיה מוקדמת פוגעת בשלושה מסלולי איתות גנטיים החיוניים ליצירת ציר הסימטריה גבי-בטני. לאחר יצירת צירי הסימטריה, שקורית עד 10 שעות אחרי ההפריה, רשת הבקרה הגנטית יציבה ואינה רגישה לריכוז החמצן במים. מסלולי האיתות המגיבים להיפוקסיה במהלך התפתחות קיפוד-הים שמורים אבולוציונית ויחסי הגומלין ביניהם דומים ליחסי הגומלין המתקיימים בבעלי חוליות במצבי היפוקסיה. מכאן, שמשך הזמן שבו נמצאים העוברים בהיפוקסיה והשלב ההתפתחותי שבו הם נמצאים, משפיעים מאוד על היכולת של בעלי חיים ימיים לעמוד במיעוט החמצן באוקיינוסים ובבתי גידול חופיים.



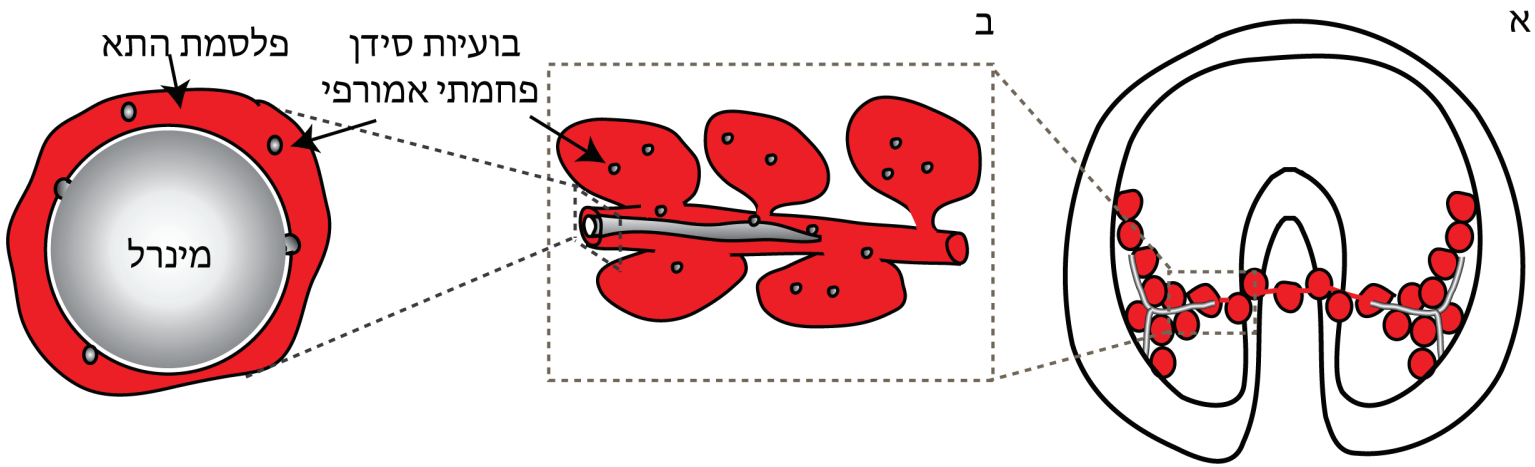
איור 5. השפעת חוסר חמצן על התפתחות עובר קיפוד-הים. עוברי קיפוד סגול מצוי, שלושה ימים לאחר ההפריה. א. עובר שגדל בתנאי חמצן נורמליים בעל סימטריה ומבנה שלד נורמליים. ב. עובר שגדל בתנאי היפוקסיה (0.5 מיליגרם לליטר) איבד את ציר הסימטריה הגבי-בטני שלו, ובעל שלד עגול. קנה-מידה, 50 מיקרומטר. צילום: מאג'ד ליוס.

יצירת השלד של עובר קיפוד-הים והבקרה הביולוגית של ביומינרליזציה

אחד התחומים שבהם מחקר בקיפוד-הים תרם במיוחד, הוא חקר הביומינרליזציה, התהליך שבו יצורים חיים משתמשים במינרלים כדי לבנות את השלד, השיניים, או הקונכיות שלהם[12]. זהו תהליך נפוץ בכל קבוצות החיים, כולל חיידקים, פטריות, צמחים ובעלי חיים, שמשתמשים בכ-60 מינרלים שונים ומעצבים אותם בצורות שונות[27]. למרות התפוצה הרחבה של תהליך הביומינרליזציה, מקובל לחשוב כי התהליך התפתח בכל מערכה באופן בלתי תלוי, על-ידי שינוי של תוכנית התפתחותית קדומה יותר[11,28]. היכולת של התאים לשלוט בתכונות המינרל כמו התגבשות, מבנה, קשיות, וגמישות, גבוהה הרבה מכל הטכניקות המלאכותיות שבהן משתמשים בני האדם. לכן הבנת התהליך חשובה לכימאים ומהנדסי חומרים שמעוניינים בפיתוח חומרים חדשים. גם גיאולוגים מתעניינים במבנה הביומינרלים המאובנים, שממנו הם יכולים ללמוד על תכונות הים בעבר. כלומר, הבנת הבקרה הביולוגית של תהליך הביומינרליזציה מקדמת

את הבנת ההתפתחות של שלדים ושיניים והאבולוציה שלהם, תורמת להבנת ההיסטוריה של החיים והגיאולוגיה של הים, ופותחת דלת לפיתוח ויצירה של חומרים חדשים.

מחקרים שנעשים בקיפודי-ים, ובפרט בקיפוד-הים הסגול במשך יותר מארבעה עשורים, תרמו משמעותית להבנת הבקרה הביולוגית והכימיה של ביומינרלים[29-34]. מחקרים, שנעשו בישראל הראו כי התאים מרכזים את המינרל, סידן פחמתי (קלציום קרבונט), לריכוזים גבוהים במיוחד בתוך בועיות (וזיקולות) שבהן המינרל שומר על הפאזה האמורפית שלו ולא מתגבש (איור 6)[35,36]. התאים משקיעים את המינרל האמורפי לתוך חלל פנימי בצורת צינור שנוצר בין התאים ובתוכו המינרל מתגבש לקלציט (איור 6ב')[33,35,36]. היכולת לרכז את המינרל לריכוזים גבוהים של עד 15 מולר בפאזה אמורפית, מבלי שיתגבש[32], חיונית ליכולת של התאים לשלוט בצורת השלד הנוצר. בתנאים מלאכותיים, מינרל בריכוזים כאלו היה מתגבש מיד, דבר שלא היה מאפשר לתאים לעצב את מוטות השלד של עובר קיפוד-הים בצורה שבה הם מעוצבים (איור 6א')[37]. היכולת של התאים לשמור על המינרל בפאזה אמורפית בריכוזים כה גבוהים נובעת מנוכחותם של חלבונים מיוחדים שתאי השלד של קיפוד-הים מבטאים, המונעים מהמינרל להתגבש[37]. עקרון הבקרה הביולוגית על הפאזה והצורה של המינרל דומה בקבוצות אחרות, מבעלי חוליות ועד לחלק מהצורבים דוגמת אלמוגים, המייצרים חלבונים אחרים, בעלי תכונות דומות, למניעת התגבשות המינרל בטרם עת[28,38].

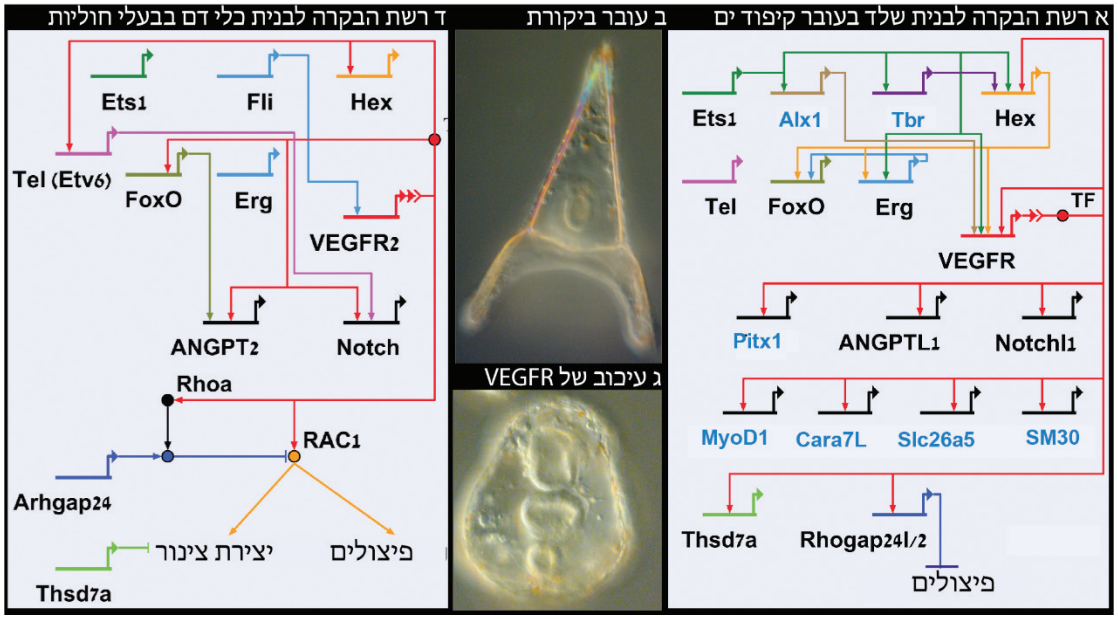


איור 6 השקעת השלד ובניית מחטי שלד (הספיקול) בעובר קיפוד-הים. א. עובר קיפוד-ים, בשלב הגסטרולציה (25 שעות אחרי ההפריה בקיפוד-הים הסגול), שבו נוצרים שני הספיקולים שמהווים את השלד. תאי השלד מסומנים באדום והם מחוברים זה לזה בכבל שהם יוצרים ובתוכו מתפתח הספיקול. ב. הגדלה של אזור הספיקול המסומן בא' המראה את צמיחה הספיקול בתוך הכבל העובר בין תאי השלד. הספיקול גדל על-ידי השקעת בועיות המלאות בסידן פחמתי אמורפי, לתוך החלל הפנימי שנוצר בתוך הכבל. בתוך החלל הפנימי המינרל מתגבש לקלציט. האיור מבוסס על איור מהמאמר[12].

רשת הבקרה הגנטית של יצירת השלד בקיפוד-הים והדמיון לרשת שבונה כלי דם באדם

המודל של רשת הבקרה הגנטית המבקרת את יצירת השלד בעובר קיפוד-הים מבוסס על ניסויים רבים, והוא אחד מהמודלים המפורטים ביותר לתהליכים התפתחותיים (איור 7א')[10,39]. משתתפים בו פקטורי שעתוק ומולקולות איתות שיחסי הגומלין ביניהם מובילים להתמיינות תאי השלד ולהפעלת חלבונים חשובים ליצירת השלד. שבעת הגנים המופיעים בחלק העליון של איור 7א', מקודדים פקטורי שעתוק המתבטאים בתאי השלד ומבקרים את ביטוי יתר הגנים ברשת ואף יוצרים מעגלי היזון חוזר חיובי (פידבק חיובי) ביניהם לבין עצמם (Ets1, Alx1, Tbr, Hex, Tel, FoxO ו-Erg). פקטורי שעתוק אלו מפעילים את הביטוי של הקולטן של מערכת האיתות Vascular Endothelial Growth Factor (VEGF), שנקרא VEGFR. להפעלת VEGFR בתאי השלד חשיבות רבה להפעלת גנים חיוניים לבניית השלד, המופיעים בחלק התחתון של איור 7א'. אם הביטוי של VEGFR מופרע, אם על-ידי מעכב או על-ידי הפרעה גנטית, השלד לא נוצר כלל (איור 7ב', ג')[10,40]. אם מערכת האיתות VEGF מופעלת בעודף, נוצרים פיצולים יתרים של השלד, ככל הנראה בשל הפרעה לביטוי של גנים המבקרים את השלד התוך תאי, כמו Rhogap24l/2[10]. מודל רשת הבקרה הגנטית מתאר את התוכנית הגנטית המקודדת בגנום להפעלה של גנים חיוניים בתאי השלד המבקרים את בניית השלד ועיצוב מוטות הקלציט של עובר קיפוד-הים.

עבודה שנעשתה בישראל על עובר קיפוד סגול מצוי הראתה כי רבים מפקטורי השעתוק ומערכות האיתות המבקרים את התמיינות תאי השלד בעובר קיפוד-הים, הם חלק מהרשת המבקרת את התמיינות תאי האנדותל בבעלי חוליות, האחראים על יצירת כלי דם (איור 7ד')[10]. תאי האנדותל יוצרים את כלי הדם במהלך ההתפתחות העוברית כמו גם במהלך מצבים פתולוגיים בבוגר, כגון חוסר חמצן וסרטן[10]. רמת חמצן נמוכה ברקמה גורמת לביטוי מולקולת האיתות VEGF שמופרשת מהתאים ועוברת בדיפוזיה לכלי דם סמוכים. תאי האנדותל בכלי הדם מבטאים את הקולטן VEGFR, שהפעלתו על-ידי VEGF משרה צמיחה של כלי דם חדש לעבר הרקמה שסובלת מחוסר חמצן ומצילה אותה מנמק[41]. גידולים סרטניים מנצלים את המערכת הזאת כדי לגדול ולהתפשט. גידול סרטני לא יכול לגדול מעבר למילימטר אחד בלי אספקת חמצן, וחוסר החמצן גורם להפרשת VEGF מהגידול. קליטת VEGF בכלי דם סמוכים משרה יצירת כלי דם חדשים בכיוון הגידול שמספקים לו חמצן וחומרי מזון, המאפשרים לו לגדול ולהתפשט לרקמות אחרות[41]. כדי לעצור יצירת כלי דם על-ידי גידולים סרטניים ולמנוע את הגדילה וההתפשטות שלהם, פותחו תרופות רבות המעכבות את פעילות מערכת האיתות VEGF[41]. לתרופות אלו הייתה הצלחה חלקית בלבד, בעיקר בשל המורכבות הרבה של רשת הבקרה הגנטית ומעגלי ההיזון המורכבים שבה (איור 7ד').



איור 7. רשת הבקרה הגנטית לבניית השלד בקיפוד-ים והדמיון הרב לרשת הבקרה הגנטית לבניית כלי דם בבעלי חוליות. א. תרשים של רשת הבקרה המבקרת את התמיינות תאי השלד ואת בניית השלד. ב. עובר ביקורת בן יומיים שבו השלד נורמלי. ג. עובר בן יומיים חסר שלד לחלוטין בשל עיכוב VEGFR. ד. תרשים של רשת הבקרה המבקרת את התמיינות האנדותל ביונקים ואת יצירת כלי הדם על-ידי תאי האנדותל. כל צומת המסומן על-ידי קו אופקי מתאר גן, ששמו רשום באנגלית מתחת לקו. חץ היוצא מהצומת מסמל את החלבון שאותו הגן מקודד. חץ שיוצא מצומת ונכנס לצומת אחר, משמעותו שהגן המיוצג ע"י אותו הצומת מקודד לפקטור שעתוק המבקר את הביטוי של הגן המיוצג על-ידי הצומת האחר. חץ המסתיים בראש חץ, מבקר הפעלה של גן אחר, וחץ המסתיים בקו מאוזן מדכא ביטוי גן אחר. גנים ששמם בצבע שחור משותפים לשתי הרשתות. גנים ששמם בצבע כחול ייחודיים לתאי השלד של קיפוד-הים. עיגולים מסמנים אינטראקציות בין חלבונים. צבעי הצמתים המקודדים אותם גנים בבעלי חוליות ובקיפודי-ים מסומנים באותו צבע. שתי הרשתות שולטות ביצירת הצינור שבו נבנה השלד (בקיפוד-הים) או זורם הדם (בבעלי חוליות), ובפיצולים של הצינור הזה.

מערכת האיתות VEGF ורבים מפקטורי השעתוק שנמצאים בתאי האנדותל בבעלי חוליות (איור 7ד'), מתבטאים בתאי השלד ומבקרים את התפתחות השלד בקיפוד-הים ובקווצי עור אחרים (איור 7א')[10,42]. המשותף בין שלד קיפוד-הים וכלי הדם של בעלי החוליות הוא שלשני האיברים האלו מבנה צינורי (איור 6ב' וג'). חוקרים סבורים כי ייתכן שרשתות הבקרה של שני איברים שונים אלו התפתחו במהלך האבולוציה מרשת קדומה לבניית צינורות[11,40]. השימור הגדול בין חלבוני בני האדם לחלבוני קיפוד-הים מאפשר לחוקרים להשתמש במעכבים של VEGFR האנושי, כדי לעכב את ה-VEGFR הקיפודי (איור 7ג')[10]. כמו כן, ניתן להציל עובר קיפוד-ים שבו נפגע הביטוי של VEGF, על-ידי הזרקת חלבון VEGF אנושי[10]. הדמיון הגדול בין החלבונים האנושיים לחלבונים של קיפוד-הים ובין תהליך יצירת השלד לתהליך יצירת כלי דם, הופכים את עובר קיפוד-הים למערכת מבטיחה לגילוי תרופות חדשות שימנעו התפתחות כלי דם ויעצרו את מחלת הסרטן.

סיכום וכיוונים לעתיד

קיפוד סגול מצוי הולך ומתמעט בחופי ישראל, אך חשיבותו ותרומתו למחקר אקולוגי, אבולוציוני, התפתחותי ומולקולרי רק עולה. אחד המחסומים העיקריים שהיו עד כה למחקר בקיפודי-ים הוא יצירת קווים מהונדסים גנטית, אך לאחרונה אפילו מחסום זה נשבר בזכות שימוש בכלים חדשים של עריכה גנומית[43]. התאמת כלים אלו לעבודה עם קיפוד סגול מצוי יכולה לתרום מאוד לחיזוק היכולות של חוקרים לבצע מחקרים פורצי דרך על התפתחות עוברית, אבולוציה, ביומינרליזציה ויצירת צינורות ביולוגיים.

תודות

מחקרים רבים מאלו שהתמקדנו בהם במאמר בוצעו בישראל בזכות חוות הגידול לקיפודי-ים הנמצאת במכון לחקר הימים והאגמים באילת[10,26,33,35,36,40], וזה המקום להודות למוקי שפיגל ודוד בן עזרא שבזכותם המחקר הזה אפשרי. אני מודה מאוד לד"ר צביה גילדור ולמאג'ד ליוס על ההערות המצוינות שלהם לגבי הפרק ולשופט של הפרק על ההערות המעמיקות והדיוק.

רשימת מקורות

1. Formery, L. et al. Developmental atlas of the indirect-developing sea urchin Paracentrotus lividus: From fertilization to juvenile stages. Front Cell Dev Biol **10**, 966408 (2022). https://doi.org:10.3389/fcell.2022.966408
2. Boudouresque, C. F. & Verlaque ,M. Ecology of Paracentrotus lividus. **37** 243-285 (Developments in Aquaculture and Fisheries Science, 2007).
3. Yeruham, E., Rilov, G., Shpigel, M. & Abelson, A. Collapse of the echinoid Paracentrotus lividus populations in the Eastern Mediterranean--result of climate change? Scientific reports **5**, 13479 (2015). https://doi.org:10.1038/srep13479
4. Reale, M. et al. Acidification, deoxygenation, and nutrient and biomass declines in a warming Mediterranean Sea. Biogeosciences **19**, 4035–4065 (2022). https//:doi.org:https://doi.org/10.5194/bg-19-4035-2022
5. Gertman, I., Goldman, R., Ozer, T. & Zodiatis, G. Interannual changes in the thermohaline structure of the South Eastern Mediterranean. in 40th CIESM Congr.(2013) .
6. Nikolaou, A., Tsirintanis, K., Rilov ,G. & Katsanevakis, S. Invasive fish and sea urchins drive the status of canopy forming macroalgae in the Eastern Mediterranean. Biology (Basel) **12** (2023). https://doi.org:10.3390/biology12060763
7. Zirler, R. et al. Mass mortality of the invasive alien echinoid Diadema setosum (Echinoidea: Diadematidae) in the Mediterranean Sea. R Soc Open Sci **10**, 230251 (2023). https://doi.org:10.1098/rsos.230251

8. Zirler, R. et al. Gaining a (tube) foothold – trends and status following two decades of the long-spined echinoid Diadema setosum (Leske, 1778) invasion to the Mediterranean Sea. Frontiers in Marine Sciences **10** (2023). https://doi.org:https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1152584
9. De-Leon, S. B. T. & Davidson, E. H. Gene regulation: Gene control network in development. Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct **36**, 191-212 (2007). https://doi.org:DOI 10.1146/annurev.biophys.35.040405.102002
10. Morgulis, M. et al. Possible cooption of a VEGF-driven tubulogenesis program for biomineralization in echinoderms. Proc Natl Acad Sci U S A **116**, 12353-12362 (2019). https://doi.org:10.1073/pnas.1902126116
11. Ben-Tabou de-Leon, S. The Evolution of Biomineralization through the Co-Option of Organic Scaffold Forming Networks. Cells **11** (2022). https://doi.org:10.3390/cells11040595
12. Gildor, T., Winter, M. R., Layous, M., Hijaze, E. & Ben-Tabou de-Leon, S. The biological regulation of sea urchin larval skeletogenesis - From genes to biomineralized tissue. J Struct Biol **213**, 107797 (2021). https://doi.org:10.1016/j.jsb.2021.107797
13. Hijaze, E. et al. Actomyosin remodeling regulates biomineral formation, growth and morphology during eukaryote skeletogenesis. eLife **12:**RP89080 (2023). https://doi.org:https://doi.org/10.7554/eLife.89080.1
14. Cary, G. A. et al. Systematic comparison of sea urchin and sea star developmental gene regulatory networks explains how novelty is incorporated in early development. Nat Commun **11**, 6235 (2020). https://doi.org:10.1038/s41467-020-20023-4
15. Paganos, P. et al. Plastic leachate-induced toxicity during sea urchin embryonic development: Insights into the molecular pathways affected by PVC. Sci Total Environ **864**, 160901 (2023). https://doi.org:10.1016/j.scitotenv.2022.160901
16. 16 Runcie, D. E. et al. Genetics of gene expression responses to temperature stress in a sea urchin gene network. Mol Ecol **21**, 4547-4562 (2012). https://doi.org:10.1111/j.1365-294X.2012.05717.x
17. Foo, S. A. et al. Responses of sea urchin larvae to field and laboratory acidification. Sci Total Environ **723**, 138003 (2020) https://doi.org:10.1016/j.scitotenv.2020.138003
18. Pan, T. C., Applebaum, S. L. & Manahan, D. T. Experimental ocean acidification alters the allocation of metabolic energy. Proc Natl Acad Sci U S A **112**, 4696-4701 (2015). https://doi.org:10.1073/pnas1416967112.
19. Todgham, A. E. & Hofmann, G. E. Transcriptomic response of sea urchin larvae Strongylocentrotus purpuratus to CO_2-driven seawater acidification. J Exp Biol **212**, 2579-2594 (2009). https://doi.org:10.1242/jeb.032540

20. Martin, S. et al. Early development and molecular plasticity in the Mediterranean sea urchin Paracentrotus lividus exposed to CO2-driven acidification. J Exp Biol **214**, 1357-1368 (2011). https://doi.org:10.1242/jeb.051169
21. Rist, S. et al. Toxicity of tire particle leachates on early life stages of keystone sea urchin species. Environ Pollut **336**, 122453 (2023). https://doi.org:10.1016/j.envpol.2023.122453
22. Schmidtko, S., Stramma, L. & Visbeck, M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. Nature **542**, 335-339 (2017)/https://doi.org:10.1038/nature21399
23. Vaquer-Sunyer, R. & Duarte, C. M. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. Proc Natl Acad Sci U S A **105**, 15452-15457 (2008). https://doi.org:10.1073/pnas.0803833105
24. Dunwoodie, S. L. The role of hypoxia in development of the Mammalian embryo. Dev Cell **17**, 755-773 (2009). https://doi.org:10.1016/j.devcel.2009.11.008
25. Chang, W. L. et al. Asymmetric distribution of hypoxia-inducible factor alpha regulates dorsoventral axis in the early sea urchin embryo. Development **144**, 2940-2950 (2017). https://doi.org:10.1242/dev.145052
26. Layous, M., Khalaily, L., Gildor, T. & Ben-Tabou de-Leon, S. The tolerance to hypoxia is defined by a time-sensitive response of the gene regulatory network in sea urchin embryos. Development **148** (2021). https://doi.org:10.1242/dev.195859
27. Weiner, S. & Addadi, I. Crystallization Pathways in Biomineralization. Annu. Rev. Mater. Res. **41**, 21-40.(2011)
28. Gilbert, P. et al. Biomineralization: Integrating mechanism and evolutionary history. Sci Adv **8**, eabl9653 (2022). https://doi.org:10.1126/sciadv.abl9653
29. Decker, G. L., Morrill, J. B. & Lennarz, W. J. Characterization of sea urchin primary mesenchyme cells and spicules during biomineralization in vitro. Development **10**, 297-312 (1987) https://doi.org:10.1242/dev.101.2.297
30. Benson, S. C., Benson, N. C. & Wilt, F. The organic matrix of the skeletal spicule of sea urchin embryos. J Cell Biol **102**, 1878-1886 (1986). https://doi.org:10.1083/jcb.102.5.1878
31. Weiner, S. Organic matrixlike macromolecules associated with the mineral phase of sea urchin skeletal plates and teeth. J Exp Zool **234**, 7-15 (1985). https://doi.org:10.1002/jez.1402340103
32. Kahil, K. et al. Cellular pathways of calcium transport and concentration toward mineral formation in sea urchin larvae. Proc Natl Acad Sci U S A **117**, 30957-30965 (2020). https://doi.org:10.1073/pnas.1918195117
33. Politi, Y., Arad, T., Klein, E., Weiner, S. & Addadi, L. Sea urchin spine calcite forms via a transient amorphous calcium carbonate phase. Science **306**, 1161-1164 (2004). https://doi.org:10.1126/science.1102289

34. Berman, A. et al. Biological control of crystal texture: a widespread strategy for adapting crystal properties to function. Science **259**, 776-779 (1993). https//:doi.org:10.1126/science.259.5096.776
35. Vidavsky, N. et al. Initial stages of calcium uptake and mineral deposition in sea urchin embryos. Proc Natl Acad Sci U S A **111**, 39-44 (2014). https://doi.org:10.1073/pnas.1312833110
36. Politi, Y. et al. Transformation mechanism of amorphous calcium carbonate into calcite in the sea urchin larval spicule. Proc Natl Acad Sci U S A **105**, 17362-17366 (2008). https://doi.org:10.1073/pnas.0806604105
37. Gong, Y. U. et al. Phase transitions in biogenic amorphous calcium carbonate. Proc Natl Acad Sci U S A **109**, 6088-6093 (2012). https://doi.org:10.1073/pnas.1118085109
38. Evans, J. S. The Biomineralization Proteome: Protein Complexity for a Complex Bioceramic Assembly Process. Proteomics **19**, e1900036 (2019). https://doi.org/10.1002:pmic.201900036
39. Oliveri, P., Tu, Q. & Davidson, E. H. Global regulatory logic for specification of an embryonic cell lineage. Proc Natl Acad Sci U S A **105**, 5955-5962 (2008). https://doi.org:10.1073/pnas.0711220105
40. Tarsis, K., Gildor, T., Morgulis, M. & Ben-Tabou de-Leon, S. Distinct regulatory states control the elongation of individual skeletal rods in the sea urchin embryo. Dev Dyn (2022). https://doi.org:10.1002/dvdy.474
41. Shibuya, M. Vascular Endothelial Growth Factor (VEGF) and Its Receptor (VEGFR) Signaling in Angiogenesis: A Crucial Target for Anti- and Pro-Angiogenic Therapies. Genes Cancer **2**, 1097-1105 (2011). https://doi.org:10.1177/1947601911423031

26 שוניות החוף הסלעי של דרום-מזרח הים התיכון - עבר, הווה ועתיד בעידן של שינויים גלובליים מואצים

גיל רילוב[2,1]

[1] המכון הלאומי לאוקינוגרפיה, חקר ימים ואגמים לישראל
[2] החוג לביולוגיה ימית, בית ספר למדעי הים, אוניברסיטת חיפה

rilovg@ocean.org.il

תקציר

שוניות סלעיות הן מבין בתי הגידול הימיים העשירים ביותר במינים, וגם בין הפגיעים ביותר בשל הימצאותן בקו החוף או קרוב אליו, לעיתים בסמיכות רבה לפעילות או תשתיות אנושיות. בחוף הים התיכון הישראלי ישנם עשרות קילומטרים של חוף סלעי, כאשר בקו החוף ישנו גם בית גידול ביוגני ייחודי הנקרא טבלאות גידוד. בעשורים האחרונים הצטברו עדויות רבות לשינוי העצום שעובר על המגוון הביולוגי בשוניות – מינים מקומיים רבים נעלמים בעוד שמאות מינים טרופיים זרים (בעיקר מים סוף) מתבססים בו. כמו כן, מימי החופים הופכים חמים יותר וקיים איום משמעותי של עליית המפלס ואירועי קיצון אקלימיים על המגוון בטבלאות הגידוד. לדיג יתר יש השפעה משמעותית על חברת הדגים בשונית, בעוד ששמורות טבע מסייעות לשיקום חברה זו. מחקרים של העשור האחרון הראו כי מינים מקומיים רבים בחופי ישראל רגישים ביותר להתחממות הים וחלקם כנראה נעלמו בשל כך, בעוד שהמינים הפולשים ממקור טרופי עמידים יותר. ההשפעה האקולוגית של המינים הפולשים משתנה. יש מינים פולשים משפיעים ביותר כמו דגי הסיכן ה"מחסלים" הרבה מהאצות הצומחות על השוניות, בעוד שלמינים נפוצים אחרים כמו הצדפה הפולשת שדרנית קוצנית – השפעה פחותה על המגוון הביולוגי. המשך השינויים הגלובליים ואיומים מקומיים כמו זיהום נפט – צפויים להמשיך ולהשפיע ביתר שאת על המגוון הביולוגי, ולהוות אתגר משמעותי לשמירת טבע והמגוון הביולוגי בחופינו, ולכן נדרשת חשיבה עדכנית ואדפטיבית לשינוי.

שוניות סלעיות - עולם עשיר ופגיע

כבר יותר ממאה שנה מהווה האקולוגיה של השוניות הסלעיות מאזור קו החוף ועד לעומק של עשרות מטרים מוקד מחקר אינטנסיבי של מאות חוקרים בכל רחבי העולם אשר הביא לתובנות אקולוגיות רבות וחשובות על תהליכים אקולוגיים כלליים. השוניות הסלעיות הינן בית גידול עשיר ומגוון ביותר המצוי בכל קווי הרוחב והיבשות בכדור הארץ, מאנטארקטיקה הקפואה ועד האזורים הטרופיים החמים, אם כי אופיין של השוניות משתנה מאוד מאזור לאזור כתלות בטמפרטורה, במבנה הטופוגרפי של קו החוף, בזרמי האוקיינוס ובכמות חומרי ההזנה (נוטריינטים) במים. מבחינת המגוון הביולוגי, השוניות הסלעיות שניות בעושרן רק לשוניות האלמוגים הטרופיות. הסיבה העיקרית לעושר זה היא המורכבות המרחבית הגבוהה שמעניקים סלעי השונית – שקעים, נקיקים, סדקים, קירות וצנירים – המספקת

מגוון עצום של גומחות (נישות) אקולוגיות ייחודיות למספר רב של מינים. גם השינוי החד בתנאים הסביבתיים שיוצרים הגאות והשפל באזור הכרית בקו החוף ושיפוע (גרדיאנט) העומק מתחת למים בשוניות החופיות המספקים על פני מרחק קצר תנאים שונים של חשיפה לאוויר, לאור, לזרמים, למזון ועוד, תורמים לעושר הביולוגי הזה. בית הגידול מאופיין ביצורים ישיבים רבים (לרוב כאלה המחוברים למצע), אם אלה אצות היוצרות יער סבוך או מרבדי צדפות, המהווים בעצמם בית גידול מורכב ליצורים רבים אחרים שחלקם ישיבים ואחרים ניידים, למשל דגים וסרטנים. אחד מבתי הגידול הידועים של השוניות הסלעיות במים קרים הוא יערות הקלפ (kelp) – אצות חומיות שבמקומות מסוימים יכולות להגיע עד לגובה של עשרים מטרים – למשל האצה מאקרוציסטיס (*Macrocystis*) בחופי קליפורניה העשירים מאוד בחומרי הזנה בשל תנאים אוקיינוגרפיים ייחודיים יכולה לגדול בקצב של מטר ליום. ישנן כמובן שוניות סלעיות גם בעומקים גדולים מאוד וחשוכים לחלוטין, אך בפרק זה נתייחס בעיקר לשוניות חופיות המצויות באזור הגאות והשפל (הכרית, Intertidal) ובמים רדודים עד לעומק של כמה עשרות מטרים.

מידע בסיסי רב על האקולוגיה של השוניות הסלעיות ניתן למצוא בפרק בנושא במהדורה הקודמת של "הוד הים"[1]. במהדורה חדשה זו נחזור בתמצית על חלק מהמידע הבסיסי ונתרכז בעיקר בעדויות הרבות שהצטברו על תמורות העוברות על בית הגידול הזה בעולם, בים התיכון ובעיקר בחופי הים התיכון הישראלי בעשורים האחרונים, בשל צירוף של שינויים גלובליים ומקומיים ובעדויות המצטברות על רגישות או עמידות המערכת לנוכח שינויים אלה. בשל קרבתן לחוף, השוניות הסלעיות במים הרדודים חשופות לשינויים סביבתיים תכופים, הכוללים גם לחצים מגוונים של פעילות אנושית. השפעות אלה מתעצמות בשל התגברות הפעילות האנושית המביאה אותנו במהירות, בעשורים האחרונים, לכדי משבר גלובלי רב פנים המורכב ממשבר המגוון הביולוגי, משבר האקלים ומשבר הזיהום. משברים אלה מקרבים את כדור הארץ לחצייתם של "גבולות פלנטריים" המהווים את מרחב הביטחון לקיום האנושות כפי שהוגדרו בשנים האחרונות[2]. הטענה היא שחצייתם עלולה להביא את כוכב הלכת לנקודות אל-חזור שעלולות להביא להתמוטטות מערכת הטבע של כדור הארץ (Earth system) עוד בזמננו. מאמרים עדכניים טוענים כי חלק מגבולות אלה כבר נחצו לאחרונה[3]. אחד ממוקדי השינוי העולמיים הוא הים התיכון ובעיקר בחלקו הדרום מזרחי – אגן הלבנט – שהינו מוקדה (hotspot) עולמית של התחממות הים ופלישות מינים, המהווים שני ביטויים חשובים של השינוי הגלובלי. פרק זה יעסוק בעיקר בבית הגידול הסלעי של הלבנט כדוגמה לאזור המושפע במיוחד מהשינויים הגלובליים.

שוניות הים התיכון וטבלאות הגידוד הייחודיות

הים התיכון מאופיין במשרעת גאות ושפל (כרית) קטנה יחסית לרוב חופי העולם, 40-20 סנטימטר בסך הכל, אך באזורים רבים בדרום ומזרח הים התיכון, רצועת החוף הסלעי החשופה לתנודות הגאות והשפל יכולה להיות רחבה ביותר בעיקר באזורים שבהם קיימים משטחי סלע (טבלאות) רחבים בקו החוף. משטחים אלה נקראים "טבלאות גידוד" (איור 1), כאשר גידוד פירושו כרסום או אירוזיה. הכוונה היא לכך שהסלע הרך יחסית המצוי במפלס זה, שעשוי סלעי משקע של כורכר או גיר, מתכרסם על-ידי פעילות הגלים והרוח בשילוב המסת הסלע באופן כימי עד למפלס הכרית, שם הוא נעצר על-ידי בניית סלע ביוגני חדש בעזרת שני מיני חלזונות קבועי מקום ממשפחת הצינוריים (*Vermetidae*) היוצרים מקבצים צפופים של בנייה ביוגנית בקונכיותיהם הצינוריות. מכאן שמם האחר של הטבלאות

– "שוניות הוורמטידים" (Vermetid reefs). בחופי ישראל, רוב החוף הסלעי הטבעי עשוי מטבלאות גידוד (סך הכל כ-10% מקו החוף) או מסלעי חוף (Beachrock) הנוצרים בדרך גיאולוגית אחרת[1]. טבלאות הגידוד בישראל הן כאמור תוצר של כרסום בקו החוף של סלעי כורכר ברוב האזורים או כרסום סלעי גיר (בעיקר באזורים שבהם רכסי הרים פוגשים את הים, בחיפה ובראש הנקרה). שני מיני הצינוריריים הבונים בישראל את טבלאות הגידוד הם הצינוריר הבונה (*Dendropoma anguliferum*) והצינוריר המשולש (*Vermetus triquetrus*). המין ראשון קטן יותר וחי בעיקר בשולי הטבלה הפונים לים, שם מצבור צפוף של פרטים יכול ליצור לאורך מאות שנים צניר בכיוון הים מתחת לקצה הטבלה וכן מעין כרכוב (מעקה) בולט בגובה של כעשרה סנטימטר מעל פני הטבלה. לעיתים ניתן גם למצוא מצבורים שטוחים שלו בגב הטבלה. המין השני גדול יותר וחי בעיקר במרכז או קרוב לקצה הטבלה, כפרטים יחידים או כצבר דליל יחסית, אשר קצה הצינור שלהם מתרומם כלפי מעלה ויכול לבלוט כסנטימטר או שניים מעל משטח הטבלה ושוליו חדים ושבירים ביותר. שני מינים אלה ניזונים בעזרת סינון או לכידת חלקיקי מזון מן המים בעזרת קורי ריר שהם מפרישים. בזמן הגאות, דגיגונים ואפילו להקות דגים גדולים יותר באים מהשוניות הרדודות להיזון על בעלי החיים או לרעות על האצות בבית הגידול של משטחי הטבלה, בעוד שבזמן השפל וים שקט, הכרכוב יכול ללכוד מים ודגים קטנים, כמו קרנונים (gobies) וקברנונים (blennies) שמשתמשים בבורות השפל כביתם. מתחת למים, באזורים מסוימים הופכים רכסי הכורכר או הגיר היוצרים את טבלאות הגידוד לשוניות תת-מימיות נרחבות לאורך החוף, בעוד שבאזורים אחרים השוניות התת-ימיות נפרדות מרכס הכורכר בקו החוף. חשוב לציין כי סקרים וניטור שנעשו בעשורים האחרונים מראים כי אוכלוסיית הצינוריר הבונה לאורך החוף קטנה ביותר; ישנן שנים שבהן היא נעלמת כמעט לחלוטין ואז חוזרים ונראים כתמים קטנים שלה במקומות מסוימים, אך הכיסוי הכללי של החלזונות נמוך ביותר[4,5]. הסיבות לתנודתיות זו אינן ידועות, וייתכן שהן קשורות להשפעות שינוי האקלים – התחממות המים והתגברות אירועי קיצון (ראו דיון בהמשך) – אך ברור כי היעלמות מין מהנדס סביבה זה יכולה להשפיע על כל המערכת האקולוגית לאורך זמן, בעיקר לאור עליית מפלס הים[6].

איור 1. טבלת גידוד בחוף הבונים. ניתן לראות את הכרכוב שנבנה על-ידי הצינוריר הבונה בקצה הטבלה. צילום: גיל רילוב.

רכסי הכורכר הם תוצר התאבנות של דיונות חוף, התלכדות חול עם צדפים וגיר לכדי יצירת סלע. בזמן תקופות הקרח, כאשר מפלס הים היה נמוך יותר בעשרות מטרים התאבנו דיונות החוף במפלסים נמוכים יותר וכיום הן יוצרות רכסי כורכר תת-ימיים ארוכים במספר עומקים לאורך החוף, בעיקר בצפון הארץ. גם רכס הכרמל הגירני ממשיך מתחת למים לכדי יצירת המישור (פלאטו) של ראש כרמל בעומק של 10-30 מטרים, הצונח במרחק של כמה קילומטרים מהחוף לעומק של מאות מטרים. כל הרכסים התת-ימיים הללו יוצרים שוניות בעלות מורכבות רבה במבנה המרחבי שלהן ולכן מהווים בית גידול עשיר לעולם חי מרהיב.

אך כאמור, עולם זה הולך ומשתנה במהירות בשל השפעות האדם הרבות – דיג, זיהום, פגיעה פיזית בבית הגידול, פלישות מינים ובשני העשורים האחרונים התגברות מהירה של שינוי האקלים הגלובלי המתבטאת באזורנו בעיקר בהתחממות מהירה של המים ועליית מפלס הים, לרבות עלייה באירועי קיצון אקלימיים, כגון אירועי שרב של רוחות מזרחיות חזקות הגורמים ליובש קיצוני בחוף הסלעי לתקופות ארוכות, וכן גלי חום עוצמתיים ההולכים ומתרבים בים התיכון[7,8]. המחקר בבית הגידול הזה התקיים לאורך שנים בחוף הישראלי, אך באופן מקוטע ונקודתי יחסית. בעשור וחצי האחרונים מתנהל מחקר מקיף על האקולוגיה המשתנה של בית גידול זה לאורך כל חופי ישראל. מחקר זה כולל ניטור עונתי מקיף במספר אתרים לאורך החוף וכן ניסויים בים ובמעבדה המכוונים להבנת מהות השינוי. החיבור בין המגמות בזמן ובמרחב לתוצאות הניסויים מאפשר גם לייצר תחזיות אפשריות לעתיד המגוון הביולוגי לפי מודלים המבוססים על תרחישים שונים של הפאנל הבין ממשלתי לשינוי אקלים (IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change) ומותאמים לאזורנו. פאנל זה מוציא דוחות מעודכנים כל מספר שנים על השינויים הגלובליים שהתרחשו ומשפר את התחזיות להמשך השינוי עד לסוף המאה ויותר, זאת בהתאם לתרחישים מתעדכנים. בפרק זה נתאר את העבר, ההווה והעתיד האפשרי של שוניות הים התיכון הדרום-מזרחיות לאור השינויים הרבים המתרחשים לחופי ישראל.

תמורות בשוניות הלבנט בעבר, בהווה ובעתיד

השפעות דיג יתר

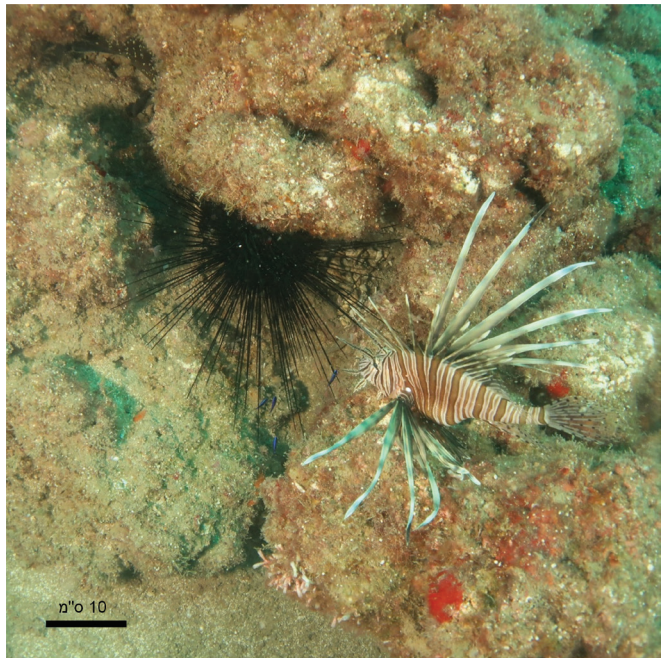
דיג הינו אחד מפעילויות האדם העתיקות בים ומתרחש כבר אלפי שנים בחופי הים התיכון. לחיים בים יש יכולת מדהימה להתחדשות גם כאשר הם נפגעים, אך כאשר כמות הדייגים עולה, מספר הספינות עולה ושיטות הדיג נעשות מתוחכמות ויעילות יותר, סופו שלא יוכל לשמור על רמות פוריות גבוהות ומגוון ביולוגי רחב לאורך זמן. תשאלו את הדייג או הצולל הוותיקים באזורנו למה בעיקר הם מתגעגעים בחופינו? קרוב לוודאי יגידו לך שהם מתגעגעים ללהקות הדגים הגדולות והדגים השמנמנים שהיו עולים בחכתם או ברשתם, או נצפים דרך משקפת הצלילה לפני ארבעים או חמישים שנה בחופי ישראל. הרבה מהעושר שנצפה או נדוג אז היה שונה מאשר זה העולה בחכה או נצפה בצלילה היום. אנשי ים אלה עדים כבר שנים לשינוי העצום בחי הימי, ובעיקר בעשורים האחרונים, הנובע מהתמעטות של מרבית

מיני הדגים המסחריים הים תיכוניים, כמו גם הירידה בגודלם. הסקרים והמחקרים של השנים האחרונות אכן מגבים תצפיות אלו במספרים. סקרים שנערכו על-ידי המכון לחקר ימים ואגמים לישראל בין 2010-2015, ומשנת 2015, בעיקר במסגרת המיזם הגדול שמובילה רשות הטבע והגנים – הביובליץ, המאגד את רוב הביולוגים הימיים שחוקרים את הים התיכון – מצביעים בבירור על כך שבשמורות הטבע הקטנות לאורך החוף ובעיקר זו הוותיקה ביותר, שמורת ים ראש הנקרה-אכזיב, מיני הדקרים והספרוסיים רבים וגדולים בהרבה מאשר אלה שבשטחים קרובים הסמוכים לשמורות[9] [10]. זוהי עדות מצד אחד ליעילות השמורות בשמירה על מינים אלה מדיג ומצד שני, להשפעה הגדולה של הדיג החופי, המסחרי והספורטיבי (המתגבר מאוד בשנים האחרונות) על אסופת הדגים בשאר השוניות לאורך החוף. הימצאות פרטים גדולים באוכלוסייה חשובה מאוד לקיום בר-קיימה של המין. נקבת דקר הסלעים בשמורה שהינה גדולה פי שניים מאחת החיה מחוץ לשמורה יכולה להביא גם מספר צאצאים גדול פי שלשה, והפרטים הגדולים ביותר הם זכרים. על כן ישנה חשיבות גדולה לשמירה על הפרטים הגדולים לצורך קיום אוכלוסייה בריאה בתוך, וגם מחוץ לשמורות, מכיוון ששמורות אפקטיביות יכולות לספק דגים צעירים לאזורים שמחוץ להן. מחקר שנערך בישראל בשמורת אכזיב-ראש הנקרה והשווה לנתונים דומים גם במקומות אחרים בעולם, הראה כי דיג בסמוך לשמורת טבע ימית יכול להשפיע על אוכלוסיות הדגים גם בשוליים המקיפים את השמורה עד לטווח של קילומטר או שניים לתוך השמורה. המשמעות היא, שבשמורות קטנות, או מאורכות וצרות, השפעה זו יכולה לפגוע מאוד בהצלחתן בשל יחס של היקף לשטח גדול ביותר (כלומר רוב שטח השמורה נמצא באזור ההשפעה)[11].

השפעת השילוב של פלישות מינים ושינוי אקלים

דרום-מזרח הים התיכון, ובתוכו חופי ישראל, הוא האזור בעל שיעור פלישות המינים הזרים (Invasive non-native species)[12] הגדול ביותר באוקיינוסים. זאת, בשל קרבתו הרבה לפתחה של תעלת סואץ המחברת בין ים סוף הטרופי לים התיכון הממוזג-סוב-טרופי, אשר דרכה עוברים בצורה ישירה או עקיפה מינים רבים מאוד מאז פתיחתה בשנת 1869. מעבר המינים התגבר עם השנים בשל הרחבתה והעמקתה, ואפילו הכפלתה של התעלה לאורך חלק מאורכה ב-2015[13]. לאורך יותר מ-150 השנים מאז פתיחתה עברו כבר מאות רבות של מינים, חלקם התפשטו מאזורנו במהירות מערבה וצפונה בים התיכון, אפילו מעבר למה שחוזים מודלים לפי נתוני התפוצה שלהם באזורי המקור[14]. ההתגברות של הופעת מינים חדשים בחופינו בעשורים האחרונים נובעת כנראה גם מהתחממות הים המואצת שמעודדת את התבססות של חלק מהמינים הטרופיים חובבי החום שבעבר לא יכלו לקיים פה אוכלוסיות, כנראה בשל טמפרטורות נמוכות מדי בחורף. נתונים מדיג המכמורת בחופי ישראל הראו כי בשלושת העשורים האחרונים הלכו והשתלטו מיני הדגים הפולשים על השלל בעוד שמינים מקומיים הולכים ונעלמים[15]. גם בשוניות הסלע יש דומיננטיות גדולה של מיני דגים, אצות, וחסרי חוליות פולשים[10]. למעשה, מבין הרכיכות בעלות הקונכיות (חלזונות וצדפות) יותר מתשעים אחוז מהפרטים הנספרים כיום בשונית הם פולשים[16]. מבחינת שכיחות וביומסה, גם רבים מהדגים הנמצאים בשוניות הם מינים זרים (אם כי עדיין ישנה דומיננטיות של מינים מקומיים מבחינת עושר המינים). בין הבולטים במינים הפולשים בעלי ההשפעה האקולוגית הם שני מיני דגי סיכן, הסיכן המשויש (*Siganus rivulatus*) והסיכן ההודי (*Siganus luridus*) שפלשו בתחילת ובאמצע המאה הקודמת בהתאמה, והפכו דומיננטיים בחברת הדגים בשונית כבר לפני

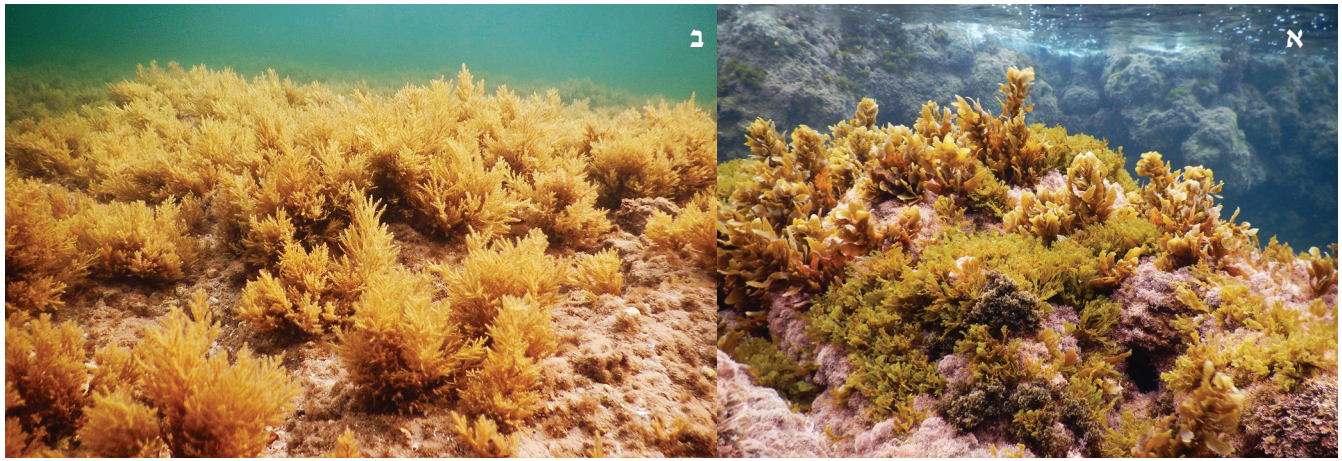
עשורים רבים[17] כולל גם בשמורה הוותיקה אכזיב-ראש הנקרה[10].
פלישות מינים ושינוי האקלים פועלים במקביל, לחוד וביחד בהשפעתם על הרכב החברה האקולוגית המקורית (כולל ירידה בכמות או היעלמות מוחלטת של מינים מקומיים) בשוניות הלבנט, אך הוכחת השפעות אלו אינה טריוויאלית ודורשת לרוב עדויות ניסוייות. השפעת דגי הסיכן שהינם צמחונים ובעלי פוטנציאל השפעה משמעותי על אצות השונית, ובשל כך גם על חברת השונית בכללותה, הודגמה למשל בעזרת בחינת צימוח או היעלמות של אצות רכות ושיחניות בתוך כלובים עם ובלי נוכחות הדגים, ראשית בניסויים בחופי טורקיה ואז גם בחופי ישראל[18-20]. ניסוי הכלובים בישראל, בתוספת ניסויי מעבדה של חשיפה לטמפרטורות שונות, הראו גם כי השילוב של תחרות על מזון (אצות) עם הסיכנים הפולשים, והתחממות מי החופים גרמו ככל הנראה להתמוטטות אוכלוסיות קיפוד-הים הסגול (*Paracentrotus lividus*) מתישהו במהלך שנות התשעים של המאה הקודמת[20,21]. מעקב אחר דגים מסומנים בתגים אקוסטיים הראה לאחרונה כי הסיכן המשויש גם הרחיב את מרחב התנועה הטריטוריאלי שלו (Home range) בים התיכון לעומת ים סוף ובכך ככל הנראה גם את מרחב ההשפעה האקולוגית על השונית[22].



איור 2. ים סוף בים התיכון – הזהרון ההדור (*Pterois miles*) פוגש את הנזירית ארוכת קוצים (*Diadema setosum*) על השונית מול חיפה. צילום: גיא רענן.

דוגמה מעניינת נוספת מבחינת השפעות אקולוגיות אפשריות היא פלישתה של הצדפה הגדולה שִדרנית קוצנית (*Spondylus spinosus*). בעוד שהמין המקומי שִדרנית מצויה (*S. gaederopus*) נעלם כמו מיני רכיכות רבים מחופינו כמעט לחלוטין, מסיבה לא ידועה (אולי בשל ההתחממות), המין הפולש משגשג מאוד בשונית בעשורים

האחרונים[16,10]. ניתן היה לשער כי לצדפה גדולה כמו השדרנית תהיה השפעה משמעותית הן על המגוון הביולוגי בשונית והן על שפיעות הפלנקטון במים. זאת היות שקשוותיהן הגדולות, העבות והמשוננות מוסיפות רבות למורכבות המבנית של השונית (באזורים רבים פרטים רבים שיושבים זה על זה ממש יוצרים שונית תל-ממדית), ובשל קצבי סינון מים גבוהים שיכולים לסלק הרבה מהפלנקטון הזה. בניסוי שבו הוסרו או הומתו הצדפות בשונית הראו החוקרים כי אין כמעט הבדל במגוון הבנטי בשונית עם ובלי הצדפות כך שבאופן מפתיע אולי, השדרנית הפולשת אינה משפיעה במיוחד על מגוון המינים המכסה את סלע השונית[23].



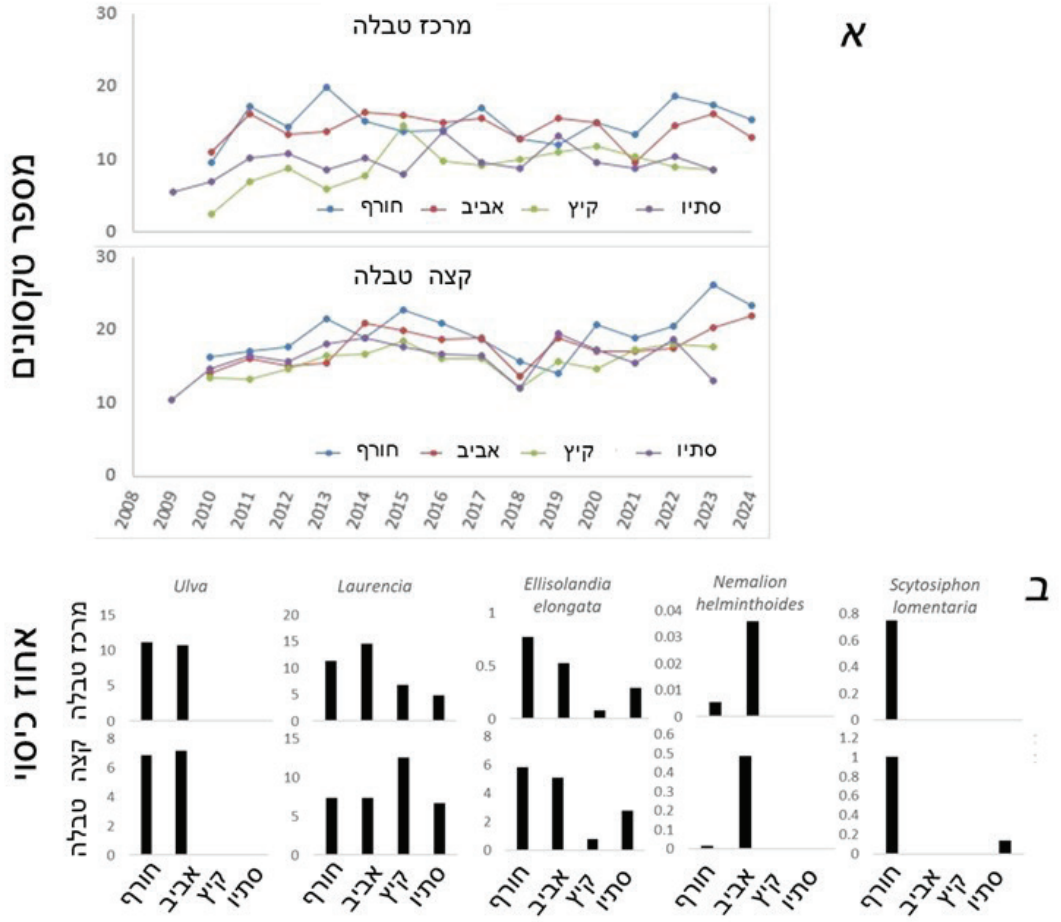
איור 3. א, יער של אצות חומיות בחוף שקמונה באביב, הנשלט על-ידי אצת הסוכך סרגסון מצוי *Sargassum vulgare*. ב, יער של הציסטנית גונגולריה ריייס *Gongolaria rayssiae* בעומק שני מטר בשקמונה באביב. צילום: גיל רילוב. גובה הגונגולריה בשיא צמיחתה כפי שנראה בתמונה מגיע לכ-25 ס"מ בעוד הסרגסון יכול להגיע בשנים מסוימות לגובה של מטר כמעט.

מינים אחרים שפלשו לים התיכון ומתפרצים בשנים האחרונות מהווים איום אמיתי על החברה האקולוגית בשונית ומאיימים על ענף הדיג. דוגמה להשפעה משמעותית אפשרית על חברת השונית אפשר למצוא בפלישה של דג זהרון הדור (איור 2, *Pterois miles*) למזרח הים התיכון בשנים האחרונות[24]. הזהרון הוא טורף יעיל ביותר שפלישתו בים הקריבי ובדרום-מזרח ארצות הברית השפיעה משמעותית על חברת שונית האלמוגים באזור[25]. בימים אלה נעשים ניסויים בקפריסין, אחד ממוקדי הפלישה המרכזיים בים התיכון לדילול האוכלוסייה שלו וגם ניסויים לבחינת משמעות הוצאתו מהמערכת על חברת השונית[26,27]. דוגמה נוספת היא פלישת קיפוד-הים הים סופי, נזירית ארוכת קוצים (*Diadema setosum*) המתפרץ גם הוא בים התיכון בשנים האחרונות (איור 2), תחילה בטורקיה ודרום הים האגאי ועכשיו גם בקפריסין ובישראל[28]. לפלישה ייתכנו השפעות אקולוגיות מרחיקות לכת הנבחנות בימים אלו במעבדה ובים. פלישת הדג הרעיל לגינון (*Lagocephalus* sp.) בים התיכון בכלל ובארץ בפרט, הביאה לפגיעה משמעותית בדיג החופי עם השלכות כלכליות רבות בחופי יוון, כיוון שבמקומות מסוימים דג זה הפך לדג הנפוץ ביותר ברשתות הדיג, שגם נפגעות מנגיסתו העוצמתית[29]. השפעתו האקולוגית עדיין לא ידועה.

גם בין האצות המכסות את השונית (Macroalgae) בדרום-מזרח הים התיכון ישנם מינים פולשים רבים. עד היום

ידועים יותר משמונים מינים שפלשו לחופי ישראל[30]. סקרים מראים כי כיום מרבית תכסית הסלע בשוניות נראית כשממה המכוסה ב-turf, מעין "שטיח" קצוץ של אצות אכולות או אצות חוטיות רכות. ניסויים בטורקיה וישראל הראו כי הסיבה לכך היא כנראה בעיקר בשל רעיית יתר בידי דגי הסיכן הפולשים[10]. כתוצאה מכך, המינים המקומיים של אצות שיחניות גדולות היוצרות סכך (canopy), כמו למשל סרגסון מצוי *Sargassum vulgare* (איור 3) או הציסטנית האנדמית *Gongolaria rayssiae* גונגולריה רייס, או אצות שיחניות רכות (כמו למשל *Halopteris scoparia* נוצית מצויה) או עלעליות (כמו למשל אזנית מצויה *Padina pavonica*) נראים בכתמים בגדלים שונים במקומות מסוימים, אך מהווים אחוז נמוך מהתכסית הכוללת בשונית, וחלקן, כמו אצות הסכך, נעלמות לגמרי בקיץ. חשוב לציין כי מרבדים גדולים של הציסטנית *גונגולריה* רייס הידועה רק מחופי ישראל ולבנון (ולפיכך מהווה מין אנדמי בעל תפוצה ביוגיאוגרפית מצומצמת ביותר) נמצאו עד היום רק בשונית הרדודה והשטוחה המשתרעת לאורך רצועת החוף בין המכון לחקר ימים ואגמים לשכונת בת גלים בחיפה, ומספר מרבדים קטנים יותר נמצאו במקומות אחרים, כמו חוף נחשולים. לעומת זאת, מספר מיני אצות פולשות הפכו בשנים האחרונות לנפוצות ביותר לאורך החוף הישראל מצפון לדרום, ביניהם למשל *Galaxaura rugosa* גלקסאורה, *Asparagopsis taxiformis* אספרגון מסועף, *Lobophora schneideri* אונית, ויוצרות כתמים הולכים וגדלים. האספרגון, הידועה בחופי ישראל כבר מספר עשורים אך בכיסוי נמוך ביותר, מראה התפרצויות צימוח משמעותיות במיוחד בחודשי הקיץ מאז שנת 2020, בעוד שהגלקסאורה הולכת ומכסה שטחים נרחבים של השונית בעיקר מחיפה וצפונה בעשור האחרון. האונית לעומתן ידועה בעיקר ככתם הולך וגדל על המישור הרדוד של ראש כרמל. היעלמות מינים מקומיים והתפשטות מינים טרופיים פולשים קשורה כנראה לעמידות גדולה יותר של הפולשים הטרופיים להתחממות הים, כפי שנראה בהמשך.

כאשר הושווה בעונת האביב התפקוד האקולוגי של חברות השונית הנשלטות על-ידי המין הפולש גלקסאורה לעומת turf (אצות קצרות יצע או קצוצות המכסות את השטח) או המין גונגולריה האנדמי, זאת בעזרת אינקובציות בתאים מטבוליים וכן השוואת המגוון המאכלס את החברות השונות, נמצא באופן לא מפתיע שב-turf המגוון הביולוגי והמטבוליזם (קליטת פחמן ופליטת חמצן) הוא הנמוך ביותר בעוד שהמגוון היה דומה בין חברות המין המקומי והפולש[31]. התפקוד המטבולי (קליטה ופליטה של חמצן ופחמן) לעומת זאת היה שונה בחברה של הגלקסאורה (נטו צרכנית או הטרוטרופית – כנראה בשל נוכחות רבה של חסרי חוליות, בעיקר פולשים, כך שרמת הנשימה הכוללת עלתה על רמת יצירת החמצן בפוטוסינתזה על-ידי האצות) לעומת חברת הגונגולריה (נטו יצרנית או אוטוטרופית, כלומר יותר פליטת חמצן מצריכתו)[31]. למרות זאת, בחישוב שנתי נראה שהיצרנות (ויכולת קליטת הפחמן) שתורמים המינים הפולשים גבוהה יותר מזו של המין המקומי. זאת כיוון שרוב השנה לגונגולריה יצע (גוף האצה) מינימלי ללא ענפים שאותם היא מגדלת עם ירידת הטמפרטורות בחורף ומאבדת אותם בתחילת הקיץ בשל עליית הטמפרטורות, ואולי גם ירידה בכמות הנוטריינטים (כלומר היא פעילה מטבולית רק 4-5 חודשים בשנה)[32]. לעומת זאת, המינים הפולשים שנבחנו הם בעלי יצע ניכר (כלומר מקיימים ביומסה משמעותית) על השונית לכל אורך כל השנה כולל בחודשי הקיץ החמים מאוד. בשל כך, ייתכן שלמינים הפולשים תפקיד חשוב בשמירת היצרנות של השונית ואספקת בית גידול למינים רבים לאורך השנה. בחינת תרומתם של מינים טרופיים פולשים לתפקוד המערכת האקולוגית כאשר מינים מקומיים דומים קורסים בשל החום, היא נושא חשוב למחקר ולהיבטים שונים של שמירת טבע ימית.



איור 4. א. מספר הטקסונים בעונות השונות לאורך השנים במרכז טבלת הגידוד ובקצה הטבלה[4]. ב. אחוז הכיסוי העונתי של מספר מינים המדגים את העונתיות הרבה של חלקם בשני אזורי הטבלה (מותאם מ- [5]).

הניטור ארוך השנים (2009-2024 עד כה) בטבלאות הגידוד שבמפלס הגאות והשפל הראה כי בניגוד למקומות רבים בעולם, העונות העשירות יותר במינים (בעיקר אצות) הן העונות הקרות, החורף והאביב, לעומת הקיץ והסתיו (איור 4). הסיבה לכך היא כנראה שמכיוון שהקיץ חם מדי למינים רבים, הם פשוט נעלמים בעונה זו[5]. ישנם מספר מינים של אצות שמופיעים רק בעונת החורף האביב, למשל תולענית החוטית (*Nemalion helminthoides*) נמצאת קצת בחורף ובעיקר באביב וחלולית משונצת (*Scytosiphon lomentaria*) נמצאת רק בחורף (איור 4). יש להניח שאירועי היובש החזקים המתרחשים תכופות באביב ומביאים להלבנה ותמותה של רוב האצות בטבלה (ראו למטה) מסייעים גם הם לשינוי המופע של החברה האקולוגית בין העונות.

עמידות מינים מקומיים ופולשים לשינוי אקלים

על מנת להבין את התמורות המתרחשות בעונתיות והדינמיקה הרב-שנתית של מינים מקומיים ופולשים חשובים, וכדי לייצר תחזיות לגבי העתיד של המגוון הביולוגי בשונית לנוכח התחממות הים והשפעות אחרות ישירות ועקיפות של שינוי אקלים, מחקרים של השנים האחרונות מנסים לבחון ולהשוות למשל את הרגישות לטמפרטורות שונות של מינים אלה. הדגש הוא בעיקר על בחינת התפקוד והשרידות של המינים תחת טמפרטורות הצפויות על-פי תרחישים שונים המפותחים על-ידי הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי אקלים, ה- IPCC, אך רלוונטיים לאזורנו (כיוון שאזורים שונים משתנים בקצבים ועוצמות שונות). בין היתר נבחנו במערכות הניסוי החדשניות של המכון לחקר הימים והאגמים לישראל מספר רב של אצות, חסרי חוליות וגם אחד מדגי הסיכן הפולשים. למשל, שני מינים מקומיים של אצות, אלמוגנית מצויה *Ellisolandia elongata* והציסטנית גונגולריה רייס *Gongolaria rayssiae* מראים רגישות גבוהה לטמפרטורות הקיץ של היום, וייתכן שעונת הצימוח שלהם כבר הצטמצמה עם ההתחממות שכבר התרחשה ובעתיד ייתכן שקיומם באזורנו בסכנה[32,33]. הגונגולריה כאמור הינה מין אנדמי המצוי רק בחופי ישראל ולבנון והיעלמותו האפשרית בעתיד פירושה הכחדה עולמית של המין. לעומתן, מיני אצות טרופיים פולשים שנבחנו, גלקסאורה והאונית *Lobophora schneideri*, הראו עמידות גבוהה הן לטמפרטורות הקיץ של ימינו והן לאלה הצפויות בעתיד עם המשך ההתחממות (נתונים שלא פורסמו).

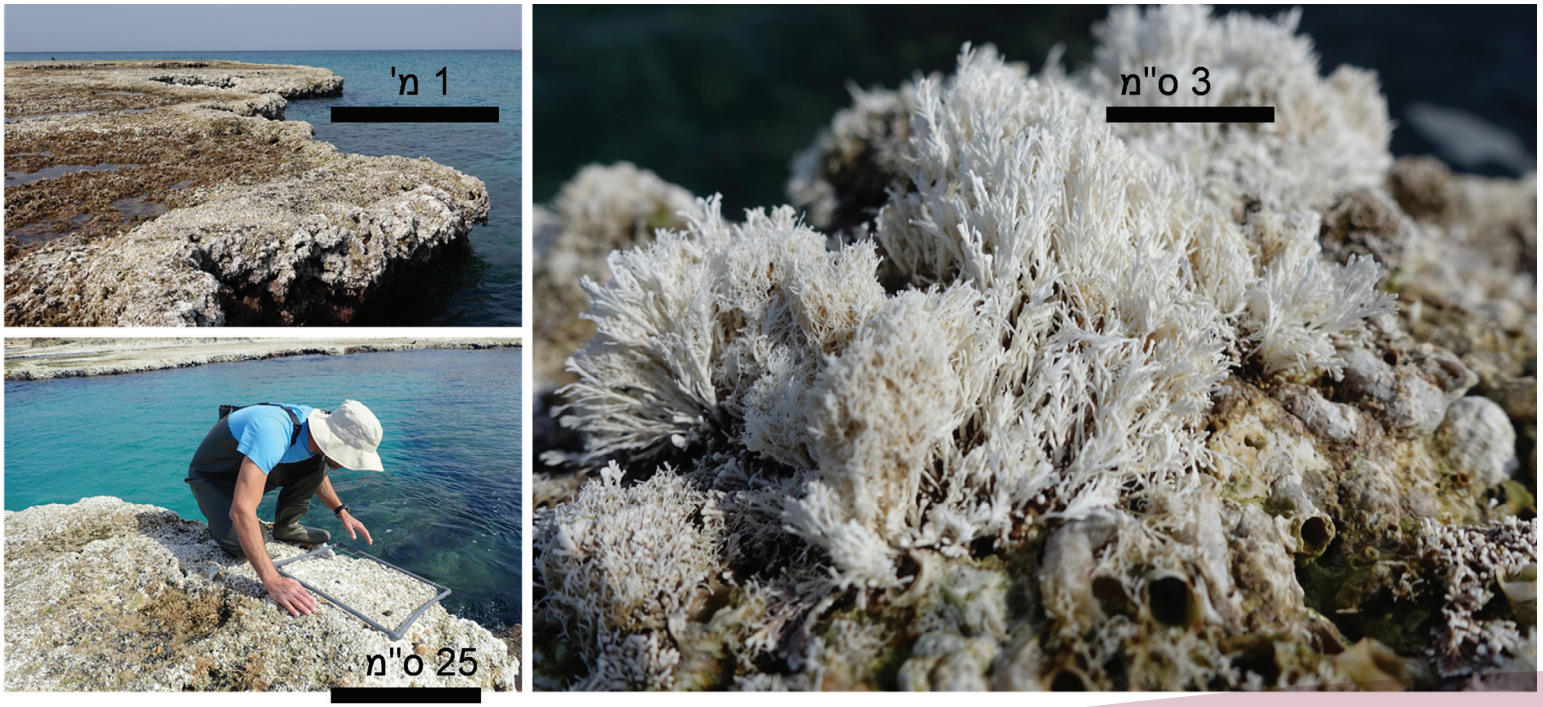
מבין חסרי החוליות המקומיים, הסרטן הקפצן, *Palaemon elegans*, החי במים הרדודים ובבריכות השפל, מראה עמידות גבוהה לטמפרטורות קיצון לזמנים קצרים, אך חשיפה ארוכה אפילו לטמפרטורות הקיץ של היום פוגעת בביצועיו הפיזיולוגיים ובשרידותו[34]. לעומת זאת, הסרטן עכובן האצות, *Acanthonyx lunulatus*, מראה רגישות גבוהה לטמפרטורת הקיץ של היום (נתונים שלא פורסמו). מבין החלזונות, שני מיני חדי-השן (חד-שן משובץ וחד-שן מנומר) המקומיים החיים באזור הגאות והשפל וכן הצלחית המקומית, *Patella caerulea*, מסתדרים עם טמפרטורת המים של הקיץ כיום, אך יסבלו אם יתחממו המים יותר, זאת לעומת הצלחית הפולשת, *Cellana rota*, המראה עמידות גבוהה גם לטמפרטורות הצפויות בקיץ בעתיד [35].

מחקר מעניין נוסף בחן את הרגישות של אותה אלמוגנית, שהיא אצה אדומית בעלת שלד גירני המכסה שטחים גדולים בשונית, בעיקר בעונת החורף והאביב, להחמצת האוקיינוסים (ocean acidification) כלומר להעלאת החומציות, המתבטאת בירידת ה-pH, הנובעת מכניסת פחמן דו-חמצני עודף לים. נבחנה העמידות להורדת ה-pH במים בין פרטים רגילים לכאלה המכוסים באצות אפיפיטיות (אצות הגדלות על אצות אחרות) חוטיות [36]. בעבודה נבחנה רמת הפוטוסינתזה וגם דרגת ההלבנה של פרטים אלה ברמות pH שונות ונמצא כי פרטים המכוסים באפיפטיים היו מוגנים למדי מהחמצת המים – בשל הפעילות הפוטוסינתטית של האצות האפיפיטיות שיצרה עלייה ברמת ה-pH בשכבת הגבול הדקיקה המקיפה את ענפי האצה[36]. אצות מוגנות אלו לא עברו הלבנה.

השפעות של אירועי קיצון

ישנם עוד היבטים של שינוי אקלים מלבד התחממות והחמצה של הים. אחת ההשלכות החשובות של שינוי האקלים היא התגברות של אירועי קיצון, כשלרוב באוקיינוסים מדובר על גלי חום (או קור) וכן סערות. בישראל מדובר גם

על עלייה במספר אירועי היובש והשרב. בחוף הסלעי הישראלי, הביטוי של אירועים כאלה, המלווים לרוב ברוחות מזרחיות יבשות וחזקות, הוא התייבשות של אזור הגאות והשפל לאורך ימים, ולעיתים נדירות אפילו שבועות (איור 5). אירועי היובש הללו המתרחשים בעיקר בעונות האביב והסתיו הינם תופעה ידועה מן העבר וקשורה בעיקר למערכות סינופטיות ספציפיות, ולרוב לאפיק ים סוף. עבודה שנערכה לפני מספר שנים הראתה שישנה עלייה בתדירות של מערכות סינופטיות אלה בעשורים האחרונים והן קיימות היום גם בחורף, דבר המוביל לאירועי יובש בחורף שהיא התקופה העשירה ביותר במגוון ביולוגי בטבלאות הגידוד[8]. העבודה הראתה שתוצאת אירועים חזקים או ארוכים כאלה היא הלבנה ותמותה מסיבית של אצות ותמותה של בעלי חיים הנלכדים על הטבלאות ובסוף מתים. אירוע קיצוני של יובש התרחש בחורף 2023 כתוצאה משילוב של שפל קיצוני בכל הים התיכון שבעקבותיו אירוע של רוחות מזרחיות חזקות שביחד הובילו לכמעט שבועיים של חשיפת הטבלאות לאוויר יבש וחם. באירוע זה נראתה, מעבר להלבנת האצות, תמותה רבה של צלחיות (*Patella*), הידועות כמין עמיד במיוחד לתנאי קיצון – למשל באזור שקמונה, נמדדה תמותה של 80% מהפרטים באזור גב הטבלה (איור 6).



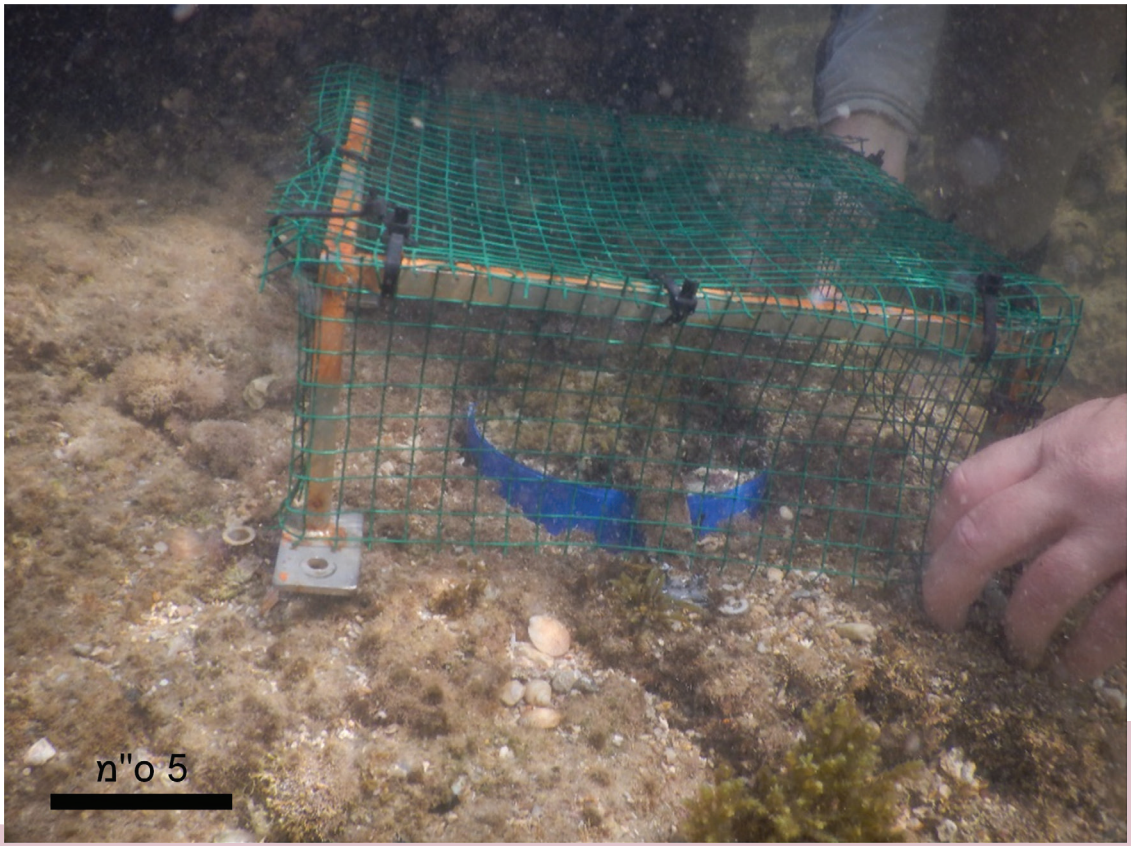
איור 5. טבלאות גידוד בשפל ויובש קיצוני והלבנת האצות הנובעת מכך. גודל ריבוע הדיגום הוא חצי על חצי מטר. צילום: גיל רילוב.

איור 6. צלחיות (Patella) מתות בעקבות אירוע היובש של פברואר 2023. הצלחיות נהפכו על-ידי הדוגם לצורך הדגמה. צילום: גיל רילוב.

השפעת עליית מפלס הים

איום נוסף של שינוי האקלים על החוף הישראלי בכלל והחוף הסלעי בפרט, ובמיוחד טבלאות הגידוד, הוא עליית מפלס הים. עליית מפלס הים נובעת משילוב גורמים, הראשון הוא התמוססות הקרחונים היבשתיים (בעיקר באנטארקטיקה וגרינלנד) והשני הוא התרחבות נפח המים בשל התחממות הים. הערכת מידת עליית המפלס עד היום אינה טריוויאלית ותלויה בכלי המדידה, כמה זמן אחורה אנחנו מסוגלים להסתכל ומידת הביטחון בנתונים. מפלס הים בתקופת הקרח לפני כ-20 אלף שנים היה כ-120 מטר מתחת למפלס היום ומאז עלה, אבל בקצב משתנה ועם תנודות רבות לאורך התקופה. מאז שהחלו מדידות מסודרות בתחילת שנות התשעים של המאה העשרים מפלס הים עלה כנראה בכ-15 ס"מ, כשעיקר העלייה התרחשה בשנות התשעים ומאז היא מתונה יותר[4]. מה שכן ברור לפי כל תחזית אקלימית הוא שהעלייה תימשך, ואפילו התחזיות האופטימיות ביותר מדברות על עלייה של 50-70 ס"מ עד סוף המאה הנוכחית, כשתחזיות אפשריות קודרות בהרבה מדברות על עלייה של 2-3 מטר במקרה של קריסת מדפי הקרח באנטארקטיקה. משמעות עלייה של אפילו חצי מטר יכולה להיות קטסטרופלית למצוקי החוף, לתשתיות רבות לאורך החוף, לערי החוף, ולהיעלמות חופי רחצה רבים, אך צפויה לה גם השפעה רבה על החוף הסלעי ובעיקר טבלאות הגידוד הנמצאות בדיוק בגובה מפלס הים. במחקר ראשוני מסוגו שנערך לפני מספר שנים בחופי ישראל נמדדו מפלסי הטבלאות באתרים רבים וכן המבנה התלת-ממדי מופה ברזולוציה גבוהה בעזרת מכשיר לייזר (LIDAR) במספר אתרים על מנת לבחון איזה אחוז מבית הגידול יהיה קבוע מתחת למים בעלייה של גובה המים למפלסים שונים [6]. באותו מחקר גם הושווה המגוון הביולוגי בין טבלאות בגובה הים וטבלה שקועה בכ-20 ס"מ בחוף הבונים. כמו כן נעשה ניסוי שבו נקדחו ליבות סלע מכוסות במגוון הביולוגי (בעיקר אצות) ממפלס הטבלה והועתקו לחורים שנקדחו במפלס נמוך ב-20-30 ס"מ

המכוסה תדיר במים (איור 5). חלק מהליבות שהועתקו היו מוגנות מרעייה של דגי הסיכן הפולשים בעזרת כלובים (איור 7). המטרה הייתה לראות כיצד ישתנה המגוון הביולוגי על ליבות הסלע שהועתקו כתוצאה מ"טביעתן" מתחת למים המהווה הדמיה של עליית המפלס. התוצאות הראו כי באתר חוף הבונים עלייה נוספת של 15 ס"מ בלבד תגרום לכך שרוב משטח הטבלה יהיו מתחת למים באופן תדיר, ובטבלה בחוף אכזיב 30 ס"מ יגרמו לטביעת כל חלקי הטבלה. כלומר אפילו לפי התחזיות המתונות ביותר, בית הגידול הייחודי הזה יהפוך ממערכת אקולוגית של אזור הכרית לכזה של התת-כרית הרדוד. הסקרים הראו כי משטחי סלע שטוחים ורדודים מאוד המצויים תדיר מתחת למים מאופיינים בעיקר בכיסוי turf עם מעט מאוד אצות שיחניות ומגוון ביולוגי כללי נמוך. ניסוי העתקה הליבות הראה כי המגוון משתנה (על ליבות מוגנות מרעיית סיכנים) או צונח (על ליבות לא מוגנות שבהן הוסרו כל האצות השיחניות ונשאר בעיקר turf) תוך מספר שבועות. היעלמות האצות בליבות הלא מוגנות גם גרמה לירידה משמעותית בתפקוד המטבולי של חברת הסלע (ירידה בפליטת חמצן וקליטת פחמן).



איור 7. ליבת סלע עם המגוון שעליה לאחר שהועברה לעומק 20 ס"מ ומוגנת מרעיית סיכנים בעזרת כלוב. צילום: גיל רילוב.

השפעות של הפרעות מקומיות: אירוע זיהום הזפת

כמובן שלא רק שינויי אקלים ופלישות מינים משפיעים על בריאות המערכות האקולוגיות בים. גורמים רבים מקומיים תורמים גם הם למצב המערכת החופית, כולל זיהומים מסוגים שונים. מעבר לזיהומים הרגילים של שפכים או חומרים רעילים כמו מתכות כבדות ממפעלים שונים, יכולים להתרחש גם אירועים נקודתיים אך בעלי פוטנציאל הרסני למערכת. אחד מהם הוא זיהום נפט כתוצאה מאירוע של שפיכת נפט ממכלית העוברת באזור, או מתקלה משמעותית באחד מאתרי הקידוח של הנפט או הגז לאורך החוף. תזכורת לכך קיבלנו באירוע זיהום הזפת בפברואר 2021, בזמן סערת חורף, אירוע המכונה אירוע זפת בסערה, שבו הופיע כתם נפט כ-50 ק"מ מהחוף כנראה, מספינה שחלפה ושחררה כ-550 טונות של נפט שהגיע לאחר מספר ימים אל החוף הישראלי בעיקר בצורה של זפת. הזיהום התפזר לכל אורך החוף כשאחד המוקדים העיקריים היה חוף שקמונה[37]. באירוע הנפט של 2021 הייתה התגייסות ציבורית עצומה של אלפי מתנדבים שניקו את כל חופי הארץ, החוליים והחופיים, מרוב שאריות הזפת (איור 8). בעבר, זיהום בזפת שהיה נפוץ בחופי הים התיכון הישראלי נבע כנראה לרוב מדליפות קטנות מספינות, עד שהוחמרו התקנות ושיעור הזיהום ירד מאוד. עיקר החשש היום הוא מאירועים גדולים ממכליות, מהקידוחים המתרבים לאורך החוף או ממתקני הובלת הנפט של חברת קו צינור אירופה-אסיה (שבעבר נקרא אילת-אשקלון). באירוע של 2021, למרות שנמצאו כתמי זפת רבים על הטבלאות בעיקר בצפון הארץ, כתמים אלה נתפסו על הסלע המחוספס בעיקר באזור גב הטבלה שבו מיעוט יצורים ולכן נפגעו כנראה בעיקר אוכלוסיות קטנות של בלוטי ים. יש לצפות כי זיהום של נפט נוזלי עלול להיות פוגעני במידה גדולה יותר. חשוב לציין כי ייתכן גם שילוב בין השפעות של זיהום מקומי והשפעות שינויי אקלים. לדוגמה, זיהום נפט או מתכות כבדות יכול להעלות את הרגישות להתחממות המים, או להפך. חקר ההשפעות המשולבות של גורמי עקה שונים הינו חשוב אך מאתגר, והולך ומתגבר בעשור האחרון במעבדות שונות בעולם. בימים אלה מתקיימים בחיא"ל ניסויים הבודקים את ההשפעות המשולבות של זיהום והתחממות על מגוון של מיני שונית ים התיכון.

איור 8. גוש זפת "טרי" על טבלת הגידוד בחוף שקמונה שהופיע בעקבות זיהום הנפט הגדול בפברואר 2021.

סיכום

בית הגידול הסלעי של ישראל הינו מגוון וייחודי אך נתון תחת איומים וסכנות רבות, מקומיות ועולמיות. המחקרים של העשורים האחרונים הראו כי מערכת אקולוגית זו עברה שינויים עצומים במגוון הביולוגי ההולך ונשלט על-ידי מינים טרופיים שפלשו אל הים התיכון, בעוד שמינים מקומיים הולכים ונעלמים, כנראה בעיקר בשל העובדה שאינם מצליחים להתמודד עם המים המתחממים וחלקם כנראה גם בשל תחרות על משאבים עם המינים הפולשים. השינוי העצום במגוון הביולוגי, שצפוי להמשיך בעשורים הקרובים, מהווה אתגר עצום לשמירת טבע וניהול משאבי הטבע ודורש חשיבה חדשה של ניהול נכון של משאבים אלו[38,39]. בין היתר, מה תפקידם של מינים פולשים במערכת ההולכת ומשתנה, ובמיוחד לאור היעלמות מינים מקומיים רבים. זהו אתגר אמיתי, הן למדענים והן למקבלי ההחלטות. מה שברור הוא שחופי ישראל מהווים את ה"קנרית במכרה" – העדות למה שיקרה בקרוב מאוד גם בחופים צפוניים ומערביים יותר בים התיכון, עם המשך ההתחממות והתפשטות המינים הפולשים ברחבי האגן הקטן והסגור הזה. ההבנות שלנו על המערכת המשתנה יכולות להועיל להבנת העתיד האקולוגי בשאר הים התיכון, ולאפשר להיערך טוב יותר לשינויים אלה, גם מבחינת שמירת טבע וגם מבחינת התאמות נדרשות.

רשימת מקורות

1. רילוב, ג. & גיא-חיים, ת. הוד הים: יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל (עורכת נגה סטמבלר) 145-168 (העמותה הישראלי למדעי הימים, 2014).
2. Rockström, J. *et al.* Safe and just Earth system boundaries. *Nature*, 1-10 (2023).
3. Richardson, K. *et al.* Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci. Adv.* **9**, eadh2458, doi: doi: 10.1126/sciadv.adh2458 (2023).
4. חרות, ב. וחובריו. תוכנית הניטור הלאומי בים התיכון לשנת 2022. ניטור זיהום ים H25/2023. דוח חיא"ל (2023).
5. Rilov, G., Peleg, O., Guy-Haim, T. & Yeruham, E. Community dynamics and ecological shifts on Mediterranean vermetid reefs. *Mar. Environ. Res.* **160**, doi: 10.1016/j.marenvres.2020.(2020) 105045.
6. Rilov, G., David, N., Guy-Haim, T., Arav, R. & Filin, S. Sea level rise can severely reduce biodiversity and community net production on rocky shores *Sci. Total Environ.* **791**, 148377, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148377 Get rights and content. (2021).
7. Garrabou, J. *et al.* Marine heatwaves drive recurrent mass mortalities in the Mediterranean Sea. *Global Change Biol.* **18**, 5708-5725, doi: https://doi.org/10.1111/gcb.16301 (2022).
8. Zamir, R., Alpert, P. & Rilov, G. Increase in weather patterns generating extreme desiccation events: implications for Mediterranean rocky shore ecosystems. *Estuaries and Coasts* **41**, 1868–1884, doi: 10.1007/s12237-018-0408-5 (2018).
9. Frid, O., Lazarus, M., Malamud, S., Belmaker, J. & Yahel, R. Effects of marine protected areas on fish communities in a hotspot of climate change and invasion. *Mediterr. Mar. Sci.*, 157-190 (2021).

10. Rilov, G. *et al.* Alien turf: overfishing, overgrazing and invader domination in southeastern Levant reef ecosystems. *Aquat .Conserv.: Mar. Freshwat. Ecosyst.* **28**, 351-369, doi: 10.1002/aqc.2862 (2018).
11. Ohayon, S., Granot, I. & Belmaker, J. A meta-analysis reveals edge effects within marine protected areas. *Nat. Ecol. Evol.* **5**, 1301-1308 (2021).
12. Soto, I. *et al.* Taming the terminological tempest in invasion science. *Biol. Rev.* doi: https://doi.org/10.1111/brv.13071 (2024).
13. Galil, B. S. *et al.* Double trouble': the expansion of the Suez Canal and marine bioinvasions in the Mediterranean Sea. *Biol. Invasions* **17**, 973-976 (2015).
14. Parravicini, V., Azzurro, E., Kulbicki, M. & Belmaker, J. Niche shift can impair the ability to predict invasion risk in the marine realm: an illustration using Mediterranean fish invaders. *Ecol. Lett.* **18**, 246-253 (2015).
15. Edelist, D., Rilov, G., Golani, D., Carlton, J. & Spanier, E. Restructuring the Sea: profound shifts in the world's most invaded marine ecosystem. *Divers. Distrib.* **19**, 69-77, doi: DOI: 10.1111/ddi.12002 (2013).
16. Rilov, G. Multi-species collapses at the warm edge of a warming sea. *Sci. Rep.* **6, 36897**, doi: 10.1038/srep36897 (2016).
17. Goren, M. & Galil, B. S. Fish biodiversity in the vermetid reef of Shiqmona (Israel). *Marine Ecology-Pubblicazioni Della Stazione Zoologica Di Napoli I* **22**, 369-378 (2001).
18. Vergés, A. *et al.* Tropical rabbitfish and the deforestation of a warming temperate sea. *J. Ecol.* **102**, 1518-1527 (2014).
19. Sala, E., Kizilkaya, Z., Yildirim, D. & Ballesteros, E. Alien marine fishes deplete algal biomass in the eastern Mediterranean. *PLoS ONE* **6**, doi: 10.1371/journal.pone.0017356 (2011).
20. Yeruham, E., Shpigel, M., Abelson, A. & Rilov, G. Ocean warming and tropical invaders erode the performance of a key herbivore. *Ecology* **101**, e02925, doi: 10.1002/ecy.2925 (2020).
21. Yeruham, E ,.Rilov, G., Shpigel, M. & Abelson, A. Collapse of the echinoid *Paracentrotus lividus* populations in the Eastern Mediterranean - result of climate change? *Sci. Rep.* **5**, 13479, doi: 10.1038/srep13479 (2015).
22. Pickholtz, R. S., Kiflawi, M., Friedlander, A. M. & Belmaker, J. Habitat utilization by an invasive herbivorous fish (Siganus rivulatus) in its native and invaded range. *Biol. Invasions* **20**, 3499-3512 (2018).
23. Diga, R. *et al.* Invading bivalves replaced native Mediterranean bivalves, with little effect on the local benthic community. *Biol. Invasions* **25**, 1441-1459 (2023).

23. Diga, R. *et al.* Invading bivalves replaced native Mediterranean bivalves, with little effect on the local benthic community. *Biol. Invasions* **25**, 1441-1459 (2023).
24. Bottacini, D. *et al.* Lionfish (*Pterois miles*) in the Mediterranean Sea: a review of the available knowledge with an update on the invasion front. *NeoBiota* **92**, 233-257 (2024).
25. Albins, M. A. Invasive Pacific lionfish *Pterois volitans* reduce abundance and species richness of native Bahamian coral-reef fishes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **522**, 231-243 (2015).
26. Huseyinoglu, M. *et al.* Assisted recovery of mediterranean native fish species by removal of two established invasive alien species, *Pterois miles* and *Diadema setosum*. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **304**, 108826 (2024).
27. Savva, I. *et al.* An underwater clash of spears: Public engagement in Mediterranean lionfish control efforts. *Aquat. Conserv.: Mar. Freshwat. Ecosyst.* **34**, e4104 (2024).
28. Zirler, R. *et al.* Gaining a (tube) foothold-trends and status following two decades of the long-spined echinoid *Diadema setosum* (Leske, 1778) invasion to the Mediterranean Sea. *Front. Mar. Sci.* **10**, 970, doi: 10.3389/fmars.2023.1152584 (2023).
29. Christidis, G. *et al.* Another One Bites the Net: Assessing the economic impacts of *Lagocephalus sceleratus* on small-scale fisheries in Greece. *Fishes* **9**, 104 (2024).
30. Israel, A. & Einav, R. Alien seaweeds from the Levant basin (Eastern Mediterranean Sea), with emphasis to the Israeli shores. *Isr. J. Plant Sci.* **64**, 99-110 (2017).
31. Peleg, O., Guy-Haim, T., Yeruham, E., Silverman, J. & Rilov, G. Tropicalisation may invert trophic state and carbon budget of shallow temperate rocky reefs. *J. Ecol.* **108**, 884-854, doi: 10.1111/1365-2745.13329 (2020).
32. Mulas, M., Silverman, J., Guy-Haim, T., Noé, S. & Rilov, G. High climate vulnerably of the Levantine endemic and endangered habitat-forming macroalga ,Gongolaria rayssiae: implications for reef carbon budget. *Front. Mar. Sci.* **9**, 1447, doi: 10.3389/fmars.2022.862332 (2022).
33. Guy-Haim, T. *et al.* The carbon turnover response to thermal stress of a dominant coralline alga on the fast warming Levant coast. *Limnol. Oceanogr.* **61**, 1120-1133 (2016).
34. Amsalem, E. & Rilov, G. High thermal plasticity, and vulnerability, in extreme environments at the warm distributional edge: The case of a tidepool shrimp. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **545**, 151641 (2021).
35. Rilov, G., Klein, L., Iluz, D., Dubinsky, Z. & Guy-Haim, T. Last snail standing? superior thermal resilience of an alien tropical intertidal gastropod over natives in an ocean-warming hotspot. *Biol. Invasions*, 1-17 (2022).
36. Guy-Haim, T. *et al.* Epiphytes provide micro-scale refuge from ocean acidification. *Mar. Environ. Res.* 105093 (2020).

37. Herut, B. *et al.* Tar pollution event (2021) at the Southeastern Levantine oligotrophic basin, short-term impacts and operational oceanography perspectives. *Mar. Pollut. Bull.* **198**, 115892 (2024).
38. Rilov, G. *et al.* A fast-moving target: achieving marine conservation goals under shifting climate and policies. *Ecol. Appl.* **30**, e02009, doi: 10.1002/eap.2009 (2020).
39. Rilov, G. *et al.* Adaptive marine conservation planning in the face of climate change: What can we learn from physiological, ecological and genetic studies? *Global Ecol. Cons.* **17**, e00566, doi: doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00566 (2019).

27 הופעה מחודשת של החילזון צינוריר בונה (*Dendropoma anguliferum*) על טבלאות הגידוד באזור חוף הכרמל

אורית ברנע[1], מיכל לידור-נעים[1], רמי צדוק[2], רות יהל[3], אריאל קושמרו[1]

[1] המחלקה להנדסת ביוטכנולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון
[2] תחנת מוריס קאהן לחקר הים, בית הספר למדעי הים ע"ש ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה
[3] רשות הטבע והגנים, חטיבת המדע

oritbar14@gmail.com, liddornm@post.bgu.ac.il, rami.tsadok@gmail.com, ruthy@npa.org.il, arielkus@bgu.ac.il

תקציר

סקר ויזואלי שנערך בסוף שנת 2020 ותחילת שנת 2021 לאורך שולי טבלאות גידוד באזור חוף הכרמל מראה נוכחות מחודשת של צברים של החילזון *Danguliferum anguliferum*, לאחר שבמשך כ-3 עשורים דווח על ירידה חדה במספר הצברים החיים של החילזון עד כדי חשש להיכחדותו. במהלך הסקר תועדו 195 צברים חיים של החילזון לאורך קו סקר מצטבר באורך 6,120 מטרים. רוב הצברים שתועדו היו בקטרים בטווח גדלים של 5-20 ס"מ והצברים הגדולים ביותר תועדו בטבלת הגידוד בצד הצפוני של תל נאמי בסמוך לנווה ים.

רצפי DNA מדוגמאות רקמה שנלקחו מ-10 צברים במיקומים שונים נמצאו דומים ברמה גבוהה מאוד (99-100%) לרצפים שמקורם בחלזונות מדרום לבנון שמשתייכים למין *D. anguliferum* המוכר כמין המקומי באגן המזרחי של הים התיכון ואחד מארבעה מינים חבויים שזוהו בעבר כמין יחיד *D. petraeum*.

מבוא

טבלאות הגידוד הינן משטחי סלע המצויים בקו החוף או במרחק עשרות מטרים ממנו והינן תוצר משולב של מצע סלעי טבעי ובנייה ביוגנית (שונית ורמטידים).

שוניות הוורמטידים נחשבות כמבנים ביוגניים מהחשובים ביותר בסביבת הים התיכון ובעולם כולו[1,2] והן נוצרות על-ידי שני מיני חלזונות ממשפחת ה-Vermetidae: צינוריר בונה (*Dendropoma petraeum*) ושלשולן משולש (*Vermetus triquetrus*), בשילוב עם אצות גירניות *Neogoniolithon brassica-florida* שמצויות ביניהם. אחד המבנים הייחודיים שנוצר על-ידי הצינוריר (בשילוב עם השלשולן והאצה הגירנית) הינו מבנה הכרכוב (מבנה מוגבה בשולי טבלת הגידוד)[3]. הכרכוב מאכלס בתוכו מגוון גדול של מיני בעלי חיים נוספים ואצות, ומאפשר יצירת אגן רדוד האוחז מים במרכז הטבלה. האגן מקטין את סכנת ההתייבשות של המינים החיים על פני הטבלה, ומשנה את משטר הזרימה ואת שיקוע החול (sedimentation) על פניה[4]. שונית הוורמטידים מהווה חלק בלתי נפרד מטבלאות הגידוד ותרומתו המשמעותית של הצינוריר הבונה לבנייה הביוגנית זיכתה אותו בתואר מהנדס סביבה Ecosystem Engineer[5,6,7]. טבלאות גידוד "בריאות" נמצאות בשיווי משקל דינמי של תהליך הבנייה ותהליכי בליה פיזית, ויוצרות בית גידול מורכב, ייחודי ועשיר באזור הכרית[8,9].

לאורך קו החוף הים תיכוני של ישראל מופיעות טבלאות גידוד מראש הנקרה שבצפון, דרך אכזיב, שבי ציון, עכו, באזור חוף הכרמל (שקמונה, אזור עתלית, שמורת הבונים, נחשולים, דור, שדות ים), מכמורת, באזור יפו (גבעת עליה) ובת ים והטבלאות הדרומיות ביותר נמצאות בפלמחים.

מספר מחקרים שנערכו בשנים האחרונות ועסקו במגוון הגנטי ומאפייני הרבייה של הצינוריר הבונה[10,6,11], הראו באופן ברור כי המין *Dendropoma petraeum*, שנחשב בעבר כמין יחיד ואנדמי לאזורים החמים ביותר של הים התיכון הינו למעשה קבוצת מינים שמכילה 4 "מינים חבויים" שנבדלים בתפוצתם הגיאוגרפית בים התיכון לאורך ציר מערב-מזרח, עם התאמה מלאה לאגני המשנה של הים התיכון.

ההבדלים הגנטיים שנמצאו הובילו למחקר נוסף שבחן הימצאות מאפיינים פנוטיפיים, במטרה לאפשר את הגדרתם של המינים הנ"ל[6]. תוצאות מחקר זה הובילו להגדרתם של שלושה מינים: *Dendropoma lebeche* (Templado, Richter & Calvo, 2016) הייחודי למערב הים התיכון, *Dendropoma cristatum* (Biondi, 1857) הייחודי לאזור סיציליה והים הטירני, *Dendropoma anguliferum* (Monterosato, 1878) הייחודי לאגן הלבנט והוא המין שנמצא בטבלאות הגידוד בישראל. מין נוסף, הייחודי לאגן האיוני-איגאי, עדיין לא הוגדר באופן רשמי[6].

מנגנון הרבייה של הצינוריר הבונה מתאפיין בהדגרה של הלרוות בתוך גוף הבוגר ושחרורן לסביבה כשהן בעלות יכולת תנועה מוגבלת ביותר[12]. הלרוות זוחלות ומתיישבות בקרבת צבר הבוגרים ולכן כמעט לא קיימת אפשרות לגיוס לרוות ממקומות מרוחקים. את הטריגר להתיישבות מספקת ככל הנראה האצה *Neogolionithon brassica-florida* שמשמשת גם כ"דבק" בין קונכיות החלזונות[13].

קיימות עדויות מחקריות לכך שבשנות ה-60 וה-70 של המאה ה-20, שוניות הוורמטידים שגשגו לאורך חופי הארץ[3,14]. יש לציין כי בתקופה זו דווח על צברים חיים של צינוריר בונה שתפסו שטח של כ-3% מאזור הכרכוב ושגודלם השתנה באופן עונתי[14]. תצפיות ראשונות שמעידות על הידרדרות במצב האוכלוסייה של הצינוריר הבונה מתועדות משנות ה-90 של המאה הקודמת, אז, על-פי Rilov et al. (2004)[15] נצפה קיטוע באופן ההופעה של החילזון לאורך חופי ישראל. על-פי גליל וגורן (2013)[2], בשנים אלה ניתן היה למצוא צברי צינורירים חיים רק בטבלאות הגידוד של דור ושקמונה אך ככל הנראה היו גם צברים חיים באתרים נוספים כמו בשדות ים (צדוק, מידע שלא פורסם). רילוב (2014)[5] מדווח כי משנת 2009 ועד 2014 חלה ירידה דרסטית בהופעת המין ורק פרטים בודדים נמצאו חיים. יתרה מכך, דווח כי ברבות מטבלאות הגידוד גובה הכרכובים נמוך ביותר, ככל הנראה כתוצאה משחיקה ו/או העדר בנייה ביוגנית[5]. ב-2013 דיווחו גליל וגורן כי מראשית שנות ה-2000 כרכובי השוניות כוסו כמעט כליל על-ידי אצות ובמעקב שנערך אחר אוכלוסיית הצינוריר הבונה באביב 2012 בשיא עונת הרבייה, לא נמצא ולו פרט יחיד של צינוריר בכרכובי השונית[2]. חיזוק לדיווחים הנ"ל התקבל מסקר ישראלי-איטלקי שנערך במסגרת פרויקט MedSeA ובו נבדקה שכיחות הופעת החלזונות ב-6 אתרים לאורך החוף הישראלי[16]. מדעני הסקר מצאו כי הצינוריר כמעט נעלם כליל מטבלאות הגידוד וכי את מקומו תפסו בהצלחה האצות הגירניות מהמין *N. brassica-florida*[16]. Milazzo וחובריו מדווחים במאמרם (2016)[13] כי באתרים רבים לאורך החוף הישראלי הכרכוב בשוליים החיצוניים של טבלאות הגידוד נשחק לחלוטין כתוצאה מתמותת החלזונות מהמין צינוריר בונה וכי שטחים נרחבים של טבלאות גידוד נפגעו. רילוב וחובריו (2020)[17] שערכו ניטור של חברת החי והצומח בטבלאות הגידוד באחד-עשר אתרים (ביניהם שניים שבהם עוסק המחקר הנוכחי)

לאורך החוף הים תיכוני הישראלי במשך 8 שנים דיווחו על נדירות קיצונית של הצינוריר לאורך כל תקופת המחקר, עם ממצאים נקודתיים של צברים חיים באכזיב ובשמורת הבונים בשנים 14-2013 (נצפו צברים קטנים בודדים). בנוסף, Badreddine וחובריה (2019)[18] שערכו מחקר מקיף על טבלאות גידוד בחמישה אתרים בלבנון, דיווחו על היעלמות הצינוריר בארבעה אתרים והימצאות צברים חיים באתר אחד בלבד.

הסיבות לירידות החדות בהופעת הצינוריר הבונה בטבלאות הגידוד באגן הלבנט ובמדינות נוספות בים התיכון אינן ברורות. הועלו מספר סיבות אפשריות: שינויי אקלים הגורמים לשינויים בתנאים הא-ביוטיים בבית הגידול[17,19], השפעות אנתרופוגניות שונות כדוגמת פגיעה בבתי גידול חופיים[18], זיהומים שונים[20], החמצת מי הים[18] ותחרות עם מינים פולשים[13].

נדירותם של צברים חיים של הצינוריר הבונה בישראל בעשורים האחרונים והחשש להמשך קיומו של המין הביאה, בשנת 2015, לכינוס ועדת מומחים שעסקה בהיבטים השונים של התופעה (סיבות אפשריות, השלכות ואמצעים לאישוש האוכלוסייה)[21].

מטרת המחקר הנוכחי הייתה לאסוף מידע עדכני על נוכחות חלזונות ממשפחת הצינורירים בתא שטח שהוגדר מראש (אזור חוף הכרמל) בקו החוף הים תיכוני הישראלי, אזור הידוע ששימש כבית גידול לחלזונות אלה.

חומרים ושיטות

הסקר הוויזואלי בוצע ביוזמת רשות הטבע והגנים בתחומי שמורת הבונים ובטווח של כ-1 ק"מ מדרום ומצפון לה בחודשים דצמבר 2020 ופברואר 2021. הנקודה הדרומית ביותר בסקר הייתה טבלת הגידוד המנותקת מהחוף שנמצאת מול מלון נחשולים (32.6142°N, 34.91535°E) והנקודה הצפונית ביותר מוקמה בטבלת הגידוד של תל-נאמי, דרומית לעתלית, (32.6609°N, 34.9255°E). השוליים החיצוניים של טבלאות הגידוד בתחומי אזור הסקר נסרקו באופן רציף לגילוי צברים של חלזונות מהסוג צינוריר (איור 1). החלק הדרומי של הסקר (מסומן באות "S" באיור 1) כלל רצועה שאורכה המצטבר 3,792 מטרים. החלק האמצעי של הסקר (מסומן באות "M" באיור 1) כלל רצועה שאורכה המצטבר 1,600 מטרים והחלק הצפוני של הסקר (מסומן באות "N" באיור 1) כלל רצועה שאורכה המצטבר 728 מטרים. כל הצברים שנמצאו, צולמו עם קנה-מידה וקוטלגו כצברים חיים לאחר בחינה של פתחי הקונכיות ואיתור מכסי קונכיות (Operculum) בשטח או בבחינת התמונות שנעשתה מאוחר יותר. המספר הכללי של צברי חלזונות חיים תועד בכל אזור (איור 1).

דיגום

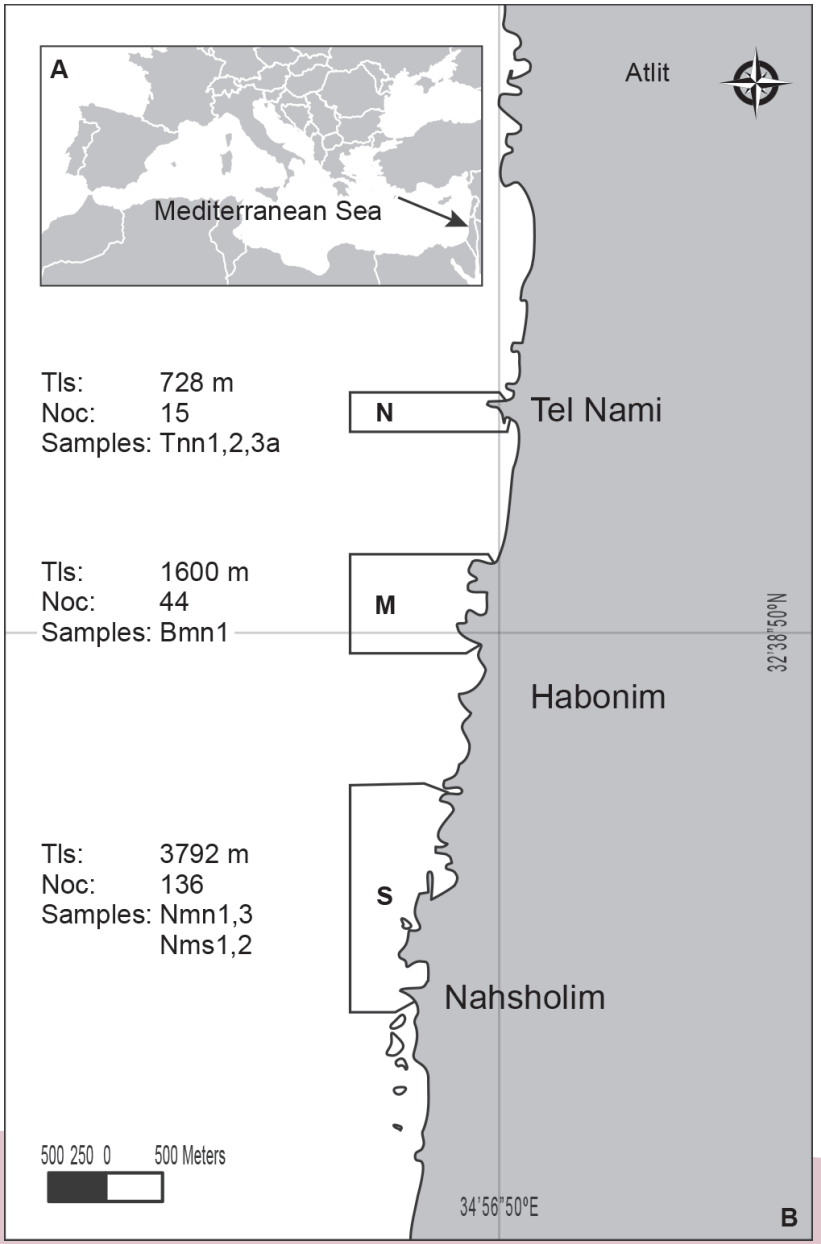
עשר דגימות נאספו ונלקחו לאנליזה מולקולרית בתאריכים 9 ו-16 בנובמבר 2021. הדגימות הכילו מספר קונכיות בשטח של 2x2 ס"מ אשר הוסרו באמצעות פטיש ואזמל והוקפאו בטמפרטורה של 20°C במבחנות מסומנות. בטרם הפקת ה-DNA, הופשרו הדגימות ורקמת החלזונות הוסרה והופרדה מהקונכייה באמצעות פינצטה ובעזרת זכוכית מגדלת.

הפקה והגברת DNA

הפקת ה-DNA מרקמת החלזונות בוצעה באמצעות ערכת הפקה PowerSoil DNA Isolation Kit (QIAGEN ,Germany). לפי הוראות היצרן. בשלב הבא בוצע תהליך PCR להגברת הגנים המיטוכונדריאליים: 16S rRNA ו-Cytochrome Oxidase subunit I באמצעות מכשיר Biometra Tone thermo-cycler PCR (Biometra, Göttingen, Germany). הפריימרים ותנאי התהליך שבהם נעשה שימוש היו זהים למתואר במאמרם של Calvo et al. (2009, 2015)[10,22]. הפריימרים שבהם נעשה שימוש היו: 16sar-L-myt[23], 16SBR[24], LCO1490[25], COI-H[26]. תוצרי ה-PCR עברו ריצוף בשיטת Sanger באמצעות מכשיר Genetic Biosystems/Hitachi) Applied Analyzer 3500). רצפי ה-DNA שהתקבלו הופקדו ב-GeneBank ומספרי הגישה שלהם מופיעים בטבלה 1.

אנליזה פילוגנטית

רצפים באיכות טובה עברו "יישור" Alignment באמצעות אלגוריתם ClustelX ואנליזה מסוג Maximum Likelihood בוצעה באמצעות תוכנת MEGA-X גרסה 10.1.8[27]. העצים הפילוגנטיים יוצרו באמצעות תוכנה גרפית מסוג iTOL גרסה 6.6[28]. העצים הפילוגנטיים מכילים רצפים מהמחקר הנוכחי בתוספת רצפים נוספים שמקורם במאמרם של Calvo et al., 2015[22] ונמצאו ב-GeneBank.



איור 1. א. מיקום אזור הסקר בים התיכון. ב. הגדלה של אזור חוף הכרמל שבו בוצע הסקר: החלק הדרומי של הסקר (מסומן באות "S" באיור 1) כלל רצועה שאורכה המצטבר 3792 מטרים. החלק האמצעי של הסקר (מסומן באות "M" באיור 1) כלל רצועה שאורכה המצטבר 1600 מטרים והחלק הצפוני של הסקר (מסומן באות "N" באיור 1) כלל רצועה שאורכה המצטבר 728 מטרים. אורך קו הדיגום Tls = Total length surveyed, מספר הצברים Noc = Number of clusters. שמות הדגימות שנאספו בכל אתר ושימשו לאנליזה המולקולרית מוצגים ליד הכיתוב "Samples" (דוגמאות).

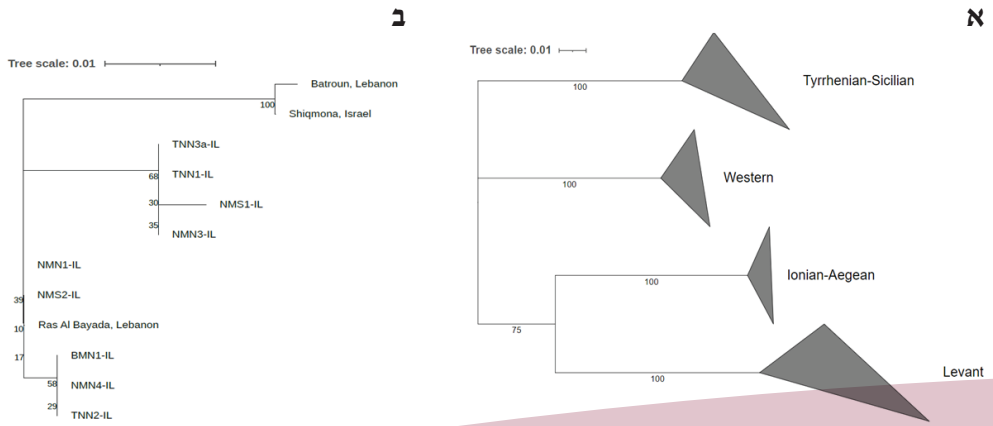
איור 2. טבלת הגידוד בתל נאמי: (א) מבט כללי על המפנה הצפוני של טבלת הגידוד. (ב) שולי הטבלה המוגבהים (כרכוב) עם מספר צברים של *D. anguliferum*. (ג) צבר אופייני של *D. anguliferum* מוקף בסלע חשוף וחלזונות ממשפחת הצלחיות (Patellidae).

איור 3. הצבר הענק של *D. anguliferum* שנמצא בחלק האחורי של טבלת הגידוד בתל נאמי, מתחת למדף הסלע. (א) מבט כללי על המקום שבו נמצא הצבר, האזור המוגבה מעל פני המים מתחת למדף הסלע הבולט שמשתרע על פני 3.5 מטרים. (ב) מבט מקרוב על הצבר של *D. anguliferum*, פתחי הקונכיות בולטים על הרקע הבהיר של האצה הגירנית. (ג) תקריב על פתחי הקונכיות, ניתן לראות את מכסה הקונכייה. (ד) פרטים בודדים של *D. anguliferum* בודדים שנצפו על סלע חשוף בקרבת הצבר הענק.

תוצאות ודיון

במהלך הסקר הוויזואלי תועדו 195 צברים חיים של החילזון צינוריר בונה (*D. anguliferum*) לאורך קו סקר מצטבר באורך 6,120 מטרים: 136 צברים תועדו באזור הדרומי (S), 44 צברים תועדו באזור האמצעי (M) ו-15 צברים באזור הצפוני (N) (ראה איור 1). כל הצברים אותרו בקלות מכיוון שבסביבתם משטח הסלע היה מנוקה מאצות ונצפתה נוכחות של חלזונות ממשפחת הצלחיות (Patellidae) (ראה איור 2). רוב הצברים שתועדו היו בקטרים בטווח גדלים של 5-20 ס"מ והקוטר הממוצע היה 8.34±3.94 ס"מ (n=116). הצברים הגדולים ביותר תועדו בטבלת הגידוד בצד הצפוני של תל נאמי (איור 2). בנוסף, בעמדה אחורית של טבלת הגידוד (מתחת למדף סלע) בצד הצפוני של תל נאמי, תועד צבר ענק של *D. anguliferum* שלא נמצא באזור הכרכוב והוא נפרש על רצועה שרוחבה כ-50 ס"מ ואורכה 390 ס"מ איור 3 א, ב, ג. יש לציין כי באזור שבו נמצא הצבר הענק טבלת הגידוד צרה מאוד ורוחבה נע בין 1.5-3 מטרים. בנוסף, בסמוך לחלק המזרחי של הצבר הענק נצפו פרטים בודדים של צינוריר בונה על סלע חשוף ונראה כי אלה חלזונות שהתיישבו לאחרונה איור 3 ד'.

רצפי DNA מהמחקר הנוכחי הראו 96%-100% דימיון למין *D. anguliferum* שמהווה את אחד מארבעת המינים החבויים בקומפלקס המינים של *D. petraeum* והוגדר במחקרם של Templado et al. 2016[6] כמין שמאכלס את האגן המזרחי של הים התיכון. באיור 4 ניתן לראות את העץ הפילוגנטי שכולל את רצפי ה-16S rRNA. ניתן לראות כי הרצפים מהמחקר הנוכחי מראים אחוזי דמיון של 99%-100% לרצפים שמקורם בחלזונות מדרום לבנון (Ras Al Bayada JQ672946). העצים הפילוגנטיים הכוללים רצפים חלקיים של הגן המיטוכונדריאלי COI 1 אינם מוצגים. העצים מבוססים על 3 רצפים מהמחקר הנוכחי (ראה טבלה 1) ותומכים בתוצאות שהתקבלו מהעץ המוצג באיור 4. רצפי ה-COI 1 הראו 99% דמיון לרצפים שמקורם בחלזונות מדרום לבנון (Ras Al Bayada EU495075).



איור 4. עצים פילוגנטיים לא מושרשים המבוססים על רצפי DNA של הגן הגן 16S rRNA. א. עץ פילוגנטי המבוסס על רצפים מהמחקר הנוכחי ומרצפים נוספים שמקורם בדגימות מהים התיכון ממחקרם של Calvo et al., 2015[22]. המשולשים מאגדים רצפים קרובים מאותה קבוצה. ב. עץ פילוגנטי של רצפים מהאגן המזרחי של הים התיכון וכולל רצפים מהמחקר הנוכחי ורצפים נוספים ממחקרם של Calvo et al., 2015[22].

תוצאות הסקר הוויזואלי בשילוב עם תוצאות האנליזה המולקולרית שנערכו במסגרת המחקר הנוכחי, מדגימות נוכחות מחודשת של צברי חלזונות מהמין *D. anguliferum* בטבלאות הגידוד של אזור חוף הכרמל (מנחשולים בדרום ועד תל נאמי בצפון אזור הסקר) ברצועת החוף הצפונית של ישראל. בהתייחס למידע אודות דפוסי ההופעה של צברים של צינוריר בונה שנאסף באזור מכמורת בראשית שנות השבעים של המאה שעברה ופורסם על-ידי Safriel and Lipkin (1971) לפיו, צברים חיים של חלזונות מהמין צינוריר בונה היוו כ-3% משטח הכרכובים[14], אנו סבורים כי ממצאי מחקרנו הנוכחי עשויים לרמז על תהליך התאוששות מתמשך של הצינוריר הבונה באזור הסקר.

בהתייחס למאפייני הרבייה הייחודיים של *D. anguliferum*, התפוצה המוגבלת של הלרוות[12] והדמיון הרב שהודגם בין רצפי ה-DNA (של הגנים המיטוכונדריאליים 16S rDNA ו-COI 1) שבודדו מהחלזונות שנדגמו בחוף הכרמל לבין חלזונות מלבנון שמשתייכים למין *D. anguliferum*, ניתן לשער כי צברי הצינוריר שהתגלו הינם שרידים של אוכלוסייה יציבה יותר שהתקיימה בטבלאות הגידוד באזור זה וצפונה משם והידלדלה מסיבות שונות. במהלך העשור האחרון הועלתה הסברה כי לאינטראקציות עם מינים פולשים עלולה להיות השפעה שלילית על הצינוריר הבונה במקומות שונים[29] וגם בישראל[13]. אחד המינים הפולשים הדומיננטיים בטבלאות הגידוד של ישראל הינו מין הצדפה *Brachidontes pharaonis* (P. Fischer, 1878) שמוכר כאחד המינים הראשונים שהיגר מים סוף (מהגר לספסי)[30] ותועד לראשונה בנמל פורט סעיד במצרים רק שבע שנים לאחר פתיחת תעלת סואץ[31]. מאז, מין זה נמצא כמאכלס מוצלח של מצעים קשים באזור החופי של הים התיכון הישראלי ואף דחק לחלוטין את המין המקומי *Mytilaster minimus* (Poli, 1795)[32]. משטחים צפופים של *B. pharaonis* נצפו ותועדו לאורך קו החוף הים תיכוני הישראלי[15] וגם בשמורת הבונים (ברנע ויהל, מידע שלא פורסם) בראשית שנות ה-2000 ועד שנת 2016. Milazzo וחובריו (2016)[13] שחקרו את תפוצת הצינוריר הבונה *D. cristatum* באתרים שונים ליד פלרמו שבסיציליה דיווחו על השפעות חמורות של *B. pharaonis* על הצפיפות של הצינורירים ועל הכיסוי של האצה הגירנית *N. brassica-florida*. הם העלו את הסברה שהצדפות הפולשות מהוות סכנה ישירה לשוניות הוורמטידים[33]. לפיכך, בהתייחס לאירוע חריג של התמוטטות אוכלוסיית הבוציות באתרים רבים לאורך קו החוף הישראלי שאירעה בשנת 2016 [17,34,35] ניתן לשער שההיעלמות הפתאומית של הצדפות, תרמה להתחלת תהליך התאוששות של הצינוריר הבונה באזור הסקר בחוף הכרמל. ייתכן כי צברים קטנים של חלזונות, שהצליחו לשרוד תחת מעטה צפוף של צדפות, הצליחו להתרבות והלרוות ששוחררו מצאו מקום חדש וזמין להתיישבות שהתפנה בעקבות היעלמות הבוציות.

טבלה 1. שמות הדגימות, מיקומן ומספרי הרצפים שהופקדו ב-GeneBank.

דוגמה	מיקום	מספר סידורי לגן 16S rRNA	מספר סידורי לגן COI
Nms1-IL, נחשולים דרום	32.61422° N, 34.91535° E	OR127150	
Nms2-IL, נחשולים דרום	32.61421° N, 34.91537° E	OR127183	OR185512
Nmn1-IL, נחשולים צפון	32.61559° N, 34.91573° E	OR127149	OR185513
Nmn2-IL, נחשולים צפון	32.61609° N, 34.91531° E	OR127184	
Nmn3-IL, נחשולים צפון	32.61669° N, 34.91530° E	OR127185	OR185555
Nmn4-IL, נחשולים צפון	32.61775° N, 34.91605° E	OR127186	
Tnn1-IL, תל נאמי צפון	32.66082° N, 34.92508° E	OR127187	
Tnn2-IL, תל נאמי	32.66090° N, 34.92519° E	OR127188	
Bmn1-IL, שמורת הבונים צפון	32.64674° N, 34.92229° E	OR127189	
Tnn3a-IL, תל נאמי צפון	32.66090° N, 34.92550° E	OR127190	

במחקר הנוכחי התגלו ותועדו 195 צברים חיים של *D. anguliferum* וביניהם צבר ייחודי וגדול מאוד שנמצא בטבלת הגידוד של תל-נאמי, שם גם נראו פרטים בודדים על סלע סמוך שככל הנראה מעידים על תהליך רבייה והתיישבות. למרות חשיבותם הרבה כמהנדסי סביבה ותרומתם הרבה כמעצבי בית הגידול של שונית הוורמטידים, ולמרות הדיווחים על ירידה חדה בנוכחותם, אוכלוסיית החלזונות ממין זה אינה מנוטרת באופן בלעדי המקיף את כל טבלאות הגידוד בארץ, אלא כמרכיב מניטור אוכלוסיית החי בטבלאות הגידוד באתרים בודדים[17,34]. יתרה מכך, המידע המולקולרי על מין זה בישראל מצומצם מאוד וכולל רצפי DNA מ-7 דגימות מאתר שקמונה[10,22] ו-10 דגימות מהמחקר הנוכחי מאזור חוף הכרמל. המחסור במידע, מקשה על הסקת מסקנות מהמחקר הנוכחי אך מדגיש את הצורך הדחוף בהכנת תוכנית ניטור לאומית למעקב תדיר אחר אוכלוסיית הצינוריר הבונה בכל טבלאות הגידוד לאורך קו החוף הים תיכוני הישראלי, כפי שהומלץ כבר בעבר[36].

סיכום

לאחר שלושה עשורים של ירידה חדה באוכלוסיית החלזונות מהסוג *Dendropoma* בישראל ודאגה אמיתית להמשך קיומה, מחקר זה מדגים את הופעתו המחודשת של המין *Dendropoma anguliferum* על טבלאות הגידוד בחוף הכרמל. במהלך הסקר נצפו ותועדו 195 צברים חיים של החלזונות ובאתר תל-נאמי תועד צבר ענק שהתפרש על 390 ס"מ בעמדה עורפית בטבלת הגידוד. גילויים של הצברים החיים באזור חוף הכרמל מהווה ממצא מעודד המחזק את הצורך במעקב פרטני וארוך טווח אחרי מין זה בכל טבלאות הגידוד לאורך חופי הים התיכון הישראלי.

רשימת מקורות

1. Chemello, R., Silenzi, S. Vermetid reefs in the Mediterranean Sea as archives of sea-level and surface temperature changes. *Chem. Ecol.* **27**, 121–127 (2011).
2. גליל, ב., ו- מ. גורן. שונית הצינורניים של בחוף הים התיכון של ישראל- השונית שאבדה. עמ' 112–119 ב- נ. סטמבלר, ת. לוטן, ב. גודמן, ו- א. ברמן-פרנק, עורכים. הוד הים יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל. העמותה הישראלית למדעי הימים (2013).
3. Safriel, U.N. Recent Vermetid formation on the Mediterranean shore of Israel. *Proc. Malacol. Soc. Lond.* **37**, 27-34 (1966).
4. רילוב, ג., גיא- חיים, ת. שוניות סלעיות בליטורל חופי הים התיכון הישראלי- אקוסיסטמה בשינוי פאזה. עמ' 120–138 ב- נ. סטמבלר, ת. לוטן, ב. גודמן, ו- א. ברמן-פרנק, עורכים. הוד הים יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל. העמותה הישראלית למדעי הימים, ישראל (2013).
5. רילוב, ג. שוניות סלעיות בים התיכון אוצרות הטבע החבויים של הים. עורך א. רוטשילד, חוברת מידע. (2014).
6. Templado, J., Richter, A., Calvo, M., Reef building Mediterranean vermetid gastropods: Disentangling the *Dendropoma petraeum* species complex. *Mediterr. Mar. Sci.* **17**, 13-31 (2016).
7. La Marca, E. C., Catania, V., Quatrini, P., Milazzo, M., Chemello, R., Settlement performance of the Mediterranean reef-builders *Dendropoma cristatum* (Biondi 1859) in response to natural bacterial films. *Mar. Environ. Res.* **137**, 149-157. 10.1016/j.marenvres.2018.03.005 (2018).
8. Safriel, U. N. The role of vermetid gastropods in the formation of Mediterranean and Atlantic reefs. *Oecologia* **20**, 85–101 (1975).
9. Tzur, Y., and U. N. Safriel. Vermetid platforms as indicators of coastal movement. *Isr. J. Earth Sci.*124–127 (1978).
10. Calvo, M., Templado, J., Oliverio, M., Machordom, A. Hidden Mediterranean biodiversity: molecular evidence for a cryptic species complex within the reef building vermetid gastropod *Dendropoma petraeum* (Mollusca: Caenogastropoda). *Biol. J. Linn.* **96**, 898-912 (2009).
11. Usvyatsov, S., Galil, B.S. Comparison of reproductive characteristics among populations of Dendropoma petraeum (Mollusca: Caenogastropoda). An endemic Mediterranean reef-building gastropod. *J. Mar. Biol. UK.* **92**, 163-170 (2012).
12. Calvo, M., Templado, J., Penchaszadeh, P. E. Reproductive biology of the gregarious Mediterranean vermetid gastropod *Dendropoma petraeum*. *J. Mar. Biol. UK.* **78**, 525–549 (1998).
13. Milazzo, M., Fine, M., La Marca, E. C., Alessi, C., Chemello, R. Drawing the line at neglected marine ecosystems: Ecology of vermetid reefs in a changing ocean Pp. 1-23 in Marine Animal Forests. S. Rossi (Ed.). Springer International Publishing, Switzerland.(2016).

14. Lipkin, Y., Safriel, U. Intertidal zonation on rocky shores at Mikhmoret (Mediterranean, Israel). *J. Ecol.* **59**, 1-30 (1971).
15. Rilov, G., Benayahu, Y., Gasith, A. A prolonged lag in population outbreak of an invasive mussel: a shifting-habitat model. *Biol. Invasions*, **6**, 347-364 (2004).
16. Fine, M., Tsadok, R., Meron, D., Cohen, S., Milazzo, M. Environmental sensitivity of *Neogoniolithon brassica*-florida associated with vermetid reefs in the Mediterranean Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 74, 1074–1082 (2017).
17. Rilov, G., Peleg, O., Guy-Haim, T., Yeruham, E. Community dynamics and ecological shifts on Mediterranean vermetid reefs. *Mar. Environ. Res.* **160**, 105045 (2020).
18. Badreddine, A., Milazzo, M., Abboud-Abi Saab, M., Bitar, G., Mangialajo, L. Threatened biogenic formations of the Mediterranean: Current status and assessment of the vermetid reefs along the Lebanese coastline (Levant basin). *Ocean Coast. Manag.* **169**, 137-146 (2019).
19. Rilov, G. Multi-species collapses at the warm edge of a warming sea. *Sci. Rep.* **6**, 36897 (2016).
20. Di Franco, A. et al. Do small marinas drive habitat specific impacts? A case study from Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.* **62**, 926-933 (2011).
21. ברוקוביץ, ע. וחובריו טבלאות הגידוד בישראל: תמונת מצב, חשיבות סביבתית ודרכי פעולה אפשריות לשיקום טרם היעלמותן. סיכום ותובנות של ועדת מומחים. האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה. 32 עמודים (2015).
22. Calvo, M., Alda, F., Oliverio, M., Templado, J., Machordom, A. Surviving the Messinian Salinity Crisis? Divergence patterns in the genus *Dendropoma* (Gastropoda: Vermetidae) in the Mediterranean Sea. *Mol. Phylogenet. Evol. **91**, 17-26 (2015).*
23. Lydeard, C., Mulvey, M., Davis, G. M. Molecular systematics and evolution of reproductive traits of North American freshwater unionacean mussels (Mollusca: Bivalvia) as inferred from 16S rRNA gene sequences. *Philos. Trans. R. Soc. B.* **351**, 1593-1603 (1996).
24. Palumbi, S. et al. The simple fool's guide to PCR, version 2.0. Department of Zoology and Kewalo Marine Laboratory, University of Hawaii, Honolulu. 45 pp (2002).
25. Folmer, O., Black, M., Hoeh, W., Lutz, R., Vrijenhoek, R. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Mol. Mar. Biol. Biotec.* **3**, 294-299 (1994).
26. Machordom, A., Araujo, R., Erpenbeck, D., Ramos, M. A. Phylogeography and Conservation Genetics of Endangered European Margaritiferidae (Bivalvia: Unionoidea). *Biol. J. Linn.* **78**, 235–252 (2003).
27. Kumar, S., Stecher, G. Li, M., Knyaz, C., Tamura, K. MEGA X: Molecular Evolutionary Genetics Analysis across Computing Platforms. *Mol. Biol. Evolution* **35**, 1547-49. 10.1093/molbev/msy096. (2018).

28. Ciccarelli, F. D. et al. Toward automatic reconstruction of a highly resolved tree of life. Science, **311**, 1283-1287. doi: 10.1126/science.1123061 (2006).
29. Franzitta, G. et al. Bridging the knowledge gap on the distribution and typology of vermetid bioconstructions along Maltese coastline: an updated assessment. *Mediterr. Mar. Sci.* **23**, 817-826 (2022).
30. Por, F. D. Lessepsian migration. The influx of Red Sea biota into the Mediterranean by way of Suez Canal. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 228 pp. (1978).
31. Fuchs Th. Die geologische Beschaffenheit der Landenge von Suez. Denkschriften der Kaiserkichen Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe, **38**, 25-42, pls. 1-3 (1878).
32. Rilov, G., Benayahu, Y., Gasith, A. A low abundance and skewed population structure of the whelk *Stramonita haemastoma* along the Israeli Mediterranean coast. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **218**, 189-202 (2001).
33. Milazzo, M. et al. Invasive mussels directly threaten intertidal vermetid reef: some evidence from a Sicilian MPA. In: Book of Abstracts. International InterMed Workshop; Mar 9-10; Palermo (2009).
34. רילוב, ג. תוכנית הניטור הלאומית של ישראל בים התיכון. דוח מדעי ל- 2016. חלק 2. ניטור המגוון הביולוגי פרק 5. ניטור חברות אקולוגיות בחוף הסלעי. דוח חיא"ל H48b/2017. עריכה איל רהב וברק חרות. (2017).
35. יהל, ר. ברנע, אורית וצדוק, ר. מידע שלא פורסם.
36. Galil, B. S. Going going gone: the loss of a reef building gastropod (Mollusca: Caenogastropoda: Vermetidae) in the southeast Mediterranean Sea. *Zool. Middle East* **59**, 179–182 (2013).

28 מיקסוזואה - קבוצה עתיקה שמצאה את מיקומה במערכת הצורבים

תמר לוטן

החוג לביולוגיה ימית, בית ספר למדעי הים, אוניברסיטת חיפה

lotant@univ.haifa.ac.il

תקציר

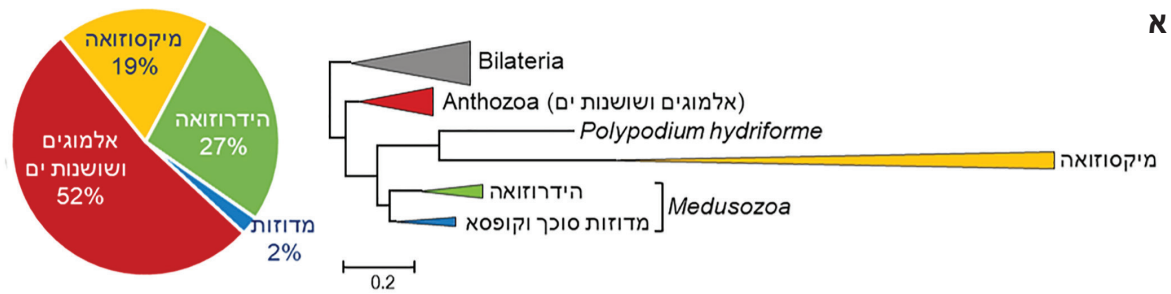
מיקסוזואה (Myxozoa) הינה קבוצה גדולה של למעלה מ-2400 טפילים מיקרוסקופיים הנפוצים בכל העולם בסביבה הימית ובמקווי מים מתוקים. יש להם מחזור חיים המורכב משני מאכסנים, האחד בעל חוליות (לרוב דג) והשני חסר חוליות (תולעים טבעתיות וחי טחביים). טפילי המיקסוזואה אינם יכולים לחיות מחוץ למאכסן והמעבר בין שלבי מחזור החיים נעשה על-ידי ספורות רב-תאיות. המיקסוזואה משויכת למערכת הצורבים, אבל במעבר האבולוציוני לחיי טפילות הפכו הטפילים ליצורים מיקרוסקופיים, מחוסרי רקמות כאשר התא היחיד שנשמר הינו תא הצריבה האופייני למערכת. בנוסף הם מאופיינים בגנום קטן שחסרים בו גנים רבים הקשורים לתהליכי התמיינות, להגנה בפני עקות ולתהליכים מטבוליים. ברמה אבולוציונית המיקסוזואה מעניינים במיוחד מאחר שהם מהטפילים הרב-תאיים הראשונים שהתפתחו בכדור הארץ. כמו כן, יכולת ההסתגלות של המיקסוזואה לסביבות מחיה שונות ומאכסנים רבים מצביעה על התאמתם הרבה לתנאי סביבה משתנים. בנוסף, מכיוון שטפילי המיקסוזואה מדביקים מגוון רחב של מיני דגים וגורמים למחלות ולתמותה, להבנת מנגנון ההדבקה והיחסים בין הטפיל למאכסן חשיבות רבה לתעשיית גידול הדגים ולשמירת אוכלוסיות הדגים בטבע.

מיקומה של המיקסוזואה בעץ האבולוציוני

מיקסוזואות זוהו לראשונה בתחילת המאה ה-19 כטפילים מיקרוסקופיים יוצרי ספורות בדגים, אבל שיוכם הפילוגנטי היה שנוי במחלוקת למעלה ממאה וחמישים שנה[1,2]. תחילה זוהו כיצורים אאוקריוטיים חד-תאיים שאינם בממלכת החי (פרוטוזואה) ואח"כ הוגדרו כקבוצה טקסונומית עצמאית, ורק בסוף המאה ה-20, בתחילת שנות ה-2000, הוכח כי אלו יצורים רב-תאיים (מטזואה)[3]. מחקרים פילוגנטיים ומציאת תאים הדומים לתאי הצריבה המאפיינים את מערכת הצורבים, מיקמו לבסוף את המיקסוזואה במערכת הצורבים כקבוצה אחות ל-Medusozoa (הכוללת את מחלקת מדוזות הסוכך, מדוזות הקופסה וההידרוזואה). לצד המיקסוזואה בעץ הפילוגנטי נמצא מין נוסף הקרוי *Polypodium hydriforme*, בעל מעמד משלו מקבוצת ה-Polypodiozoa, שהינו טפיל פקולטטיבי בעל יכולת קיום עצמאית גם ללא המאכסן (איור 1א)[4-6]. באנליזה הפילוגנטית ניתן גם לראות שלמיקסוזואה קצב התפתחות אבולוציוני מהיר ביחס לצורבים אחרים, תופעה שמאפיינת את "מרוץ החימוש" התמידי ביחסי טפיל-מאכסן[7].

בעבודות מולקולריות הוצע שהמיקסוזואה התפצלו ממערכת הצורבים כטפילים לפני כ-600 מיליון שנה[8]. כיום ידועים למעלה מ-2400 מינים של מיקסוזואה, המהווים כ-20% ממערכת הצורבים (איור 1ב)[9]. מרבית טפילי המיקסוזואה הינם ספציפיים לדג ולרקמת המטרה. כך, לעיתים ניתן למצוא מינים שונים של מיקסוזואה באותו פרט וברקמות שונות. בגלל ההדבקה הספציפית לרקמה ולמאכסן ההנחה היא שקיימים עוד מינים רבים שטרם זוהו וייתכן שבעתיד המיקסוזואה תהיה הקבוצה הדומיננטית במערכת הצורבים[3]. מספרם הגדול של טפילי המיקסוזואה בולט במיוחד לאור העובדה שבכל מערכת הצורבים ידועים בסה"כ עוד כ-10 מינים של טפילים, שלכולם שלב עצמאי המאפשר להם לחיות ללא המאכסן (טפילים פקולטטיבים)[10,11].

מבחינים בין שתי קבוצות עיקריות של מיקסוזואות: קבוצת ה-Myxosporea המכילה את רוב המינים וקבוצת ה-Malacosporea שמכילה כמה עשרות בודדות של מינים[12]. החלוקה הפנימית לקבוצות נוספות מורכבת ומתעדכנת לאורך השנים כתוצאה מריצופים של מינים חדשים ומאנליזות מולקולריות מדויקות יותר. הפרק הנוכחי יתמקד בעיקר בקבוצת- Myxosporea.



איור 1. המיקום הפילוגנטי של המיקסוזואה. א. עץ פילוגנטי המראה את המיקום היחסי של המיקסוזואה בתוך מערכת הצורבים והקשר שלה לבילטריה, מבוסס על נתונים שפורסמו ב-[13]. הקבוצה הקרובה ביותר למיקסוזואה מיוצגת על-ידי מין אחד הנקרא *Polypodium hydriforme*, טפיל של ביצי חדקן שיש לו גם שלב חיים עצמאי ללא תלות במאכסן. ב. תרשים המראה את האחוז היחסי של מיני המיקסוזואה בתוך מערכת הצורבים. האיור מבוסס על [1].

השפעת המעבר לטפילות על מבנה וגנום המיקסוזואה

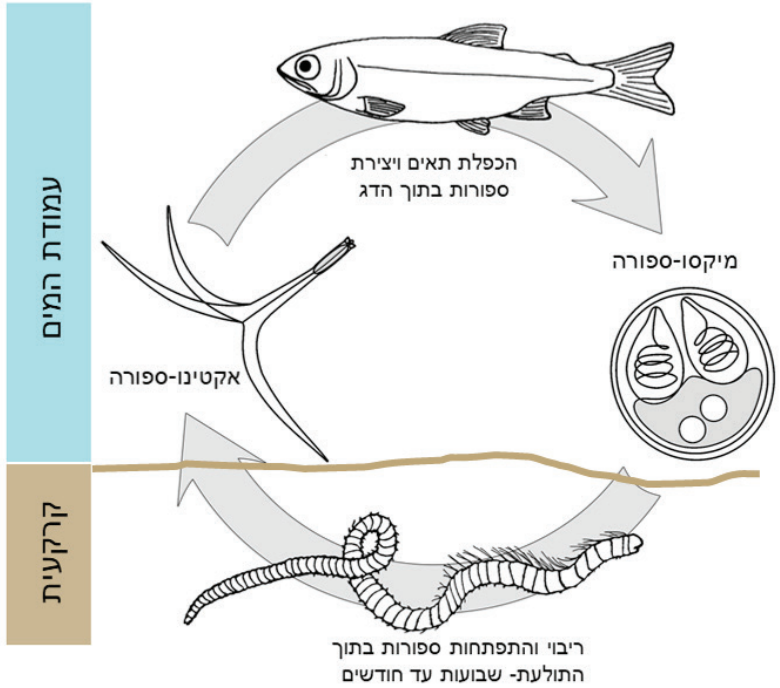
במעבר לחיי טפילות איבדו טפילי המיקסוזואה רקמות ומערכות המצויות בצורבים כמו את מערכת העצבים, שרירים, עיכול, אפיתל, תאי ריסים (cilia) ותאי מין[13,14]. יוצאים מהכלל הינם מספר טפילים מקבוצת ה-Malacosporea בעלי אפיתל ורקמת שריר[15,16]. השינויים המורפולוגיים משתקפים גם בגנום הקטן של המיקסוזואה (22.5-188.5 MB)[17]. שהוא פחות ממחצית מהגנומים של צורבים שאינם טפילים. בנוסף, הגנום של המיקסוזואה מאופיין באינטרונים (מקטעי דנ"א בתוך גן אשר אינם מקודדים לחלבון) קצרים (82-240 bp) לעומת צורבים שאינם טפילים (799- bp 2,673)[17]. חלק גדול מהגנים שאבדו במהלך האבולוציה קשורים לתהליכי התמיינות של רקמות כמו פקטורי שעתוק,

ליגנדים ורצפטורים הקשורים למסלולי בקרה לקביעת הסימטריה וגנים נוספים הקשורים לחילוף חומרים, לבקרת מנגנון התגובה לעקה וחוסר בחמצן[13,18,19]. בנוסף, המיקסוזואה איבדו את היכולת למתילציה של ציטוזין ב-DNA, תופעה המשפיעה על בקרת ביטוי גנים ומשויכת לאריזה מהודקת של הגנום[20,21]. שינויים נוספים נמצאו במבנה הגנום המיטוכונדריאלי של המיקסוזואה עד למצב קיצון שבו כל הגנום המיטוכונדריאלי אבד[22,23]. כתוצאה משינויים אלו מספר הגנים המקודדים לחלבון במיקסוזואה מוערך בין 5,500-16,500 לעומת למעלה מ-20,000 בצורבים שאינם טפילים[17].

מחזור החיים של המיקסוזואה

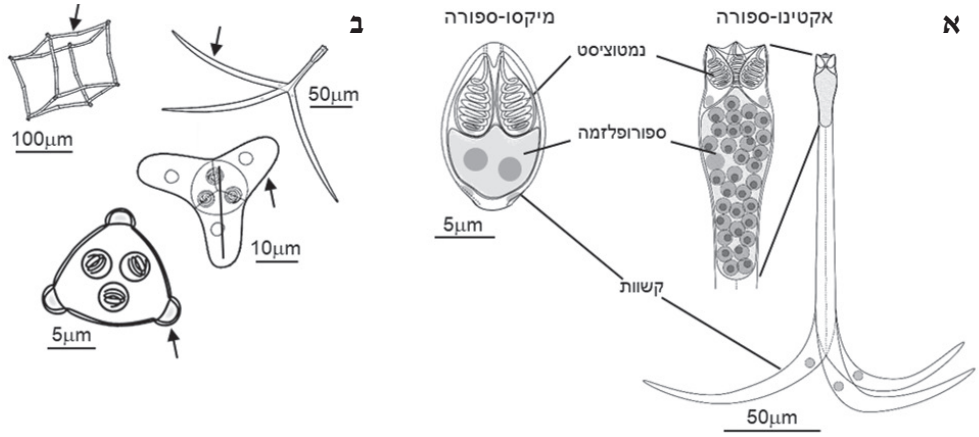
המיקסוזואות הינם טפילים אובליגטורים, היכולים להתרבות ולגדול רק בתוך המאכסן. מחזור החיים שלהם מורכב משני מאכסנים: האחד בעל חוליות, לרוב דג, והשני חסר חוליות, לרוב תולעת מקבוצת התולעים הטבעתיות (Annelida) (איור 2). מינים המשתייכים לקבוצת ה-Malacosporea מאופיינים במחזור חיים בין דגים לחי טחביים (Bryozoa) [24,25]. למרות שהדג הוא מאכסן הביניים העיקרי, במהלך האבולוציה המיקסוזואה עברה גם למאכסני בעלי חוליות נוספים כמו דו-חיים, זוחלים, עופות מים, יונקים יבשתיים (חדפים) ואף לחסרי חוליות (רכיכות)[26]. המאכסן החסר חוליות נחשב למאכסן הראשוני והעתיק יותר באבולוציה. להבדיל מהמצב בדגים, שבו נדרשת ספציפיות גבוהה בין הטפיל למאכסן, בהדבקה בתולעים קיים מגוון מינים של תולעים היכולים לשמש כמאכסנים למין מסוים של מיקסוזואה. יחד עם זאת, בתולעים של מים מתוקים ההדבקה של המיקסוזואה היא יותר ספציפית למין התולעת מאשר בתולעים ימיות[27]. האפשרות של המיקסוזואה להדביק ולהתרבות במגוון של תולעים מאפשרת להם לעבור לבתי גידול חדשים שלא היו בהם קודם. לדוגמה, בבריכות גידול דגים של מים מתוקים בבית שאן נמצאו תולעים המודבקות במיני מיקסוזואה המדביקים דגי קיפון של הים התיכון[28]. באופן דומה נמצאו בכנרת דגי קיפון המודבקים במין מיקסוזואה מהים התיכון[29]. שתי דוגמאות אלו מצביעות על העברת טפילים לחקלאות הימית של ישראל כנראה על-ידי דגים מודבקים.

המעבר בין שני המאכסנים נעשה על-ידי ספורות הנוצרות במאכסן. הספורות מופרשות ישירות למים כאשר ההדבקה חיצונית (לדוגמה זימים), או דרך מערכת ההפרשה בהדבקה פנימית, או כאשר המאכסן מת. הספורות המתפתחות בדג וקרויות מיקסו-ספורות, משתחררות למים ושוקעות לקרקעית, שם נאכלות וחודרות לגוף התולעים או לחי טחביים על-ידי מנגנון הצריבה (ראה פירוט בסעיף הבא). בתוך המאכסן הראשוני, הטפיל מתחיל להתחלק ליצירת ספורות השונות מאלו שנוצרות בדג, הקרויות אקטינו-ספורות. לאקטינו-ספורות מבנה השונה מהספורות שנוצרות בדג וכאשר הן משתחררות למים יש להן יכולת ציפה, תכונה המאפשרת לספורות להישאר בעמודת המים ולהדביק את הדג (איור 3). הטפיל חודר לדג דרך הזימים ו/או העור ועובר לרוב במערכת הדם או העצבים לאיבר המטרה שבו יתרחש תהליך הספורולציה (יצירת הספורות).



איור 2. תרשים של מעגל החיים של המיקסוזואה. בדג, תאי המיקסוזואה עוברים הכפלה ותוך שבועות עד חודשים נוצרות המיקרו-ספורות שמופרשות למים ושוקעות לקרקעית. המיקרו-ספורות נאכלות על-ידי התולעים ובגוף התולעת מתרחש תהליך המיוזה שבסופו נוצרות האקטינו-ספורות. מאחר שלאקטינו-ספורות יכולת ציפה כאשר הן משוחררות לעמודת המים הן מדביקות את הדג ומעגל ההדבקה נמשך. התמונה אינה בקנה-מידה. הגרפיקה המקורית באדיבות Dr. Stephen Atkinson Oregon State University.

בשלבי ההתפתחות הראשוניים תאי המיקסוזואה עוברים חלוקות הכפלה רבות, כאשר התא השני מוכל בתא המייסד וכך גם התא השלישי[30,31]. לאחר חלוקות התאים, מתרחשת נדידה של התאים לאיבר המטרה והתאים השניוניים יהיו התאים שמהם תתחיל ההתמיינות לספורות[32]. כתוצאה מההכפלות הראשוניות של תאי המיקסוזואה, אקטינו-ספורה אחת המדביקה את הדג יכולה לגרום להדבקה נרחבת ובמינים מסוימים גם למוות של הדג[32]. מרבית המחקר על טפילי המיקסוזואה מתמקד בשלב ההתפתחות בדגים ופחות ידוע על המיקסוזואה בתולעים למרות ששלבי ההתפתחות תוארו, אבל המסלולים המולקולריים או המטבוליים אינם ידועים[14,33]. יתרה מכך, רק כ-200 טפילי מיקסוזואה זוהו בתולעים ומתוכם ידועים רק כ-50 מעגלי חיים[8,34]. בנוסף, מכיוון שלא ניתן לגדל את שלבי החיים של המיקסוזואה במערכות *in-vitro* יש להחזיק במעבדה את שני המאכסנים על מנת לשמור על מעגל חיים. כתוצאה מכך רק כשלושה מעגלי חיים של מיקסוזואה מוחזקים היום במעבדות שונות בעולם.



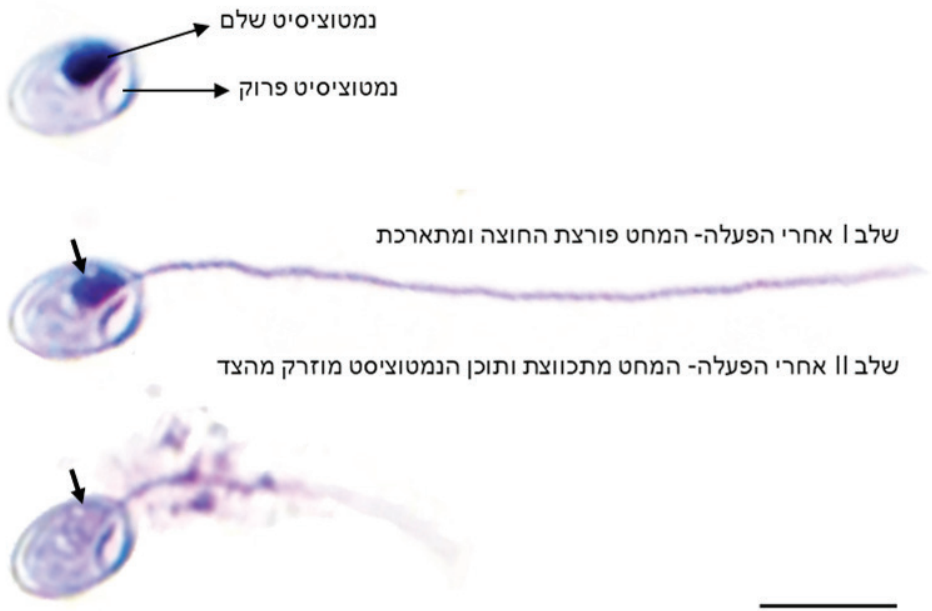
איור 3. השוואה בין המיקסו-ספורה לאקטינו-ספורה. א. תרשים המשווה בין החלקים העיקריים של הספורות. השוני במבנה הסימטריה בולט בכפולות של שתיים במיקסו-ספורה ושלוש באקטינו-ספורה. ב. תרשים של אקטינו-ספורות ממיקסוזואות שונות. החיצים מצביעים על הקשוות, שמאפשרות ציפה של הטפיל. קנה המידה של כל ספורה מוצג. האיור מבוסס על גרפיקה באדיבות Dr. Stephen Atkinson Oregon State University.

מבנה הספורות:

הספורות של המיקסוזואה הן לרוב בגודל 10 עד 50 מיקרון. המיקסו-ספורות הנוצרות בדגים מאופיינות לרוב במבנה סימטרי כפול, בעוד שהאקטינו-ספורות הנוצרות בתולעים הן לרוב בעלות סימטריה של שלוש ויותר (איור 3א). למרות השוני המבני בין שני סוגי הספורות, הן מורכבות רק משלושה סוגי תאים: תאי הקשוות (valve cells), העוטפים את הספורה, תאים צורבים (nematocyte) המכילים את מנגנון הצריבה ובעבר נקראו polar capsules ותאי sporoplasm, המכילים את המטען הגנטי להדבקת המאכסן. בספורות הבוגרות המופרשות למים רק תאי ה-sporoplasm שומרים על הגרעין וההפרדה בין התאים מיטשטשת. במיקסו-ספורות מבחינים בשני תאי ספורופלזמה בעוד שבאקטינו-ספורות בחלק ממיני המיקסוזואה ניתן למצוא ריבוי גרעינים בתא הספורופלזמה. הקשוות יוצרות את המבנה החיצוני הקשיח של הספורה העשויה מקרטין ולעיתים מסיבי קולגן[35]. באקטינו-ספורות הנוצרות על-ידי התולעת, הקשוות יוצרות שלוחות ארוכות או מבנים מורחבים הדומים למצופים העוזרים לציפה של הספורה (איור 3ב).

הנמטוציסט, העשוי קפסולה שבתוכה מחט ארוכה וחלולה הארוזה בדחיסות, הינו המנגנון המתחיל את תהליך ההדבקה של המיקסוזואה. כאשר המנגנון מופעל, המחט פורצת החוצה ובדומה לצלצל נתפסת על גבי המאכסן, תהליך המאפשר את ההצמדה של הספורה, פתיחתה והחדרת החומר הגנטי מהספורופלזמה לגוף המאכסן. מנגנון ההזרקה של המיקסוזואה דומה ביותר למנגנון של צורבים אחרים[36-38], אך מבנה המחט שונה. בחלק ממיני המיקסוזואה למחט אלסטיות יוצאת דופן, הדומה לקפיץ, תכונה המאפשרת מגע הדוק בין הספורה למאכסן (איור 4)[39,40]. בנוסף, לחלק

ממנגנוני הצריבה של המיקסוזואות למחט אין פתח יציאה או לעיתים פתח היציאה הוא צדדי ולא מקצה המחט[39]. יחד עם השינויים במבנה המחט וכחלק מההתאמה לחיי טפילות, הנמטוציסט של המיקסוזואה איבד את הרעלנים המאפיינים את תאי הצריבה בצורבים, שתפקידם לשתק את הטרף[41-44].



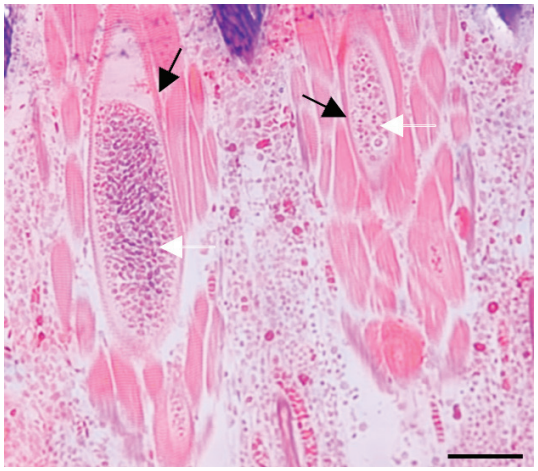
איור 4. תמונות של נמטוציסט של מיקסו-ספורה לאחר ההפעלה. הספורה טופלה בצבע כחול שחודר ומצטבר בנמטוציסט. בשלב ראשון הנמטוציסט עדיין כחול (מסומן בחץ) וכך גם המחט שפורצת החוצה ומתארכת. בשלב שני המחט מתכווצת וצבע פורץ החוצה מצידי המחט יחד עם התרוקנות הנמ־טוציסט מהצבע (מסומן בחץ). התמונות נלקחו מסרטון וידיאו שצולם במיקרוסקופ במהירות גבוהה, שיש בו גם כימות של הדינמיקה של הצבע בתוך הנמטוציסט ובמחט (ניתן לראות את הסרטונים בקישור מהמאמר)[39]. קנה-מידה - 10 מיקרון.

יחסי טפיל-מאכסן

רוב מיני המיקסוזואה אינם פוגעים בדגים, אך ישנם מינים הגורמים למחלות קשות ולמוות בעיקר בגידולים חקלאיים כמו של דגי סלומון, טרוטה, דניס, קרפיון ואמנון. לדוגמה *Myxobolus cerebralis*, מין פולש מאירופה, הגורם למחלת ה-Whirling disease בגידולים מסחריים ובאוכלוסיות טבעיות של טרוטת עין-הקשת (*Oncorhynchus mykiss*)[45]. מין זה פגע בשנות ה-90 באוכלוסיית דגי הטרוטה והביא כמעט לאובדן האוכלוסייה הטבעית בשמורות במונטנה ובמקומות נוספים בארה"ב[46,47]. בגלל הנזקים הרבים לאוכלוסיית הדגים, מין זה נחקר רבות ובאמצעותו התגלה לראשונה גם מחזור החיים של המיקסוזואה[24]. מינים אחרים שגורמים לתמותה הם *Ceratonova shasta* טפיל אנדמי לצפון אמריקה, הגורם לנמק של המעי (*enteronecrosis*) וגורם לתמותה של אוכלוסיות טרוטה וסלמון

(*Oncorhynchus spp*)[48], או *Enteromyxum leei* הגורם למחלה דומה בדגי דניס ונפוץ בים התיכון ובמפרץ אילת[49,50]. *Tetracapsuloides bryosalmonae* השייך לקבוצת ה-*Malacosporea* גורם למחלה קשה בכליות (Proliferative Kidney Disease, PKD) ולמוות של דגים ממשפחת הסלמוניים[51]. לאחרונה, נמצא מין חדש *Myxobolus bejeranoi* הגורם להדבקה של למעלה מ-80% מדגי אמנון המכלוא בבריכות גידול בבית שאן ומוביל לתמותה משמעותית[52,53]. הפגיעה הקשה בגידולי הדגים החקלאיים נובעת כנראה משילוב של תנאי גידול צפופים המחלישים את הדגים יחד עם הדבקה מוגברת של הטפילים. כיום אין טיפול למחלות הנגרמות על-ידי המיקסוזואה ולכן הטפילים מהווים איום משמעותי על מרכזי גידול דגים בעולם.

טפילי המיקסוזואה פיתחו מנגנוני תגובה שונים בכדי להימנע ולהתחמק מהמערכת החיסונית של הדג. חלקם נודדים לרקמות שבהן המערכת החיסונית כמעט ולא מופעלת כמו העיניים, הגונדות, כיס המרה, הכליות והמוח, בהן הם משגשגים לאורך זמן[54]. לדוגמה *M. cerebralis* נודד דרך מערכת העצבים למוח הדג ולבסוף לשלד הגולגולת שבו נוצרות הספורות[57]. דרך אחרת היא על-ידי הסוואת אפיטופים אנטיגנים של חלבוני הטפיל, היכולים לשמש מטרה למערכת החיסון של הדג, באמצעות תאי הדג או חלבונים[58,59]. בנוסף, מרבית המיקסוזואות שנחקרו עד היום מאופיינות במגוון יוצא דופן של פרוטאזות (אנזימים) ומעכבי פרוטאזות, למרות ההפחתה המשמעותית בגודל הגנום של המיקסוזואה. לקבוצת חלבונים זו יש תפקיד חשוב בהתמודדות עם המערכת החיסונית של הדג ורמת הביטוי שלהם עולה מיד עם ההדבקה[60,61]. עבודות אחרות הראו שחלק ממיני המיקסוזואה יכולים לדכא את מערכת החיסון של הדג המאכסן[54,62]. לדוגמה *M. bejeranoi* משתק את מערכת החיסון של אמנון המכלוא ולמעשה משאיר את הדג חשוף לכל פתוגן אחר שנמצא בסביבה[63]. למרות הממצאים הרבים שהצטברו בשנים האחרונות המנגנון שבו הטפיל משפיע על מערכת החיסון עדיין לא ידוע.



איור 5. חתך בזימים של אמנון מכלוא המודבק בטפיל המיקסוזואה *M. bejeranoi*. הטפילים המתפתחים (מסומן בחץ לבן) מוכלים בתוך ציסטה (חץ שחור), שלא מאפשרת להם להמשיך ולהתפשט ברקמת הזימים. קנה-מידה - 50 מיקרון. התמונה באדיבות מרגריטה סמירנוב, המעבדה המרכזית לבריאות דגים, ניר דוד, משרד החקלאות.

סיכום

קבוצת המיקסוזואה היא קבוצה עתיקה אבולוציונית שמשתייכת למערכת הצורבים. למרות היותם יצורים רב-תאיים יש להם יכולות הכפלה עצמית בדומה לחד-תאיים. מכיוון שמערכת הצורבים מתאפיינת ביכולות רגנרציה יוצאות דופן, ייתכן שתופעת ההכפלה של טפילי המיקסוזואה קשורה לתכונה זו. למרות שהמיקסוזואה איבדו את חלק מהסממנים של בע"ח כמו רקמות ורבייה, הם שורדים מיליוני שנה ומאופיינים בעושר מינים יוצא דופן, המאפשר מחקר של המסלולים השונים המובילים לחיי טפילות. המיקסוזואה ממשיכים לשגשג ולהתפשט למאכסנים חדשים כולל בע"ח יבשתיים וכתוצאה מכך התרחבה החשיבות האקולוגית של מערכת הצורבים מהסביבה המימית גם ליבשה.

רשימת מקורות

1. Atkinson, S. D., Bartholomew, J. L. & Lotan, T. Myxozoans: Ancient metazoan parasites find a home in phylum Cnidaria. *Zoology* **129**, 66-68 (2018).
2. Okamura, B., Gruhl, A. & Bartholomew, J. L. *Myxozoan evolution, ecology and development*. (Springer, 2015).
3. Smothers, J. F., von Dohlen, C. D., Smith, L. & Spall, R. D. Molecular evidence that the Myxozoan protists are Metazoans. *Science* **265**, 1719-1721 (1994).
4. Holland, J. W., Okamura, B., Hartikainen, H. & Secombes, C. J. A novel minicollagen gene links cnidarians and myxozoans. *Proc. R. Soc. B* **278**, 546-553 (2010).
5. Shpirer, E. *et al.* Diversity and evolution of myxozoan minicollagens and nematogalectins. *BMC Evol. Bio.l* **14**, 205 (2014).
6. Siddall, M. E., Martin, D. S., Bridge, D., Desser, S. S. & Cone, D. K .The demise of a phylum of Protists: phylogeny of Myxozoa and other parasitic Cnidaria. *J. Parasitol.* **81**, 961-967 (1995).
7. Tellier, A., Moreno-Gámez, S. & Stephan, W. Speed of adaptation and genomic footprints of host-parasite coevolution under arm race and trench warfare dynamics. *Evolution* **68**, 2211–2224 (2014).
8. Holzer, A. S. *et al.* The joint evolution of the Myxozoa and their alternate hosts: A cnidarian recipe for success and vast biodiversity. *Mol. Ecol.* **27**, 1651–1666 (2018).
9. Zhang, Z.-Q. Animal biodiversity: an update of classification and diversity in 2013. *Zootaxa* **3703**, 5-11 (2013).
10. Raikova, E. Life cycle, cytology, and morphology of *Polypodium hydriforme*, a coelenterate parasite of the eggs of acipenseriform fishes. *J. Parasitol* **80**, 1-22 (1994).
11. Weinstein, S. B. & Kuris, A. M. Independent origins of parasitism in Animalia. *Biolo. Lett.***12**, 20160324 (2016).
12. Canning, E., Curry, A., Feist, S., Longshaw, M. & Okamura, B. A new class and order of myxozoans to accommodate parasites of bryozoans with ultrastructural observations on *Tetracapsula bryosalmonae* (PKX Organism). *J Eukaryot Microbiol.* **47,** 468 - 456 (2000).
13. Chang, E. S. *et al.* Genomic insights into the evolutionary origin of Myxozoa within Cnidaria. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **112**, 14912-14917 (2015).
14. Lom, J. & Dyková, I. Myxozoan genera: definition and notes on taxonomy, life-cycle terminology and pathogenic species. *Folia Parasitol.* **53**, 1-36 (2006).
15. Jimenez-Guri, E., Philippe, H., Okamura, B. & Holland, P. W. H. *Buddenbrockia* is a cnidarian worm. *Science* **317**, 116-118 (2007).

16. Gruhl, A. & Okamura, B. Development and myogenesis of the vermiform *Buddenbrockia* (Myxozoa) and implications for cnidarian body-plan evolution. *EvoDevo* **3**, 1-15 (2012).
17. Alama-Bermejo, G. & Holzer, A. S. Advances and discoveries in myxozoan genomics. *Trends Parasitol* **37**, 552-568 (2021).
18. Maor-Landaw, K. *et al.* The molecular mechanisms employed by the parasite *Myxobolus bejeranoi* (Cnidaria: Myxozoa) from invasion through sporulation for successful proliferation in its fish host. *Int. J. Mol. Sci.* **24**, 12824 (2023).
19. Graham, A. M. & Barreto, F. S. Myxozoans (Cnidaria) do not retain key oxygen-sensing and homeostasis toolkit genes. *Genome Biol. Evol.* **15**, evad003 (2023).
20. Kyger, R. *et al.* Myxosporea (Myxozoa, Cnidaria) Lack DNA Cytosine Methylation. *Mol Biol Evol* **38**, 393-404 (2021).
21. Lechner, M. *et al.* The correlation of genome size and DNA methylation rate in metazoans. *Theory in Biosciences* **132**, 47-60 (2013).
22. Yahalomi, D. *et al.* A cnidarian parasite of salmon (Myxozoa: *Henneguya*) lacks a mitochondrial genome. *Proc. Natl. Acad. SCI.* **117**, 5358-5363 (2020).
23. Sandberg, T. O. M. *et al.* Evolution of myxozoan mitochondrial genomes: insights from myxobolids. *BMC Genomics* **25**, 388 (2024).
24. Wolf ,K. & Markiw, M. E. Biology contravenes taxonomy in the Myxozoa: new discoveries show alternation of invertebrate and vertebrate hosts. *Science* **225**, 1449-1452 (1984).
25. Morris, D. J. & Adams, A. Transmission of Tetracapsuloides bryosalmonae (Myxozoa: Malacosporea), the causative organism of salmonid proliferative kidney disease, to the freshwater bryozoan Fredericella sultana. *Parasitology* **133**, 701 (2006).
26. Hallett, S. L., Atkinson, S. D., Bartholomew, J. L. & Székely, C. in *Myxozoan Evolution, Ecology and Development* (eds Okamura,B., Gruhl, A. & Bartholomew, J. L.) 125-135(Springer, Switzerland, 2015).
27. Alexander, J. D., Kerans, B. L., El-Matbouli, M., Hallett, S. L. & Stevens, L. in *Myxozoan Evolution, Ecology and Development* (eds Okamura,B., Gruhl, A. & Bartholomew, J. L.) 217-234 (Springer, Switzerland, 2015).
28. Salti, B., Atkinson, S. D., Brekhman, V., Smirnov, M. & Lotan, T. Exotic myxozoan parasites establish complex life cycles in farm pond aquaculture. *J. Invertebr. Pathol.* **204**, 108105 (2024).
29. Gupta, A., Haddas-Sasson, M., Gayer, K. & Huchon, D. Myxozoan infection in thinlip mullet *Chelon ramada* (Mugiliformes: Mugilidae) in the Sea of Galilee. *Sci. Rep.* **12**, 10049 (2022).

30. Morris, D. A new model for myxosporean (Myxozoa) development explains the endogenous budding phenomenon, the nature of cell within cell life stages and evolution of parasitism from a cnidarian ancestor. *Int. J. Parasitol* **42**, 829-840 (2012).
31. Feist, S. W., Morris, D. J., Alama-Bermejo, G. & Holzer, A. S. in Myxozoan Evolution, Ecology and Development (eds Okamura, B., Gruhl, A. & Bartholomew, J. L.) Ch. 8, 139-154 (Springer, 2015) 139-154 (2015).
32. Bjork, S. J. & Bartholomew, J. L. Invasion of *Ceratomyxa shasta* (Myxozoa) and comparison of migration to the intestine between susceptible and resistant fish hosts. *Int. J. Parasitol* **40**, 1087-1095. (2010) .
33. Yokoyama, H. A Review: Gaps in our knowledge on myxozoan parasites of fshes. *Fish Pathology* **38**, 125-136 (2003).
34. Eszterbauer, E. *et al.* in *Myxozoan Evolution, Ecology and Development* (eds Okamura, B., Gruhl, A. & Bartholomew, J. L.) Ch. 10, 175-198 (Springer, 2015).
35. Maor-Landaw, K., Smirnov, M. & Lotan, T. The tilapia cyst tissue enclosing the proliferating *Myxobolus bejeranoi* parasite exhibits cornified structure and immune barrier function. *Int. J. Mol. Sci.* **25**, 5683 (2024).
36. לוטן, ת. המדוזה - מבנה פשוט מנצח. בתוך הוד הים: יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל (עורך סטמבלר, נ.) (העמותה הישראלית למדעי הימים, 2014).
37. Beckmann, A. & Özbek, S. The nematocyst: a molecular map of the cnidarian stinging organelle. *Int. J. Dev. Biol.* **56**, 577-582 (2012).
38. Americus, B., Lotan, T., Bartholomew, J. L. & Atkinson, S. D. A comparison of the structure and function of nematocysts in free-living and parasitic cnidarians (Myxozoa). *Int. J. Parasitol* **50**, 763-769 (2020).
39. Ben-David, J. *et al.* Myxozoan polar tubules display structural and functional variation. *Parasit Vectors* **9**, 549 (2016).
40. Kallert, D. M., Ponader, S., Eszterbauer, E., El-Matbouli, M. & Haas, W. Myxozoan transmission via actinospores: new insights into mechanisms and adaptations for host invasion. *Parasitology* **134**, 1741-1750 (2007).
41. Piriatinskiy, G. *et al.* Functional and proteomic analysis of *Ceratonova shasta* (Cnidaria: Myxozoa) polar capsules reveals adaptations to parasitism. *Sci. Rep.* **7**, 9010 (2017).
42. Americus, B. *et al.* The cnidarian parasite *Ceratonova shasta* utilizes inherited and recruited venom-like compounds during infection. *PeerJ* **9**, e12606 (2021).

43. Rachamim, T. *et al.* The dynamically evolving nematocyst content of an Anthozoan, a Scyphozoan ,and a Hydrozoan. *Mol. Biol. Evol.* **32**, 740-753 (2015).
44. D'Ambra, I. & Lauritano, C. A review of toxins from Cnidaria. *Mar. Drugs* **18** (2020).
45. Hedrick, R., Adkinson, M. & MacConnell, E. Whirling disease: re-emergence among wild trout. *Immunol. Rev.* **166**, 365-376 (1998).
46. Vincent, E. R. Whirling disease and wild trout : the Montana experience. *Fisheries* **21**, 32-33 (1996).
47. Bartholomew, J. & Reno, P. The history and dissemination of whirling disease. *Am. Fish. Soc. Symp.* **29**, 3-24 (2002).
48. Hallett, S. L. *et al.* Density of the waterborne parasite *Ceratomyxa shasta* and Its biological effects on Salmon. *App. Environ. Microbiol.* **78**, 3724-3731 (2012).
49. Diamant, A., Lo, J. & Dykova, I. *Myxidium leei* n. sp., a pathogenic myxosporean of cultured sea bream *Sparus aurata*. *Dis. Aquat. Organ.* **20**, 137-141 (1994).
50. Diamant, A., Ram, S. & Paperna, I. Experimental transmission of *Enteromyxum leei* to freshwater fish. *Dis. Aquat. Organ.* **72**, 171-178 (2006).
51. Strepparava, N. *et al.* Effects of parasite concentrations on infection dynamics and proliferative kidney disease pathogenesis in brown trout (*Salmo trutta*). *Transbound. Emerg. Dis.* **67**, 2642-2652 (2020).
52. Lövy, A., Smirnov, M., Brekhman, V., Ofek, T. & Lotan, T. Morphological and molecular characterization of a novel myxosporean parasite *Myxobolus bejeranoi* n. sp.(Cnidaria: Myxosporea) from hybrid tilapia in Israel. *Parasitol Res.* **117**, 491–499 (2018).
53. Maor-Landaw, K. *et al.* The myxozoan parasite *Myxobolus bejeranoi* (Cnidaria: Myxozoa) infection dynamics and host specificity in hybrid tilapia aquaculture. *Parasitology* **150**, 524-530 (2023).
54. Holzer, A. S., Piazzon, M. C., Barrett, D., Bartholomew, J. L. & Sitjà-Bobadilla, A. To react or not to react: The dilemma of fish immune systems facing myxozoan infections. *Front .Immunol.* **12** (2021).
55. Sitjà-Bobadilla, A., Schmidt-Posthaus, H., Wahli, T., Holland, J. W. & Secombes, C. J. in *Myxozoan Evol. Ecolo. Develop.* 253-280 (Springer, 2015).
56. Barrett, D. E. & Bartholomew, J. L. A tale of two fish: Comparative transcriptomics of resistant and susceptible steelhead following exposure to Ceratonova shasta highlights differences in parasite recognition. *PLoS One* **16**, 1179 (2021).

57. Akram, N., El-Matbouli, M. & Saleh, M. The immune response to the myxozoan parasite *Myxobolus cerebralis* in Salmonids: A review on whirling disease. *Int. J. Mol. Sci.* **24**, 17392 (2023).
58. Sitjà-Bobadilla, A., Estensoro, I. & Pérez-Sánchez, J. Immunity to gastrointestinal microparasites of fish. *Dev. Comp. Immunol.* **64**, 187-201 (2016).
59. Korytář, T., Chan, J. T. H., Vancová, M. & Holzer, A. S. Blood feast: Exploring the erythrocyte-feeding behaviour of the myxozoan *Sphaerospora molnari*. *Parasite Immunol.* **42** (2020).
60. Eszterbauer, E. *et al.* Genetic diversity of serine protease inhibitors in myxozoan (Cnidaria, Myxozoa) fish parasites. *Microorganisms* **8**, 1502 (2020).
61. Alama-Bermejo, G., Bartošová-Sojková, P., Atkinson, S. D., Holzer, A. S. & Bartholomew, J. L. Proteases as therapeutic targets against the parasitic cnidarian *Ceratonova shasta*: Characterization of molecules key to parasite virulence in Salmonid hosts. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* **11** (2022).
62. Kotob, M. H. *et al.* Differential modulation of host immune genes in the kidney and cranium of the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in response to *Tetracapsuloides bryosalmonae* and *Myxobolus cerebralis* co-infections. *Parasit Vectors* **11** (2018).
63. Maor-Landaw, K. S., M., Brekhman, V., Ofek-Lalzar, M., Yahav, T. & Lotan, T. Infection by the parasite *Myxobolus bejeranoi* (Cnidaria : Myxozoa) suppresses the immune system of Hybrid Tilapia. *Microorganisms* **10**, 1893 (2022).

29 ההשפעה של היעלמות עשבי-ים על הביוגיאוכימיה של משקעים ימיים במפרץ אילת

נטע סוטו[1], גדעון וינטרס[3,2], גלעד אנטלר[5,4]

[1] המחלקה למדעי הסביבה, גיאואינפורמטיקה ותכנון ערים, אוניברסיטת בן גוריון בנגב
[2] מו"פ מדבר וים המלח
[3] המחלקה למדעי החיים, קמפוס אילת, אוניברסיטת בן גוריון בנגב
[4] המחלקה למדעי כדור הארץ והסביבה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב
[5] המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת

sotonet@post.bgu.ac.il, giladantler@gmail.com, wintersg@adssc.org

תקציר

מאז המהפכה התעשייתית נרשמה עלייה בפליטות פחמן דו-חמצני (פד"ח) לאטמוספרה, אשר הוביל לשינויי אקלים, להתחממות כדור הארץ ולהחמצת האוקיינוסים. אחת הדרכים היעילות למיתון שינויי האקלים הינה באמצעות סילוק פחמן. תהליך זה מתבסס על לכידת פד"ח באמצעות פוטוסינתזה והטמעתו במשקעים ימיים (סדימנטים) וקרקעות בצורת פחמן אורגני. עשבי-ים הינם צמחים פורחים ימיים המקבעים פחמן בקצבים גבוהים יותר (ליחידת שטח) מאשר מערכות אקולוגיות יבשתיות. עשבי-ים משחקים תפקיד מפתח במחזור הפחמן הגלובלי שכן הם אוגרים למעלה מ-15% מכלל הפחמן הנצבר באוקיינוסים. לכן, למשקעים שבהם נקבר הפחמן חשיבות רבה ולנוכחותם של עשבי-הים השפעה אדירה על הביוגיאוכימיה של המשקעים ועל מחזור הפחמן העולמי.

למרות חשיבותם הרבה, עשבי-ים נעלמים בקצב מדאיג ברחבי העולם. היעלמותם של עשבי-הים בעולם מהווה איום משמעותי, שכן היא עשויה להוביל להאצת פליטות פד"ח מהמשקע חזרה לעמודת המים. על מנת לבחון את השפעת היעלמות עשבי-ים על הביוגיאוכימיה של משקעים ימיים, ביצענו דיגומי שטח וניסויי מעבדה שבחנו את השינויים הכימיים במשקע בעקבות הסרה מלאכותית של עשבי-ים. הממצאים מצביעים על כך כי משקעים שבהם היו עשבי-ים היו מחומצנים יותר לעומת משקעים שהיו ללא עשבי-ים. בנוסף, לאחר הסרתם, נוצרו תנאים מחוזרים שהובילו להצטברות מימן גופרתי העלול לגרום למשוב חיובי ולהוביל לפגיעה נוספת בעשבי-ים שכנים. כמו כן, נמצא כי חלקים שונים של עשבי-ים אופיינו בקצבי פירוק שונים.

מחזור הפחמן באוקיינוס ובמשקעים ימיים (סדימנטים)

שריפת דלקי מאובנים מתחילת המהפכה התעשייתית במאה ה-18 הביאה לעלייה ניכרת בריכוז הפחמן הדו-חמצני (פד"ח, CO_2) באטמוספרה[1]. פד"ח משפיע על האקלים של כדור הארץ בשל היותו גז חממה הצובר חום ובכך גורם להתחממות גלובלית. כרבע מכמות הפד"ח הנפלטת על-ידי פעילות בני האדם מתמוססת באוקיינוסים, שם הפד"ח מגיב עם מי הים ויוצר חומצה פחמתית (H_2CO_3) הגורמת להחמצת מי הים המתבטאת בירידה ב-pH (ערך ההגבה) של

המים (מ-pH 8.2 ל-pH 8.1). אחת הדרכים היעילות למיתון השינויים הגלובליים הנגרמים כתוצאה מעלייה בריכוזי הפד"ח הינה באמצעות תהליך הנקרא "סילוק פחמן". בתהליך זה, פחמן אי-אורגני מקובע בפוטוסינתזה ונקבר כפחמן אורגני בתצורות גיאולוגיות כגון משקעים ימיים (סדימנטים), קרקעות יבשתיות או בתוך גופם של יצורים חיים[2]. מערכות אקולוגיות חופיות, כגון יערות מנגרובים, מלחות ועשבי-ים מקבעות פחמן בקצבי סילוק פחמן גבוהים במיוחד יחסית ליחידת שטח[3]. פחמן המקובע ונקבר על-ידי צמחי יבשה (המכונה "פחמן ירוק") מתפרק יחסית מהר, בעזרת פעילותם של חיידקים אווירניים החיים בקרקע היבשתית העשירה בחמצן, וחוזר לאטמוספרה כפד"ח. לעומת זאת, פחמן שמקובע ונקבר במשקע ימי (המכונה "פחמן כחול"), חשוף לתנאים דלי החמצן הקיימים במשקע הימי (אין חמצן אחרי 2-4 מ"מ בעומק המשקע) ולכן נשאר לזמן רב יותר (עד מאות ואף אלפי שנים), ובסופו של דבר נקבר תחת משקעים השוקעים מעליו. בשל תנאים ייחודיים אלו, עשבי-ים אחראים לקיבוע של כ-15% מכלל הפחמן המצטבר במשקעים ימיים על פני כדור הארץ למרות שהינם מתפרסים על שטח של פחות מ-1% מקרקעית כלל האוקיינוסים, ועל כן משחקים תפקיד חשוב במחזור הפחמן העולמי[4].

עשבי-ים כמערכת אקולוגית

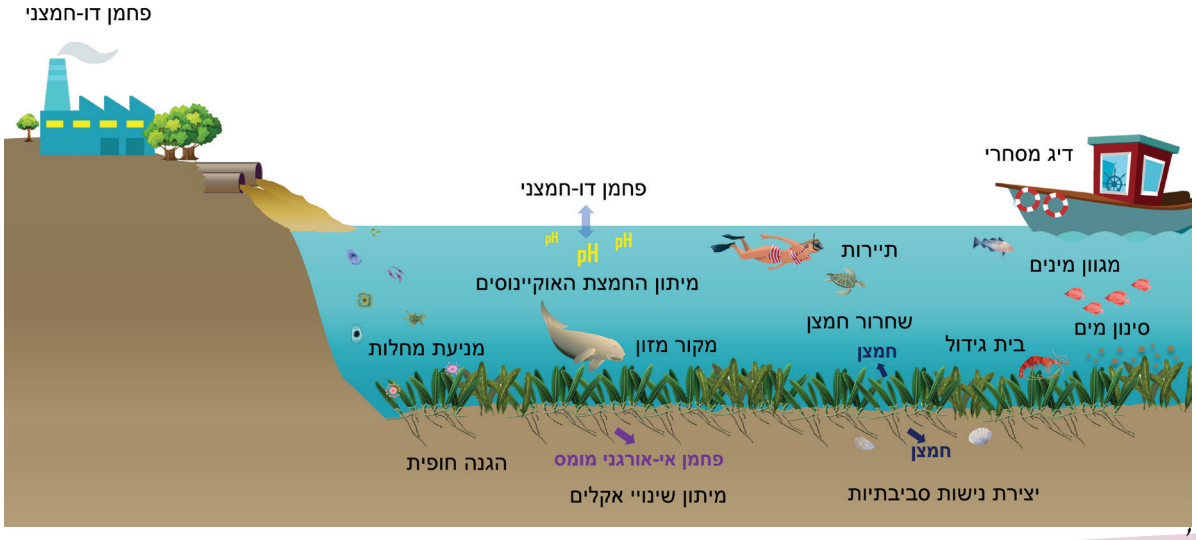
עשבי-ים הינם צמחים מכוסי זרע ימיים אשר התפתחו מצמחי יבשה לפני 90-60 מיליון שנה[5]. כמו לצמחי יבשה, לעשבי-ים יש עלים, פרחים, זרעים, מערכת שורשים מפותחת ורקמות הובלה. הם גדלים באמצעות התארכות אופקית של קנה השורש (המחבר בין העלים לשורשים) באמצעות רבייה א-מינית, ובאמצעות רבייה מינית על-ידי יצירת זרעים ואבקה הנישאים במים (בדומה להאבקת רוח של צמחי יבשה) או על-ידי מאביקים (זואופלנקטון) הנמשכים לפרחים הזכריים ולאחר מכן מבקרים בפרחים הנקביים של עשבי-ים שכנים[6]. ישנם כ-72 מינים שונים של עשבי-ים המשתייכים לארבע משפחות: Posidoniaceae, Zosteraceae, Hydrocharitaceae (מימוניים) ו-Cymodoceacea (גליתיים).

עשבי-ים יוצרים כיסוי שטח בגדלים שונים המכונים מרבד. לאחרונה, חוקרים במערב אוסטרליה הראו בעזרת שעונים מולקולריים וסמנים של גנטיקת אוכלוסיות כי המרבד של עשב-ים *Posidonia australis* שאותו חקרו השתרע על שטח עצום של 180 קמ"ר (אותו גנוטיפ, אותו שבט) וכי אורגניזם ענק זה הינו בן לפחות 4500 שנה[7] בעוד שבים התיכון נמצא כי מרבד של המין *Posidonia oceanica* הינו בן 7900 שנה[8]. למעשה, עשבי-ים הינם בין האורגניזמים העתיקים ביותר על פני כדור הארץ שעדיין חיים כיום.

מרבדים של עשבי-ים מספקים מגוון רחב של שירותי מערכת אקולוגית (איור 1)[9]. כיצרנים ראשונים, הם מבצעים פוטוסינתזה ובכך מעשירים את סביבתם בחמצן. עשבי-ים נקראים גם "הריאות הירוקות של האוקיינוסים" מכיוון שמ"ר יחיד של מרבד עשבי-ים יכול לייצר עד 10 ליטרים של חמצן ביום[10]. הם גדלים באזורים רדודים עם משקע רך ובאמצעות מערכת השורשים שלהם הם מייצבים את החול ובכך מונעים את שחיקתם של חופים ומצוקי החוף[11]. עשבי-ים משפרים את איכות המים על-ידי לכידת חומרים מרחפים וחומרי הזנה מעמודת המים ובכך הופכים את המים לצלולים יותר ומשפרים את חדירות האור ואת התנאים לפוטוסינתזה של יצרנים ראשוניים אחרים[12]. עשבי-ים מסננים גם חומרי הזנה (זרחה וחנקות) שמקורם בזיהום תעשייתי ונגר עילי מהחופים הסמוכים, אשר בריכוזים גבוהים עלולים לגרום להעתרה (העשרת יתר בחומרי הזנה, אאוטריפיקציה) המזיקה למערכות אקולוגיות שכנות[13].

בשל מאפיינים אלה הם נחשבים ל"מהנדסי סביבה", היוצרים מרחבי מחיה (נישות) חדשים ומשמשים כבית גידול עבור מגוון רחב של דגים וחסרי חוליות וכן כבית גידול זמני לדגים צעירים ממערכות אקולוגיות סמוכות כגון שוניות אלמוגים[14]. בכך, עשבי-ים תומכים בקיומה של שרשרת מזון גדולה התומכת בכלכלת ענף הדיג[15]. למעשה, ערכם של עשבי-ים מוערך בכ-2.8 מיליון דולרים לקמ"ר לשנה[16]. יתרה מכך, עשבי-הים עצמם משמשים כמקור מזון עבור בעלי חיים רבים, חלקם מצויים בסכנת הכחדה כמו צבי-ים ותחש המשכן (*Dugong dugon*). בנוסף, עשבי-ים מסננים חיידקים מחוללי מחלות (פתוגנים) ובכך מפחיתים את חשיפתם של דגים, חסרי חוליות ואפילו בני אדם למחלות[17]. המגוון הביולוגי העשיר שקיים במרבדים של עשבי-ים הופך אותם לאבן בוחן (ביואינדיקטור) חשובה לבריאותן של מערכות אקולוגיות.

יחסי הגומלין הכימיים בין עשבי-הים וסביבתם הינם מורכבים[18]. השינויים הכימיים הנגרמים בעמודת המים בעקבות תהליך הפוטוסינתזה מורידים את החומציות של המים (כלומר מתקיימת עלייה בערך ההגבה-pH), דבר המסייע במיתון החמצת המים בסביבתם הקרובה ומספק תמיכה ביצורים משקיעי שלד גירני כגון אלמוגים, צדפות ורכיכות משקיעות שלד אחרות (הרגישים לעלייה בחומציות של המים)[19]. החמצן הנוצר בתהליך הפוטוסינתזה בעלים מועבר לשורשים ומשם הוא עובר בדיפוזיה למשקע מסביב, דבר המאפשר את קיומם של יצורים הנוברים במשקע כגון צדפות ותולעים[20]. על כן, עשב-הים הוא מין מהנדס סביבה גם בהיבט הכימי, שכן הוא משפיע על ההרכב הכימי של מי הים מי החללים (המים הלכודים בין גרגרי המשקע) והמשקע עצמו.



איור 1. שירותי המערכת האקולוגית של מרבדי עשבי-ים. עשבי-ים מעשירים את המים בסביבתם בחמצן, ומהווים בית גידול למגוון מינים עשיר. הם תומכים בשרשרת מזון גדולה שמקיימת דיג מסחרי ותיירות ענפה. מרבדים של עשבי-ים תורמים למיתון שינויי אקלים באמצעות יכולתם לקבע פחמן (פחמן "כחול") שאותו הם קוברים במשקע לתקופות ארוכות (ועל-ידי כך הם תורמים גם למיתון שינויי האקלים באמצעות ויסות החמצת האוקיינוסים). הם תורמים לשיפור איכות המים באמצעות סינון חומרי מזון והפחתת כמות החיידקים במים. עשבי-הים מהווים מקור מזון למגוון רחב של בע"ח ימיים, המרבדים מספקים מבנה תלת-ממדי ובכך יוצרים נישות סביבתיות ליצורים בסביבתם (כלומר, אלו "מינים מהנדסים"). השורשים של עשבי-ים מייצבים את קרקעית הים כנגד פעולת הגלים ומונעים בלייה של החוף.

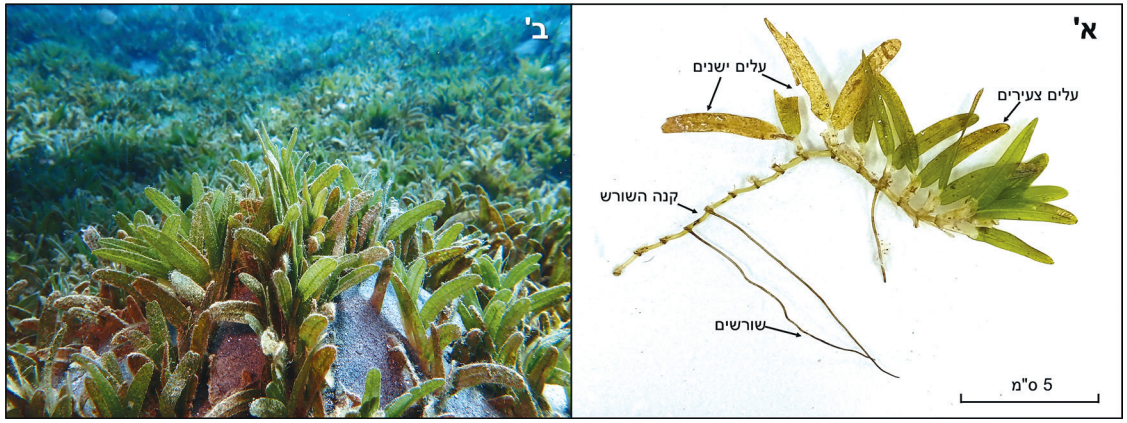
יחסי הגומלין בין עשבי-ים למשקעים ימיים

עשבי-ים נפוצים גם בגופי מים טרופיים, העניים בחומרי הזנה (אוליגוטרופיים), בשל יכולתם לקלוט את חומרי ההזנה הדרושים ליצרנות ראשונית דרך השורשים מהמשקע. יכולת זו מעניקה להם יתרון אקולוגי על יצרנים ראשונים אחרים אשר מוגבלים לקליטת חומרי ההזנה הזמינים רק בעמודת המים (כגון מקרואצות)[21]. מעבר לכך, עשבי-ים מסוגלים לקצור באופן פעיל חומרי הזנה במשקע שאינם זמינים באופן טבעי באמצעות שינויי התנאים הכימיים בסביבת השורשים. באמצעות שרשרת תהליכים, עשבי-ים גורמים להמסה מקומית של מינרלים ובכך לשחרור של חומרי ההזנה הספוחים עליהם למי החללים, שם הם זמינים לקליטה על-ידי השורשים[22]. חומרי ההזנה מועברים אז מהשורשים לעלים, שם נוצרים חמצן וסוכרים המועברים לשאר רקמות הצמח. חלק מהחמצן והסוכרים שמגיעים לשורשים דולפים החוצה לתוך המשקע באופן מעגלי[23].

עשבי-ים במפרץ באילת

עשב-הים הנפוץ ביותר בצפון מפרץ אילת הינו "ימון הקשקשים" (*Halophila stipulacea*) (איור 2), מין טרופי המצוי בעיקר בים סוף, במפרץ הפרסי ובאוקיינוס ההודי. ימון הקשקשים הוא עשב-ים קטן יחסית בעל עלים באורך אופייני של כ-5 ס"מ ושורשים באורך של כ-8 ס"מ[24]. הוא מתארך בצורה אופקית ויוצר מרבדים צפופים כאשר טווח העומקים שבו הוא גדל בעומק של בין 2 ל-50 מטרים מתחת לפני הים[25]. הוא מסוגל לגדול במגוון סביבות וניתן למצוא אותו על מצעים של חול רך. ימון הקשקשים נחשב למין פולש אגרסיבי בים התיכון (לשם היגר דרך תעלת סואץ) ובקאריביים[26].

במפרץ אילת, כיסוי השטח של עשבי-ים הינו כ-707,000 מ"ר[27], ותרומתם מוערכת בכ-2 מיליון דולר לשנה, מבחינת שווה הערך של שירותי המערכת האקולוגית שהמרבדים המקומיים באילת מספקים[16]. עשבי-הים תומכים בקיומן של שוניות אלמוגים באמצעות מיתון החמצת האוקיינוסים, סינון חומרי הזנה (דבר אשר עלול לזרז פריחת אצות שיפגעו באלמוגים)[28] ומתן שטחי רבייה וגידול לדגי השונית[14]. למרות ערכם האקולוגי והכלכלי, מרבית המחקרים המדעיים, מאמצי השימור, השיקום והחקיקה במפרץ אילת מופנים כמעט בלעדית כלפי שוניות האלמוגים. עשבי-ים גם "זוכים" לתשומת לב מועטה של הציבור והרשויות היכולות לספק את ההגנה הנדרשת לשמירה על מערכת אקולוגית זו. נכון להיום, במצפה התת-ימי אין אף תצוגה המוקדשת לעשבי-הים למרות שהם מהווים מרכיב חשוב במארג החי והצומח של מפרץ אילת. היחס שעשבי-ים מקבלים הינו מצומצם גם בקרב הקהילה המדעית, שכן כמות המחקרים העוסקים בעשבי-ים יחסית לאלמוגים וההתייחסות אליהם בדוחות השנתיים של תוכנית הניטור הלאומית במפרץ אילת מועטה למדי.



איור 2. עשב-הים "ימון הקשקשים" הנפוץ במפרץ אילת. א. חלקיו השונים של עשב-הים (עלים חדשים וישנים, קנה שורש והשורשים). ב. כר עשבי-ים של "ימון הקשקשים" בחוף הצפוני של אילת.

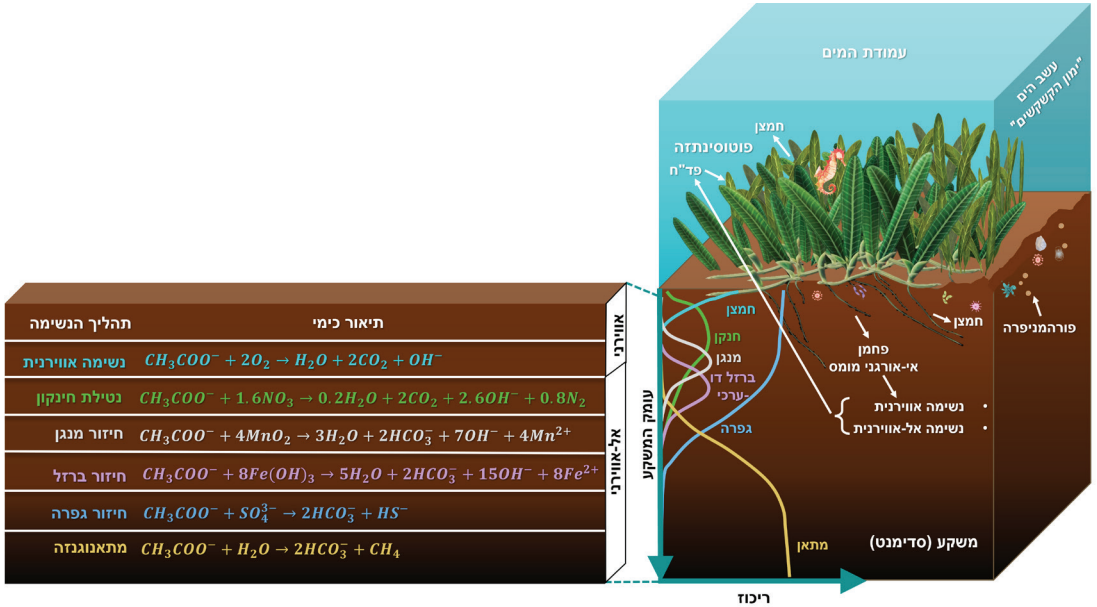
ההשפעה של הסרת עשבי-ים על הכימיה של מי החללים במשקע

כאשר חומר אורגני שוקע לקרקעית האוקיינוס, הוא נרקב ומפורק בתהליך הנשימה על-ידי חיידקים, כך שהפחמן האורגני עובר חמצון והופך חזרה לפחמן אי-אורגני מומס. כאשר יש מחסור בחמצן, חיידקים מסוימים יכולים לבצע נשימה באמצעות תרכובות כימיות אחרות (המשמשות כקבלי אלקטרונים במקום חמצן) ליצירת אנרגיה. נשימה מסוג זה נקראת נשימה אל-אווירנית (ענייה בחמצן, אנארובית) והיא מצויה במשקע בצורת שרשרת של תהליכי חיזור המשתנים עם עומק המשקע[29].

שרשרת הנשימה התאית במשקע ימי מתוארת באיור 3. תהליך החיזור הראשון לאחר שנגמר החמצן במשקע הינו נְטִילַת חִנְקוּן (דה-ניטריפיקציה) ובו חיידקים משתמשים בחַנְקָה (NO_3^-) כקבל אלקטרונים והתוצר של תהליך זה הינו חנקן גזי (N_2). התהליך הבא בשרשרת הינו חיזור תחמוצות מנגן, תהליך שבו מנגן בדרגת חמצון +4 (Mn^{4+}) מחוזר ליצירת מנגן דו-ערכי (Mn^{2+}). לאחריו מתרחש חיזור ברזל, תהליך שבו מחוזר ברזל תלת-ערכי (Fe^{3+}) לברזל דו-ערכי (Fe^{2+}). התהליך הבא הינו חיזור גָּפְרָה (SO_4^{2-}) שבו גופרה מחוזרת ליצירת מימן גופרי (H_2S). במשקעים ימיים, כ-10% מהפחמן האורגני מחומצן בתהליך חיזור ברזל וכ-50% מהפחמן האורגני מחומצן בחיזור גופרה[30]. התהליך האחרון בשרשרת הינו מתאנוגנזה שבו נוצר מתאן (CH_4) על-ידי תסיסה או חיזור של פחמן אי-אורגני מומס. חשוב לציין כי למרות שתגובות החמצון-חיזור הללו מופיעות לפי סדר לא תמיד הן נפרדות בזמן ובמרחב ויכולות להתרחש במקביל כאשר מיקרו-סביבות נוצרות כתוצאה מפועלם של יצורים שונים (יצורים נוברים בסדימנט כמו תולעים מתחפרות) או התארכות שורשים עמוק לתוך המשקע[31,32]. פעולות אלה יוצרות מגע ישיר של המים עם המשקע, מאפשרות חדירת חמצן ובכך שוברות את המרקם העדין של רצף שרשרת הנשימה האל-אווירנית.

מאז 1980 חלה ירידה של כ-110 קמ"ר בשנה בכיסוי עשבי-הים ברחבי העולם. למעשה, מאז 1980, עשבי-ים נעלמים בקצב של כ-7% בשנה, קצב השווה לערך לשני מגרשי כדורגל של עשבי-ים בכל שעה[33,34]. היעלמותם של עשבי-ים

עשויה לגרום לשינויים בכימיה של מי החללים במשקעים שמהם נעלמו[35]. יתרה מכך, מכיוון שאנו מצפים שלחלקים על-קרקעיים ותת-קרקעיים תהיה השפעה שונה על סביבתם, חשוב לבחון את השפעת היעלמותם של עשבי-ים על הכימיה של סביבתם באופן נפרד עבור חלקי הצמח השונים.



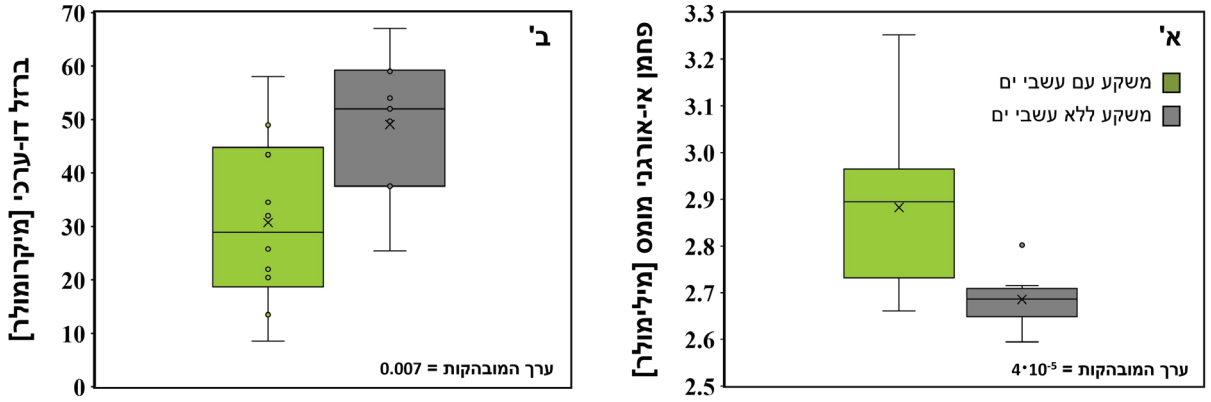
איור 3. תיאור יחסי הגומלין בין עשב-הים "ימון הקשקשים" למשקע ימי. בעמודת המים, עשב-הים קולט חומרי הזנה ופחמן דו-חמצני ומייצר חמצן (שמשוחרר למים) וסוכרים שמהווים את מקור המזון של הצמח. עשבי-הים משחררים למשקע פחמן אי-אורגני מומס אשר מהווה מצע לחיידקים ומגביר תהליכי נשימה עם וללא חמצן. בצד שמאל מתוארים השינויים בריכוזי הצורונים המשמשים לנשימה במשקע עם העומק. חמצן (טורקיז) נצרך ראשון ונגמר במילימטרים הראשונים במשקע. אחריו החיידקים משתמשים בחנקן (ירוק), לאחר מכן במנגן (אפור), ברזל (סגול) וגופרה (כחול). בתהליך האחרון, תסיסה, נוצר מתאן (צהוב). בנוסף, עשבי-ים משחררים למשקע חמצן אשר מעכב את תהליכי הנשימה האל-אווירניים. חומרי הזנה במשקע נקלטים באמצעות השורשים ומועברים לעלים.

התוצאות המוצגות באיור 4 הינן חלק מעבודת תזה לתואר מוסמך של סוטו[36]. ההבדלים בכימיה של מי החללים (המים המצויים בין חלקיקי המשקע הימי) עם וללא עשבי-ים במפרץ אילת נבדקו באמצעות מיצוי דגימות מים מהמשקע באמצעות מסנן[37]. מכל סוג משקע מוצו כעשר דגימות מים לתוך בקבוקוני זכוכית. תוצאות הניתוח הכימי של המים שנבדקו הושוו באמצעות מבחן סטטיסטי T-test עם רמת מובהקות של 0.05. ערך המובהקות (p-value) המוצג באיור 4 מצביע על כך שקיימים הבדלים משמעותיים בריכוזי הפחמן האי-אורגני המומס (איור 4א') וריכוזי הברזל הדו-ערכי (איור 4ב') במשקעים בנוכחות וללא עשבי-ים.

במשקעים עם עשבי-ים, ריכוזי הפחמן האי-אורגני המומס היו גבוהים יותר בהשוואה למשקעים ללא עשבי-ים. ממוצע ריכוזי הפחמן האי-אורגני המומס במשקעים עם עשבי-הים היו 2.8 מילימולר (עם סטיית תקן של 170 ± מיקרומולר)

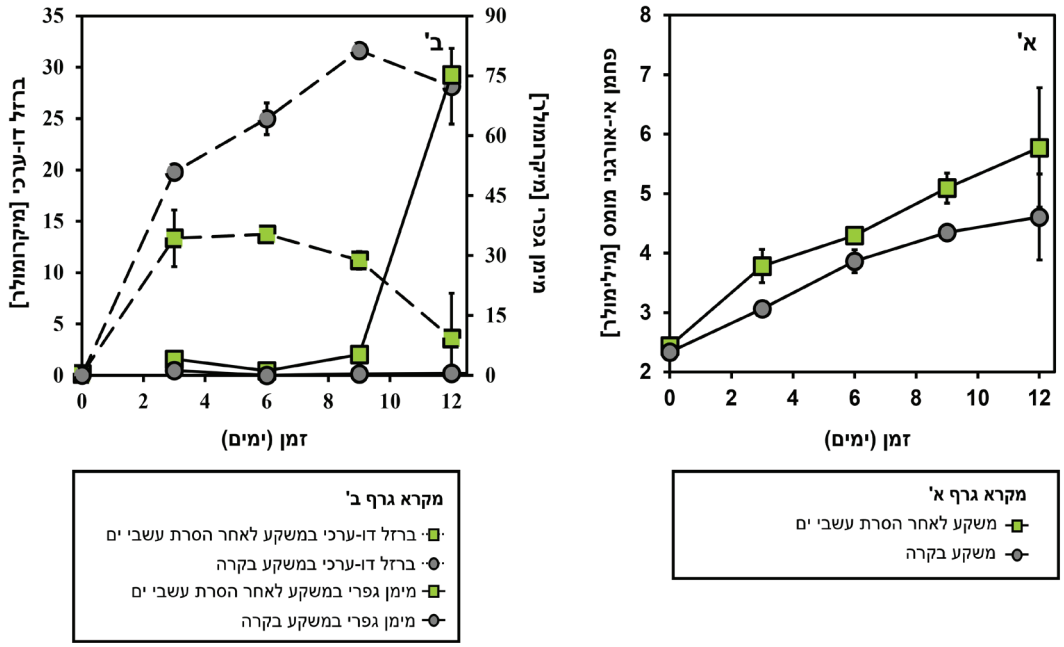
לעומת ממוצע של 2.6 מילימולר (עם סטיית תקן של ±56 מיקרומולר) במשקעים ללא עשבי-הים. לעומת זאת, ריכוזי הברזל הדו-ערכי במשקעים עם עשבי-ים היו משמעותית נמוכים יותר. ריכוז הברזל הדו-ערכי הממוצע במשקעים עם עשבי-הים היו 31 מיקרומולר (עם סטיית תקן של ±16 מיקרומולר) לעומת ממוצע של 49 מיקרומולר (עם סטיית תקן של ±13 מיקרומולר) במשקעים ללא עשבי-ים. **לפיכך, התוצאות מצביעות על כך שנוכחותו של עשב-הים *ימון הקשקשים* משנה את ההרכב הכימי של מי החללים במשקעים ימיים.**

ריכוזי הפחמן האי-אורגני המומס הגבוהים במשקע עם עשבי-הים מצביעים על קיומה של נשימה אל-אווירנית. אחד מתהליכי הנשימה האל-אווירנית המשמעותיים ביותר במשקעים ימיים הינו חיזור גופרה שהתוצר שלו הוא מימן גופרי. מימן גופרי נוטה להיקשר בזיקה גבוהה לברזל ולייצור מינרל בשם "פִּירִיט" הידוע גם בכינויו "זהב השוטים". כאשר הברזל ספוח על גבי מינרל, ריכוזו במי החללים יהיה נמוך ואולי אף אפסי, מה שמסביר את הריכוזים שנמדדו במשקעים עם עשבי-ים. כיוון שהפיריט נוצר מיוני ברזל ומימן גופרי, ריכוזי היונים החופשיים במים הניתנים למדידה קטנים. אולם, מכיוון שמימן גופרי ממשיך להיווצר, ריכוזו עולה בעוד שריכוז הברזל אינו משתנה ונשאר אפסי במי החללים.



איור 4. סיכום תוצאות הניתוח הכימי של מי החללים שמוצו ממשקעים עם עשבי-ים (בירוק) וממשקעים ללא עשבי-ים (אפור). א. ריכוז הפחמן האי-אורגני המומס. ב. ריכוזי הברזל הדו-ערכי.

על מנת לבחון את השינויים הכימיים במי החללים בעקבות הסרתם של עשבי-ים מהמשקע, בוצע ניסוי תרחיף (slurry) במעבדה במערכת סגורה. לצורך כך, נאספו ארבעה גלעינים של משקעים עם וללא עשבי-ים מהחוף הצפוני של אילת, כאשר המשקעים ללא עשבי-ים מהווים את קבוצת הבקרה. בגלעינים שהכילו משקעים עם עשבי-ים, עשבי-הים הוסרו בעדינות והשכבה העליונה של המשקע נחתכה ועורבבה עם מי ים מסוננים ועניים בחמצן. כל תערובת חולקה לבקבוקוני זכוכית שנדגמו לאורך 12 יום.



איור 5. השינויים בריכוזי הצורונים הכימיים במשקע לאחר הסרת עשבי-ים (ריבועים ירוקים) ובמשקע הבקרה (נקודות אפורות) לאורך זמן בתנאים עניים בחמצן. א. השינויים בריכוזי הפחמן האי-אורגני המומס לאורך זמן. ב. השינויים בריכוזי הברזל הדו-ערכי לאורך זמן (קו מקווקו) והשינויים בריכוזי המימן הגופרי (קו רציף) לאורך זמן.

תוצאות הניסוי (איור 5) מראות כי במשקעים שמהם הוסרו עשבי-הים, נרשמה עלייה גבוהה יותר בריכוזי הפחמן האי-אורגני המומס מאשר במשקעי הבקרה. ריכוזי הברזל הדו-ערכי הראו עלייה בשלושת ימי הניסוי הראשונים כתוצאה מחיזור ברזל ולאחר מכן נצפתה ירידה בריכוז כתוצאה מחיזור גופרה שהובילה לעלייה בריכוזי המימן הגופרי (תוצר חיזור הגופרה) ולתגובה בין מימן גופרי וברזל (איור 5א'). עדות תומכת לקיומו של חיזור גופרה במערכת הינה העלייה בריכוזי המימן הגופרי אשר מראה עלייה לאחר כתשעה ימים. לעומת זאת, במשקע הבקרה ריכוזי הברזל המשיכו להיות גבוהים והחלו לרדת רק תשעה ימים מתחילת הניסוי בעוד שריכוזי המימן הגופרי לא הראו עלייה כלל. תוצאה זו מצביעה על כך שתהליך חיזור הברזל הוא תהליך הנשימה המשמעותי. **לפיכך, התוצאות מצביעות שהסרתם של עשבי-הים גרמה להתפתחות מהירה של תנאים מחזרים במשקע יותר מאשר במשקע שבו לא היו עשבי-ים מלכתחילה.**

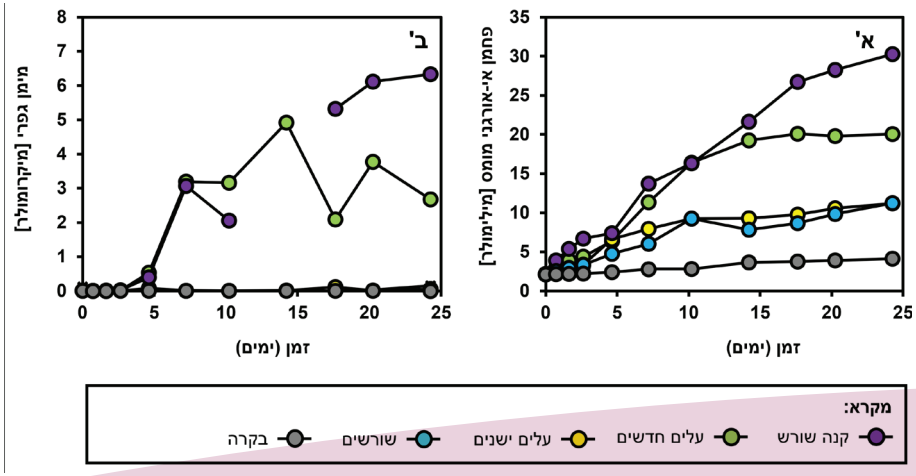
במרבדים של עשבי-ים, חמצן וחומרים אורגניים מומסים מועברים מהעלים של הצמח לשורשיו ומשם הם מועברים בדיפוזיה למשקע שמסביב[23]. בעקבות ההסרה של עשבי-ים ריכוזי החמצן במשקע ירדו אך כמות החומר האורגני המומס שהיה במשקע נשאר. היעדר החמצן במשקע איפשר את התקדמות שרשרת הנשימה התאית האל-אווירנית והחומר האורגני המומס (0.2%) הנותר שימש כמצע לחיידקים. משום כך, במשקע שממנו הוסרו כל עשבי-הים התפתחו תנאים מחוזרים במהירות רבה יותר מאשר במשקע שלא היו בו עשבי-ים מלכתחילה. **ניסוי זה ממחיש את ההשלכות של הסרת עשבי-ים על המערכת האקולוגית ומדגים כיצד היעלמותם משנה את התנאים הכימיים במשקע.**

ההשלכות האקולוגית של ניסוי זה ממחישות כי היעלמותם של עשבי-ים עשויה ליצור מצב שבו הם יתקשו לחזור ולהתיישב / לשרוד במרבד שנפגע. במצב זה, היעלמותם של עשבי-ים תפגע במַעֲקוֹבֶת (סוקצסיה) משנית שהינו תהליך של יישוב בית גידול לאחר הפרעה, בדרך כלל על-ידי יצרנים ראשוניים שהיו בבית הגידול מתחילת התהליך. לכן, יש לראות בהיעלמותם של עשבי-ים ברחבי העולם בעיה מהותית שייתכן שאיננה הפיכה.

ההשפעה של היעלמות חלקי צמח שנמצאים מעל הקרקע (עלים) ומתחת לקרקע (קנה שורש ושורשים) על תהליכים ביוגיאוכימיים במשקע

לחלקים נפרדים של עשב-הים יש הרכב ביוכימי שונה ולכן ייתכנו הבדלים בקצבי הפירוק[38]. להבדלים אלה יכולות להיות השלכות על חישובי מאגרי הפחמן ושיעורי קיבוע הפחמן במרבדים של עשבי-ים, וכן, במקרה של מוות של עשבי-ים, השפעה על סביבת המרבדים. לפיכך, המנגנון שבו עשבי-הים נעלמים ישפיע על השינויים הכימיים הנגרמים בעקבות כך. החיידקים במשקע מפרקים את עשבי-הים (החומר האורגני) ומשחררים פחמן דו-חמצני וחומרי הזנה למי החללים. הפחמן הדו-חמצני יכול לעבור באמצעות דיפוזיה מהמשקע לעמודת המים ובכך יכול לגרום להאצה של החמצת האוקיינוסים וההתחממות הגלובלית. לכן, ישנה חשיבות רבה בהבנה וכימות התהליכים המעורבים בפירוק של עשבי-ים ואת התרומה של פירוק זה למחזור הפחמן העולמי.

לצורך כך, בוצע ניסוי פירוק שבו עשבי-הים נאספו והופרדו לחלקים שונים שיובשו בתנור ולאחר מכן נטחנו לכדי אבקה. כל חלק צמחי הוסף בנפרד (חלקים שונים בבקבוקונים שונים) למשקע ימי יחד עם מי ים מסוננים ועניים בחמצן. קצב הפירוק של חלקי הצמח השונים נמדד באמצעות מעקב אחר השינויים בכימיה של המים לאורך זמן. התוצאות המופיעות להלן (איור 6) הוצגו תחילה במאמר מאת סוטו וחובריה[39].



איור 6 – השינויים בריכוזי הצורונים הכימיים בתערובת של משקעים עם חלקי הצמח השונים (קנה השורש בנקודות סגולות, עלים חדשים בנקודות ירוקות, עלים שנים בנקודות צהובות, שורשים בנקודות כחולות ומשקע בקרה ללא הוספת חומר אורגני בנקודות אפורות) לאורך זמן. א. ההשתנות בריכוזי הפחמן האי-אורגני המומס במי החללים בזמן. ב. ההשתנות בריכוזי המימן הגופרי במי החללים בזמן.

חומר אורגני שמתפרק בתהליכי נשימה הופך לפחמן אי-אורגני מומס. לפיכך, ניתן להסיק על קצב הפירוק של עשב-ים לפי השינוי בריכוז הפחמן האי-אורגני המומס בזמן. ככל שריכוזו עולה מהר יותר, כך החומר האורגני מתפרק מהר יותר. **תוצאות הניסוי (איור מס' 6) מראות כי קנה השורש מתפרקים בקצב המהיר ביותר, לאחר מכן העלים הצעירים ולבסוף העלים הישנים והשורשים.** לפי השינויים בריכוזי הפחמן האי-אורגני המומס, אנו מעריכים כי 50% מהחומר האורגני בקנה השורש התפרק, בעוד ש-30% מהחומר האורגני התפרק בעלים החדשים ו-15% מהחומר האורגני התפרק בעלים הישנים ובשורשים. ממצא זה מצביע על השוני בזמינות הביולוגית של החלקים השונים של הצמח, שוני הנובע מההרכב המולקולרי השונה של הצמח[40]. קצב הפירוק האיטי והכמות הנמוכה של פחמן שאבדה בשורשים לעומת העלים הצעירים וקנה השורש מצביעים על כך שהביומסה התת-קרקעית של עשבי-ים משחקת תפקיד משמעותי באגירת פחמן לטווח ארוך אפילו בזמן שהמערכת דועכת ומתפרקת. כלומר, כאשר עשבי-הים מתפרקים, הפחמן האי-אורגני המומס המשתחרר כתוצאה מפירוק זה ישתחרר לאט יותר בשורשים, כך שחלק מהפחמן האורגני יישאר קבור במשקע. כיוון שהביומסה העליונה והתחתונה של ימון הקשקשים מכילות כמות כמעט זהה של פחמן (23% ו-24%, בהתאמה) [39] וכי יחס הביומסה העליונה לתחתונה בצמח קרוב ל1:1[41], ניתן לומר כי מחצית מהפחמן האורגני של ימון הקשקשים מתפרק לאט יותר במשקע ויישאר קבור לטווח זמן ארוך יותר. בכך, עשבי-הים ממשיכים למעשה לתרום למיתון שינויי האקלים גם בעת פירוקם.

כאשר פחמן נקבר במשקע יבשתי, שבו חדירות החמצן גבוהה יחסית, הפחמן מתפרק במהירות רבה יותר על-ידי חיידקים וחוזר לאטמוספרה כפד"ח. לעומת זאת, במשקע הימי מרבית תגובות הפירוק הינן אל-אווירנית בשל היעדר החמצן והקצב שלהן נמוך יותר. כלומר, פחמן שנקבר במשקע נשאר קבור לזמן רב יותר של מאות ואף אלפי שנים[42].

קנה השורש והעלים הצעירים גורמים לעלייה בריכוזי המימן הגופרי (איור 6ב'), שהינו צורון רעיל של גופרית, הנקשר פעמים רבות לתמותה בעשבי-ים[43]. "משוב הגופרית" הינו תהליך משוב חיובי שבו גופרה עוברת חיזור ונוצר מימן גופרי, אשר גורם לתמותת עשבי-ים, שבעקבותיה ישנה הגברה נוספת של חיזור הגופרה (על-ידי פירוק התאים של עשבי-הים שמתו) שגורם ליצירה של עוד מימן גופרי שגורם לתמותה של עוד עשבי-ים וכך הלאה. חיזור גופרה מתרחש בסביבה ענייה בחמצן. אובדן החמצן ותמותה של עוד עשבי-ים מוסיפים עוד חומר אורגני למשקע וגורמים לחיזור נוסף ולהגברה של "משוב הגופרית". בנוסף, אובדן החמצן עלול להוביל גם לאובדן של בעלי חיים הנוברים במשקעים הימיים (כגון רכיכות ותולעים). בתנאים אלה יהיה קשה לשקם את מרבדי עשבי-הים ולהחזירם לסביבה שממנה הם נעלמו. כתוצאה מכך, תיתכן פגיעה משמעותית ומתמשכת באוכלוסיית עשבי-הים במפרץ אילת שתגרור פגיעות נוספות במערכות אקולוגיות שכנות במפרץ.

מנגנון ההיעלמות של עשבי-ים וההשלכות על הביוגיאוכימיה של משקעים ימיים במפרץ אילת

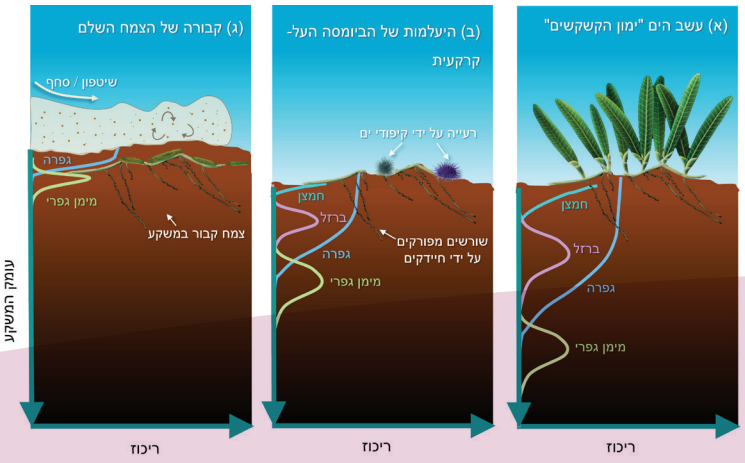
למרות שתהליך הפירוק של עשבי-ים משחק תפקיד מפתח בביוגיאוכימיה של משקעים ימיים, ההבנה שלנו לגבי המסלולים והתהליכים שעובר החומר האורגני במהלך הפירוק עדיין לוקה בחסר. היעלמות של מרבדי עשבי-ים מהטבע מתרחשת כתוצאה ממגוון גורמים כולל ירידה באיכות המים, העתרה, שינויי אקלים, פיתוח חופי ודיג יתר[33].

הניסויים המתוארים בעבודה זו בחנו את השינויים הכימיים במי החללים בעקבות היעלמות של עשבי-הים. התוצאות המוצגות מצביעות על כך שאיבוד של עשבי-ים עשוי לגרום להתפתחות של תנאים מחזרים במי החללים העלולים להקשות על חזרתם של עשבי-ים למשקעים שמהם נעלמו, דבר המהווה אתגר למאמצי שיקום עתידיים. במשך כ-20 שנה, הוצבו כלובי דגים בחוף הצפוני של מפרץ אילת אשר גרמו לעלייה בריכוזי חומרי ההזנה באזור. ב-2008 הכלובים הוצאו וכשנה לאחר מכן, עשבי-הים הראו התאוששות לאחר שנעלמו[44]. ממצא חשוב זה מוכיח כי אכן ניתן לשקם כרי עשבי-ים לאחר שנפגעו אך במקרים רבים אחרים, שבהם ההפרעה הינה מתמשכת ולא נקטעת באופן יזום, קיימת סכנת היעלמות משמעותית לעשבי-ים[46,45].

מכיוון שנוכחנו לראות כי קיימים הבדלים במסלולי הפירוק הביוגיאוכימיים של חלקיו השונים של "ימון הקשקשים" (איור 6), יש להבחין בין מנגנון ההיעלמות של עשב-הים על מנת ללמוד על ההשפעה הכימית של היעלמותם על הסביבה. לפיכך, אנו מציעים השערה להשפעה של איבוד עשבי-ים במפרץ אילת עבור שני תרחישים אפשריים: (1) אובדן של הביומסה מעל המשקע, כלומר החלק העל-קרקעי = העלים (אשר עלול להיגרם לדוגמה כתוצאה מרעיית יתר), ו-(2) קבורה של הצמח כולו במשקע באופן מהיר אשר עלולה להיגרם על-ידי שיטפונות, זרמי עכירות או תנועות משקע מהירות אחרות.

איור 7 משרטט באופן כללי את השתנות תהליכי הנשימה האל-אווירנית במשקעים ימיים בעקבות תרחישי היעלמות משתנים של עשבי-ים. בתרחיש הראשון, החומר האורגני השאריתי במשקע יורכב בעיקר משורשים וחלקים מקנה השורש. הפירוק של השורשים יגרום לחיזור של המשקע. אולם, כמות החומר האורגני תספיק להגברה בקצב חיזור הברזל אך לא להגברה בקצב חיזור הגופרה. על כן, היעלמות של עשבי-ים בתרחיש הזה לא תגרום להצטברות של מימן גופרי בריכוזים גבוהים במשקע ולפיכך, לא ייווצר "משוב הגופרית".

בתרחיש השני, החומר האורגני השאריתי במשקע יכלול את כל חלקי הצמח, כולל העלים וקנה השורש אשר מתפרקים בקצב מהיר יחסית ומעודדים התפתחות של חיזור גופרה חיידקי בתוך שעות. המימן הגופרי הנוצר בתהליך זה עשוי להרוג עוד עשבי-ים ויצורים אחרים השוכנים במשקע ולגרום להתפתחות של "משוב גופרית". אם כך, ישנה חשיבות גדולה למנגנון שבו עשבי-הים נעלמים, טווח הזמן ואילו מבין חלקי הצמח נקברים ומתפרקים במשקע.



איור 7. השינויים בריכוזי הצורונים הכימיים (חמצן בטורקיז, ברזל דו-ערכי בסגול, גופרה בכחול, ומימן גופרי בירוק) עם עומק המשקע בעקבות תרחישי היעלמות שונים של עשבי-ים. א. עשבי-ים חיים (במקרה זה, "ימון הקשקשים"). ב. היעלמות של הביומסה העל-קרקעית אשר תגרום לירידה מהירה יותר בריכוזי החמצן במשקע ולהגברת תהליכי חיזור כמו חיזור ברזל וחיזור גופרה. ג. הצמח כולו נקבר מתחת למשקע וכל חלקיו מתפרקים. במקרה זה, חיזור גופרה יהיה התהליך העיקרי במשקע וכבר בס"מ העליונים ריכוזי המימן הגופרי יהיו גבוהים וקרובים לפני השטח וריכוז הגופרה יהיה נמוך כבר במילימטרים העליונים של המשקע.

השלכות היעלמות עשבי-ים על האקולוגיה במפרץ אילת

בשל המבנה הפיזי של מפרץ אילת, ישנה תחלופה איטית של מים בין המפרץ לים הפתוח, כאשר זמן השהות של המים העליונים הינו שנה לעומת זמן שהות של המים העמוקים שיכול להגיע עד 10 שנים [47,48]. לכן, להיעלמותם של עשבי-ים באזור תהיה עשויה להיות השפעה שלילית לא רק על המרבדים עצמם אלא גם על מערכות אקולוגיות שכנות (כגון שוניות אלמוגים) הנתמכות בשירותים האקולוגיים הניתנים על-ידי מרבדי עשבי-הים. למרות כיסוי השטח הגדול (באופן יחסי) של מרבדי עשבי-הים במפרץ אילת, חשיבותם האקולוגית וערכם הכלכלי, הם עדיין מקבלים תשומת לב ציבורית, מדעית, חקיקתית ורגולטורית מועטה במיוחד יחסית למערכות אקולוגית אחרות במפרץ. למרות שהם נחשבים לצמחים מוגנים, מרבדי עשבי-הים בחלקו הצפוני של המפרץ עדיין אינם מוכרזים כחלק מהשמורה הימית וחשופים למגוון רחב של הפרעות וסיכונים.

היעלמותם של עשבי-ים עשויה להסב נזק סביבתי וכלכלי עצום. השטח הגדול ביותר שמכסים עשבי-ים במפרץ אילת נמצא בחוף הצפוני[24] החשוף למגוון רחב של הפרעות הנובעות מפעילות האדם כגון נגר עילי ממפעלים ומתעלת הקינט, פעילות סירות וספינות (גרירת עוגן הגורמת ל"צלקות" במרבדים של עשבי-ים) ורצועת חוף מתויירת. הממצאים המוצגים בעבודה זו מראים כי היעלמותם של עשבי-ים גורמת לשינויים כימיים בסביבתם ולעלייה בריכוזים של תרכובות כימיות רעילות אשר מקשות על חזרתם של עשבי-ים למרבד שניזוק. דבר זה מדגיש את חשיבותם של מאמצי השימור של עשבי-ים. בצל הסכנה שמרבד עשבי-ים שנפגע לא יוכל להשתקם מהפגיעה בו, יש לשאוף ככל האפשר למנוע פגיעה משמעותית מלכתחילה. בנוסף, מכיוון שאחד הגורמים המשמעותיים להיעלמות עשבי-ים הינו פיתוח חופי[6], עלינו להתחשב בתוצאות המוצגות כאן בבואנו לבצע פעילות כזו בחופים שבסמוך אליהם גדלים מרבדים של עשבי-ים. אנו מציעים לפעול להעלאת המודעות הציבורית, המדעית והחקיקתית לחשיבותם של עשבי-ים אשר תסייע להוביל לשינוי מדיוניות שתגן על מערכת חשובה זו.

על מנת להעלות את המודעות הציבורית, ניתן לקיים מגוון פעילות הסברתיות וחינוכיות באמצעות הרצאות, סיורים, שילוט באתרי צלילה ותיירות והקמת תצוגה במצפה התת-ימי. בנוסף, ניתן לעודד מחקרים באמצעות הקצבת מענקים ומלגות עבור חוקרים ותלמידי מחקר וקידום שיתופי פעולה אזוריים. בפן החקיקתי, אנו מציעים להכריז על עשבי-ים כבית גידול לשימור וכחלק מהשמורה הימית במפרץ ולפעול לניסוח חוקים ומדיניות להגנתם.

רשימת מקורות

1. USGCRP. Fifth National Climate Assessment. (U.S. Global Change Research Program, 2023). doi: 10.7930/NCA5.2023.
2. IPCC. Annex B - Glossary of terms in Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. (Cambridge University Press, 2001).
3. Siikamäki, J., Sanchirico, J. N., Jardine, S., McLaughlin, D. & Morris, D. Blue carbon: coastal ecosystems, their carbon storage, and potential for reducing emissions. *Environ. Sci. Policy Sustain. Dev.* **55**, 14–29 (2013).
4. Laffoley, D. & Grimsditch, G. D. (eds). The Management of Natural Coastal Carbon Sinks. (IUCN, 2009).
5. Van Der Heide, T. et al. A three-stage symbiosis forms the foundation of seagrass ecosystems. *Science* **336**, 1432–1434 (2012).
6. Orth, R., Harwell, M. & Inglis, G. Ecology of seagrass seeds and seagrass dispersal processes. In Seagrasses: Biology, Ecology, and Conservation 111–133 (Springer, 2006).
7. Edgeloe, J. M. et al. Extensive polyploid clonality was a successful strategy for seagrass to expand into a newly submerged environment. *Proc. R. Soc. B* **289**, 20220538 (2022).
8. Arnaud-Haond, S. et al. Implications of extreme life span in clonal organisms: millenary clones in meadows of the threatened seagrass *Posidonia oceanica*. *PLoS ONE* **7**, e30454 (2012).
9. Foden, J. Assessment metrics for littoral seagrass under the European Water Framework Directive; outcomes of UK intercalibration with the Netherlands. *Hydrobiologia* **579**, 187–197 (2007).
10. Reynolds, P. L., Duffy, E. & Knowlton, N. Seagrass and seagrass beds. Ocean Portal. Roca, G. et al. Response of seagrass indicators to shifts in environmental stressors: a global review and management synthesis. *Ecol. Indic.* **63**, 310–323 (2016).
11. Guannel, G., Arkema, K., Ruggiero, P. & Verutes, G. The power of three: coral reefs, seagrasses and mangroves protect coastal regions and increase their resilience. *PLoS ONE* **11**, e0158094 (2016).
12. Moore, K. A. Influence of seagrasses on water quality in shallow regions of the lower Chesapeake Bay. *J. Coast. Res.* **10045**, 162–178 (2009).
13. Bertelli, C. M. & Unsworth, R. K. Protecting the hand that feeds us: Seagrass (Zostera marina) serves as commercial juvenile fish habitat. *Mar. Pollut. Bull.* **83**, 425–429 (2014).
14. Verweij, M. C., Nagelkerken, I., Hans, I., Ruseler, S. M. & Mason, P. R. Seagrass nurseries contribute to coral reef fish populations. *Limnol. Oceanogr.* **53**, 1540–1547 (2008).
15. Lilley, R. J. & Unsworth, R. K. Atlantic Cod (*Gadus m*orhua) benefits from the availability of seagrass (*Zostera marina*) nursery habitat. *Glob. Ecol. Conserv.* **2**, 367–377 (2014).

16. Costanza, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Glob. Environ. Change* **26**, 152–158 (2014).
17. Lamb, J. B. et al. Seagrass ecosystems reduce exposure to bacterial pathogens of humans, fishes, and invertebrates. *Science* **355**, 731–733 (2017).
18. De Boer, W. F. Seagrass–sediment interactions, positive feedbacks and critical thresholds for occurrence: a review. *Hydrobiologia* **591**, 5–24 (2007).
19. Hendriks, I. E. et al. Photosynthetic activity buffers ocean acidification in seagrass meadows. *Biogeosciences* **11**, 333–346 (2014).
20. Meysman, F. J., Galaktionov, O. S., Gribsholt, B. & Middelburg, J. J. Bioirrigation in permeable sediments: Advective pore-water transport induced by burrow ventilation. *Limnol. Oceanogr.* **51**, 142–156 (2006).
21. Short, F. T. & McRoy, C. P. Nitrogen uptake by leaves and roots of the seagrass *Zostera marina*. *Botanica Marina* **27**, 547-556 (1984).
22. Brodersen, K. E. et al. Seagrass-mediated phosphorus and iron solubilization in tropical sediments. *Environ. Sci. Technol.* **51**, 14155–14163 (2017).
23. Pedersen, O., Borum, J., Duarte, C. M. & Fortes, M. D. Oxygen dynamics in the rhizosphere of Cymodocea rotundata. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **169**, 283–288 (1998).
24. Rotini, A. et al. Ecophysiological plasticity and bacteriome shift in the seagrass *Halophila stipulacea* along a depth gradient in the Northern Red Sea. *Front. Plant Sci.* **7**, 2015 (2017).
25. Sharon, Y. et al. Photosynthetic responses of *Halophila stipulacea* to a light gradient. *Aquat. Biol.* **7**, 153–157 (2009).
26. Winters, G. et al. The tropical seagrass *Halophila stipulacea*: reviewing what we know from its native and invasive habitats, alongside identifying knowledge gaps. *Front. Mar. Sci.* **7**, 300 (2020).
27. Winters, G. et al. A low cost field-survey method for mapping seagrasses and their potential threats: an example from the northern Gulf of Aqaba, Red Sea. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* **27**, 324–339 (2017).
28. Du, J. et al. Seagrass meadows provide multiple benefits to adjacent coral reefs through various microhabitat functions. *Ecosyst. Health Sustain.* **6**, 1812433 (2020).
29. Froelich, P. et al. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta* **43**, 1075–1090 (1979).
30. Kasten, S. & Jørgensen, B. B. Sulfate reduction in marine sediments. In Marine Geochemistry 263–281 (Springer, 2000).

31. Antler, G., Mills, J. V., Hutchings, A. M., Redeker, K. R. & Turchyn, A. V. The sedimentary carbon-sulfur-iron interplay–a lesson from East Anglian salt marsh sediments. *Front. Earth Sci.* **7**, 140 (2019).
32. Sela-Adler, M. et al. Co-existence of methanogenesis and sulfate reduction with common substrates in sulfate-rich estuarine sediments. *Front. Microbiol.* **8**, 766 (2017).
33. Waycott, M. et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **106**, 12377–12381 (2009).
34. Lirman, D. et al. SAV communities of western Biscayne Bay, Miami, Florida, USA: human and natural drivers of seagrass and macroalgae abundance and distribution along a continuous shoreline. *Estuaries Coasts* **37**, 1243–1255 (2014).
35. Githaiga, M. N., Frouws, A. M., Kairo, J. G. & Huxham, M. Seagrass removal leads to rapid changes in fauna and loss of carbon. *Front. Ecol. Evol.* **7**, 62 (2019).
36. Soto, N. The Effect of Seagrass *Halophila stipulancea*'s Disappearance on the Biogeochemistry of Marine Sediments. MSc thesis, Ben-Gurion University of the Negev (2023).
37. Dutta, S. et al. A method for a fast and economical *in situ* collection of pore water in sandy sediments. *Front. Mar. Sci.* **9**, 968063 (2022).
38. Jiang, Z. J., Huang, X. P. & Zhang, J. P. Effects of CO_2 enrichment on photosynthesis, growth, and biochemical composition of seagrass *Thalassia hemprichii* (Ehrenb.) Aschers. *J. Integr. Plant Biol.* **52**, 904–913 (2010).
39. Soto, N., Winters, G. & Antler, G. The effect of anaerobic remineralization of the seagrass *Halophila stipulacea* on porewater biogeochemistry in the Gulf of Aqaba. *Front. Mar. Sci.* **8**, 802354 (2022).
40. Helber, S. B. et al. Nutrient history affects the response and resilience of the tropical seagrass *Halophila stipulacea* to further enrichment in its native habitat. *Front. Plant Sci.* **12**, 678341 (2021).
41. Azcárate-García, T., Beca-Carretero, P., Villamayor, B., Stengel, D. B. & Winters, G. Responses of the seagrass *Halophila stipulacea* to depth and spatial gradients in its native region (Red Sea): morphology, in situ growth and biomass production. *Aquat. Bot.* **165**, 103252 (2020).
42. Arndt, S., Jørgensen, B. B., LaRowe, D. E., Middelburg, J. J., Pancost, R. D. & Regnier, P. Quantifying the degradation of organic matter in marine sediments: A review and synthesis. *Earth-Sci. Rev.* **123**, 53–86 (2013).
43. Koch, M. S. & Erskine, J. M. Sulfide as a phytotoxin to the tropical seagrass *Thalassia testudinum*: interactions with light, salinity and temperature. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **266**, 81–95 (2001).

44. Oron, S., Angel, D., Goodman-Tchernov, B., Merkado, G., Kiflawi, M. & Abramovich, S. Benthic foraminiferal response to the removal of aquaculture fish cages in the Gulf of Aqaba-Eilat, Red Sea. *Mar. Micropaleontol.* 107, 8–17 (2014).
45. Terrados, J. et al. Are seagrass growth and survival constrained by the reducing conditions of the sediment? *Aquat. Bot.* 65, 175–197 (1999).
46. Holmer, M. & Bondgaard, E. J. Photosynthetic and growth response of eelgrass to low oxygen and high sulfide concentrations during hypoxic events. *Aquat. Bot.* 70, 29–38 (2001).
47. Reiss, Z. & Hottinger, L. A Desert-Enclosed Sea: The Gulf of Aqaba - Ecological Micropaleontology, 33–88 (Springer, 1984).
48. Silverman, J. & Gildor, H. The residence time of an active versus a passive tracer in the Gulf of Aqaba: A box model approach. *J. Mar. Syst.* **71**, 159–170 (2008).

30 ביולוגיה, ביומינרליזציה, ופזיולוגיה של אלמוגי אבן

טלי מס

חוג לביולוגיה ימית, בית ספר למדעי הים ע"ש ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה

tmass@univ.haifa.ac.il

תקציר

למרות מבנה הגוף הפשוט של אלמוגי האבן השייכים למערכת הצורבים (תת מחלקת הששאים) הם מייצרים שלד סידני הבונה מבנים מסיביים באזורים רדודים, טרופיים וסובטרופיים של האוקיינוסים בכדור הארץ. מבנים אלו, מורכבים למעשה משלדים של אלמוגים מתים ומהווים ביתם של כ-25% מתוך בעלי החיים הימיים המרכיבים יחד את סביבת החיים האקווטית המגוונת ביותר על פני כדור הארץ, שונית האלמוגים. השונות והמגוון המורפולוגי של המינים השונים מרמזים על כך שתהליך בניית שלד שמור מאוד באבולוציה, מותאם ביולוגית לסביבות השונות ומקורו במבנה הגנטי של כל אחד ממיני האלמוגים. תהליך זה של יצירת השלד באלמוגים נשאר ללא שינוי על אף שינויים אקלימיים שהתרחשו במהלך 400 מיליון השנים האחרונות ויותר.

בשנים האחרונות, מצב שוניות האלמוגים בעולם הולך ומידרדר וכיום ישנה ירידה של כ-50% באוכלוסיית האלמוגים באזורים מסוימים. הגורמים העיקריים לפגיעה בשוניות האלמוגים הם התחממות וירידת חומציות מי האוקיינוסים המתרחשות כתוצאה מפליטת כמות גדולה של פחמן דו-חמצני לאטמוספרה.

על מנת להבין טוב יותר כיצד ניתן להציל ולשקם את שוניות האלמוגים אנו צריכים להבין היטב את המנגנונים שבאמצעותם אלמוגי אבן מייצרים את השלד שלהם.

בסקירה זו אפרט את שידוע למדע עד כה על הבסיס הביולוגי, הפיזיקלי והגנטי של תהליך השקעת השלד של אלמוגי האבן.

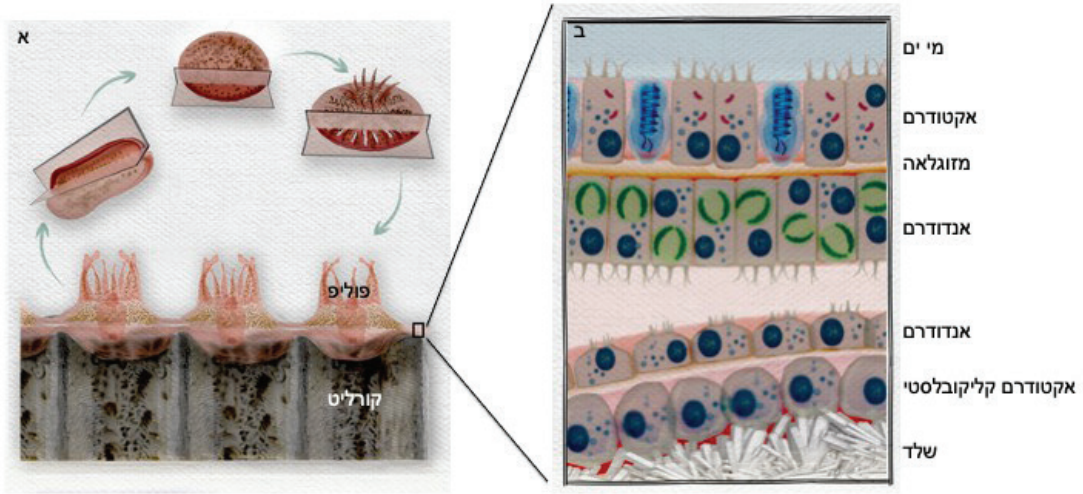
מבוא

ביומינרליזציה הינו תהליך שבו בעל חיים יוצר מינרל לצרכיו, זהו תהליך מורכב המחבר בין תחומי הכימיה והביולוגיה האורגנית והאי-אורגנית ונפוץ בכל ממלכות היצורים החיים המייצרים כ-60 מינרלים שונים[1]. מינרלים ביולוגיים ידועים ככאלה בעלי תכונות המתעלות מעל אלה של מינרלים ממקור גיאולוגי. אלמוגים הם מבין יצרני המינרל קלציום קרבונט ($CaCO_3$) הגדולים בעולם, הם מייצרים את המינרל ארגוניט (צורן של $CaCO_3$)[2] במגוון רחב של גדלים וצורות (איור 1)[3]. אותם גדלים וצורות ייחודיים למיני האלמוגים ולעיתים נבדלים גם בתוך אותו מין בהינתן סביבה שונה.

אלמוגי אבן הינם בעלי חיים קדומים מבחינה אבולוציונית. האב הקדום של האלמוגים המודרניים הופיע לפני כ-450 מיליון שנה, בעידן הפלאוזואיקון[4]. מבנה גוף האלמוגים פשוט יחסית והם פיתחו את היכולת לייצר שלד חוץ גופי העשוי גיר[5]. מבנה גוף האלמוג מורכב משתי שכבות נבט בלבד (אנדודרם ואקטורדם) אשר מופרדות ביניהן בשכבת חיבור ג'לטינית הנקראת מזוגלאה, החוזרות על עצמן, אחת פונה לכיוון הים (oral) והשנייה לכיוון השלד (aboral)[6]. יחידת המבנה הבסיסית של אלמוג הינה פוליפ בודד המבטא סימטריה רדיאלית, החי בתוך מבנה גירני בצורת גביע הנקרא קורלייט (איור 2)[7].

איור 1. מגוון צורות של מושבות אלמוגים בשונית במפרץ אילת. צילום: חגי נתיב.

אלמוגים מושבתיים, בנויים מפוליפים זהים גנטית זה לזה (שכן הם מתרבים בחלוקה וגטטיבית) המחוברים ביניהם ברקמת חיבור אשר מאפשרת קשר וחלוקה במשאבים בתוך המושבה (איור 2). רקמת האלמוג מכסה את השלד הגירני העשוי מהמינרל ארגוניט, כמו כפפה המכסה יד ומכילה בשכבת המגע ביניהם תאי אקטודרמיס ייחודיים הנקראים תאים קליקובלסטים אשר תפקידם לייצר את השלד.

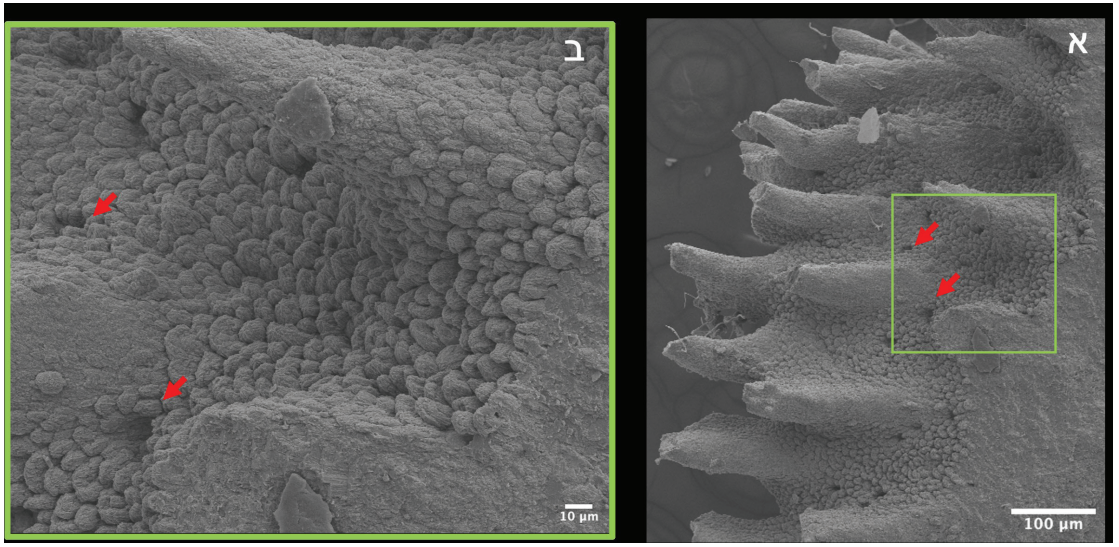


איור 2. א. מבנה סכמטי של מחזור החיים של אלמוג המתחיל מפגית שעוברת שינוי לאחר התיישבות ומייצרת את השלד הגירני. ב. רקמת האלמוג וסידור שכבות הגוף[8].

מחזור החיים של האלמוג מתחיל בפגית, דמויית זחל זעיר, שאינה ניזונה אך בעלת כושר תנועה במים עד שפוגשת מצע קשה כלשהו ונצמדת אליו. לאחר ההתיישבות, הפגית עוברת שינוי צורה לפוליפ ראשוני, אשר מסוגל לצוד, ומתחיל לבנות את שלדו. פוליפ זה מתחלק בדרך של רבייה א-מינית ויוצר פוליפים זהים נוספים עד ליצירת מושבה בוגרת (איור 2)[9]. מרבית אלמוגי האבן חיים בסימביוזה עם אצה חד-תאית החיה בתוך תאי האלמוג ומספקת להם אנרגיה.
כבר לפני יותר מ-150 שנה החלו לחקור את מנגנון השקעת השלד באלמוגים, למרות זאת אנחנו עדיין לא מבינים עד תום כיצד אלמוגי האבן מצליחים לייצר את השלד שלהם באופנים של סדר ומגוון מרשימים כל כך. הסברה הראשונית הייתה שבניית השלד הינה תהליך שאינו מבוקר ביולוגית וכי שלד האלמוג נוצר ע"י היווצרות גבישים של ארגוניט בתהליך המונע על-ידי תנאי הסביבה הכימיים-פיזיקליים במי הים. אולם הסברה היום, שיש לה הוכחות רבות, שהתהליך מבוקר ביולוגית.

היווצרות ומבנה השלד

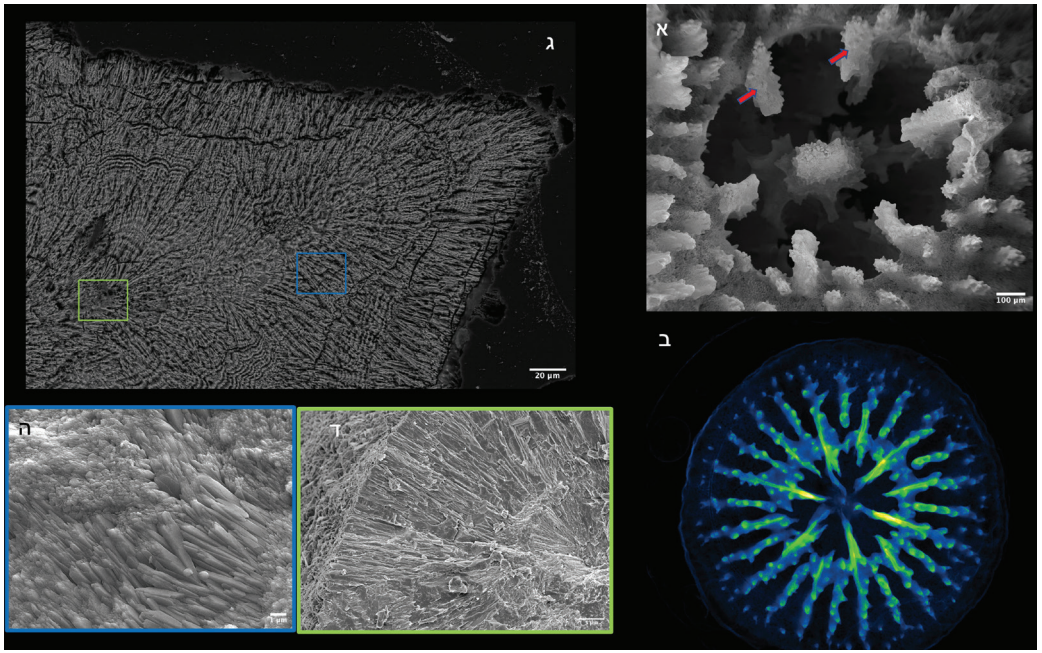
המחקרים האחרונים בתחום תהליך יצירת שלד באלמוגים משרטטים תהליך שבו תאי הקליקובלסט נצמדים לשלד קיים (איור 3) או למצע חדש באמצעות התאים הקליקובלסטים ומפרישים מולקולות הנקראות Skeletal Organic Matrix (SOM) לחלל סגור הנקרא חלל השקעת השלד[7]. תאים אלו גם מווסתים את מעבר היונים השונים ממי הים לתוך חלל זה ויוצרים את השלד החדש. אולם, בדומה לרוב בעלי החיים שבונים שלד, עדיין לא לגמרי מובן כיצד תהליך זה קורה.



איור 3. תמונת מיקרוסקופ אלקטרוני: א. צלקות שנשארו בשלד של האלמוג שיחן שכיח בנקודת העגינה של התאים הקליקובלסטים לשלד (חצים אדומים). ב. הגדלה של הריבוע המסומן בירוק באיור א.

מבנה והרכב שלד האלמוג נחקר כבר משנת 1840[7], מחקר זה מראה דמיון רב במבנה הבסיסי של השלד למרות השוני במבנה המושבות השונות. ההבדלים העיקריים בין מיני האלמוגים השונים קשורים למבנה המושבה, מיקום וצורת הקרוליט והמחיצות (הספטות), הבדלים אלו שימשו לאורך השנים להגדרת המינים השונים.[3]

שלד האלמוג מורכב משני חלקים עיקריים, שהם: גרעין השקעת השלד וסיבי ארגוניט הגדלים סביב מרכז זה בצורה מעגלית (איור 4)[10]. הסידור המרחבי של מרכזי השקעת השלד והסיבים הגדלים ממנו שונה במיני האלמוגים השונים. מרכז השקעת השלד עשיר בחומר אורגני שיוצר את גרעין ההתגבשות הראשוני של הסידן. בנוסף, אזור זה עשיר במגנזיום וסידן אמורפי. סיבי הארגוניט המקיפים את הגרעין ומרכיבים את רוב השלד, מכילים כ-1% חומר אורגני בלבד. היות שהמבנה של השלד ובעיקר סידור סיבי הארגוניט שונים בין המינים, גם הוא משמש להגדרת המינים השונים.



איור 4. תמונת מיקרוסקופ אלקטרוני של מבנה כללי של שלד האלמוג שיחן שכיח. א. פוליפ בודד כולל מחיצות השלד (חץ אדום ואיור ג). ב. סריקת µCT המדגימה את המבנה התלת-ממדי של פוליפ הכולל את מרכזי השקעת השלד (ירוק) ואת סיבי הארגוניט (כחול). ג. תמונת מיקרוסקופ אלקטרוני של חתך רוחבי במחיצת שלד (חץ אדום באיור א) ד. סידור של מרכזי השקעת השלד (מסגרת ירוקה באיור א) ה. מחטי הארגוניט (מסגרת כחולה באיור א).

השפעת הסביבה המימית על תהליך הביומינרליזציה: כימיה של מי הים

למרות שמי הים רווים ביוני סידן Ca^{2+} וביקרבונט HCO_3^-, סידן לא מתגבש במי הים באופן ספונטני. לעומת זאת, סידן נוצר ממי הים בצורה מבוקרת בחלל שבין רקמת האלמוג והמצע או השלד. על מנת להבין את הפרדוקס הזה, גיאוכימאים חוקרים את הכימיה של הנוזל בחלל השקעת השלד, הביולוגים חוקרים את החומר האורגני שמועבר לחלל הזה, ופיזיקאים מנסים לאפיין את התהליך שבו נוצר המינרל.

חשיבות הבנת התהליך נובעת מכך שזהו תהליך התלוי ברמת ה-pH, טמפרטורה ומליחות. תנאים אלו משתנים באופן רציף בסביבה הימית כתוצאה מפליטת פחמן דו-חמצני לאטמוספרה ועלולים להשפיע באופן דרמטי על תהליך יצירת השלד באלמוגים.

יצירת השלד באלמוגים מתייחסת לרמת הרוויה של ארגוניט (צורן של קלציום קרבונט, $CaCO_3$) שתלויה בריכוז יוני הסידן Ca^{2+} וביכוז יוני הקרבונט CO_3^{2-} במי הים משוואה 1 לכן ירידת pH מי הים תגרום לירידת ערך רמת הרוויה לארגוניט ומכאן לירידה בקצב השקעת השלד.

משוואה 1.

$$\Omega arg = \frac{[Ca^{2+}]sw\ X\ [CO_3^{2-}]sw}{[CaCO_3]}$$

בהתחשב בכך שדרגת הרוויה לארגוניט צריכה להיות גבוהה, על מנת שייווצר שלד, האלמוג צריך לווסת את ריכוז הקרבונט ורמת החומציות בחלל השקעת השלד. משוואה 1

במחקר חדש, של Sevilgen et al 2019[11], השתמשו החוקרים באלקטרודות מיוחדות בשילוב עם מיקרוסקופ אור והצליחו למדוד במדויק בתוך חלל השקעת השלד את ריכוז יוני הסידן, יוני הקרבונט ורמת החומציות. החוקרים הראו, שערכי החומציות בחלל השקעת השלד גבוהים מערכי הסביבה ב-0.36 pH, ריכוז יוני הקרבונט גדל פי 3.5 וריכוז יוני הסידן גדל פי 1.2. עלייה זו הובילה לעלייה של כפי 4 בדרגת הרוויה של הארגוניט, דבר המסביר את ההתגבשות המהירה של הסידן בחלל זה. אחת השאלות העולות ממדידות אלו היא כיצד מי הים מגיעים לחלל השקעת השלד.

יחסי גומלין (אינטראקציה) בין רקמת האלמוג ובין מי הים

רקמת האלמוג מחוברת לשלד, באופן בלתי רציף, בעזרת תאים ייחודיים ברקמה הקליקובלסטית (איור 2). בין כל חיבור כזה נוצר חלל (החלל הקליקובלסטי) שאליו מועברים מי ים ואיתם יונים הדרושים לבניית השלד. במחקר של Mor-Khlifa et al. 2021[12] החוקרים הראו שחלקיקים בגודל של כמיקרון אחד שהוספו למי הים הצליחו לעבור דרך רקמת האלמוג אל החלל שבו נוצר השלד. חלקיקים אלו העוברים בתעלות זעירות הנמצאות בין התאים, מוכיחים כי מי ים אכן יכולים להגיע לחלל שבו נוצר השלד. אולם מי ים אלו מכילים יונים בריכוז רגיל למי ים ולא בריכוז הייחודי שנמדד[11]. מכאן נראה, כי קיים מנגנון שונה, המוביל לשינוי בהרכב הכימי בחלל יצירת השלד.

מנגנון נוסף למעבר יונים לחללי יצירת השלד הוא דרך משאבות יונים אקטיביות או תעלות יונים. במשאבות אלו, יוני סידן וביקרבונט מועברים תוך כדי שחרור פרוטונים. מחקרים שונים[13,14]השתמשו בסמני צבע הנקשרים לתעלות ולמשאבות תוך תאיות ספציפיות וזיהו אותן בשכבת התאים הקליקובלסטית. לאחר שיוני הביקרבונט מגיעים לחלל השקעת השלד. האלמוג משתמש באנזים קרבוניק אנהידרז אשר מזרז את ריאקציית ההתמרה מביקרבונט לקרבונט אשר זוהה, גם הוא, במחקר, בשכבת הקליקובלסט בעזרת נוגדנים יחודיים לאנזים[15].

דרך נוספת למעבר יונים הינה בעזרת בועיות (וזיקולות) תוך תאיות. וזיקולות אלו אוגרות בתוכן מי ים וחלבונים אשר יחד גורמים לתחילת התגבשות של המינרל בצורה אמורפית[16].

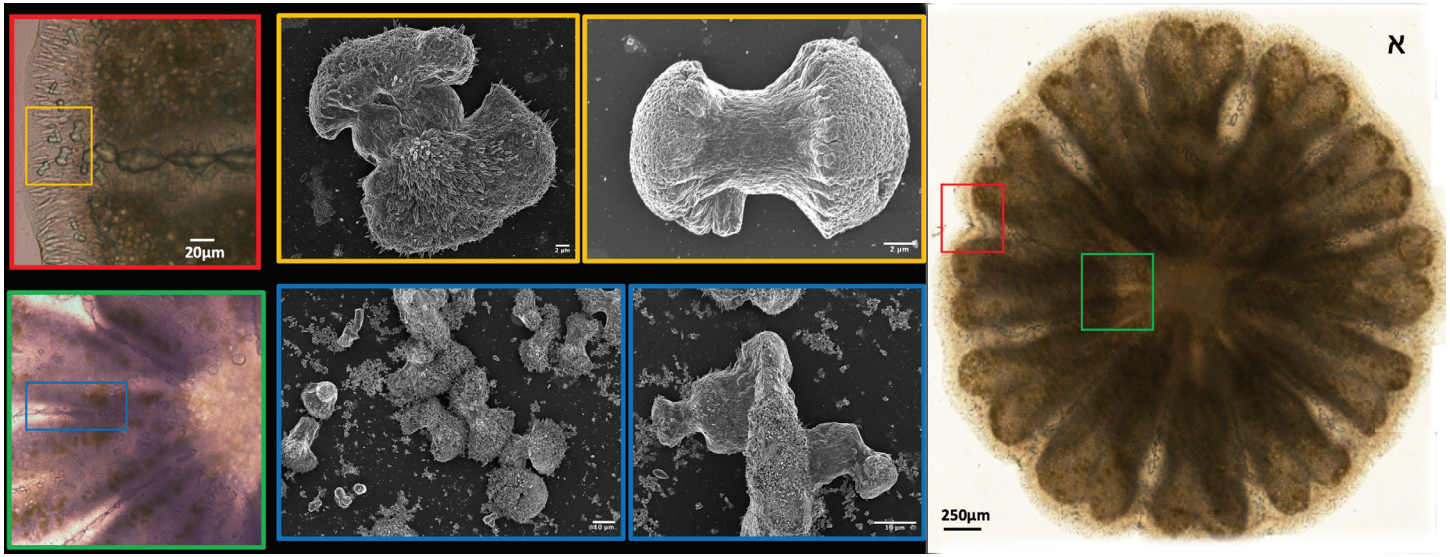
לסיכום, בשלב הראשון של התהליך, האלמוג ממלא את החלל שבין שכבת הגוף האקטודרמלית והמצע ביונים של סידן וקרבונט שמקורם במי הים, יונים אלו יכולים להגיע לחלל ע"י שילוב של תעלות אקטיביות, דרך הממברנה התאית, במעברים בין התאים או ע"י ריכוז של יונים בוזיקולות תוך תאיות. אומנם המנגנונים השונים הוכחו מדעית, אך נכון להיום, לא ידוע מהי התרומה של כל מנגנון להעברת היונים.

יצירת השלד הסופית - רכיבים אורגניים והאי-אורגניים בתוך השלד

לאחר שההרכב הכימי בחלל יצירת השלד מיוצב, המולקולות האורגניות שמופרשות לחלל זה ע"י התאים הקליקובלסטים מהוות גרעיני התגבשות ראשוניים למינרל (מרכז השקעת שלד). מולקולות אורגניות אלו מורכבות מחלבוני שלד חומציים ומחלבונים מבניים[17]. חלבונים בעלי תכונות דומות נמצאים בכל בעלי החיים המשקיעים שלד[18].

בעזרת חלבונים אלו נוצר גרעין ההתגבשות הראשוני היוצר מינרל בצורת משקולית[16], ממנו מנצים סיבי ארגוניט בצורה מעגלית המתארכים וממלאים את החלל בין הגבישים השונים (איור 5). בנוסף, אזור זה עשיר במגנזיום וסידן אמורפיים. סיבי הארגוניט מרכיבים את רוב מסת השלד והם מכילים כ-1% חומר אורגני[7]. בנוסף, הפיזור המרחבי של יסודות הקורט ואיזוטופים יציבים משתנה בין האזורים הללו. קיים דמיון רב ביחידת המבנה הבסיסית של השלד, ברמה המיקרונית, ומרכז השקעת השלד שממנו גדלים סיבי הארגוניט חוזר על עצמו (איור 4)[19].

הסידור המרחבי של מרכזי השקעת השלד והסיבים הגדלים ממנו שונה בין מיני האלמוגים השונים ויכול לשמש כדרך נוספת לזיהוי המינים השונים. ולאחרונה, זיהוי מבני זה להבחנה בין המינים, נתמך גם בשיטות זיהוי מולקולריות היות שצורת הגדילה נשלטת ע"י הגנטיקה השונה של כל אלמוג. למרות זאת, נמצא כי לסביבת הגידול המקומית של כל אלמוג ישנה השפעה חזקה על המורפולוגיה של השלד.

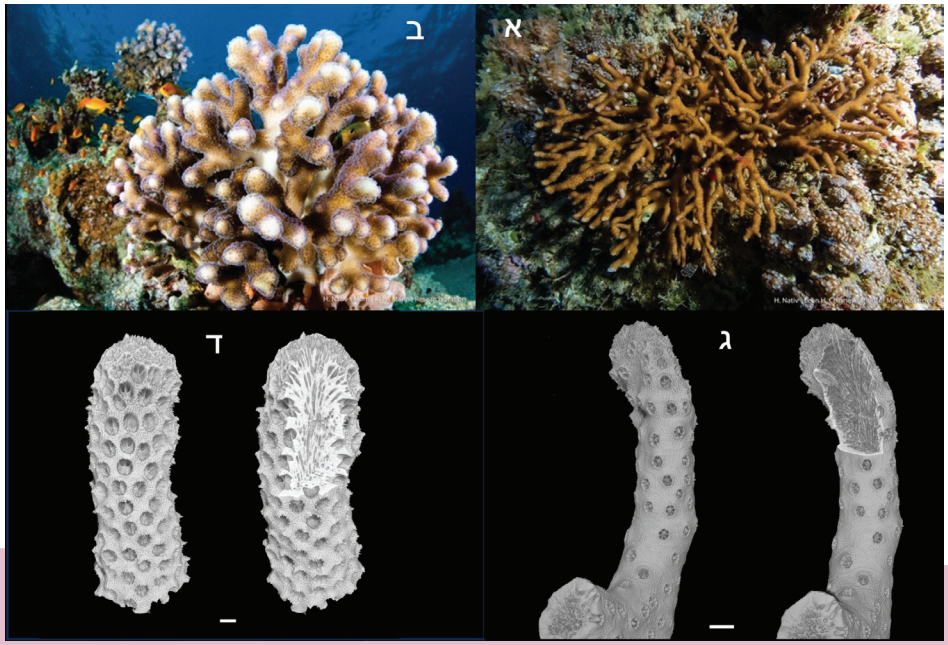


איור 5. א. תמונת מיקרוסקופ אור של פוליפ בודד של האלמוג שיחן שכיח. בהגדלה של האזורים המסומנים בריבוע אדום וירוק ניתן לראות את השלבים הראשונים של תהליך בניית השלד של האלמוג. בריבוע האדום נראה שלב ראשון מתחיל מגרעין התגבשות ראשוני בצורת משקולית. תמונת מיקרוסקופ אלקטרוני של משקולית המסומנת בריבוע כתום. בשלב השני (ריבוע ירוק) ישנה הנצה של סיבי ארגונית מהמשקולית הממלאים את החללים בין גרעיני ההתגבשות ליצירת מחיצות השלד המלאות (ריבוע כחול)[16].

השפעת הסביבה על מבנה השלד: גמישות מורפולוגית

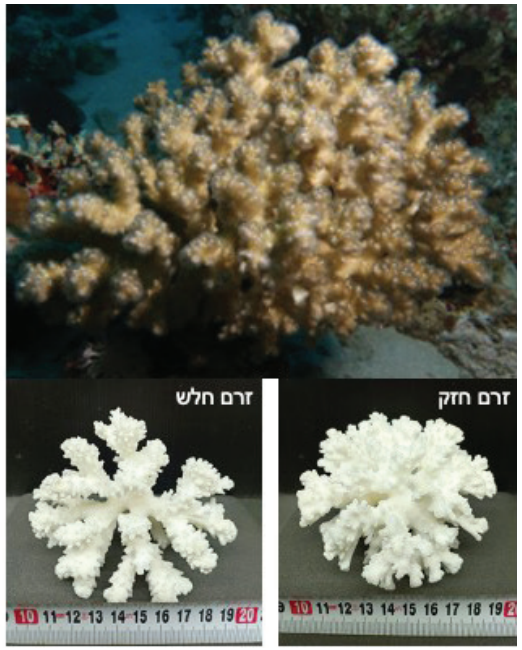
אלמוגים בונים שלד גירני הבנוי מארגוניט, שלד זה מהווה בסיס ליצירת שוניות אלמוגים מורכבות בצורות ומבנים שונים באזורים שונים באוקיינוסים. מיני האלמוגים נבדלים זה מזה בצורה ובמבנה של השלד. במבנה ובגודל מושבת האלמוגים קיימת מעורבות גנטית, לצד השפעה ישירה של הסביבה שבה היא גדלה תוך התאמה של צורת המושבה לתנאים הפיזיקליים שבה היא גדלה. תהליך זה נקרא "גמישות מורפולוגית" (phenotypic plasticity) והוא מסייע

לאלמוגים, שהם בעלי חיים צמודי מצע, להגדיל את מגוון בתי הגידול שלהם.
לפיכך, אלמוגים בודדים המייצגים את אותה אוכלוסייה גנטית יכולים לבטא שונות מורפולוגית ופיזיולוגית בעקבות תנאי סביבה שונים. מחקרים קודמים הראו למשל כי גמישות מורפולוגית של אלמוגי אבן עשויה להיות מופעלת על-ידי הבדלים בזרימת המים[20,21], עומק[22–24], או פרמטרים סביבתיים אחרים (כמו אור, טמפרטורה, מליחות וחומציות)[25,26].
נראה גם כי מינים שונים יכולים לפתח מורפולוגיות שדומות למינים אחרים כאשר מעבירים אותם לסביבה משותפת: למשל, האלמוג *שיחית Pocillopora meandrina* יכול לפתח תכונות מורפולוגיות הדומות *לשיחית Pocillopora-damicornis* בתוך כמה חודשים לאחר העברה לבית גידול זהה[27].
דוגמה אחת לגמישות פנוטיפית (שאינה תלויה בשינוי גנטי), מתבטאת באלמוגי אבן במין שיחן שכיח (*Stylophora pistillata*), שהוא מין אלמוג שיחני הנפוץ במפרץ אילת. השיחן השכיח נפוץ לאורך כל עמודת המים מעומק 1-70 מטרים כאשר התנאים הפיזיקליים של הסביבה העמוקה (מעבר ל 30 מ') שונים מאוד מהסביבה הרדודה בעיקר בהיבטים של לחץ הידרוסטטי, תאורה (עוצמה ואורך גל), טמפרטורה, זמינות מזון וזרמים. השינויים האלה יוצרים סביבה שונה לגדילת אלמוגים הדורשת התאמה ייחודית, למשל, בכדי למקסם את אפשרויות הקליטה של האור ובכדי ללכוד מזון. אי לכך, משתנה מבנה המושבה ממופע כדורי בעוצמת אור גבוהה למופע שטוח המותאם לקליטת קרני האור בצורה הטובה ביותר (איור 6)[22].



איור 6. מבנה מושבה של האלמוג שיחן הגדל א. בעומק 60 מטר ב. בעומק 5 מטר. מבנה המושבה משתנה ממבנה כדורי ב-5 מטר למבנה צלחתי בעומק 60 מטר. ג. ו-ד. סריקת מיקרו סי טי מראה את ההבדל במבנה תלת-ממדי של השלד, המרחק בין הפוליפים גדל וגודל הפוליפ קטן עם העומק (סקאלה 1 מ"מ). צילום: חגי נתיב.

דוגמה נוספת היא מחקר של אלמוג מהמין שיחית (*Pocillopora verucosa*) שבו נמצא כי אלמוגים הגדלים באזורים שבהם זרם המים חזק ותנועת הגלים חזקה, בעלי שלד צפוף ומסיבי יותר משלד של אלמוג מאותו המין שגדל בלגונות שקטות לא זרמים (איור 7)[20].



איור 7. ההבדל במבנה השלד של האלמוג שיחנית הגדל בזרם חזק (מימין) וחלש (משמאל).

בנוסף, במחקר של Scucchia et al 2021[28] המחברים הראו שפגיות אלמוגים הגדלות בתנאי חומציות משתנה משנות את מבנה השלד שלהן כך שבתנאי חומציות נמוכה, השלד פחות צפוף ומכיל יותר חומר אורגני. היכולת של אלמוג להתאים את מבנה השלד שלו לסביבה המשתנה מגדיל את יכולתו לשרוד תנאים משתנים, ומגדיל את הפוטנציאל של האזורים הפחות חשופים להפרעות סביבתיות להוות מקלט פוטנציאלי לאלמוגים.

סקירה זו מראה שתהליך בניית השלד באלמוגים הינו תהליך מורכב המווסת ברמה המולקולרית ע"י תאי האלמוג ומושפע מהסביבה. למרות שאנחנו עדיין לא מבינים לגמרי את כל התהליך, מידע רב נאסף בשנים האחרונות על התהליך. לדוגמה, ברור לנו כי תהליך בניית השלד של האלמוגים אינו פשוט פונקציה של דרגת הרוויה של הארגוניט במי הים. לאורך ההיסטוריה הגיאולוגית, תהליך הברירה הטבעית סייע להתאמה לשינויים בתנאי הסביבה, הן ברמה המורפולוגית והן ברמה המולקולרית. כך שאף שמיני האלמוגים משתנים בהכרח, הקבוצה כולה ממשיכה להתקיים. בעוד שכיסוי האלמוגים יורד כתוצאה משינויי האקלים ומהשפעת האדם על הסביבה, העובדה שאלמוגים הצליחו בצורה מסוימת לשרוד לאורך תקופה של כ-500 מיליון שנה, מעלה תקווה שהם יוכלו לשרוד את שינויי האקלים הצפויים.

רשימת מקורות

1. Knoll, A. H. Biomineralization and evolutionary history. *Rev. Mineral. Geochem.* **54**, 329–356 (2003).
2. 2. Lowenstam, H. A. & Weiner, S. *On Biomineralization*. (Oxford Univ. Press, Oxford, 1989).
3. Veron, J. E. N. *Corals of the World*. (Australian Institute of Marine Sciences, Townsville, 2000).
4. Stolarski, J. *et al.* The ancient evolutionary origins of Scleractinia revealed by azooxanthellate corals. *BMC Evol. Biol.* **11**, 316 (2011).
5. Erwin, D. H. *et al.* The cambrian conundrum: early divergence and later ecological success in the early history of animals. *Science* **334**, 1091–1097 (2011).
6. Pochon, X. *et al.* Comparison of endosymbiotic and free-living *symbiodinium* (Dinophyceae) diversity in a Hawaiian reef environment. *J. Phycol.* **46**, 53–65 (2010).
7. Drake, J. L. *et al.* How corals made rocks through the ages. *Glob. Chang. Biol.* **26**, 31-53 (2020)
8. Drake, J. L., Varsano, N. & Mass, T. Genetic basis of stony coral biomineralization: History, trends and future prospects. *J. Struct. Biol.* **213**, 107782 (2021).
9. Levy, S. *et al.* A stony coral cell atlas illuminates the molecular and cellular basis of coral symbiosis, calcification, and immunity. *Cell* **184**, 2973–2987.e18 (2021).
10. Cuif, J. P. & Dauphin, Y. The environment recording unit in coral skeletons - a synthesis of structural and chemical evidences for a biochemically driven, stepping-growth process in fibres. *Biogeosciences* **2**, 61–73 (2005).
11. Sevilgen, D. S. *et al.* Full in vivo characterization of carbonate chemistry at the site of calcification in corals. *Science Advances* **5**, eaau7447 (2019).
12. Mor Khalifa, G., Levy, S. & Mass, T. The calcifying interface in a stony coral primary polyp: An interplay between seawater and an extracellular calcifying space. *J. Struct. Biol.* **213**, 107803 (2021).
13. Zoccola, D. *et al.* Cloning of a calcium channel alpha 1 subunit from the reef-building coral, *Stylophora pistillata*. *Gene* **227**, 157–167 (1999).
14. Zoccola, D. *et al.* Bicarbonate transporters in corals point towards a key step in the evolution of cnidarian calcification. *Sci. Rep.* **5**, 9983 (2015).
15. Bertucci, A., Tambutté, S., Supuran, C., Allemand, D. & Zoccola, D. A new coral carbonic anhydrase in *Stylophora pistillata*. *Mar. Biotechnol.* **13**, 992–1002 (2011).
16. Neder, M. *et al.* Mineral formation in the primary polyps of pocilloporoid corals. *Acta Biomater.* (2019) doi:10.1016/j.actbio.2019.07.016.
17. Peled, Y. *et al.* Optimization of skeletal protein preparation for LC-MS/MS sequencing yields additional coral skeletal proteins in *Stylophora pistillata*. *bioRxiv* 2020.03.16.991273 (2020).
18. Zaquin, T., Malik, A., Drake, J. L., Putnam, H. M. & Mass, T. Evolution of Protein-Mediated Biomineralization in Scleractinian Corals. *Front. Genet.* **12**, 618517 (2021).

19. Stolarski, J. Three-dimensional micro- and nanostructural characteristics of the scleractinian coral skeleton: A Biocalcification proxy. *Acta Palaeontol. Pol.* **48**, 497–530 (2003).
20. Mass, T. & Genin, A. Environmental versus intrinsic determination of colony symmetry in the coral *Pocillopora verrucosa*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **369**, 131–137 (2008).
21. Mass, T., Brickner, I., Hendy, E. & Genin, A. Enduring physiological and reproductive benefits of enhanced flow for a stony coral. *Limnol. Oceanogr.* **56**, 2176–2188 (2011).
22. Malik, A. *et al.* Molecular and skeletal fingerprints of scleractinian coral biomineralization: From the sea surface to mesophotic depths. *Acta Biomater.* **120**, 263–276 (2021).
23. 23. Goodbody-Gringley, G. & Waletich, J. Morphological plasticity of the depth generalist coral, *Montastraea cavernosa*, on mesophotic reefs in Bermuda. *Ecology* **99**, 1688–1690 (2018).
24. Einbinder, S. *et al.* Changes in morphology and diet of the coral *Stylophora pistillata* along a depth gradient. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **381**, 167–174 (2009).
25. Scucchia, F. Malik, A., Zaslansky, P., Putnam, H. M. & Mass, T. Response of *Stylophora pistillata* primary polyps to decreasing seawater pH. *In-review*.
26. Tambutte, E. *et al.* Morphological plasticity of the coral skeleton under CO_2-driven seawater acidification. *Nat. Commun.* **6**, (2015).
27. Marti-Puig, P. *et al.* Extreme phenotypic polymorphism in the coral genus *Pocillopora*; micro-morphology corresponds to mitochondrial groups, while colony morphology does not. *Bull. Mar. Sci.* **90**, 211–231 (2014).
28. Scucchia, F., Malik, A., Zaslansky, P., Putnam, H. M. & Mass, T. Combined responses of primary coral polyps and their algal endosymbionts to decreasing seawater pH. *Proc. Biol. Sci.* **288**, 20210328 (2021).

שוניות האלמוגים במפרץ אילת, שנחשבות לעמידות במיוחד בפני עליית טמפרטורות הים, מתחילות לגלות סימנים ראשונים להשפעת ההתחממות הגלובלית – תופעת הלבנת האלמוגים. אירוע ההלבנה בקיץ 2024 לא היה חמור במיוחד, ורק אלמוגים מעטים נפגעו (בתמונה זו אלו אלמוגי אש, *Millepora dichotoma*). עם זאת, ייתכן שתופעה זו מסמלת נקודת מפנה קריטית בעתידו של המפרץ, ומהווה קריאת אזהרה ותזכורת דחופה לחשיבות ההגנה על שוניות האלמוגים של מפרץ אילת מכל הפרעה נוספת. צילום: תום שלזינגר

31 עדות מטבולית לעמידות תרמית גבוהה יותר של אלמוגי מפרץ אילת לעומת אלו מקצהו הדרומי של הים האדום

נעמה-רוז קוכמן[2,1], מעוז פיין[2,1]

[1] המחלקה לאקולוגיה, אבולוציה והתנהגות, המכון למדעי החיים ע"ש אלכסנדר סילברמן, האוניברסיטה העברית בירושלים
[2] המכון הבין-אוניברסיטאי למדעי הים

naama-rose.kochman@mail.huji.ac.il,
maoz.fine@mail.huji.ac.il

תקציר

שוניות אלמוגים ברחבי העולם מידרדרות במהירות בעקבות שינויים סביבתיים-גלובליים ומקומיים. עליית טמפרטורת הים היא האיום החמור והמיידי ביותר עליהן. לאור התחזיות כי 70-90% מהשוניות יאבדו עד אמצע המאה הנוכחית, ישנו צורך לאתר את שוניות האלמוגים עם הסיכוי הגבוה ביותר לשרוד באוקיינוסים חמים יותר על מנת לרכז וליעל מאמצי שימור. מפל הטמפרטורות לאורך הים האדום, מטמפרטורת קיץ ממוצעת קיצונית בדרומו (33°C) ועד טמפרטורה מרבית ממוצעת של 27°C בצפונו, מציע שהאלמוגים יהיו עמידים יותר בדרום הים האדום. אולם בפועל, אלמוגים ממפרץ אילת בקצהו הצפון מזרחי של הים האדום (29° צפון), מדגימים עמידות תרמית יוצאת דופן הנובעת, ככל הנראה, מבריכה טבעית (סלקציה) שעברו מושבות האם בדרום הים האדום בתום עידן הקרח האחרון. במחקר זה שאלנו האם אוכלוסיות אלמוגים שעברו את הסלקציה וחיות מזה אלפי שנים במפרץ אילת דומות בתכונותיהן לאלמוגים בקצהו הדרומי של הים האדום (ממפרץ טאג'ורה, ג'יבוטי), לאור הדמיון הגנטי בין האוכלוסיות. בסוף קיץ 2022, דגמנו *שיחן שכית* (*Stylophora pistillata*), שיחית *חרירן* (*Pocillopora* sp.) ו*פוריטס* (*Porites* sp.) ממפרץ טאג'ורה (11° צפון), 70 קילומטר דרומית לכניסה לים האדום, וממפרץ אילת, על מנת לבחון האם קיימים הבדלים בצפיפות אצות, ריכוז כלורופיל ותכולת מאגרי אנרגיה (חלבונים, פחמימות ושומנים) של האלמוגים והאצות השיתופיות שלהם. בעת הדיגום בשני המפרצים, שלושת סוגי האלמוגים לא עברו הלבנת אלמוגים (coral bleaching), למרות שנחשפו ל-2°C מעל טמפרטורת הקיץ המרבית המקומית. במחקר זוהו מספר הבדלים מובהקים בין מושבות ממפרץ אילת למפרץ טאג'ורה: *לשיחן שכית* ו*לשיחית* ממפרץ אילת היו יותר חלבוני מאכסן מאלו שבמפרץ טאג'ורה (59 ו-65% יותר, בהתאמה), ובאצות של שיחן גם תכולת הפחמימות הייתה גבוהה יותר (ב-48%). כלומר לאלמוגים החיים מתחת לסף ההלבנה במפרץ אילת ישנם מאגרי אנרגיה גבוהים יותר, בחלק מהסוגים. בנוסף, זוהו שינויים יחסיים קטנים יותר בשיחית ממפרץ אילת לטאג'ורה במחקר זה (מרחק של כ-2,000 קילומטרים) לעומת שיחית ממפרץ אילת ודרום הים האדום ממחקר קודם (פרסאן, ערב הסעודית; 1,600 קילומטרים), זאת למרות היותם קרובים יותר זה לזה, כך שלטמפרטורה השפעה גדולה יותר מהמרחק בין השוניות. ממצאי מחקר זה תומכים בכך שאלמוגי מפרץ אילת עברו סלקציה בפני טמפרטורות קיץ גבוהות בדרום הים האדום (באיזור איי פרסאן) ומדגישים את עמידותם בפני טמפרטורות הקיץ הנוכחיות במפרץ אילת. בעוד שוניות ברחבי

העולם, בג׳יבוטי ובדרום הים האדום עוברות אירועי הלבנה תדירים וחמורים יותר, שוניות במפרץ אילת צפויות להיות עדיין מתחת לסף ההלבנה שלהן בעשורים הקרובים. זאת לאור ההלבנה שזוהתה בשונית הרדודה בקיץ 2024. לכן, לשוניות מפרץ אילת חשיבות עולמית כמקלט אלמוגים, ויש לרכז בהן מאמצי שימור ולהסיר מהן הפרעות מקומיות כזיהום ופגיעה פיזית.

מבוא

שונית האלמוגים היא המערכת האקולוגית הימית עם מגוון המינים הגדול ביותר בעולם, המספקת שירותים אקולוגיים רבים ליותר מחצי מיליארד בני-אדם, כמקור מזון וחומרי-טבע, הכנסה מתיירות, והגנה חופית[1]. אולם, שוניות אלמוגים ברחבי העולם מידרדרות במהירות, עקב גורמי עקה מקומיים וגלובליים[2]. העלייה המהירה בטמפרטורת פני הים כתוצאה מפליטות גזי-חממה היא איום חמור ומיידי על שוניות האלמוגים[3], מאחר שדי בעלייה של 1-2°C מעל לטמפרטורת הקיץ המקומית כדי להוביל להלבנת אלמוגים[4]. הלבנת אלמוגים (coral bleaching) מתרחשת כאשר מופסק שיתוף הפעולה (סימביוזה) בין האלמוג לאצות השיתופיות החיות ברקמתו, וכך, ללא הכלורופיל של האצות השיתופיות המקנה לרקמת האלמוג צבע, נראה האלמוג לבן כמו צבע השלד שלו. הלבנת אלמוגים ממושכת עלולה להוביל לתמותה[5] בעקבות המחסור שנוצר בסוכרים מקיבוע הפחמן (פוטוסינתזה), שמהווים כ-90% ממזונו של האלמוג במצב תקין. בשנים האחרונות הלבנת אלמוגים נרחבת מתרחשת כמעט מדי שנה ברחבי העולם, דבר המקשה על אלמוגים להתאושש[3] ומסכן אלפי מינים החיים בשונית. אינדקס נפוץ לחיזוי אירועי הלבנה נרחבים הוא מעלות חימום שבועיות (DHW- Degree Heating Weeks)[6], המשקלל בכמה חרגה טמפרטורת המים מטמפרטורת הקיץ המרבית המקומית ואת משך החריגה. מעל ארבע מעלות חימום שבועיות גורמות לרוב להלבנת אלמוגים, ומעל לשמונה צפויה תמותה נרחבת[7].

בעוד שהלבנת אלמוגים היא המאפיין הבולט ביותר לעקת טמפרטורה באלמוגים, גם טמפרטורות נמוכות מטמפרטורת הסף העליונה שמובילה להלבנה מפעילות נתיבי חילוף חומרים (מטבוליים) משמרי-חיים[8]. כלומר, בדומה לבעלי חיים אחרים, לאלמוגים יש טווח טמפרטורות מוגדר שבו הם יכולים לתפקד, הכולל בתוכו טמפרטורת תפקוד מיטבית. כאשר אלמוגים שוהים בטמפרטורה מיטבית, הם בעלי רמת התפקוד הגבוהה ביותר של תהליכים מולקולריים, תאיים ומערכתיים, ולכן מתרחשים בנייה ואחסון של מאגרי אנרגיה, גדילה ורבייה[9]. אולם סטייה מהטמפרטורה המיטבית תגרום לצריכתם של מאגרי האנרגיה עקב פעילותם של מנגנוני תיקון והגנה, ירידה בהטמעת חומרי הזנה, ופגיעה במסלולי אנרגיה תלויי-חמצן[9]. ברמה התאית, הדרישה האנרגטית המוגברת של האלמוג תחת עקת חום גורמת לסימביוזה עם האצות להפוך ממבוססת על הגבלה בחנקן למוגבלת בפחמן, דבר שמפחית באופן ניכר את מעבר הפחמן המקובע החיוני מהאצות לאלמוג המאכסן[8].

לאור החשיבות האדירה של שמירת האיזון העדין במעבר חומרי ההזנה בין האלמוג המאכסן לאצותיו, אלמוגים המציגים גמישות תזונתית מסוגלים לעיתים לשרוד ולהתאושש מאירועי הלבנה[10]. אלמוגים גמישים תזונתית יכולים להעלות את קצב תפיסת הטרף כתחליף לסוכרים החסרים מקיבוע הפחמן שנפגע, או להוריד את קצב חילוף החומרים שלהם כדי לשמור על שיווי-משקל אנרגטי[11,12]. עקב כך, אלמוגים גמישים תזונתית מציגים שרידות ויכולת התאקלמות

טובה יותר בפני אירועי הלבנה הנעשים תדירים יותר[13]. התאקלמות תרמית באלמוגים עשויה להתרחש במהלך חשיפה ממושכת לטמפרטורות גבוהות מהממוצע הרב-שנתי, אשר גורמת לעלייה בטמפרטורה המיטבית של האלמוג עוד במהלך חייו[14]. ניתן לבחון את יכולת התאקלמותם של אלמוגים בוני שונית בפני טמפרטורות גבוהות בשוניות המשתרעות לאורך קווי רוחב רבים ובהן הבדלי טמפרטורה הדרגתיים. בחינת התגובה של אלמוגים לטמפרטורות גבוהות מסייעת בזיהוי האלמוגים המותאמים ביותר לתנאי-ים עתידיים[15–19].

הים האדום אידיאלי ללמידת תגובות פיזיולוגיות של אלמוגים לאורך גרדיאנט (מפל) של קווי רוחב. הוא משתרע לאורך 2,270 ק"מ, ממפרץ סואץ (30° צפון) עד למיצרי באב אל-מנדב הרדודים והצרים (12° דרום) והתנאים הסביבתיים שבו משתנים מדרום לצפון: מליחות הים נעה מ-37 PSU בבאב אל-מנדב, עד ל-41 PSU בצפון[20,21]. כמות חומרי ההזנה גבוהה יותר בבאב אל-מנדב, וריכוזם הולך ופוחת כלפי צפון[21]. אלקליניות המים ואחוז הרוויה של ארגוניט (Ω ארגוניט) הולכים ועולים מ- 2.29 ו-3.40 בדרום[22] עד 2.58 ו-4.00 מילימולר לקילוגרם בצפון[23,24]. גרדיאנט הכלורופיל נע בין 4 מ"ג כלורופיל-a, בבאב אל-מנדב ו-0.5 מ"ג בצפון הים האדום[25]. טווח הטמפרטורות העונתי הרב-שנתי נע בין 28-34°C בבאב אל-מנדב ו-20-27°C בצפון מפרץ אילת[25,26].

השפעתם של אירועי הלבנה ניכרת בשוניות המרכז ודרום הים האדום[27], אולם אלמוגי מפרץ אילת/עקבה מעולם לא חוו אירוע הלבנה נרחב, למרות עליית טמפרטורת הים המהירה והעקבית במפרץ[28]. בנוסף, אלמוגי מפרץ אילת היו עמידים בפני גל-החום החמור ביותר שתועד במפרץ בשנת 2021[29], אולם מספר סוגי אלמוגים עברו הלבנה בקיץ הקיצוני של 2024 בשונית הרדודה מאוד (בעיקר עד עומק של 5 מטרים). גם בניסויי טמפרטורה גבוהה במעבדה אלמוגי מפרץ אילת חסינים בצורה יוצאת דופן, ואינם עוברים הלבנה עד שנחשפים למעל 6°C מעל טמפרטורת הקיץ המרבית הממוצעת באילת (27.5°C; ממוצע הטמפרטורה המרבית בשלושים השנה האחרונות)[11,30–34]. למעשה, אלמוגי מפרץ אילת תפקדו טוב יותר כשהוחזקו באקווריום שבו טמפרטורה של 2°C מעל טמפרטורת הקיץ המרבית וב-DHW=11[31], בעוד תנאים דומים צפויים לגרום להלבנה בשוניות אחרות בעולם[4]. ההסבר המקובל לעמידות אלמוגי המפרץ מבוסס על היותם צאצאים של אלמוגים שעברו ברירה טבעית (סלקציה) לשרוד בטמפרטורות גבוהות מאוד לאחר עידן הקרח האחרון, תוך כדי הרחבת תפוצתם בים האדום דרך מיצרי באב אל-מנדב אל מפרץ אילת. בעידן הקרח האחרון, כשמפלס הים האדום היה נמוך בכ-120 מ' מהיום, מעבר המים היה מוגבל במיצרי באב-אל מנדב הרדודים (137 מטר כיום), והוביל לעלייה חדה במליחות המים, שגרמה כנראה להכחדת אלמוגים בים האדום[35]. ההתבססות המחודשת של האלמוגים לאורך הים האדום החלה לפני כ-8,000 שנה, לקראת סוף עידן הקרח[35], כשהמקור היחיד לפגיות אלמוגים (אלמוגים צעירים שטרם התיישבו בשונית) היה מפרץ עדן. רק צאצאים של אלמוגים ששרדו את הטמפרטורה הגבוהה באזור איי פרסאן, מעל 32°C בקיץ[32], התיישבו לאורך הים האדום עד מפרץ אילת הצפוני, שבו טמפרטורת המים קרה יותר בכ-6°C[28,32]. ואכן סף ההלבנה של אלמוגי מפרץ אילת הוא כ-33°C[11,30], מעל טמפרטורת הקיץ המרבית הצפויה במפרץ עד סוף המאה[32].

אם עמידותם התרמית של אלמוגי צפון הים האדום אכן מבוססת על מוצאם בדרום הים האדום, שזה לא לפני הרבה זמן במונחים אבולוציוניים בחסרי חוליות (כ-8,000 שנה), נצפה למצוא דמיון גנטי רב בין אוכלוסיות אלמוגים בצפון ובדרום הים האדום, וגם עמידות דומה שלהם לעליית טמפרטורה. מעט מחקרים הצליחו ללמוד תגובת אלמוגים

לתנאים סביבתיים לאורך גרדיאנט של אלפי קילומטרים באותה התקופה. מרבית המחקרים שכן בוצעו נעשו לאורך שונית המחסום הגדולה (אוסטרליה) שם קיים רצף טריטוריאלי המאפשר זאת[17,36]. אולם בים האדום, הדבר מורכב הרבה יותר, מאחר שהחוף המערבי מחולק בין חמש מדינות, והמזרחי בין שלוש מדינות, והמצב הגיאופוליטי באזור מקשה על מעבר ומחקר ביניהן. לכן, במחקר הנוכחי, התמקדנו בקצוות הים האדום הצפוני (אילת) והדרומי (ג'יבוטי). מפרץ טאג'ורה (Tadjoura), ג'יבוטי, נמצא 70 ק"מ דרומית ממיצרי באב אל-מנדב, והוא מתחבר לים האדום ולאוקיינוס ההודי דרך מפרץ עדן[37]. מפרץ טאג'ורה חשוף לעלייתם של מי-עומק קרים ועשירים בחומרי הזנה בעקבות רוחות עונתיות חזקות ומבנהו הטופוגרפי הכולל קניון תת-ימי עמוק[37]. טמפרטורת הקיץ המקסימלית הממוצעת בטאג'ורה היא 30.7°C, והיא מתרחשת בשני שיאים, בין יוני ויולי, ובין ספטמבר לאוקטובר. אלמוגים במפרץ טאג'ורה חוו אירועי הלבנה במהלך השנים האחרונות ללא ירידה ארוכת שנים באחוזי כיסוי האלמוגים החיים[38]. עם זאת, פיתוח חופי מקומי והתחממות מי-הים העלו חשש לעתיד שוניות אלו[38].

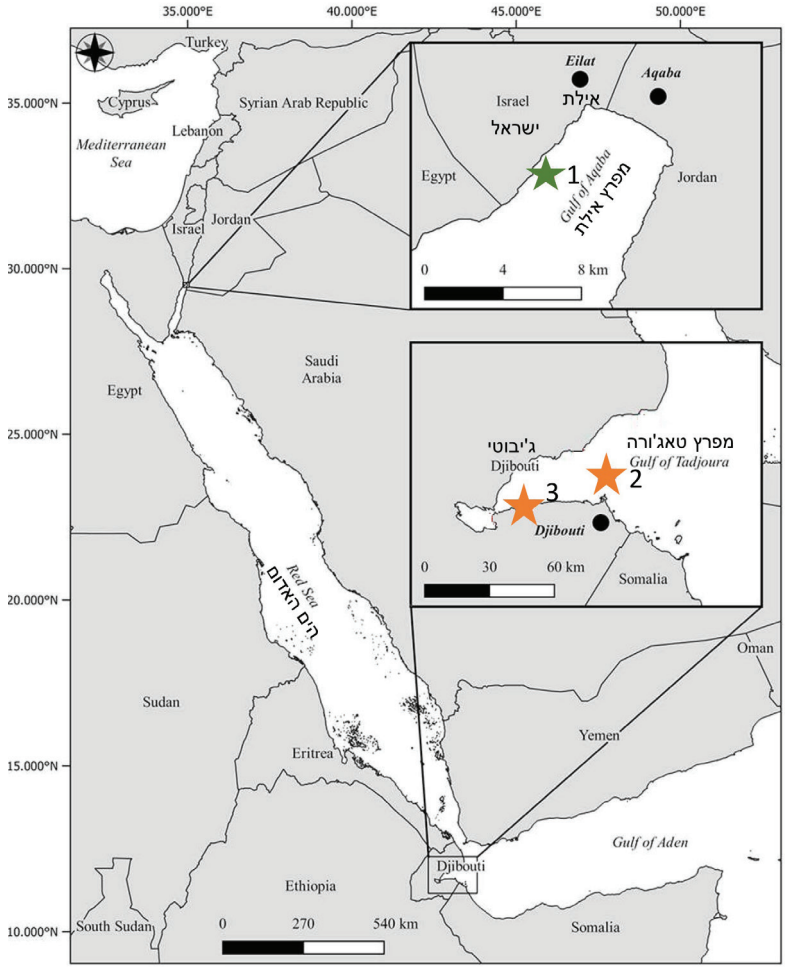
במהלך מרץ 2020, חוקרים ממעבדתנו ביצעו ניסוי פיזיולוגי שבו נקבעה הטמפרטורה המיטבית לתפקוד של שישה מיני אלמוגים, ממפרץ אילת ומפרץ טאג'ורה[39]. הטמפרטורה נחשבה כמיטבית כשקצבי הפוטוסינתזה והנשימה היו מרביים, על-ידי מדידת חמצן בתאים סגורים ובתנאים מבוקרים (תאים מטבוליים). הטמפרטורה המיטבית לתפקוד של כל ששת המינים שנבחנו במפרץ אילת הייתה גבוהה יותר מטמפרטורת הקיץ המרבית, בעוד שבמפרץ טאג'ורה, הטמפרטורה האופטימלית הייתה נמוכה יותר מטמפרטורת הקיץ[39]. בנוסף, רוב המינים, למעט שיחן *שכיח*, *Stylophora pistillata*, הציגו טמפרטורה אופטימלית דומה במפרץ אילת ובמפרץ טאג'ורה[39].

בספטמבר 2022, ביצענו דיגום נוסף של האלמוגים שיחן שכיח, שיחית (*Pocillopora* sp.) וחרירן (*Porites* sp.) במפרץ טאג'ורה (ג'יבוטי) ובתוך שבועיים, נדגמו אלמוגים מאותם סוגים בצפון מפרץ אילת, על מנת לבחון האם קיימים הבדלים בצפיפות אצות, ריכוז כלורופיל ותכולת מאגרי אנרגיה (חלבונים, פחמימות ושומנים) של שלושת סוגי האלמוגים ואצותיהם השיתופיות משני קצותיו של הים האדום.

שיטות וחומרים

נתונים סביבתיים

טמפרטורת פני הים המקסימלית היומית ומעלות החימום השבועיות (DHW; איור 2 א) עבור מפרץ טאג'ורה ואילת הופקו מהאתר של NOAA[58] (מנהל האוקיינוסים והאטמוספרה הלאומי של ארה"ב; National Oceanic and Atmospheric Administration) מאוקטובר 2021 עד סוף הדיגום באוקטובר 2022. בנוסף, בכדי לתאר טוב יותר את ההבדלים בין התנאים הסביבתיים, חושבו ריכוזי הכלורופיל-a בעמודת המים, כשריכוזים גבוהים מעידים על עכירות גבוהה וחדירה נמוכה של אור השמש[40]. הממוצע חודשי של ריכוז כלורופיל-a בעמודת המים (איור 2 ב) בשני המיקומים חושב באמצעות GlobColour[59] ברזולוציה של 4 ק"מ (Chl_1, MODIES and MERIS).



איור 1. מפה של אתרי הדיגום לאורך הים האדום. אתרי הדיגום מסומנים בכוכביות וכוללים: (1) משתלת האלמוגים של המכון הבינאוניברסיטאי, ישראל, במפרץ אילת בירוק, (2) האי מוצ'ה ו-(3)ראס קורלי, במפרץ טאג'ורה, ג'יבוטי בכתום. ראו הפניה לאיור המקורי[39].

דיגום אלמוגים

במהלך ספטמבר 2022, נדגם ענף יחיד מעשר מושבות שונות של שיחן שכיח, שיחית וחרירן (n=10 לכל סוג) בשני אתרים במפרץ טאג'ורה: מהאי מוצ'ה (Moucha Island 19-לספטמבר; 11°41.889′N, 43°08.697′E) ומראס-קורלי (Ras Korali 20-לספטמבר; 11°34.44′N, 42°47.29′E). לאחר שבועיים, נדגמו ענפי אלמוגים מאותם הסוגים באילת

(היה קושי לזהות לרמת המין את שיחית וחרירן, לכן הם אוחדו תחת "סוג" במאמר זה), ממשתלת האלמוגים במכון הבינאוניברסיטאי (IUI) למדעי הים (3 לאוקטובר; 29°30′N, 34°55′E; איור 1). מצבן הפיזיולוגי של 8 מתוך 10 המושבות של שיחן שכיח ושיחית שנדגמו במחקר זה הוערך לפני, במהלך ולאחר גל החום החמור ביותר שתועד בקיץ 2021, שנה לפני הדיגום במחקר זה[29].

כל ענפי האלמוגים (אורך ממוצע של 5 ס"מ; 90 ענפים סה"כ; n=30 מכל אתר) נדגמו מעומק דומה של 5-8 מ' ומיד הושמו בתוך בופר DESS שנמצא יעיל בשימור דנ"א ומורפולוגיה תאית בחסרי חוליות[41] (150-200 DMSO, 20% EDTA pH 8, 0.25 M גר' NaCl ו-DDW) עד כיסוי מלא בתוך מבחנה. כל האלמוגים הוחזקו בבופר למשך 28 יום מתאריך הדיגום שלהם, ובהמשך הוקפאו (80- °C) בתוך הבופר עד להמשך עיבוד.

עיבוד רקמות האלמוגים

הדוגמאות הופשרו, ענף האלמוג הוסר והוקפא בחנקן נוזלי, ומבחנת הבופר עברה סרכוז (8000 סל"ד, 5 דק', 4°C) למקרה שחלק מן החומר הביולוגי נשטף מדוגמת האלמוג. המשקע נשמר והבופר רוקן. רקמת האלמוג הוסרה בעזרת מברשת-אוויר לתוך 5 מ"ל בופר PBS (pH 7.4, סיגמה-אלדריך, 4°C). תמהיל הרקמה אוחד עם המשקע, ועבר הומוגניזציה ידנית בעזרת מכתש ועלי. צפיפות האצות, ריכוז כלורופיל, וכימות החלבונים, הפחמימות והשומנים של האלמוג והאצה כומתו כפי שתואר במאמר קודם[29]. כמות האנרגיה האגורה חושבה על-ידי הכפלת כמות החלבונים, הפחמימות והשומנים באנתלפיית הבעירה היחסית שלהם וסכימתם. צפיפות אצות ומאגרי האנרגיה של האלמוג נורמלו לשטח פנים של שלד האלמוג היבש בעזרת שיטת הטבילה בשעווה. כלורופיל ומאגרי האנרגיה של האצות השיתופיות נורמלו לפי צפיפות האצות.

השוואה בין מדדים פיזיולוגיים של אלמוגים לאורכו של הים-האדום

חושב אחוז השינוי (טבלה 2) לכל נתון פיזיולוגי שמוצג במאמר זה ובמאמרים פיזיולוגיים דומים לאורך הים האדום[39,42], במהלך הקיץ או החורף[29,39,42] עבור שיחן שכיח ושיחית. לא נמצאו מאמרים פיזיולוגיים של *חרירן* לאורך הים האדום. לא מוצגים ערכים אבסולוטיים אלא אחוז השינוי, כי הערכים תלויים בשיטות שבהן השתמש החוקר. השוואה זו נועדה להראות את טווח השינוי הפיזיולוגי ששיחן שכיח ושיחית יכולים לעבור בהתאם למקום דיגומם (מפרץ אילת-מפרץ טאג'ורה; מפרץ אילת- איי פראסן Farasan) או העונה (קיץ או חורף).

ניתוח סטטיסטי

הנתונים הגולמיים שורטטו כהיסטוגרמה כדי לבחון חריגות פוטנציאליות בנתונים. במידה שנמצאו חריגות בהיסטוגרמה, הן הוסרו מהמשך עיבוד הנתונים. עבור כל משתנה תלוי, נבדקו כהנחות המבחן הסטטיסטי שונות שווה (מבחן שפירו-וילק Shapirp-Wilk test) והתפלגות נורמלית (מבחן לוין Levene's test). במידה שאלה אומתו, נערכה ANOVA דו-כיוונית כאשר "אתר" (אילת, האי מוצ'ה וראס-קורלי) ו"סוג" (שיחן, שיחית וחרירן) הוגדרו כגורמים הבלתי תלויים. אם ההבדלים נמצאו מובהקים (p-value <0.05), בוצע מבחן פוסט-הוק "Tukey (lsmeans, R package: {emmeans}, adj =`tukey"). אם ההנחות הופרו, בוצע מבחן לא פרמטרי Kruskal-Wallis לפי "אתר" ו-"סוג", ואם ההבדלים נמצאו מובהקים, Dunn שימש כמבחן פוסט-הוק.

צפיפות אצות, ריכוז כלורופיל, וכמות החלבונים, הפחמימות והשומנים של האלמוג והאצות השיתופיות נורמלו ואוחדו למטריקס קורלציה, ובוצע principal component analysis (PCA) בעזרת הפקודה "prcomp", כש"אתר" ו"סוג" הוגדרו כגורמים המקובעים. המובהקות של המקבצים הוערכה בעזרת Permutational Multivariate ANOVA (PERMANOVA) על מרחקים אוקלידיים עם 999 פרמוטציות שיצרו את ערכי ה-p-value עבור "אתר" ו-"סוג" כגורמים המקובעים. Pairwise permutational MANOVAs בוצעו כבדיקת מובהקות כפוסט-הוק. כל הגרפים (R package: ggplot2) והמבחנים הסטטיסטיים בוצעו ב-R גרסה 3.6.

תוצאות

תנאים סביבתיים

טמפרטורת פני הים המקסימלית הממוצעת בחודש שקדם לדיגום הייתה 31.5°C בג'יבוטי ו- 29.2°C באילת (איור 2א). כלומר, אלמוגים בשני האתרים חוו טמפרטורות קיץ גבוהות מטמפרטורת המקסימום השנתית שלהם בעת הדיגום (ג'יבוטי 0.8°C+ , אילת ב-1.7 °C+). כתוצאה מכך, אלמוגים ממפרץ טאג'ורה היו חשופים ל-DHW =2 (רמת עקת חום נמוכה) בעת הדיגום, בעוד במפרץ אילת ל-DHW =6 (עקת חום האמורה לגרום להלבנה).

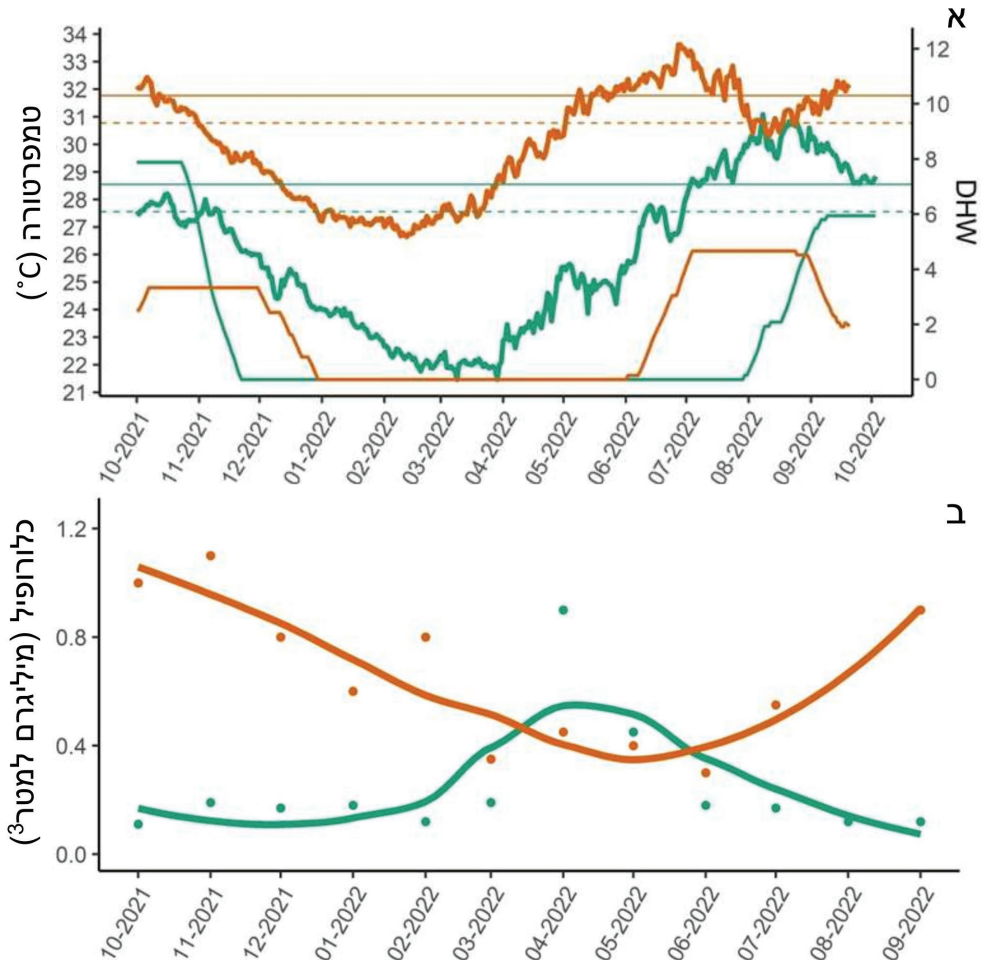
ריכוז הכלורופיל החודשי בעמודת המים היה גבוה יותר בג'יבוטי כמעט לאורך כל השנה, למעט אפריל בעת פריחת הפלנקטון העונתית במפרץ אילת (איור 2 ב). במהלך הדיגום, ריכוזי הכלורופיל היו 87% גבוהים יותר במפרץ טאג'ורה מאשר במפרץ אילת (0.9 לעומת 0.12 מ"ג מטר^3).

הפרשים בין הטמפרטורה הסביבתית לטמפרטורת התפקוד האופטימלית

כל הסוגים בשני המיקומים חוו טמפרטורה סביבתית גבוהה מטמפרטורת התפקוד המיטבית היחסית שלהם בעת הדיגום (טבלה 1). טמפרטורת התפקוד האופטימלית של *חרירן* הייתה הקרובה ביותר לטמפרטורה הסביבתית, אחריו שיחן שכיח, ולבסוף שיחית.

טבלה 1. טמפרטורת התפקוד האופטימלית במפרץ אילת ומפרץ טאג'ורה בשיחן שכיח, שיחית וחרירן, על-פי מאמר קודם[39] וההפרש בין ממוצע הטמפרטורות החודשי לפני הדיגום (29.2°C במפרץ אילת ו-31.5°C במפרץ טאג'ורה) לטמפרטורת התפקוד האופטימלית לפי מיקום וסוג.

	טמפרטורת תפקוד אופטימלית (°C)		הפרש (בין הטמפרטורה ממוצעת החודשית לטמפרטורת תפקוד אופטימלית (°C)	
	אילת	טאג'ורה	אילת	טאג'ורה
שיחן שכיח	28.3	30.4	0.9	1.1
שיחית	28.1	28.7	1.1	2.8
חרירן	28.4	30.9	0.8	0.6



איור 2. א. ממוצע יומי של טמפרטורת פני-הים המקסימלית (קו עבה) ומעלות חימום שבועיות (DHW; קו דק) במפרץ טאג'ורה (כתום) ובמפרץ אילת (ירוק) בין אוקטובר 2021 עד מועד הדיגום (בטאג'ורה: 19-20/09/2022 באילת: 03/10/2022). קו אופקי מקווקו מציין את טמפרטורת הקיץ המקסימלית בממוצע רב-שנתי (MMM), וקו אופקי רצוף מציין את סף ההלבנה לפי מיקום (MMM+1). ב. ממוצע חודשי של כלורופיל-a במי-הים במפרץ טאג'ורה (כתום) ומפרץ אילת (ירוק).

מדדי הלבנה: צפיפות אצות ותכולת כלורופיל

בזמן הדיגום, לא היו עדויות להלבנת אלמוגים בשלושת סוגי האלמוגים במפרץ טאג'ורה ואילת. *בחרירן* זוהו 54% יותר אצות (איור 3 א) במפרץ טאג'ורה לעומת מפרץ אילת, שם *לחרירן* היו פחות אצות (48%-) מאשר בשיחן שכיח. צפיפות האצות הייתה דומה בשיחן שכיח ושיחית. ריכוז כלורופיל (איור 3 ב) בחרירן, שיחית ושיחן שכיח היה דומה במפרצים השונים. עם זאת, לחרירן היו ערכי כלורופיל גבוהים יותר בשני המיקומים מאשר בשיחן שכיח (60%+) ושיחנית (66%+).

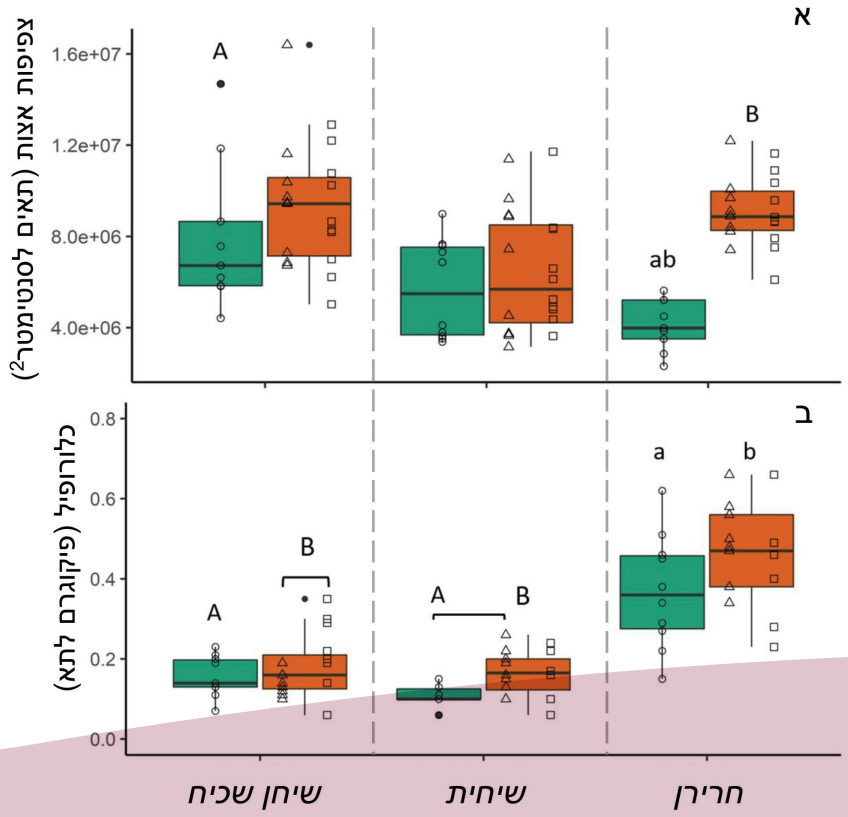
מאגרי אנרגיה

ערכי החלבון באלמוג המאכסן (איור 4 א) היה גבוה באופן מובהק בשיחן שכיח (59%+) ושיחית (65%+) ממפרץ אילת לעומת מפרץ טאג'ורה, בעוד הערכים היו דומים בין המיקומים בחרירן. בנוסף, ערכי החלבון בשיחן שכיח היו גבוהים משמעותית (53%+) משיחית בשני המיקומים.

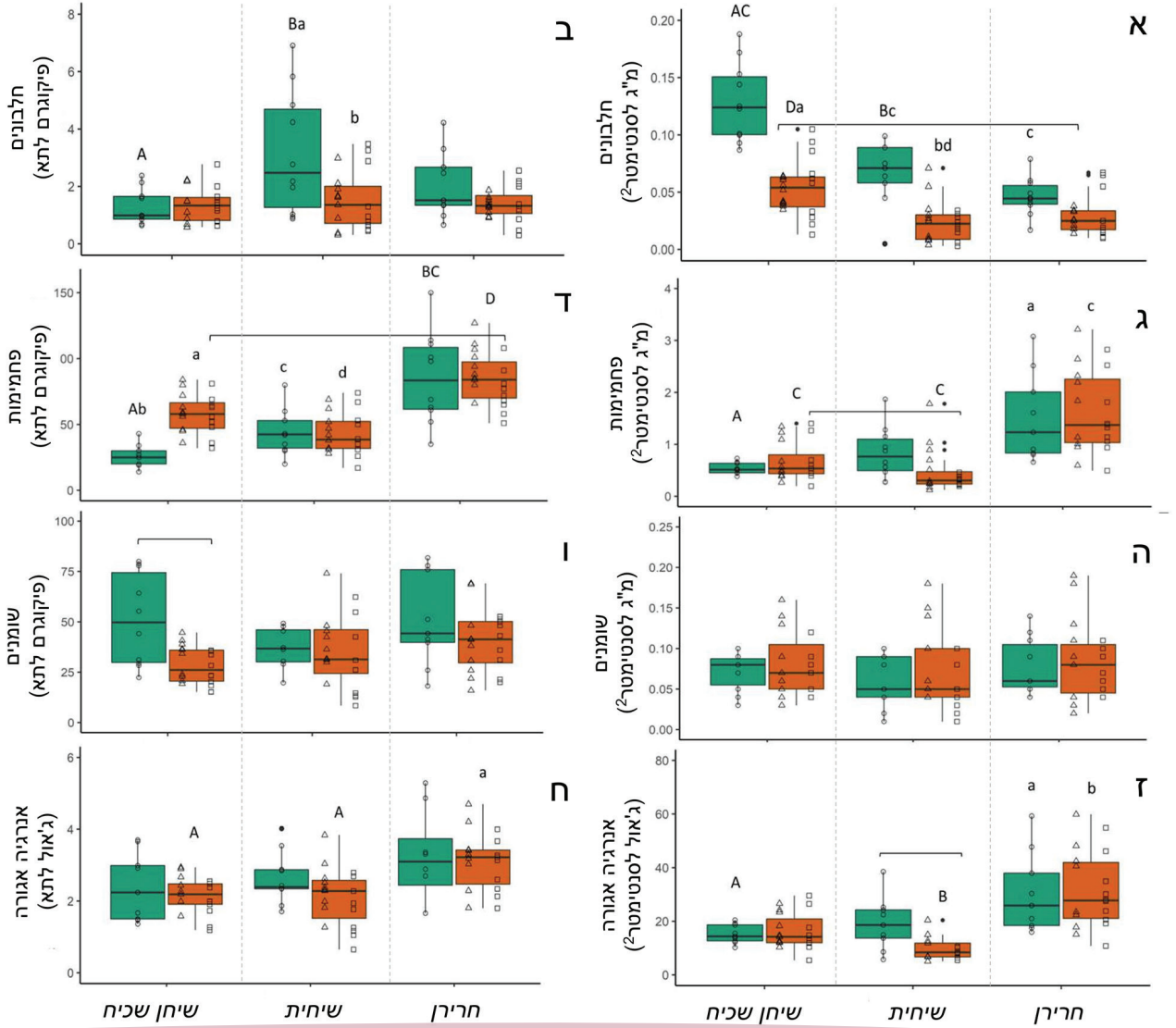
חלבוני האצות השיתופיות (איור 4 ב) היו גבוהים באופן ניכר (52%+) בשיחית ממפרץ אילת לעומת אלו ממפרץ טאג'ורה. בנוסף שיחית הציגה ערכים גבוהים יותר מאשר שיחן שכיח במפרץ אילת.

תכולת הפחמימות (איור 4 ג', וד', בהתאמה) הייתה הגבוהה ביותר בחרירן, שהציג ערכים גבוהים יותר משיחן שכיח, באלמוג המאכסן ובאצות (ב-60% ו-42%, בהתאמה) ומשיחית (ב-64% ו-50%, בהתאמה) במפרץ אילת וטאג'ורה. בנוסף, לשיחן שכיח ממפרץ טאג'ורה היו יותר פחמימות (48%+) באצותיו השיתופיות לעומת אלו ממפרץ אילת.

כמות השומנים באלמוג ובאצות השיתופיות (איור 4 ה,ו) היו דומות בין הסוגים והמיקומים השונים. האנרגיה האגורה במאכסן ובאצות השיתופיות (איור 4 ז,ח) הייתה הגבוהה ביותר בחרירן בשני המיקומים לעומת שיחן שכיח ושיחית.



איור 3. א. צפיפות אצות ב. ריכוזי כלורופיל *בשיחן שכיח, שיחית וחרירן*, ממפרץ אילת (ירוק) או מפרץ טאג'ורה (כתום). N=10. בדיאגרמת הקופסה, הקו האופקי מציג את חציון הנתונים, תחומי הקופסה הם הרבעון הראשון והשלישי, והקווים המאונכים משני צידי הקופסה הם הטווח הבין רבעוני פי 1.5. צורת הנקודות מעידה על אתר הדיגום: מפרץ אילת עיגול- IUI, מפרץ טאג'ורה ריבוע - האי מוצ'ה, ומשולש - ראס קורלי. נקודות שחורות מלאות מסמלות חריגות. הבדלים סטטיסטיים בין המפרצים ובין סוגים סומנו באותה אות לועזית גדולה וקטנה. הבדלים מובהקים בין האתרים סומנו בסוגריים מרובעים.



איור 4. מדדים פיזיולוגיים בשיחן שכיח, שיחית וחרירן ואצותיהם השיתופיות. ריכוז חלבונים באלמוג ובתא אצה. (א' וב'), פחמימות (ג' וד'), שומנים (ה' ו'), ואנרגיה אגורה (ז' וח') בהתאמה, ממפרץ אילת (ירוק) או מפרץ טאג'ורה (כתום). N=10. בדיאגרמת הקופסה, הקו האופקי מציג את חציון הנתונים, תחומי הקופסה הם הרבעון הראשון והשלישי, והקווים המאונכים משני צידי הקופסה הם הטווח הבין רבעוני פי 1.5. צורת הנקודות מעידה על אתר הדיגום: עיגול- IUI, ריבוע - האי מוצ'ה, ומשולש - ראס קורלי. נקודות שחורות מלאות מסמלות חריגות. הבדלים סטטיסטיים בין המפרצים ובין סוגים סומנו באותה אות לועזית גדולה וקטנה, והבדלים מובהקים בין האתרים סומנו בסוגריים מרובעים.

אנליזת PCA

על-פי אנליזת ה-PCA (איור 5), קיים הבדל משמעותי בין סוגים ($p<0.000001$), אתר הדיגום ($p<0.0008$) והשפעה משולבת של הסוג ואתר הדיגום ($p<0.05$) על התפלגות השונות של הנתונים הפיזיולוגיים. בנוסף, נמצא כי לשיחן שכיח ושיחית שונות דומה בין האתרים, בעוד לחרירן הייתה שונות גבוהה באופן ניכר מאשר שיחן שכיח ושיחית.

השוואה בין מדדים פיזיולוגיים של אלמוגים בקצה הצפוני והדרומי של הים-האדום

שיחן שכיח

כאשר משווים את אחוז השינוי במדדים פיזיולוגיים שונים (טבלה 2), אחוז השינוי היה גבוה יותר במפרץ אילת לבין מפרץ טאג'ורה בסוף הקיץ לעומת הטווח השנתי במפרץ אילת רק בחלבוני המאכסן ותכולת הפחמימות באצות השיתופיות. בניסוי הנוכחי היה שינוי של 59% בחלבוני המאכסן בין מפרץ אילת לטאג'ורה, לעומת 35% אחוז בטווח השנתי. בנוסף השינוי בתכולת הפחמימות באצות במחקר זה היה 91%, לעומת הטווח השנתי באילת, שבו אחוז השינוי היה רק 31%.

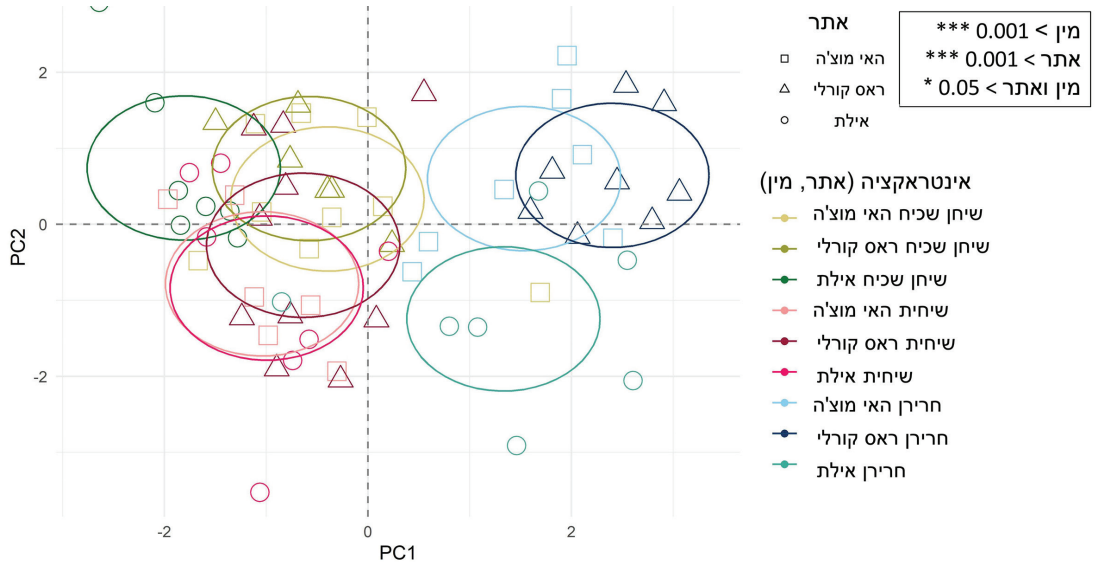
טבלה 2. שינוי (%) במדדים פיזיולוגים של שיחן שכיח ושיחית מהקצה הדרומי והצפוני (מחקר זה ומחקר קודם ולאורכו של הים האדום[26] ובין עונות (בקיץ במחקר זה ובחורף[39]). הטווח השנתי באילת חושב על-פי מאמר קודם[29].

שיחית

	שיחן שכיח (% שינוי)			***שיחית*** (% שינוי)			
	אילת-טאג'ורה, סוף קיץ (מחקר זה)	טווח שנתי באילת[29]	אילת-טאג'ורה, חורף[39]	אילת-טאג'ורה, סוף קיץ (מחקר הזה)	טווח שנתי באילת[29]	אילת-טאג'ורה, חורף[39]	אילת-איי פרסאן, סוף קיץ[26]
צפיפות אצות	17	60	4	14	40	208	388
כלורופיל	16	40		47	48		262
חלבוני מאכסן	59	35		65	55		119
פחמימות מאכסן	24	55		47	47		
שומנים מאכסן	18	59		19	55		66
חלבוני אצות	3	31		52	37		
פחמימות אצות	91	36		3	48		
שומנים אצות	45	63		5	55		

במחקר זה היה אחוז שינוי גבוה יותר מאשר הטווח השנתי במפרץ אילת בחלבוני המאכסן וחלבוני האצות השיתופיות. בניסוי הנוכחי היה שינוי של 65% בתכולת חלבוני האלמוג לעומת 55% מהטווח השנתי במפרץ אילת. בנוסף היה שינוי של 52% בחלבוני האצות השיתופיות לעומת 37% מהטווח השנתי במפרץ אילת.

בנוסף, בעת השוואת אחוז השינוי במחקר זה למחקר שנערך בסוף הקיץ באותו החודש (ספטמבר; אולם בשנים שונות)



איור 5. אורדינציית PCA בעזרת נתוני צפיפות אצות, ריכוז כלורופיל, וכמות החלבונים, הפחמימות והשומנים של האלמוג והאצות השיתופיות עבור שיחן שכיח, שיחית וחרירן ממפרץ אילת או טאג'ורה, לפי אתר וסוג. אליפסות מייצגות דמיון של 95% בין המקבצים הסטטיסטיים. התוצאות של PERMANOVA לפי סוג, אתר, וההשפעה המשולבת של סוג ואתר מוצגת בקופסה הימנית העליונה (n=10).

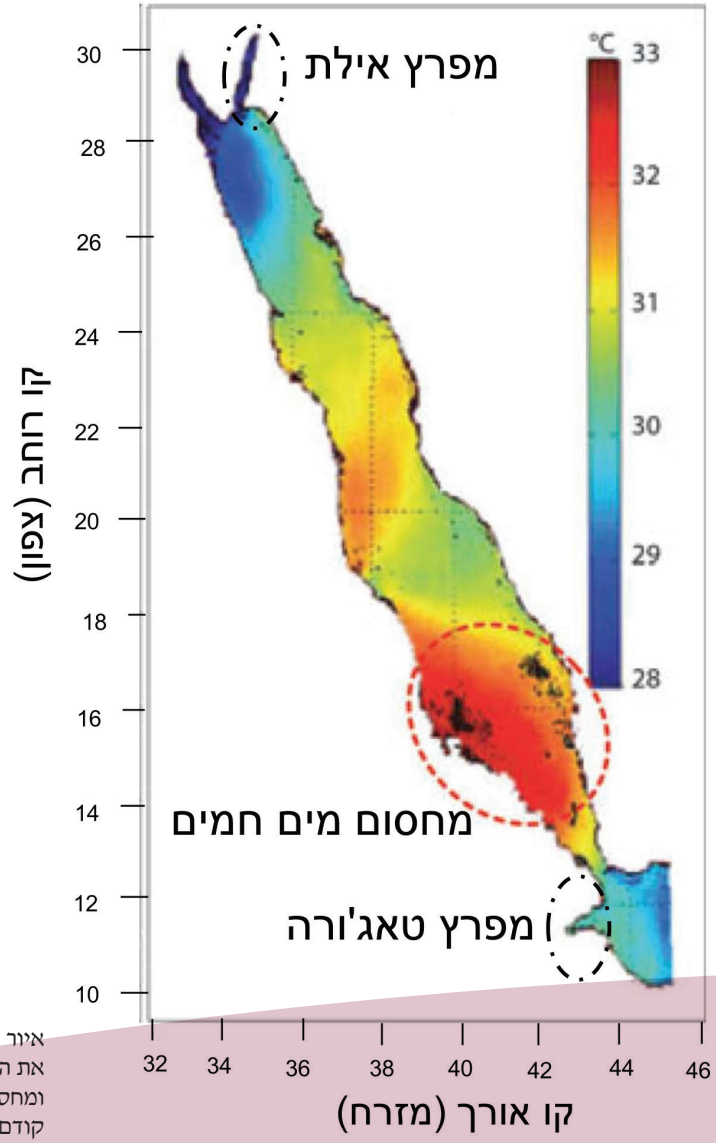
שבו נדגמו מושבות שיחית ממפרץ אילת ומאיי פרסאן (Farasan) בדרום מזרח הים האדום כ-580 ק"מ צפונית למפרץ ג'יבוטי 42, המדדים (צפיפות אצות, כלורופיל, חלבונים ושומנים) הראו אחוז שינוי גדול יותר בין מפרץ אילת לאיי פרסאן לעומת השינוי בין מפרץ אילת ומפרץ טאג'ורהבאותה העונה, זאת למרות המרחק הקצר יותר בין איי פראסן ואילת.

דיון

במחקר זה, בדקנו באותו פרק זמן מאגרי אנרגיה של שלושה סוגי אלמוגים בוני שונית והאצות השיתופיות שלהם מהקצה הצפוני והדרומי של הים האדום, במרחק של 2000 ק"מ. אלמוגים משני אתרי המחקר נחשפו במהלך קיץ 2022 לטמפרטורה הגבוהה בכ-2°C מטמפרטורת הקיץ המרבית המקומית ול-DHW גבוהות מ-4, שעשויים לגרום להלבנת אלמוגים[4,6]. עם זאת, חרירן, שיחית ושיחן שכיח ממפרץ טאג'ורה ומפרץ אילת לא חוו הלבנה בעת הדיגום, אך נמצאו הבדלים מובהקים בין מושבות ממפרץ אילת למפרץ טאג'ורה, המעידים על עמידות יחסית גבוהה יותר של אלמוגי מפרץ אילת לטמפרטורת הקיץ הגבוהות. עמידותם היחסית של אלמוגי מפרץ אילת גבוהה ממושבות ממפרץ טאג'ורה, למרות שהינו מפרץ עשיר יותר בחומרי הזנה כמעט לאורך כל השנה. חומרי הזנה מובילים לעלייה בריכוז הכלורופיל במים, וכך מופחתת עוצמת אור השמש ופוחתים הסיכויים להלבנת אלמוגים[43].

ייתכן שהעמידות התרמית הגבוהה יותר של אלמוגי מפרץ אילת ביחס לתנאים הסביבתיים שהם חווים נובעת מהיותם צאצאים של אלמוגים שעברו סלקציה תרמית בדרום הים האדום[32]. בעוד שוניות במפרץ עדן ובדרום הים האדום יחוו טמפרטורת קיץ מקסימלית של כ-35°C בסוף המאה, שוניות במפרץ אילת צפויות להיות עדיין מתחת לסף ההלבנה

שלהן וצפויות לחוות טמפרטורת קיץ ממוצעת נמוכה בהרבה (31°C)[32] בעוד שזוהי טמפרטורת הקיץ הנוכחית במפרץ טאג'ורה. עם זאת, בקיץ הקיצוני של 2024 זוהתה הלבנה במספר סוגי אלמוגים (בעיקר בחרירן, ספלולית וההידרתי - אלמוג האש) בשונית הרדודה ביותר במפרץ אילת (עד 5 מטרים), שבה האלמוגים היו חשופים בנוסף לטמפרטורה הגבוהה לעוצמת אור חזקה, אליה הראו רגישות תחת טמפרטורות גבוהות במחקר קודם[34].



איור 6. מפת טמפרטורות שיא הקיץ לאורך הים האדום, המדגישה את הבדלי הטמפרטורה בין מפרץ אילת, טאג'ורה (קו שחור מקווקו) ומחסום המים החמים בדרום (קו אדום מקווקו). האיור שונה ממאמר קודם[32].

למרות זאת, ממצאי מחקר זה תומכים בסלקציה תרמית. זיהינו שינויים פיזיולוגיים גדולים יותר במושבות שיחית ממפרץ אילת ואיי פרסאן[42] (מרחק אווירי של 1,600 קילומטרים) לעומת מפרץ אילת ומפרץ טאג'ורה (במרחק אווירי של כ-2,000 קילומטרים). ייתכן כי ההבדלים הפיזיולוגיים בשיחית גדולים יותר בין מושבות ממפרץ אילת לאיי פרסאן, מאחר שטמפרטורת המים בקיץ באיי פרסאן גבוהה יותר ממפרץ טאג'ורה, למרות היותה שונית צפונית יותר וקרובה יותר למפרץ אילת (איור 6). מחקר פיזיולוגי נוסף של סוגי אלמוגים אחרים לאורך גרדיאנט הים האדום יסייע בזיהוי הסוגים המותאמים ביותר להתמודד עם עליית טמפרטורות המים.

מבין הסוגים, חרירן הראה את העמידות התרמית הגבוהה ביותר, כשלאחריו שיחית ולבסוף שיחן שכיח. בנוסף, שלושת הסוגים הדגימו דרגות שונות של גמישות מטבולית, שהיא היכולת להתאים את תגובתם הפיזיולוגית לתנאים סביבתיים משתנים[44].

חרירן הדגים את העמידות המטבולית הגבוהה ביותר לנוכח השינויים בתנאים הסביבתיים בין מפרץ אילת למפרץ טאג'ורה, ייתכן מאחר שטמפרטורת התפקוד האופטימלית שלו הייתה הקרובה ביותר לטמפרטורת הסביבה[39]. עמידותו המטבולית של חרירן בפני שינויים סביבתיים הודגמו במחקרים נוספים, למשל לאורך 1400 ק"מ בשונית המחסום הגדולה של אוסטרליה[17], לאורך 53 ק"מ ברחבי הוואי[45], בין אתרים קרובים ורחוקים מהחוף בפלאו[46], ולאחר 22 חודשים של תרחישי טמפרטורה וחומציות עתידיים[47]. ההבדל היחיד בין מושבות החרירן שנדגמו במחקר זה היה צפיפות אצות גבוהה יותר במפרץ טאג'ורה, המפרץ העשיר יותר בחומרי הזנה והחם יותר. יש צורך בריצוף גנטי לאצות השיתופיות בחרירן ממפרץ טאג'ורה על מנת לקבוע האם אוכלוסיית האצות שונה בין המיקומים שנבדקו במאמר זה, והאם מכאן נובע השוני בצפיפות האצות, זאת מאחר שבצפון הים האדום חרירן נושא אוכלוסיית אצות שרובה *Cladocopium*, ואילו בדרום, באיי פרסאן, האוכלוסייה רובה *Durusdinium*[48]. *Durusdinium trenchii* ידועה כאצה שיתופית עמידה לתנאי טמפרטורה גבוהה ומים עכורים[49].

לעומת חרירן שהציג טמפרטורת תפקוד אופטימלית גבוהה, לשיחית טמפרטורות תפקוד אופטימליות דומות במפרץ אילת (28.1°C) ומפרץ טאג'ורה (28.7°C)[39]. 28°C היא הטמפרטורה האופטימלית לגדילה (השקעת שלד) בשיחית שנדגמה לאורך גרדיאנט של 12° רוחב בים האדום, ללא תלות במיקום הדיגום[42]. מנגד, תחת 33°C בקיץ, שיחית מאיי פרסאן הפחיתה קצבי גדילה ייתכן כדי להפחית את צרכיה האנרגטיים, בעודה מפרישה יותר ריר (מוקוס) המכיל סוכרים עודפים מתהליך קיבוע הפחמן[42]. ייתכן כי עמידותה המטבולית של שיחית בים האדום נובעת גם מהבדלים בהרכב אוכלוסיית האצות שלה, שכן במפרץ אילת שיחית בעלת אוכלוסייה שרובה *Cladocopium*, לעומת באיי פרסאן שם האוכלוסייה רובה *Symbiodinium* עם נוכחות של *Durusdinium* במהלך הקיץ[50].

במחקר זה זיהינו יותר חלבונים בשיחית ממפרץ אילת לעומת מפרץ טאג'ורה, בעוד כמות חלבונים הייתה דומה בין מושבות ממפרץ אילת לבין איי פרסאן בסוף קיץ[42]. מאחר שלחלבונים תפקיד חיוני בתהליכי ייצוב ותיקון בעת עקת חום באלמוגים, כמו ל-HSP70 (Heat shock protein)[51], איפיון החלבונים (פרוטאומיקה) לאורך גרדיאנט הים-אדום בסוגי האלמוגים השונים יסייע לזהות גנים שעברו סלקציה לחום.

שיחית הדגימה עמידות מטבולית גדולה יותר מאשר שיחן שכיח, מאחר שההבדל היחיד היה כמות חלבוני מאכסן גבוהה יותר במפרץ אילת מאשר במפרץ טאג'ורה. עמידות מטבולית גבוהה יותר בשיחית מאשר שיחן שכיח במפרץ אילת זוהתה גם בניסוי עקת חום במעבדה[52] ובמהלך גל החום הימי החם ביותר שתועד עד היום באזור[29].

בשיחן שכיח נצפו השינויים הפיזיולוגיים המובהקים ביותר בין מפרץ אילת למפרץ טאג'ורה, שכללו פחות חלבוני מאכסן ותכולה גבוהה יותר של פחמימות באצות השיתופיות במפרץ טאג'ורה. שני מדדים אלה היו היחידים שבהם ניכר אחוז שינוי גבוה יותר בין מפרץ אילת לטאג'ורה, לעומת אחוז השינוי השנתי במפרץ אילת. פירוק חלבוני מאכסן ואי-שחרור הסוכרים הנוצרים בתהליך קיבוע הפחמן על-ידי האצות היא תגובה תאית שעשויה להעיד על אי-יציבות בחלוקת חומרי ההזנה בשיתוף הפעולה החיוני בין האלמוג לאצותיו[8], העשויה להוביל להרעבה של האלמוג המאכסן אף לפני הלבנה הניכרת לעין[8]. מאחר שהטמפרטורה הסביבתית במפרץ טאג'ורה הייתה 31.5°C, כ-1.1°C מעל הטמפרטורה האופטימלית של שיחן שכיח, ייתכן שתנאים אלו גרמו לעקה תרמית שהתבטאה בתגובה המטבולית במפרץ טאג'ורה, בעוד הטמפרטורה במפרץ אילת לא גרמה לתגובה דומה. באופן דומה, מושבות שיחן שכיח ממפרץ אילת הדגימו עמידות תרמית גבוהה יותר גם ממושבות דרומיות יותר לאורך הים האדום[53], כשהן ואצותיהן השיתופיות הדגימו ביטוי גנים (רנא) מהיר וגבוה לחימום של 7°C מעל טמפרטורת המים המקסימלית בקיץ, בעוד מושבות ממרכז הים האדום הציגו כמות קבועה ומוגבלת של ביטוי גנים. ממצא זה תומך בכך שאלמוגי מפרץ אילת הם חברת אלמוגים עמידה, בעוד שזו ממרכז הים האדום נמצאת קרוב לסף העמידות שלה[53]. בנוסף, שיחן שכיח ממפרץ אילת עמיד בפני העלאת טמפרטורה מהירה וקצרה וגם בפני שהייה ממושכת עד ל-32°C,[30] 5°C + מעל טמפרטורת הקיץ המקסימלית הנוכחית.

עמידות זו ממחישה את חשיבותו העולמית של מפרץ אילת כמקלט אלמוגים שבולטת גם לעומת אזורים אחרים שנחשבו בעבר כמקלטי אלמוגים, כמו שוניות דרומיות ומרוחקות באוסטרליה (האי הרון[54] ואיי לורד היו[55]), כך שיכולתן של שוניות אלה לשמש כמקלט אלמוגים מוטלת בספק.

סיכום ומסקנות

בעידן של שינויי אקלים והידרדרות מהירה במצבן של שוניות אלמוגים, ישנו צורך לזהות את שוניות האלמוגים עם הסיכוי הגבוה ביותר לשרוד באוקיינוסים חמים יותר[56]. מעניינות במיוחד הן שוניות אלמוגים הנפרשות לאורך מנעד רחב של טמפרטורות, מאחר שהן יכולות לעבור סלקציה טבעית לאורך קווי רוחב[57]. במחקר זה, בחנו את מצבם האנרגטי (חלבונים, פחמימות ושומנים) של שלושה סוגי אלמוגים שכיחים בסוף קיץ 2022 משתי שוניות אלמוגים משני קצות הים האדום, במפרץ טאג'ורה בדרום ובמפרץ אילת בצפון. מצאנו כי אף-על-פי שלא זוהתה הלבנת אלמוגים בשיחן שכיח, שיחית וחרירן משני המפרצים, זוהו הבדלים במאגרי האנרגיה שלהם. השערתנו אוששה חלקית, מאחר שרק שיחן שכיח ושיחית הדגימו מאגרי אנרגיה גבוהים יותר במפרץ אילת לעומת מפרץ טאג'ורה בסוף קיץ 2022. בנוסף, סוגי אלמוגים בעלי טמפרטורת תפקוד אופטימלית קרובה יותר לטמפרטורה הסביבתית לא הציגו בהכרח מאגרי אנרגיה גבוהים יותר. בעוד שהשערה זו אומתה לגבי חרירן, היא לא אומתה לגבי שיחן שכיח ושיחית. עם זאת, ההיררכיה של העמידות המטבולית שהוצגה כאן (חרירן, שיחית ולבסוף שיחן שכיח) אכן מתבטאת בשכיחויות גבוהות של חרירן בדרום הים האדום, באתרים שעברו לאחרונה אירועי הלבנה ותמותת אלמוגים נרחבת, ובנוכחות הולכת ועולה של שיחית ואחריה שיחן שכיח לאורך קווי הרוחב הגבוהים של הים האדום[27]. יש צורך להמשיך לעקוב אחר הרכבן ומצבן של חברות האלמוגים לאורך הים האדום, ובייחוד במפרץ אילת, מקלט אלמוגים בעל חשיבות עולמית.

תודות

ברצוננו להודות לגילהם בנק-פרנדי וגבי פרנה על תרומתם הרבה למחקר זה בשל דיגום ושינוע האלמוגים מג'יבוטי.

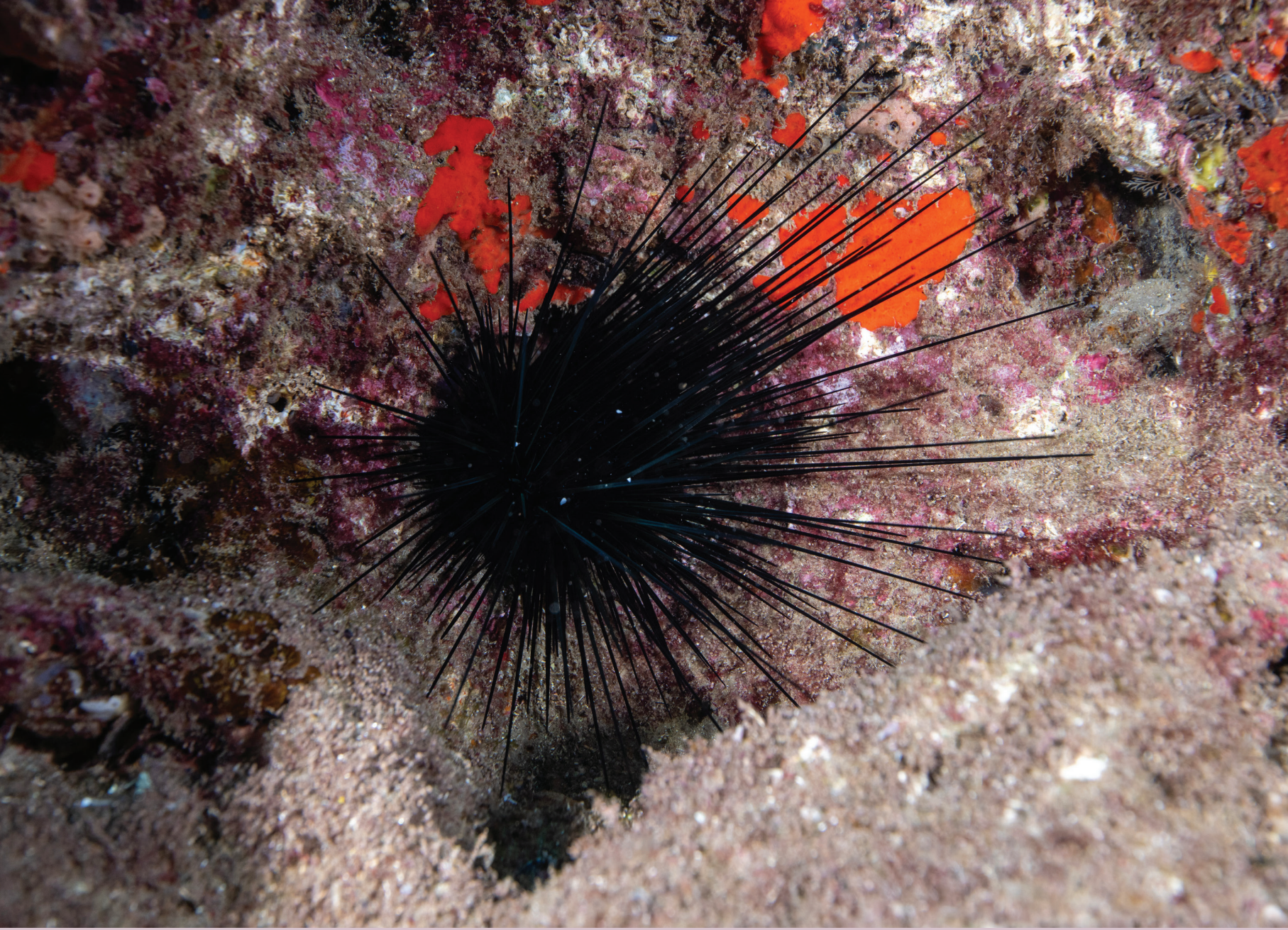
רשימת מקורות

1. Eddy, T. D. et al. Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services. *One Earth* **4**, 1278–1285 (2021).
2. Hoegh-Guldberg, O. Coral reef ecosystems and anthropogenic climate change. *Reg. Environ. Chang.* **11**, 215–227 (2011).
3. Hughes, T. P. et al. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*. **359**, 80–83 (2018).
4. Hoegh-Guldberg, O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar. Freshw.* Res. **50**, 839–866 (1999).
5. Oakley, C. A. & Davy, S. K. Cell biology of coral bleaching. in coral bleaching: patterns, processes, causes and consequences 189–211 (2018). doi:10.1007/978-3-319-75393-5_8
6. Liu, G., Strong, A. E., Skirving, W. J. & Arzayus, L. F. Overview of NOAA Coral Reef Watch Program's near-real-time satellite global coral bleaching monitoring activities. Proc. 10th Int. Coral Reef Symp. **1793**, 1783–1793 (2006).
7. Kayanne, H. Validation of degree heating weeks as a coral bleaching index in the northwestern Pacific. *Coral Reefs* **36**, 63–70 (2017).
8. Rädecker, N. et al. Heat stress destabilizes symbiotic nutrient cycling in corals. *Proc. Natl. Acad. Sci.* U. S. A. **118**, (2021).
9. Sokolova, I. M. Energy-limited tolerance to stress as a conceptual framework to integrate the effects of multiple stressors. Integr. *Comp. Biol.* **53**, 597–608 (2013).
10. Grottoli, A. G., Rodrigues, L. J. & Palardy, J. E. Heterotrophic plasticity and resilience in bleached corals. *Nature* **440**, 1186–1189 (2006).
11. Kochman, N. R., Grover, R., Rottier, C., Ferrier-Pages, C. & Fine, M. The reef building coral *Stylophora pistillata* uses stored carbohydrates to maintain ATP levels under thermal stress. Coral Reefs **40**, 1473–1485 (2021).
12. Tremblay, P., Gori, A., Maguer, J. F., Hoogenboom, M. & Ferrier-Pagès, C. Heterotrophy promotes the re-establishment of photosynthate translocation in a symbiotic coral after heat stress. *Sci. Rep.* **6**, 38112 (2016).
13. Grottoli, A. G. et al. The cumulative impact of annual coral bleaching can turn some coral species winners into losers. *Glob. Chang. Biol.* **20**, 3823–3833 (2014).

14. Sinclair, B. J. et al. Can we predict ectotherm responses to climate change using thermal performance curves and body temperatures? *Ecol. Lett.* **19**, 1372–1385 (2016).
15. Rodolfo-Metalpa, R. et al. Thermally tolerant corals have limited capacity to acclimatize to future warming. *Glob. Chang. Biol.* **20**, 3036–3049 (2014).
16. Aichelman, H. E., Zimmerman, R. C. & Barshis, D. J. Adaptive signatures in thermal performance of the temperate coral *Astrangia poculata*. J. Exp. Biol. **222**, jeb189225 (2019).
17. Jurriaans, S. & Hoogenboom, M. O. Thermal performance of scleractinian corals along a latitudinal gradient on the Great Barrier Reef. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **374**, 20180546 (2019).
18. Silbiger, N. J., Goodbody-Gringley, G., Bruno, J. F. & Putnam, H. M. Comparative thermal performance of the reef-building coral *Orbicella franksi* at its latitudinal range limits. *Mar. Biol.* **166**, 1–14 (2019).
19. Gates, R. D. & Edmunds, P. J. The physiological mechanisms of acclimatization in tropical reef corals. *Am. Zool.* **39**, 30–43 (1999).
20. Sofianos, S. S., Johns, W. E. & Murray, S. P. Heat and freshwater budgets in the Red Sea from direct observations at Bab el Mandeb. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **49**, 1323–1340 (2002).
21. Kürten, B. et al. Influence of environmental gradients on C and N stable isotope ratios in coral reef biota of the Red Sea, Saudi Arabia. *J. Sea Res.* **85**, 379–394 (2014).
22. Rushdi, A. I., El-Mubarak, A. H. & Al-Mutlaq, K. F. Calcite and Aragonite Saturation Levels of the Red Sea Coastal Waters of Yemen During Early Winter and Expected pH Decrease (Acidification) Effects. in Oceanographic and biological aspects of the Red Sea 171–183 (2019). doi:10.1007/978-3-319-99417-8_10
23. Fine, M. et al. Coral reefs of the Red Sea — Challenges and potential solutions. *Reg. Stud. Mar. Sci.* **25**, 1–13 (2019).
24. Silverman, J., Lazar, B. & Erez, J. Effect of aragonite saturation, temperature, and nutrients on the community calcification rate of a coral reef. *J. Geophys. Res. Ocean.* **112**, 1–14 (2007).
25. Raitsos, D. E., Pradhan, Y., Brewin, R. J. W., Stenchikov, G. & Hoteit, I. Remote Sensing the Phytoplankton Seasonal Succession of the Red Sea. *PLoS One* **8**, e64909 (2013).
26. Sawall, Y. & Al-Sofyani, A. Biology of Red Sea corals: metabolism, reproduction, acclimatization, and adaptation. Red Sea Form. Morphol. Oceanogr. Environ. a Young Ocean Basin 487–509 (2015).
27. Hammerman, N. M. et al. Variable response of Red Sea coral communities to recent disturbance events along a latitudinal gradient. *Mar. Biol.* **168**, 1–14 (2021).
28. Osman, E. O. et al. Thermal refugia against coral bleaching throughout the northern Red Sea. *Glob. Chang. Biol.* **24**, e474–e484 (2018).

29. Kochman-Gino, N. R. & Fine, M. Reef building corals show resilience to the hottest marine heatwave on record in the Gulf of Aqaba. *Front. Mar. Sci.* **10**, 1215567 (2023).
30. Evensen, N. R., Fine, M., Perna, G., Voolstra, C. R. & Barshis, D. J. Remarkably high and consistent tolerance of a Red Sea coral to acute and chronic thermal stress exposures. *Limnol. Oceanogr.* 4–45 (2021). doi:10.1002/lno.11715
31. Krueger, T. et al. Common reef-building coral in the northern red sea resistant to elevated temperature and acidification. *R. Soc. Open Sci.* **4**, 170038 (2017).
32. Fine, M., Gildor, H. & Genin, A. A coral reef refuge in the Red Sea. *Glob. Chang. Biol.* **19**, 3640–3647 (2013).
33. Savary, R. et al. Fast and pervasive transcriptomic resilience and acclimation of extremely heat-tolerant coral holobionts from the northern Red Sea. *Proc. Natl. Acad. Sci.* U. S. A. **118**, (2021).
34. Bellworthy, J. & Fine, M. Beyond peak summer temperatures, branching corals in the Gulf of Aqaba are resilient to thermal stress but sensitive to high light. *Coral Reefs* **36**, 1071–1082 (2017).
35. Braithwaite, C. J. R. Geology and palaeogeography of the Red Sea region. (Pergamon Press Oxford, 1987).
36. Ulstrup, K. E., Berkelmans, R., Ralph, P. J. & Van Oppen, M. J. H. Variation in bleaching sensitivity of two coral species across a latitudinal gradient on the Great Barrier Reef: The role of zooxanthellae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **314**, 135–148 (2006).
37. Omar, M., Youssouf, Memery, L. & Carton, X. Statistical Analysis of Sea Surface Temperature and Chlorophyll-a Concentration Patterns in the Gulf of Tadjourah (Djibouti). *J. Mar. Sci. Res. Dev.* **06**, 1–9 (2016).
38. Cowburn, B. et al. Healthy and diverse coral reefs in Djibouti – A resilient reef system or few anthropogenic threats? *Mar. Pollut. Bull.* **148**, 182–193 (2019).
39. Banc-Prandi, G. et al. Assessment of temperature optimum signatures of corals at both latitudinal extremes of the Red Sea. *Conserv. Physiol.* 10, coac002 (2022).
40. Dishon, G., Dubinsky, Z., Fine, M. & Iluz, D. Underwater light field patterns in subtropical coastal waters: A case study from the Gulf of Eilat (Aqaba). *Isr. J. Plant Sci.* **60**, 265–275 (2012).
41. Yoder, M. et al. DESS: A versatile solution for preserving morphology and extractable DNA of nematodes. *Nematology* **8**, 367–376 (2006).
42. Sawall, Y. et al. Extensive phenotypic plasticity of a Red Sea coral over a strong latitudinal temperature gradient suggests limited acclimatization potential to warming. *Sci. Rep.* **5**, e8940 (2015).
43. Keighan, R., van Woesik, R., Yalon, A., Nam, J. & Houk, P. Moderate chlorophyll-a environments reduce coral bleaching during thermal stress in Yap, Micronesia. *Sci. Rep.* **13**, 9336 (2023).

44. Ziegler, M., Roder, C. M., Büchel, C. & Voolstra, C. R. Limits to physiological plasticity of the coral *Pocillopora verrucosa* from the central Red Sea. *Coral Reefs* **33**, 1115–1129 (2014).
45. McLachlan, R. H. et al. Environmental gradients drive physiological variation in Hawaiian corals. *Coral Reefs* **40**, 1505–1523 (2021).
46. Keister, E. F. et al. Similarities in biomass and energy reserves among coral colonies from contrasting reef environments. *Sci. Rep.* **13**, 1355 (2023).
47. McLachlan, R. H. et al. Physiological acclimatization in Hawaiian corals following a 22-month shift in baseline seawater temperature and pH. *Sci. Rep.* **12**, 3712 (2022).
48. Terraneo, T. I. et al. Environmental latitudinal gradients and host-specificity shape Symbiodiniaceae distribution in Red Sea Porites corals. *J. Biogeogr.* **46**, 2323–2335 (2019).
49. LaJeunesse, T. C. et al. Systematic revision of Symbiodiniaceae highlights the antiquity and diversity of coral endosymbionts. *Curr. Biol.* **28**, 2570–2580 (2018).
50. Sawall, Y., Al-Sofyani, A., Banguera-Hinestroza, E. & Voolstra, C. R. Spatio-temporal analyses of Symbiodinium physiology of the coral *Pocillopora verrucosa* along large-scale nutrient and temperature gradients in the Red Sea. *PLoS One* **9**, 1–12 (2014).
51. Barshis, D. J. et al. Genomic basis for coral resilience to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* U. S. A. **110**, 1387–1392 (2013).
52. Grottoli, A. G., Tchernov, D. & Winters, G. Physiological and biogeochemical responses of super-corals to thermal stress from the northern gulf of Aqaba, Red Sea. *Front. Mar. Sci.* **4**, 1–12 (2017).
53. Voolstra, C. R. et al. Contrasting heat stress response patterns of coral holobionts across the Red Sea suggest distinct mechanisms of thermal tolerance. *Mol. Ecol.* **30**, 4466–4480 (2021).
54. Brown, K. T., Eyal, G., Dove, S. G. & Barott, K. L. Fine-scale heterogeneity reveals disproportionate thermal stress and coral mortality in thermally variable reef habitats during a marine heatwave. *Coral Reefs* **42**, 131–142 (2023).
55. Moriarty, T., Leggat, W., Heron, S. F., Steinberg, R. & Ainsworth, T. D. Bleaching, mortality and lengthy recovery on the coral reefs of Lord Howe Island. The 2019 marine heatwave suggests an uncertain future for high-latitude ecosystems. *PLOS Clim.* **2**, e0000080 (2023).
56. van Woesik, R. et al. Coral-bleaching responses to climate change across biological scales. *Glob. Chang. Biol.* **28**, 4229–4250 (2022).
57. Dixon, G. et al. Tolerance across latitudes. *Science.* **348**, 2014–2016 (2015).



קיפוד-ים פולש לספסייני - נזרית ארוכת קוצים, *Diadema setosum* בעומק 10 מטר מול אכזיב המין שהגיע מהים האדום נמצא בסכנת הכחדה שם בעקבות מגפה קטלנית. הקיפודים הם צמחוניים הניזונים מאצות ומכאן חשיבותם בשונית האלמוגים באילת.
בים תיכון הם מתחרים עם צמחוניים אחרים. צילום: חגי נתיב.

32 הים אינו אותו ים, מינים זרים בחוף הים התיכוני של ישראל - נתונים עדכניים, מדיניות, תחזית

בלה ש. גליל[1], הנק ק. מיניס[2,1] מנחם גורן[3,1]

[1]מוזיאון הטבע והמרכז לאומי לחקר המגוון הביולוגי ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב
[2]אוספים לאומיים לטבע, האוניברסיטה העברית בירושלים
[3]בית ספר לזואולוגיה, אוניברסיטת תל אביב

bgalil@tauex.tau.ac.il,
mienis@tauex.tau.ac.il,
gorenm@tauex.tau.ac.il

תקציר

מתוך 490 מינים רב-תאיים זרים (Non-indigenous species) שתועדו לאורך חופי הים התיכון של ישראל, קרוב ל-90% הם מינים שחדרו דרך תעלת סואץ. מדף היבשת הישראלי משמש כאתר התיישבות, רבייה והפצה עבור מינים אלו, 315 תועדו ברחבי ים הלבנט ו-161 הגיעו למרכז הים התיכון. המתאם החיובי בין מועד התיעוד הראשון ותחום התפשטות המינים הים סופיים בים התיכון כיום מצביע על כך שאוכלוסיותיהם ממשיכות להתפשט מערבה. תעלת סואץ המורחבת המשמשת כמסדרון פלישה, והתחממות מי הים התיכון, הביאו להאצת חדירתם, התבססותם והתפשטותם.

אנו מציגים סיכום מעודכן של השינויים לאורך חופי ישראל בשל פלישות מינים דרך תעלת סואץ. אנו דנים בהשפעות אוכלוסיות המינים הללו על המגוון הביולוגי, הדיג ובריאות האדם, ומתייחסים לדוח מבקר המדינה אשר קבע כי המשרד להגנת הסביבה (הגנ"ס) לא ביצע תהליכים מובנים של הערכת וניהול סיכונים לגבי מינים פולשים, לא יצר תוכנית למוכנות מוקדמת להגעתם ולא קבע מערך פעולות חירום שיכלו למנוע את התבססותם ואת התפשטותם. מדיניות ישראל באשר למינים ימיים זרים, כפי שבאה לידי ביטוי במסמכים רשמיים, כושלת ובפועל מגינה עליהם ומעודדת את התפשטותם.

כבר ב-1919 כתב ו. שטיניץ: "תעלת סואץ מקשרת בין שני אוקיינוסים שלכל אחד מהם פאונה שונה לחלוטין מזה של השני, מה שמעורר מספר שאלות: האם חילוף פאונה מתרחש בין שני האוקיינוסים באמצעות תעלה זו? האם המהגרים מהצד השני משגשגים כאן או מתים? האם הגירה כזו גרמה לשינויים חשובים בפאונה של האגן המזרחי של הים התיכון?"[1]

מבוא

לאורך החוף הישראלי תועדו 490 מינים זרים, המספר הגבוה ביותר של מינים זרים בים התיכון[2]. כאשר מביאים בחשבון את אורך החוף, מספר המינים הזרים הימיים הוא הגבוה בעולם. מטרת פרק זה הוא להציג את הידע העדכני על מינים ימיים זרים לאורך החוף הים-תיכוני של ישראל, תוך התייחסות מיוחדת לפלישות דרך תעלת סואץ (מינים אריתראים) כמקור הדומיננטי של מינים זרים בים התיכון. המאמר מציג את דפוסי התפשטותם ואת ההשלכות על היבטים מסוימים

של הטבע (שימור המגוון הביולוגי ושימור מבוסס-אתרים, דיג ובריאות האדם). ובעיקר, נבחנת בפרק זה ההלימה של מדיניות הניהול שאומצה בשנים האחרונות על-ידי מדינת ישראל לגבי המים הטריטוריאליים והכלכליים ביחס לסעיף 13 של האמנה להגנת הסביבה הימית והאזור החופי של הים התיכון ("אמנת ברצלונה").

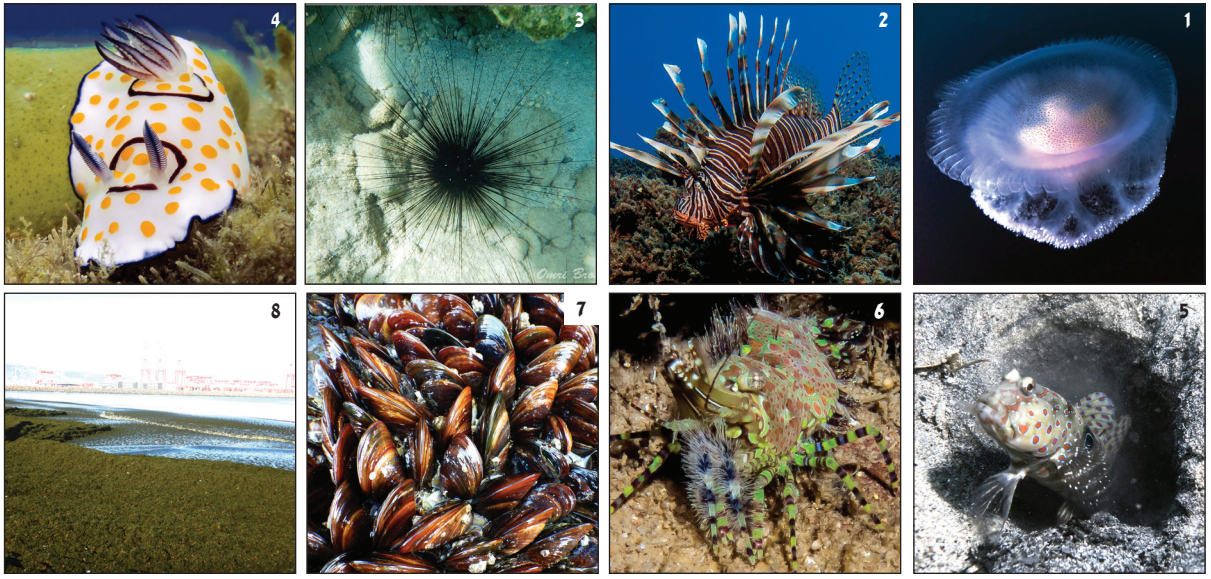
מסמך הסיכום של הפלטפורמה הבין-ממשלתית למדע-מדיניות למגוון ביולוגי ושירותי מערכות אקולוגיות קבע שמינים זרים פולשים מהווים אחד הגורמים הישירים החשובים ביותר לאובדן מגוון ביולוגי ולשינויים בשירותי המערכת האקולוגית, והשפעתם משמעותית ובעיקר שלילית. ההשפעות הינן הן על הטבע, והן על תרומות הטבע לאנושות[3]. תשומת הלב של מקבלי החלטות, בעלי עניין והציבור ממוקדת בעיקר באותם מינים פולשים הנחשבים "מזיקים", הגורמים לאובדן אוכלוסיות ומינים ילידיים ובעיקר אלו הגורמים לנזקים כלכליים או פוגעים בבריאות הציבור[4]. לפיכך, מינים זרים מוגדרים לעיתים קרובות במסמכי מדיניות וחקיקה על בסיס השפעותיהם: "... מין זר שהוכח כי הכנסתו או התפשטותו מאיימת או משפיעה לרעה על המגוון הביולוגי ושירותי המערכת האקולוגית הקשורים אליו"[5]. אולם, כל המינים הזרים עשויים להשפיע על הטבע על-ידי עצם השתלבותם במערכת האקולוגית, גם כאשר תפוצתם מצומצמת[6].

המדינות החתומות על "אמנת ברצלונה" אימצו ב-1995 את הפרוטוקול הנוגע לאזורים מוגנים ולמגוון ביולוגי[7]. סעיף 13 של האמנה קובע בבירור כי "הצדדים ינקטו בכל האמצעים המתאימים כדי להסדיר את ההכנסה המכוונת או המקרית של מינים זרים. ולאסור הכנסתם של אלה שעלולים להשפיע לרעה על מערכות אקולוגיות, בתי גידול או מינים באזור שעליו חל פרוטוקול זה. הצדדים ישתדלו ליישם את כל האמצעים האפשריים כדי להשמיד מינים שכבר הוכנסו כאשר, לאחר הערכה מדעית, נראה שמינים אלה גורמים או עלולים לגרום נזק למערכות אקולוגיות, בתי גידול או מינים באזור שעליו חל פרוטוקול זה". ישראל חתמה על האמנה.

יוזמתנו לסקירת המינים הזרים בחוף הים-תיכוני של ישראל עלתה בשל סמיכות אירועים: מאה חמישים וחמש שנים לפתיחת תעלת סואץ – הנתיב העיקרי לכניסת מינים זרים; מאה וחמש שנים לקריאתו של ו. שטייניץ[1] לחקור את המקום היחיד על פני כדור הארץ שבו מתקיימת הגירה ישירה בין שתי פרובינציות פאוניסטיות ימיות שונות לחלוטין והשפעות הגירה זו; חקיקת תקנות שנויות במחלוקת ל"ערכי טבע מוגנים"[8] הכוללות מינים ימיים זרים; אישור הוועדה לתכנון ושימור סביבה במינהל התכנון של מסמך המדיניות עבור המרחב הימי של ישראל להסדרת כל הפעילויות הקשורות למים במים החופיים, במים הטריטוריאליים ובמים הכלכליים[9]; ודוח מבקר המדינה שנושאו "מניעת נזקי מינים פולשים ושמירה על המגוון הביולוגי" [10]. מספר דוגמאות למינים זרים שהתפשטו במזרח הים התיכון בעשורים האחרונים באיור1.

החוף הים תיכוני של ישראל - תיאור קצר

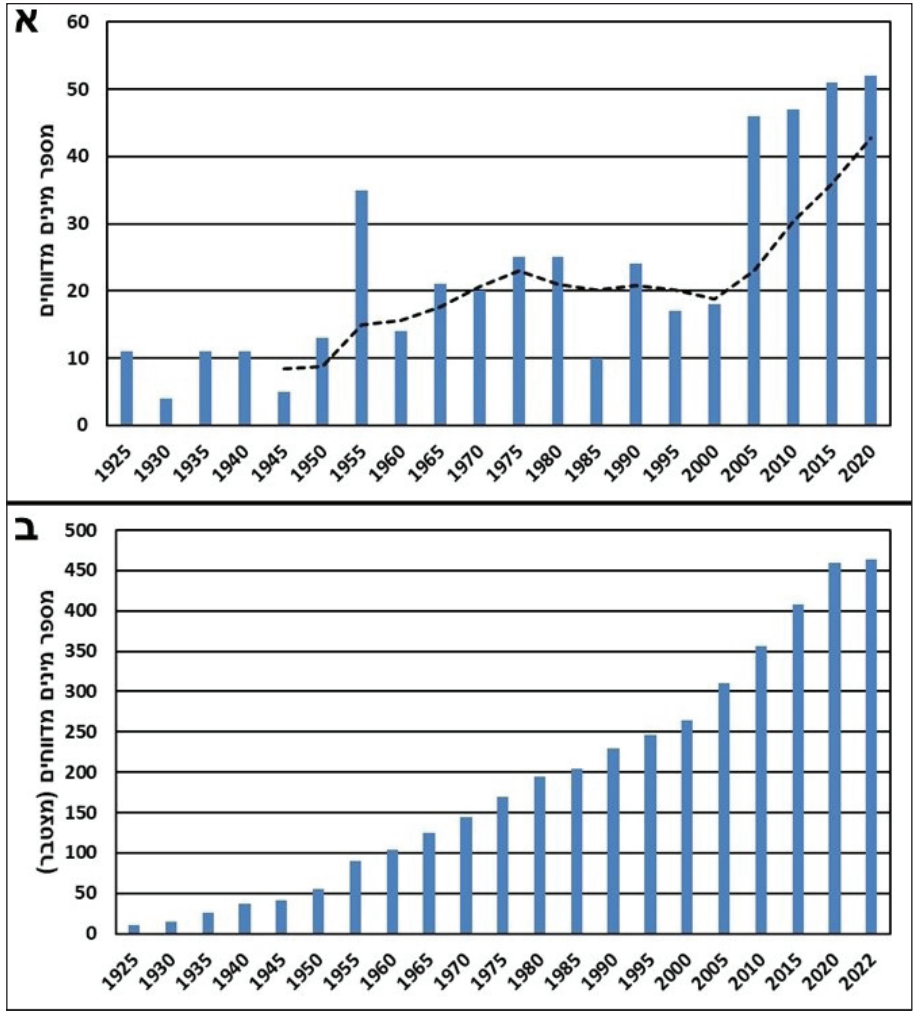
החוף הים תיכוני של ישראל אורכו כ-196 ק"מ. הסעת סדימנטים מהנילוס על-ידי זרמי הים לאורך חופי ישראל יצרה מדף יבשת חולי וטיני ברובו ההולך וצר כלפי צפון ששוליו הם בעומק 100-80 מטר. רכסי הכורכר המקבילים לחוף מכוסים ברובם סדימנטים. צפונה למפרץ חיפה מדף היבשת מאופיין במקטעים של טבלאות גידוד, חופים סלעיים מורכבים ומספר איים זעירים[11].



איור 1. מינים זרים שהתפשטו לאורך החוף הים תיכוני של ישראל. 1. פרחונית סגולה (*Marivagia stellata*); 2. זהרון הדור (*Pterois miles*); 3. ניזרית ארוכת קוצים (*Diadema setosum*); 4. חשופית זהובת כתמים (*Chromodoris annulata*); 5. סרטנון מקושט (*Cryptocentrus caerulopunctatus*); 6. סרון השיש (*Saron marmoratus*); 7. צדפה חומה (*Perna perna*); 8. קודיון זעיר (*Codium parvulum*). צילומים: 5,1 שבי רוטמן; 6,4,2 אורן קליין; 3 עמרי ברונשטיין; 8,7 מוטי מנדלסון.

לפני השלמת סכר אסואן הגבוה ב-1964, הנילוס הזרים לים התיכון מדי שנה (בעיקר בחודשים אוגוסט-נובמבר) 60 עד 180 טונות של סדימנט ו-18 עד 55 מיליארד מטרים מעוקבים של מים. מדידות הידרוגרפיות במדף היבשת הראו ירידה חדה במליחות המים לאורך חופי ישראל הדרומיים בסוף הקיץ כתוצאה של גאות הנילוס. הפסקת "גאון" הנילוס ב-1965 הביאה לעלייה במליחות. כיום המליחות הממוצעת בשכבת המים העליונה (0-10 מטר) בים הפתוח היא 39.75 [12]. טמפרטורות מים הגבוהות ביותר בים התיכון נמדדו בדרום מזרח הים. המדידות במהלך 40 השנים האחרונות תיעדו התחממות ממוצעת של 0.13°C בשנה, גבוהה בהרבה מן התחזיות של הפורום הבין-ממשלתי לשינויי האקלים (IPCC, The Intergovernmental Panel on Climate Change) שהעריך שההתחממות הצפויה בשנים 2016-2035 היא 0.035°C בשנה. הסיבה כנראה היא קצב תחלופת מים נמוך[13].

בנוסף להשפעות אזוריות (סכר אסואן, התייבשות וזיהום נחלי חוף רבים ושינויי אקלים), החוף הישראלי חווה לחצים אנתרופוגניים נוספים שנבעו מגידול מהיר של אוכלוסיית ישראל, ופיתוח אינטנסיבי של החקלאות והתעשייה. כל אלה הביאו להזרמה של מזהמים כמו מתכות כבדות וחומרים אורגניים באמצעות מוצאים ימיים, נחלי החוף ושיטפונות עונתיים. מפרץ חיפה נחשף לזיהום הכבד ביותר. בשנות השבעים והשמונים של המאה ה-20 נמצאו בדגים וחסרי חוליות שנדגמו במפרץ, ריכוזים גבוהים של מתכות שמקורם בעיקר מהשפכים של התעשייה הפטרוכימית[14]. למרות האמצעים שננקטו כנגד הזיהום, עדיין מוצאים בסדימנט שבקרבת שפכי נחלים שבמפרץ עקבות של מתכות כבדות (כולל כספית) וחומרים אורגניים[15]. בנוסף לכל אלה חווה החוף הישראלי הפרעות פיזיות ובהן בניית נמלים, שוברי גלים, הזנת חופים (ניוד מסיבי רב-שנתי של סחף חול לחופי רחצה), מתקני התפלת מים, ומתקנים ימיים נוספים.



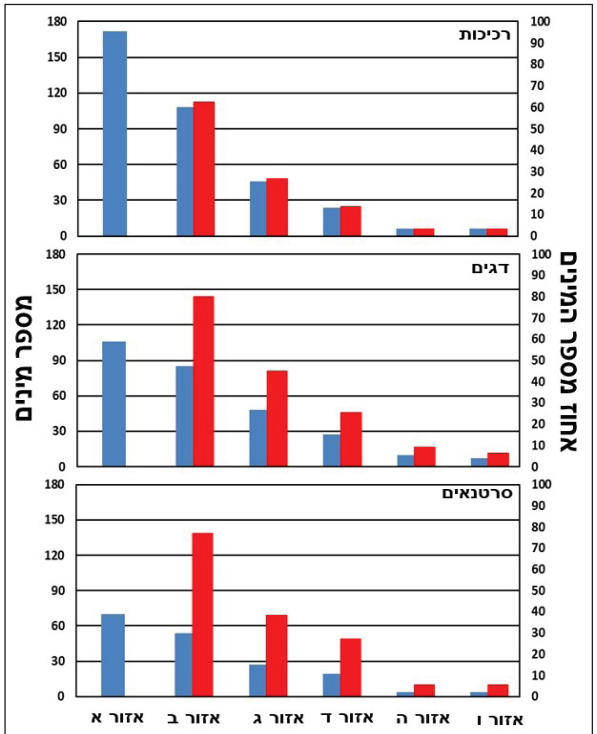
איור 2. א. מספר המינים הזרים שתועדו, 1995-2020. הקו מציין ממוצע נע לפרקי זמן של 5 שנים.
ב. סך מצטבר של כלל המינים הזרים 1925-2022

הפלישה הגדולה

עד כה תועדו במרחב הימי של ישראל 490 מינים רב-תאיים זרים, הנמנים עם 255 משפחות. תהליך הפלישה של מינים זרים נמשך ללא הרף ומספרם שולש ויותר מאז 1970 (מ-147 ל-473) (איור 2). הקבוצות העשירות ביותר במינים זרים הן רכיכות, דגים וסרטנאים המהווים בהתאמה 37% (182 מינים), 22%, (108 מינים) 15% (71 מינים) מסך מספר המינים הזרים שתועדו. קצב הדיווח על רשומות חדשות משקף את השוני במאמצי המחקר של הקבוצות השונות (איור

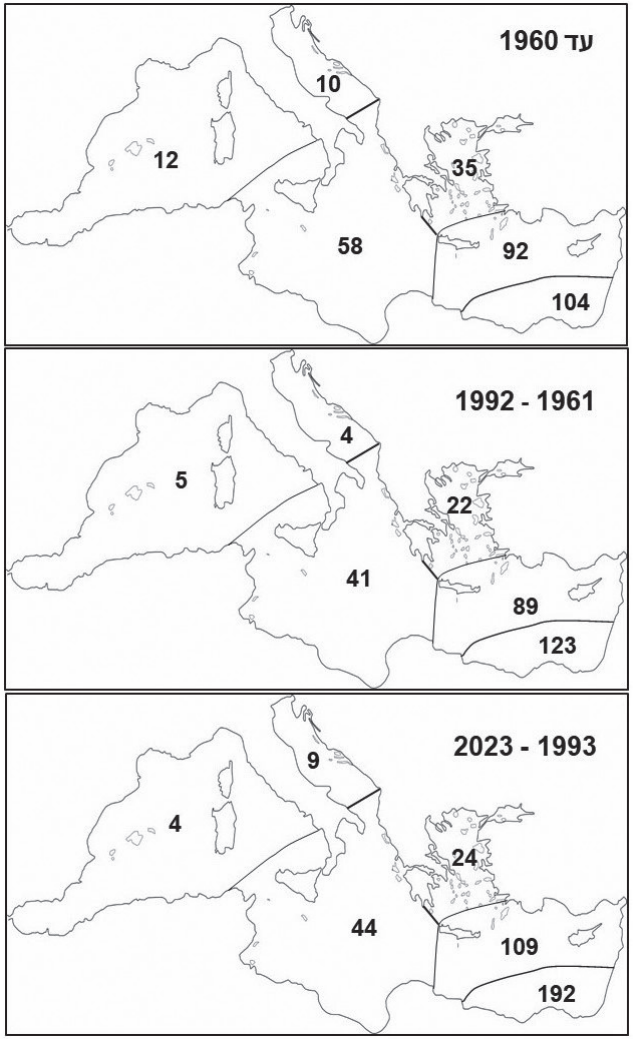
2). מאז המילניום גדל מספר המינים הזרים של הרכיכות, הדגים, והסרטנאים ב-79, 54 ו-32 מינים, בהתאמה. רובם המכריע (90%) של המינים הזרים בישראל הגיעו דרך תעלת סואץ. 280 מינים חצו כנראה את תעלת סואץ בכוחות עצמם, 61 כנראה חצו את התעלה כצימדה על כלי שיט, 37 מינים הגיעו עם כלי שיט מאזורים אחרים (מלבד ים סוף/האוקיינוס ההודי), 3 מחקלאות מים ו-3 ממקור לא ידוע.

אחוז גבוה מהמינים שתועדו לפני 1960 ביסס אוכלוסיות גדולות ונפוצות (100%, 74%, 55% עבור דגים, סרטנאים, רכיכות, בהתאמה). לעומת זאת בין המינים שדווחו בשלושת העשורים האחרונים, גבוה האחוז של המינים ה"נדירים" או כאלה שדווחו רק פעם אחת (67%, 57%, 36%) עבור דגים, רכיכות, וסרטנאים, בהתאמה. מספר המינים הזרים וחלקם היחסי יורדים ככל שמתרחקים מדרום מזרח הלבנט (איורים 3, 4). דפוס זה בולט יותר בקרב מינים שאוכלוסייתם לאורך חופי ישראל היא נפוצה ושופעת.



איור 3. מספר המינים האריתראים (בכחול) והאחוז שלהם (באדום) בהשוואה למספר המינים לחופי ישראל. אזור א – דרום מזרח הלבנט; אזור ב – ים הלבנט; אזור ג מרכז הים התיכון; אזור ד – הים האגאי; אזור ה – הים האדריאטי; אזור ו – מערב הים התיכון

איור 3. מספר המינים (בכחול) והאחוזון שלהם (באדום) בהשוואה למספר המינים לחופי ישראל. אזור א – דרום מזרח הלבנט; אזור ב – ים הלבנט; אזור ג מרכז הים התיכון; אזור ד – הים האגאי; אזור ה – הים האדריאטי; אזור ו – מערב הים התיכון.



איור 4. מספר המינים האריתראים שתועדו באזורים השונים בים התיכון – דרום-מזרח הלבנט, ים הלבנט, הים האגאי, מרכז הים התיכון, הים האדריאטי ומערב הים בתקופות: א. עד 1960. ב. בתקופה 1961-1992. ג. 1993-2023.

על אף ההרחבה המשמעותית של תעלת סואץ ועליית טמפרטורת מי הים התיכון במהלך שלושת העשורים האחרונים, ה"וותק" של המינים הזרים הוא הגורם החשוב בדפוס התפשטותם הגיאוגרפי בים התיכון. יש מתאם בין משך השהות של המינים הזרים בחופי ישראל לבין מרחקי תפוצתם בים התיכון. אחוז המינים שהתפשטו מערבה בים התיכון מבין המינים שתועדו בישראל לפני 1960 גבוה מאלה שתועדו באזורי הים התיכון השונים במהלך שלושת העשורים האחרונים 1993-2023 – 89%, 58%, 35% בים הלבנט, בים התיכון המרכזי ובים האגאי, בהתאמה לעומת 55%, 24%, 13% (איור 4). כל עוד הוגבלה נוכחות המינים האריתראים לים הלבנט ולא נגרמו בעטיים נזקים כלכליים או פגיעות

ברווחת האדם, חוקרים וקובעי מדיניות התעלמו מן התופעה. הגידול באוכלוסיותיהם והתפשטותם של מספר מינים בולטים בנזקיהם בשנות השמונים הביאו להעלאת המודעות לפלישה יוצאת הדופן. בעשורים האחרונים גדל מאוד מספרם במרכז הים התיכון – עד למיצר סיציליה *המחבר את אגנו המזרחי של הים התיכון עם אגנו המערבי*.
התפשטות המינים הזרים למדינות הים התיכון הביאה לפעילויות ממשק שמטרתן צמצום הנזק. בטורקיה וקפריסין החלה פעילות אינטנסיבית לדילול אוכלוסיות הזהרונים על-ידי צוללנים [19,18,17,16]. כמו כן מחלחלת ההכרה בנזקים ובסיכונים של מיני הלגינון (*Lagocephalus*) ויש פעילות ראשונית של איסוף הנתונים מארצות הים התיכון ובדיקת אפשרויות לפעילויות להפחתת הנזקים והסיכונים[21,20].

יורדים לעומק

בעבר רווחה ההנחה שאוכלוסיות מינים אריתראים תוגבלנה למדף היבשת הרדוד מכיוון שעומקה של תעלת סואץ לא יאפשר מעבר חי מעמקים. ואכן, עד שנות השמונים אוכלוסיות המינים האריתראים, פרט למקרים בודדים, תועדו מבתי גידול רדודים מ-50 מטר. אולם, מאז תחילת המילניום נאספו מינים אריתראים, שחלקם הגיעו לאחרונה לחוף הישראלי וחלקם מינים שכבר ביססו עצמם לפני שנים, בעומקים גדולים יותר. בסקרים של חברות הקרקעית שנערכו ב-2010-2012, ושוב ב-2017, בעומקים העולים על 100 מטר נאספו דגים וסרטנים קצרי בטן פולשים[22,23]. סביר להניח שלאוכלוסיות טורפים זרים כמו אופירית נודדת *Pterois miles, Saurida lesspessianus* והסרטן השחיין *Charybdis longicollis* במדרון היבשת השפעה על המגוון הביולוגי של המינים הילידים[26-24].

האם שמורות הטבע הימיות אכן שומרות על מגוון המינים הטבעי?

ייעודן של שמורות הטבע הימיות בישראל הוא שמירה על "...חי, צומח, דומם, קרקע, מערות, מים או נוף, שיש בהם עניין מדעי או חינוכי, מפני שינויים בלתי רצויים במראם, **בהרכבם הביולוגי** או במהלך התפתחותם" (חוק גנים לאומיים שמורות טבע, אתרים לאומיים ואתרי הנצחה (התשנ"ח, 1998). ברם, שמורות טבע ימיות מוגבלות לניהול סביבתי בתוך גבולותיהן (דיג, תשתיות, קהל) ואינן מגינות מפני שינויים בלתי רצויים בהרכבן הביולוגי שמקורם במפגעים סביבתיים כדיג יתר, זיהום רחב טווח, התחממות ומינים פולשים[3].
על-פי השערת "העמידות הביוטית" חברות עתירות מינים ילידים המוגנות בשמורות טבע אמורות להיות מוגנות מפני פלישות – אולם המציאות שונה[30-27, 19]. במזרח הים התיכון הן מהוות מרכזי קליטה והתבססות למינים זרים. מחקר שנערך בדרום מזרח קפריסין דיווח שצפיפות זהרונים באזורים האסורים בדיג כפולה מבאזורים המותרים בדיג מסחרי וגבוהה פי ארבע מבאזורים שבהם מתקיים דיג ספורטיבי, בנוסף לדיג המסחרי[27]. בחופינו, דג הזהרון נצפה ב-2013 בשמורת אכזיב, וממנה התפשט למפרץ חיפה ומרכז הארץ. עתה הזהרון מצוי לכל אורך החוף מהמים הרדודים עד לעומק של 120 מטר[31]. סקרי חברות דגי שונית סלעית ב-30 שמורות טבע בים התיכון לא הצביעו על השפעת שמורות על שכיחות מיני דגים זרים[32]. בשמורות טבע לאורך החוף הדרומי של טורקיה נמצא שהביומסה של דגים אריתראים הייתה גבוהה יותר בשמורות מאשר באזורים לא מוגנים סמוכים[33]. מרבית הדגה (עושר מינים וביומסה) בשמורות טבע ימיות במזרח הים התיכון היא מינים זרים[34]. הסקרים בשמורות הטבע הימיות בחופינו מעידים על מצב דומה לגבי בעלי

חוליות ישיבים כמו הרכיכות והאיצטלניים. בשמורת הטבע ראש הנקרה-אכזיב, אשר בה מתקיימת פעילות פיקוח ואכיפה החל משנות ה- 90, תועדו ב-2004 בתי גידול המיושבים על-ידי מינים אריתראים. רצועה צפופה של צדפות בוצית פרעה *Brachidontes pharaonis* חוגרת את משטחי הסלע בתחום הכרית, והצדפות האריתראיות שדרנית קוצנית *Spondylus spinosus* וטיטית טסמנית *Chama pacifica* השתלטו על רכסי הכורכר, דגים אריתראים היוו מעל 37% מסך הפרטים שתועדו במהלך הסקרים[35]. ב-2015 רשות הטבע והגנים (רט"ג) השיקה סקרים דו-שנתיים במתווה "ביו-בליץ" של דגים וחי-קרקעית ב-4 שמורות טבע ימיות סלעיות ובאתרי ביקורת סמוכים. בסיכום 4 עונות דיגום נמצא שעושר ומגוון מיני הדגים בתוך השמורות היו גבוהים יותר מאשר באתרים שאינם מוגנים. חלק ניכר מן המינים שתועדו בארבע עונות הדיגום היו פולשים. מחקר אשר תיעד נוכחות מרחבית של חברת הדגים בשמורת ראש הנקרה-אכזיב וסביבתה מצא כי ניתוח התוצאות אינו תומך בהנחה ששמורות טבע "עמידות ביוטית", יתרה מכך, הביומסה של מינים פולשים הייתה גבוהה משמעותית בתוככי השמורה מאשר באזורים סמוכים שאינם מוגנים מדיג, ובשמורות אחרות – שקמונה, גדור והבונים – ביומסת הפולשים דומה בשמורות ומחוצה להן[36,37]. כמעט כל הצדפות שתועדו במהלך הסקרים, בתוך שמורות הטבע ומחוץ להן, זוהו כמינים פולשים[38]. חסרי החוליות שתועדו במהלך הסקרים שנערכו ב-2015, 2017, 2019, 2021, משתייכים אל הקבוצות הבאות: צורבים, חי-טחביים, קווצי עור, סרטנים, רכיכות, אצטלניים, ספוגים, תולעים טבעתיות, רב-לוחיתיים, תולעים שטוחות ותולעים סיפוניות[39]. בנספחים א2, ב2 מובאות הגדרות אצות, ספוגיים ואצטלניים, חלקן הגדול לרמת המין והסוג. אולם הנתונים לגבי שאר הקבוצות דלים ביותר (נספח 1): מהרכיכות, מחלקה משופעת במאות רבות של מינים בחופינו, זוהו רק 10 מיני צדפות ו-11 מיני חלזונות, מן הסרטנאים 7 מינים, מן הצורבים, חי-טחביים, תולעים טבעתיות – 2 מינים לקבוצה, רב-לוחיתיים מין יחיד, ממערכות קווצי העור והתולעים השטוחות ומסדרת התולעים הסיפוניות – אף לא מין יחיד. ממצאים אלה מראים ששיטת העבודה בסקרים אלה אינה מספקת את המידע הנדרש להכנת רשימת המצאי של בעלי החיים בשמורות.

ההסתפקות במקרים רבים בתיעוד האורגניזמים ברמת מערכה/מחלקה לא מספק את הידע הדרוש לתיעוד החי בשמורות ולא מאפשר הערכת עושר ומגוון המינים הילידים והזרים. כדי לנטר את השפעות פלישת המינים הזרים יש לעקוב אחרי הדינמיקה של חברות המינים לאורך זמן. היעדר מידע לגבי חלק ניכר מקבוצות החי פוגע במימוש מטרות אלה. פעילויות הפיקוח והאכיפה בשמורות הטבע חייבות להיות מבוססות ידע.

מינים זרים בשלל הדיג

דגים אריתראים הופיעו בשווקי הארץ כבר בעשורים הראשונים של המאה ה-20, בסוף שנות השישים הדגים הזרים היוו כחמישית משלל הדיג ובשנות ה-90 היוו כמחצית שלל הדיג על מדף היבשת הרדוד[40]. סקר דגה על מדף היבשת הרדוד בשנים 2010-2012 הראה שדגים זרים היוו 70% מביומסת הדגים בעומק 20 מטר ו-45% בעומק 40 מטר[41]. הסרטנים היוו כ- 99% בעומקים 20 ו-40 מטר. בניתוח שלל הדיג בשנים 1996-2013 של אחת מספינות המכמורת נמצא שאחוז הכנסות הדייגים ממינים זרים (דגים וסרטנים) כמעט והוכפל, בעוד שהכנסות ממינים ילידים פחתו. כתוצאה מכך הדייגים נטו לעבור לדיג במים רדודים[42].

צורבים ורעילים - ה"מדוזה" ועמיתיה

בין המינים האריתראים מצויים מינים ארסיים או רעילים המהווים איום על בריאות האדם. אלה כוללים מינים מבוססים שהרחיבו מאוד את התפשטותם בעשור האחרון כדוגמת הזהרון *Pterois miles* החוטית הנודדת *Rhopilema nomadica* ומינים שתועדו לאחרונה כדוגמת השפמית הארסית *Plotosus lineatus*, הלגינון המאורך *Lagocephalus sceleratus*, קיפוד-הים ארוך הקוצים *Diadema setosum*, האבנון *Synanceia verrucosa* והצורבן הנוצתי *Macrorhynchia philippina*[43].

החוטית הנודדת ידועה לשמצה משום שנחיליה מופיעים כאשר הנופש בחופים הוא בשיאו. מספר המתרחצים הנפגע מגיע לאלפים מדי שנה. צריבת המדוזה גורמת לכאב מיידי, אדמומיות, תחושת שריפה, היווצרות שלפוחיות, ובמקרים מעטים אף עלולה לגרום לתסמינים אנפילקטיים[44]. מבקר המדינה דיווח שסקר שנערך על-ידי המשרד להגנ"ס – בשנת 2013 מצא כי "הנזק השנתי שנגרם לקהל הרוחצים בים מהחוטית הנודדת נאמד בכ-21.8 מיליון ש"ח. בישראל חמש תחנות הכוח החופיות מתמודדות מדי שנה בשנה עם פינוי עשרות טונות של מדוזות שנלכדות במערכת הסינון שלהן וגורמות לפגיעה בציוד ולהאטה בייצור החשמל. ב-2011, בעקבות הגעת נחיל גדול של מדוזות לתחנת אורות רבין בחדרה, ולאחר שניסיונות פינוי המדוזות לא הספיקו, מערך השאיבה של התחנה נחסם, והתחנה נאלצה להיסגר. משנת 2016, עלות פינוי המדוזות שנאספו במערכת הקירור הראשית של כל אתרי חברת החשמל (תחנות הכוח החופיות) מסתכמת בכ-50,000 ש"ח לשנה. עוד הוסיפה החברה כי עיקר הפעילות היא בקיץ, ובשנים האחרונות נצפתה ירידה במספר ובעוצמה של נחילי המדוזות ובהתאם גם היקף הפינויים"[10]. בינואר 2024 עובדי תחנת הכוח הסמוכה לזיקים שוב פינו מדוזות ממערכות הסינון[45]. משרד מבקר המדינה אמד את הנזק למתקני ההתפלה בישראל עקב פלישת החוטית הנודדת, בהתחשב בעלויות הסינון, ולפיו הפגיעה במתקנים והירידה של 50% בתפוקת הייצור עלולה הייתה להסתכם בכ-32 מיליון ש"ח בשנה[10].

דגים ממשפחת הנפוחיתיים הם רעילים ואכילת בשרם, ובמיוחד שחלות וכבד, גורמת להרעלת טטרודוטוקסין אשר גרמה למאות קורבנות הרעלה במזרח הים התיכון[20].

השפמית הארסית נחשבת לאחד מדגי הארס הימיים המסוכנים ביותר שדקירה של קוציו עלולה לגרום למוות. פציעה מקוצי הדג גורמת לכאב, ולאחר מכן לכיחלון, חוסר תחושה ונפיחות אדמומיות, התכווצויות שרירים, התנפחות בלוטות הלימפה וחום[43]. סקר של פציעות מאורגניזמים ימיים שנערך בקרב דייגים מקצועיים ישראלים חשף ש-10% מהפציעות הקשורות לדגים נגרמו על-ידי מין זה. בהתחשב בכך שהאוכלוסייה שלו גדלה מאוד מאז דווח לראשונה ב-2001, יש לשער שמספר הפציעות הנגרמות על-ידי השפמית גדל. דקירה מקוצי הזהרון גורמת לכאב עז ונפיחות, חוסר תחושה, כאבי בטן, דופק מהיר והתעלפות[43]. עד כה דווח על מעט פגיעות מזהרונים בים התיכון, אך עם הגידול באוכלוסייתם והרחבת התפוצה שלהם מחד, ועלייה במספר הנופשים מאידך, עולה סיכונם. הצורבן הנוצתי מופיע בצבעים צפופים על מצעים קשים – הן טבעיים והן מלאכותיים. מגע בענפיו העשירים בתאים צורבים עלול לגרום לתחושת עקיצה, פריחה, שלפוחיות וגבשושיות מגרדות שיכולות להימשך ימים. העלייה בשכיחות מין זה לאורך חופי הלבנט עלולה לפגוע בפעילויות נופש כמו שחייה ושנירקול. לאחרונה הופיעה בחופינו ניזרית ארוכת קוצים – קיפוד-הים שחור קוצים המוכר לנופשים במפרץ אילת[46]. בתוך שנים מועטות גדלה אוכלוסייתו מאוד ועמה הסיכוי למפגש מכאיב. דקירתו עלולה לגרום לדלקת עקב הרעלנים שבקוצים. ככל ששכיחות המין תעלה כן יגבר הסיכון.

מדיניות ישראל באשר למינים זרים ימיים

מסמך המדיניות למרחב הימי של ישראל של מינהל התכנון פירט את השימושים והפעילויות במרחב הימי הישראלי[9] כולל הרחבה מסיבית של תשתיות ופעילויות ימיות בחופים, על מדף היבשת ובלב ים, הכוללות ספנות ושיט נופש, תשתיות (מצינורות ומתקני התפלה ועד אסדות קידוח והפקה ואיים מלאכותיים גדולים), הגנה חופית (שוברי גלים, סוללות), חקלאות ימית בקנה-מידה גדול בחופים ובמים עמוקים, הפקה ועיבוד פחמימנים, ופיתוח "ענפים כלכליים חדשים" שטרם הוגדרו. המסמך אומנם מצהיר שניצול הפוטנציאל הכלכלי במרחב הימי ייעשה תוך שמירה על המערכת האקולוגית ומשאבי הים, אך למרות שכל מעשי האדם הנזכרים לעיל משמשים מוקדי הפצה והתפשטות של מינים זרים, הן לבתי גידול טבעיים והן לבתי גידול מעשה אדם, המסמך אינו מתייחס להשפעות הפעילויות המתוכננות על מינים ימיים זרים. כך למשל, במים הכלכליים של ישראל מתקיימים מערכי חיפוש והפקת פחמימנים, אך במסמך המדיניות הדיון מוגבל להשפעות הסביבתיות של זיהום נפט ומסתפק בהתחייבות עמומה לקדם מחקר על ההשפעה של אסדות על הרכב האורגניזמים המתיישבים עליהן ועל מינים פולשים[9]. סקרים של החי המתיישב על אסדות הפקת גז הממוקמות מול חופי ישראל בעומקי מים של 200 עד 250 מטר כבר חשפו שכל הרכיכות שזוהו היו מינים אריתראים[47]. נוכחותם מאשרת שפגיות מינים אלו מצויות בלב ים, וכי האסדות הישראליות הקיימות משמשות כ"ראשי גשר" לפלישה. סקר של חי צמוד-מצע בתשתיות ימיות של תחנות כוח ובתי גידול סלעיים הסמוכים להם הראה, שמספר ואחוז הכיסוי של מינים זרים גבוה יותר על גבי מצעים מלאכותיים – צדפות בוצית פרעה כיסו כ-2/3 מפני השטח המאוכלס בתחנת הכוח רידינג, לעומת כחמישית מפני השטח במסלע הטבעי בחוף גורדון, תל אביב[48]. גם כאן ההתייחסות להשפעות על הפצת מינים זרים היא התחייבות עמומה להשתמש בעקרונות וחומרים של הנדסה אקולוגית שמגדילים את מגוון המינים המקומיים[9]. אולם העקרונות והחומרים הנדונים לא נבדקו כהלכה בתנאי החוף הישראלי.

מסמך המדיניות מתחייב לתקן את השינויים במתווה קרקעית הים וקו החוף הנובעים ממיזמי התשתיות החופיות באמצעות "הזנת חופים" (העברה מסיבית של חול) תוך קביעה שהעברת חול שהצטבר בשל הקמת תשתיות ימיות למטרת מילוי חופים פטורה מהגשת תוכנית והערכת השפעות סביבתיות. ההשפעה הברורה והישירה ביותר של מילוי חול בחוף הישראלי היא העברה וביסוס של מינים זרים.

על-פי חוק, ייעודן של שמורות הטבע הימיות בישראל הוא שמירה מפני שינויים בהרכבן הביולוגי (ראה לעיל). הסקרים בשמורות הטבע הימיות בחופינו מעידים שלא כך הדבר (ראה לעיל ההתייחסות לשמורת ראש הנקרה-אכזיב) שמורות הטבע במדף היבשת הרדוד לאורך חופינו אינן מקיימות את ייעודן הקבוע בחוק ומנוהלות למעשה כפארקים ימיים. ראוי לעדכן את הגדרתן בהתאם למציאות החדשה. יתרה מכך, על-פי חוק "ערכי טבע מוגנים" המעודכן[8] ישראל מקנה הגנה לכלל חסרי החוליות ולדגי הגרם בשמורות הים התיכון, כולל מינים פולשים ממוצא ים סופי ובכך מונעת הקמת מערך פעולות ניהול למניעת או לצמצום התבססותם של פולשים מזיקים בשמורות הטבע הימיות. עם הגילוי הראשוני של דגי הזהרון בשמורת ראש הנקרה-אכזיב המליצו מדענים לפעול להכחדתם. התמהמהות הרט"ג ואיסור מפורש על הדיג במשך שלוש שנים בפרק הזמן הקריטי להדברת הזהרון הביאה לכך שהשמורה כיום מהווה מוקד לאוכלוסייה משגשגת[49]. באיחור פורסם "היתר פגיעה" קצר מועד אשר לא מנע את תפוצת הזהרון לאורך החוף[50]. הלגינון וקיפוד-הים נזרית ארוכת קוצים נותרו ערכי טבע מוגנים בכלל המרחב הימי של ישראל אף כי שניהם מהווים סיכון לאדם

מלבד נזקיהם לחי המקומי. יתר על כן – לרשימת המינים המוגנים צורף בשנת 2022 ימון הקשקשים (*Halophila stipulacea*) – עשב-ים פולש ממוצא ים סופי שחדר לים התיכון לפני כ-150 שנים והתפשט מערבה עד טוניס ואיטליה – אשר פוגע בגלית הגדולה (*Cymodocea nodosa*), עשב-ים ילידי אשר אף הוא ברשימת "ערכי טבע מוגנים"[51,52].

מעקב אחר השפעת המינים הזרים על הדיג לאורך חופי הים התיכון של ישראל

ב-2016 נכנס לתוקף תיקון לתקנות הדיג מ-1937, שנקבע על-ידי אגף הדיג במשרד החקלאות ואושר על-ידי ועדת הכלכלה של הכנסת. מטרת התקנות היא לשפר את מצב תעשיית הדיג בישראל באמצעות ניהול בר-קיימה של משאבי הדיג. איסור דיג המכמורות בצפון הארץ והאיסור לדוג במים רדודים בשאר החופים אמור לסייע בשיקום חלקי של מדף היבשת הרדוד שהיום מאוכלס במספר רב ביותר של מינים זרים (ראה לעיל). רק ניטור ארוך טווח יאפשר בחינה האם לתקנות השפעה על הדגה ועל שכיחות המינים הזרים במים הרדודים, ומה השפעת הסטת הדיג למים עמוקים יותר. למרות מחויבות אגף הדיג במשרד החקלאות, האחראי למעקב אחר השפעות תקנות הדיג, לאסוף את נתוני הניטור המבוצע במסגרת הניטור הלאומי (ראה להלן) ולהעביר דוח מסכם אחת לשנה – לא פורסמו עדיין תוצאות הניטור[53].

מינים זרים וסיכונים לבריאות האדם

בהתחשב ברעילות הקטלנית של הלגינון (ראה לעיל), משרדי החקלאות של קפריסין, מצרים, יוון, לבנון וטורקיה אסרו על דיג ומכירה של מין זה[54]. למרות שדג זה נפוץ לאורך חופי ישראל, משרד החקלאות לא אסר על מכירת בשרו ולא הפיץ מידע על הסיכון שבאכילתו. המעמד החוקי של מין זר זה בים התיכון הוא של ערך טבע מוגן, הן בשמורות הטבע הימיות והן מחוצה להן (ראה לעיל).

חמישה עשורים ואלפי צריבות מכאיבות עברו מאז איסוף הפרט הראשון של החוטית הנודדת בחופינו ועד ששר הפנים הנחה את הרשויות שבשטחן חופי רחצה מוכרזים כי יונף דגל בצבע סגול המתריע מפני הסכנה – והאיור על גבי הדגל הינו של מין שאינו מצוי בחופינו[55].

דוח מבקר המדינה 2022 - מניעת נזקי מינים פולשים ושמירה על המגוון הביולוגי

המדיניות הנוכחית של ישראל מתעלמת מן ההשפעות של חדירת המינים הזרים והאצת התבססותם והתפשטותם לאורך חופי הים התיכון. דוח מבקר המדינה שעניינו מניעת נזקי מינים פולשים ושמירה על המגוון הביולוגי פורס כשל רב-מערכתי רב שנים[10]. במימי ישראל התבססו מאות מינים פולשים הגורמים נזקים לסביבה ולאדם, לרבות נזקים בריאותיים וכלכליים. על-פי המבקר "משרדי הממשלה וגופים אחרים הנדרשים להתמודד עם הבעיה, אינם ערוכים לכך ואינם מנהלים את הסיכונים ואת אפיקי הפעולה הנדרשים למניעת הנזקים ולצמצומם". בביקורתו בנושא הפלישה, ההתפשטות וההתבססות כותב המבקר שישראל לא אשררה את הפרוטוקול באמנת ברצלונה שמטרתו

הגנה על אזורים מוגנים במיוחד והמגוון הביולוגי בים התיכון, אשר מתייחס למינים זרים. רט"ג מסרה בתשובתה למשרד מבקר המדינה כי הסיבה העיקרית לכך שישראל לא אישרה את הפרוטוקול המעודכן היא "היעדר חוק מינים פולשים"[10]. בנוסף, "המשרד להג"ס לא ביצע תהליך של הערכת סיכונים לפלישת מינים זרים הגורמים לנזקים, לא יצר תוכנית למוכנות מוקדמת להגעתם ולא קבע מערך פעולות חירום שיכלו למנוע את התבססותם ואת התפשטותם המהירה"[10]. כמו כן קובע המבקר שחסרה אסדרה למניעת התבססות או לביעור פלישת מינים ימיים[10], אשר שינו את מרקם המערכות האקולוגיות לבלי הכר – כולל בשמורות הטבע הימיות (ראה לעיל).

ישראל אשררה את אמנת האו"ם לשמירה על המגוון הביולוגי. אחד היעדים – שמימושו נקבע ל-2020 – הוא ההתמודדות עם מינים זרים. המדינות החתומות נדרשו לתעד את המינים הפולשים בשטחן, מסלולי הפלישה ולתעדף אפיקי טיפול: פעולות לצמצום התפשטות מינים זרים, שימוש באמצעי שליטה, ומניעת חדירתם. בתגובה לדוח המבקר "מסר המשרד להגנ"ס כי הוא מקבל את ביקורת משרד מבקר המדינה בעניין ומגבש בימים אלה תוכנית פעולה לאומית לשמירה על המגוון הביולוגי שתתייחס בין היתר גם לצורך במניעת התבססות של מינים פולשים, ותכלול קביעת יעדים ומדדים להצלחה. הצפי לסיום התוכנית – דצמבר 2022."[10]. התוכנית לא פורסמה בעת כתיבת שורות אלה.

אף לא אחד מן הגופים האמונים על ניטור בתי הגידול הימיים[10] ממוקד בניטור מינים זרים. נכון למועד כתיבת הפרק, רק אחד מבין 11 המינים הזרים שתועדו לראשונה לחופי ישראל בשנת 2023 נאסף במסגרת "הניטור הלאומי בים התיכון".

המבקר מכיר בכך ש"הכרת המגוון הביולוגי ותפוצתו ברזולוציה של מינים, בתי גידול ומערכות אקולוגיות ישמשו לקבלת החלטות"[10]. המבקר מדגיש שקיים מידע רב בנושא המגוון הביולוגי והמינים הפולשים, אולם הוא מבוזר בין גופי הניטור, אינו מאוגם ואינו משמש לצורך קבלת החלטות[10]. לדעתנו, המבקר כשל כאן בהבנתו את תהליך יצירת הידע – החוקרים (טקסונומים, אקולוגים) אינם חלק אינטגרלי של צוותי גופי הניטור ולא של משרדי הממשלה וגופים אחרים הנדרשים להתמודד עם הבעיה.

יש לקוות שמשרדי הממשלה וגופים אחרים האמונים על ההתמודדות עם מינים זרים ימיים יטמיעו את המלצות המבקר. ראוי כי המשרד להגנ"ס יפעל לאורן של התחייבויות בינלאומיות ושל החלטות ממשלה וישלים במהרה את גיבוש התוכנית האסטרטגית יישומית לשמירה על המגוון הביולוגי הימי ולמניעת התבססות של מינים פולשים ימיים (ראה לעיל).

ההתמודדות עם הפלישות הימיות אינה פשוטה, שכן המרחב הימי הישראלי כבר מכיל מאות מינים זרים וקצב הגעתם גובר, אך אם ברצוננו לשמור על המינים הילידים בשל חשיבות תפקודיהם האקולוגיים, כערכי מורשת ותרבות, וכנכסים בריאותיים וכלכליים, חובתנו להתמודד עם האתגרים בהסתמך על ידע מדעי אמין ומקיף.

תודות

אנו מודים לצלמים שבי רוטמן, אורן קליין, עמרי ברונשטיין ומוטי מנדלסון על תמונות המינים הפולשים. כמו כן אנו מודים למבקרי המאמר על הערותיהם.

רשימת מקורות

1. Steinitz, W. Denkschrift zur Begrüdung einer zoologischen Meeresstation an der Küste Palästinas. 24 pp. + 2 pp. (by W. Kükenthal) + 2 pp. (by T. Krumbach). Breslau (1919).
2. Galil, B.S., Mienis, H.K., Hoffman, R. & Goren, M. Non-indigenous species along the Israeli Mediterranean coast: tally, policy, outlook. *Hydrobiologia* **848**, 2011-2029 (2021).
3. IPBES (2023). Summary for policymakers of the thematic assessment report on invasive alien species and their control of the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. Roy, H. E. et al. (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. https://doi.org/10.5281/zenodo.7430692
4. Simberloff, D. et al. Impacts of biological invasions: what's what and the way forward. *TREE* **28**, 58-66 (2013).
5. Regulation (EU) No 1143/2014 of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the prevention and management of the introduction and spread of invasive alien species, Official Journal of the European Union L317/35 (2014).
6. Carlton, J.T. Bioinvasion ecology: Assessing invasion impact and scale. In: E. Leppäkoski E, Gollasch S, Olenin S, (eds.) Invasive aquatic species of Europe. Distribution, impacts, and management. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 7–19 (2002).
7. United Nations Environment Programme, 2019. Convention for the protection of the marine environment and the coastal region of the mediterranean and its protocols. Nairobi. 160 pp.
8. רשומות. קובץ התקנות 10341 29 בספטמבר 2022 ד' תשרי התשפ"ג אכרזת גנים לאומיים, שמורות טבע, אתרים לאומיים ואתרי הנצחה (ערכי טבע מוגנים) (תיקון), עמ' 7-6. התשפ"ג-2022
9. מינהל התכנון. מסמך מדיניות למרחב הימי של ישראל–ים תיכון. מרץ 2020, 142 עמ '. (2020).
10. דוח שנתי של מבקר המדינה - מניעת נזקי מינים פולשים ושמירה על המגוון הביולוגי עמ' 1679-1858 (מאי, 2022).
11. Emery, K.O. & & Bentor Y.K. The continental shelf of Israel. State of Israel, Ministry of Development, Geological Survey **26**, 25-41 (1960).
12. Kress N., Gertman I. & Herut, B. Temporal evolution of physical and chemical characteristics of the water column in the Easternmost Levantine basin (Eastern Mediterranean Sea) from 2002 to 2010. *J. Mar. Syst.* **135**, 6-13 (2014).
13. חרות, ב. רהב, א. עורכים. תוכנית הניטור הלאומית של ישראל בים התיכון. דוח מדעי לשנת 2016. חקר ימים ואגמים לישראל H48/2017 (2017).
14. Shefer, E, Silverman, J. & Herut B. Trace metal bioaccumulation in Israeli Mediterranean coastal marine mollusks. *Quat. Int.* **390**, 44-55 (2015).

15. Shoham-Frider, E. et al. Legacy groundwater pollution as a source of mercury enrichment in marine food web, Haifa Bay, Israel. *Sci. Total Environ.* **714**, 136711 (2020).
16. Ulman, A., Tunçer, S., Tuney Kizilkaya, I., Alford, P. & Zilifli, I. Rapid lionfish expansion in Turkey, warning of impeding ecological crisis, and appeal to begin national culling exercise to control invasion. *Reg. Stud. Mar. Sci.* **36**: 101271 (2020).
17. Kleitou, P. et al. Regular monitoring and targeted removals can control lionfish in Mediterranean marine protected areas. *Aqua. Cons. Mar. Freshr. Ecosys.* 1–13, 2870–2882 (2021).
18. Huseyinoglu, M.F et al. Assisted recovery of Mediterranean native fish species by removal of two established invasive alien species, Pterois miles and Diadema setosum. Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, p.108826 (2024).
19. Kleitou, P et al. Marine protected areas can increase the abundance of invasive lionfish (Pterois miles). *Conserv. Sci. Pract.* p.e13147 (2024).
20. Ulman, A. et al. The biology and ecology of the invasive silver-cheeked toadfish (Lagocephalus sceleratus), with emphasis on the Eastern Mediterranean. *NeoBiota*, **68**, 145-175 (2021).
21. Ulman, A. et al. Assessment of human health impacts from invasive pufferfish (attacks, poisonings and fatalities) across the Eastern Mediterranean. *Biology*, **13**, 208 (2024).
22. Galil, B.S., Danovaro, R., Rothman, S.B.S., Gevili, R. & Goren, M. Invasive biota in the deep-sea Mediterranean: an emerging issue in marine conservation and management. *Biol. Invasions* **21**, 281-288 (2019).
23. Innocenti, G. Going down together: invasive host, *Charybdis longicollis* (Decapoda: Brachyura: Portunidae) and invasive parasite, *Heterosaccus dollfusi* (Cirripedia: Rhizocephala: Sacculinidae) on the upper slope off the Mediterranean coast of Israel. *Mar. Biol. Res.* **13**, 229-236 (2017).
24. Savva, I. et al. They are here to stay: the biology and ecology of lionfish (*Pterois miles*) in the Mediterranean Sea. *J. Fish Biol.* 97, 148-162 (2020).
25. Stasolla, G., Innocenti, G. & Galil, B.S. On the diet of the invasive crab *Charybdis longicollis* Leene, 1938 (Brachyura: Portunidae) in the eastern Mediterranean Sea. *Isr. J. Ecol. Evol.* **61**, 130-134 (2015).
26. Chaikin, S. & Belmaker, J. Fish depth redistributions do not allow maintenance of abundance in a region of rapid change. Oikos, p.e09650 (2023).
27. Cacabelos, E. et al. Limited effects of marine protected areas on the distribution of invasive species, despite positive effects on diversity in shallow-water marine communities. *Biol. Invasions*, ***22***, 1169-1179 (2020).

28. Cobián-Rojas, D. et al. The community diversity of two Caribbean MPAs invaded by lionfish does not support the biotic resistance hypothesis. *J. Sea Res.* **134,** 26-33 (2018).
29. Dimitriadis, C., Fournari-Konstantinidou, I., Sourbès, L., Koutsoubas, D. & Katsanevakis, S. Long term interactions of native and invasive species in a marine protected area suggest complex cascading effects challenging conservation outcomes. *Diversity* **13,** 71 (2021).
30. Ohayon, S. et al. Consistent edge effect patterns revealed using continuous surveys across an Eastern Mediterranean no-take marine protected area. *ICES J. Mar. Sci.* **80**, 1594-1605 (2023
31. https://www.parks.org.il/תושב-קבע-הזהרון-ההדור-בים-התיכון/
32. Giakoumi, S. et al. Exploring the relationships between marine protected areas and invasive fish in the world's most invaded sea. *Ecol. Appl.* 29, e01809 (2019).
33. Guidetti, P. et al. Large-scale assessment of Mediterranean marine protected areas effects on fish assemblages. *PLoS ONE* **9**, e91841 (2014).
34. D'Amen, M. & Azzurro, E. Lessepsian fish invasion in Mediterranean marine protected areas: a risk assessment under climate change scenarios. *ICES J. Mar. Sci.* **77**, 388-397 (2020).
35. Ramos-Esplá, A. A. & Valle Pérez, C. Marine Biodiversity Study of the Rosh Haniqra-Akhiv Nature Reserves (Israel) to the Establishment of a Management Plan. Regional Project for the development of marine and coastal protected areas in the Mediterranean region (MedMPA). 127 pp. (2004).
36. לצרוס, מ., פריד-לנדאו, א., יהל, ר. סקר ביולוגי (Marine Bioblitz) בשמורות טבע ימיות בים התיכון הישראלי. פרק ב מבנה חברת הדגים. דוח מסכם לסקרי 2015, 2017, 2019, 2021. 90 עמ' . (2022).
37. Frid, O., Lazarus, M., Malamud, S., Belmaker, J. & Yahel, R. Effects of marine protected areas on fish communities in a hotspot of climate change and invasion. *Mediterr. Mar. Sci.* **23**, 157-190 (2022).
38. Diga, R., Gilboa, M., Moskovich, R., Darmon, N., Amit, T., Belmaker, J. and Yahel, G. Invading bivalves replaced native Mediterranean bivalves, with little effect on the local benthic community. *Biol. Invasions* **25**,1441-1459 (2023).
39. דיגה, ר. יהל, ר. סקר שמורות הטבע הימיות בים התיכון הישראלי (Marine Bioblitz). דוח מסכם לסקרים שנערכו בשנים 2015, 2017, 2019, 2021. פרק ג' מבנה חברת הקרקעית. רשות הטבע והגנים 74 עמ' (2022).
40. Edelist, D., Sonin, O., Golani, D., Rilov, G. & Spanier, E. Spatiotemporal patterns of catch and discards of the Israeli Mediterranean trawl fishery in the early 1990s: ecological and conservation perspectives. *Sci. Mar.* **75**, 641-652 (2011).
41. Goren, M., Galil, B.S., Diamant, A., Stern, N. & Levitt- Barmats Y. Invading up the food web? Invasive fish in the southeastern Mediterranean Sea. *Mar. Biol.* **163**, 180 (2016).

42. van Rijn, I., Kiflawi, M. & Belmaker, J. Alien species stabilize local fisheries catch in a highly invaded ecosystem. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **999**, 1-10 (2019).
43. Galil, B. Poisonous and venomous: marine alien species in the Mediterranean Sea and human health. In: Mazza G. & E. Tricarico (eds) Invasive species and human health. CABI Invasive Series **10**, 1-15 (2018).
44. Glatstein, M., Adir, D., Galil, B., Scolnik, D., Rimon, A., Pivko-Levy, D. & Hoyte, C. Pediatric jellyfish envenomation in the Mediterranean Sea. *Eur. J. Emerg. Med.* **25**, 434-439 (2018).
45. https://www.israelhayom.co.il/news/environment/article/15036848
46. Bronstein, O. & Kroh, A. Needle in a haystack—genetic evidence confirms the expansion of the alien echinoid *Diadema setosum* (Echinoidea: Diadematidae) to the Mediterranean coast of Israel. *Zootaxa*, 4497, 593-599 (2018).
47. CSA Ocean Sciences. Mari-B/Tamar Production Platforms Environmental Monitoring Program Offshore Israel November 2016 Platform Survey. 1323 pp. (2018).
48. Shabtay, A., Portman, M.E. & Carmel, Y. Contributions of marine infrastructures to marine planning and protected area networking. *Aquat. Conserv.* **28**, 830-839 (2018).
49. Stern, N. & Rothman, S.B.S. Divide and conserve the simultaneously protected and invasive species. *Aquat. Conserv.: Mar. Freshw. Ecosyst.* 29, 161-162. (2019).
50. https://www.parks.org.il/wp-content/uploads/2018/06/5d19c198bc95f.pdf
51. Sghaier, Y. R., Zakhama-Sraieb, R. & Charfi-Cheikhrouha, F. "Effects of the invasive seagrass *Halophila stipulacea* on the native seagrass *Cymodocea nodosa*," in Proceedings of the Fifth Mediterranean Symposium on Marine Vegetation. Portorož (Slovenia), 167–171. (2014).
52. Mancuso, F.P., Chemello, R. & Mannino, A.M. The effects of non-indigenous macrophytes on native biodiversity: case studies from Sicily. *J. Mar. Sci. Eng.* **11**,1389. (2023).
53. החלטות ממשלה - אישור תוכנית לאומית מורחבת לניטור הים התיכון. החלטה 4399, 23.12.2018 סעיף 7. https://www.gov.il/he/departments/policies/dec4399_2018
54. Nader, M., Indary, S. & Boustany, L. The pufferfish Lagocephalus sceleratus (Gmelin, 1789) in the eastern Mediterranean. GCP/INT/041/EC – GRE – ITATD – 10, FAO EastMed, 41 pp (2012).
https://www.gov.il/he/departments/news/news-05-04-16/

33 דגי סחוס בישראל

עדי ברש[2,1], יערה גרוסמארק[3,1]

[1] עמותת כרישים בישראל, עמותה לקידום הידע והשימור של כרישים ובטאים בישראל וסביבתה.
[2] מוזיאון הטבע על שם שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב
[3] הפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים, הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל

adibarash@hotmail.com, yaaragr@hotmail.com

תקציר

דגי סחוס הם קבוצה קדומה של בעלי חוליות ימיים, הכוללת כרישים, בטאים וכימרות. שלד הסחוס שלהם מקנה להם תכונות פיזיולוגיות ייחודיות המאפשרות להם להתפתח לממדים גדולים יחסית לדגי גרם. הם ממלאים תפקידים אקולוגיים מגוונים במערכת הימית, בהם ויסות אוכלוסיות טרף, מיחזור חומרי מזון בין אזורים שונים, והשפעה על מבנה קרקעית הים. מצב השימור של דגי הסחוס מדאיג במיוחד, כאשר כשליש מהמינים בעולם נמצאים בסכנת הכחדה, ומעל 50% ממיני הים התיכון מצויים ברמות שונות של סיכון. בישראל תועדו 58 מינים, כאשר ההרכב משתנה לפי עומק, עונה ואזור. בים התיכון, אזורים רדודים מאופיינים במיני בטאים כמו מחבטן אפור וגיטרן אטלנטי, לצד כרישים חופיים כמו כריש סנפירתן וכריש עפרורי. בעומקים בינוניים ועמוקים מופיעים מינים נדירים יותר כמו תריסניות וכרישי עומק. במפרץ אילת, שבו התנאים הימיים יציבים יותר לאורך השנה, נפוצים בטאים כמו מחבטן הספירים, טחן עינוני וטריגון כנוף-זנב, לצד כרישים נדירים יותר כמו כריש טיגריסי וכריש לווייתני. מפגשי אדם ודגי סחוס בישראל מגוונים וכוללים חשיפה טבעית בטיילות חוף, תצפיות בתחנות כוח, פעילות דיג וצלילה. חלקם תורמים לשימור ולהגברת המודעות הציבורית, בעוד שאחרים מהווים גורמי סיכון לפגיעה באוכלוסיות. האיומים המרכזיים על דגי הסחוס כוללים דיג, פגיעה בבתי גידול, שינויי אקלים והשפעות אנתרופוגניות אחרות. בישראל הוגדרו על-ידי ארגון השימור העולמי (IUCN) 6 אזורים חשובים לכרישים ובטאים, חמישה בים התיכון ואחד במפרץ אילת. אזורים אלו משמשים כמוקדי מחיה, האכלה ורבייה למינים מאוימים, והגדרתם מאפשרת קידום צעדי שימור אפקטיביים.

למרות מאמצי השימור הקיימים, קיימים פערי מידע משמעותיים הדורשים המשך מחקר וניטור. פעולות לעתיד צריכות להתמקד בפיתוח תקנות לדיג בר-קיימה, מחקר על השפעות שינויי אקלים, חיזוק אכיפה והגברת החינוך הציבורי בנוגע לחשיבותם של דגי הסחוס במערכת הימית.

מבוא

דגי סחוס מייצגים קבוצה קדומה שהחלה להתפתח לפני כ-450 מיליון שנה, ומהווה אחת מהקבוצות האבולוציוניות החשובות ביותר של בעלי חוליות ימיים. הקבוצה מכילה כ-1,285 מינים, והיא נחלקת לשלוש קבוצות עיקריות: כרישים (Selachii), בטאים (Batoidea) וכימרות (Holocephali). השלד הסחוסי המאפיין את דגי הסחוס קל וגמיש יותר מהשלד הגרמי של דגי הגרם (עצם). הוא יכול להתחדש במהירות, ומאפשר גדילה לממדים גדולים מאוד. עם זאת, השלד הסחוסי פחות חזק ואינו תומך בשרירים המניעים את הסנפירים. לכן התנועה העיקרית שלהם במים מבוססת על שרירי אורך בגוף ובזנב[1,2]. כרישים ובטאים שייכים לתת-המחלקה מחוייצי זימים (Elasmobranchii) ולהם חמישה פתחי זימים חשופים (במינים מועטים קיימים שישה או שבעה פתחים) ללא מכסה זימים[3,4]. כרישים מאופיינים בדרך כלל בגוף גלילי, בעוד בטאים הם בעלי גוף שטוח המתאים לחיים בקרקעית הים. עם זאת, קיימים יוצאים מן הכלל כמו כרישי המלאך השטוחים והגיטרנים, הגליליים יחסית. ההבדל העיקרי בין שתי הקבוצות מתבסס על מיקום פתחי הזימים, כשבכרישים פתחי הזימים ממוקמים בצידי הגוף בעוד שבבטאים הם יימצאו בתחתית הגוף. הכימרות, לעומת זאת, שייכות לתת-המחלקה מכוסי זימים ולהן כיסוי זימים יחיד. בתת-המחלקה כ-60 מינים בלבד, החיים בעיקר במים עמוקים[5,6].

החשיבות האקולוגית

כרישים מאכלסים כמעט את כל בתי הגידול הימיים, ממעמקי האוקיינוסים ועד לשפכי נהרות ומים מתוקים. בניגוד לתפיסה הרווחת הרואה בהם טורפי-על השולטים במערכת האקולוגית, רוב מיני הכרישים אינם טורפי-על אלא טורפי ביניים (mesopredators), הניזונים מטרף קטן יותר ובכך משפיעים על מארג המזון בצורה שונה מכרישים גדולים הניזונים מדגים גדולים, זוחלים או יונקים ימיים[7,8].

כרישים ממלאים תפקידים רבים במערכת האקולוגית, המשתנים בהתאם לגודל הגוף, לתזונה ולשלבי ההתפתחות שלהם. כטורפים, הם מווסתים את אוכלוסיות הטרף, מונעים התרבות יתר של מינים מסוימים, ומסייעים להסרה של מחלות וטפילים מהמערכת. הם משפיעים על אוכלוסיות הטרף שלהם לא רק על-ידי טריפה ישירה אלא גם באמצעות שינוי התנהגות הטרף, כמו צמצום תנועתיות והימנעות מאזורים מסוימים, ובכך מגדילים את מגוון בתי הגידול במערכת. כרישים ובטאים הנעים בין אזורים ובין עומקים שונים תורמים להסעת נוטריינטים בין אזורי המחיה. בטאים הניזונים מהקרקע, משפיעים על קרקעית הים וגורמים הפרעה והרחפה של סדימנט, פעולה המסייעת לאיזון חומרי המזון ולתחזוקת בתי הגידול. כרישים ובטאים משנים את דפוסי התזונה שלהם לאורך חייהם, כאשר בצעירותם הם ניזונים ממזון קטן וזמין יותר, ובבגרותם הם עשויים להפוך לטורפים גדולים יותר, שינוי המשפיע על תפקידם האקולוגי ומגדיל את מגוון השפעותיהם על המערכת[7,9,10]. כרישים ובטאים מקיימים לעיתים קרובות יחסי סימביוזה עם דגים אחרים, לדוגמה, דגי הנווט הכל-ימי (*Naucrates ductor*) שוחים לעיתים קרובות בסמוך לכרישים פלאגים גדולים ונהנים מהגנה מסכנות בים הפתוח, ודגי הדבק (Echeneidae) נצמדים לגופם של כרישים באמצעות דיסקית הצמדה מיוחדת, לעיתים לתקופות ארוכות, וניזונים משאריות המזון שלהם. יחסים אלו מדגימים את התפקיד המורכב של כרישים במערכת האקולוגית הימית, לא רק כטורפים אלא גם כבית גידול למינים אחרים[10–12].

מצב השימור

שליש ממיני דגי הסחוס (32.6%) בעולם נמצאים בסכנת הכחדה בשל איומים כמו דיג יתר, זיהום ימי ואובדן בתי גידול. אחד הגורמים המרכזיים הוא דיג לוואי, שבו כרישים ובטאים נלכדים ללא כוונה במערכי דיג. בנוסף, דרישה גבוהה לסנפירי כרישים, בשר ואיברים נוספים יוצרים שוק גלובלי המגביר את הלחץ על מינים אלו[13-15]. הים התיכון, כאגן סגור המוקף באוכלוסייה אנושית צפופה, הינו אחד האזורים המאוימים ביותר עבור דגי סחוס. בים התיכון נראית ירידה דרמטית באוכלוסיות הכרישים והבטאים הנמשכת מזה כמה עשורים ומציבה מעל חצי מהמינים בסיכון (53%)[16–20]. בים סוף, שבו קיימים איומים דומים כמו לחץ דיג גבוה, זיהום ושינויי אקלים, לא נערכו הערכות סיכון מקומיות למצב דגי הסחוס. עם זאת, 78% מהמינים הידועים ממנו מוגדרים בסיכון על-פי ההערכות העולמיות.

רבייה בדגי סחוס

בכל דגי הסחוס מתקיימת רבייה פנימית, כלומר הביציות מופרות בתוך מערכת המין בגוף הנקבה. הרבייה הפנימית מתחלקת לרבייה אוויפרית (oviparous) שבה מוטלות ביצים והצאצאים בוקעים מחוץ לגוף האם, רבייה אובוויויפרית (ovoviviparous) שבה מתפתחים העוברים בתוך גוף האם ללא חיבור לגוף האם (מהווה מחסה בלבד) ורבייה ויויפארית (viviparous) שבה העוברים מחוברים עם שליה לגוף האם וניזונים ממנה.

מיני דגי הסחוס בחופי ישראל

בישראל עד לעשור האחרון לא היה מחקר מוכוון דגי סחוס. הידע הקיים היה מצומצם והתבסס על נתוני דיג בעיקר ועל תצפיות ודיגומים מקריים. בסיס המידע העיקרי נבע מפרויקט הניטור הלאומי בדיג מכמורת בים התיכון[21]. פרויקט מדע אזרחי של איסוף תצפיות דגי סחוס פועל מאז 2014, בהובלת עמותת כרישים בישראל, ומוסיף על הידע הקיים נתוני עונתיות, פיזור מרחבי ומידע התנהגותי / רבייתי. בים התיכון הישראלי נאספו עד היום כ-7000 תצפיות השייכות ל34 מינים, ומאילת מעל 3000 תצפיות המתעדות גם כן 34 מינים (MECO project, unpublished data).

הים התיכון

מתוך 80 מיני דגי סחוס הידועים בים התיכון כולו, בחופי ישראל תועדו עד היום 58 מינים סך הכל[22]. בעשור האחרון, שבו גבר מאמץ המחקר המקומי, תועדו כ-34 מינים בלבד מהמים הישראליים. כיוון שלא קיים ידע היסטורי כמותי על המינים השונים אין דרך לדעת מנין הפער נובע. ייתכן שמדובר במינים עמוקים או נדירים באופן טבעי ו/או ייתכן שחלק מהמינים כבר אינם מופיעים בחופינו.

הרכב דגי הסחוס משתנה לאורך החוף הישראלי (מדרום לצפון), על פני גרדיאנט עומקים ובדפוס עונתי. בחופים הדרומיים שבהם מדף היבשת רחב ומכוסה ברובו בחול קוורצי דק שמקורו מדלתת הנילוס[23] נצפים יותר מינים שוכני חול כמו טריגוני שוט (הסוג *Himantura*) וגיטרנים. בחופים הסלעיים של רכסי הכורכר, מופיעים מגוון טריגונים וברצועת החוף הצפונית המאופיינת במדף יבשת צר חול גס וביוגני[23], שכיחות המינים שוכני החול קטנה, ושכיחות

המינים השוחים בגוף המים כמו טחן פר ואברתן רחב שן גדלה. את הרכב המינים לאורך גרדיאנט עומק ניתן לחלק לאזור רדוד עד 50 מטרים עומק, עומק ביניים של 50 עד 250 מטרים ולאזור העמוק מ-250 מטרים[24]. כמו כן, קיימת עונתיות בפיזור במרחב ובהתנהגות הרבייה של דגי הסחוס[25].
באזור הרדוד (0-30 מ') של הים התיכון הישראלי מצויים 12 מינים של בטאים ומספר כרישים חופיים:

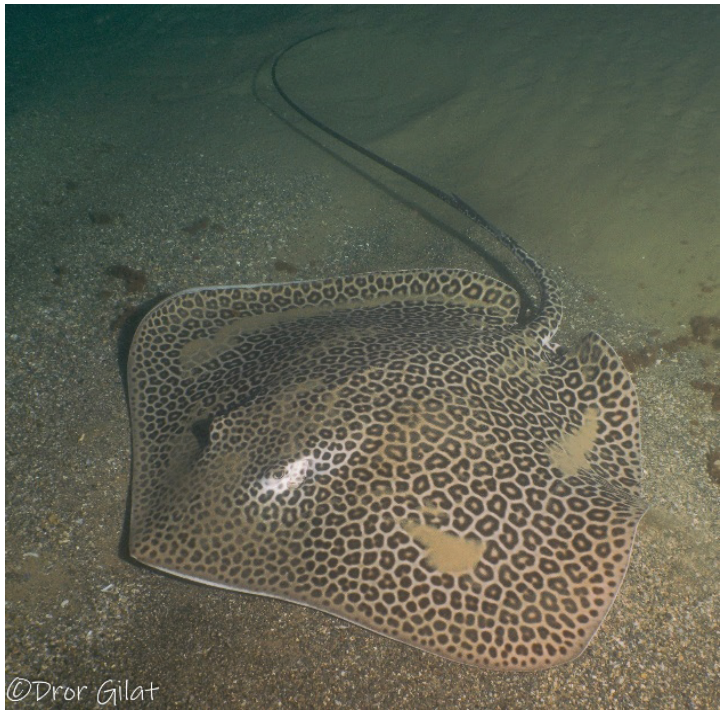
בטאים

1. **מחבטן אפור** (*Taeniurops grabatus*) – מין גדול שרוחבו (רוחב הדיסק) מעל מטר בבגרות. מוגדר בעולם ובים התיכון כמין החסר במידע[26], אך בישראל הוא אחד הבטאים הנפוצים ביותר, במיוחד מחיפה וצפונה, והוא נצפה באופן רציף לאורך כל השנה. (איור 1) תצפיות מלמדות על נוכחות של נקבות בהיריון ועל מחבטנים צעירים הנצפים במים ברדודים של שמורת אכזיב בצפון. בחיפה ובאכזיב נצפו התקבצויות של פרטים רבים של המין באביב.

איור 1. עשרות פרטים של מחבטן אפור בתנועה בחוף בת גלים, חיפה. צילום: אורן רוזנר.

2. **גיטרן אטלנטי** (*Glaucostegus cemiculus*) – מין גדול, אורכו המקסימלי שני מטרים. המין מוגדר כמין בסכנת הכחדה חמורה[26] אך הוא נפוץ במים הרדודים של חופי ישראל. הצעירים מושרצים בחופים בסוף הקיץ וניתן לראות אותם בהליכה על החוף באזורים החוליים במהלך הסתיו.

3. **גיטרן מובהק** (*Rhinobatos rhinobatos*) – דומה לגיטרן האטלנטי אך קטן ממנו. מוגדר בסכנת הכחדה[26] ונצפה בארץ במספרים נמוכים יחסית לגיטרן האטלנטי. באזור חוף פלמחים נצפים גם צעירים מהמין, אך אינם מגיעים למי אפסיים כמו הגיטרן האטלנטי.
4. **טריגון נקוד** (*Himantura uarnak*) **וטריגון נמרי** (*Himantura leoparda*) (איור 2) – שני מינים של טריגוני שוט שהיגרו מים סוף והתבססו בים התיכון[27,28]. מינים אלו יכולים לסבול טווח מליחות רחב ולהימצא גם בשפכי נהרות. הם גדולים מאוד, כמטר וחצי רוחב לבוגר, ובעלי זנבות ארוכים ומרשימים. שני המינים נבדלים בדוגמת הנקודות השחורות על עורם: חברברות בטריגון הנמרי לעומת פיזור נקודות אחיד בטריגון הנקוד. טריגונים אלו נצפים ביחידים לאורך כל השנה ובחורף עשרות מתקבצים במים החמים של תחנות הכוח.



איור 2. טריגון נמרי. אחד משני מינים של טריגוני שוט שהיגרו לים התיכון. צילום: דרור גילת.

טריגון חד-אף (*Dasyatis pastinaca*) (איור 3) **וטריגון אטלנטי** (*Dasyatis marmorata*) – מהבטאים הנפוצים ביותר בחופי ישראל. טריגונים קטנים יחסית, כחצי מטר רוחב. לטריגון חד-האף כתמים צהובים סביב העיניים בעוד לטריגון האטלנטי כתמים כחולים בצידו העליון. טריגונים אלו מתקבצים במספרים גדולים באביב, בעונת הרבייה ונצפים חיזורים, הזדווגויות ונקבות הריוניות. הזכרים מגיעים לאזור ההתקבצות לפני הנקבות, ועם התקדמות העונה נצפות נקבות בשלבי היריון מתקדמים יותר. בסתיו נצפים הצעירים.

איור 3. טריגונים חדי אף זכרים בחיזור סביב נקבה. צילום: אורן קידרון.

1. **טחן פר** (*Aetomylaeus bovinus*) – הינו מין של "עטלף-ים", שוחה בגוף המים וניזון מהקרקעית. צידו העליון כהה, בעל פסים תכולים לרוחב. הוא נצפה מהאביב עד הסתיו, לעיתים בקבוצות של עד 15 פרטים. המין מוגדר בעולם כחסר במידע, ובים התיכון כמין הנמצא בסכנת הכחדה חמורה[26].
2. **אברתן רחב-שן** (*Rhinoptera marginata*) – מין השוחה בגוף המים ומוגדר בסכנת הכחדה קריטית[26]. המין הנצפה רק בחציו המזרחי של הים התיכון לעיתים בלהקות גדולות של מאות פרטים. בישראל נצפה בעיקר בעונת הסתיו באתרים הצפוניים.
3. **אגפית משושת** (*Gymnura altavela*) – מין של טריגון גדול המזכיר בצורתו פרפר. מין זה נמצא בסכנת הכחדה חמורה בים התיכון[26], אולם בשמורת אכזיב נחשב למין יחסית נפוץ מבין דגי הסחוס. נצפה מאזור מכמורת וצפונה לאורך כל השנה ובקבוצות גדולות של כמה עשרות פרטים בעונת הסתיו.
4. **חשמלן עינוני** (*Torpedo torpedo*) **וחשמלן משויש** (*Torpedo marmorata*) – שני מינים קטנים בעלי יכולת לייצר זרם חשמלי להגנה ולציד. לחשמלן העינוני עיגולים כחולים על צידו העליון (חמישה או פחות) ולמשויש דוגמת שיש כהה. מופיעים בעיקר במים רדודים חוליים ונצפים לעיתים נדירות יחסית בעיקר בחודשי החורף.

כרישים

1. **כריש סנפירתן** (*Carcharhinus plumbeus*) – אחד ממיני הכרישים הנפוצים ביותר לחופי הים התיכון. בישראל נצפים במים עמוקים יותר (מעל 50 מטרים) בעונות הקיץ ובעונות המעבר נצפים במים רדודים. כמה עשרות כרישים מהמין מתקבצים כל שנה במים החמים של תחנות הכוח החופיות.
2. **כריש עפרורי** (*Carcharhinus obscurus*) – מין גדול המגיע לאורך של 3.5 מטרים. המין נדיר בים התיכון ונצפה כמעט רק בישראל. מחקרים גנטים מראים כי ייתכן כי פרטים מהמין עברו מים סוף והצטרפו וכלוסייה המקומית (פלישה קריפטית שבה פרטים מאזור אחר מהגרים לאזור שבו קיים אותו המין). פרטים ממין זה נצפים בעיקר במים החמים של תחנות הכוח[29,30]. ראו פרק שיינין וחובריו בספר.
3. בעבר הלא רחוק להקות **פטישן תמים חרטום** (*Sphyrna zygaena*) היו נצפות במימי ישראל, בעיקר בסמיכות למים החמים בתחנות הכוח. בעשור האחרון נעלמו להקות הפטישנים, תופעה המתרחשת בים התיכון כולו, ומאז 2013 מתועדות תצפיות בודדות של פטישנים יחידים.

לעומת המים הרדודים שבהם החל להתבסס הידע על מיני דגי הסחוס, במים העמוקים המידע אנקדוטלי יותר ומבוסס נתוני דיג. בעומקי הביניים בין 50 ל-250 מטרים המינים הנפוצים בשלל הדיג הם מיני תריסניות (תריסנית קוצנית *Raja clavata* ותריסנית ספירים *Raja miraletus*). תריסניות הן בטאים מטילי ביצים (לעומת שאר הבטאים שמשריצים צאצאים). בישראל תריסנית הספירים מדווחת מעומק 30 ועד ל200 מטרים לערך, ותריסנית קוצנית החל מ-50 מטרים[24].

בעומק הגדול מ-250 מטרים חיים רוב מיני הכרישים. בעומקים האלו מול חופי ישראל בולטים מינים כמו קוצנים (מהסוגים *Squalus* ו-*Centrophorus*), גלדן שחור פה (*Galeus melastomus*), תריסנית קוצנית ותריסנית חוטמנית (*Dipturus oxyrinchus*) וקיימים מינים דרמסלים נוספים[21].

במינים השוחים בגוף המים, מצויים מספר מינים של כרישים גדולים, ביניהם הכריש העפרורי וכריש סנפירתן ובולטים וגם פרטים צעירים של העמלץ הכחול (*Isurus oxyrinchus*) שנתפסים במערכי קרסים בחודשי האביב. מין זה מוגדר בסיכון קריטי בים התיכון, והינו טורף על חשוב במערכת הימית. בנוסף מתועד טריגון כד-האף (*Pteroplatytrygon violacea*) השוחה בגוף המים ללא זיקה לקרקעית.

מפרץ אילת

מפרץ אילת הוא אגן חצי סגור ועמוק. אזור החוף הישראלי בו קצר מאוד, מדף היבשת צר ברובו ומדרון ההעמקה תלול מאוד. בין החוף הדרומי לחוף הצפוני באילת יש הבדלים משמעותים כשבעוד החוף הדרומי מאופיין בשוניות אלמוגים, החוף הצפוני חולי ברובו, והאזור הרדוד רחב יותר. השינוי בטמפרטורת המים בין החורף לקיץ מתבטא רק בכ-10 מעלות[31].

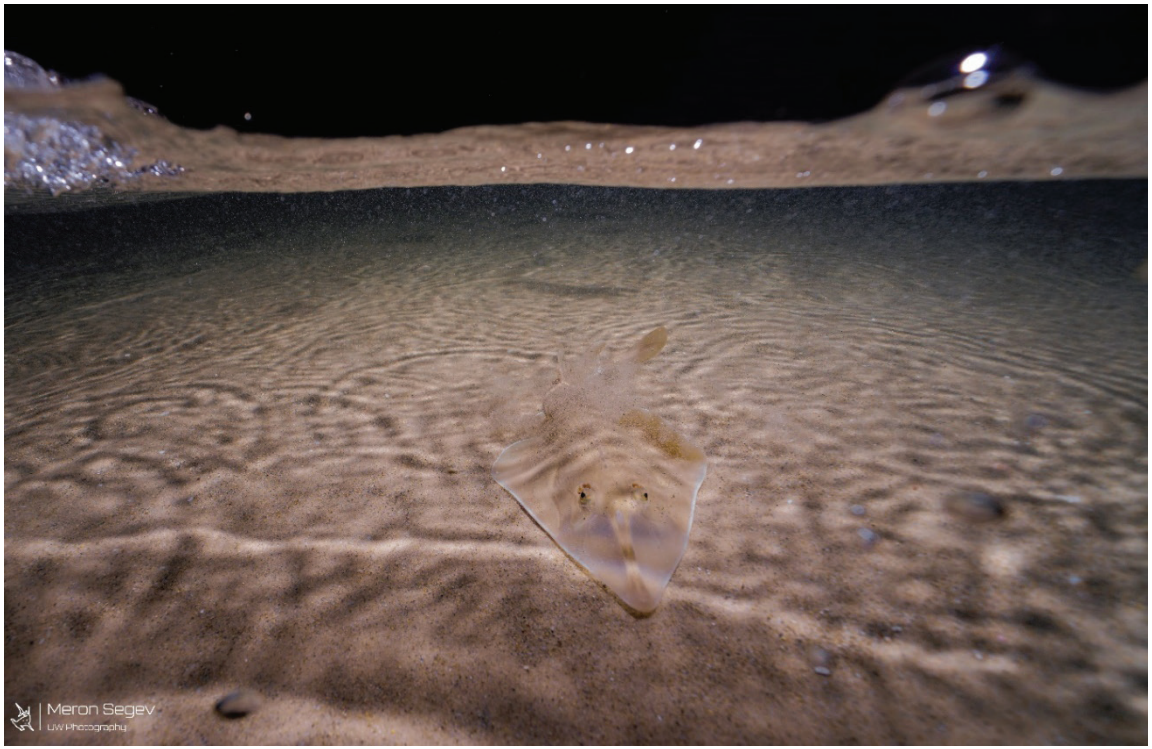
מיעוט של מחקרים בים סוף ובמפרץ אילת הביא לכך שהידע על דגי הסחוס מצומצם מאוד. פרויקט התצפיות של עמותת כרישים בישראל פועל בים סוף תחת השם RedECO מאז 2018 ובשבע השנים האחרונות שבהן נאספו תצפיות

מאילת, נוספו 15 מינים לרשימה שכללה 19 מינים בלבד[32]. ייתכן שמינים ותיקים לא זכו לתיעוד עד היום וקיימת גם האפשרות ששינויים סביבתיים הביאו למפרץ מינים שלא היו נפוצים בו קודם.

מיני הבטאים הנפוצים במים הרדודים באילת הם מחבטן הספירים (*Taeniura lymma*), טחן עינוני (*Aetobatus ocellatus*), חשמלן מנומר (*Torpedo panthera*) טריגוני שוט – נקוד ונמרי וטריגון כנוף-זנב (*Pastinachus sephen*). לחלק מהמינים לא קיים שם רישמי בעברית כיוון שלא היו מוכרים בעבר, כמו טריגון מנגרובים (*Urogymnus granulatus*), טריגון ורוד (*Pateobatis fai*) וטריגון מגובשש (*Bathytoshia lata*). המינים הנדירים שנצפו בעשור האחרון במים הרדודים כוללים שני מינים של כינורנים (*Rhynchobatus* sp.), חשמלנית בן-טוביה, (*Heteronarce bentuviai*), מין אנדמי למפרץ אילת שלא נצפה מאז שנות ה-80, מנטת ענק (*Mobula birostris*), מחבטן עגול (*Taeniurops meyeni*) ועוד. בעמודת המים מעל המים העמוקים נתפסים כשלל לוואי באילת מיני כרישים שונים כמו כריש טיגריסי (*Galeocerdo cuvier*), כריש ארך-גף (*Carcharhinus longimanus*), וכריש סנפירתן. במים העמוקים נתפסים בעיקר יאגו המצולות (*Iago omanensis*) וגיטרן נקוד (*Rhinobatos punctifer*). הכריש העיקרי שבו נפגשים שחיינים וצוללים הוא הכריש הלווייתני (*Rhincodon typus*). לכריש זה נקודות ופסים לבנים המאפשרים זיהוי פרט, וכך ניתן ללמוד על התנהגות ונדידה של פרטים. נמצא כי הכרישים הלווייתניים מגיעים למפרץ למספר ימים ומתחלפים בפרטים אחרים (RedECO project, unpublished data).

התנהגות ותופעות מיוחדות

עונת הרבייה – בסוף עונת האביב נצפית בים התיכון עונת הרבייה של הבטאים. מינים שונים מתקבצים בנקודות נבחרות במים לאורך החוף. בחודשים מרץ עד יוני נצפים זכרים ונקבות, כולל נקבות הריוניות, בהתקבצויות המונות עשרות רבות של פרטים. בנקבות קל לראות נפיחות גדולה במרכז הגוף המצביעה על הריונות בשלבים שונים, ואף נצפים אירועי חיזור רבים שבהם מספר זכרים מקיפים נקבה וסימני נשיכות רבים על גוף הנקבות (ולעיתים גם זכרים). המינים הבולטים בהתקבצויות הרבייה הם הטריגון חד-האף, הטריגון האטלנטי, מחבטן אפור, ושני מיני הגיטרנים המופיעים מאוחר יותר בעונה בחודש יוני[25,33,34]. בסקרים שנעשו בשמורת הטבע גדור התגלה כי הזכרים של הטריגון חד-האף מופיעים ראשונים באזור ההתקבצות, לאחר מכן מופיעות הנקבות ולבסוף נצפות נקבות בשלבי הריון מתקדמים. הזכרים הולכים ונהיים תנועתיים יותר ככל שמתקדמת העונה[25] ולקראת סופה מפגינים התנהגות טריטוריאלית ואגריסיבית כלפי טריגונים אחרים וכלפי צוללים. טריגון זכר ישחה במהירות לכיוון צולל כנראה בניסיון כנראה להרחיק אותו מהאזור. בסתיו נצפית עונת התקבצות נוספת, ובה נצפים יותר פרטים צעירים מהמינים השונים (MECO project, unpublished data), אך על התקבצויות אלו קיים פחות מידע.



איור 4. גיטרן אטלנטי צעיר במי אפסיים בחוף נחל דליה. צילום: מירון שגב.

אזור אומנה לגיטרן האטלנטי – גיטרנים משריצים ולדות חיים (ovoviviparous) המתפתחים בגוף האם בתזונה משק חלבון בתחילה ומנוזלים רחמיים בסוף ההיריון. בקיץ מגיעות נקבות הגיטרן האטלנטי לקרבת החוף, משריצות את הצאצאים ובימים האחרונים של חודש אוגוסט מתחילים לראות גיטרנים צעירים (כ-30-25 ס"מ בהשרצה) שוחים במי האפסיים בחופים (איור 4). במהלך החודשים לאחר מכן (ספטמבר עד תחילת נובמבר) גיטרנים צעירים מופיעים במי האפסיים ואף מחוץ למים, על החול הרטוב. לאחר נובמבר לא ניתן יותר לראות גיטרנים מחוץ למים, כנראה שהם מעמיקים מעט, אך נשארים באזור החוף, ייתכן שלכל אורך שנתם הראשונה[35]. על-פי מחקר שנעשה בחוף מעגן מיכאל, שבו נתפסו גיטרנים בחוף לשם מדידה ותיוג, ניתן לראות שאורך הגיטרנים גדל במהלך השנה עד הקיץ. עם זאת, לאחר תחילת ההשרצות לא נצפו גיטרנים גדולים מההשרצות של השנה הקודמת ולכן סביר להניח שהם עוזבים את החוף הרדוד[36,37]. הגיטרן האטלנטי הינו מין בסכנת הכחדה קריטית ואזורי אומנה הינם כלי חשוב בהגנה על המין. בנוסף, תופעת היציאה מהמים של הגיטרנים הקטנים לא תועדה בשום מקום בעולם מלבד ישראל.

התקבצות בתחנת הכוח – תחנות הכוח החופיות בישראל משתמשות במי הים לקירור טורבינות החשמל ושופכות את המים חזרה לים חמים בכ-8 מעלות מעל טמפרטורת הים. אזור חמים זה מושך אליו מיני דגים במהלך החורף כשמי הים יורדים מתחת ל-20 מעלות. לתחנות באשקלון ובחדרה מגיעים עשרות כרישים עפרוריים וסנפירתנים ועשרות טריגוני

שוט, ואף ניצפו גיטרנים צעירים במי התחנות[38,39]. לאזור תחנת הכוח באשדוד מגיעים עשרות סנפירתנים למספר שבועות בודדים באביב (MECO project, unpublished data).

מרבדי ההטלה של גילדן שחור פה – מול חוף פלמחים, בעומק הים, נמצאה גלישה קרקעית המכונה גלישת פלמחים. באזור זה, בעומק של כאלף מטרים, נמצאו בריכות מלח גדולות, והתגלו מרבדים הבנויים שכבות על גבי שכבות מביצי גלדן שחור פה (מין זה מטיל ביצים). עומק השכבות המגיע לכמה עשרות ס"מ ושלבי ההתפתחות השונים של ביצים שנאספו מהאתר שבהם ביצים חיות עם עוברים ומעטפות ביצים ריקות, מעידים על כך שהאזור משמש באופן קבוע וחזרתי כאזור הטלה למין זה. בנוסף, נמצא כי כרישי הטריזן הצניני (*Oxynotus centrina*) שוחים באזור ההטלה וכנראה ניזונים מהביצים, הידועות כמקור מזון למין זה[40,41].

החוף הצפוני באילת – החוף הצפוני באילת מהווה בית גידול משמעותי למינים שונים של בטאים. זהו החוף היחיד באילת (והיחיד הידוע מים סוף) שבו נצפים בטאים באופן יומיומי. ייתכן שהחוף משמש כאזור אומנה רב-מיני שכן נצפים בו צעירים ממינים שונים כמו הטריגון הנקוד, טחן עינוני וטריגון כנוף זנב[42]. בנוסף נצפו בו אף פרטים צעירים של מינים נדירים ובסיכון גבוה כמו כינורנים (*Rhynchobatus* sp.), ומנטה ענק (תצפית ייחודית של מנטה צעירה (*Mobula birostris*) מים סוף)[43]. במערב החוף הצפוני באילת, דווחו במשך מספר שנים התקבצויות של טריגונים גדולים במי אפסיים. בחוף זה נצפות בקיץ להקות ענק של דגים זעירים המושכות אליהן מגוון טורפים וביניהם טריגוני שוט גדולים. ניתן לראות מהחוף עשרות טריגונים נקודים, טריגונים נמריים ואף טריגונים ורודים[44].

מפגשי אדם ודגי סחוס בישראל

מפגשי אדם-חיית בר (Human-wildlife interaction) הינם אירועים של נקודות השקה בין אנשים לחיות-בר שבהן האדם מושפע מנוכחות חיית הבר[45]. מפגשים אלו נעים על מנעד רחב בין מפגשים שליליים המובילים לפחד ורתיעה מחיות בר למפגשים חיוביים המעוררים פליאה וקרבה לטבע[46]. נושא מפגשי אדם-חיית בר בים סובל ממחסור במידע יחסית לנושא ביבשה, אך עם זאת כרישים ובטאים הינם בין חיות הבר הימיות המעוררות הכי הרבה עניין בציבור[9]. מצד אחד דגי סחוס ובעיקר כרישים מעוררים פחד אצל אנשים רבים ומצד שני תיירות כרישים ברחבי העולם הולכת וגדלה עם השנים ומכניסה מיליוני דולרים בתיירות מוכוונת דגי סחוס[47]. ומקור הידע של הציבור הרחב עליהם הוא ערוצי התקשורת ובעיקר סרטים כמו "מלתעות" וסרטי טבע המציגים אותם, ובעיקר את הכרישים, כבע"ח מסוכנים. עם זאת, דגי סחוס, שאינם כשרים למאכל, אינם שכיחים בישראל כדגי מאכל בקרב מרבית הציבור. עובדה זאת הקלה על הכנסת כל הכרישים והבטאים לרשימת ערכי הטבע המוגנים ב-2005 ועם זאת בישראל דגי סחוס אינם נחשבים למשאב תיירותי ותרבותי. מפגשי אדם-דג סחוס חיוביים הם הזדמנות לייצר חוויות חיוביות בנוגע לדגים אלו ולעודד שמירה עליהם. מפגשי אדם-דג סחוס בישראל הם מגוונים וכוללים בתוכם קבוצות שונות של הציבור, החל מדייגים וצוללים ועד לתיירי חוף שכמעט ואינם מכירים את העולם התת-ימי. המגוון הרחב של מפגשים בלתי אמצעיים אלו פותח פתח לפעולות שימור והסברה נרחבים. בחלק זה של הפרק נסקור את מפגשי אדם-דג סחוס ואת ההשפעות האפשריות וההזדמנויות שמפגשים אלו כוללים בתוכם.

חוות דגים בים פתוח: חוות הדגים הראשונה שהוקמה בישראל הוקמה בחוף הצפוני של אילת, אולם לאחר מאבק

ציבורי נרחב כלובי הדגים הוצאו מהמפרץ והוחלט שלא לקיים פעילות של חקלאות ימית בשטח מפרץ אילת בגלל הרגישות הסביבתית הגדולה של השטח. בתקופת פעילות כלובי הדגים באילת נצפתה נוכחות כרישים באזור אך לא היה מחקר על נוכחותם בקרבת הכלובים.

מאז הקמת כלובי דגים בים הפתוח מול חופי אשדוד ב-2006, בעיקר לגידול דגי ספרוס זהוב (דניס *Sparus aurata*), דווח על נוכחות קבועה של כרישים באזור זה. הנוכחות הייתה בולטת במיוחד בקיץ, כאשר כרישים, בעיקר כרישי סנפירתן, התאספו בסמוך לכלובים (איור 5). כרישים פצועים או בעלי כושר תחרותי נמוך נצפו באזורי הכלובים לאורך שנים, מה שמעיד על תלות הולכת וגדלה במזון המסופק על-ידי האדם[48]. על-פי עדויות עובדים בחוות לעיתים היו הכרישים נכנסים לתוך כלוב הדגים ומציגים סממני עקה ואם הם לא הוצאו הם נמצאו לאחר מספר ימים מתים בתוך הכלוב. שימוש בפרקטיקה להוצאת כרישים מהכלוב על-ידי הפיכתם והכנסתם למצב שיתוק טונוס (tonic immobility) הוביל בשנת 2013 לתאונה שבה נפגע עובד בידו בצורה קשה מנשיכת כריש[49].

חוות הדגים מול אשדוד נסגרה סופית ב-2023 וב-2025 הוחלט על סגירת חוות דגים בים הפתוח "לב-ים", שהייתה ממוקמת כ-3 ק"מ מול מכמורת. עם זאת, על-פי מסמך המדיניות למרחב הימי של ישראל החקלאות של חוות דגים בים פתוח הם בעלי פוטנציאל כלכלי כחלק מהראייה של כלכלה כחולה[50] ומשרד החקלאות ביחד עם מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית אף יצר תוכנית-אב לחקלאות ימית[51]. אולם באף אחת מתוכניות אלו לא התייחסו לסיכונים הקיימים ולמשיכה של כרישים לחוות הדגים ולצורך במחקר ובבניית נוהלי עבודה ביחס לכרישים ומינים טורפים נוספים המגיעים לכלובי הדגים.

איור 5. כריש סנפירתן בכלובי הדגים באשדוד. צילום: חגי נתיב תחנת מוריס קאהן לחקר הים, אוניברסיטת חיפה.

דיג מסחרי: דיג נחשב לאחת הסיבות העיקריות לירידה באוכלוסיות של דגי סחוס בעולם. למרות שבמקרים רבים דגי הסחוס אינם מיני המטרה, פרטים רבים נלכדים כשלל לוואי ולא מוחזרים לים. בשנים האחרונות מספר רב של מינים הוכנס לרשימות הגנה של מועצות דיג אזוריות (RFMOs - Regional fisheries management organisations) ואמנות שונות כמו CITES ו-CMS אולם ייקח זמן עד שמהלכים אלו יקבלו ביטוי בשטח[13]. בישראל כל דגי הסחוס מוגנים על-פי חוק משנת 2005, אך האכיפה המלאה של החוק החלה רק בשנת 2013 [37]. לפני כניסת החוק והאכיפה מרבית דגי הסחוס שנדוגו בישראל היו מיוצאים לעזה ולשטחים מכיוון שדגי סחוס אינם כשרים והשוק המקומי קטן ולא רווחי[52]. מכיוון שדגי סחוס לא נחשבו למין מטרה בדיג מסחרי והם אינם כשרים למאכל הם הופיעו בדוחות הדיג תחת קטגוריה אחת (טרף) או שחולקו לקבוצות טקסונומיות גדולות (כרישים, בטאים, גיטרנים). בשנים האחרונות בעקבות פעילות אכיפה משמעותית דיג דגי הסחוס ירד, אך מכיוון שאין חובת דיווח על תפיסות שלל לוואי אין מידע על היקף לכידה לא מכוונת של דגי סחוס ואין מידע על היקף הדיג לא חוקי של דגי סחוס בישראל[52].

דיג ספורטיבי: דיג ספורטיבי הוא דיג למטרות ספורט ופנאי ומבוצע בדרך כלל באמצעות חכה, או בצלילה חופשית ורובה דיג. בישראל מעל ל-70,000 דייגים ספורטיביים[53,54]. גם בדיג ספורטיבי הדייג מחויב לשחרר את דג הסחוס במקרה של תפיסה. בפרויקט התצפיות של עמותת כרישים בישראל אוספים תצפיות גם מדייגי חכות ודייגי צלילה חופשית. הדיווחים נאספים מקבוצת פייסבוק יעודית ואו בתקשורת אישית מול הדייג. עם זאת, כמות הדיווחים מדייגים מוגבלת עקב חוסר רצון לדווח ברשת חברתית בגלל תגובות לא נעימות או פחד שהדיווח יועבר לרשויות האכיפה. לדוגמה, בשנת 2022 מתוך 986 דיווחים, רק כ-27 דיווחים התקבלו מדייגי חכות חופיים, 11 דיווחים מדייגי חכות מסירה או קיאק ו-13 דיווחים מדייגי רובה בצלילה חופשית.

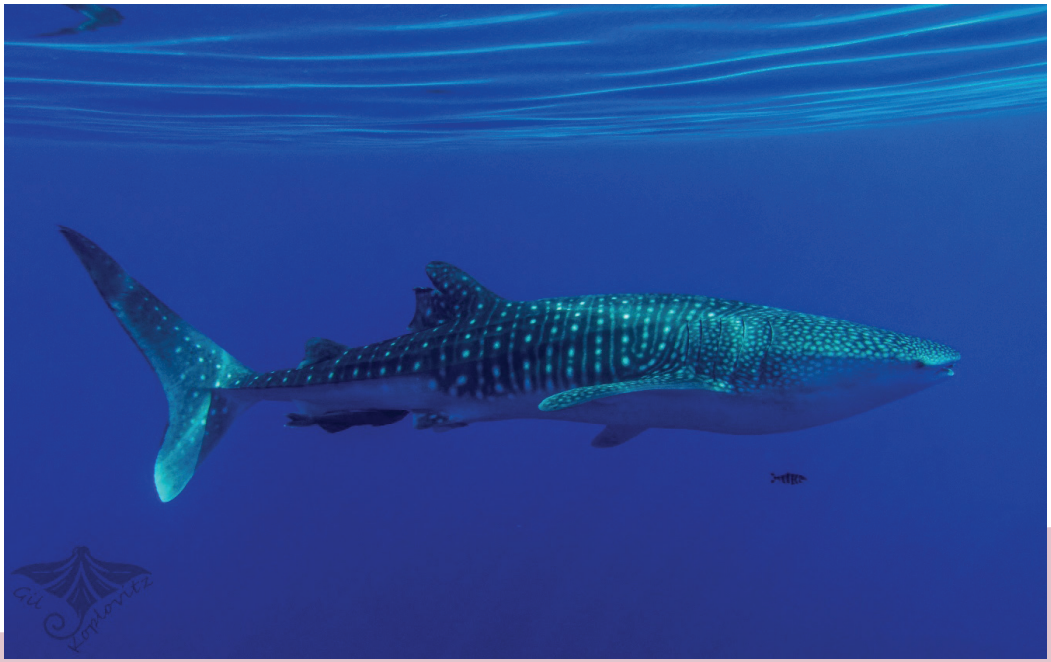
צלילה, שנירקול ושחייה: צלילת מכלים או צלילה חופשית, שנירקול ושחייה בים פתוח הן פעילויות ספורט ימי המאפשרות לצפות בחי מתחת לים. בשנים האחרונות החשיפה וההיכרות של ספורטאי הים לדגי סחוס הולכת וגדלה, ואתרי צלילה, שנירקול ושחייה לצפייה בדגי סחוס כמו שמורת גדור[25] פארק נחל חדרה[38,55] וגן לאומי פלמחים [37] הופכים למוקדי עניין מקומיים. על אף הפופולאריות של תיירות כרישים ודגי סחוס[47], הפוטנציאל של אתרים אלו להפוך למוקדי משיכה לתיירות נכנסת אינו ממומש. יתרה על כך, באילת שבה תיירות הצלילה נחשבת לענף כלכלי בעיר[56], החוף הצפוני שבו נצפים מרבית דגי הסחוס אינו מתוייר באופן תדיר בהשוואה לאתרי הצלילה הדרומיים בעיר[42] והשחייה בו אף מסוכנת עקב תנועת סירות ערה בקרבת החוף.

טיילות חוף: ישנם מעט מאוד מקומות בעולם שבהם ניתן לראות דגי סחוס מהחוף ללא כניסה למים (לא אקווריום). בישראל מתקיימות מספר תופעות ייחודיות המאפשרות מפגש כמעט בלתי אמצעי עם דגי סחוס ותוארו מוקדם יותר בפרק. העיקריות בהן, שלא תוארו משום מקום אחר בעולם, כמו עליית גיטרנים וטריגונים לחוף והתקבצות הכרישים בקרבת תחנות הכוח בישראל.

תופעות אלו מאפשרות לציבור הרחב, שאינו משתמש ים קבוע (כלומר אינו שייך לאחת מקבוצות העניין כמו צוללנים, שחיינים, דייגים וכו') להיחשף לדגים אלו בטיול על החוף, וללמוד מקרוב עליהם ועל קרוביהם[33,34]. בניגוד לאזורי האמנה של הגיטרנים בחופים, התקבצות הכרישים בחדרה אינה תופעה טבעית והיא נובעת מפעילות האדם – הזרמת המים החמים מתחנות הכוח החופיות[38]. בישראל שלוש תחנות כוח חופיות שבהן התופעה מתרחשת. עם זאת, רק

תחנת הכוח אורות רבין בחדרה, הממוקמת על החוף בסמוך לשפך נחל חדרה, מזמנת מפגש אדם-כריש. תחנת הכוח הוקמה בשנת 1982 ולידה נבנה פארק נחל חדרה, בשיתוף קק"ל, עיריית חדרה וחברת החשמל /www.kkl.org.il parks_and_forests/hadera_stream). הפארק מאפשר גישה נוחה ונגישה כמעט עד החוף וממנו ניתן לתצפת לכיוון זרם המים החמים ולראות סנפירים של כרישים. בשנת 2022 נבנתה בגדה הצפונית מרפסת תצפית שממנה ניתן לתצפת על הכרישים בצורה טובה יותר, אך מאז הגישה לגדה הצפונית נחסמה מספר פעמים על-ידי העירייה. תצפית על הכרישים מאפשרת לציבור הרחב להיחשף לחיות אלו ומייצרת עניין ומוקד משיכה. חשיפת הציבור לחיות אלו בשילוב נכון עם פעולות הסברה יכול להוביל לשינוי תפישתי אצל הקהל הרחב.

סירות וכלי שיט: כאשר כלי שיט ממונע מתקרב לדג סחוס גדול בידיעה או שלא בידיעה הוא עלול לפגוע בו עם מדחף המנוע. הבעיה מוכרת בעיקר מכרישים לווייתניים[57] אך מסכנת גם דגי סחוס גדולים אחרים. הבעיה בולטת בעיקר בחופי אילת שאליהם מגיעים לעיתים כרישים לווייתניים. שטח המפרץ הוא קטן יחסית וחופי אילת עמוסים בכלי שיט ממונעים, ביחוד בעונת הקיץ שבה נצפים גם רוב הכרישים הלווייתניים [56]. פגיעה מכלי שיט ממונע יכולה להימנע באמצעים פשוטים יחסית של האטה בקרבת בעלי חיים ימיים גדולים (מהירות מקסימלית של 10 קשר), כיבוי המנוע בקרבת הכריש ושמירה על מרחק (איור 6). תנועת כלי השיט הערה בחוף הצפוני פוגעת גם ביכולת לשחות ולשנרקל בבטחה. כלי שיט ממונעים ושאינם ממונעים (קיאקים, סאפים, סירות מפרש) מגיעים גם לתחנת הכוח בחדרה ועלולים לפגוע הן בכרישים והן בצוללים והמשנרקלים באתר[42,58].



איור 6. כריש לווייתני שנפגע בסנפיר הגב, כנראה ממדחף סירה. צילום: גיל קופלוביץ.

איומים ואתגרים בשימור דגי סחוס בישראל

דיג: ישראל הינה אחת המדינות היחידות בעולם (וייתכן כי היחידה) שבה כל מיני דגי הסחוס אסורים לדיג. עם זאת, איסור הדיג לא מונע לכידת דגי סחוס כשלל לוואי במגוון רחב של שיטות דיג. במקרה שנתפסים דגי סחוס על הדייג לשחרר את הדגים ולהחזיר אותם לים, אולם החוק לא מגדיר איך צריך להתבצע השחרור ותוך כמה זמן. למרות שמינים מסוימים של דגי סחוס מפגינים עמידות גבוהה יחסית לתפיסה ושחרור[59], עדיין קיים מחסור משמעותי במידע מקומי על היקף התפיסה כשלל לוואי, על יעילות תהליכי השחרור בשיטות הדיג השונות, וכן על ההבדלים ביכולת ההישרדות בין המינים השונים לאחר השחרור. הבנת גורמים אלו חיונית לשיפור שיטות השחרור ולהפחתת הפגיעה באוכלוסיות דגי הסחוס. סכנה נוספת שמקורה בפעילות דיג היא היא "רשתות הרפאים" הננטשות בים לאחר פעילות הדיג ומהוות לעיתים קרובות מלכודת לדגי סחוס ולחיות ימיות אחרות. כאשר רשת רפאים מאותרת בים, היחידה הימית של רט"ג או ארגוני סביבה כדוגמת סיירת החוף, משמר הים והחברה להגנת הטבע, פועלים על מנת להוציא אותה. עם זאת, חסר מידע על היקף התופעה ואין חובת דיווח של דייגים על רשת רפאים שנשארה בים והדיווחים על מפגעים כאלה נעשים מתוך רצון טוב או על-ידי משתמשי ים שנתקלים בה. על-פי דוחות החלה"ט בין השנים 2022-2024 דווחו והוסרו 22 רשתות רפאים[60]. לרשתות רפאים יכולה להיות השפעה גדולה על דגים בכלל ודגי סחוס בפרט, לדוגמה, לאחר דיווח באפליקציית seawatch של החלה"ט בנובמבר 2023 סיירת החוף הוציאה רשת רפאים שבה נלכדו ומתו כ-25 גיטרנים אטלנטים צעירים (מתוך עמוד הפייסבוק של סיירת החוף).

הרס בתי גידול: פעילות אנושית שכוללת הנחת תשתיות ובנייה בתוך הים או בקרבת החוף יכולה להשפיע על בתי הגידול של דגי סחוס. אומנם רבים מדגי הסחוס הם מינים נודדים שעוברים מרחקים גדולים, אך פגיעה באזורים בעלי חשיבות למחזור החיים כמו אזורי אומנה (שלרוב נמצאים יותר בקרבת החוף) ואזורי רבייה יכולה להיות משמעותית ביותר לדגי סחוס. לאורך חופי הים התיכון בישראל זוהו ארבעה אזורים חשובים לדגי סחוס כאזורים של התקבצויות של דגי סחוס למטרות רבייה ואומנה: ראש הנקרה-אכזיב[61], חוף דליה[35], רכסי הכורכר של גדור[62], וריף פלמחים[34], מתוך ארבעת האזורים הללו רק אזור ראש הנקרה-אכזיב נמצא במלואו בתוך שטח שמורת טבע. בתוך השטח שזוהה כאזור חשוב לדגי סחוס ברכסי הכורכר של גדור יש שמורת טבע שמכסה חלק מהשטח (שמורת גדור) ובשטח של ריף פלמחים יש גן לאומי חופי (גן לאומי פלמחים) ומוצע גן לאומי ימי. שטח חוף דליה גובל בשמורת הטבע נחל תנינים מדרום ושמורת הדיפלה מצפון. בשטח הימי נמצא אי היונים שהוא חלק משמורת איי דור ומעגן מיכאל ומוצעת שמורה ימית הכוללת את האיים ואת כל השטח של האזור החשוב לכרישים ובטאים[63]. בשלושת האתרים האחרונים (חוף דליה, גדור וריף פלמחים), החלקים שאינם נמצאים בתוך שטח שמורת הטבע עדיין חשופים לפגיעה והרס בית הגידול. לדוגמה: חוף דליה שבו מוזרמים באופן קבוע מים מבריכות הדגים של קיבוץ מעגן מיכאל ורכס הכורכר בגדור, שבגבולו הצפוני מתוכננים פיתוחים משמעותיים, בהם בניית שכונת הפרפרים, הקמת חופי רחצה, ומעט צפונית משם הנחת צינור גז בקרבת תחנת הכוח בחדרה. פרויקטים אלו עשויים להשפיע הן על אזור רכסי הכורכר של גדור והן על אוכלוסיית הכרישים הפוקדת את תחנת הכוח. בים העמוק המידע עדיין מועט, מלבד הידוע על בריכות המלח באזור גלישת פלמחים[40]. הפעילות האנושית הכוללת חיפושי וקידוחי גז ונפט יחד עם התשתיות הנחוצות לפעילות זאת יכולות להשפיע בצורה שלילית על בתי הגידול העמוקים של דגי סחוס מול חופי הים התיכון של ישראל[64].

החוף הצפוני באילת הוא אזור עמוס ומפותח עם מרינה וטיילת קרובה לחוף ורק בקצהו יש שטח שאינו מפותח. חוף זה מהווה בית גידול שונה משמורת האלמוגים, כאזור חולי ושטוח יותר. בחוף הצפוני חיים דרך קבע מיני דגי סחוס שלא נצפים כמעט בכלל בשמורת האלמוגים ונדיר שמדווחים מכל ים סוף ועל כן כאמור, הוגדר כאזור חשוב לדגי סחוס[44]. על-פי מסמך המדיניות לרצועת החוף באילת כל השטח הצפוני מיועד לפיתוח, למעט רצועה קטנה צמודה לקו הגבול עם ירדן, לעומת האזור הדרומי במפרץ המיועד לשמירת טבע ופיתוח בר-קיימה[65].

שינויי אקלים: התחממות האוקיינוסים משפיעה על המאזן האקולוגי של דגי סחוס. כבר היום כ-10% מדגי הסחוס המאוימים מושפעים משינויי אקלים[13]. ההיבטים המרכזיים של שינויי האקלים, המשפיעים ביותר על דגי הסחוס, הם תופעת הלבנת שוניות האלמוגים (bleaching) והשינויים בתפוצת אוכלוסיותיהם (איור 7), הנגרמים כתוצאה משינויים בטמפרטורת המים, רמות החמצן או במליחות[13]. בהקשר זה יש לציין כי הים התיכון הוא אחד האזורים הכי מושפעים כתוצאה מהתחממות גלובלית גם מבחינת עליית הטמפרטורה גם מבחינת עליית מפלס הים[66].

על האמנה מ-1983.

אמנת ברצלונה (The Barcelona Convention) היא אמנה אזורית שנחתמה בשנת 1976 ומטרתה להגן על הים התיכון מפני זיהום ולשמר את המערכות האקולוגיות הימיות והחופיות. האמנה עצמה אינה מתמקדת ישירות בדגי סחוס, אך היא כוללת פרוטוקול מיוחד על שמירת המגוון הביולוגי והסביבה הימית בים התיכון, אשר מסייע להגנה על בתי הגידול של כרישים ובטאים. כמו כן, במסגרת התוכנית לפיקוח על הדיג והפחתת השפעותיו האקולוגיות, האמנה תומכת ביוזמות לשימור אוכלוסיות דגי סחוס הנמצאות בסכנה בשל דיג יתר, הרס בתי גידול וזיהום. ישראל חתומה על אמנה זאת משנת 1976.

הוועדה הכללית לדיג בים התיכון (GFCM - General Fisheries Commission for the Mediterranean) היא ועדה אזורית של ארגון המזון והחקלאות של האו"ם (FAO), הפועל לניהול ופיקוח בר-קיימה על הדיג והמשאבים הימיים בים התיכון ובים השחור. ה-GFCM אחראית על קביעת תקנות דיג, קידום דיג בר-קיימה, הפחתת דיג יתר, ושימור מינים ימיים רגישים, כולל דגי סחוס הנמצאים בסכנת הכחדה עקב פעילות דיג אינטנסיבית. ישראל חברה ב-GFCM מאז שנת 1952, אך טרם אישררה את האמנה או שילמה דמי חבר.

בנוסף לאמנות שעליהן ישראל חתומה ומחויבת לפעול תחתן ישנן יוזמות בינלאומיות שאינן מחייבות שמטרתן הגנה על דגי סחוס:

היוזמה לאזורים חשובים לכרישים ולבטאים (ISRA Important Shark and Ray Areas) היא פרויקט בינלאומי שמטרתו לזהות, למפות ולהגן על אזורים קריטיים למינים אלו והיא מובלת על-ידי צוות המומחים לכרישים של ה-IUCN. האזורים מזוהים על בסיס קריטריונים מדעיים, כגון אתרי רבייה, אזורי האכלה, מסלולי נדידה ובתי גידול רגישים. היוזמה נועדה לתמוך בקביעת מדיניות אזורית ובינלאומית ולשמש כלי לקבלת החלטות עבור מדינות, גופי שימור וארגונים העוסקים בהגנה על מערכות ימיות[67,68].

בישראל הוגדרו שישה אזורים חשובים לכרישים ובטאים, חמישה בים התיכון ואחד בים סוף, וכל אחד מהם מתאפיין במינים והתנהגויות שונות[34,35,40,44,61,62].

פרויקט MECO (Mediterranean Elasmobranch Citizen Observations) הוא יוזמה מדעית-אזרחית שמטרתה לאסוף נתונים על נוכחותם והתנהגותם של דגי סחוס בים התיכון. הפרויקט מתבסס על תצפיות של צוללים, דייגים ואזרחים, המוזמנים לדווח על מפגשים עם מינים אלו, ובכך לתרום למאגר מידע רחב היקף. הנתונים שנאספים מסייעים למדענים לנתח מגמות אוכלוסין, לאתר אזורי תפוצה חשובים, ולהבין איומים פוטנציאליים על המינים. המידע משמש גם לקידום מאמצי שימור ולהגברת המודעות הציבורית לחשיבות הגנת דגי סחוס בים התיכון. MECO הוא פרויקט שפותח ומובל על-ידי עמותת כרישים בישראל וכולל בתוכו את פרויקט איסוף התצפיות המקומי[69].

בנוסף למאמצי השימור הבינלאומיים, בישראל מתקיימות גם פעולות שימור מקומיות. כל דגי הסחוס בישראל מוגנים על-פי חוק, ולכן חל איסור על דיג מכוון שלהם, על הבאתם לחוף או מסחר בדגי סחוס או חלקיהם[70]. מכאן שבמקרה של לכידה בלתי מכוונת (שלל לוואי), יש להחזירם למים, אולם אין הגדרה של פעולת השחרור. יש חוסר בקביעת פרוטוקולים מחייבים ופעולות הסברה מקיפות מול דייגים על שחרור נכון מבחינת משך הזמן ודרך השחרור ובנוסף אין חובת דיווח על תפיסות של דגי סחוס כשלל לוואי ולכן אין מידע על היקף התופעה.

החוק אוסר על פגיעה בערך טבע מוגן ומגדיר פגיעה כ"לרבות השמדה, הריסה, שבירה, חבלה, קטיפה, עקירה, נטילה,

שליה, הרעלה, שינויה של צורה או של תנוחה טבעית של ערך טבע או הפרעה למהלך התפתחותו הטבעית, לרבייתו או לשמירתו"[70]. דגי סחוס מוגדרים בישראל כערך טבע מוגן אך לא מוגדרים כחיית בר, ועל כן לא זוכים להגנה מפני הטרדה (harassment) לדוגמה, רדיפה אחרי דגי סחוס או נגיעה בדג סחוס ולכן יש קושי לאכוף מקרים כאלו למרות שיש בהם מן הסיכוי לפגיעה.

בשנים האחרונות רט"ג מובילה תהליך של הגדרת שמורות טבע ימיות גדולות המתחילות מקו החוף של ישראל ועד לגבול המים הטריטוריאליים שלה[63]. בין שמורות הטבע הגדולות שהוכרזו נכללת שמורת הטבע ראש הנקרה-אכזיב שבה קיים אזור חשוב לדגי סחוס[61], כמו גם תהליך הרחבה של שמורות ימיות קטנות קיימות כמו שמורת גדור הנמצאת באזור החשוב לדגי סחוס של רכסי הכורכר של גדור[62]. החברה להגנת הטבע מקדמת שמורות טבע בים עמוק במים הכלכליים של ישראל[71] מהלך שיש בו פוטנציאל להגן על אזורים חשובים לכרישים ובטאים כדוגמת בריכות המלח, שזוכות להגנה כחלק מגלישת פלמחים[40].

עמותת כרישים בישראל פועלת להגנה, חקר ושימור כרישים ובטאים במים הטריטוריאליים של ישראל. העמותה שואפת להעלות את המודעות הציבורית לחשיבות השימור של דגי סחוס ולהגן עליהם מפני איומים על-ידי מחקר ומדע אזרחי, העלאת המודעות ופעילויות הסברה (אתר כרישים בישראל).

פעולות לעתיד

שימור דגי הסחוס התפתח משמעותית בשנים האחרונות, אך עדיין קיימים בו פערים מהותיים. יש להעמיק את ההבנה בנוגע להשפעות האיומים השונים על אוכלוסיות דגי הסחוס ולהמשיך בניטורם, כולל הערכת שכיחותם בשלל לוואי בשיטות דיג שונות, מצבם הפיזי לאחר לכידתם, וסיכויי הישרדותם עם החזרתם לים. בנוסף, יש לפתח פרוטוקולים לשחרור מיטבי של דגים שנלכדו בטעות ולבצע פעולות הסברה רחבות לשחרור נכון, אשר יגדילו את סיכויי הישרדותם. לצד זאת, נדרשת רגולציה שתכלול חובת דיווח על שלל לוואי ורשתות רפאים, במטרה לצמצם את הפגיעה בדגי הסחוס ובמינים ימיים נוספים. כמו כן, יש להסדיר את נושא כלי השיט באזור החוף הצפוני של אילת, לפתח נהלים לשיט בקרבת כרישים, ולגבש הנחיות מיטביות לצפייה בדגי סחוס – בין אם מסירה, בשנירקול או בצלילה.

לצד הצעדים הרגולטוריים והמחקריים קיים צורך בהעלאת המודעות הציבורית לחשיבות שימור דגי הסחוס, הן בקרב קהלי יעד כמו דייגים צוללים והן בקרב הציבור הרחב. פעילויות חינוכיות בבתי ספר, קמפיינים ציבוריים, ותוכניות הסברה ייחודיות יכולים להוביל לשינוי תודעתי בקרב הציבור הרחב. שילוב הציבור בתהליכי השימור באמצעות מעורבות קהילתית ומיזמים אזרחיים יכול לחזק את התמיכה במאמצים אלו כמו גם הכרה בדגי הסחוס כנכס תרבותי וטבעי של מדינת ישראל.

סיכום

בישראל קיים מגוון ועושר של מיני דגי סחוס בחופים ובים העמוק, אשר הידע עליהם עדיין מועט כמו גם היכרות הציבור עם בעלי חיים אלו. דגי הסחוס מהווים חלק בלתי נפרד ממערכת הים התיכון ומפרץ אילת, אך האוכלוסיות של מינים רבים נמצאות תחת איום גובר עקב פעילות אנושית אינטנסיבית. בעשור האחרון חלה עלייה משמעותית בהבנה

של חשיבותם האקולוגית, והמאמצים לשימורם צוברים תאוצה. עם זאת, האתגרים הרבים הניצבים בפני אוכלוסיות דגי הסחוס בישראל מחייבים גישה רב-תחומית המשלבת מחקר, חינוך, רגולציה ושיתוף פעולה בינלאומי.
לזיהוי והגנה על אזורים קריטיים כמו אלו שהוגדרו במסגרת ISRA תפקיד מרכזי בשימור המינים הללו, אך לצד זאת יש צורך בהרחבת האכיפה על חוקי הדיג, צמצום הפגיעה בבתי גידול ושיפור ההתנהלות עם שלל לוואי בדיג מסחרי. מעורבות הציבור באמצעות תיירות, מדע אזרחי ופעילויות חינוכיות יכולה להוות מנוף משמעותי לשינוי תפיסתי ולהגברת התמיכה במאמצי השימור.
שימור דגי הסחוס בישראל אינו רק משימה אקולוגית, אלא גם אתגר חברתי וכלכלי. על-ידי שילוב מאמץ מחקרי עם מדיניות ורגולציה והגברת המעורבות הציבורית, ניתן לאושש את האוכלוסיות של המינים הייחודיים הללו, ולשמור על מערכת ימית בריאה ומתפקדת לדורות הבאים.

רשימת מקורות

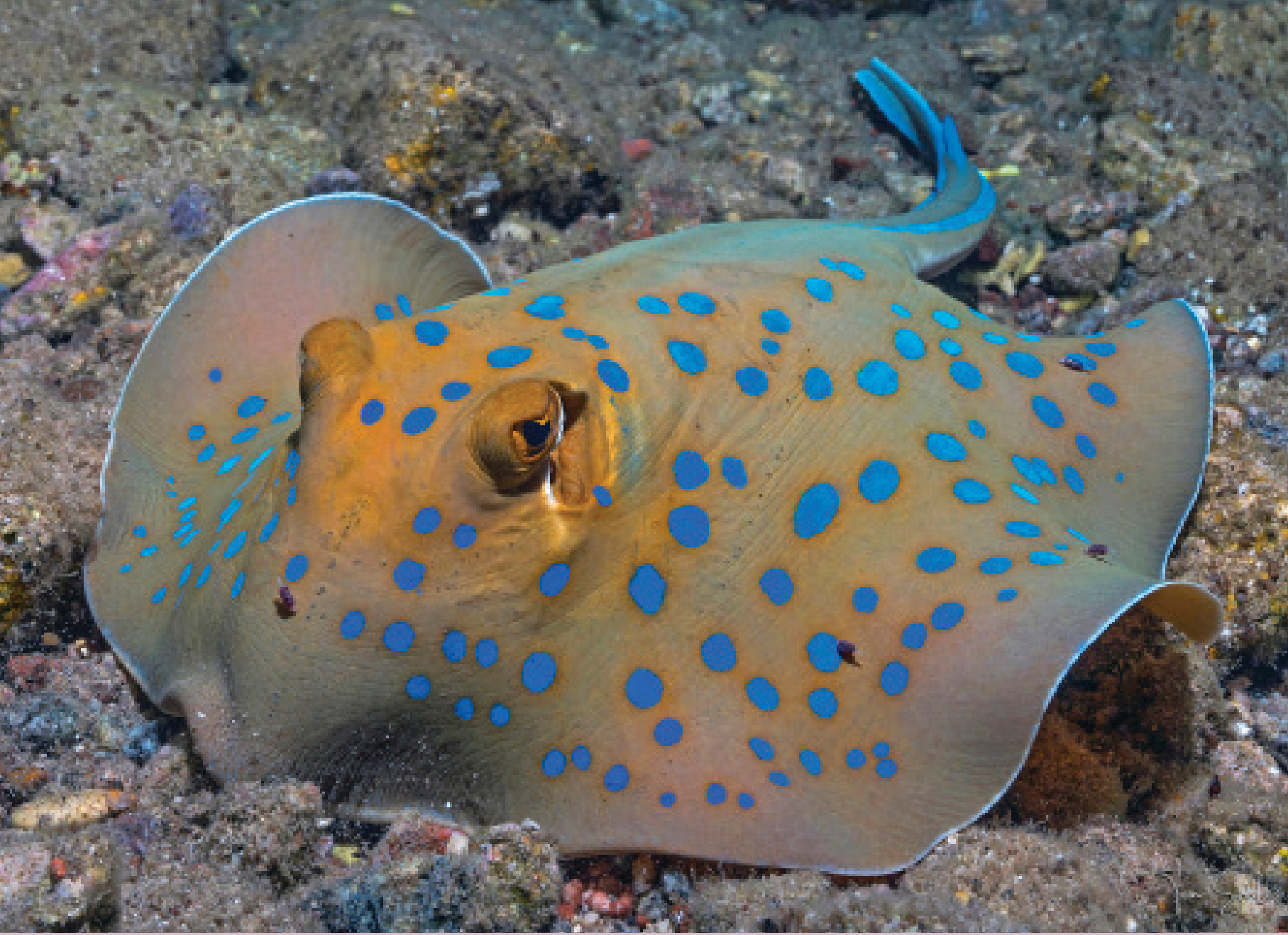
1. Klimley, A. P. *The Biology of Sharks and Rays*. (University of Chicago Press, 2013).
2. Mallatt, J. Shark pharyngeal muscles and early vertebrate evolution. *Acta. Zoologica* **78**, 279–294 (1997).
3. Ebert, D. A., Dando, M. & Fowler, S. *Sharks of the World: A Complete Guide*. Princeton University Press. **19** (2021).
4. Last, P., Naylor, G., Séret, B., White, W., de Carvalho, M. & Stehmann, M. (Eds.). *Rays of the World*. CSIRO publishing, (2016).
5. Hamlett, W. C. *Sharks, Skates, and Rays: The Biology of Elasmobranch Fishes*. (JHU Press, 1999).
6. Balfour, F. M. The development of elasmobranch fishes. *J. Anat.* **11**, 406 (1877).
7. Dedman, S., et al. Ecological roles and importance of sharks in the Anthropocene Ocean. *Science* 385, adl2362 (2024).
8. Ruppert, J. L. W., Fortin, M.-J. & Meekan, M. G. The ecological role of sharks on coral reefs: Response to Roff et al. *Trends Ecol. Evol.* **31**, 586–587 (2016).
9. Guerra, A. S. Wolves of the Sea: Managing human-wildlife conflict in an increasingly tense ocean. *Mar. Policy*. **99**, 369–373 (2019).
10. Roff, G. et al. The ecological role of sharks on coral reefs. *Trends Ecol. Evol.* **31**, 395–407 (2016).
11. Norman, B. M., Reynolds, S. D. & Morgan, D. L. Three-way symbiotic relationships in whale sharks. *Pac. Conserv. Biol.* **28**, 80–83 (2021).
12. Gayford, J. H. The multidimensional spectrum of eco-evolutionary relationships between sharks and remoras. *J. Fish. Biol.***105**, 4–9 (2024).
13. Jabado, R.W. et al. (eds.). The global status of sharks, rays, and chimaeras. *IUCN.* https://doi.org/10.59216/ssg.gsrsrc.2024 (2024).
14. Dulvy, N.K. et al. Challenges and priorities in shark and ray conservation. *Curr. Biol.* **27**, R565–R572 (2017).
15. Dulvy, et al. Extinction risk and conservation of the world's sharks and rays. *Elife* 3, e00590 (2014).
16. Cuttelod, A., García, N., Malak, D. A., Temple, H. J. & Katariya, V. The Mediterranean: a biodiversity hotspot under threat. *Wildlife in a Changing World–an analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species* **89**, 9 (2009).
17. Milazzo, M., Cattano, C., Al Mabruk, S. A. A. & Giovos, I. Mediterranean sharks and rays need action. *Science* **371**, 355–356 (2021).
18. Ferretti, F., Myers, R. A., Serena, F. & Lotze, H. K. Loss of large predatory sharks from the Mediterranean Sea. *Conserv. Biol.* **22**, 952–964 (2008).

19. Cavanagh, R. D. & Gibson, C. *Overview of the Conservation Status of Cartilaginous Fishes (Chondrichthyans) in the Mediterranean Sea. Iucn* (2007). doi: 10.2305/IUCN.CH.2007.MRA.3.en.
20. Dulvy, N. K., Allen, D. J., Ralph, G. M. & Walls, R. H. L. The Conservation Status of Sharks , Rays and Chimaeras in the Mediterranean Sea [Brochure]. (2016) doi: 10.13140/RG.2.2.22020.53129.
21. רהב, א וחובריו. תוכנית הניטור הלאומי בים התיכון לשנת 2022. ניטור המגוון הביולוגי H27/2023, דוח חיא"ל (2023).
22. Golani, D. Checklist of the Mediterranean fishes of Israel. *Zootaxa* 947, 1–90 (2005).
23. Bar, A., Bookman, R., Galili, E. & Zviely, D. Beachrock morphology along the Mediterranean coast of Israel: typological classification of erosion features. *J. Mar. Sci. Eng.* **10**, 1571 (2022).
24. Herut, B. Chapter The National Monitoring Program of Israel's Mediterranean Waters–scientific perspectives. (2022).
25. Chaikin, S., Belmaker, J. & Barash, A. Coastal breeding aggregations of threatened stingrays and guitarfish in the Levant. *Aquat. Conserv.* **30**, 1160–1171 (2020).
26. The IUCN red list of threatened species. < https://www.iucnredlist.org/ accessed on 02/02/2025.
27. Yucel, N., Sakalli, A. & Karahan, A. First record of the honeycomb stingray Himantura leoparda (Manjaji-Matsumoto & Last, 2008) (Myliobatoidei: Dasyatidae) in the Mediterranean Sea, confirmed by DNA barcoding. *J. Appl. Ichthyol.* **33**, 530–532 (2017).
28. Ben-Tuvia, A. Two Indo-Pacific fishes, Dasyatis uarnak and Upeneus moluccensis, in the eastern Mediterranean. *Nature* **176**, 1177–1178 (1955).
29. Barash, A. Species identification, phylogeography and spatio-temporal distribution of requiem sharks (genus carcharhinus) along the Israeli Mediterranean coast. (University of Haifa, 2014).
30. Bigal, E. et al. Shark shuffle: segregated co-occurrence of multiple dusky and sandbar lineages at a human-altered habitat in the eastern Mediterranean Sea. *Sci Rep* **14**, 19924 (2024).
31. Rinkevich, B. What do we know about Eilat (Red Sea) reef degradation? A critical examination of the published literature. *J Exp Mar Biol Ecol* 327, 183–200 (2005).
32. Golani, D. & Fricke, R. Checklist of the Red Sea fishes with delineation of the Gulf of Suez, Gulf of Aqaba, endemism and Lessepsian migrants. *Zootaxa* **4509**, 1–215 (2018).
33. ברש, ע. דוח מגוון מיני דגי הסחוס בשמורת אכזיב. עמותת כרישים בישראל עבור החברה להגנת הטבע (2020).
34. IUCN SSC Shark Specialist Group. Danny Reef Palmahim ISRA Factsheet. Dubai: IUCN SSC Shark Specialist Group. (2023).

35. IUCN SSC Shark Specialist Group. Dalia Beach ISRA Factsheet. Dubai: IUCN SSC Shark Specialist Group. (2023)
36. Azrieli, B. et al. Characterising a potential nearshore nursery ground for the blackchin guitarfish (Glaucostegus cemiculus) in Ma'agan Michael, Israel. *Front Mar Sci* 11, 1391752 (2024).
37. Grossmark, Y., Azriali Zohar, B., Barash, A. & Portman, M. E. Incorporation of human–wildlife interactions in ecosystem-based management to enhance conservation of endangered guitarfish. *Conserv Biol* 38, e14327 (2024).
38. Barash, A., Pickholtz, R., Pickholtz, E., Blaustein, L. & Rilov, G. Seasonal aggregations of sharks near coastal power plants in Israel: an emerging phenomenon. *Mar Ecol Prog Ser* 590, 145–154 (2018).
39. Barash, A., et al. Some like it hot: Investigating thermoregulatory behavior of carcharhinid sharks in a natural environment with artificially elevated temperatures. *Fishes* 8, 428 (2023).
40. IUCN SSC Shark Specialist Group. Palmahim Brine Pools ISRA Factsheet. Dubai: IUCN SSC Shark Specialist Group. (2023).
41. Sisma-Ventura, G., Herut, B., Segal, Y., Stern, N., Makovsky, Y. & Rubin-Blum, M. Oviparous Catsharks Accumulate Mercury in Deep-Sea Brine Pool Nurseries. *Environ. Sci. Technol. Lett* .**11**, 1103–1109 (2024).
42. ברש, ע. ריכוז תצפיות דגי הסחוס בחלקיו השונים של החוף הצפוני באילת. עמותת כרישים בישראל עבור רשות הטבע והגנים. (2021).
43. Knochel, A.M., Cochran, J.E., Kattan, A., Stevens, G.M., Bojanowksi, E.& Berumen, M.L. Crowdsourced data reveal multinational connectivity, population demographics, and possible nursery ground of endangered oceanic manta rays in the Red Sea. *Aquat Conserv* 32, 1774–1786 (2022).
44. IUCN SSC Shark Specialist Group. Eilat North Beach ISRA Factsheet. Dubai: IUCN SSC Shark Specialist Group. (2023).
45. Nyhus, P. J. Human–wildlife conflict and coexistence. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **41**, 143–171 (2016).
46. Frank, B. Human–wildlife conflicts and the need to include tolerance and coexistence: An introductory comment. *Soc. Nat. Resour.* **29**, 738–743 (2016).
47. Healy, T. J., Hill, N. J., Barnett, A. & Chin, A. A global review of elasmobranch tourism activities, management and risk. *Mar. Policy.* **118**, 103964 (2020).
48. Barash, A., Pickholtz, R., Nativ, R., Malamud, S., Scheinin, A. and Tchernov, D. Seasonal arrival and feeding of injured coastal sharks at fish farms in the eastern Mediterranean. *J Black Sea Mediterr, Environ* **24**, 86–90 (2018).

49. ברש, ע., ושניר, א. צמצום יחסי הגומלין בין כרישים לחוות גידול דגים בים הפתוח. החברה להגנת הטבע, רשות הטבע והגנים ומשרד החקלאות ופיתוח הכפר. (2016).
50. מינהל התכנון. מסמך מדיניות למרחב הימי של ישראל | ים התיכון. (2020)
51. איילון, א., טרופ, ת., עשת, צ., ליבס, ע., זרביב, מ., וכרם, א. פיתוח בר-קיימה של חקלאות ימית בים התיכון של ישראל. מוסד שמואל נאמן. (2015).
52. אריאלי, א., וברש, ע. תוכנית פעולה להגנה של כרישים ובטאים בים התיכון. עמותת אקואושן (2015).
53. פריד, א., וגבריאלי, ט. סקר הדיג הספורטיבי דוח מסכם. רשות הטבע והגנים, האגף לדיג ולחקלאות מים משרד החקלאות ופיתוח הכפר. (2019).
54. *הרפורמה לניהול הדיג בים התיכון- עורך אלון רוטשילד*. (2015).
55. Shamir, Z. Z., Shamir, S. Z., Becker, N., Scheinin, A. & Tchernov, D. Evidence of the impacts of emerging shark tourism in the Mediterranean. *Ocean Coast Manag* 178, 104847 (2019).
56. (2021)..מינהל התכנון. מסמך מדיניות למרחב הימי של ישראל | מפרץ אילת (טיוטה)
57. Womersley, F.C. et al. Identifying priority sites for whale shark ship collision management globally. Sci. Total Environ. **934**, 172776 (2024).
58. שבתאי, ע., ירוחם, א., גן-פרקל, ה., ורוטשילד, א. הסדרת הפעילות במרחב השהייה של כרישים במוצא המים למען שמירת הטבע ובטיחות האדם. החברה להגנת הטבע. (2021). החמים, חדרה,
59. Ellis, J. R., McCully Phillips, S. R. & Poisson, F. A review of capture and post-release mortality of elasmobranchs. *J. Fish. Biol.* **90**, 653–722 (2017).
60. Retrieved December 2, 2025, החברה להגנת הטבע. החצי הכחול. החצי הכחול- הרפורמה להצלת הים התיכון. from https://mafish.org.il
61. IUCN SSC Shark Specialist Group. Rosh-Hanikra Achziv ISRA Factsheet. Dubai: IUCN SSC Shark Specialist Group. (2023).
62. IUCN SSC Shark Specialist Group. Gdor Kurkar Ridges ISRA Factsheet. Dubai: IUCN SSC Shark Specialist Group. (2023).
63. רשות הטבע והגנים .שמורות הטבע הימיות בים התיכון של ישראל [רשות הטבע והגנים] .נקרא ב-25 בדצמבר, 2025 : https://www.parks.org.il/article/שמורות-טבע-ימיות./
64. ויסמן, א., ורוטשילד, א. הים התיכון העמוק—חשוך, קר ומיוחד : חשיבות שמירת הים העמוק וקידום שמורת טבע "הפרעת פלמחים" (עמ. 75). החברה להגנת הטבע. (2018).
65. מינהל התכנון. מסמך המדיניות לרצועת החוף אילת : חזון ומתווה מנחה לתכנון המרחב. מינהל התכנון, שרד התיירות ועיריית אילת. (2021).

66. חרות, ב וחובריו, תוכנית הניטור הלאומית בים התיכון לשנת 2022. H22/2024 דוח חיא״ל (חקר ימים ואגמים לישראל בע״מ, 2024)
67. Hyde, C.A., Notarbartolo di Sciara, G., Sorrentino, L., Boyd, C., Finucci, B., Fowler, S.L., Kyne, P.M., Leurs, G., Simpfendorfer, C.A., Tetley, M.J. & Womersley, F. Putting sharks on the map: A global standard for improving shark area-based conservation. *Front. Mar. Sci.* 9, 968853 (2022).
68. Important Shark and Ray Areas. Important Shark and Ray Areas (ISRA) initiative. International Union for Conservation of Nature. Retrieved December 2, 2025, from https://www.iucnssg.org/isra.html.
69. Barash, A., Salingre, S., Grosmark, Y. & Rothman, S. The MECO project (Mediterranean Elasmobranch Citizen Observations): Creating a large-scale database of elasmobranchs observations using social. in *Proceedings of the European Elasmobranch Association 22nd annual conference* (Peniche, Portugal, 2018).
70. חוק גנים לאומיים, שמורות טבע, אתרים לאומיים ואתרי הנצחה, תשנ״ח-1998, משרד המשפטים.(1998) .
71. החברה להגנת הטבע. תוכנית-אב לשמורות טבע באזור הכלכלי הבלעדי בים התיכון. החברה להגנת הטבע, החצי הכחול. (2023).



מחבטן הספירים (*Taeniura lymma*) מתגלה בלילה בציד חרישי במים הרדודים – פורטרט אינטימי של טורף אלגנטי בשונית במפרץ אילת.
צילום: תום שלזינגר.

34 מחקר ארוך שנים על התקבצות הכרישים בחדרה

אביעד שייניין[1], אייל ביגל[2,1], עינב כהן[1], לי ליבנה[1], דני מוריק[3,1], דלית מירון[1], זיו צמח שמיר[1], דן צ'רנוב[1]

[1] תחנת מוריס קהאן לחקר הים, בית הספר למדעי הים ע"ש ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה.
[2] תחנה ימית הופקינס, אוניברסיטת סטנפורד
[3] החוג לביוטכנולוגיות כחולות וחקלאות מקיימת, בית הספר למדעי הים ע"ש ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה
[2] המכון הבין-אוניברסיטאי למדעי הים

ascheinin@univ.haifa.ac.il, ebigal@stanford.edu, Navic007@gmail.com, leigh.livne@gmail.com, dmorick@univ.haifa.ac.il, dalitmeron@gmail.com, zzemah@univ.haifa.ac.il, dtchernov@univ.haifa.ac.il

תקציר

התקבצות כרישי הסנפירתן (Sandbar; *Carcharhinus plumbeus*) והעפרורי (Dusky; *Carcharhinus obscurus*) בישראל, הינה תופעה ייחודית, המאפשרת נגישות לביצוע מחקר מעמיק על שני מינים אלה המוגדרים בסכנת הכחדה, כמרבית מיני הכרישים בים התיכון. מטרות המחקר הינן הבנת המוטיבציה להתקבצות שנתית (נובמבר-מאי) במוצא המים החמים של תחנת הכוח אורות רבין בחדרה, בחינת מצבם הבריאותי במהלך שהייתם באתר, ובחינת תפוצתם כאשר המים מתחממים (יוני-אוקטובר) לאחר שעזבו את חדרה. מחקר זה הינו מחקר פעיל מתמשך והממצאים המובאים כאן מתבססים על 6 שנות מחקר (2016-2022). במהלך עבודת לכידה ושחרור נאספו נתונים והושתלו אמצעי תיוג אשר עברו עיבוד תחת קשת רחבה של תחומי מחקר; מדדים מורפומטריים לקביעת בגרות ואפיון ההתקבצות, דוגמאות רקמה ודם לקביעות גנטיות ומצב פיזיולוגי, החדרת משדרי קול למעקב תנועתי והבנת תבניות התנהגות, איסוף מיקרוביום לבחינת אינטרקציה עם הסביבה הימית המקומית והשפעתה על הפרט. השפעת האדם, הישירה והעקיפה, על התקבצות הכרישים נבחנה גם היא ואף הוצעה צורת התנהלות אזורית דינמית אשר נותנת מענה לשימור התקבצות הכרישים וצורכי הדייגים. המשך ביצוע שיטות המחקר המפורטות להלן ושילובן עם עבודות ניטור נוספות יאפשרו בעתיד הבנה טובה ומקיפה לגבי תפקוד הכרישים כטורפי-על ולהקיש גם על מצב המערכת האקולוגית הימית באזור בשלמותה.

מבוא

כרישים הם טורפי-על הנמצאים בראש מארג המזון, ובעלי תפקיד מרכזי בשמירה על איזון האוכלוסיות של דגים ויצורים ימיים אחרים[1]. גם בשטחה הימי של ישראל מהווים הכרישים חלק חשוב ובלתי נפרד מהמערכת האקולוגית הימית[2]. ברשימת מיני הדגים בים התיכון כולו משנת 2021[3] נמנו 58 מינים של דגי סחוס (Chondrichthyes), ומתוכם 37 כרישים. לאורך חופי ישראל מצויים 13 מיני כרישים גדולים וקטנים מתוך כלל דגי הסחוס. מצבם הכללי לאורך חופי הים התיכון של ישראל הינו מדאיג, שכן רבים מהם נמצאים בסכנת הכחדה בשל איומים כמו דיג יתר, אובדן בתי גידול וזיהום. משנות ה-50 של המאה הקודמת ועד היום, 90% מאוכלוסיות הכרישים בים התיכון "נעלמו"[3] – ממצא אשר מדגיש את הצורך בשימורם ובהגנה על הסביבה הימית שבה הם חיים. כל מיני הכרישים והבטאים מוגדרים כמינים מוגנים אסורים לדיג בכל עונה, גודל ואמצעי, ובכל השטח הימי של מדינת ישראל. התקבצויות עונתיות של כרישים סביב תשתיות חופיות כמעט אינן מתועדות בספרות המדעית הבינלאומית. לעומת זאת, בישראל, עשרות פרטים משני מינים, כריש הסנפירתן (Sandbar, *Carcharhinus plumbeus*; איור 1) והעפרורי (Dusky, *Carcharhinus obscurus*; איור 2) מופיעים מדי שנה בקרבת כלובי דגים, אסדות גז ותחנות כוח, ומנוטרים בשנים האחרונות באופן רציף.

איור 1. כרישי סנפירתן מתחת לכלובי הדגים באשדוד. צילום: חגי נתיב.

איור 2. כרישה עפרורית מתויגת לאחר ששוחררה בחדרה. צילום: חגי נתיב.

תופעה זו מהווה הזדמנות ייחודית למחקר ולבחינת מצבם האקולוגי והבריאותי של פרטים ספציפיים לצד הסקנת מסקנות לגבי כלל האוכלוסייה. התקבצויות אלו, המונות עשרות פרטים משני המינים, שונות זו מזו מבחינת הרכב דמוגרפי (מספר פרטים, יחס מינים וזוויגים), עונתיות, וגורמי המשיכה המקומיים. הפרקים הבאים מתארים ממצאים של מחקרים פעילים ומתמשכים אשר מטרתם הינה בחינת גורמי המשיכה וההשלכות של שהות ארוכת-טווח במוצא המים החמים של תחנת הכוח אורות רבין בחדרה. ממצאי מחקרים אלה, המתבססים על 6 שנות מחקר (2016-2022), עברו עיבוד תחת קשת רחבה של תחומי מחקר; מדדים מורפומטריים לקביעת בגרות ואפיון ההרכב הדמוגרפי של חברת הכרישים, אנליזות גנטיות ומצב פיזיולוגי, מעקב תנועתי באמצעות משדרי קול והבנת תבניות התנהגות, ואיסוף מיקרוביום לבחינת אינטרקציה עם הסביבה הימית המקומית. השפעת האדם הישירה והעקיפה על התקבצות הכרישים נבחנה גם היא ואף הוצעה תוכנית ניהול אזורית דינמית אשר תיתן מענה לשימור התקבצות הכרישים לצד משתמשי ים אחרים (מתרחצים, דייגים, ועוד). לפי הערכת ארגון שמירת הטבע העולמי[4] (International Union for the Conservation of Nature; IUCN) בנוגע לרחבי הים התיכון, הכריש העפרורי מוגדר כמין אודותיו אין מספיק נתונים כדי לאמוד את מצב שימורו (Data deficient; DD) והכריש הסנפירתן מוגדר כמין בסכנת הכחדה (Endangered; EN). לכן, ניטור המאפיינים הביולוגיים והאקולוגיים של תופעת ההתקבצות הינו מהותי למאמצי

שימור של הכריש העפרורי והסנפירתן. מתוקף היותם מינים בעלי דפוסי נדידה רחבים, המשך ביצוע שיטות המחקר המפורטות כאן מאפשר הבנה טובה ומקיפה לגבי מצב הכרישים כטורפי-על במערכת, ואינדיקציה על מצב המערכת האקולוגית הימית בשלמותה – לא רק בישראל, אלא בכל טווח תפוצתם.

מאפייני התקבצות הכרישים בתחנת הכוח אורות רבין בחדרה

תופעת ההתקבצות בתחנת הכוח אורות רבין בחדרה (איור 3) נחקרת משנת 2015 ומגוון עבודות נכתבו בעבר על שינויים ביולוגיים והתנהגותיים בקרב הכרישים בתגובה להשפעות אדם חיצוניות, כגון עומס תיירות[5], זיהום ממקור יבשתי[6], והחשיפה לגורמי תחלואה[7].

איור 3. התקבצות הכרישים במוצא המים בתחנת הכוח אורות רבין בחדרה. צילום: חגי נתיב.

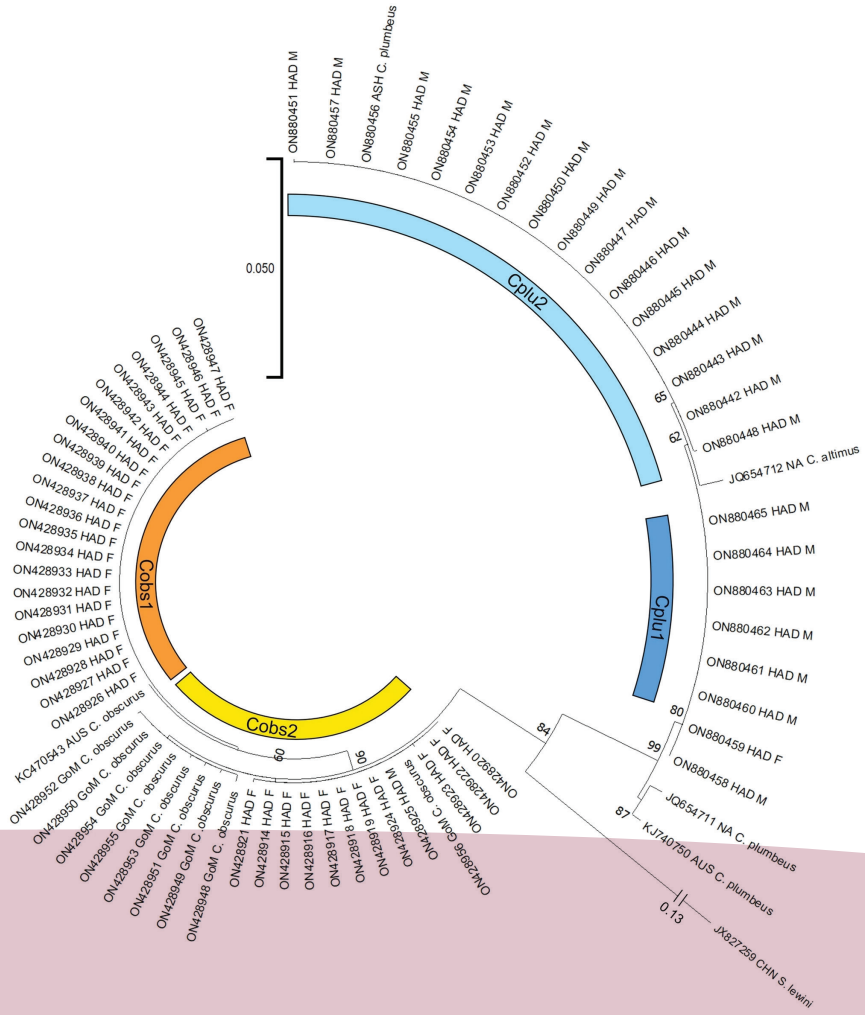
במסגרת המחקר האקולוגי ארוך-הטווח שמתבצע בצמוד לתחנה, הכרישים נלכדים, נדגמים, נמדדים, מתויגים, ומשוחררים תוך פרק זמן קצר (איור 4) לפי פרוטוקול סטנדרטי ובהיתר רשות הטבע והגנים. הדיגום בשטח מאפשר אפיון גנטי של כל כריש

לפי מין ואוכלוסייה באמצעות כלים מולקולריים, ובחינה חיצונית לקביעת זוויג ובגרות מינית[8]. בנוסף, המחקר מתבסס על טלמטריה אקוסטית – החדרה של משדרי קול לתוך חלל הגוף של הכרישים, כאשר האות שאלה מפיקים נקלט על-ידי מערך מקלטים הממוקמים בנקודות עניין לאורך החוף הישראלי. שיטה זו מאפשרת בחינה של תבניות תנועה והתנהגות מחזוריות ברזולוציות זמן שונות, כמו גם הסקת הרווח מול הסיכון שבשהות ממושכת באתר. בעוד שדיגום הכרישים רוכז בתחנת הכוח אורות רבין (77 פרטים ב-2016-2022; ממוצע של 13 בשנה) פיזור המקלטים האקוסטיים התפרס על תחנות כוח נוספות (אשקלון ואשדוד), חוות דגים (אשדוד ומכמורת), ובתי גידול טבעיים (אשדוד, הרצליה, געש, ג'יסר א זרקא, ואכזיב).

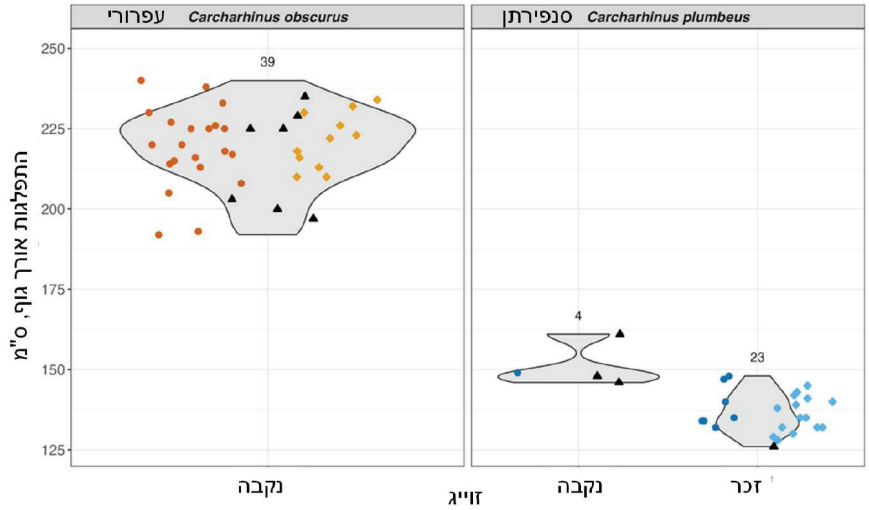
איור 4. כרישה עפרורית נמדדת במהלך מחקר תיוג הכרישים מדופן הסירה. צילום: חגי נתיב.

תוצאות המחקר הצביעו על נוכחות שתי קבוצות גנטיות נפרדות בכל אחד מהמינים (איור 5). בכריש העפרורי, נמצאה התאמה לאוכלוסייה שנדגמה בעבר באוקיינוס האינדו-פסיפי (Cobs1) ולאחת נוספת שנדגמה באוקיינוס האטלנטי (Cobs2)[8]. אף על פי שהפרדה דומה זוהתה ע"י מחקר קודם בכריש העפרורי לאורך חופי ישראל באמצעות סמנים גנטיים אחרים[9], זוהי העדות הראשונה לנוכחות חופפת בזמן ובמרחב של אוכלוסיות נפרדות השייכות למין זה באתר ספציפי, לרבות סביבות טבעיות. בכריש הסנפירתן, נמצאה התאמה לאוכלוסייה שנדגמה בעבר בים התיכון, בים

האדום, בצפון מערב האוקיינוס ההודי, ובדרום אפריקה (Cplu1), ולאוכלוסייה נוספת שלא נדגמה בעבר אך שונה גנטית מהראשונה (Cplu2). זוהי העדות הראשונה להימצאות מספר אוכלוסיות נפרדות של הכריש הסנפירתן בים התיכון. המחקר מציג מספר היפותזות לתפוצתם של כרישים באזור ולמגוון הגנטי שהם מציגים, עם היתכנות להגירה לספסית בכל אחד מהמינים. ממצא נוסף באשר להרכב החברתי באתר ההתקבצות היה פיצול זוויגי כמעט מוחלט בין המינים – נקבות של הכריש העפרורי וזכרים של הכריש הסנפירתן; כל הפרטים שנדגמו הציגו אורך גוף גבוה מזה שבו מינים אלה מגיעים לבגרות מינית[8] (איור 6). על סמך נוכחותם של פרטים בוגרים בלבד משני מינים נפרדים, המחקר מצא שתחנת הכוח בחדרה אינה משמשת כאתר אומנה, לידה, או זיווג.



איור 5. קירבה פילוגנטית בקרב האפלוטיפים של הגן cytochrome C oxidase I (COI; 1355 בסיסים) בכרישים שנדגמו בתחנת הכוח אורות רבין. שמות הרצפים כוללים את המספר הסידורי (קטלוג GenBank), מיקום הדיגום (HAD – חדרה; AUS – מזרח אוסטרליה; GoM – מפרץ מקסיקו; ASH – אשדוד; CHN – סין; NA – לא ידוע), זוויג (F – נקבה; M – זכר) או את שם המין (ברצפים ששימשו לייחוס). המספרים בנקודות הפיצול מסמלים את ערך ה-bootstrap באנליזה (מתוך: Bigal et al., 2024)[8].



איור 6 התפלגות אורכי גוף (חוטם עד בסיס הזנב) של כרישים בתחנת הכוח אורות רבין לפי מין וזוויג. הערך מעל כל עמודה מבטא את גודל המדגם. רוחב העמודות מבטא צפיפות kernel בערך ציר ה-y התואם. הגוונים השונים והצורות בכל מין מסמלים את זהות ההאפלוטיפ (עיגולים כהים – Cobs1 ו-Cplu1; מעוינים בהירים – Cobs2 ו-Cplu2; משולשים שחורים – האפלוטיפ לא ידוע). קבוצות שכוללות פרט אחד בלבד (זכרים עפרוריים) הוסרו מהאיור. (מתוך: Bigal et al., 2024)[8].

למרות קיומן של מספר אוכלוסיות נפרדות באתר, ממצאי הטלמטריה האקוסטית הצביעו על חפיפה מלאה בנוכחותן בכל שנות המחקר, עם הופעה ראשונה בחודש נובמבר ואחרונה בחודש מאי, כאשר הממוצע החודשי של טמפרטורות מי הים בסביבה הטבעית שמחוץ להשפעת התחנה נמוך מ-25°C (כפי שכבר הודגם במחקר מקדים[10]). מתוך 58 הפרטים שצוידו במשדר אקוסטי, 17 חזרו לאתר במהלך שנות המחקר, 7 מהכריש העפרורי (6 נקבות וזכר אחד) ו-10 זכרים סנפירתנים. אף על פי כן, מוערך כי מספר הכרישים בהתקבצות הינו יציב ועומד על מספר עשרות. לפיכך, אחוז הפרטים שחזרו מכלל הכרישים שביקרו באתר בכל שנות המחקר הינו קטן. בנוסף, נמצא שהכרישים אינם שוהים בשטח מוצא המים החמים באופן רציף אלא מגיעים ועוזבים בתדירות של מספר ימים. ככלל, נמצאה פעילות גבוהה יותר (צפיפות קריאות אקוסטיות) באופן מובהק בשעות החשכה. ע"פ קריאות העומק ממשדרי הקול, הכרישים עזבו את שטח הכיסוי האקוסטי של מערך המקלטים אשר סביב מוצא המים החמים בשעות היום, אך לא אל העומק בכיוון מערב. הסבר אפשרי הוא שאלה מנצלים את הטמפרטורה החמה של המים הרדודים לאורך החוף בשעות האור ומתקבצים בצפיפות גבוהה יותר בשעות הלילה, קרוב למוצא המים החמים מהתחנה – כאשר טמפרטורת המים הסביבתית יורדת. מסקנה זו עולה בקנה אחד עם תצפיות אנקדוטיות של כרישים במים רדודים במיוחד (< 2 מ') בשעות היום. כמו כן, ניתוח נתוני טמפרטורת הגוף של הכרישים, אשר נמדדת גם היא ע"י המשדרים האקוסטיים, הראה כי השהות במים החמים מאפשרת התחממות מתמשכת במהלך הביקורים באתר ושמירה על חום גוף של כ-2-3°C מעל טמפרטורת המים הסביבתית.

לכאורה, בנוסף למסקנות השלב הראשון של העבודה, לפיהן האתר אינו משמש כאזור אומנה, לידה, הזדווגות, או הזנה, הממצאים מצביעים על משיכה ישירה של הכרישים למים החמים ולא למשאבים אחרים באזור כגון ריכוז גבוה של טרף. בנוסף, הנתונים שנאספו מאפשרים בחינה ופיתוח של השערות נוספות באשר לרווח האנרגטי המופק משהות ארוכת-טווח באתר. לדוגמה:

עיכול מזורז של מזון לאחר סיורי ציד מחוץ לשטח ההתקבצות.

העברת אינפורמציה ותיווך אינטראקציה חברתית כאסטרטגיה לשרידות בתנאים אוליגוטרופיים שמחוץ לשטח התחנה.

ניצול הטמפרטורות החמות של מי הקירור הנפלטים מתחנת הכוח למיטוב הפוריות בכל אחד מהמינים / זוויגים (לרבות נקבות לא הריוניות).

לצורך בחינה של השערות אלה, פרוטוקולי עבודה המנטרים פרמטרים חדשים הוספו לעבודת התיוג לאחר שעברו התאמה למינים הנמצאים באתר. לדוגמה, מחקר נוכחי שעוסק בפוריות הכרישים המשלב בדיקות אולטראסאונד, ומדידות של סטרואידים ספציפיים (תת-קבוצה של הורמוני מין) יעזור לקבוע את השלב במחזור הרבייתי שבו מגיעות הנקבות לאתר. אותן נקבות מתויגות וכך ניתן לעקוב אחר תנועתן מחוץ לאזור ההתקבצות תוך מאמץ לאיתור אזורי הולדה.

השפעת האדם על הכרישים בתחנת הכוח אורות רבין, חדרה

במהלך חודשי החורף, הכרישים מתקבצים באזור שרובו ככולו סובל מלחץ אנתרופוגני משמעותי והפרעות שניתן לחלק לשתי קבוצות שונות – "עקיפות", או "ישירות". לדוגמה, הקבוצה הראשונה כוללת מפעל התפלה שממנו נפלטת תמלחת בשילוב מי קירור לצד מים חמים הנפלטים מתחנת הכוח הפחמית. כמו כן, שפכי ביוב ובריכות דגים מוזרמים ממעלה נחל חדרה ישירות לאזור ההתקבצות. הפרעות ישירות כוללות מספר רב של מבקרים מהים ומהיבשה כמו צוללים, שחיינים ומשנרקלים, חותרי קיאק וגלשן, אופנועי ים וסירות קטנות, וקבוצות של הולכי רגל (להן השפעה מינורית, אם כי אפשרית). כמו כן, מבקרים באתר גם דייגי חכות, שלהם השפעה משמעותית יחסית על הכרישים ועל שאר המשתמשים באתר[11,12].

כאשר בוחנים את העימותים הרבים שנוצרים בהגעת המבקרים, יש לקחת בחשבון כי לא ניתן לבודד את מידת ההשפעה של כל גורם באופן פרטני. קיימות עדויות לכך שתיירות חופית עשויה לגרום עקה לכרישים ולהביא לשינוי התנהגותי[5], אך ייתכן כי באתר ההתקבצות בחדרה, גורמי ההשפעה העקיפה הינם משמעותיים יותר באופן יחסי.

עימותים בין צוללים וכרישים

לצלילה עם כרישים השפעה משמעותית על עמדת בני אדם בנוגע להגנתם ושימור הסביבה הימית ככלל[13]. מבחינת הפגיעה האפשרית של פעילות זו בכרישים, מחקרים שבדקו משמעויות ארוכות-טווח של נוכחות צוללים בסביבתם לא מצאו כל השפעה שלילית[14,15]. לדוגמה, ב-Palmyra Atoll שבצפון האוקיינוס השקט, נבחנה נוכחותם, שפעתם, והתנהגותם של כרישי שונית בשני אתרים דומים – האחד אתר שבו קיימת תיירות צלילה ענפה, והשני אתר שבו הצלילה עם כרישים אסורה. מסקנת המחקר הייתה כי כל עוד קיים ויסות של מספר הצוללים במים וכללי ההתנהגות נשמרים, ניתן לקיים תיירות כרישים ללא חשש מפגיעה ארוכת-טווח בהם או ביעדי השימור. חשוב לציין, כי גישה

זו מייצגת את "הרע במיעוטו", שכן עדיפה תיירות צלילה עם כרישים על פני שימושים הרסניים אחרים. באופן דומה, ממצאי ניטור ההתקבצות בחדרה הראו שהכרישים נמנעו באופן פעיל מקרבה פיזית לצוללים בכל מפגש מקרי – במיוחד פרטים מהמין סנפירתן, בעוד שנקבות הכריש העפרורי הגיבו ברוגע אך נמנעו גם הן מאינטראקציה[5]. אף על פיכן, לא נצפו השפעות ארוכות-טווח על התנהגות הכרישים באתר. בשנים האחרונות, אימצה רשות הטבע והגנים קוד התנהגות (code of conduct) בחדרה כפי שקיים במקומות שונים בעולם. לדוגמה, לטובת ההגנה על כרישי לווייתן (*Rhincodon typus*) הידועים באופיים העדין[16], נדרש בשמורת הטבע Ningaloo Marine Park שאוסטרליה לשמור על מרחק מינימלי של שלושה מטרים מכל פרט ועל נוכחות של עד עשרה צוללים בסביבתם מאז משנת 1996[17], זאת למרות הצעה שונה ומעודכנת שעלתה בשנת 2007 לפיה יש לשמור על מרחק מינימלי של שני אורכי גוף של הכריש[18].

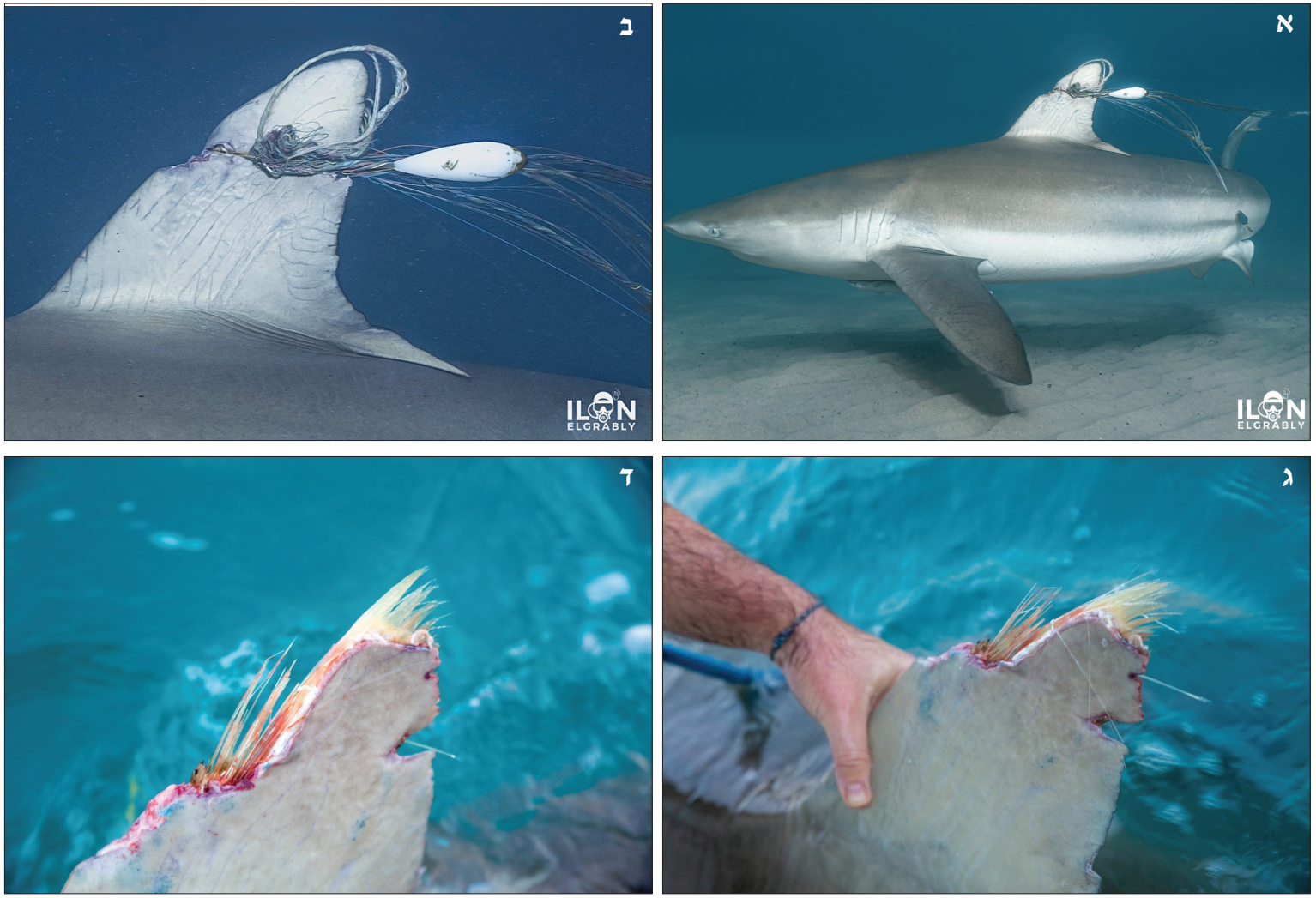
עימותים בין דייגים וכרישים

המחקר ארוך-הטווח בחדרה בחן את יחס דייגי החכות לכרישים, ומצא כי שיטת הניהול "סגירות דינמיות בזמן ובמרחב" (dynamic time-area closures) מאפשרת צמצום זמן החפיפה בין שימושים באתר באופן יעיל – הגנה על הכרישים לצד פגיעה מינימלית בשימוש הדייגים בשטח[11]. לעומת זאת, אי-הפרדה בזמן ובמרחב עלולה לגרום במקרים קיצוניים גם לפציעות חמורות (איור 7) ואף תמותה של הכריש.

הערכת בריאות הכרישים בתחנת הכוח אורות רבין, בחדרה

בשנים האחרונות נבחנו מספר גישות העוזרות להעריך את מצבם הבריאותי של כרישים באזור חופי ישראל. הראשונה – ביצוע נתיחה שלאחר המוות לפרטים שהגיעו מתים לחוף; השנייה, בעלת אופי של ניטור מתמשך – בדיקות דם שגרתיות לכרישים שמגיעים לאזור ההתקבצות. מדדי הדם השונים מהווים סממן מצוין למצב הבריאותי והפיזיולוגי של כל בעל חיים. בשונה מבדיקות דם שנתיות אשר מבוצעות לבני אדם או בדיקות וטרינריות מסוג זה עבור כלבים וחתולים, מחקרים על מדדי בריאות של כרישים בים התיכון כמעט ולא נערכו, ונתונים ביוכימיים והמטולוגיים של מינים רבים אינם ידועים.

כדוגמה לגישה הראשונה, נתיחה שבוצעה ב-2018 לכריש סנפירתן שנצפה גוסס בחוף בנתניה ומת לאחר מספר שעות הצביעה על סימנים החשודים כמחלה כרונית מפושטת[7]. הכריש היה במצב תזונתי ירוד ומספר איברים וביניהם מערכת המין, הכבד והמעיים הראו סימנים חמורים של תהליך דלקתי. בדיקות המעבדה איששו את השערת החוקרים כשזוהה חיידק מסוג *Streptococcus agalactiae* כגורם האחראי לתהליך הדלקתי. חיידק זה נפוץ בבעלי חיים ימיים באזורנו ובעולם והינו חיידק זואונוטי, כלומר, מסוגל לעבור ולגרום מחלה בין מינים, כולל בני אדם. תהליך דלקתי חמור זה הוביל כנראה למותו של הכריש. כדוגמה לגישה השנייה, מחקר עדכני שהתבסס על דגימות דם שנאספו מכרישים באתר ההתקבצות בחדרה (איור 8) היה הראשון שמתאר את מדדי הדם של הכריש העפרורי והסנפירתן בים התיכון[19]. המחקר בדק מדדים דומים לאלה שנמדדו במחקרים אחרים על מיני כרישים קרובים בספרות. יחד עם זאת, בדגימות של מחקר זה, ריכוזי הגלוקוז היו גבוהים יותר, בעוד שריכוזי הכולסטרול ברמות נמוכות יותר מהשוואה



איור 7. נקבה מהמין כריש עפרורי שנלכדה ברשת דיג. א. ו-ב. ציוד הדיג סביב סנפיר הגב של הכרישה; ג. ו-ד. הפציעה שנגרמה לסנפיר הגב כפי שנצפה בלכידתה החוזרת. צילום: א. אלגרבלי, א. שייניין ו ל. ליבנה.

למינים קרובים[19]. מורפולוגיה של תאי הדם של שני המינים המתקבצים בחדרה תאמה לממצאים קודמים עבור מינים קרובים. תוצאות מחקר זה יוכלו לשמש בעתיד כנתוני בסיס/ייחוס להערכת המצב הבריאותי של פרט חולה אשר יגיע לחוף. חשוב לציין כי יש להתייחס לממצאים אלה בזהירות מסוימת מכיוון שהשפעת הלכידה עצמה והתנאים הסביבתיים באזור הלכידה עשויים להשפיע באופן משמעותי על הפיזיולוגיה של הפרט ועל מדדי הדם.

איור 8. לקיחת דם לכרישה עפרורית במהלך המחקר. צילום: חגי נתיב.

מיקרוביום של כרישים

כרישים, כטורפי-על, ממלאים תפקיד אקולוגי חיוני בעיצוב מארג המזון הימי ובשמירה על מערכות אקולוגיות ימיות בריאות ומאוזנות. כרישים רגישים לשינויים סביבתיים וללחץ אנתרופוגני ומפגינים תגובה ברורה ומהירה. כמטא-אורגניזם, הכרישים מציעים נישות סלקטיביות (באיברים השונים) למיקרואורגניזמים שיכולים לספק יתרונות לבע"ח המארח. עם זאת, שינויים במיקרוביוטה (עקב שינויים פיזיולוגיים או סביבתיים) יכולים להפוך את הסימביוזה (יחסי שותפות) לדיסביוזה (יחסים שבהם האחד לא מרוויח והשני לא מרוויח או מפסיד) ועשויים להשפיע על הפיזיולוגיה, החסינות והסביבה של המארח. למרות חשיבות היבט המיקרוביום כחלק אינטגרלי מהאורגניזם, מחקרים מעטים עסקו במיקרוביום של כרישים, ומחקר זה הוא הראשון שנעשה על מיני הכרישים העפרורי והסנפירתן בים התיכון[6]. דוגמאות מיקרוביוטה (איור 9) נאספו משני מיני הכרישים ומשלושה איברים: זימים, עור ופתח המין (קלואקה), לאורך שלוש עונות דיגום (2019-2021). כמו כן נאספו דוגמאות סביבתיות של המים. תוצאות הרכב האוכלוסיות הסימביונטיות של הכרישים הצביעו על פרופיל בקטריאלי ספציפי לכל מין כריש ואיבר, כמו גם שוני משמעותי מסביבת המים. הדיגום שחזר לאורך העונות אִפשר לזהות את הקבוצות הטקסונומיות של החיידקים הקבועות ומהווה את מיקרוביום הליבה, ואת הקבוצות הייחודיות לכל מין כריש/איבר היכולות לשמש כסממנים מיקרוביאליים לנישה הספציפית.

משפחות החיידקים שהיו דומיננטיות עבור שני מיני הכרישים היו Rhodobacteraceae, Flavobacteriaceae, Moraxellaceae. בשנה השלישית של הדיגום, בהסתמך על תוצאות הפרופיל הבקטריאלי, זוהה שינוי בהרכב ובמדדי המגוון של המיקרוביוטה, ועלייה משמעותית בכל הדגימות של הפתוגן הפוטנציאלי *Streptococcus*. הדיסביוזה (חוסר איזון במיקרוביום) שנוצרה התבטאה גם בעלייה בשכיחות של פתוגנים פוטנציאליים נוספים כגון *Photobacterium* ו-*Vibrio*. הופעת פתוגנים אלה ביחד עם *Streptococcus* תוארה גם בעבר בסקרי דגי בר בים התיכון[20]. בנוסף, נצפתה גם עלייה בחיידקים סמביונטים (*Pseudomonas, Pseudoalteromonas*), הידועים כתורמים לבריאות המארח בהתמודדות עם פצעים או פתוגנים שייתכן שנבעה כתגובה לעליית הפתוגנים הפוטנציאליים. בחינה של הרכב המיקרוביטה בסביבת המים הראתה תוצאה דומה, עלייה משמעותית בשפע היחסי של *Streptococcus* בעונה השלישית ביחס לעונות הקודמות, ואף חפיפה בהתאמה למגמת העלייה והירידה לאורך חודשי הדיגום לשפע היחסי בכרישים. מיני *Streptococcus* נפוצים בסביבות שונות (כולל סביבות מים מתוקים ומי ים) ובאורגניזמים שונים – בריאים או חולים. בהשוואה של הרצף הדומיננטי של *Streptococcus* שהתקבל בדגימות לבין מסד נתונים, נראה כי הרצף שזוהה היה קרוב יותר מבחינה פילוגנטית לרצפים שבודדו מאורגניזמים יבשתיים, מה שמוביל להנחה שמקור החיידק עשוי להיות משפך נחל החדרה, הנחשב מזוהם, או מהפעילות האנתרופגנית העמוסה באזור זה. ניטור המיקרוביום, במיוחד במחקר ארוך-הטווח, יכול להצביע על שינויים ואירועים סביבתיים ועשוי לסייע בזיהוי סוג האירוע (כגון זיהום ספציפי) ומקורו. בנוסף, מחקרים ומדדים נוספים של הכרישים (כגון דם, הורמונים ומצב פיזיולוגי) שינותחו במקביל למיקרוביום יאפשרו הבנה מעמיקה יותר של שינויים פיזיולוגיים ויתמכו בהבנת המטא-אורגניזם.

איור 9. דגימת מיקרוביום מהזימים של כרישה עפרורית בחדרה. צילום: א. שייניין.

הסכנה והשמירה מהכרישים

לצד העניין המדעי הגובר בתופעת ההתקבצות בחדרה, נרשמה בשנים האחרונות עלייה במספר המבקרים שפוקדים את האתר במהלך חודשי החורף - לרבות שחיינים, צוללים, דייגים, כלי שיט ממונעים וחותרי קיאק או גלשן. כתוצאה מהעומס באתר, גבר החשש לבטיחות המבקרים כמו גם לכרישים עצמם, אשר מוגדרים כערך טבע מוגן בישראל. כדי לתת מענה לסוגייה זו, קמו מספר יוזמות שונות לתיאום השימושים בשטח ולקידום חקיקה ופיקוח. אף על פי כן, ההסדרה החוקית של השטח הינה מורכבת עקב ריבוי שימושים וכפיפותם לחוקים נפרדים. לדוגמה, בעוד שחוף נחל חדרה הינו אסור לרחצה, מגבלה זו אינה חלה על צלילת מכלים. כמו כן, קיימת חפיפה בין רשויות שונות בשטח בכל הנוגע לאכיפת הכניסה למים, ההגנה על הכרישים, ותנועת כלי שיט (ע"י עיריית חדרה, רשות הטבע והגנים, והמשטרה הימית, בהתאמה). לצד היעדר המשילות והעלייה במודעות הציבורית לנגישות הכרישים במים הרדודים, גברה לאורך השנים גם תחושת ביטחון כי הם אינם מהווים סכנה לבני אדם, והתנהגויות בלתי הולמות כגון רדיפה ע"י שחיינים,

נגיעה, או חסימה פיזית של הכרישים בשטח הפכו תדירות. בתאריך 21.04.2025, תועד באתר מותו של שחיין באזור הזרם החם לאחר נשיכות כריש בפני המים. התקרית צולמה ע"י מבקרים ששהו בחוף נחל חדרה ושותפה בתפוצה רחבה ברשתות החברתיות ובחדשות. על סמך גודל הכרישים שתועדו בקרבת השחיין בעת מצוקתו, ניתן להסיק שלפחות אחד מהפרטים המעורבים היה מהמין כריש עפרורי, אם כי לא ניתן לשלול את מעורבותם גם של פרטים מהמין סנפירתן. זהו התיעוד הראשון בעולם של מקרה מוות כתוצאה של נשיכת כרישים ממינים אלה[21]. יש לפעול להסדרת השמירה על בני האדם והכרישים.

סיכום

כרישי הסנפירתן והעפרורי נפוצים לאורך חופי ישראל ומתקבצים בסביבת תשתיות, כגון חוות דגים, אסדות גז ותחנות כוח. התקבצותם העונתית במוצא המים החמים של תחנת הכוח אורות רבין בחדרה מאפשרת נגישות נדירה בים התיכון לביצוע מחקרים אקולוגיים וגנטיים חשובים.

מטרות המחקר היו: הבנת דפוסי ההתקבצות במוצא המים החמים של תחנת הכוח אורות רבין בחדרה ובחינת השפעת האדם.

ממצאים עיקריים:

- **קישוריות גיאוגרפית:** אפיון גנטי מצביע על קישוריות בין הים התיכון לאוקיינוסים האטלנטי וההודי, המעידה על מסלולי נדידה אפשריים.
- **אקולוגיה ודינמיקה:** התקבצות הכרישים אינה משמשת כאזור אומנה, הולדה, הזדווגות, או הזנה, אלא נובעת ממשיכה ישירה לטמפרטורה החמה של המים.
- **השפעת האדם:** השפעות ישירות ועקיפות של האדם על אוכלוסיות הכרישים כוללות זיהום מים, פגיעה מדיג אינטנסיבי וחדירת גורמי תחלואה יבשתיים לסביבה הימית.
- **מיקרוביום:** אפיון המיקרוביום של הכרישים וסביבתם מסייע בהבנת השפעות האדם על מצבם הפיזיולוגי וההתנהגותי.

המלצות:

- **ניטור מתמשך:** יש להמשיך במעקב אחר המאפיינים הביולוגיים והאקולוגיים של הכרישים, כולל גורמי סיכון, סריקות אולטראסאונד ומדידות של הורמוני רבייה.
- **הפחתת גורמי סיכון לכרישים:** עצירה זמנית של הדיג באתר בתקופת התקבצות הכרישים באתר, שמירה על נחל חדרה נקי מזיהום, וניהול מקיים של פעילות ימית באתר – צלילה, שחייה ושיט.
- **שיתוף פעולה מחקרי:** עידוד תחומי מחקר נוספים לשימוש בכלים הקיימים ולחיבור לתשתית הניטור מתוך ראייה הוליסטית של המערכת.

המחקר מצביע על כך שמוצא המים החמים של תחנת הכוח אורות רבין בחדרה מספק בית גידול ייחודי עבור הכריש העפרורי והכריש הסנפירתן, במיוחד בעונות החורף. המשך המחקר ויישום תוכנית ניהול אזורית לשימורם יאפשרו הגברת המודעות למצבם של הכרישים ולשמירה עליהם לאורך חופי ישראל ובמזרח הים התיכון.

רשימת מקורות

1. Skomal, G. B. & Mandelman, J. W. The physiological response to anthropogenic stressors in marine elasmobranch fishes: a review with a focus on the secondary response. *Comp. Biochem. Physiol., Part A Mol. Integr. Physiol.* ***162***, 146–155 (2012).
2. דרום, ד. וברנס, א. הכריש. הוצאת מסדה. 114 עמ' (1980).
3. Golani, D. An updated checklist of the Mediterranean fishes of Israel, with illustrations of recently recorded species and delineation of Lessepsian migrants. *Zootaxa* **4956**, 1–108 (2021).
4. IUCN. 2024. The IUCN red list of threatened species. Version 2024-1. https://www.iucnredlist.org. Accessed on 01.09.2024.
5. Zemah Shamir, *et al.* Shark aggregation and tourism: opportunities and challenges of an emerging phenomenon. *Int. J. Sustainable Dev. World Ecol.* **26**, 406–414 (2019).
6. Bregman, G., *et al.* Preliminary study of shark microbiota at a unique mix-species shark aggregation site, in the Eastern Mediterranean Sea. *Front. Microbiol.* **14**, 1146783 (2023).
7. Morick D., *et al.* Fatal Infection in a Wild Sandbar Shark (Carcharhinus plumbeus), Caused by Streptococcus agalactiae, Type Ia-ST7. *Animals* **10**, 284 (2020).
8. Bigal, E., *et al.* Shark shuffle: segregated co-occurrence of multiple dusky and sandbar lineages at a human-altered habitat in the eastern Mediterranean Sea. *Sci Rep.* **14**, 3452 (2024).
9. Barash, A. *Species Identification, Phylogeography and Spatio-Temporal Distribution of Requiem Sharks (Genus Carcharhinus) Along the Israeli Mediterranean Coast*. Doctoral dissertation, University of Haifa, Israel (2014).
10. Barash, A. *et al.* Some Like It Hot: investigating thermoregulatory behavior of carcharhinid sharks in a natural environment with artificially elevated temperatures. *Fish. Sahul* **8**, 212–222 (2023).
11. Zemah-Shamir, S., *et al.* Comparing spatial management tools to protect highly migratory shark species in the Eastern Mediterranean Sea hot spots. *J. Environ. Manage.* **337**, (2023).
12. Zemah-Shamir, Z., *et al.* Preliminary insights of a mixed-species shark aggregation: a case study of two carcharhinids from the Mediterranean Sea. *Environ. Biol. Fishes* **105**, 987–998 (2022).
13. Carmi, N., *et al.* Shattering negative stigmas and creating empathy and willingness to advocate for unpopular endangered species: evidence from shark watching in Israel. Ann. Leis. Res. (2022).
14. Zemah-Shamir, Z. The human–wildlife conflict as a global challenge: Anthropogenic factors affecting shark behavior and physiology. Winter aggregation of sharks at Hadera as a case study. Doctoral dissertation, University of Haifa, Israel (2021).
15. Bradley, D., Papastamatiou, Y. P. & Caselle, J. E. No persistent behavioural effects of SCUBA diving on reef sharks. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **567**, 173-184 (2017).

16. Hacohen-Domené, A., *et al.* Habitat suitability and environmental factors affecting whale shark (Rhincodon typus) aggregations in the Mexican Caribbean. *Environ. Biol. Fishes.* **98**, 1121–1134 (2015).
17. Davis, D. Whale shark tourism in Ningaloo Marine Park, Australia. Anthrozoös, **11** (1998).
18. Martin, R. A. A review of shark agonistic displays: comparison of display features and implications for shark–human interactions. *Mar. Freshw. Behav. Physiol.* **40**, 85–101 (2007).
19. Starostinetsky-Malonek, T., *et al.* First report on the serum chemistry and haematology of free-ranging dusky (Carcharhinus obscurus) and sandbar (Carcharhinus plumbeus) sharks in the eastern Mediterranean Sea. *Conserv. Physiol.* **11**, coaa137 (2023).
20. Meron, D., *et al.* Specific pathogens and microbial abundance within liver and kidney tissues of wild marine fish from the Eastern Mediterranean Sea. *Microb. Biotechnol.* **13**, (2020).
21. Bigal, E., Livne, L., Zemah-Shamir, Z, Morick, D., Einbinder, S., Tchernov, D. & Scheinin, A. Fatal shark incident in the eastern Mediterranean Sea highlights urgent need for enhanced management measures. *Ocean & Coastal Management* (*In review*, 2025).

35 דגי הים התיכון ושאלת השפעת דיג המכמורת על הסביבה הימית

דני גולני

המחלקה לאקולוגיה, אבולוציה והתנהגות ואוספי הטבע הלאומיים, האוניברסיטה העברית בירושלים

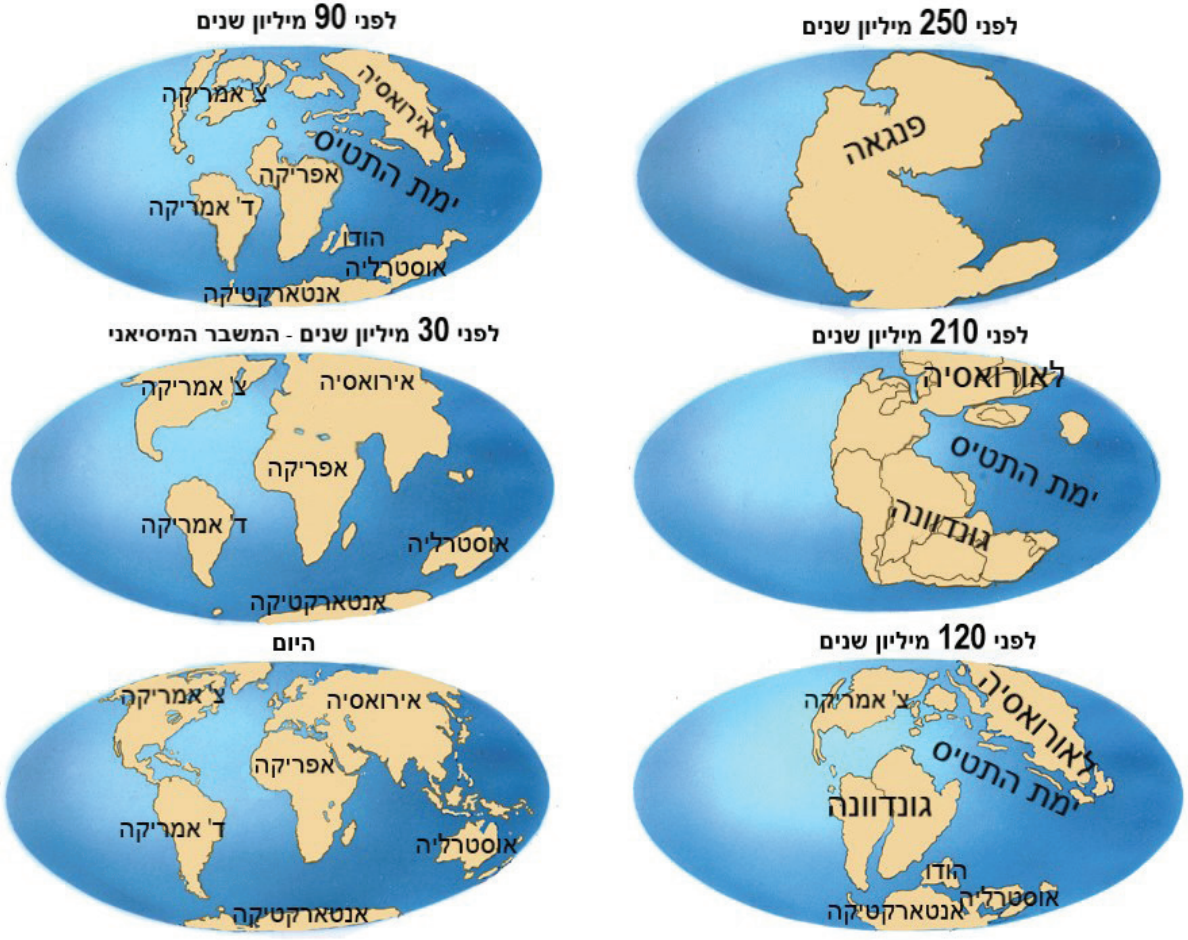
dani.golani@mail.huji.ac.il

תקציר

הרכב פאונת הדגים של הים התיכון נקבע על-ידי שלושה גורמים עיקריים: העבר הגיאולוגי והיווצרות הים התיכון, האקלים והשפעת האדם. מוצאם של מרבית המינים הוא מהאוקיינוס האטלנטי, מינים שחדרו דרך מיצר גיברלטר שמספרם הולך ופוחת לכיוון מזרח ודרום עם העלייה בטמפרטורת מי הים. מנגד, ישנם המינים שחדרו מים סוף דרך תעלת סואץ שמספרם מגיע לכ-120 מינים באגן המזרחי אך הולך ופוחת בכיוון מערב, כשנכון להיום, שלושה מינים הגיעו עד מיצר גיברלטר. חדירת המינים הים סופיים העשירה באופן ניכר את מגוון מיני הדגים במזרח הים התיכון: אחדים מיסדו אוכלוסיות ענק והשפעתם רבה על המערכת האקולוגית בים התיכון. מחקרים השוואתיים על מגוון הטפילים באוכלוסיות המהגרים בים התיכון ושל אוכלוסיות המקור בים סוף הראו שהמהגרים נפטרו מחלק מהטפילים הים סופיים שלהם שלא הצליחו להתבסס בסביבה החדשה יחד עם מאכסניהם, אך לעומת זאת הדגים המהגרים רכשו טפילים ים תיכוניים מקומיים שלא נפגשו מעודם עם אותם מיני דגים. מחקר ארוך שנים מראה שהשפעתו של דיג המכמורת הישראלי על המערכת האקולוגית הימית הוא מזערי, אם בכלל. מאמץ הדיג היה קבוע עם יציבות של גובה שלל הדיג בארבעת העשורים האחרונים, מה שסותר את הטענות על נזק סביבתי בלתי הפיך של דיג המכמורת בישראל.

הפרמטרים הקובעים את פאונת דגי הים התיכון

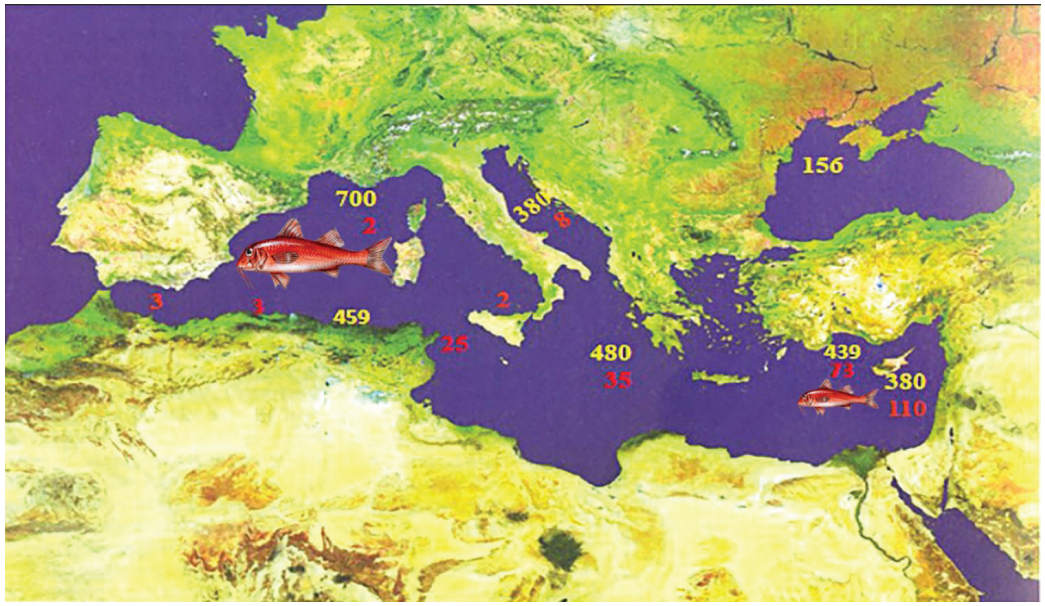
העיצוב והמבנה של פאונת דגי הים התיכון נקבעים על-ידי מספר גורמים. גורם חשוב הוא העבר הגיאולוגי והיווצרות הים התיכון כתוצאה מנדידת היבשות (continental drift). עד לפני כ-250 מיליון שנים הייתה על פני כדור הארץ יבשת-על גדולה פנגאה (Pangaea) שבמשך כ-50 מיליון שנים התפצלה לשתי יבשות-על, הצפונית לאוראסיה (Laurasia) והדרומית גונדוונה (Gondwana) כשבינן הולכת ונפערת ימת התטיס, שהיא ראשיתו של הים התיכון. ימת התטיס הלכה והתרחבה והגיעה לשיא גודלה בתקופת המיוקן לפני כ-70 מיליון שנים. ב-35 מיליון השנים הבאות הלכה והצטמקה ימת התטיס עד להתייבשותה המוחלטת תוך השמדת מרבית הפאונה והפלורה שהיו בה (איור 1). לפי מדענים אחדים נותרו מספר אזורי מפלט של גופי מים שבהם שרד חלק זעיר של החי והצומח שחיו בימת התטיס. בתקופת הפליוקן, לפני 5.33 מיליון שנים, נפרץ מיצר הגיברלטר. עם כניסת מי האוקיינוס האטלנטי לים התיכון הקדום חדרו עמם בעלי החיים וביניהם הדגים שהיו בעיקרם דגי מים קרים. חיבור מאוחר יותר למערכת האוקיינוסים הכללית היה עם חפירת תעלת סואץ וחיבור הים התיכון לים סוף והאוקיינוס ההודי. מבחינה הידרוגרפית לא היה לחיבור זה השפעה מורגשת על הים התיכון אולם מבחינה ביולוגית הוא שינה את מבנה הפאונה במזרח הים התיכון[1,2].



איור 1. נדידת היבשות ויצירת הים התיכון. איור: טוביה קורץ.

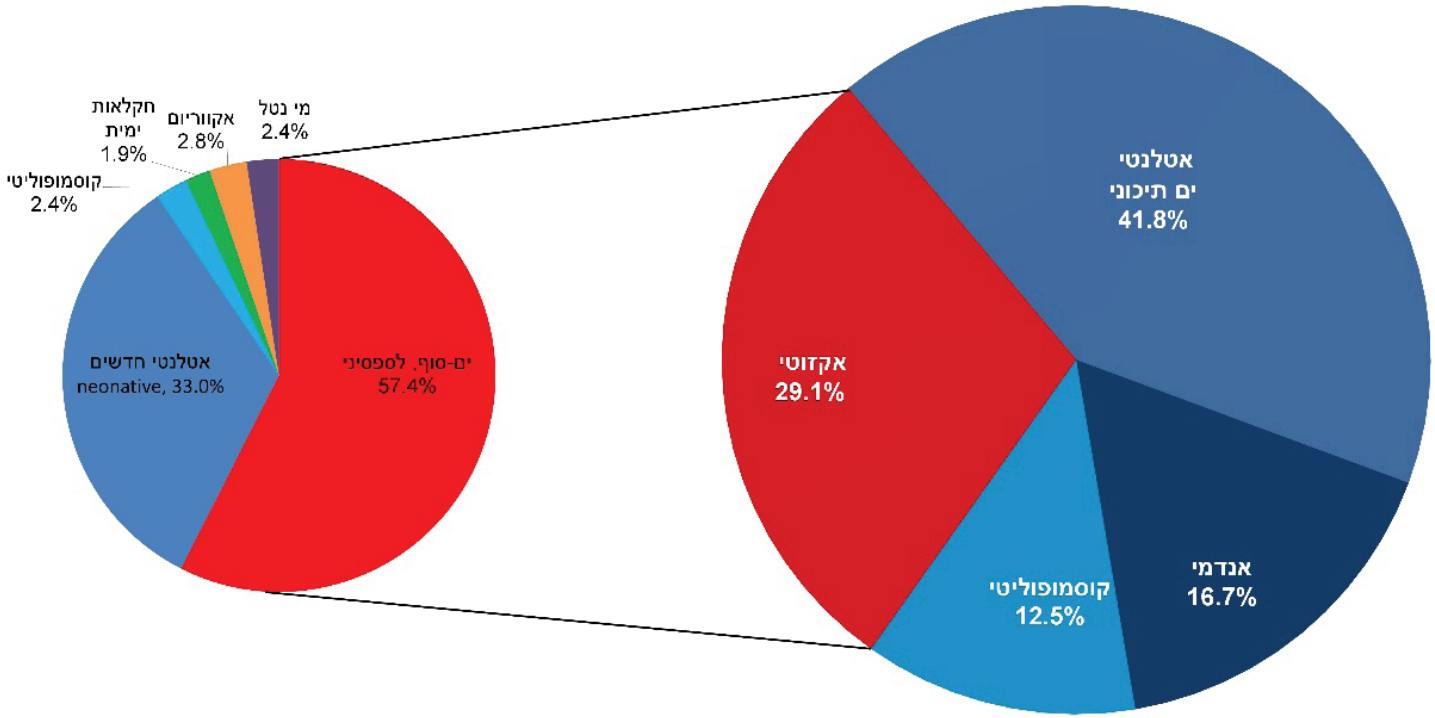
גורם נוסף הקובע את פיזור המינים ושיפעתם הוא האקלים והסביבה הפיזיקלית ובמידה פחותה גם הסביבה הכימית (גרדיינט המליחות). הגורם החשוב ביותר לאורך הים התיכון הוא גרדיינט הטמפרטורות ההולכות ומתחממות עם המעבר מזרחה ודרומה. כתוצאה מכך מספר המינים המקוריים (indigenous) שמקורם במים קרים ואינם מסוגלים לשרוד בטמפרטורות גבוהות הולך ופוחת עם המעבר מזרחה ובאופן חד יותר לכיוון דרום[3]. בנוסף לכך המינים המקוריים שמצליחים לחיות באזורים שאינם המיטביים (suboptimal) עבורם, כגון המולית האדומה (Mullus barbatus) או הבקלה הים תיכונית (Merluccius merluccius) הם קטנים בגופם בהשוואה לבני מינם במערב הים התיכון ובאוקיינוס האטלנטי. תופעה זאת מוכרת בשם גמדות מזרח ים-תיכונית (Eastern Mediterranean Nanism).

עם זאת באוכלוסיות מהאגן המזרחי של הים התיכון הדגים מגיעים לבגרות מינית מהר יותר ובגודל גוף קטן יותר[4] (איור 2).



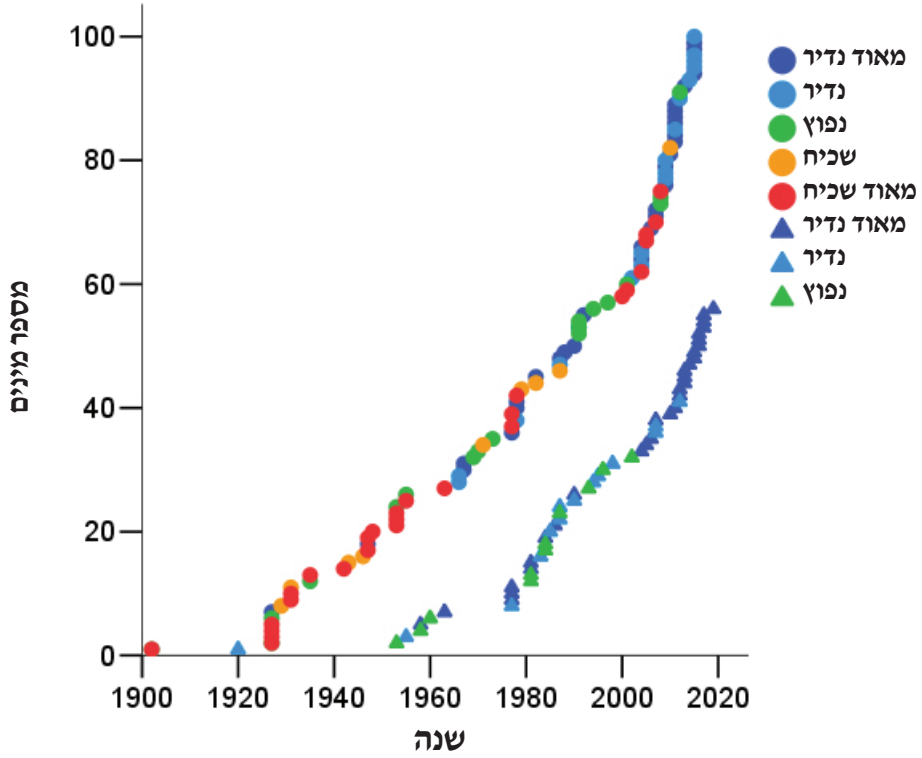
איור 2. מספר מיני הדגים בחלקיו של הים התיכון. בצהוב – מינים מקומיים (indigenous), באדום – מינים לספסיינים. תופעת הגמדות המזרח ים תיכונית מוצגת על-ידי דג גדול במערב ודג קטן מאותו המין במזרח.

הגורם השלישי הקובע את הרכב מיני הדגים בים התיכון הוא פעילות האדם על-ידי החדרת מינים זרים (מינים אקזוטים)[7,6,5]. באיור 3 מוצג בעיגול הימני שיעור מיני הדגים בים התיכון לפי מוצאם. בצפון האגן המערבי, שבו שולטות טמפרטורות נמוכות, מצויים כ-700 מינים. עם ההתחממות ההדרגתית של הים בכיוון מזרח ודרום הולך ופוחת מספר המינים המקוריים באופן הדרגתי לכיוון מזרח ובאופן חד עוד יותר בכיוון דרום. בשלושת החלקים המופיעים בגווני כחול מיוצגים 71% מינים מקוריים ממוצא אטלנטי שמתחלקים ביניהם לשלוש קבוצות: א. למינים הנפוצים באוקיינוס האטלנטי, ב. מינים אנדמיים הנמצאים רק בים התיכון וג. מינים קוסמופוליטיים המצויים בכל מערכות האוקיינוסים[8,9]. מינים אקזוטיים מהווים 29% מדגי הים התיכון. העיגול השמאלי מציג את פירוט מוצאם של המינים האקזוטיים. למעלה ממחצית ממינים אלה מוצאם מים סוף, מינים שחדרו לים התיכון דרך תעלת סואץ בתהליך הנקרא הגירה לספסיינית (Lessepsian migration). מרביתם התנחלו בהצלחה במקומם החדש והקימו בים התיכון אוכלוסיות בנות-קיימה. חלק נוסף שהכללתו כמינים אקזוטיים נתונה לוויכוח אלה מינים ממוצא אטלנטי שחדרו לים התיכון לאחרונה. הם בעצם מקיימים תהליך שהחל לפני 5.33 מיליון שנים. אולם, חוקרים רבים מתייחסים אליהם כמהגרים חדשים ומכנים אותם neonatives. שאר המקורות של מינים אקזוטיים, מי נטל (ballast water), פליטי אקווריום, ופליטי חקלאות ימית, מהווים אחוזים בודדים.



איור 3. התפלגות אחוז מיני הדגים בים התיכון לפי המוצא הזואוגיאוגרפי (עיגול ימני) והתפלגות אחוז המינים האקזוטיים לפי מקורם (עיגול שמאלי).

מגמת ההתפשטות וההתבססות של המהגרים הלספסיינים שונה וברורה לעומת "המהגרים" החדשים מהאוקיינוס האטלנטי (neonatives). הפולשים מים סוף בדרך כלל מייסדים אוכלוסיות בנות-קיימה בביתם החדש. לדוגמה, החלילון החלק (*Fistularia commersonii*), שפמית ארסית (*Plotosus lineatus*) ולגינון מוארך (*Lagocephalus sceleratus*) יצרו אוכלוסיות ענק והתפשטו מערבה בים התיכון. לעומתם, ה"מהגרים" החדשים מהאוקיינוס האטלנטי דווחו לרוב מפרטים בודדים, ואין עדות ליצירת אוכלוסיות מקומיות. יוצאים מכלל זה היו המורנה האטלנטית (*Enchelycore anatina*) ונפוחית העומק (*Sphoeroides pachygaster*) שהם מינים טרופיים באוקיינוס האטלנטי שהגיעו למזרח הים התיכון החם ומיסדו שם אוכלוסיות קבועות, אם כי לא גדולות[5].



איור 4. מספר המינים המצטבר של המינים הלספסיינים (עיגולים) ושל המינים ממקור אטלנטי (משולשים) לאורך השנים ומידת הנפיצות (abundance) העכשווית שלהם בים התיכון. (מתוך[5,3]).

הגירה לספסיינית - דגי ים סוף בים התיכון

בשנת 1869 נפתחה תעלת סואץ שמחברת את הים התיכון עם ים סוף. התעלה הינה מעין נימה דקה שאורכה כ-163 ק"מ מהעיר סואץ שבדרום ועד פורט סעיד בצפון. בדרכה עוברת התעלה דרך שני האגמים המרים, שמליחותם הייתה כפולה ממליחות הים בזמן חפירת התעלה, וכן דרך אגם תמסח שבו היו תנודות גבוהות של מליחות כתוצאה מהזרוע הפלוסית, שהייתה מחוברת לנילוס והביאה לזרימות עונתיות של מים מתוקים לאגם.

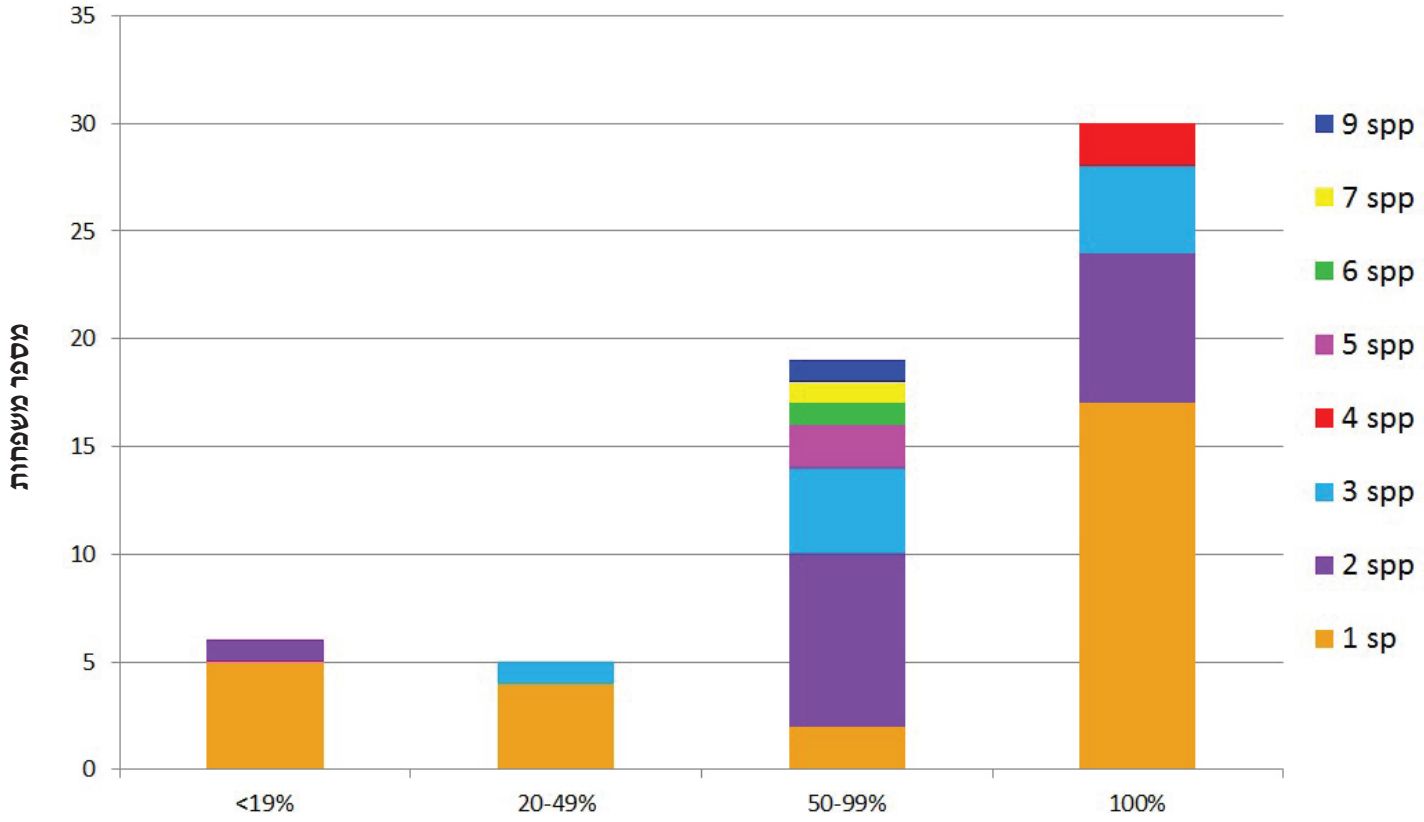
עד כריית התעלה היה עולם החי והצומח בשני הימים שונה לחלוטין, לא היו בהם כמעט מינים משותפים. מקור בעלי החיים והצומח בים התיכון היה מהאוקיינוס האטלנטי הממוזג ואילו של ים סוף הגיעו מהאוקיינוס ההודי, בעל התנאים הטרופיים. פתיחת התעלה הובילה להגירה כמעט חד-סיטרית מים סוף לים התיכון וכללה את כל קבוצות בעלי החיים העיקריות: סרטנים, תולעים, רכיכות, חוריריות (Foraminifera) איצטלנים ודגים. ההגירה החד-סיטרית נקראת הגירה לספסיינית על שמו של פרדיננד דה-לספס (Ferdinand de Lesseps) שהיה דיפלומט ואדריכל צרפתי והיווה

את הדמות המרכזית במיזם חפירת התעלה[10].

שיעור ההגירה של כל קבוצות בעלי החיים הלך והתעצם עם השנים. לדוגמה, בין הדגים עברו כ-30 מינים מים סוף לים התיכון במאה השנים שלאחר פתיחת התעלה[10,11], בעוד שב-70 השנים הבאות עלה המספר לכ-120 מינים שהם כרבע ממיני הדגים במזרח הים התיכון . [3]אולם חשיבות המהגרים הלספסיינים אינה באה לידי ביטוי רק במספר המינים, אלא בעיקר בעובדה שחלק ניכר מהמינים ביססו אוכלוסיות גדולות במקומן החדש והביאו לשינוי קיצוני במערכת האקולוגית של מזרח הים התיכון.

מחקר ההגירה הלספסיינית של דגים נהנה מיתרון שאינו קיים במחקרים דומים העוסקים במרבית קבוצות בעלי החיים הימיים האחרות וזאת תודות לדיג המסחרי ש"דוגם" את אוכלוסיות הדגים במספרים גבוהים ולאורך שנים רבות. בעזרת שלל הדיג ניתן לעקוב אחר הדינמיקה של אוכלוסיות הדגים הכוללת עליות וירידות בנפיצותן. בין חובבי הטבע והחוקרים חלוקות הדעות האם תופעת ההגירה הינה חיובית או שלילית. יש הטוענים שההגירה היא שלילית ומזיקה היות שהמהגרים מים סוף מתחרים במינים המקומיים על משאבי הסביבה ובמקרים רבים הם דוחקים אותם מבית הגידול[12, 13]. לפיכך הוצעו מספר אמצעים שאמורים לעצור או לעכב את ההגירה כגון העברת צינורות בעלי נקבים רבים לרוחב התעלה ועל-ידי הזרמת אוויר דרכם ליצור מעין מסך בועות. אמצעי אחר שהוצע היה ליצור קטע-מחסום בעל מליחות שלא יאפשר לחצותו. מנגד יש הטוענים שלמהגרים השפעה חיובית בכך שהם תורמים תרומה רבה לדיג המסחרי[14] וכן, שבניגוד למקומות רבים בעולם, ההגירה הלספסיינית מעלה את מגוון המינים (biodiversity) באזור.

איור 5 מציג את תרומת המהגרים הלספסיינים למגוון המינים בים התיכון. באיור זה חולקו משפחות הדגים בים התיכון לפי האחוז של מספר המינים הלספסיינים מתוך כלל המינים במשפחתם הים תיכונית. בעמודה הימנית מופיעות 30 משפחות שבהן כל המינים במשפחה בים התיכון הם מהגרים ים סופיים. מתוכן, בעשר משפחות שלא היו קיימות בים התיכון יש רק מין אחד, כגון משפחת הגרזנוניים (Pempheridae) עם המין גרזנון הכוכים (*Pempheris rhomboidea*), או משפחת השפמיתיים (Plotosidae) עם המין שפמית ארסית (*Plotosus lineatus*), וכן שמונה משפחות שבהן שני מינים כגון החלילוניים (Fistularidae) עם חלילון חלק (*Fistularia commersonii*) וחלילון זיפני (*Fistularia petimba*). בעמודה השנייה מימין מהווים המינים הלספסיינים מחצית או יותר מבני משפחתם בים התיכון. לדוגמה במשפחת המוליתיים (Mullidae) קיימים חמישה מינים בים התיכון מתוכם שלושה, אופון זהוב-פס (*Upeneus moluccensis*), אופון פור (Upeneus pori) ובינתן פורסקל (*Parupeneus forsskali*), הם מהגרים לספסיינים המהווים 60% מהמינים. העמודה בצד שמאל מייצגת משפחות בים התיכון שבהן המין הלספסייני מהווה פחות מ-19%. כלומר המינים הים סופיים התווספו למשפחה שמלכתחילה הייתה מרובת מינים מקומיים, לפחות חמישה מינים.



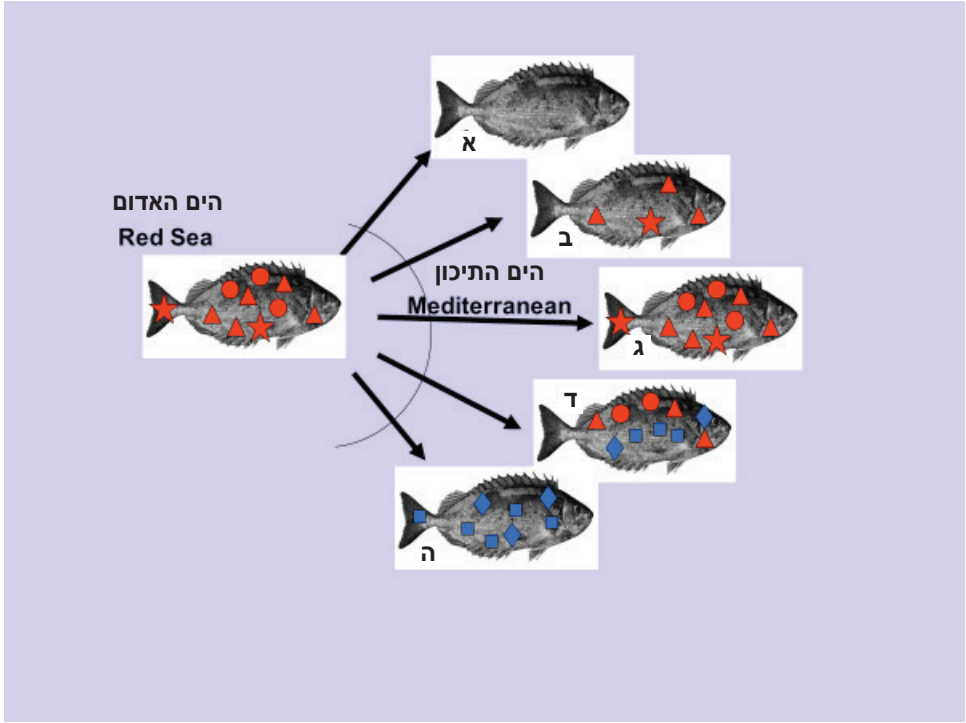
איור 5. אחוז המינים הלספיסנים במשפחותיהם בים התיכון.

עד שנות ה-70 של המאה הקודמת רוב המינים הים סופיים שחדרו לים התיכון היו בעלי אורח חיים דומה, הם אכלסו בתי גידול קרקעיים פתוחים, חוליים או בוציים, עד לעומק של כ-100 מטר. מסוף המאה הקודמת ובשני העשורים הראשונים של המאה הנוכחית, המתנחלים מים סוף הכפילו את עומק תפוצתם ובמפתיע, מינים שתפוצתם המקורית הייתה בצמוד לשונית האלמוגים, פלשו לים התיכון הנטול שוניות אלמוגים[1]. המפתיעים ביותר היו שלושה מינים ממשפחת הקברנוניים (Gobiidae) המוצגים באיור 6: סרטנון עינוני (*Cryptocentrus coeruleopunctatus*)[15], סרטנון שטיינהרד (*Cryptocentrus steihnardti*)[16] וגלילן עינוני (*Vanderhorstia mertensi*)[17], כולם דגים קטנים צמודי-קרקע החיים בים סוף בשיתוף פעולה סימביוטי עם סרטנים. בים התיכון הם יצרו שיתופי פעולה עם מיני סרטנים מקומיים, לרוב מהסוג נקשן (*Alpheus*), וכך התאימו את עצמם לאורח חיים בסביבה שהייתה חדשה עבורם.

איור 6. מינים לספסיינים ממשפחת הקברנוניים החיים בשיתוף פעולה עם סרטנים ים-תיכוניים. גלילן עינוני (ימין), צילום: Murat Draman. וסרטנון עינוני (שמאל). צילום: אורן קליין.

חקר טפילי דגים

תרומה רבה לחקר ההגירה הלספסיינית והשפעתה על הסביבה הימית בים התיכון היה מחקר השוואתי של הפרזיטופאונה (חקר הטפילים) של אוכלוסיות המקור בים סוף עם אוכלוסיות המהגרים בים התיכון של שני מיני דגי הסיכן (Siganidae)[18,19] איור 7 מציג את חמשת התרחישים האפשריים: A- אוכלוסיית המהגרים נפטרה מכל הטפילים הים סופיים שלא עמדו בתנאים החדשים, B- אוכלוסיית המהגרים נפטרה רק מחלק מהטפילים הים סופיים, C- אוכלוסיית המהגרים עברה עם כל הטפילים מים סוף לים התיכון, D- אוכלוסיית המהגרים עברה עם חלק מטפילי ים סוף אך רכשה גם טפילים ים תיכוניים, E- אוכלוסיית המהגרים נפטרה מכל הטפילים הים סופיים ובו בזמן רכשה טפילים ים תיכוניים (איור 7). ממצאיו של פרופ' דיאמנט הראו שתרחיש D הוא זה שקרה בפועל, כלומר שהדגים המהגרים רכשו טפילים ים תיכוניים[19]. המחקרים הראו שהקשר טפיל-מאכסן שבמקרים רבים הוא ספציפי (species specific) ייצר מצב של "דלדול טפילים" בדגים המהגרים, כיוון שאלה "הותירו מאחור" חלק משמעותי מטפיליהם. אולם הסתבר שמיני טפילים מקומיים בים התיכון "התעשתו ולמדו" תוך זמן קצר להיטפל למינים מהגרים שאותם לא פגשו עד חדירתם לים התיכון.



איור 7. התרחישים האפשריים של מעבר טפילים ים סופיים ורכישת טפילים ים תיכוניים. תגים אדומים – מגוון טפילים ים סופיים, תגים כחולים – מגוון טפילים ים תיכוניים (מתוך [19]).

ממצאי המחקר ההשוואתי של הפרזיטופאונה בין שני הימים[18] נתנו תשובה לשאלה נוספת: האם הדגים המהגרים חוצים את תעלת סואץ בשחייה או שההגירה מתבצעת באמצעות פגיות (לארוות) או ביצים הנסחפות בזרמים לעבר הים התיכון? הימצאות חלק מהטפילים הים סופיים בגופם של המהגרים הבהירה שלפחות חלק מאוכלוסיית המתנחלים עברו את התעלה בשחייה כדגים בוגרים שנשאו עמם את הטפילים מים סוף.

הדיג בישראל

מבחינה אדמיניסטרטיבית ניהול ממשק הדיג מתחלק לדיג מסחרי ודיג חובבים, המכונה גם "דיג ספורטיבי". הדיג המסחרי מתחלק לשלושה ענפים: 1. דיג חופי שהוא עצמו מתחלק לשניים, רשתות העמידה (אמבטן) ומערכי חכות (שאראק), 2. רשתות הקפה (צ'ינצ'ולה), 3. מכמורת (trawl). לתיאור שיטות הדיג, ראה [21,20].

השפעת הדיג על אוכלוסיות הדגים והסביבה הימית עומדת במרכזם של מספר מחקרים[25-21,14].

בשנים האחרונות בולט במיוחד הוויכוח הציבורי שעסק בדיג המכמורת והשפעתו על אוכלוסיות הדגים והמערכת האקולוגית של מזרח הים התיכון.

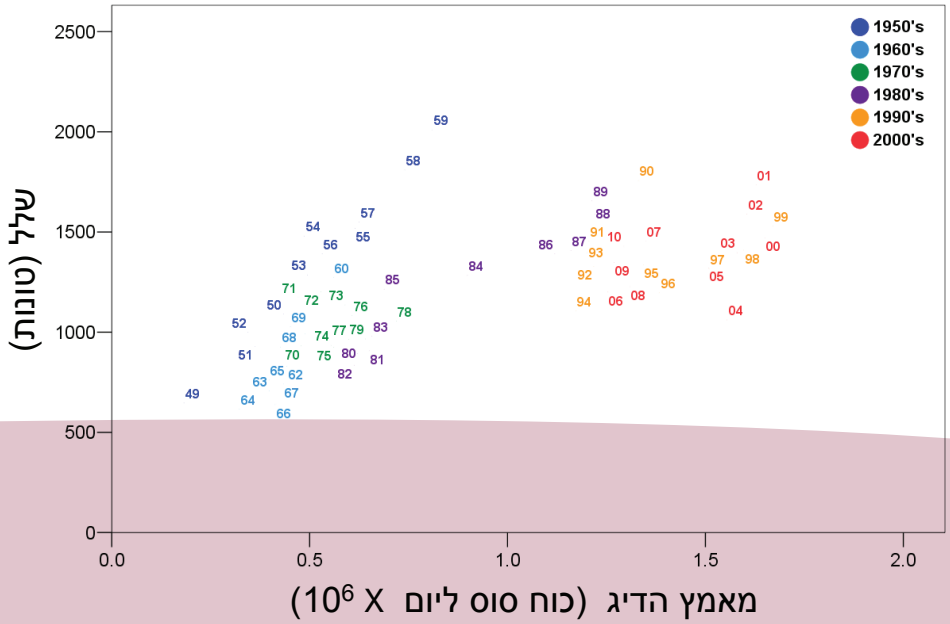
דיג המכמורת הישראלי - הכצעקתה?

בתחילת העשור השני של המאה הנוכחית התעורר דיון ציבורי על אופן ניהול ממשק הדיג הים תיכוני של ישראל. במרכז הדיון עמדה השפעת דיג המכמורת על אוכלוסיות הדגים והסביבה הימית של ישראל. הטענה המרכזית הייתה שדיג המכמורת הוא גורם נזק עיקרי והרסני ואם לא יוגבל הוא יגרום לקריסת המערכת האקולוגית בים התיכון, לפיכך מוצע לחוקק הגבלות שימנעו את הקטסטרופה שעלולה, כביכול, להתרחש.

על מנת לאמוד את השפעת דיג המכמורת על אוכלוסיות הדגים יש לבדוק לאורך שנים רבות את התלות בין שני פרמטרים עיקריים: שלל הדיג השנתי ומאמץ הדיג השנתי. מאמץ הדיג (Fishing Effort) השנתי של דיג המכמורת בישראל מחושב על-ידי מכפלה של ימי הדיג של הספינות הפעילות ושל הספק המנוע בכוחות סוס(HP) של כל אחת מהן (כביטוי ליעילות כושר הדיג של כל ספינה), לפי הנוסחה:

מספר ימי דיג שנתי X הספק המנוע בכוחות סוס של כל ספינות הדיג בשנה = **מאמץ דיג.**

דיג המכמורת הישראלי החל כבר בשלהי שנות העשרים של המאה הקודמת, אולם עד קום המדינה לא נוהל מעקב אחרי גובה השלל ומאמץ הדיג. מקום המדינה ועד תחילת שנות ה-80 של המאה היה מאמץ דיג מתון, והשלל בהתאם. בתחילת שנות ה-80, בעיקר כתוצאה מביקוש מוגבר של חסילונים (שרימפס), גדל צי המכמורתנים ב-30%-40%. כל ספינות המכמורת שהתווספו התמקדו בדיג החסילונים שמתבצע במים רדודים של 20-40 מ'. מאז ובמשך יותר משלושה עשורים נשאר מאמץ הדיג יציב ללא כל סימנים של נזק סביבתי. באיור 8 ניתן לראות שמאמץ הדיג היה נמוך בשלושת העשורים הראשונים שאחרי קום המדינה ובהתאם גם שלל הדיג. העלייה החדה במאמץ הדיג החל מתחילת שנות ה-80 ובמשך שלושת העשורים הבאים הביאה לעלייה בשלל, שנשאר יציב[26].



איור 8. מאמץ הדיג. כפונקציה של השלל בטונות של דיג המכמורת הישראלי לאורך השנים. כל שנה מצוינת על-ידי שתי הספרות האחרונות של אותה שנה. לכל עשור צבע שונה (מתוך[26]).

תמונה זאת סותרת באופן ברור את הטענה שדיג המכמורת גורם לנזק סביבתי רב שעלול לגרום לקריסת המערכת האקולוגית. לו היה בסיס עובדתי לטענה שדיג המכמורת עלול להביא לקריסת המערכת האקולוגית, הרי שהיא הייתה אמורה לקרוס תוך זמן קצר.

טענה נוספת של מובילי הרפורמה לניהול הדיג בים התיכון הייתה שדיג המכמורת פוגע בשלל הדיג של שיטות אחרות. טענה זו מופרכת בעבודתם של שיינין וחובריו[20] שמראים בבירור שרוב מיני הדגים הנדוגים בשיטת המכמורת – מוליתיים, (Mullidae), אופירית נודדת (Saurida lessepsianus), בקלה ים-תיכונית (Merluccis merluccius), נימי דו-ימי (Nemipterus randalli), חסילונים (שרימפס) ועוד – אינם נדוגים כל עיקר בשיטות אחרות הנהוגות בארץ. אף על פי כן ולמרות הראיות המנוגדות, כתוצאה מלחצים אינטנסיביים של מובילי הרפורמה הובאו בשנת 2016 לאישור תקנות האוסרות דיג מכמורת צפונית לחוף דור (טנטורה) וכן תקנה האוסרת על דיג מכמורת בעומק רדוד מ-40 מ'.

סיכום

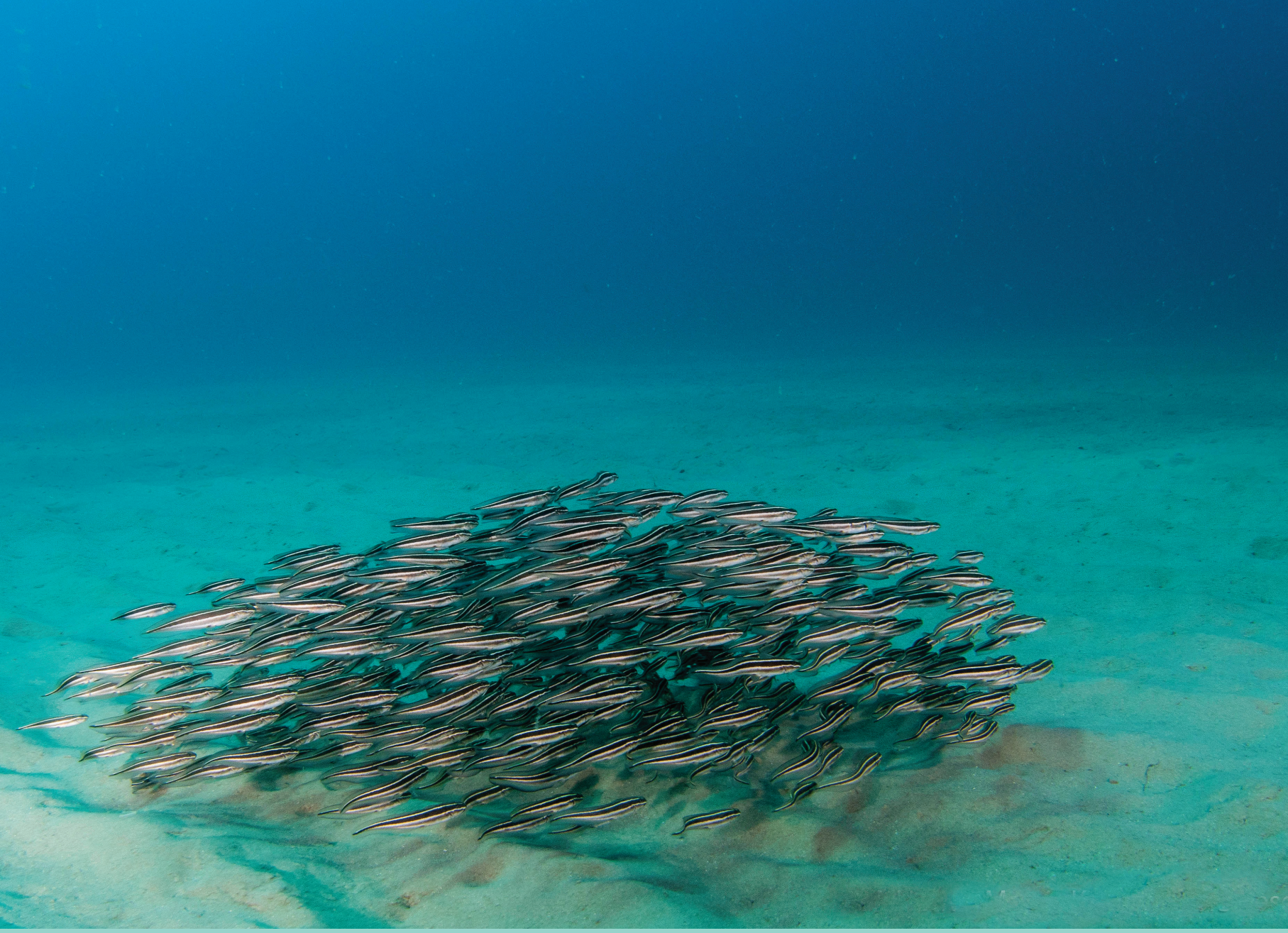
חברות דגי הים התיכון הן דינמיות מאוד ועוברות שינויים מהירים בתפוצה, נפיצות (abundance) והרכב המינים. הגורם העיקרי לשינויים הוא חדירה של מינים זרים – אקזוטיים. לדוגמה, לרשימת דגי הים התיכון של ישראל נוספו ב-15 השנים האחרונות 62 מינים מתוכם 38 הם מהגרים מים סוף שעברו דרך תעלת סואץ (מהגרים לספסיינים)[3]. קיים דיון ער, האם להגירה הלספסיינית יש השפעות שליליות או חיוביות על המערכת האקולוגית בים התיכון. למרות ההצעות ליישם אמצעים לעיכוב ההגירה (מחסום מליחות, יצירת "מסכי" בועות), היא ממשיכה ביתר שאת ולא מראה סימני האטה. ניהול ממשק הדיג בים התיכון של ישראל עומד במרכזו של דיון רגשי חריף. מעקב ארוך שנים של הנתונים של שלל דיג המכמורת לעומת מאמץ הדיג מראה שהשלל יציב במשך השנים ומאמץ הדיג מותאם לכושר הנשיאה של הסביבה, מה שמעיד שדיג המכמורת אינו הרסני ואינו מזיק לדגה. התקנות המגבילות של ענף דיג זה שהתקבלו ב-2016, מן הראוי שיזכו לדיון מחודש.

רשימת מקורות

1. גולני, ד. דגי הים התיכון. בהוד הים, יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל (סטמבלר, נ. עורכת). עמותה הישראלית למדעי הימים. עמ' 183- 195(2014).
2. Golani, D. Öztürk, B. & N. Başusta, N. Fishes of the Eastern Mediterranean. Turkish Marine Research Foundation, Publication no. 24, Istanbul, Turkey. 259 pp. (2006).
3. Golani, D. An updated Checklist of the Mediterranean fishes of Israel, with illustrations of recently recorded species and delineation of Lessepsian migrants. Zootaxa 4956 Magmolia Press, Auckland, New Zealand. 108 pp. (2021).
4. Sonin,O. Spanier, E. Levi, D. Patti, B. Rizzo, P. & Andreoli, M.G. Nanism (Dwarfism) in fish: a comparison between red mullet *Mullus barbatus* from the southeaster and central Mediterranean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **343**, 221-228 (2007).

5. Golani, D. Azzurro, E. Dulčić, J. Massutí, E. & Orsi-Relini, L. Atlas of Exotic Fishes in the Mediterranean Sea. 2nd edition [F. Briand, Ed.] 365 pages. CIESM Publishers, Paris, Monaco (2021).
6. Goren, M. & Galil, B. A review of changes in the fish assemblages of Levantine inland and marine ecosystems following the introduction of non-native fishes. *J. Appl. Ichth.* **21**, 364-370 (2005).
7. Golani, D. & Appelbaum-Golani, B. (eds.) Fish Invasions of the Mediterranean – Change and Renewal. Sofia: Pensoft. 332 pp. (2010).
8. Quignard, J.P. & Tomasini, J.A. Mediterranean fish diversity. *Biol. Mer. Medit.* **7,** 1-66. (2000)
9. Louisy, P. Europe and Mediterranean Marine Fish – Identification Guide. Ulmar, Paris, 512 pp. (2015).
10. Por, F.D. Lessepsian Migration – The influx of Red Sea biota into the Mediterranean by way of the Suez Canal. Ecological Study **23** Berlin, Springer Verlag 278 pp. (1978).
11. Ben-Tuvia, A. Immigration of fishes through the Suez Canal. *Fisher. Bull.* **76**, 249-255 (1978).
12. Galil, B.S. A sea under siege – alien species in the Mediterranean. *Biol.Invasions* **2**, 177-186. (2000).
13. Galil, B.S. Loss or gain? Invasive aliens and biodiversity in the Mediterranean. *Mar. Pollut. Bull.* **55**, 314-322. (2007).
14. Golani, D. & Ben-Tuvia, A. Lessepsian migration and the Mediterranean fisheries of Israel. In: Armantrout, N.B. (ed.). Conditions of the World's Aquatic Habits. Proceedings of the World Fishery Congress Theme 1. Oxford & IBH Pub. Co. Pvt. Ltd. New Delhi. 279-289 pp. (1995).
15. Rothman, S.B.S. & Goren, M. First record of the Red Sea shrimp-goby *Cryptocentrus caeruleopunctatus* in the Mediterranean Sea. *Mar. Biodivers. Rec.* **8,** e157 (2015).
16. Goren, M. & Stern, N. *Cryptocentrus steinhardti* (Actinopterygii; Gobiidae): a new species of shrimp-goby, and a new invasive to the Mediterranean Sea. *Peer J* **9**: e12136 DOI 10.7717/peerj.12136. (2021).
17. Bilecenoğlu, M. Yokeş, M.B. & Eryigit, A. First record of *Vanderhorstia mertensi* Klausewitz, 1974 (Pisces, Gobiidae) in the Mediterranean Sea. Aquatic Invasions **3**, 478-490 (2008).
18. Diamant, A. Parasitological aspect of Red-Med migration. Actes du Colloque Scientifique, Proceedings of the International Colloquium, OCEANOS, Montpellier, France, pp. 175-178. (1998).
19. Diamant, A. Red-Med immigration: a fish parasitology perspective with special reference to the Myxosporea. *In*: Fish Invasion of the Mediterranean Sea: Change and Renewal. Pensoft Publisher. Sofia-Moscow. (2010).
20. שייניין, א. אדליסט, ד. וסונין, א. הדיג בחופי הים התיכון – עבר, הווה ואולי גם עתיד. הוד הים, יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל (סטמבלר, נ. עורכת). העמותה הישראלית למדעי הימים. עמ' 238-223 (2014).
21. גולני, ד. דיג וגידול דגים בישראל. אחיאסף בע"מ. 184 ע"מ (2017).
22. Edelist, D. Rilov, G. Golani, D. Carlton, J.T. & Spanier, E. Restructuring the sea: profound shifts in the world's most invaded marine ecosystem. *Diversity Distrib.* **19**, 69-77. doi: 10.1111/ddi.12002 (2013).

23. Buba,Y. et al. Remarkable size-spectra stability in a marine system undergoing massive Invasion. Biol. Lett. **13**: 20170159. http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2017.0159 (2017).
24. van Rijn, I. Kiflawi, M. & Belmaker, J. Alien species stabilize local fisheries catch in a highly invaded ecosystem. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **77**, 752–761. doi.org/10.1139/cjfas-2019-0065 (2020).
25. Ofir, E. et al. Evaluation of fisheries management policies in the alien species-rich Eastern Mediterranean under climate change. *Front. Mar. Sci.* **10:** :1155480 doi: 10.3389/fmars.2023.1155480 (2023).
26. Golani, D. Edelist, D. Lerner, A. Sonin, O. & Motro, U. A long term (1949-2010) study of catch and effort in Israeli trawl fishery, Eastern Mediterranean Sea. *Acta Adriat.* **58**, 157-163 (2017).



להקת שפמית ארסית *Plotosus lineatus*, מהגר לספסייני, בעומק 10 מטר מול שדות ים. הארס שמסוכן לאדם, מצוי בקצוות סנפירי הגב והחזה. ההתלהקות היא בעיקר של פרטים צעירים. צילום: חג י נתיב .

36 חברות הדגים בים התיכון ובים האדום: גורמי סיכון ומגמות שינוי

יונתן בלמקר*[2,1,*], טל גבריאל*[1,*], ענבר דהן*[1,*], אורי הפנר אוקו*[1,*], שחר חייקין*[1,*], מאי לצרוס*[1,*], שבי רוטמן*[2,*]

[1] בית ספר לזואולוגיה, הפקולטה למדעי החיים, מאוניברסיטת תל אביב
[2] מוזיאון הטבע על שם שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב
* משתתפים אלו תרמו באופן שווה

jbelmaker@tauex.tau.ac.il, talgav@gmail.com, inbardahan1@mail.tau.ac.il, hepnerori@gmail.com, shahar.chaikin@gmail.com, mai.lazarus@gmail.com, rshevy@tauex.tau.ac.il

תקציר

דגים מהווים חלק מרכזי בתפקוד מערכות אקולוגיות ימיות. בישראל שתי מערכות ימיות: הים התיכון והים האדום. לשני הימים היסטוריה גיאולוגית נפרדת, הם שונים בתנאים הסביבתיים המתקיימים בהם וחשופים להשפעות אנתרופוגניות שונות. משום כך, איומים שונים משפיעים על הדגים בים התיכון ובים האדום. היסטורית, בים התיכון דיג היווה גורם מרכזי המשפיע על חברות הדגים. אולם איומים חדשים כגון חיפוש ופיתוח מואץ של מאגרי אנרגיה ימיים, שינויי אקלים וכניסה של מינים זרים משפיעים בצורה חסרת תקדים על חברות הדגים. חיזוי ההשפעה ההדדית של גורמים אלו הוא אתגר מורכב עבור הקהילה המדעית המקומית, לאור העובדה שעוצמות ההשפעה, בעיקר של מינים זרים והתחממות, גדולות בים התיכון הישראלי מאשר בכל אזור ימי אחר על פני כדור הארץ. בים האדום, מרבית הפגיעה בדגים בעבר נבעה מזיהומים ימיים, בעיקר זיהומים בחומרים אורגניים וזיהומי נפט, פגיעה פיזית בבית הגידול כתוצאה מפיתוח עירוני ותיירות, ופגיעה ישירה באוכלוסיות כתוצאה מדיג. בעשורים הקרובים, צפוי לגבור הסיכון לחברות הדגים כתוצאה מחשיפה לעקות חום, הרס שונית הנובע מהחמצת מי הים, פיתוח עירוני ודיג ספורטיבי. כמו כן, גורם משמעותי שצפוי לסכן את דגי השונית בשנים הקרובות הוא שימוש בנמל הנפט בקצא"א (קו צינור אילת-אשקלון) שהיקפו עלול להתרחב בשנים הקרובות על אף התנגדות ציבורית נמרצת. חיוני להגדיל את ההבנה וההיערכות לקראת השינויים המשמעותיים שחברות הדגים בים התיכון ובים האדום צפויות לחוות בשנים הקרובות. עדויות מדעיות חד-משמעיות תומכות בהגדלת השטח והכמות של שמורות הטבע, הן בים התיכון והן בים האדום, כדרך להגנה על חברות הדגים והמערכת האקולוגית בכללותה. תהליכים של תכנון ואכרזה על שטחים מוגנים נוספים כבר החלה, וחיוני כי נמשיך עד להגנה על 30% לפחות מהשטח הימי, בהתאם להסכם שהתקבל בוועידת האו"ם למגוון ביולוגי בשנת 2022. מאמצי השימור חייבים להיות מלווים בניטור אפקטיבי ארוך טווח ומבוסס מדע. ניטור זה הכרחי להבנת תפקוד של שמורות טבע ימיות והצלחת ההגנה עליהן, לזיהוי מינים זרים חדשים ומגמות התפרצות של מינים זרים שכבר התבססו, להתאמות של תקנות הדיג ליצירת דיג בר-קיימה, וזיהוי מוקדם וטיפול באירועי זיהום נקודתיים או מתמשכים.

רקע כללי

לדגים תרומה מרכזית בתפקודן של מערכות אקולוגיות ימיות. הם ממלאים תפקיד חיוני בסחרור נוטריינטים, בהעברת אנרגיה בין רמות טרופיות, ובשמירה על יציבותם של בתי גידול מאוימים כמו שוניות אלמוגים ועשבי-ים. בנוסף, הם תורמים למגוון הביולוגי, ומהווים משאב בעל ערך כלכלי ותרבותי לאדם, בין היתר דרך דיג ותיירות. מערכות ימיות שבהן הדגים ירדו בשכיחותם, לדוגמה בעקבות דיג, הינן פחות יציבות ופחות עמידות בפני שינויים חיצוניים[1]. בנוסף להיותם מקור מזון חשוב לאדם, הדגים תורמים לעולמנו בדרכים רבות. הם בעלי ערך חברתי, תרבותי וכלכלי בתחומי הנופש והתיירות, מקדמים ידע ולמידה דרך חינוך ומחקר מדעי, ומשמשים כסמלים באמנות ובדת. בשל חשיבותם, לחקר השינויים בחברות דגים יש תפקיד מרכזי בהבנת בריאותה ותפקודה של המערכת האקולוגית כולה. בישראל שתי מערכות ימיות: הים התיכון והים האדום. לשני הימים היסטוריה גיאולוגית נפרדת והם שונים בתנאים הסביבתיים המתקיימים בהם, ובהתאם לכך בחברות הדגים. הים האדום מקושר לאוקיינוס ההודי והוא מאופיין בשוניות אלמוגים ובדגים ממוצא טרופי. מיצרי באב אל-מנדב המפרידים את הים האדום מהאוקיינוס ההודי מגבילים את קצב תחלופת המים ומאפשרים בעיקר כניסה של מים עליונים וחמים. התנאים הסביבתיים המיוחדים הללו הם אלו שאפשרו את התפתחותן של שוניות אלמוגים עשירות ומשגשגות אף בקווי רוחב גבוהים ביחס לתחום תפוצתן העולמי[2]. בזכות שוניות האלמוגים הים האדום מכיל עושר גדול של מיני דגים, ובגלל הבידוד החלקי מהאוקיינוס ההודי כ-13% ממיני דגי החוף הינם אנדמיים (ייחודיים) לים האדום[3].

הים התיכון, המחובר לאוקיינוס האטלנטי דרך מיצר גיברלטר, מאופיין בעיקר בדגים ממוצא אטלנטי ממוזג, והוא מחולק לשני אגנים מרכזיים, האגן המערבי והאגן המזרחי. אגן הלבנט שבקצהו המזרחי ביותר של האגן המזרחי מתאפיין במים חמים יותר, מלוחים יותר ועניים בחומרי הזנה (אוליגוטרופיות) ככל שנעים מזרחה[4]. תנאים אלה מייצרים סביבה שאינה אופטימלית לדגים מקומיים, ובתגובה לטמפרטורת המים הגבוהה בחופי ישראל ממדי הדגים והביומסה הכוללת שלהם קטנים יותר[5,6]. גורם מרכזי נוסף המשפיע על מזרח הים התיכון הוא כניסה מסיבית של מינים זרים, במוצאם בעיקר באזור האינדו-פסיפי, דרך תעלת סואץ[7]. שטף מיני הדגים שנכנסים לים התיכון דרך תעלת סואץ ומתבססים בו משנה את הרכב חברת הדגים ומצמצם את ההבדל הטבעי בין חברות הדגים בשני הימים[8].

מחקר וניטור הדגים בים האדום מתמקד בעיקר בדגי השונית, בעוד שבים התיכון ההתמקדות העיקרית היא בדגים בעלי ערך מסחרי ודגי סחוס. עם זאת, חשוב לזכור שבשני הימים מגוון רחב של בתי גידול המאכלסים מגוון דגים. במפרץ אילת בתי גידול חוליים, מרבדי עשב-ים, שוניות אלמוגים ומגוון רחב של בתי גידול עמוקים הכוללים מגלשות חול, רכסים ותעלות[9]. בים התיכון יש שוניות סלעיות, טבלאות גידוד, רכסי כורכר תת-ימיים, קניונים תלולים, משטחי חול וטין, גני ספוגים ובתי גידול עמוקים.

בתי גידול ימיים בעולם חשופים לגורמי הפרעה רבים ומגוונים. חלק מגורמי ההפרעה מתקיימים בקנה-מידה עולמי וחלקם בקנה-מידה מקומי. בעוד חלק מגורמי ההפרעה הם טבעיים (כגון אירועי שפל קיצוניים או טמפרטורות חריגות) ואליהם המערכת האקולוגית מורגלת כבר אלפי שנים, חלקם נובעים מהשפעות אנושיות ועם אלה לרוב המערכת האקולוגית מתקשה יותר להתמודד. במקביל, גם העוצמה והתדירות של גורמי ההפרעה הטבעיים יכולות להיות מושפעות משינויים שמקורם בפעילות האדם.

גורמי ההפרעה העיקריים בים התיכון ועדויות להשפעתם על חברת הדגים

מינים זרים

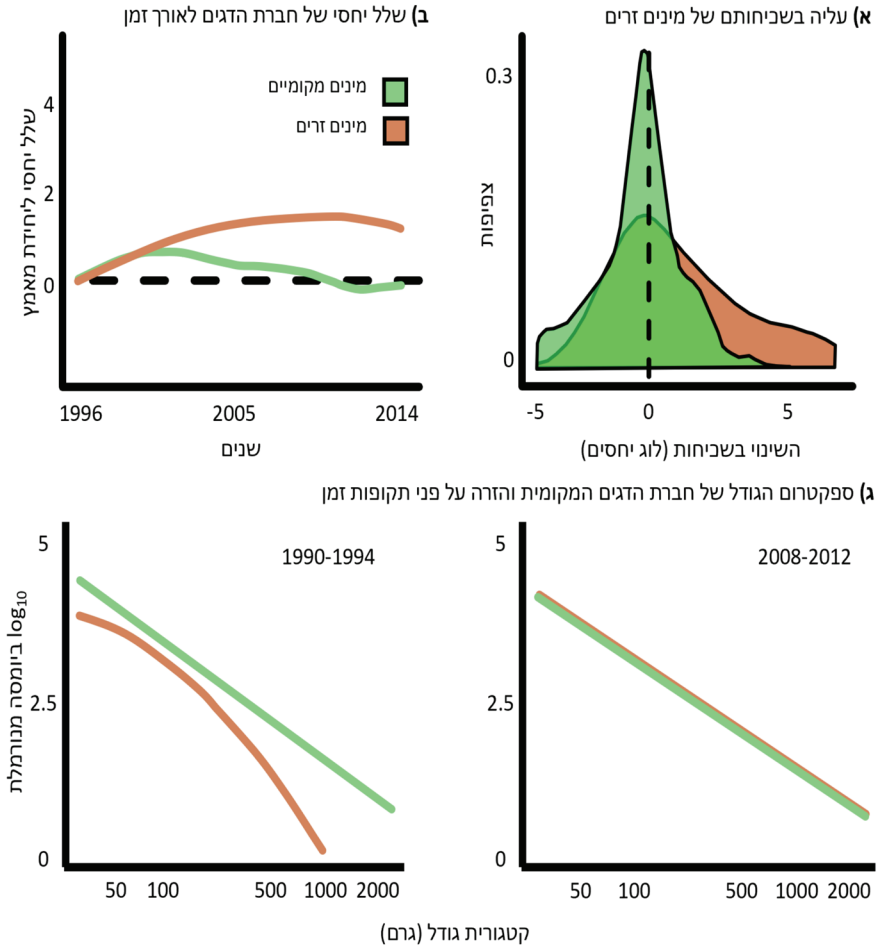
הגירה של מינים זרים לים התיכון דרך תעלת סואץ הפכה את אגן הלבנט ואת חופי ישראל בפרט לאזור הימי הנפלש ביותר בעולם ואחד מגורמי האיום הבולטים על חברת הדגים המקומית [10]. תופעה זו התעצמה במהלך השנים ככל שממדי התעלה התרחבו והיקף התעבורה הימית שעוברת דרכה גדלה[11,12]. מבין למעלה מ-450 מינים זרים שתועדו בחופי ישראל, כ-95 הם דגים שמוצאם מים סוף והאוקיינוס ההודי, רובם ככל הנראה חצו את התעלה בשחייה אקטיבית או שנסחפו עם זרמי המים, ומספר מצומצם של מינים עברו עם מי נטל של אוניות[12–14]. מרבית הדגים המהגרים הידועים מהים התיכון דווחו לראשונה מחופי ישראל, וקצב הדיווחים בשנים האחרונות גדל באופן משמעותי. כך נמצא כי בין השנים 2005 ל-2020 התגלו בישראל בממוצע 2.5 מיני דגים מהגרים חדשים בשנה[12]. יש לציין כי קצב הגילוי מושפע גם מריכוז מאמץ המחקר ובמעורבות הולכת וגדלה של הציבור הרחב בתיעוד ודיווח[15,16]. הכניסה המתמשכת של מינים חדשים לאזור והשינויים בשכיחות של מינים אלו (איור 1א), משפיעים באופן ניכר על הרכב חברת הדגים בחופינו. במהלך השנים, השכיחות היחסית של דגים זרים בשלל הדיג גדלה[17], והיום הביומסה שלהם בשלל הדיג במים רדודים אף גדולה מזו של מינים מקומיים[10,18,19]. בנוסף, כניסתם של מינים זרים רבים שינתה את מארג המזון[20–22]. הדינמיקה של אוכלוסיות הדגים הזרים אינה אחידה במרחב ובזמן, השכיחות שלהם עשויה לגדול, להתייצב ולדעוך בקצב שונה, וכך גם ההתקדמות שלהם במרחב. כך לדוגמה, אוכלוסיית השפמית הארסית (*Plotosus lineatus*), שתועדה לראשונה מחופי ישראל בשנת 2001 התבססה וגדלה בהדרגה עד שהגיעה לשיאה בשנת 2016 ואחריה קרסה באופן דרמטי[23]. לעומת זאת אוכלוסיית הנימי הדו-ימי (*Nemipterus randalli*) שתועד לראשונה מחופי ישראל בשנת 2005 התבססה וגדלה בקצב מהיר מאוד במהלך שנת 2008 [24] ונותרה גדולה ויציבה עד היום (Stern, unpublished data).

ישנן מספר עדויות להשפעות האקולוגיות של מיני הדגים הזרים בים התיכון. אחת הדוגמאות הוותיקות והידועות הינה של הסיכן המשויש (*Siganus rivulatus*) והסיכן ההודי (*Siganus luridus*). מינים אלו מהווים כיום מרכיב משמעותי בביומסה של חברת הדגים בבית הגידול הסלעי בים התיכון[25]. טרם פלישת הסיכנים, בית הגידול הסלעי נשלט על-ידי חברת אצות אשר העניקו הן מסתור עבור דגים צעירים והן מקור תזונה עבור מינים מקומיים וצמחוניים. עם התבססות דגי הסיכן, המאופיינים בתזונה צמחונית וקצב רעייה גבוה, הלכו ונעלמו האצות הגדולות ובעלי החיים התלויים בהם[26–28]. לאחרונה התבססו מספר מיני דגים טורפים המאיימים על חברת הדגים או על בית הגידול. הזהרון ההדור (*Pterois miles*) תועד לראשונה בים התיכון בשנת 1991 ובעשור האחרון התבסס והתפשט בחופי ישראל[29]. הזהרון מצויד בקוצים ארסיים המגינים עליו מפני טריפה ולפרטים הבוגרים ככל הנראה אין טורפים. נמצא כי דגים מקומיים אדישים לזהרון ומהווים את הטרף העיקרי עבורו, מנגד, מיני דגים זרים נרתעים ממנו, ככל הנראה בשל היכרות מקדימה עמו כטורף[30]. מין זר נוסף הידוע לשמצה בים התיכון הינו הלגינון המוארך (*Lagocephalus sceleratus*). הלגינון תועד לראשונה בים התיכון בשנת 2003 ומאז התפשט ותועד לאורכו ולרוחבו[31]. בדומה לזהרון, גם כאן נמצא

כי מינים מקומיים אדישים לנוכחותו של הלגינון בעוד מינים זרים נרתעים ממנו. בשונה מהזהרון, הלגינון ניזון בעיקר ממינים זרים, וניתן לשער כי השפעתו כטורף על דגים מקומיים בחופי ישראל הינה, לפחות לעת עתה, פחותה[32].

יש לציין כי על אף הכמות הרבה של מיני הדגים הזרים שתועדו בחופי ישראל, מחקרים המתעדים את השפעתם האקולוגית מתמקדים במספר מצומצם של מינים. כך, בעוד שלמינים זרים מסוימים השפעה שלילית ניכרת על החברה המקומית (ראו את דוגמת הסיכנים), אין עדויות רבות להשפעה מערכתית ישירה של חברת המינים הזרים על מינים מקומיים. לדוגמה, אין עדות מובהקת לכך שעלייה בשכיחות מינים זרים בשלל הדיג היא זו שגרמה לירידה הכללית בשכיחות של מינים מקומיים בעלי תכונות דומות[33,34]. יתרה מזאת, הכניסה של דגים זרים לא הובילה לשינוי בשלל היחסי של מינים מקומיים בדיג המכמורות[18,35] (איור 1ב), ועלייה בחלקם היחסי של דגים זרים בגדלים שונים לא גרמה לירידה מקבילה בחלקם היחסי של מינים מקומיים[36] (איור 1ג). תוצאות אלו מפתיעות, כי ניתן היה להניח שכניסה מסיבית של מינים זרים תשפיע באופן דרמטי על המינים המקומיים. ניתן להסביר תוצאות אלו על-ידי כך שמינים זרים נוטים להיכנס לנישות ריקות שפחות מאוכלסות במינים מקומיים[8], ושכיחות המינים המקומיים מושפעת יותר מהתחממות הים ומדיג[33]. יש לציין שחסרים נתוני עבר המשקפים את חברת הדגים כפי שהייתה תחת השפעת אדם פחותה, נתונים שחיוניים להבנת התהליכים והשינויים שאנו עדים להם היום.

ישנה מורכבות ייחודית בממשק במינים זרים באזורנו, מכיוון שמינים זרים רבים בים התיכון הישראלי הינם מינים מוגנים במפרץ אילת. דבר זה מוביל לקושי משפטי וציבורי כי יש צורך בשמירה על מינים באזור אחד במקביל לתהליכי ממשק אקטיבי באזור אחר[29].



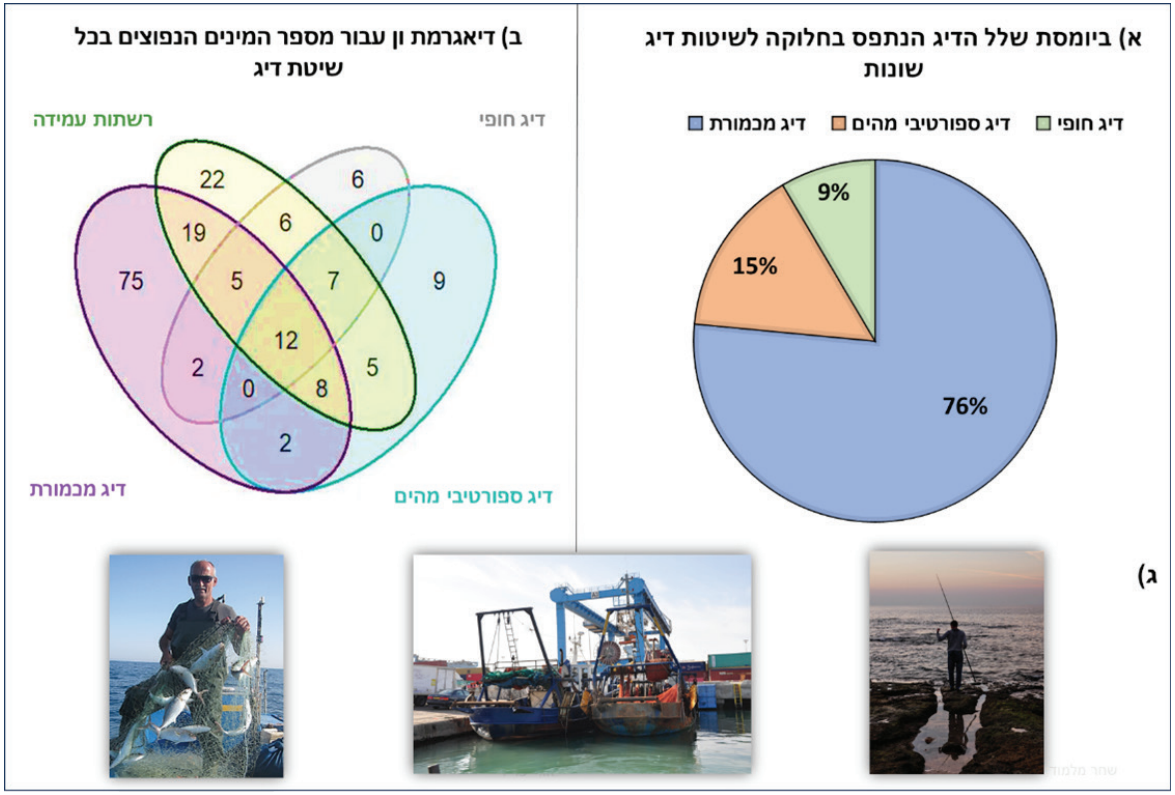
איור 1. שינויים בשכיחויות חברת הדגים המקומית והזרה בחופי ישראל על בסיס שלל המכמורת. א. גרף צפיפות המציג את השינוי בשכיחות החברהההמקומית והחברה הזרה על פני שתי תקופות זמן של 20 שנים (1990-1994 ו-2008-2012). ערכים חיובים בציר ה-X מייצגים עלייה בשכיחות בין שתי תקופות הזמן וערכים שליליים מצביעים על דעיכה בשכיחות. הקו המקווקו מציג את האזור שבו אין שינוי בשכיחות. שימו לב שקנה המידה הוא לוגריתמי. ככלל, מינים רבים בחברה הזרה מציגים עלייה בשכיחות. הוסב מתוך [33]. ב. שינויים בשלל הדיג היחסי ליחידת מאמץ באמצעות שיטת דיג מכמורת. ישנה עלייה בשלל מיני הדגים הזרים (חום) לאורך השנים בעוד שהחברה המקומית (ירוק) אינה מציגה מגמה ברורה. מבוסס על[18]. ג. גרף ספקטרום הגודל מציין את התפלגות הביומסה בחברה נתונה בכל קבוצת גודל. באיור זה ניתן לראות את ספקטרום הגודל של החברה המקומית והזרה בשתי תקופות זמן שונות. ציר ה-Y מציג את הביומסה המנורמלת לאחר טרנספורמציית $\log_{10}$ וציר ה-X מציג קטגוריות גודל שונות. ספקטרום הגודל הינו שלילי (ביומסה גדולה יותר של פרטים קטנים וביומסה נמוכה של פרטים גדולים) אך שינויים בשיפוע עשויים ללמד אודות שינויים במבנה מארג המזון של החברה. בתקופת הזמן הראשונה החברה הזרה מציגה ביומסה פחותה יותר של פרטים גדולים ביחס לחברה המקומית. עם זאת, לאחר ~20 שנים הבדל זה אינו קיים ושתי החברות מציגות ספקטרום גודל דומה. דפוס זה מציע כי לנוכחות הגדלה של מינים זרים ישנה ככל הנראה השפעה מועטה על חברה הדגים המקומית. הוסב מתוך[36].

דיג

הדיג בישראל כולל שיטות שונות, שלהן השפעה שונה על הרכב השלל, כמותו והמערכת האקולוגית בכללותה[37]. אומדן שלל הדיג בישראל עמד בשנת 2011 על כ-4,000 טון בשנה, מתוכם כ-60-75% הנדוגים בדיג המכמורת והשאר בדיג חופי הכולל רשתות עמידה, הקפה ומערכי קרסים ודיג ספורטיבי[19,37] (איור 2א). דיג המכמורת מביא שלל רב ליחידת מאמץ (כ-300 ק"ג ליום לעומת כ-40 ק"ג ליום בדיג החופי) אם כי הינו בעל סלקטיביות נמוכה ולכן מאופיין בכמות גדולה יחסית של שלל מושלך (בעלי חיים חסרי ערך מסחרי המושלכים בחזרה אל הים)[38]. כמו כן, דיג המכמורת גורם לנזק משמעותי למינים פגיעים כגון צבי-ים[39] ומשנה את קרקעית הים. שלל המכמורת בישראל מראה מגמת ירידה ארוכת טווח, בין השאר כתוצאה של הדיג[37,38]. למרות זאת, נתונים אחרים, המתבססים על יומני דייגים, מצביעים על יציבות בשלל המכמורת[18]. בשנת 2016 עודכנו תקנות הדיג, במטרה להגן על הסביבה הימית ומתוך תקווה לשפר את מצב ענף הדיג בישראל באמצעות ניהול מקיים של משאב הדגה. השינויים המרכזיים כללו עדכון או הגדרת גודלי מינימום המותרים לדיג, הגדלת העין (גודל החורים ברשת הדיג) ברשתות מכמורת ועמידה, גריטת שליש מצי המכמורת, הגדרת שיטות דיג אסורות, איסור דיג מכמורת באזורים סלעיים, צמצום השטח המותר לדיג בספינות מכמורת, איסור דיג דיפרנציאלי (תלוי שיטת דיג) בעונות הרבייה והגיוס, והגבלת שלל יומי בשיטות דיג ספורטיבי. גודלו של צי המכמורת הוגבל ל-16 ספינות (ב-2023 נותרו 10 ספינות פעילות בצי) והדיג הוגבל לחלקה המרכזי והדרומי של המדינה (דור-הבונים דרומה) ולעומק הגדול מ-40 מטר. לאחר שנים רבות שבהן הפיקוח והאכיפה על תקנות הדיג היו מצומצמים ביותר, משרד החקלאות הסמיך את רשות הטבע והגנים לאכוף את פקודת הדיג. בהתאם לכך, הוקמה היחידה הימית של רשות הטבע והימים שבקיץ 2018 החלה לפעול ולאכוף את תקנות הדיג. עדכון התקנות ואכיפתן בשטח מאפשרים את צמצום הפגיעה בדגה לחופי ישראל, אולם חסרים כרגע נתונים מפורסמים המכמתים את ההשפעה ארוכת טווח של תקנות אלו על שינויים בחברת הדגים.

לעומת דיג המכמורת, הדיג החופי מאופיין בכמות קטנה של שלל לוואי ושלל מושלך[40]. כמות העוסקים בדיג חופי בארץ קטנה והיא נמצאת במגמת ירידה[37,41]. לחץ הדיג האפקטיבי, כלומר מספר הסירות המשתתפות בפועל ביום דיג, נמוך משמעותית מלחץ הדיג הפוטנציאלי (מספר הסירות המקסימלי בעלות רישיון עיסוק בדיג הנמצאות במעגנה) ופחות מ-15% מצי הדיג החופי משתתף בפעילות הדיג בממוצע[37,41]. בנוסף, הדיג החופי מאופיין בשונות רבה בשלל, כאשר במקרים רבים חוזרים הדייגים לנמל עם כמות שלל מועטה מאוד או ללא דגים כלל. מנגד, בימים מועטים הסירות חוזרות לנמל עם שלל גדול[37,41]. אולם חסר מידע הקושר שינויים בדיג החופי ישירות עם שינויים בכמות והרכב חברות הדגים.

בעוד היקף הדיג המסחרי בישראל (דיג המכמורת והדיג החופי) במגמת ירידה, ההערכה היא שהדיג הספורטיבי, שאינו למטרות רווח, נמצא במגמת עלייה[37]. יש לציין כי בעבר סברו שהיקף שלל הדיג הספורטיבי מסך השלל הנדוג הוא זניח, אולם מחקרים אחרונים מעריכים כי היקפו שווה ערך ל- 10%-37% משלל הדיג המסחרי[19]. בעוד ששיטות הדיג השונות (מכמורת, דיג חופי ודיג ספורטיבי) מכוונות למיני מטרה שונים, קיימים מספר מינים מסחריים אשר נדוגים במספר רב של שיטות או לחלופין שיטות שונות תופסות את אותו המין בשלבי חיים שונים (איור 2ב)[19]. על כן, כאשר מתכננים ממשקי דיג עתידיים חשוב להתייחס גם לדיג הספורטיבי.



איור 2. א. ביומסה ממוצעת לשנה של שלל הדיג הנתפס בחלוקה לשיטות הדיג השונות: דיג מכמורת מסחרי, דיג ספורטיבי, ודיג חופי (כולל מערכי חכות). דיג הקפה קטן בהיקפו ולא נכלל כאן. מבוסס על [19]. ב. דיאגרמת ון המציגה את מספר מיני הדגים השונים הנדוגים בכל שיטת דיג. המספרים באיור כוללים את מספר המינים המשותף והייחודי לכל שיטת דיג, לדוגמה יש 75 מינים הנדוגים רק בדיג מכמורת, ו-2 מינים הנדוגים הן בדיג מכמורת והן בדיג חופי. מבוסס על[19]. ג. שיטות הדיג השונות מימין לשמאל: דיג ספורטיבי, דיג מכמורת ודיג חופי.

הגנה על שטחים ימיים מפני פעילות דיג נחשבת לאמצעי יעיל לשימור ואישוש מערכות ימיות[42]. באזורים מוגנים שמוגדרים כשמורות אל-געת, כל פעילות פוגענית (כגון דיג, חקלאות ימית, הזרמת מזהמים) אסורה, ויש להם פוטנציאל לשיקום אוכלוסיות דגים בתנאי שההגבלות שחלות בשטחן נאכפות[43]. היעדר דיג בשמורות מאפשר לאוכלוסיות לגדול ולפרטים להגיע לבגרות מינית וכך להגדיל את פוטנציאל הרבייה של האוכלוסייה. בנוסף, כשאוכלוסיות הדגים גדלות ועוברות את כושר הנשיאה של השטח מתרחשת זליגה של פרטים אל מעבר לגבולות השמורה, וכך השמורה גם מזינה את השטחים שמחוץ לה ועשויה לתרום לשלל הדיג באזורים שבהם הוא מותר.

על מנת לבחון את השפעת שמורות הטבע הימיות ואת השפעת שינוי התקנות ואכיפתן יש צורך בניטור מתמשך של חברות הדגים, שמתחיל טרם השינוי ברגולציה וממשיך לאורך זמן. דוגמה לניטור מסוג זה הם סקרי ה"ביובליץ"

המתקיימים משנת 2015 (ראו פרק של רותי יהל וחובריה בספר). ההשפעה החיובית של השמורות על חברת הדגים נראית לאורך כל שנות הסקר, בעיקר בשמורת ראש הנקרה-אכזיב שנאכפת באופן עקבי כבר מספר עשורים, אך גם בשמורות האחרות שנסקרו. השפעה זו מתבטאת בביומסה כללית גבוהה יותר בתוך השמורות, יותר פרטים גדולים, ובעיקר במדדים הקשורים במינים ממשפחת הדקריים שמהווים מינים אינדיקטוריים למצבו של בית הגידול הסלעי[44]. בנוסף, לאורך שנות הסקר נראה שיפור במדדים שונים גם מחוץ לחלק מהשמורות, כולל עלייה בביומסת המינים המסחריים, עלייה בשכיחות הפרטים הגדולים ועלייה בשכיחות הדקרים, שיפור שעשוי להעיד על תרומת השינויים שנעשו בתקנות הדיג ובמאמצי האכיפה[44]. למרות הנתונים המעודדים על תפקוד שמורת הטבע הימיות בארץ, יש צורך להקטין את התופעה של אפקט שוליים – תופעה המתבטאת בירידה בביומסה של מינים מסחריים בתוך השמורה[45,46] שיכולה להתאפשר בעזרת הגדלת השמורות ואכיפה מוגברת[6,47].

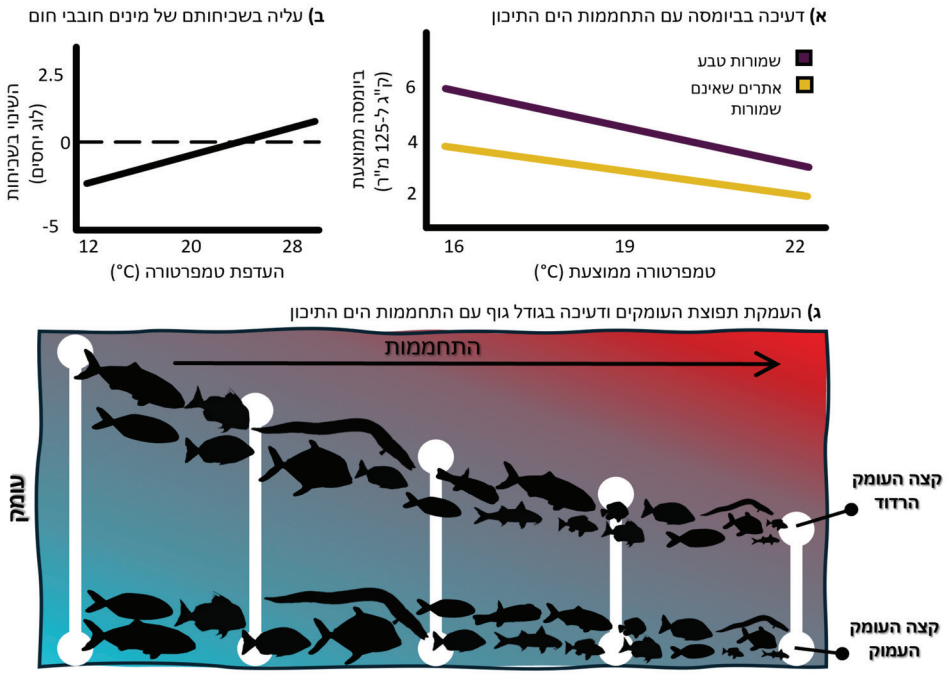
התחממות

מי אגן הלבנט מתחממים בקצב מהיר מהממוצע העולמי[48] והתחממות זו משפיעה באופן נרחב על דגים וקבוצות ימיות נוספות. בין ההשפעות תועדו ירידה חדה בגודל הגוף של הדגים (ננסות לבנטינית)[5,49] שינויים בגודל רבייה[50], ושינויים בקצבי טריפה[51]. שינויים אלה צפויים להוביל לירידה בביומסה בשלל הדיג. דגם זה, שבו גודל הגוף יורד עם התחממות, אף נמצא חזק במיוחד בקרב דגים בעלי ערך מסחרי רב[5]. אכן, כאשר מסתכלים על פני כל הים התיכון, ניכר כי הביומסה הכללית של הדגים מושפעת מאוד מטמפרטורת המים וקטנה ככל שמתחמם, כך שבאזור ישראל הביומסה היא הקטנה ביותר[6] (איור 3א). צפוי שיהיו גם שינויים פנולוגיים בזמן פעילויות ביולוגיות כגון תקופות רבייה או נדידה, אך שינויים כאלו לא נחקרו עדיין בישראל.

אחת התגובות הנרחבות של דגים להתחממות הינה שינוי תפוצה לעבר קווי רוחב גבוהים יותר. באזורנו, מחקרים מבוססי מודלים של תפוצה חוזים היעלמות של מינים עם המשך ההתחממות[47,52], אולם אין עדויות עד כה להיכחדות מוחלטת של מיני דגים מישראל בעקבות התחממות. במחקר שנערך בישראל נמצא שמיני הדגים המקומיים, שיורדים בשכיחות בקצב הגבוה ביותר, הם אלו שלהם העדפה לטמפרטורות נמוכות[33] (איור 3ב).

מעבר לשינוי תפוצה לקווי רוחב גבוהים יותר, התחממות בים התיכון קשורה בהעמקה של בעלי חיים לאזורים קרירים יותר[53]. עם זאת, העמקה עשויה לגרור השלכות על יכולתם של דגים לשמר את שכיחותם. כך נמצא כי בחופי ישראל, על פני שני עשורים שבהם טמפרטורת המים העליונה התחממה בממוצע ב-2.4 מעלות צלסיוס[54], נצפתה דעיכה בשכיחותם של מיני דגים אשר העמיקו או כיווצו את טווח עומקי התפוצה שלהם[55] (איור 3ג). למרות זאת, יש לזכור כי ההשפעה של ההתחממות לא זהה בכל המינים ויש מינים רבים שדווקא צפויים להרוויח מהתחממות ולהגדיל את שכיחותם. אלו כוללים מינים חובבי חום[33] (איור 3ב), וכמובן גם מינים זרים מהים האדום שלהם מוצא טרופי[10,18].

כאשר משקללים את כל השינויים הללו יחדיו, ניתן לסכם כי המשך ההתחממות צפויה לגרום לשינויים מהותיים בחברת הדגים הים תיכונית, כולל ירידה בביומסת הדגים הכללית[19] ושינויים נרחבים במבנה החברה הכוללים העמקה והגירה של מינים מקומיים חובבי קור[53,55], במקביל לעלייה בשכיחות של מינים חובבי חום, בדגש על מינים זרים ממוצא טרופי[33].



איור 3. השפעת התחממות הים התיכון על חברת הדגים. א. דעיכה בביומסה של דגים לאורך הים התיכון כתלות בטמפרטורת פני הים. ציר ה-y מציג ביומסת דגים וציר ה-x מייצג את טמפרטורת הים הממוצעת בפני השטח. הצבעים מציגים את סטטוס שמירת הטבע (שמורה או מחוץ לשמורה). מבוסס על[6]. ב. הקשר בין הטמפרטורה הממוצעת שבה נדגמו מינים בכל תחום התפוצה (להלן העדפת טמפרטורה) לבין השינוי בשכיחותם בישראל בין שתי תקופות זמן בהפרש של 20 שנים. ציר ה-Y מייצג את לוג היחס של השכיחות בין התקופה השנייה לבין הראשונה. ערכים חיובים מייצגים מינים שעלו בשכיחות וערכים שליליים מציגים מינים שירדו בשכיחותם. ישנו קשר חיובי ומובהק בין השינוי בשכיחות לבין העדפת טמפרטורה. מבוסס על[33]. ג. איור המדגים את העמקת גבול התפוצה הרדוד של בעלי חיים יימים בים התיכון והקטנה של גודל הגוף עם מעבר למים חמים יותר. הקווים הלבנים מייצגים את טווח העומקים. האקלים באיור מתחמם משמאל לימין ומלמטה (הקרקעית) למעלה (פני המים). מבוסס על[5,53].

פיתוח ימי וזיהום

הגידול באוכלוסיית העולם ובארץ בפרט, מוביל לאובדן בתי גידול עקב פיתוח מואץ של תשתיות ימיות ותעבורה ימית הולכת וגדלה, וכמו גם לעלייה במזהמים ממקורות רבים כמו שפכים, פלסטיק, נפט, תמלחות התפלה, זיהום תרמי, זיהום אור, וזיהום קול (רעש)[56]. במקביל מתרחש באזורנו תהליך אוליגוטרופיקציה של הים – הפחתה בכמות הנוטריינטים במים עקב הקמתו של סכר אסואן והפסקת זרימת סדימנטים מנהר הנילוס לים[57]. בעוד המחקר על ההשפעות המקומיות של גורמים אלו על חברות הדגים בישראל הינו מועט, קיימות עדויות רבות על ההשלכות של פיתוח, זיהום ואוליגוטרופיקציה באזורים אחרים.

פסולת מוצקה ובנייה ימית: הבנייה בחוף ובתוך הים התיכון הישראלי צפויה להתרחב בשנים הקרובות[56]. מבנים מלאכותיים כגון שוברי גלים או אוניות טרופות מהווים מוקדי התיישבות והתקבצות עבור דגים, וגדל גם השימוש

בשוניות מלאכותיות כאמצעי לשיקום בתי גידול טבעיים והעברת מאמצי דיג לאתרים מלאכותיים. יחד עם זאת, לא ברור האם ערכם של מבנים מלאכותיים כבתי גידול לדגים זהה לערכם של בתי גידול טבעיים והאם הם מפצים על השינוי שנגרם לבתי הגידול המקוריים. קיימות עדויות מעטות על השפעות של פיתוח תשתיות ימיות על חברת הדגים בישראל. הידע הקיים מצביע על כך שהשכיחות והביומסה של דגים סביב ובתוך שוניות מלאכותיות גבוהות משמעותית בהשוואה למצע טבעי שטוח[58]. אומנם קבוצות פונקציונליות דומות נצפו בשוניות סלעיות ובאוניות טרופות, אך הרכב המינים בהן היה שונה[59].

שפכים ופלסטיק: במשך עשרות שנים הוזרמו שפכים המכילים מתכות כבדות אל הים, במיוחד באזור מפרץ חיפה. בחופי עכו לדוגמה, שבחלקה הדרומי פעל עד לשנת 2004 מפעל תעשיות אלקטרוכימיות שפלט מזהמים לסביבה, הצטברו עדויות לנוכחות כספית ברקמות דגים ממינים שונים (למשל, סרגוס מסורטט, *Diplodus sargus*) גם שנים לאחר הפסקת ההזרמה, מכיוון שהזיהום חלחל אל מי התהום[60]. לאחר יישום רגולציה בנושא נצפתה ירידה בריכוזי הכספית בדגים למשך מספר שנים אולם בשנת 2022 נצפתה שוב עלייה במספר מינים מסחריים[61]. מתכות כבדות אחרות, כגון ניקל, אבץ וקדמיום, נמצאו כמזיקות לרקמות של מספר מינים מסחריים בדרום הים התיכון[62]. שפכים ממקורות אורגניים מגיעים לים לרוב כנגר עילי או מנחלים, בין היתר באירועי גשם קיצוניים שבהם מערכות הביוב מוצפות. מינים ימיים שחיים בקרבת שפכי נחלים, ואף משתמשים בהם כאזורי הטלה או השרצה, נפגעים, עד כדי אירועי תמותה המונית (למשל קיפוניים בנחל אלכסנדר ובנחל לכיש). מלבד חומרים שמקורם בשפכים, מיקרופלסטיק בכמויות גבוהות נמצא בשני מיני סיכנים מאזורנו[62,63]. ידוע כי צריכה של דגים שנחשפו למזהמים עלולה לסכן את הציבור הצורך אותם, אולם כרגע אין עדויות חזקות להשפעה של זיהומים אלו על חברות הדגים עצמן.

זיהום נפט: בים התיכון הישראלי קיים פוטנציאל גבוה לאירועי זיהום נפט ו/או גז כתוצאה מדליפות מכלי שיט, ממיצוי מאגרי אנרגיה באזור המים הכלכליים ומאתרי פסולת כימית ופסולת פחם בים עמוק. זיהום הנפט הגדול ביותר בתולדות ישראל אירע בשנת 2021 ופגע בחלקים נרחבים מהחוף, אולם השפעתו על חברת הדגים לא כומתה. אין ספק שלו הייתה הדליפה בתצורת נפט נוזלי, היה הנזק למערכת האקולוגית גדול בהרבה מאשר בתצורת הזפת שזיהמה את חופי ישראל.

התפלה: התפלת מי ים מתבצעת בים התיכון הישראלי בקנה-מידה נרחב ומהווה איום פוטנציאלי לחברת הדגים. מי התמלחת עלולים לפגוע באופן ישיר בהתפתחות ובשרידות לארוות דגים, או להשפיע באופן עקיף על בתי גידול בקרבת שפך התמלחות [64], מנגד, באוסטרליה נמצאו עדויות לעלייה בשכיחות דגים בסביבת אזורי הפליטה, כנראה לאור שינויים מקומיים במשטר הזרימה, שנוצרו עקב הזרמת התמלחת[65].

זיהום תרמי: מי ים נשאבים לצורך קירור טורבינות תחנות הכוח בארץ, ולאחר מכן מוזרמים בחזרה לים וגורמים לזיהום תרמי מקומי. ריכוזים גבוהים של כרישים נצפו בשנים האחרונות בקרבת תחנות הכוח, החל מסוף עונת הסתיו, וההשערה היא כי הם נמשכים למים החמים[66]. ככל הנראה ההשפעה המערכתית על חברות דגים קטנה, שכן הזיהום התרמי הינו מקומי.

זיהום אור ורעש: בשנים האחרונות עולה המודעות לנזקים מזיהומים שמקורם איננו בהזרמת חומרים למים – זיהום אור וזיהום קול (רעש). זיהום אור ידוע בהיותו גורם לעקה (סטרס), המשפיע על הפיזיולוגיה וההתנהגות של דגים. הנושא לא נחקר בים התיכון הישראלי אך סביר להניח כי חברת הדגים באזור חשופה להשפעות זיהום אור, שכן מרבית

החופים בישראל (כ-78%) חשופים לעוצמות תאורת לילה מלאכותית גבוהות מעוצמות תאורה טבעיות[67]. זיהום רעש בים התיכון, שמקורו בבניית תשתיות, תעבורה, דיג, חיפוש משאבים או סקרים סיסמיים, מוביל להשפעות מגוונות על חברת דגים: מיסוך תקשורת בין פרטים, שינויים בצריכת החמצן ובתגובות ביוכימיות המקושרות לסטרס, שינויים התנהגותיים (ברמת הפרט וברמת להקות) וירידה בתפקוד רבייתי[68].

אוליגוטרופיקציה: הקמת סכר אסואן והרחבתו במהלך 60 השנים האחרונות הובילו לירידה משמעותית במעבר הנוטריינטים מנהר הנילוס אל דרום הים התיכון[57]. לכך השפעות מרובות, ביניהן שינויים בהרכב הכימי-פיזיקלי של המים, ירידה בהיקף הסדימנט העדין ובחומר האורגני, שינויים בבתי הגידול על קרקעית הים והשלכות על מארג המזון כולו. בין היתר נצפו שינויים בחברת הפלנקטון אשר משפיעים על שאר מערכת המזון, בפרט נצפתה ירידה בשכיחותם של דגים פלאגיים[69].

לסיכום, חברת הדגים לחופי הים התיכון הישראלי חשופה לאיומים רבים, שלהם השפעות ארוכות טווח על חברות הדגים, שבתורן ישליכו גם על הציבור המתבסס על דגים כמשאב (למרות שרק 1% מהדגים הנצרכים בארץ מגיעים מדיג מקומי). על מנת להבין לעומק את השפעות השינויים באזורנו, עלינו למזער את פערי הידע באמצעות מחקר, ניטור ורגולציה. יחד עם זאת, חשוב לציין כי המודעות להשלכות של פגיעות מסוג זה מתגברת. לדוגמה, אזור גלישת פלמחים היה מיועד לחיפושי גז ונפט נרחבים והוכרז ב-2022 כאזור ימי מוגן לאחר שהתגלו בו בתי גידול ייחודיים ונדירים וריכוז גבוה במיוחד של כרישים, ביניהם הטריזן הצנירי *Oxynotus centrina* המצוי בסכנת הכחדה קריטית בים התיכון ואתרי הטלה של גילדן שחור-פה *Galeus melastomus*[70].

גורמי ההפרעה העיקריים בים האדום, ועדויות להשפעתם על חברת הדגים

זיהום וירידה באיכות המים

זיהום כימי: העשרה בנוטריינטים ובחומר אורגני (אאוטריפיקציה): מפרץ אילת הוא ים אוליגוטרופי (עני בנוטריינטים), וזהו תנאי הכרחי לקיומן של שוניות האלמוגים במפרץ, וכן של רבים ממיני הדגים. העשרה בנוטריינטים מפרה את האיזון הטבעי בין אצות ואלמוגים ומובילה לגדילה מוגברת של אצות אשר בסופו של דבר דוחקות את האלמוגים ומובילות לשינויים מרחיקי לכת בבית הגידול[71]. בעבר, פעילות כלובי דגים והזרמתו של ביוב לים הובילו לעלייה בריכוז הנוטריינטים[72,73]. למרות שכיום הביוב כבר אינו מוזרם לים וכלובי הדגים הוצאו ממפרץ אילת, ישנם מקורות זיהום נוספים המזרימים מים עשירים בנוטריינטים למי המפרץ. לדוגמה, מים שמוזרמים לחוץ הצפוני במפרץ אילת בתעלת הקינט אשר מנקזת ומובילה מי שיטפונות מאילת והערבה[73]. פריקה וטעינה של חומרים כימיים כגון זרחן ואשלגן עלולה אף היא להוביל לזיהום של המים, כמו שאכן קרה לא פעם בשנות ה-70[72], אולם התדירות של אירועי זיהום כאלו ירדה מאוד במהלך השנים.

בנוסף לאאוטריפיקציה, מפרץ אילת חשוף לסיכון של זיהומים כימיים כגון שמנים, דלקים, חומרים מונעי צמדה (antifouling), דטרגנטים ותכשירי קוסמטיקה שעלולים לפגוע בבריאות השונית ואיכות המים במפרץ אילת.

זיהום ים בדלקים ובשמנים ידוע כגורם הפוגע במערכות פיזיולוגיות של דגים ואלמוגים, המהווים את אבני היסוד של השוניות באילת[74]. במפרץ אילת, אירועים של דליפת נפט בתדירות גבוהה אך בהיקפים קטנים, שהתרחשו בין השנים 1969-1979, הובילו לירידת במגוון הדגים והאלמוגים[71,75]. בחלקו הצפוני של מפרץ אילת קיימת תנועה ערה של כלי שיט, לרבות אוניות מטען גדולות ומכליות דלק, דבר המהווה גורם סיכון לזיהום כימי. על אף שבשנים האחרונות זיהומי הים בדלק שתועדו באילת לא עלו על כמות של 20 טון דלק שדלפו מאוניות, בתרחיש שבו אונייה תעלה על שרטון או אירוע של אובדן שליטה הנזק צפוי להיות אדיר. סיכון זה צפוי לעלות משמעותית במידה שתתממש ההרחבה של הפעילות בקצא"א והעלייה בהיקף הדלקים אשר יועברו דרך המסוף.

פסולת מוצקה ופלסטיק: במפרץ אילת נמצא כי זיהום הפלסטיק גבוה משמעותית בשוניות העמוקות מ-30 מטרים לעומת פני השטח [76]. כמו כן, ריכוזים של מיקרופלסטיק נמצאו ברקמות של בעלי חיים מסננים במפרץ אילת[77] שמהווים מקור מזון לחלק מהדגים או עבור מיני הטרף שלהם. עם זאת, נמצא כי באופן כללי זיהום הפלסטיק במפרץ אילת נמוך יותר בהשוואה לשוניות אלמוגים אחרות ברחבי העולם [77]. פסולת מוצקה עלולה להגיע למי המפרץ גם כתוצאה מעבודות פיתוח ובנייה שמתרחשות על קו המים (לדוגמה בניית טיילת להולכי רגל). בעבודות אלו, גם כאשר קיים פרוטוקול עבודה שנועד לצמצם את הפגיעה במרחב הימי, פעמים רבות כאשר לא קיים פיקוח בשטח, פסולת בניין וסדימנטים נשפכים אל הסביבה הימית.

זיהומי אור ורעש: גורמי זיהום נוספים במפרץ הם זיהומי אור ורעש. תאורה מלאכותית חזקה במהלך שעות החשכה מורגשת במפרץ אילת גם בעומקים של 30 מטרים. חשוב לציין כי זיהום אור הוא כרוני ולו השפעה מתמשכת על דגי שונית, כולל ירידה בהצלחה רבייתית[78] והשפעה שלילית על קצבי גדילה ותמותה של פרטים צעירים[79]. גם לזיהום רעש, רעש תת-ימי ממקור אנתרופוגני, יש טווח רחב של השפעות שליליות על דגים ובעלי חיים ימיים[80]. בדגי שונית, נמצא כי רעש של סירות ממסך את הרעשים הטבעיים של השונית ובכך מוביל לירידה בכמות הלרוות שמצליחות להתיישב בהצלחה בשונית[81]. כמו כן נראה כי רעש סירות מוביל לעלייה ברמות הקורטיזול, ומדדים פיזיולוגיים או התנהגותיים נוספים[82]. באילת ישנה תנועה ערה של סירות ורחשי המנוע עשויים להיקלט בקרב דגים גם במרחקים של מאות מטרים. בהינתן גודלו הקטן של המפרץ ויעילות מעבר גלי הקול בתווך המימי, כמעט ואין סביבה בצד הישראלי של המפרץ המוגנת מזיהום רעש.

זיהום ביולוגי: זיהום באורגניזמים לא מקומיים, פתוגנים, טפילים ווירוסים זרים עלול להוביל לפלישות של בעלי חיים זרים ושל גורמי מחלה שונים אל תוך מערכות אקולוגיות. למפרץ אילת מוזרמים מים ממערכות גידול של בעלי חיים ימיים שמקורם אינו במפרץ אילת (מחקלאות ימית, ממכוני מחקר, ותצוגות תיירותיות). מקור פוטנציאלי נוסף לזיהום ביולוגי במפרץ אילת הוא מי נטל של אוניות (ballast water) שידוע כווקטור מרכזי למעבר של מינים זרים, כולל דגים[83].

פגיעה פיזית בשונית והרחפת סדימנטים

פגיעה פיזית בשונית והרחפת סדימנטים יכולות להיגרם מסיבות רבות, ביניהן סערות דרומיות שמכות בחוזקה בשונית, כמו הסערה שפגעה באילת ב-2020 [84], כלי שיט שחורגים מגבולות השיט המותרים ופוגעים בשוניות, בינוי תת-ימי, תשתיות ועבודות תחזוקה למתקנים תת-ימיים קיימים, בנייה של קירות ים ומבנים בסמוך לקו המים ותיירות (צוללים ומשנרקלים הפוגעים בשוניות עם סנפיריהם ומרחיפים סדימנט מהקרקעית החולית). פגיעות פיזיות והרחפת סדימנטים כתוצאה מפעילות האדם הן הפרעות חדשות המתווספות להפרעות טבעיות ויכולות להשפיע גם על חברות הדגים. אפשרות לכימות השפעת פעילות תיירותית על הדגים נפתחה עקב פתיחת אתר קצא"א לציבור. אתר קצא"א היה סגור לציבור מסיבות בטיחותיות במשך 50 שנה עד אשר חלקו הצפוני נפתח לקהל הרחב בשנת 2017. סקרים הבוחנים את חברת הדגים באתר לפני ואחרי פתיחתו לא הראו שינוי בצפיפות או עושר הדגים[85]. עם זאת, יש לציין כי הסקרים נערכו בבית הגידול הטבעי באתר (בלטי שונית), אך מרבית הצוללים והמבקרים מתרכזים סביב עמודי המזח שלא נסקרו.

התחממות וסערות

שינויי אקלים באים לידי ביטוי, בין היתר, בהתחממות מי הים במפרץ אילת בקצב של כ-0.3 מעלות צלסיוס לעשור. בעוד אלמוגי מפרץ אילת מראים עד כה עמידות גבוהה יחסית לעלייה בטמפרטורה[86], בדגים נמצא כי עלייה חדה בטמפרטורת המים עלולה לגרום לפגיעות המערכת החיסונית, להתפרצות מחלות ותמותה רחבת היקף של פרטים בוגרים של מינים גדולים[87]. בנוסף, התחממות יכולה לגרום לפגיעה עקיפה בדגים דרך פגיעה בשונית האלמוגים.

שינויי אקלים באים לידי ביטוי גם בעלייה בשכיחות סערות ועוצמתן. במרץ 2020 הכתה בחופי אילת סערה דרומית היוצאת דופן בעוצמתה (מהירות רוח של מעל ל-100 קמ"ש) וגרמה לנזקים רבים לרצועת החוף. ניטור דגים ואלמוגים אשר התבצע במסגרת סקרי ה"מחנה האקולוגי" החל משנת 2015 איפשר לבחון את השפעת הסערה בבתי גידול של בלטי שוניות אלמוגים רדודים במגוון אתרים[85]. בסקרים שהתבצעו זמן קצר אחרי הסערה, צפיפות הדגים צנחה ועמדה על פחות מחצי מהצפיפות הממוצעת שתועדה לפני הסערה (איור 4ב). אולם, באופן מפתיע, כשנה לאחר הסערה נמצאה עלייה בכמות הדגים וחברות הדגים שבה שבו למצבן הקודם בכל האתרים שנסקרו[88]. חשוב לציין כי מסקנות אלו מוגבלות לבית הגידול של בלטי אלמוגים רדודים שבהם מורכבות בית הגידול לא נפגעה בצורה ניכרת מהסערה[89]. התוצאות מעידות כי לחברות הדגים במפרץ פוטנציאל גבוה להשתקם במהירות מהפרעות טבעיות, כל עוד האלמוגים לא נפגעים גם הם באופן משמעותי, ומחזקות ממצאים המעידים על יציבות בחברת הדגים.

דיג

פעילות דיג במפרץ אילת מתקיימת בתחומי ישראל, ירדן, ערב הסעודית ומצרים. בישראל, פעילות הדיג המסחרי הצטמצמה בעשורים האחרונים וגרמה, ככל הנראה, גם לירידה בשלל. פעילות הדיג המסחרי באילת מוגבלת לדייגים ולכלי שיט הרשומים לדיג, נכון להיום פועלים בעיר כעשרה דייגים מסחריים וארבע סירות דיג. שיטות הדיג הנפוצות באילת הן מלכודות בגדלים שונים, מערכי קרסים (שארק), רשתות עמידה באורכים שונים ודיג בעזרת רשתות הקפה.

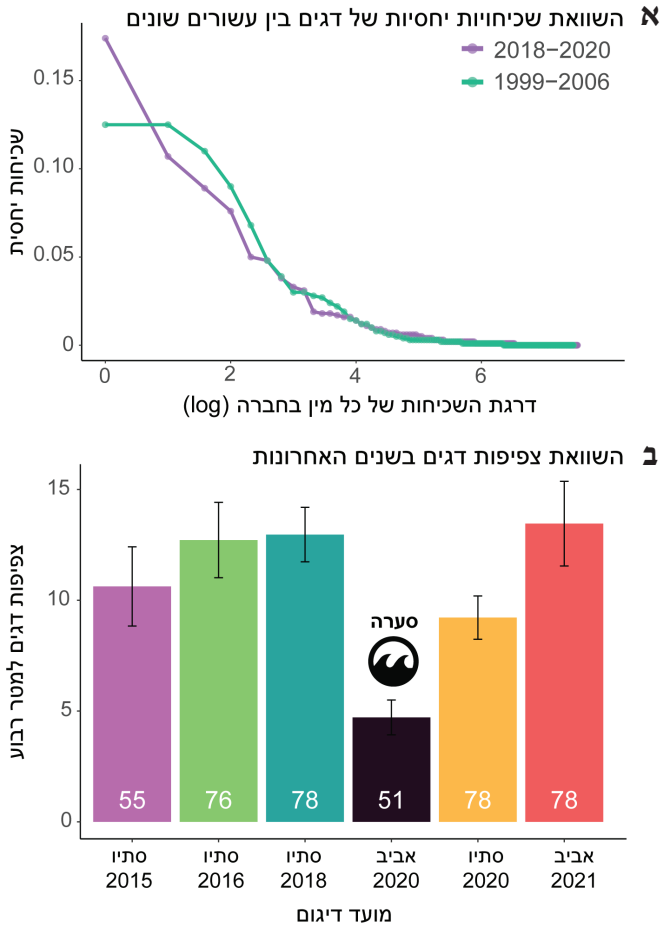
הדיג המסחרי מותר מחוץ לתחום של שמורות טבע ובמים רדודים עם החרגה ממגבלת שיט של 300 מטר מהחוף. על אף מספר הדייגים הנמוך יש לפעילות הדיג המסחרית יכולת להסב למערכת הטבעית נזק משמעותי, במיוחד לאור הערכיות והרגישות האקולוגית הגבוהה של שונית האלמוגים. כמו כן, מיני המטרה הינם מינים גדולים הנדירים באזור מטבעם, וטורפי-על בעלי חשיבות רבה למארג המזון והמערכת האקולוגית.

בעוד הדיג המסחרי מצומצם מבחינת מספר העוסקים בו, הדיג הספורטיבי כולל משתתפים רבים ובאילת מתבצע בעזרת חכות מהחוף או מסירה. הדיג ברובה תת-ימי בצלילה באילת אסור. כיום, פועלות במפרץ אילת עשרות סירות בעלות רישיון דיג ספורטיבי וההערכה היא כי דיג מסירה מתבצע על-ידי מאות דייגים ספורטיביים. דיג ספורטיבי בחכה מהחוף אינו מצריך רישיון ועל כן מספרם של העוסקים בדיג זה אינו ברור. כמו כן, חשוב לזכור כי דיג מסחרי וספורטיבי נפוץ גם במדינות המפרץ השכנות ושלל הדיג בהן נמצא במגמת עלייה[90]. בשל שטחו הקטן של המפרץ, סביר להניח שדיג במדינות שכנות משפיע גם על חברת הדגים בישראל ובמיוחד על מינים פלאגיים (שוחים בעמודת המים) טורפים אשר להם חשיבות רבה ליציבות מארג המזון.

עד כה, לא בוצע ניטור במפרץ אילת של מעקב אחר שלל הדיג הספורטיבי והמסחרי שמאפשר לבחון השלכות נוספות של שינוי תקנות הדיג ואכיפתן על אוכלוסיות הדגים[19], אך מדיווחים המגיעים לרשות הטבע והגנים עולה כי ישנה פגיעה במינים מוגנים שנתפסים כשלל לוואי, בכללם צבי-ים, כרישים ובטאים ודגי שונית, שאותם הדייגים מחויבים על-פי חוק לשחרר. אחוזי התמותה של דגים לאחר שחרורם ממלכודות לא נחקרו בארץ, אך בעולם ישנן עדויות לאחוזי תמותה משמעותיים. בהינתן השטחים הימיים המצומצמים לאורך חופי אילת ובהתאם לגודל האוכלוסייה הקטן של מינים רבים (בעיקר מינים גדולים הנדירים מטבעם), נראה שדיג, ובמיוחד דיג באמצעות רשתות שאורכן מאות מטרים, מהווה פגיעה משמעותית במערכת האקולוגית. סקרים לכימות היקף הדיג והשלל במפרץ יאפשרו להעריך את השפעת הדיג על חברות הדגים ואת הפגיעות שלהן ללחץ דיג.

עדויות לשינוי או יציבות במפרץ אילת

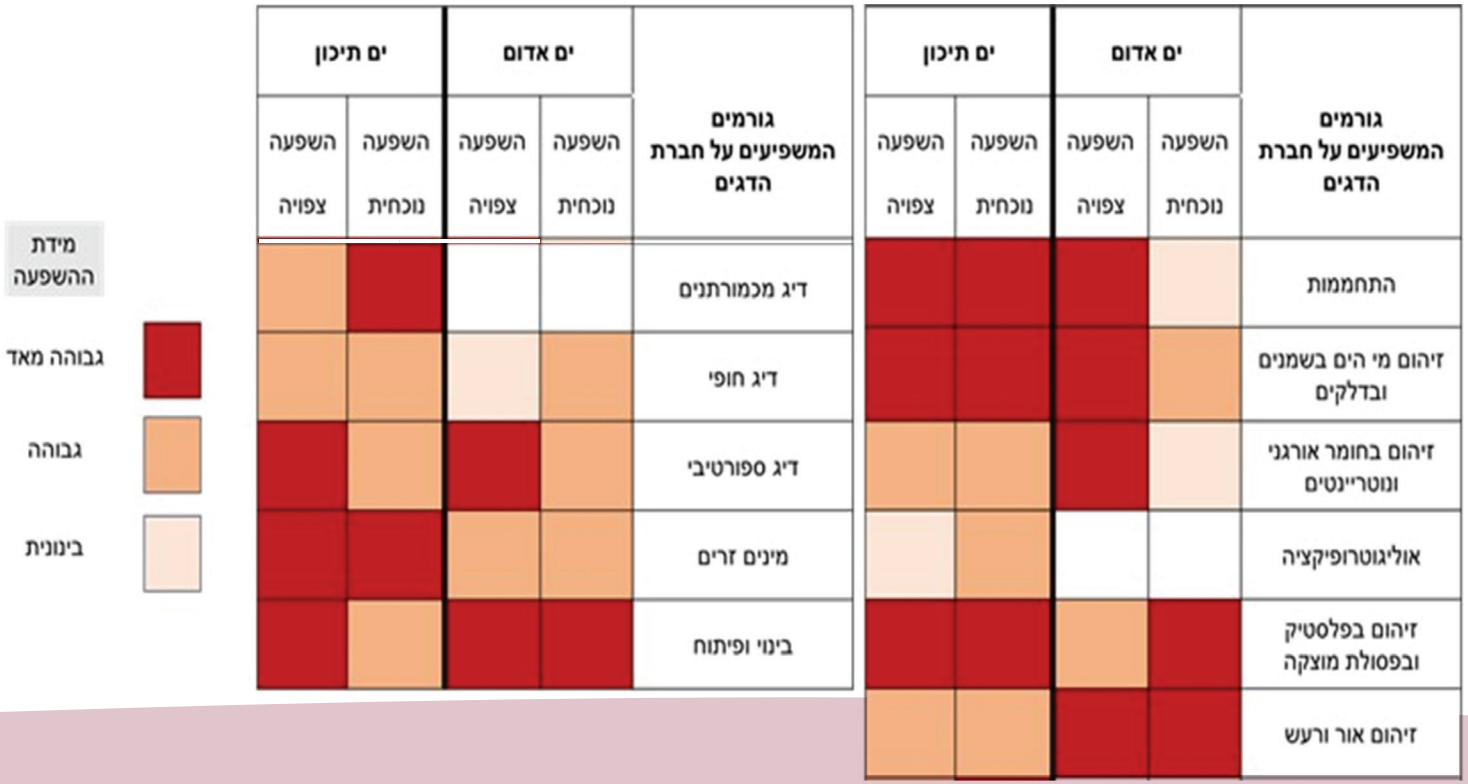
על אף גורמי הסיכון הרבים המאיימים על חברות הדגים במפרץ אילת, אנו מוצאים עדויות ליציבות של חברת הדגים. לדוגמה, כאשר בוחנים את חברות הדגים בבלטי אלמוגים רדודים, תצורת נוף נפוצה בחופי אילת, ניכר כי קיימת יציבות לאורך השנים (2015-2022) וכי צפיפות, עושר ומגוון הדגים נשאר דומה לאורך התקופה[85]. ירידה זמנית בצפיפות הדגים תועדה לאחר הסערה שפקדה את המפרץ במרץ 2020 אך נראה כי חברת הדגים התאוששה בתוך שנה (איור 4ב)[88]. יציבות מבנה חברת הדגים במפרץ אילת מתבטאת גם בדמיון בהתפלגות השכיחות היחסית של מיני דגים שוכני שונית, בין תקופות דיגום שבוצעו בהפרש של כ-10 שנים (איור 4א) (מתוך[91] ונתונים נוספים שלא פורסמו) ובבחינת ממצאי תוכנית הניטור הלאומית במפרץ אילת[92]. במהלך תקופת הסקרים האלו נפתח אתר קאצ"א לציבור, פקדה את חופי אילת סערה חריגה ותועדו מספר גלי חום. על כן, הממצאים המתעדים יציבות בחברת הדגים מעודדים, שכן הם מצביעים על עמידות לשינויים החלים בחופי אילת. עם זאת, חשוב לזכור כי הם מעידים על יציבות בעשורים האחרונים ואינם בהכרח מצביעים כי לא חל שינוי בחברות הדגים ביחס למצב שהיה קיים בתחילת המאה ה-20. כמו כן, יש לזכור שהיציבות של חברת הדגים בכללותה לא בהכרח מעידה על יציבות במרכיביה, ועלולה למסך על שינויים בקבוצות



איור 4. עדויות ליציבות בחברת הדגים במפרץ אילת. א. גרף דירוג שכיחויות: ציר ה-X מייצג את דרגת השכיחות של כל מין בחברת הדגים, כך שהמין הכי נפוץ מדורג ראשון, בקצה השמאלי של העקומה. ציר ה-Y מייצג את השכיחות היחסית. ככל שהעקומה "ישרה" יותר, כך ההבדל בשכיחות בין המין הנפוץ ביותר למין הנדיר ביותר הוא נמוך יותר, והחברה יותר שוויונית. ניתן לראות כי השוויוניות של חברת הדגים בשתי תקופות דיגום דומה, כולל השוואה בין השנים 2005-2011 (הנתונים ברובם מתוך[91] וכוללים מעט נתונים נוספים) ו-2018-2020 . ב. צפיפות הדגים בבלטי האלמוגים הרדודים בחופי אילת כפי שנצפה בנתוני המחנה האקולוגי[85]. סמל הגל מייצג את הדיגום שהתבצע לאחר הסערה שפקדה את חופי אילת במרץ 2020. ניתן לראות שלמעט בחצי השנה שלאחר הסערה צפיפות הדגים הינה יציבה ועומדת על כ-12 דגים למטר רבוע. ג. סקר דגים במפרץ אילת, תמונה באדיבות עומרי עומסי.

פונקציונליות או במינים ספציפיים. חשוב לציין כי כמעט אין מידע על שינויים בהרכב חברת הדגים בבתי גידול שאינם השונית כגון עשב-ים, עמודת המים, בתי גידול עמוקים והקרקעית הרכה. המשך ניטור ומעקב אחרי השפעתם של איומים ספציפיים על חברת הדגים חיוני על מנת להעריך את יציבות החברה לאורך זמן ולאמוד את תגובתה לאירועי עקה המאיימים על המפרץ.

אנו נמצאים לפני תקופה של שינויים רבים ופיתוח מסיבי של קו החוף באילת. לדוגמה, בעשור הקרוב צפוייה בנייה והרחבתה של טיילת להולכי רגל על קו המים, בנייה של מלונות, פרויקט נמל התעלה, הרחבה של פעילות נמל קצא"א ועלייה משמעותית בהיקף מכליות הדלק הפורקות נפט במסוף. כמו כן, טמפרטורת מי הים צפויה להמשיך ולעלות וכן חזויה עלייה באירועי מזג אוויר קיצוניים, כגון סערות וגלי חום. כימות ההשפעה של אירועים אלו על הדגים במפרץ על-ידי ניטור רציף, וכן נקיטת צעדים למניעת הפגיעה, היא הכרחית.



איור 5. סיכום האיומים על חברות הדגים בישראל במפרץ אילת ובים התיכון, מחולק לפי השפעה נוכחית (על פני 20 השנה האחרונות) והשפעה עתידית מוערכת (ל-2050). הצבעים מייצגים את מידת ההשפעה.

האיומים העתידיים על הדגים והדרכים להפחתת השפעתם

חברות הדגים בים התיכון ובים האדום מושפעות רבות משינויים סביבתיים מקומיים וגלובליים. אולם סוג ההשפעות, עוצמתן והמגמה העתידית שלהן על אוכלוסיות הדגים אינן זהות בים התיכון ובים האדום (איור 5, טבלה 1).

לאורך ההיסטוריה דיג היווה גורם מרכזי המשפיע על חברות הדגים בים התיכון. בשנים האחרונות, לחץ הדיג המסחרי ירד כתוצאה מהטמעתן של תקנות דיג חדשות והתמדה באכיפתן, אך הוא עדיין משפיע על חברות דגים מסוימות. במקביל, ענף הדיג הספורטיבי גדל ועלול לפגוע בחברות דגים. לצד זאת, איומים חדשים יותר כמו פיתוח וזיהום הכוללים את מאמצי החיפוש וההפקה של פחמימנים ממאגרי אנרגיה, מהווים מקור פוטנציאלי חדש לנזקים קשים וארוכי טווח בבתי גידול הרגישים לשינויים. התחממות הים הפכה לאחד הגורמים המשפיעים ביותר על הדגים באזורנו, וככל שתימשך מגמת ההתחממות, היא צפויה לשנות באופן דרסטי את חברות הדגים. בנוסף, הכניסה של מינים זרים כבר השפיעה באופן נרחב ובלתי הפיך על חברות הדגים בים התיכון. בעתיד צפויה עלייה מתמשכת במספר המינים הזרים ובשכיחותם שתשפיע באופן משמעותי על חברת הדגים המקומית. חשוב לציין כי גורמי השינוי אינם פועלים בנפרד אלא באופן סינרגיסטי[33,47]. כך תתרום התחממות נוספת של המים, ככל הנראה, להצלחתם של המינים הזרים, והם ישנו את שלל והרכב הדיג. חיזוי ההשפעה ההדדית של גורמים אלו היא מורכבת ומהווה אתגר משמעותי לקהילה המדעית ולמקבלי ההחלטות, במיוחד לאור העובדה שעוצמות ההשפעה של מינים זרים וההתחממות בים התיכון הישראלי גדולות יותר מבכל אזור ימי אחר בעולם.

בים האדום, הפגיעה העיקרית בדגים לאורך שנים רבות נבעה מזיהום ימי, לצד פיתוח עירוני ותיירות שפגעו פיזית בבית הגידול, ופגיעה ישירה כתוצאה מדיג. בעשורים הקרובים, שינויים מקומיים ועולמיים צפויים להגביר את החשיפה לעקות חום, כתוצאה מעלייה בטמפרטורת מי הים, ואת הרס השונית, כתוצאה מהחמצת מי הים. פיתוח עירוני, ודיג ספורטיבי ימשיכו להוות איום ואף צפויים להגביר את השפעתם עם הזמן על כלל בתי הגידול במפרץ. גידול בפעילות הימית ובתיירות כמו פעילויות שיט, צלילה ושנרקול צפוי גם הוא להזיק לשונית ולבתי גידול נוספים ולדגים התלויים בהם. גורם משמעותי שעתיד לסכן את דגי השונית הוא שימוש בנמל הנפט בקצא"א שעלול לגדול על אף התנגדות ציבורית נמרצת. חשוב גם לזכור את ההקשר האזורי, ובעיקר את הפיתוח הקיים והצפוי במדינות שכנות. כך לדוגמה, מגיעים בשנים האחרונות לחופי אילת דגים זרים שברחו ממתקני חקלאות בערב הסעודית[93], ועיר העתיד החדשנית (Neom) המוקמת בערב הסעודית וצפויה להגדיל באופן חסר תקדים את מספר התושבים מסביב למפרץ אילת. ההשלכות של שינויים אלו על חברות הדגים צפויות להיות משמעותיות.

לצד האיומים, עדויות מדעיות חד-משמעיות תומכות בהגדלת השטח והכמות של שמורות הטבע, הן בים התיכון והן בים האדום כאמצעי להגנה על חברות הדגים והמערכת האקולוגית בכללותה. תהליכים של תכנון ואכרזה על שטחים מוגנים נוספים כבר החלה, במטרה להגן על לפחות 30% מהשטח הימי של ישראל, כולל ייצוגיות מלאה של בתי הגידול השונים בהתאמה לאמנת ה-CBD שעליה ישראל חתומה. מטרת התהליך היא להגן על שטח רחב ומייצג, שיתמוך באוכלוסיות דגים יציבות, שיעשירו את שטחי הדיג ובכך יגדילו את השלל הנדוג – מצב אופטימלי של win-win. תכנון השטחים המוגנים וגם מאמצי האכיפה והפיקוח עליהם צריכים להתחשב מראש גם בשינויים שעלולים להתרחש בהרכב חברת הדגים בשמורות על מנת שהם יהיו אפקטיביים שנים קדימה.

מאמצי השימור חייבים להיות מלווים בניטור אפקטיבי ארוך טווח ומבוסס מדע. תקנות הדיג החדשות והגדלת מאמצי האכיפה צמצמו את השפעת הדיג על חברת הדגים, אך כדי לייצר ממשק דיג בר-קיימה לאורך זמן, יש צורך בניטור רציף של אוכלוסיות דגים ורענון תקופתי של תקנות דיג במרחב ובזמן. כך לדוגמה, ניתן בים התיכון לבחון תיעדוף דיג של מינים חובבי חום ומינים זרים. ניטור גם הכרחי לזיהוי התפקוד של שמורות טבע ימיות והצלחת ההגנה עליהן, לזיהוי מינים זרים חדשים ומגמות התפרצות של מינים זרים שכבר התבססו, וזיהוי מוקדם וטיפול באירועי זיהום (נקודתיים או מתמשכים). כיום רוב מאמצי הניטור מתבססים על סקרים דו-שנתיים של רשות הטבע והגנים (ה"ביובליץ" בים התיכון וה"מחנה האקולוגי" בים האדום) שמספקים תובנות חשובות לגבי מצב מיני מפתח ותפקוד שמורות טבע ימיות[44,45,88,94], על פרויקט הניטור הלאומי במפרץ אילת[95] ובים התיכון[23], ועל סקרי שלל של אגף הדיג במשרד החקלאות ובמכון לחקר ימים ואגמים[96]. אולם, ישנם פערים ברציפות הניטור ובפריסתו המרחבית, ובאופן ניתוח נתוני הניטור כבסיס מדעי לקבלת החלטות מושכלות בניהול שמורות ופעילות דיג (לדוגמה, stock assessment). ליווי מדעי משמעותי של פעולות הניטור הקיימות, לצד הרחבת הניטור למרכיבי חברת הדגים הנחקרים פחות, כמו שלבי חיים צעירים, מינים חבויים (קריפטיים), בתי גידול רכים, או מיני ים עמוק, יאפשרו למקסם את התובנות שניתן לגזור מהן. במקביל ישנן יוזמות מקומיות כדוגמת הניטור שמבוצע על-ידי חברת אתרים בחופי תל אביב[97]. הרחבה של יוזמות כאלו, לצד שימוש הולך וגובר במדע אזרחי, יאפשרו לנטר בתי גידול שכרגע לא מקבלים מענה. יחד, חיוני להגדיל את ההבנה וההיערכות לקראת השינויים המשמעותיים שחברות הדגים בים התיכון ובים האדום צפויות לחוות בשנים הקרובות.

טבלה 1. סיכום גורמי הפרעה קיימים בישראל והערכה של השפעה עתידית (ל-2050) במפרץ אילת ובים התיכון.

	ים אדום		ים תיכון	
נושא	**מצב (עבר לעומת הווה)**	**סיכון (עתיד)**	**מצב (עבר לעומת הווה)**	**סיכון (עתיד)**
התחממות והחמצת מי הים	**בינוני** - עד כה מפרץ אילת נפגע פחות משוניות אחרות בעולם, מכיוון שאלמוגי מפרץ אילת יחסית עמידים ובית הגידול יחסית יציב. למרות זאת, דגים נפגעים מאירועי חום.	**גבוה מאוד** - עמידותם של אלמוגי אילת להתחממות תלויה מאוד בכל גורמי ההפרעה. אלה מגבירים את הסיכון לבית הגידול שבתורו ישפיע על דגי השונית.	**גבוה מאוד** - ההתחממות גבוהה פי 10 מהממוצע הגלובלית. לצידה, הקצנה בשכיחות, במשך ובעוצמת גלי חום. מינים אוהבי קור נעלמים, נודדים צפונה או מעמיקים, זאת לצד ירידה בביומסת הדגים הכללית.	**גבוה מאוד** - ההתחממות צפויה לגרום להאצה של שינויים מהותיים בחברת הדגים הים תיכונית. החמצה פחות רלוונטית לדגי הים התיכון באזורינו.
זיהומי ים בדלקים / שמנים	**גבוה** - שופר בצורה ניכרת, אך עדיין, בערך אחת לשנה, ישנו אירוע של זיהום ים בחומרים אלה.	**גבוה מאוד** - הסיכון קיים ועלול להתגבר בעקבות נמל דלק בצד הירדני, תכניות לנמל תעלה בישראל והגברת נפח התעבורה בקצא"א.	**גבוה מאד** - עלייה בחיפוש ומיצוי מאגרי אנרגיה באזור המים הכלכליים של ישראל, לצד תעבורה ימית גבוהה. אירוע זיהום הנפט החמור האחרון התרחש ב-2020.	**גבוה מאוד** - הסיכון עלול להתגבר עם המשך חיפוש אתרים חדשים.
זיהום בחומר אורגני ונוטריינטים	**בינוני** - שופר בצורה ניכרת (כלובי הדגים הוצאו מהים והביוב מטופל). לעומת זאת, תעלת הקינט ממשיכה לזהם את הים בחומר אורגני ונוטריינטים.	**גבוה מאוד** - קיימות תכניות להקמת חוות לחקלאות ימית המחוברות לים. קיימות תכניות להגדלת נפח התפלת המים.	**גבוה** - שיפור ניכר בהזרמת שפכים ממפעלים ומתקני שפכים, אולם עדיין ישנם אירועי זיהום, בעיקר לאחר שטפונות.	**גבוה** - עלייה בצפיפות האוכלוסייה מגבירה את הסיכון. דרושה היערכות למנוע הצפות עקב שטפונות, גם בפני אירועי קיצון אקלימיים.
זיהום בפלסטיק ובפסולת מוצקה	**גבוה מאוד** - כמות הפלסטיק שמגיעה למפרץ מהסביבה היבשתית ומכלי שיט גבוהה מאוד.	**גבוה** - יש מגמה של שיפור בחינוך, אכיפה וחוקי עזר עירוניים. בנוסף, יש זיהום משמעותי מארצות שכנות.	**גבוה מאוד** - כמות הפלסטיק שמגיעה לים בעיקר מהסביבה היבשתית וגם מכלי שיט גבוהה מאוד.	**גבוה מאוד** - יש מגמה של שיפור מקומי בחקיקה ובאכיפה, אך עדיין מהווה בעיה. בנוסף, יש זיהום משמעותי מארצות שכנות.
זיהום אור וזיהום רעש	**גבוה מאוד** - הזנחה ארוכת שנים. זיהום אור פוגע בתפקוד השונית.	**גבוה מאוד** - עלייה במודעות, אך הגברה של פיתוח מואץ.	**גבוה** - זיהום אור גבוה מאוד. חסר ידע לגבי ההשפעה של זיהום רעש ואור על דגים ברמה המקומית.	**גבוה** - עלייה במודעות, אך הגברה של הזיהום בגלל פיתוח מואץ.
פגיעה פיזית בבית הגידול על ידי מתרחצים/ צוללים/כלי שיט	**בינוני** - עומס תיירות גדול מאוד. מצד שני, ההשפעה ירדה על ידי ממשק צוללים, הסברה ואכיפה.	**בינוני** - צפוי המשך עלייה בעומס התיירותי. חשוב להמשיך עם חינוך, הסברה ואכיפה ותכנון ממשק צוללים.		
דיג	**גבוה** - יש מעט דיג חופי, אך חלקו בשיטות בעלות סלקטיביות נמוכה. השטח הכולל הקטן של המפרץ מוביל לעליה בסיכון.	**גבוה** - הדיג החופי יציב או במגמת ירידה אך הדיג הספורטיבי עלול לחדש את העליה.	**גבוה** - עליה ברגולציה ובאכיפה ואכרזת שמורות טבע ימיות הורידה בשנים האחרונות את ההשפעה של הדיג ממצב סיכון גבוה מאוד.	**גבוה** - הדיג החופי ודיג המכמורת יציבים או במגמת ירידה, הדיג הספורטיבי במגמת עליה. המשך האסדרה והאכיפה בתחום צפויות למנוע עליה בסיכונים.
זיהום ביולוגי / מינים זרים / מתפרצים	**גבוה** - הסיכון היה גבוה מאוד בתקופת כלובי הדגים, וכיום גבוה בעיקר בהקשר של מיזמי תיירות ותעלת הקינט.	**גבוה** - יש תוכניות להגדלת שטח חוות דגים יבשתיות. יש תוכניות להגדלת חקלאות ימית במדינות שכנות.	**גבוה מאוד** - מוקד עולמי של מינים זרים מהים האדום.	**גבוה מאוד** - הרחבת תעלת סואץ ועליה מתמשכת בתעבורה הימית תורמות רבות לעלייה בסיכון ממינים זרים.
בינוי ופיתוח	**גבוה מאוד** - תכניות פיתוח רבות בשלבי ביצוע שונים, חלקן גדולות ומשמעותיות, המתפרסות על שטח קטן. השפעה משמעותית על החוף והים.	**גבוה מאוד** - תכניות פיתוח של נמל תעלה, חקלאות ימית, מלונות ותיירות, לרבות מלון תת-ימי. תנופת פיתוח אדירה במדינות שכנות.	**גבוה** - חלק ניכר מהחוף כבר בנוי, כולל נמלים, אסדות ומרינות, בצורה שמשנה את תוואי הזרם והשקעת החול.	**גבוה מאוד** - צפי לבניה מסיבית של שוברי גלים ומרינות לאורך החופים אשר צפוי לגרום לגריעה של המצע החולי. תוכניות רבות לבניית אסדות ופיתוח תשתיות ביוב ואנרגיה.

רשימת מקורות

1. Melli, C. Aaron MacNeil, M., Cheal, A. J., Emslie, M. J. & Julian Caley, M .Marine protected areas increase resilience among coral reef communities. *Ecol. Lett.* **19**, 629–637 (2016).
2. Eyal, G., Tamir, R., Kramer, N., Eyal-Shaham, L. & Loya, Y. The red sea: Israel. in Mesophotic Coral Ecosystems (eds. Loya, Y., Puglise, K. A. & Bridge, T. C. L.) **12**, 199–214 (Springer International Publishing, 2019).
3. DiBattista, J. D. et al. On the origin of endemic species in the Red Sea. *J. Biogeogr.* **43**, 13–30 (2016).
4. Coll, M. et al. The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats. *PLoS ONE* **5**, e11842 (2010).
5. van Rijn, I., Buba, Y., DeLong, J., Kiflawi, M. & Belmaker, J. Large but uneven reduction in fish size across species in relation to changing sea temperatures. *Glob. Chang. Biol.* **23**, 3667–3674 (2017).
6. Frid, O. et al. Marine protected areas' positive effect on fish biomass persists across the steep climatic gradient of the Mediterranean Sea. *J. Appl. Ecol.* **60**, 638–649 (2023).
7. Galil, B. S. & Zenetos, A. A sea change — exotics in the eastern mediterranean sea. in Invasive aquatic species of Europe. distribution, impacts and management (eds. Leppäkoski, E., Gollasch, S. & Olenin, S.) 325–336 (Springer Netherlands, 2002). doi: 10.1007/978-94-015-9956-6_33.
8. Givan, O., Parravicini, V., Kulbicki, M. & Belmaker, J. Trait structure reveals the processes underlying fish establishment in the Mediterranean. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **26**, 142–153 (2017).
9. Weinstein, D. K. et al. Mesophotic reef geomorphology categorization, habitat identification, and relationships with surface cover and terrace formation in the Gulf of Aqaba. *Geomorphology* **379**, 107548 (2021).
10. Edelist, D., Rilov, G., Golani, D., Carlton, J. T. & Spanier, E. Restructuring the Sea: profound shifts in the world's most invaded marine ecosystem. *Diversity Distrib.* **19**, 69–77 (2013).
11. Galil, B. S., Danovaro, R., Rothman, S. B. S., Gevili, R. & Goren, M. Invasive biota in the deep-sea Mediterranean: an emerging issue in marine conservation and management. *Biol. Invasions* **21**, 281–288 (2018).
12. Golani, D. An updated checklist of the Mediterranean fishes of Israel, with illustrations of recently recorded species and delineation of Lessepsian migrants. *Zootaxa* **4956**, (2021).
13. Rothman, S. B. S., Gayer, K. & Stern, N. A long-distance traveler: the peacock rockskipper Istiblennius meleagris (Valenciennes, 1836) on the Mediterranean intertidal reefs. *Biol. Invasions* **22**, 2401–2408 (2020).
14. Galil, B. S., Mienis, H. K., Hoffman, R. & Goren, M. Non-indigenous species along the Israeli Mediterranean coast: tally, policy, outlook. *Hydrobiologia* **848**, 2011–2029 (2020).

15. Belmaker, J., Brokovich, E., China, V., Golani, D. & Kiflawi, M. Estimating the rate of biological introductions: Lessepsian fishes in the Mediterranean. *Ecology* **90**, 1134–1141 (2009).
16. Buba, Y., Kiflawi, M., McGeoch, M. A. & Belmaker, J. Evaluating models for estimating introduction rates of alien species from discovery records. *Glob. Ecol. Biogeogr.* (2023).
17. Zenetos, A. et al. Established non-indigenous species increased by 40% in 11 years in the Mediterranean Sea. *Medit. Mar. Sci.* **23**, (2022).
18. van Rijn, I., Kiflawi, M. & Belmaker, J. Alien species stabilize local fisheries catch in a highly invaded ecosystem. Can. J. Fish. *Aquat. Sci.* **77**, 752–761 (2020).
19. Frid, O. et al. Catch estimates and species composition of recreational fishing in Israel. *Fishes* **8**, 69 (2023).
20. Goren, M., Galil, B. S., Diamant, A., Stern, N. & Levitt-Barmats, Y. Invading up the food web? Invasive fish in the southeastern Mediterranean Sea. *Mar. Biol.* **163**, 180 (2016).
21. Fanelli, E., Azzurro, E., Bariche, M., Cartes, J. E. & Maynou, F. Depicting the novel Eastern Mediterranean food web: a stable isotopes study following Lessepsian fish invasion. *Biol. Invasions* **17**, 2163–2178 (2015).
22. Corrales, X. et al. Modeling the role and impact of alien species and fisheries on the Israeli marine continental shelf ecosystem. *J. Mar. Syst.* **170**, 88–102 (2017).
23. רהב, א וחובריו. תוכנית הניטור הלאומי בים התיכון לשנת 2022. ניטור המגוון הביולוגי H27/2023, דוח חיא"ל (2023).
24. Stern, N. et al. Distribution and population structure of the alien Indo-Pacific Randall's threadfin bream Nemipterus randalli in the eastern Mediterranean Sea. *J. Fish Biol.* **85**, 394–406 (2014).
25. Goren, M. & Galil, B. S. Fish biodiversity in the vermetid reef of Shiqmona (Israel). *Mar. Ecol.* **22**, 369–378 (2001).
26. Sala, E., Kizilkaya, Z., Yildirim, D. & Ballesteros, E. Alien marine fishes deplete algal biomass in the Eastern Mediterranean. *PLoS ONE* **6**, e17356 (2011).
27. Rilov, G. et al. Alien turf: Overfishing, overgrazing and invader domination in south-eastern Levant reef ecosystems. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* **28**, 351–369 (2017).
28. Yeruham, E., Shpigel, M., Abelson, A. & Rilov, G. Ocean warming and tropical invaders erode the performance of a key herbivore. *Ecology* **101**, e02925 (2020).
29. Stern, N. & Rothman, S. B. S. Divide and conserve the simultaneously protected and invasive species. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* **29**, 161–162 (2019).
30. D'Agostino, D. et al. Behavioural traits and feeding ecology of Mediterranean lionfish and naiveté of native species to lionfish predation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **638**, 123–135 (2020).

31. Ulman, A. et al. Low pufferfish and lionfish predation in their native and invaded ranges suggests human control mechanisms may be necessary to control their mediterranean abundances. *Front. Mar. Sci.* **8**, (2021).
32. Chaikin, S., De-Beer, G., Yitzhak, N., Stern, N. & Belmaker, J. The invasive silver-cheeked toadfish (Lagocephalus sceleratus) predominantly impacts the behavior of other non-indigenous species in the Eastern Mediterranean. *Biol. Invasions* **25**, 983–990 (2022).
33. Givan, O., Edelist, D., Sonin, O. & Belmaker, J. Thermal affinity as the dominant factor changing Mediterranean fish abundances. *Glob. Chang. Biol.* **24**, e80–e89 (2018).
34. Arndt, E., Givan, O., Edelist, D., Sonin, O. & Belmaker, J. Shifts in eastern mediterranean fish communities: abundance changes, trait overlap, and possible competition between native and non-native species. *Fishes* **3**, 19 (2018).
35. Buba, Y. & Belmaker, J. Native-exotic diversity relationships for Eastern Mediterranean fishes reveal a weak pattern of interactions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **611**, 215–220 (2019).
36. Buba, Y. et al. Remarkable size-spectra stability in a marine system undergoing massive invasion. *Biol. Lett.* **13**, (2017).
37. Edelist, D. et al. Israel: Reconstructed estimates of total fisheries removals in the Mediterranean, 1950–2010. *Acta Adria* **54**, 253–264 (2013).
38. Edelist, D., Sonin, O., Golani, D., Rilov, G. & Spanier, E. Spatiotemporal patterns of catch and discards of the Israeli Mediterranean trawl fishery in the early 1990s: ecological and conservation perspectives. *Sci. Mar.* **75**, 641–652 (2011).
39. Levy, Y. et al. A small fishery with a high impact on sea turtle populations in the eastern Mediterranean. Zool. *Middle East* **61**, 300–317 (2015).
40. Frid, O. & Belmaker, J. Catch dynamics of set net fisheries in Israel. *Fish. Res* **213**, 1–11 (2019).
41. מלמוד, ש., פריד, א., בלמקר, י. דוח מסכם - סקר לכימות ההשפעה האקולוגית והכלכלית של שלל הלוואי בדיג החופי, ודרכים למניעתו על-ידי הגברת סלקטיביות הרשת. דוח לאגף הדיג, משרד החקלאות ופיתוח הכפר (2018).
42. Edgar, G. J. et al. Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature* **506**, 216–220 (2014).
43. Giakoumi, S. et al. Ecological effects of full and partial protection in the crowded Mediterranean Sea: a regional meta-analysis. *Sci. Rep.* **7**, 8940 (2017).
44. Frid, O., Lazarus, M., Malamud, S., Belmaker, J. & Yahel, R. Effects of marine protected areas on fish communities in a hotspot of climate change and invasion. *Medit. Mar. Sci.* **23**, 157–190 (2022).
45. Ohayon, S. et al. Consistent edge effect patterns revealed using continuous surveys across an Eastern Mediterranean no-take marine protected area. *ICES J. Mar. Sci* **80**, 1594–1605 (2023).

46. Ohayon, S., Granot, I. & Belmaker, J. A meta-analysis reveals edge effects within marine protected areas. *Nat. Ecol. Evol.* **5**, 1301–1308 (2021).
47. Corrales, X. et al. Future scenarios of marine resources and ecosystem conditions in the Eastern Mediterranean under the impacts of fishing, alien species and sea warming. *Sci. Rep.* **8**, 14284 (2018).
48. Ozer, T., Gertman, I., Gildor, H. & Herut, B. Thermohaline temporal variability of the SE Mediterranean coastal waters (Israel) – Long-Term Trends, Seasonality, and Connectivity. *Front. Mar. Sci.* **8**, (2022).
49. Sonin, O. et al. Nanism (dwarfism) in fish: a comparison between red mullet Mullus barbatus from the southeastern and the central Mediterranean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **343**, 221–228 (2007).
50. Shapiro Goldberg, D., van Rijn, I., Kiflawi, M., Belmaker, J. & Handling editor: Mikko Heino. Decreases in length at maturation of Mediterranean fishes associated with higher sea temperatures. *ICES J. Mar. Sci* **76**, 946–959 (2019).
51. Buba, Y., DeLong, J. P. & Belmaker, J. Synthesizing drivers of fish functional responses across species. *Fish.* **23**, (2021).
52. Gamliel, I. et al. Incorporating physiology into species distribution models moderates the projected impact of warming on selected Mediterranean marine species. *Ecography* **43**, 1090–1106 (2020).
53. Chaikin, S., Dubiner, S. & Belmaker, J. Cold-water species deepen to escape warm water temperatures. *Glob. Ecol. Biogeogr* **31**, 75–88 (2022).
54. Ozer, T., Gertman, I., Kress, N., Silverman, J. & Herut, B. Interannual thermohaline (1979–2014) and nutrient (2002–2014) dynamics in the Levantine surface and intermediate water masses, SE Mediterranean Sea. *Glob. Planet. Change* **151**, 60–67 (2017).
55. Chaikin, S. & Belmaker, J. Fish depth redistributions do not allow maintenance of abundance in a region of rapid change. *Oikos* **2023**, e09650 (2023).
56. Spanier, E. & Zviely, D. Key Environmental Impacts along the Mediterranean Coast of Israel in the Last 100 Years. *JMSE* **11**, 2 (2022).
57. Herut, B. et al. Marine oligotrophication due to fine sediments and nutrient starvation caused by anthropogenic sediment and water retention in large rivers: the Nile damming case. *Front. Mar. Sci.* **10**, (2023).
58. Edelist, D. & Spanier, E. Influence of Levantine Artificial Reefs on the fish assemblage of the surrounding seabed. *Medit. Mar. Sci.* **10**, (2009).
59. Lipsky, G. Shipwrecks in the Levant Basin: Species-diversity hotspots or invader paradise? (Tel Aviv University, 2012).
60. Shoham-Frider, E. et al. Legacy groundwater pollution as a source of mercury enrichment in marine food web, Haifa Bay, Israel. *Sci. Total Environ.* **714**, 136711 (2020).
61. חרות, ב. וחובריו. תוכנית הניטור הלאומי בים התיכון לשנת 2022. ניטור זיהום ים H26/2023. דוח חיא"ל (2023).

62. Bencheikh, Z. et al. Chemical pollution impairs the health of fish species and fishery activities along the Algeria coastline, Mediterranean Sea. *Environ. Monit. Assess.* **194**, 497 (2022).
63. van der Hal, N., Yeruham, E. & Angel, D. L. Dynamics in microplastic ingestion during the past six decades in herbivorous fish on the mediterranean Israeli coast. in Proceedings of the international conference on microplastic pollution in the mediterranean sea (eds. Cocca, M. et al.) 159–165 (Springer International Publishing, 2018). doi: 10.1007/978-3-319-71279-6_21.
64. Petersen, K. L., Frank, H., Paytan, A. & Bar-Zeev, E. Impacts of seawater desalination on coastal environments. in Sustainable Desalination Handbook 437–463 (Elsevier, 2018). doi: 10.1016/B978-0-12-809240-8.00011-3.
65. Kelaher, B. P., Clark, G. F., Johnston, E. L. & Coleman, M. A. Effect of desalination discharge on the abundance and diversity of reef fishes. *Environ. Sci. Technol.* **54**, 735–744 (2020).
66. Barash, A. et al. Some Like It Hot: Investigating Thermoregulatory behavior of carcharhinid sharks in a natural environment with artificially elevated temperatures. *Fishes* **8**, 428 (2023).
67. בן-משה, נ., ליבנה, ע., סלינגרה, ש., רנן, א. זיהום אור בישראל - היבטים אקולוגיים ומרחביים 2022. מתוך כרך מגמות ואיומים, המארג – התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע. עורכים: בן-משה, נ. ורנן, א. מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב, (2022).
68. Di Franco, E. et al. Effects of marine noise pollution on Mediterranean fishes and invertebrates: A review. *Mar. Pollut. Bull.* **159**, 111450 (2020).
69. Wadia, W. Effect of regulation of the Nile river on the bioproductivity of southeastern Mediterranean Sea. *J. Ichthyol.* **22**, 164–167 (1982).
70. שבתאי, ע. ורוטשילד, א. תוכנית אב לשמורות טבע ימיות באזור הכלכלי הבלעדי בים התיכון. החברה להגנת הטבע (2023).
71. Fishelson, L. Ecology of coral reefs in the Gulf of Aqaba (Red Sea) influenced by pollution. *Oecologia* **12**, 55–67 (1973).
72. Loya, Y. The coral reefs of Eilat — past, present and future: three decades of coral community structure studies. in Coral health and disease (eds. Rosenberg, E. & Loya, Y.) 1–34 (Springer Berlin Heidelberg, 2004). doi: 10.1007/978-3-662-06414-6_1.
73. שקד, י. וגנין, א. התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת – דוח מדעי לשנת 2020 (2021).
74. Loya, Y. & Rinkevich, B. Effects of oil pollution on coral reef communities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **3**, 167–180 (1980).
75. Fishelson, L. Stability and instability of marine ecosystems, illustrated by examples from the Red Sea. *Helgolander Wiss. Meeresunters* **30**, 18–29 (1977).

76. Vered, G., Kaplan, A., Avisar, D. & Shenkar, N. Using solitary ascidians to assess microplastic and phthalate plasticizers pollution among marine biota: A case study of the Eastern Mediterranean and Red Sea. *Mar. Pollut. Bull.* **138**, 618–625 (2019).
77. Vered, G. & Shenkar, N. Plastic pollution in a coral reef climate refuge: Occurrence of anthropogenic debris, microplastics, and plasticizers in the Gulf of Aqaba. *Sci. Total Environ.* **905**, 167791 (2023).
78. Fobert, E. K., Burke da Silva, K. & Swearer, S. E. Artificial light at night causes reproductive failure in clownfish. *Biol. Lett.* **15**, 20190272 (2019).
79. Schligler, J., Cortese, D., Beldade, R., Swearer, S. E. & Mills, S. C. Long-term exposure to artificial light at night in the wild decreases survival and growth of a coral reef fish. *Proc. Biol. Sci.* **288**, 20210454 (2021).
80. Kunc, H. P., McLaughlin, K. E. & Schmidt, R. Aquatic noise pollution: implications for individuals, populations, and ecosystems. *Proc. Biol. Sci.* **283**, (2016).
81. Holles, S., Simpson, S. D., Radford, A. N., Berten, L. & Lecchini, D. Boat noise disrupts orientation behaviour in a coral reef fish. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **485**, 295–300 (2013).
82. Ferrier-Pagès, C. et al. Noise pollution on coral reefs? - A yet underestimated threat to coral reef communities. *Mar. Pollut. Bull.* **165**, 112129 (2021).
83. Costello, K. E., Lynch, S. A., McAllen, R., O'Riordan, R. M. & Culloty, S. C. Assessing the potential for invasive species introductions and secondary spread using vessel movements in maritime ports. *Mar. Pollut. Bull.* **177**, 113496 (2022).
84. Oron, S., Akkaynak, D., Goodman Tchernov, B. N. & Shaked, Y. How monster storms shape fringing reefs: Observations from the 2020 Middle East Cyclone. *Ecosphere* **14**, (2023).
85. גבריאל, ט., לוי, ל., בלמקר, י. זבולוני, א. מחנה אקולוגי במפרץ אילת. רשות הטבע והגנים (2023).
86. Fine, M., Gildor, H. & Genin, A. A coral reef refuge in the Red Sea. *Glob. Chang. Biol.* **19**, 3640–3647 (2013).
87. Genin, A., Levy, L., Sharon, G., Raitsos, D. E. & Diamant, A. Rapid onsets of warming events trigger mass mortality of coral reef fish. *Proc Natl Acad Sci USA* **117**, 25378–25385 (2020).
88. Gavriel, T. et al. An extreme storm decreases reef fish abundance and richness but does not impact spatial heterogeneity. *Coral Reefs* (2023) doi: 10.1007/s00338-023-02418-z.
89. Yuval, M. et al. Assessment of storm impact on coral reef structural complexity. *Sci. Total Environ.* **891**, 164493 (2023).
90. Tesfamichael, D. & Pauly, D. The Red Sea ecosystem and fisheries. **7** 203 (Springer Netherlands, 2016).
91. Brokovich, E., Baranes, A. & Goren, M. Habitat structure determines coral reef fish assemblages at the northern tip of the Red Sea. *Ecological Indicators* **6**, 494–507 (2006).

92. שקד, י. וגנין, א. התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת – דוח מדעי לשנת 2021. המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת (2022).
93. Stern, N. & Rothman, S. B.-S. An alarming mariculture breach in a coral reef: alien barramundi Lates calcarifer (Bloch, 1790) at the Northern Red Sea. *Bioinvasions Rec.* **10**, 181–187 (2021).
94. לצרוס, מ., פריד-לנדאו, א., יהל, ר. סקר ביולוגי בשמורות טבע ימיות בים התיכון הישראלי. פרק ב' - מבנה חברת הדגים. דוח מסכם לסקרי 2015, 2017, 2019, 2021. רשות הטבע והגנים הלאומיים (2022).
95. שקד, י. וגנין, א. התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת – דוח מדעי לשנת 2022. המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת (2023).
96. אדליסט, ד. דוח שנתי למשרד החקלאות. ניטור הדיג בים התיכון בישראל לשנת 2020. חברת נחשון עבודות ימיות בע"מ (2021).
97. קליין, י. וחובריו. זמן להעמיק: פרויקט הניטור הימי לאורך חופי תל-אביב–יפו המאפשר ניהול מושכל ופיתוח מקיים של רצועות החוף והים. אקולוגיה וסביבה, כתב עת למדע ולמדיניות הסביבה **12** (2021).

37 יונקי הים התיכון בישראל

אביעד שיינין[3,1], יאלי מבורך[1], מיה אלסר[3,2], יותם צוריאל[3,1], קים קובו[1], אייל ביגל[4,3,1], אורי גלילי[1], דני כרם[2,1], דן צ'רנוב[1], דני מוריק[5,1]

[1] תחנת מוריס קהאן לחקר הים, בית הספר למדעי הים ע"ש ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה
[2] המכון ללימודי ים ע"ש ליאון רקאנטי, אוניברסיטת חיפה
[3] עמותת דלפיס
[4] תחנה ימית הופקינס, אוניברסיטת סטנפורד
[5] החוג לביוטכנולוגיות כחולות וחקלאות ימית מקיימת, בית הספר למדעי הים ע"ש ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה

ascheinin@univ.haifa.ac.il,
yaly.me@gmail.com,
elasar.ma@gmail.com,
yotam_zu@yahoo.com,
kimko392@gmail.com,
eyalbigal@gmail.com,
ori_g_inal@yahoo.com,
dankerem@research.haifa.ac.il,
dtchernov@univ.haifa.ac.il,
dmorick@univ.haifa.ac.il

תקציר

היונקים הימיים מהווים טורפי-על במערכת הימית, חשיבותם למערכת רבה ומצבם מהווה מדד טוב לבריאות המערכת הימית בכללותה. בתחילת הדרך, התמקד מחקר היונקים הימיים בישראל באוכלוסיית הדולפינים החופית והתבסס על דיווחי תצפיות אקראיות על-ידי אנשי ים והגעה לחוף (החפה) של יונקים ימיים מתים. בתחילת שנות האלפיים החל מחקר סדור של אוכלוסיית הדולפינים החופיים שהתבסס על סקרים יזומים. המחקר ארוך השנים הניב מידע איכותי וייחודי במזרח הים התיכון על שני מיני דולפינים חופיים: הדולפינן המצוי, שמקיים אוכלוסייה קבועה ויציבה לאורך כל החוף הישראלי בים התיכון, והדולפין המצוי שמקיים אוכלוסייה קטנה בחוף הדרומי של ישראל ואוכלוסייתו נמצאת במגמה מטרידה של ירידה בגודלה. אוכלוסיית כלב-הים הנזירי הים תיכוני נמצאת במגמת התאוששות מעודדת במזרח הים התיכון. בישראל, לאחר היעלמות של כארבעים שנה, תועדו בעשור האחרון מעל מאה תצפיות של לפחות ארבעה פרטים שונים. סקר בתי גידול קבע שיש חוסר משמעותי במערות מנוחה והמלטה, והראה את הצורך בשיקום מערות שקרסו והקמה של מחסות מלאכותיים במטרה להחזיר את כלב-הים הנזירי לחוף הישראלי באופן קבוע. פער הידע המשמעותי ביותר בתחום היונקים הימיים קיים בים העמוק, במים הכלכליים הבלעדיים של ישראל. מחקר ראשוני מראה שיש נוכחות של לווייתנים צוללי עומק ומיני דולפינים שונים. העומס ההולך וגדל של פעילות אנושית בים העמוק מחזק את הצורך במחקר וניטור קבוע של אוכלוסיות אלה ובהגנה עליהן, אוכלוסיות שמהוות מדד חשוב גם לבריאות הים העמוק של ישראל.

מבוא

היונקים הימיים, כטורפי-על במערכת האקולוגית הימית, נחשבים כ"מיני דגל", שגרירים לשמירה על הים וכ"מיני התרעה" (sentinel species), המעידים על מצב בריאותה של הסביבה הימית הן במובן הרחב של "בריאות המערכת" והן במובן הצר של בריאות האדם כצרכן של משאבי המזון הימיים. ניידותם הנרחבת, תוחלת חייהם הארוכה, מיקומם הגבוה כטורפי-על במארג המזון והימצאות רקמות מאגר שומניות בגופם הופכים אותם ל"קטלוג שוחה" האוצר ומתעד תמונה אינטגרטיבית במרחב ובזמן של זיהום ימי כימי וביו-פתולוגי[1]. כיונקים, תגובת מערכות גופם לעומס הזיהומי הינה בעלת משמעות מיידית להם והיקש ישיר לאדם שיכול להיפגע מהזיהום. בעיית הזיהום ממקורות יבשתיים תקפה במיוחד לגבי מינים השוהים בקרבת החוף וחולקים עם האדם מקורות מזון ימיים. האיומים העיקריים על היונקים הימיים במזרח הים התיכון הם לכידה בלתי מכוונת בציוד דיג (דיג מכמורת ורשתות עמידה), דילול משאבי מזון בעקבות דיג יתר, הרס סביבת המחיה החופית, זיהום כימי, זיהום רעש והתנגשות עם כלי שיט, בעיקר של לווייתנים גדולים. מיני היונקים הימיים בים התיכון הנצפים מול החוף הישראלי מעודכנים בטבלה 1. איומים מקומיים בים התיכון לאוכלוסייה החופית לא השתנו לאורך השנים ופירוט לגביהם ניתן למצוא בכרם וחובריו 2014[1].

טבלה 1. מיני היונקים הימיים בים התיכון הנצפים מול החוף הישראלי

מין	שם מדעי	אורך בוגר מקסימלי (מ')	תפוצה באגן הלבנט	קטגוריית סיכון	אזור מחייה
כלב ים נזירי ים-תיכוני	*Monachus monachus*	2.8	שוכן קבע	פגיע	חופי
ראשתן גדל-ראש	*Physeter macrocephalus*	זכר- 18 נקבה- 12	שוכן קבע	בסכנת הכחדה	ים עמוק
זיפיוס חלול-חרטום	*Ziphius cavirostris*	7	שוכן קבע	פגיע	ים עמוק
גרמפוס אפור	*Grampus griseus*	4	שוכן קבע	בסכנת הכחדה	ים עמוק
דולפינן מצוי	*Tursiops truncatus*	2.5-3	שוכן קבע	לא בסיכון	חופי
סטנלה פסוסה	*Stenella coeruleoalba*	2.3	שוכן קבע	לא בסיכון	ים עמוק
דולפין מצוי	*Delphinus delphis*	1.8-2.3	שוכן קבע	בסכנת הכחדה	חופי
סטנו תלום-שן	*Steno bredanensis*	2.6	שוכן קבע	בסיכון נמוך	ים עמוק
עב-שן קטלני	*Pseudorca crassidens*	6	מזדמן (ספק שוכן קבע)		חופי/ים עמוק
לוויתן מצוי	*Balaenoptera physalus*	20	מזדמן	בסכנת הכחדה	ים עמוק
לוויתן גוץ	*Balaenoptera acutorostrata*	8	מזדמן נדיר		חופי/ים עמוק
לוויתן אפור	*Eschrichtius robustus*	15	תועה מהאוקינוס השקט (תצפית בודדת)		חופי
קטלן	*Orcinus orca*	8.5-10	תועה מהאטלנטי		חופי
דולפין מגובנן של האוקיאנוס ההודי	*Sousa plumbea*	2.7	תועה - מהגר לספסי (תצפית בודדת)		חופי

על סמך ה'רשימה האדומה' של IUCN, בהתייחס לתת-האוכלוסיות של הים התיכון, נכון ל-2023[1].

בפרק זה נתמקד במחקר החופי ארוך השנים של יונקים ימיים – מסדרת הטורפים ממשפחת כלבי הים ומסדרת הלוויתנאים ממשפחת הדולפינים, במחקר ראשוני של היונקים הימיים בים העמוק ובמחקר מתמשך של גורמי התחלואה של מינים חופיים ושל הים העמוק. המחקרים בוצעו במסגרת הפעילות המחקרית של תחנת מוריס קאהן לחקר הים, בבית הספר למדעי הים ע"ש צ'רני, המכון ללימודי ים ע"ש ליאון רקאנטי באוניברסיטת חיפה ושל עמותות דלפיס ומחמל"י.

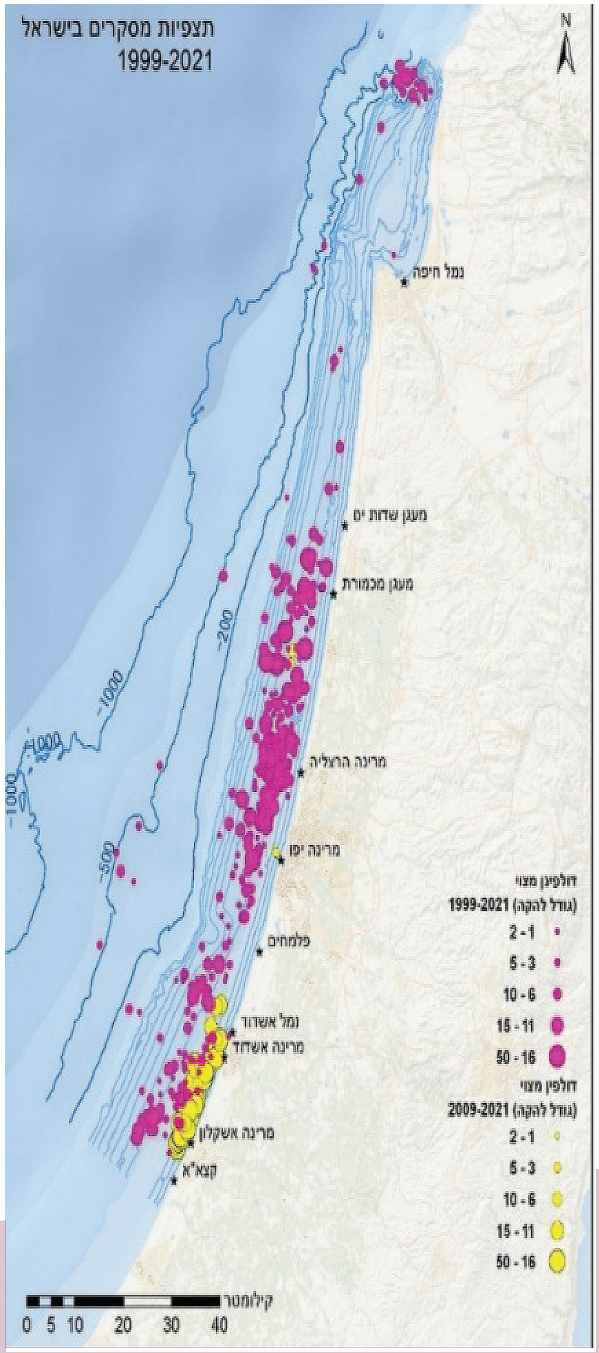
הדולפינים החופיים

הדולפינים החופיים מהווים חלק חשוב ומשמעותי במערכות האקולוגיות הימיות לאורך קווי החוף העולמיים. הם נמצאים במערכת יחסים תמידית עם קו החוף העמוס בפעילות אנושית ומהווים אינדיקטור חשוב להשפעה שלנו על הסביבה הימית. הדולפינים מאופיינים במבנה גוף הידרודינמי המאפשר להם לשחות במהירויות גבוהות ולבצע תמרונים חדים, ובמערכת חברתית מורכבת הכוללת תקשורת ווקאלית וויזואלית מתקדמת. הדולפינים החופיים ניזונים ממגוון רחב של דגים ופרוקי רגליים, ומשתמשים בטכניקות ציד מתוחכמות כגון קיבוץ עדרי דגים ושימוש בגלי קול לאיתור טרף. בפרק זה נכיר את הביולוגיה והאקולוגיה של הדולפינים החופיים בישראל, נעמיק בהתנהגותם החברתית, ונבחן את האתגרים הסביבתיים המשפיעים על אוכלוסיותיהם, כולל זיהום ימי ושינויי אקלים. כמו כן, נעסוק במחקרים ובמאמצי השימור השונים שמבוצעים לשם הבטחת הישרדותם של הדולפינים החופיים בסביבתם הטבעית.

בקרבת קו החוף של ישראל חיים כדרך קבע שני מינים של דולפינים חופיים (איור 1)[2]. הדולפינן המצוי (*Tursiops truncatus*) והדולפין המצוי (*Delphinus delphis*) מאכלסים את אזור מדף היבשת לאורך כל השנה, בעיקר בעומקים רדודים של 20-80 מטרים. הדולפינן המצוי הינו אפור וגדול, אורכם של הפרטים הבוגרים ברחבי העולם נע בין שניים לארבעה מטרים, ומשקלם נע בין 150 ל-650 קילוגרמים, בארץ הם נפוצים לאורך החוף כולו, בקבוצות קטנות של כחמישה פרטים בממוצע. הדולפין המצוי לעומתו, הינו קטן יותר ואורכו נע בין 1.9-2.5 מטרים עם משקל הנע בין 80 ל-230 קילוגרמים. בישראל תפוצתם מוגבלת לדרום, בעיקר בין אשדוד לאשקלון, והם נעים בקבוצות גדולות יותר של בין 10 ל-20 פרטים. שני המינים ניזונים ממגוון רחב של דגים קטנים, שוכני קרקעית או להקתיים בגוף המים, אשר חלקם נדוגים על-ידי ספינות מכמורת למאכל או כשלל לוואי[3,4]. לאור המצב הזה, הדולפינים נצפים לעיתים קרובות בקרבת רשתות המכמורת בניסיון לצוד שאריות מהרשת.

בעשורים האחרונים מתבצעים מחקרי ניטור ארוכי טווח שמטרתם להבין את מאפייני האוכלוסיות של שני המינים בקרבת ישראל – תפוצה, גודל, ומבנה, ואת הגורמים המשפיעים עליהם וזאת, בנוסף לסקרנות המדעית, על מנת להבטיח את שימורם בסביבתנו. מחקר הדולפינן המצוי התחיל בשנות ה-90 המאוחרות, בתחילה מתצפיות אקראיות ובהמשך, מתחילת שנות ה-2000, עם מחקר שיטתי ארוך טווח. מחקר הדולפין המצוי לעומת זאת, החל באופן שיטתי רק בשנת 2016. באיור 2 ניתן לראות את פיזור התצפיות של שני המינים לאורך שנות המחקר שלהם. ניתן לראות שהתצפיות הן מאשקלון בדרום ועד ראש הנקרה בצפון כאשר מרבית התצפיות הן מדרום לשדות ים עד אשקלון.

איור 1. א. דולפינן מצוי. ב. דולפין מצוי. צילום: אביעד שייניין.



איור 2. מפת תצפיות של הדולפינים החופיים בין השנים 1999-2021 עם התייחסות לגודל להקה בהתאם לגודל העיגול. תצפיות של הדולפינן המצוי בוורוד ודולפין מצוי בצהוב (מרבית מאמץ הסקרים בדרום ותצפיות הדולפין המצוי בהתאם התבצעו בין השנים 2016-2021).

רוב המחקר מתבסס על סקרי ים (הפלגות מחקר) אשר מתבצעים מכלי שיט ועובדים לפי פרוטוקול עבודה מסודר שהוגדר על-פי המחקר. הסקרים כוללים הפלגה בעיקר בטווח עומקים של 30-80 מטרים (אזור המחיה העיקרי של הדולפינים החופיים) וחיפוש אחר דולפינים. במידה שהחוקרים מזהים ספינת דיג מכמורת במהלך ההפלגה, הם יתקרבו לספינה על מנת לבדוק אם ישנם דולפינים אשר עוקבים אחריה ואוכלים מהרשת. כאשר יש תצפית דולפינים, החוקרים אוספים נתוני מיקום והתנהגות של הדולפינים ומצלמים אותם על מנת לבצע זיהוי פרטני על-פי צדודית סנפיר הגב, כפי שניתן לראות באיור 3. לאורך חייהם, צוברים הדולפינים סימנים וצלקות על סנפיר הגב שלהם אשר אינם מחלימים ומאפשרים זיהוי פרטני לאורך שנים ארוכות, כמו טביעת אצבע ייחודית. כאשר מתאפשר, מבוצעות גם הקלטות תת-ימיות של התקשורת בין הפרטים בלהקה והטסת רחפן מעליה.

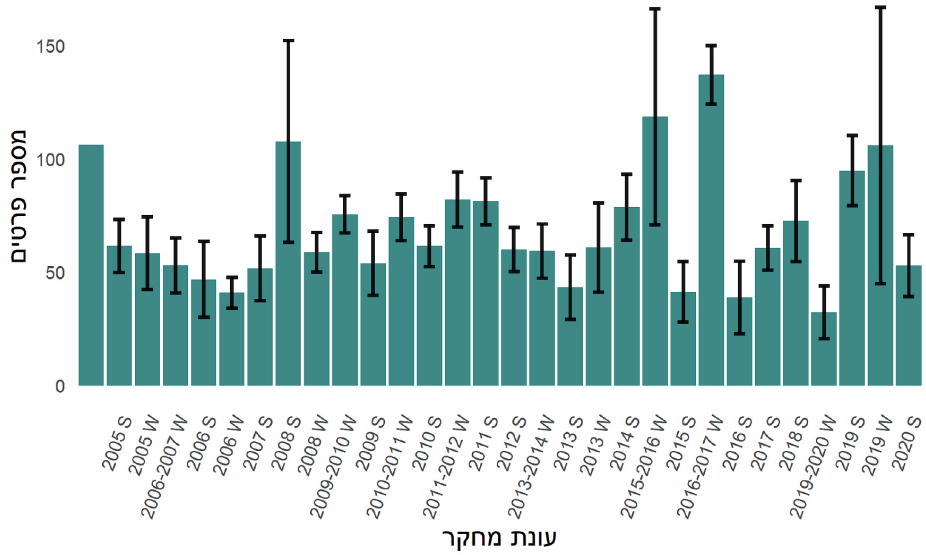
לאחר שנים ארוכות של איסוף נתונים, ניתן להעריך באמצעות מודלים מתמטיים את גודל האוכלוסייה ולבחון את התנודות והשינויים לאורך השנים. אחד המודלים שבהם השתמשנו מתבסס על זיהויים חוזרים של דולפינים מוכרים באוכלוסייה.

איור 3. דוגמה של מספר סנפירי גב של דולפיננים מהאוכלוסייה הישראלית, אשר מקוטלגים עם שם ומספר קטלוגי.

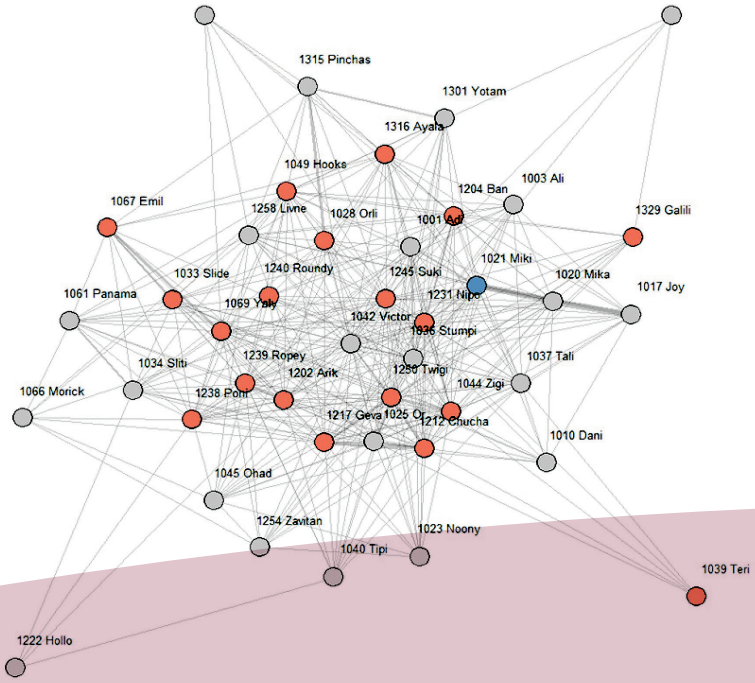
דולפינן מצוי

על סמך תוצאות המודל של הדולפיננים המצויים, בכל רגע נתון בשטח המחקר בישראל נמצאים בממוצע 70 פרטים, כאשר סך הכול זוהו 360 סנפירים שונים לאורך שנות המחקר (2005-2020)[2]. כמות זו נשארה יחסית יציבה לאורך שנות המחקר בלי להראות מגמה ברורה של ירידה או עלייה במספר הפרטים (איור 4). השונות בין מספר הפרטים בכל רגע נתון לבין כמות הסנפירים הכללית מאפיינת לרוב "אוכלוסיות פתוחות" של דולפינים, שבהן האוכלוסייה חולשת על אזור גדול יותר מהאזור הנחקר והדולפינים המזוהים מהווים רק חלק מכלל הפרטים באוכלוסייה.

בהתאם לכך, הדולפינים החיים לחופי ישראל הם ככל הנראה חלק מסופר-אוכלוסייה גדולה יותר ופתוחה של מין זה אשר חולשת על אזור מזרח הים התיכון ונמצאת גם בסביבת החופים של המדינות השכנות. באוכלוסייה בעלת אופי כזה, הדולפיננים שוחים בכל הגזרה בחופשיות ורובם נצפה פעמים בודדות בלבד באזורנו. מתוך כל הדולפיננים באוכלוסייה, ישנו גרעין של 42 פרטים אשר נצפים בתדירות גבוהה ונראה כי בחרו בישראל כמגורי קבע. אותו גרעין מנהל מבנה חברתי פתוח, שבו הקבוצות מתפרקות ונבנות מחדש בתדירות גבוהה והדולפינים שבהן מנהלים קשרים אקראיים וחלשים עם שאר הדולפינים בגרעין ומעט קשרים חזקים וארוכי טווח עם דולפינים ספציפיים. המבנה החברתי של גרעין אוכלוסיית הדולפינן המצוי, המונה 42 פרטים, מוצג באיור 5 ונצפה בתדירות גבוהה לאורך חופי ישראל במהלך שנות המחקר.



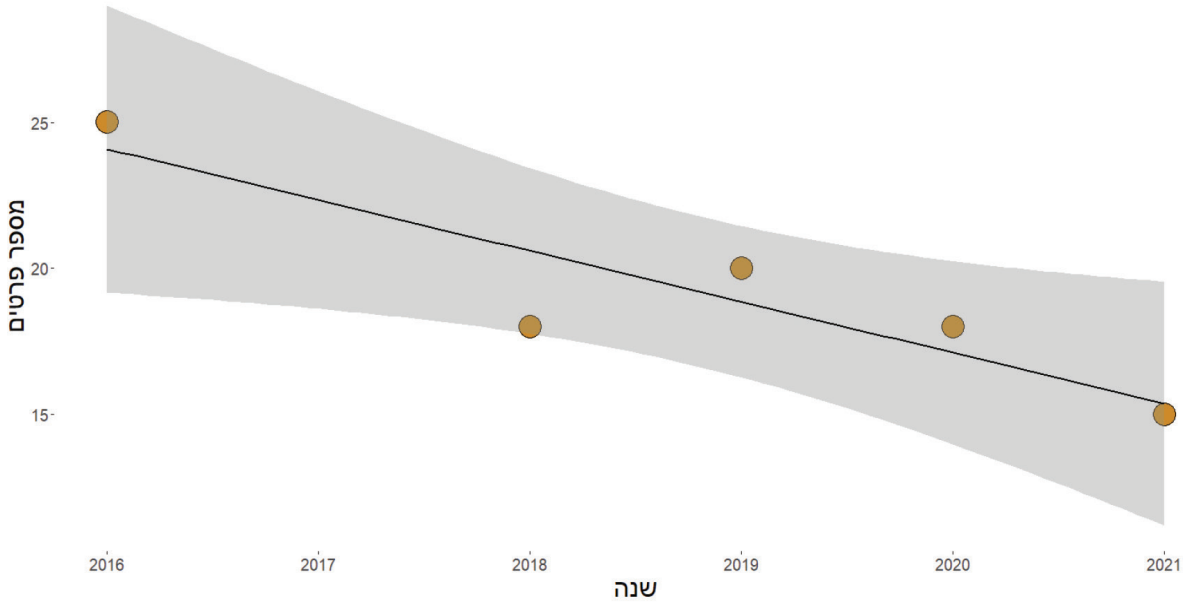
איור 4. גודל אוכלוסיית הדולפינן המצוי לאורך 15 שנות מחקר עם הפרדה בין עונה קרה (W - דצמבר עד מאי) לעונה חמה (S - יוני עד נובמבר).



איור 5. המבנה החברתי של גרעין אוכלוסיית הדולפינן המצוי, כל עיגול מתייחס לדולפין ולידו שם הדולפין והמספר הסידורי שלו בקטלוג. אדום מתייחס לנקבות, כחול לזכרים ואפור לפרטים אשר מינם אינו ידוע. עובי הקו בין הפרטים מעיד על חוזק הקשר ביניהם, הנמדד לפי כמות הפעמים שבהן נצפו יחד באותה להקה.

דולפין מצוי

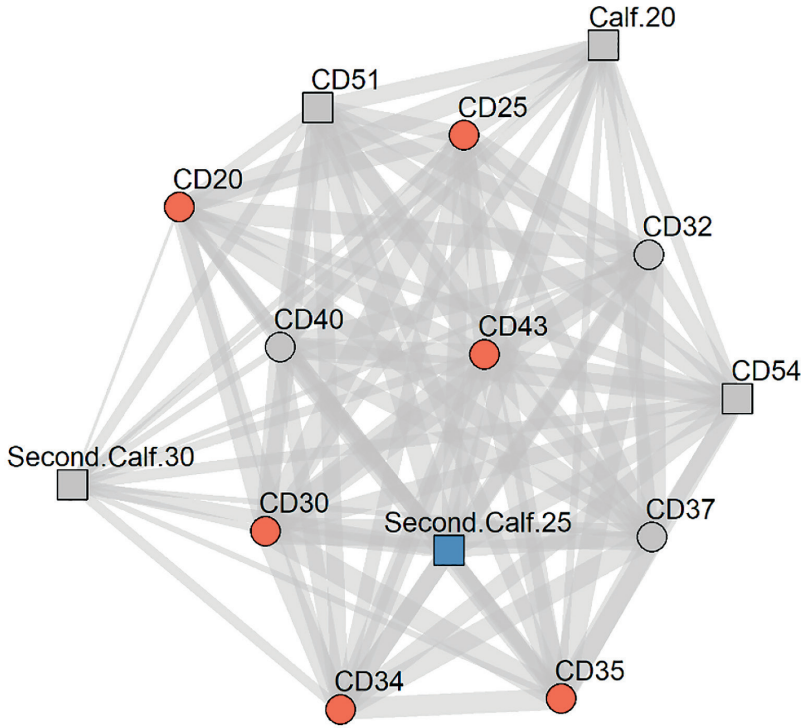
בניגוד לדולפינן המצוי, אוכלוסיית הדולפין המצוי מראה סימנים של ירידה בגודל האוכלוסייה לאורך שנות המחקר, עם ירידה דרסטית ומדאיגה במספר הפרטים (איור 6) מ-25 דולפינים באוכלוסייה בשנת 2016 ל-14 פרטים בלבד בשנת 2021[5]. בשנת 2023 נצפו שני גורים חדשים באוכלוסייה לאחר שלוש שנים ללא המלטות מתועדות, דבר אשר עשוי להעיד על מגמת התאוששות של האוכלוסייה. ירידה דומה מאפיינת אוכלוסיות דולפין מצוי נוספות בים התיכון אשר בעבר היה נפוץ ביותר והיום נמצא בסכנת הכחדה.



איור 6. גודלי אוכלוסיית הדולפין המצוי (N) בין השנים 2016-2021 אשר נמצאים במגמת ירידה ברורה.

גם המבנה החברתי של הדולפינים המצויים שונה מזה של הדולפין המצוי. בגלל גודלה הקטן של האוכלוסייה (עשרות בודדות של פרטים) ומרחב המחיה המצומצם שלה (אזור דרום ישראל), רוב הפרטים שבה משויכים ללהקה אחת בעלת מבנה סגור אשר מבודד ככל הנראה מאוכלוסיות אחרות של המין הזה. עקב כך, אין הגעה של פרטים חדשים או נדידה של פרטים החוצה מהאוכלוסייה. כל הדולפינים באוכלוסייה כמעט תמיד נצפים יחד בלהקה אחת ומקיימים קשרים חברתיים חזקים וארוכי טווח (איור 7). מבנה זה עשוי להעיד על הפרדה של הלהקה מאוכלוסיות אחרות מאותו מין, דבר אשר יכול להשפיע על סיכויי ההישרדות והרבייה של הפרטים בלהקה ושל האוכלוסייה עצמה.

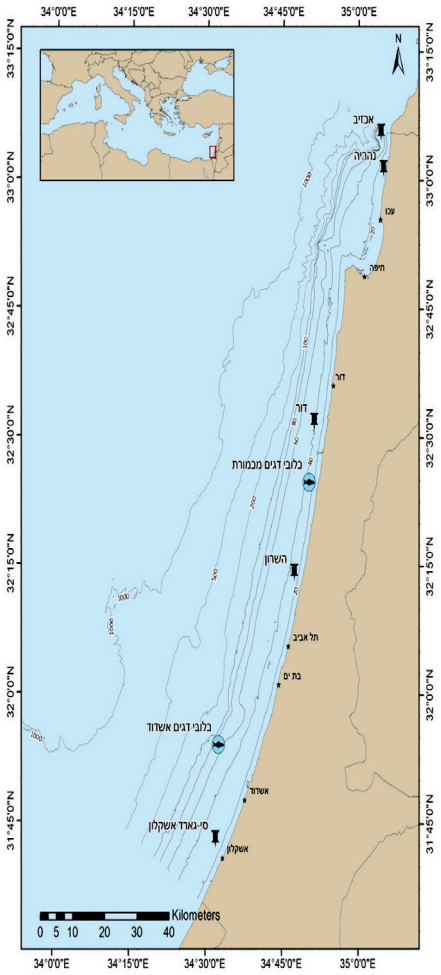
עובי הקו באיור 7 שונה משמעותית מבאיור 5, דבר שמלמד על קשרים הרבה יותר הדוקים בין הדולפיננים המצויים בהשוואה לדולפינים המצויים.



איור 7. המבנה החברתי של להקת הדולפין המצוי בישראל. פרטים בוגרים מסומנים בעיגול ואילו גורים בריבוע. ליד הצורה ניתן לראות את שם הדולפין והמספר הסידורי שלו בקטלוג. אדום מתייחס לנקבות, כחול לזכרים ואפור לפרטים בעלי מין לא ידוע. עובי הקו בין הפרטים מעיד על חוזק הקשר ביניהם, הנמדד לפי כמות הפעמים שבהן נצפו יחד באותה להקה.

הממצאים מניטור אקוסטי סביל ארוך טווח

מעקב חזותי, גם כאשר בעלי החיים נמצאים על פני מים, מוגבל לשעות האור ולמזג אוויר נוח, בעוד שמעקב חזותי מתחת לפני הים מוגבל עוד יותר על-ידי טווח הראייה, יכולת זיהוי ויזואלית ועלות כלכלית. דולפינים משתמשים בקול למגוון פעילויות הכוללות תקשורת, ניווט וציד, ותכונה זו מאפשרת גישה למחקר אקוסטי של מגוון נושאים אקולוגיים. זהו יתרון משמעותי מכיוון שבעלי חיים אלו מבלים את מרבית זמנם מתחת לפני המים הרחק מעיני החוקרים. הניטור האקוסטי הינו שיטת מחקר פורצת דרך האוספת נתונים בצורה סבילה אשר אינה מזיקה או משפיעה על ההתנהגות הדולפינים ומאפשרת מחקר רציף לאורך כל שעות היממה, כולל שעות החשכה, ולאורך כל השנה, כולל בחורף ובזמן סערות. הדולפינים משתמשים בקול בשתי צורות עיקריות: שריקות המשמשות לתקשורת בין חברי הלהקה ונקישות (קליקים, clicks) המשמשות להתמצאות במרחב ולציד. בנוסף, רצפי קליקים בתדירות גבוהה (burst-pulsedsounds) משמשים גם לתקשורת חברתית.



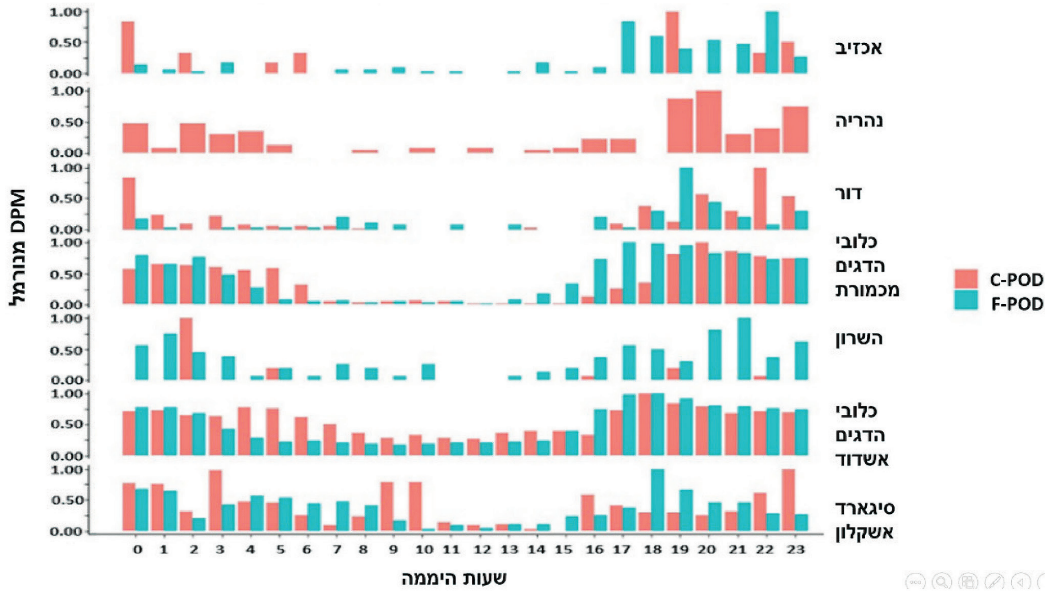
איור 8. מפה המציגה את מיקומי נקודות הניטור של מקלטי ה-C/F-POD. סמל הסיכה מציין את מיקום הצבת המכשירים לאורך החוף, סמל הדג מציין את מיקום אתרי חוות הדגים בים הפתוח.

הניטור האקוסטי של הדולפינים בוצע ע"י המקלטים האקוסטים ה-C-POD והגרסה החדשה והמתקדמת יותר, ה-F-POD (מאפשרים ניטור אקוסטי סביל לטווח ארוך), שהוצבו בסוף שנת 2018 לאורך חוף הים התיכוני הישראלי. בעזרת תוכנה ייעודית[6] מזוהה נוכחות לווייתנאי שיניים קטנים (דולפינים ופוקנות –porpoises) מרצפי הקליקים שהם מייצרים. בכדי למנוע זיהוי קליקים שגוי, רק קליקים באיכות גבוהה או בינונית נחשבו כאמינים מספיק בעוד קליקים באיכות נמוכה או בספק ("doubtful") הוסרו מהנתונים.

המקלטים הוצבו בנקודות שונות ובעומקים שונים, אשר שונו במהלך הזמן בהתאם לצורכי המחקר ואילוצים שונים[7]. נקודות הניטור נפרסו מהצפון (נהריה בעומק 20 מ' ואכזיב בעומק 45 מ'), במרכז (שדות ים בעומק 45 מ', והשרון בעומק

20 מ') ובדרום (אשקלון בעומק 27 מ'). נקודות אלו מייצגות אזורי חוף חולי (נהריה), סלעי (אכזיב, שדות ים והשרון) וספינה טבועה (אשקלון). בנוסף, הוצבו מכשירים בשתי חוות לגידול דגים בכלובים בים פתוח, באשדוד (עומק 75 מ') חווה אשר החלה לפעול בשנת 2006 ובמכמורת (עומק 36 מ') חווה אשר החלה לפעול בשנת 2011 (איור 8). בכדי להתחשב בזמני הפעולה השונים ובהפסקות הפעילות, נוכחות הדולפינים חושבה ביחס ל"זמן המאמץ" (Minutes On"") – דקות פעילות המקלטים בכל נקודת ניטור, והוצגה כ-Detected Positive Minutes%, DPM%, המחושב כדקות נוכחות של דולפינים ליחידת זמן (שעה/חודש):

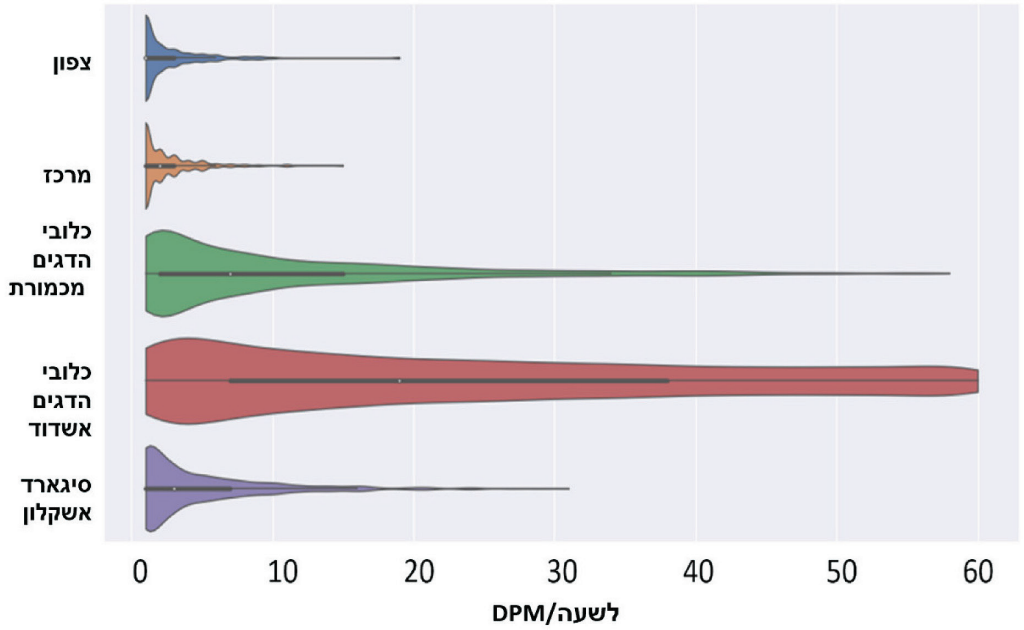
(DPM / Minutes On) * 100%=DPM. תוצאות המחקר הראו שישנה נוכחות של דולפינים בכל נקודות הניטור. כאשר בוחנים את נוכחות הדולפינים לאורך שעות היממה, ניתן לראות נוכחות גבוהה יותר בשעות הלילה, שעות הבוקר המוקדמות ושעות אחר הצהריים המאוחרות בכל נקודות הניטור (איור 9).



איור 9. נוכחות הדולפינים כ-% דקות נוכחות של דולפינים DPM% שזוהו על-ידי C-POD ו-F-POD מיוצגים בנפרד, לפי שעות היממה בכל נקודת הניטור. הערכים נורמלו כך שהשעה עם ה-%DPM הגבוה ביותר בכל אתר קיבלה ערך של 1.00.

מתוך תקופת איסוף הנתונים במחקר, נראה כי ישנה נוכחות רצופה של דולפינים במשך כל החודשים שנבדקו, בכל נקודות הניטור פרט לאכזיב. נראה כי הדולפינים ממעטים לפקוד את האזור במהלך חודשי הקיץ. ככלל, ישנה הסתברות גבוהה יותר למצוא דולפינים בעונת החורף ובשעות הלילה.

זמן השהות בכל נקודת ניטור מרגע הזיהוי הראשוני, המוצג כ־DPM/h (דקות נוכחות של דולפינים לשעת פעילות מכשיר) מראה זמני שהייה גבוהים בכלובי הדגים שיכולים להגיע עד נוכחות של שעה שלמה ואף יותר, בעוד שבשאר נקודות הדיגום זמני השהייה הינם קצרים ולרוב מסתכמים בדקות בודדות (איור 10).



איור 10. התפלגויות DPM/h בנקודות הניטור השונות (F-POD). צירי ה-Y נורמלו לגודל הדגימה של כל נקודת הניטור.

הנוכחות המוגברת היא בקרבת כלובי הדגים, בעיקר באשדוד שבה הנוכחות מגיעה מעל 10% DPM, לעומת פחות מ-1% DPM בנקודות הדגימה האחרות. הנוכחות הגבוהה יותר בכלובי הדגים באשדוד עשויה להיות קשורה לגודל החווה (המשווקת פי 3 יותר דגים מהחווה במכמורת). נוכחות גדולה יותר של הדולפינים בחווה באשדוד על פני מכמורת קיימת לאורך כל השנה ובכל שעות היום והלילה. הנוכחות הגבוהה של הדולפינים באזורי כלובי הדגים מצביעה ככל הנראה על התלות שלהם בנישה זו כמקור מזון לצורכי שרידות באזור מזרח הים התיכון הישראלי המאופיין כעני בחומרי הזנה באופן קיצוני. סגירת חוות הדגים באשדוד בשנת 2022 בעקבות שיקולים כלכליים עשויה להשפיע על העדפות המרחב של הדולפינים בעתיד הקרוב.

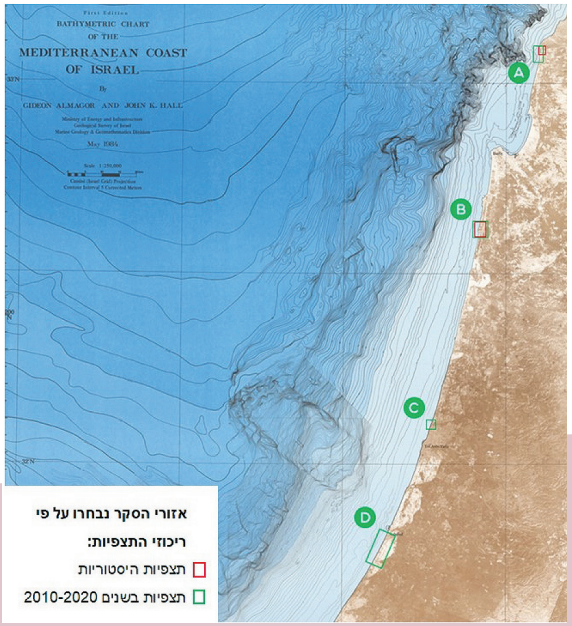
מנתוני המחקר עולה שמצד אחד איסור הדיג על-ידי מכמורתנים בחודשי הקיץ גורם לדולפינים להימצא באזור כלובי הדגים אף יותר מאשר בחורף. מצד שני, צפונית לדור, לאורך כל השנה, האיסור הגורף של דיג המכמורת לא גרם בהכרח לדולפינים לשנות את תפוצתם ולעקוב אחר המכמורתנים לאזורי הדיג מדרום לדור. ייתכן שממצא זה מרמז על כך שחוסר התחרות עם דיג המכמורתנים והתחדשות הקרקעית באזור מאפשרים הזדמנויות ציד זהות, אם במעקב אחר המכמורתנים ואם במוקדי משיכה אחרים כגון מארג המזון בקניון אכזיב[9] ושמורת ראש הנקרה.

כלב-הים הנזירי הים-תיכוני

לאחר כארבעים שנות היעדרות, שהביאו להגדרת כלב-הים הנזירי הים-תיכוני כמין שנכחד מקומית[10], נאספו מאז שנת 2010 מעל 100 דיווחי תצפית מחופי ישראל. אזכורים היסטוריים על נוכחות המין בישראל מתוארכים לשנים 1927-1968 והתרכזו בראש הנקרה ובטנטורה (דור-הבונים), שם נרשמה אף עדות לרבייה[11]. לאחרונה התווסף לעדויות אלו דיווח של תצפית כלב-ים בחוף קיסריה גם בתחילת שנות ה-70.

בתצפיות שאספו חוקרי עמותת "דלפיס" עד לשנת 2022, תועדו 3 פרטים שונים – כולם בים. אחת מהן – נקבה בוגרת שזכתה לשם "מאיה" – זוהתה בישראל בחמישה ביקורים שונים בין השנים 2010-2018[11] ומאז, על-פי מעקב ברשתות החברתיות, העבירה את משכנה למערה מצפון לבירות. בשנת 2024 נראתה שוב בתוך הנקרות בראש הנקרה. תצפיות אקראיות אלו לאורך החוף הישראלי ואף בסוריה ובלבנון, מצביעות על אפשרות של זליגה של פרטים מאוכלוסיית כלב-הים הנזירי שהולכת וגדלה מצפון ביוון וטורקיה[12,13], לבתי גידול עם פחות תחרות על מערות ומזון.

למרות מגמה מבטיחה זו, בכל התצפיות שנאספו בלטה העובדה כי כלבי-הים לא נשארו בחוף הישראלי יותר מימים ספורים. סיבה אפשרית לכך נמצאה במהלך סקר בתי גידול פוטנציאליים שנערך לאורך החוף הישראלי בשנים 2015 ו-2022, והתמקד באזורים שבהם נצפה כלב-הים בעבר ומאז שנת 2010 (איור 11). במהלך הסקר חיפשנו אחר מערות נסתרות מעין אנשים, עם מדף יבש בתוכן למנוחה, ובמידת האפשר גם מסדרון כניסה ארוך שיפחית את השפעת הגלים על פנים המערה. משתנים נוספים כמו כיוון פתח המערה ביחס לכיוון הרוחות והגלים, מספר הכניסות התת-ימיות אליה, גודל המערה, שטח המדף היבש בתוכה ומידת התאורה בתוך המערה משפיעים על בחירת המערה לא רק כמקום מנוחה, אלא אף כמערת המלטה[14].



איור 11. מפת אתרי הסקר מתוך דוח סקר בתי גידול לכלב-הים הנזירי הים תיכוני, שמטרתו בדיקת סימנים לנוכחות ופוטנציאל התיישבות מחודשת של כלב-הים הנזירי בישראל.

ממצאי הסקר[15] הצביעו על מחסור במערות מתאימות לאורך קו החוף הישראלי בעקבות קריסת מצוקים ימיים, הצפה של מערות כתוצאה מעליית פני הים ומגמת עלייה בלחץ התיירות החופית. בסקר נמצאו שתי מערות קטנות בראש הנקרה, אך הן מתאימות למנוחה קצרה ובתנאי ים נוחים בלבד. במערות אלו הוצבו מצלמות אינפרה-אדום (IR) לתיעוד בעלי חיים הנכנסים אליהן על מנת לבחון את השימוש בהן (איור 12).

איור 12. מערה עם כניסה תת-מימית באתר הנקרות בראש הנקרה, נבדקת לנוכחות כלבי-ים באמצעות מצלמה. צילום: ד"ר מיה אלסר.

בחודש מאי 2023 תועדה נקבת כלב-ים בוגרת, הפרט המזוהה הרביעי במספר, אשר נשארה לאורך החוף הישראלי במשך שבועיים וחצי באופן יוצא דופן, ותועדה בעיקר במנוחה על חופים פתוחים (איור 13). כלבת-הים קיבלה את השם "יוליה" ומהר מאוד זוהתה על-ידי חוקרים טורקים כנקבה המוכרת להם מאז שנת 2007 מאזור Mersin, בחוף המזרחי של טורקיה. זהו מסעה המתועד השני של יוליה – הראשון היה מטורקיה ללבנון ובחזרה בשנת 2019. בביקור בארץ בשנת 2023 התבצע מעקב צמוד אחרי יוליה בין חופי יפו ועד לגבול עזה, בעזרתו של הציבור הרחב, וזה הדגיש את המחסור במקומות מנוחה מוגנים למין זה לאורך החוף הישראלי.

איור 13. כלבת-הים הנזירית הים תיכונית יוליה בחוף ביפו 2023. צילום: ד"ר אביעד שיינין.

החוף הישראלי מהווה מסדרון אקולוגי משמעותי בתהליך שיקום אוכלוסיית כלב-הים הנזירי בים התיכון, הן מבחינת מיקומו הגיאוגרפי – בין האוכלוסייה הגדלה מצפון ביוון וטורקיה והחופים הדרומיים של הים התיכון, והן בזכות שמורות הטבע הימיות המוכרזות והמתוכננות בו ורגולציית הדיג. כל אלו ביחד מייצרים אזור עם שפע מזון וסכנות מועטות באופן יחסי לאזור. בימים אלו פועלת עמותת "דלפיס" ליצירת בתי גידול מתאימים לכלב-הים הנזירי הים-תיכוני, אם באמצעות שיקום מערות טבעיות שקרסו בתחומי השמורה הימית אכזיב-ראש הנקרה ואם בהקמת מחסות מלאכותיים ממרכז החוף הישראלי ודרומה, זאת מתוך אמונה כי יצירת בתי גידול מתאימים תזרז את חזרתו והשתקעותו של המין בחוף הישראלי. אמונה זו מקבלת רוח גבית מעדכון רמת האיום העולמית על כלב-הים הנזירי הים-תיכוני על-ידי ה IUCN – ממין "בסכנת הכחדה" למין "פגיע". עדכון זה מתבסס על עלייה במספר הפרטים באוכלוסייה העולמית, אך יש לציין כי אינו לוקח בחשבון את הפגיעה במגוון הגנטי שחווה המין במאה האחרונה.

גורמי מחלה ותמותה ביונקים ימיים בחופי ישראל

מרבית הידע לגבי גורמי תמותה ומחלה ביונקים ימיים מתקבל כתוצאה מביצוע נתיחות שלאחר המוות של פרטים מתים שנמצאו בחוף הים או הובאו על-ידי דייגים, בנוסף לדיגום פרטים חיים שהחיפו ונלקחו לאישוש (טיפול וטרינרי). נתיחות יונקים ימיים בישראל התבצעו מאז החל מחקר היונקים הימיים בארץ בשנות ה-90. ישנן דרכים נוספות לאפיין ולזהות גורמי תחלואה ביונקים ימיים, מפרטים חיים, כדוגמת דיגום בעלי החיים בים הפתוח, אך

בישראל התחום עדיין לא מפותח. במהלך סקרי דולפינים, מבוצע מעקב וצילום של היונקים הימיים וגם מתוך סקרים אלה ניתן עד רמה מסוימת להעריך מצב רפואי של בעל החיים בהתאם להערכת המצב הגופני, קצב נשימות ופצעי עור. בשמונה השנים האחרונות, במסגרת פתיחת תחום גורמי תחלואה בבעלי חיים ימיים בתחנת מוריס קאהן לחקר הים של אוניברסיטת חיפה, בוצעו יותר נתיחות שלאחר המוות של דגים, כרישים, צבי-ים ויונקים ימיים, יחסית לשנים שעברו, ולכן בשנים אלו הצטבר יותר מידע בתחום ובהמשך פרק זה נמצא תקציר הממצאים מנתיחות הדולפינים אשר החיפו לאורך חופי ישראל.

אחד המקרים המעניינים שהתרחש ב-2007, כאשר נקבת דולפינן מצוי נצפתה שוחה וצוללת פנימה והחוצה מנמל חיפה, אך נמצאה מתה למחרת היום, 60 ק"מ דרומה, על החוף. נתיחה שלאחר המוות גילתה רשת דיג, וחוטי דיג עטופים סביב קנה הנשימה, חותכים דרך הרקמה הרכה, ממשיכים למטה לתוך הקיבה, שם נמצאה המסה גדולה של הרשת. יש להבהיר כי בדולפינים קנה הנשימה חוצה את הוושט. המצב הגופני הירוד של הדולפינה ובחינת הרקמה הרכה המקיפה את חוטי הרשת המונחים סביב הגרון, מצביעים על תקופה ממושכת של רעב, שהובילה לחולשה ורזון קיצוני אשר גרמו בסופו של דבר למות הדולפינה[15]. ב-2010, *Neoscytalidium dimidiatum* (זיהום פטרייתי) בודד משתי מורסות מוגלתיות (אבצסים) באורך 18-12 ס"מ בריאות ובלוטות הלימפה המדיסטינליות של דולפין גרמפוס אפור מת שהחיף באשדוד. בנתיחה לאחר המוות בדיקה היסטופתולוגית של איברים אלה גילתה נוכחות של היפאות ואלמנטים פטרייתיים. בנוסף, חיידק מסוג *Photobacterium damselae* subsp. *damselae* התגלה באיבריו של הדולפין. לא היו סימנים היסטופתולוגיים של זיהום בנגיף מורביליוירוס. ככל הידוע, זהו הדיווח הראשון של זיהום ב-*N. dimidiatum* ביונק ימי[16]. במחקר נוסף זוהה ואופיין מולקולרית טפיל *Toxoplasma gondii* בשלושה דולפינים מתים, שהגיעו לחוף, מהמין דולפינן מצוי, כולל מקרה אחד של הדבקה בנגיף הרפס. הדולפינים החיפו בחופי הים התיכון של ישראל בחודשים מאי ונובמבר 2013. באחד משלושת המקרים, הדולפין נמצא בחיים והועבר להתאוששות אך מת לאחר מספר ימים. *Toxoplasma gondii* תואר במספר יונקים ימיים ברחבי העולם כולל מינים רבים של לווייתנים, אך מנגנוני ההדבקה וההעברה בסביבה הימית אינם מוגדרים בבירור. מכיוון שטפיל זה הינו ביו-אינדיקטור לזיהום הים ולבריאות היונקים הימיים, לממצאים חשיבות לגבי מצב הסביבה באזור. זהו הדיווח הראשון של זיהום ב- *T. gondii* ביונקים ימיים במזרח הים התיכון[17]. בספטמבר 2020 נמצא דולפין מצוי זכר (*Delphinus delphis*) מת בחוף ליד בת ים. הגופה נראתה במצב טרי ומצב תזונתי בינוני וללא פגיעות כתוצאה מציוד דיג. בדיקה שלאחר המוות לא העלתה סיבה נראית לעין של מוות, אך בדיקות מעבדה נוספות הראו נוכחות חיידקית של *Streptococcus agalactiae* במספר רקמות, כולל בשלפוחית השתן, ריאות ונוזל קרום הלב. החיידק זוהה ואופיין כסוג Ia-ST7 על-ידי ביצוע ריצוף גנומי מלא של החיידק. באופן מעניין, נמצא בידוד כמעט זהה לבידוד אחר שזוהה מכריש סנפירתן (*Carcharhinus plumbeus*) שגם הוחף ונמצא מת, גם הוא באזור בת ים[18]. באותו דולפין גם אובחן נגע קטן באיבר המין[19]. נגע זה הוסר לצורך בדיקה היסטולוגית ואפיונים מולקולריים. בדיקות המעבדה הוכיחו הימצאות נגיף מתת-משפחת ה-gammaherpes. דגימות רקמות מהריאות, הכבד והטחול נבדקו ונמצאו שליליות עבור זיהום בנגיף ההרפס. הנגיף שזוהה כאן דומה לבידודים אחרים שדווחו במספר אזורים ברחבי העולם במינים שונים של יונקים ימיים. זהו המקרה המדווח הראשון של זיהום בנגיף הרפס בדולפינים מהמזרח הים התיכון, והמקרה מעיד על הצורך בניטור ארוך טווח ליצירת מאגרי מידע

של זיהומים ויראליים אצל יונקים ימיים, במיוחד בהקשר של שינויי אקלים, שעלולים להגביר את התפרצויות מחלות זיהומיות ביונקים ימיים באזור בעתיד[19]. בשנת 2021 התבצעה נתיחה שלאחר המוות בדולפין מצוי זכר שנמצא מת בחוף באזור אשדוד. במהלך הנתיחה התגלתה בבירור דלקת ריאות חמורה הכוללת מוגלה, אבצסים בריאות ובנוסף, מצב גופני ירוד ורזון חמור של הדולפין. במקרה זה בודד מנוזלי הדלקת חיידק בשם *Photobacterium damselae* תת-מין *damselae* שגרם במקרה זה למחלה כרונית בבעל החיים ובהמשך, למות הדולפין[19]. חיידק זה בודד גם בגרמפוס מאשדוד[16].

קשה להעריך מהממצאים שנאספו עד כה אם מצב התחלואה של יונקים ימיים באזורנו גבוה או נמוך ממדינות שכנות, או גם ממדינות רחוקות יותר בים התיכון. המשך ניטור גורמי תחלואה ותמותה של יונקים ימיים, כמו גם בעלי חיים ימיים אחרים בים, חשוב וייתן בעתיד הבנה עמוקה יותר על בריאות בעלי החיים הימיים באזורנו ובצירוף נתוני ניטור אחרים, הבנה על בריאות המערכת האקולוגית הימית באזורנו.

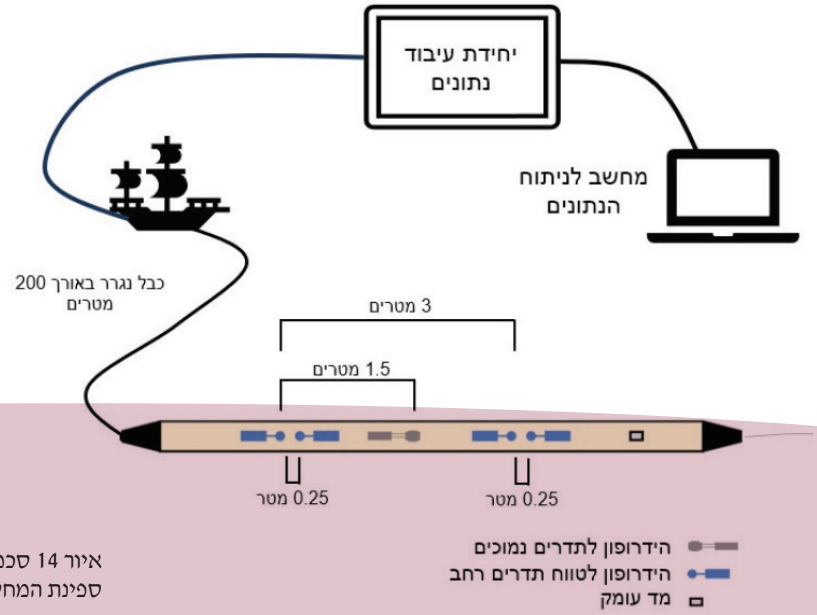
יונקים בים העמוק

הים העמוק בישראל נחשב לאזור אפוף מסתורין שבו רב הנסתר על הגלוי. אך למעשה, אזור מסתורי זה מכסה את מרבית השטח הימי בישראל. לישראל שטח טריטוריאלי ימי החולש על כ-4,000 קמ"ר שהם חלק מהמדינה, וכל חוקי המדינה חלים עליהם. מים טריטוריאליים אלו הם חלק מהמים החופיים וברובם נמצאים מעל מדף היבשת. בנוסף, שטחי המים הכלכליים הבלעדיים הם שטחים בניהול של המדינה והיא אחראית להם. מדובר על 22,000 קמ"ר, הכוללים בתוכם את אזור הים העמוק (עומק קרקעית בין 200-1,500 מטר). סך שטח המים הכלכליים והריבוניים גדולים יותר מהשטח היבשתי של מדינת ישראל. בשל המרחק הגדול מהחוף, מחקר ים עמוק הינו יקר ומורכב מבחינה טכנית ולוגיסטית. המחקר יכול להתבצע על-ידי ספינות מחקר, מטוסים, וכלי שיט בלתי מאוישים.

ישנם מיני דולפינים ולווייתנים החיים בים העמוק מול ישראל, שאותם פוגשות לרוב ספינות תיירות/ דיג בהפלגה בדרך לקפריסין או ספינות של חיל הים, ומדי פעם פרטים חולים ומתים נסחפים אל החוף. ביניהם נמנים שני מיני דולפינים – הגרמפוס האפור (*Grampus griseus*) והסטנלה הפסוסה (*Stenella coeruleoalba*). הגרמפוס, חי במים העמוקים של מדרון היבשת וניזון מדיונוני עומק. מספר תצפיות אקראיות בים והחפות של פרטים גוססים או מאוד טריים, כולל גורים, מעידה על הימצאותם באזור. תצפיות של להקות סטנלה פסוסה, הלווייתנאי הנפוץ ביותר בים התיכון, גם כן נדירות יחסית באזור, אך המין הוא השני בתדירות ההחפות בישראל. עובדה מטרידה היא שמין נוסף, דולפין תלום שן (*Steno bredanensis*), שסיווגו כמין קבוע בים התיכון התבסס בעיקר על תצפיות והחפות שלו בישראל משנות האלפיים[20], נעלם כליל מהאזור (עדות אחרונה היא החפה בנתניה ב-2008). שני מיני לווייתנים שהם שיאני הצלילה לעומק, ראשתן גדל-ראש (*Physeter macrocephalus*) וזיפיוס חלול חרטום (*Ziphius cavirostris*) נצפו באזור ישראל גם כן. מינים אלו מבלים את רוב זמנם במים העמוקים של מדרון היבשת וניזונים מדיונוני עומק, ולכן נצפים לעיתים נדירות. הזיפיוס מוכר בישראל כמעט רק מהחפות, כמעט תמיד במצב של ריקבון מתקדם, כשההחפה הדרומית ביותר אירעה בתל אביב. תדירות התצפיות וההחפות של ראשתנים באזורנו עלתה בשנים האחרונות, כאשר רובן בעונת הקיץ. בשני העשורים האחרונים נשטפו לחופי ישראל לפחות 7 פרטים מתים,

4 מתוכם בין השנים 2018-2023. אירוע ההחפה האחרון אירע באוגוסט 2023 בחוף געש, לשם נשטף זכר מתבגר באורך של כ-12 מטר. גופתו הייתה במצב ריקבון מתקדם ולכן סיבת המוות אינה ידועה. באותו השבוע נסחפו שני פרטים נוספים לחופי לבנון, וההנחה היא שהם נפגעו בעת ששחו יחד. האירועים הללו מעידים על כך שמין זה נמצא במזרח הים התיכון ובמים הכלכליים של ישראל. באזור מזרח הים התיכון ישנם מינים נוספים אשר מוגדרים "מזדמנים/מבקרים", ביניהם העב-שן הקטלני (*Pseudorca crassidens*).

בשנים האחרונות הפכה מדינת ישראל מוקד לחיפוש אחר גז ונפט בקרקעית הים העמוק. עבודות של הנחת תשתיות יוצרות הפרעה קולית בים, וחיפוש גז ונפט שנעשה על-ידי סקרים סיסמיים מייצרים הדף קולי חזק מאוד, אשר עשוי לפגוע ביכולת התקשורת והניווט של יונקים ימיים ועלול אף לגרום לפגיעה ברקמות ולטראומה[21]. סקירה מדעית משנת 2018[22] הראתה את פערי הידע הקיימים במזרח הים התיכון, ופסקה שאין מספיק מידע בשביל לאפיין את תפוצת האוכלוסיות באזורים אלו. מתוך הצורך העולה במחקר ומיפוי הים העמוק נולד פרויקט הים העמוק של אוניברסיטת חיפה שהתחיל בשיתוף הפעולה עם עמותת "גרינפיס" וממשיך במימון משרד האנרגיה והתשתיות. מטרת הפרויקט היא ביצוע סקרים אקוסטיים וויזואליים במים הכלכליים של ישראל על מנת לצמצם את פערי הידע ולמפות את התפוצה של יונקי המים העמוקים במים הכלכליים של ישראל. הסקר הראשון בוצע בשיתוף עם "גרינפיס" ישראל והיה הפעם הראשונה שנעשה סקר שיטתי באזור, כשלפניו היה סקר בודד של חמישה ימים ב-2005. איסוף הנתונים התבצע באמצעות גרירת מערך מיקרופונים תת-ימיים (איור 14) מאחורי הספינה אשר מאפשר האזנה שוטפת לסביבה התת-ימית ובכך זיהוי של לווייתנאים בעומק באמצעות קליטה של רצפי התקשורת שלהם (קודות) או קליקים המשמשים אותם למציאת מזון ולהתמצאות במרחב.



איור 14 סכמת מערך מיקרופונים תת-ימיים שנגרר מאחורי ספינת המחקר.

במהלך הסקר (שהתקיים באפריל 2022) זוהתה באופן אקוסטי להקה של כ-8 לווייתני ראשתן מול חיפה במרחקים של כ-12 ו-27 קילומטר מהחוף, בעומקים שבין 400-1,700 מטר. לווייתן אחד תועד ויזואלית וזכה להיות הלווייתן הראשון בקטלוג הלווייתנים הישראלי. זיהוי פרטים מתבצע על-פי החתכים והצלקות שעל זנב הלווייתן. הלווייתן שתועד בסקר זה הינו זכר צעיר, ובהמשך התברר כי תועד 11 פעמים בים הליגורי במערב הים התיכון לפני הגעתו לישראל וזוהה על בסיס הזנב שלו (איור 15). זהו לווייתן הראשתן ששחה את המרחק הארוך ביותר שתועד בים התיכון (1,650 מייל!). ראשתן נוסף נצפה שוחה בליווי שני דולפינים ממין דולפינן מצוי. מלבד ראשתנים, זוהו בסקר גם זיפיוס חלול חרטום (כ-4 פרטים) מול החופים בדרום הארץ ודולפינים נוספים אשר לא זוהו לרמת המין. בסקרים נוספים שהתקיימו מאז נשמעו שוב ראשתנים, לווייתני מקור וזוהו מינים שונים של דולפינים, מה שמעיד על הנוכחות שלהם באזור. התוצאות הללו תומכות בטענה שהאגן המזרחי של הים התיכון משמש כבית למינים רבים של יונקים ימיים, חלקם פגיעים ובסכנת הכחדה, ומחזקות את הצורך בבניית תשתית למחקר ים עמוק והמשך קיום סקרים אקוסטיים במים הכלכליים של ישראל במטרה לצמצם את פערי הידע וניהול מיטבי של משאב הים.

איור 15. ראשתן צעיר שתועד בישראל, זוהה על-פי הזנב ונצפה גם באיטליה ובצרפת. צילום: קים קובו.

סקר אווירי

בשנת 2018 השתתפו חוקרים מתחנת מוריס קאהן לחקר הים, אוניברסיטת חיפה, בסקר האווירי הראשון לכימות פיזור ושפעה של בעלי חיים ברחבי הים-התיכון מטעם אמנת ACCOBAMS . הסקר (ASI) כלל זיהוי ויזואלי של יונקים ימיים, דגי גרם וסחוס, צבים, ציפורים ואף פסולת ימית על פני שטחי כיסוי נרחבים באמצעות ספינות ומטוסים.

כמו כן, גילוי של יונקים ימיים בעומק ובשעות החשכה התבצע באמצעות ניטור אקוסטי סביל באמצעות ספינות מחקר. איסוף וניתוח הנתונים התבסס על שיטת דיגום לאורך חתך קווי "line transect distance sampling" שמאפשרת אומדן של מספר פרטים ליחידת שטח תוך כדי כיסוי חלקי בלבד של אזור המחקר. הירתמות הצוות הישראלי למאמץ הסקר כללה השתתפות בהפלגות מחקר בחו"ל והובלה של הסקרים האווריים ממטוס קל בשטחה הימי של ישראל. שטח המחקר התפרס על 27,324 קמ"ר עם כיסוי בפועל של 5.8% לאורך מסלול של 821 ק"מ ו-7 שעות טיסה. תצפיות בזמן הסקר כללו פסולת ימית, ציפורים, ואף להקה אחת של לווייתן זיפיוס חלול-חרטום, אשר מוגדר לפי הערכת איגוד השימור העולמי (IUCN) כמין פגיע. בנוסף לחשיבות הסקר לצורך השלמת התמונה הסינופטית של הסקר עבור כלל הים התיכון, הימצאותם של מינים רגישים בשטחה הים-תיכוני של ישראל מלמדת על חשיבות המשך הניטור והשימור הסביבתי גם באזור הים העמוק.

סיכום

מחקר אקולוגי ארוך טווח על אוכלוסיות היונקים הימיים החופיים בישראל מספק תובנות חשובות לגבי יציבותן, האיומים שניצבים בפניהן והמגמות העתידיות שישפיעו על הישרדותן.

שני מיני דולפינים חיים בקרבת חופי ישראל: **הדולפינן והדולפין המצוי**. אוכלוסיית הדולפינן יציבה ומתפרשת לכל אורך חופי ישראל, כאשר תחום מחייתה אף חורג מהמים הטריטוריאליים של המדינה. לעומת זאת, אוכלוסיית הדולפין המצוי אינה יציבה ונמצאת במגמת ירידה מדאיגה – תופעה שמשתקפת גם באוכלוסיותיו ברחבי הים התיכון. שתי האוכלוסיות מושפעות משמעותית מהפעילות האנושית באזור ונמצאות תחת איומים תמידיים. סכנות אלו כוללות הסתבכות בציוד דיג נסחף, זיהום פלסטיק, זיהום כימי וזיהום רעש תת-ימי, הפוגע ביכולתם של הדולפינים להתמצא במרחב, למצוא מזון ולתקשר זה עם זה. אוכלוסיית הדולפין המצוי מתקשה להתמודד עם האתגרים הללו, ומצבה מוסיף להידרדר עם השנים.

לצד האתגרים, ישנם גם סימנים מעודדים: כלב-הים הנזירי הים-תיכוני, שנחשב בעבר לנעדר מהאזור, נראה שוב בישראל, עם למעלה מ-100 תצפיות וזיהוי של לפחות ארבעה פרטים שונים. עם זאת, הפגיעה בבתי הגידול שלו מעכבת את חזרתו הקבועה לחופי ישראל. כדי לאפשר את התאוששותו, נדרשים מאמצי שיקום ובניית מערות מנוחה והמלטה, שיאפשרו לו לשוב ולהתבסס לאורך חופינו.

האתגר הגדול בשנים הקרובות הוא הבנת תמונת המצב של היונקים הימיים במים העמוקים של מזרח הים התיכון. מחקר זה מורכב ויקר, וכולל סקרים ימיים ואווריים המתפרסים על פני אלפי קילומטרים בשטחי המים הכלכליים של ישראל.

מזרח הים התיכון מאופיין בדלות חומרי הזנה, ומארג המזון שבו מצומצם – בדומה למדבר. כמו שבמדבר מרבית החיים מתכנסים בנאות מדבר, כך גם בים: אזורים תת-ימיים מסוימים מתפקדים כ"נאות מדבר ימיים" ומושכים אליהם מגוון מינים נדירים. נוכחותם של מינים כמו **ראשתן** ו**זיפיוס חלול-חרטום**, הצוללים לעומק וניזונים מקרבת הקרקעית, מספקת רמזים לגבי מיקומם של אזורים חיוניים אלו. הבנת האזורים הללו ושימורם הם קריטיים להמשך קיומם של היונקים הימיים במרחב.

המחקרים המתבצעים כיום מאפשרים לנו להעמיק את ההיכרות עם חייהם של יונקים ימיים, להבין את הצרכים

האקולוגיים שלהם ולפעול למען שימורם. עם זאת, השמירה על הים היא לא רק תפקידם של מדענים וחוקרים – כל אחד מאיתנו יכול לתרום.

גם פעולה קטנה כמו הרמת אשפה מחוף הים יכולה לסייע בהגנה על היונקים הימיים של ישראל. הים הוא נכס יקר ערך, והאחריות על שמירתו מוטלת על כולנו.

רשימת מקורות

1. כרם, ד., שיינין, א., גופמן, ע., אלסר, מ., והדר, נ. יונקים ימיים בים התיכון ובצפון ים סוף. הוד הים – יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל. עורכת נ. סטמבלר. הוצאת העמותה למדעי הים. (2014).
2. Galili, O., et al. Two decades of coastal dolphin population surveys in Israel, Eastern Mediterranean. *Biology,* **12**, 328 (2023).
3. Scheinin, A.P., et al. Resource partitioning between common bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) and the Israeli bottom trawl fishery? Assessment by stomach contents and tissue stable isotopes analysis. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* **94**, 1203–1220 (2014).
4. Brand, D., et al. Common dolphins, common in neritic waters off southern Israel, demonstrate uncommon dietary habits. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* **31**, 15–21 (2021).
5. Mevorach, Y., et al. Common dolphins (*Delphinus delphis*) in Israel: Unique dynamics of a critically endangered population. *Front. Mar. Sci.* **9**, 2223 (2022).
6. Tregenza, N. CPOD. Exe: A guide for users. Chelonia Ltd, Mousehole, UK (2012).
7. Tuya, F., Sanchez-Jerez, P., Dempster, T., Boyra, A. & Haroun, R.J. Changes in demersal wild fish aggregations beneath a sea-cage fish farm after the cessation of farming. *J. Fish. Biol.* **69**, 682–697 (2006). https://www.chelonia.co.uk
8. Zuriel, Y.E., et al. Multi-year passive acoustic monitoring of coastal dolphins along the Israeli Mediterranean shallow shelf reveals the impact of marine fish farms and trawling patterns on their habitat utilization. *Mar. Environ. Res.* **188**, 106014 (2023).
9. Roditi-Elasar, M. Akhziv submarine canyon as a modifier of the regional food-web. Ph.D. Dissertation, University of Haifa (2015).
10. דולב, ע. & פרבולוצקי, א. הספר האדום של החולייתנים בישראל. רשות הטבע והגנים והחברה להגנת הטבע. (2002).
11. Roditi-Elasar, M., et al. Mediterranean monk seal (*Monachus monachus*) sightings in Israel 2009-2020: Extralimital records or signs of population expansion? *Mar. Mammal Sci.* **37**, 344–351 (2021).
12. Bundone, A., Panou, E. & Molinaroli, E. On sightings of (vagrant?) monk seals, *Monachus monachus,* in the Mediterranean Basin and their importance for the conservation of the species. *Aquat. Conserv.: Mar. Freshw. Ecosyst.* **29**, 554–563 (2019).
13. Karamanlidis, A.A., et al. The Mediterranean monk seal *Monachus monachus*: status, biology, threats, and conservation priorities. *Mammal Rev.* **46**, 92–105 (2016).
14. Dendrinos, P., et al. Pupping habitat use in the Mediterranean monk seal: a long-term study. *Mar. Mammal Sci.* **23**, 615–628 (2007).

15. Roditi-Elasar, M., Bundone, L. & Scheinin, A. Potential suitable habitats for the Mediterranean monk seal, Monachus monachus, along the Israeli coast. Report submitted as part of the IUCN regional project 'Monk seal protection at the Eastern Mediterranean' (2023).
16. Levy, A.M., et al. Laryngeal snaring by ingested fishing net in a common bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) off the Israeli shoreline. *J. Wildl. Dis.* **45**, 834–838 (2009).
17. Elad, D., et al. Pulmonary fungal infection caused by *Neoscytalidium dimidiatum* in a Risso's dolphin (*Grampus griseus*). *Med. Mycol.* **49**, 424–426 (2011).
18. Bigal, E., et al. Detection of Toxoplasma gondii in three common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*); a first description from the Eastern Mediterranean Sea. **258**, 74–78 (2018).
19. Morick, D., et al. First Isolation and characterization of *Streptococcus* agalactiae from a stranded wild common dolphin (*Delphinus delphis*). *Front. Mar. Sci.* **9**, 824071 (2022).
20. Morick, D., et al. *Photobacterium damsel*ae subspecies damselae Pneumonia in dead, stranded bottlenose dolphin, eastern Mediterranean Sea. *Emerg. Infect. Dis.* **29**, 179–183 (2023).
21. Kerem, D., et al. Rough-toothed dolphins in the Levantine Sea: a relic population? In: Notarbartolo di Sciara, G., Podesta, M. & Curry, B. (eds.). Mediterranean marine mammal science and conservation, *Adv. Mar. Biol.* **75**, 233–258 (2016).
22. Gordon, J., et al. A review of the effects of seismic surveys on marine mammals. *Mar. Technol. Soc. J.* **37**, 16–34 (2003).
23. Mannocci, L., et al. Assessing cetacean surveys throughout the Mediterranean Sea: a gap analysis in environmental space. *Sci. Rep.* **8**, 3126 (2018).

צמד דגי קופסינון סגול (*Ostracion cyanurus*) בתצוגת חיזור לילית במפרץ אילת. הזכר (בחלק העליון)
עוקב אחר הנקבה (בחלק התחתון) בתנועה ושמירה מתמשכות במהלך שעות הערב המוקדמות –
שלב אופייני בטקסי החיזור של המין. צילום: תום שלזינגר

הספר "הוד הים – איתנות ותמורות במערכות הימיות של ישראל" מציג תמונה עדכנית מדעית-מחקרית לנושאים הקשורים למערכות הימיות של ישראל: השינויים הטבעיים, השפעת שינויי אקלים, השפעות האדם, דיג המכמורת ורמות מזהמים בסביבה הימית בעבר, בהווה ובעתיד על גופי מים שמדינת ישראל שוכנת לחופם: הים התיכון והים האדום. הספר עוסק במדיניות וביישום ניטור, שמירה וניהול של הסביבה הימית, הערכה כלכלית ורגולציה, גישה סביבתית ביחס למבני הגנה חופית, חינוך, מדע וקהילה, זרמים ומערבלים בים. מוצגות מערכות אקולוגיות ייחודיות ביניהן נביעות גז ותמלחות בהפרעת פלמחים, שוניות דרום-מזרח הים התיכון ושונית האלמוגים במפרץ אילת. מובאים היבטים שונים של הביוטה בסביבה הימית כולל מיקרובים, פיטופלנקטון, אצות וציאנובקטריה רעילות, עשבי-ים, זואופלנקטון, פורמיניפרה, חי טחבים, ספוגים, קיפוד-הים, מיקסוזואה, דגים, החילזון צינוריר, מינים זרים (פולשים) כרישים, לובסטרים, יונקים ימיים ואלמוגים. זהו המשכו, הרחבתו ועדכונו של הספר "הוד הים – יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל" שיצא לאור בשנת 2015. הכותבים הם חוקרים פרופסורים דוקטורים מהאקדמיה, מובילים בחקר הים בעולם, אחראים על אוצרות הים במשרדי הממשלה ונציגים של גופי שמירת הטבע.

מסת"ב
978-965-597-380-8

ISBN 978-965-597-380-8
9 789655 973808