גיליון מספר 205 | פברואר 2025, תשפ"ה

שמורת טבע

עלון מורי הביולוגיה

שיקום והתאוששות בטבע

מדינת ישראל
משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף א' למדעים
הפיקוח על הוראת הביולוגיה
הפיקוח על הוראת מדעי הסביבה

מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי
ע"ש עמוס דה-שליט

המרכז הארצי
למורי הביולוגיה

מכון ויצמן למדע
WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE

שלום לכולכם,

לאחר שנה כואבת ומדממת, אנחנו מעיזים לחשוב מחשבות על שיקום והתאוששות. בגיליון זה ניסינו להציג תופעות של שיקום בכל רמות הארגון הביולוגיות, והבאנו לפניכם תהליכי התאוששות אקולוגיים לצד תהליכי שיקום פיזיולוגיים ומולקולריים ותהליכי חוסן. אין כמו הטבע כהשראה לתהליכים כאלה.

קריאה מהנה,

גילת בריל

עורכת העלון
וצוות המרכז למורי הביולוגיה

עורכת: ד"ר גילת בריל

ייעוץ אקדמי: פרופ' ענת ירדן

עימוד: אבי טל

עיצוב גראפי: מור מוריה-שיפוני

עריכת לשון: ענבל גיל

מנהל הפרויקט: ד"ר אוהד לבקוביץ

תמונת השער: בשנת 1986 אירעה תאונה בכור הגרעיני שליד העיר צ'רנוביל בצפון אוקראינה, אז ברית המועצות. ליבת הכור התפוצצה, וחומרים רדיואקטיביים התפזרו לסביבה, והגיעו עד אירופה. התושבים פונו אל מחוץ לאזור והוא נסגר לכניסת בני אדם. הקרינה החזקה פגעה בטבע באופן חמור, ובעיקר זכורים מראות הצמחייה שהצהיבה. שנים אחר כך, כאשר האזור עדיין סגור מלבד סיורים באישור מיוחד, התאוששה המערכת האקולוגית באזור האסון, וביערות שהתפתחו בו נמצא מגוון המינים הגדול ביותר בכל יערות אירופה. בתצלום נראים העגורנים שננטשו על גדות הנהר, והיער העבות שהגיע עד לשפת המים.

הפרויקט מבוצע על ידי המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע עבור משרד החינוך במסגרת מכרז מס' 22/11.2020: הקמה והפעלה של מרכזי המורים ארציים במקצועות הבאים: מדעים, טכנולוגיה ומתמטיקה.

לתיאום הסדרי נגישות, ניתן לפנות ל-gilatbrill@gmail.com

מדינת ישראל
משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף א' למדעים
הפיקוח על הוראת הביולוגיה
הפיקוח על הוראת מדעי הסביבה

דבר המפמ"ר

מורות ומורים יקרים,

פרסום עלון זה מאפשר הזדמנות נוספת **להודות לכל מי שעוסקים בהוראת הביולוגיה**. לכן ולכם, ללבורנטיות ולבורנטים, לצוות ההדרכה, לצוות מרכז המורים לביולוגיה במכון ויצמן, לצוות מרכז המעבדות באוניברסיטת בר אילן, לחוקרות וחוקרי הוראת המדעים, למכשירות ומכשירי הסטודנטים לתעודת הוראה, לחברות וחברי ועדת המקצוע ולגמלאיות שממשיכות לתרום מניסיונן בשמחה. תרומתכם המקצועית והמסורה היא הבסיס להצלחה ומחזקת את הקהילה החינוכית כולה.

כתיבת דבר המפמ"ר של העלון הקודם נעשתה בשנה שעברה בעת מלחמה. אף אחד לא העלה על הדעת שגם עלון זה ייכתב בעת מלחמה ויוקדש גם הוא לחוסן. העלון הקודם התמקד באדם ואילו בעלון זה ניתן מקום גם לטבע ולכל רמות הארגון. החל ממערכות אקולוגיות: שינויים בעקבות נסיגת קרחונים, שיקום מערכות אקולוגיות בישראל שעברו פגיעה קשה והתאוששות אוכלוסיות; עבור לאורגניזמים - ריפוי פצעים בבעלי חיים ובצמחים, התפתחות מערכות המייצרות חוסן בתקופת הטיפול בצאצאים ביונקים; וכלה בתאים - התאוששות ושיקום ברמת התא הבודד והאורגניזם השלם בעקבות חשיפה לחומרים לא מומלצים בעליל.

בעלון משולבת תיאוריה בצד הצעות מעשיות לפעילות בכתה עם דוגמאות לחוסן בקרב מגוון של יצורים חיים: צמחי סויה, אלמוגים, שממיות, נמלים ובוטריל פרחוני כאשר התוצר המבוקש מהתלמידים משלב שימוש ב-AI (איך לא...) ולטיפוח למידה בהכוונה עצמית כמנגנון המסייע לחזור לשגרת למידה.

קיים קשר עמוק ומשמעותי בין המצב הרגשי לאיכות הלמידה. לא בכדי נאמר "הכל בראש" שם ממוקמת האמיגדלה. האמיגדלה בעלת צורת שקד, נמצאת במוחם של בעלי חוליות, ומשחקת תפקיד מרכזי בתהליכים עצביים והורמונליים הקשורים בין היתר למצבים רגשיים כמו פחד ותגובה ראשונית לגירויים ("הילחם או ברח" - Fight-or-flight response) החשובים במיוחד במצבי דחק. האמיגדלה משחקת תפקיד מכריע גם בתהליכי קשב ולמידה. טיפוח החוסן הנפשי והרגשי יכול לסייע בצמצום ההשפעות המזיקות של מצבי דחק, ולשפר את יכולתנו להתמודד עם אתגרים לימודיים ואישיים, בו בזמן שעיסוק בלמידה עשוי להשפיע גם הוא על צמצום מצב הדחק וטיפוח החוסן.

מטרת המאמרים בעלון זה, לסייע הן לטיפוח החוסן והן לאיכות הלמידה. פרסום המאמרים, במהלך החודשים האחרונים, זה אחר זה, איפשר להתעמק יותר בכל אחד מהם ועתה מוגש העלון במלוא הדרו, גיליון נוסף של "שמורת טבע", עלון 205 המהווה שמורת טבע התורמת לחוסן בכל עת ובימים אלו במיוחד.

עוד בימים אלו, לקראת בחינות הבגרות המתקרבות נצלו את קורסי ההכנה לבגרות בביולוגיה בקמפוס IL בעברית ובערבית: "התא" "אקולוגיה" ו"גוף האדם", שיכולים לשמש להוראה בכל אחת משכבות הגיל ואת המשאבים השונים באתר של מרכז המורים לביולוגיה, אתר מרכז המעבדות ואתר מפמ"ר.
צוות ההדרכה עומד לרשותכם, בערוצי תקשורת שונים: הדרכה צמודה במסגרת הגפ"ן ולמורות ומורים מבתי ספר שאינן בגפ"ן - תיבת הביולוגיה, מפגשי ייעוץ כלליים המתקיימים מדי יום שלישי בשלוש, בהם ניתן מענה לשאלות על ידי מנחה ארצי/ת לביולוגיה ומפגשים ייעודיים לקמפוס IL ואוריינות מדעית בעברית ובערבית. פרטים בלוח המודעות בשולחן המפמ"ר.

ביולוגיה עוסקת בחיים, וככזו - גם בחוסן. בתקופה זו, בה אנו מתמודדים עם אתגרים רבים, חשוב לזכור ולנצל את כוחנו להשפיע על הדורות הבאים. אני מאחלת לכולנו שנמשיך לפתח חוסן אישי ומקצועי, נצלח את הבחינות מכל הבחינות ונעבוד יחד למען ימים טובים ומוארים יותר עבור תלמידינו.

להתראות בכנס המורות והמורים לביולוגיה, ה-31, שיערך בסיום שנת הלימודים,

אירית

ד"ר אירית שדה
מפמ"ר ביולוגיה

גיליון מספר 205 | פברואר 2025, תשפ"ה

שמורת טבע

עלון מורי הביולוגיה

תוכן העניינים

השאלה היא לא אם התרחשה התאוששות, אלא מהי התאוששות

ד"ר יהושע שקדי היה עד לא מזמן האקולוג הראשי של רשות הטבע והגנים. עם פרספקטיבה של כשלושים שנים בשמירת טבע, הוא פורס לפנינו דוגמאות מאלפות של מערכות אקולוגיות שהוא נטל חלק מכובד בניסיונות לשקם אותן מאסונות ומפגיעות. על פי התובנות שלו, לאחר שנים של עבודה בשטח, קשה מאוד להגדיר מהי התאוששות, ובכל מערכת אקולוגית צריך להציב יעדי שיקום המותאמים לה. לרוב, ניסיונות השיקום יולידו מערכת אקולוגית דומה לזו שנפגעה, אבל בכל זאת אחרת.

דיוקן

יהושע שקדי

ד"ר יהושע שקדי הוא אקולוג. הוא סיים את לימודיו לתואר שלישי באוניברסיטה העברית בירושלים, ומחקרו עסק באקולוגיה מדברית. את לימודי הבתר-דוקטורט באקולוגיה ימית סיים באוניברסיטת סטנפורד, קליפורניה, ארצות הברית. עם חזרתו ארצה החל לעבוד ברשות הטבע והגנים, ועד לא מזמן כיהן כמדען הראשי ומנהל חטיבת המדע של הרשות. לאחרונה פרש לגמלאות לאחר כ-30 שנים מהן 19 כמדען ראשי בארגון.

מראיינים: אוהד לבקוביץ וגילת בריל

איך יודעים שהמערכת האקולוגית מתאוששת אחרי אסון טבע?

השאלה היא אחרת: מה זאת התאוששות? מה זה שיקום? יש בכלל שיקום? בהקבלה למה שקורה היום מסביבנו, בקרב אנשים ומשפחות שנפגעו, יש כאלה שנראה שהתגברו על הכול, אבל לא רואים את הצלקות שנשארו מתחת לחיוך, ולא ידוע מה קורה מלמטה. אפשר להתאושש מאובדן? כנראה שלא, אבל אפשר לדעת להמשיך את החיים עם האובדן ביחד.

בטבע, ההתאוששות של מערכות אקולוגיות יכולה להיות מפתיעה. לא תמיד יש התאוששות, אבל פעמים רבות היא מתרחשת מהר מאוד, או ממצב קשה מאוד. מחכים, מחכים, מחכים, ואז "החיטה צומחת שוב": העשב צומח, הכול נראה ירוק. מכסה את הצלקות, ולא רואים אותן. ואז השאלה היא: זה התאושש? או שרק נראה כך? רואים נביטה, ובעלי חיים שחוזרים, אבל לא תמיד רואים את מה שלא חזר, ומסובך לזהות מה לא חזר.

אי אפשר לבדוק אם המערכת התאוששה בלי להגדיר מראש לאן רוצים להגיע. מעבר למדד אינטואיטיבי, כלומר, הסתכלות מסביב איך נראית המערכת ואיך היא מתנהגת, צריך להחליט מראש על הקריטריונים שלפיהם נחליט אם השטח מתאושש: אילו תהליכים אנחנו מעוניינים שיקרו בשטח כדי שנכריז על התאוששות של המערכת ואיך נמדוד אותם.

יש שיאמרו שקריטריון חשוב הוא שהמערכת צריכה לחזור למצבה הטבעי. קשה מאוד לדעת מה היה המצב הטבעי, ולכן זה קריטריון שקשה להציב ולעמוד בו כיעד להתאוששות. במיוחד במדינה כמו שלנו, שמאז התקופה הכלכוליתית, כלומר, ב-7000 השנים האחרונות, השפעת האדם פה היא עצומה.

> קשה מאוד לדעת מה היה המצב הטבעי, ולכן זה קריטריון שקשה להציב ולעמוד בו כיעד להתאוששות.

בדרך כלל תהליכי התאוששות מתחילים בייצור ראשוני, זאת אומרת צמחים שעושים פוטוסינתזה צומחים שוב, ואז מגיעים חסרי החוליות, עופות, יונקים, וזה נראה טוב. התאוששות כזו אפשר למדוד בצורה ברורה יותר.

אתה יכול לתת דוגמה לקריטריון שהצבתם לשיקום של מערכת אקולוגית?

אתן דוגמה לקריטריון ברור וחד שהעמדנו כדי לקבוע את מצב ההתאוששות באחד מאסונות הטבע שטיפלנו בו: בשנת 2014 היה זיהום של נפט גולמי בעברונה, שבו נשפכו טונות על גבי טונות של נפט. המערכת האקולוגית של עברונה מאופיינת בסוואנה של עצי שיטה. היה לנו ברור שללא עצי השיטה - תהיה מערכת אקולוגית הרבה יותר דלה מבחינת ביומסה, מגוון מינים ופעילות, משום שבסוף הקיץ רק עצי השיטה הם אלה שמספקים את המזון: אפשר לחיות תחתם ואפשר לאכול מפריים. לכן הצבנו קריטריון שלפיו כדי שתהיה התאוששות משמעותית אנחנו רוצים לראות עצי שיטה, ואם הם לא יחזרו, נדע שהמערכת נפגעה לבלי שוב. בעקבות זיהום הנפט, עצי שיטה רבים שלא הוצפו לגמרי בנפט לא נפגעו, כי השורשים שלהם למטה, מתחת לנפט, והם חיים. לכאורה - המערכת מתפקדת. אבל אז שאלנו את עצמנו מה יקרה בעוד מאתיים שנים כשעצי השיטה האלה ימותו? צריך שייווצרו עצי שיטה חדשים. וכך נולד הקריטריון ליעד הרצוי להתאוששות של המערכת כולה: השטח יוכרז כמשוקם כאשר תהיה נביטה של עצי שיטה חדשים.

ואז התבר לנו שב-1975 היה עוד זיהום של נפט ממש קרוב באותו אזור, שכולם שכחו ממנו. כשהתבוננו בשטח לא ראינו שום דבר יוצא דופן. בדקנו את המערכת שנוצרה מאז 1975: חסרי חוליות - כמו היום; עשבוניים - כמו היום; שיחים - כמו היום; עצי שיטה - כמו היום. מה אין? אין נבטים של עצי שיטה. היה לי ברור שבעוד 200 שנים, כשעצי השיטה החיים היום בשמורת עברונה ימותו, המערכת הזאת תשתנה לחלוטין, וההשתקמות לא תהיה שלמה.

מעבר להסתכלות מסביב איך נראית המערכת ואיך היא מתנהגת, צריך להחליט מראש על הקריטריונים שלפיהם נחליט אם השטח מתאושש.

ניסינו לפרק את הנפט בעברונה בעזרת כימיקלים וחיידקים. בניסויי מעבדה שנערכו בבנק הגנים של משרד החקלאות נמצא שצריך לפרק לפחות 60-70 אחוז מהנפט כדי שתהיה נביטה של עצי השיטה. היו כתמים שבהם הצלחנו לפרק 70 אחוז מהנפט, אבל ברוב המקומות התפרקו בממוצע רק כ-50 אחוז. ולכן הכתרנו את הניסיונות ככישלון צורב. היום, עשר שנים אחרי, כשהולכים בעברונה, לא רואים כתם נפט אחד - הנפט חבוי מתחת לסחף. אבל עצי השיטה לא ינבטו שם. אפשר לטעת עצי שיטה, אבל הניסיון מראה שעצי שיטה זקוקים להשקיה כל החיים, ולך תבנה במקום הזה מערכת השקיה. לכן החלטנו להוציא את הקרקע מלמעלה, ולשים קרקע אחרת או שהשיטפונות יסיעו לשם קרקע אחרת, ולתת לעצי השיטה סיכוי לנבוט שוב.

אז מבחינתכם המערכת הזאת עדיין לא התאוששה?

עדיין לא. אנחנו הולכים להחליף את הקרקע ואז נבדוק את עצמנו. גם קרקע שמוציאים, יש בה אורגניזמים, וגם היא תצטרך להשתקם. הקרקע החדשה לא תתפקד כרגיל, יש בה פחות חיידקים ופחות פרוקי רגליים שמעבדים את הקרקע. אבל אנחנו מקווים שזה יקרה לאט-לאט. לכן אנחנו מנטרים: עושים ובודקים. כמו עם הניסיון לפרק את הנפט: בדקנו אם זה הצליח ומצאנו שלא. עכשיו נעקוב אחר החלפת הקרקע.

אז האסון בעברונה הוא דוגמה למערכת שנפגעה, שהקריטריון לשיקום שהצבנו היה חד וברור: שעצי השיטה צריכים לנבוט ולשם כך 60 אחוז מהנפט צריך להתפרק. זה לא קרה - אז המערכת לא השתקמה. אבל כשמסתכלים עליה היום, היא נראית משוקמת לחלוטין. כאילו הכול מתפקד, אפילו רואים בקרקע את החורים של הארינמל. אלא שעצי השיטה לא נובטים, ולטווח הרחוק - המערכת למעשה לא התאוששה.

יש לך דוגמה למערכת אקולוגית שכן התאוששה?

דווקא במדינה היבשה שלנו מערכות אקולוגיות שנפגעו מהיעדר מים, כמו נחלים, ביצות, אגמים, משתקמות מהר יחסית. כשמוסיפים למערכת מים - חוזרים החיידקים, החרקים, העופות, היונקים. זאת הדוגמה הטובה ביותר להתאוששות, ושוב - נצטרך להגדיר התאוששות. נחל דן, נחל עיון, נחל כזיב, נחל בצת, נחל דוד, נחל ערוגות – כל אלה נחלים שבהם פגענו אנחנו, בני האדם, ורשות הטבע והגנים מבצעת ממשק מושקע כדי להביא את המערכת ממצב א' למצב ב'. זאת נקודה חשובה: שמירת טבע משמעותה התערבות בתהליכים. אנחנו בני האדם קלקלנו - אנחנו כבני אדם רשאים וחייבים לפעול כדי לתקן. אנחנו לא חייבים להתערב, ואפילו מעדיפים לא להתערב, בגלל שתי סיבות: אחת, הטבע חכם מאיתנו ועושה זאת טוב מאיתנו; והשנייה, כי לא לעשות כלום זה מאוד זול.

אם מתקבלות תוצאות טובות - זה הטוב ביותר! אבל אם צריך - מתערבים. לדוגמה, נחל דן שבצפון נובע ממעיין קרסטי, של עד 220 מיליון מטר מעוקב מים בשנה. זו קליחה אדירה. אבל הנחל התייבש משום שקיבוץ דן ברשות מלאה של מדינת ישראל שאב מים גם מהמעיין הראשי, וגם משני מעיינות התל שנמצאים צמוד לתל דן. כשחתכו לגמרי את הצינור שבו זרמו המים ששאבו ממעיינות התל, התחילו לזרום מים בנחל. וכשכל המים זורמים, מגיע הצומח, מגיעים חסרי חוליות, בעלי חוליות. היום שמורת דן, שהיא שמורה קטנטנה, שוצפת מים מאין כמוה. דוגמה אחרת היא נחל עיון, שהמים שזרמו בו הגיעו מלבנון לישראל, וכשהלבנונים התחילו לנצל את מי המעיין - הנחל יבש. כשבדקנו את איכות המים בנחל עיון, מצאנו שהיא דומה מאוד לזו של הדן, ולכן אפשר לערבב בין המים האלה למים האלה. ואכן בשעת מחסור נשאבים מים מהדן ממזרח, ומוזרמים בנחל עיון, שחזר להיות נחל איתן אחרי הרבה שנים שהמים כמעט שלא זרמו שם בקיץ.

דוגמה אחרת לחלוטין היא שמורת החולה. אנחנו יודעים שהיו 45 קמ"ר ביצה ו-15 קמ"ר אגם. בשנותיה הראשונות של מדינת ישראל הוחלט לייבש את החולה, והיום לא כל כך ברור למה: המלריה מוגרה כבר קודם, והייבוש הוסיף רק מעט קרקע חקלאית (כבול) שהתגלתה כבעייתית, משום שהיא מתייבשת בקיץ ונשרפת, ויש צורך להשקות אותה כדי למנוע את השריפה. הסיבה המרכזית לכך שייבוש החולה היה טעות, היא שהחולה שמרה על איכות המים שזרמו לכינרת. לכן החליטו להציף את החולה מחדש. עוד לפני כן, בשנות החמישים, פרופסור היינריך מנדלסון ופרופסור אמוץ זהבי מאוניברסיטת תל אביב נלחמו כדי לשמור משהו מהחולה. הם הצליחו להכריז על 4000 דונם של אזור שמור, סגור בסוללות עפר, כשמסביב הכבול שוקע, כי הוא מקבל מים, מתייבש ויורד. עם הזמן, השמורה גבהה

מה אתה זוכר מתקופת התיכון שלך?

למדתי בבית ספר תיכון בערד, והיה לנו מורה מצוין לביולוגיה, אבינועם נרד זיכרונו לברכה. אני זוכר שהיה יום התלמיד, שבו תלמידים היו המורים. בדיוק למדנו על מערכת הרבייה. על תא זרע, תא ביצית, על הזיגוטה, וכשזה מתפתח יש תותית. למה אני זוכר את זה? כי אני לקחתי על עצמי ללמד את הנושא בכיתה המקבילה. זאת הייתה כיתה הומנית, לא ביולוגית (אצלנו היו רק ביולוגיה והומני) והיו בה החבר'ה היותר פלפלים. אני זוכר שהמורה שלי היסס: "הוא ילך ללמד את הכיתה השנייה על רביה?" הוא הסכים, אבל פתאום אני רואה אותו בכיתה, נכנס למעבדה ליד. ואני אומר לו: "אתה רוצה..." והוא עונה: "לא, לא, אני חייב לעשות משהו לשיעור הבא." הוא עמד שם בשקט, הם לא ראו אותו, רק אני ראיתי אותו. הצלחתי להעביר שיעור, והוא עמד שם רק כדי לשמור למקרה שתהיה התפרקות בגלל הנושא העסיסי. האמת היא - הם היו מרותקים. זאת מערכת יפה מאוד: תא זרע תא ביצית, אונטוגנזה. נתתי הרצאה של שעה, ואבינעם נרד עמד שם ונתן לי גב סמוי, והוא יצא משם אחר כך עם חיוך רחב, כי הצלחתי ללמד את זה. לקחתי מהמורה שלי את היכולת להעביר נושא מורכב בשעה, לכיתה אחרת, ואת החובה לנסות בהוראה דברים חדשים גם אם הם נראים קיצוניים, וזה בזכותו.

מעל פני השטח, ואת המים שהיא קיבלה אז - מי ביוב ומי בריכות דגים באיכות גרועה מאוד - צריך לשאוב אליה. דבר ראשון שעשינו כדי לשקם את שמורת החולה, בשיתוף עם רשות המים, היה לשקם את הסוללות האוגמות את המים בשמורה. הגדלנו את כמויות המים הנשאבות אל השמורה פי עשרה בערך, ובמקום מים באיכות נמוכה ביותר, מגיעים אל השמורה מי ירדן צלולים. באופן זה, שולטים בריכוז הנוטריינטים בשמורה ומוודאים שהמים הזורמים אל הכנרת הם באיכות טובה.

היום המים הצלולים זורמים בחולה לאט, ומשקמים שם את הדגה ואת הצמחים. הפלא ופלא, אפילו עגולשון שחור-גחון - דו-חיים עם נקודות על הגחון, שהוא מין אנדמי לחולה - נמצא מחדש; אם כי קשה לדעת אם הוא חזר לחולה בגלל מה שעשינו או ללא קשר לכך.

הופתעת שהמין שרד שם חמישים שנה?

הלסת נפלה לנו! זה היה אושר עילאי! הוא נותר בעמק החולה והצליח לשרוד איכשהו והיום אנחנו משקמים את האוכלוסיות שלו שהולכות וגדלות. יש לנו פרויקט גדול, יחד עם מדענים מרופין ומאוניברסיטת תל אביב, שמגדלים ראשנים של המין הזה בשביה. כל הפרויקט היה בחולה, ובגלל המלחמה והירי על החולה העברנו אותם לגן החיות התנ"כי. עכשיו יעבירו אותם בחזרה.

אז הינה פרויקט שנראה כהצלחה. אבל שימו לב, כל בתי הגידול שמוסיפים בחולה, גם האגמון שלא שייך לרשות הטבע והגנים, הם בריכות מלאכותיות. הכול מוצף מחדש, בנוי מחדש, מהונדס. היום אנחנו משתמשים בדחפורים כדי לבנות בית גידול ולנסות לחקות מה שהיה פעם. וגם לפעמים לא בדיוק מחקים מה שהיה פעם. האם אפשר לומר שהמערכת האקולוגית השתקמה?

נתת דוגמה של מים, נתת דוגמה של נפט. מה עם שריפות?

שריפות מקבלות יחסי ציבור עצומים, אבל צריך לשקול את זה במידה. אנחנו לא אוהבים שריפות, כי אומנם אנחנו רואים בעיקר את הצומח שנפגע, אבל גם כל בעלי החיים נשרפים, זוחלים, חרקים ופרוקי רגליים; ואם זאת עונת הדגירה, גם דוגרי קרקע, ובאמת כואב הלב.

עם זאת, כפי שאמרתי, כ-7,000 שנה, הארץ נמצאת תחת השפעת אדם חזקה מאוד, כולל שריפות. כתוב אצלנו במקורות ששמשון הצית שריפה עם זנבות השועלים. הארץ הזאת תמיד נשרפה, ואין בכך משהו חדש. זה לא טוב, זה לא נעים, אבל זה לא סוף העולם.

הייתי פעם בסיור לימודי בדרום אפריקה. האקלים אצלם דומה לאקלים ים תיכוני, עם כמה חודשי גשם וכל שאר החודשים יבש. יש להם שיטה ברורה מאוד בנוגע לשריפות: אם השריפה מסכנת יישוב, הולכים לכבות אותה (שלא כמו אצלנו, היישובים שם רחוקים מאוד זה מזה). אם השריפה האחרונה הייתה בשטח הזה לפני 25-20 שנים, שיישרף, זה טוב! לפעמים מצטבר הרבה מאוד חומר אורגני יבש ואז מגיעה השריפה ועושה איזו מתיחת פנים. אבל אם השריפה האחרונה הייתה בחמש השנים האחרונות - הולכים לכבות ומהר. הסיבה היא ששריפות חוזרות בפרק זמן קצר גורמות לשטח להשתנות בצורה שמקשה עליו להשתקם. שריפה חוזרת כזאת משנה בעיקר את איכות הקרקע, שנאפית בחום הגבוה, וכשזה קורה פעם אחר פעם, נוצרים נזקים גדולים מאוד. גם האוכלוסיות של בעלי החיים מתקשות ליצור גרעין מייסד חדש אחרי שריפות חוזרות ונשנות. אז אפשר להשתקם אחרי שריפה, קשה מאוד להשתקם אחרי שריפות חוזרות יותר מפעם אחת בחמש שנים. אם לפני 20 שנים הייתה שריפה - לא נודע כי בא אל קרבו.

זה מה שקרה במלחמה בצפון? השריפות כל הזמן חזרו ונשנו?

הן לא חזרו ונשנו, אלא שרפו עוד ועוד שטחים. שריפות כמו שקרו השנה היו אסון, משום שכאשר 200 קמ"ר נשרפים, זה פשוט נורא ואיום. בהכרח כשנשרפים עוד ועוד שטחים, יש ביניהם שטחים שנשרפו לפני שנה ולפני שנתיים ולפני שלוש. ברמת הגולן כל שנה חוזרות ונשנות השריפות בגלל אימוני צה"ל, אבל בגלל שזאת חברת עשבוניים - ההתאוששות מהירה יחסית. כשחורש או יערות קק"ל נשרפים, עובר יותר זמן עד ההתאוששות. בכרמל, באזור החי-בר, יש אזורים שנשרפו פעם אחרי פעם בהפרש של כשלוש עד חמש שנים, ואנחנו רואים שהצמיחה של הצומח המעוצה איטית מאוד, ולא מתקבל שם בחזרה החורש הסבוך.

יש מקרים נוספים שבהם אתה חושב שעדיף היה לא להתערב בתהליך הטבעי?

אולי דוגמה טובה למקרה כזה היא חולות החוף בשמורת ניצנים. החולות הללו חדרו אלינו מסיני דרך רצועת עזה. מכיוון שישראל היא הקצה הצפוני של החולות, התנאים הייחודיים הפעילו

שמירת טבע משמעותה התערבות בתהליכים. אנחנו בני האדם קלקלנו - אנחנו כבני אדם רשאים לפעול כדי לתקן.

ברירה טבעית שיצרה מינים חדשים, אנדמיים, שנמצאים רק שם. החולות מגיעים מסיני וגם מהנילוס, דרך הים התיכון, מגיעים אל החופים שלנו, ואז הרוח מסיעה את החולות פנימה לכיוון היבשה. אבל מה לעשות שב-250-200 השנים האחרונות הרוח נחלשה, וכניסת החולות איטית יותר. בעבר, החולות החשופים שהוסעו פנימה ברוח נותרו חשופים, כי הייתה השפעה חזקה של האדם: רעייה חזקה מאוד, כריתת עצים לצורכי הסקה. בתנאים האלה הצומח לא מתבסס, והרוח המעטה מצליחה להניע את החולות. מדינת ישראל הכריזה על חולות ניצנים כשמורת טבע ואסרה על רעייה וכריתה. בהיעדר רעייה ובהיעדר כריתה, החולות התייצבו, התכסו בצמחייה, ובמקום חברה של ידיד החולות ולענה חד-זרעית, מקבלים סבך של רותם וקידה שעירה. למה זה לא טוב? כי יש מינים שאנחנו קוראים להם פסמופילים[1], אוהבי חולות. לדוגמה, המכרסם גרביל החוף (*Gerbillus andersoni*) חי באזורים העצורים, אבל גרביל החולות (*Gerbillus pyramidum*) חי באזורים החשופים של החולות. כדי לשמור על המינים הללו הגענו ב-2004 לשמורת ניצנים עם דחפורים ובולדוזרים, וקילפנו את הצומח מחלק מהדיונות. עכשיו תחשבו על המצב הזה: אני עומד שם עם הפקח, צופים על דחפור שעובד בתוך שמורת טבע ומגלח את הצומח. אם מישהו אחר היה מעז לעשות את זה, היינו מפעילים עליו אמצעי פיקוח. אבל אנחנו עושים את זה ברשות ובהיתר וביוזמה שלנו, והכול כדי שהרוח תסיע את החולות והם ינועו. חיקינו את המצב שבו רעייה וכריתה מונעות את התבססות הצומח המעוצה. קיווינו שכך יגדלו מספרי המינים הפסמופיליים. הורדנו צמחייה מכמה דיונות חיכינו, ניטרנו, בדקנו את עצמנו ובחנו מה אנחנו מקבלים. ואם חשבנו שנקבל חברה מסוג מסוים - צומח, חרקים, זוחלים ומכרסמים, שמאפיינת דיונות נודדות, לעומת חברה שמאפיינת דיונות יציבות, הפלא ופלא - קיבלנו משהו אחר לגמרי. לא מה שהיה קודם, לא מה שהתכוונו שיקרה - אלא משהו אחר. האם אפשר לומר שהמערכת האקולוגית השתקמה? האם היה נכון להתערב בתהליכים?

במה זה היה אחר?

הרכב מינים אחר. עשינו ניתוח סטטיסטי רב משתנים של הרכב החברה שהתבסס על עשרות רבות של מיני צמחים, חסרי חוליות, מכרסמים. הנתונים הוצגו בגרף פיזור. זה היה ניתוח מורכב, שהעמיד את הנתונים של המערכת האקולוגית בניצנים לאחר פעולת גילוח הצומח מהדיונות באזור אחר בגרף: לא באזור הנתונים של נקודת ההתחלה, ולא באזור הנתונים שאליו רצינו להגיע. בחולות ניצנים קבענו נקודת ייחוס שלא הייתה ברורה דיה, וקשה היה לקבוע לפיה מה בעצם רוצים להגדיר כשיקום. הפעולה שלנו בניצנים לא הובילה למה שהיה לפני, וקיבלנו משהו אחר. זה טוב? אני לא יודע, נצטרך להמשיך לעקוב.

1 פסמו – חול; פילי – אוהב.

גם אם התקבלה חברה אחרת, אי אפשר לראות בתוצאות משהו טוב?

אם קיבלנו חברה אחרת, אז למה לא להשאיר את המיוצבת? בשנת אלפיים ארגנו סדנה עם אקולוגים וגיאומורפולוגים שעסקה בשאלה מה לעשות עם חולות מישור החוף. האקולוגים אמרו: אנחנו נילחם על כל מין שיש פה כי יש פה אנדימיזם. לעומתם הגיאומורפולוגים אמרו: מה יש לכם האקולוגים, אתם השתגעתם? אפילו שיש פה קצת אנדימיזם, אתם נלחמים בכוחות הטבע. התהליך הטבעי הוא ייצוב החולות, אז תנו לחולות להתייצב. אז לא יהיו פה כמה מינים. ביום השני לסדנה הגאומורפולוגים לא נכחו, וכשהביאו את הנושא להצבעה, האקולוגים החליטו להילחם על המינים האנדמיים. התוצאה הייתה הממשק של גילוח הצמחייה בחולות ניצנים, שעליו סיפרתי לכם. כשחזרנו עם התוצאות לסדנה נוספת, שאלתי את אותן שאלות: זה טוב? זה רע? אף אחד לא ענה לי. כי אי אפשר לדעת מה התשובה. אנחנו צריכים עוד לחכות ולנטר ולא להתבייש לבצע שינויים.

אז מה רצוי שמדינת ישראל תעשה כדי למנוע פגיעות או כדי לעודד התאוששות מפגיעות משמעויות?

זה פשוט מאוד. כדי לשמור על הטבע בישראל צריך להבין שהוא כל הזמן ישתנה ולא להיות מקובעים. יש כמה פעולות בסיסיות שצריך לעשות לשם כך: הראשונה היא מיפוי המערכות האקולוגיות בישראל. את זה דותן רותם מרשות הטבע והגנים עשה. השנייה היא לדאוג שכל המערכות האקולוגיות מיוצגות בתוך שמורות טבע. צריך לזכור שהיום אנחנו נמצאים במצב

ש-30-25 אחוז משטח המדינה מוגן בשמורות טבע. זה אחוז אדיר בקנה מידה עולמי, אבל לא כל המערכות מיוצגות בשמורות טבע כמו שצריך. באזורים הללו צריך להיאבק ולהגדיל את שמורות הטבע, יחד עם קק"ל ועם מנהל התכנון. השמורות צריכות להיות גדולות, כי אם השמורה קטנה, מתרחשים תהליכים שקשה לשלוט בהם. הפעולה השלישית היא לחבר בין שמורות הטבע. זאת אומרת שיהיה קשר קרקעי ביניהן כדי

קשה לקבוע מה היה קודם

יש לנו בעיה לדעת מה היה קודם. אני לא יודע מה היה פה בימי אברהם אבינו. דרך אגב, אני בודק מקורות תנכיים, כי מסופר על אבשלום שהשערות שלו נתפסו בתוך חורש, ועל שמשון והשריפה, ודוד המלך שמתאר שהוא נלחם בארי ובדוב, ועקדת יצחק והאייל בסבך. לאברהם ולוט לא היו מספיק אזורי מרעה, ולכן אברהם שלח את לוט לכיכר סדום, והוא נשאר למעלה באזור חברון. אנחנו לומדים מכך שהייתה בעיה עם רעייה ולכן אפשר לשער איך הארץ נראתה באותה תקופה.

ד"ר אביבה רבינוביץ זיכרונה לברכה, שהייתה מדענית ראשית ברשות הטבע והגנים, כתבה מאמר בכתב העת "טבע וארץ"* על הזיכרונות שלה בתור לוחמת פלמ"ח, כתצפיתנית. היא תצפתה דרומה באזור ואדי פוכין שבשוליהם הדרומיים של הרי ירושלים, והיא כותבת: היינו צריכים לבנות מחסות מאבנים כדי שלא יראו אותנו. כשאני נמצא היום באותו מקום שבו היא הייתה, כל מה אני צריך לעשות כדי שלא יראו אותי זה להתכופף, כי יש מלא עצים מסביב. לה לא היו עצים להסתתר. ברור שלא שהיינו רוצים לחזור למצב בתקופתה, כי זאת הייתה תוצאה של רעייה וכריתה בלתי מבוקרות, אבל אולי גם הצומח שקיים שם היום הוא יותר מדי, כי אולי פעם היו יותר אוכלי עשב שדילדלו את החורש וכדומה. לכן קביעה של נקודת הייחוס, כלומר, מה שהיה קודם, מעלה שאלות: מה נכון ומה לא נכון? מתי זה "לפני"? אני לא יודע, כי אין לי למה להשוות, אין לי נקודת ייחוס וקשה מאוד לקבוע אותה.

*כתב העת של החברה להגנת הטבע.

שתוכל להיות הפצה של בעלי חיים ושל זרעי צמחים. אלה הם המסדרונות האקולוגיים שהיה לי הכבוד לכתוב עליהם את המסמך המייסד. הם לא מוגדרים כשמורת טבע, אלא כשטח שבו מוטלות מגבלות של פיתוח. זאת אומרת, יש לנו שמורות, גדולות איפה שאפשר, מייצגות את כל המערכות האקולוגיות בישראל, ומחוברות בעזרת מסדרונות אקולוגיים. זה הדבר המרכזי שצריך לעשות בשביל לשמור על הטבע ולמנוע הרס.

אתם רואים שגישה כזאת אכן משמרת מערכות אקולוגיות?

זה לא מספיק. אנחנו ברשות הטבע והגנים, יחד עם קק"ל, המשרד לאיכות הסביבה ומדענים מתנדבים ממוסדות אקדמיים שונים, הקמנו את המארג, שמטרתו לעקוב אחרי השינויים בטבע. בעזרת המארג אנחנו רואים שהרעיון "גדול-מייצג-מחובר" נותן מטרייה ששומרת על רוב המינים, אבל "קטני הארץ" לא נשמרים מספיק טוב: אנחנו רואים ירידה במכרסמים, ירידה בפרפרים. לכן יש כמה דברים נוספים שצריך לעשות ברמה הלאומית. בשביל לנסות להתגבר על סכנת השריפות החוזרות, שללא ספק פוגעות בקטני הארץ, צריך ליצור אמצעים שיאפשרו לכבות את השריפות ביעילות. יש המלצות ברורות מאוד ליצור אזורי חייץ סביב היערות, סביב היישובים וסביב שמורות הטבע בלב השטח, כדי לאפשר לכוחות הכיבוי להגיע ולכבות.

דבר נוסף הוא לגבש חוק ברור נגד מינים פולשים. מינים פולשים משפיעים ברמה שהיא מעבר לעיקרון של "גדול-מחובר-מייצג". הם מגיעים ממקומות אחרים וגורמים נזקים: הביאו חיות מחמד, הביאו צמחים כמו השיטה הכחלחלה שהתפשטה בכל הארץ והטיונית; הביאו את נמלת האש הקטנה ותולעים שגרמו לנזקים נוראים ופטרייה שפגעה באופן חמור בענף השקדים בארץ. אגב, שאלה ביולוגית מעניינת היא למה הם עושים נזקים במקום חדש להם, שבו אין להם היסטוריה של ברירה טבעית. אפשר לצפות לכך שהחברה המקומית תהיה חזקה מאוד ועמידה בפני מינים חדשים. טרם מצאתי תשובות טובות לשאלה הזאת. אבל צריך חקיקה, כדי שהפולש הבא לא ייכנס. אני עובד על חקיקה נגד מינים פולשים 15 שנה לפחות ונתקלתי בקשיים גדולים לקדם אותה.

הדבר השלישי: צריך לנקות את המדינה מלכלוך על פני הקרקע. אני מדבר על פסולת חקלאית, ובעיקר על פסולת בשר, כי היא מזינה את הטורפים שאני מגן עליהם באמצעות החוק, את הזאבים ואת השועלים ואת התנים ואת העורבים. בכל מקום יש פסולת של בשר, ואז כל המינים שהזכרתי מתרבים, וגורמים נזקים לחקלאות. חקלאי זועם שלא מקבל תשובה לבעיות ולמצוקות שלו מפזר רעל באופן לא חוקי. ואז מישהו מת - זה יכול להיות כמה תנים, וסלחו לי שאני לא מרגיש חמלה עליהם כי הם רבים מדי, ואלה יכולים להיות נשרים ועיטים שמתים מהרעלות משניות.

דבר רביעי: המדינה חייבת להילחם בתופעה של הכלבים המשוטטים. אצל בדואים בנגב כלבים משוטטים רודפים אחרי הילדים שלהם, הורגים את העיזים, רודפים אחרי הבדואי ואשתו, והוא עומד חסר-אונים. ואז כמה חברות כנסת עם לב של זהב מציעות ללכוד אותם, לסרס אותם, לחסן אותם ולשחרר אותם בחזרה אל המקום שבו הם נתפסו. אומר הבדואי שמסתכל שם: הממשלה כבר תפסה את הכלבים, וזורקת אותם עליי בחזרה? יותר מפעם אחת קרה שפיזרו רעלים נגד הכלבים ו-15 נשרים מתו במכה. ולא רק נשרים נפגעים, גם רוכבי אופניים! הכלבים האלה רודפים אחריהם וזאת סכנה אמיתית! בביר א-דארג' הייתה ילדה בדואית שכלב משוטט הרג אותה. אחר כך המשפחה תבעה את המדינה לפיצויים ובצדק. ועדיין מגינים על הכלבים יותר מאשר על הנשרים שלי, ויותר מאשר על רוכבי אופניים, ויותר מאשר על הילדים הבדואים. למה?

מה המסר שלך למורים לביולוגיה?

הייתי שותף לכתיבה של בערך עשר תוכניות לימודים. מכל השנים, ואני מדבר על עשרים ומשהו שנה, אולי למדו אותן 5000 תלמידים. ככה אי אפשר להנחיל לציבור ערכים של שמירת טבע. כדי לחנך את הציבור לשמירת טבע, צריך להשתמש היום באמצעים אחרים: הרשתות החברתיות יכולות להיות מאוסות לפעמים ואני עצמי לא נוטל חלק בהן. אבל, יש להן יתרון, כי הן נותנות אפשרויות פנטסטיות להגיע באופן בלתי אמצעי ישר למשתמשי הקצה, שלא רוצים פילטר. לדעתי חשוב מאוד להשתמש במדיה החברתית כדי להגיע ישירות לתלמידים וגם ישירות למורים. אז הפנייה שלי למורים היא להעביר את המסר של שמירת טבע בכל אמצעי אפשרי, ורשתות החברתיות הן אמצעי מצוין לשם כך.

מותר להוציא ניידים

אתרים ואפליקציות שעוזרים לנו בנושא שיקום וחוסן

שיקום טבע

שיקום שמורת הטבע עברונה - סרטון

שיקום שמורות הטבע בצפון - כתבה ב"זווית"

שיקום שמורת טבע נחל עיון לאחר המלחמה - סרטון

המארג: התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע

התאוששות מערכת אקולוגית לאחר שריפה - סרטון

רגנרציה

מקבץ כתבות על מחקרים בנושא רגנרציה - מכון דוידסון

סרטון על מחקר באקסולוטל

התחדשות מלאה של הידרה בהילוך מהיר - סרטון

התחדשות של פלנריה - סרטון

אוקסיטוצין

פעילות ההורמון אוקסיטוצין - סרטון

כשקרחונים מפנים את מקומם

מאפיינים של התפתחות מערכות אקולוגיות באזורי נסיגת הקרחונים

עיבוד על פי המאמרים[1]:

Poorter, L., Amissah, L., Bongers, F., Hordijk, I., Kok, J., Laurance, S.G.W., Lohbeck, M., Martínez-Ramos, M., Matsuo, T., Meave, J.A., Muñoz, A., Peña-Claros, M. & van der Sande, M.T. (2023): "Successional theories". Biological Reviews 98: pp. 2049–2077.

Ficetola, G.F. Marta, S., Guerrieri, A., Gobbi, M., Ambrosini, R., et al. (2021): "Dynamics of Ecological Communities Following Current Retreat of Glaciers". Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 52 (1), pp.405-426. 10.1146/annurev-ecolsys-010521- 040017. hal-03409533

הפשרת הקרחונים היא אחת התופעות המזוהות ביותר עם ההתחממות הגלובלית. תופעה זו גורמת לעלייה במפלס מי הים והצפות באזורים רבים הנמצאים בגובה פני הים (Taherkhani et al., 2020). כמו כן, הפשרת הקרחונים חושפת אזורים נרחבים של קרקע או ים, שהם כהים יותר ביחס לקרח, ולכן מורידה את שיעור החזר קרינת השמש מפני כדור הארץ (Pistone et al., 2014). לצד השפעות אלו מתרחשים ממש לנגד עינינו תהליכי מַעקובֶת (סוּקצֶסיה), שבהם בתי הגידול שהיו מכוסים בקרחון במשך עשרות אלפי שנים, פנויים לאכלוס של אורגניזמים חדשים וליצירת מערכת אקולוגית חדשה (Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019).

מערכות אקולוגיות על פני כדור הארץ כבר חוו בעבר את סיומם של עידני קרח ונסיגת קרחונים. הייחודיות של נסיגת הקרחונים הנוכחית היא במהירות הגבוהה שבה היא מתרחשת, ביחס לנסיגות קודמות (Sommer et al., 2020). המהירות היחסית של הנסיגה מאתגרת את יכולת ההתאמה וההסתגלות של מערכות ביולוגיות, אולם לחוקרים היא מאפשרת תיעוד רציף של תחילת הנסיגה והתקדמותה בעבור קרחונים רבים על פני כדור הארץ[2]; ובמקביל לתעד את הרצפים הכרונולוגיים של היווצרות המערכת האקולוגית, כלומר, אילו שינויים אקולוגיים חלים במהלך הנסיגה. כל אלה תרמו לכך שנסיגת הקרחונים עודדה עוד מתחילת המאה הקודמת מחקר נרחב של התהליכים המאפיינים את המעקובת, שתחילתה במספר מועט של אורגניזמים חלוצים (Hagvar et al., 2020), והמשכה ביצירת מערכות אקולוגיות מורכבות ובעלות מגוון ביולוגי רחב, ההולכות ונבנות עד להתייצבותן.

תהליכי מעקובת מתרחשים לאחר הפרעה למערכת האקולוגית, כמו שריפה, נסיגת קרחונים, התפרצות הרי געש, שיטפון, או אירוע של זיהום נפט. הפרעות מעין אלה יוצרות שטח חדש הפנוי לאכלוס. בעוד שברוב המקרים הללו הייתה מערכת אקולוגית פעילה נראית לעין לפני ההרס, נסיגת קרחונים ייחודית בכך שהקרקע הייתה מכוסה בקרחון עשרות אלפי שנים. האם אפשר לראות בשטחים שמתרחשת בהם נסיגת קרחונים התפתחות הדרגתית של מערכות אקולוגיות משלב ראשוני חסר חיים? מסתבר שלא: קרחונים מתאפיינים במערכת אקולוגית עשירה של מיקרואורגניזמים החיים על פני הקרחון, במים הזורמים בסדקים שבתוך הקרחון, ואף מתחתיו (Hotaling et al. 2017, ראו מסגרת). יתרה מזאת, מיקרואורגניזמים אלה נמצאו שונים מהמיקרואורגניזמים הקיימים במשקעים המגיעים מהאטמוספרה, מה שמעיד על כך שהם אוכלוסיית התחלה ייחודית לתהליכי מעקובת של נסיגת קרחונים (Rime et al., 2016).

דינמיקה של שינויים

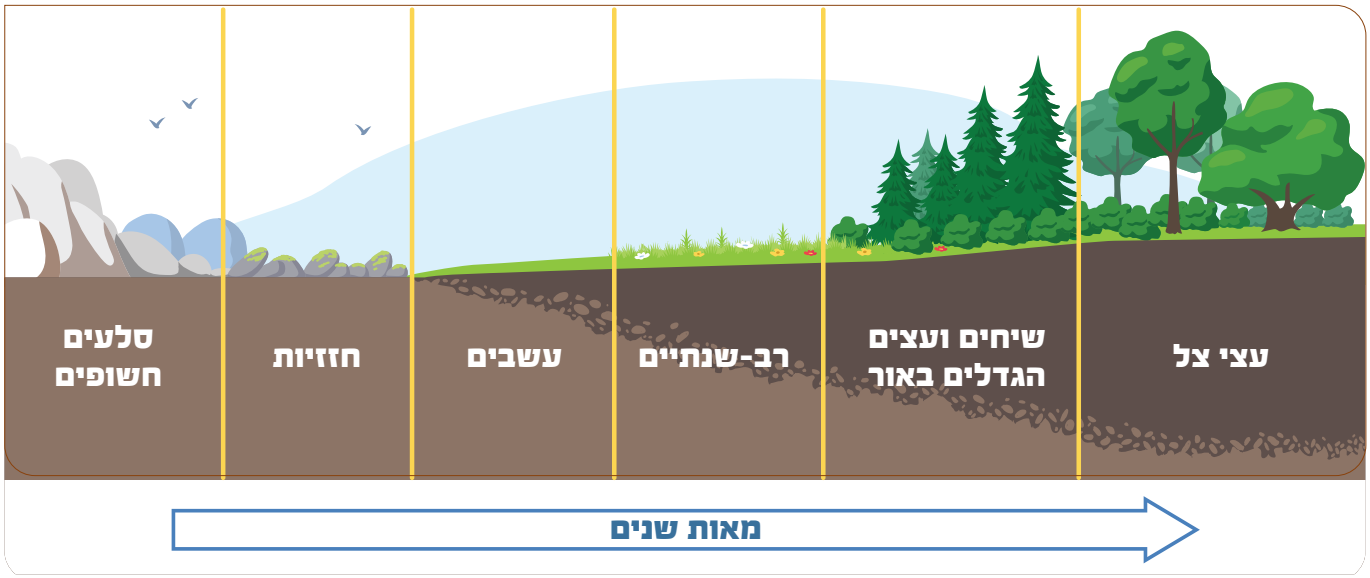
א. מאפייני המעקובת

חוקרים שעקבו אחר מערכות אקולוגיות המתפתחות לאחר נסיגת קרחונים דיווחו על תופעות שונות המאפיינות את תהליכי המעקובת:

החלפת מינים היא מעקובת המתרחשת בגלים של חברות המורכבות ממגוון מינים ייחודי המחליפות זו את זו: תחילה חודרים מינים חלוצים לאזור שהתפנה ומתבססים בו. בשלבים הבאים מינים חלוצים אלה מוחלפים בחברות חדשות של אורגניזמים (Clements, 1916).

תופעה זאת אופיינית למעקובת של חברות צמחים, שלרוב מתחילה בחברה של צמחים נמוכים ומהירי צימוח כמו עשבים, המוחלפים אחר כך בשיחים, ולבסוף בעצים שהצימוח שלהם איטי יותר (איור 1). ואכן, ממצאים דומים נצפו בעבור צמחים באזורי נסיגת קרחונים, והראו שצמחים חלוצים מהירי צימוח, שהתבססו בשלבים המוקדמים של המעקובת, הוחלפו בשלבים מאוחרים יותר בצמחים מתחרים, בצמחים עם צימוח איטי יותר, או בצמחים המסוגלים לגדול בטווח רחב יותר של תנאים א-ביוטיים (Chapin et al., 1994). תופעה דומה תוארה באזורי נסיגת קרחונים גם בעבור חברות של חסרי חוליות (Gobbi et al., 2007) וגם בעבור מיקרואורגניזמים המאכלסים את הקרקע באזור הנסיגה (Edwards & Cook, 2015).

1. הגרסה המובאת כאן היא סקירה של תוכני המאמרים המקוריים, ונועדה להנגיש את המידע לציבור המורים לביולוגיה. העיבוד כלל הוספת הסברים ואיורים לתכנים מורכבים, סינון מידע שאינו נקשר לרעיון המרכזי של הגרסה המעובדת, הגדרת מונחים מקצועיים, ובמידת האפשר קישור הדברים לתהליכי למידה והוראה. המעוניינים לקרוא את המאמרים המקוריים מוזמנים לפנות למקור לפי הפרטים המופיעים בתחילת הגרסה המעובדת.
2. תופעה המכונה אלבדו (Albedo).



איור 1: תהליכי החלפת מינים בחברות של צמחים

הוספת מינים היא תופעה שבמהלכה המינים הראשונים שמאכלסים את האזור המתפנה אינם מוחלפים אלא נותרים במערכת האקולוגית, ואליהם מצטרפים מינים חדשים (Moret et al. 2020). התופעה מאפיינת קבוצות טקסונומיות שונות, כמו פרוקי רגליים, חזזיות ופטריות; בתחילת הנסיגה של הקרחונים נוספים לאזור ומאכלסים אותו מינים רבים יחסית, ובשלבים מאוחרים יותר מתווספים אליהם מינים אחרים, אם כי מעט יחסית (Vater & Matthews, 2015).

סביר להניח שהשינויים במערכת האקולוגית ההולכת ונבנית באמצעות הוספה או החלפה של קבוצות טקסונומיות אינם מנותקים זה מזה, והדינמיקה של השינויים נוצרת מתוך יחסי גומלין הדוקים בין האורגניזמים לבין הסביבה. לדוגמה, בתחילה יכולים להתווסף למערכת עוד ועוד מינים, אבל ככל שעושר המינים וכמות הפרטים גדלים כך מתחילים חלק מהמשאבים להיות מוגבלים, ונוצרים תנאי סף ונקודות מפנה המשפיעים על המינים השונים[3].

הזמן שעובר מאז תחילת הנסיגה של הקרחון נחשב לאמצעי ניבוי טוב למצב המערכת האקולוגית (Johnson & Miyanishi 2008). השינויים הראשונים והיווצרותם של מארגי מזון של מינים חלוצים מתחילים בתוך זמן קצר, בשנים הראשונות, ולעיתים אף לאחר כמה חודשים מתחילת הנסיגה (Hagavar et al., 2020). לעומת זאת, מערכת אקולוגית עשירה ומפותחת כמו בסביבה הקרובה לקרחון מתפתחת בסדר גודל אחר לגמרי של זמן, לעיתים אפילו אלפי שנים (Delgado-Baquerizo et al., 2019). בין שני קצוות אלה של סקלת הזמן, יש מערכות אקולוגיות שמתפתחות בסדרי גודל של עשרות או מאות שנים. כמו כן, קיימים הבדלים בעיתוי של הצטרפות קבוצות טקסונומיות שונות, והבדלים בקצב האכלוס בקווי גובה שונים. לכן, כשמאפיינים תהליך של מעקובת, נהוג להתייחס לשלבים מוגדרים על פי זמן, כלומר, שלב מעקובת מוקדם, שלב ביניים ושלב מתקדם. שלבים אלה מכונים רצפים כרונולוגיים[4].

ב. גורמים ביוטיים וגורמים א-ביוטיים: השפעה דו-כיוונית

מודלים שפותחו כבר מראשית המאה הקודמת (Clements, 1916) מתייחסים למכלול גורמים העשויים להשפיע על הדינמיקה של מערכת אקולוגית המתבססת בבית גידול חדש עד להתייצבותה. ההשפעה הדו-כיוונית בין גורמים א-ביוטיים וגורמים ביוטיים יוצרת דינמיקה אופיינית לתהליכי מעקובת.

תכונות האורגניזמים המאכלסים: תיאוריית הסבילות

רוב המינים שיאכלסו את האזור שהתפנה בנסיגת הקרחון מגיעים ממערכות אקולוגיות השכנות לקרחון. התכונות הביולוגיות של המינים המרכיבים מערכות אלה וטווח התנאים הסביבתיים שבהם הם מסוגלים להתקיים, הם אלה המשפיעים על הדינמיקה של המעקובת. עיקרון זה מכונה תיאוריית הסבילות[5]. לדוגמה, אורגניזמים עם יכולת תפוצה רחבה, כמו זרעים הנפוצים עם הרוח, חיפושיות בעלות כנפיים או עכבישים עפים יאכלסו ראשונים אזורי נסיגה של קרחונים שנחשפו לפני פחות מ-100 שנים (Gobbi et al., 2017). אורגניזמים שיכולת התפוצה שלהם מוגבלת יותר, למשל זרעים הנופלים רק בקרבת השיח, יגיעו לאזור בשלבים מאוחרים יותר, לאחר למעלה ממאה שנים. עופות ויונקים יכולים מדי פעם להגיע לאזור הנסיגה, לצורכי ציד, אולם כדי שהמקום יספק את המזון הדרוש להם לאורך זמן, ויתמוך באוכלוסיותיהם, צריכות לעבור כמה עשרות שנים (Williams et al., 2019).

3. דוגמה להיווצרות תנאי סף ונקודות מפנה אפשר למצוא בפריחה עונתית של אצות באוקיינוס, שבה נוצרים גלים של שגשוג מיני אצות שונים וקריסתם בשל שינוי תנאי הסביבה על ידי המינים בגל הקודם.
4. Chronological sequences.
5. Tolerance Theory.

בתי הגידול שהיו מכוסים בקרחון במשך עשרות אלפי שנים, פנויים לאכלוס של אורגניזמים חדשים וליצירת מערכת אקולוגית חדשה

דוגמה נוספת היא יכולתם של אורגניזמים מסוימים לקיים חיים בטווח רחב יותר של תנאים א-ביוטיים, כמו טמפרטורות. אורגניזמים שיש להם יכולת הסתגלות לטווח רחב יותר של טמפרטורות יאכלסו ראשונים שטחים שהתפנו, ותהיה להם עדיפות על פני אורגניזמים הרגישים לטמפרטורות ואשר מקיימים חיים בטווח טמפרטורות צר יותר.

מחזור החיים של האורגניזמים, כלומר, משך הזמן החולף לדוגמה מהמלטה לבגרות מינית, או מנביטה ועד לצמח מניב זרעים, משפיע אף הוא על הדינמיקה של המעקובת. כך, למשל, העמדת צאצאים של אורגניזמים שמחזור חייהם ארוך תתרחש לאורך זמן רב יותר ותרחיק את התבססות האוכלוסייה בבית הגידול לשלבים מאוחרים יותר.

אורגניזמים משנים סביבה: עקרון ההסללה ועקרון העיכוב

כך או אחרת, אורגניזמים המגיעים לאזור הפנוי לאכלוס, ומתבססים בו, יוצרים שינויים בתנאי הסביבה, וכך סוללים את דרכם של מינים אחרים להתבססות במערכת האקולוגית, שבעבורם התנאים החדשים שנוצרו מיטביים. עיקרון זה מכונה עקרון ההסללה[6] (Connell & Slatyer, 1977). אחד הביטויים האופייניים של עיקרון זה בתהליכי מעקובת של נסיגת קרחונים הוא שלאורך רצפים כרונולוגיים שונים, האורגניזמים המאכלסים את הקרקע של אזור נסיגת הקרחון משנים את תכונותיה, ואלה משפיעות על המשך היווצרות המערכת האקולוגית: בשלבים הראשונים של הנסיגה, הקרקע הנחשפת אינה יציבה, ועלול להיווצר סחף, במיוחד במדרונות הרריים (Erschbamer et al., 2008). קרקע כזאת מתאימה בעיקר לנביטה של עשבים, בעוד שזרעים של שיחים מתקשים להיאחז בה ולנבוט. עם הזמן, לאחר שהשטח אוכלס במינים החלוצים, ההיאחזות של עשבים במדרונות והשורשים שהם מצמיחים מייצבים את הקרקע, ובמקביל חלים הצטברות של חומר אורגני כתוצאה מהפרשות ותמותה, שינויים בחומציות הקרקע ועלייה בכמות החנקן (Khedim et al., 2021). כל אלה מאפשרים נביטה של זרעי שיחים ועצים והתבססות של חסרי חוליות החיים בקרקע וניזונים מרקב (Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019); שינויים בהרכב המיקרואורגניזמים החיים בקרקע והתבססות יחסי גומלין בינם לבין הצמחים (Khedim et al., 2021). כמו כן, מכיוון שמייד לאחר הנסיגה הקרקע ענייה בחנקן, יאכלסו בשלב זה את אזור הנסיגה מינים שיש להם יכולת לקבע חנקן אטמוספרי. עם הזמן, חנקן ייכלא יותר ויותר במערכת האקולוגית, תמותה של אורגניזמים תעשיר את הקרקע בחנקן, ותכשיר את התנאים להתבססותם של אורגניזמים שאינם מקבעים חנקן (Benavent-González et al., 2019).

מנגד, אורגניזמים מסוימים יכולים ליצור תנאים המגבילים את הצטרפותם של מינים אחרים, בעיקרון המכונה עקרון העיכוב. עיכוב יכול להיות ישיר, למשל באמצעות טריפה, או עקיף, למשל באמצעות תחרות על משאבים. דוגמה לעיכוב עקיף היא התבססות של שיחים ועצים המגבילים את כמות האור ומעכבים את הצטרפותם של מיני צמחים נמוכים הזקוקים לאור רב (Chapin et al., 1994).

זמינות המשאבים: דינמיקה מורכבת של תחרות

תחרות על משאבים נחשבת לאחד הגורמים החשובים המניעים שינויים של תהליכי מעקובת, והיא מיוחסת לרוב לתהליכים של החלפה (Connell & Slatyer, 1977). לדוגמה, צמחים כמו עשבים, שהם מהירי צימוח, צורכים אור רב ובעלי תפוצת זרעים רחבה, מאכלסים ראשונים את האזור הפנוי. עם הגעתם של שיחים לאזור והתבססותם, נוצרים אזורי הצללה, ההופכים את האור למשאב זמין פחות בעבור העשבים, ובתנאים אלה האור הוא משאב מגביל ומושא לתחרות. זאת אחת הסיבות לכך שעם הזמן יתמעטו העשבים, וחברות שיחים ילכו ויתבססו באזור.

השפעת התחרות על תהליכי מעקובת היא מורכבת. העובדה שחסרי חוליות מאכלסים את אזור הנסיגה, בתהליך של התווספות מינים, מעידה על כך שגם תכונות האורגניזמים עצמם והסבילות שלהם לטווח תנאים רחב או צר הם גורמים מניעים חשובים, לעיתים אף יותר מתחרות (Gobbi et al., 2017). יתרה מזו, אותם מינים יכולים להפגין בשלב מסוים של המעקובת תופעה של הסללה, ובשלבים אחרים - תחרות. לדוגמה, עצים ממשפחת השדריים (Betulaceae), המקבעים חנקן ומעשירים בו את הקרקע באזורי נסיגת קרחונים, מאפשרים כך את צמיחתם של צמחים מהסוג אשוחית (Picea) בשלבים מוקדמים של האכלוס; אולם לאחר עשרות שנים השדריים מעכבים את צמיחת האשוחיות, כנראה משום שנוף העץ המלא שלהם כבר מסתיר את האור (Chapin et al., 2016).

הפרדוקס של אכלוס ללא צמחים

בשל חשיבותם של אורגניזמים יצרניים למערכת האקולוגית, אפשר היה לשער שתהליכי ההתבססות הראשונים של אורגניזמים חלוצים באזור הקרחון הנסוג תלויים בנוכחותם של צמחים ויצורים המבצעים פוטוסינתזה. ואכן, הגעתם של מיני הצמחים הראשונים לאזור סוללת את הדרך לאורגניזמים אחרים (Schmidt et al., 2014). למרות זאת, באופן מפתיע, לא כל האורגניזמים תלויים בהתבססותה של חברת צמחים (Hågvar et al., 2020): עכבישים, חרקים טורפים, נמטודות (תולעים) הניזונות מחיידקים וחסרי חוליות אוכלי רקב מאכלסים את הקרקע הנחשפת עוד לפני שצמחים מגיעים אליה. אחת ההשערות היא שבתחילת נסיגת הקרחון הקרקע עשירה בחומרים אורגניים מהסחף הנוצר עם הנסיגה. מכיוון שאין די נתונים לאשר את ההשערה, וכמו כן קיימות עדויות ליחסי גומלין מורכבים בין הטורפים השונים - עדיין אין פתרון לפרדוקס.

6. Facilitation Model.

ניבוי תהליכי המעקובת

יחד עם פירוק הגורמים המשפיעים על רצף התהליכים המתרחשים במעקובת, יש ניסיון לאחד אותם לתיאוריות המנבאות את השינויים הצפויים להתרחש תוך כדי התבססות המערכת האקולוגית.

אחת התיאוריות הללו מפרטת את השינויים הצפויים בשישה מאפיינים של מערכות אקולוגיות (Odum, 1969; איור 2). הרעיון המרכזי של התיאוריה הוא שלמעקובת יש מסלול צפוי מראש, משום שחברות של אורגניזמים משנות את הסביבה כך שנוצרת מערכת אקולוגית יציבה, בעלת ייצור ביומאסה מרבי בתנאים הקיימים, הנמצאת בהומיאוסטזיס מול הסביבה. השינויים שמציעה התיאוריה בששת הרכיבים של המערכת האקולוגית המתבססת מובאים להלן. הם אומנם נכתבו כעובדה מוגמרת, אולם כל רכיב נתון לבדיקה ומצריך אימות עם נתונים במציאות.

1. מעברי אנרגיה

בתהליכי מעקובת אפשר לצפות שעם הזמן, בעיקר בגלל שכמות הצמחייה הולכת וגדלה, תחול עלייה בביומאסה הנוצרת על ידי המערכת. בהמשך, בגלל שתהליכי נשימה שבעזרתם נשמרת הביומאסה הולכים ומתגברים, מגיעה המערכת לשיא של מאזן אנרגטי, שמצד אחד מאפשר בנייה של האורגניזמים ומצד שני מאפשר את תחזוקתם. מארג המזון מתחיל בשרשרת פשוטה יחסית של עשב, אוכלי עשב וטורפים, אך בשל החלפת העשבים בשיחים ובעצים, והצטרפותם של אוכלי רקב, נוצר מארג מזון יותר ויותר סבוך. כמו כן, בשל העלייה בכמות הצמחייה חלה עלייה בקיבוע של פחמן דו-חמצני ושל חנקן, הנכלאים בתוך הביומאסה.

2. מבנה החברות

מערכת אקולוגית עשירה ומבוססת מתאפיינת בין השאר בעושר מינים גדול (כמות גדולה או מרבית של מיני אורגניזמים המרכיבים את המערכת) ובדמיון בשכיחות המינים השונים (כלומר, שרוב המינים המרכיבים את המערכת אינם נדירים או נפוצים במיוחד). בתהליכי מעקובת, עושר המינים הולך ועולה, מפני שעם הזמן מגיעים עוד ועוד מינים חדשים. בתחילה שכיחות המינים אינה שווה, שכן המינים החלוצים הם הנפוצים יותר במערכת. אולם, ככל שעובר הזמן הם נדחקים על ידי מינים אחרים, והירידה בתפוצתם תורמת לירידה בהבדלים בשכיחותם של מינים שונים במערכת.

> אורגניזמים המגיעים לאזור הפנוי לאכלוס, ומתבססים בו, יוצרים שינויים בתנאי הסביבה, וכך סוללים את דרכם של מינים אחרים להתבססות במערכת האקולוגית

3. מחזורי נוטריינטים

בשלבים הראשונים, המעבר של נוטריינטים מהאדמה לביומאסה הוא מהיר, בשל תכונות הצמיחה המהירות של מיני הצמחים החלוצים, אך עם תחלופת הצמחייה הוא מאט. בתחילה נוטריינטים יכולים להיות מוסעים מחוץ לאזור, שכן שורשי הצמחים החלוצים הם שטוחים ומעטים יחסית. עם החלפתם בצמחיית שיחים ועצים, נכלאים יותר ויותר נוטריינטים באדמה שבין השורשים העבותים. כמו כן, ככל שהביומאסה גדלה, כך תהליכי פירוק הופכים לדומיננטיים יותר במִחזור נוטריינטים בתוך המערכת האקולוגית.

4. מחזורי חיים

המינים החלוצים מתאפיינים במחזורי חיים מהירים, ובניצול מגוון רחב של נישות אקולוגיות, משום שאלה התכונות המאפשרות להם להגיע ראשונים לאזור שהתפנה ולאכלס אותו. עם הזמן, כאשר עוד ועוד מינים מצליחים להגיע, הם מתאפיינים במחזורי חיים ארוכים יותר, וגם הנישות האקולוגיות שהם מאכלסים הן צרות יותר.

5. לחצי ברירה טבעית

בשלבים מוקדמים של אכלוס, כמותם של חלק מהמשאבים גדולה יחסית, ולחצי הברירה פועלים לטובת אסטרטגיית הִתרבות מהירה, ריבוי צאצאים, טיפול הורי מועט וסיכויי הישרדות נמוכים של כל צאצא (אסטרטגיית R). בשלבי מעקובת מאוחרים יותר, כמות המשאבים מתמעטת ונתונה לתחרות, כך שלחצי הברירה הטבעית הם לטובת צימוח וגדילה איטיים יותר, מיעוט צאצאים וטיפול הורי צמוד, והגדלת סיכויי ההישרדות של כל צאצא (אסטרטגיית K).

6. שמירה על יציבות

במערכות אקולוגיות קיימים תהליכים השומרים על יציבותן. יחסי גומלין של סימביוזה הולכים ומתבססים עם התקדמות תהליכי המעקובת. אלה יוצרים בקרה על תהליכים ביולוגיים ומובילים ליציבות ולחוסן - המאפשרים למערכת לשמור על עצמה במקרה של הפרעה חדשה.

חיידקים ונגיפים שקפאו בזמן

בשנת 2016 חלה התפרצות של מחלת האנטרקס בסיביר, שבעקבותיה מתו מהמחלה אלפי איילים ואדם אחד. ההתפרצות הקשה יוחסה להפשרת משטחי הקרח בסיביר בעקבות שינוי האקלים, ולשחרור של נבגים של חיידק הקרקע בצילוס אנטרקס (Bacillus anthrax) מהקרח הנמס. הנבגים של החיידק ידועים בעמידותם בתנאים קשים, כולל בהקפאה, וביכולתם להתאושש ולהתרבות (Ezhova, 2021).

הקרחונים ומשטחי הקרח שעל פני כדור הארץ הם מאגר עצום של נגיפים וחיידקים שקפאו בתוכם במשך מאות ואלפי שנים. הפשרתם כתוצאה משינוי האקלים עלולה לשחרר את האורגניזמים והנגיפים שקפאו איתם, וביניהם עלולים להימצא גם וירוסים וחיידקים מחוללי מחלות (Stella et al., 2020). מי הקרחונים והקרח הנמסים מגיעים לים ולאגמים ונהרות, וכך גם למקורות מי השתייה, ולכן מוסיפים דאגה להשפעות ההולכות ומצטברות של שינוי האקלים.

מעברי אנרגיה
- מעבר משרשרת מזון ליניארית למארג מזון
- עלייה בביומאסה מעל הקרקע
- עלייה בייצור ראשוני (פוטוסינתזה)
- עלייה במאגרי פחמן וחנקן בתוך הביומאסה

שמירה על יציבות
- עלייה ביחסי גומלין מסוג סימביוזה
- עלייה בחוסן של המערכת האקולוגית

מחזורי נוטריינטים
- עלייה במחזורי נוטריינטים הסגורים בתוך המערכת האקולוגית
- עלייה בצריכת הנוטריינטים
- מעבר מניצול מינרלים בקרקע ובמים למחזור נורטיינטים באמצעות פירוק אורגניזמים

לחצי ברירה טבעית
- מעבר מאסטרטגיות רבייה מהירות עם צאצאים רבים ללא טיפול (R) לאסטרטגיות רבייה איטיות עם צאצאים מעטים וטיפול מסור (K).

מבנה החברות
- עלייה בעושר המינים
- דמיון רב יותר בשכיחות המינים (פחות מינים נדירים או שכיחים במיוחד)

מחזור חיים
- עלייה במשך מחזור החיים
- אכלוס נישות אקולוגיות צרות יותר

איור 2: שינויים במאפייני המערכת האקולוגית עם התקדמות תהליכי המעקבת (Odum, 1969)

גישות מחקר של תהליכי מעקבת: הרכב טקסונומי מול תכונות ותפקוד

כדי לתקף את התיאוריות המוצעות לתהליכי מעקבת במערכת האקולוגית המשתנה ולמנגנונים המניעים את התייצבותה, יש צורך לבצע מחקרים. תיעוד של תהליכי מעקבת טבעיים יכול להתבצע ברמה הטקסונומית או התפקודית. בגישת מחקר על פי הרמה הטקסונומית, מדענים שואלים אילו אורגניזמים מאכלסים את בית הגידול, מהו הרכב המינים בחברה באזור מסוים וכיצד הוא משתנה לאורך זמן. כך למשל, תופעת ההחלפה מיוחסת למצב של חברה שבה קיים מין או מספר מצומצם של מינים דומיננטיים יותר בהשוואה למינים אחרים, המתחלפת בחברה שבה שולטים מינים אחרים.

נוסף על ניתוח שינויים והבדלים אקולוגיים ברמת הרכב המינים, אפשר לחקור שינויים המתרחשים ברמת התפקודים הקיימים במערכת (Cyrille et al., 2007). בגישת מחקר כזאת, מדענים שואלים אילו תהליכים מבצעים אותם אורגניזמים הקיימים במערכת, וכיצד תכונה זו או אחרת משתנה בתגובה לסביבה. גישה זאת מבוססת על התובנה שלפיה מערכת אקולוגית מושפעת מהתכונות הפיזיולוגיות והמטבוליות של כלל חבריה (לדוגמה, מהיכולת של כלל האורגניזמים המרכיבים אותה לקבע חנקן או לבצע פוטוסינתזה), ולא מיכולתם של מיני אורגניזמים ייחודיים בלבד. השילוב של טקסונומיה ותכונות פונקציונאליות נותן תמונה ברורה ומלאה יותר על האקולוגיה של המעקבת.

ברמה הפיזיולוגית, אנליזה של תכונות בחברת אורגניזמים יכולה להתייחס לקצב הגידול או הצימוח, ליכולת תפוצה ולתחרות, כך שאפשר לזהות אילו תהליכים חשובים לשלבי מעקבת שונים. ברמה המטבולית אפשר להשתמש בשיטות אנליטיות ומולקולריות שונות, הנותנות מידע על ביטוי גנים ברמת ה-RNA או החלבון. שיטות אלו, ובמיוחד שילוב שלהן, מסייע לכמת את רמת קיבוע הפחמן באמצעות פוטוסינתזה, ניצול הנוטריינטים במערכת, או ייצור מטבוליטים שונים בעלי חשיבות אקולוגית. לדוגמה, קיבוע חנקן הוא תכונה משותפת לצמחים, כמו עץ האדר, ולמיקרואורגניזמים, כמו פטריות מסוימות, ואפשר לבדוק את השינויים ביכולת לקבע חנקן בקרב כלל האורגניזמים במערכת האקולוגית במהלך המעקבת. נוסף על כך, אפשר להשוות קיבוע חנקן בין חברות שונות המתקיימות בבתי גידול שונים, לדוגמה, בגבהים שונים מעל פני הים או באזורים עם זיהום ובלעדיו.

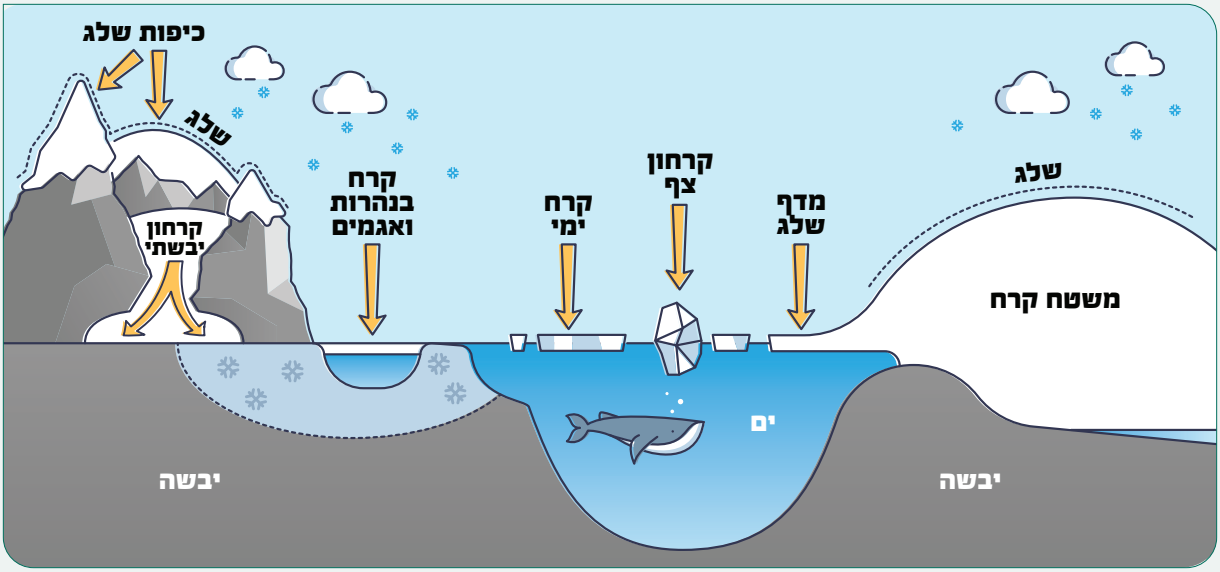
מעקב אחר תכונות מאפשר לבצע ניסויים מורכבים שבהם נבדקת השפעתם של כמה גורמים על מכלול הרמות הטרופיות במארג המזון, כולל מיקרואורגניזמים (Rillig et al., 2019). נוסף על כך, מחקר ברמת התכונות מאפשר לזהות באיזה רצף כרונולוגי של המעקבת נמצאת חברת אורגניזמים מסוימת על פי אנליזה של תפוצת התכונות הללו במערכת האקולוגית המתפתחת, ולנבא את יציבותה לאורך זמן או כיצד היא תמשיך להתפתח (Ricotta et al., 2020).

התופעות הנצפות בשטח, התיאוריות והמנגנונים המוצעים יחד עם גישות המחקר השונות - כל אלה מנסים לתאר ולהסביר תהליכי מעקבת, שבהם במקום שבו המערכת האקולוגית עברה הפרעה משמעותית ופגיעה קשה, הולכת ונבנית, לאורך שנים, מערכת אקולוגית חדשה, שלבסוף מתייצבת.

קריוספרה: ספרת הקרח

קריוספרה היא שם כולל לכל החלקים על פני כדור הארץ שהטמפרטורה השוררת בהם כל השנה או חלק ממנה היא מתחת ל-0ºC ולכן הם מכוסים במים במצב מוצק, כלומר, קרח או שלג. חלק אחד של הקריוספרה הוא קרח ושלג הנמצאים על מים, ואלה כוללים קרחונים בים, קרח ימי, אגמים ונהרות קפואים, וכן מדפי שלג (שלג הגולש מהיבשה אל הים). חלק אחר של הקריוספרה הוא מים קפואים ביבשה, הכוללים קרחונים על פני היבשה, משטחי קרח, כיפות שלג על הרים, והאדמה הקפואה שתחתם. סביבות אלה מתאפיינות בטמפרטורות נמוכות באופן קיצוני, קרינת UV חזקה, מיעוט נוטריינטים באדמה ותנועה איטית של מים.

משטחי שלג וקרח מחזירים לחלל את קרינת השמש הפוגעת בהם, וכך הקריוספרה תורמת לשמירה על טמפרטורת כדור הארץ. להפשרת משטחי קרח ושלג בשל ההתחממות הגלובלית יש אם כך השפעה לא רק על מפלס מי הים ועל הצפות, אלא גם על עליית הטמפרטורות עצמה, שכן קרינה רבה יותר נשארת כלואה באטמוספרה של כדור הארץ.



מקורות

Benavent-González, A., et al. (2019): "High nitrogen contribution by Gunnera magellanica and 606 nitrogen transfer by mycorrhizas drive an extraordinarily fast primary succession in sub-607 Antarctic Chile". **New Phytologist** 223: pp. 661-674.

Chapin, F.S., et al. (1994): "Mechanisms of primary 637 succession following deglaciation at Glacier Bay, Alaska". **Ecological Monographs** 638 64: pp. 149-175.

Chapin, F.S., et al. (2016): "Absence of net long-term successional facilitation by alder in a boreal Alaska floodplain". **Ecology** 97: pp. 2986-2997.

Cauvy-Fraunié, S. & Dangles, O. (2019): "A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat". **Nature Ecology & Evolution** 3(12), pp. 1675-1685.

Clements, F.E. (1916): Plant succession: an analysis of the development of vegetation. Carnegie Institution of Washington.

Connell, S.H. & Slatyer, R.O. (1977): "Mechanisms of Succession in Natural Communities and Their Role in Community Stability and Organization". **The American Naturalist** 111: pp. 1119-1144.

Violle, C., et al. (2007): "Let the concept of trait be functional!" **Oikos** 116: pp. 882_892. https://nsojournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x

Delgado-Baquerizo, M. et al. (2019): "Changes in belowground biodiversity during ecosystem development". **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 116: p. 6891.

Edwards, A. & Cook, S. (2015): "Microbial dynamics in glacier forefield soils show succession is not just skin deep". **Molecular Ecology** 24: pp. 963-966.

Erschbamer, B., et al. (2008): "Colonization processes on a central Alpine glacier foreland". **Journal of Vegetation Science** 19: pp. 855-862.

Ezhova, E., et al. (2021): "Climatic Factors Influencing the Anthrax Outbreak of 2016 in Siberia, Russia". **Ecohealth** 18(2): pp. 217-228. doi: 10.1007/s10393-021-01549-5.

Gobbi, M., et al. (2007): "Environmental features influencing Carabid beetle (Coleoptera) assemblages along a recently deglaciated area in the Alpine region". **Ecological Entomology** 32: pp. 682-689.

Gobbi, M., et al. (2017): "Life in harsh environments: carabid and spider trait types and functional diversity on a debris-covered glacier and along its foreland". **Ecological Entomology** 42: pp. 838-848.

Hagvar, S. et al. (2020): "Ecosystem birth near melting glaciers: a review on the pioneer role of ground-dwelling arthropods". **Insects** 11: p. 644.

Hotaling, S., et al. (2017): "Microbial ecology of mountain glacier ecosystems: biodiversity, ecological connections and implications of a warming climate". **Environmental Microbiology** 19: pp. 2935-2948.

Johnson, E.A. & Miyanishi, K. (2008): "Testing the assumptions of chronosequences in succession". **Ecology Letters** 11: pp. 419-431.

Khedim, N., et al. (2021): "Topsoil organic matter build-up in glacier forelands around the world". **Global Change Biology** 27: pp. 1662-1677.

Odum, E.P. (1969): "The strategy of ecosystem development: an understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature". **Science** 164: pp. 262-270.

Pistone, K., et al. (2014): "Observational determination of albedo decrease caused by vanishing arctic sea ice". **Proceedings National Academy of Science** 111 (9): pp. 3322-3326.

Ricotta, C., et al.(2020): "From abundance-based to functional-based indicator species". **Ecological Indicators** 118: p. 106761.

Rillig, M.C., et al. (2019): "The role of multiple global change factors in driving soil 842 functions and microbial biodiversity". **Science** 366: p. 886.

Rime, T., et al. (2016): "Potential sources of microbial colonizers in an initial soil ecosystem after retreat of an alpine glacier". **The ISME journal** 10: pp. 1625-1641.

Schmidt, S.K., et al. (2014): "Do bacterial and fungal communities assemble differently during primary succession?" **Molecular Ecology** 23: pp. 254-258.

Sommer, C., et al. (2020): "Rapid glacier retreat and down-wasting throughout the European Alps in the early 21st century". **Nature Communications** 11: p. 3209.

Stella, E., et al. (2020): "Permafrost dynamics and the risk of anthrax transmission: a modelling study". **Sci Rep** 10: p. 16460. https://doi.org/10.1038/s41598-020-72440-6

Taherkhani, M., et al. (2020): "Sea-level rise exponentially increases coastal flood frequency". **Sci Rep** 10: p. 6466. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62188-4.

Vater, A.E. & Matthews, J.A. (2015): "Succession of pitfall-trapped insects and arachnids on eight Norwegian glacier forelands along an altitudinal gradient: Patterns and models". **The Holocene** 25(1): pp. 108-129.

Williams, P.J., et al. (2019): "The rise of an apex predator following deglaciation". **Diversity and Distributions** 25: pp. 895-908.

ביולוגיה של חוסן

מעובד על פי המאמרים[1]:

Feldman, R. (2020): "What is resilience: an affiliative neuroscience approach". **World Psychiatry** 19: pp. 132–150.

Troy, A.S., Willroth, E.C., Shallcross, A.J., Giuliani, N.R., Gross, J.J. & Mauss, I.B. (2023): "Psychological resilience: an affect-regulation framework". **Annual review of psychology** 74(1): pp. 547-576.

אנשים המסוגלים לעמוד בפני קשיי החיים, ועדיין לשמור על בריאות פיזית ונפשית ועל אופטימיות, מפגינים חוסן. מיותר להסביר עד כמה חקר של נושא כמו חוסן הוא חשוב ויכול לסייע בטיפול במצבים של היעדר חוסן של הפרט או של קהילות, כולל מצבים פתולוגיים, ואולי אף למנוע אותם. אולם סקירת ספרות בנושא מעלה שאלות רבות הקשורות לעצם תפיסתנו את המושג חוסן – החל בהגדרה, דרך נקודות המבט המובילות לגישות המחקר השונות, וכלה במודלים המוצעים שאמורים להציע הסברים אפשריים ולהוביל למחקרים נוספים (Troy et al., 2023).

לאור זאת, המאמר נפתח דווקא בסקירה של ההתלבטויות והשאלות הקשורות למושג חוסן, שהן חשובות במיוחד בבואנו לחקור את התופעה ולהציע ניסויים, מודלים והסברים. בהמשך המאמר מוצג מודל מעניין המתייחס להיבטים פיזיולוגיים, נוירוביולוגיים וחברתיים של חוסן, ומוצעים מנגנונים העשויים להסביר כיצד חוסן מתפתח.

מהו חוסן?

באופן מסורתי, חוסן הוגדר כיכולת לתחזק את הגוף (של פרט, או של קהילה), לתפקד ולהתאושש, למרות התמודדות עם מצוקה מתמשכת או אירוע טראומתי (Kalisch et al., 2017). הגדרה זאת קושרת בין חוסן לבין מצבי עקה (Stress), כך שפועל יוצא ממנה הוא שחוסן מתבטא רק לאחר חוויה של מצוקה כלשהי. ההצמדה בין חוסן לבין חוויית מצוקה גרמה בין השאר לכך שרוב המחקרים הנוירוביולוגיים בנושא חוסן והממצאים שהתקבלו מהם עוסקים בניהול תגובת פחד ובהתפתחות תסמינים של מחלות שונות, כולל מחלות נפש (Feder et al., 2009).

האם יש לראות חוסן אך ורק בצמידות למצוקה? לא בהכרח. יש הרואים בחוסן תכונה יציבה, יחסית, הקיימת מראש, גם בהיעדר מצוקה ממשית (Block & Kremen, 1996), ומגדירים אותה כהתאמה לשינוי. על פי תפיסה זאת, חוסן מעודד תהליכים של חוזק וכושר עמידה, ולכן יש לחקור אותו בהקשר חיובי, ולנתק אותו מחוויות שליליות כמו טראומה (Holz et al., 2020). כאשר מנסים לחקור תופעות של חוסן בהקשר חיובי, רצוי להתייחס מצד אחד ליכולות המורכבות של המוח האנושי ומצד שני לממצאים ניורוביולוגיים המאפשרים לגלות ולתאר תהליכי חוסן בקרב קבוצות טקסונומיות שונות של אורגניזמים ובהיבטים אבולוציוניים (Blass & Carmeli, 2007).

האם חוסן הוא תוצאה או תהליך?

חוסן יכול להיות תהליך או סדרת תהליכים שבהם חל גיוס של משאבים ויכולות המאפשרים להתמודד עם הדרישות הקשות ולעיתים אף מתמשכות של מצבי מצוקה. משאבים כאלה יכולים להיות עזרה הדדית, התנהגויות מסוימות או תהליכים קוגניטיביים (Schetter & Dolbier, 2011). לעומת זאת, אפשר לראות בחוסן תוצאה, כמו תפקוד מתאים אל מול מצב של מצוקה (Hall & Zautra, 2010). תפקוד מתאים יכול להיחשב, לדוגמה, ברמת הפרט, כרווחה ותחושה טובה, היעדר תסמינים נפשיים או הופעה של מעט תסמינים כאלה, הישגים אקדמיים או מקצועיים, או מעבר בין שלבים התפתחותיים וגדילה. ברמת הקהילה, אלה יכולים להיות, לדוגמה, חינוך ומוסדות הדואגים לרווחת הפרט.

מהי מצוקה?

אם ההנחה היא שחוסן מתבטא רק לאחר חוויית מצוקה, יש להגדיר מהי בדיוק: האם מצוקה היא מושג אובייקטיבי, כלומר, מצב מסוים שבו כל אחד יכול לחוש מצוקה, כמו עוני או שכול (Masten & Motti-Stefanidi, 2020); או שאולי מצוקה נתונה להגדרה סובייקטיבית, שלפיה, פרט יתפוס אירוע מסוים, לדוגמה מפגש חברתי, כאירוע הגורם למצוקה, ואילו פרט אחר לא יראה בו מצוקה כלל (Epel et al., 2018). נוסף על כך, יש להבין כיצד החוסן מושפע מממדים שונים של מצוקה, כמו אם היא חד-פעמית או מתמשכת, עד כמה אפשר לשלוט במצב, או מתי היא מתרחשת; וכן כיצד חוסן מושפע מסוגים שונים של מצוקות, כמו שְׁכוֹל לעומת עוני.

כיצד קובעים שקיים חוסן?

אפשרות אחת היא לקבוע ערך סף מסוים, שמעליו האדם נחשב לבעל חוסן, ומתחתיו – לחסר חוסן, כפי שקובעים באבחון של פוסט-טראומה (Waugh et al., 2008). אפשרות אחרת היא לבדוק את מידת החוסן באופן יחסי: לדוגמה, בהשוואה לאחרים החווים אירוע או מצוקה זהים, בהשוואה למי שלא חווה אותם, או בהשוואה לעצמי (Hiebel et al., 2021). ערכי חוסן יכולים להיות בדידים, כלומר, יש חוסן או אין חוסן; או רציפים ובעלי ערכי ביניים.

מתי נוצר חוסן?

לזמן יש ללא ספק השפעה על החוסן. אם חוסן נתפס כתגובה מיידית לאירוע מצוקה, הוא אמור להיווצר תוך כדי האירוע או סמוך לו, ובנקודות זמן אלה יש גם למדוד אותו (Kimhi et

1 הגרסה המובאת כאן היא סקירה של תוכני המאמרים המקוריים, ונועדה להנגיש את המידע לציבור המורים לביולוגיה ולמדעי הסביבה. העיבוד כלל הוספת הסברים ואיורים לתכנים מורכבים, סינון מידע שאינו נקשר לרעיון המרכזי של הגרסה המעובדת, הגדרת מונחים מקצועיים, ובמידת האפשר קישור הדברים לתהליכי למידה והוראה. המעוניינים לקרוא את המאמרים המקוריים מוזמנים לפנות למקור לפי הפרטים המופיעים בתחילת הגרסה המעובדת.

al., 2021). לעומת זאת, אפשר להתייחס לחוסן כאל תגובה מתמשכת, או תהליך, שיכול להתעצם או להיחלש עם הזמן החולף מחוויית המצוקה, ולכן יש לחזור ולמדוד אותו בכל פרק זמן מסוים ואפילו לאורך שנים (Infurna, 2020).

אם חוסן נתפס כתהליך של חיזוק וניהול משאבים חיובי, ללא קשר למצוקה בהכרח, קיים גם היבט התפתחותי: תינוקות נולדים למשפחות ולתרבויות שונות ומתפתחים לאנשים בוגרים המפגינים חוסן. יש הטוענים שכדי להבין כיצד חוסן נוצר ומתפתח, יש לעקוב אחר ילדים ולזהות תהליכים התנהגותיים, ביולוגיים וחברתיים המעודדים חוסן (Rutter, 2013).

מודל ביולוגי לחוסן: נוירוביולוגיה של שייכות

אחד המודלים המוצעים לתופעת החוסן הוא המודל הנוירוביולוגי של שייכות, המבוסס על כך שצאצאי יונקים נולדים עם מוח לא בשל, והתפתחותו תלויה בטיפול שההורים מעניקים ובאינטראקציה אינטימית ואינטנסיבית איתם (Feldman R., 2020). על פי המודל, תהליכים אלה – המניעים את התפתחות המוח ומכינים את הצאצאים להתמודד עם הקשיים המצפים להם בנישה האקולוגית שהם מאכלסים – הם למעשה הרכיבים של תופעת החוסן, ובהם יש למקד את המחקר.

הבחירה להציג במאמר זה דווקא את הנוירוביולוגיה של השייכות נשענת על כל אלה, ובמיוחד על העובדה שמודל זה אינו מצמיד את התפתחות החוסן לתגובת פחד או חרדה, ולכן הוא מאפשר לפתח גישות לחיזוק חוסן עוד לפני שמתרחש אירוע טראומטי או לפני שנחוצה התמודדות עם קשיים מתמשכים.

מאפייני חוסן על פי מודל השייכות

על פי המודל הנוירוביולוגי של שייכות (איור 1), קיימים שלושה מאפיינים עיקריים של חוסן:

גמישות: מאפשרת להגיב בכל רמת ארגון ביולוגית ולהתאים את עצמנו לשינוי בתנאים; שינוי שפעמים רבות הוא משמעותי ורב-ממדים. כמו כן, גמישות מאפשרת יצירת דפוסים פיזיולוגיים והתנהגותיים חדשים על פי רכיבי המציאות שהשתנו, וכיול מחדש של המערכת.

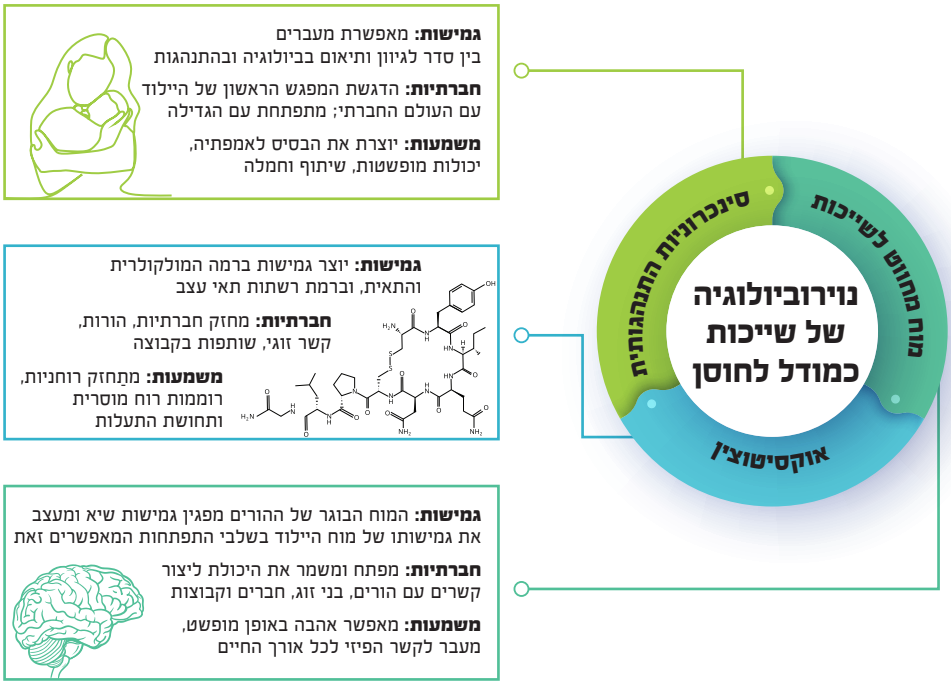
חברתיות: התפתחה במהלך האבולוציה ביצורים רבים הרחוקים זה מזה מבחינה טקסונומית. היכולת לשתף פעולה מעניקה לאורגניזמים יתרון ומעצימה את יכולותיהם. ביונקים, קשר חברתי מחזק ויסות של תגובת הדחק[2] מעניק הגנה ומחזק התנהגות שיתופית.

משמעות: על פי המודל, משמעות היא ייחודית לבני אדם, ומשרה חוזק בעמידה בפני טראומה, מעניקה מטרה לסבל, ומאפשרת להתעלות על סכנות בעת ביצוע מעשי נדיבות וחסד.

התפתחות מאפייני החוסן הללו מתבצעת על פי המודל באמצעות שלוש רמות ארגון עיקריות (ראה איור 1).

א. מערכת האוקסיטוצין

אוקסיטוצין הוא נוירופפטיד קטן שאורכו תשע חומצות אמיניות. הוא דומה מאוד לווזופרסין (בהבדל של חומצה אמינית יחידה), ובקרב יונקים מופרש מחלקה האחורי של יותרת המוח. עם הופעת אוקסיטוצין בקרב בעלי חיים לפני כ-500 מיליון שנים (איור 2), הוא היה מעורב בתהליכים הקשורים ישירות לעמידות בפני שינויים בתנאי הסביבה, כמו שמירה על מאזן המים בגוף ועל מאזן אנרגטי (Feldman et al., 2016). בהמשך האבולוציה,



איור 1: המודל לחוסן על פי הנוירוביולוגיה של שייכות

גויס אוקסיטוצין להשפעה על תהליכי רבייה ועל שלל התנהגויות חברתיות, ומאוחר יותר גם לתהליך הלידה וההנקה ביונקים. תהליך זה כולל עיכוב תהליכי דחק, כך שהאם תוכל להתפנות לטפל בצאצאים, או בחלק מהמינים אף שני ההורים. כתוצאה מכך, על פי המודל, בקרב יונקים נעשתה האינטראקציה בין האם לצאצאים זירה חשובה שבה מתרחשת ההכנה להתמודדות עם מצבי דחק בהמשך החיים, כלומר – להתפתחות של חוסן.

פעולת אוקסיטוצין תורמת להתפתחות חוסן באמצעות השפעה על גמישות מערכת העצבים[3]. תאי עצב המפרישים אוקסיטוצין לרוב מפרישים גם מגוון של מוליכים עצביים אחרים, והשילובים השונים תורמים לגמישות של מערכת העצבים באמצעות מגוון אפשרויות התגובה העצבית (Grinevich et al., 2016). לאוקסיטוצין מגוון השפעות על תאי עצב באזורים מגוונים במוח ואף על תאים אחרים בגוף. כמו כן, אוקסיטוצין גורם לתאים בהיפוקמפוס לקלוט יותר מידע תחושתי (סנסורי) ולהעבירו לאזורים אחרים במוח (Tirko et al., 2018).

אוקסיטוצין תורם לגמישות של מערכת העצבים גם באמצעות אינטראקציה בין המוח לסביבה, החשובה מאוד בתהליכים של חוסן. דוגמה לכך היא העובדה שלידה והנקה גורמות לפולסים של הפרשת אוקסיטוצין מיותרת המוח של האם, וכך, בין השאר, מתכונן גוף האם לטיפול ברך הנולד (Blyth et al., 2000). כמו כן, במהלך הלידה, הפרשת שיא של אוקסיטוצין מהאם גורמת

באופן מסורתי, חוסן הוגדר כיכולת לתחזק את הגוף, לתפקד ולהתאושש, למרות התמודדות עם מצוקה או אירוע טראומתי

לתאים מסוימים[4] במוח היילוד לשנות את תפקודם: מתאים המעוררים פעילות עצבית לפני הלידה לתאים המעכבים פעילות עצבית אחרי הלידה. שינוי זה תורם לוויסות פעולתם של תאי עצב, החיוני לאורך כל החיים (Bali & Kovacs, 2003).

פעולת אוקסיטוצין תורמת לחוסן גם באמצעות התפתחותם של דפוסים חברתיים. קליטת אוקסיטוצין ברשתות שונות של תאי עצב של הרך הנולד מעודדת רגישות ואבחנה בדפוסי התנהגות של האם (ושל האב, במינים שבהם הטיפול הוא של שני ההורים) ושל הסביבה; כמו כן היא מעודדת את ההעדפה של דפוסי ההתנהגות המגיעים מההורים המטפלים, שכתוצאה ממנה נוצר הקשר הייחודי ביניהם (Insel, 2010). הקשרים הקיימים במוח בין תאים המבטאים את הקולטנים לאוקסיטוצין מחד גיסא, לבין קבוצות של תאי עצב במוח הקשורות למערכת הגמול ולדופמין, לחוש הריח ולמסלולים תחושתיים מאידך גיסא – יוצרים בימים שלאחר הלידה הקשרים בין אוקסיטוצין לבין גירויים חברתיים מסוימים (Zheng et al., 2014). כל אלה יוצרים במוח תפיסה

איור 2: תפקודים המשויכים לאוקסיטוצין בקבוצות טקסונומיות שונות (על פי Feldman et al., 2016)

3 Neural plasticity

4 תאי עצב המפרישים את המוליך העצבי GABA.

חוסן יכול להיות תהליך גיוס של משאבים המאפשרים להתמודד עם הדרישות הקשות ולעיתים אף מתמשכות של מצבי מצוקה

חברתית, המורכבת מזיכרונות והעדפות המקושרים למושא הקשר – ההורים המטפלים. אוקסיטוצין מעורב גם בתהליכי השתייכות למעגלים חברתיים רחבים יותר, כמו השתייכות ללהקת ציפורים, לחברת מכרסמים או לחבורת שימפנזים (Insel & Young, 2001). כל אלה מצטרפים לממצא במחקרים רבים שלפיו תמיכה חברתית ותחושת שייכות הן גורמים משמעותיים בהתפתחות של חוסן (Scarf et al., 2016). נוסף על כך, טיפול הורי הוא בעל השפעה על קולטנים לאוקסיטוצין במוח הצאצאים (Feldman et al., 2013), ויכולתו ליצור תחושת ביטחון תוך כדי חוויית העולם שמסביב היא תנאי חשוב להתפתחות חוסן.

המישור השלישי הוא שלל ההשפעות שנמצאו לאוקסיטוצין על מערכת החיסון. בתרבית, אוקסיטוצין מעכב הפרשת IL-6 ממקרופאגים. כמו כן, בבדיקות דם של חולים שקיבלו אוקסיטוצין חלה ירידה בריכוזי IL-6 ו-TGFβ, שניהם מעוררי תגובה חיסונית (Clodi et al., 2008). בתהליכים של בניית קשרים בינאישיים, כמו בין הורים לתינוק שנולד או בין בני זוג מאוהבים, חלה עלייה בריכוז אוקסיטוצין ו-IL-6. נוסף על כך, אוקסיטוצין מזרז תהליכי החלמה של פצעים (Guin et al., 2010). מעניין לציין שבמיקרוביום של עכברים נמצא חיידק הגורם לעלייה בייצור אוקסיטוצין (Varian et al., 2017), המרמז על קשר אפשרי בין המיקרוביום לבין מוח המאחסן מבחינת תהליכי חוסן.

ב. מוח מחווט לשייכות

במוח האנושי קיימות קבוצות של תאי עצב שפעילותן מייצרת ובונה את הצורך ביצירת קשרים קרובים עם צאצאים, בני זוג, חברים וקהילות חברתיות שונות, ובמקביל ממתֶּנֶת את הרתיעה מהם. במחקרים על מכרסמים נמצא שהפרשת אוקסיטוצין במהלך ההיריון ובהמלטה משפיעה על אזור מסוים בהיפותלמוס המעודד את הנקבה לטפל בצאצאים שייוולדו ולדאוג לביטחונם, ועל אזורים אחרים במוח המעודדים גמול בעקבות גירויים מהצאצאים (Feldman et al., 2019). על גבי רשת תאי עצב זאת נוספו במוח האנושי תפקודים גבוהים יותר הקשורים לקליפת המוח[5], כמו אמפתיה, ויסות רגשי ויצירת מודלים מנטליים[6]. תפקודים גבוהים אלה יוצרים רשתות סבוכות של תאי עצב שרבים מהם מבטאים קולטנים לאוקסיטוצין (Sokolowski K, Corbin, 2012), ויחד הם מחזקים את תחושת השייכות (Feldman, 2015).

אחת הדוגמאות לוויסות רגשי היא תאי העצב באמיגדלה – חלק מהמערכת הלימבית המזוהה עם רגשות – ותגובתם לאוקסיטוצין: אוקסיטוצין גורם לירידה בעוצמת התגובה של תאי עצב באמיגדלה, ובכך ממתן רגשות שליליים בעקבות גירויים חברתיים (Gur et al., 2014) ומסייע להתמקד בגורם חברתי מסוים שיכול לסייע.

מסלול מעניין אחר העשוי להיות קשור לחוסן נמצא בקבוצת תאי עצב במוח המכונה גרעיני הבסיס[7]. אלה משויכים להכוונת פעילות מוטורית ממוקדת-מטרה וארגון סדר הפעולות המוטוריות הנדרש לשם כך. תאי העצב המרכיבים אותם מבטאים בו-זמנית קולטנים לאוקסיטוצין וקולטנים לדופמין. הקישור של דופמין לתאי עצב בגרעיני הבסיס מסיר תהליכים המעכבים פעילות עצבית, ויוצר חיזוק (גמול) לפעילות המוטורית, כך שהיא יוצאת אל הפועל באופן ממוקד ומתמיד (Grillner et al., 2005). במקביל, קישור אוקסיטוצין גורם לרגיעה הנחוצה לשם יצירת הקשר החברתי. פעילות משותפת כזאת יכולה להיות ביטוי לחוסן, שכן היא מעודדת פעולה ממוקדת-מטרה במצבים בעייתיים וחיפוש פעיל של קשרים חברתיים, בניגוד לחוסר אונים או אובדן עשתונות המתאפיינים בחוסר מיקוד.

מערכות עצבים מעין אלה אומנם נוצרו ביונקים כחלק מהקשר הורים-צאצאים, אולם הן מעודדות תחושת שייכות גם בהמשך החיים, בחיזוק קשר זוגי (Walum & Young, 2018) ובניהול קשר חברי קרוב (Feldman, 2017). פעילות מיטבית של מערכות אלה מאפשרת לשמר קשרים חברתיים לאורך זמן, לפתור בעיות באמצעות קשרים חברתיים; ובאמצעות שילוב בין פעולת אוקסיטוצין לפעולת דופמין – לחוש גמול עמוק ומשמעותי כתוצאה מקשרים חברתיים, בניגוד לגמול מגורמים לא חברתיים (כמו סמים).

ג. סינכרוניות ביו-התנהגותית

סינכרוניות ביו-התנהגותית מתארת את המנגנונים המאפשרים תיאום ביולוגי והתנהגותי בין שותפים לקשר חברתי. בתחילת החיים, אלה המנגנונים המאפשרים למוח הבוגר של ההורה לווסת ולכוון מבחוץ את המוח הלא-בשל של התינוק לחיים חברתיים (Feldman, 2012). המנגנונים הללו משלבים תהליכים ביולוגיים, חברתיים ומנטליים עם רגעים של התאמה חברתית (אמפתיה, שייכות) ורגעים של אי-התאמה כזאת (פיצוי, בדידות). ברגעים כאלה של סינכרוניות, מתרחשת התאמה בין פרמטרים ביולוגיים של האם והתינוק, כמו קצב פעימות הלב (Feldman et al., 2011a), הפרשת אוקסיטוצין (Feldman et al., 2011b), והפעלת אזורים במוח הקשורים להיבטים חברתיים (Levi et al., 2017). הקשר שנמצא בין סינכרוניות לבין התנהלות טובה יותר במצבי דחק (Halevi et al., 2017) תומך בכך שסינכרוניות משמשת מנגנון להקטנת תגובת לחץ ולהגברת חוסן. יש עדויות להתחלת הסינכרוניות עוד ברחם, ובחודשים הראשונים לחיי

יש הרואים בחוסן התאמה לשינוי הקיימת מראש, גם בהיעדר מצוקה ממשית

5 קורטקס.

6 הכוונה ליכולת לדמיין. לדוגמה: היכולת לדעת שהאם נמצאת בסביבה, גם אם הצאצא אינו רואה אותה לפניו.

7 הגרעינים הבזאליים; Basal Ganglia.

התינוק היא משמשת מנגנון לוויסות רגשות ולהתפתחות רשתות עצבים הקשורות לשייכות (Feldman, 2007).

עדויות תומכות

כל מודל נבדק מול המציאות באמצעות ניסויים ואיסוף נתונים. בחרנו להציג כאן רק חלק מהעדויות התומכות במודל, אלה הקשורות לפגים, המוחזקים באינקובטורים עד להבשלתם לקראת חיים בחוץ. מסיבות מובנות, המגע של עור בעור בין אם לרך נולד מוגבל מאוד במקרים כאלה.

במחקר שנערך לאורך שנים (Feldman, 2020) עקבו אחר קבוצה של אימהות והפגים שנולדו להן, כולם במשקל שאינו עולה על 1750 גרם. בעת השהות בפגייה, האימהות יצרו עם הפגים מגע עור בעור ("טיפול קנגורו") למשך שעה בכל יום למשך 14 ימים. אימהות אלה והפגים שלהן הושוו לאימהות ולפגים שקיבלו טיפול רגיל באינקובטור. התינוקות נבדקו כמה פעמים לאורך השנים: לפני הטיפול, עם השחרור מבית החולים, בגילים 3, 6, 12 ו-24 חודשים, בגיל 5 שנים ובגיל 10 שנים. במלאות להם 18-20 שנים, חזרו החוקרים לבקר אותם בביתם, צפו ביחסיהם עם האם, בדקו מצב הורמונלי ונתונים פיזיולוגיים, וכן ביצעו fMRI לבדיקת פעולתם של אזורים חברתיים במוח.

ממצאי המחקר העלו שתפקוד המערכת האוטונומית של תינוקות שטופלו במגע עור בעור של האם היו טובים יותר, ומחזורי השינה-עוררות שלהם היו מאורגנים יותר. גם האוריינטציה ועיבוד המידע היו טובים יותר. במקביל, גם הטיפול האימהי לתינוקות אלה בתקופה שלאחר הלידה היה טוב יותר (Feldman et al., 2002). גם בגילים מאוחרים יותר הראו התינוקות הללו התפתחות טובה יותר, לדוגמה, יותר ויסות עצמי ואיפוק בגיל שנה עד שנתיים (Feldman et al., 2002b). ההבדלים נצפו גם בגילים מאוחרים אף יותר (Feldman et al., 2014), כשהילדים שעברו טיפול קנגורו בינקותם הראו מדדים טובים יותר של שינה, הפרשת קורטיזול נמוכה יותר במצבי דחק, זיכרון עבודה טוב יותר וגמישות קוגניטיבית רבה יותר (ללא הבדל ב-IQ). בגיל הבגרות, המשיכו להימצא הבדלים, כששלושה אזורים מוחיים המזוהים עם יכולת לגלות אמפתיה לרגשות של האחר הראו פעילות שונה בקרב אלו שבינקותם קיבלו טיפול קנגורו לעומת אלו שלא קיבלו טיפול כזה (Mackes et al., 2018).

סיכום

אפשר לראות חוסן כתכונה מורכבת ההולכת ומתפתחת עם השנים, התלויה באינטראקציה בין ההורים המטפלים לבין הצאצא, במיוחד ביונקים. נוירוביולוגיה של שייכות היא שדה מחקר המתאר את ההיבטים העצביים, אנדוקריניים, גנטיים ומולקולריים של יכולתנו ליצור קשר חברתי, לאהוב, לדאוג ולטפל בזולת, לחוש אמפתיה ולהשתייך לקבוצה חברתית. המודל המוצע כאן לחוסן על פי נוירוביולוגיה של שייכות מתייחס לביולוגיה ולאבולוציה של חוסן בכמה רמות ארגון ביולוגיות, החל בהשפעת אוקסיטוצין, דרך היווצרות מערכות עצבים המחזקות שייכות, וכלה בסינכרוניות ביו-התנהגותית. בכל רמה מוצעים שלושה מנגנונים המפתחים חוסן לאורך זמן ומתארים מהו חוסן הלכה למעשה: גמישות, חברתיות ומשמעות; שלוש רמות הארגון ושלושת המנגנונים מצטרפים יחד למודל המנתק חוסן ממצוקה או טראומה, ומאפשר לפתח טיפולים המחזקים חוסן טרם הצורך להיעזר בו.

מקורות

Bali, B. & Kovacs, K.J. (2003): "GABAergic control of neuropeptide gene expression in parvocellular neurons of the hypothalamic paraventricular nucleus". **European Journal of Neuroscience 18**: pp. 1518-1526.

Blass, R.B. & Carmeli, Z. (2007): "The case against neuropsychoanalysis: on fallacies underlying psychoanalysis' latest scientific trend and its negative impact on psychoanalytic discourse". **International Journal of Psychoanalysis 88**: pp. 19-4.

Blyth, B.J., et al. (2000): "The neurosteroid allopregnanolone modulates oxytocin expression in the hypothalamic paraventricular nucleus". **American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology 278**: pp. R684-R691.

Block, J. & Kremen, A.M. (1996): "IQ and ego-resiliency: conceptual and empirical connections and separateness". **Journal of Personality and Social Psychology 70(2)**: pp. 349–361.

Clodi, M., et al. (2008): "Oxytocin alleviates the neuroendocrine and cytokine response to bacterial endotoxin in healthy men". **The American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism 295**: pp. E686-E691.

Epel, E.S., et al. (2018): "More than a feeling: a unified view of stress measurement for population science". **Frontiers in Neuroendocrinology 49**: pp. 146–169.

Feder, A., et al. (2009): "Psychobiology and molecular genetics of resilience". **Nature Reviews in Neuroscience 10**: pp. 446-457.

Feldman, R., et al. (2002a): "Comparison of skin-to-skin (kangaroo) and traditional care: parenting outcomes and preterm infant development". **Pediatrics 110**: pp. 16-26.

Feldman, R., et al. (2002b): "Skin-to-skin contact (kangaroo care) promotes self-regulation in premature infants: sleep-wake cyclicity, arousal modulation, and sustained exploration". **Developmental Psychology 38**: pp. 194-207.

Feldman R. (2007): Parent-infant synchrony and the construction of shared timing; physiological precursors, developmental outcomes, and risk conditions. **Journal of Child Psychology and Psychiatry Allied Discipline** 48:329-54.

Feldman, R., et al. (2011a): "Mother and infant coordinate heart rhythms through episodes of interaction synchrony". **Infant Behavior and Development 34**: pp. 569-577.

Feldman, R., et al. (2011b): "Maternal and paternal plasma, salivary, and urinary oxytocin and parent-infant synchrony: considering stress and affiliation components of human bonding". **Developmental Science 14**: pp. 752-761.

Feldman, R. (2012): “Parent-infant synchrony: a biobehavioral model of mutual influences in the formation of affiliative bonds”. **Monographs of the Society for Research in Child Development 77**: pp. 42-51.

Feldman, R., et al. (2013): “Parental oxytocin and early caregiving jointly shape children’s oxytocin response and social reciprocity”. **Neuropsychopharmacology 38**: pp. 1154-1162.

Feldman, R., et al. (2014): “Maternal-preterm skin-to-skin contact enhances child physiologic organization and cognitive control across the first 10 years of life”. **Biological Psychiatry 75**: pp. 56-64.

Feldman, R. (2015): “Sensitive periods in human social development: new insights from research on oxytocin, synchrony, and high-risk parenting”. **Development and Psychopathology 27**: pp. 369-395.

Feldman, R., et al (2016): “Pathway genes: evolutionary ancient system impacting on human affiliation, sociality, and psychopathology”. **Biological Psychiatry 79**: pp. 174-184.

Feldman, R. (2017): “The neurobiology of human attachments”. **Trends in Cognitive Sciences, 21**: pp. 80-99.

Feldman, R., et al. (2019): “The neural mechanisms and consequences of paternal caregiving”. **Nature Reviews in Neuroscience 20**: pp. 1-20.

Feldman, R. (2020): “What is resilience: an affiliative neuroscience approach”. **World Psychiatry 19**: pp. 132–150.

Grillner, S., et al. (2005): “Mechanisms for selection of basic motor programs – roles for the striatum and pallidum”. **Trends in Neuroscience 28**: pp. 364-370.

Grinevich, V., et al. (2016): “Assembling the puzzle: pathways of oxytocin signaling in the brain”. **Biological Psychiatry 79**: pp. 155-164.

Gur, R., et al. (2014): “Long-term social recognition memory is mediated by oxytocin-dependent synaptic plasticity in the medial amygdala”. **Biological Psychiatry 76**: pp. 377-386.

Halevi, G., et al. (2017): “The social transmission of risk: maternal stress physiology, synchronous parenting, and well-being mediate the effects of war exposure on child psychopathology”. **Journal of Abnormal Psychology 126**: pp. 1087-1103.

Hall, J.S. & Zautra, A.J. (2010): “Indicators of community resilience. What are they? Why bother?” In: **Handbook of Adult Resilience**, Reich, J.W., Zautra, A.J. & J.S. Hall, pp. 350–371. New York: Guilford.

Hiebel N, Rabe M, Maus K, Peusquens F, Radbruch L, Geiser F. (2021): “Resilience in adult health science revisited—a narrative review synthesis of process-oriented approaches.” **Frontiers in Psychology 12**:659395

Holz, N.E., et al. (2020): “Resilience and the brain: a key role for regulatory circuits linked to social stress and support”. **Molecular Psychiatry 25**: pp. 379-396.

Infurna, F.J. (2020): “What does resilience signify? An evaluation of concepts and directions for future research”. **Gerontology 66(4)**: pp. 323–331.

Insel, T.R. (2010): “The challenge of translation in social neuroscience: a review of oxytocin, vasopressin, and affiliative behavior”. **Neuron 65**: pp. 768-779.

Insel, T.R. & Young, L.J. (2001): “The neurobiology of attachment”. **Nature Reviews in Neuroscience 2**: pp. 129-136.

Kalisch, R., et al. (2017): “The resilience framework as a strategy to combat stress-related disorders”. **Nature Human Behaviour 1**: p. 784. doi:10.1038/s41562-017-0200-8.

Kimhi, S., et al. (2021): “Trajectories of depression and anxiety during COVID-19 associations with religion, income, and economic difficulties”. **Journal of Psychiatry Research 144**: pp. 389–396.

Levy, J., et al (2017): “Perception of social synchrony induces mother-child gamma coupling in the social brain”. **Social Cognitive and Affective Neuroscience 12**: pp. 1036-1046.

Mackes, N.K., et al. (2018): “Tracking emotions in the brain – revisiting the Empathic Accuracy Task”. **Neuroimage 178**: pp. 677-686.

Masten, A.S. & Motti-Stefanidi, F. (2020): “Multisystem resilience for children and youth in disaster: reflections in the context of COVID-19”. **Adversity and Resilience Science 1(2)**: pp. 95–106.

Rutter, M. (2013): “Annual research review: Resilience – clinical implications”. **Journal of Child Psychology and Psychiatry 54**: pp. 474-487.

Scarf, D., et al. (2016): “Somewhere I belong: long-term increases in adolescents’ resilience are predicted by perceived belonging to the in-group”. **The British Journal of Social Psychology 55**: pp. 588-599.

Schetter, C.D. & Dolbier, C. (2011): “Resilience in the context of chronic stress and health in adults”. **Social and Personality Psychology Compass 9(5)**: pp. 634–652.

Sokolowski, K. & Corbin, J.G. (2012): “Wired for behaviors: from development to function of innate limbic system circuitry”. **Frontiers in Molecular Neuroscience 5**: p. 55.

Tirko, N.N., et al. (2018): “Oxytocin transforms firing mode of CA2 hippocampal neurons”. **Neuron 100**: pp. 593-608.e3.

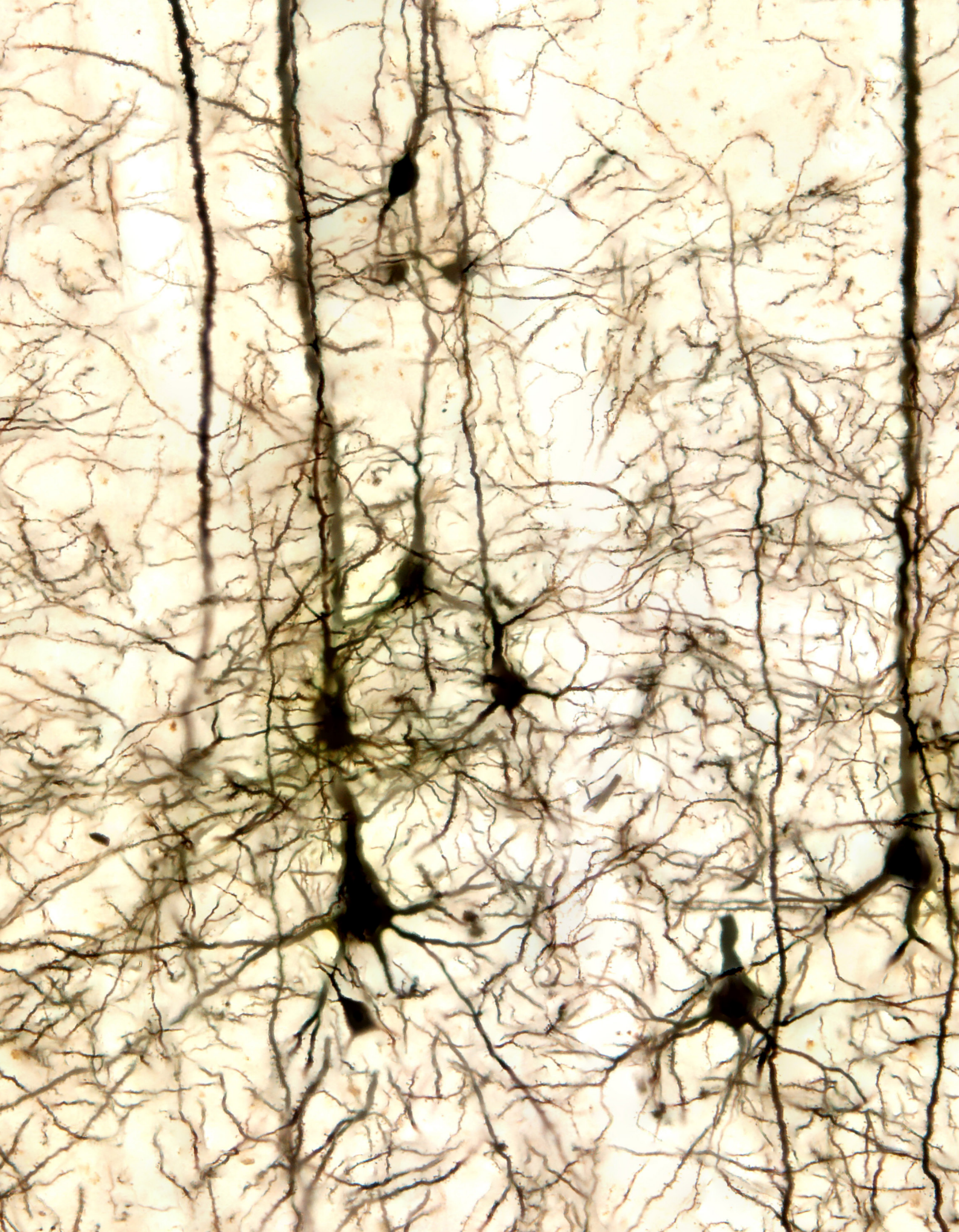
Troy, A.S., et al. (2023): “Psychological resilience: an affect-regulation framework”. **Annual review of psychology, 74(1)**: pp. 547-576.

Varian ,B.J ,.et al” :(2017) .Microbial lysate upregulates host oxytocin .“**Brain ,Behavior ,and Immunity61** : pp. 36-49.

Walum, H. & Young, L.J. (2018): “The neural mechanisms and circuitry of the pair bond”. **Nature Reviews Neuroscience 19**: pp. 643-654.

Waugh, C.E., et al. (2008): “Adapting to life’s slings and arrows: individual differences in resilience when recovering from an anticipated threat”. **The Journal of Research in Personality 42**: pp. 1031–1046.

Zheng, J-J., et al. (2014): “Oxytocin mediates early experience-dependent cross-modal plasticity in the sensory cortices”. **Nature Neuroscience 17**: pp. 391-399.



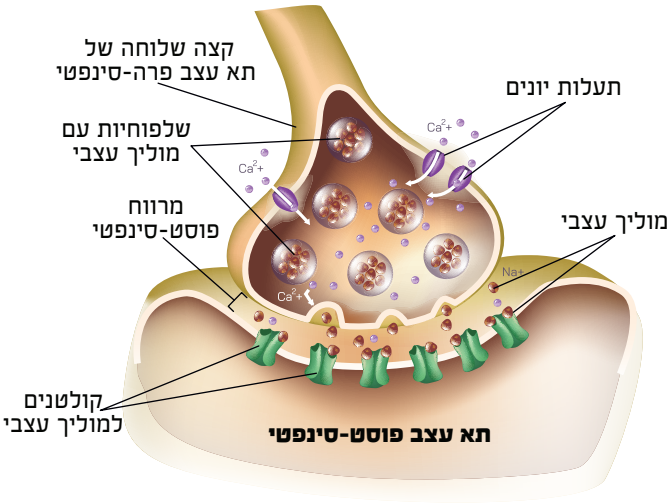
התאוששות ושיקום ברמת התא הבודד והאורגניזם השלם בעקבות חשיפה מתמשכת לחומר פסיכואקטיבי

ד"ר יוסי באומהקר[1]

החיים שלנו מתנהלים ברמות ארגון שונות. אנחנו חלק מאוכלוסייה, חברה, מארג מזון, ובעצמנו מהווים אורגניזם הכולל רמות ארגון נוספות כמו מערכות, איברים, רקמות ותאים, ואף בית גידול לאוכלוסיית חיידקי המעיים. בין רמות ארגון אלה קיימות הקבלות רבות. למשל: סוקצסיה של בית גידול המתבטאת בהחלפת חברת חלוץ המתאפיינת במיעוט יחסי-גומלין בחברת בעלי-חיים המקיימים קשרים מורכבים יותר, יכולה לשמש דוגמה להתפתחות אורגניזם מתא בודד למערכות המקיימות ביניהן קשרי גומלין מורכבים. התאמה לסביבה ברמה האקולוגית עשויה להקביל להתמיינות והתמחות ברמת האורגניזם וברמת התא. וויסות ברמה האקולוגית עשוי להקביל להומיאוסטזיס ברמת האורגניזם וברמת התא הבודד, ואילו שינוי בבית גידול יכול להתבטא כדיסביוזה[2] במערכת העיכול.

ברמת הארגון האקולוגית, כמו-גם ברמות ארגון אחרות, השינוי הוא הקבוע היחיד: מערכות ביולוגיות משתנות כל העת בתגובה לגירויים חיצוניים, היוצרים בתורם שינויים בתוך המערכת. שינוי, כלומר יציאה מהומיאוסטזיס, עלול לגרום לסדרה של אירועים שיכולים להיות בלתי-הפיכים, כך שלא תמיד אפשר להחזיר את בית הגידול, או את האורגניזם למצב שקדם לשינוי. מכאן שהתאוששות של בית גידול או אורגניזם לא תמיד אפשרית (Irving 2013; Kerr & Deguise 2004; Wu et. al. 2019). גם ברמת האורגניזם השלם, וגם ברמת התא אפשר לראות דוגמאות רבות לשינויים שאינם הפיכים: מחלות חשוכות מרפא, זיהומים בלתי ניתנים לריפוי, ואפילו התבגרות והזדקנות. במאמר זה אתאר את המורכבות הכרוכה בסוג אחד של תהליכי שינוי, שיקום והתאוששות, המתרחשים במערכת העצבים, תחילה ברמת תא עצב בודד, וממנו אעבור לרמות ארגון נוספות.

לתא עצב פוסט-סינפטי יש קולטנים ייחודיים שאליהם נקשרים מוליכים עצביים (נוירוטרנסמיטרים), המופרשים על ידי תא פרה-סינפטי. קישור המוליך העצבי לקולטן גורם לסדרה של פעולות מוגדרות בהתאם לסוג הקולטן ולסוג התא הפוסט-סינפטי (ראו איור 1). בדוגמה זו מדובר בקישור לקולטן המצומד לחלבון G (G-protein), שבעקבותיו מתחילה סדרת פעולות שבמהלכן האנזים GTPase נעשה פעיל; והוא בתורו מפעיל את האנזים אדנילט-ציקלאז[3] (Adenylate Cyclase, AC) שהופך ATP



איור 1: איור כללי של סינפסה

ל-cAMP (שליח שניוני); וזה בתורו נקשר לחלבון מסוים cAMP (Response Element-Binding Protein, CREB) אשר נקשר ל- DNA ומעודד תעתוק (Wang et. al. 2018). מחקרים מראים שישנם גורמים רבים הפועלים על מערכת זו של שליח שניוני (ראו איור1) והתוצאה הסופית היא שקלול סך ההשפעות המעוררות והמעכבות ברגע מסוים.

אחד מסוגי הקולטנים המצויים על פני קרום התא הפרה-סינפטי הוא הקולטן האופיאטי מסוג μ, המצומד לחלבון מעכב (Gi) ומופעל באופן "טבעי" על ידי אנדורפין. הפעלת הרצפטור על ידי אנדורפין תגרום לפתיחת תעלות אשלגן, לזרימה של יוני אשלגן אל מחוץ לתא[4], לעיכוב אדנילאט-ציקלאז (ראו איור 2; Ding et al., 2023) – וכתוצאה מכך לירידה בתגובות התא.

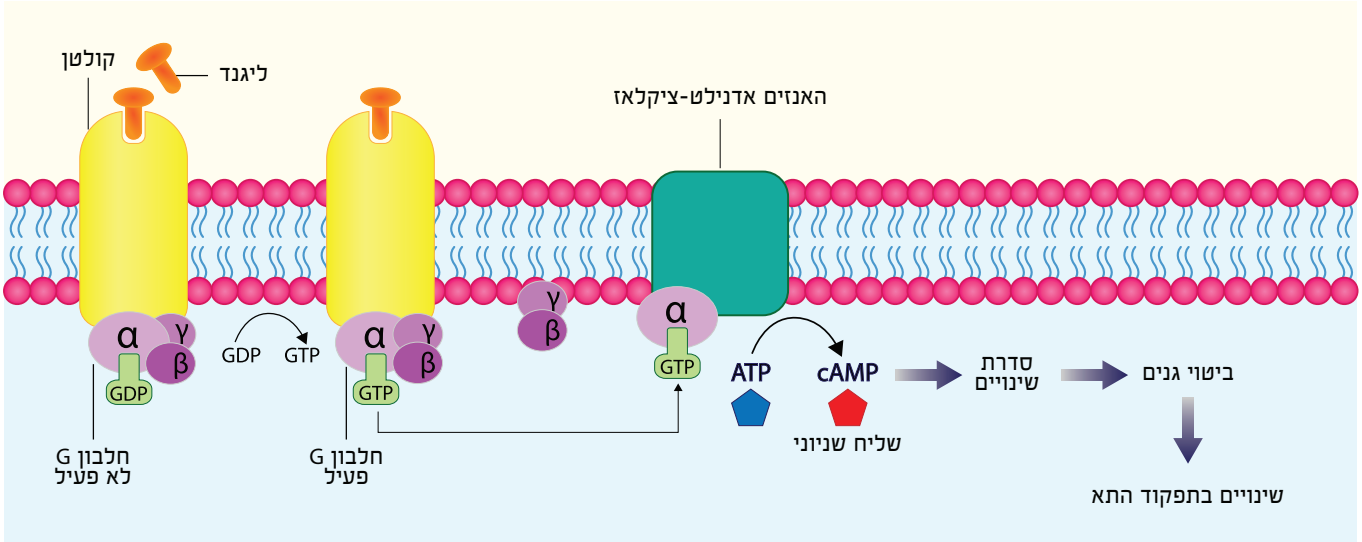
אבל מה קורה כאשר המערכת משתבשת? מה קורה כאשר הפעלת הרצפטור נעשית על ידי חומרים המוחדרים לגוף מבחוץ (למשל: אופיאטים) בריכוזים גבוהים פי כמה מריכוזי האנדורפינים ה"רגילים", ואשר יכולים להיקשר לרצפטור

1 ד"ר יוסי באומהקר, נוירופיזיולוג, חוקר מוח, מורה בגמלאות לביולוגיה וביוטכנולוגיה ומנחה קורס מתוקשב באוניברסיטת בר-אילן בנושא "סמים והתמכרויות, מדע מול תפיסות שגויות" byos.phd@gmail.com.

2 דיסביוזה (Dysbiosis) = שינוי בהרכב המיקרוביום

3 במאמרים מסויימים האנזים נקרא גם אדניליל-ציקלאז (Adenylyl-Cyclase).

4 היפרפולריזציה



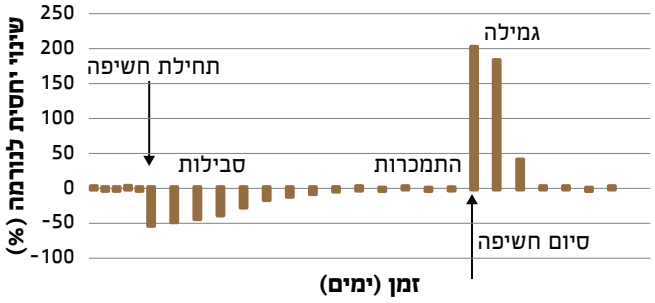
איור 2: שרשרת האירועים בתא עצב פוסט-סינפטי בעקבות קישור מוליך עצבי לקולטן המצומד לחלבון G

האופיאטי מסוג μ? במקרה זה המערכת האנדורפינית מווסתת את עוצמת המידע הנקלט על ידי התא הפוסט-סינפטי באמצעות כמה תהליכים שאחד מהם הוא הפחתת כמות הקולטנים על פני קרום התא. בתרביות תאים אפשר לראות את תחילתו של הוויסות כמעט מייד. שניות ספורות בלבד לאחר החשיפה לאופיאטים בריכוז גבוה מבחינים בעלייה בפעילותו של חלבון אשר נחוץ לתהליך האינטרנליזציה (כלומר ספיגה אל תוך התא) של קולטנים אופיאטיים. אם החשיפה לאופיאט נמשכת עוד דקות מספר אפשר לראות שחלק מאותם קולטנים עוברים תהליך של אנדוציטוזה שנקרא גם: Down-regulation, מה שהופך את התא הפוסט-סינפטי לפחות רגיש לאופיאטים שבסינפסה. תהליכים נוספים מתרחשים בטווח של שעות מרגע חשיפת התאים למינון גבוה של אופיאטים. סדרה זו של פעולות, שבסופה התא נעשה פחות רגיש לנוירוטרנסמיטר בשל חשיפה מוקדמת, נקראת בשם סבילות (Tolerance) או ירידה ברגישות (Desensitization) (Williams et. al. 2013; Al-Hasani & Bruchas 2011). ברמת תא עצב יחיד, סבילות יכולה להיות תהליך של שיקום וחוסן מפני חשיפה לריכוז גבוה מדי של אופיאטים.

התמכרות וגמילה: שיבוש בתהליכי שיקום ברמת התא וברמת האורגניזם

עוד ב-1975 הציעו Sharma et al. מודל להמחשת תהליכי סבילות, התמכרות וגמילה מאופיאט מסוים ברמת התא הבודד (ראו איור 3): תא פוסט-סינפטי המושפע ממגוון נוירוטרנסמיטרים, חלקם מעוררים את פעילותו וחלקם מעכבים אותה. תחילת החשיפה לאופיאט, שהוא חומר מעכב, תתבטא בירידה בפעילות התא. אולם ככל שתימשך החשיפה לאופיאט, כך תפחת השפעתו הודות לתהליכי הוויסות שהוזכרו, ותתבטא בסבילות ובירידה ברגישות, עד למצב שבו השפעת האופיאט תהיה קטנה מאוד.

לאחר הפסקת החשיפה לאופיאט אפשר להבחין בעלייה גבוהה מאוד בפעילות התא. תהליך זה נקרא גמילה (Withdrawal) והוא מעיד על כך שחלה התמכרות של התא לסם. הגורמים העיקריים לעלייה הגבוהה בפעילות התא יכולים להיות אלה: התא הפוסט-סינפטי שהגיב לאופיאט באמצעות ירידה ברגישות



איור 3: רמת פעילות cAMP בתאים בעקבות חשיפה יומית לאגוניסט אופיאטי

משמר עדיין את תגובתו לחומרים מעוררים אחרים הפועלים עליו. לכן כאשר האופיאט מוסר, השפעת החומרים האנדורפינים האנדוגניים (המעכבים) נמוכה מכדי להשפיע על פעילות התא הפוסט-סינפטי, והתא נותר חשוף בעיקר להשפעתם של חומרים מעוררים. כלומר רמות AC, GTPase וגורמים אחרים הקשורים לשרשרת הביוכימית שהוויסות שלהם הושפע מרמות גבוהות של אופיאט, מושפעות עתה בעיקר מגורמים מעוררים - דבר שמתבטא בפעילות גבוהה מאוד. תהליך הגמילה בתא הבודד הוא קצר יחסית ואחריו התא חוזר למצבו שלפני החשיפה.

ברמת האורגניזם השלם המצב מורכב עוד יותר מהמודל שהציעו Sharma et al (1975), בעיקר משום שאופיאטים משפיעים על סוגי תאי עצב רבים ובאמצעותם על מערכות רבות בגוף. למשל, אופיאטים מפחיתים את פעילות הלב, מדכאים את מערכת החיסון ומשבשים את פעילות מערכת העיכול. חשיפה לאופיאטים יוצרת תחושת אופוריה והרגעה, ומפעילה את מערכת התגמול הדופמינרגית (ומכאן סכנת ההתמכרות ההתנהגותית נוסף על ההתמכרות הפיזית). אופיאטים משמשים ברפואה בעיקר לטיפול בכאב. בשל השפעתם על מערכות רבות הרי שתופעות הלוואי שלהם מרובות גם הן, ובתוכן אפשר למנות: הפחתת קצב הלב ולחץ הדם, הפחתה ברפלקס השיעול, היצרות האישון, קשיות הבטן, בחילות והקאות, גירוד והזעה, אדמומיות עור הפנים, פצעים ומחלות עור, התנהגות

חסרת מנוחה ועוד. כאשר מופיעה סבילות נדרש להעלות את ריכוז האופיאט כדי לקבל את אותה השפעה מוקדמת, אלא שאז תופעות הלוואי עלולות להיות חמורות יותר (Al-Hasani & Bruchas 2011). הסבילות לתחושת האופוריה מתפתחת מהר יותר מאשר הסבילות לירידה בפעילות הלב. כך שהנרקומן הצורך את הסם בשל תחושת האופוריה, מרגיש צורך להעלות עוד ועוד את המינון או את התכיפות עד כדי כך שההשפעה על הלב, שלא עבר סבילות, הולכת וגדלה עד כדי דום לב ומוות. ואכן סיבת המוות הנפוצה ביותר בקרב מכורים לאופיאטים היא מחלת לב איסכמית[5] (Headrick et al., 2015). דוגמה נוספת להבדל בהתפתחות הסבילות וההתמכרות בין הרמה התאית לבין רמת האורגניזם השלם היא הממצא לפיו הירידה במספר הקולטנים האופיאטיים הנראית ברמת התא אינה מתרחשת בהכרח בתגובה לכל סוגי האופיאטים (Al-Hasani & Bruchas, 2011). נוסף על כך, תהליכי הגמילה, שבמודל התא הבודד נמשכים ימים ספורים בלבד, ברמת האורגניזם השלם הינם ארוכים ומורכבים: הם יכולים להימשך עד כ-12 שבועות בקהילה או 28 יום באשפוז (Nuamah et al., 2019), וגם לאחריהם המצב לא חוזר לקדמותו. לדוגמה, נמצא שנגמלים מאופיאטים מראים ירידה משמעותית באיכות החיים בהמשך חייהם הנקיים מסמים (Rhee & Rosenheck 2019). נוסף על כך יש עדויות לא מעטות של נגמלים המגדירים את עצמם "מכורים נקיים", שכן אף שנגמלו לפני שנים רבות הצורך בסם והסכנה ליפול לשימוש נותרים חזקים.

הגנטיקה של ההתמכרות

לנטייה להתמכרות יש ביטוי גם ברמת ה-DNA (Mistry et al., 2014; Browne et al., 2020). מסתבר שבגנים המקודדים לקולטנים לדופמין (DRD_2, DRD_3, DRD_4) ומשפיעים על מרכז התגמול יש אללים המאפיינים מכורים. לדוגמה: האלל BalI של הגן DRD_3 המעכב את פעילותו של AC, מקושר לנטייה ליטול סיכונים רבים יותר ובתוכם גם שימוש מוגבר בסמים והתמכרות.

כמו כן, קיימים אללים המעורבים בנטייה להתמכרות של גנים המקודדים לקולטנים אופיאטיים ($OPRM_1$, $OPRD_1$, $OPRK_1$). מעניין לציין שבגנים אלו נמצאו אללים האופייניים למכורים באוכלוסיות שונות, כמו אללים המאפיינים מכורים ממוצא גרמני ואללים המאפיינים מכורים ממוצא אמריקאי.

שיבוש בתהליכי שיקום ברמת בית הגידול - דיסביוזה והתמכרות

אם נתייחס לאדם כאל בית גידול למיקרוביום שבתוכו (ועליו), נוכל לראות גם כאן השפעות הדדיות בין האורגניזם השלם לבין המיקרוביום. בנוסף, כשם שסוג אחד של אורגניזמים יכול להוביל לשינוי של בית הגידול כולו (שדה, 2017), כך מיני חיידקים מסוימים המהווים חלק מהמיקרוביום יכולים להוביל לשינוי בהתנהגות של האורגניזם השלם. לדוגמה, Lactobacillus reuteri (*L. reuteri*) קשור לחרדה וסטרס ולהפרשת קורטיקוסטרון בעכברים ומשפיע על ביטוי mRNA של קולטנים מסוג GABA-A ו-GABA-B במוח; *Lactobacillus* ו-*Bifidobacterium* קשורים לייצור GABA; *Escherichia*, *Candida*, *Enterococcus*-1 מייצרים סרוטונין; ומינים שונים של Bacillus מייצרים דופמין (Kazemian & Pakpour 2024).

כאשר מופיעה סבילות נדרש להעלות את ריכוז האופיאט כדי לקבל את אותה השפעה מוקדמת, אלא שאז תופעות הלוואי עלולות להיות חמורות יותר

ממצאים מעניינים מהשנים האחרונות (Krebs et al. 2016; Ren & Lotfipour 2020; Kazemian & Pakpour 2024) מראים שכאשר האורגניזם (לרוב עכברים) נחשף לאופיאטים אפשר להבחין בשינויים במיקרוביום שכן אופיאטים מאיטים את פעילות המעיים ובכך יוצרים תנאים לגידול יתר של המיקרוביום ודיסביוזה. נמצא גם שדיסביוזה הנובעת מחשיפה לאופיאטים יכולה להוביל לשינויים במערכת העיכול כגון דלקות מעי, ולייצור מטבוליטים המשפיעים בתורם על פעילות מערכת העיכול. כמו כן, מאחר והמיקרוביום קשור למוח באמצעות מסלולים עצביים, הורמונליים, אימונולוגיים ומטבוליים, יש לו תפקיד חיוני בוויסות השפעת השימוש בסמים על תפקוד המוח ועל ההתנהגות (Kazemian & Pakpour 2024). נוסף על כך, נמצא שלמיקרוביום יש השפעה על הקשר שבין שימוש באופיאטים לבין מערכת התגמול ובכך הוא יכול להגביר את הצורך בשימוש ולהקשות את הגמילה. מעניין לציין שהעברת מיקרוביום צואתי[6] מעכבר בריא לעכבר שנחשף לאופיאטים יכולה לעכב סבילות והתמכרות (Kazemian & Pakpour 2024).

אפשר לראות אפוא ששינויים במיני המיקרואורגניזמים המרכיבים את המיקרוביום יכולים להוביל לשינויים במטבוליזם של סמים, ומכאן לשינויים בעוצמת השפעותיהם ובעוצמת תופעות הלוואי שלהם (Ren & Lotfipour 2020).

שינויים וניסיונות התאוששות ברמת החברה

נוסף על רמות הארגון שהראיתי, אפשר להגיד שהאדם הוא חלק מרמות ארגון רחבות יותר, כמו חברה או אוכלוסייה. רמות ארגון אלו יכולות להשפיע על הפרט. ניסיונות התמודדות של הפרט עם שינויים בסביבתו עלולים להוביל לתוצאות בלתי הפיכות, ושינויים אלה של הפרט יכולים להשפיע בחזרה על החברה. דוגמה לשינוי סביבתי טראומטי היא תקופת הקורונה, אשר כפתה על האוכלוסייה סגרים והובילה לשינוי משמעותי בחִברות (סוציאליזציה) ובשגרה. מחקרים שנעשו על תקופה זו (דלי וסופר, 2021) הראו עלייה בשכיחות השימוש במשככי כאבים, קנאביס, אלכוהול, הימורים, צפייה בפורנו, בילוי ברשתות חברתיות וכדומה בקרב תלמידים בכל החטיבות. דו"ח של המרכז הישראלי להתמכרויות (ICA) (2024) במלאות שנה למלחמת חרבות ברזל מראה עלייה בשימוש בחומרים ממכרים באוכלוסייה מ-22.7% באפריל 2022 עד 26.6% באפריל 2024

5 Ischemic heart disease

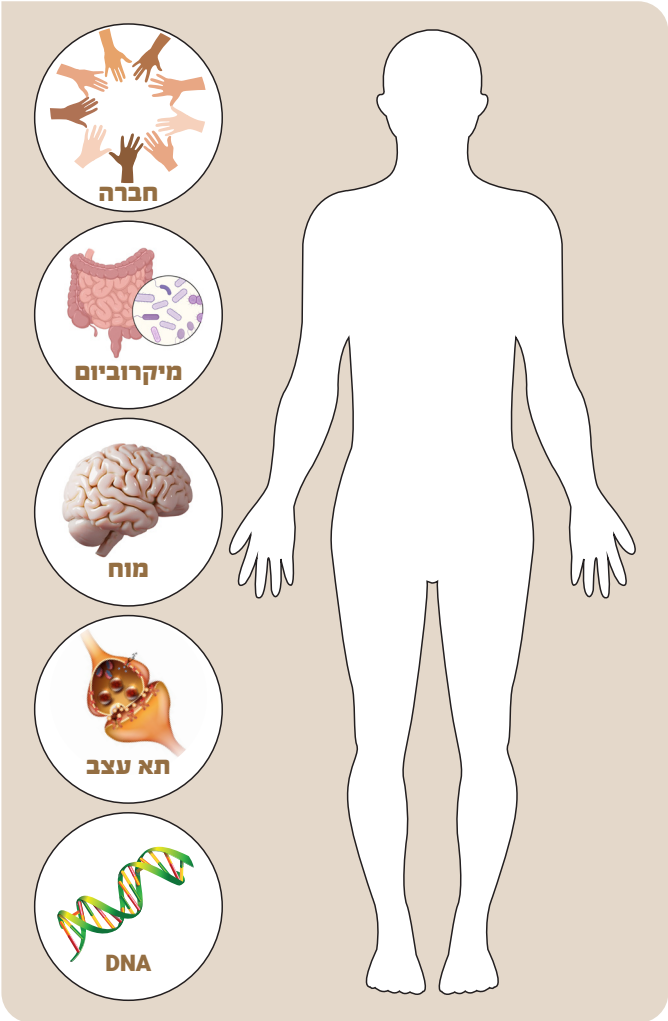
6 FMT - Fecal Microbiota Transplantation

(ולאחר מכן ירידה מתונה ל-25% במאי 2024). ניסיונות אלה של הפרט להתמודד עם שינויים שנגרמים על ידי החברה משפיעים בחזרה על החברה.

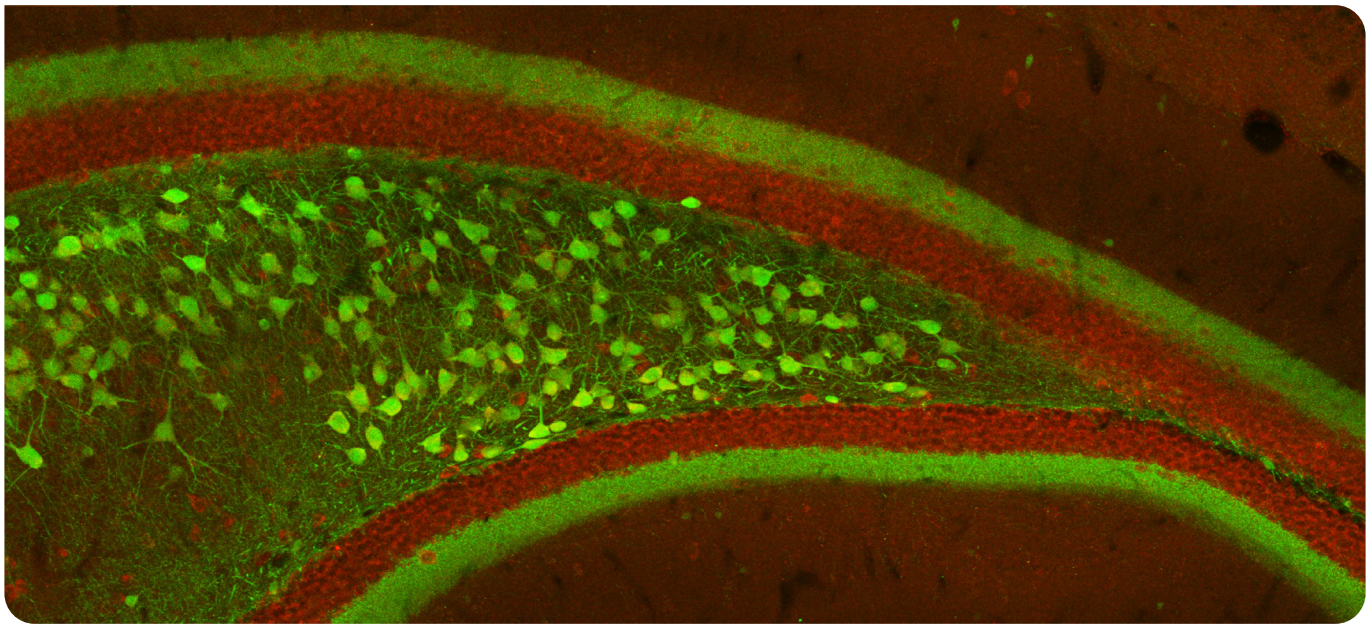
שימוש במשככי כאבים (תרופות מרשם) נחשב למגיפה באזורים מסוימים בעולם והסמים המדוברים ביותר הם אופיאטים, וביניהם פנטניל (Fentanyl) וגם אחרים הנקראים "סמי זומבי" כגון דזומורפין (Desomorphine) וקסילזין (Xylazine). מדבקות פנטניל הן פוטנטיות ביותר (פי 50 עד 100 יותר ממורפין) ומשמשות בעיקר לשיכוך כאבים כרוניים שאינם מגיבים לאופיאטים אחרים. פנטניל הוא הגורם העיקרי למה שנקרא: "מגפת הפנטניל". הכינוי "מגפה" ניתן בשל מספר מקרי המוות הגבוה ביותר בארצות הברית יחסית לסמים אחרים. המִנהל לאכיפת הסמים בארצות הברית (Drug Enforcement Administration) הגדיר את הפנטניל כ"איום הסמים הגדול ביותר" בתולדות המדינה, בין השאר לנוכח שכיחותו הרחבה והפוטנטיות שלו. ומה בארץ? גם אצלנו נראית עלייה בשימוש בפנטניל (קוך-דבידוביץ', 2020). בדו"ח של מרכז המחקר והמידע של הכנסת (גרינברג, 2023) מצוטט נתון שלפיו הצריכה הממוצעת של פנטניל בישראל עמדה בשנים 2018-2020 על 14,427 מנות (DDD-S) למיליון נפש ביום - הצריכה הגבוהה ביותר מבין מדינות העולם.

לסיכום

במאמר זה ביקשתי להראות כיצד שינויים ברמת תאי העצב הקשורים לשיקום התא יכולים להשפיע על שינויים ברמת האורגניזם השלם וברמת החברה, ואיך שינויים ברמת ארגון אחת יכולים להשפיע על רמות ארגון רחבות ממנה (איור 4). שינויים כאלה לא תמיד מאפשרים התאוששות מלאה. למשל, וריאנט של גן מסוים עלול לגרום לאדם להעדיף התנהגות סיכונית - צריכת סמים במקרה זה - אשר תשפיע ברמת תא העצב ועלולה להוביל לסבילות ולהתמכרות, ואלה בתורן ישפיעו על רמת ארגון של אוכלוסייה, כמו למשל אוכלוסיית חיידקי המעיים שישפיעו על האדם המאחסן אותם ועל אוכלוסיית בני-האדם.



איור 4: שינויים ברמת תאי העצב הקשורים לשיקום התא יכולים להשפיע על שינויים ברמת האורגניזם השלם וברמת החברה.



מקורות

Al-Hasani R & .Bruchas M.R) .2011" :(Molecular Mechanisms of Opioid Receptor-dependent Signaling and Behavior." **Anesthesiology 115**: pp. 1363-1381, https://doi.org/10.1097/ALN.0b013e318238bba6.

Browne, C.J. et al. (2020): "Epigenetic Mechanisms of Opioid Addiction". **Biological Psychiatry, 87(1)**: pp. 22-33, ISSN 0006-3223, https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2019.06.027.

Ding, R., et al. (2023): "Basic and clinical insights of Mu (μ)-opioid receptor in cancer". **Gene Protein Dis 2(2)**: p .282, https://doi.org/10.36922/gpd.282.

Headrick, J.P., et al. (2015): "Opioid receptors and cardioprotection - 'opioidergic conditioning' of the heart". **Br. J. Pharmacol. 172(8)**: pp. 2026-2050, doi: 10.1111/bph.13042.

Irving, A.D. (2013): "A century of failure for habitat recovery". **Ecography 36**: pp. 414-416, https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00210.x.

Kazemian, N. & Pakpour, S. (2024): "Understanding the impact of the gut microbiome on opioid use disorder: Pathways, mechanisms, and treatment insights". **Microbial Biotechnology 17(10)**, p. e70030, https//:doi.org/10.1111/1751-7915.70030.

Kerr, J.T. & Deguise, I. (2004): "Habitat loss and the limits to endangered species recovery". **Ecology Letters 7(12)**: pp. 1163-1169, https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00676.x.

Krebs, E., et al. (2016): "Characterizing Long-Term Health Related Quality of Life Trajectories of Individuals With Opioid Use Disorder". **Journal of Substance Abuse Treatment 67**: pp. 30-37, ISSN 0740-5472, https://doi.org/10.1016/j.jsat.2016.05.001.

Mistry, C.J., et al. (2014): "Genetics of Opioid Dependence: A Review of the Genetic Contribution to Opioid Dependence". **Curr Psychiatry Rev 10(2)**: pp. 156-167. doi: 10.2174/1573400510666140320000928. PMID: 25242908; PMCID: PMC4155832.

Nuamah, J.K., et al. (2019): "The past, present and future of opioid withdrawal assessment: a scoping review of scales and technologies". **BMC Med Inform Decis Mak 19**, p. 113. https://doi.org/10.1186/s12911-019-0834-8.

Ren, M. & Lotfipour, S. (2020): "The role of the gut microbiome in opioid use". **Behav Pharmacol. (2&3)**: pp. 113-121. doi: 10.1097/FBP.0000000000000538. PMID: 31895059; PMCID: PMC7908675.

Rhee, T.G. & Rosenheck, R.A. (2019): "Association of current and past opioid use disorders with health-related quality of life and employment among US adults". **Drug and Alcohol Dependence 199**: pp. 122-128, ISSN 0376-8716. https://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2019.03.004.

Sharma, S.K., et al. (1975): "Dual regulation of adenylate cyclase accounts for narcotic dependence and tolerance". **Proceedings of the National Academy of Sciences 72(8)**: pp. 3092-3096.

Wang ,H ,.et al) .2018" :(cAMP Response Element-Binding Protein) CREB :(A Possible Signaling Molecule Link in the Pathophysiology of Schizophrenia ."**Frontiers in Molecular Neuroscience 11**: p. 255 https://doi.org/10.3389/fnmol.2018.00255.

Williams, J.T., et al. (2013): "Regulation of μ-opioid receptors: desensitization, phosphorylation, internalization, and tolerance". **Pharmacological reviews, 65(1)**: pp. 223-254. https://doi.org/10.1124/pr.112.005942.

Wu, S., et al. (2019): "Quantifying the risk of irreversible degradation for ecosystems: A probabilistic method based on Bayesian inference". **Ecological Indicators 107**: p. 105621, https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105621.

(ללא שם מחבר) (2024): מלחמת חרבות ברזל: טראומה ושימוש בחומרים ממכרים שנה למלחמה, המרכז הישראלי להתמכרויות.

גרינברג נ. (2023): התמכרות למדבקות פנטניל בישראל – רקע לדיון, מרכז המחקר והמידע, הכנסת.

דלי נ., וסופר ב. (2021): ההשפעות הרגשיות של הקורונה על ילדים ונוער נתונים מישראל ומהעולם, לשכת המדען הראשי, משרד החינוך.

קוך-דבידוביץ' פ. (2020): המידע הקיים על אוכלוסיית הסובלים מהתמכרות בישראל, מרכז המחקר והמידע, הכנסת.

שדה א. (2017): זאבים משנים פני שטח או כיצד זאבים שינו נהרות – דף עבודה, המרכז הארצי למורי הביולוגיה.

לקריאה נוספת על מגפת האופיואידים:

Cook County Public Health, The opioid epidemic

American Psychiatry Association, Opioid Use Disorder

החלמה מלאה

תהליכי התחדשות של רקמות פגועות בצמחים ובבעלי חיים

מעובד על פי המאמר[1]:

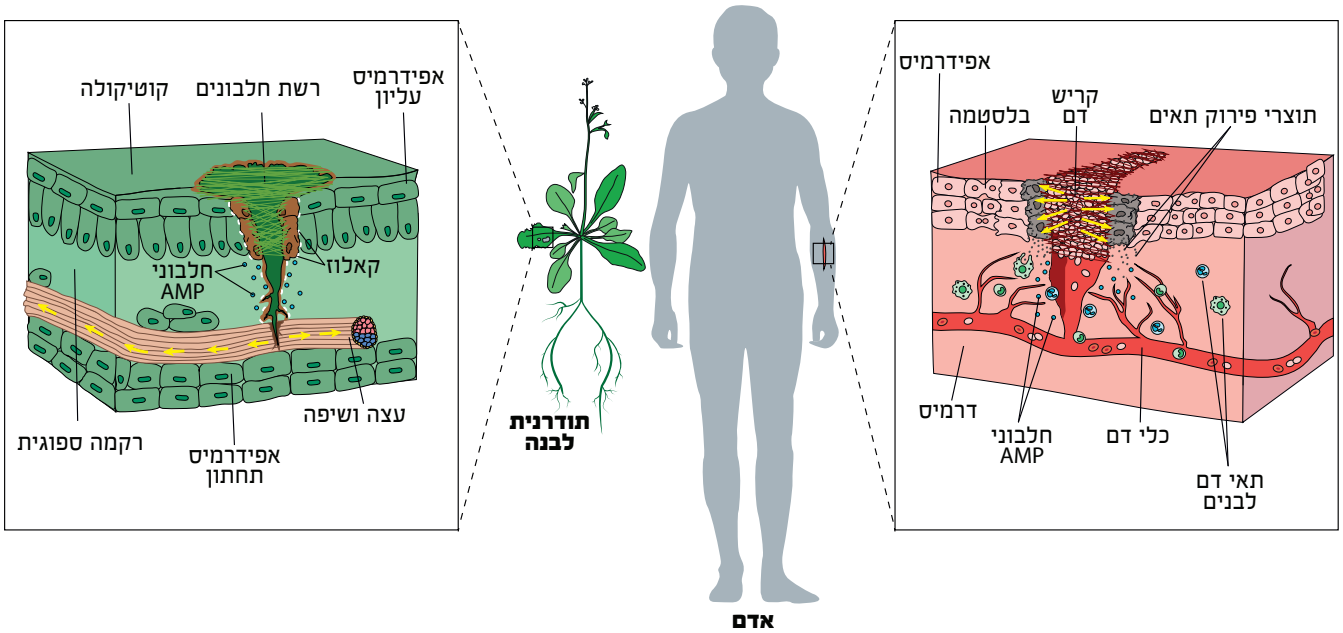
Timothy C. Byatt & Paul Martin (2023): “Parallel repair mechanisms in plants and animals”.
Disease Models & Mechanisms 16, dmm049801. doi:10.1242/dmm.049801.

תהליכי התחדשות של איברים ורקמות נחקרים לעומק בבעלי חיים שבהם יכולות ההתחדשות וההחלמה טובות יותר מאלה של בני אדם. הידע המצטבר אמור לסייע במציאת טיפולים שאפשר יהיה להפעיל בבני אדם ולחדש גפיים שנקטעו או פצעים שיצרו צלקת. מחקרים אלה מתבססים על הדמיון הקיים בין אורגניזמים מקבוצות טקסונומיות שונות, ולכן מחפשים מודל מחקר בעל קרבה טקסונומית לבני אדם.

עד כמה שהדבר נשמע מופרך, אפשר למצוא בצמחים ובבעלי חיים תהליכים אנלוגיים של החלמה מפצעים ומפגיעות. מאמר זה משווה ביניהם (איור 1), מתוך מחשבה שייתכן כי הבנת קווי הדמיון וההבדלים בין קבוצות טקסונומיות שונות מאוד עשויה לתרום באופן דו-כיווני: מחד גיסא, ליצור כיוונים חדשים לטיפול רפואי בפצעים בבעלי חיים ובכללם בני אדם; ומאידך גיסא, לפתח דרכים חדשות המונעות פגיעת מזיקים בגידולים חקלאיים.

הרקמה הפגועה משחררת אותות לסביבה

בשלב הראשון לאחר הפציעה בצמחים ובבעלי חיים, משתחררים יוני סידן מהרקמה שנפגעה ונקלטים בתאים הסמוכים לה. כתוצאה מכך, התאים הללו משחררים אף הם יוני סידן, ונוצר גל הולך ומתרחב. תהליך זה הומחש באורגניזמים חיים באמצעות החדרת גן מלאכותי המקודד לחלבון שחלקו קלמודולין וחלקו החלבון הזוהר GFP. קישור של יוני סידן לקלמודולין גורם לחלבון GPF לפלוט קרינה פלואורסצנטית (Nguyen et al., 2018). בצמח תודרנית לבנה (*Arabidopsis thaliana*), לדוגמה, עוברות שתי שניות מרגע הפגיעה ועד שגל



איור 1: שלבים בתהליך החלמת פצעים בצמחים ובבני אדם

בשלבים מוקדמים נוצר גל של יוני סידן (חיצים צהובים) העוברים מהרקמה הפגועה לתאים שכנים באופן מקומי באדם, ולכל האורגניזם באמצעות מערכת ההובלה בצמחים. בד בבד חל תהליך של פולימריזציה ליצירת סיבי פיברין באדם ורשת חלבונים מנוזל השיפה בצמחים. הסיבים מתארגנים לרשת, ליצירת קריש הסותם את החור ברקמה. חלבונים אנטיבקטריאליים (AMP) המופרשים באזור הפגוע, וכן תאי מערכת החיסון באדם, מונעים התפתחות של זיהום. תאים בשולי הרקמה הפגועה עוברים תהליך של מוות תאי מתוכנן (באפור מימין, בחום משמאל), ותאים בקרבתם נכנסים למעגל החלוקה ומתרבים (מריסטמה בבעלי חיים, קאלוס בחיתוך הגבעול בצמחים). באדם התאים הללו ממלאים את החלק הפגוע ברקמה והקריש מתייבש ונושר, ואילו בצמחים הקריש נותר ואף מחוזק באמצעות קאלוס, וכמו כן נותר החור ברקמה.

1 הגרסה המובאת כאן היא סקירה של תוכני המאמר המקורי, ונועדה להנגיש את המידע לציבור המורים לביולוגיה. העיבוד כלל הוספת הסברים ואיורים לתכנים מורכבים, סינון מידע שאינו נקשר לרעיון המרכזי של הגרסה המעובדת, הגדרת מונחים מקצועיים, ובמידת האפשר קישור הדברים לתהליכי למידה והוראה. המעוניינים לקרוא את המאמר המקורי מוזמנים לפנות למקור לפי הפרטים המופיעים בתחילת הגרסה המעובדת.

יוני הסידן מתחיל להתרחב לתאים הסמוכים. כאשר יוני הסידן מגיעים לצינור הובלה כלשהו, הם אף מעוברים דרכו לכל חלקי הצמח (Toyota et al., 2018). בדגים התהליך מתחיל במהירות רבה יותר, אבל נותר מקומי (Razzell et al., 2013).

יוני הסידן יכולים לעבור מהתאים הפגועים ישירות לתאים סמוכים דרך גשרים בין-תאיים (Shannon et al., 2017), אך קיימים מנגנונים נוספים הגורמים לשחרור יוני סידן. לדוגמה, בדרוזופילה נמצא שתאים פגועים משחררים פרוטאזות המפרקות מבנים בתאים סמוכים שלא נפגעו, ובתוך כך גורמות ליציאת יוני סידן מהרשת האנדופלזמטית (O'Connor et al., 2021). גם בצמחים נמצאו עדויות לפעילות של פרוטאזות הקשורה ליוני סידן (Hander et al., 2019).

שחרור חומרי חמצון

גל יוני הסידן מוביל בצמחים ובבעלי חיים לשחרור של חומרי חמצון חזקים, כמו H_2O_2, בין השאר משום שהאנזימים המייצרים אותם מופעלים ישירות על ידי קישור יוני סידן (Razzell et al., 2013; Dubiella et al., 2013).

חומרי חמצון פוגעים ישירות במיקרואורגניזמים, ולכן החומרים ששוחררו מהתאים למעשה מחטאים את אזור הפצע. נוסף על כך הם עצמם אותות הנקלטים בתאי מערכות ההגנה של האורגניזם שנפצע ומעוררים אותם (Mhamdi et al., 2010). כמו כן, H_2O_2 ידוע כגורם לתהליכי מוות תאי מתוכנן (Apoptosis) החיוניים לתהליכי חידוש רקמות (רגנרציה; Love et al., 2014) ויש אף בעלי חיים המקריבים איברים שלמים באמצעות מוות של תאים במישור מסוים של הרקמה הגורם לניתוק האיבר הפגוע, לפני תחילת התחדשות הרקמה או האיבר. גם בצמחים קיימות עדויות למוות תאי מתוכנן בתאים הגובלים בפצע, ולקשר אפשרי של תהליך זה לחידוש חלוקות תאים ולחידוש הרקמה הפגועה (Zhou et al., 2019), אולם החלבונים המעורבים בתהליך שונים בבעלי חיים ובצמחים.

תפנית מטבולית

החלמת רקמה פצועה כרוכה בחלוקת תאים ובבנייה מחדש של החלק הפגוע. בתוך כך, התאים באזור הפצוע בבעלי חיים (Love et al., 2014) וגם בצמחים (Jacobo-Velazquez et al., 2015) עוברים שינוי במצבם המטבולי, מפוספורילציה אוקסידטיבית לגליקוליזה אנאירובית. ואכן, בארנבונים נמצאה עלייה בחומצה לקטית בפצעים מחלימים (Ghani et al., 2003); ואנליזה ברמת התא של ביטוי גנים בפצעי עור של עכברים הראתה עלייה בביטוי הגנים לאנזימים המשתתפים בגליקוליזה, וירידה בביטוי הגנים המשתתפים בפוספורילציה אוקסידטיבית (Haensel et al., 2020). אנליזה ברמת התא של ביטוי גנים ברקמה פצועה בצמחים מראה עלייה בביטוי גנים הקשורים למטבוליזם של עמילן וסוכרוז (Guan et al., 2021) המספקים אנרגיה וחומרי בנייה לאזור שנפגע.

מניעת זיהום

פציעת הרקמה החיצונית של האורגניזם פוגעת בשמירה על הסביבה הפנימית שלו מפני גורמים מזהמים, כמו חיידקים, פטריות ונגיפים. ברוב בעלי החיים קיימים בשכבה החיצונית תאים של מערכת החיסון, לדוגמה מקרופאגים, המזהים אנטיגנים נפוצים של גורמים מזהמים שונים (Qian & Cao, 2013), וכשאלו מזהמים את הפצע, הם מפעילים את מערכת החיסון ויוצרים דלקת. רק אם

הפצע אינו מגליד, או אם הוא מזוהם במידה רבה, מגויסים תאי T ותאי B כדי לסלק באופן יעיל וייחודי את הזיהום (Weavers & Martin, 2020). בצמחים מופעלים גם כן תאים המזהים אנטיגנים נפוצים של גורמים מזהמים (Noman et al., 2019), אלא שהתאים הללו אינם בעלי יכולת תנועה. הם מפעילים מנגנון חיסון קדום הקיים בבעלי חיים ובצמחים, באמצעות הפרשת מאות סוגים של חלבונים אנטימיקרוביאליים, אשר חלקם מתבטאים באופן תמידי וחלקם מתבטאים ביתר אחרי פציעה (Howe et al., 2018). סוג אחד של חלבונים כאלה שהתגלו בצמח תודרנית לבנה מכונה דיפנסינים. חלבונים אלה פועלים בשלל מנגנונים, כמו פגיעה בקרומי התאים של הפתוגן, או עיכוב אנזימים הקשורים לטריפה (Kovaleva et al., 2020). דיפנסינים התגלו גם בקרב בני אדם והם כנראה פועלים במנגנונים דומים לאלו שבצמחים (Pazgier et al., 2006). בעקבות גילוי מגוון הפעולות של חלבונים אנטימיקרוביאליים בשנים האחרונות, נפתח מגוון אפשרויות חדשות לפיתוח תרופות וטיפולים ברקמות פגועות ובתהליכים ממאירים (Williams et al., 2018).

סגירה מיידית של החתך

בבעלי חוליות סגירת החתך ברקמה מתבצעת באמצעות קריש דם: טסיות דם יוצאות מכלי הדם הפגועים, ומשחררות חומרים שונים, כמו גורמי קרישה שהיו אגורים בהן בשלפוחיות. תרומבין מפרק פיברינוגן לפיברין, והחור ברקמה נסתם באמצעות רשת של סיבים שטסיות ותאי דם נכלאים בתוכה (Martin, 1997). גם בחרקים נוצרת רשת של סיבים החוסמת את הפצע באמצעות שחרור התוכן של שלפוחיות, אך אין בהם רכיבים המקבילים לטסיות דם או לגורמי קרישה (Schmid et al., 2019).

תהליך אנלוגי מתקיים בצמחים: כאשר צינורות השיפה נפגעים, נוצרים קשרים סולפידיים בין חלבונים מנוזל השיפה, ונוצר פולימר דמוי רשת הסותם את החור (Ernst et al., 2012), ומחוזק מאוחר יותר על ידי הוספת רב-הסוכר קאלוז. בעוד שקריש הדם בבעלי חיים הוא זמני, וכשמתחדשת רקמת העור עם הזמן הוא נושר, הרשת הסיבית בצמחים קבועה יותר.

התחדשות לעומת הצטלקות

קיימים מיני זוחלים ודו-חיים המנתקים את זנבם בעת סכנה, לרוב כבריחה מטורף האוחז בהם. התהליך מכונה אוטוטומיה,

או קטיעה עצמית, ולאחריו רבים מהמינים הללו מגדלים זנב חדש במקום זה שנקטע. קיימים גם מיני בעלי חיים, בעיקר בקרב דו-חיים, המסוגלים לחדש גפיים שנקטעו, ואף כאלה המחדשים גוף שלם, כמו הידרה ופלנריה. לעומת זאת, בקרב בני אדם, קטיעת גפיים אינה מובילה להתחדשות האיבר. אפשר אפוא לשרטט רצף של יכולת התחדשות בקרב בעלי חיים (Tanaka & Reddien, 2011), מיכולת התחדשות מלאה של איברים בתולעים, דגים ודו-חיים, דרך התחדשות מלאה של רקמות, כמו שריר הלב בדגים ובעוברי יונקים, וכלה בהצטלקות הרקמה ביונקים בוגרים, כמו שריר הלב בבני אדם.

מחקר על תהליכי התחדשות בקרב בעלי חיים מראה שסמוך לאזור הפגיעה מתחילה חלוקה מוגברת של קבוצת תאים המכונה בלסטמה (McCusker et al., 2015). תאים אלה, שלפני הפציעה היו תאים ממוינים שאינם מתחלקים ברקמה, קולטים גורמי גדילה[2] ובעקבות כך נכנסים למעגל החלוקה (Wehner & Weidinger, 2015). בשלב מאוחר יותר תאי הבלסטמה יעברו תהליכי התמיינות מחדש לסוגי התאים השונים המרכיבים את האיבר שנפגע. לרוב, טווח ההתמיינות מוגבל, ותאים שהיו לדוגמה תאי שריר ברקמה לפני הפגיעה, לא יתמיינו לאפידרמיס או לסחוס. המשמעות היא שאובדן מוחלט של סוג תאים מסוים באיבר כתוצאה מהפגיעה יוביל לכך שלא ייווצרו תאים כאלה מחדש (Kragl et al., 2009).

בדומה לבלסטמה בבעלי חיים, בצמחים נוצר קאלוס: תאים ממוינים ברקמה הצמחית שלאחר הפגיעה נכנסים למעגל החלוקות. בשונה מבעלי חיים, התאים המתחלקים ברקמת הקאלוס מסוגלים להתמיין לכל סוג של תא בצמח. תכונה זאת מאפשרת לחדש כל חלק של הצמח שנפגע ואף צמח שלם (Ikeuchi et al., 2016). באופן מפתיע, צמחים דווקא אינם מחדשים פגיעה בהיקף קטן, כמו חור בעלה כתוצאה מאכילה של זחל, ועדיין לא ברור מדוע קיים הבדל כזה בין חידוש כל העלה לבין חידוש חלק קטן ממנו בלבד.

מבחינה מולקולרית, התחדשות רקמות ואיברים בבעלי חיים נשענת על תהליכים אפיגנטיים, ובמיוחד על שינויים בהיסטונים, החלבונים האורזים את ה-DNA. בתהליכי התחדשות סנפירים בדגי זברה, לדוגמה, מוסרות מתילציות על היסטונים מסוג H3 הנמצאים באזור המקדם של גנים, וכך מתחיל תעתוק של גורמי גדילה ושל גנים המקודדים לחלבונים הקשורים לחלוקת תאים, המובילים ליצירת הבלסטמה (Stewart et al., 2009). ביצירת הבלסטמה מעורבת גם הסרה של מתילציה של ה-DNA, ומעניין לציין שבעכברים, שאצלם יכולת ההתחדשות של הרקמה נמוכה יותר, גם הסרת המתילציות המעכבות תעתוק של גנים מצומצמת יותר לעומת דגים. ייתכן שזאת אחת הסיבות לכך שבעכברים חלים ברקמת האפיתל תהליכים כמו תנועה של תאים וחלוקות תאים להשלמת החתך בעקבות פציעה, אך אין היווצרות של בלסטמה (Shaw & Martin, 2009).

גם בצמחים, תהליכי היווצרות הקאלוס מתאי העלה בעקבות פציעה תלויים בהסרת מתילציות של היסטון H3 ומתילציות של ה-DNA, המעכבות ביטוי של גנים ((Mozgova et al., 2017. הסרת מתילציות קיימת בגנים הקשורים לפעולת ההורמון

בשלב הראשון לאחר הפציעה בצמחים ובבעלי חיים, משתחררים יוני סידן מהרקמה שנפגעה ונקלטים בתאים הסמוכים לה

אוקסין ובגנים הקשורים להתארכות שורשים (He et al., 2012). תהליך חשוב נוסף הוא אצטילציה של היסטונים: עיכוב אנזימים המסירים את האצטילציות מעכב את היווצרות הקאלוס בעקבות פגיעה (Rymen et al., 2019). ייתכן שאצטילציה של היסטונים היא מנגנון מולקולרי בצמחים לסימון גנים החיוניים לתהליכי התחדשות של רקמות, וכך מתאפשר מעבר יעיל יותר מתאים ממוינים לתאים מתחלקים היכולים, עם הזמן, להתמיין לרוב סוגי התאים בצמח.

תהליכי חוסן

באופן פרדוקסלי, מנגנונים להתחדשות רקמות ואיברים, כמו תהליכי דלקת והפרשת חומרים מחמצנים חזקים, עלולים בעצמם לפגוע בתאי הרקמה. לאחרונה נמצאו בעכברים ובזבובים תהליכים הממזערים את הנזק העצמי בעקבות הפגיעה ומכינים את הרקמה לקראת תהליך הריפוי. כך למשל, מופעלים אנזימים הפועלים על חומרי החמצון וממדרים אותם, וכן עם הפציעה מופעלים תהליכי תיקון DNA וחלבונים (Weavers et al., 2019). תהליכים כאלה מעוררים עניין רב, משום שהם יכולים לשמש הכנה לריפוי פצעים לפני ניתוחים מתוכננים.

בצמחים ידועים תהליכים אחרים היוצרים חוסן, כמו זיפים על פני העלים והגבעולים שתזוזתם מובילה להפרשת רעלנים מרתיעים עוד לפני שהחלה אכילת הצמח (Zhou et al., 2017). כמו כן, לאחר פגיעה, ולעיתים אפילו לחץ מכני קל, צמחים מגיבים בגלים של יוני סידן ובהפרשת חומרי חמצון, ואלה יוצרים הגנה יעילה מפני גורמים מזהמים מחוללי מחלות (Benikhlef et al., 2013). אף על פי שיש להמשיך ולחקור תהליכים כאלה בצמחים, אפשר יהיה להפעיל אותם בגידולים חקלאיים כאמצעי למניעת מחלות, לדוגמה לפני התפשטות עונתית צפויה של וירוסים או חיידקים, ואף של חרקים מזיקים.

חזון המחקר

לכאורה, השוואת תהליכי ריפוי והתחדשות של רקמות בין קבוצות טקסונומיות רחוקות כל כך מעלה סימני שאלה, שכן תהליכים המתרחשים בקבוצה האחת לא בהכרח יפעלו באופן דומה בקבוצה השנייה. לפחות הצלחה מוכחת אחת תומכת בגישה זאת: החלבון NmDef02, שהוא דיפנסין המבוטא באופן רקומביננטי בחיידקי E. coli, מראה בתרבית פעילות אנטימיקרוביאלית כנגד מחוללי מחלות בבני אדם (Ceballo et al., 2022). כמו כן, ייתכן כי תהליכים המעכבים מוות תאי מתוכנן בצמחים בעקבות פציעה יוכלו בעתיד לסייע למניעת תהליכי הצטלקות. ייתכן שדווקא המרחק בין שתי הקבוצות עשוי לגייס מנגנונים שונים מאוד לתהליך דומה ולאפשר פריצות דרך.

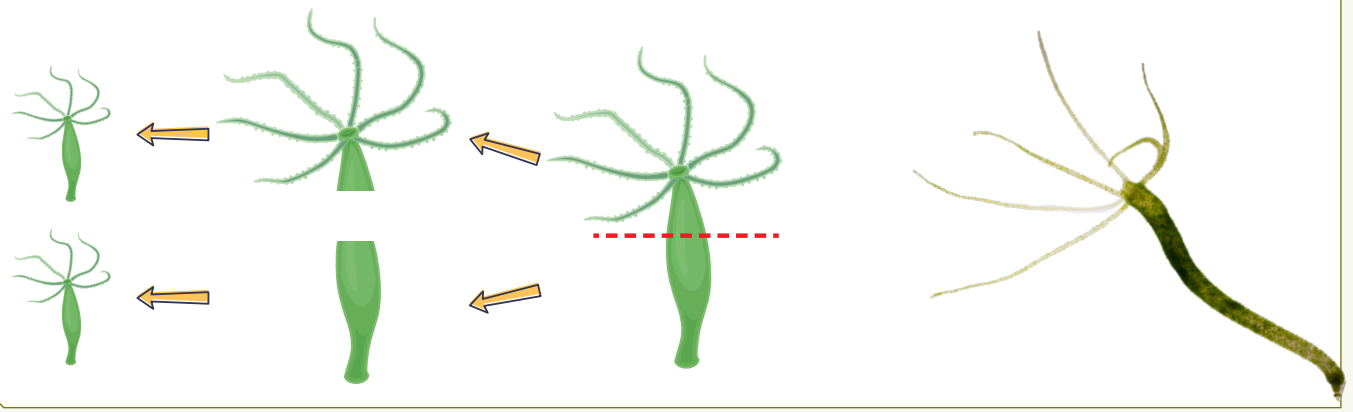
2 FGF ; WNT/β-catenin.

מודלים למחקר על התחדשות איברים ורקמות

במחקר על התחדשות איברים ורקמות קיים מגוון של חיות מודל, ולכל אחת מהן יתרונות וחסרונות ביחס לאפשרויות המחקר והשיטות שאפשר להפעיל (Goldman & Poss, 2020).

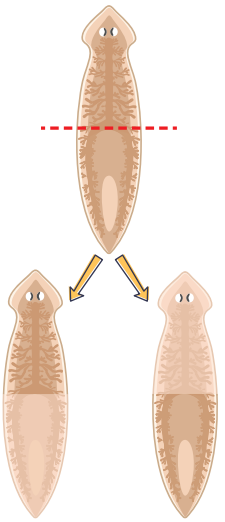
הידרה | *Hydra* (צורבים)

סוג של בעל חיים ממערכת הצורבים החי במים מתוקים באזורים טרופיים ומורכב מגוף מאורך ו"ראש" בעל זרועות. להידרה יכולת לחדש את כל גופה החסר לאחר חיתוך, כך שהגוף המואורך מייצר ראש חדש, והראש מייצר גוף מוארך חדש. התהליך, המכונה מורפלקסיס (Morphallaxis), מתרחש ללא חלוקת תאים, ולכן נוצרת הידרה שלמה חדשה קטנה יותר מהמקורית, בגודלו של החלק שממנו נוצרה. כמודל מחקר, להידרה יש יתרון כאורגניזם פשוט, יחסית, ואפשר לייצר הידרות טרנסגניות.



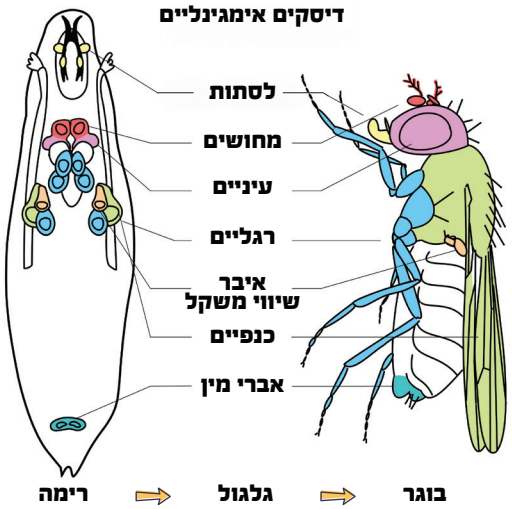
פלנריה | מהמין *Dugesia ubtentaculata* (תולעים שטוחות)

אחד ממאות מינים של מחלקת תולעי הריסים במערכת התולעים השטוחות. לפלנריה יכולת התחדשות מלאה: מכל חלק של הגוף, ראש, אמצע או קצה אחורי, יכול להיווצר האורגניזם השלם. בגוף הפלנריה קיימים תאי גזע רבים, המכונים נאובלסטים, אשר יכולים לייצר את כל סוגי התאים המרכיבים את האורגניזם. כלי מחקר נפוץ מאוד במודל זה הוא שימוש ברצפי RNA המפריעים לביטוי גנים בנאובלסטים (RNAi).



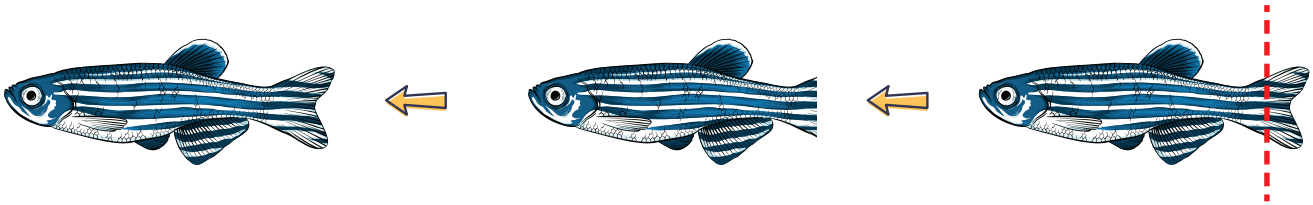
תסיסנית המחקר | *Drosophila melanogaster* (חרקים)

מין של זבוב הנפוץ מאוד במחקר גנטי. בזבובים אין הרבה רקמות מתחדשות. תהליכי התחדשות חלים בעיקר בדיסקים האימגינליים, קבוצות של תאים ברימות המתפתחים מאוחר יותר, בגולם, לאיברים ורקמות חיצוניים בבוגר. הדיסקים הללו מתחדשים לאחר פגיעה. היתרונות במחקר על זבובי תסיסנית המחקר מוכרים, ובעיקר קיימים כלי מחקר גנטיים ומולקולריים רבים.



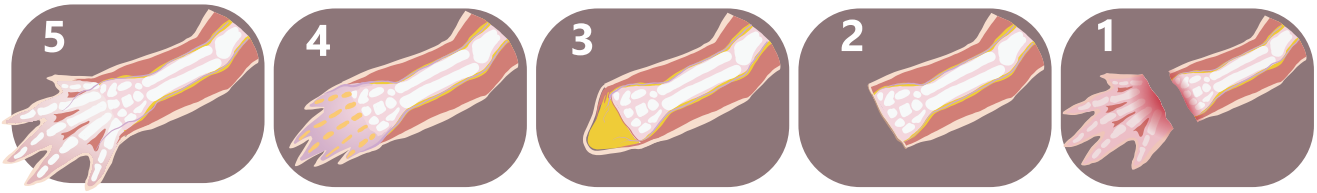
דגי זברה | *Danio rerio* (דגים)

דגי זברה הם מין של דגי מים מתוקים החיים בנהרות בהודו. בשל תנאי הגידול הפשוטים יחסית הם הפכו למודל מחקר נפוץ מאוד לתהליכים בחולייתנים. לדגים אלה יש יכולת לחדש רקמת לב, סנפירים, חוט שדרה, תאי לבלב, כליה, כבד, רשתית ומוח. תהליכי ההתחדשות נמשכים כשלושה חודשים, וכחולייתן בעל מגוון מרשים של רקמות מתחדשות, יש למחקר במודל זה חשיבות רפואית רבה מאוד. כלי נפוץ במחקרים בדגי זברה הוא CRISPR, המאפשר לבדוק כיצד חֶסר של גן מסוים משפיע על תהליכי ההתחדשות.



אקסולוטל | *Ambystoma mexicanum* (דו-חיים)

מין אנדמי למקסיקו, שכמעט נכחד בטבע אך קיים במעבדות רבות ברחבי העולם ומתרבה היטב בשבי. אקסולוטלים יכולים לחדש איברים שלמים כמו גפיים, לב, עיניים, שחלות, זנב ואפילו חלקים של המוח. חידוש גפיים נמשך כשנים-עשר חודשים. גם לסלמנדרות, סוג אחר של דו-חיים, יש את היכולת לחדש גפיים, ואף הן מודל למחקר. היתרון של אקסולוטל כמודל מחקר להתחדשות רקמות הוא שהם אינם עוברים גלגול מלא, ונותרים כל חייהם בשלב ביניים שבין התפתחות עוברית לבין שלב הבוגר. אפשר להפעיל עליהם מניפולציות גנטיות, כולל הפעלת CRISPR ויצירת אורגניזמים טרנסגניים.



עכבר מצוי | *Mus musculus* (יונקים)

עכברים, בדומה ליונקים אחרים כולל בני אדם, אינם מצטיינים ביכולת ההתחדשות של רקמות. עם זאת, לחלק מהרקמות יש יכולת התחדשות בעוברים או בעכברים צעירים מאוד. בשל הקרבה הטקסונומית לבני אדם, והכלים הגנטיים הרבים כמו יצירת עכברים טרנסגניים, הפעלת CRISPR ואפשרות של הכלאות הם משמשים מודל מחקר, בעיקר של ירידה ביכולת ההתחדשות של רקמות כמו שריר הלב משלב ההתפתחות העוברית ועד לבגרות ובזקנה. בדומה לדגים, תהליכי התחדשות יכולים להימשך כשלושה חודשים.

Benikhlef, L., et al. (2013): "Perception of soft mechanical stress in Arabidopsis leaves activates disease resistance". **BMC Plant Biology** 13: p. 133. doi:10.1186/1471-2229-13-133.

Dubiella, U., et al. (2013): "Calcium-dependent protein kinase/ NADPH oxidase activation circuit is required for rapid defense signal propagation". **Proceedings National Academy of Science USA** 110: pp. 8744-8749. doi:10.1073/pnas.1221294110.

Ernst, A.M., et al. (2012): "Sieve element occlusion (SEO) genes encode structural phloem proteins involved in wound sealing of the phloem". **Proceedings National Academy of Science USA** 109: pp. E1980-E1989.

Ghani, Q.P., et al. (2003): "Role of ADP-ribosylation in wound repair. The contributions of Thomas K. Hunt, MD". **Wound Repair and Regeneration** 11: pp. 439-444. doi:10.1046/ j.1524-475X.2003.11608.x.

Goldman, J.A. & Poss, K.D. (2020). "Gene regulatory programs of tissue regeneration". **Nature Reviews Genetics** 21: pp. 511-525. https://doi.org/10.1038/ s41576-020-0239-7.

Guan, Y.G., et al. (2021): "Proteomic analysis validates previous findings on wounding-responsive plant hormone signaling and primary metabolism contributing to the biosynthesis of secondary metabolites based on metabolomic analysis in harvested broccoli (Brassica oleracea L. var. italica)". **Food Research International** 145: p. 110388. doi:10.1016/j. foodres.2021.110388.

Hander, T., et al. (2019). "Damage on plants activates Ca2+-dependent metacaspases for release of immunomodulatory peptides". **Science** 363, p. eaar7486. doi:10.1126/science. aar7486.

Haensel, D., et al. (2020). "Defining epidermal basal cell states during skin homeostasis and wound healing using single-cell transcriptomics". **Cell Report** 30: pp. 3932-3947.e6. doi:10.1016/j.celrep.2020.02.091.

He, C.S., et al. (2012): "Reprogramming of H3K27me3 is critical for acquisition of pluripotency from cultured Arabidopsis tissues". **PLoS Genetics** 8: p. e1002911. doi:10.1371/journal. pgen.1002911.

Howe, G.A., et al. (2018): "Modularity in jasmonate signaling for multistress resilience". **Annual Reviews in Plant Biology** 69: pp. 387-415. doi:10.1146/annurev-arplant-042817-040047.

Ikeuchi, M., et al. (2016): "Plant regeneration: cellular origins and molecular mechanisms". **Development** 143: pp. 1442-1451. doi:10.1242/dev.134668.

Jacobo-Velazquez, D.A., et al. (2015): "Cross-talk between signaling pathways: The link between plant secondary metabolite production and wounding stress response". **Science Reports** 5: p. 8608. doi:10.1038/srep08608.

Kovaleva, V., et al. (2020): "Plant defensins from a structural perspective". **International Journal of Molecular Science** 21: p. 5307. doi:10.3390/ijms21155307.

Kragl, M., et al. (2009): "Cells keep a memory of their tissue origin during axolotl limb regeneration". **Nature** 460: pp. 60-65. doi:10.1038/nature08152.

Love, N.R., et al. (2014): "Carbohydrate metabolism during vertebrate appendage regeneration: What is its role? How is it regulated?" **BioEssays** 36: pp. 27-33. doi:10.1002/ bies.201300110.

Martin, P. (1997): "Wound healing-aiming for perfect skin regeneration". **Science** 276: pp. 75-81. doi:10.1126/ science.276.5309.75.

Mccusker, C., et al. (2015): "The axolotl limb blastema: cellular and molecular mechanisms driving blastema formation and limb regeneration in tetrapods". **Regeneration** 2: pp. 54-71. doi:10.1002/reg2.32.

Mhamdi, A., et al. (2010): "Arabidopsis GLUTATHIONE REDUCTASE1 plays a crucial role in leaf responses to intracellular hydrogen peroxide and in ensuring appropriate gene expression through both salicylic acid and Jasmonic acid signaling pathways". **Plant Physiology** 153: pp. 1144-1160. doi:10.1104/pp.110.153767.

Nguyen, C.T., et al. (2018): "Identification of cell populations necessary for leaf-to-leaf electrical signaling in a wounded plant". **Proceedings National Academy of Science USA** 115: p. 10178. doi:10.1073/pnas.1807049115.

Noman, A., et al., (2019): "PRRs and NB-LRRs: from signal perception to activation of plant innate immunity". **International Journal of Molecular Science** 20: 1882. doi:10. 3390/ijms20081882

O'Connor, J. T., et al. (2021): "Proteolytic activation of Growth-blocking peptides triggers calcium responses through the GPCR Mthl10 during epithelial wound detection." **Development Cell** 56: 2160-2175.e5. doi:10.1016/j.devcel.2021.06.020

Pazgier, M., et al. (2006): "Human β-defensins". **Cellular and Molecular Life Sciences** 63: p. 12941313. doi:10.1007/ s00018-005-5540-2.

Qian, C. & Cao, X.T. (2013): "Regulation of Toll-like receptor signaling pathways in innate immune responses". **Annual N Y Academy of Science** 1283: pp. 67-74. doi:10.1111/j.1749-6632.2012.06786.x.

Razzell, W., et al. (2013): "Calcium flashes orchestrate the wound inflammatory response through DUOX activation and hydrogen peroxide release". **Current Biology** 23: pp. 424-429. doi:10.1016/j.cub.2013.01.058.

Rymen, B., et al. (2019): "Histone acetylation orchestrates wound-induced transcriptional activation and cellular reprogramming in Arabidopsis". **Communication Biology** 2: p. 404. doi:10.1038/s42003-019-0646-5.

Shannon, E.K., et al. (2017). "Multiple mechanisms drive calcium signal dynamics around laser-induced epithelial wounds". **Biophysics Journal** 113: pp. 1623-1635. doi:10.1016/j.bpj.2017.07.022.

Shaw, T. & Martin, P. (2009): "Epigenetic reprogramming during wound healing: loss of polycomb-mediated silencing may enable upregulation of repair genes". **EMBO Reports** 10: pp. 881-886. doi:10.1038/embor.2009.102.

Schmid, M.R.,et al. (2019). "Insect hemolymph coagulation: Kinetics of classically and non-classically secreted clotting factors". **Insect Biochemistry and Molecular Biology**, 109: pp. 63-71. doi:10.1016/j.ibmb.2019.04.007.

Stewart, S., et al. (2009): "A histone demethylase is necessary for regeneration in zebrafish". **Proceedings National Academy of Science USA**, 106: pp. 19889-19894. doi:10.1073/pnas.0904132106.

Tanaka, E.M. & Reddien, P.W. (2011): "The cellular basis for animal regeneration". **Development Cell** 21: pp. 172-185. doi:10.1016/j.devcel.2011.06.016.

Toyota, M., et al. (2018): "Glutamate triggers long-distance, calcium based, plant defense signaling". **Science** 361: pp. 1112-1115. doi:10.1126/science.aat7744.

Weavers, H., et al. (2019): "Injury activates a dynamic cytoprotective network to confer stress resilience and drive repair". **Current Biology** 29: pp. 3851-3862.e4. doi:10.1016/j.cub.2019.09.035.

Weavers, H. and Martin, P. (2020): "The cell biology of inflammation: from common traits to remarkable immunological adaptations." **Journal of Cell Biology** 219: e202004003. doi:10.1083/jcb.202004003

Wehner, D. & Weidinger, G. (2015): "Signaling networks organizing regenerative growth of the zebrafish fin". **Trends in Genetics** 31: pp. 336-343. doi:10.1016/j.tig.2015.03.012.

Williams, H., et al. (2018): "Microbial host interactions and impaired wound healing in mice and humans: defining a role for BD14 and NOD2". **Journal of Investigative Dermatology** 138: pp. 2264-2274. doi:10.1016/j.jid.2018.04.014.

Zhou, L.H., et al. (2017): "The Arabidopsis trichome is an active mechanosensory switch". **Plant Cell Environment** 40: pp. 611-621. doi:10.1111/pce.12728.

Zhou, W.K., et al. (2019): "A Jasmonate signaling network activates root stem cells and promotes regeneration". **Cell** 177: pp. 942-956.e14. doi:10.1016/j.cell.2019.03.006.

מה אפשר ללמוד על חוסן ועל שיקום מיצורים חיים?

דקלה גיש, זווית בחינוך, עירוני ה חיפה

בימי מלחמה לא תמיד קל להיות חזקים או לדמיין את היום שאחרי, אך בעלי חיים וצמחים שונים הם מקור השראה ליכולת לשרוד ולגלות חוסן גם בתנאים עוינים ומאתגרים.
בפתיחת ספרו "על פני האדמה", חוקר הטבע דיוויד אטנבורו מתאר את העיר פְּרִיפְיָאט שבאוקראינה כ"מקום של ייאוש מוחלט": העיר, שנפגעה מקרינה בעקבות פיצוץ הכור הגרעיני בצ'רנוביל ב-1986, התרוקנה מתושביה, וכל שנותר בה הוא מבנים נטושים - תזכורת לחיים שהיו בה פעם. עם זאת, בסוף ספרו חוזר אטנבורו אל פריפיאט, ומספר שבשנים שחלפו מאז האסון התעורר בה הטבע, וכיום - צמחייה ובעלי חיים משגשגים בעיר. זוהי דוגמה אחת מני רבות לכך שהטבע מסוגל להתאושש מבין הריסות.
לפניכם פעילות לתלמידים המתקיימת בקבוצות ומציגה להם דוגמאות של דרכי שיקום בטבע המראות שחוסן הוא חלק טבעי ממי שאנחנו. הפעילות מבוססת על כתבה מאת רעות אלון באתר "זווית": "מה אפשר ללמוד על חוסן ושיקום אחרי אסון מהחי ומהצומח?"

פתיח לשיעור

שאלות לדיון קצר

1. מהו שיקום בעולם הטבע?
2. אילו דוגמאות של שיקום אתם מכירים?

משימה בקבוצות קטנות

כל קבוצה תקבל כרטיסייה ובה מידע על דוגמה מכתבה על התאוששות בטבע, וכן הנחיות למשימה ושאלות. בכל כרטיסיה דגש על מיומנות אחרת. מגוון הכרטיסיות מאפשר למורה לתת בחירה לתלמידיו ומענה לשונות בכיתתו.

היצור הימי ששב מן המוות

בעל חיים ימי יוצא דופן מאתגר גם את התפיסה עתיקת היומין של חיים ומוות. הבוטריל הפרחוני (*Botryllus schlosseri*) הוא יצור חסר חוליות החי במושבות בגודל סנטימטרים ספורים, על סלעים ואפילו על ספינות. תוחלת החיים של פרט בודד במושבה היא שלושה שבועות. פרטים צעירים גדלים מתוך הפרטים הבוגרים, הופכים לבוגרים בעצמם - ובסיום חייהם מתכווצים ונעלמים, בעודם בחיים, אל תוך המושבה - וממנה גדלים ניצנים חדשים. כך, המושבה ממשיכה לחיות עוד ועוד. מעבר לכך, מעגל החיים והמוות של הבוטריל לא נגמר ברמת הפרט הבודד: נמצא שהמושבה כולה מזדקנת - ואז מצעירה שוב, בפרקי זמן של תשעים יום, שבסופם התהליך חוזר על עצמו.

כרטיסיה 1: בוטיריל פרחוני - היצור ששב מן המוות - מחזורי חיים

רקע

הבוטריל הפרחוני (*Botryllus schlosseri*) הוא בעל חיים ימי המתחיל את חייו כפרט אחד בתוך מושבה, ומתחדש במחזוריות קבועה. בשלב מסוים הוא נספג לתוך המושבה, ומגופו נוצרים ניצנים חדשים, המאפשרים למושבה "לחיות מחדש" במעין מעגל חיים מחודש.

משימה

1. שאלות לחקירה:
   - תארו מחזור חיים של אורגניזם המוכר לכם (למשל, מחזור חיים של צמח).
   - במה שונה מחזור החיים של הבוטריל ממחזור החיים שתיארתם?
   - האם קיימים אורגניזמים נוספים בעלי מחזור חיים דומה?
2. משחקים במחזורי חיים:
   - חקרו בעזרת בינה מלאכותית דוגמאות רבות ככל האפשר לרצפים של מחזורי חיים. למשל: ביצה - זחל - גולם - פרפר בוגר - רבייה.
   - הכינו כרטיסיות לכל המונחים שתאספו בחקר שלכם: למשל: ביצה, זרע, גולם...
   - הניחו את הכרטיסיות בערימה, ערבבו ובקשו מחבריכם לסדר את הרצפים של מחזורי החיים בהתאם לסדר הנכון ובזמן הקצר ביותר.

הסויה השורדת בצ'רנוביל

אסונות גרעיניים כמו זה שאירע בצ'רנוביל הם בעלי השפעה הרסנית על האזור שבו התרחשו - אך מתברר שטבע יכול להתקיים אפילו בצל חשיפה תמידית לקרינה רדיואקטיבית. כך, חוקרים מסלובקיה שתלו פולי סויה בסמוך לצ'רנוביל - ומצאו שבצמחים קיים מנגנון המאפשר להם לשרוד ולהתפתח בתנאי עקה: הם גילו שחלבון בשם ציסטאין סינתאז (Cysteine synthase) האחראי להגנה על הצמח, נמצא בכמות גבוהה פי שלושה בפולי הסויה שגדלו בצ'רנוביל לעומת פולי סויה שגדלו באזורים אחרים.

כרטיסיה 2: סויה שורדת קרינה רדיואקטיבית בצ'רנוביל

רקע

אזור צ'רנוביל, שנפגע מאסון גרעיני, מכיל קרינה רדיואקטיבית מסוכנת. מדענים מצאו כי בצמחי סויה שגדלו באזור הרדיואקטיבי קיים ריכוז גבוה יותר של האנזים ציסטאין סינתאז המגן על הצמח. הם משערים שלאנזים זה יש קשר למנגנון המאפשר להם לשרוד בתנאים אלה.

משימה

1. א. בעקבות תוצאות המחקר על צמחי הסויה כִּתבו לפחות שלוש שאלות לחקירה.
   ב. בחרו שאלה אחת וחפשו תשובה לשאלה זו. בתשובתכם ציינו באילו מקורות השתמשתם.
2. כיצד התפתחה התכונה של ריכוז אנזים סינתאז גבוה יותר בצמחי סויה הגדלים באזורים שנפגעו מהקרינה הרדיואקטיבית בעקבות האסון? בתשובתכם היעזרו במושגים: ברירה טבעית ושונות גנטית.
3. מסע מחשבתי עם AI: עיצוב אורגניזם המותאם לסביבה קיצונית. היעזרו בכלי בינה מלאכותית בביצוע ההנחיות הבאות:
   א. בחרו סביבה קיצונית (למשל, סביבה מדברית, תת-מימית או קפואה) ותארו את המאפיינים שלה.
   ב. ציינו תכונות שיאפשרו לאורגניזמים לשרוד בסביבה זו.
   ג. "עצבו" אורגניזם שישרוד בסביבה שבחרתם:
   - תנו לאורגניזם שלכם שם.
   - ציינו מהם המנגנונים הביולוגיים המאפיינים אותו.
   - הסבירו את התאמתו לסביבה הקיצונית.
   - צרו איור של האורגניזם שלכם בעזרת הבינה המלאכותית, או איירו אותו בעצמכם.
   - חפשו אורגניזם אמיתי המתקיים בסביבה זו. האם יש דמיון בינו לבין האורגניזם שעיצבתם?

האלמוגים החסינים להתחממות מי-הים

דוגמה להסתגלות יוצאת דופן מגיעה אלינו משוניות האלמוגים - אחד מפלאי הטבע היפים והעשירים ביותר במגוון ביולוגי. עליית הטמפרטורות בעקבות פליטות גזי החממה (כמו פחמן דו-חמצני) גורמת לעלייה בטמפרטורת מי הים וברמת החומציות שלהם, והדבר פוגע קשות בשוניות אלמוגים רבות ברחבי העולם, המלבינות ומתות - ויחד איתן נעלם עולם עשיר של יצורים ימיים אחרים. עם זאת, בנוף המדאיג הזה קיים שביב של תקווה, המגיע מהשונית הביתית שלנו - שונית האלמוגים באילת: נמצא שהאלמוגים בים סוף עמידים יותר להשפעת הטמפרטורה של המים וחומציותם. מעבר לכך, למרות השינוי בתנאים, אלמוגים אלה אף ממשיכים להעמיד צאצאים, ללא שינוי בקצב ובאיכות. ייתכן שהדבר נעוץ בכך שמקורם ההיסטורי של אלמוגים באזורנו הוא במצר באב אל-מנדב הסמוך לתימן, שבו הטמפרטורות גבוהות מאוד - כלומר, לאלמוגים באזור הדרומי עמידות לחום, המעניקה להם יתרון גם כיום. לכן השונית שלנו היא מעין מקלט שחיים בו אלמוגים העמידים יותר לתנאי קיצון - ואלה, מעבר להישרדותם יוכלו לשמש גם "בנק גנטי" בעבור אלמוגי העתיד.

כרטיסיה 3: שונית האלמוגים באילת - מגוון ביולוגי, חשיבותו ושימורו

רקע

אלמוגים באילת עמידים יותר לטמפרטורות גבוהות ולרמת חומציות גבוהה יותר של הים בהשוואה לאלמוגים אחרים בעולם. ייתכן שעמידותם קשורה להיסטוריה שלהם באזורי חום קיצוני. שונית האלמוגים באילת נחשבת כיום ל"בנק גנטי" לאלמוגים עמידים במיוחד.

משימה

1. היעזרו במרשתת והשיבו על השאלות הבאות:
   - מהו אלמוג?
   - מדוע שונית האלמוגים באילת נחשבת לייחודית?
   - אילו איומים עלולים לפגוע בה?
   - איך השונית משפיעה על הסביבה המקומית, על הכלכלה ועל המחקר המדעי?
   - מדוע אילת נחשבת למקלט או "בנק גנטי" לאלמוגים עמידים?
   - מה אפשר לעשות כדי להגן על שונית האלמוגים באילת?
2. כתיבת מכתב לראש העיר על חשיבות שימור שונית האלמוגים באילת:

באילת מתכננים להקים טיילת חדשה, וזו עלולה לפגוע משמעותית בשונית האלמוגים. במשימה זו תתבקשו לכתוב מכתב לראש העיר ובו תציגו טיעונים לחשיבות השימור - נסחו בעצמכם שלושה טיעונים. בחלק זה של המשימה היעזרו בבינה מלאכותית כדי לכתוב את מכתבכם.

א. בקשו מה-AI לכתוב טיעונים משלו על חשיבות השימור של שונית האלמוגים באילת.

ב. ערכו השוואה בין הטיעונים שלכם לאלו שהציגה הבינה המלאכותית - האם חלק מהטיעונים חופפים? אם הבינה המלאכותית הציעה טיעונים חדשים - האם הם הגיוניים? האם אתם מסכימים איתם?

ג. נסחו את מכתבכם לראש העיר. כל שני חברים בקבוצה יהיו אחראים לחלק אחר במכתב:
   - מבוא: הצגת החשיבות של שונית האלמוגים באילת.
   - תיאור האיומים: פירוט הסכנות הנשקפות לשונית.

ד. כתבו יחד הצעות לפתרונות הכוללים רעיונות לשימור ושיקום השונית והוסיפו אותן למכתב.

טיפים לעבודה

1. בקשו מהבינה המלאכותית להציע משפט פתיחה מרשים על ייחודיות שונית האלמוגים באילת. חִקרו בעזרתה את האיומים הנפוצים על שוניות בעולם, ובקשו רעיונות לפתרונות בני-קיימא וטכנולוגיות חדשות לשימור שוניות.

2. המלצה על כלים נוספים, גרפיים: בקשו מכלי AI כמו MidJourney לייצר תמונה של שונית אלמוגים והשתמשו בכלים כמו Canva או Google Docs לעיצוב מכתב אסתטי ומושך.

השממיות המצמיחות מחדש את זנבן

דוגמה מעניינת אחרת שייכת לעולם הזוחלים: לטאות ושממיות ממינים שונים פיתחו מנגנון הישרדות והגנה המאפשר להן לנתק את הזנב, וכך להטעות טורפים. מדובר בדוגמה בולטת לאוטוטומיה - תופעת ניתוק עצמי של אברי גוף שנצפתה אצל בעלי חיים שונים, החל מסלמנדרות, דרך תמנונים ועד עכבישים. במקרה של הלטאות והשממיות, ההפתעה האמיתית מגיעה דווקא אחרי הניתוק - כשהחיה מגדלת מחדש איבר דמוי זנב. אומנם בגרסה המחודשת של הזנב אין עצמות ושרירים (בניגוד לזנב המקורי), אך הוא מפצה על האיבר האבוד ומאפשר לה תנועה יציבה.

כרטיסיה 4: שממיות המצמיחות מחדש את זנבן - הישרדות

רקע

שממיות מסוגלות לנתק את זנבן כדי להטעות טורפים, ולאחר מכן לגדלו מחדש. תהליך זה נקרא אוטוטומיה. אף כי הזנב המחודש אינו זהה במבנהו לזנב המקורי, הוא מאפשר לשממית תנועה ותפקוד תקין.

משימה

1. שאלות לחקירה:
   - חקרו את המחיר שהשממית משלמת על אובדן הזנב: אילו תפקודים חשובים הזנב ממלא בעבור השממית, וכיצד אובדן הזנב משפיע על חייה? האם יש הבדל ביכולת התנועה של שממית ללא זנב לעומת שממית עם זנב? כמה אנרגיה שממית משקיעה בתהליך צמיחת הזנב מחדש, והאם זה משפיע על הישרדותה? האם יש מחיר נוסף (למשל, תחרות על משאבים או הזדווגות) לאובדן הזנב בשממיות?
   - חקרו את התועלת של האוטוטומיה בעבור השממית: באילו מצבים ניתוק הזנב יוצר יתרון לשממית, ומהם הסיכויים לשרוד במצבים אלו? כמה זמן השממית זוכה להסחת דעתו של הטורף כאשר היא מנתקת את הזנב?
   - חקרו את תהליך צמיחת הזנב מחדש: כמה זמן נמשכת הצמיחה מחדש של זנב השממית ומהם שלבי התהליך? במה שונה הזנב החדש מהזנב המקורי? אילו גורמים חיצוניים (כמו טמפרטורה) משפיעים על איכות צמיחת הזנב החדש?

2. פיתוח משחק "לקבל החלטות כמו שממית":
עליכם לפתח משחק שבו המשתתפים הם שממיות הנמצאות בעולם מלא טורפים מסוכנים. לכל פעולה שהן יעשו תהיה השפעה על הסיכוי שלהן לשרוד, להימלט ולהתאושש.

   א. כתבו כללים בסיסיים למשחק
   למשל - לכל קבוצה יש זנב אחד, שאפשר לנתק פעם אחת בלבד. כל החלטה יכולה לשפר או להחמיר את מצבכם, ותקבלו ניקוד לפי ההחלטות שתעשו.

   ב. צרו תחנות הישרדות, שכל אחת מהן מייצגת תרחיש שבו השממית נתקלת בטורף או באתגר סביבתי.
   למשל -

   תרחיש תחנה 1: מפגש עם טורף מהיר: "נחש מתקרב אליכם במהירות".

   תרחיש תחנה 2: "אתם במרכזו של שטח פתוח. ינשוף מבחין בכם ומתחיל לעוף לעברכם."

   תרחיש תחנה 3: "ניתקתם את הזנב ושרדתם. עכשיו עליכם להתאושש כדי לשחזר תפקוד תקין."

   ג. לכל תרחיש צרו לפחות שלוש אפשרויות. בעזרת בינה מלאכותית קבעו לכל אפשרות מדד סיכויי הישרדות ונקדו אותו.
   למשל - להסתתר מאחורי סלע, לרוץ במהירות לכיוון הצמחייה, לנתק את הזנב ולנסות להסיח את דעתו של הטורף...

   ד. שחקו עם חבריכם את המשחק שפיתחתם.

הנמלים המטפלות באחיותיהן הפצועות

נמלים מהמין מגפונרה אנאליס (*Megaponera analis*) פועלות לפי עיקרון שכולנו ראינו היטב את חשיבותו מאז פרוץ המלחמה: התגייסות קהילתית למען הפרט. נמלים אלו, המצויות באפריקה, ניזונות באופן בלעדי מטרמיטים - ולעיתים קרובות הן נפצעות קשה בקרב עימם ואף מאבדות חלק מגפיהן. אבל הפועלות הבריאות ששרדו את הלחימה לא נוטשות את אלו שנפגעו, אלא מגלות אלטרואיזם[1] יוצא דופן ואוספות את הפצועות בחזרה לקן. שם, הנמלים שלא נפצעו מנקות את הפצעים הפתוחים של חברותיהן באמצעות פיהן, והטיפול המסור מצליח להציל את חייהן של לא פחות מכ-90 אחוז מהנמלים הפצועות.

כרטיסיה 5: הנמלים המטפלות באחיותיהן הפצועות - לומדים מהנמלה

רקע

נמלים מהמין *Megaponera analis* מטפלות בחברותיהן שנפצעו בקרבות נגד טרמיטים. הנמלים הפצועות נלקחות בחזרה לקן, שם חברותיהן מטפלות בהן ומעלות את סיכויי ההישרדות שלהן בכ-90%.

משימה

1. שאלות לחקירה:
   - מהם היתרונות האבולוציוניים של התנהגות הנמלים?
   - מהם המחירים הכרוכים בעזרה ההדדית?
   - תנו דוגמה נוספת להתנהגות שבה אורגניזמים עוזרים זה לזה בטבע.
   - אילו דוגמאות לטיפול וסיוע הדדי אפשר למצוא בחברה האנושית?

2. לך אל הנמלה עצל, ראה דרכיה וחכם: במשימה זו תבנו תוכנית המבוססת על עקרונות התנהגות הנמלים.

א. חִשבו בקבוצה כיצד אפשר ליישם מערכות שיתוף פעולה וסיוע הדדי בבתי ספר.

ב. העלו על הכתב מגוון בעיות חברתיות שאתם נתקלים בהן (בדידות, חרם או עזרה לתלמידים מתקשים).

ג. בחרו אחת מהבעיות שהעליתם ובנו תוכנית לטיפול בבעיה באמצעות שיתוף פעולה. יש לכלול התייחסות להיבטים הבאים:
   - מהי הבעיה שהתוכנית מנסה לפתור?
   - כיצד התוכנית תעבוד?
   - מהם האתגרים בהטמעתה?
   - מה הקשר של התוכנית להתנהגות הנמלים?

ד. הציגו בפוסטר את התוכנית שיצרתם.

1 אלטרואיזם: בביולוגיה - התנהגות המסייעת לאחרים על חשבון הכשירות (fitness) של הפרט המסייע.

התאוששות אוכלוסיית הצבוע המפוספס: סיפור של הסתגלות

פרופ' ראובן יוסף, תיכון עירוני ע"ש יצחק רבין, אילת, ואוניברסיטת בן גוריון בנגב - קמפוס אילת.

מאמר זה מתבסס בעיקרו על עבודה שערך עזרא חדד (רשות הטבע והגנים), ועימו שיתפתי פעולה בפרסום נתוניו הרבים, ואשר צילם את התמונות המלוות מאמר זה. שותפים נוספים למחקר ולפירסומים הם אמיר בלבן, החברה להגנת הטבע; ופרופ' יעקב קוסיצ'קי, דיקן אוניברסיטת אדם מיקיאביץ', פוזנן, פולין.

במרחבי ישראל חי יצור שלרוב אינו זוכה להתייחסות רבה עקב התנהגותו החבויה, שהצליח להסתגל לשינויים שהביאה עימה ההתפתחות האנושית. הצבוע המפוספס (*Hyaena hyaena*), שבעבר היה נפוץ ברחבי המזרח התיכון, חווה ירידה דרסטית בגודל האוכלוסייה עקב הרעלות מכוונות ואובדן שטחי מחיה, במיוחד במהלך המאה ה-20 (חדד, 2015; Mendelssohn, 1972; Hadad et al., 2023a). ירידה זו גרמה לכך שהמין סווג כ"סיכון קרוב להכחדה" (Near Threatened) ברמה העולמית ו"כפוף לסיכון הכחדה" (Vulnerable) במזרח התיכון. אך למרות כל הקשיים, הצבוע המפוספס מציג חזרה מרשימה.

שובו המפתיע

הצבוע המפוספס, שהיה פעם סמל לאובדן, נעשה כעת דוגמה לעמידות. מחקרים עדכניים מצביעים על שיקום משמעותי של אוכלוסיית הצבוע בישראל, עם הערכות העולות על כ-1,000 פרטים (Hadad et al., 2023a, b). תהליך זה לא התרחש במקרה, אלא הוא סיפור של הסתגלות. בניגוד למינים רבים הנמצאים על סף הכחדה, הצבוע הצליח לשגשג על ידי ניצול השינויים שדווקא הובילו לירידה באוכלוסייתו - ההתפשטות האנושית וזמינות מקורות המזון, במיוחד פסולת אורגנית הנוצרת על ידי פעילות אנושית.

בישראל, הצבוע המפוספס הוא טורף הניזון בעיקר מפגרים ומאשפה (Hadad et al., 2024a). בעוד שמזונו עשוי להיראות שולי, הוא אִפשר לצבוע למלא נישה אקולוגית שבה מעט טורפים מסתדרים, ולמצוא מקום קיום בערים ובאזורים חקלאיים, הודות לאוכל שזורקת החברה האנושית.

עם זאת, הסתגלות זו אינה מגיעה ללא אתגרים. הקִרבה בין בני האדם לצבועים הובילה לגידול באירועים של התנגשות עם רכבים. בין השנים 2008-2021 נרשמו 622 תקריות שבהן פגעו רכבים בצבועים, ו-555 מהן היו קטלניות. היתקלויות אלה נפוצות במיוחד בחורף, בכבישים החוצים את שטחי המחיה של הצבועים במרחבים הצחיחים והחצי-צחיחים של ישראל. השעות הקטלניות ביותר הן שעות הבוקר המוקדמות, שבהן הצבועים פעילים ביותר.

מיתוס הטריפה של בעלי חיים

הגדלת הנוכחות של הצבוע המפוספס באזורים חקלאיים עוררה חששות בקרב חקלאים, בעיקר בנוגע לאיום פוטנציאלי על בעלי חיים (חדד, 2022; 2017). נכון, הצבוע פוקד לעיתים אזורים שבהם רועים עדרים, והם נצפו בסמוך לבקר ולצאן. עם זאת, אין עדויות ממוסדות התומכות בטענה שהצבוע המפוספס צד בהצלחה בעלי חיים ביתיים או מבויתים. תזונתם העיקרית מורכבת מפגרים, ורוב האינטראקציות שלהם עם בעלי חיים ביתיים הן ככל הנראה מזדמנות ולא למטרות טריפה. בכל זאת, הדעה הציבורית נוטה להיתפס על טריפה של בעלי חיים בשל הקרבה של הצבוע ליישובים.

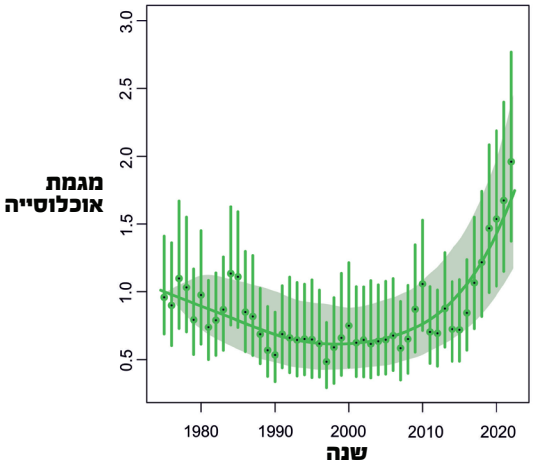
האמת היא שהצבוע המפוספס מצא דרך לחיות לצד בני אדם, אולם הקיום המשותף הזה טומן בחובו מתח מתמיד (Tal, 2024). היכולת המרשימה של הצבועים להסתגל לסביבות עירוניות הובילה לשינוי בהתנהגותם, ונראה כי הם מסתגלים להתנהלות בסמוך למפעלי חקלאות וגם ממש בתוך הערים עצמן, תוך ניצול השלכת פגרים בשדות. שינוי זה הוביל לעלייה במקרים של חיכוך עם בני אדם.

תצלום: עזרא חדד

בעיה נוספת היא התדמית המיוחסת לצבוע כחיה המייצגת את עולם המתים, מאחר שנצפה מוציא חלקי גופות או עצמות מקברים, או את הרשע, כמו בסרט של דיסני "מלך האריות" (חדד, 2017). מעבר לכך, קיימת אי-הבנה בנוגע למגוון המינים של הצבועים, עם התנהגויות שונות, באזורי תפוצתם בעולם: יש מיני צבועים התוקפים גם בני אדם, לרוב משום שהתגרו בהם או פגעו בהם בדרכים שונות. אך הבדל זה מקבל משקל שולי כשהאדם נפגע מצבועים ממינים מסוימים, ולכן הפגיעה משויכת לכלל הצבועים. כמעט כל האירועים של תקיפות אדם הם באפריקה, שם הצבוע הנקוד (*Crocuta crocuta*) חי וצד בקבוצות גדולות ואיננו חושש גם מהאדם (למשל Macielak et al., 2022).

לקחים מהנוף

במהלך 47 השנים האחרונות נרשמה עלייה משמעותית באוכלוסיית הצבוע המפוספס בישראל (ראו איור 1). במהלך תקופה זו נצפו 5,860 פרטים בכל רחבי ישראל וביהודה ושומרון. בשנת 2022 נרשם שיא של 703 פרטים, מה שמעיד על מגמת עלייה ליניארית במספר הפרטים לאורך השנים (Hadad et al., 2023a, b).



איור 1: מגמת האוכלוסייה של צבוע מפוספס בישראל משנות השבעים של המאה הקודמת עד היום.

העלייה באוכלוסיית הצבועים נובעת מכמה גורמים. אחד הגורמים המרכזיים הוא זמינות הטרף. התפתחות אנושית אינטנסיבית הגדילה את זמינות המזון לצבועים, במיוחד באזורים חקלאיים ובסביבות עירוניות. נוסף על כך, הכחדת הנמר (*Panthera pardus nimr*) השאירה את הצבועים כטורף הגדול ביותר בישראל, מה שהפחית את התחרות ביניהם ובין מיני טורפים אחרים.

מודעות ציבורית משחקת אף היא תפקיד חשוב במגמת העלייה (Tal, 2024). עלייה במודעות הציבורית וביכולת הטכנולוגית לשפר את תהליכי התצפית והדיווח על הצבועים הובילה להתרבות דיווחים על נוכחותם. עם זאת, יש להיזהר בהערכת הסטטוס של האוכלוסייה, שכן ישנם עדיין לחצים אקולוגיים ואנושיים, כמו פגיעות מכוונות, סחר בלתי חוקי והריגות נקמניות, שיכולים להשפיע על האוכלוסייה (חדד, 2021).

בצפון ישראל, במיוחד באזור הר הכרמל, אוכלוסיית הצבועים פרחה הודות לשפע של "מזיקים חקלאיים", כגון חזיר הבר והתן הזהוב. פגרים של בעלי חיים אלו, שהשאירו בשטח ציידים, היו מקור שופע למזון בעבור הצבועים. התוצאה הייתה גידול

תצלום: עזרא חדד

במספרם של הצבועים, שאוכלוסייתם הגיעה לצפיפות מרשימה של 2.1 פרטים לכל 100 קמ"ר.

אף על פי שהצבוע המפוספס בישראל חווה עלייה באוכלוסייה, יש צורך במעקב מתמשך, כדי להבטיח את המשך קיומם של מינים אלו בסביבה המשתנה.

רבייה

במחקרנו על הרבייה של הצבוע המפוספס בישראל, שנמשך 15 עונות, צפינו ב-33 מאורות עם 67 אירועי רבייה (Hadad et al., 2024b). במהלך המחקר הצלחנו לעקוב אחר 151 גורים. לרוב, נקבה המליטה בין 1 ל-4 גורים, כאשר רוב ההמלטות התרחשו בין ינואר ליוני. נמצא כי מספר הגורים היה קשור באופן חיובי לאזורים מישוריים ולשיחים בקרבת המאורה. הממצאים מצביעים על כך שהצלחה רבייתית תלויה בתנאי הסביבה שבהם ממוקמות המאורות, מה שמבטיח הצלחה רבייתית עקבית לאורך זמן.

במהלך המחקר זיהינו תופעה מעניינת שלא הייתה ידועה עד כה במין זה, אשר נחשב ליחידני (solitary), אף שקיימות תצפיות מעניינות של מערכת סוציאלית מורכבת שלא דווחה לפני כן (Tichon et al., 2020): עם חלק מהנקבות נשארו גורות משנים קודמות שעזרו לאם לגדל את האחים הצעירים (חדד ואחרים, 2023; Hadad et al., 2023c). אנו משערים ששתיהן מרוויחות מהעסקה - בדרך זו, ה"בייביסיטרית" רוכשת ניסיון בגידול גורים והכשרתם לחיים בטבע הישראלי, עוד לפני שתתרחק ותקים משפחה בעצמה; ואילו האם נהנית מסיוע צמוד והקלה בגידול צאצאיה.

אתגרים של שיתוף פעולה

למרות שגשוג האוכלוסייה, יחסם של בני אדם לצבוע בישראל הוא שלילי לעיתים, ומלא חששות מהחיה הגדולה (חדד, 2022; 2017). גידול אוכלוסיית הצבוע באזורים מסוימים מעורר דאגות בנוגע להשפעתם על בריאות הציבור או על בעלי חיים חקלאיים. חיכוכים עם בעלי חיים כבר התרחשו בכרמל בעקבות חזירי בר, ואם הצבועים יוסיפו להתרבות, עלול להיות צורך בניהול זהיר.

מחקרנו מצביע על כך שצבועים מפוספסים נוטים להתרכז באזורים עירוניים ובסביבת ערים גדולות, שם הם נמשכים לאזורי מגורים בשל זמינות המזון, כמו פסולת ביתית. אך הם נמנעים מכניסה לאזורים סבוכים או מיוערים. מסוכנים במיוחד הם אזורים פרבריים ואזורים הסמוכים לכבישים מהירים, שם מתרחשות תאונות רבות עם רכבים (Hadad et al., 2022). בעקבות מיפוי וניתוח של נתוני התצפיות, גילינו שעיקר הפגיעות מתרחש בכבישים בהרי יהודה המובילים לירושלים ממערב, בכביש בין באר שבע למצפה רמון, ובחלק הצפוני של כביש הערבה - צומת סדום. הצורך במיפוי אזורים אלו ובהבנת הדינמיקה של תנועת הצבועים בסביבות אלו הוא קריטי לפיתוח אסטרטגיות שימור אפקטיביות ולצמצום מספר התאונות.

כדי להבטיח את הישרדות הצבוע המפוספס, מדענים וציידים מדגישים את הצורך בתוכניות חינוכיות לציבור. אנשים צריכים להבין כי הצבוע אינו מסכן את בני האדם, וכי תפקידו האקולוגי חיוני - בין היתר משום שהוא מספק "שירותים סביבתיים", בניקוי פסולת וסילוק פגרים ושיירים מן הטבע, דבר המונע התפשטות מחלות ותורם לרמה גבוהה של בריאות הציבור. נוסף על כך, שמירה על הצבוע המפוספס היא שמירה על איזון במערכת האקולוגית של מדינת ישראל.

הצצה לעתיד

בהביטנו לעתיד, הצבוע המפוספס הוא סיפור של זהירות ותקווה. למרות העלייה בסיכון לחיכוכים, ההסתגלות שלו מספקת אפשרות לשיתוף פעולה טוב בין בני אדם ובינו.

תצלום: עזרא חדד

רשימת הספרות

חדד, ע. (2015): "צבועים בישראל". **טבע הדברים 232**: עמ' 14-3.

חדד, ע. (2017): "על רדיפת הצבוע בתרבות האנושית, חלק ב". **טבע הדברים 258**: עמ' 78-68.

חדד, ע. (2021): "ישראל הפכה לגן עדן ומקלט לצבוע המפוספס, על תפוצתו של הצבוע המפוספס בעולם". **טבע הדברים 310**: עמ' 63-52.

חדד, ע. (2022): "העוול שנעשה לצבוע המפוספס בישראל". **טבע הדברים 326**: עמ' 19-11.

חדד, ע. ואחרים. (2023): "הורות תחליפית באמצעות עוזרים (בייביסיטר) אצל הצבוע המפוספס (*Hyaena hyaena*)". **טבע הדברים 334**: עמ' 19-11.

Hadad, E., et al. (2023a): "Population trends of striped hyena (Hyaena hyaena) in Israel for the past five decades." **Scientific Reports 13**: p. 3982. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31137-2

Hadad, E., et al. (2023b): "Spatial modeling of road collisions of Striped Hyena (*Hyaena hyaena*) in Israel". **Ecological Research 38**: pp. 664-675. doi: 10.1111/1440-1703.12399.

Hadad, E., et al. (2023c): "Alloparenting by helpers in striped hyena (*Hyaena hyaena*)". **Animals 13**: p. 1914. doi.org/10.3390/ani13121914

Hadad, E., et al. (2024a): "Neo-taphonomy of striped hyena (*Hyaena hyaena*) in Israel". **Journal of Arid Environments 220**: p. 105103. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105103

Hadad, E., et al. (2024b): "Reproductive ecology of free-ranging striped hyena (Hyaena hyaena) in central Israel". **Ecological Research 39**: pp. 621-799. doi.org/10.1111/1440-1703.12467

Macielak, R. J., et al. (2022): "Hyena bite injury to the neck leading to laryngotracheal separation". **Cureus 14**: p. e29104. DOI: 10.7759/cureus.29104

Mendelssohn, H. (1972): "The impact of pesticides on bird life in Israel". **Bull. International Council for Bird Preservation 11**: pp. 75-104.

Tal, A. (2024): "A Charismatic Hyena: Insights for Human-Wildlife Interaction in Shared Urban Environments". **Case Studies in the Environment 8**: p. 2302549. https://doi.org/10.1525/cse.2024.2302549.

Tichon, J., et al. (2020): "Social interactions in striped hyena inferred from camera trap data: is it more social than previously thought?" **Current Zoology 66**: pp. 345-353.

בחזרה לשגרת למידה:

למידה בהכוונה עצמית בהוראת הביולוגיה ככלי לשיקום ולצמיחה

מעיין אגמון[1], בית הספר הבינלאומי Eastern Mediterranean International School (EMIS), רמת השרון; החוג לחינוך מתמטי, מדעי וטכנולוגי, בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל אביב.
סברין יאסין, תיכון מקיף אלבטוף, עראבה; החוג לחינוך מתמטי, מדעי וטכנולוגי, בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל אביב.
קלודיה סאבא בטשון, תיכון חדש דרכא, בת ים; החוג לחינוך מתמטי, מדעי וטכנולוגי, בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל אביב.
עידית אדלר, החוג לחינוך מתמטי, מדעי וטכנולוגי, בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל אביב.

תקציר

המאמר עוסק בחשיבות של למידה בהכוונה עצמית (Self-regulated learning — SRL) בתהליך החזרה לשגרה, שיקום וצמיחה של תלמידים לאחר משבר, בדגש על הוראת הביולוגיה. למידה בהכוונה עצמית מוגדרת כתהליך פעיל שבו תלמידים מציבים מטרות, מנטרים ומווסתים את התהליכים הקוגניטיביים, המוטיבציוניים, ההתנהגותיים וההקשריים שלהם. במאמר מוסברים ההיבטים השונים של תהליך זה, לצד הצגת מודל בן ארבעה שלבים לפיתוח מיומנויות ויסות עצמי. המאמר מדגים דרכים מעשיות לשילוב המיומנויות הללו בהוראת הביולוגיה באמצעות פרויקט "ביוחקר ברשת", בדגש על שילוב אסטרטגיות לוויסות הלמידה במהלך החקר השיתופי. גישה זו מקנה לתלמידים כלים חיוניים להתמודדות עם האתגרים בלמידה לאחר משבר, תוך שימור הוראת הידע והמיומנויות הנדרשות בתחום הביולוגיה. המאמר מציע דרכים מעשיות למורים לשלב אסטרטגיות של למידה בהכוונה עצמית בכיתה, ויכול לסייע למורים המעוניינים לשלב עקרונות של למידה בהכוונה עצמית במהלך ההוראה בכיתה.

מבוא

משברים מובילים לשינויים עצומים ודרמטיים בחיי הפרט והקהילה. בעקבותיהם, עלולים גם תלמידים להתמודד עם מציאות מורכבת, הכוללת אובדן שגרה, תחושת חוסר ודאות, מתח, פחד וחוסר ביטחון. מציאות מורכבת זו משפיעה על יכולת הריכוז של התלמידים ועל המוטיבציה שלהם ללמוד (Dubovi & Adler, 2024). המתח הנפשי, החשש מהעתיד או הפגיעה בשגרה היומיומית עלולים לגרום לתחושת חוסר רלבנטיות בלמידה ואובדן המוטיבציה להמשיך בתהליכים לימודיים רגילים. תלמידים עלולים להרגיש מנותקים מהסביבה החינוכית, דבר העלול להוביל לירידה בהישגים האקדמיים ובתחושת היכולת האישית. תהליכי השיקום והחזרה לשגרה, המהווים בעצמם תהליך מורכב, הופכים למאתגרים אף יותר בעקבות אובדן העניין והמוטיבציה ללמוד (Dubovi & Adler, 2024), במיוחד לאחר תקופה ארוכה של משבר ויציאה משגרת הלמידה.

למידה בהכוונה עצמית יכולה לסייע לתלמידים להתמודד עם אתגרים אלו, על ידי הקניית כלים שיאפשרו להם ללמוד לווסת את תהליכי הלמידה, ליצור שגרת למידה שהם עצמם שולטים עליה, ובכך להקל על תהליכי החזרה לשגרה. במאמר נדון בחשיבות של למידה בהכוונה עצמית באופן כללי, ובאופן ספציפי – לאחר תקופת משבר, בתהליך השיקום והחזרה לשגרה. נפרט על היבטים קוגניטיביים, מוטיבציוניים, התנהגותיים והקשריים (ראו בהמשך) של למידה בהכוונה עצמית, וחשיבות המורים במינוף הזדמנויות לעיסוק בהיבטים הללו במהלך הלמידה. נציע מודל לתמיכה במיומנויות למידה בהכוונה עצמית במהלך ההוראה, ונשתמש בו על מנת להדגים כיצד אפשר לשלב היבטים אלו במהלך פרויקט "ביוחקר ברשת", כדי להקל את החזרה של התלמידים לשגרת למידה.

מהי למידה בהכוונה עצמית?

למידה בהכוונה עצמית (Self-regulated learning — SRL) הוגדרה על ידי פינטריץ' (Pintrich, 2000) כתהליך פעיל שבמהלכו הלומדים מציבים מטרות ללמידה, מנטרים, מנהלים ומעריכים את התהליכים הקוגניטיביים, המוטיבציה, ההתנהגות וההיבטים ההקשריים – כדי להשיג את המטרות תוך כדי הרחבת האוטונומיה שלהם (Pintrich, 2000, 2004; Schunk & Zimmerman, 2012). מיומנות זו נחשבת לאחת המיומנויות העיקריות של המאה ה-21, וחשובה מאוד ליכולת להתקיים בעולם המודרני (EU Council, 2002; NRC, 2012; OECD, 2018; Zimmerman, 2013). מכאן שפיתוח מיומנות של למידה בהכוונה עצמית נחשב לאחת המטרות המרכזיות של החינוך.

מתוך מגוון המודלים הקיימים (Panadero, 2017), המחקר הנוכחי מתבסס על המודל המקיף של פינטריץ' (Pintrich, 2000, 2004), הכולל מספר משמעותי של תהליכים שאפשר ליישם במהלך ההוראה (Hoops et al., 2016; Kizilcec, 2017; Moote, 2019) (ראו טבלה 1).

על פי המודל של פינטריץ' (Pintrich, 2000, 2004), למידה בהכוונה עצמית כוללת ארבעה היבטים: קוגניציה, מוטיבציה, התנהגות והקשרים חינוכיים. כל אחד מההיבטים הללו מאופיין בארבעה שלבים: תכנון והגדרת מטרות, ניטור, ניהול תהליך ורפלקציה והערכה. השלבים הללו יכולים להתרחש במקביל ובאופן דינמי (Pintrich, 2000, 2004). בהמשך הפרק נפרט על אודות כל אחד מההיבטים של למידה בהכוונה עצמית על פי השלבים השונים של מסגרת תאורטית זו (Pintrich, 2000, 2004).

היבטים קוגניטיביים של למידה בהכוונה עצמית

ההיבט הקוגניטיבי מתמקד באסטרטגיות קוגניטיביות שאפשר להשתמש בהן כדי ללמוד ולבצע משימה, כמו גם באסטרטגיות שנועדו לנטר ולנהל את התהליכים הקוגניטיביים (מטה-קוגניציה; Pintrich, 2000). על מנת לווסת תהליכים קוגניטיביים, על הלומדים להיות מעורבים בתהליכים מטה-קוגניטיביים הכוללים התבוננות חיצונית, ניטור וניהול של תהליכי הלמידה

1 הכותבות לפי סדר האל"ף-בי"ת

טבלה 1: המסגרת התאורטית של פינטריץ' (Pintrich, 2000) ללמידה בהכוונה עצמית

היבטים של למידה בהכוונה עצמית

שלבים	קוגניציה	מוטיבציה	התנהגות	הקשר
תכנון מקדים	תכנון והצבת יעדים; עירור ידע קודם; עירור אסטרטגיות למידה.	הצבת מטרות; הערכת רמת קושי; הערכת מסוגלות עצמית; הערכת ערך המשימה; הערכת העניין במשימה.	תכנון השקעת זמן; תכנון השקעת מאמץ מנטלי.	תפיסות על המשימה; תפיסות על ההקשר החינוכי.
ניטור	ניטור תהליכים קוגניטיביים.	ניטור מוטיבציה.	ניטור היבטים התנהגותיים.	ניטור שינויים במשימה ובהקשר החינוכי.
ניהול	בחירה והתאמה של אסטרטגיות קוגניטיביות.	בחירה והתאמה של אסטרטגיות לניהול מוטיבציה.	בחירה והתאמה של אסטרטגיות לניהול התנהגות.	בחירה והתאמה של אסטרטגיות לניהול תהליכים הקשריים.
רפלקציה והערכה	הערכת התהליכים הקוגניטיביים במהלך הלמידה.	הערכת המוטיבציה כפי שבאה לידי ביטוי במהלך המשימה.	הערכת ההיבטים התנהגותיים כפי שבאו לידי ביטוי במהלך המשימה.	הערכת ההתנהלות מבחינת ההיבטים ההקשריים כפי שבאו לידי ביטוי במהלך המשימה.

(Flavell, 1987;Schraw & Dennison, 1994; Schwartz et al., 2021). תחילה, על הלומדים **לתכנן**[2] את תהליך הלמידה – להציב למשימה יעדים ברורים ובני השגה, שיהיו המדד להצלחתם. נוסף על כך, על הלומדים לעורר את הידע הקודם הדרוש להם להשלמת המשימה, וזאת על מנת לקשר בין הידע החדש לבין ידע הקיים ברשותם, ובכך להקל עליהם את תהליך הלמידה. על הלומדים להציע אסטרטגיות קוגניטיביות שיסייעו להם להשלים את המשימה, כמו למשל: מרקור של היבטים חשובים במשפטים שיסייעו להם להבחין בין עיקר לטפל, או קריאה בקול רם על מנת לוודא בהירות של טקסט (Schraw, 1998). במהלך ביצוע המשימה, על הלומדים **לנטר** את תהליכי הלמידה של עצמם אל מול המטרות שהציבו – האם הם עומדים במטרות? האם הם מבינים את החומר הנלמד? האם הם מרגישים שהם על דרך המלך, או לחלופין חשים בלבול או חוסר ודאות? בעקבות תהליכי הניטור, עליהם **לנהל** את האסטרטגיות שהם משתמשים בהן, ואולי אף להחליף את האסטרטגיות הללו בכאלה שיהיו יעילות יותר בעבורם. וחשוב מכול – בסוף תהליך הלמידה, על הלומדים לערוך **רפלקציה** מעמיקה ולבחון את אופן הלמידה שלהם, הן ברמת התוכן והעמידה מול היעדים שהציבו לעצמם, והן ברמת האסטרטגיות שהם השתמשו בהן. רפלקציה זו היא קריטית להמשך הלימודים, ובעיקר – כדי שיוכלו לסגל לעצמם מיומנויות למידה למשימות הבאות.

מוטיבציה ותהליכי למידה בהכוונה עצמית

ההיבט המוטיבציוני עוסק באמונות של אנשים על אודות עצמם ועל אודות המשימה שעליהם לבצע, הכוללות אמונות בדבר המסוגלות העצמית שלהם (Self-efficacy judgments), ערך המשימה בעיניהם, העניין שלהם במשימה, וכן תגובות רגשיות חיוביות ושליליות כלפי עצמם או כלפי המשימה (Pintrich, 2000). לכן ויסות של מוטיבציה כולל פעמים רבות ניסיונות של הלומדים לווסת אמונות ותפיסות הקשורות למוטיבציה (מטה-מוטיבציה Miele & Scholer, 2018; Miele et al., 2020; Scholer et al., 2018). בתחילת המשימה, על הלומדים **להעריך** את רמת הקושי של המשימה בעיניהם, ובהתאם לכך את יכולתם לבצע את המשימה, את ערך המשימה בעיניהם, וכן את מידת העניין שלהם במשימה. במהלך המשימה חשוב שהלומדים **ינטרו** את המוטיבציה שלהם לביצוע המשימה ואת התחושות שהמשימה משרה עליהם – עניין? סקרנות? או אולי שעמום? עייפות? חרדה? בעקבות תהליכי הניטור, על התלמידים לנהל את המוטיבציה שלהם באמצעות אסטרטגיות הקשורות להיבטים המשפיעים על תחושותיהם. למשל, תלמידים יכולים להשתמש בדיבור עצמי חיובי כדי להעלות את תחושת המסוגלות שלהם, או לנסות לקשר את החומר הנלמד לחוויות והתנסויות מחיי היום-יום, כדי לייצר משמעות למשימה. לבסוף, רפלקציה והערכה של התנודות במוטיבציה שלהם והדרכים שבהן התמודדו עם תנודות אלו היא חשובה ביותר על מנת לסייע בהתמודדות עתידית עם משימות מורכבות.

היבטים של התנהגות בלמידה בהכוונה עצמית

היבט ההתנהגות משקף את הניסיונות של הלומדים לווסת היבטים של התנהגות גלויה (מטה-התנהגות; Amran, 2021), הכוללת ניהול זמן, ניהול השקעת מאמץ מנטלי ופנייה לעזרה (Pintrich, 2000). מכאן שבתחילת המשימה, על הלומדים לתכנן ולהגדיר לעצמם את לוחות הזמנים לביצוע המשימה, בהתחשבות במאמץ המנטלי שנדרש מהם בכל אחד משלבי המשימה ומשאבי הזמן העומדים לרשותם. עליהם להתחשב

2 חשוב לזכור שעל פי פינטריץ' (Pintrich, 2000), התהליכים הללו אינם בהכרח ליניאריים. עם זאת, לצורך בהירות, הפירוט ייעשה באופן זה, כלומר - תכנון, ניטור, ניהול ולבסוף רפלקציה.

גם במשאבים העומדים לרשותם לקבלת עזרה אם יזדקקו לה בהמשך דרכם. במהלך המשימה, על התלמידים לנטר את האופן שבו הם עומדים ביעדי המשימה, ולבחון היבטים שונים של ניהול זמן ומאמץ מנטלי – האם לוח הזמנים שהכינו תואם את הזמן והמאמץ המנטלי הנדרשים מהם בפועל להשלמת המשימה? או האם עליהם לשנות משהו בהתנהלות שלהם על מנת להספיק ולעמוד ביעדי המשימה? כתוצאה מתהליכי הניטור, על התלמידים לשנות את האופן שבו הם מנהלים את הזמן, ולהשתמש באסטרטגיות לניהול ההתנהגות שלהם, כגון: להימנע מהמתנה לרגע האחרון, או אסטרטגיות להגברת הרצון להתמיד במשימה, ואסטרטגיות לבקשת עזרה, תוך כדי ניצול המשאבים העומדים לרשות הלומד להשלמת המשימה. וכמובן, כדי שבפעמים הבאות ינהלו את הזמן, את המאמץ המנטלי ואת תהליכי בקשת העזרה בצורה טובה יותר – חשוב מאוד שלאחר השלמת המשימה יהיו התלמידים מעורבים בתהליכי הערכה ורפלקציה של אופן ניהול ההתנהגות: למשל, האם הערכת הזמן שלהם הייתה נכונה ומתאימה לצורכי המשימה? האם ניטרו ושינו את הזמן שהקדישו למשימה, תוך כדי ביצועה? כמו כן, חשוב שהרפלקציה תאפשר להם להסיק מסקנות כדי לשפר את האופן שבו הם מבצעים את המשימה הבאה.

היבטים הקשריים בלמידה בהכוונה עצמית

ההיבט הרביעי, ההקשר, מייצג היבטים שונים של המשימה או של הסביבה החינוכית שבה מתרחש תהליך הלמידה (Pintrch, 2000). כמו בהיבטים הקודמים, גם בהיבט זה התלמידים נדרשים לבחון את ההתנהלות שלהם במשימה או בסביבה החינוכית (מטה-הקשר: Nishizuka, 2022; Pryor & Crossouard, 2008). בתחילת המשימה, על הלומדים **להעריך** את התפיסות שלהם על אודות המשימה ועל אודות הסביבה החינוכית שבמסגרתה עליהם לבצע את המשימה. במסגרת כיתתית, תפיסות על אודות המשימה יכולות לכלול הבנה של הנורמות הכיתתיות הקשורות לביצוע המשימה, כגון הפורמט של המשימה, האפשרות לעבוד בשיתוף פעולה עם אחרים, והאופן שבו המורים מדרגים את המשימות או נותנים עליהן ציון. תפיסות על אודות ההקשר החינוכי יכולות לכלול ידיעה של הנורמות הכיתתיות והאקלים הכיתתי, כמו למשל: האם מותר או אסור לדבר במהלך ביצוע המשימה? מה מידת הבחירה שיש לתלמידים במהלך העבודה? האם דיבור עם אחרים במהלך ביצוע המשימה משמעותו העתקה? במהלך ביצוע המשימה, וכדי שהישגי התלמידים יבואו לידי ביטוי, עליהם לנטר את האופן שבו הם עומדים בנורמות הכיתתיות לביצוע המשימות ולהשלמתן, וכן לשים לב אם במהלך ביצוע המשימה חלו שינויים בנורמות הללו. בעקבות תהליכי הניטור, התלמידים יכולים לנהל את הלמידה שלהם טוב יותר באמצעות הפעלת אסטרטגיות שונות שיעזרו להם לווסת היבטים הקשריים של למידה, למשל: ניהול שיח הבהרה עם המורים על האופן שבו ניתנים ציונים למשימה, שינויים באופן העבודה על המשימה מעבודה עצמית לעבודה בקבוצות ולהפך, וכן גמישות בהתנהלות במשימות על פי הדרישות השונות. לבסוף, כמו בהיבטים האחרים, חשוב מאוד שתלמידים יעריכו את ההיבטים ההקשריים – בין אם במשימה עצמה ובין אם בהקשר החינוכי – שתרמו ליכולת שלהם להצליח ולעמוד ביעדים או עיכבו אותה.

עידוד למידה בהכוונה עצמית בכיתה

הוראה הממנפת הזדמנויות לפיתוח מיומנויות למידה בהכוונה עצמית היא משימה מאתגרת במיוחד, המצריכה איזון בין אוטונומיה, הדרושה לעירור מוטיבציה פנימית ללמידה, לבין הכְּוונה, שמטרתה למנוע תסכול (Nussbaumer, 2015). הוראה כזו יכולה להיות מאתגרת במיוחד לאחר תקופות משבר, שבהן נדרשים מורים "לאסוף מחדש" את התלמידים ולהוביל אותם לשגרת למידה. ממחקרים עולה חשיבות המורה כמנחה ולא כמקור ידע על מנת להוביל את התלמידים לפיתוח מיומנויות למידה בהכוונה עצמית (Adler et al., 2016; An & Reigeluth, 2011).

פרקטיקות הוראה יכולות לספק הזדמנויות יקרות-ערך לתרגול ופיתוח של מיומנויות למידה בהכוונה עצמית (Kramarski, 2018; Mevarech, et al., 2018), במיוחד לאחר תקופות משבר, בעת הניסיון לשקם ולהחזיר את החיים והלימודים למסלול של שגרה. ממחקרים עולה כי אפשר לעודד תהליכי למידה בהכוונה עצמית באחת משתי דרכים: באופן עקיף, על ידי פיתוח סביבות למידה המעודדת תהליכים אלו; או באופן ישיר, באמצעות הוראה ישירה של אסטרטגיות (Dignath, et al, 2008; Dignath & Veenman, 2021). להלן נעסוק בהוראה ישירה של אסטרטגיות כדרך לעורר, לעודד ולטפח תהליכי למידה בהכוונה עצמית (איור 1). נוסף על כך, אפשר להבחין בין שתי צורות ללמד אסטרטגיות בהוראה ישירה: באופן מרומז (Implicit), על ידי עידוד התלמידים להשתמש באסטרטגיה, בלי לספק להם מידע על המשמעות של פעילות זו; או באופן מפורש (Explicit), על ידי מתן הסבר מעמיק על האסטרטגיות, הסיבות והתנאים שבהן כדאי להשתמש בהן (Adler, et al, 2016; Dignath & Veenman, 2021; Schraw, 1998; Veenman, 2018). הוראה מפורשת של אסטרטגיות הינה קריטית לפיתוח לומדים בעלי מיומנויות למידה בהכוונה עצמית.

למידה בהכוונה עצמית כוללת ארבעה היבטים: קוגניציה, מוטיבציה, התנהגות והקשרים חינוכיים; שכל אחד מהם מאופיין בארבעה שלבים: תכנון והגדרת מטרות, ניטור, ניהול תהליך ורפלקציה והערכה

מודל לתמיכה בתהליכי למידה בהכוונה עצמית

המודל המוצע מבוסס על הוראת מגוון אסטרטגיות ללמידה בהכוונה עצמית. אסטרטגיות אלה והסבר על רכיביהן תוכלו למצוא בקישור.

בהתבסס על ספרות ענפה בתחום ומחקרים שערכנו (Adler et al., 2025; אגמון 2024; יאסין, 2024; סאבא בטשון, 2024), פיתחנו את מודל ארבעת השלבים לטיפוח ועידוד למידה בהכוונה עצמית (איור 1). כל אחד מהשלבים במודל מאפשר מתן הזדמנויות רבות יותר ללומדים להתנסות, לפתח ולשפר את מיומנויות הלמידה בהכוונה עצמית שלהם (Dignath-van Ewijk et al., 2013; Dignath & Veenman, 2021):

- **שלב 1: עידוד תהליכי ויסות למידה באופן מרומז** – בשלב זה המורים מעודדים התנסות בוויסות תהליכים קוגניטיביים, מוטיבציוניים, התנהגותיים והקשריים באופן מרומז (Implicit) בלבד. הם עשויים לספק הזדמנויות לפעילות שבה התלמידים עוסקים בהיבטים שונים של ויסות למידה, אולם אינם מדברים על התהליכים הללו באופן מפורש ואינם מעלים את חשיבותם למודעות התלמידים.

- **שלב 2: העלאת המודעות לתהליכי ויסות למידה בקרב התלמידים** – בשלב זה המורים מנהלים שיח על אודות ההיבטים השונים של ויסות תהליכים קוגניטיביים, מוטיבציוניים, התנהגותיים והקשריים, ומעלים למודעות התלמידים את החשיבות של ויסות תהליכי למידה. זאת מכיוון שמודעות לתהליכים הללו והכרה בחשיבותם מהווים בסיס לתהליכי למידה בהכוונה עצמית (e.g., Kistner et al., 2010; Pintrich, 2002; Schraw, 1998).

- **שלב 3: הוראה מפורשת של אסטרטגיות** – בשלב זה מספקים המורים אסטרטגיות לוויסות תהליכי הלמידה בצורה מפורשת (Explicit) במהלך ההוראה שלהם (Effeney et al., 2013; Schunk & Usher, 2013; Verschaffel et al., 2019). על מנת שהקניית האסטרטגיות תהיה יעילה, עליה לכלול את שם האסטרטגיה, באילו תנאים כדאי להשתמש בה, האופן שבו יש להשתמש בה, והסבר מדוע כדאי להשתמש באסטרטגיה זו (Schraw, 1998).

- **שלב 4: התאמה של אסטרטגיות לתכונות הלומד** – בשלב זה המורה מתאים אסטרטגיות לתלמידים, על פי מאפייני הלמידה של התלמידים עצמם (Schraw & Dennison, 1994). התאמה זו יכולה להיעשות בין היתר על ידי מתן אוטונומיה לתלמידים לבחור בין מגוון רחב של אסטרטגיות, או לחלופין לפתח אסטרטגיות אישיות המתאימות להם.

עידוד תהליכי למידה בהכוונה עצמית בפרויקט "ביוחקר ברשת"

חשוב לשלב פדגוגיות לעידוד, פיתוח וטיפוח למידה בהכוונה עצמית בהוראת הביולוגיה באופן כללי, ובעיקר בתקופת שיקום שלאחר משבר. אפשר לשלב פדגוגיות אלו במסגרת רבים משיעורי הביולוגיה. במאמר זה נתמקד בפרויקט "ביוחקר ברשת" ונדגים באמצעותו הטמעת פדגוגיות לתמיכה בהיבטים השונים של למידה בהכוונה עצמית.

מודל ארבעת השלבים לעידוד תהליכי למידה בהכוונה עצמית

טיפוח לומדים בעלי מיומנויות של למידה בהכוונה עצמית הינו מהמטרות החשובות של מערכת החינוך.
חשוב שמורים ישתמשו בפדגוגיות אשר יעשירו את היכרותם של התלמידים עם מגוון רחב של אסטרטגיות, ויספקו להם הזדמנויות להתנסות ולהשתמש בהן במהלך הלמידה.

איך עושים זאת?

איור 1: מודל ארבעת השלבים לעידוד תהליכי למידה בהכוונה עצמית

למידה בהכוונה עצמית יכולה לסייע לתלמידים להתמודד עם אתגרים המלווים משברים, על ידי הקניית כלים שיאפשרו להם ללמוד לווסת את תהליכי הלמידה

תכנית "ביוחקר ברשת" היא תכנית ייחודית של הפיקוח על הוראת הביולוגיה במשרד החינוך, המשלבת עבודת חקר מעשית שיתופית של תלמידי מגמת הביולוגיה בסביבה דיגיטלית. התוכנית מופעלת בארבעה דגמים; אחד מהם הינו חקר שיתופי בין בתי ספר שונים ובו קבוצות החקר, המורכבות מארבעה תלמידים (זוג מכל בית ספר), משתתפות בתהליך חקר מדעי מקוון. התלמידים משתמשים במקורות מידע דיגיטליים, מקיימים מפגשים א-סינכרוניים לשיתוף פעולה בניהול וביצוע כל שלבי החקר, החל מתופעה ביולוגית מסקרנת או בעיה יישומית חקלאית ועד לכתיבת עבודת החקר. תהליך חקר זה הינו מאתגר מאוד (Sadeh & Zion, 2009, 2012; Snapir, et al, 2022; Zion & Sadeh, 2007; Zion et al., 2004), ומכיוון שכך, מצריך יישום מודע ומוכוון של אסטרטגיות למידה לוויסות היבטים קוגניטיביים, מוטיבציה, התנהגות והקשר. בחלק זה נדגים כיצד מורים המנחים בפרויקט ביוחקר ברשת יכולים להתייחס לחלק מההיבטים הללו.

עידוד וִיסות של תהליכים קוגניטיביים

במהלך עבודת החקר נדרשים התלמידים להתמודד עם אתגרים רבים הן בתחום התוכן והן בתחום מיומנויות החקר. לצורך כך, חשוב להקנות לתלמידים אסטרטגיות למידה שיסייעו להם במהלך המשימות השונות, ללמד אותם להשתמש בהן באופן יעיל, ואף לעודד אותם לפתח אסטרטגיות משלהם כדי לשפר את תהליכי הלמידה. למשל, במהלך כתיבת הסקירה הספרותית לעבודת המחקר, חשוב שהמורים **יעלו למודעות** התלמידים את חשיבות השימוש באסטרטגיות שונות שיסייעו להם בכתיבת הסקירה הספרותית, כדי להפוך את התהליך ליעיל ולהגיע לתוצרים מוצלחים. לאחר מכן, המורים יכולים להקנות לתלמידים באופן מפורש **אסטרטגיות** שונות לכתיבת הסקירה, כגון: אסטרטגיות לארגון מידע, להבחנה בין עיקר לטפל, לקריאה יעילה של מידע, לאיחוד מקורות, ועוד. התלמידים ישתמשו באסטרטגיות השונות לצורך פיתוח הסקירה הספרותית, ואף יגישו לצד התוצר הסופי את הטיוטות שסייעו להם בתהליך, ובהן הסברים על אופן השימוש באסטרטגיות. נוסף על כך, המורים יכולים לעודד את התלמידים **לפתח בעצמם אסטרטגיות** שיסייעו להם בעריכת הסקירה הספרותית, על חלקיה השונים.

עידוד לוויסות מוטיבציה

עבודת הביוחקר רצופה אתגרים, מצריכה השקעת זמן, מאמץ, והתמדה לאורך זמן רב. לכן, לאורך התהליך, גם תלמידים המתחילים כשהם חדורי מוטיבציה עלולים לחוות ירידות במוטיבציה במהלך הדרך. על מנת שהתלמידים יגיעו לקו הגמר בהצלחה, חשוב מאוד להקנות להם כלים לנטר את המוטיבציה שלהם בתהליך, ולהתריע על נקודות משבר בדרך העלולות למנוע מהם לסיים את העבודה. לצורך כך, יש לעורר בהם את **המודעות** לתנודות במוטיבציה שיתרחשו לאורך התהליך, לתת לגיטימציה לתנודות הללו, ולהבהיר להם את החשיבות בניטור תהליכי מוטיבציה במהלך עבודת הביוחקר. על המורים גם להקנות **אסטרטגיות** לניטור התנודות במוטיבציה, למשל, אסטרטגית Sadly or Smiley? (ראו טבלה 2).

לבסוף, מורים יכולים גם לעודד את התלמידים **לפתח בעצמם אסטרטגיות** שיסייעו להם לנטר את המוטיבציה שלהם לאורך תהליך החקר, זאת כדי שיוכלו להתריע על ירידה במוטיבציה בהקדם, וכך לקבל עידוד או עזרה מהמורה.

עידוד לוויסות התנהגות

מכיוון שהתלמידים המבצעים את עבודת הביוחקר אינם חולקים את אותו מרחב למידה, **ניהול זמן** במהלך ביצוע החקר הוא אתגר. לכן חשוב מאוד שהמורים המנחים את התלמידים יעודדו אותם לתכנן, לנטר, לנהל ולהעריך את ניהול הזמן שלהם. על מנת לסייע לתלמידים בתהליך זה, תחילה על המורה **להעלות למודעות** התלמידים כמה חשוב לנהל את זמנם לאורך תהליך החקר המאתגר כדי להגיע לקו הגמר בהצלחה. לאחר מכן, **כאסטרטגית למידה**, המורה יכול לעודד את התלמידים לבנות

טבלה 2: אסטרטגיית Sadly or Smiley לניטור מוטיבציה

שם האסטרטגיה	איך להשתמש?	מתי להשתמש?	מתי להשתמש?
Sadly or Smiley?	• באופן תקופתי במהלך משימה, עצרו ושאלו את עצמכם: מה רמת המוטיבציה שלי? האם היא גבוהה? האם נמוכה? איך היא השתנתה במהלך התהליך? • העניקו לעצמכם Smiley כל עוד המוטיבציה שלכם גבוהה, או Sadly אם אתם מרגישים שהמוטיבציה שלכם ירדה. • אם נתתם לעצמכם Sadly - חישבו על דרכים שבהן תוכלו להעלות את המוטיבציה שלכם מחדש.	במהלך משימה לניטור מוטיבציה.	חשוב מאוד לשמור על מוטיבציה במהלך ביצוע משימה, בעיקר במשימות ארוכות ומאתגרות. אסטרטגיה זו תסייע לכם לזהות את הרגע שבו המוטיבציה שלכם יורדת, ובכך תאפשר לכם לחשוב על דרכים לעורר אותה מחדש.

לוח זמנים אישי ולהשתמש בו בכל שלב בתהליך החקר, בהתאם למטרות ולשלבים שהוגדרו מראש. התלמידים יציינו בלוח הזמנים את היעדים שעליהם להשיג, את הפגישות של הצוות, ויגדירו זמנים המוקדשים לעבודה על הפרויקט. התלמידים יכולים **להתאים את השימוש ביומנים** לאופן הלמידה שלהם, על ידי בחירה בין סוגים שונים של לוחות זמנים, כמו יומנים אישיים, יומנים אישיים דיגיטליים, ואף יומנים דיגיטליים שיתופיים. בכל מפגש יתעדו התלמידים את המשימות אשר בוצעו ואת משך הזמן שהקדישו לכך. אחת לכמה זמן, יבצעו התלמידים רפלקציה על תהליך ניהול הזמן, כדי לבחון את ההתקדמות שלהם ולבדוק אם יש צורך לשנות משהו בניהול הזמן.

עידוד ויסות של היבטים הקשריים

עבודת הביוחקר היא גדולה בהיקפה ובזמן שהיא מצריכה לעומת עבודות אחרות הנערכות במסגרת לימודי הביולוגיה. מכיוון שכך, תלמידים מגיעים לעיתים עם תפיסות שונות על עבודת הביוחקר מאלו של המורים המנחים אותם, למשל, באשר למידה שבה מותר להם להיעזר בעבודות של אחרים, למה שמצופה מהם מבחינת הרמה של העבודה, ואפילו ביחס לפורמט שבו עליהם להגיש את עבודת החקר. לכן חשוב מאוד, בשלב הראשון, שהמורים יעלו **למודעות** התלמידים כמה חשוב לחשוף את התפיסות שלהם ביחס למשימה, ואף יאפשרו מרחב בטוח לשיח על התפיסות השונות בין התלמידים או על התפיסות השונות של מורים ותלמידים, ישוו בין התפיסות ויחשפו את ההבדלים ביניהם. לאחר מכן, המורה יכול להתחיל בניסיון לצמצם את הפערים בין התפיסות, תוך כדי הקניית אסטרטגיות שיאפשרו תהליך זה, כגון אסטרטגיית "מה ההיגיון?" (ראו טבלה 3).

לבסוף, מורים יכולים גם לעודד את התלמידים **לפתח בעצמם אסטרטגיות** שיסייעו להם לסגור פערים בין תפיסות שונות הנוגעות למשימה כדי להגביר את סיכויי ההצלחה שלהם במשימה.

לסיכום

למידה בהכוונה עצמית מציעה פתרון פרקטי ויעיל להתמודדות עם אתגרי השיקום לאחר משבר, שכן היא מקנה לתלמידים כלים המסייעים להם לווסת את תהליכי הלמידה שלהם באופן עצמאי. מודל ארבעת השלבים שהוצע במאמר מדגיש את תפקידם המרכזי של מורים בתמיכה בתלמידים ובטיפוח מיומנויות אלו אצל התלמידים – באמצעות מתן אוטונומיה לתלמידים, לצד הוראה ישירה של אסטרטגיות למידה. שילוב אסטרטגיות אלו בהוראת הביולוגיה, כפי שהודגם על ידי הפרויקט "ביוחקר ברשת", מוכיח כי אפשר לשלב בין פיתוח כישורים אלו לבין שימור הוראת הידע והמיומנויות בתחום. יישום עקרונות למידה בהכוונה עצמית יכול לסייע בשיקום חוויית הלמידה לאחר משבר, ובד בבד להכין את התלמידים להתמודדות עם האתגרים העתידיים, הן במישור האקדמי והן במישור האישי.

טבלה 3: אסטרטגיית "מה ההיגיון" לסגירת פערים בתפיסות

שם האסטרטגיה	איך להשתמש?	מתי להשתמש?	מתי להשתמש?
מה ההגיון?	אפשר להשתמש באסטרטגיה זו בעת התחלת משימה חדשה, אם הציפיות של התלמידים מהמשימה אינן תואמות את ציפיות המורה או המנחה. במקרה זה, בקשו להבין את ההיגיון שמאחורי הציפיות.	אם אין התאמה בין הציפיות שלכם כתלמידים לציפיות המורה או המנחה שלכם ביחס למשימה.	על מנת להצליח במשימות, חשוב מאוד שהתפיסות שלכם ביחס למשימה ולציפיות מכם יהיו דומות ככל האפשר לציפיות של המורה או המנחה – כך יש סיכוי רב יותר שתעמדו בציפיות ותגיעו להישגים גבוהים.

Adler, I., et al. (2025): "Leveraging opportunities for self-regulated learning in **smart learning environments". Smart Learning Environments 12(1)**: p. 6.

Adler, I., et al. (2016): "The effect of explicit environmentally oriented metacognitive guidance and peer collaboration on students' expressions of environmental literacy". **Journal of Research in Science Teaching, 53(4)**: pp. 620-663.

Amran, M.S., et al. (2021): "Thinking about behavior: Perspective on meta-behavior in education". **Frontiers in Psychology 12**: p. 727116.

An, Y.J. & Reigeluth, C. (2011): "Creating technology-enhanced, learner-centered classrooms: K-12 teachers' beliefs, perceptions, barriers, and support needs". **Journal of Digital Learning in Teacher Education 28(2)**: pp. 54-62.

Dignath, C., et al. (2008): "How can primary school students learn self-regulated learning strategies most effectively?: A meta-analysis on self-regulation training programs". **Educational Research Review 3(2)**: pp. 101-129.

Dignath, C. & Veenman, M.V. (2021): "The role of direct strategy instruction and indirect activation of self-regulated learning–Evidence from classroom observation studies". **Educational Psychology Review 33(2)**: pp. 489-533.

Dignath-van Ewijk, C., et al. (2013): "Assessing how teachers enhance self-regulated learning: A multiperspective approach". **Journal of Cognitive Education and Psychology 12(3)**: pp. 338-358.

Dubovi, I. & Adler, I. (2024): "The impact of COVID-19 induced anxiety on students' engagement while learning with online computer-based simulations: the mediating role of boredom". I**nteractive Learning Environments 32(3)**: pp. 843-858.

Effeney, G., et al. (2013): "Self-Regulated Learning: Key strategies and their sources in a sample of adolescent males". Australian Journal of Educ**ational & Developmental Psychology 13**: pp. 58-74.

EU Council. (2002): "Council Resolution of 27 June 2002 on Lifelong Learning". Official **Journal of the European Communities**, July 9, 2002.

Flavell, J.H. (1987), "Speculation about the nature and development of metacognition". In F. Weinert & R. Kluwe (Eds), **Metacognition, motivation and understanding** (pp. 21-29). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Hoops, L.D., et al. (2016): "Investigating postsecondary self-regulated learning instructional practices: The development of the self-regulated learning observation protocol". **International Journal of Teaching and Learning in Higher Education 28(1**): pp. 75-93.

Kistner, S., et al. (2010): "Promotion of self-regulated learning in classrooms: Investigating frequency, quality, and consequences for student performance". **Metacognition and Learning 5(2)**: pp. 157-171.

Kizilcec, R.F., et al. (2017): "Self-regulated learning strategies predict learner behavior and goal attainment in Massive Open Online Courses". **Computers & Education 104**: pp. 18-33.

Kramarski, B. (2018): "Teachers as agents in promoting students' SRL and performance: Applications for teachers' dual-role training program". In D. H. Schunk & J.A. Greene (Eds.), **Handbook of self-regulation of learning and performance** (pp. 223–239). Routledge.

Mevarech, Z.R., et al. (2018): "Metacognitive pedagogies in math classrooms". In D.H. Schunk & J.A. Greene (Eds.), **Handbook of self-regulated learning and performance** (pp. 109 –123). New York, NY: Routledge.

Miele, D.B. & Scholer, A.A. (2018): "The role of metamotivational monitoring in motivation regulation". **Educational Psychologist 53(1)**: pp. 1-21.

Miele, D.B., et al. (2020): "Metamotivation: Emerging research on the regulation of motivational states". **Advances in Motivation Science 7**: pp. 1-42.

Moote, J. (2019): "Investigating the longer-term impact of the CREST inquiry-based learning program on student self-regulated processes and related motivations: **Views of students and teachers". Research in Science Education 49(1)**: pp. 265-294.

National Research Council (NRC) (2012): **A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas**. Washington, DC: National Academies Press.

Nishizuka, K. (2022): "From assessment for learning to assessment for expansion: Proposing a new paradigm of assessment as a sociocultural practice". **Journal of Teaching and Learning 16(3)**: pp. 44-68.

Nussbaumer, A., et al. (2015): "Supporting self-regulated learning". In S. Kroop, A. Mikroyannidis & M. Wolpers (Eds.), **Responsive open learning environments** (pp. 17-48). Springer.

OECD (2018). **The future of education and skills: Education 2030, the future we want**. Available at: https://www.oecd.org/education/2030/E2030%20Position%20Paper%20(05.04.2018).pdf (Accessed June 15, 2024).

Panadero, E. (2017): "A review of self-regulated learning: Six models and four directions for research". **Frontiers in Psychology, 8(422)**.

Pintrich, P.R. (2000): "The role of goal orientation in self-regulated learning". In M. Boekaerts, P. Pintrich & M. Zeidner (Eds.), **Handbook of self-regulation** (pp. 451– 502). San Diego, CA: Academic Press.

Pintrich, P.R. (2002). "The role of metacognitive knowledge in learning, teaching, and assessing". **Theory into Practice 41(4)**: pp. 219-225.

Pintrich, P.R. (2004): "A conceptual framework for assessing motivation and self-regulated learning in college students". **Educational Psychology Review 16(4)**: pp. 385-407.

Pryor, J. & Crossouard, B. (2008): "A sociocultural theorisation of formative assessment". **Oxford Review of Education 34(1)**: pp. 1–20.

Sadeh, I. & Zion, M. (2009): "The development of dynamic inquiry performances within an open inquiry setting: A comparison to guided inquiry setting". **Journal of Research in Science Teaching 46(10)**: pp. 1137-1160.

Sadeh, I. & Zion, M. (2012): "Which type of inquiry project do high school biology students prefer: Open or guided?". **Research in Science Education 42**: pp. 831-848.

Scholer, A.A., et al. (2018): "New directions in self-regulation: The role of metamotivational beliefs". **Current Directions in Psychological Science 27(6)**: pp. 437-442.

Schunk, D.H. & Usher, E.L. (2013): "Barry J. Zimmerman's theory of self-regulatory learning". In H. Bembenutty, T.J. Cleary, & A. Kitsantas (Eds.), **Applications of self-regulated learning across diverse disciplines** (pp. 1-28). Charlotte, NC: Information Age Publishing.

Schunk, D.H. & Zimmerman, B.J. (Eds.) (2012): **Motivation and self-regulated learning: Theory, research, and applications**. Routledge.

Schraw, G. (1998): "Promoting general metacognitive awareness"**. Instructional Science 26(1)**: pp. 113-125.

Schraw, G. & Dennison, R.S. (1994): "Assessing metacognitive awareness". **Contemporary Educational Psychology, 19(4)**, 460-475.

Schwartz, L., et al. (2021). Rising up to the challenge: The effect of individual and social metacognitive scaffolds on students' expressions of autonomy and competence throughout an inquiry process. **Journal of Science Education and Technology 30(4)**: pp. 582-593.

Snapir, Z., et al. (2022): "Inquiry practices and types of knowledge, with paths of logical associations between inquiry questions, presented as part of an open inquiry process". **Journal of Biological Education 57(5)**: pp. 1062-1082.

Veenman, M.V.J. (2018): **Final report talent education—metacognition**. Leiden: SCOL.

Verschaffel, L., et al. (2019): "Learning Mathematics in metacognitively oriented ICT-Based learning environments: A systematic review of the literature". **Education Research International 2019**: pp. 1-19.

Zimmerman, B.J. (2013): "Theories of self-regulated learning and academic achievement: an overview and analysis". In **Self-regulated learning and academic achievement** (pp. 0–45). Routledge.

Zion, M.I. & Sadeh, I. (2007): "Curiosity and open inquiry learning". **Journal of Biological Education 41(4)**: pp. 162-169.

Zion, M., et al. (2004): "Dynamic, open inquiry in biology learning". **Science Education 88(5)**: pp. 728-753.

אגמון, מ'. (2024): **אפיון פרקטיקות ההוראה בהן מורים ממנפים הזדמנויות לפיתוח וטיפוח תהליכי למידה בהכוונה עצמית, על ידי עידוד התלמידים לווסת תהליכים של מוטיבציה**. עבודת גמר לקבלת התואר "מוסמך למדעי הרוח", בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל אביב.

יאסין, ס'. (2024): **אפיון פרקטיקות הוראה תומכות למידה בהכוונה עצמית בהיבטים של התנהגות**. עבודת גמר לקבלת התואר "מוסמך למדעי הרוח", בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל אביב.

סאבא בטשון, ק'. (2024): א**פיון פרקטיקות הוראה של מורים לקידום מיומנויות וויסות עצמי של סביבות למידה של תלמידיהם**. עבודת גמר לקבלת התואר "מוסמך למדעי הרוח", בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל אביב.