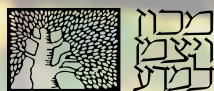


גיליון מספר 199 | מרץ 2020 תש"פ

שמורת טבע

עלון מורי הביולוגיה ומורי מדעי הסביבה

שינויי אקלים



המחלקה להוראת המדעים

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



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



המרכז הארצי
למורי הביולוגיה
ולמורי מדעי הסביבה



שלום לכולכם,

משבר האקלים הוא נושא מדאיג, שיש להכיר ולתת עליו את הדעת. בגיליון זה אספנו בעיקר מחקרים הנוגעים להתמודדות הביוספרה עם שינויי האקלים, מבחינת תפוצה של מינים, שינויים בשעונים ביולוגיים והסתגלות באמצעות התנהגות. הוספנו ראיון עם חוקר שינויי אקלים, המדגיש את חשיבות התגייסות הציבור ומקבלי ההחלטות לנקיטת פעולות להפחתת פליטת גזי חממה. בתוך כך, הוראת מדעי הסביבה והוראת הביולוגיה מקבלות משמעות נוספת, והיא מתבטאת במאמר על השפעת בני נוער על הוריהם בנושא שינויי אקלים ובהצעה של מורה למדעי הסביבה לפעילות בנושא. אתרים ויישומונים יובילו אתכם להרצאות, שיחות, מאגרי מידע ופעילויות הקשורים להפחתת השפעתנו על שינויי האקלים.

קריאה מהנה,

גילת בריל

עורכת העלון

עורכת: ד"ר גילת בריל

ייעוץ אקדמי: פרופ' ענת ירדן

עיצוב גרפי: עדנה רולניק

עימוד: אבי טל

עריכת לשון: ענבל גיל

מנהל הפרויקט: ד"ר אוהד לבקוביץ'

תמונת השער: קואלות הן דוגמה לאורגניזם ששינויי אקלים עלולים לפגוע בו במיוחד, מפני שהן מותאמות לבית גידול ייחודי. אורגניזמים מתמחים כמו הקואלות אינם מסוגלים להגמיש התנהגות או להרחיב את מגוון מקורות המזון שלהם. במקרה שנפגע בית הגידול שלהם אין להם כמעט אפשרות להפעיל מנגנוני הסתגלות לבתי גידול אחרים. השריפות הגדולות שפקדו את אוסטרליה ב-2019 השאירו חשש כבד לגורלן של הקואלות.

צילומים: רוב הצילומים המשולבים נלקחו ברישיון מאתר [shutterstock.com](https://www.shutterstock.com).

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי אלקטרוני, אופטי, מכני, או אחר, כל חלק שהוא מהחומר שבספר זה. שימוש מסחרי מכל סוג שהוא בחומר הכלול בספר זה אסור בהחלט, אלא ברשות מפורשת בכתב מהמוציא לאור.

הפרויקט מבוצע עפ"י מכרז 09/07.13 עבור המזכירות הפדגוגי, משרד החינוך.

© כל הזכויות שמורות למשרד החינוך



גיליון מספר 199 | מרץ 2020 תש"פ

שמורת טבע

עלון מורי הביולוגיה ומורי מדעי הסביבה



על ארבע החלטות העולם עומד

ראיון עם פרופ' רון מילוא



3



9

הנשארים והעוברים

השפעת ההתחממות הגלובלית על תפוצת אורגניזמים

להתנהג בהתאם

שינויי התנהגות כתגובה לשינויי אקלים



17



23

שעון גמיש

השפעת ההתחממות הגלובלית על פוטופריודיזם

הרגשתי שאני צריך לעשות משהו

משבר האקלים בראי האקטיביזם הסביבתי



31



35

השפעת שינויי האקלים על העביד הצהוב

סיכום עבודת גמר על האקלוגיה של העקרב בשדה צין

למידה בן-דורית:

האם בני נוער הם המפתח להתנהגות הורים בנושא שינויי אקלים



43

תוכן העניינים



על ארבע החלטות העולם עומד

פרופסור רון מילוא מוביל מעבדת מחקר העוסקת במקורות אנרגיה מתחדשים, השפעות סביבתיות של ייצור מזון ואקולוגיה גלובלית. בריאיון עימו הוא מספר על תחומי המחקר בתחום ועל הקשר בינם לבין המציאות של משבר האקלים, על דרכים להתמודדות עם האתגר הגדול של האנושות במאה ה-21, ומשלב דאגה עם פרספקטיבה אופטימית.

דיוקן



רון מילוא

פרופסור רון מילוא מוביל מעבדת מחקר במכון ויצמן למדע העוסקת בקשר שבין קיימות לבין האתגר של קיום 8 מיליארד אנשים על פני כדור הארץ בעידן של משבר סביבה ואקלים. לאחר לימודי פיזיקה, כימיה ומדעי המחשב בתיכון התקבל בצבא לתוכנית "תלפיות", שבמסגרתה למד לתואר ראשון בפיזיקה ובמתמטיקה באוניברסיטה העברית. במקביל לתשע שנות שירות בחיל האוויר למד לתואר שני בהנדסת חשמל באוניברסיטת תל אביב, חזר לפקד ב"תלפיות" והתמנה למדריך הראשי של התוכנית. את לימודיו לתואר שלישי עשה בפיזיקה ביולוגית במעבדתו של פרופסור אורי אלון במכון ויצמן, ומשם עבר ללימודי בתר-דוקטורט בבית הספר לרפואה בהרוורד. לאחר מכן חזר למכון ויצמן והתקבל כחוקר. אהבתו המדעית היא להתבונן על תופעות בטבע באמצעות מספרי מפתח שיכולים לעורר תובנות חדשות ומעניינות.

מראיינים: גילת בריל ואוהד לבקוביץ

אילו שאלות מעניינות אתכם במעבדה?

תמיד אהבתי להבין את הטבע בפרספקטיבה כמותית ולבדוק אילו תובנות אפשר להשיג בעזרתה. זוהי האהבה האינטלקטואלית שלי. כשחזרתי מההכשרה בארצות הברית רציתי לשלב את המהפכות שקרו בביולוגיה סינתטית ובביולוגיה מערכתית, התחומים שבהם עשיתי תואר שלישי במכון, ובתר-דוקטורט במחלקה שבה הייתי בהרוורד, עם אתגרי קיימות ושינויי אקלים שחשובים בעיניי. חיפשתי את הקשר בין שניהם, ומצאתי נושא מרכזי שהיה לי נוח להתחבר אליו, להשקיע בו זמן ועבודה: קיבוע פחמן: התהליך שבו פחמן דו-חמצני הופך למזון ולדלקים. למעשה, רוב המשאבים של הטבע, כגון קרקע ומים, מנוצלים לחקלאות. מכיוון שחקלאות היא בפועל תעשייה של קיבוע פחמן, התחלנו את העבודה במעבדה בשאלה אם אפשר לשפר את יעילות התהליך הזה, והמשכנו לעסוק בה ב-11 השנים האחרונות. אומנם קיבוע פחמן דו-חמצני הוא חלק מתהליך הפוטוסינתזה, אבל במקביל הוא גם חלק מתהליכי המטבוליזם בתאים. לכן התרכזנו במטבוליזם תוך הפעלה של חשיבה כמותית (לדוגמה, קצב פעולה של אנזימים, רמת ביטוי, כמות חלבונים). זה כיף גדול. אני אוהב לחשוב על הדברים האלה.

ניסינו לבדוק איך אפשר לייעל את המסלול המטבולי של קיבוע הפחמן. ניסינו לבדוק אילו רכיבים אנזימיים שקיימים בטבע אפשר לשלב בתהליך קיבוע הפחמן כדי לגרום לביצוע מהיר יותר. כאורגניזם מודל בחרנו ב-*E. coli*, שהוא הטרוטרופ ולא מקבע פחמן, והתחלנו פרויקט שנמשך עשר שנים, ובו ניסינו לבדוק אם אפשר להפוך אותו מהטרוטרופ לאוטוטרופ. האמת היא שכשסטודנט שלי, ארן בר אבן, בא אליי עם הרעיון הזה בפעם הראשונה חשבתי שבטח כבר חשבו על זה. הוא שכנע אותי שלא. זה נשמע כמו מדע בדיוני, אבל בתהליך מדעי ארוך, עם תמיכה מהאיחוד האירופי ועם סטודנטים מוכשרים מאוד, הצלחנו להגיע לאחרונה להוכחה מלאה שהשינוי אפשרי: יצרנו זן *E. coli* שמשמש בפחמן דו-חמצני ובונה ממנו את כל הביומאסה שלו, מאה אחוז מהגוף. כלומר, שינינו אותו מהטרוטרופ לאוטוטרופ.

התמודדות עם משבר האקלים היא בעיה קשה שאין לה פתרונות קסם, ואנחנו נידרש לשינויים משמעותיים

מצאנו תמונה ברורה, שלפיה בקר יקר לסביבה הרבה יותר מכל המזונות האחרים

יהיה צורך לפתח טכנולוגיות לספיחת הפחמן הדו-חמצני באופן מלאכותי שיהיה אפשרי מבחינה כלכלית.

בהקשרים אלה אפשר לחשוב על החיידקים האוטוטרופיים שיצרנו במעבדה; אבל אם נעזוב לרגע את המעבדה, בתוך המאמץ המחקרי העולמי זהו תחום שההצלחה בו היא קריטית.

האם יש חשש מיציאה של החיידקים הללו לטבע?

חיידקים כאלה היוצאים לטבע אינם יכולים לשרוד. הם תלויים בחומצה פורמית¹ כמקור אנרגיה, ומכיוון שהיא אינה זמינה להם בטבע, הם לא יכולים לשרוד מחוץ למעבדה. גם אילו יכלו לשרוד בחוץ, חשוב להבין שיש חיידקים טבעיים שמבצעים את התהליך הזה בדיוק. כלומר, הם לא נכנסים עכשיו לאיזו נישה חדשה משלהם ומתעלים על מינים אחרים. אם בצורה כלשהי שאיני יכול לתאר, הם עדיין יוכלו איכשהו לשרוד, יש להם תחרות עם חיידקים אחרים שכבר מבצעים את התהליך זמן רב וקשה מאוד לראות באיזשהו תסריט אפשרי שיהיה להם יתרון. אנחנו צופים שיהיו להם רק חסרונות. במובן האבולוציוני זאת רק החזרת עטרה ליושנה, מפני שהאב הקדמון של *E. coli* ידע לבצע תהליך כזה בהיסטוריה שלו, וגם היום יש חיידקים שיוודעים לבצעו. בכל מקרה אנחנו מנסים להמשיך ולחשוב על השאלה החשובה הזאת ופתוחים לשמוע הצעות שלא חשבנו עליהן.



אילו כיווני מחקר נוספים קיימים במעבדה?

אחד מכיווני המחקר קשור לצורך למצוא פתרון כלשהו לצריכת המשאבים של בני האדם, הגדלה במהירות, בעולם צפוף שהמשאבים בו מוגבלים. האתגר הוא למצוא דרך שבה האנושות תוכל להזין את עצמה בצורה מאוזנת, וזאת בלי שייצור המזון יפגע במערכות האקולוגיות בצורה אנושה. בהקשר זה, מוזיאון הטבע החדש בתל אביב פרסם בפברואר האחרון את [דו"ח Eat](#) [Lancet](#) שחיברה קבוצת חוקרים בשיתוף פעולה עם כתב העת [Lancet](#). הדו"ח משרטט את היעדים והדרכים להאכלת עשרה מיליארד איש, תוך שמירה על קיימות כדור הארץ. מידע נוסף בעברית תמצאו באתר [הפורום הישראלי לתזונה בת קיימא](#).

במה זה שונה מאורגניזמים אחרים שעושים פוטוסינתזה?

בעצם, ה-*E. coli* שלנו עושה את אותו טריק מטבולי של צמחים, וכך נעשה קצת יותר דומה להם. גם בחיידקים וגם בצמחים קיבוע פחמן מתרחש עם מעגל קלווין-בנסון. מדובר במסלול מטבולי זהה, בכמות אנזימים זהה. לרוביסקו, האנזים שמזרז את הקרבוקסילציה, יש כמה צורות, ואנחנו כללנו בתהליך רק את זו שבחיידקים סגוליים. אבל אלה פרטים קטנים מבחינתנו. נכון שיש גם חיידקים אחרים שיוודעים לעשות את הטריוק, אבל אנחנו רואים בכך שאפשר להפוך יצור מהטרורופ לאוטוטרופ הוכחת היתכנות מעניינת מאוד.

מה יכול להיות היישום של חיידקים כאלה?

לגבי היישום, הייתי כמובן שמח אילו החיידקים האלה היו עוזרים לנו כבר עכשיו בייצור מזון, או בהפחתת פחמן דו-חמצני באטמוספירה או בהספקת דלקים. אני חייב להגיד שהדרך עוד ארוכה. אומנם ה-*E. coli* שיצרנו יודע לבנות את הביומאסה שלו מפחמן דו-חמצני, אבל הוא תלוי לשם כך במקור אנרגיה שבעצמו פולט פחמן דו-חמצני, ולכן אין רווח אנרגטי כרגע. לשימושים עתידיים אפשר לנסות לחשוב איך לספק את מקור האנרגיה הזה מחשמל או מדרכים אחרות בתכלית. גם אז עולה השאלה הביוטכנולוגית או ההנדסית אם אפשרות כזאת עדיפה כלכלית על פני חלופה כמו תהליך כימי של ייצור דלקים על בסיס אנרגיה מתחדשת. אני לא יכול להגיד כרגע מה טוב יותר בשווח הארוך.

אספקת אנרגיה היא אתגר גדול הקשור לשינויי אקלים. אומנם ניכרת התקדמות רבה בשימוש במקורות אנרגיה מתחדשים, כמו רוח ושמש, אולם ההיקפים עדיין אינם גדולים דיים. נוסף על כך, כאשר אנו מנסים להגדיל את היקף השימוש במקורות אנרגיה מתחדשים, אנו נתקלים באתגרים רציניים: מקורות האנרגיה לעיתים זמינים ולעיתים לא (בלילה אין שמש; רוח אינה עקבית). אין מדובר רק בעניין של אפס או אחת, כלומר, אם אתה משתמש בזה או לא, אלא בשאלה באיזו כמות. אם האנרגיה ממקורות מתחדשים משמשת להפקת חמישה אחוזים מאספקת החשמל, אין בעיה. אבל בהיקף של שלושים אחוז ומעלה מאספקת החשמל - אתגר מרכזי הוא אגירת האנרגיה. מכאן שאספקת אנרגיה ממקורות מתחדשים מצריכה פריצות דרך באגירת חשמל, ויש לכך השלכות משמעותיות על מניעת שינויי אקלים.

אתגר נוסף הקשור לשינויי אקלים הוא קיבוע פחמן. אלפי שנים יעברו עד שרוב הפחמן הדו-חמצני שפלטנו עד עכשיו יחזור לאוקיינוסים או לבטן האדמה בצורה טבעית. אם האנושות מעוניינת להגביל את עליית הטמפרטורות ואת שינויי האקלים,

¹ CH₂O₂

דמות להערכה: ריצ'ארד פיינמן

ריצ'רד פיינמן הוא פיזיקאי אמריקאי יהודי זוכה פרס נובל, דמות ססגונית מאוד. הוא כתב ספרים מרתקים ואופטימיים שהם קלאסיקות להבנת הטבע ועולם המדע. אתה בטח מתלוצץ, מיסטר פיינמן! הרפתקאותיו של איש מוזר הוא אחד מהם. אני זוכר שבכיתה י' בשבוע הספר קניתי ספר שלו שנקרא התיאוריה המוזרה של אור וחומר. ממש התרגשתי ממנו ואפילו רציתי לכתוב לו מכתב, אבל הוא נפטר לפני שהייתה לי הזדמנות.

מנתחים באופן כמותי את הרכב הביוספרה: כמה צמחים, חיידקים, פטריות ובעלי חיים מתקיימים על פני כדור הארץ; מי שוקלים יותר בעולם - חיידקים, צמחים או פטריות? האם הם נמצאים בעיקר בים או ביבשה? בנוסף מעניין לדעת אם מתחולל שינוי לאורך הזמן, למרות שדי קשה לענות על כך בצורה כמותית. אנחנו יודעים להעריך בצורה די טובה, אבל ההערכה קשה יותר מאחר שלפני חמשת אלפים שנה לא היה מי שכתב מאמרים. ועם זאת, יש לנו דרכים לאמוד שינויים ואנחנו רואים לדוגמה שמשקל הצמחים במגמת ירידה, בעיקר בעקבות שטחים שהוקדשו לחקלאות וכריתת יערות לטובת שטחי מרעה. עכשיו אנחנו בודקים משקל מעניין במיוחד: משקלם של כל היונקים היבשתיים ובמקביל של כל החרקים, או פרוקי רגליים באופן כללי. אף אחד לא יודע היום מה המאסה או הכמות של פרוקי רגליים שיש בעולם. אם לא הייתי נפגש איתכם, הייתי עובר עכשיו על מאמר שמנתח את חישובי המאסה האלה. התוצאות מפליאות, הן בדרך כלל שונות ממה שאנשים חושבים.

אם האנושות מעוניינת להגביל את עליית הטמפרטורות ואת שינויי האקלים, יהיה צורך לפתח טכנולוגיות לספיחת הפחמן הדו-חמצני באופן מלאכותי

הגעת לחקר הסביבה מתחום הפיזיקה. איזו השפעה יש לך על הדרך שבה אתה חוקר נושאים ביולוגיים?

אנחנו מנסים להפעיל בביולוגיה מיומנות חשיבה שנפוצה בהנדסה ופיזיקה, של חשיבה במספרים, הערכות סדרי גודל ומבחני היתכנות². כלומר, מה אפשר להבין על החיים באמצעות חישוב סדרי גודל. השימוש המושכל במספרים הוא מיומנות רלבנטית גם בביולוגיה, בכלכלה ובמשפטים. זהו כלי נרחב לחיים המקצועיים. התחלתי לעבוד על הכיוון הזה עוד בהארוורד, ויצרתי מאגר נתונים לכל קהילת הביולוגיה וספר [זמין גם חנים באינטרנט](#).

כלומר, מספרים יכולים לעזור לשער לדוגמה עד כמה תא יכול להיות גדול ועדיין חי?

נכון, וכך גם היקף וקצב; המספרים יכולים לעזור לנו גם לשער כמה זמן לוקח לייצר את החלבונים וכמה אנרגיה נדרשת לשם כך. כששלמדים פיזיקה לבגרות, יש דף קבועים: מהי מסת הפרוטון, מה קבוע המשיכה וכן הלאה. יצרתי אפוא דף כזה, שנקרא [BioNumbers](#), של מספרי מפתח בביולוגיה של התא, כמו גודל של חיידק, גודל של תא אדם. יצרנו [גם דף עם מספרים מרכזיים שחשוב לדעת בהקשר של תהליכי התחממות גלובלית](#). ממספרים אלה אפשר לעבור לחישובים, להערכות, לסדרי גודל וכן הלאה.

היבט נוסף שאנו נותנים עליו את הדעת קשור לשינויי האקלים הנגרמים על ידי גזי חממה, שהעיקריים שבהם הם פחמן דו-חמצני ומתאן. אחד התהליכים הפולטים גזים אלה באופן משמעותי הוא גידול מזון והפקתו. תרומתו לפליטת גזי חממה היא פחות או יותר כמו תרומת השימוש בתחבורה וכמעט כמו תרומת תהליך אספקת החשמל, שעליהם מדברים יותר. דפוסי צריכת המזון שלנו הם בעייתיים מאוד גם מבחינת פליטת גזי חממה והשפעה על שינויי אקלים וגם מבחינת צריכה של משאבי טבע. בעשר השנים האחרונות אנחנו מנתחים במעבדה את המחיר הסביבתי של המזון שאנחנו צורכים - כלומר, איזה מזון יעיל יותר בהקשר של צריכת משאבי טבע ושתהליך ייצור פולט פחות גזי חממה. אנחנו משווים ערכי חלבון, קלוריות, קרקע, מים ופליטת גזי חממה של ייצור מזונות שונים, לדוגמה, בקר לעומת עוף. מצאנו תמונה ברורה, שלפיה בקר יקר לסביבה הרבה יותר מכל המזונות האחרים, גם כאלה שהערכים התזונתיים שלהם זהים לאלה של הבקר. כלומר, אם נחליף בקר לעוף עם ערכי חלבון זהים, נקבל חיסכון דרמטי במשאבי טבע. אפשר אפילו לחסוך יותר משאבי טבע בבניית תזונה צמחית מגוונת, שמכילה את כל רכיבי התזונה המתקבלים מבקר. אבל החיסכון המשמעותי ביותר יתקבל מויתור על הבקר. מעבר מבקר לעוף הוא כבר חלק נכבד מהדרך. המחקר בכיוון הזה של המעבדה זוכה להדהוד גדול ועניין רב בעולם. שאלה חשובה היא איך אנחנו דואגים לביטחון התזונתי שלנו ובמקביל דואגים שייגרם כמה שפחות נזק מבחינת שינויי אקלים? גם במחקר שלנו וגם במחקרים אחרים הסוגיה של בשר וחלב מבקר מופיעה בצורה משמעותית מאוד ככזו שיש לה השלכה ניכרת על התחממות גלובלית. מבחינה זאת, לשינויי תזונה יכולה להיות השפעה מכרעת גם לחיוב וגם לשלילה: כרגע, שינוי התזונה בעולם הוא לכיוון של יותר צריכת בשר בקר, וזאת השפעה לרעה. שינוי לכיוון השני יכול להיות לטובה.

כיוון שלישי קשור לסקר אוכלוסין שאנחנו עורכים בכלל הטבע בעולם. במקביל לדרמה של ההתחממות הגלובלית, הצטברות גזי החממה וההשפעה המשמעותית של האנושות על כדור הארץ - תופעות שאנחנו יותר מודעים להן - יש שינוי דרמטי אחר, הקשור להשפעה של שימושי קרקע שלנו על כמות האורגניזמים החיים על פני כדור הארץ ועל הרכבם. אנחנו

² מבחני היתכנות: sanity test. בדיקה ראשונית, לרוב מתמטית, המאפשרת להעריך אם מצב מסוים יכול להתקיים. לדוגמה: אם יכול להיות (באופן תיאורטי) תא חי בגודל 1 סמ"ר.

בהיסטוריה של כדור הארץ התרחשו תהליכי התחממות במשך מיליוני שנים, בעוד שהשינויים הנוכחיים מתרחשים במשך עשורים בודדים

הנוכחי יש שני הבדלים מרכזיים: האחד הוא שהשינויים הללו קרו לפני שהופיעה האנושות, ולא כשיש 7.7 מיליארד אנשים שצריכים מזון ומקורות אנרגיה. שינויי אקלים דרמטיים שהאנושות לא התנסתה בהם יגרמו לפגיעה במיליונים רבים של אנשים, אם לא במיליארדים. הבדל שני הוא שבהיסטוריה של כדור הארץ התהליכים התרחשו במשך מיליוני שנים, בעוד שהשינויים הנוכחיים מתרחשים במשך עשורים בודדים. כשינויים מתרחשים על פני מיליון שנה, מתרחשים תהליכים אבולוציוניים של התאמה. כשזה קורה על פני מאה שנה, יש השלכות אקולוגיות קטסטרופליות.

יש קבוצת מדענים קטנה שאומרת ששינויי האקלים הם לא בהכרח תוצאה של פעילות האדם. מה דעתך?

אני מודע למה שהם טוענים וקראתי טיעונים שהם כתבו. המדענים שאני מכיר, שטוענים כך או שיש להם הצעות למה המצב הוא שונה, הם לרוב לא מדעני אקלים או מדענים מתחום מדעי כדור הארץ, ולא הקדישו את כל הקריירה שלהם להתעמק בנושא הזה כפי שנדרש כדי להבין אותו לעומק. מדענים רבים הרבה יותר הפריכו את הטענות האלה. זה חלק מהתהליך המדעי: אנשים טוענים ומביאים עדויות, ואפשר לנתח את הנתונים שעליהם הם מסתמכים ולבחון אותם. לדוגמה, שני חוקרי אקלים, אלי ציפרמן ואלי גלנטי, העבירו במכון ויצמן קורס מעניין שעסק בוויכוחים מדעיים סביב המדע של שינויי אקלים. הניתוח שנערך בקורס, על מה אנחנו יודעים ומה אנחנו לא יודעים בכל נושא, מראה עד כמה כדור הארץ הוא מערכת מורכבת ועד כמה הדברים מצריכים התעמקות ברמה המדעית הגבוהה ביותר. כלומר, אפשר להסביר מה זאת התחממות גלובלית ומהם שינויי אקלים בטיעונים פשוטים ופשטניים, וזה אולי בסדר כדי לתקשר איכשהו עם הקהל הרחב או עם תלמידים. אבל אם רוצים להבין את התהליכים לעומקם, זה מורכב למדי. בהקשר זה ראוי לציין את התהליך העולמי של [הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי האקלים \(IPCC\)](#), המאגד מומחים רבים שכל אחד מהם הקדיש עשרות שנים מחייו כדי להתעמק בנושא שינויי אקלים, באופן שמאפשר להעריך ולתכלל את הידע המדעי הקיים בנושא.

מה יכול כל אחד מאיתנו לעשות ברמת הפרט ומה אפשר להמליץ ברמת מקבלי ההחלטות כדי לתרום למאמץ העולמי בעניין שינויי האקלים?

אני חושב שכל אחד צריך לשאול את עצמו את השאלות האלה, גם צעירים וגם לא, כי עם כל הכבוד לווירוס הקורונה, אני חושב שהדרך לקיימות ובתוך זה התמודדות עם משבר האקלים היא האתגר הכי גדול של האנושות במאה ה-21. צריך לומר מראש שזו בעיה קשה שאין לה פתרונות קסם. אנחנו נידרש לשינויים

מה זכור לך מתקופת התיכון?

אהבתי ללמוד פיזיקה, ויש לי זיכרון משיעורי ביולוגיה בכיתה י שהוא קצת צחוק הגורל. למורה שלי אז היה חשוב ללמד את החלוקה ליצורים הטרופיים ואוטוטרופיים, וגם כימוליוטרופיים וכולי. באותם ימים זה לא אמר לי כלום וממש לא התחברתי לזה. בצורה משעשעת הנושא הפך למרכז המחקר שאני והסטודנטים שלי הקדשנו לו עשר שנים מהחיים המקצועיים שלנו. בעצם הראנו שאפשר לשנות במעבדה את החלוקה הזאת.

עד היום אני בקשר עם המורה שלי לביולוגיה ומדעים, יונה בלס, שלימדה אותי בכיתות ז-ט בחטיבת שז"ר בכפר סבא. היא מגיעה לפעמים להרצאות שלי ואני נהנה להיפגש איתה, מתייעץ איתה על כל מיני דברים ונעזר בה בגינת הבר שלי.

אתה יכול לתת דוגמה?

כן. בכמה עלתה הטמפרטורה עד עכשיו או בכמה עלה מפלס הים עד היום? זה רק מספר. השורה התחתונה. מספרים כאלה עוזרים להבין את התהליך בצורה מעמיקה יותר. לדוגמה, כיום הטמפרטורה הגלובלית הממוצעת על פני כדור הארץ עלתה בערך במעלה אחת. בקטבים הטמפרטורה עלתה יותר - בארבע עד חמש מעלות. בישראל היא עלתה בשתי מעלות. אז איך אפשר להסביר את הטמפרטורה בישראל אם אנחנו לא כל כך קרובים לקטבים? זה קשור לכך שהים מתחמם לאט יותר, יחסית ליבשה. ביבשה הטמפרטורה עלתה בשתי מעלות בממוצע. מבחינה זאת, ישראל היא בעצם כמו הממוצע ביבשה. אפשר לנסות לפלח כמה מההתחממות היא בעקבות פחמן דו-חמצני, כמה בעקבות מתאן (גז טבעי), כמה בעקבות גורמים אחרים, וכולי. ואז אפשר לנסות ליצור תחזיות לעתיד.

כמה שונה תהליך ההתחממות הגלובלית היום ממצבי התחממות של כדור הארץ בעבר?

לכדור הארץ יש באמת היסטוריה מרתקת, שבה חלו שינויים גם בטמפרטורה על פני כדור הארץ וגם בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה. הייתי אומר שבתהליך ההתחממות



התמודדות עם משבר האקלים היא בעיה קשה שאין לה פתרונות קסם, ואנחנו נידרש לשינויים משמעותיים

חשיבות השפה

התנהלות האנושות מול משבר האקלים דורשת הסברה טובה של הממצאים המדעיים לציבור הרחב וגיוסו לנקיטת פעולות. בתוך כך, יש למונחים שבהם משתמשים בכלי התקשורת השפעה רבה על תפיסת המציאות. ראיתי לאחרונה ש"הגארדיאן" עדכן את השפה שבה הוא משתמש. עורכי העיתון החליטו להפסיק להשתמש בביטויים שנראים פאסיביים או עדינים מידי בעיניהם לביטויים הממחישים את חומרת המצב כפי שהמדענים רואים אותה: הם מחליפים את הביטוי "שינויי אקלים" (climate change) בביטוי "משבר אקלים" (climate crisis); ואת הביטוי "התחממות גלובלית" (global warming) לביטוי "התלהטות גלובלית" (global heating). אני חושב שחשוב לעשות משהו דומה גם בעברית.



צומח בארבעה עד חמישה אחוזים בשנה. כך שבמקום להפסיק לגמרי לצרוך או להוריד את הצריכה בחמישים אחוז, אנחנו יכולים להפסיק להשתמש במה שלא באמת נחוץ לנו. חשיבה בשחור ולבן היא בעייתית, ולדעתי אם יש דבר שמונע היום את היכולת לקבל החלטות פוליטיות וחברתיות נכונות, זאת צורת המחשבה הדיכוטומית הזאת.

איזה מסר היית רוצה להעביר למורים לביולוגיה ולמורים למדעי הסביבה?

המסר שלי הוא שמשבר האקלים והמשבר האקולוגי של הכחדה מאסיבית של בעלי חיים הם האתגר הרציני של הדור שלנו ושל הדור הבא. חשוב גם לשים את זה בסוג של פרספקטיבה - הם חלק מהמחיר שאנחנו משלמים על כך שיש הרבה אנשים על פני כדור הארץ שחייהם נעמים ונוחים מאי פעם. האתגר הגדול הוא לנסות למצוא איזון בין רמת חיים שתספק את האנשים עד כמה שאפשר, ועם זאת שהאקלים והטבע לא ייפגעו יותר מדי.

משמעותיים. וגם בהתקיים השינויים האלה, אני לא בטוח שנצליח לחזור למה שהיה קודם, כי יש לנו עולם שעליו כ-8 מיליארד אנשים שחוגגים (לא כולם, אבל עדיין אנשים רבים מאוד) ברמת חיים גבוהה מאי פעם. אנחנו נהנים מזה - כולל אני - אבל זה לא לגמרי מסתדר לאורך זמן עם המשאבים המוגבלים של כדור הארץ. אז זה פשוט מורכב.

עם זאת, ברמת הפרט, אם חושבים על הדברים שבני אדם יכולים להשפיע עליהם בהתנהגותם היומיומית, הייתי מציין ארבע החלטות חשובות שאפשר להחליט ברמה האישית (לא לפי סדר החשיבות שלהן): מה אנחנו אוכלים; כמה אנחנו טסים, ובכלל איך אנחנו מגיעים ממקום למקום; כמה אנרגיה אנחנו מבזבזים בקירור וחימום במקום שבו אנחנו נמצאים; וכמה ילדים אנחנו מביאים לעולם. אלה ארבע החלטות שלכל אחת מהן יש השפעה סביבתית משמעותית: לטוס פחות ולנסוע פחות ובאמצעים יעילים יותר (כמו תחבורה ציבורית), לאכול פחות בקר, לבודד את הבית היטב ולכבות מזגן כשהוא לא ממש נחוץ ולחשוב היטב עד כמה אנחנו רוצים לעודד ילודה.

אבל לא יהיו לכך השלכות שליליות על אנשים?

לדעתי, לא כדאי לחשוב בשחור ולבן, אלא להבין שלמציאות יש הרבה גוונים. אפשר לחשוב על ארבע החלטות, שלדעתי ישפיעו לטובה על שינויי האקלים, בצורה קיצונית: אם נפסיק לצרוך, לא תהיה לאנשים עבודה, ייסגרו מפעלים וכן הלאה. אבל העולם הוא רציף וכך גם החלטות שלנו והשפעותיהן על הסביבה ועל החברה האנושית. אם כולנו נפסיק לצרוך או לטוס, אכן לא תהיה עבודה ומפעלים ייסגרו. אבל העולם

יש לך מסר מרגיע עבור הציבור שחושש ממה שטומן לנו העתיד?

יש לי מסר של פרספקטיבה, שקיבלתי מספר מצוין בשם Factfulness של [הנס רוסלינג](#) שנתנה לי סטודנטית שעבדתי איתה. יש לו ב-Ted הרצאות מצוינות בתרגום לעברית על התקדמות האנושות. הספר וההרצאה מראים גם את ההתפתחויות החיוביות של האנושות - כלומר, פחות אנשים בתנאי רעב, יותר אנשים בעלי השכלה, יותר נשים שזכותן לזכויות וכולי. אומנם יש עדיין אזורים בעולם שלא זכו לכך, אבל אם בוחנים את הנתונים גלובלית, ההתפתחות היא חיובית והדברים מפתיעים. עד כמה תוחלת החיים באפריקה עולה, עד כמה עולה רמת ההשכלה ברוב מוחץ של המדינות. אני חושב שזה גם נותן כוח להשקיע ולפתור את הבעיות שאנחנו גורמים לעולם הטבע בזמן שרמת החיים שלנו משתפרת.

מכיוון שחקלאות היא בפועל תעשייה של קיבוע פחמן, התחלנו את העבודה במעבדה בשאלה אם אפשר לשפר את יעילות התהליך הזה



הנשאים והעוברים

השפעת ההתחממות הגלובלית על תפוצת אורגניזמים

מעובד על פי המאמר¹:

Richard J. Hobbs, Leonie E. Valentine, Rachel J. Standish & Stephen T. Jackson (2017): Movers and Stayers: Novel Assemblages in Changing Environments. Trends in Ecology & Evolution, Vol. 33(2): 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.11.00>

עיבוד: גילת בריל

להישאר או לעבור

אורגניזמים יכולים להגיב לשינויים בסביבה באמצעות הקטנת שטח תפוצתם או באמצעות העתקתו (איור 1). כתוצאה מהקטנת השטח הקודם יכול להיווצר שטח תפוצה מצומצם יחיד המהווה מקלט קבוע או זמני לאוכלוסייה ששרדה (McLaughlin, 2017). אפשרות אחרת היא היווצרות איים של שטחי תפוצה, בעיקר כתוצאה מבניית ערים או חקלאות. לעומת זאת, העתקת שטח התפוצה יכולה להיווצר על ידי צמצום שטח המחיה באזור אחד והרחבתו באזור אחר (Ettinger & HilleRisLambers, 2013).

הקטנת שטח התפוצה יכולה להתרחש בעקבות תמותה באוכלוסיית המין, או באמצעות הגירה של פרטים לשטח המצומצם (Ceballos, 2017). לעומת זאת, העתקת שטח התפוצה מתרחשת באמצעות הגירה של האוכלוסייה והתיישבות בשטח חדש, ואחריהן התאמת גודל האוכלוסייה לשטח החדש.

מינים מסוימים יכולים להגיב לשינויים בסביבה בשתי הצורות (הקטנת שטח תפוצתם והעתקתו). באופן דומה, באותו אזור

אחת מהתגובות הנפוצות של אורגניזמים לתהליכי ההתחממות הגלובלית היא שינוי מקום מחיה (Pech, 2017). ואכן, בעידן של שינויי אקלים עולמיים, יימצאו בכל בית גידול מינים העוזבים אותו או הפולשים אליו, בד בבד עם מינים אשר נשארים ומתמודדים לעת עתה עם השינויים.

תופעות אלה אינן חדשות. תקופות של התקררות כדור הארץ והתחממותו כבר גרמו בעבר לשינויי תפוצה של מינים: ממצאי מאובנים מראים כי מינים שונים של אורגניזמים נשארו בבתי גידול מסוימים בעוד שמינים אחרים נעלמו מהם, או הופיעו בהם, בהתאם לתקופות התחממות או התקררות (Barnosky et al., 2017). ואולם קצב השינויים העולמיים המתחוללים היום והיקפם, כמו גם מידת המעורבות של בני אדם בתהליכים אקולוגיים, הם חסרי תקדים (Lawler, 2015).

גם במקרים של התערבות האדם, יש מינים המועברים משטח מחייתם ויש מינים המושארים בו. העברת אורגניזמים על ידי האדם מאזורי תפוצתם הטבעיים עלולה ליצור מינים פולשים (Lockwood, 2013) או יכולה לסייע למינים בסכנת הכחדה (Richardson, 2009). לעיתים, בהיעדר התערבות מלאכותית, חלק מהמינים הנשארים נכחדים (Sansilvestri, 2015).

צירופי האורגניזמים הנמצאים במערכת אקולוגית מסוימת כוללים אפוא את "הנשארים", שחלקם נידונו להכחדה וחלקם ישרדו את השינויים, ואת "העוברים", שפלטו והרחיבו את שטח תפוצתם או שינו אותו (Magurran, 2016). נמצא שלצירופים השונים של האורגניזמים - הנשארים והעוברים - יש דרגות חידוש שונות, החל מצירופים שבהם דרגת החידוש היא אפסית מאחר שהצירוף כבר הופיע במקום אחר, ועד לצירוף חדש לגמרי של מינים (Stralberg, 2009). במאמר מנסים הכותבים להתייחס לדינמיות של מינים נשארים ושל מינים עוברים בחברות האורגניזמים בעולם העובר שינויי אקלים מואצים, ולהסביר את ההשלכות שיש לכך על תהליכי שימור.



¹ הגרסה המובאת כאן היא סקירה של תוכני המאמר המקורי, 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 המאמר המקורי מוזמנים לפנות למקור לפי ההפניה המובאת בתחילת הגרסה המעובדת.

המחיה שלהם בהרי האלפים השווייצריים הולך ועולה (Büntgen, 2017). כיוון אחר הוא מעבר לקווי אורך או לקווי רוחב אחרים על פני כדור הארץ (Lenoir, 2015). לדוגמה, תנועה משמעותית של דגי ים תועדה מאזור מזרח אוסטרליה ויפן לכיוון צפון, ובעקבותיה עלתה צפיפות הדגים באזורים צפוניים (Johnson, 2011). כתוצאה מכך התרחשה רעיית יתר של אצות באזורים אלה, וחדירה של אלמוגים לאזורים של אקלים ממוזג (Vergés, 2014).

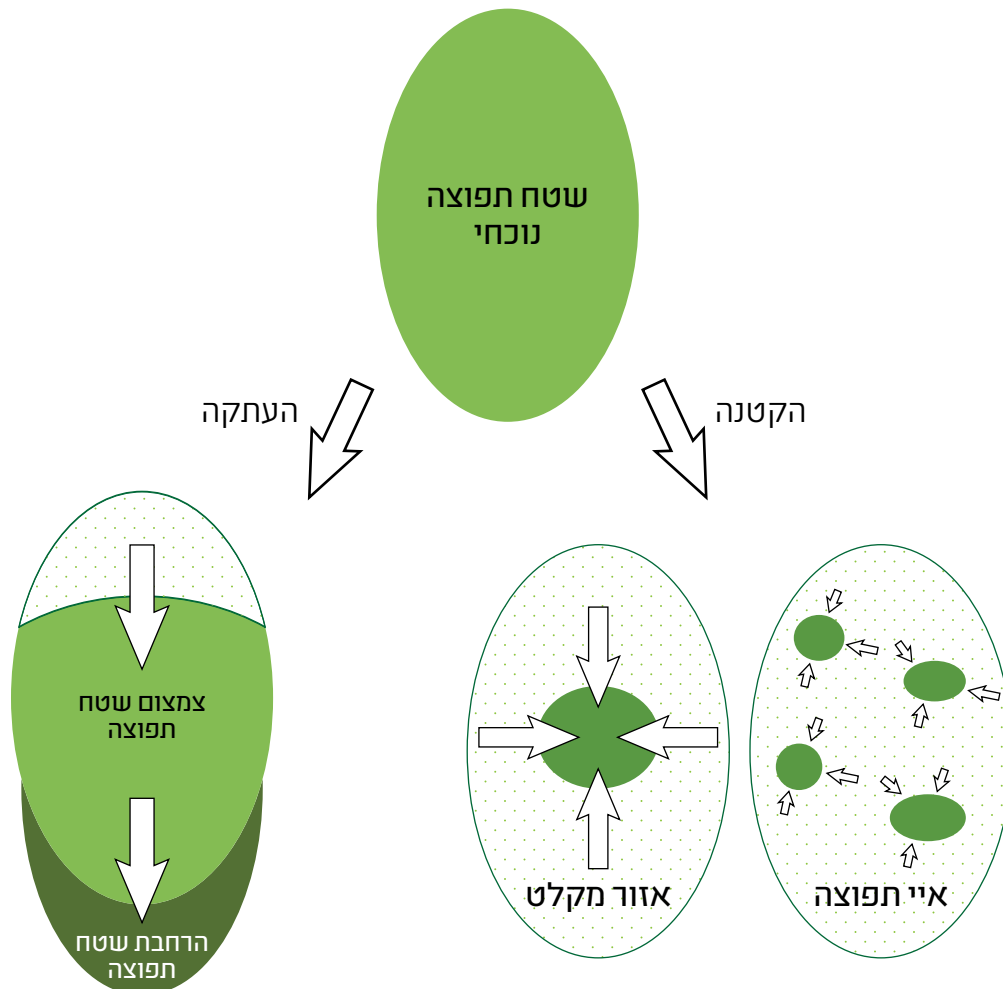
תרומתם של בני אדם לתנועת אורגניזמים ידועה לכל אורך ההיסטוריה האנושית (Hulme, 2009). כיום, רוב ההתערבות של בני אדם בתפוצת מינים נועדה מחד גיסא לשמור או להגדיל את תפוצתם של מינים בעלי ערך או תועלת, ועיקר השינוע מתמקד בצמחי מזון וצמחים לטקסטיל, מינים מתורבתים, עדרי בקר וצאן וחיות מחמד; ומאידך גיסא נועדה ההתערבות להפחית מינים הנתפסים כפוגעים בסביבה או כבעלי חסרונות, או להוציא מינים כאלה מהמערכת. רוב מיני התבואה, הצאן והבקר פוזרו ברחבי העולם על ידי בני אדם ונשמרים בשדות או במכלאות. בני אדם הפיצו, לעיתים בכוונה ולעיתים במקרה, גם מינים פחות רצויים, שחלקם הפכו למינים פולשים (Global Invasive Species Database, 2017). השפעות שליליות של מינים פולשים מתועדות בכל העולם, כמו גם המאמצים להפחיתן (Simberloff, 2014).

יכולים להתרחש מגוון תהליכים הקורים בו-זמנית, כשחלק מהמינים מגיעים בכוחות עצמם, חלק מהמינים מגיעים בהתערבות האדם, חלק נשארים, ואחרים נעלמים או עוברים למקומות אחרים. לכן הקטגוריות "נשארים" ו"עוברים" המתוארות להלן אינן בהכרח נפרדות זו מזו.

עוברים

מינים של אורגניזמים יכולים לנוע בתוך שטחי תפוצתם ולהתפזר למרחקים קצרים או ארוכים. סדרי הגודל של תנועת המינים משתנים מאוד, מתנועה מקומית לתנועה למרחקים בקנה מידה עולמי, מזמני תנועה קצרים של ימים לזמני תנועה ארוכים של אלפי שנים (Wilson, 2009). תנועה מוכרת וידועה של מינים רבים היא תופעת הנדידה העונתית, לעיתים למרחקים עצומים ולאורך זמן.

כאשר מינים נעים בתגובה לשינויי אקלים ומשנים את שטח תפוצתם, הם עושים זאת בכמה כיוונים: שינוי בקווי גובה, כמו עלייה לאזורים גבוהים יותר או ירידה לאזורים נמוכים יותר בהרים. לדוגמה, ביערות הגשם שבצפון אוסטרליה נצפתה תנועה של כ-28 מיני ציפורים לקווי גובה גבוהים יותר ומיני אופוסום מקומיים הרחיבו את שטח תפוצתם כשעלו או ירדו בקווי הגובה (State of the Wet Tropics Report, 2016). תנועה דומה נצפתה אצל עיזים אלפיניות ואיילים, שקו הגובה של שטח



איור 1: תגובות אפשריות של אורגניזמים לשינויי אקלים על ידי שינוי שטחי תפוצה

בעידן של שינויי אקלים עולמיים, ימצאו בכל בית גידול מינים העוזבים אותו או הפולשים אליו, בד בבד עם מינים אשר נשארים

מתועדים היטב בנתונים רבים בשל פלטפורמות של מאגרי נתונים ורשתות של גיוס מידע. לדוגמה, שינויים במועדי פריחה מצביעים על חוסר התאמה בין פריחה לבין זמינות המאבקים, וכתוצאה מכך חלה ירידה בזמינות משאבים לבעלי חיים (Butt, 2015). בקרב אורגניזמים המקובעים למקום ואינם יכולים לנוע, כמו צמחים, במיוחד אם תוחלת החיים שלהם ארוכה, ההסתגלות מתבטאת ביכולת להתקיים בתנאי תאורה חלשה, על ידי הפצה יעילה של אבקנים, או בהפעלת מגוון דרכים לניצול משאבים מהקרקה. נוסף על כך, אוכלוסיות שאינן נעות יכולות להישאר בתוך שטח המחיה שלהן באזורי מקלט שהתנאים בהם ממתנים את השינויים בסביבה (McLaughlin, 2017).

חלק מהמינים אינם עוברים פשוט משום שהם מוגבלים ביכולת ההפצה שלהם, ויכולים לנוע למרחקים קצרים בלבד, או שהם מותאמים לבית גידול ייחודי או לניצול משאב ייחודי, ואלה מגבילים את יכולת התפוצה שלהם. סופם של מינים נשארים אלה להיכחד בשל תמותה, קשיים להמשיך להתרבות, או חוסר יכולת להגיב פנוטיפית לקצב השינויים בסביבה.

יתרון למינים הנשארים בשטח התפוצה שלהם יכול להתקבל מהיווצרותם של מצבים חדשים. לדוגמה, התמעטות או הכחדה של טורף או מין מתחרה, או הגירה של מינים חדשים לשטח התפוצה שיכולים לשמש משאב חדש (Raynor, 2017). השאלה אם אפשר לחזות את התגובה של הנשארים לחדירת מינים חדשים היא חשובה ביותר מבחינת מאמצי השימור של מערכות אקולוגיות.

תופעה מעניינת המתחילה לצבור עדויות תומכות היא יכולתם של מינים להתאים את עצמם לשינויים סביבתיים באמצעות שינוי אבולוציוני מהיר או שינויים פנוטיפיים (Rey, 2016; Flores-). יצורי כלאיים הם דוגמה לשינויים מהירים כאלה, שבהם רבייה בין מינים שונים יוצרת צאצאי כלאיים המותאמים טוב יותר לשינויי הסביבה. לדוגמה, קיימות עדויות לרבייה שהתרחשה בעבר ומתרחשת גם כיום בין דוב קוטב לדוב חום בהקשר של שינויים סביבתיים (Miller, 2012). אולם יש לזכור שקצב השינויים האבולוציוניים ושיעורם מוגבלים על ידי מגוון גנטי, גודל אוכלוסייה אפקטיבי, זמן דור וברירה טבעית. כנראה שיעור שינויי האקלים עולה על שיעור היכולת האבולוציונית ליצור התאמה לסביבה בקרב אוכלוסיות, ומוביל לבסוף להכחדתן המקומית של אוכלוסיות אלו.

קיים מגוון רחב של מינים שהישירותם בשטח תפוצתם תלוי בהתערבות האדם, ולכן הם מכונים מינים תלויי-שימור. השארת

במקביל לתופעות אלה, תנועת מינים בהתערבות האדם נעשית יותר ויותר כלי לשימור אקולוגי. קיים מגוון של גישות ומטרות הנוגעות לשינוע לשם שימור. החזרת פרטים לאזורים שבהם היו נפוצים בעבר או הוספת פרטים לחיזוק אוכלוסייה מקומית הם עניין שבשגרה במבצעי שימור (Carter, 2017). כמו כן, יש פרטים המועברים למקומות שהתנאים בהם בטוחים יותר עבורם, או המועברים בעקבות תחזית של שינוי אקולוגי צפוי - כל זאת כדי להציל אוכלוסיות בסכנה (Mitchell, 2013). גרעיני רבייה בגני חיות ובנק זרעים של צמחים הם דוגמאות נוספות לשינוע למטרות שימור. לעיתים משנעים אורגניזמים כממלאי מקום של חסר אקולוגי. לדוגמה, כדי לבצע תהליכים החסרים במערכת האקולוגית הועברו צבי ענק לאיים בגלפגוס ולקבוצת איים באוקיינוס ההודי שבהם נכחדו המינים האנדמיים (Hunter, 2013). גישה אחרת לשימור, שעדיין שנויה במחלוקת, היא [החזרת טורפי-על למערכת אקולוגית כדי לשקמה](#). על פי גישה זאת, טורף-על הוא אורגניזם מפתח, המעודד תנועה של אנרגיה בכל הרמות הטרופיות של המערכת האקולוגית, ולכן הוא מרכזי לשיקומה (Svenning, 2016).

כחלופה לשינוע יזום, יש תוכניות שימור המנסות לעודד תנועה טבעית של אורגניזמים, כמו יצירת מסדרונות אקולוגיים מקומיים המחברים בין אזורים תפוצה שהופרדו בשל בניית ערים או כבישים מהירים, או יצירת חיבורים בין שטחים פתוחים ושמורות בסדר גודל של יבשת, כמו [החיבור בין פארק ילוסטון בארצות הברית לפארק יוקון שבקנדה](#).

תופעה מעניינת אחרת היא נהיית אורגניזמים לסביבות המיושבות על ידי בני אדם. תופעה עתיקה היא כניסת בעלי חיים לשטחים חקלאיים ורעייה, או שתייה ממקורות השקיה, במיוחד באזורים מדבריים או בעונות יבשות (James, 1999). דוגמה למין שתפוצתו הושפעה מחקלאות היא אנפית הבקר, שתפוצתה העולמית התאפשרה במקביל להתפשטות גידולי בקר בעולם (Massa, 2014). מינים מסוימים עוברים לשכון בערים, המהוות מקור משיכה בשל שפע המים והמזון שבהן (Williams, 2006). דוגמה מיוחדת לקשר בין תהליכים טבעיים לבין סביבות המעוצבות על ידי בני אדם התרחשה ב-2011 לאחר גל הצונאמי ביפן, כאשר שברי מבנים וחפצים שונים שהתפזרו באוקיינוס שימשו רפסודות ששינעו מאות מינים ימיים לרחבי האוקיינוס השקט (Carlton, 2017).

נשארים

מינים הנשארים בבתי הגידול שלהם למרות שינויי האקלים הם לרוב סבילים למגוון תנאים, ולכן פחות מושפעים מהשינויים. הסתגלותם לשינויים יכולה להתבטא בשינויים בתכונות עונתיות, בשינויים פיזיולוגיים, באיתור משאבים חדשים, בשינויים אנטומיים ומורפולוגיים ובשינויי התנהגות. רבים מהשינויים האלה הם ייחודיים למין או למקום, וקשה לצפות אותם מראש ללא נתונים מתצפיות רבות. דווקא שינויים בתכונות עונתיות





מכל האמור לעיל אפשר להבין שיש מינים שיעברו מקום בתגובה לשינויי האקלים, חלקם מהר יותר מאחרים. לעומתם, יש מינים שישארו במקומם, חלקם זמן ארוך מאחרים. חלק מהמינים הזקוקים למעבר כדי לשרוד אינם מסוגלים לבצעו. כמו כן, כל העת ייווצרו צירופים חדשים של מינים בשטח מסוים. בהתאם לכך, ייכחדו מינים אנדמיים שטווחי התגובה שלהם מוגבלים ואשר אינם יכולים להסתגל או אינם מקבלים עזרה באמצעות שימור. דוגמה ראשונה למין כזה היא המכרסם האוסטרלי מלומיס קי ברמבל, שהיה הראשון שהוכרז כמין שנכחד כתוצאה מההתחממות הגלובלית, וחי באי מבודד בשונית האלמוגים הגדולה של אוסטרליה (Fulton, 2017). מין זה ואלו שנכחדו אחריו לא קיבלו כל סיוע יזום להישארות או להעברה. מורכבות רבה כרוכה בהחלטות היכן ומתי להתערב במבצעי שימור על ידי העברה או השארה של מינים, והיכן להניח למינים ולמקומות. הישארות או מעבר אינם תהליכים מנוגדים: כל מין יכול להפגין יותר מתהליך אחד בתגובה לשינויי אקלים, ולהיות נתון בו-זמנית להתערבויות שונות של בני אדם.

עובדות אלה יכולות לרפות את ידי המנסים להציל מערכות אקולוגיות, או לחלופין לגרום להם להמשיך ולפעול כמיטב יכולתם. למרות זאת, כדי להחליט באופן מושכל איזו התערבות (או אי התערבות) עשויה לתת את התוצאות הטובות ביותר, יש לשקול את מכלול האפשרויות. גישות השימור צריכות לעבור מעיסוק במינים ספציפיים - להתייחסות כוללת יותר לדרך שבה האינטראקציה בין המינים תחול ולאופן שבו חברות חדשות שיווצרו לאחר ההתערבות יתפקדו. לדוגמה, העברת מין בסכנה לבית גידול חדש עלולה ליצור השלכות שליליות על מינים אחרים החיים בבית הגידול, או שהמין המועבר יכול להפוך למין פולש. כיצד אפשר לעבור להתייחסות כוללת כזאת בניבוי של תהליכי שימור? המדיניות והביצוע יכולים עדיין להתייחס למין יחיד, אבל השיקולים הכרוכים בהחלטה על תהליך השימור המתאים ביותר למין זה צריכים להביא בחשבון את השינויים באינטראקציות בין המינים ותוצאות בלתי צפויות ובלתי רצויות שיכולות להתקבל. מגוון האפשרויות לפעולה יכול לגדול אם יועלו גישות תלויות-טקסונומיה (על פי מינים ושיוכם הטקסונומי) ובלתי-תלויות בטקסונומיה (על פי תפקוד אקולוגי במערכת). בעולם שבו תפוצת האורגניזמים משתנה ואיתה הרכבם במערכות אקולוגיות, חשוב להבין מהם הדברים הגורמים למינים להישאר או לעבור, ולהפעיל התערבויות שמשיגות את מטרת השימור והשיקום של מערכות אקולוגיות.

מינים בסכנת הכחדה מקומית או עולמית בשטחי תפוצה בהתערבות האדם היא חלק בלתי נפרד ממבצעי שימור, המכתיבה התערבות ושינויים בשטח התפוצה כדי לאפשר את הישארותם של המינים והישרדותם. חלק מהמינים הנבחרים לשימור מסוג זה הם בעלי ערך מיוחד לבני האדם: מינים היוצרים חותם מיוחד לשטח התפוצה שלהם, מינים בעלי חשיבות כלכלית, מינים הנחשבים לבעלי השפעה אקולוגית משמעותית או מינים בעלי משמעות תרבותית מקומית. ההתערבות בשטחי התפוצה יכולה להיות מזערית עד מושקעת מאוד. דוגמה להתערבות מושקעת היא ריסוס עונתי של צמחי צוגה קנדי (*Tsuga Canadensis*) בשולי מסלולי טיול רגליים בקנדה כנגד פשפש מזיק שמקורו באסיה ומהווה סכנה לקיומו של הצמח.

הצלת מינים באמצעות שימור מחוץ לשטח תפוצה נפוצה יותר ויותר, בעיקר מפני שהאורגניזם נכחד הלכה למעשה בשטח התפוצה המקורי שבו חי. גרעיני רבייה או בנק זרעים נמנים עם הצורות לשימור מחוץ לשטח תפוצה, מתוך תקווה להחזיר את הפרטים לשטח המחיה המקורי או לשטח מתאים אחר כאשר תגדל האוכלוסייה בשבי או בחממות (Canessa, 2016). החיסרון בגישה זאת הוא שרבייה בשבי או בחממות יכולה ליצור שינויים אבולוציוניים זעירים שמתאימים את האוכלוסייה לתנאי השבי. כמו כן, שינויי אקלים יכולים לגרום לשטח התפוצה המקורי להפוך לבלתי מתאים לתוצאות מאמצי השימור, באופן המצריך לאתר מקומות מחיה חדשים. בכל מקרה, אין לצפות משימור מחוץ לשטח התפוצה המקורי לשמר מינים ואת היחסים ביניהם כפי שהם כיום.

כפי שתואר בנוגע למינים עוברים, גם מינים נשארים עשויים להישאר בשל פעילות לא מכוונת של האדם. לדוגמה, גידול חקלאי המשמש מזון, הופעת מינים מתורבתים המספקים מחסה או מזון, או מקורות מים חדשים ומבנים המשמשים מקום מחסה, קניון או התיישבות. בארצות שבהן מקובל ליצור בגינות ביתיות מתקני האכלה לציפורים, מתקני קניון או צמחייה מגוונת, במקביל לעלייה במספר מיני החרקים, שחלקם יכולים לשמש נצפית גם עלייה במספר מיני החרקים, שחלקם יכולים לשמש מזון עבור הציפורים (Orros, 2012).

עוברים למעשים או מרימים ידיים?

רוב מאמצי השימור של המגוון הביולוגי מתמקדים במקומות, כמו שמורות טבע, פארקים לאומיים ושטחים פתוחים, ובמינים וחברות ספציפיים, כמו הכרזה על מינים בסכנת הכחדה ועל גרעיני רבייה. לעיתים קרובות הצלת מין מסוים מכתיבה את המיקום של פעולות השימור, כמו שמורת סרנגטי באפריקה או פארק יוסמיטי בארצות הברית. מיקוד כפול זה במקומות ובמינים פועל יפה בעולם יציב, שבו בתי הגידול הם בעלי מאפיינים קבועים פחות או יותר; אך פחות מתאים כאשר מקומות המחיה של היצורים משתנים, וכאשר מינים עוברים למקומות אחרים.

שימור המתמקד במקומות ובמינים פועל יפה בעולם יציב, אך פחות מתאים כאשר מקומות המחיה של היצורים משתנים, וכאשר מינים עוברים למקומות אחרים

- Hulme, P.E. (2009): Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. *Journal of Applied Ecology* **46**: 10–18.
- Hunter, E.A., Gibbs, J.P., Cayot, L.J. & Tapia, W. (2013): Equivalency of Galápagos giant tortoises used as ecological replacement species to restore eco-system functions. *Conservation Biology* **27**: 701–709.
- James, C.D. Lansberg, D.J & Morton, S.R. (1999): Provision of watering points in the Australian arid zone: a review of effects on biota. *Journal of Arid Environment* **41**: 87–121.
- Johnson, C.R., Banks, S.C., Barrett, N.S., Cazassus, F., Dunstan, P.K., Edgar, G.J., Frusher, S.D., Gardner, C., Haddon, M., Helidoniotis, F., Hill, K.L., Holbrook, N.J., Hosie, G.W., Last, P.R., Ling, S.D., Melbourne-Thomas, J., Miller, K., Pecl, G.T., Richardson, A.J., Ridgway, K.R., Rintoul, S.R., Ritz, D.A., Ross, D.J., Sanderson, J.C., Shepherd, S.A., Slotwinski, A., Swadling, K.M. & Taw, N. (2011): Climate change cascades: shifts in oceanography, species' ranges and sub-tidal marine community dynamics in eastern Tasmania. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **400**: 17–32.
- Lawler, J.J., Ackerly, D.D., Albano, C.M., Anderson, M.G., Dobrowski, S.Z., Gill, J.L., Heller, N.E., Pressey, R.L., Sanderson, E.W. & Weiss, S.B. (2015): The theory behind, and the challenges of, conserving nature's stage in a time of rapid change. *Conservation Biology* **29**: 618–629.
- Lenoir, J. & Svenning, J.C. (2015): Climate-related range shifts – a global multidimensional synthesis and new research directions. *Ecography* **38**: 15–28.
- Lockwood, J.L., Hoopes, M.F. & Marchetti, M.P. (2013): *Invasion Ecology*, (2nd ed.), Wiley- Blackwell.
- Magurran, A.E. (2016): How ecosystems change. *Science* **351**: 448–449.
- Massa, C., Fortunato, R.C. & Doyle, M.E. (2014): On how cattle egret (*Bubulcus ibis*) spread to the Americas: meteorological tools to assess probable colonization trajectories. *International Biometeorology* **58**: 1879–1891.
- McLaughlin, B.C., Ackerly, D.D., Klos, P.Z., Natali, J., Dawson, T.E. & Thompson, S.E. (2017): Hydrologic refugia, plants, and climate change. *Global Change Biology* **23**: 2941–2961.
- Miller, W., Schuster, S.C., Welch, A.J., Ratana, A., Bedoya-Reina, O.C., Zhao, F., Kim, H.L., Burhans, R.C., Drautz, D.I., Wittekindt, N.E., Tomsho, L.P., Ibarra-Laclette, E., Herrera-Estrella, L., Peacock, E., Farley, S., Sage, G.K., Rode, K., Obbard, M., Montiel, R., Bachmann, L., Ingólfsson, Ó, Aars, J., Mailund, T., Wiig, Ø., Talbot, S.L. & Lindqvist, C. (2012): Polar and brown bear genomes reveal ancient admixture and
- Barnosky, A.D. et al. (2017): Merging paleobiology with conservation biology to guide the future of terrestrial ecosystems. *Science* **355**, eaah4787.
- Beever, E.A., Hall, L.E., Varner, J., Loosen, A.E., Dunham, J.B., Gahl, M.K., Smith, F.A. & Lawler, J.J. (2017): Behavioral flexibility as a mechanism for coping with climate change. *Frontiers in Ecology and Environment* **15**: 299–308.
- Büntgen, U., Greuter, L., Bollmann, K., Hannes, J., Liebhold, A., Galván, J.D., Stenseth, N. C., Andrew, C. & Mysterud, A. (2017): Elevational range shifts in four mountain ungulate species from the Swiss Alps. *Ecosphere* **8**, e01761.
- Butt, N. Seabrook, L., Maron, M., Law, B.S., Dawson, T.P., Syktus, J. & McAlpine, C.A. (2015): Cascading effects of climate extremes on vertebrate fauna through changes to low-latitude tree flowering and fruiting phenology. *Global Change Biology* **21**: 3267–3277.
- Canessa, S., Converse, S.J., West, M., Clemann, N., Gillespie, G., McFadden, M., Silla, A.J., Parris, K.M. & McCarthy, M.A. (2016): Planning for ex situ conservation in the face of uncertainty. *Conservation Biology* **30**: 599–609.
- Carlton, J.T., Chapman, J.W., Geller, J.B., Miller, J.A., Carlton, D.A., McCuller, M.I., Treneman, N.C., Steves, B.P. & Ruiz, G.M. (2017): Tsunami-driven rafting: Transoceanic species dispersal and implications for marine biogeography. *Science* **357**, 1402–1406.
- Carter, I. Foster, J. & Lock, L. (2017): The role of animal translocations in con-serving British wildlife: an overview of recent work and prospects for the future. *EcoHealth* **14**: 7–15.
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R. & Dirzo, R. (2017): Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings National Academy of Science U.S.A.* **114**, E6089–E6096.
- Ettinger, A.K. & HilleRisLambers, J. (2013): Climate isn't every-thing: competitive interactions and variation by life stage will also affect range shifts in a warming world. *American Journal Botany* **100**: 1344–1355.
- Flores-Moreno, H., García-Treviño, E.S., Letten, A.D. & Moles, A.T. (2015): In the beginning: phenotypic change in three invasive species through their first two centuries since introduction. *Biology Invasions* **17**: 1215–1225.
- Fulton, G.R. (2017): The Bramble Cay melomys: the first mammalian extinction due to human-induced climate change. *Pacific Conservation Biology* **23**: 1–3.
- Global Invasive Species Database (2017): <http://www.iucngisd.org/gisd/>

demographic footprints of past climate change. *Proceedings National Academy of Science U.S.A.* **109**: E2382–E2390.

Mitchell, N., Hipsey, M.R., Arnall, S., McGrath, G., Tareque, H.B., Kuchling, G., Vogwill, R., Sivapalan, M., Porter, W.P. & Kearney, M.R. (2013): Linking eco-energetics and eco-hydrology to select sites for the assisted colonization of Australia's rarest reptile. *Biology (Basel)* **2**: 1–25.

Orros, M.E. & Fellowes, M.D.E. (2012): Supplementary feeding of wild birds indirectly affects the local abundance of arthropod prey. *Basic Applied Ecology* **13**: 286–293.

Pecl, G.T., Araújo, M.B., Bell, J.D., Blanchard, J., Bonebrake, T.C., Chen, I.C., Clark, T.D., Colwell, R.K., Danielsen, F., Evengård, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R.A., Griffis, R.B., Hobday, A.J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M.A., Jennings, S., Lenoir, J., Linnetved, H.I., Martin, V.Y., McCormack, P.C., McDonald, J., Mitchell, N.J., Mustonen, T., Pandolfi, J.M., Pettoirelli, N., Popova, E., Robinson, S.A., Scheffers, B.R., Shaw, J.D., Sorte, C.J., Strugnell, J.M., Sunday, J.M., Tuanmu, M.N., Vergés, A., Villanueva, C., Wernberg, T., Wapstra, E. & Williams, S.E. (2017): Biodiversity redistribution under climate change: impacts on ecosystems and human well-being. *Science* **355**, eaai9214.

Raynor, E.J., Cable, T.T. & Sandercock, B.K. (2017): Effects of Tamarix removal on the community dynamics of riparian birds in a semiarid grassland. *Restoration Ecology* **28**: 778–787.

Rey, O., Danchin, E., Mirouze, M., Loot, C. & Blanchet, S. (2016): Adaptation to global change: a transposable element–epigenetics perspective. *Trends in Ecology and Evolution* **31**: 514–526.

Richardson, D.M., McLachlan, J.S., Hellmann, J. J. & Sax, D.F. (2009): Multidimensional evaluation of managed relocation. *Proceedings National Academy of Science U.S.A.* **106**: 9721–9724.

Sansilvestri, R., Frascaria-Lacoste, N. & Fernández-Manjarre's, J.F. (2015): Reconstructing a deconstructed concept: policy tools

for implementing assisted migration for species and ecosystem management. *Environmental Science Policy* **51**: 192–201.

Simberloff, D. (2014): Biological invasions: what's worth fighting and what can be won? *Ecol. Eng.* **65**: 112–121.

State of the Wet Tropics Report (2016): Ancient, Endemic, Rare and Threatened Vertebrates of the Wet Tropics. Wet Tropics Management Authority. <https://www.wettropics.gov.au/site/user-assets/docs/sowt2015-16b5-lres.pdf>

Stralberg, D.I., Jongsomjit, D., Howell, C.A., Snyder, M.A., Alexander, J.D., Wiens, J.A. & Root, T.L. (2009): Re-shuffling of species with climate disruption: a no-analog future for California birds? *PLoS One* **4**, e6825.

Svenning, J.-C., Pedersen, P.B.M., Donlan, C.J., Ejrnæs, R., Faurby, S., Galetti, M., Hansen, D.M., Sandel, B., Sandom, C.J., Terborgh, J.W. & Vera, F.W.M. (2016): Science for a wilder Anthropocene: synthesis and future directions for trophic rewilding research. *Proceedings National Academy of Science U.S.A.* **113**: 898–906.

Vergés, A., Steinberg, P.D., Hay, M.E., Poore, A.G.B., Campbell, A.H., Ballesteros, E., Heck, K.L., Booth, D.J., Coleman, M.A., Feary, D.A., Figueira, W., Tim L., Marzinelli, M., Mizerek, T., Mumby, P.J., Nakamura, Y., Roughan, M., van Sebille, E., Gupta, A.S., Smale, D.A., Tomas, F., Wernberg, T. & Wilson, S.K. (2014): The tropicalization of temperate marine ecosystems: climate-mediated changes in herbivory and community phase shifts. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **281**, 20140846.

Williams, N.S.G., McDonnell, M.J., Phelan, G.K., Keim, L.D. & van der Ree, R. (2006): Range expansion due to urbanization: increased food resources attract Grey-headed Flying-foxes (*Pteropus poliocephalus*) to Melbourne. *Australian Ecology* **31**: 190–198.

Wilson, J.R.U., Dormontt, E.E., Prentis, P.J., Lowe, A.J. & Richardson, D.M. (2009): Something in the way you move: dispersal pathways affect invasion success. *Trends in Ecology and Evolution* **24**: 136–144.





מותר להוציא ניידים

אתרים ואפליקציות לשינויי האקלים

הרצאות TED

א. הפניה לשלל הרצאות בנושא שינויי אקלים



ב. דיייד קיטי וגאו-הנדסה

רעיון לא קונבנציונלי לפתרון משבר האקלים, המדגיש את מורכבות הבעיה



Earth-Now (באנגלית)

יישומון של NASA המספק נתונים ויזואליים הקשורים לשינויי אקלים על פני כדור הארץ



For Good (באנגלית)

חישוב פליטת הפחמן הדו-חמצנית האישית



WWF Together (באנגלית)

תמונות ומידע על בעלי חיים בסכנת הכחדה



מחזור-Location (בעברית)

איתור פחי מחזור מסוגים שונים ברחבי הארץ



catmolo (בעברית)

אפליקציית משחק של בית המחזור תמיר, המלמדת איך להפריד אריזות לפחי המחזור.



דו"ח Eat Lancet

קבוצת מדענים שחברו עם כתב העת המדעי היוקרתי Lancet לכתיבת דו"ח המכיל המלצות בנוגע לתזונה ושינויי אקלים.



ריכוז נתונים מספריים על שינויי אקלים
פרופסור רון מילוא, מכון ויצמן למדע



הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים IPCC

אתר הארגון בינלאומי המחבר דוחות על מצב שינויי האקלים



שינויי אקלים -

הסכת (פודקסט), שיחה עם מדענים מומחים בתחום

כדי להאזין יש להוריד לטלפון הנייד ישומון להאזנה לפודקסטים

חלק 1



חלק 2



חלק 3





להתנהג בהתאם

שינויי התנהגות כתגובה לשינויי אקלים

מעובד על פי המאמר¹:

Beever, E.A., Hall, L.E., Varner, J., Loosen, A.E., Dunham, J.B., Gahl, M.K., Smith, F.A. & Lawler, J. J. (2017): Behavioral flexibility as a mechanism for coping with climate change. *Frontiers in Ecology and Environment* 15: 299–308.

עיבוד: גילת בריל

לאחר מזון ובני זוג אמור בסופו של דבר להוציא את החולדות מהמחילה ולקצר את משך ההורות בה. כלומר, חולדות אלה מוגבלות ביכולתן לשנות את זמני היציאה מהמחילה ולהימנע משמפרטורות גבוהות. למגבלה זאת יש כמובן משמעות רבה ככל שהטמפרטורות עולות, והיא משפיעה במיוחד על גודל האוכלוסייה. נראה שהימנעות מיציאה מהמחילות בשעות החמות בעונת הרבייה היא אחד מההסברים לירידה הניכרת באוכלוסיית הלטאות העולמית (Kearney, 2013).

סיפור מקרה: הפיקה האמריקאית

נתונים על התנהגות הפיקה האמריקאית (*Ochotona princeps*) ממחישים היטב שינויים התנהגותיים של אורגניזם בתגובה לשינויי האקלים, וכן את המורכבות של יחסי אורגניזם-שינויי אקלים.

הפיקה האמריקאית היא יונק קטן, יחסית, מסדרת הארנבאים. מלבד אוזניה הקצרות היא דומה מאוד לארנבת, וניזונה מעשבים, פירות, זרעים, בצלים, שורשים ופרחים. פיקות מאכלסות אזורים סלעיים בהרים גבוהים במערב ארצות הברית, כמו הרי הרוקי, ומקום מחייתן אף עובר את קו העצים. הן מפגינות מגוון תגובות התנהגותיות לשינויי האקלים, ובהן שינוי באסטרטגיות ליקוט המזון, שינוי בדרך שבה הן מנצלות את בית הגידול ושינוי בהתנהגויות הקשורות לתרמורגולציה. אומנם בחלק מאזורי התפוצה שלהן תועדה ירידה בגודל האוכלוסייה (Beever et al., 2016), ואולם באזורים אחרים מפגינות הפיקות גמישות התנהגותית המאפשרת להן לנצל אזורים אשר בהם מיקרו-אקלים שונה בשטחים שלכאורה אינם מתאימים להן (Varner & Dearing, 2014a).

העובדה שהתנהגות כלשהי הינה הפיכה מקנה לאורגניזמים יתרון בכך שפנוטיפים קיימים שהתאימו לתנאי הסביבה עד עתה נשמרים

מבין שלל התגובות האפשריות של אורגניזמים לשינויי האקלים, הסתגלות היא אחת הדרכים המהירות יותר. בעוד שלהתאמה לסביבה נדרשים תהליכים אבולוציוניים, אשר לרוב אורכים זמן רב, ויצירת מנגנונים חדשים שלא היו זמינים עבור האורגניזמים, הסתגלות היא בחירת מנגנון מתאים מתוך שלל אפשרויות שאורגניזם יכול לבצע; לדוגמה הפעלת מסלול מטבולי מסוים שעד כה לא הופעל, מתוך מגוון מסלולים שתאי האורגניזמים מסוגלים להפעיל.

גמישות התנהגותית, כלומר, היכולת של אורגניזמים לשנות את התנהגותם בהתאם לתנאי הסביבה (Hadfield & Strathmann, 1996), היא אחד ממנגנוני ההסתגלות לשינויי אקלים (Van Buskirk, [Mulvihill & Leberman], 2012). היא יכולה להתבטא בשינויי התנהגות הקשורים לרבייה, לויסות חום, לתנועה (כמו נדידה), לאכילה או לאיסוף מזון, לשינויים באופן השימוש בבית הגידול ולהימנעות משורפים. העובדה שהתנהגות כלשהי הינה הפיכה מקנה לאורגניזמים יתרון בכך שפנוטיפים קיימים שהתאימו לתנאי הסביבה עד עתה נשמרים ויכולים לשמש את אותם אורגניזמים שוב כאשר יחולו שינויים בלתי צפויים נוספים (Chevin, Lande & Mace, 2010). אומנם שינוי התנהגותי מצריך משאבים מתאימים בסביבה ויכולות קוגניטיביות מתאימות של האורגניזם, אבל הוא עדיין מהיר יותר משינויים אקולוגיים כמו שינוי תפוצה או משינויים דמוגרפיים. בשל היותם מהירים וקלים להבחנה, שינויי התנהגות יכולים להיות מדד ללחצים סביבתיים של שינויי אקלים עוד לפני שנצפים שינויים בתפוצה או בגודל האוכלוסייה (Berger-Tal et al., 2011).

יחד עם הרווח בדמות הסתגלות לשינויי האקלים, לשינויים התנהגותיים יש מגבלות, בייחוד כאשר השינוי קשור לצרכים חיוניים כמו אכילה או רבייה. לדוגמה, חולדה סוחרת מדברית (*Neotoma lepida*), הנפוצה במדבריות שבמערב אמריקה, יוצאת ממחילתה רק לקראת ערב, כאשר הטמפרטורות בחוץ יורדות מתחת לטמפרטורה המסוכנת עבורן (Murray & Smith, 2012). מאחר שהטמפרטורה הממוצעת הולכת ועולה לקראת ערב, בשל ההתחממות הגלובלית, מתקצר משך הזמן שחולדות אלה מבלות מחוץ למחילה, ולכן מתקצר גם הזמן העומד לרשותן ללקט מזון, למצוא מים או לאתר בני זוג. בהתאם לכך, הצורך

¹ הגרסה המובאת כאן היא סקירה של תוכני המאמר המקורי, 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 המאמר המקורי מוזמנים לפנות למקור המובא בתחילת הגרסה המעובדת.

ניצול בית הגידול



פיקות חיות על פי רוב בקווי גובה גבוהים בהרים, בין שברי סלעים ודרדרות. לאחרונה נצפו פיקות וערימות של גבעולי צמחים המאפיינות את פעילותן גם במסלעות לחופי אגמים ומאגרי מים בקווי גובה נמוכים מהרגיל, וגם במקומות לא סלעיים, כמו גזעי עצים, ערימות ענפים ויערות מחטניים. ההערכה היא שמקומות אלה מסייעים לפיקות להתמודד עם עליית הטמפרטורות: הטמפרטורה שנמדדה בתוך ערימת גבעולי צמחים במקומות לא סלעיים אלה הייתה גבוהה רק ב-0.9°C מטמפרטורת הסביבה; בעוד שבערימות גבעולים באזורים סלעיים סמוכים להם נמדדו טמפרטורות הגבוהות ב-1.7°C מטמפרטורת הסביבה.

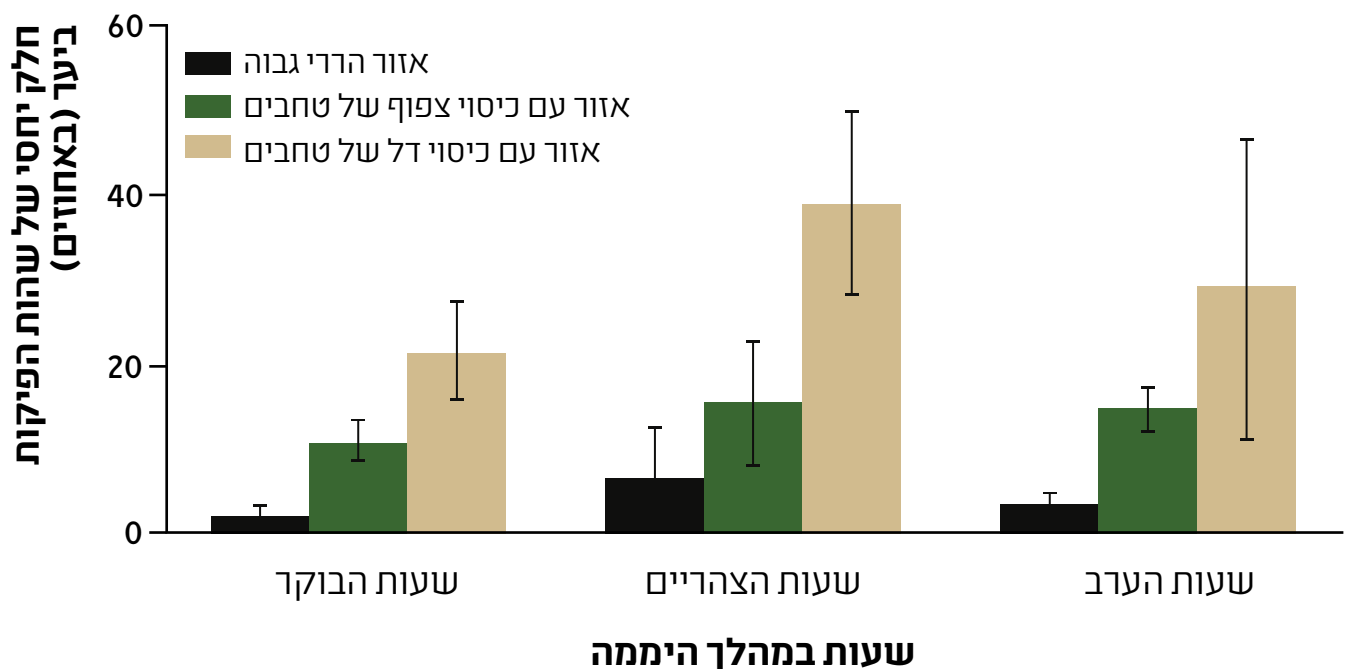
פיקות החיות בקווי גובה גבוהים, בעלי מאפיינים אלפיניים, שוהות לרוב בין הסלעים. לעומת זאת, פיקות החיות בקווי גובה נמוכים יותר שוהות זמן רב יותר ביערות צפופים ומוצלים בקרבת דרדרת או מסלעה (איור 1). לרוב, השוהות ביער המוצל היא באמצע היום, בשעות החמות. נראה שהשוהיה ביער רבה יותר באזורים שבהם הסלעים מכוסים פחות בשחבי עלים. ייתכן ששחבי עלים ממתנים טמפרטורות בקיץ הגבוהות מדי בעבור הפיקות, ובמקומות שבהם כיסוי הסלעים בשחבים הוא דל מחליפות הפיקות את הסלעים ביער. באזור אחר שנערך בו מעקב אחר הפיקות במשך למעלה מעשרים שנה לא נצפתה גמישות כזאת של הפיקות בבחירת בית הגידול, ואכן חל שם מצצום משמעותי באזור התפוצה שלהן (Beever et al., 2016).

באזורים אלפיניים יש אוכלוסיות הבוחרות למקם את ערימת הגבעולים בין סלעים גדולים יחסית. ערימות גבעולים בין סלעים קטנים יותר נצפו כאשר המדרונות היו מתונים יותר, וייתכן שסלעים גדולים מספקים הגנה מפני סלעים מידרדרים במדרונות תלולים במיוחד. נוסף על כך, סלעים גדולים פולטים פחות חום יחסית לנפחם, וייתכן שנוצר בהם מיקרו-אקלים הממתן את הטמפרטורות בערימת הגבעולים. כמו כן, סלעים גדולים לרוב בולטים מעל שכבת השלג, ולכן עם בוא האביב הם קולטים יותר קרינת שמש ומקדימים מעט את הפשרת השלגים בקרבת מרכז הפעילות של הפיקה.

לעומת זאת, באזורים שבהם הפיקות חיות בקווי גובה נמוכים יותר נצפתה התנהגות שונה של ליקוט מזון. באזורים אלה שחבי עלים נפוצים מאוד ויש אוכלוסיות של פיקות הצורכות מהם כמויות גדולות, עד כדי 63% ממזונן (Varner & Dearing, 2014b). אכילת שחבי העלים משחררת את הפיקות לפעילויות אחרות בקיץ מלבד ליקוט מזון ואגירתו לחורף. לרוב, בקווי גובה נמוכים ערימות הגבעולים ממוקמות בסלעים שאינם גדולים

ליקוט מזון

פיקות יוצרות לעצמן ערימה של גבעולי צמחים שונים, המשמשת לאגירת מזון לחורף. הן מרכזות את פעילותן סביב ערימה זו ומגינות עליה באופן טריטוריאלי. מגוון המיקומים של ערימות הגבעולים בבית הגידול משתנה בקרב אוכלוסיות שונות של פיקות.



איור 1: ניצול גמיש של בית הגידול על ידי הפיקה האמריקאית

ויסות חום

פיקות שומרות על חום גופן בין השאר באמצעות הגבלת שעות הפעילות במשך היום (Smith, 1974). באזורים קרירים יותר או בקווי גובה גבוהים, הפיקות פעילות בשעות החמות יותר של היום, לרוב בצהריים. לעומת זאת, בקווי גובה נמוכים יותר נצפית פעילות של הפיקות בשעות אחר הצהריים, והן אינן פעילות על פני השטח בשעות הצהריים (Smith, 1974).

שינוי צורת הגוף באמצעות התכדררות, כלומר, שינוי מצורה מוארכת לצורה כדורית, מאפשר לפיקות להקטין את היחס בין שטח הפנים שלהן לבין נפחן ולאבד פחות חום. באזורי תפוצה צפוניים של הפיקות, שבהם הפער בין הטמפרטורות הנמוכות ביותר בחורף לבין הטמפרטורות המרביות בקיץ הוא גדול במיוחד, הן נצפות זמן רב יותר במנח גוף כדורי בחורף (74% מהתצפיות), לעומת בקיץ (12% מהתצפיות).

שאלות חדשות

המחקר בנוגע לשינויי התנהגות של בעלי חיים בהתאמה לשינויי האקלים עוסק לרוב בתגובתם של אלה לשינויים מתמשכים באקלים, כמו עלייה בטמפרטורות הממוצעות בעונת הקיץ. מאחר שתנאים קיצוניים או אירועים כמו שריפות או שיטפונות הם חלק בלתי נפרד מההתחממות הגלובלית, עולה השאלה אם אלה יוצרים אתגר בלתי אפשרי לגמישות התנהגותית, או שהשפעתם פשוט לא נחקרה. כמו כן, רוב המחקרים מתייחסים להיבט יחיד של האקלים, כמו טמפרטורה. ההתייחסות להיבטים אחרים, למשל למשק המים, כמו גם למורכבות של השפעת מספר רכיבי אקלים יחד על התנהגות בעלי חיים - חסרה.

בדומה למחקרים על תגובה לרכיבי האקלים השונים, גם השינוי ההתנהגותי נבדק במחקרים לרוב על פני עונה שלמה, אם כי יש מחקרים הבודקים שינויי התנהגות במהלך שבועות, ימים או אפילו שעות. מעטים המחקרים שעקבו אחר שינויי התנהגות לאורך שנים. עולה אפוא השאלה אם שינויים כאלה הם נדירים ביותר, או שפשוט קשה לבצע מעקב ארוך טווח כזה.

היבט חשוב אחר למחקר הוא ניסיון לאפיין את ההיבטים הביולוגיים והאקולוגיים שאפשר לשנות באמצעות התנהגות, ולזהות את מגבלות ההתנהגות המקשות על אורגניזם להסתגל לשינויי אקלים. מינים שהנישה האקולוגית שלהם כללית ואינם תלויים למשל במזון מסוג מסוים או באזור מחיה מסוים, יוכלו



תוחלת חיים וגמישות התנהגותית

רוב המחקרים עוסקים בגמישות התנהגותית בקרב בעלי חיים החיים לפחות שלוש שנים, לפחות לאורך עונה שלמה, ובתגובה לשינויי אקלים החוזרים על עצמם לאורך זמן, כמו עלייה בטמפרטורת קיץ ממוצעת. לכן תוצאות המחקרים עלולות להיות מוטות לבעלי חיים שתוחלת חייהם גבוהה יחסית. ועם זאת, ייתכן שבקרב בעלי חיים כאלה התפתחה במיוחד גמישות התנהגותית בתגובה לשינויי אקלים, משום שחשיפתם לשינויי האקלים הינה ממושכת יותר. זמן החשיפה מאפשר יותר אירועי ניסוי וטעייה, יותר שינויי התנהגות מתאימים ויותר הזדמנויות להסתגל למנגנונים הפועלים על תגובה לאות מהסביבה (Sol & Maspons, 2015). לדוגמה, אסטרטגיה נפוצה להתמודדות עם לחץ טריפה בקרב מיני ציפורים מסוימים היא שינוי מיקום קן הציפור על פי העיקרון "הצלחת-הישאר - הפסדת-החלף מקום". באסטרטגיה מסוג זה יש יתרון לפרטים הצוברים ניסיון לאורך זמן. ציפורים מהמין *Spizella breweri*, שלאחר אירוע טריפה בקן בונות קן חדש במיקומים עם מאפיינים השונים ממיקומו הקודם של הקן, משתמשות באותה אסטרטגיה גם כאשר הצאצאים לא שרדו בשל שינויי אקלים (Chalfoun & Martin, 2010). במקרה זה, חשיפה ממושכת יחסית לשינויי אקלים מקנה יתרון באמצעות ניסוי וטעייה מתמשכים.



במיוחד. מדרונות תלולים באזורים אלה מכוסים פחות בשלג באופן קבוע, ושחבי העלים יוצרים על הסלעים מעין שמיכה המונעת את הידרדרותם. נוסף על כך, שחבי העלים ממתנים את הטמפרטורות (Varner & Dearing, 2014b).

פיקות לרוב צורכות מים ממזונן, אבל בסוף הקיץ ובתחילת הסתיו, כאשר קיים מחסור במים, הן נצפו שותות מאגמים או מיובלים. תצפיות כאלה נראו רק באוכלוסיות החיות באזורי תפוצה יבשים יותר, ומשלימות עדויות נוספות שלפיהן פיקות החיות בקווי גובה נמוכים גמישות יותר בנוגע לתכולת המים במזון שהן מלקטות (Smith & Erb, 2013).

כדי להעריך טוב יותר את רגישותם של מינים לשינויי אקלים יש להכניס למדדי ההתאמה לשימור גם מדדים של גמישות התנהגותית

(Charmantier et al., 2008). לעומתן, יש אוכלוסיות של ציפורים בעלות אסטרטגיית נדידה דומה שאינן מצליחות להדביק את קצב השינויים באמצעות שינויים התנהגותיים (Van Buskirk et al., 2012). כדי להעריך טוב יותר את רגישותם של מינים לשינויי אקלים יש להכניס למדדי ההתאמה לשימור גם מדדים של גמישות התנהגותית (Munoz, Marquez & Real, 2015).

גמישות התנהגותית היא מנגנון תגובה של אורגניזמים לשינויי אקלים, שהינו מהיר יותר משינויים גנטיים או מהגירה. עם זאת, אין מדובר במנגנון מושלם. מגבלות פיזיולוגיות, רווח והפסד של פעילויות אחרות המשפיעות על כשירות וטווח רחב של תנאי סביבה משתנים מגבילים את ההסתגלות לשינויי אקלים באמצעות שינויי התנהגות. נוסף על כך, חלק מההתנהגויות המשתנות, כמו נדידה או אופן השימוש בבית הגידול, מוגבלות על ידי תהליכי עיור או פיצול אזורי המחיה בבית הגידול. לכן פעמים רבות אין די בגמישות התנהגותית כדי להסתגל לתנאים חדשים, ויחד איתה מופיעים שינויים בתכונות נוספות, או במקרים פחות רצויים - אפילו נגרם נזק לאורגניזם (Van Buskirk et al., 2012). הבנת מגבלות אלה חשובה לשיקולי פיתוח תוכניות שימור יעילות המבוססות על שינויי התנהגות (Wong & Candolin, 2015), ובייחוד לקביעת סדרי עדיפות בשל הכמות הרבה של מינים הזקוקים להצלה.

היבט חשוב נוסף של שינויי התנהגות קשור לניהול בתי הגידול כחלק מתהליכי שימור. לדוגמה, אם אורגניזם מסוגל לשנות את ניצול בית הגידול שלו ולשהות זמן רב יותר במעיינות קרירים, הרי יש מקום ליצור או לשמר מעיינות או מקווי מים קרים היכולים לשמש מקומות מקלט קרירים יותר. כמו כן, אפשר לשנות מועדי עונות ציד כדי להגן על שינויים בזמני קינון.

מדיניות שימור יעילה המסתמכת על גמישות התנהגותית בעידן של שינויי אקלים צריכה מידע ברור על יכולתם של אורגניזמים לשנות את התנהגותם, ועל השפעת השינוי ברמת האוכלוסייה. ניהול מדיניות שימור המתחשבת ביכולתם של המינים לשנות תזמון נדידה, עונות רבייה, ניצול בתי הגידול והתנהגויות אחרות היא חיונית כדי ליצור שימור יעיל של בעלי חיים בעתיד שאינו בטוח.

כנראה להסתגל לשינויים טוב יותר מאשר מינים מתמחים (DeSantis & Haupt, 2014). נוסף על כך, יכולתם של אורגניזמים להתפזר תשפיע על יכולתם להגיע לבתי גידול שבעבר לא התאימו עבורם, או לחלקים אחרים של בית גידול שבהם התנאים מתאימים עבורם. ההכרח להשתמש באזורי מקלט כאלה (לדוגמה, אזורים עם נשורת עלים עבה יותר, או יערות סבוכים יותר) בתוך אזור שאינו מתאים למחיה עבור אורגניזם כזה או אחר עלול לגרום לניתוק בין אוכלוסיות, במיוחד בקרב מינים שאין להם יכולת פיזור טובה.

רוב המחקרים העוסקים בהשפעת שינויי אקלים מבוססים על תצפיות ולא על ניסויים. מגבלות לוגיסטיות ואתיות אינן מאפשרות לבצע ניסויים שבהם משנים באופן מבוקר את תנאי הסביבה של בעלי החיים שבניסוי עד לתנאים מסכני חיים. עם זאת, במחקרים מעטים בוצעו שינויים באופן מעודן ומבוקר. לדוגמה, במחקר על [למור עכברי אפור](#) בשבי נמצא שרירייה הדרגתית אך מתמשכת בזמינות המזון בקיץ גורמת לשינוי משטר שעות השינה והתנועה שלו ולכניסה לתרדמת חורף (Giroud et al., 2008). מחקרים מסוג זה יכולים לחזק מחקרים המבוססים על תצפיות. מחקרים אחרים דוגמים תנאי אקלים ושינויי התנהגות לאורך מדרג ביופיזי בתחום התפוצה של המין (Breshears, 2008) או מתעדים מגוון אזורי מיקרו-אקלים שאורגניזמים בוחרים מתוך מגוון תנאים נתונים (Murray & Smith, 2012). גם מחקרים על אוכלוסיות של אורגניזמים חיים בקצה אזורי התפוצה של המין יכולים לספק מידע על התנהגויות המשמשות למיתון תופעות אקלים קיצוניות (Ruiz-Aravena et al., 2014).

השלכות לשימור

להבנה טובה של הקשר בין שינויי אקלים לבין גמישות התנהגותית יש השלכות על תהליכי שימור. נתונים חשובים להחלטות על שימור הם מידת הגמישות של התנהגויות הקשורות לכשירות (fitness) ומידת ההשפעה של ההתנהגות על הישרדותם של מינים (Blumstein, 2015). לדוגמה, יש אוכלוסיות של ציפורים נודדות שמצליחות להגמיש לתאריך מטבי את הגעתן לשטחי הרבייה, למרות שינויים מהירים בתנאי האביב



- Kearney, M.R. (2013): Activity restriction and the mechanistic basis for extinctions under climate warming. *Ecology Letters* 16: 1470–1479.
- Munoz, A-R, Marquez, A.L. & Real, R. (2015): An approach to consider behavioral plasticity as a source of uncertainty when forecasting species' response to climate change. *Ecology and Evolution* 5: 2359–2373.
- Murray, I.W. & Smith, F.A. (2012): Estimating the influence of the thermal environment on activity patterns of the desert woodrat (*Neotoma lepida*) using temperature chronologies. *Canadian Journal of Zoology* 90: 1171–1180.
- Ruiz-Aravena M., Gonzalez-Mendez A., Estay S.A., Gaitán-Espitia J.D., Barria-Oyarzo I., Bartheld J.L. & Bacigalupe L.D. (2014): Impact of global warming at the range margins: phenotypic plasticity and behavioral thermoregulation will buffer an endemic amphibian. *Ecology and Evolution* 4:4467–4475.
- Smith, A.T. (1974): The distribution and dispersal of pikas: influences of behavior and climate. *Ecology* 55: 1368–1376.
- Smith, J.A. & Erb, L.P. (2013): Patterns of selective caching behavior of a generalist herbivore, the American pika (*Ochotona princeps*). *Arctic Antarctic and Alpine Research* 45: 396–403.
- Sol, D. & Maspons, J. (2015): Integrating behavior into life-history theory: a comment on Wong and Candolin. *Behavioral Ecology* 26: 677–678.
- Van Buskirk, J., Mulvihill, R.S. & Leberman, R.C. (2012): Phenotypic plasticity alone cannot explain climate-induced change in avian migration timing. *Ecology and Evolution* 2: 2430–2437.
- Varner, J. & Dearing, M.D. (2014a): The importance of biologically relevant microclimates in habitat suitability assessments. *PLoS ONE* 9: e104648.
- Varner, J. & Dearing, M.D. (2014b): Dietary plasticity in pikas as a strategy for atypical resource landscapes. *Journal of Mammalogy* 95: 72–81.
- Wong, B.B.M. & Candolin, U. (2015): Behavioral responses to changing environments. *Behavioral Ecology* 26: 665–673.
- Beever, E.A., Perrine, J.D., Rickman, T., Flores, M., Clark, J.P., Waters, C., Weber, Sh.S., Yardley, B., Thoma, D.P., Chesley-Preston, T., Goehring, K.E., Magnuson, M., Nordensten, N., Nelson, M. & Collins, G.H. (2016): Pika (*Ochotona princeps*) losses from two isolated regions reflect temperature and water balance, but reflect habitat area in a mainland region. *Journal of Mammalogy* 97: 1495–1511.
- Berger-Tal, O., Polak, T., Oron, A., Kotler, B., Saltz, D. & Lubin, Y. (2011): Integrating animal behavior and conservation biology: a conceptual framework. *Behavioral Ecology* 22: 236–[2]39.
- Blumstein, D.T. (2015): Prioritizing conservation behavior research: a comment on Wong and Candolin. *Behavioral Ecology* 26: 674.
- Breshears D.D., Huxman T.E., Adams H.D., Zou Ch.B., & Davison J.E. (2008): Vegetation synchronously leans upslope as climate warms. *Proceedings National Academy of Science USA* 105:11591–11592.
- Chalfoun A.D. & Martin T.E. (2010): Facultative nest patch shifts in response to nest predation risk in the Brewer's sparrow: a "win-stay, lose-switch" strategy? *Oecologia* 163:885–892.
- Charmantier, A., McCleery R.H., Cole L.R., Perrins C., Kruuk L.E. & Sheldon, B.C. (2008): Adaptive phenotypic plasticity in response to climate change in a wild bird population. *Science* 320: 800–803.
- Chevin, L.M., Lande, R. & Mace, G.M. (2010): Adaptation, plasticity, and extinction in a changing environment: towards a predictive theory. *PLoS Biol* 8: e1000357.
- DeSantis, L.R.G. & Haupt, R.J. (2014): Cougars' key to survival through the Late Pleistocene extinction: insights from dental microwear texture analysis. *Biology Letters* 10: 20140203.
- Giroud, S., Blanc, S., Aujard, F., Bertrand, F., Gilbert, C. & Perret, M. (2008): Chronic food shortage and seasonal modulations of daily torpor and locomotor activity in the grey mouse lemur (*Microcebus murinus*). *American Journal of Physiology Regulation* 294: R1958–[19]67.
- Hadfield, M.G. & Strathmann, M.F. (1996): Variability, flexibility and plasticity in life histories of marine invertebrates. *Oceanologica Acta* 19: 323–334.



שעון גמיש

השפעת ההתחממות הגלובלית על פוטופריודים

מעובד על פי המאמר¹:

Walker, W.H., Meléndez-Fernández, O.H., Nelson, R.J. & Reiter, R.J. (2019): Global climate change and invariable photoperiods: A mismatch that jeopardizes animal fitness. *Ecology and Evolution* 9: 10044–10054. <https://doi.org/10.1002/ece3.553>.

תכולת החנקן בצמח, וזו הגבירה את תרומתו לתזונת האיילים. בעקבות אכילת הצמח עלתה מסת הגוף של האיילים, החשובה במיוחד בסיום החורף ובאביב, כאשר הם מתכוננים לעונת הרבייה (Cebrian, Kielland & Finstad, 2008). בדרך זאת התחדש מלאי השומן והחלבונים שהידלדלו בגופם של האיילים במהלך החורף, והנקבות ייצרו חלב מזין יותר עבור העופרים שהמליטו (Chan-McLeod, White, & Holleman, 1994). ההשפעה שיש לכך על כשירות (fitness) הפרטים של אוכלוסיית אייל הצפון היא ברורה.

בחקרים נצפו גם שלל תופעות המובילות לעלייה בכשירות. כ-70 אחוז ממיני הפרפרים באנגליה, ספרד וקליפורניה מקדימים את עונת הפעילות ושלב התעופה כתוצאה מהקדמת עונת האביב (Forister & Shapiro, 2003). הקדמת הפעילות נצפתה גם בדבורים, בזבובים ובחיפושיות (Gordo & Sanz, 2005). באמריקה הצפונית נמצאה עלייה בקצב התפתחות החיפושיות מהמין *Dendroctonus rufipennis*, עד כדי ירידה למחצית הזמן הדרוש להתפתחותן מ-1971 עד 1996 (Berg, Henry, Fastie, Volder & Matsuoka, 2006). בחיפושיות, עשים, כנימות ויתושים תועדה עלייה ביכולת ההישרדות בעונת החורף (Rochlin, Ninivaggi, Hutchinson & Farajollahi, 2013) ויחד איתה נמצאה תופעה של הרחבת שטח התפוצה בשפיריות, חרגולים, פרפרים יתושים ועשים.

השפעות שליליות של שינוי אקלים על אורגניזמים

לא כל האורגניזמים יכולים להגיב לשינוי אקלים בהרחבת שטחי תפוצה או בשינוי משך זמן ההתפתחות, ולהסתגל לתנאים החדשים שהסביבה מציבה בפניהם.

צמחים שהטמפרטורות הממוצעות גבוהות מדי עבורם עשויים לנדוד ולשנות את שטח התפוצה שלהם. מאחר שהם חסרי תנועה, שינוי שטח התפוצה תלוי בתכונות הפצת הזרעים וביכולת הנביטה וההתפתחות לבשלות, ואלה עלולות לפגר אחר קצב ההתחממות ולגרום נזק לצמחים. נזק לצמחים יכול

אחד השינויים המרכזיים בתנאי האקלים כתוצאה מהתחממות כדור הארץ הוא התקצרות עונת החורף והקדמת עונת האביב

אחד השינויים המרכזיים בתנאי האקלים כתוצאה מהתחממות כדור הארץ הוא התקצרות עונת החורף והקדמת עונת האביב. לשינויי העונות האלה, בעיקר מבחינת טמפרטורות ומשקעים, יש השפעה רבה על הביוספרה, ובבואנו לאמוד את השפעתם הם נתפסים באופן כללי כמוזיקים, במיוחד לאור הפגיעה באורגניזמים עד כדי הכחדת מינים בקצב חסר תקדים. אולם השפעתה של ההתחממות על הביוספרה הינה מורכבת מכך. יש להניח שלצד אורגניזמים שכשירותם נפגעת וייכחדו או יעברו שינויים בהתאמה לשינויי האקלים, יהיו אורגניזמים שכשירותם תעלה, משום שהם מותאמים טוב יותר לתוצאות ההתחממות. במאמר מביאים המחברים דוגמאות להשפעת ההתחממות הגלובלית על אורגניזמים, ומתמקדים בהשפעה של שינויי האקלים על תופעות עונתיות בקרב אורגניזמים.

השפעות חיוביות של שינוי אקלים על אורגניזמים

תופעת ההתחממות הגלובלית יכולה להתגלות כבעלת יתרונות עבור חלק מהצמחים ובעלי החיים. צמחים יכולים ליהנות מהקדמת עונת האביב והארכת עונת הצמיחה, ומהעלייה באטמוספירה של ריכוז הפחמן הדו-חמצני הדרוש לפוטוסינתזה. נתוני לוויין של הרשות לאוקיינוסים ואטמוספירה של ארצות הברית (NOAA) אכן מראים עלייה במסת הצמחים בעונת הקיץ, ועלייה בתהליכי נשימה של צמחים במהלך החורף בקווי רוחב גבוהים על פני כדור הארץ (Myneni, Keeling, Tucker, Asrar & Nemani, 1997). נוסף על כך, ניתוח של טבעות בגזעי עצים בחצי הכדור הצפוני מראה שבמאה הקודמת חלה עלייה במסת העצים (Briffa et al., 1998).

העלייה בטמפרטורות אפשרה למיני צמחים מסוימים לנדוד ולהרחיב את שטח תפוצתם. לדוגמה, בהרים גבוהים עלה קו העצים לקווי גובה גבוהים יותר ונצפתה גדילה של אוכלוסיותיהם (Lloyd, 2005). דוגמה נוספת היא העלייה שנצפתה בצמח הארקטי *Deschampsia antarctica* ממשפחת הדגניים: ב-1964 באי גלינדז שבאנטארקטיקה נספרו 500 פרטים ממין זה, וב-1990 נספרו באותו אי 12,000 פרטים מאותו מין (Smith, 1994). תוצאות דומות התקבלו באזורים רבים אחרים באנטארקטיקה. דוגמה נוספת להשפעה חיובית נצפתה באלסקה, שם הפשרת השלגים המוקדמת, יחסית, עודדה פריחה מוקדמת של הצמח *Eriophorum vaginatum* ממשפחת הגמאיים, שהוא מזונו של אייל הצפון (*Rangifer tarandus*). הפריחה המוקדמת שינתה את

¹ הגרסה המובאת כאן היא סקירה של תוכני המאמר המקורי, 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 המאמר המקורי מוזמנים לפנות למקור המובא בתחילת הגרסה המעובדת.

[שועל השלג](#) באזורים ארקטיים היא התפשטות [השועל המצוי](#) (*Vulpes vulpes*), הגדול משועל השלג, לאזורים ארקטיים בשל ההתחממות. נראה שהשועל המצוי מתחרה בשועל השלג על מקורות מזון דומים ועל מיקום המאורות, ולכן גורם לצמצום אוכלוסייתו (Killengreen et al., 2007). ההשערה לגבי הקרפדות בקוסטה ריקה היא שהן נפגעו מהתפשטותה של פטרייה פתוגנית כתוצאה מההתחממות הגלובלית (Pounds et al., 2006).

התחממות גלובלית, תופעות עונתיות ופוטופריודיזם

לעומת שמפרטורות, מים או מזון, ההבדל בין אורך היום לאורך הלילה ביממה בעונות השנה משתנה באופן קבוע, ולכן הוא גורם אביוטי אמין מאוד. מכיוון שכך, התפתחו בצמחים ובבעלי חיים מנגנונים דומים מאוד של פוטופריודיזם, כלומר, רגישות לאורך היום לעומת אורך הלילה, שהפכו לאורך האבולוציה מדויקים, מבוקרים ורגישים להפליא. כתוצאה ממנגנונים אלה מתרחשות התנהגויות המשתנות מעונה לעונה, הקשורות לרבייה, לתזונה ולמטבוליזם, ומאפשרות לאורגניזמים לנצל את תנאי הסביבה באופן מותאם ומיטבי (Stevenson, Prendergast & Nelson, 2017). כך למשל, ההמלטות של יונקים באזורים נרחבים על פני כדור הארץ מתוזמנות לעונת האביב, כך שהסיכוי של הצאצאים לשרוד עולה מפני שהשמפרטורות גבוהות יותר ויש שפע של מזון.

ההתחממות הגלובלית אינה משפיעה על ההבדלים העונתיים בין היום ללילה במהלך היממה, אלא גורמת לשינויים בטמפרטורות ובמשקעים. כתוצאה מכך הסתיו מתארך, האביב מקדים, והחורפים קצרים וחמים יותר. מחד גיסא, תופעה זאת עשויה לחזק מינים שהאביב או הקיץ הם עונות הפעילות שלהם, כך שהזמן שבו טווח הטמפרטורות מיטבי עבורם מתארך; מאידך גיסא, נוצרת אי-התאמה בין מינים הנמצאים באינטראקציה אקולוגית התלויה בתזמון עונתי מדויק (Donnelly, Caffarra & O'Neill, 2011), ולכן נפגעת ההתאמה בין המנגנונים הפוטופריודיים לבין התנאים בסביבה (Visser & Both, 2005): רביית האורגניזמים אינה מתאימה לזמינות מקורות המזון, נפגעים יחסי טורף-נטרף, יחסי צמחים-מאביקים, או יחסי סימביוזה.



להתרחש גם באופן עקיף, כמו על ידי הארכת עונת הפעילות של מזיקים לצמחים בשל חורפים מתונים יותר, האצה בזמן ההתפתחות שלהם או התרחבות שטח תפוצתם (Harvell et al., 2002). דוגמאות לכך הן העובש *Phytophthora cinnamomic* הגורם לריקבון שורשים חמור כאשר הטמפרטורות עולות, והזיהום בפטרייה *Ophiostoma novoulmi* הגורם בעצי אולמוס לנשירת עלים מוגברת בשנים חמות יותר (Sutherland, Pearson & Brasier, 1997). נזק עקיף אחר לצמחים הוא שינויי אקלים לטובת מיני צמחים פולשים הדוחקים מינים מקומיים. לדוגמה, במדבר מוהאבי שבנבדה ארצות הברית נמצא שעליית טמפרטורות ועלייה בריכוז פחמן דו-חמצני שיפרה את כמות הזרעים של עשבוניים חד-שנתיים פולשים ואת הפצתם ברוח בהשוואה לעשבוניים מקומיים (Smith et al., 2000).

שינויי האקלים פוגעים בהתאמה בין המנגנונים הפוטופריודיים לבין התנאים בסביבה

אולי אחת מהתוצאות השליליות והכאובות ביותר של התחממות כדור הארץ היא שמינים רבים עלולים להיכחד. אומנם עדיין אין עדויות² לכך שההתחממות הגלובלית גרמה להכחדת מינים, ואולם מצטברות עדויות שהיא גורמת להידלדלות אוכלוסיות. חשש גדול במיוחד בעבור מינים שטווח תפוצתם הינו מוגבל, כמו קווי גובה גבוהים בהרים, או אזורים ארקטיים (Trivelpiece et al., 2011). דוגמה ידועה לכך היא הידלדלות אוכלוסיית דובי הקוטב וירידה בשיעור ההמלטות הנמצאות בקורלציה לשבירת קרח מוקדמת כתוצאה מעליית הטמפרטורות (Stirling, Lunn & Iacozza, 1999).

רשימת המינים שהצטמצמות אוכלוסיותיהם משיכת לשינויי האקלים היא ארוכה: באזורים הארקטיים מצטמצמות אוכלוסיות [פינגווין רצועת-הסנטר](#) (*Pygoscelis antarcticus*; Barbosa, Benzel & Moreno, 2012), [פינגווין קיסרי](#) (*Aptenodytes forsteri*; Barbraud & Weimerskirch, 2001), [פינגווין אדלי](#) (*Pygoscelis adeliae*; Trivelpiece et al., 2011), [אוריה חייכנית](#) (*Uria lomvia*; Descamps, Strøm & Steen, 2013), [אדרית שחורת כיפה](#) (*Somateria mollissima*; Merkel, 2004) ו-[שועל השלג](#) (*Vulpes lagopus*; Killengreen et al., 2007). כמו כן, אוכלוסיות של מינים בהרים גבוהים, כמו [פיקות](#) (*Ochotona princeps*) במערב ארצות הברית (Beever, Brussard & Berger, 2003), [פרפרי אפולו](#) (*Parnassius apollo*) בצרפת (Descimon, 2005), [קרפדות הארלקוויין](#) (*Atelopus*; Bachelard, Boitier & Pierrat, 2005) ו-[וקרפדות זהובות](#) (*Bufo periglenes*) בקוסטה ריקה (Pounds et al., 2006).

הסיבות לצמצום האוכלוסיות עקב שינויי האקלים הן מגוונות: צמצום בתי גידול מתאימים, צמצום במקורות מזון וזמינותו, שינויים באינטראקציות טורף-נטרף, שינויים בתפוצת מינים מתחרים, ועלייה בהישרדות של גורמי מחלות שונים והאצה בהתפתחותם. כך למשל, השערה אפשרית לצמצום אוכלוסיית

² בשנת 2016 הוכרזה [חולדת זנב-פסיפס קי ברמבל](#) כמין הראשון שנכחד כתוצאה מההתחממות הגלובלית.

דוגמה לאי-התאמה בין מנגנון פוטופריודי לבין יחסי טורף-נטרף אפשר למצוא בצמצום אוכלוסיית ארנבות השלג כתוצאה מאי-התאמה של צבע הפרווה (Pedersen & Odden, 2017). מנגנון פוטופריודי גורם לנשירת פרוות החורף הלבנה של הארנבות. אולם בשל עליית הטמפרטורות מקדים השלג להפשיר, בעוד שהפרווה הלבנה של הארנבת טרם התחלפה בפרווה חומה. התוצאה מתבטאת בצמצום אוכלוסיית ארנבות השלג בשבעה אחוזים, כנראה בשל נראות הארנבות לטורפיהן (Zimova et al., 2018). מקרים דומים של אי-התאמה בין מנגנון המשנה את צבע הפרווה לבין העלייה בטמפרטורות הסיבבה עקב ההתחממות הגלובלית נצפו ב**שכוי השלג** (*Lagopus muta*), ב**שועל השלג** (*Vulpes lagopus*) וב**נמר השלג** (*Panthera uncial*). קיימת השערה שלפיה תופעות דומות מתרחשות גם בקרב יונקים נוספים כמו **למינגים** (*Dicrostonyx*), **סמורים** (*Mustela*) ו**זאבים** (*Canis lupus*).

מנגנוני הסתגלות

מכל האמור לעיל אפשר אפוא להסיק שההתחממות הגלובלית יוצרת אי-התאמה בין מנגנונים פוטופריודיים לבין תנאי הסיבבה, ואי-התאמה זאת משפיעה ישירות על כשירות הפרטים והישרדותם (איור 1). לחץ ברירה מסוג זה מניע את המנגנונים האבולוציוניים לכוון מחדש תזמון מדויק בין שניהם, וליצור מנגנוני הסתגלות לתנאי סביבה משתנים.

דוגמה אחת היא הירגזי המצוי, שכאמור המנגנון הפוטופריודי שלו למועד בקיעת הגוזלים מהביצים מפגר אחר זמינות המזון

דוגמה לאי-התאמה בין רבייה לבין זמינות מקורות מזון תועדה במין הירגזי המצוי (*Parus major*) בהולנד (Visser, van Noordwijk, Tinbergen & Lessells, 1998). אף שירגזים ניזונים ממגוון של חרקים, הם נוטים להאכיל את הגוזלים בזחלים עתירי חלבון. מנגנון פוטופריודי גורם לירגזים להטיל את ביציהם כך שבקיעת הגוזלים באביב מתוזמנת לתקופה שבה כמות הזחלים מרבית. אלא שבשנים 1973-1995 חלה עלייה בטמפרטורות בתקופה שלאחר הטלת ביצי הירגזים, שגרמה להאצה בהתפתחות הזחלים. המנגנון הפוטופריודי של הירגזים ומועד בקיעת הגוזלים נותרו ללא שינוי, ולא התאימו עוד למועד זמינות הזחלים. מכאן שאוכלוסיית הירגזים נתונה לחץ אבולוציוני לשינוי מועד ההטלה כך שיתאים להתפתחות הזחלים המואצת. ההתאמה יכולה להתרחש גם על ידי מנגנונים שאינם פוטופריודיים, כמו הקטנת מספר הביצים בהטלה, קיצור הזמן שבין הטלת הביצה האחרונה לתחילת הדגירה, או הפחתת משך הדגירה.

אי-התאמה נוספת בין מנגנון פוטופריודי לבין טמפרטורת הסיבבה נצפתה בחטפית שחורת-עורף (*Ficedula hypoleuca*). מחוץ לעונת הרבייה שוהות ציפורים אלה באפריקה. באמצעות מנגנון פוטופריודי הן מתכוננות לנדידה לאזורי הרבייה שלהן באירופה המערבית (Gwinner, 1996). אלא שעליית הטמפרטורות גרמה להאצת התפתחות הזחלים שמשמשים את החטפיות להזנת הגוזלים, ללא שינוי במועד הנדידה שלהן. כתוצאה מכך, מקבלים גוזלי החטפית תזונה מזינה פחות, קצב הגדילה שלהם איטי יותר, ומספר הגוזלים המגיעים לבגרות וחוזרים להתרבות באירופה מצטמצם.



ירידה בכשירות האורגניזמים עקב אי התאמה של מגוון תהליכים לתנאי הסביבה



איור 1: תהליכים עונתיים שתזמונם נפגע כתוצאה מההתחממות הגלובלית

תופעה מורכבת

תופעת ההתחממות הגלובלית הינה מורכבת. היבט אחד של המורכבות הוא שההתחממות אינה מתרחשת על פני כל כדור הארץ בעוצמה שווה. אזורים בקווי רוחב גבוהים, קרוב יותר לקטבים, צפויים להתחמם בקצב מהיר יותר (IPCC, 2014), כפי שמומחש בתהליכי המסת הקרחונים וצמצום שטחי הקרח בגרינלנד ובאנטארקטיקה (Oerlemans, 2005). כמו כן, העלייה האבסולוטית בטמפרטורות המרביות רבה יותר באופן משמעותי בחורף לעומת הקיץ (Hughes, 2000), לעיתים [אפילו פי שניים יותר](#). מורכבות נוספת מתבטאת בעלייה בכמות המשקעים העולמית, ולא רק בעליית הטמפרטורות על פני כדור הארץ. נתוני לוויין מצביעים על עלייה קבועה בתכולת המים באטמוספירה ובמשקעים כתוצאה מהתגברות תהליכי אידיוי ולחץ אדי המים באטמוספירה (Liepert & Previdi, 2009). נוסף על כך, מודלים מנבאים הבדלים בשינויי המשקעים על פני כדור הארץ: בעוד שאזורים בקווי רוחב גבוהים (קרוב לקטבים), אזורים לחים בקווי רוחב אמצעיים ואזורי קו המשווה באזור האוקיינוס השקט צפויים לעלייה בכמות המשקעים - אזורים יבשים בקווי רוחב אמצעיים ואזורים סובטרופיים צפויים לירידה בכמות המשקעים (IPCC, 2014).



(הזחלים) בשל העלייה בטמפרטורות בסוף החורף (Visser, van Noordwijk, Tinbergen & Lessells, 1998). לחץ הברירה הטבעית על אוכלוסיית הירגזי המצוי יצר יתרון לפרטים המפגינים גמישות רבה במיוחד בתזמון הרבייה, ואחוזיהם באוכלוסייה הלכו ועלו במהלך שלושה עשורים (Nussey, Postma, Gienapp, & Visser, 2005). גמישות כזאת יכולה ליצור תזמון מחודש בין מועד בקיעת הגוזלים לבין זמינות המזון בתנאי סביבה משתנים. הסתגלות דומה נצפתה בקרב אוכלוסיות של [סנאי אדום אמריקני \(Tamiasciurus hudsonicus\)](#). עונת הרבייה של סנאים אלה מקדימה, וכך מתאימה להופעת אצטרובלים מוקדמת יותר בעצי האשוח (Réale, Berteaux, McAdam & Boutin, 2003).

מנגנוני הסתגלות אחרים מתבטאים בהתנהגות של בעלי חיים. לדוגמה, פרטים של שכווי השלג נצפו מלכלכים את עצמם בבוץ כאשר אין התאמה בין החלפת צבע הנוצות שלהם לבין מועד הפשרת השלגים (Montgomerie, Lyon & Holder, 2001); ופרטים של [שכווי וילון \(Lagopus lagopus\)](#) נצפו ניזונים באזורים שמתאימים לצבע נוצותיהם, אף שאזורים אלה עניים בנוטריינטים (Steen, Erikstad & Høidal, 1992).

לא כל תהליכי ההתאמה בין פוטופריודיות לשינויי טמפרטורות חלים באמצעות הסתגלות. מחקר על יתושים מהמין [Wyeomyia smithii](#) הראה שחלו באוכלוסיית היתושים שינויים גנטיים של בקרת אותות פוטופריודיים המשפיעים על כניסת היתושים להשיית חורף³. שינויים אלה גרמו למנגנון הפוטופריודי לזהות משך שעות אור ביממה הקצר מזה שזיהה המנגנון הפוטופריודי הקודם. השינוי בזיהוי משך שעות האור מאפשר ליתושים להאריך את תקופת הפעילות, לפני שהם נכנסים להשיית חורף (Bradshaw & Holzapfel, 2001), ורק כאשר הטמפרטורות אכן יורדות. שינויים גנטיים נמצאו גם במנגנון פוטופריודי לרבייה בקרב אוגר לבן-רגליים (Desjardins, Bronson & Blank, 1986; [Peromyscus maniculatus](#)).

שינויי האקלים פוגעים בהתאמה בין המנגנונים הפוטופריודיים לבין התנאים בסביבה

דוגמה לאי-התאמה בין מנגנון פוטופריודי לבין יחסי טורף-נטרף אפשר למצוא בצמצום אוכלוסיית ארנבות השלג כתוצאה מאי-התאמה של צבע הפרווה

סיכום

שילוב בין שינויי אקלים לבין יציבות בהבדלים בין אורך היום לבין אורך הלילה במהלך השנה יוצרים לחץ אבולוציוני על אורגניזמים. לחץ זה חזק במיוחד כאשר אורגניזמים אינם יכולים להסתגל לאי-ההתאמה בין המנגנון הפוטופריודי לבין השינויים בסביבה, ועלול להתבטא בפגיעה ברבייה ובהשרדות, כלומר, בפגיעה ישירה בכשירות (ראו איור 1). אורגניזמים נתונים לחץ אבולוציוני לא רק בשל אי-ההתאמה לגורמים אביוטיים כמו טמפרטורות ומשקעים בסביבה שבה הם חיים, אלא גם בשל השפעת השינויים בגורמים ביוטיים, במיוחד בתגובת אורגניזמים אחרים החיים בסביבתם והסתגלותם או אי-הסתגלותם לשינויי האקלים.

יכולתם של מינים לעבור תהליכי הסתגלות והתאמה לסביבה המשתנה תלויה בגמישות גנטית (התאמה) ופנוטיפית (הסתגלות) של הגורמים היוצרים מנגנונים פוטופריודיים למדידת זמן. היעדר גמישות כזאת תגרום ככל הנראה להכחדה מקומית של מינים.

³ תהליך פיזיולוגי שבו התפתחות האורגניזם מואטת מאוד או נעצרת במהלך החורף, עד לבוא האביב והעלייה בטמפרטורות.

מקורות

Anderson, T.R., Hawkins, E. & Jones, P.D. (2016): CO₂, the greenhouse effect and global warming: From the pioneering work of Arrhenius and Calendar to today's Earth System Models. *Endeavour* 40(3): 178–187.

Barbraud, C. & Weimerskirch, H. (2001): Emperor penguins and climate change. *Nature* 411(6834): 183. <https://doi.org/10.1038/35075554>

Barbosa, A., Benzal, J., De Leo'n, A. & Moreno, J. (2012): Population decline of chinstrap penguins (*Pygoscelis antarctica*) on Deception Island, South Shetlands, Antarctica. *Polar Biology* 35: 1453–1457.

Beever, E.A., Brussard, P.F. & Berger, J. (2003): Patterns of apparent extirpation among isolated populations of pikas (*Ochotona princeps*) in the Great Basin. *Journal of Mammalogy* 84(1): 37–54. [https://doi.org/10.1644/1545-1542\(2003\)084<0037:POAEAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1644/1545-1542(2003)084<0037:POAEAI>2.0.CO;2)

Beltran, R.S., Burns, J.M. & Breed, G.A. (2018): Convergence of biannual moulting strategies across birds and mammals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285(1878): 20180318. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0318>

Berg, E.E., Henry, J.D., Fastie, C.L., De Volder, A.D. & Matsuoka, S.M. (2006): Spruce beetle outbreaks on the Kenai Peninsula, Alaska, and Kluane National Park and Reserve, Yukon Territory: Relationship to summer temperatures and regional differences in disturbance regimes. *Forest Ecology and Management* 227(3):219–232. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.038>

Bradshaw, W.E. & Holzapfel, C.M. (2001): Genetic shift in photoperiodic response correlated with global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98(25): 14509–14511. <https://doi.org/10.1073/pnas.24139.1498>

Briffa, K.R., Schweingruber, F.H., Jones, P.D., Osborn, T.J., Harris, I.C., Shiyatov, S.G., Vaganov, E.A. & Grudd, H. (1998): Trees tell of past climates: But are they speaking less clearly today? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 353(1365): 65–73. <https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0191>

Broecker, W.S. (1975): Climatic change: Are we on the brink of a pronounced global warming? *Science* 189(4201): 460–463. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.460>

Chan-McLeod, A.C.A., White, R.G. & Holleman, D.F. (1994): Effects of protein and energy intake, body condition, and season on nutrient partitioning and milk production in caribou and reindeer. *Canadian Journal of Zoology* 72(5): 938–947. <https://doi.org/10.1139/z94-127>

Cebrian, M.R., Kielland, K. & Finstad, G. (2008): Forage quality and reindeer productivity: Multiplier effects amplified by climate change. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 40(1): 48–54. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(06-073\)\[CEBRIAN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(06-073)[CEBRIAN]2.0.CO;2)



בוויכוח מדעי

המונח "התחממות גלובלית" נטבע על ידי האקולוג ואלאס ברוקר כבר בשנת 1975 (Broecker, 1975). מ-1880 עד 2012 עלתה הטמפרטורה הממוצעת של פני כדור הארץ ושל האוקיינוסים ב-0.85°C (IPCC, 2014).

אחת הסיבות המוצעות להתחממות הגלובלית היא הצטברות גזים, ובהם פחמן דו-חמצני, באטמוספירה של כדור הארץ. ההשערה היא שהצטברות הגזים גורמת לאפקט חממה, כלומר, לכליאת אנרגיה באטמוספירה של כדור הארץ, שבהיעדרם הייתה משתחררת לחלל (Anderson, Hawkins, & Jones 2016). רוב המדענים משייכים את ההתחממות הגלובלית, או לפחות את קצב ההתחממות המהיר, לעלייה בריכוז גזים כמו פחמן דו-חמצני כתוצאה מפעילות האדם. כתמיכה בדעה זאת הם מציינים שהעלייה בטמפרטורות הגלובליות התחילה במקביל למהפכה התעשייתית ולפלישת גזי החממה, שהעיקרי בהם הוא פחמן דו-חמצני. ללא ספק פלישת פחמן דו-חמצני רק הולכת ועולה (Malik, Lan, & Lenzen, 2016): מחצית מפלישת הפחמן הדו-חמצני כתוצאה מפעילות האדם בין השנים 1750 עד 2011 התרחשה בארבעים השנים האחרונות; הקפיצות הגדולות ביותר התרחשו בין השנים 2000 ל-2010 (IPCC, 2014). פלישת פחמן דו-חמצני בארצות הברית כתוצאה מפעילות האדם מוערכת כיום בכ-80 אחוז מסך כל פלישת גזי החממה בארצות הברית. נוכח זאת טוענים מדענים אלה שמגמת ההתחממות אינה עומדת להתמתן (IPCC, 2014) אלא אם כן האנושות תצמצם את פלישת הגזים.

לעומת זאת, יש קבוצה קטנה של מדענים הטוענים שההתחממות הגלובלית מתרחשת מסיבות אחרות. לדוגמה, שינויים מחזוריים בפעילות השמש. על פי מחקריהם, העלייה בריכוז פחמן דו-חמצני באטמוספירה אינה יכולה להסביר תנודות משמעותיות בטמפרטורות. כתמיכה לכך הם מעלים עדויות שבעידני קרח על פני כדור הארץ היה ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה דווקא גבוה מכפי שהוא כיום. הם אף מציעים מנגנון אפשרי להשפעת פעילות השמש על תהליכי התקררות והתחממות של כדור הארץ.

- Descamps, S., Strøm, H. & Steen, H. (2013): Decline of an arctic top predator: Synchrony in colony size fluctuations, risk of extinction and the subpolar gyre. *Oecologia* 173(4): 1271–1282. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2701-0>
- Descimon, H., Bachelard, P., Boitier, E. & Pierrat, V. (2005): Decline and extinction of *Parnassius apollo* populations in France-continued. *Studies on the Ecology and Conservation of Butterflies in Europe* 1:114–115.
- Desjardins, C., Bronson, F.H. & Blank, J.L. (1986): Genetic selection for reproductive photoresponsiveness in deer mice. *Nature* 322(6075): 172. <https://doi.org/10.1038/322172a0>
- Donnelly, A., Caffarra, A. & O'Neill, B.F. (2011): A review of climate driven mismatches between interdependent phenophases in terrestrial and aquatic ecosystems. *International Journal of Biometeorology* 55(6): 805–817. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0426-5>
- Forister, M. L. & Shapiro, A. M. (2003): Climatic trends and advancing spring flight of butterflies in lowland California. *Global Change Biology* 9(7):1130–1135.
- Gordo, O. & Sanz, J.J. (2005): Phenology and climate change: a longterm study in a Mediterranean locality. *Oecologia* 146(3):484–495.
- Gwinner, E. (1996): Circadian and circannual programmes in avian migration. *Journal of Experimental Biology* 199(1): 39–48.
- Harvell, C.D., Mitchell, C.E., Ward, J.R., Altizer, S., Dobson, A.P., Ostfeld, R.S. & Samuel, M.D. (2002): Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science* 296(5576): 2158–2162.
- Hughes, L. (2000): Biological consequences of global warming: Is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution* 15(2): 56–61. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(99\)01764-4](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(99)01764-4)
- Ikeno, T., Weil, Z.M. & Nelson, R.J. (2014): Dim light at night disrupts the short-day response in Siberian hamsters. *General and Comparative Endocrinology* 197: 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2013.12.005>
- Killengreen, S.T., Ims, R.A., Yoccoz, N.G., Bråthen, K.A., Henden, J.A. & Schott, T. (2007): Structural characteristics of a low Arctic tundra ecosystem and the retreat of the Arctic fox. *Biological Conservation* 135(4): 459–472. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.10.039>
- Liepert, B.G. & Previdi, M. (2009): Do models and observations disagree on the rainfall response to global warming? *Journal of Climate* 22(11): 3156–3166. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2472.1>
- Lloyd, A.H. (2005): Ecological histories from Alaskan tree lines provide insight into future change. *Ecology* 86(7): 1687–1695. <https://doi.org/10.1890/03-0786>
- Malik, A., Lan, J. & Lenzen, M. (2016): Trends in global greenhouse gas emissions from 1990 to 2010. *Environmental Science Technology* 50(9): 4722–4730. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06162>
- Merkel, F.R. (2004): Evidence of population decline in common eiders breeding in western Greenland. *Arctic* 57(1): 27–36. <https://doi.org/10.14430/arcti.c480>
- Montgomerie, R., Lyon, B. & Holder, K. (2001): Dirty ptarmigan: Behavioral modification of conspicuous male plumage. *Behavioral Ecology*, 12(4): 429–438. <https://doi.org/10.1093/behec o/12.4.429>
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G. & Nemani, R.R. (1997): Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386(6626): 698. <https://doi.org/10.1038/386698a0>
- Nussey, D.H., Postma, E., Gienapp, P. & Visser, M.E. (2005): Selection on heritable phenotypic plasticity in a wild bird population. *Science* 310(5746): 304–306.
- Oerlemans, J. (2005): Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science* 308(5722): 675–677. <https://doi.org/10.1126/science.1107046>
- Pedersen, S., Odden, M., & Pedersen, H.C. (2017): Climate change induced molting mismatch? Mountain hare abundance reduced by duration of snow cover and predator abundance. *Ecosphere* 8(3),e01722. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1722>
- Pounds, J.A., Bustamante, M.R., Coloma, L.A., Consuegra, J.A., Fogden, M.P.L., Foster, P.N., La Marca E., Masters K.L., Merino-Viteri A., Puschendorf R., Ron S.R., Sánchez-Azofeifa G.A., Still C.J., & Young, B.E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature* 439(7073): 161. <https://doi.org/10.1038/natur e04246>
- Réale, D., Berteaux, D., McAdam, A.G. & Boutin, S. (2003): Lifetime selection on heritable life-history traits in a natural population of red squirrels. *Evolution* 57(10): 2416–2423. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2003.tb00253.x>
- Rochlin, I., Ninivaggi, D. V., Hutchinson, M. L., & Farajollahi, A. (2013). Climate change and range expansion of the Asian tiger mosquito (*Aedes albopictus*) in Northeastern USA: Implications for public health practitioners. *PLoS ONE* 8(4):e60874. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060874>
- Smith, R.L. (1994): Vascular plants as bioindicators of regional warming in Antarctica. *Oecologia* 99(3–4): 322–328. <https://doi.org/10.1007/BF00627745>
- Smith, S.D., Huxman, T.E., Zitzer, S.F., Charlet, T.N., Housman, D.C., Coleman, J.S., Fenstermaker L.K., Seemann J.R., & Nowak, R.S. (2000): Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem. *Nature* 408(6808): 79. <https://doi.org/10.1038/35040544>

Steen, J. B., Erikstad, K. E., & Høidal, K. (1992): Cryptic behavior in molting hen willow ptarmigan *Lagopus l. lagopus* during snow melt. *Ornis Scandinavica* 101–104.

Stevenson, T.J., Prendergast, B.J. & Nelson, R.J. (2017): Mammalian seasonal rhythms: Behavior and neuroendocrine substrates. In D. W. Pfaff, M. Joëls (Eds.), *Hormones, brain, and behavior* (3rd ed., pp. 371–398). New York, NY: Elsevier.

Stirling, I., Lunn, N.J. & Iacozza, J. (1999): Long-term trends in the population ecology of polar bears in western Hudson Bay in relation to climatic change. *Arctic* 52(3): 294–306.

Sutherland, M.L., Pearson, S. & Brasier, C.M. (1997): The influence of temperature and light on defoliation levels of elm by Dutch elm disease. *Phytopathology* 87(6): 576–581. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1997.87.6.576>

Trivelpiece, W.Z., Hinke, J.T., Miller, A.K., Reiss, C.S., Trivelpiece, S.G. & Watters, G.M. (2011): Variability in krill biomass links harvesting

and climate warming to penguin population changes in Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108(18): 7625–7628. <https://doi.org/10.1073/pnas.1016560108>

Visser, M.E. & Both, C. (2005): Shifts in phenology due to global climate change: The need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 272(1581): 2561–2569.

Visser, M.E., van Noordwijk, A.J., Tinbergen, J.M. & Lessells, C.M. (1998): Warmer springs lead to mistimed reproduction in great tits (*Parus major*). *Proceedings of the Royal Society of London Series B. Biological Sciences* 265(1408): 1867–1870.

Zimova, M., Hackländer, K., Good, J.M., Melo-Ferreira, J., Alves, P.C. & Mills, L.S. (2018): Function and underlying mechanisms of seasonal colour moulting in mammals and birds: What keeps them changing in a warming world? *Biological Reviews* 93(3): 1478–1498. <https://doi.org/10.1111/brv.12405>





"הרגשתי שאני צריך לעשות משהו"

משבר האקלים בראי האקטיביזם הסביבתי

מאיר מלכה, תיכון דרכא רמון, גדרה

התלמידות מישראל חקרו את ההיבטים הסביבתיים של הנושא. לטובת החקר הן נעזרו בד"ר אמנון שפון ממכון ויצמן למדע (באמצעות האפליקציה [מדען ברשת של מכון ויצמן](#)). התלמידות ערכו סקר משותף עם התלמידים בפורטוגל (שחקרו את ההיבטים התזונתיים של צריכת בשר אדום). העבודה זכתה במקום השני בתחרות הבינלאומית לכתבי סביבה צעירים (YRE), בקטגוריה של שיתוף פעולה בינלאומי.

כך מתארת אדווה סלוטקין, תלמידת כיתה י"ב במגמת מדעי הסביבה, את העבודה:

"בחרנו בנושא זה בגלל שמאוד אכפת לנו מבעלי החיים ומהסביבה, רצינו לחקור ולהבין מה ההשפעות וההשלכות של צריכת בשר אדום על הסביבה תוך התייחסות לשינויים הגלובליים ומשבר האקלים ועד כמה הדבר תלוי בנו.

העבודה מול תלמידים מפורטוגל הייתה מאתגרת אך לאחר שנשבר הקרח נוצר שיתוף פעולה מעניין למרות הריחוק הגיאוגרפי.

המיזם שעשינו גרם לי להבין שצריכת בשר הינה גורם שאין להתעלם ממנו כאשר בוחנים את משבר האקלים. 70% משטחי החקלאות בעולם מנוצלים לגידול בקר (נתון שהפתיע אותי). יש ניצול משאבים מוגבר בתעשייה זו ופליטה של גז מתאן שאף הוא גז חממה ידוע.

בעקבות ההשתתפות בפרויקט הפחתתי מאוד את צריכת הבשר וכך עשו גם בני משפחתי. זאת הייתה הזדמנות טובה עבורי לקחת נושא שקרוב לליבי ולחקור אותו בצורה כל כך מעמיקה. המיזם נמשך כ-3 חודשים וללא ספק היה יוצא דופן ומשמעותי כחוויה לימודית ייחודית."

יישומון "נוסעים ירוק" להפחתת השימוש בדלקים

מיזם זה נערך במסגרת התוכנית הלאומית "מניעים את הגלגל מחדש". התלמידים נחשפו לנושא משבר האקלים והתבקשו ליזום פעילות שמעודדת הפחתת שימוש בדלקים. בשלב ראשון הם ערכו סקר שנועד לבדוק עד כמה נעשה שימוש בדלקים ברכבים פרטיים, וזאת כדי לחשב את הצריכה הממוצעת לרכב למשפחה בשבוע (שעמדה על 40 ליטר בממוצע). לשאלה אם היו מוכנים לקבל תגמול כספי עבור הפחתת השימוש בדלק ברכבם הפרטי השיבו למעלה מ-80 אחוז מהנהגים בחיוב.

ומכאן החליטו התלמידים לקחת את העניין הלאה. הם תכננו יישומון שמשקלל את כמות הדלק השבועית לנהג, ועל פי מפתח מתמטי מעניק הנחה ככל שיוורדים מצריכת הדלק הממוצעת לרכב פרטי (40 ליטר). היישום מתעדף (מבחינת ההנחות) כלי רכב ידניים, שכן הם פחות מזהמים את הסביבה. הנהג מתבקש

משבר האקלים הוא נושא "חם מתמיד" וזוכה להתייחסות במוסדות החינוך השונים. לרוב ההתייחסות מסתכמת בהרצאה מעניינת ומערך שיעור שמעורר את התלמידים לחשיבה עמוקה יותר ורצון לפעולה. מתוך שאיפה לפתח לומד המעורה בסביבתו ומוכן לפעול למען שינוי, חיפשתי דרך ליטול את המושכות ולמנף את אותה התעוררות. רציתי לעודד גישה אקטיביסטית שללא ספק יכולה להיות תוצר של למידה משמעותית ויכולה להוביל להפנמת ערכים בקרב הלומד ולעצב את השקפת עולמו. לשם כך בחרתי בתהליך למידה באמצעות פרויקטים.

את השיעורים לתלמידים בנושא שינויי האקלים הצגתי בדרכים מגוונות (סרטונים, מצגות ומשחק תפקידים), והם יצרו הקדמה נאותה לדבר האמיתי. לאחר מכן נחלקו התלמידים לקבוצות עבודה של שלושה-ארבעה תלמידים. היה עליהם לחקור סוגיה סביבתית הקרובה לליבם ולערוך כתבת תחקיר, סרטון או סדרת תמונות, במטרה לשקף את הבעיה מזוויות שונות, ולהציע פתרון חדשני לבעיה, על ידי הגברת מודעות לנושא או אפילו הצעה לפיתוחים טכנולוגיים או צרכניים. לשם כך התבקשו התלמידים לבצע תהליך של חקר: לאסוף מקורות מידע רלבנטיים (אתרי תוכן, ראיונות, מאמרים ומחקרים שנערכו בנושא); לזהות גורמים מרכזיים בבעיה; לבחור כלי מחקר מתאימים (ראיונות / סקרים / שאלונים / מפגש עם מומחים) ולערוך תחקיר משלהם על מודעות הציבור לבעיה ועל פתרונות אפשריים שהציבור מציע. החלק המרכזי במיזם היה להציע פתרון אפשרי לבעיה ולהפיץ את התוצר הסופי (כתבה או סרטון) בכלים עיתונאיים (עיתונות, רשתות חברתיות, פרסום בבית הספר ובהקילה). במשך כל התהליך שימשתי מנחה, נפגשתי עם הקבוצות מספר פעמים (אחת לשבועיים-שלושה), התעדכנתי בקצב ההתקדמות, הקשבתי לקשיים, תמכתי בקבוצות הזקוקות לכך ונתתי הנחיות לגבי ההמשך.

הפלטפורמה למיזם זה קשורה ל**ארגון כתבי סביבה צעירים הקשור לעמותת אקואושן**, ותלמידיי חברים בו למעלה משש שנים. מיזמים נוספים נעשו במסגרת ההשתייכות של תלמידיי לפרויקט הלאומי הנקרא "**מניעים את הגלגל מחדש**", שתכליתו לחנך את התלמידים לעודד שימוש בדלקים חילופיים או להפחית שימוש בדלקים בכלל.

התלמידים יצרו מיזמים איכותיים, שחלקם אף זכו לפרסום בינלאומי. אמנה בעיקר את אלה הקשורים למשבר האקלים.

השפעת בשר אדום על משבר האקלים

מיזם זה הוא חקר משותף עם תלמידים מפורטוגל בנושא השלכות של צריכת בשר אדום על משבר האקלים. התוצר הוא **כתבה שפורסמה** בעיתונות מקומית ובמספר אתרים ועיתונים בפורטוגל.

רציתי לעודד בקרב התלמידים גישה אקטיביסטית שללא ספק יכולה להיות תוצר של למידה משמעותית

גם אם הפרויקט שלי לא יפעל לטווח הרחוק ויצא לאור אני יודעת שאני אעשה את כל מה שאני יכולה כדי להפיץ את מה שלמדתי מהפרויקט ולשנות את הדרך בה אני חיה. אני אשמור על כדור הארץ בדרך הכי טובה ואישית שאני יכולה ואנסה גם להשפיע על אחרים."

עידוד נסיעה בתחבורה שיתופית

גם מיזם זה נעשה במסגרת התוכנית "מניעים את הגלגל מחדש". התלמידים בחנו לעומק את השימוש בתחבורה שיתופית במדינת ישראל. בסקר רחב שערכו מצאו כי השימוש קטן והפוטנציאל רב. בחקר שערכו עלו סיבות רבות להיקף הנמוך בשימוש בתחבורה שיתופית: חשש מנסיעה עם נהג לא מוכר, חשש של הנהג לנסוע עם זרים, קושי לסמוך על נהג שאינך מכיר מבחינת מעורבותו בתאונות.

התלמידים פיתחו מודל היוצר תקשורת מיטבית בין הנהג לבין הנוסעים העתידים להצטרף אליו, דרך הפלטפורמה של הרשתות החברתיות. המודל מספק פרטים הכרחיים שיפחיתו את חששות הנוסעים, כמו חשיפה לפרופיל הפייסבוק, המוגבלת לקיום הקשר באותו יום, קבלת המלצות מנוסעים, חשיבה על כמות הנוסעים המתוכננת לנסיעה, על כמות המטען שאמור להיות ברכב, על נוסעים מעשנים ועל רגישות לבעלי חיים. כמו כן, התלמידים סבורים שעל המדינה להנפיק תו תקן לנהג המאשר את עברו התעבורתי (אינו מעורב בתאונות דרכים משמעותיות) וגם אין לו עבר פלילי.

כך מתאר רון סביון, תלמיד כיתה י' במגמת מדעי הסביבה בתיכון דרכא רמון, גדרה, את העבודה על המיזם:

"בחרתי בנושא זה כי חשבתי על עומסי התנועה שקיימים בישראל וכמוכן בקשר ישיר עם צמצום ההתחממות הגלובלית. למדתי מהתהליך שדברים טובים לא באים ברגע, כי זה היה תהליך ארוך ומשתלם, וכמוכן שיש שלל דרכים לצמצום ההתחממות הגלובלית והכול תלוי רק בנו."

למידה דרך פרויקטים היא ללא ספק נושא שיש להרבות בו מכיוון שלמידה זו היא הכי חווייתית שתלמיד יכול לעבור ובנוסף עבורי זו הייתה הדרך שהצלחתי להפיק ממנה את המיטב וכמוכן הדרך שבה נהייתי הכי הרבה.

אני לוקח איתי הלאה מפרויקט התחבורה השיתופית שהתחממות הגלובלית היא דבר חשוב, שיש לשים עליו דגש כבר מגיל צעיר ביותר בבית הספר ואף בגנים, כי אם נהרוס לעצמנו את הבית, ולא ניתן לדורות הבאים ידע וכישורים על מנת לטפח ולשמר אותו, אז איפה זה שם אותנו בתור אחראים למצב הזה? עלינו לקחת אחריות להעניק לכוכב הזה את המירב לשמירתו.

וכמוכן אני מאמין ביוזמה שלנו. באמת עלינו על כל הנקודות הבעייתיות בנושא תחבורה שיתופית והצענו פתרון אמיתי שאפשר ליישם אותו ועל כך אני גאה מאוד."

לבחור את סוג ההנחה (טעינת רב קו לנסיעה בתחבורה ציבורית או הנחה במיסים עירוניים כחלק מעידוד בנסיעה שיתופית). גולת הכותרת של היישומון הייתה חישוב הפחתת גז החממה העיקרי - פחמן דו-חמצני - כתלות בכמות הדלק שנחסכה.

התלמידים חברו לתלמיד מגמת מחשבים, שיצר יישומון פעיל, ולתלמידי מגמת תקשורת, שיצרו [סרטון המתעד את כל התהליך](#). הם הציגו זאת במספר כנסים, וגאים מאוד בעשייתם.

שני תלמידים מתארים את התהליך שעברו במילים האלה:

דור אהרוני, תלמיד מגמת מדעי הסביבה בתיכון דרכא רמון בגדרה:

"החלטתי לבחור בנושא הזה לא רק כי זה מעניין אותי. החוסר מודעות של אנשים לגבי התרומה שלנו למשבר האקלים זיהום הסביבה היה גבוה והרגשתי שאני צריך לעשות משהו לגבי זה. במיוחד כאשר בחרתי ללמוד במגמת מדעי הסביבה.

הפקתי המון ידע מן התהליך הזה בנוסף למה שכבר ידעתי, ועמדנו באתגר גדול, לפתח יישום שממש עובד ולעבוד בשיטות פעולה עם מגמת מחשבים כדי להפוך את הרעיון למשהו מציאותי שממש יכול לעבוד. בנוסף אני מרגיש שהסובלנות שלי כלפי הסביבה והטבע עלתה.

זה שינה את הפרספקטיבה שלי כלפי הסביבה ב-180 מעלות, ובתור נהג לעתיד בהחלט אנסה לאמץ דפוס חסכוני יותר של שימוש ברכב פרטי ובנוסף עכשיו כל פעם שאני יוצא לטבע אני מביא איתי שקית לאסוף זבל שאנשים אחרים זרקו.

אני בהחלט חושב שלמידה דרך פרויקט יכולה להיות חברותית ומהנה ואני חושב שכל אחד צריך להתנסות בפרויקט אחד שהוא אוהב.

אני בעיקר לוקח הלאה את הדאגה לסביבה, כי אם אנחנו לא נשמור עליה, לדורות הבאים שלנו כבר לא יהיה על מה לשמור."

מאיה שרעבי, תלמידת מגמת מדעי הסביבה בתיכון דרכא רמון בגדרה:

"אני מרגישה שהנושא של הדלקים בארץ ישראל ובעולם בכלל הוא נושא מאוד רציני הנוגע לשמירה על סביבתנו וטביעת הרגל האקולוגית שלנו. אחד מהגזים העיקריים בדלק הוא פחמן דו-חמצני, וגז זה הוא גם הגז העיקרי להתחממות הגלובלית. לכן הרגשתי שעם השינוי הקטן שכל אחד יעשה מבחינת הפחתת השימוש בדלק אפשר לשנות מאוד את הזיהום ולהקטין את ההתחממות הגלובלית.

למדתי ששווה להילחם בדברים החשובים בחיים. יש לנו כדור ארץ אחד ואנחנו צריכים לשמור עליו כמה שאנחנו יכולים.

בהתחלה, לפני הפרויקט שהתחלנו לפני כשנה וחצי אני לא ידעתי הרבה על כמה אנחנו משפיעים על כדור הארץ לרעה וגם לא הייתי ממש מודעת להיקף הפגיעה הזו. כשהתחלתי את הפרויקט התחלתי להבין שגם אם אנחנו לא רואים את זה ביום יום בצורה ברורה, זאת בעיה שחיה וקיימת בצורה מאוד חזקה שאם לא נשנה את הדרך בה אנו חיים יהיו נזקים בלתי הפיכים.

לפי דעתי התהליך שכל בן אדם עובר בבניית פרויקט הוא תהליך אישי ומשמעותי, וכשאתה מתמסר למשהו אתה מתחבר אליו ואתה לומד אותו בצורה הכי עמוקה שאפשר.



השפעת שינויי האקלים באזור שדה בוקר על סביבת המחיה של העביד הצהוב (*Scorpio maurus palmatus*) בשדה צין, התנהגותו ואסטרטגיית הרבייה שלו

נעם ברקת ויגאל גרנות, התיכון לחינוך סביבתי במדרשת בן-גוריון

פרולוג

שדה צין, הלוא הוא העביד הצהוב (*S. maurus palmatus*). מכיוון ששינויי האקלים החלו להשפיע לפני כשלושים שנה, אפשר היה לבדוק את השפעתם על האקולוגיה של טורף זה: אילו שינויים חלו בסביבת המחיה שלו, אילו שינויים חלו בהתנהגות הטרפיה שלו, ומהי אסטרטגיית הרבייה שמאפשרת לעקרב זה לצלוח את שינויי האקלים הללו.

העביד הצהוב (*Scorpio maurus palmatus*)

עקרבים הם חסרי חוליות המשתייכים למערכת פרוקי הרגליים, מחלקת העכבישנים ולתת-מחלקת העקרבים. העבידים היא אחת המשפחות בתת-מחלקה זו. היא מכילה מינים רבים, ביניהם העביד המלכותי (גדול העקרבים בעולם). רק שני מינים מהם נמצאים בארץ: עביד שחום (*Scorpio maurus fuscus*) ועביד צהוב (*Scorpio maurus palmatus*). העביד הצהוב הוא המין המדברי מבין השניים. בעבר היה נפוץ מאוד באזור הנגב והעקרב היחיד במישור צין. רוחב בסיס האצבע הנחה (המחוברת לצבת) של העביד הצהוב הוא כמחצית אורכה של האצבע הנעה לערך. אורך גופו של העביד הצהוב הוא 60 מ"מ ומשקל גופו (פרט בוגר) קטן מ-3 גרם. מספר עלעלי המסרקיות, שבצידי פתח המין נע בין 11 ל-13. משפחת העבידים היא המשפחה היחידה בתת-מחלקת העקרבים החופרת מחילות וחייה בהן. העומק האנכי של מחילות העביד הצהוב מגיע בממוצע ל-22-25 ס"מ. הנקבה משריצה את הצאצאים, הם עולים על גבה, והיא מפרנסת אותם בתוך המחילה, עד הגשם הראשון. אז הם יכולים לצאת ולחפור באדמה הלחה מחילה חדשה.

לפני ארבעים שנה ביצע בהנחיית תלמיד בשם מיכאל ברקת מבית הספר התיכון לחינוך סביבתי במדרשת בן-גוריון עבודת גמר באקולוגיה, בנושא: "פרקים באקולוגיה של עקרב מהמין עביד צהוב (*Scorpio maurus palmatus*)". לפני שנתיים התקשר אליי אותו תלמיד וסיפר לי שבתו לומדת באותו בית הספר והיא רוצה להמשיך את עבודת המחקר של אביה. שמחתי מאוד בגלל שתי סיבות: (א) מאז אותה עבודה גרמו שינויי האקלים לשינויים אקולוגיים רבים באזורנו: מיני צמחים ובעלי חיים מסוימים נעלמו, ובעצם נקרתה לי הזדמנות חד-פעמית לבדוק כיצד השפיעו השינויים הללו על אוכלוסייה של טורף כמו העקרב הזה; (ב) בעבודה של מיכאל ברקת נמצא שמספר הביציות המופרות והמפותחות לפני ההזדווגות היה דומה מאוד למספרן אחרי ההשרצה, דבר שנתפס בעיניי כחידה, והינה נקרתה לי הזדמנות לנסות ולפתור גם את התעלומה הזאת.

העבודה החדשה נעשתה בהדרכת, פנסינור של המרכז הבינתחומי במדרשה, ובהדרכת מר סול ברנד, פנסינור של המכון לחקר המדבר. בסיזמה הדהימו אותנו הממצאים עד כדי כך שהוחלט להגיש את העבודה לתחרות מדענים צעירים של "מוזיאון המדע על שם בלומפילד" בירושלים, שם היא אכן זכתה בפרס מיוחד מטעם "קרן כנפו" על עבודה מקורית ועל מחשבה מחוץ לקופסה. המאמר שלפניכם הוא סיכום של מחקר מיוחד זה שמלמד עד כמה מחקרים של תלמידי תיכון יכולים להיות רציניים.

יגאל גרנות

מבוא

בשלושים השנים האחרונות התרחשה הקצנה ניכרת בכל המדדים המאפיינים את האקלים באזור שדה צין¹; הטמפרטורות הממוצעות בנגב עלו ב-3%, משרעת הטמפרטורות גדלה משמעותית, מספר ימי הגשם ירד ומועד ההופעה של עיקר כמות הגשמים התאחר בחודשיים לערך. כמות המשקעים השנתית הממוצעת, אף היא פחתה בכ-15%, ביחס לשנות השמונים של המאה הקודמת. שינויי אקלים אלה השפיעו רבות על הנגב בכלל, ועל מרכז הנגב והר הנגב בפרט. אזורים שלמים התייבשו, כתמי צמחייה נעלמו, בעלי חיים נכחדו או נדדו לאזורי מחיה אחרים, נוחים יותר. בעבודת המחקר של אבי, שנערכה לפני ארבעים שנה, נבדקו נתונים שונים על האקולוגיה ואסטרטגיית הרבייה של הטורף העיקרי במערכת האקולוגית המדברית של



¹ שדה צין - מישור לס הנמצא במרכז הנגב; עליו יושבת מדרשת בן-גוריון.

סביבת המחיה (אקולוגיה)

במערכת המדברית הנבדקת, היצרנים הם המיקרואורגניזמים שמרכיבים את קרומי הקרקע. הצרכנים הראשוניים (הצמחונים) הם טחבני המדבר (איזופודים) והשבלולים, ואילו הטורף העיקרי בשרשרת המזון הזו הוא העביד הצהוב.



וסומנה על ידי המנחים שלי כבר לפני שנים רבות לצורכי ניסוי ותצפיות. החלקה השנייה הייתה חלקה "פרועה" ולא מסומנת בנחל הרועה, בסמוך למטע עצי פיסטוק נטוש. חלקות אלו שימשו מדגם מייצג לסקרים, ספירות ובדיקת מדדים סטטיסטיים של מחילות העבידים הצהובים, לרבות גודל פתחיהן (המעיד על גיל העביד החופר), כיוון פתחי מחילות, מרחקן זו מזו, מרחקן מריכוזי צמחייה ומקיני נמלים. כן נבדקה נוכחות העבידים במחילה ובתוך כך אם היא פעילה. סקר המחילות נערך אחת לחודש, על-פני כל תקופת העבודה.

מתקן לבדיקת יחסי הגומלין בין עבידים לבתוסיים: בחמת מחקר בתחומי מדרשת בן-גוריון הותקנו ארבעה ארגזי פלסטיק קשיחים בני 80 ליטר ובגודל 55x75 ס"מ כל אחד. כל ארגז מולא באדמת לס ממישור צין, עד לגובה 15 ס"מ, והונחה אבן באחת מפינותיו. קרקע הלס רוססה במעט מים, ליצירת קרום. לכל אחד מארבעת הארגזים הוכנסו שני עקרבים, עביד צהוב ובתוס ישראלי, וכן טרמיטים ששימשו אותם למאכל. הארגזים כוסו במכסים מחוררים לאוורור.



מספר חודשים לפני תחילת העבודה, וכהכנה לקראתה, סקרתי ובחנתי ריכוזי מחילות של העביד הצהוב בשדה צין ובנחל הרועה. מהסקרים הללו גיליתי שמספר מחילות העבידים ליחידת שטח, לרבות מספר המחילות הפעילות, פחתו באופן משמעותי, ביחס למדווח בעבודות שנעשו לפני שנים רבות. הטרידה אותי במיוחד העובדה שנצפו מעט מאוד מחילות של עבידים צעירים לאחר הגשם הראשון, במועד שבו צפויה עלייה מובהקת של מחילות כאלה. זאת ועוד, טחבני המדבר (מין של סרטן יבשה), שהיו עיקר מזונו של העביד הצהוב בשדה צין, נעלמו מהמישור סמוך לשנת 2011 (אירוס 1, א, 1). נראה כי טחבני המדבר, הזקוקים לקרקע לחה במיוחד כדי שיוכלו לנשום, לא שרדו את תנאי החום והיובש החדשים שפקדו את האזור.

תצפיות לילה: השריון החיצוני של עקרבים זוהר כשמאירים עליו באור על-סגול (uv). עובדה זו מקלה משמעותית את ביצוע התצפיות על פעילות העבידים, שכן הם פעילי לילה המעדיפים לצאת לפעילות בלילות חמים וחשוכים במיוחד.

נוכח שינויי האקלים והשינויים בסביבת המחיה העליתי שאלות רבות: איך השפיעו שינויי האקלים על אוכלוסיות העבידים? כיצד השתנתה אסטרטגיית הטריפה של העביד בעקבות היעלמות הטרף העיקרי שלו (הטחבן המדברי)? איך אסטרטגיית הרבייה מאפשרת לעביד להתרבות למרות השינויים במשטר הגשמים וכמותם?

על שאלות אלו ורבות אחרות מנסה לענות עבודה זו.

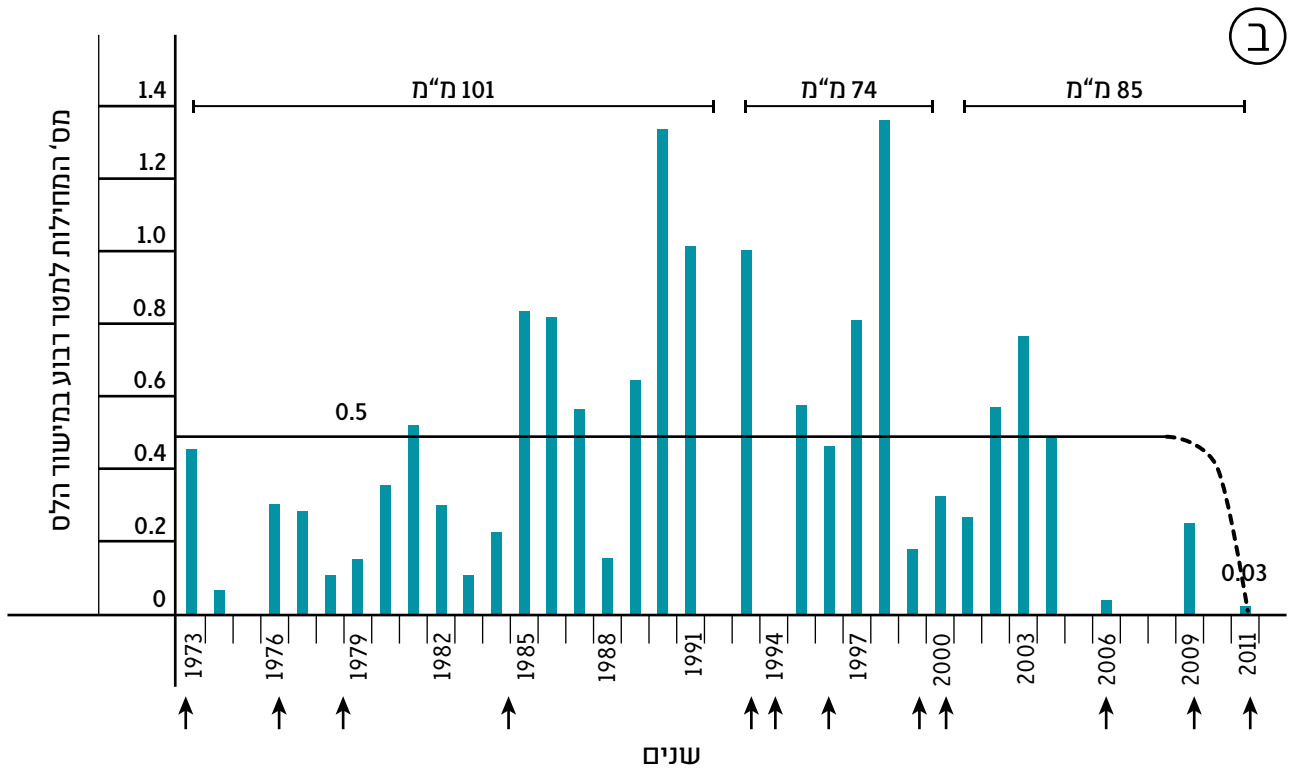
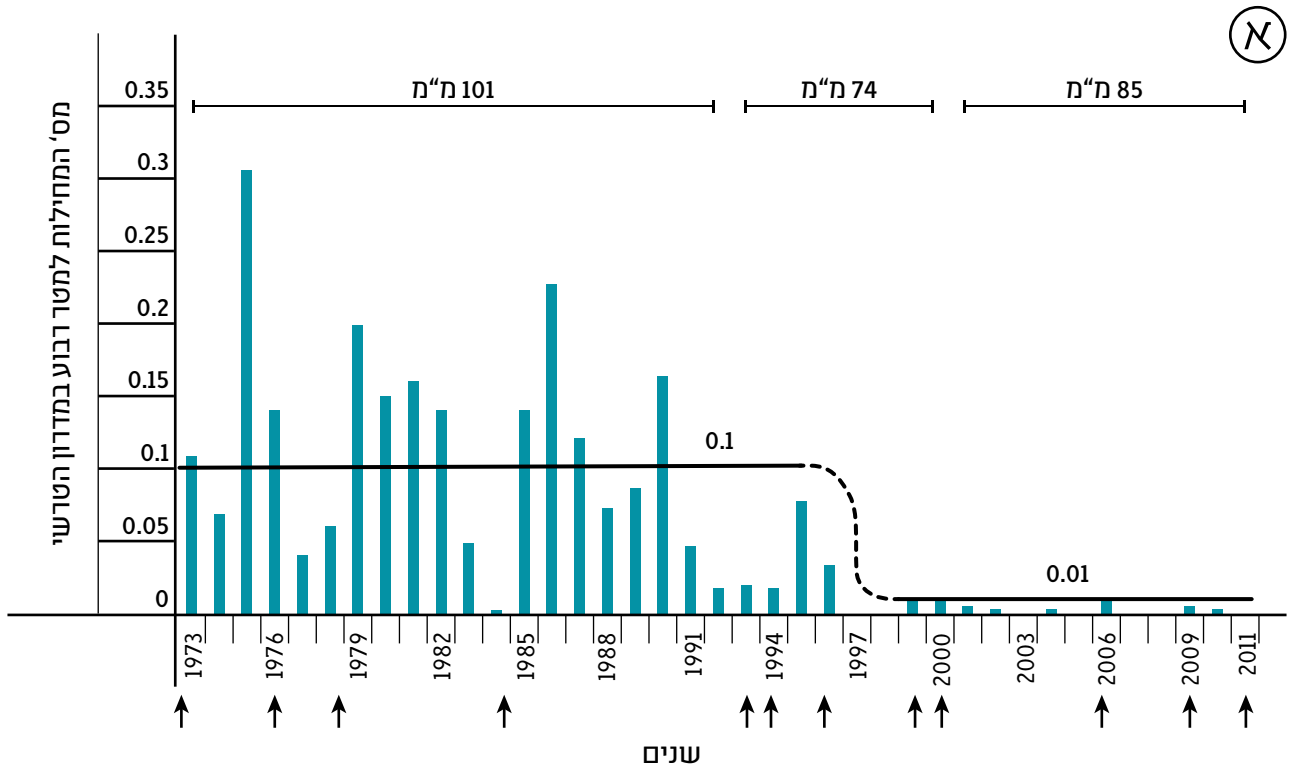
ניתוח העבידים והוצאת מערכת הרבייה: לשם בדיקה סטטיסטית של מספר הביציות שעל השחלה וגודלן נערכה בכל חודש חפירת מחילות לאיתור שלוש עד ארבע נקבות עבידים. אלה נאספו וסומנו ולאחר מכן עברו ניתוח להוצאת שחלות. נתונים אלה נועדו לבדוק שינויים באסטרטגיית הרבייה. מספר נקבות העבידים המנותחות היה קטן והקשה מאוד לבצע חישובים סטטיסטיים, אך הדבר נעשה מתוך שיקול דעת, כדי לצמצם למינימום ההכרחי את הפגיעה באוכלוסיית העבידים, הפוחתת ממילא. הניתוח נעשה תחת מיקרוסקופ בינוקולרי בשיטה שהמציא אבי לפני ארבעים שנה ושהמשכתי לפתח במהלך העבודה.

גם חפירת מחילות העבידים נעשתה בשיטה שהמציא אבי ושהוספתי לפתח. ככלל, פתחי מחילות העבידים נראים כחצאי סהר על פני הקרקע. אם המחילה פעילה, יימצא בפתחה לרוב שפך אדמה ופסולת, עדות להגדלת שטחה וניקויה על ידי העביד השוכן בה. גוף נקבות העביד גבוה וצר מגוף הזכרים, כך שהיחס בין רוחב לגובה המחילה יכול לרמוז על זוויג העביד השוכן בה ובכך לחסוך פגיעה בעבידים זכרים. רוחב המחילה וכיוון פתחה נמדדו ונרשמו לפני תחילת החפירה. לאחר הוצאת העביד

שיטות המחקר

ריכוז חומר מחקרי ומדדי אקלים: כדי להבין אילו שינויים אקלימיים חלו על האזור בשנים האחרונות ריכזתי ובדקתי סטטיסטית את מדדי האקלים כפי שנאספו בתחנה המטאורולוגית של המכון לחקר המדבר במדרשת בן-גוריון בארבעים השנים האחרונות. בין היתר נבדקו כמויות משקעים, מספר ימי גשם, טמפרטורות ומשרעת הטמפרטורות בין יום ולילה ובין קיץ וחורף.

חלקות מחקר: למחקר שימשו שתי חלקות. האחת במישור צין, בשטח של כארבעה דונם מצפון מערב למדרשת בן-גוריון. החלקה חולקה ל-10 רצועות שוות, בנות 400 מ"ר כל אחת,



איור 1: שינויים באוכלוסיית השחבן המדברי בין השנים 1973-2011 (ברשות מתוך גרנות ברנד ושחק, 2012). (א) במדרון הטרשי (ב) במישור הלס. העמודות מייצגות את גודל האוכלוסייה בכל שנה. הרווחים ביניהן מייצגים שנים שבהן לא נערכה ספירת מחילות. הקו האופקי (בשחור) מייצג את ממוצע גודל האוכלוסייה. שלושת הקווים האופקיים למעלה מציינים את ממוצע המשקעים. החיצים האנכיים על ציר השנים מייצגים שנות בצורת. הקו המקווקו מייצג את הנפילה החדה בגודל אוכלוסיית השחבנים.

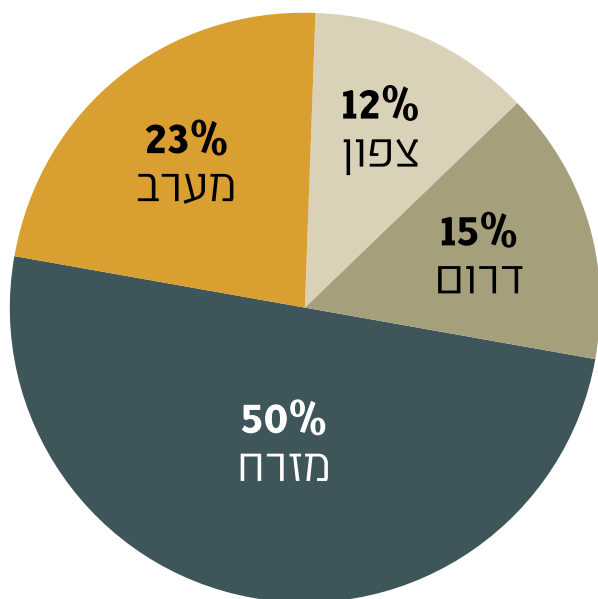
מהמחילה נבדקו שאריות המזון בתכולת המחילה ששימשה את העביד ונמדד עומקה. כל הנתונים נרשמו ב"תעודת זהות" שהוכנה לכל עביד שנחפר ממחילתו. העבידים הובאו למעבדה, שם הורדמו על ידי הזרקת אלכוהול 90% לגופם דרך פתח השת. פעולה זו - נוסף על המתת העביד מהר וללא סבל - הקלה את שלבי הניתוח, שכן שחלות העביד מתקשות במגע עם אלכוהול. בעזרת מספריים מיוחדים מקלפים את שריון הגב של העביד מגופו וחושפים את קרביו. את מערכת הרבייה מגלים בעזרת שתי פינצטות (מלקטות) שען. זוהי עבודה קשה ועדינה במיוחד, המצריכה סבלנות רבה. שחלת העביד קטנה ופגיעה מאוד והיא עטופה בכבד. כל פגיעה מקשה את השימוש בה להמשך עבודת המחקר. לאחר חשיפת השחלה שוטפים אותה בעדינות בזרזיף מים, סופרים את הביציות שעליה וממיינים אותן לגדלים: קטנות, בינוניות, גדולות-מפותחות. עם סיום הניתוח מנתקים את השחלה מגוף נקבת העביד ומכניסים אותה לאלכוהול 70% בצנצנת קטנה, לתהליך קיבוע (פיקסציה), המשמר את מצבה לבדיקות עתידיות והשוואת נתונים. הצנצנת מסומנת בקוד, הקושר אותה ל"תעודת זהות" של העביד.

כיום לא ניתן למצוא בשרידי המזון של העבידים שאריות של טחבנים, אלא רק חלקי נמלים, חיפושיות וחרקים לא מזוהים אחרים



תוצאות ודין

לפעילות. אגב, במקומות שבהם תלוליות או שיחים מסתירים את המזרח הייתה העדפה לפתח בכיוון מערב, ובאפיקי פלגים ונחלים נחפר פתח המחילה עם כיוון הזרימה, כדי למנוע הצפה (קורן וגרנות, 2003).

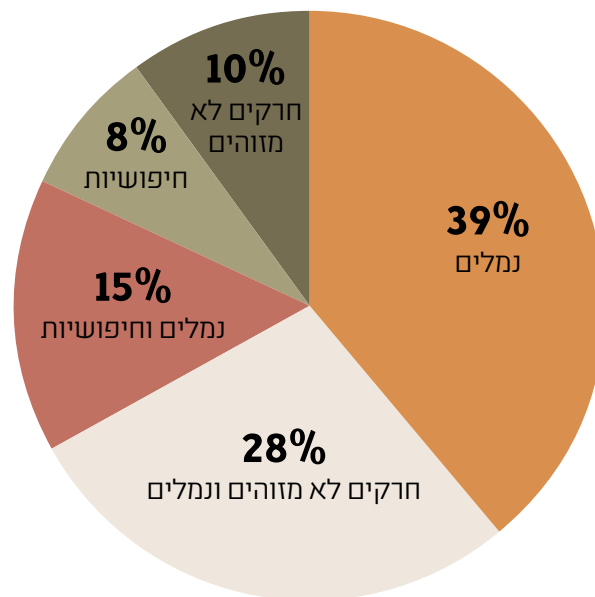


איור 3: התפלגות נתוני כיוון פתח המחילה של העבידים שנותחו ב-2019

תגלית מפתיעה ביותר התגלתה לי בסקרים הליליים. סמוך לריכוזי מחילות העבידים, ואף בפתחיהן, התגלו עקרבים מהמין "בוטוס (צרבן) ישראלי" (*Buthus Israelis*). תגלית זו מפתיעה במיוחד נוכח העובדה שהבוטוס אינו חופר מחילות. עד לפני שנים לא רבות היה העביד הצהוב העקרב היחיד שנצפה במישור צין והטורף העיקרי בנישה אקולוגית זו; נראה כי איבד את הבלעדיות והשליטה לבוטוס (הצרבן) הישראלי (שעד היום נצפה בעיקר באזורים טרשיים, קרי: על רכס חלוקים הסמוך). האם הבוטוס מסלק את העביד הצהוב ממחילותיו? האם הוא טורף אותו, או את צאצאיו? האם אנו עדים לשינוי התנהגותי של הבוטוס הישראלי, המסגל לעצמו הרגלי מחיה במחילות העביד? בחינה סטטיסטית של הממצאים מגלה כי היחס בין מספר העבידים הצהובים למספר הבוטוסים עומד על אחד לארבעה בהתאמה. נתון זה חוזר במדויק גם בתצפיות ובסקרים ליליים שנערכו בנחל הרועה. ניכר כי הבוטוס הישראלי משתלט על אזורי המחיה של העביד, מסלק אותו ממחילותיו ומסתגל לחיים במישור לס, במחילות שעליהן השתלט. לא פחות מרעושה היא תוצאה נוספת הנובעת מתצפיות הלילה וקשורה לאסטרטגיית הציד של העביד: בעבר, כשכמות המזון הזמינה לעביד הייתה מצויה בשפע, הוא היה יכול לשחר לטרף באמצעות מארב בפתח מחילותו, מבלי לצאת ממנה. העביד גם לא טרח לרדוף אחרי הטרף אם עבר בסמוך למחילה. במקום או במאוחר הזדמנו טחבן המדבר, חיפושית או נמלה ממש לפתח המחילה ונלכדו בצבתותיו החזקות של העביד. נכון להיום, לאחר שטחבני המדבר נעלמו מהשטח, חייב העביד הצהוב "להילחם" על כל טרף בשטח ולכן נאלץ לצאת מהמחילה (לעיתים עד חמישה מטרים ממנה) ולארום לטרף. זו הסיבה שהוקם מערך ניסוי שעסק ביחסי הגומלין בין העביד הצהוב לבוטוס הישראלי.

שתי עובדות ברורות - הקשורות אחת בשנייה - עולות מניתוח התוצאות של סקירת הספרות ומבחינת נתוני האקלים של התחנה המטאורולוגית במכון לחקר המדבר במדרשת בן-גוריון. עובדה ראשונה: הנגב מתחמם ומתייבש משמעותית בשנים האחרונות (גרנות ברנד ושחק, 2012; שם איור 2).

העובדה השנייה: התחממות הנגב בכלל (ואזור מישור צין בפרט) משפיעה באופן ניכר על הנישה האקולוגית הנבדקת. כתמי הצומח הולכים ונעלמים ממישור צין ומשאירים אותו כמעט סטרילי ביחס לכיסוי הצומח לפני ארבעים שנה. כמו כן, האוכלוסיות של בעלי חיים רבים שחיו במישור הולכות ופוחתות וחלקן אף נכחד כליל מהאזור. הדוגמה הבולטת לכך היא טחבן המדבר, שמחילותיו כיסו את מישור צין באלפיהן עד לפני עשרים שנה. אלפי הפרטים הללו הסתובבו בשטח, תיחחו את קרקע הלס, הפחיתו את המליחות בה והיו המזון העיקרי של העביד הצהוב. סקרי השטח בחלקות המחקר מוכיחים שהמרחק בין מחילות העבידים גדל בהרבה ביחס למצב שנבדק לפני ארבעים שנה. בהיעדר טחבנים מעדיפים העבידים - בעיקר הצעירים שבהם - לחפור את מחילותיהם בסמוך לקיני נמלים שהפכו בשנים האחרונות למזונם העיקרי (יחד עם החיפושיות למיניהן). עובדה זו מקבלת משנה תוקף כשבודקים את פסולת המזון של העבידים בפתחי המחילות שנחפרו (איור 2). כיום לא ניתן למצוא בשרידי המזון שאריות של טחבנים, אלא רק חלקי נמלים, חיפושיות וחרקים לא מזוהים אחרים.



איור 2: שאריות מזון במחילות בוגרים

מעניין היה לגלות שביחס להעדפת הכיוון של פתחי המחילות לא היה שינוי לעומת עבודתו של אבי, ואילו במישורים פתוחים התגלתה העדפה מובהקת של פתחי מחילות הפונים לכיוון מזרח (איור 3). נראה כי העבידים, המעדיפים לצאת לפעילות בלילות חשוכים במיוחד, חופרים את המחילה כך שיוכלו לראות מפתחה את זריחת הירח. הדבר מקל עליהם את תזמון יציאתם

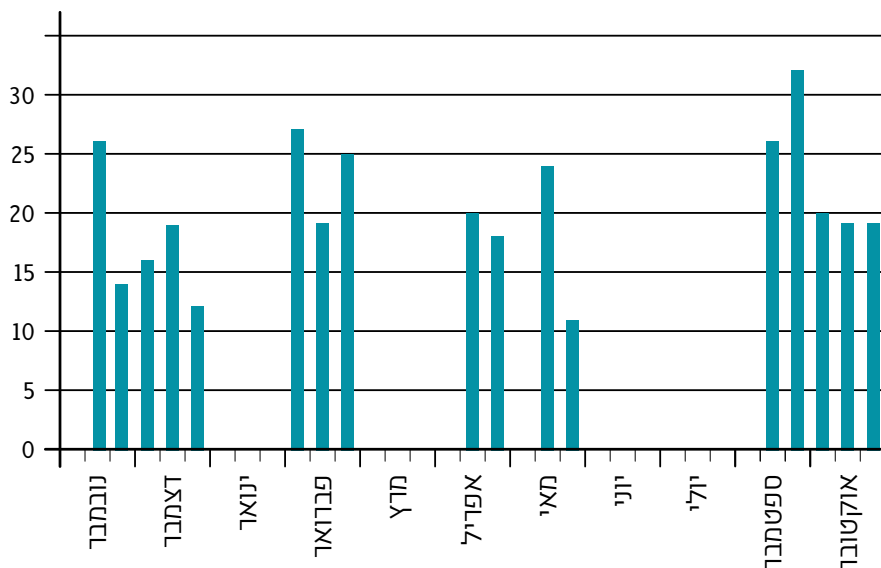
אותם. יש להדגיש שזו השערה בלבד וכדי לבדוק אם היא נכונה נדרש מחקר נוסף.

התוצאות המרשימות ביותר התגלו בתחום אסטרטגיית הרבייה. כאמור, אחת לחודש - במשך שנה תמימה - נותחו נקבות העבידים והוצאו מהן השחלות. הבדיקה של מספר הביציות על השחלה, גודלן ומצב התפתחותן העלתה ממצאים מדהימים. בעבר ביצעו העבידים את ריקוד החיזור וההזדווגות בחודשים יוני-יולי. ההיריון נמשך כחודשיים ובחודש ספטמבר הושרצו הצאצאים, שהיו עולים מייד על גב האם, בתוך המחילה. הם נותרו במחילת האם כחודש נוסף שבו האם מפרנסת אותם עד להתנשלות הראשונה. התנשלות זאת מתרחשת בערך עם הגשם המשמעותי הראשון (היורה), אז הצעירים הללו יכולים לצאת לעצמאות ולחפור לעצמם מחילה בקרקע הלס הלחה. כיום,

אף על פי שבכל אחד מארגזי המחקר התקבלה תוצאה מעט שונה, הרי שהמגמה שנצפתה הייתה ברורה: ביחסי הגומלין בין הבותוס הישראלי לעביד הצהוב ידו של הבותוס על העליונה והוא מצליח לגרש את העביד ממחילתו ומתנחל במקומו.

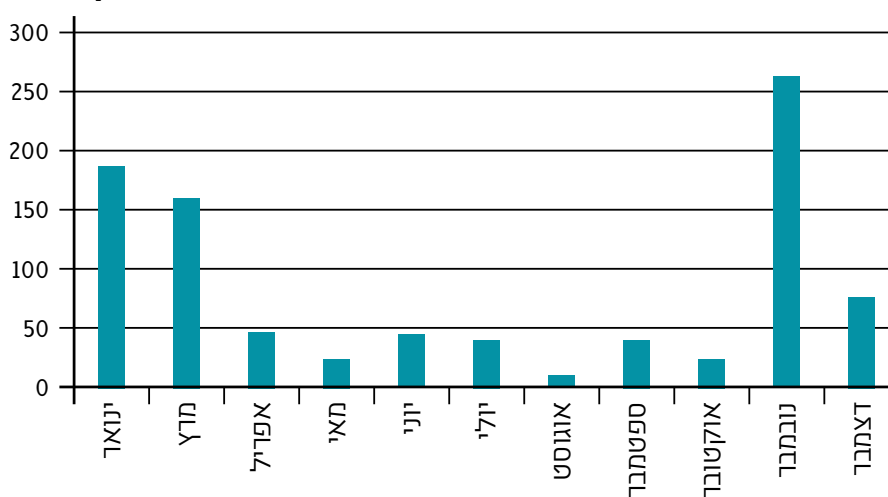
הבותוס הישראלי הוא מין מתפרץ, המבסס את מעמדו כמחליפו של העביד הצהוב בשרשרת המזון בשדה צין. השאלה שנותרה בינתיים ללא פתרון היא מדוע מצליח הבותוס הישראלי להסתדר בשדה צין טוב יותר מהעביד. לפי רמזים שונים שיערתי שהבותוס הישראלי לא רק משתלט על מחילות העביד, אלא אף ניזון מצאצאיו, המהווים עבורו מזון עתיר חלבון (קניבלים) הוא תופעה מוכרת ונפוצה בקרב עקרבים). כמו כן, זריזותו וקלות גופו של הבותוס, בניגוד לעביד הכבד והמסורבל, מאפשרים לו לרדוף אחרי השרמיטים המהירים החיים במישור צין ולצוד

ביציות מופרות מפותחות



איור 4: מספר ביציות מופרות-מפותחות בשחלה, לפי חודשים

מס' המחילות בחלקה



איור 5: מספר מחילות של צעירים בחלקת המחקר, לפי חודשים

נראה כי טחבני המדבר, הזקוקים לקרקע לחה במיוחד כדי שיוכלו לנשום, לא שרדו את תנאי החום והיובש החדשים שפקדו את האזור

המין, מחלקת הנקבה את התהליך לשגר עיקרי אחד (קטן יותר מבעבר) בחודש נובמבר, ולעתודות שגרים נוספים, קטנים במיוחד, במהלך כל השנה. עיון בגרפים לעיל מלמד שבין מספר הביציות המפותחות בשחלות האם שנמצאו בחודשים נובמבר, אפריל, מאי וספטמבר, ובין הופעת מחילות הצעירים, כשלושה חודשים מאוחר יותר, בחודשים ינואר, יוני, יולי ונובמבר, נמצא מתאם מלא התומך בהשערה זו. נראה כי זהו מנגנון ביטחון אבולוציוני, המופעל בעיתות מצוקה וסכנה להמשכיות המין. בזמנים קשים כאלה מאפשר המנגנון עיכוב בהתפתחות הביציות המופרות ודחיית ההשרצה למועדים מאוחרים יותר במהלך השנה. יש להדגיש שהמנגנון המוצע כאן הוא בחזקת השערה בלבד, שכן קיימים גם הסברים אחרים לאופן פעולתו, ונחוץ מחקר נוסף כדי לענות על השאלות שמנגנון כזה מעלה.

מקורות

ברקת, מ. (1981). פרקים באסטרטגיית רבייה ואקולוגיה של העביד הצהוב בשדה צין. מתוך עבודת גמר בבית הספר התיכון לחינוך סביבתי.

גרנות, י., ברנד, ס., ושחק, מ. (2012). שינויים בגודל האוכלוסייה של טחבן המדבר כסמן להשפעת שינויים במשטר הגשמים על מערכות אקולוגיות בנגב. "אקולוגיה וסביבה", גיליון 2, עמ' 181-186.

קורן, מ., וגרנות, י. (2003). אקולוגיה של העביד הצהוב במישורי הלס של הנגב המרכזי. מתוך עבודת ביוטופ במדרשת שדה בוקר.

עם דחיית ימי הגשם עמוק לתוך החורף, סביב חודש נובמבר - ההיריון, ההשרצה והיציאה לעצמאות נדחים בחודשיים לערך. נראה כי הביציות מתחילות להתפתח בסוף אוגוסט-תחילת ספטמבר (איור 4), והצאצאים יוצאים לעצמאות כשלושה חודשים מאוחר יותר, בנובמבר (איור 5). מדהים לראות שיש התאמה מלאה בין תחילת התפתחות הביציות בחודש ספטמבר, לאחר ההזדווגות, לבין הופעת מחילות צאצאי העבידים, שלושה חודשים מאוחר יותר, בנובמבר.

אך זה לא הכול. מניתוח התוצאות עולה כי בעבר, כל תהליך הרבייה חל פעם בשנה. כלומר, החיזור וההזדווגות חלו בחודשים יוני-יולי; ההיריון נמשך כחודשיים, עד חודשים אוגוסט-ספטמבר; השרצת כל הצאצאים התרחשה בתחילת ספטמבר; הצאצאים יצאו לעצמאות ועזבו את מחילת האם בסוף ספטמבר וחפרו לעצמם מחילות עם הגשם הראשון. במהלך ארבעים השנה האחרונות אסטרטגיה זו השתנתה. לא רק שהתהליך נדחה בחודשיים, כפי שכבר נכתב, אלא שכדי להבטיח את המשכיות





למידה בין-דורית:

האם בני נוער הם המפתח להתנהגות ההורים בנושא שינויי אקלים?

מעובד על פי המאמר¹:

Lawson, D.F., Stevenson, K.T., Peterson, M.N., Carrier, S.J., Strnad, R. & Seekamp, E. (2018): Intergenerational learning: Are children key in spurring climate action? *Global Environmental Change* 53: 204–208.

עיבוד: גילת בריל

למידה שבה הורים לומדים מילדיהם, עשויה להצליח לפנות לקהלים רחבים בעניין שינויי אקלים ללא קשר לדעותיהם הפוליטיות

פליטת פחמן עבור אוכלוסיות של נוצרים אדוקים (Wardekker, Moser) כלי נוסף הוא שימוש בידוענים להעברת מסרים (2009). כמו השחקן ליאונרדו די קפריו המרבה להביע את דעתו בעניין שינויי האקלים. אולם כלים אלה יעילים בפלחי אוכלוסייה צרים, יחסית, ונותר צורך בפיתוח כלים שיגשרו על הפער בין דעות פוליטיות ושינויי אקלים בקרב אוכלוסיות רחבות יותר.

למידה בין-דורית, שבה הורים לומדים מילדיהם, עשויה להיות דרך מבטיחה לפנות לקהלים רחבים בעניין שינויי אקלים ללא קשר לדעותיהם הפוליטיות. כשבני נוער לומדים על שינויי אקלים הם פחות מושפעים מאידיאולוגיה פוליטית-חברתית (Flora et al., 2014) לעומת אנשים מבוגרים יותר. מחקרים שנערכו על מבוגרים העלו תוצאות סותרות בעניין השפעת חינוך ופרסום בנושא שינויי אקלים (Moser, 2009), ולעומת זאת נמצא כי חינוך והוראת הנושא בקרב ילדים מעוררים דאגה למצב העולמי ומעודדים התנהגויות מפחיתות פליטת פחמן (Stevenson, 2018). יתר על כן, ילדים ובני נוער משפיעים על הוריהם במגוון תחומים, כמו על התנהגות הקנייה של ההורים בסופרמרקט (Flurry, L.A., & Burns, 2005), או בעידוד ההורים להשתמש בטכנולוגיה מתקדמת (Baily, 2009), ואף בתחומים מורכבים וטעונים (כמו זהות מינית; LaSala, 2000). השפעת ילדים ובני נוער על הוריהם נמצאה גם בנושאי סביבה, כמו השפעה על התנהגויות הקשורות בניהול פסולת ביתית (Maddox et al., 2011), ידע על שיטפונות (Williams et al., 2017) והתנהגויות לצמצום השימוש באנרגיה (Boudet, 2016). הורים אף מדווחים שקל להם לשוחח על נושאים טעונים עם ילדיהם יותר מאשר עם מבוגרים אחרים בחייהם (Morawska et al., 2018).

בעיות סביבתיות מורכבות כמו החור באוזון נפתרו בעבר לאחר שהציבור לא היה מוכן לקבל עוד את הסיכון הכרוך בהן ודרש שינוי. תופעה זאת מכונה **מודרניזציה רפלקסיבית** (Beck, 1992). גם בעניין שינויי האקלים אפשר היה לצפות ללחץ ציבורי להפעלת פתרונות התנהגותיים וטכנולוגיים שיכולים לצמצם את שיעור פליטת גזי החממה: ברמת הפרט החלטות בנוגע להפחתת צריכת הבשר (Hedenus et al., 2014), לרכיבה על אופניים במקום נסיעה ברכב ממונע ולחיסכון באנרגיה בבית (Peterson et al., 2013); וברמת הממשל וקובעי המדיניות החלטות בנוגע להפעלת טכנולוגיות לספיחת גזי חממה, טיפוח תחבורה ציבורית ועידוד השימוש בה וכן הטלת מיסים על פליטות יתר של פחמן דו-חמצני.

אולם במקרה של משבר האקלים חלה תופעה הפוכה, המכונה אנטי-רפלקסיביות, שבה אנשים רבים מתעלמים מהסיכונים שבשינויי האקלים ומשלימים עם המצב כפי שהוא. בארצות הברית הסיבה העיקרית לכך היא פוליטיזציה של הנושא (McCright & Dunlap, 2010), כך שדעות המכירות בתרומת האדם לשינויי האקלים משויכות לעמדה פוליטית מסוימת, ואילו דעות המכחישות את תרומת האנושות לשינויים משויכות לעמדה הפוליטית המנוגדת לה. שיוך זה יוצר חסמים בפני נקיטת פעולות לצמצום פליטת גזי חממה (ראו מסגרת עליונה בעמוד הבא). ללא ספק, ניסיונות לגייס את הציבור לצמצום שינויי האקלים צריכים להתייחס למגוון אידיאולוגיות פוליטיות והשקפות עולם, יחד עם הידע המדעי (Kahan et al., 2012).

למטרה זאת פותחו כלים המנסים ליצור תקשורת טובה יותר עם מגוון של אוכלוסיות והפונים לאידיאולוגיות שונות. אחד הכלים הוא באמצעות מסגור אסטרטגי² כלומר, שימוש בערכים ובתהיות המאפיינים את דרך החשיבה של הקוראים או הצופים כדי להציג להם את התכנים ולעורר כיוון מחשבה מסוים. כלי כזה שימש בעבר בהצלחה בתיווך מידע לגבי חיסונים (Gerend & Shepherd, 2007), באמצעות מסגור אסטרטגי של רווח והפסד. בנושא שינויי אקלים, מסגור אסטרטגי המדגיש ערכים נוצריים המתיישבים עם קיימות, תיווך ידע מדעי והתנהגויות לצמצום

¹ הגרסה המובאת כאן היא סקירה של תוכני המאמר המקורי, 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 המאמר המקורי מוזמנים לפנות למקור המובא בתחילת הגרסה המעובדת.

² Strategic framing

ילדים ובני נוער משפיעים על הוריהם במגוון תחומים ואף בתחומים מורכבים וטעונים

(al., 2015). כל אלה מעידים על כך שלמידה בין-דורית של הורים מילדיהם היא אפשרית, ויכולה לסייע למעורבות של שני הדורות ביצירת שינוי סביבתי. ייתכן שהיחסים המיוחדים והמורכבים בין בני נוער להוריהם יכולים להסיר מחסומים אידיאולוגיים לדאגה לשינויי האקלים ולהתגבר על נטיות אנטי-רפלקסיביות של מבוגרים. נוסף על כך, מכיוון שבני הנוער אמורים לחוות את השפעות שינויי האקלים בחומרה כבר באמצע המאה, יש חובה מוסרית להכין אותם לכך (Lombardi et al., 2016).

קיימים לפחות ארבעה רכיבים שיכולים לעודד למידה בין-דורית: עיסוק בנושאים מקומיים (Ballantyne et al., 2001); למידה ממושכת (לפחות כמה שבועות); פרויקטים שבהם התלמידים מתנסים בעצמם (לדוגמה, מעבדות רטובות, או איסוף נתונים מהשטח וניתוחם); ועידוד השתתפות הורית, כמו במשימות לביצוע בבית (Percy-Smith & Burns, 2013). כדי להראות שרכיבים אלה אכן מעודדים למידה בין-דורית גם בנושא שינויי אקלים יש לבצע מחקרים נוספים. עד כה נמצא מחקרית שילדים להורים המודאגים משינויי האקלים מודאגים גם הם (Stevenson et al., 2016a), נוקטים פעולות המצמצמות פליטת גזי חממה (Valdez, 2017) ואף מחפשים מידע בנושא, בדומה להוריהם (Mead et al., 2012). תוצאות מחקרים אלה מעידות על כך שתפיסות הורים וילדיהם בעניין שינויי אקלים והתנהגויותיהם קשורות אלה לאלה, אך נדרש מחקר הבודק מהו כיוון ההשפעה: האם ההורים משפיעים על ילדיהם או להפך? (ראו מסגרת בעמוד הבא).

מחקר מסוג זה כרוך בקשיים רבים. מעבר לקושי לקבל אישור למחקר של ילדים ובני נוער לעומת מחקר של מבוגרים, פעמים רבות איסוף הנתונים נעשה באמצעות גורם שלישי. כלומר, המורים אוספים נתונים מהתלמידים שאוספים נתונים מהוריהם. כתוצאה מכך כמות הנתונים הנאספים נמוכה, וקשה לנהל תקשורת טובה בין המורים לתלמידים ולהורים (Wellington, 2015). כמו כן, יש צורך בפיתוח שאלונים שהורים ותלמידים כאחד יכולים להבין.



נפלאות דרכי עיבוד המידע

לרוב, נתונים מדעיים נחשבים לניטרליים, ולכאורה אפשר היה לצפות שמספרים והוכחות מדעיות יעודדו חשיבה לוגית ולמידה. אולם קיימים תחומי מחקר מדעי, כמו שינויי האקלים ואבולוציה, שמתקשרים לדעה פוליטית או לקבוצות שיוך חברתיות שונות, וקשה לפתח בהם חשיבה מדעית לוגית או לקדם למידה. הסיבה לכך היא שמניעי הלומד ומטרותיו (להגיע למסקנה נכונה או להגיע למסקנה מסוימת) משפיעים על תהליכים קוגניטיביים ומונעים הפעלת היגיון מדעי או יכולת שיפוט (Druckman & McGrath, 2019). במונחים פסיכולוגיים מכונה התופעה **הסקה מונעת** (motivated reasoning), והיא מתרחשת בכל אחד מאיתנו. הסקה מונעת יכול לגרום לנו לחפש באופן מגמתי ובלתי מודע מידע המאשר את אמונתנו המקורית, ולהיחשף באופן סלקטיבי רק למידע כזה. כמו כן, אנחנו מייחסים למידע חדש בנושא משקל רב יותר כאשר הוא מתיישב עם דעותינו הקודמות, ונוטים בעוצמה רבה יותר לסתור מידע המחזק דעות המנוגדות להן.

היחסים המיוחדים והמורכבים בין בני נוער להוריהם יכולים להסיר מחסומים אידיאולוגיים לדאגה לשינויי האקלים

מחקר על למידה בין-דורית בנושא שינויי אקלים יכול לבדוק אילו גורמים יעילים במיוחד בעידוד למידה מסוג זה. לדוגמה, ילדים יכולים לעודד התנהגויות מסוימות של הוריהם אבל להשפיע פחות על התנהגויות אחרות (Boudet et al., 2016). חשוב לבדוק באילו משפחות יש ללמידה בין-דורית השפעה רבה יותר על התנהגויות מצמצמות פליטת גזי חממה. לדוגמה, אפשר לבדוק אם יש ללמידה כזאת השפעה רבה יותר במשפחות שחיים בהן יחד כמה דורות במשפחה, כולל סבים וסבתות; או במשפחות של מהגרים שבהן הילדים הם המתרגמים העיקריים של השפה (Knafo & Galansky, 2008); או במשפחות מחוץ לארצות הברית, במדינות שבהן אין קיטוב פוליטי סביב הנושא.

הבנה טובה יותר של תהליכי למידה בין-דורית עשויה להוביל לפיתוח תוכניות לימודים המעודדות למידה מסוג זה, ואולי כך לתרום באופן משמעותי לשינוי בהתנהגות הציבור שיובייל לצמצום פליטת גזי החממה שכולנו מייחלים לו.

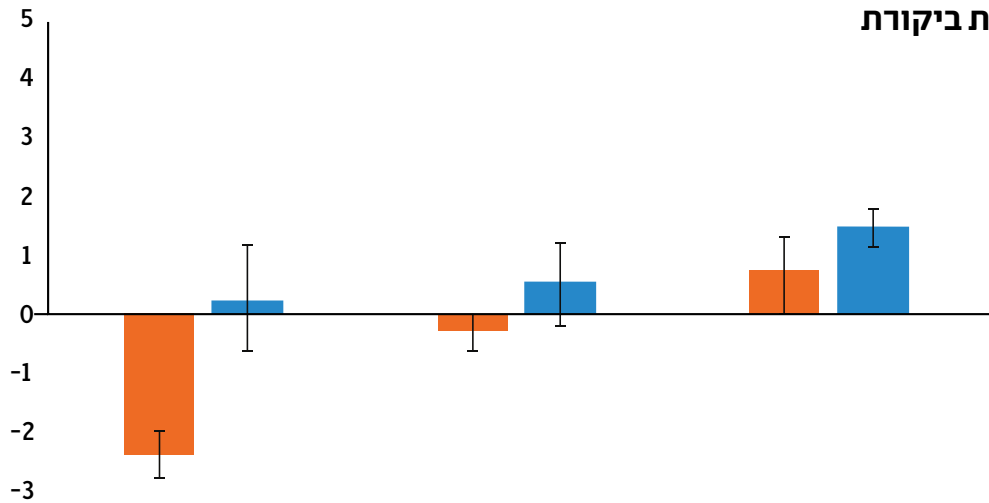
הגנה על פרחי הבר בישראל - סיפור הצלחה של למידה בין-דורית

בשנות השישים של המאה הקודמת יצאה החברה להגנת הטבע במבצע הסברה שנועד למנוע קטיפת פרחי בר. נוסף על הכרזת פרחים מסוימים כפרחים מוגנים ואיסור על קטיפתם, ביצעה החברה להגנת הטבע פעולות חינוך בגנים ובבתי הספר. הילדים חזרו ממסגרות החינוך לבתיהם עם ערכי ההגנה על פרחי הבר, ולימדו גם את הוריהם להימנע מלקטוף. מבצע הסברה שינה התנהגות שנחשבה מקובלת ואהובה - לקטוף פרחי בר - לנורמה פסולה, ועד היום נחשב להצלחה הסברתית יוצאת דופן.

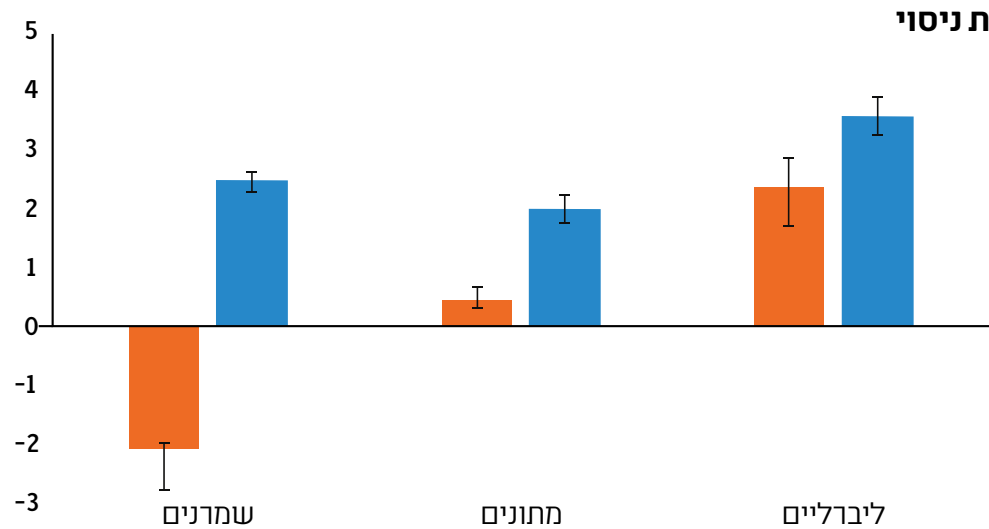
האם ילדים יכולים לעודד הורים לדאגה משינויי האקלים?

קבוצת המחקר שכתבה מאמר דעה זה ביצעה בינתיים מחקר על למידה בין-דורית בנושא שינויי אקלים. המחקר, שפורסם בכתב העת היוקרתי Nature climate change (Lawson et al., 2019), בדק את ההשפעה של תוכנית לימודים בחשיבת הביניים על דאגתם של הורי התלמידים משינויי האקלים. התוכנית כללה ארבע פעילויות בכיתה ופעילות חוץ-כיתתית אחת, ותוכננה במיוחד לעודד למידה בין-דורית בנושא שינויי אקלים. המחקר נערך במשך שנתיים וכלל שאלונים לתלמידים ולהורים שבדקו את רמת הדאגה שלהם משינויי האקלים, וכן ראיונות עם הורי התלמידים שהשתתפו במחקר. ארבע תוצאות עיקריות התקבלו: (א) בהשוואה לקבוצת הביקורת, התלמידים שלמדו בתוכנית הלימודים המעודדת למידה בין-דורית הראו דאגה מוגברת יותר משינויי אקלים; (ב) תלמידים בקבוצת הניסוי גרמו לעלייה רבה יותר בדאגת הוריהם משינויי האקלים לעומת קבוצת הביקורת (איור 1); (ג) השינויים המשמעותיים יותר ברמת הדאגה משינויי אקלים חלו בקרב הורים שהיו הרבה פחות מודאגים בתחילת המחקר, לפני השמעת התוכנית (איור 1); (ד) בנות גרמו לעלייה רבה יותר ברמת הדאגה של הוריהן משינויי האקלים לעומת בנים.

דירוג ממוצע של רמת הדאגה משינויי האקלים



דירוג ממוצע של רמת הדאגה משינויי האקלים



קבוצת שיוך פוליטית של ההורים

■ לפני ההטמעה
■ אחרי ההטמעה

איור 1: שינויים ברמת הדאגה משינויי האקלים בקרב הורי התלמידים

- Baily, C. (2009): Reverse intergenerational learning: a missed opportunity? *AI & Society* 23(1): 111–115.
- Ballantyne, R., Fien, J. & Packer, J. (2001): Program effectiveness in facilitating intergenerational influence in environmental education: lessons from the field. *Journal of Environmental Education* 32: 8–15. <https://doi.org/10.1080/00958960109598657>.
- Beck, U. (1992): *Risk Society: Towards a New Modernity*. Sage Publications, Inc., New York, NY.
- Boudet, H., Ardoin, N., Flora, J., Armel, K.C., Desai, M. & Robinson, T.N. (2016): Effects of a behaviour change intervention for girl scouts on child and parent energy-saving behaviours. *Nature Energy* 1 (8).
- Druckman, J.N. & McGrath, M.C. (2019): The evidence for motivated reasoning in climate change preference formation. *Nature Climate Change* 9: 111–119. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0360-1>.
- Flora, J., Saphir, M., Lappe, M., Roser-Renouf, C., Maibach, E. & Leiserowitz, A. (2014): Evaluation of a National High School Entertainment Education Program: The Alliance for Climate Education. *Climatic Change* 127(3–4): 419–434. doi:10.1007/s10584-014-1274-1.
- Flurry, L.A. & Burns, A.C. (2005): Children's influence in purchase decisions: a social power theory approach. *Journal of business research* 58: 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2003.08.007>.
- Gerend, M.A. & Shepherd, J.E. (2007): Using message framing to promote acceptance of the human papillomavirus vaccine. *Health Psychology* 26(6): 745–752.
- Hedenus, F., Wirsenius, S. & Johansson, D.J.A. (2014): The importance of reduced meat and dairy consumption for meeting stringent climate change targets. *Climate Change* 124(2): 79–91.
- Kahan, D.M., Peters, E., Wittlin, M., Slovic, P., Ouellette, L.L., Braman, D. & Mandel, G., (2012): The polarizing impact of science literacy and numeracy on perceived climate change risks. *Nature Climate Change* 2: 1–19. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1547>.
- Knafo, A. & Galansky, N. (2008): The influence of children on their parents' values. *Social & Personality Psychology Compass* 2(3): 1143–1161.
- LaSala, M.C. (2000): Lesbians, gay men, and their parents: family therapy for the coming-out crisis. *Family Process* 39: 67–81.
- Lawson, D.F., Stevenson, K.T., Peterson, M.N., Carrier, S.J., Strnad, R.L. & Seekamp, E. (2019): Children can foster climate change concern among their parents. *Nature Climate Change* 458(9): 458–462.
- Lombardi, D., Danielson, R.W. & Young, N. (2016): A plausible connection: models examining the relations between evaluation, plausibility, and the refutation text effect. *Learning & Instruction* 44: 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.03.003>.
- Maddox, P., Doran, C., Williams, I.D. & Kus, M. (2011): The role of intergenerational influence in waste education programmes: the THAW project. *Waste Management (Oxford)* 31 (12): 590–2600.
- McCright, A.M. & Dunlap, R.E. (2010): Anti-reflexivity: The American conservative movement's success in undermining climate science and policy. *Theory Culture & Society* 27: 100–133. <https://doi.org/10.1177/0263276409356001>.
- Mead, E., Roser-Renouf, C., Flora, J.A., Maibach, E.W., Leiserowitz, A., Rimal, R.N. & Leiserowitz, A. (2012): Information seeking about global climate change among adolescents: the role of risk perceptions, efficacy beliefs and parental influences. *Atlantic Journal of Communication* 20: 31–52. <https://doi.org/10.1080/15456870.2012.637027>.
- Morawska, A., Walsh, A., Grabski, M. & Fletcher, R. (2015): Parental confidence and preferences for communicating with their child about sexuality. *Sex Education* 15: 235–248. <https://doi.org/10.1080/14681811.2014.996213>.
- Moser, S.C. & Dilling, L. (2007): *Creating a Climate for Change: Communicating Climate Change and Facilitating Social Change*. (Cambridge Univ.Press, 2007).
- Moser, S.C. (2009): Communicating climate change: history, challenges, process and future directions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 1:31–53. <https://doi.org/10.1002/wcc.11>.
- Percy-Smith, B. & Burns, D. (2013): Exploring the role of children and young people as agents of change in sustainable community development. *Local Environ.: International Journal of Justice & Sustainability* 18(3): 3323–3399.
- Peterson, M.N., Peterson, T. & Liu, J. (2013): *The Housing Bomb: Why Our Addiction to Houses Is Destroying the Environment and Threatening Our Society*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD.
- Stevenson, K.T., Peterson, M.N. & Bondell, H.D. (2016)a: The influence of personal beliefs, friends, and family in building climate change concern among adolescents. *Environmental Education Research* 4622: 1–14. <https://doi.org/10.1080/13504622.2016.1177712>.
- Stevenson, K.T., Peterson, M.N. & Bondell, H.D. (2018): Development of a causal model for adolescent climate change behavior. *Climatic Change* 151: 589–603.
- Valdez, R.X., Peterson, M.N. & Stevenson, K.T. (2017): How communication with teachers, family and friends contributes to predicting climate change behavior among adolescents. *Environmental Conservation* 45(2): 183–191. <https://doi.org/10.1017/S0376892917000443>.
- Wardekker, J.A., Petersen, A.C. & van der Sluijs, J.P. (2009): Ethics and public perception of climate change: exploring the Christian voices in the US public debate. *Global Environment Change* 19: 512–521.
- Wellington, J. (2015): *Educational Research: Contemporary Issues and Practical Approaches*, 2nd ed.). Bloomsbury Publishing, Plc., London, UK.
- Williams, S., McLean, L. & Quinn, N. (2017): As the climate changes: intergenerational action-based learning in relation to flood education. *Journal of Environmental Education* 48(3): 154–171. <https://doi.org/10.1080/00958964.2016.1256261>.

