



חקר השינויים במארגי המזון וחשיבותו לניהול שטחים פתוחים בעידן של שינוי האקלים

יגאל גרנות^{1*} | סול ברנד² | משה שחק²

- 1 המרכז הבינתחומי, מדרשת שדה בוקר
 - 2 המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
- * yigalg.boker@gmail.com

תקציר

אופנים מרכזיים: הכחדת מינים ישירה; היכחדות משנית של אוכלוסיות התלויות במינים שנכחדו מהאזור; חיווט מחדש של מארג המזון בעקבות התבססות מינים חדשים.

השלכות המחקרים על ניהול שטחים פתוחים מצביעות על הצורך בזיהוי מוקדם של נקודות חולשה אקולוגיות, ניטור רמות טרופיות שונות ושימוש בגישות מבוססות מארג מזון לניהול אקולוגי של שטחים פתוחים. הבנת הדינמיקה של מארגי המזון בשטחים פתוחים מדבריים, המהווים מערכת פשוטה יותר מזו של היערות, תאפשר פיתוח אסטרטגיות ניהול שיתמודדו עם שינוי האקלים וימנעו קריסה תפקודית של השטחים הפתוחים והיערות.

שינוי האקלים משפיע על יציבותן ותפקודן של מערכות אקולוגיות ברחבי העולם, תוך יצירת שינויים משמעותיים בהרכב ובדינמיקה של מארגי המזון. אירועי קיצון, כגון בצורות וגלי חום, עשויים להוביל להכחדת מיני מפתח, לשינויים באינטראקציות ביוטיות ולהתבססות של מינים פולשים, תהליכים המשפיעים ישירות על תפקודה של המערכת האקולוגית.

מאמר זה משלב מחקר אמפירי עם שיקולים עיוניים, והשלכותיו מעשיות. המחקר האמפירי מתמקד בהשפעת שינוי האקלים על מארג המזון בשטחים פתוחים מדבריים, תוך שימת דגש על השפעות אקולוגיות ארוכות טווח בנגב וזאת באמצעות ניטור ממושך של אוכלוסיות של מיני מפתח, ניתוח מגמות אקלימיות ובחינת שינויים במארג המזון. המחקרים שנערכו בין השנים 1973–2020 מדגימים כיצד היכחדות אוכלוסיית טחבן המדבר הובילה להפחתה משמעותית בצפיפות האוכלוסייה של הטורף העיקרי שלו, העקרב עבֵד צהוב, ולפלישה של העקרב צרבן ישראלי. הממצאים האלה תומכים במודלים תאורטיים המצביעים על כך ששינוי האקלים משפיע על מארגי המזון בשלושה

מילות מפתח

הכחדת מינים, חיווט מחדש, טחבן המדבר, עבֵד צהוב, צרבן ישראלי

מבוא

בעוד שניטור ומניעת חדירת מינים פולשים עשויים לסייע במניעת שיבוש מארג המזון ובישימור השירותים האקולוגיים שהמערכת מספקת (Carnicer et al., 2011).

מאמר זה מציג את החשיבות של חקר השפעות שינוי האקלים על מארג המזון באמצעות מחקר אמפירי שנערך בשטחים פתוחים בנגב. השטחים המדבריים האלה מהווים מערכות אקולוגיות פשוטות יחסית, כיוון שמספר המרכיבים הביולוגיים בהן נמוך והאינטראקציות ביניהם מוגבלות. היות שכך, הן יכולות לשמש מודל טוב ונוח למחקר של מערכות אקולוגיות בכלל. המחקר, שנמשך כמעט 50 שנה, מבוסס על ניטור ארוך טווח של טמפרטורה, דפוסי משקעים ודינמיקה של אוכלוסיות מפתח, ומטרתו לנתח את הקשרים בין שינוי האקלים, מארג המזון והתפקוד האקולוגי של המערכת. על בסיס הממצאים האלה מוצעת מסגרת להבנת הקשרים בין שינוי האקלים למארגי המזון והשלכות שינוי האקלים על חקר מארגי המזון בניהול שטחים פתוחים.

המחקר האמפירי נערך בהר הנגב המאפיין אזור מדברי צחיח. הוא התבסס על מארג המזון המרכזי באזור, ונבחן בו התנדודות בגודל האוכלוסייה של מינים מרכזיים במארג המזון במישור הלס ליד שדה בוקר. לפני כן, ערכנו מחקר מקדים בנחל הרועה (מיובלי נחל הבשור, בהר הנגב הצפוני) כדי להבהיר היבטים מסוימים במארג המזון במישורי הלס. חקרנו סרטן יבשה בשם טחבן המדבר (*Hemilepustus reaumuri*) כצרכן ראשוני, ועקרב בשם עבִיד צהוב (*Scorpio maurus palmatus*) כצרכן שניוני, לפני תקופה של בצורת מתמשכת ואחריה. טחבן המדבר הוא מין מפתח (Yair and Shachak, 1982) בעל ביומסה גבוהה ליחידת שטח (Shachak, 1980; Citron-Pousty and Shachak, 1998) הניזון משני מקורות הזמינים כל השנה – צמחים יבשים וקרומי קרקע ביולוגיים (Shachak et al., 1976). העבִיד הצהוב גם הוא מין מפתח. הוא הטורף הראשוני היחיד שמקשר בין צרכנים ראשוניים (חסרי חוליות) לטורפים (בעלי חוליות). העבִיד נוקט אסטרטגיה של "שב וחכה" (Shachak and Brand, 1983) וניזון בעיקר מטחבן המדבר, מחיפושיות, מנמלת הקציר (*Messor* sp.) ומחרקים נוספים, וכן מעכבישים ומעקרבים אחרים. טורפיו הם עופות שונים ובהם דורסים, וכן קיפודים, שועלים, מכרסמים ויונקים אחרים, נחשים, לטאות וזוחלים אחרים, עכבישים ועקרבים. כמו כן גם נחקר העקרב צרבן ישראלי (*Buthus occitanus israelis*) הואיל והוא מין סימפטר (חי בתפוצה גאוגרפית חופפת) לעבִיד הצהוב, שחי בדרך כלל בגבעות סלעיות תחת אבנים. הוא ניזון מטרמיט הקציר (*Anacanthotermes ubachi*) שלמעשה מהווה את מזונו העיקרי, וכן מהמינים שהעבִיד ניזון מהם. טורפיו הם אותם טורפים כמו טורפי העבִיד (סקוטלסקי, 1994; Levy and

שינוי האקלים מעצב מחדש מערכות אקולוגיות ברחבי העולם, תוך השפעה עמוקה על המבנה, התפקוד והיציבות שלהן (Malhi et al., 2020). עלייה בתדירות אירועי קיצון, שינויים בדפוסי משקעים וגלי חום ממושכים יוצרים לחצים סביבתיים שמובילים לארגון מחדש של מערכות אקולוגיות. שטחים פתוחים רגישים במיוחד לשינויים האלה, שכן הקשרים בין תנאי הסביבה לבין יחסי הגומלין בין אורגניזמים קובעים את יציבותה של המערכת האקולוגית לאורך זמן.

אחד הגורמים המרכזיים המכתיבים את תפקוד המערכת האקולוגית הוא מארג המזון, המתווך את זרימת האנרגיה ומחזור היסודות בין רמות טרופיות שונות. שינוי האקלים עשוי לערער את יציבות מארג המזון בדרכים מגוונות, כולל יצירת שינויים בנישיות אקלימיות והידרולוגיות, שיבוש יחסי טורף-נטרף והכחדת מיני מפתח. השינויים האלה יכולים להשפיע על כלל התהליכים האקולוגיים במערכת, מדינמיקה של אוכלוסיות ועד למחזור חומרי הזנה (O'Connor et al., 2011; Ockendon et al., 2014; Marasekare, 2015). כמו כן, עלולה להתרחש היכחדות משנית, כלומר עלול להתרחש אובדן של מינים המשמשים מקור מזון מרכזי, שיוביל לקריסת אוכלוסיות שתלויות בהם, ויפגע ביציבות האקולוגית. נוסף על כך, שינוי האקלים עלול לגרום לחיווט מחדש של מארג המזון, כלומר חיבור מחדש בין רכיבי המערכת בהתאם לשינוי שחל בהם, שבמהלכו חדירה של מינים פולשים מובילה לשינויים במבנה ובתפקוד האקולוגי של זרימת אנרגיה ומחזור יסודות (Portner and Farrell, 2014; Binzeret et al., 2012; Dell et al., 2008). לכן, חקר ההשפעה של שינוי האקלים על מארג המזון חיוני להבנת האופן שמערכות אקולוגיות מגיבות לשינויים סביבתיים, ולפיתוח אסטרטגיות ניהול מושכלות שיבטיחו את שימורן ותפקודן העתידי.

שטחים פתוחים הם מערכות אקולוגיות דינמיות הנשענות על מארגי מזון מורכבים. יחסי טורף-נטרף, תחרות, האבקה ופירוק חומר אורגני במארגי המזון הללו מווסתים את תפקודן של המערכות האקולוגיות. שינויים במארג המזון עשויים להשפיע על יציבות המערכת האקולוגית בדרכים שונות, כולל בקרת אוכלוסיות מזיקים, מחזור חומרי הזנה ושימור המגוון הביולוגי. הבנת השינויים במארגי המזון עשויה לסייע בפיתוח אסטרטגיות ניהול יעילות לשטחים פתוחים. למשל, ניהול של אוכלי עשב במארג המזון יכול למנוע התפשטות שרפות, ובכך להגן על הצמחייה. תמיכה במגוון הביולוגי של מפרקים או בניהול מושכל של נשר צמחי וחומר אורגני עשויה לתרום למחזור חומרי הזנה ולבריאות הקרקע,

הטחבן בשטח) במישור הלס בשטח של ארבעה דונם. בשטח נספרו כל מחילות טחבן המדבר פעמיים בשנה: בשלב יצירת הזוגות בפברואר ובסיום עונת הפעילות באוקטובר. מספר הפרטים למחילה נאמד באמצעות מדד לינקולן (Adams, 1951). הניתוח כלל שינויים בגודל האוכלוסייה לאורך זמן, ובדיקה אם יש להם קשר למשטר הגשמים. גודל האוכלוסייה של העבִיד הצהוב כומת באותו שטח. מכיוון שבמחילת עקרב יש פרט אחד בלבד, גודל האוכלוסייה שווה למספר המחילות הפעילות בשטח (לפירוט השיטות ראו גרנות ואח', 2012). הצרבן הישראלי הוא מין עקרב שנחקר במקביל בנחל הרועה. במחקר הנוכחי התגלה שהצרבן פלש למישור הלס משטחים סמוכים בנחל הרועה. הפלישה אירעה לאחר בצורת שגרמה להכחדת האוכלוסייה של טחבן המדבר במישור הלס. בעקבות השינוי הצרבן נעשה חלק ממארג המזון במישור הלס. אומדן האוכלוסייה שלו בשנים 2008–2020 נעשה באמצעות תצפיות ישירות על פעילות בלילות ללא ירח ובעזרת פנסי אור אולטרה-סגול (סקוטלסקי, 1994).

עומס טריפה ופעילות העבִיד – עומס הטריפה של העבִיד, כלומר מספר הנטרפים למחילת עקרב, הוערך על ידי איסוף ומיון של שרידי טרף שנאספו בכניסה למחילות העקרבים. כל פריטי המזון שנמצאו נספרו, ולאחר מכן נבדק חלקו היחסי – באחוזים – של כל פריט מזון. איסוף פריטי המזון מפתח המחילות התבצע בשנים 1982/3, 1985/6, 2005/6, 2019/20, ולא בוצעו ניסויי מעבדה. גודל טריטוריות העקרב הוערך בעזרת המרחק בין המחילות בעונות שונות במהלך השנים 2010 ו-2011.

תוצאות

שינוי האקלים: איור 1 מתאר את השונות בטמפרטורות המרביות השנתיות, שמייצגת גלי חום, בשנים 1977–2017.

(Amitai, 1980).

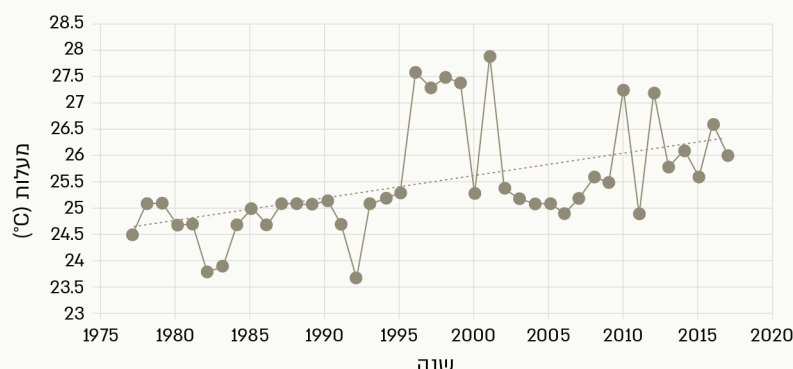
המאמר מדגיש שמעבר להיבט התאורטי, חקר השינויים במארג המזון עשוי להוות כלי ניהול חשוב בעידן של שינוי אקלים. הבנה מעמיקה של המנגנונים המעצבים מחדש את מארג המזון עשויה לסייע בפיתוח אסטרטגיות שימור והתמודדות עם התמוטטות תפקודית של מערכות אקולוגיות (Thakur, 2020; Manlick et al., 2024).

שיטות

אזור המחקר – המחקר נערך בנגב המרכזי בישראל בשנים 1973–2020. טחבן המדבר נחקר ברציפות, ואילו העקרבים נחקרו בהפסקות בשני שטחים: מדרון טרשי וערוץ בנחל הרועה הנמצא ברכס חלוקים (נ"צ E5315 N1779) ומישור לס בשדה צין שליד מדרשת בן-גוריון (נ"צ E5305 N1797). בכל בית גידול היו שטחי מחקר קבועים בחלקות של ארבעה דונם.

אקלים – לחקר שינוי האקלים בעשורים האחרונים הסתייענו בנתוני אקלים שנאספו בתחנה המטאורולוגית של המכונים לחקר המדבר, הסמוכה לאזור המחקר. ניתחנו נתוני גשמים רב שנתיים בשנים 1974–2022, כלומר שנתיים מעבר לתקופת המחקר, כדי לבחון אם היו שינויים הפיכים מבחינת האורגניזמים שנבחנו. בדקנו את השינוי בממוצע המשקעים הרב שנתי ואת תדירות הבצורות כדי להסיק לגבי תנודות ומגמות בגשם. בדקנו את מהלך הטמפרטורות המרביות השנתיות בין השנים 1977–2017, וניתחנו את מגמת השינוי הכללי תוך מתן דגש לשנים עם טמפרטורות מרביות גבוהות, שמצביעות כנראה על גלי חום.

אומדן גודל אוכלוסיות – כימתנו את גודל אוכלוסיות טחבן המדבר במשך 37 שנים (משנת 1973 עד שנת 2009 – השנה שעדיין הייתה בה אוכלוסייה קטנה של



איור 1

טמפרטורות מרביות שנתיות שנרשמו במישור הלס
מקור הנתונים: התחנה המטאורולוגית של המכונים לחקר המדבר במדרשת שדה בוקר.

צנח מממוצע של 50 משפחות ל-100 מ"ר לפחות משלוש משפחות ל-100 מ"ר, ולאחר מכן האוכלוסייה נכחדה (איור 3). כדי לוודא שזה אכן המצב נערך ניטור קבוע במהלך עשר השנים שלאחר מכן.

תגובות העבֵיץ הצהוב להיכחדות טחבן המדבר: איור 4 מתאר את התגובה הראשונית של העבֵיץ הצהוב להיכחדות המקומית של טחבן המדבר – שינוי בהרכב המזון. האזור ממחיש את הרכב המזון של העבֵיץ הצהוב בהתבסס על שאריות מזון שנצפו בפתחי המחילות לפני היכחדות טחבן המדבר ואחריה.

נראה שיש מתאם בין אחוז הטחבנים בדיאטה של העבֵיץ לבין גודל האוכלוסייה של העבֵיץ. לפני ההיכחדות המקומית העבֵיץ ניזון בעיקר מטחבנים, מחיפושיות ומנמלים. לאחר היכחדות טחבן המדבר הוא הוחלף לראשונה בחרקים אחרים, ואוכלוסיית העבֵיץ הצטמצמה (איור 5).

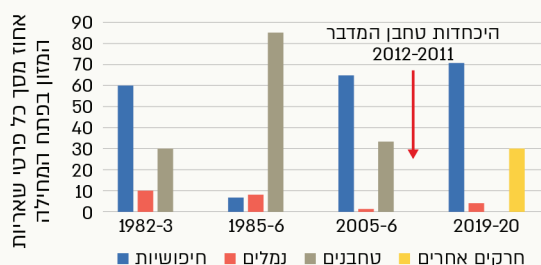
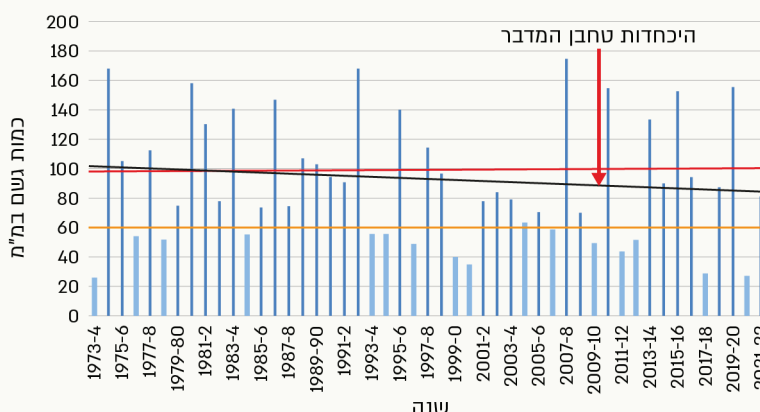
הטמפרטורה הקרבית הממוצעת הציגה עלייה משמעותית של 2 מעלות צלזיוס, מ-24.5 ל-26.5 מעלות צלזיוס, וכן נרשמה עלייה בתדירות גלי החום. התבנית של כמות המשקעים השנתית במהלך 40 שנות הניטור מתוארת באיור 2. נצפתה ירידה הדרגתית בכמות המשקעים השנתית הממוצעת, ירידה מממוצע רב שנתי של 100 מ"מ בתחילת התקופה, לממוצע רב שנתי של 80 מ"מ בסיומה. במקביל עלתה התדירות של אירועי בצורות במהלך 20 השנים שבין 1994 ל-2014. בתקופה זו התרחשו מקרים חוזרים ונשנים של שנתיים רצופות של בצורות, שהיו בלעדיות ל-20 השנים הללו.

שינוי האקלים והיכחדות מקומית של אוכלוסיית טחבן המדבר: אוכלוסיית טחבן המדבר במישור הלס נכחדה מקומית בשנה ההידרולוגית 2011/12, לאחר שני עשורים של עלייה בתדירות הבצורות בין השנים 1993–2012 (איור 2). חלה ירידה משמעותית בגודל האוכלוסייה, והוא

איור 2

משטר הגשמים, שנות בצורת מתונות וקיצוניות ושנת היכחדות אוכלוסיית טחבן המדבר במישור הלס

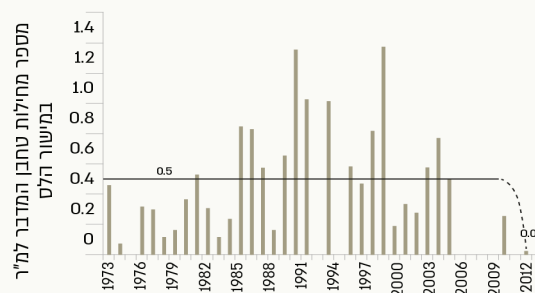
קו ממוצע הגשמים, 100 מ"מ, מסומן באדום, מגמת השינוי בממוצע הרב שנתי של הגשמים מסומנת בקו שחור, בצורות קיצוניות מסומנות בעמודה רחבה בתכלת, וקו 60 מ"מ המציין בצורת, מסומן בכתום. הנתונים מוצגים לפי שנים הידרולוגיות, מאוקטובר בשנה אחת לאוקטובר בשנה העוקבת. מקור הנתונים: התחנה המטאורולוגית של המכונים לחקר המדבר במדרשת שדה בוקר.



איור 4

שאריות המזון בפתח המחילות של מיני טרף העבֵיץ לפני היכחדות הטחבנים ואחריה

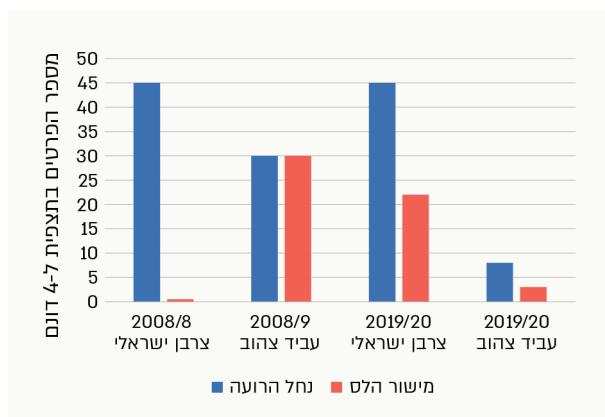
הנתונים מוצגים לפי שנים הידרולוגיות, מאוקטובר בשנה אחת לאוקטובר בשנה העוקבת.



איור 3

צפיפות מחילות של טחבן המדבר במישור הלס

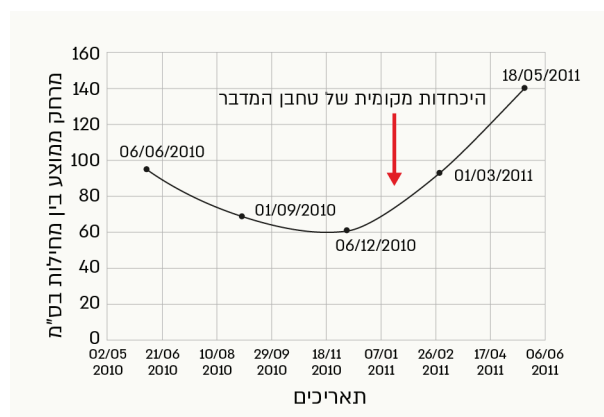
הקו השחור הרציף מציין את מספר המחילות הממוצע הרב שנתי. החל מ-2012 האוכלוסייה נכחדה.



איור 6

מספר הצרענים והעבדים שנצפו בשני בתי הגידול בנחל הרועה ובמישור הלס לפני היכחדות הטחבנים (שנת 2008/9) ואחריה (שנת 2019/20)

הנתונים מוצגים לפי שנים הידרולוגיות, מאוקטובר בשנה אחת לאוקטובר בשנה העוקבת.



איור 5

מרחקים ממוצעים בין מחילות העבדים במישור הלס לפני היכחדות הטחבנים ואחריה

הנתונים מוצגים לפי שנים הידרולוגיות, מאוקטובר בשנה אחת לאוקטובר בשנה העוקבת.

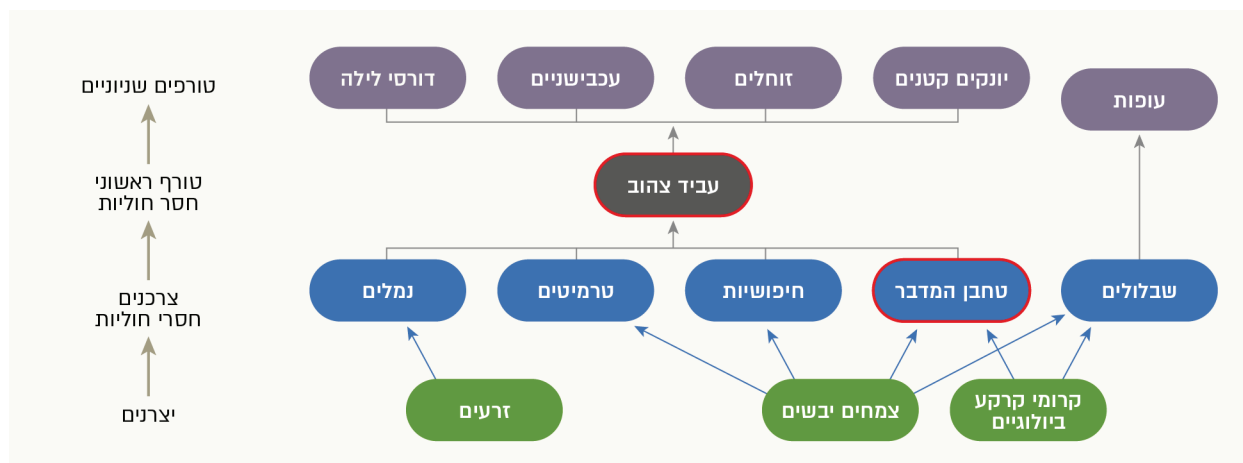
דיון

המחקר האמפירי בנגב ממחיש כיצד שינוי האקלים, ובעיקר בצורות וגלי חום, עשוי לשנות באופן עמוק את המבנה והתפקוד של מארג המזון (איור 7, איור 8). מחקרים קודמים קבעו כי לחות הקרקע בקיץ במחילות טחבן המדבר ממלאת תפקיד מרכזי בהישרדות הטחבנים (Shachak, 1980). את היכחדות אוכלוסיית טחבן המדבר ניתן לייחס לירידה בלחות הקרקע בעקבות ירידה בכמות הגשמים ואידי מוגבר במהלך גלי החום (גרנות ואח', 2012). הממצאים מראים כי הכחדת טחבן המדבר, מין מפתח במערכת האקולוגית המדברית, הובילה לשינוי משמעותי באינטראקציות הטרופיות, כולל ירידה באוכלוסיית הטורף עבד הצהוב ופלישה של הצרען הישראלי. במארג המזון החדש השתנה תפקוד המערכת, כי נותק הקשר בין קרומי הקרקע הביולוגיים כמקור מזון לצרכן הראשוני (הטחבן), ובהמשך נותק מסלול זה גם לטורפים במערכת. התהליכים האלה ממחישים כי השפעות שינוי האקלים על שטחים פתוחים אינן מוגבלות לשינוי הצומח בלבד, אלא כוללות שינויים משמעותיים במארג המזון בשלמותם, שעלולים להוביל לשינויים ואף לקריסת מערכות אקולוגיות קיימות ולהופעת מערכות חדשות עם תפקוד שונה (Zhang et al., 2007).

שינוי האקלים יכול להשפיע על מארג המזון דרך מספר מנגנונים מרכזיים. הכחדת מינים ישירה מתרחשת כאשר מינים רגישים לאקלים אינם מסוגלים לשרוד בסביבה המשתנה (Cahill et al., 2013), מה שמוביל לשיבוש

התבנית המרחבית של מחילות העקרבנים משמעות אינדיקטור נוסף לתגובתם לזמינות המזון. פיזור המחילות משקף את אזור השיחור הנגיש לעקרבנים. צפיפות מחילות גבוהה מתאימה לזמינות טרף בשפע, בעוד שצפיפות דלילה מסמלת זמינות מזון נמוכה. השונות בצפיפות אוכלוסיית העקרבנים במקביל לשינויים משמעותיים באוכלוסיית טחבן המדבר בין 2008 ל-2011 מצביעה על האפשרות של קשר ישיר בין הטורף לטרף: בדיקת המרחקים בין המחילות מלמדת שמהשנה ההידרולוגית 2011/12 (מועד היעלמות הטחבנים) חלה עלייה במרחקים בין המחילות, כלומר הצפיפות הלכה וירדה (איור 5). גם תשע שנים לאחר היכחדות טחבן המדבר (השנה ההידרולוגית 2019/20) נותרה אוכלוסיית העבדים במישור הלס בצפיפות נמוכה (איור 6).

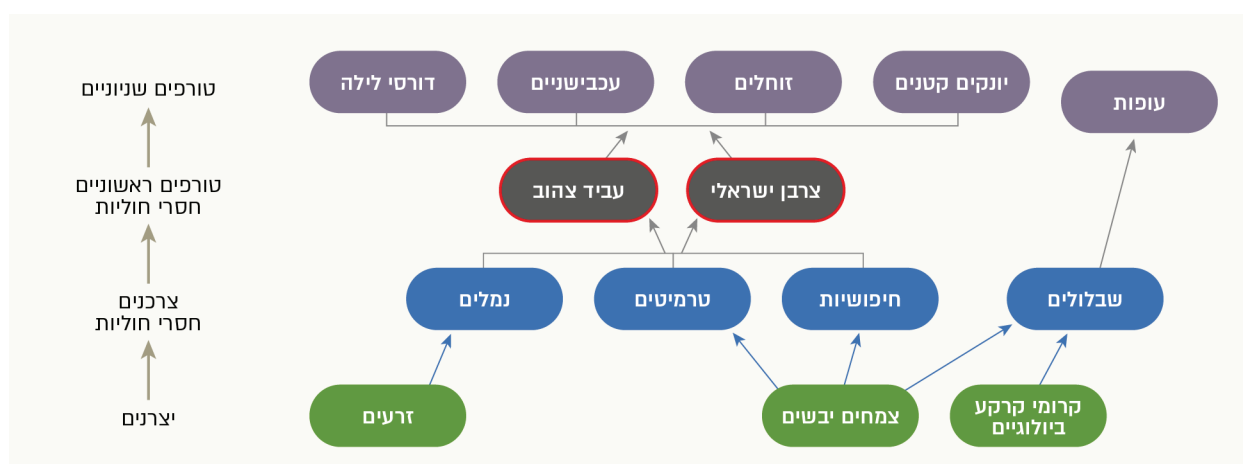
תגובת הצרען הישראלי להיכחדות טחבן המדבר: תצפיות ליליות שנערכו לפני ההיכחדות המקומית של אוכלוסיית הטחבנים ואחריה, מצביעות על פלישה של הצרען הישראלי למישור הלס. ככל הנראה, אוכלוסיית המקור של הצרען נמצאת בגבעות סלעיות שכנות למישור הלס ("נחל הרועה" באיור 6). הפעילות הלילית של שני מיני העקרבנים במישור הלס ובגבעה הסלעית נבדקה בנוכחות הטחבנים בשטח (2008/9) ובלעדיהם (2019/20). נמצא שלפני היכחדות טחבן המדבר, שני מיני העקרבנים חיו יחד בסימפטריה בגבעות הסלעיות השכנות, אך רק העבד הצהוב היה נוכח במישור הלס. בעקבות הירידה באוכלוסיית העבד הצהוב במישור הלס פלש הצרען הישראלי למישור, והפך למין השולט בו.



איור 7

מארג המזון המרכזי במישור הלס לפני העלייה בתדירות הבצורות

מארג המזון המרכזי מתבסס על שלושה מקורות של ייצור ראשוני: צמחים יבשים (נשר צומח), קרום קרקע ביולוגי וזרעים. לשני האורגניזמים המסומנים באדום תפקודים מיוחדים. טבחן המדבר משתף במארג המזון צמחים יבשים וקרומי קרקע ביולוגיים, שהם מקורות מזון שנמצאים בשפע גם בשנות בצורת. העבד הצהוב מתפקד כצומת המקשר בין נטרפים חסרי חוליות ובעלי חוליות טורפים. האיור הוכן על סמך תצפיות הכותבים בשטח.



איור 8

מארג המזון במישור הלס אחרי ההיכחדות המקומית של טבחן המדבר

מגמות שינוי: א. מעבר האנרגיה ממאגר המזון הזמין "קרומי קרקע ביולוגיים" אל מארג המזון התלוי בעבדים אינו קיים; ב. מקורות המזון לעבדים הצטמצמו; ג. הצרבן הישראלי פלש ומשתתף עם העבד הצהוב כחוליה מקשרת בין הנטרפים חסרי החוליות ובעלי החוליות הטורפים. האיור הוכן על סמך תצפיות הכותבים בשטח.

קודם לכן, או כאשר שינוי בהתנהגותם של מינים קיימים בעקבות שינוי האקלים מביא לשינויים בהרכב ובתפקוד של המערכת ובאופן שאנרגיה ומחזור חומרי הזנה מקיימים אותה (Lurgi et al., 2012). במקרה של הר הנגב, היכחדות אוכלוסיית טבחן המדבר (גרנות ואח', 2012) הובילה לשינוי במארג המזון. לא קיימים נתונים ישירים על זרימת האנרגיה בין הרמות הטורפיות השונות, אך להבנתנו עשויות להיות

בזרימת האנרגיה ובמחזור היסודות (Petchey et al., 1999). הכחדות משניות נגרמות עקב אובדן של מינים המהווים מקור מזון מרכזי, מה שעלול לגרום התמוטטות של אוכלוסיות התלויות בהם, בייחוד כאשר מדובר במיני מפתח הקובעים את יציבות המערכת האקולוגית. מנגנון נוסף הוא חיווט מחדש של מארג המזון (Bartley et al., 2019), כלומר חדירת מינים מקומיים לאזורים שלא היו נוכחים בהם

(Bartley et al., 2019). במקרה של הר הנגב, פלישת הצרפן הישראלי עשויה להוות תהליך של התאוששות חלקית, אך אינה משיבה את המערכת למצבה המקורי, והשאלה נותרת פתוחה ודורשת מחקר נוסף.

ממצאי המחקר האמפירי, בשילוב השיקולים התאורטיים, מדגישים את הצורך להעמיק את חקר השפעות שינוי האקלים על מארגי מזון, ולבחון את הקשרים בין שינויים במארג המזון לבין תפקוד השטחים הפתוחים מבחינת שימור תפקודם, אספקת שירותי המערכת האקולוגית והתאמות ניהוליות. מחקרים עתידיים צריכים להתמקד במספר תחומים מרכזיים: הערכת התפקיד של מינים חלופיים ובחינת יכולתם לפצות באופן תפקודי על אובדן מיני מפתח; ניתוח השפעת שינוי האקלים על רמות טרופיות שונות; בחינת מבנה מארג המזון העכשווי לשם זיהוי ההשפעות האפשריות, הישירות והעקיפות, של שינוי האקלים. בו-בזמן יש לפתח כלים למחקר ולניטור ארוכי טווח של מארגי המזון העכשוויים, שיאפשרו זיהוי נקודות קריטיות לפני שינויים מהותיים במארג המזון בעקבות שינוי האקלים (Cameron et al., 2019). יכולתנו להבין כיצד הכחדת מיני מפתח, שינוי אינטראקציות טרופיות ופלישה של מינים חדשים מעצבים מחדש מערכות אקולוגיות, קריטית לשמירה על שירותי המערכת האקולוגית ולניהול בר-קיימא של שטחים פתוחים בעידן של שינוי האקלים. לסיכום, שינוי האקלים אינו משנה רק את הרכב הצומח או את זמינות המשאבים, אלא גם את המבנה והדינמיקה של מארגי המזון, ויש לו השלכות רחבות על תפקוד שטחים פתוחים וניהולם. הבנת הקשרים בין שינוי האקלים, מארג המזון ותפקוד המערכת האקולוגית היא צעד חשוב להבטחת תפקודם של שטחים פתוחים. מאמר זה מדגיש את הצורך לשלב מחקרים אקולוגיים מבוססי מארגי מזון באסטרטגיות ניהול שטחים פתוחים להתמודדות עם שינוי האקלים.

תודות

המחברים מודים למר זיו יופה על עזרתו הטכנית הרבה בכתיבת מאמר זה.

מאמר זה מוקדש לזכרו של סול ברנד שהלך מאיתנו בזמן הכנתו, ובהערכה רבה לתרומתו הגדולה.

לכך השלכות נוספות שלא נבדקו, כמו הפחתת זרימת האנרגיה מהצרכנים הראשוניים לטורפים, דבר שכנראה פגע בזרימת האנרגיה לרמות הטרופיות הגבוהות (איור 8).

השפעות שינוי האקלים על מארג המזון מציבות אתגר משמעותי לניהול שטחים פתוחים (Gauthier et al., 2023). שינוי במאזן האנרגיה של המערכת, כמו זה שנצפה בנגב, עשוי לשנות לחלוטין את יחסי הגומלין האקולוגיים ולהשפיע על שירותי המערכת האקולוגית. אחת המשימות המרכזיות בניהול שטחים פתוחים היא זיהוי נקודות חולשה במערכת האקולוגית לפני שינויים משמעותיים מתרחשים במארג המזון. הכחדת מיני מפתח, שינויים בדינמיקה הטרופית, פגיעה בתהליכים אקולוגיים בסיסיים ואובדן יכולת ההתאוששות של המערכת עשויים להיות אינדיקציות לקריסה אפשרית. שינוי האקלים מחמיר את נקודות החולשה הללו על ידי הגברת עוצמתם ותדירותם של גורמי עקה (stress), כמו בצורות, גלי חום, עליית טמפרטורה ושינויים קיצוניים בדפוסי המשקעים.

ניתן לזהות נקודות חולשה באמצעות ניטור שיטתי של שינויים באינטראקציות טרופיות, היעלמות של צמחים מרכזיים במארג המזון וירידה בחוסן של מיני מפתח, כלומר מינים בצמחים מרכזיים של מארג המזון (איור 7 ואיור 8). במקרה שלנו העבד אכן משמש מזון מרכזי בשדה צין, וכנראה שהצרפן משמש מזון חלופי. לדעתנו השינוי במערכת משמעותי, כי נותק הקשר למקור מזון מרכזי במארג המזון והוא קרומי הקרקע הביולוגיים שעשירים בחומרי הזנה וזמינים בכמות גדולה כל השנה.

מעקב אחר שינויים באוכלוסיות של המינים האלה עשוי להוות אינדיקטור חיוני לזיהוי מוקדם של שינויים אפשריים במארג המזון והשלכותיהם על המערכת האקולוגית. במקרה של הר הנגב, היכחדות אוכלוסיית טחבן המדבר והצמצום החד באוכלוסיית העבד הצהוב שיקפו את הפגיעה בזרימת האנרגיה בין רמות טרופיות שונות, מה שהעיד על שינוי משמעותי במערכת האקולוגית המקומית. באמצעות ניטור מוקדם, חיזוי מגמות עתידיות וניהול מותאם ניתן להפחית את הסיכון לשינוי ואף לקריסת מארג המזון ולהבטיח שמירה על שירותים אקולוגיים חיוניים לאורך זמן. חיווט מחדש של מארגי מזון בעקבות שינוי האקלים מתועד גם באזורים אחרים בעולם, והשאלה המרכזית העולה ממחקרנו היא אם חיווט מחדש של מארג המזון מוביל לשיקום של תפקודי המערכת או להיווצרות מערכת מוחלשת

מקורות

סקוטלסקי א. 1994. השפעת אור הירח על התנהגות חיפוש מזון, תוך שקלול סיכונים טריפה, בעקרב הישראלי *Buthus occitanus israelis* (עבודה לקבלת תואר מוסמך). באר שבע: אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.

גרנות י, ברנד ס ושחק מ. 2012. שינויים בגודל האוכלוסייה של טחבן המדבר כסמן להשפעת שינויים במשטר הגשמים על מערכות אקולוגיות בנגב. *אקולוגיה וסביבה*, 3(2), 186–181.

- Malhi Y, Franklin J, Seddon N, Solan M, Turner MG, Field CB, et al. 2020. Climate change and ecosystems: Threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190104.
- Manlick PJ, Perryman NL, Koltz AM, Cook JA, and Newsome SD. 2024. Climate warming restructures food webs and carbon flow in high-latitude ecosystems. *Nature Climate Change*, 14(2), 184–189.
- Marasekare P. 2015 Effects of temperature on consumer-resource interactions. *Journal of Animal Ecology*, 84, 665–679.
- Ockendon N, Baker DJ, Carr JA, White EC, Almond REA, Amano T, et al. 2014. Mechanisms underpinning climatic impacts on natural populations: Altered species interactions are more important than direct effects. *Global Change Biology*, 20, 2221–2229.
- O'Connor MI, Gilbert B, and Brown CJ. 2011. Theoretical predictions for how temperature affects the dynamics of interacting herbivores and plants. *The American Naturalist*, 178, 626–638.
- Petchey OL, McPhearson PT, Casey TM, and Morin PJ. 1999. Environmental warming alters food-web structure and ecosystem function. *Nature*, 402(6757), 69–72.
- Portner HO and Farrell AP. 2008. Physiology and climate change. *Science*, 322, 690–692.
- Thakur MP. 2020. Climate warming and trophic mismatches in terrestrial ecosystems: The green–brown imbalance hypothesis. *Biology Letters*, 16(2), 20190770.
- Shachak M. 1980. Energy allocation and life history strategy of the desert isopod *H. reaumuri*. *Oecologia*, 45, 404–413.
- Shachak M and Brand S. 1983. The relationship between sit and wait foraging strategy and dispersal in the desert scorpion, *Scorpio maurus palmatus*. *Oecologia*, 60, 371–377.
- Shachak M, Chapman EA, and Steinberger Y. 1976. Feeding, energy flow and soil turnover in the desert isopod, *Hemilepistus reaumuri*. *Oecologia*, 24, 57–69.
- Yair A and Shachak M. 1982. A case study of energy, water and soil flow chains in an arid ecosystem. *Oecologia*, 54(3), 389–397.
- Zhang L, Takahashi D, Hartvig M, and Andersen KH. 2017. Food-web dynamics under climate change. *Proceedings of the Royal Society B*, 284, 20171772.
- Adams L. 1951. Confidence limits for the Petersen or Lincoln index used in animal population studies. *The Journal of Wildlife Management*, 15(1), 13–19.
- Bartley TJ, McCann KS, Bieg C, and McMeans BC. 2019. Food web rewiring in a changing world. *Nature Ecology and Evolution*, 3(3), 345–354.
- Binzer A, Guill C, Brose U, and Rall BC. 2012. The dynamics of food chains under climate change and nutrient enrichment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 367, 2935–2944.
- Cahill AE, Aiello-Lammens ME, Fisher-Reid MC, and Wiens JJ. 2013. How does climate change cause extinction? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1750), 1890–2012.
- Cameron EK, Sundqvist MK, Keith SA, CaraDonna PJ, Mousing EA, Nilsson KA, et al. 2019. Uneven global distribution of food web studies under climate change. *Ecosphere*, 10(3), e02645.
- Carnicer J, Coll M, Ninyerola M, Pons X, Sanchez G, and Penuelas J. 2011. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(4), 1474–1478.
- Citron-Pousty S and Shachak M. 1998. Comparative spatial patterns of the terrestrial isopod *Hemilepistus reaumuri* at multiple scales. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 44(3–4), 355–368.
- Dell AI, Pawar S, and Savage VM. 2014. Temperature dependence of trophic interactions are driven by asymmetry of species responses and foraging strategy. *Journal of Animal Ecology*, 83, 70–84.
- Gauthier S, Kuuluvainen T, Macdonald SE, Shorohova E, Shvidenko A, Bélisle AC, et al. 2023. Ecosystem management of the boreal forest in the era of global change. In: Girona MM, Morin H, Gauthier S, and Bergeron Y (Eds). *Boreal Forests in the Face of Climate Change*. Cham: Springer International Publishing. pp. 3–49.
- Levy G and Amitai P. 1980. *Fauna Palaestina. Arachnida I: Scorpiones*. Jerusalem: Israeli Academy of Sciences and Humanities.
- Lurgi M, Lopez BC, and Montoya JM. 2012. Climate change impacts on body size and food web structure on mountain ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1605), 3050–3057.