



מחקר אקולוגי ארוך טווח: התפתחות, מגמות והישגים בעולם, באירופה ובישראל

משה שחק^{1*} | שילי דור-חיים^{2,1}

- 1 המכון לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
- 2 מו"פ מדבר וים המלח
- * shachak@bgu.ac.il

תקציר

(eLTER RI), שמבוססת על מחקר ארוך טווח ושילוב מחקר סוציו-אקולוגי, העוסק בחקר האינטראקציות בין אנשים לטבע. רשת LTER ישראל שייכת לרשת LTER אירופה, והוקמה בשנת 1997. הרשת בישראל מונה 13 תחנות מחקר ארוכות טווח וארבעה אזורי מחקר (פלטפורמות) סוציו-אקולוגיים. תחנות LTER בישראל מהוות מוקד משיכה לחוקרים מדיסציפלינות שונות מהארץ ומהעולם, וזאת הודות לידע שנצבר בתחנות שמתמקדות במחקר של מערכות אקולוגיות מוגבלות מים, ובזכות תשתיות וציוד המחקר הנמצאים בתחום התחנה. המחקרים בתחנות עוסקים בעיקר בחקר ההשלכות של שינוי האקלים על המערכות האקולוגיות ועל שימושי קרקע.

מחקרים ארוכי טווח הוכיחו שיש להם יתרון בחשיפת מידע, תופעות ותהליכים חדשים שלא נצפו במחקרים קצרי טווח. רשת התחנות למחקר אקולוגי ארוך טווח (LTER – Long Term Ecological Research) הוקמה בשנות ה-80 בארה"ב במטרה לספק לחוקרים אתרי מחקר במערכות אקולוגיות מגוונות ותמיכה בתשתיות המחקר באתרים אלה. בשנות ה-90 הוקמו רשתות LTER לאומיות ב-28 מדינות ברחבי העולם, שהתקבלו רשמית כחברות ברשת LTER העולמית (ILTER). כיום ILTER מורכבת מארבע רשתות (מזרח אסיה; אפריקה; אירופה; אמריקה), ולמעלה מ-1,000 תחנות פועלות במסגרתה ב-45 מדינות שונות. מטרותיה הן לסייע לקהילה הבין-לאומית במניעה ובפתרון של בעיות סביבתיות ובעיות חברתיות-אקולוגיות עכשוויות ועתידיות. ולשפר את ההבנה של מערכות אקולוגיות כלל-עולמיות. רשת LTER אירופה אימצה את מטרות ILTER, והגדירה ארבעה מאפיינים לתחנות: א. מחקר מבוסס אתר (*in-situ*); ב. מחקר המתבסס על טווח זמן ארוך; ג. מחקר בגישה מערכתית הכוללת הצלבת נתונים מדיסציפלינות שונות; ד. חקר של תהליכים המתקיימים במערכת האקולוגית. כיום LTER אירופה מתמקדת בקידום תשתית מחקר אירופית

מילות מפתח

אינטראקציה בין-לאומית, גישה מערכתית, סוציו-אקולוגיה, שינוי האקלים, שינויים בשימושי קרקע, LTER

מבוא

חדשנית למחקר אקולוגי יש ערך רב לקידום האקולוגיה ומדעי הסביבה.

המחשבה מאחורי הקמת רשת מחקר אקולוגי ארוך טווח הייתה לספק לחוקרים אתרי שדה לניסויים במערכות אקולוגיות המייצגות את מגוון בתי הגידול, ולתמוך בתשתיות המחקר באתרים במטרה להגדיל את מסד הנתונים ולהבין את התנהלות המערכות האקולוגיות בטווח הארוך ובתנאי סביבה משתנים. הנחת הבסיס בהקמת אתרי המחקר הייתה שהמהלך יעודד תיאום בין חוקרים מהדיסציפלינות השונות שעובדים בתחנה. מקימי הרשת אף הציבו כמטרה לשפר את התקשורת ושיתוף הפעולה בין חוקרים ובין אנשי הממשק והציבור הרחב וזאת דרך הנחלת ידע על תהליכים קצרי וארוכי טווח במערכות אקולוגיות.

מקימי רשת LTER התבססו על כך שעד להקמת הרשת: א. ניסויים אקולוגיים נערכו מתוך הכרה מועטה בשונות הבין-שנתית הגבוהה במערכות אקולוגיות; ב. מגמות ארוכות טווח לא נטרו באופן שיטתי במערכות אקולוגיות, ועל כן לא היה ניתן להבחין בין שינויים חד-כיווניים לבין שונות מחזורית; ג. לא הייתה רשת מתואמת של אתרי מחקר אקולוגיים, והדבר עיכב את המחקר ההשוואתי בין מערכות אקולוגיות שונות; ד. מחקר אקולוגי נעשה לעיתים קרובות רק על רכיב נבחר של המערכת (מינים נבחרים של צמחים, בעלי חיים וחיידקים), ונתונים משולבים או מערכתיים לא היו זמינים באתרי המחקר. כדי לסייע בהוצאת הרעיון לפועל נקבעו במהלך שנות ה-80 קווים מנחים לקביעת המשתנים למדידות אקולוגיות ארוכות טווח, לאופן ניתוחם ולדרך לבנות בעזרתם מודלים של מבנה ותפקוד של מערכות אקולוגיות. הקווים המנחים נוסחו כדי להבטיח השתתפות מגוונת של כל תתי-הדיסציפלינות האקולוגיות, כלומר: אקולוגיה של אוכלוסיות, חברות, מערכות אקולוגיות ואקולוגיה של הנוף. אף על פי שרשת LTER מתבססת על שיתוף פעולה בין חוקרים מתת-דיסציפלינות, היא תוכננה גם לספק הזדמנויות מחקר לחוקרים בודדים.

רשת LTER ארה"ב

התוצר המדעי של רשת LTER בארה"ב הוא העשיר ביותר עד כה, והוא נסקר ומשמש במאמרי מפתח (Callahan, 1984; Magnuson, 1990; Swanson and Spark, 1990; Franklin et al., 1990; Hobbie et al., 2003) וכן במספר גדל והולך של ספרים המתייחסים לאוסף מחקרי סינתזה של אתרי LTER ספציפיים (LTER Network, n.d.). נוסף על הישגיה המדעיים, הוכרה תוכנית LTER ארה"ב כמובילה בהיבטים של ניהול מידע בזכות תפקידה המרכזי ביצירת שיתוף פעולה בין חוקרים וסינתזה של תוצאות בתוך רשת האתרים (Hobbie et al., 2003).

אקולוגים מודעים זה מכבר ליתרונות שיש לתצפיות ולניטור במשך פרקי זמן ארוכים ולניתוח התוצאות שהתקבלו מהם, והיתרונות הללו הובילו להתפתחות מחקרים אקולוגיים ארוכי טווח. למרות ההכרה בחשיבותם של מחקרים ארוכי טווח התקשו האקולוגים בארה"ב בהקמת מערכת שתומכת במחקרים מסוג זה. כפתרון ביניים להבנת תהליכים כאלה חיברו האקולוגים רצף של פרויקטים קצרי טווח או ניתחו נתונים מניטור ארוך טווח שביצעו גופי ממשק שמתמחים בניהול שטחים פתוחים. פתרונות ביניים אלה קידמו את הבנת החשיבות של מחקר ארוך טווח. למרות זאת, האקולוגים לא היו מסוגלים להתמודד עם דינמיקת המערכות האקולוגיות בטווחים של עשרות שנים במגוון המערכות האקולוגיות בביוספירה.

מחקרים חלוציים שנעשו בצורה כזו עסקו באגם וושינגטון בארה"ב וכן במקומות שונים באירופה, והתמקדו בעיקר בקשר שבין המגוון הביולוגי ותפקוד המערכות האקולוגיות (Likens et al., 1977; Edmondson, 1991; Loreau et al., 2001). המחקר המפורט והמצוטט ביותר בתחום הוא מחקר השוואתי ארוך טווח, שבדק את הקשר שבין המגוון הביולוגי ותפקוד המערכת האקולוגית במערכות עשבוניות ברחבי אירופה (Hector et al., 2001). במאמרים מדעיים רבים הוכח שמחקרים בסקאלות זמן ממושכות חושפים מידע, תופעות ותהליכים חדשים שלא נצפו במחקרים קצרי טווח.

הבסיס העיוני למחקר אקולוגי ארוך טווח התפתח גם מתוך מחקרי עבר של מערכות אקולוגיות (Forbes, 1887; Tansley, 1935; Lindeman, 1942) ומתרחב של תוכניות בין-תחומיות בסקאלות גדולות, כגון סקרי עופות ברחבי ארה"ב וניטור ומחקר של השפעות אטמוספיריות על מערכות אקולוגיות של יער ואגמים (Gosz et al., 2010). התוכנית הביולוגית הבין-לאומית שהתמקדה בחקר הפוריות והמגוון של מערכות אקולוגיות תרמה משמעותית להתפתחות ה-LTER. בתוכנית זו נחקרו בפעם הראשונה כל הנופיות (biomes) המרכזיות של כדור הארץ, החל בקטבים וכלה באזורים הטרופיים, במטרה לפתח מודל מבוסס מחשב של המבנה והתפקוד של מערכות אקולוגיות. המחקר נערך לפי פרוטוקול אחיד, שכלל ניטור של ביומסה וייצור ראשוני ושינוי (Aronova et al., 2010).

מחקר אקולוגי ארוך טווח הפך ישים כאשר הוקמה רשת של תחנות כחלק מתוכנית של הקרן הלאומית למדע (NSF) בארה"ב, שראתה בהקמת רשת תחנות למחקר אקולוגי ארוך טווח (LTER – Long Term Ecological Research) המשכיכות טבעית של המחקרים ארוכי הטווח שנעשו קודם לכן. מייסדי הרשת, ובראשם פרופ' ג'ים גוז (אוניברסיטת ניו מקסיקו, ארה"ב), האמינו כי לגישה המוצעת של רשת

רשת LTER הבין-לאומית

ייסוד הרשת בארה"ב ותפעולה הביאו להבנה שכדי להתמודד עם אתגרי הסביבה אין להסתפק ברשת האמריקאית בלבד, ויש לייסד רשת LTER בין-לאומית. בתמיכת LTER ארה"ב ובאמצעות מאמצי הקרן הלאומית למדע האמריקאית הוקמו בשנות ה-90 רשתות LTER לאומיות ב-28 מדינות ברחבי העולם, שהתקבלו רשמית כחברות ברשת LTER העולמית (International Long-Term Ecological Research – ILTER).

החזון של הרשת העולמית נוסח בהסתמך על הניסיון המצטבר של LTER ארה"ב, כשאיפה לסייע לקהילה הבין-לאומית במניעה ובפתרון של בעיות סביבתיות ובעיות חברתיות-אקולוגיות בעזרת מחקר אקולוגי ארוך טווח בסקאלה הגלובלית. כמו כן, הנהלת ILTER והמאגד (קונסורציום), שמורכב מנציג של כל מדינה חברה ומיו"ר שנבחר על ידי נציגי המאגד, הגדירו שמשימתה העיקרית של הרשת היא לשפר את ההבנה של מערכות אקולוגיות גלובליות ובעקבות זאת לספק פתרונות לבעיות סביבתיות עכשוויות ועתידיות. ILTER היא הארגון היחיד שלרשותו רשת גלובלית של אתרי מחקר, היוצרת רשת עולמית של קבוצות מחקר תחומיות ובין-תחומיות המתמקדות ומשתפות פעולה במחקר ארוך טווח של מערכות אקולוגיות ברחבי העולם, ושתוצרתן המדעית יכולה לסייע בהבנת השינויים הסביבתיים הגלובליים. יתרונה של רשת זו הוא בזיהוי מגמות של שינויים ברמות שונות (הגלובלית, האזורית, הארצית והמקומית), החלים במבנה ובתפקוד של מערכות אקולוגיות בשל הפעילות האנושית. ILTER הוסיפה למשימותיה את הכשרת הדור הבא של מדענים חוקרי סביבה בגישת LTER, המתמקדת במחקרים בסקאלות משתנות של מרחב וזמן ובשיתוף פעולה להבנת בעיות סביבתיות ולהתמודדות איתן תוך שיתוף הנתונים. הנתונים, תוצרי המחקרים והתובנות על תהליכים המתרחשים במערכות האקולוגיות הנחקרות בתחנות ILTER, עומדים לרשות המדענים, קובעי מדיניות והציבור הרחב.

רשת ILTER מורכבת כיום מארבע רשתות (מזרח אסיה; אפריקה; אירופה ואמריקה), ובהן למעלה מ-1,000 אתרים ב-45 מדינות שונות, ומקיימת שיתופי פעולה בין מדענים העוסקים במחקר אקולוגי ארוך טווח.

LTER אירופה – מטרות, חידושים והסתכלות לעתיד

רשת LTER אירופה, המכונה eLTER (ראו אתר [eLTER](#)), מבוססת על העקרונות של LTER ארה"ב, וכן ניסחה את מעמדה באמצעות ארבעה מאפיינים:

1 מחקר מבוסס אתר (*in-situ*): מהמחקרים מפיקים נתונים על המבנה והתפקוד של מערכות אקולוגיות בסקאלה משתנה מרמת האתר ועד רמת האזור. כמו כן, נעשה ניתוח של המערכות האקולוגיות בכל רמות הארגון.

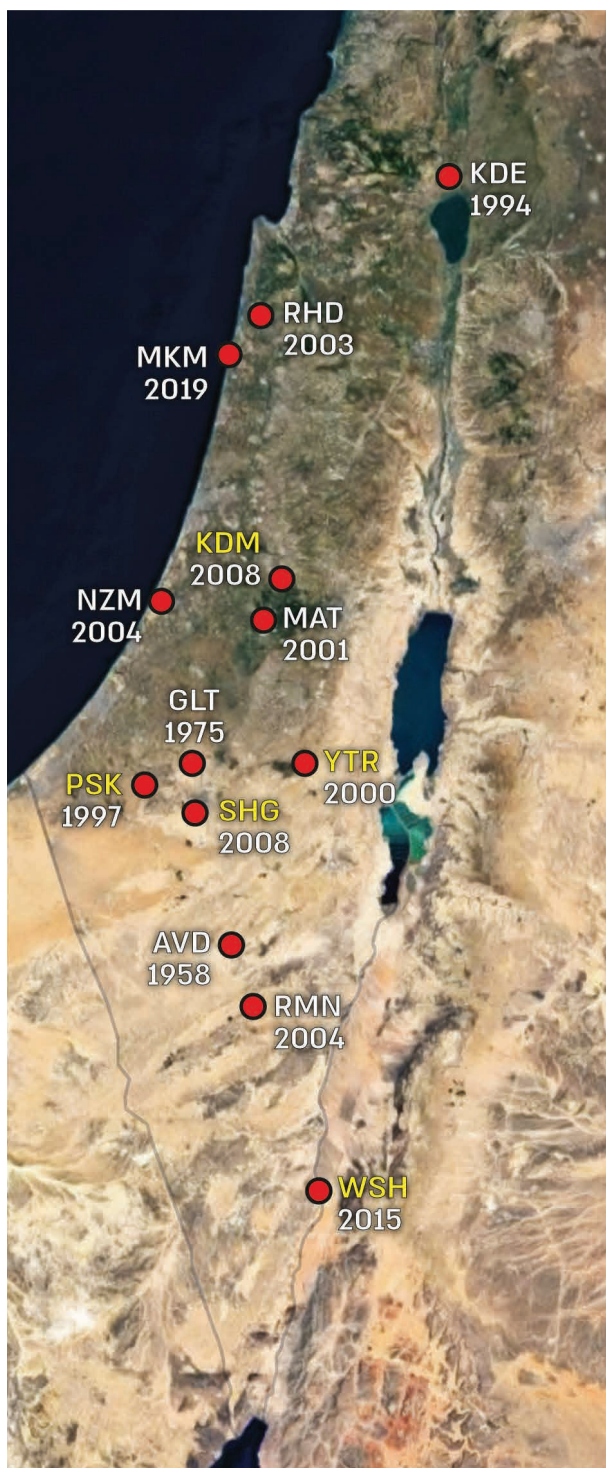
2 מחקר המתבסס על טווח זמן ארוך: במחקר נערכים תיעוד ושימוש במידע אקולוגי בטווח ארוך. במקביל, נבחנים נתונים על השינויים במבנה ובתפקוד של מערכות אקולוגיות בעקבות שינוי האקלים והשינוי בשימושי קרקע. כדי לאפשר זיהוי מגמות ארוכות טווח אופק הזמן של איסוף הנתונים הוא של עשרות שנים.

3 מחקר בגישה מערכתית: רשת LTER אירופה תורמת להבנה טובה יותר של המורכבות של מערכות אקולוגיות טבעיות ומערכות סוציו-אקולוגיות, המכסות את התחום הטבעי והתרבותי ובוחנות את השתנות הסביבה עקב תהליכים טבעיים ואנושיים. שיטות המחקר והניטור באתרי LTER אירופה לקוחות מהדיסציפלינות השונות המסייעות בהבנת המבנה והתפקוד של המערכות האקולוגיות, ובהן מדעי החיים, מדעי כדור הארץ ומדעי החברה.

4 חקר של תהליכים: המחקר מבוסס על כימות תהליכים המתרחשים במערכות אקולוגיות ועל יחסי גומלין ביניהם. השאלה המרכזית היא כיצד תהליכים אלה קובעים את המבנה והתפקוד של המערכת האקולוגית ושירותיה. הגישה משלבת מחקר וניטור ארוכי טווח. הנתונים מתייחסים למרכיבים הביזויים והאביוטיים של בתי גידול ושל מערכות אקולוגיות ברחבי אירופה ולשינויים הסביבתיים והסוציו-אקולוגיים, כגון שינוי האקלים ושינויים בשימושי קרקע.

כל אתרי רשת LTER אירופה מסתמכים על גישת ניתוח המבנה והתפקוד של מערכות אקולוגיות כמערכת שלמה (WAILS – Whole system Approach for *In-situ* Mirtl et al.) (research on Life Supporting Systems (2021)). גישת המערכת השלמה, כלומר הרעיון של ניתוח מערכות אקולוגיות בכלים של ניתוח מערכות, אינו חדש (Odum, 1983). אולם כדי להתאים את הגישה לאתגרים הסביבתיים המרכזיים כיום, שהם התמודדות עם ההשפעות האקולוגיות של שימושי הקרקע ושינוי האקלים, יש לפתח את הכלים לתיאור ולניתוח של המערכת השלמה ולקשרה לבעיות האקטואליות הסביבתיות העכשוויות. כמו כן, יש להתאים את הגישה להתפתחויות חדשות באקולוגיה.

LTER אירופה מתמקדת כיום בקידום תשתית מחקר אירופית, שמבוססת על מחקר ארוך טווח ועל הסתכלות חדשנית על המערכת האקולוגית – ממאגרי המים בקרקע ועד לחופת העצים – תוך שילוב מחקר סוציו-אקולוגי, העוסק בהבנת יחסי הגומלין המורכבות בין אנשים לטבע לאורך זמן. eLTER מספקת לחוקרים גישה ליותר מ-500



איור 1

כריסה ארצית של תחנות המחקר ארוך הטווח בישראל

תחנת כרי דשא (KDE); תחנת שדות ים (MKM); תחנת רמת הנדיב (RHD); תחנת יער הקדושים (KDM); תחנת מטע (MAT); תחנת ניצנים (NZM); תחנת יער יתיר (YTR); תחנת יער השגרירים (SHG); תחנת פארק סירת שקד (PSK); תחנת גילת-מגדה (GLT); תחנת עבדת (AVD); תחנת רמון-גוונים (RMN); תחנת נחל שיטה (WSH). ליד כל תחנה מצוינת שנת הצטרפות לרשת LTER ישראל. תחנות בניהול קק"ל מופיעות בצהוב. מקור: Google Earth, 2005.

אתרים ולכ-50 פלטפורמות (LTSE Socio-) Long Term Ecological Research (Ecological Research) גדולות יותר ברחבי אירופה, כולל ישראל, המציעות נתונים, שירותים והדרכה. eLTER משקיעה מאמצים למציאת פתרונות בני-קיימא לאתגרים החברתיים אקולוגיים הגדולים שניצבים מולנו כיום – שינוי האקלים ושינויים בשימושי קרקע – על ידי מתן ידע וראיות אמפיריות הדרושים לזיהוי ולהפחתה של השפעות אנושיות על מערכות אקולוגיות. המשימה המרכזית של eLTER היא שלמחקרים תהיה השפעה גדולה על ציבור מקבלי ההחלטות, ושהמחקרים יזרזו הגעה לתובנות חדשות לגבי ההשפעות המורכבות שיש לשינוי האקלים, לאובדן המגוון הביולוגי, להתדרדרות תפקודי הקרקע, לזיהום ולשימוש במשאבים שאינם בני-קיימא, על מגוון מערכות אקולוגיות וסוציו-אקולוגיות בכדור הארץ. הסתמכות על התשתית הפיזית המבוזרת והמומחיות המדעית שנצברה ברשת LTER בשילוב עם הגישה הסוציו-אקולוגית לחקר מערכות משולבות טבע ואדם ושיתוף הידע עם בעלי העניין מאפשרים לספק בסיס איתן למתן פתרונות מדיניים וממשקיים מבוססי ידע להתמודדות עם אתגרים סביבתיים עכשוויים ועתידיים.

LTER ישראל – התפתחות, הישגים והסתכלות לעתיד

ישראל משתייכת למסגרת אזורית אירופית, ופועלת בשיתוף פעולה מלא עם המשימות שמציבה LTER אירופה. בדומה להתפתחות רשתות LTER ארה"ב ואירופה, גם LTER ישראל (איור 1; ראו אתר LTER Israel) התפתחה משני פרויקטים ארוכי טווח. הפרויקט הראשון עסק בחקר מערכות אקולוגיות באגני היקוות בהר הנגב (Yair and Shachak, 1982). מחקרי האקולוגיה של אגני היקוות בהר הנגב התמקדו בקשר שבין המגוון הגאולוגי, המגוון הביולוגי ותפקוד המערכת האקולוגית. המחקרים הניחו את מסד המידע לקשרי גשם-נגר (Olsvig-Whittaker et al., 1983), לקשר בין גאומורפולוגיה לתפקודי צמחים ובעלי חיים (Yair and Shachak, 1987) ולחשיבות מהנדסי הסביבה בעיצוב הנוף (Jones et al., 1997). כמו כן, המחקרים הללו תרמו לגיבוש קבוצות בין-תחומיות ששילבו מטאורולוגיה, גאומורפולוגיה, חקר הקרקע, ביולוגיה ואקולוגיה. כל אלה יצרו את התשתית למחקר בין-תחומי במערכות אקולוגיות מוגבלות מים.

הפרויקט השני הוא פרויקט הסוואניזציה שהתבסס על שתי תחנות מחקר בצפון הנגב: פארק סירת שקד ותחנת להבים. מטרת הפרויקט הייתה לחקור את תהליכי המדבור ולאתר דרכים לשיקום תפקודי של מערכות ממודברות (Shachak et al., 1998). בפרויקט הסוואניזציה השתמשו

הישגי LTER ישראל – סיכום ביניים

אתרי LTER בארץ נוסדו במטרה לחקור נושאים ספציפיים בהתאם למטרות המוסד המפעיל את התחנה (ראו מאמרים המופיעים בחוברת זו). למרות זאת, בשלושה תחומים רשת LTER ישראל תורמת לקידום האקולוגיה התאורטית והשימושית כמסד להתמודדות עם בעיות סביבתיות בישראל: א. פיתוח מסגרת עיונית למחקר מבוסס אתרים ורשת; ב. חקר ההשלכות האקולוגיות של שינוי האקלים; ג. חקר ההשלכות האקולוגיות של שינויים בשימושי קרקע.

א. קידום התורה האקולוגית

מכיוון שישראל היא חלק מרשת LTER אירופה, היא מסייעת בפיתוח ובקידום של מסגרת גישת המערכת השלמה, שתוארה לעיל. ב-LTER ישראל פותחה גישה המתארת את המבנה והתפקוד של מערכות אקולוגיות כרשת (network) של קשרים (Dor-Haim et al., 2019). גישה זו מרחיבה את גישת המערכת האקולוגית השלמה, ומשלבת את המבנה והתפקוד של המרכיבים הפיזיים, הביולוגיים והחברתיים במערכות אקולוגיות.

המודל העיוני של LTER ישראל מפתח את הגישה של המערכת האקולוגית השלמה ומצרפה למסגרת הסוציו-אקולוגית, וכך יוצר חיבור של המגוון הפיזי והביולוגי למגוון של החברה האנושית (social-diversity) כדי להבין את תפקוד המערכות האקולוגיות בתקופה שהאדם הוא הגורם המשפיע הדומיננטי על כדור הארץ (Shachak et al., in preparation). מסגרת עיונית נוספת שפותחה לתיאור הגורמים המווסתים את המבנה והתפקוד של המערכת השלמה היא חקר ההתארגנות העצמית (self-organization) של המערכות האקולוגיות תוך התמקדות ביצירת תבניות צומח. התבניות מתארות את מערך הצומח במרחב שנוצר בשל אינטראקציות בין הצמחים לבין עצמם וכן עם סביבתם הפיזית (Meron, 2015). במסגרת זו פותחו מודלים מתמטיים של יצירת תבניות צמחייה במרחב המודלים מסייעים בזיהוי הקשר שבין תבניות הצומח לעיצוב הנוף, והשפעתו של הנוף על היצרנות והמגוון הביולוגי (Gilad et al., 2007; Shachak et al., 2008).

הפעילות של LTER ישראל נמשכת כרשת לפיתוח גישת המערכת השלמה על ידי שילוב הפרדיגמה של פעימה-עתודה (Pulse-Reserve). פרדיגמת פעימה-עתודה טוענת שמערכות אקולוגיות מוגבלות מים מונעות על ידי פעימות של גשם ונגר המותמרות לפעימות של לחות קרקע. פעימות המים בקרקע מפעילות פעימות של תפקודיות (יצרנות ופירוק) במערכת האקולוגית. לאחר שבעלי החיים והצומח מנצלים את פעימות המים, המערכת מייצרת מאגרים של משאבים וגופי רבייה, שישמשו עתודות שיופיעו על ידי פעימות הגשם בעונת החורף הבאה (Noy-Meir, 1974).

במערכות קציר-נגר כדי ליצור מערכת אקולוגית חדשנית דמוית סוואנה, המאופיינת ברשת לא צפופה של עצים שביניהם מערכת אקולוגית טבעית של עשבונים ושיחים. מחקרי פרויקט הסוואניזציה הובילו לבניית מודל של תהליכי מדבור שמבוססים על התפתחות מערכת שיחנית, שמשמרת משאבים. פעילות האדם ותנאי אקלים משתנים מביאים להרס השיחים ולהרס תפקודם כמהנדס סביבה המשמר משאבים (Dor-Haim et al., 2023), וכן מאמר על תחנת פארק סיירת שקד בגיליון זה). פרויקט זה הביא בעקבותיו להרחבת רשת תחנות LTER ולהקמת תחנות נוספות (ראו בגיליון זה מאמרים העוסקים בתחנות נחל שיטה, יער השגרירים, יער יתיר, יער הקדושים, רמת הנדיב וכרי דשא). פרויקט נוסף שנתן דחיפה חשובה להתפתחות LTER כרשת בישראל היה פרויקט שבחן את תפקוד הצמחים המעוצים כמעצבי סביבה ואת השפעתם על המגוון הביולוגי. הפרויקט קישר מחקרית חמש תחנות לאורך מפל הגשם בישראל (Shachak et al., 2008).

כיום רשת LTER ישראל מונה 13 תחנות מחקר ארוכות טווח שעוסקות במחקר בין-תחומי, וארבע פלטפורמות LTSE שנערכים בהן מחקרים סוציו-אקולוגיים, המשלבים היבטים של כלכלה, חברה, תרבות ופרספקטיבה אנושית בכלל (ראו מאמרם של אורנשטיין ושות' בגיליון זה). הפלטפורמות מאפשרות הערכות ותחזיות על שינויים במבנה, בתפקוד ובדינמיקה של מערכות אקולוגיות ושירותיהן בעקבות יחסי גומלין בין האדם לסביבה.

תחנות LTER ישראל מהוות מוקד משיכה לחוקרים מדיסציפלינות שונות הודות לידע שנצבר בהן בשל התמקדותן במחקר של מערכות אקולוגיות מוגבלות מים, והודות לתשתיות ולציוד המחקר הנמצאים בתחום התחנה. כמו כן, עבודה בתחנה מסודרת שבראשה עומד ראש תחנה שרואה באופן כולל את המתרחש בה, מאפשרת חיבורים ייחודיים בין חוקרים מתחומי ידע שונים. הידע שנצבר בתחנות והקשרים ההדוקים בין החוקרים לקובעי המדיניות הובילו לקידום המחקר מחד גיסא, וליכולת לתת מענה לשאלות מרכזיות בניהול שטחים פתוחים מאידך גיסא. למשל, כיצד יש לנהל את השטח כדי שיתפקד אקולוגית ולא ידורדר? בתחנות מתמודדים עם השלכות ממשקיות וניהוליות שיש לשינוי בשימושי קרקע או לשינוי האקלים על המערכות האקולוגיות ועל השטחים הפתוחים. נוסף על כך, המחקרים ארוכי הטווח המבוצעים על המפל האקלימי של מדינת ישראל מאפשרים לחוקרים לספק תובנות ממשקיות ולתת המלצות לניהול השטחים הפתוחים.

רשת LTER ישראל שואפת להיות משאב לאומי, כדי שיהיה ניתן להתמודד עם השאלות המרכזיות שניצבות בפנינו כיום בנושא השטחים הפתוחים.

של שינוי האקלים על מערכות אקולוגיות שונות. מחקרי השפעת שינוי האקלים בשלוש התחנות הללו מכסים שלוש מערכות אקולוגיות בקבוצות תפקודיות שונות של צמחים: עשבונים (תחנת מטע) שיחים (תחנת פארק סירת שקד) ועצים (תחנת יער יתיר). קבוצות אלה מייצגות את שלושת המרכיבים התפקודיים של הצומח במערכות האקולוגיות בישראל.

ג. חקר ההשלכות האקולוגיות של שינויים בשימושי קרקע
 LTER ישראל מתמקדת במגוון שימושי קרקע – שימושים לשמירת טבע, פארקים, ייעור, מערכות חקלאות ומרעה. בדרך זו LTER ישראל "מכסה" את רוב מערכת שימושי הקרקע בישראל, למעט מערכות עירוניות. בכל המחקרים העוסקים בשימושי הקרקע LTER ישראל מתמקדת בחקר ההשפעות של שימושי הקרקע (רעייה, סחיפת קרקע וחקלאות) על המבנה והתפקוד של המערכות האקולוגיות. בתחנת רמון מתמקדים בשימור התנאים של מערכת צחיחה קיצונית במסגרת חקר שימושי קרקע לצורכי שימור, ובתחנת ניצנים נחקר שימור המבנה והתפקוד של מערכות אקולוגיות טבעיות בדינות חול (Bar, 2013). בתחנת עבדת חוקרים את מורשת החקלאות הקדומה ואת השפעתה על התפתחות מערכות אקולוגיות חדשניות, שנוצרו בעקבות אינטראקציה בין האדם והטבע, ולא היו קיימות קודם לכן (Dor-Haim, submitted); בתחנות יער יתיר ויער הקדושים מתמקדים בייעור, והדגש מושם על הקיימות של מערכות נטע אדם בתנאי אקלים משתנים (Rotenberg and Yakir, 2022; Pozner et al., 2010). בתחנת רמת הנדיב חוקרים את המבנה והתפקוד של פארק אקולוגי כמערכת אקולוגית חדשנית המספקת שירותי מערכת אקולוגית (Levin et al., 2013). חקר שימושי קרקע למרעה מתבצע בתחנות מגדה וכרי דשא, והמטרה היא להבין כיצד לייצר מרעית בכמות המרבית האפשרית בצורה מקיימת (Seligman et al., 2017; Divinsky et al., 1981). בתחנות פארק סירת שקד ויער השגרירים מתמקדים המחקרים בשיקום תפקודי של מערכות אקולוגיות שהתדרדרו בעקבות שימושי קרקע, כגון רעייה, סחיפת קרקע וחקלאות (Shachak et al., 1998; Argaman et al., 2022).

לסיכום, רשת LTER ישראל נמצאת בתהליך של פיתוח מחקרי רשת, שהם מחקרים המבוססים על תיאוריה אחת שנבדקים בעת ובעונה אחת במגוון תחנות מחקר. במקביל, אנו מפתחים מסגרת עיונית למחקר של המערכת האקולוגית השלמה. שאיפה עתידית של הרשת היא להקים מרכז סינתזה. המרכז ירכז את הידע הרב שהצטבר בתחנות השונות, יהווה מקור מידע מרכזי בחקר אקולוגי של מערכות שונות בישראל, ויספק ידע מדעי לחינוך ולקהל הרחב לצורכי ממשק אקולוגי מושכל.

האדם משפיע על רוב המערכות האקולוגיות על פני כדור הארץ, ועל כן יש חשיבות מיוחדת לשילוב בין גישת המערכת השלמה, האדם והמערכת האקולוגית. בישראל יש לדבר חשיבות מיוחדת, הואיל ורוב המערכות האקולוגיות בה, כגון מערכות רעייה, מערכות חקלאיות ומערכות חקלאיות של טרסות, נוצרו בעקבות תהליכים ארוכים של יחסי גומלין בין האדם לטבע (Orenstein et al., 2012). רשת LTER ישראל מעורבת בפיתוח מדע הסוציו-אקולוגיה, המשלב בין האדם והסביבה במסגרת מושגית אחת (Orenstein et al., 2012; Dick et al., 2018), וזאת לצורך שילוב האדם בגישת המערכת השלמה. מחקר הסוציו-אקולוגיה תורגם במסגרת LTER לפלטפורמות LTSE (Mirtl et al., 2018).

ב. חקר ההשלכות של שינוי האקלים על המבנה והתפקוד של המערכות האקולוגיות

אתגר מרכזי הוא לזהות את השינויים במבנה ובתפקוד של מערכות אקולוגיות בעקבות שינוי האקלים. בשלושה אתרי LTER בישראל נחקר הקשר בין שינוי האקלים למערכות האקולוגיות: תחנות פארק סירת שקד, מטע ויתיר. בין היתר, המחקר עוסק בתבנית הגשם, בשינוי טמפרטורה וגלי חום, ובתהליכים של ייצור ראשוני ושל משק המים המשפיעים על המבנה והתפקוד של המערכת האקולוגית. מערכת הניסוי בתחנת מטע מתמקדת במניפולציות בקלט הגשם על ידי השקיה והדמיית בצורת מצד אחד ועוצמות גשם גבוהות מצד שני, ובוחנת את ההשפעות של המניפולציות על מרכיבי המערכת האקולוגית ועל יחסי הגומלין ביניהם. כלומר, נחקרת ההשפעה של פעימות גשם בכמויות שונות על היצרנות והמגוון של צמחים עשבונים חד-שנתיים ועל עתודות ביוטיות (בנק זרעים) וא-ביוטיות (נוטריינטים) בקרקע (Alon and Sternberg, 2019; DeMalach et al., 2021). בתחנת יער יתיר מתמקדים בהשפעת שינוי האקלים על יער נטוע באזור יובשני למחצה ברמת העץ וברמת היער כמערכת. ברמת העץ נבחנת התגובה הפיזיולוגית של עצי היער לשינוי האקלים ולתנאי אקלים קיצוניים (Klein, 2014). ברמת היער נבחנות השפעות אקלימיות (למשל שינוי במשטר הגשם ובטמפרטורה) על שטפים במערכת האקולוגית (למשל, שטפי פחמן ומים) המצביעים על שינויים בתפקודי היער כמערכת (Qubaja et al., 2020). בתחנת פארק סירת שקד נחקרת ההשפעה של בצורות על המבנה והתפקוד של המערכת האקולוגית ברמת אגן ההיקוות, והמחקר מתמקד בהבנת תהליך הקריסה, השיקום וההשתקמות של המערכת לאחר תדירות גבוהה של שנות בצורת (Paz-Kagan et al., 2014; Stavi et al., 2021a; Stavi et al., 2021b). תחנות LTER ישראל תורמות להבנת מגוון ההשפעות

- Hobbie JE, Carpenter SR, Grimm NB, Gosz JR, and Seastedt TR. 2003. The US long term ecological research program. *BioScience*, 53, 21–32.
- Jones CG, Lawton JH, and Shachak M. 1997. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology*, 78(7), 1946–1957.
- Klein T, Hoch G, Yakir D, and Körner C. 2014. Drought stress, growth and nonstructural carbohydrate dynamics of pine trees in a semi-arid forest. *Tree Physiology*, 34(9), 981–992.
- Levin N, Watson JE, Joseph LN, Grantham HS, Hadar L, Apel N, et al. 2013. A framework for systematic conservation planning and management of Mediterranean landscapes. *Biological Conservation*, 158, 371–383.
- Pozner E, Bar-On P, Livne-Luzon S, Moran U, Tsamir-Rimon M, Dener E, et al. 2022. A hidden mechanism of forest loss under climate change: The role of drought in eliminating forest regeneration at the edge of its distribution. *Forest Ecology and Management*, 506, 119966.
- Loreau M and Hector A. 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412(6842), 72–76.
- Likens GE, Borman FH, Pierce RS, Eaton JS, and Johnson NM. 1977. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. New York: Springer.
- Lindeman RL. 1942. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 23, 399–418.
- ILTER Israel. n.d. Israeli Long-Term Ecological Research Network. <https://lter-israel.org.il>
- ILTER Network. n.d. LTER Publications Committee. NSF. <https://lternet.edu/committees/publications>
- Magnuson JJ. 1990. Long-term ecological research and the invisible present. *BioScience*, 40, 495–501.
- Meron E. 2015. *Nonlinear Physics of Ecosystems*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Mirtl M, Borer ET, Djukic I, Forsius M, Haubold H, Hugo W, et al. 2018. Genesis, goals and achievements of long-term ecological research at the global scale: A critical review of ILTER and future directions. *Science of the Total Environment*, 626, 1439–1462.
- Mirtl M, Kuhn I, Montheith D, Bäck J, Orenstein D, Provenzale A, et al. 2021. Whole System Approach for in-situ research on Life Supporting Systems in the Anthropocene (WALLS). In: *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU21-16425).
- Noy-Meir I. 1974. Desert ecosystems: Higher trophic levels. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 195–214.
- Odum HT. 1983. *Systems Ecology; An Introduction*. United States: Web.
- Olsvig-Whittaker L, Shachak M, and Yair A. 1983. Vegetation patterns related to environmental factors in a Negev Desert watershed. *Vegetatio*, 54(3), 153–165.
- Orenstein DE, Groner E, Argaman E, Boeken B, Preisler Y, Shachak M, et al. 2012. An ecosystem services inventory: Lessons from the northern Negev long-term social ecological research (LTSER) platform. *Geography Research Forum*, 32(2012), 96–118.
- Paz-Kagan T, Panov N, Shachak M, Zaady E, and Karnieli A. 2014. Structural changes of desertified and managed shrubland landscapes in response to drought: Spectral, spatial and temporal analyses. *Remote Sensing*, 6(9), 8134–8164.
- Qubaja R, Grünzweig JM, Rotenberg E, and Yakir D. 2020. Evidence for large carbon sink and long residence time in semiarid forests based on 15 year flux and inventory records. *Global Change Biology*, 26(3), 1626–1637.
- Rotenberg E and Yakir D. 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science*, 327(5964), 451–454.
- Seligman NG, Benjamin RW, and Eyal E. 1981. Migda system 1 (MIGS 1): A model for studying management systems of an integrated sheep-wheat farm in the semi-arid zone of Israel. *Special Publication-Agricultural Research Organization (Israel)*. no. 207.
- Alon M and Sternberg M. 2019. Effects of extreme drought on primary production, species composition and species diversity of a Mediterranean annual plant community. *Journal of Vegetation Science*, 30(6), 1045–1061.
- Argaman E, Borow N, and Stavi I. 2022. Long-term effects of water harvesting systems on soil and vegetation dynamics in a semiarid region, Israel. *17th Plinius Conference on Mediterranean Risks*, Frascati, Rome, Italy, 18–21 Oct 2022. Plinius17–17.
- Aronova E, Baker KS, and Oreskes N. 2010. Big science and big data in biology: From the international geophysical year through the international biological program to the long term ecological research (LTER) network, 1957–present. *Historical Studies in the Natural Sciences*, 40(2), 183–224.
- Bar P. 2013. Restoration of coastal sand dunes for conservation of biodiversity: The Israeli experience. *Restoration of Coastal Dunes*, 173–185.
- Callahan JT. 1984. Long-term ecological research. *BioScience*, 34, 363–367.
- DeMalach N, Kigel J, and Sternberg M. 2021. The soil seed bank can buffer long-term compositional changes in annual plant communities. *Journal of Ecology*, 109(3), 1275–1283.
- Dick J, Orenstein DE, Holzer JM, Wohner C, Achard AL, Andrews C, et al. 2018. What is socio-ecological research delivering? A literature survey across 25 international LTSER platforms. *Science of the Total Environment*, 622, 1225–1240.
- Divinsky I, Becker N, and Bar P. 2017. Ecosystem service tradeoff between grazing intensity and other services-A case study in Karei-Deshe experimental cattle range in northern Israel. *Ecosystem Services*, 24, 16–27.
- Dor-Haim S, Brand D, Moshe I, and Shachak M. 2023. Functional restoration of desertified, water-limited ecosystems: The Israel desert experience. *Land*, 12(3), 643.
- Dor-Haim S, Groner E, Paz-Kagan T, Ohana-Levi N, and Shachak M. Submitted. The effects of human and biophysical legacies on novel ecosystem development: The ancient agro-terrace system of the Negev as a case study.
- Dor-Haim S, Orenstein DE, and Shachak M. 2019. Web of interactions among diversity approaches to identify ecosystem essential variables: Negev Highlands case study. *Ecosphere*, 10(11), e02906.
- Edmondson WT. 1991. *The Uses of Ecology: Lake Washington and Beyond*. Seattle: University of Washington Press.
- eILTER. n.d. Integrated European Long-Term Ecosystem, critical zone, and socio-ecological Research. <https://elter-ri.eu/>
- Forbes SA. 1887. The lake as a microcosm. *Bulletin of the Peoria Science Association*. Reprinted in the *Illinois Natural History Survey Bulletin*, 15, 537–550.
- Franklin JF, Bledsoe CS, and Callahan JT. 1990. Contributions of the long-term ecological research program. *BioScience*, 40, 509–523.
- Gilad E, von Hardenberg J, Provenzale A, Shachak M, and Meron E. 2007. A mathematical model of plants as ecosystem engineers. *Journal of Theoretical Biology*, 244(4), 680–691.
- Gosz JR, Waide RB, and Magnuson JJ. 2010. Twenty-eight years of the US-LTER program: Experience, results, and research questions. In: Müller F, Baessler C, Schubert H, and Klotz S (Eds). *Long-Term Ecological Research*. Springer, Dordrecht. pp. 59–74
- Hector A, Dobson K, Minns A, Bazeley-White E, and Hartley Lawton J. 2001. Community diversity and invasion resistance: An experimental test in a grassland ecosystem and a review of comparable studies. *Ecological Research*, 16, 819–831

- Stavi I, Zaady E, Gusarov A, and Yizhaq H. 2021b. Dead shrub patches as ecosystem engineers in degraded drylands. *Journal of Geographical Sciences*, 31(8), 1187–1204.
- Swanson FJ and Sparks RE. 1990. Long-term ecological research and the invisible place. *BioScience*, 40, 502–508.
- Tansley AG. 1935. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16, 284–307.
- 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.
- Yair A and Shachak M. 1987. Studies in watershed ecology of an arid area. In: Berkofsky L and Wurtele MG (Eds). *Progress in Desert Research*. Totowa, NJ: Rowman and Littlefield.
- Shachak M, Boeken B, Groner E, Kadmon R, Lubin Y, Meron E, et al. 2008. Woody species as landscape modulators and their effect on biodiversity patterns. *Bioscience*, 58(3), 209–221.
- Shachak M, Orenstein DE, and Dor-Haim S. In preparation. Linking geo-bio and social diversities: Whole system diversity and ecosystem functions and services in social ecological systems.
- Shachak M, Sachs M, and Moshe I. 1998. Ecosystem management of desertified shrublands in Israel. *Ecosystems*, 1(5), 475–483.
- Stavi I, Yizhaq H, Szitenberg A, and Zaady E. 2021a. Patch-scale to hillslope-scale geodiversity alleviates susceptibility of dryland ecosystems to climate change: Insights from the Israeli Negev. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 50, 129–137.



חלקת אורנים בתחנת LTER, רמת הנדיב, מרץ 2019
צילום: ידיד לוי