



כתב-עת
לניהול יערות
ושטחים פתוחים

יער

גיליון 22 | יולי 2022 | תשפ"ב



גיליון מיוחד
בנושא שינוי האקלים





תוכן עניינים

	3	בפתח הגיליון אברהם דובדבני
	4	מאמר המערכת גלעד אוסטרובסקי
	5	היערכות ניהול היער בישראל לשינוי האקלים שני רוהטין, גלעד אוסטרובסקי
		■ מאמרי סקירה
	8	משבר האקלים – גורמים, השפעות, תרחישים עתידיים ודרכים לפתרון אבנר גרוס
	15	התמודדות יערות עם שינוי האקלים ההדרגתי ועם אירועי קיצון: התייחסות לעולם והתמקדות בישראל יקיר פרייזלר, יותם זית
	28	מחזור המים המפתיע בנגב בקיץ נורית אגם, משה שחק
		■ מאמרים
	38	ברירה של טיפוסים עמידים ליובש של ברוש מצוי ושיפור שיטת הריבוי הווגטיבי באמצעות השרשת ייחורים כדי לאפשר שימוש בטיפוסים הנבחרים לנטיעות יערניות יוסי ריוב, הדס רגב, משה הוברמן
	49	יובש מגביל את ההתחדשות בעיר יתיר: הסכנה ליער מתעצמת בשל שינוי האקלים אלה פוזנר, פלג בר און, סתיו ליבנה-לוזון, אורי מורן, מור צמיר-רימון, אפרת דנר, אפרת שוורץ, אייל רוטנברג, פיודור טטרינוב, יקיר פרייזלר, ניתאי זכריה, יגיל אסם, דן יקיר, תמיר קליין
	60	הזיקה בין הישרדות של עצי אורן ברוסיה לבין תבנית גדילת רוחב רב-שנתית רותם אטיאס, עומר גולן, אסף אלון, ליאור רגב, אליזבטה בוארטו, שי צמרי, צבי מנדל, רקפת דוד-שוורץ
	71	המעורבות של חיפושיות קליפה בתמותת עצי אורן ביער הנטוע בישראל עומר גולן, רתם אטיאס, מאור אלרון, אלכס פרוטסוב, צבי מנדל, רקפת דוד-שוורץ
		■ מהשטח
	82	תחנות המחקר והניטור ארוכי הטווח של קק"ל – חשיבותן לממשק מותאם ולבקרה על התהליכים במערכת האקולוגית לנוכח שינוי האקלים שילי דור-חיים, יגיל אסם, תמיר קליין, אלי ארגמן, ניצן שגב, אסף קרואני
	90	שיטות וכלים מדעיים וישומיים לחיזוי, למניעה ולכיבוי של שרפות יער מור אשכנזי, מאיה מלאת, נעמי הומינר, מוני שטרית, חן קרוא, רויטל וויס, חנוך צורף
	94	ניתוח השרפה בהר הרוח (יער החמישה) – יוני 2021 רוני טל, ענת אידלמן, אלמוג רם
	97	לימנים בציד הכבישים בנגב - תמונת מצב גיל סיאקי
	100	התפתחות וצמיחה של שיטים בחלקת אקלום בנגב תמר כפרי, דניס לוז'קוביץ, גלעד רייספלד
		■ מאמרי דעה
	104	שירותי תרבות ביערות מחטניים לנוכח שינוי האקלים: להמשיך ליהנות מיער מסוג אחר דניאל אורנשטיין
		■ קצרצרים
	108	פרויקט יער האקלים לנטיעת עצים אחראית במרחב המיושב דניאל כץ
		■ יער של סכרים
	110	התמוטטות, מאת ג'ארד דיימונד, 2008 העץ, מאת ג'ון פאולס, 2021 (1979) גלעד אוסטרובסקי
		■ עצים ששווה להכיר
	113	שיטה סלילנית בפארק סירת שקד חגי יבלוביץ'
		■ תקצירים באנגלית
	III	

עורכת:

ד"ר ענת מדמוני

ועדת העורכים:

ד"ר גלעד אוסטרובסקי

ד"ר ענת מדמוני

ד"ר שני רוהטין

חברי המערכת:

ד"ר גלעד אוסטרובסקי

ד"ר דניאל אורנשטיין

ד"ר יגיל אסם

ד"ר עמרי בונה

פרופ' מני בן-חור

ד"ר ארז ברקאי

ד"ר רקפת דוד-שורץ

אביגיל הלר

פרופ' דן יקיר

פרופ' צביקה מנדל

ד"ר דורון מרקל

עדי נוי איוניר

ד"ר מיכאל ספרינצין

ד"ר אורית סקוטלסקי

ד"ר עידן קופלר

ד"ר תמיר קליין

אסף קרואני

ד"ר שני רוהטין

פרופ' יוסי ריוב

אורי רמון

ד"ר אפרת שפר

עריכת לשון ותוכן:

ענבר קמחי-אנגרט

תרגום לאנגלית:

ד"ר אסתר לחמן

עיצוב גרפי:

אורית ישעיהו

כתובת המערכת:

"יער"

קרן קימת לישראל

Yaar.magazine@kkl.org.il

הוצאה לאור:

קרן קימת לישראל

מנהל פיתוח הקרקע

אגף הייעור

היחידה לפרסומים, קשרי ציבור

© כל הזכויות שמורות

אתר כתב העת "יער באינטרנט"

www.kkl.org.il/forest-online-journal

אתר קק"ל באינטרנט

www.kkl.org.il

לפרטים ולהרשמה לאירועים ביערות ובאתרי קק"ל:

קו ליער: 1-800-350-550

תמונת הכריכה הקדמית:

יער יתיר – יער מחטני צפוף, מאי 2022. במרכזו נטיעה צעירה של עצים

רחבי עלים בצפיפות נמוכה. מה מזמן העתיד ליער הדרומי בעקבות שינוי

האקלים?

צילום: רובי יהב / Roby Yahav

תמונת הכריכה האחורית:

תמונת הכריכה הקדמית צולמה מגבעה חשופה זו ביער ביתר. ניתן לראות

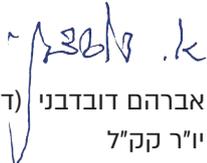
היטב את ההבדל בין הצומח הטבעי לבין היער הנטוע, מאי 2022.

צילום: רובי יהב / Roby Yahav

שלום וברכה,

הקשורים לשאלות יסוד של ניהול היער. הנושא חשוב מאוד לקק"ל, מאחר שהיער הוא החזית הנראית לעין של הארגון, והוא נקודת המפגש הפיזית שלנו עם הציבור הכללי במדינת ישראל. תרומת החוקרים וחילופי הרעיונות בנושא חיוניים, אפוא, להמשך הפעילות היערנית של קק"ל. במקביל לחשיבה המקצועית של אנשי הייעור מתנהל דיון פרלמנטרי בניסוח חוק היער, שיחליף סוף סוף חקיקה ישנה, מורשת המנדט הבריטי. אנו מצפים לסיום תהליך החקיקה בהקדם ולהסדרת מעמדה וסמכותה של קק"ל בניהול היער בצורה רשמית ומתוקנת.

קריאה נעימה ומועילה,


אברהם דובדבני (דובדב)
יו"ר קק"ל

לפני מספר חודשים התקיימה ועידת גלזגו, ושאלות הקשורות לשינוי האקלים עלו על סדר היום העולמי. באחד הגיליונות בשנה שעברה דיווחנו על כוונתנו להיכנס לעיסוק רחב יותר בנושא משבר האקלים, ואכן בתקציב השנה הקצבנו לנושא סכום מכובד. אנו בתחילת הדרך, ואני מקווה שפעילותנו בתחום תתרום לשיפור המצב בארץ ובעולם. הקשרים ההדדיים וההשפעה ההדדית בין היער לבין שינוי האקלים ברורים לכאורה, אבל יש עוד שדה נרחב למחקר בעניין זה ולהסקת מסקנות מעשיות.

עברנו "עונת שרפות" קשה מאוד, שהשאירה את רישומה על כולנו. בעקבות השרפות התכנסו מספר גורמים רלוונטיים, יחד ולחוד, לחשיבה מעמיקה בנושא היער בהיבטים שונים

פתח דבר

הקרקע; שירותי תרבות, הכוללים מרחב לפנאי, לנופש ולספורט, מחקר וחינוך, אסתטיקה והשראה רוחנית. כל אלה מוכרים לנו היטב, וחיוניותם רק הולכת וגוברת עם הצטמצמות השטחים הפתוחים לצד התחממות האקלים והעלייה בשכיחות אירועי קיצון. עתה עלינו להגדיר מהן הבעיות העיקריות המאיימות על קיומו ועל תפקודו של היער לנוכח שינוי האקלים, וכיצד עלינו לפעול כדי להבטיח את קיומו ואת המשך אספקת שירותי המערכת המגוונים שהוא מעניק.

בפתח הגיליון מובאים בפני הקורא קווים עיקריים להיערכות ניהול היער לתנאים של שינוי האקלים. זהו תקציר הדברים משולחן העבודה של מסמך הנמצא בהכנה באגף הייעור, ושכונתנו לסיים את כתיבתו ולפרסמו בחודשים הקרובים. מעבר לכך, הגיליון כולל מגוון היבטים של בעיית שינוי האקלים: סקירה על תופעת שינוי האקלים בהקשר העולמי והמקומי ולאחריה מיקוד המבט על היערות והתמודדותם עם שינוי הדרגתי. משק המים, חשיבות ההשבה לנוכח היובש הגובר וסכנת התפרצות מזיקי יער וכמובן שרפות יער מקבלים אף הם התייחסות מעניינת ומלמדת בגיליון. תם ולא נשלם. העבודה על הגיליון ארכה כשנה, ומטבע הדברים לא כל הנושאים זכו להתייחסות, ועל שולחנה של העורכת נותרו מאמרים נוספים שלא הסתיימה הכנתם עד סגירת הגיליון. אנו נמשיך להציג, לפרסם, ובעיקר לפעול ככל יכולתנו כדי להגביר את חוסנם של היערות בישראל ואף להרחיב את שטחם ואת מגוון שירותי היער שהם מספקים לחברה ולסביבה.

קריאה נעימה,



גלעד אוסטרובסקי

היערן הראשי ומנהל אגף הייעור

הגיליון שלפניכם מוקדש לנושא הסביבתי-קיומי העומד בפנינו: שינוי האקלים. האתגר שניצב בפני האנושות מי שורנו, ולעיתים נדמה שההתקדמות המדעית הרבה אין בכוחה לספק את הכלים להתמודדות הנדרשת. החברה והכלכלה בנויות על אדנים שאינם בני-קיימא, ועל אף המודעות הציבורית ותשומת הלב הפוליטית איננו מצליחים לשנות את המגמות המדאיות: צריכה הולכת וגוברת ועלייה בניצול המשאבים, ובקצה השני הררי פסולת ופליטת גזי חממה. למרות אזהרות המדענים וניסוח האמנות הבין-לאומיות המשיכה פליטת גזי החממה לעלות גם בשנת 2021, אף על פי שהייתה זו שנת קורונה שגרמה להאטה בפעילות הכלכלית.

האם ביכולתה של האנושות להתמודד עם האתגר המבהיל שעומד לפנינו? איננו יודעים. אך ברור לנו שנדרש שינוי מערכתי בהשתתפות כל מרכיבי החברה: אזרחים, ערים, מנהיגים, ארגונים, תאגידים וכמובן ממשלות וארגונים בין-לאומיים. כל אחד יטה כתף ויתרום את חלקו.

ליער, מרכז עיסוקנו, נועד תפקיד חשוב בהתמודדות עם שינוי האקלים במיתון הצטברות גזי חממה באטמוספירה (על ידי קיבוע פחמן) ובקירור מקומי וכן בצמצום ההשפעות הלא רצויות הנגרמות מאירועי קיצון ומהשלכותיהם על מערכות החיים השונות. ככלל, היער מספק מגוון שירותי מערכת אקולוגית: שירותי אספקה כדוגמת מרעית לבקר וצאן, צוף לדבורים, מאכלי בר, תרופות, חומר עץ וכן משאבים גנטיים יקרי ערך; שירותי ויסות של האקלים העולמי והמקומי, האבקה גידולים חקלאיים, ויסות של מחלות, מזיקים ומינים פולשים, וכן ויסות איכות האוויר, הקרקע והמים ומניעת שיטפונות, סחיפה ובליה של



היערכות ניהול היער בישראל לשינוי האקלים

שני רוהטין * | גלעד אוסטרובסקי

אגף הייעור, קק"ל
* shanir@kkk.org.il

1. **ממשק אדפטיבי מוכוון מטרה:** תכנון וביצוע של פעולות הממשק ביער בהתאם למטרה או לכמה מטרות מוגדרות; ליווי פעולות הממשק בניטור הבוחן לאורך זמן את מידת ההצלחה שלהן, בין היתר לנוכח שינוי האקלים, ומכוון בהתאם את התכנון ואת פעולות הממשק בעתיד.
 2. **מגוון, מורכבות וכתמיות:** שימור וטיפוח של מגוון נופים, בתי גידול, תצורות צומח, מינים וגנוטיפים ביער כמרכיב יסודי המאפשר את תפקודו ואת חוסן המערכת האקולוגית.
 3. **עידוד תהליכים טבעיים:** הסתמכות ככל הניתן על תהליכים טבעיים ועל מינים מקומיים שעברו תהליכים ארוכי שנים של ברירה (סלקציה) והסתגלות, ועל כן יכולים לתרום לחוסן המערכת בהתמודדות עם הפרעות ועם שינוי האקלים.
 4. **התערבות מושכלת:** חתירה להשגת מטרות ניהול היער שהוגדרו, על ידי התערבות מותאמת בשטח, קרי, נקיטת רמות שונות של התערבות בהתאם למטרות הניהול ולאופי השטח ומתוך התחשבות בסדרי עדיפויות ותוך חיסכון במשאבים.
 5. **אי-ודאות:** הכרה בכך שקיימת אי-ודאות ביחס לקצב ולעוצמה של שינוי האקלים בישראל ולמידת השפעתו על המערכות האקולוגיות בכלל ועל היער בפרט. מענה לאי-ודאות יינתן על ידי רמות התערבות בניהול היער ושימוש במגוון פתרונות ושיטות עבודה, לצד ניטור מתמשך ומחקר ארוך טווח (ממשק מסתגל [אדפטיבי]).
- עקרונות היסוד הם:

השבחה והרחבת המגוון הגנטי: פעולות אלה יעזרו לשפר את ההתמודדות של עצי היער עם תנאי יובש גוברים ועם הפגעים והמפגעים הנלווים לשינוי האקלים (רוחות, שלגים, מזיקים ועוד). עלינו לקדם ביתר שאת ולהרחיב תוכנית השבחה שתבסס על יצירת מגוון גנטי רחב, לצד חיזוק תכונות שמעצמות את העמידות ליובש במיני העצים ביער. **קציר נגר ופעולות אגרוטכניות נוספות:** פעולות שמטרתן למנוע אובדן מים, להגביר את איסוף המים מהמדרונות ולשפר בכך את משק המים של העצים, הן כלי מרכזי בביסוס ובקיום של יערות באקלים צחיח למחצה, כדוגמת זה השורר בצפון הנגב. עלינו למצוא את אופן השימוש המיטבי והמדויק בשיטות העבודה השונות, לצמצם את ההפרה בשטח ככל שניתן, ולהתאים את הפעולות האגרוטכניות למטרות המבוקשות. אם יהיה צורך, תיבחן הרחבת השימוש בשיטות אלה גם לאזורי אקלים ים תיכוניים ככלי להתמודדות עם שינוי האקלים.

ג. עלייה בהיקף, בעוצמה ובתכרסות של שרפות יער
שינוי האקלים מעלה באופן ישיר את הגברת הסיכון להתפרצות שרפות בעוצמה גבוהה ולהתפשטותן. אין ספק שזהו אתגר מרכזי ביותר בניהול היער, והוא דורש התערבות גבוהה שיכולה לשפר במידה ניכרת את מניעת האש ולהקטין את הנזקים ליער, לרכוש ולנפש. **ההמלצות העיקריות** נוגעות להכנת תוכניות הגנה מאש לכלל היערות כחלק מהכנת תוכניות יער וממשק, כלומר נספח ייעודי המפרט את אזורי החיץ ביער, אזורי חיץ סביב יישובים, דרכים, נקודות כינוס, נקודות מים ועוד. מבחינת העבודה היערתית הוגדרו שלושה סוגים של שטחים המשמשים לצמצום סכנת שרפה: אזור חיץ סביב יישוב, אזור חיץ ביער וכן שטחים שאינם קווי חיץ המטופלים להקטנת איום השרפה באמצעות צמצום עומס חומרי הבערה וקטיוע הרצף המרחבי שלהם. כמו כן, עלינו לכלול את סכנת השרפות בשיקולים שלנו בעת חידוש יער והקמת יער חדש. נוסף על כך, עלינו לפעול לקידום ממשק הרעייה באזורי החיץ ככלי מרכזי להפחתת הצומח העשבוני והצומח המעוצה הנמוך.

ד. חדירה והתפרצות של מיני צמחים פולשים
מינים זרים לבית הגידול שיש להם פוטנציאל לפגוע במערכת האקולוגית ולדחוק מינים מקומיים, הם איום גובר בתנאים של שינוי האקלים. בתחום זה עדיין חסר מידע, ויש מקום לקדם מחקרים יישומיים כדי שנדע כיצד לפעול. בשנה הקרובה בכוונתנו להכין **תוכנית להתמודדות עם מגוון מינים פולשים** שתיתן עדיפות לטיפול בפולשים בעלי פוטנציאל התפשטות גבוה. עדיפות ראשונה תינתן למניעת הגעתם של מינים פולשים חדשים. בעדיפות שנייה נמצאת

על בסיס עקרונות יסוד אלה נכתבים הפרקים במסמך המדיניות, ובכל פרק נידונה בעיה אחת הנובעת משינוי האקלים. הפרקים מתארים את תמצית הבעיה, את מידת הוודאות לגביה ואת מדרג החשיבות שלה, והמלצות עקרוניות לפעולה.

א. הקושי לשמור על שטחי היער

במדינה קטנה בשטחה וצפופת אוכלוסין יש חשיבות רבה ביותר לשמירה על שטחי היער כדי להבטיח את המשך אספקת שירותי המערכת האקולוגית. לקק"ל תפקיד מפתח, תכנוני וממשקי, בהגנה על היערות, בצמצום גריעות שטחי יער, ביוזמה להרחבת שטח היערות וביצירת קישוריות בין שטחים פתוחים. כמו כן, לקק"ל תפקיד משמעותי בהרחבת המבט אל מחוץ למקרקעי הייעור, בהגברת שירותי המערכת של שטחים מדורדרים ופגועים, ובהגדלת כיוסי העצים בשטחי יישובים ובאזורי שוליים צמודי דופן לבינוי ולחקלאות, מקומות שהייעור יכול לשמש בהם כלי מרכזי בשיקום אקולוגי.

השמירה על קיומם של היערות, מניעת הכרסום בשטחים והגנה מפני פגיעות פיזיות והשחתת היער יקבלו התייחסות נרחבת בתוכנית האסטרטגית ליער הנמצאת בהכנה בימים אלה.

ב. מחסור במים הגורם לתמותת עצים מיובש ולירידה בהתחדשות הטבעית

עקת יובש ומחסור במים מהווים איום משמעותי, בעיקר על עצי המחט בישראל. אופן ההתמודדות שלנו יתבסס על סל מגוון של פעולות, שייצרו איזון בין התבססות על תהליכים טבעיים לבין התערבות ממשקית, וייתייחס בעיקר לנושאים הבאים:

מבנה היער והרכבו: ליער מגוון ומורכב מבחינת מבנה, נוף ומיני העצים יש עמידות גבוהה יותר להפרעות ולשינויים, ובהם יובש גובר.

דילול היער: דילול היער המחטני (הפחתת צפיפות העצים) הוא פעולה חשובה מעין כמותה לשיפור משק המים של צמחיית היער. עבודתנו תתבסס על הנחיות המסמך המקצועי – "דילול היער המחטני" (אסם וצורף, 2019) שאומץ על ידנו עם פרסומו, ועל תובנות שעלו לאורך השנים ממספר רב של מחקרים, שעיקרן: מתן דגש לדילול יערות צעירים והתאמת צפיפות העצים לתנאי משק המים של בית הגידול. בישראל הצפיפות הסופית המרבית המומלצת לעומדי יער מחטני נעה בין 20 ל-35 עצים לדונם, בהתאם למשק המים של בית הגידול. במסגרת פעולות הדילול יש לתת חשיבות רבה לחידוש יערות ותיקים הקרבים לפרקם על בסיס שילוב נכון של התחדשות טבעית ונטיעות. לצד זאת, עלינו לפקוח עיניים ולעקוב אחר תמותת עצים ביער, תוך הבנה ששיעורי תמותה מסוימים הם חלק ממחזור החיים ביער.

ז. צורך בהגברת ניטור ומחקר

אחת מהנחות היסוד בניהול יער בר-קיימא היא התבססות על ממשק מסתגל מוכוון מטרה. ממשק מסתגל משמעו ביצוע פעולות התערבות בעלות מטרה מוגדרת תוך ניטור מתמשך ומחקר בשטחים המנוהלים והתאמת פעולות הממשק לתובנות המתקבלות מהמחקרים ומהסקרים. הניטור והמחקר של קק"ל מתבססים כיום על מערך קבוע וארוך טווח של חלקות מחקר וניטור לצד מחקרים וסקרים נקודתיים קצרי טווח. כל אלה עומדים לעזרתנו גם במתן מענה לפערי הידע הקיימים במגוון תחומים, וגם בזיהוי שינויים ומגמות במצב המערכת האקולוגית ביערות ובשטחים הפתוחים. על בסיס תובנות מערך הניטור והמחקר נכתבו ונכתבים מסמכי מדיניות רבים המשמשים לניהול היערות בישראל ולהגנה עליהם. המשך קיומו של מערך זה הוא בסיס הכרחי לניהול יער בר-קיימא, והוא הממקם את מערך הייעור של קק"ל בחזית המדע ובחזית מקצוע היערנות לצד גופי ניהול יערות במדינות רבות אחרות.

ח. הצטמצמות שטח היערות וירידה בתפקודם לצד עלייה

בדרישה לשירותי המערכת האקולוגית שעל היער לספק המשך המגמות הקיימות בישראל של גידול האוכלוסייה והתרחבות השטח הבנוי מובילות בהכרח לצמצום שטח היערות ולהגברת קיטועם. לצד זאת, החרפת היובש עקב שינוי האקלים עלולה לגרום לפגיעה בתפקוד היערות ובכושרם לספק שירותי מערכת אקולוגית חיוניים לאדם ולסביבה. ההתחממות במזרח הים התיכון צפויה לגרום לשינויים באזורי תפוצה של מינים ושיבוש דפוסי צמיחה וגידול של צמחים ובעלי חיים. תהליכים אלה מעלים חשש להתדרדרות המגוון הביולוגי. בעקבות זאת, שירותי המערכת האקולוגית הנסמכים על המגוון הביולוגי ייפגעו ויצטמצמו אף הם. האופן המרכזי שעלינו להתמודד עם בעיות אלה, לצד פעולות ממשק היער, הוא בתכנון מדויק שיתרום למירוב שירותי המערכת של היער כך שיתאימו לתנאי הסביבה, לצורכי האדם וליתרונות היחסיים בכל מקום.

עלינו להמשיך להרחיב ולעגן תהליך תכנון ארוך טווח המתבסס על תוכניות אב ותוכניות יער וממשק, לזהות ולהגדיר את שירותי המערכת המתבקשים בכל יער, ולבצע ממשק מושכל בהתאם למטרות הניהול ולערכים האקולוגיים שאנו מעוניינים לטפח.

מניעת התבססותם בשלבים מוקדמים כשגודל האוכלוסייה עדיין מצומצם, ובשלישית – בלימת המשך התפשטותם, בייחוד בשטחים רגישים טבעיים.

ההמלצות בשלב זה כוללות: הימנעות מנטיעת מינים פולשים או מינים שיש חשש שיהפכו לפולשים; מזעור הפרת שטחים בממשק היער; ניטור ומעקב אחר הדינמיקה של מינים פולשים בכלל שטחי היער ובפרט בשטחים מטופלים; תכנון ארוך טווח להתמודדות עם מינים פולשים המבוסס על סדר העדיפויות שפורט קודם לכן; קידום מחקר ופיתוח; שיתוף פעולה בין-ארגוני.

ה. חרקים פולשים ומתפרצים וגורמי מחלות ביערות ישראל

לשינוי האקלים המתפתח במזרח אגן הים התיכון השפעה שלילית על בריאותם ועל תפקודם של היער והחורש בישראל. תגובת העצים לעקות חום ולגירעון במשק המים עלולה לשבש את הקצאת המשאבים בצמח למערכות הגנה פיזיות וכימיות. כמו כן, ייתכנו שינויים בתחום התפוצה ובמחזור החיים של מזיקים שעלולים לגרום להתפרצות ולהתפשטות במרחב ובזמן.

עיקרי ההמלצות בשלב זה כוללים ממשק לטיפול בעקה האביוטית (למשל דילול להפחתת עקת מים), שימוש במיני עצים מתאימים למזעור העקה והפגיעה על ידי מזיקים, השבחה גנטית לטיפוסים עמידים (ליובש ולמזיק), ושיפור הזיהוי והניטור של בריאות היער (פתוגנים, מחלות ומזיקים).

ו. עלייה בתדירות של אירועי קיצון: סופות ושלגים

אירועי קיצון, הכוללים כמויות גדולות של גשם בזמן קצר, שלגים ורוחות בעוצמות גבוהות וכן השילוב בין תופעות אלה, גורמים נזקים ליער, שיכולים להתבטא באופנים שונים: קריסת עצים, שבירה של הגזע המרכזי, וכן שבירה של ענפי הכותרת. ניתן לשער ששכיחות אירועי הקיצון תעלה, אך קשה לאמוד את התפרוסת שלהם ואת מידת השפעתם ולכוון בצורה ממוקדת את הפעולות ל"הגנת" היער מפניהם. הפעולה המרכזית והחשובה ביותר היא דילול נכון של יערות המחט באופן שיגביר את עמידותם וחסיונותם של העצים, יחד עם פעולות בטיחות נוספות, כגון גיזום וסילוק עצים מסוכנים באתרים קולטי קהל. בעת חידוש יער והקמת יער בנטיעה יש לכלול במערך השיקולים בחירה נכונה של מינים (מחטניים ורחבי עלים) בעלי עמידות לאירועי קיצון הצפויים בכל שטח.

מקורות

אסם י, וצורף ת. 2019. תורת ניהול היער בישראל. דילול היער המחטני. הקרן הקימת לישראל.

אסם י, ברנד ד, טאבור י, פרבולוצקי א וצורף ת. 2014. תורת ניהול היער בישראל. מדיניות והנחיות לתכנון ולממשק היער. הקרן הקימת לישראל. https://www.kkl.org.il/files/forest_and_environment/forest_management_new.pdf

משבר האקלים – גורמים, השפעות, תרחישים עתידיים ודרכים לפתרון

אבנר גרוס

המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי ובית הספר לקיימות ושינויי אקלים, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
avnergro@bgu.ac.il

תקציר

הכימי במערכות אקולוגיות יבשתיות. עם זאת, ספיגתו המוגברת במי האוקיינוס מעלה את חומציות הים, תהליך שיש לו השלכות חמורות על המערכת האקולוגית הימית. כדי למנוע שינוי אקלים בעל השלכות קטסטרופליות על האדם והטבע, המוסכמה המדעית המקובלת היא שעלינו להגביל את עליית הטמפרטורה הגלובלית עד סוף המאה ללא יותר מ-2°C לעומת הממוצע של 1850–1900. כדי להגיע ליעד זה עלינו לאפס את פליטות גזי החממה עד אמצע המאה הנוכחית ולהגביר את שאיבת הפחמן מהאטמוספירה תוך שימוש בפתרונות טבעיים, כמו נטיעת יערות.

פני השטח של כדור הארץ נמצאים במגמת התחממות מואצת מאז תחילת המאה ה-20, ושבע השנים האחרונות (2014–2021) מהוות את רצף השנים החם ביותר מאז החלו המדידות. התחממות כדור הארץ נגרמת בעקבות עלייה חדה בריכוז האטמוספרי של גזי חממה, כמו פחמן דו-חמצני, מתאן ודו-חנקן חמצני, שנפלטות בקצב הולך ועולה מפעילויות אנושיות כמו שרפת דלקי מחצבים, חקלאות וכריתת יערות.

שינוי האקלים, המשפיע על כל אזור בכדור הארץ, מסיט את כדור הארץ ממצב האקלים היציב שהיה שרוי בו בעשרת אלפים השנים האחרונות ומעלה את התדירות, העוצמה והמשך של אירועי אקלים קיצוניים, כמו גלי חום, אירועי גשם ובצורות. נוסף על כך, ההתחממות גורמת לירידה בצמיחת התפוקה החקלאית ומאיצה את קצב המסת הקרחונים, תהליך המוביל לעלייה מהירה של פני הים.

נוסף על היותו גז חממה, לעליית ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה יש השפעות נוספות על המערכות היבשתיות והימיות. ספיגתו המוגברת על ידי הצמחייה היבשתית, שהובילה עד היום לתהליך של "התיירקות כדור הארץ" (global greening), הגיעה לרוויה, ותרמה להפרת האיזון

מילות מפתח

אירועי אקלים קיצוניים, אפקט החממה, החמצת אוקיינוסים, נקודות מפנה אקלימיות, פחמן דו-חמצני

מבוא – כדור הארץ מתחמם

שמניע את המעברים של כדור הארץ בין מצבי אקלים שונים הוא שינוי במאזן הקרינה הפלנטרי. שינויים במאזן הקרינה נובעים משינוי בכמות הקרינה האלקטרומגנטית קצרת-גל המגיעה מהשמש ליחידת שטח (ביחידות של וואט למ"ר) או משינוי בכמות הקרינה ארוכת-הגל שנפלטת מפני השטח לחלל החיצון. עודפי אנרגיה בעקבות עלייה בכמות הקרינה קצרת-הגל או ירידה בכמות הקרינה ארוכת-הגל יובילו בהכרח להתחממות הימים והיבשות. כמות הקרינה קצרת-הגל נקבעת בעיקר על ידי גורמים טבעיים, כמו עוצמת קרינת השמש הפוגעת בפני השטח, ומידת ההחזר שלה לאחר פגיעתה במשטחים (אפקט האלֶבְדו). לעומת זאת, כמות הקרינה ארוכת-הגל הנפלטת מפני השטח שמצליחה להגיע לחלל מווסתת על ידי ריכוז גזי החממה באטמוספירה, המושפע מפעילות אנושית, בתהליך שנהוג לכנות "אפקט החממה". בעוד האילוצים הקרינתיים הטבעיים נותרו ללא שינוי ב-150 השנים האחרונות, התחממות כדור הארץ מאז תחילת העידן התעשייתי משויכת לעלייה בריכוז האטמוספרי של גז החממה פחמן דו-חמצני (CO₂) (וברמה פחותה גם של מתאן (CH₄) ודו-חנקן חמצני (N₂O)). גזי החממה בולעים את הקרינה ארוכת הגל הנפלטת מפני שטח כדור הארץ, ובכך הצטברותם באטמוספירה מגבירה את אפקט החממה וגורמת לעלייה בטמפרטורה הממוצעת העולמית (איור 1).

העלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני קשורה ישירות לפעילות אנושית אשר הביאה לפליטה של 2,500 מיליארד טונות פחמן דו-חמצני מאז המאה ה-19 ועד היום (Friedlingstein et al., 2020). הפליטות הנרחבות תרמו לעלייה של כ-50 אחוזים בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה, מערך של 280 חלקים למיליון בעידן הקדם-תעשייתי ועד לערך של 410 חלקים למיליון כיום. ההערכות כיום הן שהערך הנוכחי הוא הגבוה ביותר מאז תקופת הפליוקן (Pliocene) שהסתיימה לפני 2.5 מיליון שנים (IPCC, 2021).

במקביל לעלייה בפחמן הדו-חמצני נצפתה עלייה דרמטית גם בערכי גזי החממה המשניים – מתאן וחנקן דו-חמצני. מתאן עלה ב-156 אחוזים משנת 1850 (והגיע עד לערכים של 1,866 חלקים למיליארד) וחנקן דו-חמצני עלה ב-23 אחוזים (והגיע עד לערכים של 332 חלקים למיליארד). אלה ערכים חסרי תקדים לפחות ב-800 אלף השנים האחרונות, וייתכן שאף יותר מכך (IPCC, 2021). למעשה, הנתונים שנאספו בעשורים האחרונים מראים כי פעילות אנושית אחראית ל-100 אחוזים מעודף החום שנאגר בכדור הארץ מ-1850 ועד היום (IPCC, 2021).

ניתן לשייך כ-70 אחוזים מההתחממות לפחמן דו-חמצני שנפלט משרפת דלקים, כמו נפט, פחם וגז, עשרה אחוזים נוספים לפחמן דו-חמצני שנפלט בשל שינוי ייעודי קרקע וכריתת יערות, 20 אחוזים לפליטות מתאן מכלל המקורות האנושיים, ועוד כ-8 אחוזים לפליטות חנקן דו-חמצני

טמפרטורת פני השטח בכדור הארץ נמצאת במגמת עלייה מאז תחילת העידן התעשייתי. בשנת 1988 החליטו הארגון המטאורולוגי העולמי וארגון הסביבה של האו"ם על הקמת פאנל בין-ממשלתי לשינוי האקלים (Intergovernmental Panel on Climate Change), שירכז את הידע המדעי העדכני בנושא האקלים. מאז, ה-IPCC מפרסם דו"ח אחת לחמש עד שבע שנים. הדו"ח האחרון מתבסס על מעל 14 אלף מאמרים מדעיים שעברו ביקורת עמיתים, ועולה ממנו כי בין השנים 1850–1900 לבין השנים 2011–2020 עלתה הטמפרטורה העולמית ב-1.1°C (IPCC, 2021).

עליית הטמפרטורה הביאה את כדור הארץ למצב החם ביותר מאז העידן הבין-קרחוני האחרון (Eemian period) שהסתיים לפני 115 אלף שנים (IPCC, 2021) (איור 1). כשני שלישים מההתחממות התרחשו מאז 1975, בקצב של 0.2°C לעשור (Lenssen et al., 2019). קצב התחממות זה גבוה פי עשרה בקירוב מקצב ההתחממות הטבעי של כדור הארץ במעברים בין תקופות קרח ותקופות בין-קרחוניות, המתרחשים באופן מחזורי ונובעים מהמסלול הטבעי של כדור הארץ סביב השמש במיליון השנים האחרונות (Gaffney and Steffen, 2017).

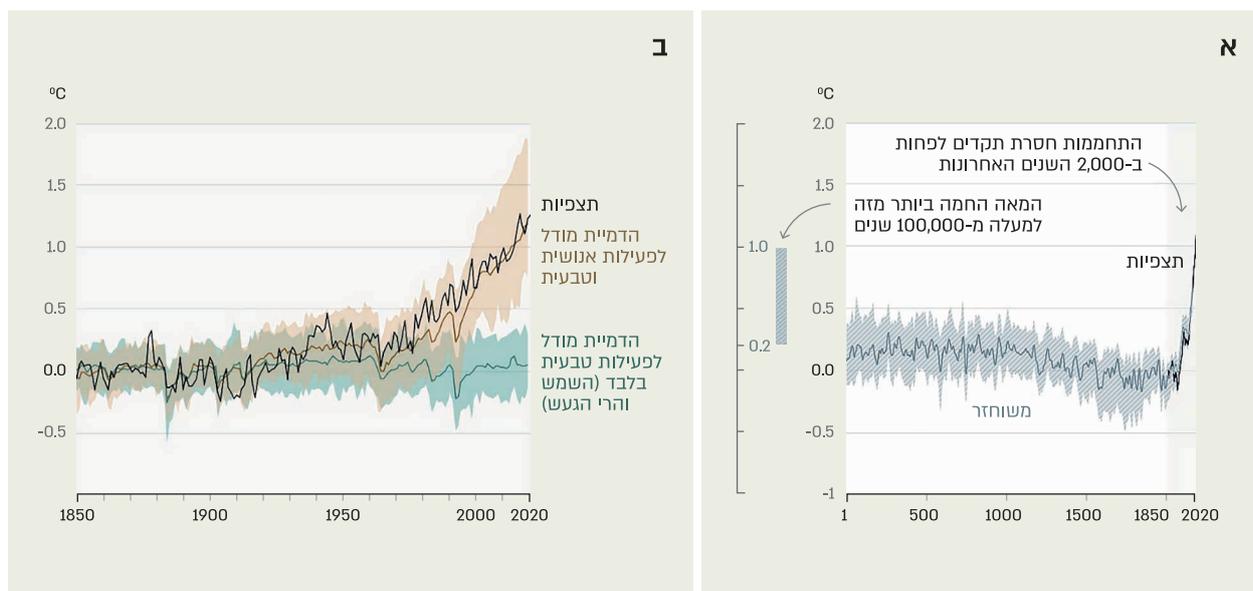
עליית הטמפרטורה הממוצעת מאז תחילת העידן התעשייתי אינה אחידה מבחינה מרחבית. באופן כללי, היבשה מתחממת בקצב מהיר יותר מהאוקיינוסים. הטמפרטורה הממוצעת ביבשה עלתה ב-1.59°C לעומת עלייה מקבילה של 0.88°C בים בהשוואה לממוצע השנים 1850–1900 (IPCC, 2021).

קצב ההתחממות הממוצע אינו קבוע במרחב, ומשתנה מאזור לאזור. באופן כללי, הקטבים מתחממים בקצב מהיר יותר מאשר האזורים הטרופיים וקווי הרוחב הנמוכים. קצב ההתחממות הגבוה ביותר נמדד באזור הארקטי, עם התחממות של כמעט 2.5°C מעל הממוצע של השנים 1850–1900, קצב המהיר פי שניים עד שלושה מההתחממות העולמית הממוצעת (Thoman et al., 2020).

לפי דו"ח השירות המטאורולוגי הישראלי, מדינת ישראל התחממה ב-1.5°C בין השנים 1950–2020, בקצב עלייה ממוצע של 0.21°C לעשור. עם זאת, נתונים חדשים של השירות המטאורולוגי מראים כי מאז 1980 ישראל מתחממת בקצב של 0.54°C לעשור, קצב כמעט כפול מאשר קצב ההתחממות הממוצע בעולם בארבעת העשורים האחרונים.

אפקט החממה וההשפעה האנושית על האקלים של כדור הארץ

האקלים בכדור הארץ השתנה פעמים רבות בעבר. מה



איור 1

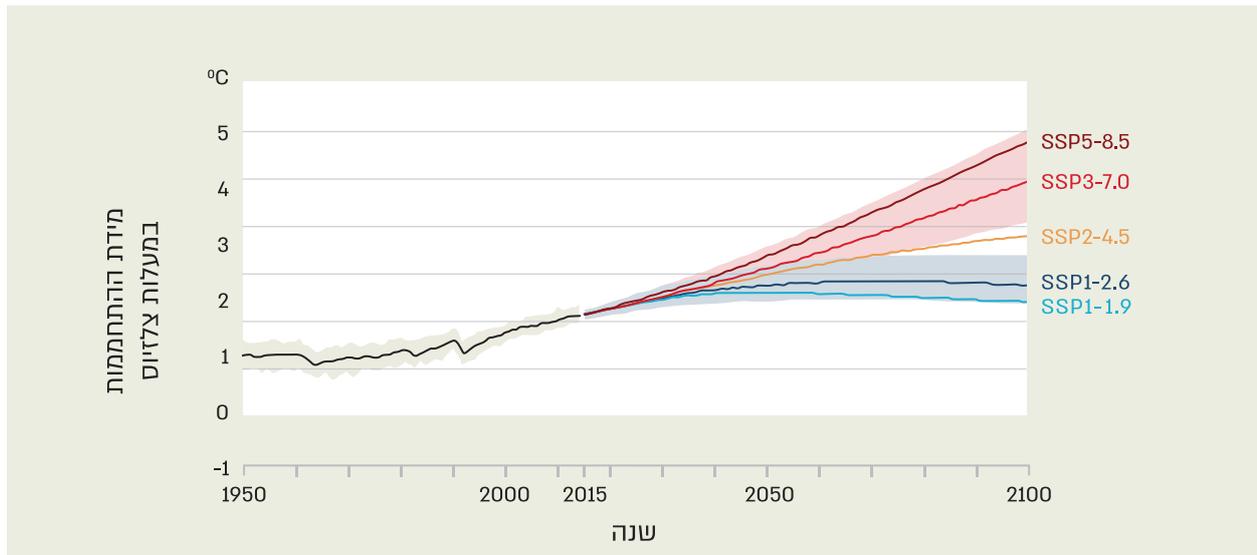
שינוי בטמפרטורת פני השטח הגלובלית (ב-°C) ביחס לרמות שנמדדו בשנים 1850–1900

א. שינוי בטמפרטורת פני השטח העולמית (ממוצע של עשור) מנתונים משוחזרים (בין השנים 1850–1) ומדודים (בין השנים 1850–2020).
 ב. שינוי בטמפרטורת פני השטח העולמית (ממוצע שנתי) שנמדדה בפועל (קו שחור) או הוערכה בעזרת הדמיית מודל המבוסס על אילוצים קרינתיים אנושיים וטבעיים (חום) או על אילוצים קרינתיים טבעיים בלבד (ירוק).
 מקור: דו"ח ההערכה השישי של ה-IPCC (IPCC, 2021).

ההשפעות של עליית הטמפרטורה על מערכות כדור הארץ

לעליית הטמפרטורה העולמית יש השפעות נרחבות על כל המערכות בכדור הארץ. נתוני אקלים שסוכמו בדו"ח ה-IPCC האחרון מראים כי בעשורים האחרונים ישנה עלייה דרמטית בגלי חום קיצוניים, באירועי גשם קיצוניים ובבצורות ברוב אזורי העולם, וכי ברוב המקרים ניתן לשייך את ההשפעה האנושית על האקלים לאירועי הקיצון שנצפו (IPCC, 2021). התחזיות הן שהתדירות והעוצמה של אירועי האקלים הקיצוניים יגברו בהתאם לעלייה בטמפרטורה הגלובלית, כתלות בקצב פליטות גזי החממה. בעקבות זאת, מדענים צופים כי כדור הארץ יעבור שינויים הידרולוגיים, אקלימיים ואקולוגיים נרחבים בכל היבשות והאוקיינוסים. לדוגמה, דו"ח ה-IPCC האחרון מצא כי בתרחיש התחממות של 1.5°C עד סוף המאה התדירות של אירועי חום המתרחשים בתדירות של פעם ב-50 שנה צפויה לעלות פי 8.6 לעומת התדירות הממוצעת שלהם בשנים 1850–1900, וכי 39.2 בתרחיש התחממות של 4°C (IPCC, 2021). נוסף על כך, נתונים חדשים מראים כי התדירות של אירועי חום שוברי שיאים היסטוריים צפויה לגדול עד פי 7 בין שנת 2021 לשנת 2050 ואף להתגבר עד פי 21 בין 2051 ל-2080 (Fischer et al., 2021).

מפעילות חקלאית. את השארית ניתן לשייך לפליטות גזים הלונגניים ולפליטות אוזון ממקור אנושי (IPCC, 2021). בעוד שקצב פליטות גזי החממה ממקורות אנושיים התגבר משמעותית לאחר מלחמת העולם השנייה ועלה בהדרגתיות עם התיעוש המואץ בעולם מתקופה זו, בשנים האחרונות נצפית התמתנות בעלייה של קצב הפליטות העולמי השנתי, והוא התייצב על כ-40 מיליארד טונות שווה ערך כחמן דו-חמצני ($\text{CO}_2\text{-eq}$) (IPCC, 2021). מאחר שקצב פליטות גזי החממה העתידי יקבע את קצב התחממות כדור הארץ ואת ההשפעות העתידיות של שינוי האקלים על האדם והטבע, מדענים מדיסציפלינות שונות יצרו חמישה תרחישים עתידיים עם רמות פליטת גזי חממה משתנות, התלויות בסט תרחישים דמוגרפיים, כלכליים, חברתיים, פוליטיים וטכנולוגיים (Shared Socioeconomic Pathways, SSP). לפי תרחיש הפליטות הנמוך, המביא בחשבון הפחתה חדה בפליטות גזי החממה כבר בעשור הקרוב (SSP1), עליית הטמפרטורה בכדור הארץ בסוף המאה הנוכחית לעומת הערך ממוצע של 1850–1900 תהיה בין 1.5°C ל- 2°C (בהתאם לקצב הפחתת הפליטות). לעומת זאת, לפי תרחיש הפליטות הגבוה, המנבא המשך צמיחה כלכלית מבוססת כחמן ללא מאמץ עולמי להפחתת פליטות (SSP5), טמפרטורת כדור הארץ תעלה במוצע ב- 4.5°C עד סוף המאה (איור 2) (IPCC, 2021).



איור 2

שינוי בטמפרטורת פני השטח הגלובלית עד סוף המאה (ב-°C) ביחס לרמות שנמדדו בשנים 1850–1900 לפי חמשת תרחישי האקלים השונים (SSP1–SSP5)

הקיום הצבעוניים מייצגים את הערך הממוצע שהתקבל בהרצת כל הדמיות האקלים השונות, והשטחים הצבועים מייצגים את הערכים שהתקבלו ב-90 אחוזים מהסימולציות. הקו השחור מייצג את הטמפרטורות המדודות מ-1950 ועד 2020. המספרים מייצגים את מספר התרחיש (1–5) ואת רמת האילוץ הקרינתי בכל תרחיש (בטווח של 1.9–8.5, בוואט למ"ר). מקור: דו"ח ההערכה השישי של ה-IPCC (2021).

עליית הטמפרטורה והתגברות קצב אידוי המים בשילוב עם צפי למרווחים הולכים וגדלים בין אירועי גשם צפויים להגביר את קצב התייבשות הקרקע וכך את התדירות והמשך של בצורות. התדירות של בצורות המתרחשות פעם בעשור צפויה להתגבר פי 2 בתרחיש התחממות של 1.5°C, ופי 4.1 בתרחיש התחממות של 4°C (IPCC, 2021).

נוסף על העלייה החזויה באירועי אקלים קיצוניים, עליית הטמפרטורה הגבירה באופן דרמטי את קצב המסת הקרח שנמצא מחוץ למים ובתוכם במדפי הקרח הגדולים בגרינלנד, בקרחונים היבשתיים ובים הקרח הארקטי, וזאת על סמך השוואת המצב כיום למדידות מהימנות מתחילת שנות ה-70 של המאה שעברה ואילך. קצב המסת הקרחונים צפוי להתגבר משמעותית בכל האזורים עם המשך עליית הטמפרטורה העולמית ואף להמיס לחלוטין את כיסוי הקרח בים הארקטי כבר משנת 2050 בכל תרחיש של עלייה מעל ב-2°C (SSP2-SSP5).

לפי מנהל האוקיינוסים והאטמוספירה הלאומי האמריקאי (NOAA), העלייה בקצב המסת הקרחונים (יחד עם ההתפשטות התרמית של מי הים המתחממים) תרמה לעלייה של 21–24 ס"מ בכני הים מאז 1880. פני הים צפויים לעלות יחד עם עליית הטמפרטורה העולמית בכ-50 ס"מ בתרחיש פליטות נמוך, וכמעט ב-100 ס"מ בתרחיש פליטות גבוה.

נוסף על אירועי חום קיצוני, העלייה בטמפרטורה העולמית הממוצעת מגבירה את קצב אידוי המים וכך מגדילה את האחוז שלהם באטמוספירה. למעשה, כמות אדי המים באטמוספירה צפויה לגדול בכ-7 אחוזים לכל מעלת התחממות, מה שיוביל לעלייה בכמות המשקעים הכללית בכדור הארץ וכן להתגברות אירועי גשם קיצוניים והצפות (IPCC, 2021). התדירות של אירועי גשם קיצוניים המתרחשים בתדירות של פעם בעשור צפויה להתגבר פי 1.5, ועוצמתם צפויה להתגבר ב-10.5 אחוזים בתרחיש התחממות של 1.5°C. לעומת זאת, בתרחיש התחממות של 4°C תדירות אירועי גשם קיצוניים צפויה לעלות פי 2.7, יחד עם התגברות של 30.2 אחוזים בעוצמת הגשם (IPCC, 2021). העלייה בכמות המשקעים לא צפויה להיות אחידה בזמן ובמרחב. בעוד כמויות המשקעים צפויות לעלות משמעותית בקווי הרוחב 60–90 צפון ודרום – באזור הסהל, באזור המפרץ הפרסי ובמערב הודו, הפחתה משמעותית בכמויות המשקעים צפויה באגן הים התיכון ובאזור האמזונס (IPCC, 2021).

השירות המטאורולוגי הישראלי מדווח על הפחתת משקעים בקצב של כ-25 מ"מ בעשור ב-30 השנים האחרונות (ללא מובהקות סטטיסטית) וחוזה כי כמות המשקעים תפחת בכ-15 עד 25 אחוזים עד סוף המאה לעומת הממוצע של 1961–1990, בהתאם לתרחישי ההתחממות השונים.

זרחן וברזל, אינו עולה באותו הקצב כמו העלייה בריכוז הפחמן (Loladze, 2002). ההערכות הן כי חוסר האיזון הזה יפגע לא רק בקצב הצמיחה, אלא גם בערך התזונתי שיש לחומר הצמחי לשאר המינים הניזונים ממנו. לכן, הפער שנוצר ביחס שבין הפחמן לזרחן ולחנקן עלול להיגרר מהיצרנים הראשוניים למינים נוספים במעלה שרשרת המזון, וכן להשפיע על הרכב החומר האורגני בקרקע ואף לשנות את ההרכב הכימי של מערכות אקולוגיות שלמות.

נוסף על כך, הדישון בפחמן דו-חמצני השפיע באופן ניכר על ההרכב הכימי של גידולים חקלאיים רבים ברחבי העולם. עדויות רבות מראות כי בעוד קצב הצמיחה של גידולים רבים הואץ עם העלייה בריכוז האטמוספרי של פחמן דו-חמצני, כמעט בכל הגידולים שנבדקו ישנה ירידה דרמטית בריכוז החלבונים והוויטמינים וכן בריכוז של יסודות חיוניים לתזונה האדם, כמו ברזל, אבץ וסידן (Myers et al., 2014). תופעה זו מעצימה את אפקט "הרעב הנסתר", המתאר את הירידה בערך התזונתי של דגנים רבים עקב דילול הריכוז של יסודות חיוניים לתזונה האנושית, כמו אבץ וברזל, במדינות כמו הודו, שהתזונה בהן מבוססת פחמימות (Müller et al., 2014). למרות זאת, ההיבט החקלאי של תופעת הדישון בפחמן דו-חמצני אינו מקבל את תשומת הלב הראויה בקרב מדענים ובקרב מקבלי ההחלטות, בוודאי אם מניחים כי הירידה בערך התזונתי של גידולים רבים תתעצם עוד יותר בעקבות העלייה הצפויה בריכוז האטמוספרי של הפחמן הדו-חמצני. במקביל להשלכות האקולוגיות ביבשה, לעלייה בריכוז האטמוספרי של פחמן דו-חמצני יש השלכות נרחבות על הים, מאחר שעודפי הפחמן שנספגים באוקיינוסים מובילים לשינוי בהרכבו הכימי ולירידה בחומציות מי הים, תהליך שמכונה "החמצת האוקיינוסים" (ocean acidification).

בעקבות תהליך זה ערך ההגבה (pH) הממוצע של מי הים נמצא בירידה מתמדת מאז העידן הקדם-תעשייתי ועד היום, מערך של 8.20 עד לערך של 8.07 (Jiang et al., 2019). בתרחיש פליטות נמוך, חומציות מי הים צפויה לרדת לערך pH של 8.0 עד סוף המאה ואף להגיע לערך של 7.65 בתרחיש פליטות גבוה (IPCC, 2021).

להחמצת האוקיינוסים יש השפעה אקולוגית נרחבת על המערכת הימית. התמוססות עודפי הפחמן האטמוספרי במי הים מקשה על תפקודם של אורגניזמים ימיים רבים, ובראשם האלמוגים, מאחר שעלייה בערך ה-pH של מי הים משבשת את יכולתם להשקיע את השלד המינרלי שלהם.

תופעת החמצת האוקיינוסים, בשילוב עם העלייה ההדרגתית בטמפרטורת מי הים ועם תדירות גלי החום הימיים, מגדילה את תופעת הלבנת האלמוגים (coral bleaching) המאיימת על שרידות שוניות האלמוגים ברחבי העולם, תהליך שצפוי להתגבר לכדי פגיעה בעד כ-90 אחוזים מהאלמוגים עד שנת 2100 בתרחיש הפליטות הנמוך או להוביל להכחדתם המוחלטת בתרחיש הפליטות

עם זאת, עליית הטמפרטורה והשינויים במשטר הגשמים צפויים לחשוף אזורים רבים לתנאי אקלים קיצוניים שעלולים לפגוע באופן חד במגוון המינים. תחזיות עדכניות מראות כי בתרחיש פליטות גבוה כ-15 אחוזים משטח בכדור הארץ צפויים להיחשף לתנאי אקלים קיצוניים שיפגעו במעל 20 אחוזים מהמינים. הפגיעה החדה ביותר במגוון המינים צפויה להתרחש במערכות טרופיות ימיות ויבשתיות, ובחלק מהן יש סכנה לאובדן מהיר של כ-90 אחוזים מהמינים בתוך 50 שנים (Trisos et al., 2020). עם זאת, ההשפעה על מגוון המינים צפויה להצטמק לכדי 2 אחוזים משטח כדור הארץ בתרחיש פליטות נמוך.

נוסף על ההשפעות האקלימיות והאקולוגיות, שינוי האקלים גובה מחירים חקלאיים כבדים. נתונים מהשנה האחרונה מצביעים על ירידה של כ-21 אחוזים במדד צמיחת התפוקה החקלאית הכוללת מאז שנות ה-60 של המאה שעברה. הפגיעה הגדולה ביותר נרשמה באזורים החמים, כמו אפריקה, המזרח התיכון, דרום אמריקה והאיים הקריביים, עם ירידה של בין 26 ל-34 אחוזים במדד צמיחת התפוקה החקלאית (Ortiz-Bobea et al., 2021).

"הבעיות האחרות" של הפחמן הדו-חמצני

רק כמחצית מהפחמן שנפלט מפעילות אנושית מצטבר באטמוספירה. 27 אחוזים מהפחמן האנושי נספגים בסופו של דבר בביוספירה היבשתית, ו-23 אחוזים נוספים נספגים באוקיינוס (Friedlingstein et al., 2020). אי לכך, כמות הפחמן הכללית בצמחייה היבשתית, בקרקעות ובאוקיינוסים עלתה בשיעורים גדולים מאז 1750 ועד היום. תהליך ספיגת עודפי הפחמן בצמחייה נקרא "אפקט הדישון בפחמן דו-חמצני" (CO₂ fertilization effect). תהליך זה העלה את כמות הביומסה היבשתית באזורים רבים בכדור הארץ מאז אמצע המאה שעברה, והוביל להתיירקות כדור הארץ (global greening). לצד זאת, עדויות אחרונות מראות כי אפקט הדישון בפחמן דו-חמצני התמתן משמעותית בארבעת העשורים האחרונים, וכנראה הגיע לרוויה בגלל מגבלות של מים וזמינות חומרי הזנה כמו חנקות וזרחות (Wang et al., 2020). בעקבות זאת, מדענים צופים כי העלייה בספיגת הפחמן הדו-חמצני הנפלט ממקורות אנושיים על ידי הצמחייה היבשתית צפויה להאט, מה שצפוי להגביר את קצב הצטברות הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה (IPCC, 2021).

נוסף על השפעתו על הריכוז האטמוספרי של הפחמן הדו-חמצני, לאפקט הדישון בפחמן דו-חמצני יש השפעות אקולוגיות נרחבות. ההשפעה המרכזית נובעת מחוסר איזון שנוצר בצמחייה בשל התגברות קצב קיבוע הפחמן, מאחר שהריכוז של שאר היסודות החיוניים לצמחים, כמו חנקן,

לפי דו"ח ה-IPCC האחרון, עצירת ההתחממות העולמית הממוצעת מתחת לסף של 1.5°C עד סוף המאה דורשת הפחתה של כ-50 אחוזים בפליטות גזי החממה ממקורות אנושיים עד שנת 2030 בדרך לאיפוסן המוחלט עד לשנת 2050. איפוס הפליטות דורש מעבר לכלכלה נטולת-פחמן, ועובר דרך יעול דרמטי של השימוש באנרגיה והגדלה ניכרת בפיתוח מקורות אנרגיה דלי-פחמן ושימוש בהם עד לכדי מצב שבו כמעט כל צריכת האנרגיה העולמית תגיע ממקורות כמו שמש, רוח, מים וגרעין. לפי סוכנות האנרגיה הבין-לאומית (IEA), מהפכה כזו דורשת השקעה כלכלית שמוערכת בכ-4.2 טריליון דולר בשנה, ובזמן טומנת בחובה יתרונות כלכליים ובריאותיים, למשל כאלה הנובעים מהפחתה בזיהום האוויר הנגרם משרפת דלקים. בד בבד עם המעבר לאנרגיות דלות-פחמן, העמידה ביעדי האקלים מחייבת הגדלה של שאיבת הפחמן מהאטמוספירה תוך שימוש בפתרונות מבוססי טבע או בפתרונות מלאכותיים. מתוך הפתרונות הקיימים, נטיעת יערות ויעור מחדש (afforestation and reforestation) הם אחת הדרכים היעילות, הזולות והזמינות ביותר להורדת ריכוז הפחמן הדו-חמצני האטמוספרי, מאחר שהרחבת השטח המיוער תעלה את אגירת הפחמן הדו-חמצני במערכות היבשתיות (Doelman et al., 2020). נטיעת יערות חדשים ושיקום יערות הם הפתרון עם פוטנציאל ההשפעה הגדול ביותר מבין כל פתרונות שאיבת הפחמן הקיימים, ויש לו פוטנציאל ספיחת פחמן שנע מ-0.5 ועד 10.1 מיליארד טונות שווה ערך פחמן דו-חמצני ($\text{CO}_2\text{-eq}$) לשנה, שהוא בין אחוז ורבע לכ-25 אחוזים מכמות הפחמן השנתית הנפלטת מפעילות אנושית (IPCC, 2019). נוסף על כך, יש להביא בחשבון כי הרחבת השטח המיוער דורשת שימוש במשאבים, מאיימת על הביטחון התזונתי באזורים מסוימים, וכן יש לה השפעות ישירות על האקלים בשל הפרת מחזור המים ושינוי רמות האלבודו של כדור הארץ (IPCC, 2019).

לסיכום, עמידה ביעדי האקלים (שנוסחו בוועידת האקלים בפריז ב-2015 ואושרו מחדש בוועידת האקלים בגלזגו בשנת 2021) הדרושים לשם עצירת ההתחממות העולמית הממוצעת מתחת לסף של 2°C תלויה בהפחתה ניכרת בפליטות גזי החממה ממקורות אנושיים כבר בעשור הקרוב ובהגברת קצב שאיבת הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה תוך שימוש בפתרונות טבעיים שונים.

הגבוה (IPCC, 2021). ההשלכות האקולוגיות של פגיעה בשוניות האלמוגים צפויות להיות נרחבות, היות ששוניות האלמוגים מתפקדות כמוקד אקולוגי ימי ומספקות מזון ומחסה לאורגניזמים ימיים רבים.

האם יש דרך לעצור את הקטסטרופה האקלימית? הגבלת התחממות ל- 1.5°C ותפקיד היערות

כל התופעות האקלימיות האקולוגיות המוזכרות במאמר זה צפויות להתגבר עם עליית ריכוז גזי החממה באטמוספירה ולגבות מחירים אנושיים כבדים. עליית פני הים צפויה להוביל לאובדן אזורי מחיה רבים ולפגוע במאות מיליוני אנשים החיים באזורים עירוניים צפופים בקרבת הים. המשך העלייה בטמפרטורה העולמית צפוי להגביר את הכשלים בתפוקה החקלאית ולהוביל לאי-סדירות באספקת המזון באזורים רבים בשל התגברות העוצמה והתדירות של גלי חום, אירועי גשם קיצוניים ובצורות. סך ההשפעות של שינוי האקלים על בני האדם עלול להביא למעבר המוני של אוכלוסיות מאזורים פגיעים אקלימית לאזורים פחות, לפגיעה בצמיחה הכלכלית העולמית, להגברת התדירות והעצימות של סכסוכים מקומיים ובין-לאומיים עקב התדלדלות המשאבים ולפגיעה באזורי המחיה, ובסופו של דבר להוביל לחוסר יציבות חברתית ופוליטית כולל. המוסכמה המדעית המקובלת היא שמניעת שינוי אקלים בלתי הפיך בעל השלכות קטסטרופליות על החברה האנושית דורשת את הגבלת עליית הטמפרטורה העולמית עד סוף המאה בלא יותר מ- 2°C מהמוצע של 1850–1900, תוך הפעלת מאמץ עולמי כולל לעצירת התחממות בלא יותר מ- 1.5°C . עצירת ההתחממות מתחת לסף זה תאט או אף תמנע לחלוטין את החציה של נקודות מפנה אקלימיות (tipping points), כגון האצה בהמסה של הקרח מעל פני המים ומתחת להם בגרינלנד, בים הארקטי ובאנטארקטיקה, קריסת יערות האמזונס, קריסת היערות הצפוניים (boreal), המסת קרקעות קפאית-עד (permafrost) באזורים התת-ארקטיים ועצירת סירקולציית המים המרידוניאלית האטלנטית (AMOC). חציית נקודות מפנה אלה עלולה להניע שרשרת של משובים חיוביים שישנו את אקלים כדור הארץ באופן בלתי הפיך (Lenton et al., 2019).

מקורות

Fischer E, Sippel S, and Knutti R. 2021. Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nature Climate Change*, 11(8), 689–695.

Doelman JC, Stehfest E, van Vuuren DP, Tabeau A, Hof AF, Braakhekke MC, et al. 2020. Afforestation for climate change mitigation: Potentials, risks and tradeoffs. *Global Change Biology*, 26(3), 1576–1591.

- Lenton TM, Rockström J, Gaffney O, Rahmstorf S, Richardson K, Steffen W, and Schellnhuber HJ. 2019. Climate tipping points – too risky to bet against: Nature Publishing Group.
- Loladze I. 2002. Rising atmospheric CO₂ and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry. *Trends in Ecology & Evolution* 17(10), 457–461.
- Müller C, Elliott J, and Levermann A. 2014. Fertilizing hidden hunger. *Nature Climate Change*, 4(7), 540–541.
- Myers SS, Zanobetti A, Kloog I, Huybers P, Leakey AD, Bloom AJ, et al. 2014. Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, 510(7503), 139–142.
- Ortiz-Bobea A, Ault TR, Carrillo CM, Chambers RG, and Lobell DB. 2021. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 306–312.
- Thoman R, Richter-Menge J, and Druckenmiller M. 2020. *Arctic Report Card 2020*. Washington, DC: NOAA 10.
- Trisos CH, Merow C, and Pigot AL. 2020. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature*, 580(7804), 496–501.
- Wang S, Zhang Y, Ju W, Chen JM, Ciais P, Cescatti A, et al. 2020. Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science*, 370(6522), 1295–1300.
- Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Hauck J, Olsen A, et al. 2020. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269–3340.
- Gaffney O and Steffen W. 2017. The anthropocene equation. *The Anthropocene Review*, 4(1), 53–61.
- IPCC. 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. [Shukla P, Skea J, Calvo Buendia E, Masson-Delmotte V, Pörtner H, Roberts D, et al. (Eds)]. Cambridge University Press.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors CP SL, Berger S, Caud N, et al. (Eds)]. Cambridge University Press.
- Jiang L, Carter B, Feely R, Lauvset S, and Olsen A 2019. Surface ocean pH and buffer capacity: Past, present and future. *Scientific Reports*, 9, 18624.
- Lenssen NJ, Schmidt GA, Hansen JE, Menne MJ, Persin A, Ruedy R, and Zyss D. 2019. Improvements in the GISTEMP uncertainty model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(12), 6307–6326.



יער המלאכים (יער שחריה), שניטע בשנות ה-50, ממוקם כ-4 ק"מ ממזרח לקרית גת בצפון הנגב. היער הפך מיער אורנים חד-גילי ליער מגוון רב-גילי. אפריל 2021
צילום ממשוק: גיל סיאקי



התמודדות יערות עם שינוי האקלים ההדרגתי ועם אירועי קיצון: התייחסות לעולם והתמקדות בישראל

יקיר פרייזלר¹ * | יותם זית²

- 1 אוניברסיטת הרווארד, מסצ'וסטס, ארה"ב
 - 2 המכון למדעי הצמח וגנטיקה בחקלאות, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות
- * ypreisler@seas.harvard.edu

תקציר

לעומת תגובתם לאירועי קיצון המתרחשים בפתאומיות (כגון גלי חום). שיטות מדידה וגישות מחקריות העוזרות בהבנת התמודדות היערות עם שינוי האקלים ורלוונטיות לישראל הוצגו גם כן. אנו מציעים כי מאחר שהמערכת היערנית בישראל מורכבת ביותר ונמצאת בתנאי עקה מתמשכים, יש צורך בגישה ממשקית ומחקרית כירורגית, הבוחנת את העץ או היער בעזרת כלים מתוחכמים ומדויקים, ומשלבת ניטור ארוך טווח ושימוש מתכלל בטכנולוגיות חדשניות. שילוב זה הכרחי לצורך זיהוי מוקדם של מגמות שליליות ומאפשר התערבות ממשקית מוקדמת במידת הצורך.

העלייה בטמפרטורה הממוצעת ובתכיפות אירועי קיצון ובחומרתם בעקבות שינוי האקלים מהווה איום משמעותי על הישרדותם של יערות העולם. עקב שינוי תנאי האקלים צפויות תמורות בהרכב המינים, בצפיפות היער ובאספקת שירותי המערכת האקולוגית בבתי גידול שונים. כדי לצמצם את הנזקים של שינוי האקלים על היערות, ישנה חשיבות מכרעת בהבנת האקופיזיולוגיה של מיני הצומח בבתי הגידול השונים, ותכנון ניהול היער בהתאם. המחקר היערני-אקופיזיולוגי בישראל לאורך השנים מתקדם ביותר ובעל חשיבות רבה במחקר העולמי בעיקר לנוכח שינוי האקלים, שכן אזורים נרחבים בעולם יהפכו יבשים וחמים יותר. עם זאת, עדיין קיימים פערי ידע בהבנה אילו מינים מתמודדים טוב יותר עם תנאים משתנים, ואילו תכונות דרושות לכך במערכות יערניות, בעיקר באזורים יובשניים. במאמר סקירה זה אנו מציעים כיצד עקות אביוטיות, כגון טמפרטורות גבוהות, שנות בצורת, יובש אוויר, עלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני ושטפי קרינה גבוהים, מגבילות את הצמיחה, את כושר ההישרדות ואת ההתחדשות של יערות בארץ ובעולם. נוסף על כך, התייחסנו ליכולת של עצי יער להגיב לשינויים הדרגתיים בסביבה המתרחשים בטווח זמן ארוך,

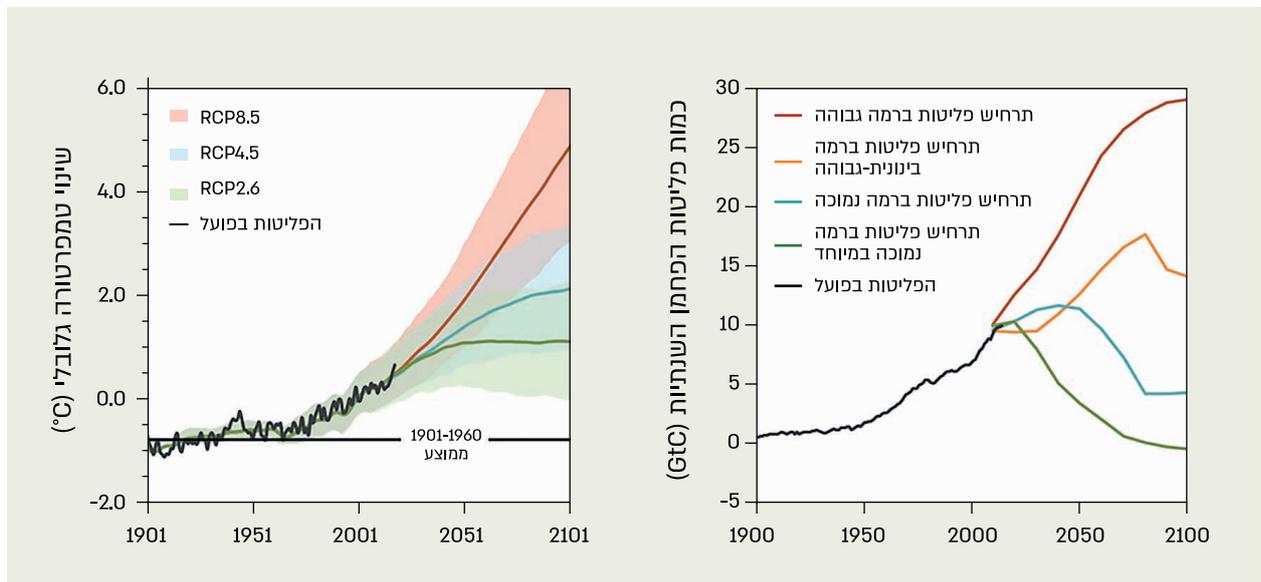
מילות מפתח

אקופיזיולוגיה, בצורת, גלי חום, ממשק, משקעים, ניטור, עליית טמפרטורות, שיטפונות

התחממות כדור הארץ, וההשפעה על יערות בארץ ובעולם

תלויה ביכולת ההתאמה והתגובה של העצים לעלייה הדרגתית בטמפרטורות ולשינוי בממוצע המשקעים, וכן בתגובתם לאירועי קיצון (Niinemets, 2010). יכולת התאמה זו תלויה במספר גורמים: מועד ההתחממות מבחינת עונות השנה והשלב ההתפתחותי של העץ (אונטוגני ופנולוגי), הטמפרטורה המיטבית לגדילתו של העץ (תלוי מין), זמינות מים וחומרי הזנה, תכונות עמידות ליובש וכן תגובת העץ לעלייה בריכוז ה- CO_2 (Way and Oren, 2010). למרות ההתייחסות הרבה לשינוי ההדרגתי, ייתכן שדווקא לעוצמת אירועי הקיצון עשויה להיות השפעה משמעותית אף יותר על הישרדות היערות בעולם, מאחר שיכולת העץ להגיב לשינויים פתאומיים ובעלי עוצמה פחותה מיכולת ההתאמה ההדרגתית. עליית טמפרטורת האוויר הממוצעת, ירידה בזמינות המים, עוצמות קרינה גבוהות ועלייה קצרת מועד, פתאומית וקיצונית בטמפרטורות (גלי חום) הן הגורמים האביוטיים העיקריים שהשפעתם צפויה להחמיר עם שינוי האקלים. מאחר שבדרך כלל עקות אלה מופיעות יחד (Vargas Zeppetello et al., 2020), הבנת התגובה של מערכות אקולוגיות יערניות לשינוי האקלים דורשת ידע אקופיזיולוגי מעמיק של המינים הקיימים במערכת. במאמר זה נסקור כיצד עצים מגיבים לעקות אקלימיות שונות, כיצד ניתן למדוד ולנטר תגובות אקופיזיולוגיות של

עליית ריכוז גזי החממה באטמוספירה עקב שרפת דלקי מחצבים מובילה לשינוי אקלים, המתבטא בעיקר בעליית טמפרטורות ובעלייה באירועי קיצון אקלימיים ברחבי העולם (IPCC, 2021). הטמפרטורה העולמית הממוצעת עלתה בכ-1.1 מעלות צלזיוס בעשור האחרון (1.6 מעלות ביבשה) וצפויה לעלות בכ-4 מעלות עד שנת 2100 כתלות בתרחישי פליטות הפחמן הדו-חמצני (CO_2) (איור 1). במאה השנים האחרונות עלתה הטמפרטורה הממוצעת באגן הים התיכון ב-1.5–4 מעלות, וצפוי שמתחילת המאה ה-21 ועד סופה היא תעלה בכ-1–6 מעלות (Alpert et al., 2008; Hochman et al., 2018). כמו כן, נרשמו ירידה בכמות המשקעים, שינוי במשטר הגשמים ועלייה בכמות אירועי הקיצון (Yosef et al., 2009; Shohami et al., 2011; Ziv et al., 2021; Drori et al., 2021; al., 2014; Yosef et al., 2019). כל אלה מובילים להגברת התדירות של שנות בצורת, גלי חום וקור ועלייה בעוצמת השיטפונות, כפי שהוצג לאחרונה בדו"ח האקלים החדש והמקיף של האו"ם (IPCC, 2021). מחקרים רבים שנערכו במגוון רחב של מיני עצים ביערות ברחבי העולם מראים כי תגובת היערות לשינוי האקלים



איור 1

תיעוד פליטות ה- CO_2 והטמפרטורות בשנים 1901–1960, ותחזית השינוי בטמפרטורות מהממוצע עד סוף המאה (שמאל) על פי תרחישים שונים של פליטות CO_2 (ימין)

הפליטות מוצגות בגיגה-טונות פחמן (GtC) לשנה. RCP8.5 הוא תרחיש של "עסקים כרגיל" – ללא הפחתת קצב הפליטות, ויביא ל-8.5 ואט למ"ר בשנת 2100; RCP6.0 (התייצבות על 6 ואט למ"ר בשנת 2100) מתייחס לתרחיש שבו תהיה יכולת להפחית את ההתחממות ואת רמת הפליטות לקראת שנת 2100 באמצעים טכנולוגיים; RCP4.5 (התייצבות על 4.5 ואט למ"ר בשנת 2100) ו-RCP2.6 (התייצבות על 2.6 ואט למ"ר) מתארים מצב של הפחתה משמעותית בכמות הפליטות, והטמפרטורה הממוצעת תעלה לכל היותר ב-2 מעלות עד 2100 (מעובד מתוך USGCRP, 2017).

חמה ויבשה בקיץ ובתקופה קרירה ורטובה בחורף. אחת התכונות המובהקות של אקלים זה היא תקופה קצרה מאוד בשנה (מספר שבועות באביב) שמתקיימות בה הטמפרטורה המיטבית לצמיחה וזמינות מים גבוהה. יכולת העץ לקיים צימוח בטמפרטורות גבוהות תלויה בעיקר ביעילות המערכת הפוטוסינתטית וביעילות הפעילות הקמביאלית (התאים העובריים שחלוקתם אחראית להתעבות הגזע) במועדי הלבול והצמיחה. המערכת הפוטוסינתטית רגישה לשינויים בטמפרטורה ותלויה בטמפרטורה המיטבית הייחודית למין. במיני עצים ים תיכוניים עליית הטמפרטורה בדרך כלל תגרום להגברת קצב הפוטוסינתזה, אך עלייה רבה מדי של הטמפרטורה עלולה לפגוע במערכת הפוטוסינתטית, בעיקר על ידי עיכוב תהליכים ביוכימיים, בעיקר אנזימטיים (Flexas et al., 2014). נוסף על כך, עצי יער הגדלים בתנאים של שטפי קרינה גבוהים צריכים לשמור על האיזון שבין ניצול מרבי של אנרגיית האור לקיבוע CO₂ לבין מזעור פוטנציאל הנזק הנובע מעירור יתר של המנגנונים הפוטוסינתטיים בעלים. השילוב של עודפי קרינה עם גורמי סביבה נוספים, בייחוד טמפרטורות נמוכות או גבוהות, יכול להוביל למצב של עיכוב פעילות המערכת הפוטוסינתטית בעיקר על ידי נזקי חמצון, שמובילים בסופו של דבר לירידה בייצור החומרים הנחוצים לקיום פעילות פיזיולוגית תקינה (photoinhibition). היכולת להיפטר מעודפי קרינה היא תכונה חשובה להתבססות ולהישרדות למיני עצים הגדלים באזורים יובשניים, כפי שהראו עבודות שנעשו על אורן ירושלים (Maseyk et al., 2019) ושיזף מצוי (*Ziziphus spina-christi*) (Zait and Schwartz, 2018). נוסף על כך, עלייה בטמפרטורה גורמת לעלייה בדרישה האטמוספירית להתאדות (ראו פירוט בהמשך) ומגבירה את קצב איבוד המים מהעלים בתהליך הדיות. על כן, היכולת של מיני עצים לשגשג בתנאים של התחממות עולמית תלויה ביכולתם לבצע שינויים הסתגולתיים (התאמות מבניות, פיזיולוגיות וביוכימיות) לעלייה ההדרגתית בטמפרטורה הממוצעת בטווח הזמן הארוך (ימים עד שנים), וליכולתם להגיב לשינויים קיצוניים בטמפרטורה (למשל לגלי חום) בטווח זמן קצר (דקות עד ימים בודדים).

אילו מיני עצי יער עמידים לשינויי טמפרטורה הדרגתיים?
מועד הפעילות הפיזיולוגית של עצים כתלות בטמפרטורה הממוצעת משתנה מעט כתלות במיקום הגאוגרפי ובזמינות המים. למשל, בעיר יתיר אורן ירושלים מקדים את שיא הפעילות שלו (גדילה, קצב קיבוע פחמן) מחודשי האביב והקיץ (באירופה) לחודשי החורף (באקלים צחיח למחצה), בשעה שהטמפרטורה היומית הממוצעת עומדת על כ-14 מעלות, וזמינות המים בקרקע גבוהה (Rotenberg and Wang et al., 2020; Yakir, 2010). נוסף על כך, נראה כי גם אם זמינות המים תהיה גבוהה לאורך כל השנה, ניכר

יערות לשינוי האקלים, אילו מאמצים נעשים בנידון, ואילו אמצעים קיימים כיום כדי להתמודד עם השפעת שינוי האקלים על היערות בעולם ובישראל. ניתן דגש לתגובת העצים הן לשינויים ההדרגתיים הן לאירועי הקיצון. נסקור כל גורם עקה בנפרד, ונבחן את התגובות הפיזיולוגיות של מגוון מיני עצים בבתי גידול שונים לעקות. נוסף על כך, נסכם את שיטות המדידה השונות הבוחנות את העץ הבודד, היער והמערכת האקולוגית, ותורמות להבנה מעמיקה יותר של תגובת העצים לשינוי האקלים.

השפעות שינוי האקלים על יערות ישראל

מרבית יערות ישראל מתאפיינים ביערות נטועים חד-מיניים (מחטניים בעיקר), בחורש ים תיכוני מגוון הכולל מספר רב של מיני עצים רחבי עלים, ובחלקות עם עצים מדבריים, כדוגמת שיטה ושיזף. בסקירה זו נעסוק בעיקר במין אורן ירושלים (*Pinus halepensis*) המהווה כמחצית מעצי היער בישראל, ובעצים רחבי עלים שונים המאכלסים את שאר השטח המיוער והחורש הטבעי (קק"ל, 2020). מרבית בתי הגידול של יערות ישראל חוו אירועי בצורת ונזקים שונים בעקבות שינוי האקלים. למשל, רוחות חורף קיצוניות שברו והפילו עצים באזור לכיש (סילבר ושות', 2021), שרפות יער והתפשטות מהירה של האש בכרמל ובהרי ירושלים (אסם ושות', 2021; Kutiel, 2011; Paz et al., 2012) נגרמו, בין השאר, בעקבות שילוב של יובש קרקע (שנבע ממחסור בגשמים) עם יובש האוויר, תמותת אלונים נרשמה בכרמל ובגולן (סבר ונאמן 2008; Koplek and Bar-Shalom, 2019), ותמותת אורנים עקב בצורת תועדה במרבית יערות ישראל (Dorman et al., 2013; Klein et al., 2019; Preisler et al., 2019). מאחר שעל פי תחזיות ומודלים אקלימיים שונים, אירועים כגון אלה צפויים להתגבר בעתיד (Alpert et al., 2008), התאמת מיני עצים ואקוטופים שונים שעמידים לתנאי אקלים משתנים והשבחת מינים בהתאם לתנאי הסביבה ולבית הגידול המיועד (Korol et al., 1995; Steinitz et al., 2011; Kremer et al., 2012; Riov et al., 2020; Houminer et al., 2021), יכולות לסייע לשיפור היצרנות וליכולת ההישרדות בתנאי עקה מתמשכת (קליין, 2019; Reisman-Berman et al., 2021).

תגובת יערות לעליית טמפרטורה ולגלי חום קיצוניים

השפעת עליית הטמפרטורה על תהליכים פיזיולוגיים
טמפרטורת הסביבה היא מרכיב אקלימי עיקרי המבדיל בין מערכות אקולוגיות שונות. יערות ישראל נמצאים באזורי האקלים הים תיכוני והצחיח למחצה, המאופיינים בתקופה

אלון התבור (*Q. ithaburensis*), אלה ארץ-ישראלית (*P. atlantica*) ואלה אטלנטית (*Pistacia palaestina*) (שילר, 2013). תופעה זו קיימת גם בעצים אוהבי חום שנחשפים לטמפרטורות נמוכות (נשירות מותנה), כדוגמת השיזף המצוי ושיטת הנגב (*Vachellia gerrardii*) (Danin, 1988). תופעה זו יכולה להוות חיסרון באזורים ים תיכוניים וצחיחים למחצה שבהם מרבית הגשמים יורדים במהלך החורף. השילוב של נשירת עלים בחורף עם קיץ יבש מוביל לכך שעצים נשירים מקבעים CO₂ במשך תקופה קצרה מאוד. במקרים מסוימים עלול להיווצר מאזן פחמן שלילי, כי העץ אינו מספיק להחזיר את ההשקעה בקיום צימוח ותחזוקה. מצד שני, במקרה של עליית טמפרטורות האוויר בחודשי החורף, הנשירות המותנה תיפסק, והעץ יתקיים כירוק-עד, דבר שיכול להוות יתרון אקולוגי.

תגובת עצי יער לשינויים קיצוניים בטמפרטורה

בשנים האחרונות נצפית גם עלייה בתדירות גלי החום (Stefanon et al., 2012; Schiermeier, 2018, 2019); (Schuldt et al., 2020), נוסף על עלייה בטמפרטורה הממוצעת (IPCC, 2018, 2021). תגובת עצי יער לגלי חום משתנה בין מינים ואזורים גאוגרפיים (Bamberger et al., 2017; Drake et al., 2018a; Schuldt et al., 2020). התמודדות מוצלחת של מיני עצים עם תקופה של גל חום קצר מועד (חמסין) תלויה בעיקר במהירות התגובה של העץ למצב ובמניעת איבוד מים. בעלים יש פיוניות, שהן פתחים מיקרוסקופיים שדרכם מתבצע חילוף הגזים – קליטת CO₂ והתאדות אדי מים. העץ מווסת את מוליכות הפיוניות (הקצב ופוטנציאל ההולכה של הגזים דרך המפתח) כדי למנוע איבוד מים מוגבר במטרה לשמור על מערכת הולכת מים תקינה. עם זאת, הפחתת איבוד המים מהצמח דרך הפיוניות עלולה לגרום להתחממות יתר של העלה ולפגיעה בפעילות הביולוגית. לכן, למיני עצים המאזנים בין איבוד מים מינימלי לשמירת טמפרטורת עלה בטווח המיטבי יש יתרון בהתמודדות עם אירועי חום קיצוניים. בישראל גלי החום מופיעים בדרך כלל באביב (אפריל-יוני), כאשר זמינות המים בקרקע גבוהה בהשוואה לאזורים צפוניים יותר שגלי החום בהם מתרחשים בתקופות הקיץ (Salomón et al., 2022). בעבודה שנעשתה ביער יתיר, נמצא שאורן ירושלים מפחית את קצב הפוטוסינתזה שלו לערכים אפסיים במהלך גל חום של כמה ימים על ידי הורדת מוליכות הפיוניות שמצמצמת את קצב איבוד המים, אך גם מצמצמת את כניסת ה-CO₂ לעלים. הפחתת פעילות זו אומנם פוגעת ביצרנות בטווח הקצר, אך מאפשרת התאוששות מיידית לאחר גל החום (Tatarinov et al., 2016). התכונות שמאפשרות תגובה זו הן ככל הנראה רגישות הפיוניות לשינויים במשק המים של העץ, המסייעת גם בקירור העלווה, המבנה הקסרומורפי (xeromorphic) של המחטים המאפשר בידוד מרחבי של

שלעליית הטמפרטורות הממוצעת לא תהיה השפעה חיובית על הפעילות הפיזיולוגית של העץ (Preisler, 2020). עליית הטמפרטורות עלולה לפגוע בפעילות של אורן ירושלים ושל אלון מצוי (*Quercus calliprinos*), כפי שנמצא בבחינה בבתי גידול שונים (Helman et al., 2017). משמעות הדבר היא כי ייתכן שכושר היצרנות של שני מיני העצים הדומיננטיים ביותר ביערות ישראל יפחת, וייתכנו פגיעה בהתפתחות תקינה של העץ ובהרכב האוכלוסייה (הצפיפות והגודל של העצים, מבנה תת-היער ויכולת התבססות), ואף עלייה במקרי תמותה.

בניגוד למינים הנפוצים האלה, ישנם מינים אוהבי חום (תרמופיליים) כגון שיזף מצוי, שיטים שונות ומיני עצים נוספים ממוצא טרופי-סודני, שהטמפרטורה המיטבית שלהם היא 30–34 מעלות (Winters et al., 2018; Zait et al., 2019). במחקר שנערך על עצי שיטה סלילנית (*Vachellia raddiana*) ושיטת הסוכך (*Acacia tortilis*) בערבה נמצא ששיא הפעילות הקמביאלית וצימוח מואץ מתרחשים בחודשי הקיץ החמים (יוני-אוגוסט), כאשר טמפרטורת האוויר מגיעה ל-45 מעלות, והאוויר יבש באופן קיצוני (דרישה אטמוספירית גבוהה להתאדות) (Winters et al., 2018). הסיבות העיקריות לעמידות הגבוהה לטמפרטורה הן מערכת שורשים עמוקה ומסועפת המסוגלת לקלוט מים משכבות הקרקע העמוקות וממי התהום (מנגנון "הימנעות מייבש"), ועמידות של המערכת הפוטוסינתטית והמערכת הקמביאלית בפני טמפרטורות גבוהות (Uni et al., 2021).

על עצים חובבי חום, הרגישים מאוד לטמפרטורות נמוכות ולאירועי קרה, עליית הטמפרטורה הממוצעת עשויה דווקא להשפיע לטובה. דוגמה לעץ ש"נהנה" משינוי האקלים היא השיזף המצוי, ממשפחת האשחריים, שנעשה נפוץ יותר ויותר באופן טבעי באזורנו בעשורים האחרונים (זית ושות', 2017; Ginsberg and Atzmon, 2009). באזורי התפוצה הטבעית של השיזף (אזורים משוונים של סודן ואתיופיה ועד לצפון אפריקה, הודו וטורקיה) טמפרטורת האוויר גבוהה לאורך כל השנה, והגשמים יורדים בחודשי הקיץ בלבד. בטמפרטורות סביבה נמוכות זרעי השיזף מצליחים לנבוט, אבל קצב הצמיחה שלו נמוך ביותר בגלל רגישות יוצאת דופן של המערכת הפוטוסינתטית לקור (Zait et al., 2020). התמתנות הטמפרטורה בחורף והתמעטות אירועי הקרה מאפשרות לשיזף לשמר עלווה פעילה גם בחורף, ובכך להמשיך לבצע פוטוסינתזה, לצבור את תוצריה ולנצל את חודשי האביב ותחילת הקיץ לצמיחה מואצת. זאת ועוד, טמפרטורות גבוהות יחסית בחורף גורמות לנביטה מוקדמת, המאפשרת לנבטים לפתח מערכת שורשים עמוקה יותר, שמגבירה את יכולת ההישרדות של הזרעים במהלך הקיץ היבש.

נשירת עלים בחורף היא תכונה אופיינית למספר מיני עצים ים תיכוניים ואירנו-טורניים, כמו אלון התולע (*Q. infectoria*),

ישראל לוויסות תופעות שינוי האקלים ולעצירת תהליכי המדבור גבוהה ביותר (רוטנברג ויקיר, 2018; Rotenberg and Yakir, 2010, 2011; Rog et al., 2021; Rohatyn et al., 2021), ולכן לשימור ולשיפור של תפקוד היערות יש חשיבות רבה. היערות משפיעים על הטמפרטורה הממוצעת בדרך נוספת: הרכב הצמחייה משפיע על כמות הקרינה הנבלעת על ידי כדור הארץ ועל מידת ההחזרה של קרינת השמש מהקרקע אל האטמוספירה (אֶלְבֶּדוֹ), שמושפעת מצבעו הכהה של כיסוי העצים (רוטנברג ויקיר, 2018; Rotenberg and Yakir, 2010). לכן, נטיעת יערות באזורים שפני השטח בהם בהירים יחסית (אזורים צחיחים וצחיחים למחצה, למשל באזורים הדרומיים של ישראל) יכולה לגרום להעלאת טמפרטורת האוויר באופן ישיר בעקבות שינוי האלבדו (Rotenberg and Yakir, 2010), להבדיל מנטיעת יערות באזורים צפוניים יותר בעלי פני שטח כהים יותר שאינה משנה את האלבדו באותה עוצמה (רוטנברג ויקיר, 2018; Ramati, 2015).

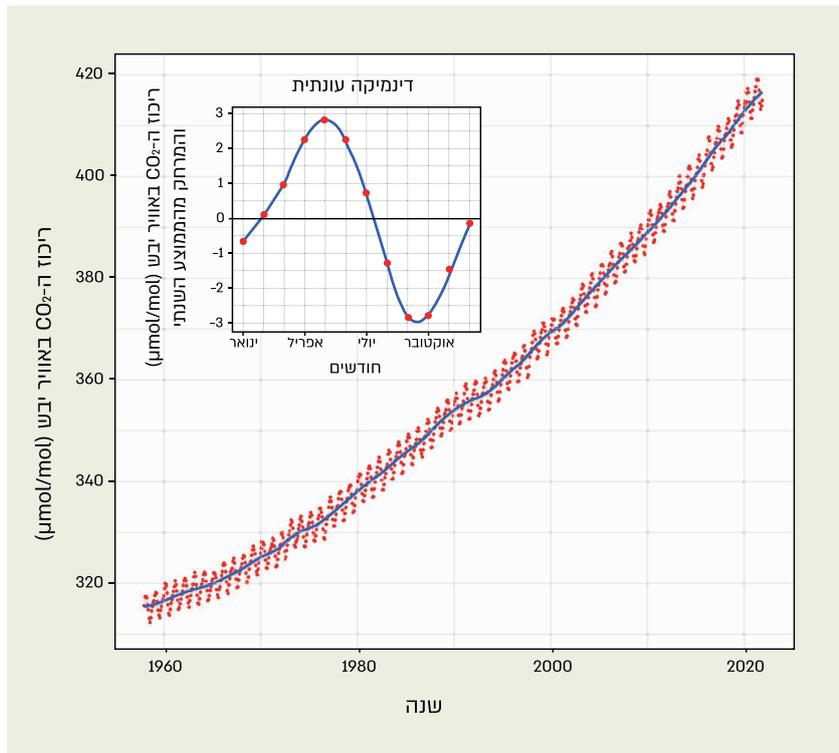
תגובות יערות בארץ ובעולם לירידה בזמינות המים

זמינות המים בקרקע היא גורם משמעותי ומכריע בתהליכי גדילה והתפתחות וכן בסיכויי ההשרדות של עצי יער באזורים יובשניים, ועל כן ירידה בתכולת המים בקרקע מתחת לסף קריטי (שייחודי לכל סוג קרקע ומין עץ) היא

הפיוניות מהסביבה היבשה, וכן היכולת לאגור את תוצרי הפוטוסינתזה ברקמות האגירה ולשנע אותם מהן בימים שלא מתקיימת פוטוסינתזה (Birami et al., 2018; Drake et al., 2018; Salomón et al., 2022). למיטב ידיעתנו, עדיין חסרים נתונים על תגובתם של מיני עצי יער נוספים לגלי חום קצרי מועד, והמשך מחקר בנושא ישפר את הבנת ההשפעה של שינוי האקלים על יערות ישראל.

השפעת היער על הטמפרטורה המקומית

יכולתו של היער לקרר את סביבתו תלויה בעיקר בשינוי גורמים. הראשון, גורם ישיר ומקומי, שקשור לתהליך הדיות – איבוד מים והסעת אנרגיה (חום כמוס) מהעץ אל האטמוספירה וכן בעקבות הפחתת הקרינה המקומית באמצעות הצללה. נוסף על כך, עצים מסוגלים לקרר את סביבתם באמצעות הסעת החום המוחשי על ידי קונוקציה (ערבול אנכי של האוויר) עקב חספוס פני השטח שיוצרים העצים (רוטנברג ויקיר, 2018). הגורם השני הוא עולמי ועקיף, ונובע מהפחתת ריכוז ה- CO_2 באמצעות פוטוסינתזה – קיבוע הפחמן העולמי על ידי היערות שווה לכ-25–30% מסך פליטת ה- CO_2 העולמית, וכך הוא מווסת את תהליך ההתחממות העולמית (Keenan et al., 2016; Duffy et al., 2021) (איור 2). חשוב להדגיש שבישראל הפחתת ריכוז ה- CO_2 על ידי היערות נמוכה משמעותית מהשיעור העולמי, וזאת עקב התנאים היובשניים וצפיפות עצי היער הנמוכה ביחס לצפיפות האוכלוסייה. אך למרות זאת – חשיבות תרומת יערות



איור 2

השינוי בריכוז ה- CO_2 מתחילת תקופת המדידה הרציפה (1958), כפי שנמדד במאונה לואה שבהוואי, הרחק מכל אזור מיושב

התנודתיות העונתית בריכוז ה- CO_2 המודגשת בתוך האיור, נובעת מקיבוע הפחמן ביערות בחצי הכדור הצפוני בחודשי האביב והקיץ (NOAA, 2022).

של מים מהסלע הנקבובי (Preisler et al., 2019; De Falco et al., 2021; Dubinin et al., 2021; Nardini et al., 2021; Stavi et al., 2021).

השפעת זמינות המים על אופי בית הגידול

זמינות המים תכריע גם את אופי המינים והרכבם בבתי הגידול החדשים שיווצרו בעתיד, ואת יכולת הפצת הזרעים לנוכח שינוי האקלים ולאחר אירועי תמותת עצים (Sheffer et al., 2020). אי לכך, בחירת המיקום והצפיפות של נטיעות עתידיות, בחירת הרכב המינים, העדפת מינים מקומיים או מותאמים לתנאי האקלים הספציפיים (קליין, 2021; Steinitz et al., 2011; Klein et al., 2013; Reisman-Berman et al., 2019), בשילוב בחינת כושר הנשיאה של בית הגידול, זמינות המשאבים ותחזיות אקלים ממוקדות אזור, יכריעו את אופן הפיזור הטבעי של העצים, והם כולם גורמי מפתח בקבלת ההחלטות לנטיעות חדשות.

בשנים האחרונות מתחדדת ההבנה כי יער מגוון, המשלב את העקרונות הללו, הוא יער בעל כושר גבוה לקיבוע ולאגירה של פחמן, כושר התאוששות ועמידות גבוהה ליובש, ובעל סיכויי תמותה פחותים מאשר בית גידול חד-מיני (Väänänen et al., 2020; Rog et al., 2021; Waitz and Sheffer, 2021). יער אלונים ואורנים מגוון מאפשר לשני המינים להתקיים במקביל בעיקר הודות למשק מים שונה, הנובע בין השאר מהבדלים בעומק השורשים – לאלונים מערכת שורשים עמוקה ומסועפת המאפשרת גישה למקורות מים בעומק הקרקע וזמינות מים מספקת גם בחודשי הקיץ והסתיו היבשים (הר, 2008). לאורנים מערכת שורשים רדודה (20–70 ס"מ) (Preisler et al., 2019) שיכולה ליהנות מזמינות מים מספקת בבית גידול משולב גם בחודשים היבשים הודות לניצול מנגנון העלאת מים לשכבות הקרקע הרדודות יותר באמצעות מערכת השורשים העמוקה של האלונים (hydraulic lifting). על כן, בית גידול המשלב את שני המינים האלה יוצר עמידות בפני נזקי הבצורת (Osem and Moshe, 2021; Waitz and Sheffer, 2021).

זמינות מים בקרקע כגורם המגביל העיקרי לצמיחה ולהישרדות של יערות יובשניים

באקלים ים תיכוני וצחיח למחצה העלייה בטמפרטורת האוויר, בשילוב ירידה בכמות המשקעים או שינוי בתדירות אירועי הגשם, מובילים בסופו של דבר להארכת תקופות היובש ולעלייה בדרישה האטמוספירית למים (גירעון לחץ האדים, VPD – Vapor Pressure Deficit). לעלייה ביובש הקרקע וביובש האוויר יש השפעה משמעותית על אפיון עוצמת הבצורת וחומרתה, ועקב כך גם על תגובת מיני העצים השונים לבצורת. מנגנון הוויסות העיקרי של עצי יער להתמודדות עם עלייה בגירעון לחץ האדים ועם

גורם מגביל עיקרי לגדילה ולהתפתחות (Klein et al., 2014; Preisler et al., 2019; Oz, 2021). בניגוד לרמת הוודאות הגבוהה לגבי עליית הטמפרטורות ברחבי העולם בתחזיות הגלובליות, קיימת שונות רבה בתחזיות הנוגעות להשפעת ההתחממות העולמית על כמות המשקעים ומשטר המשקעים המקומי (Palmer et al., 2005; Slingo and Palmer et al., 2020; Ukkola et al., 2020) – באזורים מסוימים בעולם צפויה עלייה בכמות המשקעים, בעוד שבאזורים אחרים צפויה ירידה. באזור הים התיכון צפויה ירידה בכמות המשקעים על פי רוב המודלים האקלימיים (IPCC, 2021). נוסף על כך, מרבית התחזיות צופות שונות גבוהה יותר במשטר המשקעים, ונראה שמספר אירועי הגשם יפחת, אך כמות המשקעים בכל אירוע גשם עשויה לגדול (Drori et al., 2021). תופעה זו יכולה להביא לעלייה במספר השיטפונות הגורמים לנזקים רבים (סחף קרקע, הצפות), ולתכולת מים גבוהה יותר בקרקע מאשר בפיזור משקעים סדיר (Raz-Yaseef et al., 2009), דבר שיכול ליצור דווקא יתרון לעצים הגדלים באזורים יובשניים (ארגמן ושות' 2017; Assefa-Haile, 2019). עלייה בתכיפות ובחומרה של אירועי בצורת וגלי חום קיצוניים בשנים האחרונות הובילה לעלייה משמעותית של תמותת עצים ברחבי העולם (Allen et al., 2022; Hartmann et al., 2022; Yi et al., 2022; Dorman et al., 2015; Klein et al., 2019; Preisler et al., 2019). תמותת עצים זו נובעת בעיקר מעלייה בדרישה האטמוספירית למים (עקב העלייה בטמפרטורת האוויר), הגורמת להעלאת האידוי-דיות (התאידות מהקרקע והעצים), הגבוהה מקצב אספקת המים. אי-התאמה זו, בין אספקת המים לדרישת המים, אם היא ממושכת, גורמת נזקים בלתי הפיכים למערכת הובלת המים של העצים (כשל הידראולי). כשל הידראולי נגרם עקב יצירת בועיות גז בצינורות ההובלה והתפשטותן (cavitation), דבר הגורם לחסימת הצינורות (אמבולזים) ולאובדן יכולת ההולכה של הצינורות שנחסמו. כשל המתפשט במרבית צינורות ההובלה (מעל 80–90%) עלול לגרום לתמותת העץ (Hammond and Adams, 2019).

תופעת התמותה, בעיקר באזורים יובשניים, תלויה בכושר הנשיאה של בית הגידול (צפיפות העצים, סוג הקרקע והרכבה) וגם בתנאי בית הגידול הספציפי של העצים נמצא כי עצים הגדלים בבית גידול עם קרקע עמוקה, ללא כיסוי סלע ועם אחוז אבנים נמוך באזור בית השורשים, רגישים יותר לאירועי בצורת ממושכים, והם בעלי סיכויי תמותה גבוהים יותר מאשר עצים סמוכים הגדלים בקרקע סלעית בעלת אחוז אבנים גבוה בבית השורשים. הסיבה לכך היא שזמינות המים בבית גידול זה גבוהה יותר בעקבות הפחתת התאדות מפני השטח, הגברת נגר עילי מקומי, ריכוז מים גבוה ליחידת נפח קרקע ויכולת ספיחה ושחרור

יערות אורנים באזורים צפוניים יותר עם כמות משקעים גבוהה עלולה להיות השפעה שלילית על המאזן ההידרולוגי, בעקבות שינוי מאזני המים בקרקע שינבע מצריכת המים הגבוהה של העצים (Rohatyn et al., 2018).

השפעת עליית ריכוז הפחמן הדו-חמצני באוויר על יערות בארץ ובעולם

מחקרים רבים בדקו את ההשפעה של ריכוזי CO₂ גבוהים על עצים, אך עדיין לא ברור כיצד עליית ריכוז ה-CO₂ העתידית תשפיע על הביצועים הפיזיולוגיים של עצי יער (Hickler et al., 2008; Bugmann and Bigler, 2011; Keenan et al., 2011; Klein et al., 2016; Bartlett et al., 2018; Paudel et al., 2018; Nadal-Sala et al., 2021; Chen et al., 2022). יש לזכור שהשינויים ב-CO₂ הדרגתיים (עלייה ממוצעת של 1.5 חלקיקים למיליון בשנה), ומאפשרים לעצים לעבור תהליכי אקלום (שינויים מבניים, מורפולוגיים, אנטומיים וביוכימיים). עם זאת, ניסויי העשרה של CO₂ באוויר הפתוח מסוג FACE (Free-Air CO₂ Enrichment), שיכולים לדמות תהליכים טבעיים וללמד על תהליכי אקלום ארוכי טווח, נדירים (כדוגמת <https://facedata.ornl.gov>), בעיקר בגלל עלויות כלכליות גבוהות הכרוכות בהקמה ובתחזוקה, וכן בשל הגברת זיהום האוויר. לשינויים בריכוז ה-CO₂ פוטנציאל לשפר את יעילות ניצול המים, בעיקר מכיוון שה-CO₂ הוא חומר גלם לתהליך הפוטוסינתזה, וריכוז גבוה מכחית את קצב איבוד המים מהעלים על ידי יסות מפתח הפיוניות והפחתת כמות הפיוניות ליחידת שטח עלווה. שיפור יעילות ניצול המים הוא הגורם העיקרי המסביר את ההשפעות החיוביות של עלייה ב-CO₂ על יצרנות העצים (NPP), מכיוון שבאופן יחסי פחות מים מנוצלים להטמעת CO₂ בתהליך הפוטוסינתזה, וכך יותר מים נשארים בקרקע (Osborne et al., 2000). כל זה מרמז שעליית ה-CO₂ צפויה לשפר את היצרנות והעמידות ליובש של העץ הבודד ושל המערכת האקולוגית (Chen et al., 2022). מאידך גיסא, יכול להיות שבטווח הארוך ריכוזים גבוהים של CO₂ (מעל 600 חלקיקים למיליון) עלולים להשפיע באופן שלילי על מיני עצים מסוימים ולכגוע בהתפתחותם התקינה, אולם ניסויים התומכים בהשערה זו עדיין חסרים.

השפעת משטר הקרינה על האקופיזיולוגיה של עצי יער

קרינת השמש היא מקור האנרגיה המשמעותי לחיים על פני כדור הארץ. אופי פיזור הקרינה (קרינה דיפוזית וקרינה ישירה, ראו הסבר), כמות הימים המעוננים ועוצמת הקרינה

ירידה בזמינות המים הוא הפחתת איבוד המים בתהליך הדיות, בעיקר באמצעות הקטנת שטח העלווה, בקרה על הצפיפות והמפתח של הפיוניות, ובקרה על מערכת הולכת המים של הצמח. כאשר זמינות המים בקרקע יורדת, העצים מתקשים לקלוט את כמות המים שאובדים בדיות, וזה מוביל לירידה בתכולת המים ובפוטנציאל המים בצמח (ומגדיל את הסיכון לכשל הידראולי). על כן, מרבית העצים יסגרו את מפתח הפיוניות או יפחיתו משמעותית את המוליכות שלהן כדי להקטין את קצב איבוד המים מהן. דוגמה ליכולת התאמה לשילוב בין יובש הקרקע ליובש האוויר נצפתה באורן ירושלים ביער יתיר, שבעונה היבשה (אפריל-אוקטובר) מסיט את שיא פעילותו לשעות הבוקר המוקדמות (כאשר יובש האוויר נמוך יחסית) ומקיים פעילות פיזיולוגית תוך שימוש במאגרי המים הפנימיים שבענפים ובמחטים. מייד לאחר מכן האורן סוגר את הפיוניות לשאר שעות היום, וכך נמנעים איבוד מים משמעותי וסיכון לכשל הידראולי (Preisler et al., 2021). יכולת התאמה זו, נוסף על ההתאמות המורפולוגיות של אורן ירושלים, הכוללות בין השאר שינוי באורך המחטים (Preisler et al., 2019) ובצפיפות הפיוניות כתלות בכמות המשקעים השנתית, הופכות את מין האורן הזה לבעל כושר עמידות ויכולת התאוששות משמעותיים לתנאי יובש.

מאחר שיערות באזורים בעלי כמות משקעים גבוהה יחסית יסבלו פחות מיובש הקרקע ויותר מיובש האוויר (גירעון לחץ אדים גבוה), חשוב להבין איך עלייה ביובש האוויר לבדה תשפיע על עצי היער, ומי מהם הוא הגורם המגביל העיקרי לפעילות העצים. ממחקרים שנערכו ביער יתיר לצורך ניתוח תגובות היער לשינויים ביובש הקרקע והאוויר לאורך מספר שנים באמצעות מדידות ממושכות, עולה כי מחזור הפעילות השנתי של הדיות קשור באופן הדוק לתכולת המים בקרקע. עם זאת, הפעילות השנתית של מוליכות הפיוניות וקצב הפוטוסינתזה קשורים יותר לשינויים בגירעון לחץ האדים (Oz, 2021). נוסף על כך, בניסוי מניפולציה שהפריד בין שני הגורמים – יובש הקרקע ויובש האוויר – על ידי השקיה ממושכת לחלק מהעצים במהלך חודשי האביב והקיץ (אל מול ביקורת לא מושקית), נמצא כי מוליכות הפיוניות וקצב הפוטוסינתזה עלו בתגובה להשקיה, אך גם כאן, הם הוגבלו על ידי עליית הטמפרטורה ויובש האוויר. נראה כי כאשר זמינות המים בקרקע גבוהה ומספקת, גירעון לחץ האדים (VPD) הוא כוח מניע לדיות, ואינו מגביל את הפעילות הפיזיולוגית של העץ (Preisler, 2020). אי לכך, ניכר כי פיוניות האורן נסגרות בתגובה למחסור במים בעץ (ולירידה בפוטנציאל מים) ולא מושפעות מיובש האוויר, ולכן סביר להעריך כי אורנים הגדלים בבתי גידול צפוניים יותר, שכמות המשקעים זמינות המים בקרקע בהם יציבים יחסית, ימשיכו לקיים צימוח ולדיית למרות העלייה בטמפרטורות, כתלות בטמפרטורה המיטבית של כל מין. מנגד, לנטיעת

התנאים היובשניים השוררים בהם. הידע הרב שנצבר בלימוד האקופיזיולוגיה של יערות אלה והמחקרים הרבים בנושא, בשילוב ניטור ארוך טווח של התהליכים השונים לנוכח שינוי האקלים, יכולים להוות קו מנחה לניהול היער באזורים שצפויים להפוך ליובשניים בעתיד, כמו אלה במרכז אירופה ובאגן הים תיכון.

מודלים דינמיים (אזוריים ועולמיים) של מערכות יערניות הם כלי יעיל ומקובל להבנת תגובת הצמחייה לשינוי האקלים (Tarnita et al., 2017; Fisher et al., 2018; Kumar et al., 2022; Hartmann et al., 2018). המודלים מביאים בחשבון את מדדי הפעילות הפיזיולוגית של העצים במערכות האקולוגיות, תוך התחשבות בתנאים המטאורולוגיים ובאינטראקציות בין המינים. באמצעות המודלים ניתן לחזות את הרכב המינים, את גודל היער ואת נפח פעילות הפיזיולוגית (דיות, צימוח וקיבוע פחמן) בתנאי אקלים עתידיים (Purves and Pacala, 2008). עם זאת, המגבלה העיקרית שקיימת במודלים האלה כיום היא רמת הדיוק הנמוכה יחסית למערכות יערניות יובשניות, נושא שעדיין נמצא במחקר ודורש את כיוול המודלים למערכות מורכבות אלה.

השיפור ביכולות הניטור והאגירה של המידע וכן בנגישותו מאפשר זיהוי מגמות של שינוי מצב בריאות היער בזמן אמת בהיבט המרחבי ובהיבט העיתי. לדוגמה: על ידי שימוש בטכנולוגיות חישה מרחוק באמצעות לוויינים וכלי טיס ניתן לנטר בתאי שטח נרחבים את טמפרטורת המים ותכולתם בקרקע ובעצים ברזולוציות שונות (Paz-Kagan et al., 2018; Lapidot et al., 2019; Feldman et al., 2020; Muller et al., 2021), לעקוב אחר השלבים הפיזיולוגיים והפעילות הפיזיולוגית (Antonarakis et al., 2019; Milliman et al., 2022), לחשב את כיסוי הצומח (Drori et al., 2020) ולזהות תמותת עצים (Byer, 2017; Brodrick and Asner, 2017; Rogers et al., 2018; Jin, 2017). נוסף על כך, בשנים האחרונות חלה התקדמות ניכרת ביכולות המיפוי התלת-ממדיות של היער באמצעות טכנולוגיית LIDAR (Light Detection And Ranging) מהקרקע ומהאוויר, המאפשרת לחשב את ביומסת היער (Jucker et al., 2017) ואת מבנה החופה ופיזורו במרחב היער. מיפויים מדויקים אלה הובילו לשיפור המודלים והמדידות של שטפי הפחמן, האנרגיה והמים ביער (Kröniger et al., 2018). נוסף על כך, שימוש בחיישנים פשוטים וזולים יחסית, כדוגמת דנדרומטרים – המודדים את קצב גדילת העץ והשינויים היומיים בקוטר הגזע (התכווצות והתרחבות יומיות הנובעות מאיבוד מים במהלך היום), וכן שימוש בחיישני זרימת מים בגזע (sap flow), יכולים לסייע בגילוי מוקדם של סימני עקה ותמותה של תחומי הידע שלהלן, בשילוב הזולה והנגשה של היכולות הללו, יוצרים כלי ממשקי רב עוצמה, המסייע בתהליך קבלת

המרבית הם גורם חשוב בתגובתם האקופיזיולוגית של עצי יער שונים לתנאים הללו. הקרינה משפיעה בצורה ישירה בעיקר על תהליך הפוטוסינתזה ועל הדיות, וכן על מגמות הטמפרטורה העונתיות והיומיות, ובעקבות זאת משפיעה גם על משק המים של הצמח ועל התגובה לבצורת. למיני עצים שמקורם באזורים המאופיינים בשטפי קרינה גבוהים יש מבנה עלים ייחודי, המאפשר ניצול מרבי של הקרינה הפוטוסינתטית הפעילה (הקרינה בטווח אורכי גל של 400 עד 700 ננומטר).

שינוי במשטר הקרינה ובהרכב הקרינה הדיפוזית מסך כלל הקרינה, הנובע בעיקר משינוי בכמות הימים המעוננים ומעלייה בריכוז האירוסולים (עקב סופות אבק למשל), יכול להגביר את הכמות והקצב של קיבוע הפחמן, כפי שהראו מרבית העבודות שחקרו, בין השאר, את השפעת ההתפרצות הר הגעש פינטובו ב-1991 על יערות טרופיים וממוזגים בעלי חופה צפופה. עליית קיבוע הפחמן בשנים שאחרי ההתפרצות הנגשית, נבעה בעיקר מעלייה בקרינה הדיפוזית שהובילה לירידה בטמפרטורות, להפחתת קצב הנשימה, וכן לפיזור אחיד יותר של הקרינה המגיע לתת-היער (Roderick et al., 2001; Farquhar and Roderick, 2009; Mercado et al., 2003; Gu et al., 2003). השפעת הקרינה על היער תלויה בהרכב החופה הקובעת את עוצמת הקרינה הנכנסת, בעיקר ביער מגוון שיש בו עצים בגבהים שונים ובעלי סידור עלים שונה (מחטניים מול רחבי עלים, לדוגמה: Osem and Moshe, 2021). צפיפות יערות ישראל נמוכה ביחס ליערות שהוזכרו לעיל, ועבודות רבות שנעשו בשנים האחרונות בחנו מהם התנאים והצפיפות האידיאליים מבחינת משק המים, ההתחדשות הטבעית והשפעת הקרינה על שרידות והתפתחות היער הארץ-ישראלי (Osem et al., 2009, 2013; Ungar et al., 2013; Tsamir et al., 2019; Pozner et al., 2022). נראה גם כאן שדרושה התאמה לתנאי בית הגידול, ויש צורך בהמשך מחקר מעמיק בנושא.

מבט אל פני העתיד – חקר המקרה של יערות ישראל

פעולות אפשריות למיתון השפעות שינוי האקלים על יערות בארץ ובעולם

פרויקט הייעור הייחודי שהתרחש בישראל בהובלת קק"ל ב-118 השנים האחרונות, בשילוב המחקר היערי הישראלי המקיף, יכולים לשמש חקר מקרה מצוין לתגובת יערות לשינוי האקלים (Rotenberg and Yakir, 2010; Pervolotsky and Sheffer, 2011; Rohatyn et al., 2021). התנאים בבתי הגידול במרבית יערות קק"ל (בעיקר הדרומיים – מאמציה ודרומה) לכאורה לא מאפשרים שגשוג והתפתחות יערות בכלל, ויערות אורנים בפרט, בשל

שנסקרו במאמר, ושעלולים להוביל לשינוי בקצב הגידול של חלק מהמינים ולתמותת מינים אחרים. בעקבות זאת, המראה הנוכחי, התפקוד ומתן שירותי המערכת של היער בישראל ישתנו בהתאם להרכב המינים הנוכחי וליכולתם להתאים לשינוי האקלים (יתרון למינים אוהבי חום). בסקירה זו הראינו שישנם הבדלים בין התגובה לשינויים ההדרגתיים לבין התגובה לאירועי קיצון – האופן שבו העצים מגיבים לשינוי הדרגתי כולל בתוכו שינויים הסתגולתיים במבנה ובפיזיולוגיה המתרחשים לאורך זמן, לעומת התגובות לאירועי קיצון המאופיינות בהתאמות פיזיולוגיות מהירות. הראינו כי לנטיעת עצים ישנה השפעה חיובית על הסביבה, אם הם מותאמים לבית הגידול, וכי לבחירת מינים מותאמים יש קשר ישיר ליכולת השגשוג וההישרדות של היערות בעתיד. אי לכך, ישנה חשיבות מרבית להבנה אקופיזיולוגית מעמיקה של המינים הרלוונטיים בתהליך המחקר ובתהליך קבלת החלטות, להמשך מחקר מעמיק ולבניית ניסויים ומערכי מחקר שתואמים לתנאי קיצון קצרי מועד ולשינויים הדרגתיים בתנאי האקלים.

החלטות (קרי דילול צפיפות היער, טיפול במחלות בשלב מוקדם וכדומה), ובמציאת מינים מותאמים לתנאי קיצון ולשינוי אקלים הדרגתי.

קידום המחקר היערי, שימוש בטכנולוגיות מתקדמות שצוינו לעיל למטרת ניטור מצב היער בסקאלות השונות, והידוק שיתוף הפעולה בין מקבלי ההחלטות לגורמי המחקר, הכרחיים לחיזוי תגובת היערות לשינוי האקלים ברחבי העולם. בעשורים האחרונים מתבצעים בישראל מחקרים אקופיזיולוגיים ויערניים רבים בבתי גידול שונים, וניתן ליצור מהם מסד נתונים רחב שיתאים את בתי הגידול למין העץ ולצפיפות הנטיעה (Ungar et al., 2013), תוך התחשבות בתחזיות שינוי האקלים. נוסף על כך, ניתן ליצור מפת רגישות לתמותה (heatmap) שתאגד תוצאות מחקרים שעסקו בקשר בין תנאי הקרקע, תקופות יובש ותמותה (Sockel, 2015; Preisler et al., 2019). חיבור של מקורות הידע לצורך קבלת החלטות ממשקיות תוך הבנת הרגישויות של המינים השונים לתנאי הסביבה יכול לתת מענה משמעותי לעתיד היעור בישראל.

תודות

הכותבים מבקשים להודות לד"ר עידו רוג, לד"ר ענת מדמוני ולענבר קמחי-אנגרט עורכת הלשון, ולשני מבקרים אנונימיים על ההערות וההצעות לשיפור המאמר.

סיכום

מרבית יערות ישראל סובלים וצפויים לסבול בעתיד מתופעות של שינוי האקלים. הרכב המינים ביערות ישראל צפוי להשתנות בעשורים הקרובים עקב עלייה בגורמי העקה

מקורות

- Alpert P, Krichak SO, Shafir H, Haim D, and Osetinsky I. 2008. Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Global and Planetary Change*, 63, 163–170.
- Antonarakis AS, Bogan SA, Goulden ML, and Moorcroft PR. 2022. Impacts of the 2012–2015 Californian drought on carbon, water and energy fluxes in the Californian Sierras: Results from an imaging spectrometry-constrained terrestrial biosphere model. *Global Change Biology*, 28, 1823–1852.
- Bamberger I, Ruehr NK, Schmitt M, Gast A, Wohlfahrt G, and Arneith A. 2017. Isoprene emission and photosynthesis during heatwaves and drought in black locust. *Biogeosciences*, 14, 3649–3667.
- Bartlett MK, Detto M, and Pacala SW. 2018. Predicting shifts in the functional composition of tropical forests under increased drought and CO2 from trade-offs among plant hydraulic traits. *Ecology Letters*, 22(1), 67–77.
- Belmonte A, Sankey T, Biederman J, Bradford JB, and Kolb T. 2022. Soil moisture response to seasonal drought conditions and post-thinning forest structure. *Ecohydrology*, 22, 1–18.
- Birami B, Gattmann M, Heyer AG, Grote R, Arneith A, and Ruehr NK. 2018. Heat waves alter carbon allocation and increase mortality of Aleppo Pine under dry conditions. *Frontiers in Forests and Global Change*, 1, 1–17.
- אסם י, צורף ת, אשכנזי מ, אוסטרובסקי ג ופורת י. 2021. השרפה בהרי יהודה – אוגוסט 2021, תובנות עיקריות וקווים מנחים לפעולה מסמך עמדה מקצועי. יער, 21, 5–14.
- הר נ. 2008. מבנה מערכת הקרקע והסלע והדינמיקה של המים בבית הגידול כגורמים אקולוגיים עיקריים בתפוצת אלון התבור והאלון המצוי באזור אלונים מנשה (עבודה לקבלת תואר דוקטור). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
- זית י, ארזי ע, אפרת י ושוורץ א. 2017. התאמות פיזיולוגיות לתנאי סביבה משתנים של המין שיזף מצוי (*Ziziphus spina-christi*) נטוע בתנאי אקלים חצי יובשני ובתפוצה טבעית באקלים ים-תיכוני. יער, 17, 36–45.
- סבר נ ונאמן ג. 2008. התייבשות והתאוששות של עצי אלון מצוי בישראל לאחר רצף של שנות בצורת. יער, 10, 10–16.
- סילבר מ, יופיטר ואנונו א, דור-חיים ש, שחק מ וקרניאלי א. 2021. ניתוח הנזקים שגרמה סופת הרוח במרץ 2020 ליערות קק"ל. יער, 21, 24–31.
- קליין ת. 2021. שימוש במיני עצים מקומיים ביעור בארץ ובעולם: עבר, הווה ועתיד. יער, 21, 43–46.
- קק"ל. נתוני יערות קק"ל לשנת תשע"ט-תש"ף. https://www.kkl.org.il/afforestation_forest_data
- רוטנברג א ויקר ד. 2018. ייעור, אקלים ועתיד היערות בישראל. אקולוגיה וסביבה, 9(3), 22–33.
- שילר ג. 2013. גידול עצי יער ויערות בישראל, ארץ של ספר המדבר. <https://israelforests.wordpress.com>
- Allen CD, Breshears DD, and McDowell NG. 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6, 1–55.

- Hartmann H, Bastos A, Das AJ, Esquivel-Muelbert A, Hammond WM, Martínez-Vilalta J, et al. 2022. Climate change risks to global forest health: Emergence of unexpected events of elevated tree mortality worldwide. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 25.1–25.30.
- Helman D, Osem Y, Yakir D, and Lensky IM. 2017. Relationships between climate, topography, water use and productivity in two key Mediterranean forest types with different water-use strategies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 319–330.
- Hickler T, Smith B, Prentice IC, Mjöfors K, Miller P, Arneeth A, et al. 2008. CO₂ fertilization in temperate FACE experiments not representative of boreal and tropical forests. *Global Change Biology*, 14, 1531–1542.
- Hochman A, Mercogliano P, Alpert P, Saaroni H, and Bucchignani E. 2018. High-resolution projection of climate change and extremity over Israel using COSMO-CLM. *International Journal of Climatology*, 38, 5095–5106.
- Houminer N, Doron-Faigenboim A, Shklar G, De La Torre AR, Neale D, Korol L, et al. 2021. Transcriptome-based single-nucleotide polymorphism markers between *Pinus brutia* and *Pinus halepensis* and the analysis of their hybrids. *Tree Genetics and Genomes*, 17, 1–11.
- IPCC. 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, et al. (Eds)].
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, et al. (Eds)).
- Jucker T, Caspersen J, Chave J, Antin C, Barbier N, Bongers F, et al. 2017. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Global Change Biology*, 23, 177–190.
- Keenan T, Maria Serra J, Lloret F, Ninyerola M, and Sabate S. 2011. Predicting the future of forests in the Mediterranean under climate change, with niche- and process-based models: CO₂ matters! *Global Change Biology*, 17, 565–579.
- Keenan TF, Prentice IC, Canadell JG, Williams CA, Wang H, Raupach M, et al. 2016. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nature Communications*, 7, 1–9.
- Klein T, Bader MK, Leuzinger S, Mildner M, Schleppei P, Siegwolf RTW, et al. 2016. Growth and carbon relations of mature *Picea abies* trees under 5 years of free-air CO₂ enrichment. *Journal of Ecology*, 104, 1720–1733.
- Klein T, Cahanovitch R, Sprintsin M, Herr N, and Schiller G. 2019. A nationwide analysis of tree mortality under climate change: Forest loss and its causes in Israel 1948–2017. *Forest Ecology and Management*, 432, 840–849.
- Klein T, Di Matteo G, Rotenberg E, Cohen S, and Yakir D. 2013. Differential ecophysiological response of a major Mediterranean pine species across a climatic gradient. *Tree Physiology*, 33, 26–36.
- Klein T, Rotenberg E, Cohen-Hilaleh E, Raz-Yaseef N, Tatarinov F, Preisler Y, et al. 2014. Quantifying transpirable soil water and its relations to tree water use dynamics in a water-limited pine forest. *Ecology*, 7, 409–419.
- Kopler I and Bar-Shalom O. 2019. Oak decline and mortality in the Golan Heights. *International Oaks*, 30, 161–168.
- Korol L, Madmony A, Riov Y, and Schiller G. 1995. *Pinus halepensis* × *Pinus brutia* subsp. *brutia* hybrids? Identification using morphological and biochemical traits. *Silvae Genetica*, 44, 186–190.
- Brodrick PG and Asner GP. 2017. Remotely sensed predictors of conifer tree mortality during severe drought. *Environmental Research Letters*, 12, 115013.
- Bugmann H and Bigler C. 2011. Will the CO₂ fertilization effect in forests be offset by reduced tree longevity? *Oecologia*, 165, 533–544.
- Byer S and Jin Y. 2017. Detecting drought-induced tree mortality in Sierra Nevada forests with time series of satellite data. *Remote Sensing*, 9, 14–17.
- Chen C, Riley WJ, Prentice IC, and Keenan TF. 2022. CO₂ fertilization of terrestrial photosynthesis inferred from site to global scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119, e2115627119.
- Danin A. 1988. Flora and vegetation of Israel and adjacent areas. *The Zoogeography of Israel*, 30, 251–276.
- Dorman M, Perevolotsky A, Sarris D, and Svoray T. 2015. Amount vs. temporal pattern: On the importance of intra-annual climatic conditions on tree growth in a dry environment. *Journal of Arid Environments*, 118, 65–68.
- Dorman M, Svoray T, Perevolotsky A, and Sarris D. 2013. Forest performance during two consecutive drought periods: Diverging long-term trends and short-term responses along a climatic gradient. *Forest Ecology and Management*, 310, 1–9.
- Drake JE, Tjoelker MG, Vårhammar A, Medlyn BE, Reich PB, Leigh A, et al. 2018. Trees tolerate an extreme heatwave via sustained transpirational cooling and increased leaf thermal tolerance. *Global Change Biology*, 24, 2390–2402.
- Drori R, Dan H, Sprintsin M, and Sheffer E. 2020. Precipitation-sensitive dynamic threshold: A new and simple method to detect and monitor forest and woody vegetation cover in sub-humid to arid areas. *Remote Sensing*, 12(1231), 1–11.
- Drori R, Ziv B, Saaroni H, Etkin A, and Sheffer E. 2021. Recent changes in the rain regime over the Mediterranean climate region of Israel. *Climatic Change*, 167, 1–21.
- Dubinina V, Stavi I, Svoray T, Dorman M, and Yizhaq H. 2021. Hillslope geodiversity improves the resistance of shrubs to prolonged droughts in semiarid ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 188, 104462.
- Duffy KA, Schwalm CR, Arcus VL, Koch GW, Liang LL, and Schipper LA. 2021. How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere? *Science Advances*, 7, 1–9.
- De Falco N, Tal-Berger R, Hjazin A, Yizhaq H, Stavi I, and Rachmilevitch S. 2021. Geodiversity impacts plant community structure in a semi-arid region. *Scientific Reports*, 11, 1–11.
- Farquhar GD and Roderick ML. 2003. Pinatubo, diffuse light, and the carbon cycle. *Science*, 299(5615), 1997–1998.
- Feldman AF, Short Gianotti DJ, Trigo IF, Salvucci GD, and Entekhabi D. 2020. Land-atmosphere drivers of landscape-scale plant water content loss. *Geophysical Research Letters*, 47, 1–12.
- Fisher RA, Koven CD, Anderegg WRL, Christoffersen BO, Dietze MC, Farrior CE, et al. 2018. Vegetation demographics in earth system models: A review of progress and priorities. *Global Change Biology*, 24, 35–54.
- Flexas J, Diaz-Espejo A, Gago J, Gallé A, Galmés J, Gulias J, et al. 2014. Photosynthetic limitations in Mediterranean plants: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 12–23.
- Ginsberg P and Atzmon N. 2009. Semi-arid zone afforestation in northern Israel: A review. *Forest Management*, 9, 249–270.
- Gu L, Baldocchi DD, Wofsy SC, Munger WJ, Michalsky JJ, Urbanski SP, et al. 2003. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. *Science*, 299, 2035–2038.
- Hammond WM and Adams HD. 2019. Dying on time: traits influencing the dynamics of tree mortality risk from drought. *Tree Physiology*, 39, 906–909.
- Hammond WM, Johnson DM, and Meinzer FC. 2021. A thin line between life and death: radial sap flux failure signals trajectory to tree mortality. *Plant, Cell & Environment*, 4, 1311–1314.

- Palmer RD, Cheong BL, Hoffman MW, Frasier SJ, and López-Dekker FJ. 2005. Observations of the small-scale variability of precipitation using an imaging radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22, 1122–1137.
- Paudel I, Halpern M, Wagner Y, Raveh E, Yermiyahu U, Hoch G, et al. 2018. Elevated CO₂ compensates for drought effects in lemon saplings via stomatal downregulation, increased soil moisture, and increased wood carbon storage. *Environmental and Experimental Botany*, 148, 117–127.
- Paz-Kagan T, Vaughn NR, Martin RE, Brodrick PG, Stephenson NL, Das AJ, et al. 2018. Landscape-scale variation in canopy water content of giant sequoias during drought. *Forest Ecology and Management*, 419, 291–304.
- Paz S, Carmel Y, Jahshan F, and Shoshany M. 2011. Post-fire analysis of pre-fire mapping of fire-risk: A recent case study from Mt. Carmel (Israel). *Forest Ecology and Management*, 262, 1184–1188.
- Perevolotsky A and Sheffer E. 2011. Integrated management of heterogeneous landscape – Mediterranean Israel as a study case. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 57, 111–128.
- 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.
- Preisler Y. 2020. *Water-Use Strategies Leading to Resilience of Pine Trees to Global Climatic Change* (PhD Dissertation). Rehovot: The Hebrew University of Jerusalem.
- Preisler Y, Hölttä T, Grünzweig JM, Oz I, Tatarinov F, Ruehr NK, et al. 2021. The importance of tree internal water storage under drought conditions. *Tree Physiology*, 42(4), 771–783.
- Preisler Y, Tatarinov F, Grünzweig JM, Bert D, Ogée J, Wingate L, et al. 2019. Mortality versus survival in drought-affected Aleppo pine forest depends on the extent of rock cover and soil stoniness. *Functional Ecology*, 33, 901–912.
- Preisler Y, Tatarinov F, Grünzweig JM, and Yakir D. 2021. Seeking the 'point of no return' in the sequence of events leading to mortality of mature trees. *Plant, Cell & Environment*, 44, 1315–1328.
- Purves D, Pacala S. 2008. Predictive models of forest dynamics. *Science*, 320, 1452–1453.
- Ramati E. 2015. *Tradeoffs Between Carbon Sequestration and Radiation Budget in Influencing Climate along the Precipitation Gradient in Israel* (MSc Thesis). Rehovot: The Weizmann Institute of Science.
- Raz-Yaseef N, Yakir D, Rotenberg E, Schiller G, and Cohen S. 2010. Ecohydrology of a semi-arid forest: partitioning among water balance components and its implications for predicted precipitation changes. *Ecohydrology*, 130(2), 126–130.
- Reisman-Berman O, Keasar T, and Tel-Zur N. 2019. Native and non-native species for dryland afforestation: Bridging ecosystem integrity and livelihood support. *Annals of Forest Science*, 76, 1–13.
- Riov J, Fox H, Attias R, Shklar G, Farkash-Haim L, Sitbon R, et al. 2020. Improved method for vegetative propagation of mature *Pinus halepensis* and its hybrids by cuttings. *Israel Journal of Plant Sciences*, 67, 5–15.
- Roderick ML, Farquhar GD, Berry SL, and Noble IR. 2001. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia*, 129, 21–30.
- Rog I, Tague C, Jakoby G, Megidish S, Yaakobi A, Wagner Y, and Klein T. 2021. Interspecific soil water partitioning as a driver of increased productivity in a diverse mixed Mediterranean forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126, 1–22.
- Kremer A, Ronce O, Robledo-Arnuncio JJ, Guillaume F, Bohrer G, Nathan R, et al. 2012. Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. *Ecology Letters*, 15, 378–392.
- Kröniger K, De Roo F, Brügger P, Huq S, Banerjee T, Zinsser J, et al. 2018. Effect of secondary circulations on the surface-atmosphere exchange of energy at an isolated semi-arid forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 169, 209–232.
- Kumar M, Rawat SPS, Singh H, Ravindranath NH, and Kalra N. 2018. Dynamic forest vegetation models for predicting impacts of climate change on forests: An Indian perspective. *Indian Journal of Forestry*, 41, 1–12.
- Kutiel H. 2012. Weather conditions and forest fire propagation – the case of the Carmel fire, December 2010. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 58, 113–122.
- Lapidot O, Ignat T, Rud R, Rog I, Alchanatis V, and Klein T. 2019. Use of thermal imaging to detect evaporative cooling in coniferous and broadleaved tree species of the Mediterranean maquis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 285–294.
- Maseyk K, Lin T, Cochavi A, Schwartz A, and Yakir D. 2019. Quantification of leaf-scale light energy allocation and photoprotection processes in a Mediterranean pine forest under extensive seasonal drought. *Tree Physiology*, 39, 1767–1782.
- Mercado LM, Bellouin N, Sitch S, Boucher O, Huntingford C, Wild M, et al. 2009. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature*, 458, 1014–1017.
- Milliman T, Seyednasrollah B, Young AM, Hufkens K, Friedl MA, Frohling S, et al. 2019. *PhenoCam Dataset v2.0: Digital Camera Imagery from the PhenoCam Network, 2000–2018*. ORNL Distributed Active Archive Center.
- Muller JD, Rotenberg E, Tatarinov F, Vishnevetsky I, Dingjan T, Kribus A, et al. 2021. Dual-reference method for high-precision infrared measurement of leaf surface temperature under field conditions. *New Phytologist*, 232, 2535–2546.
- Nadal-Sala D, Medlyn BE, Ruehr NK, Barton CVM, Ellsworth DS, Gracia C, et al. 2021. Increasing aridity will not offset CO₂ fertilization in fast-growing eucalypts with access to deep soil water. *Global Change Biology*, 27(12), 1–21.
- Nardini A, Petruzzellis F, Marusig D, Tomasella M, Natale S, Altobelli A, et al. 2021. Water 'on the rocks': A summer drink for thirsty trees? *New Phytologist*, 229, 199–212.
- Niinemets Ü. 2010. Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation. *Forest Ecology and Management*, 260, 1623–1639.
- NOAA. 2022. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Global Monitoring Laboratory. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends>
- Osborne CP, Mitchell PL, Sheehy JE, and Woodward FI. 2000. Modelling the recent historical impacts of atmospheric CO₂ and climate change on Mediterranean vegetation. *Global Change Biology*, 6, 445–458.
- Osem Y and Moshe Y. 2021. From first generation of pine monocultures to mixed-forest ecosystems: Biotic and abiotic determinants of pine forests' dynamics in Mediterranean Israel. In: Ne'eman G and Osem Y (Eds). *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Springer. pp. 679–699.
- Osem Y, Yavlovich H, Zecharia N, Atzmon N, Moshe Y, and Schiller G. 2013. Fire-free natural regeneration in water limited *Pinus halepensis* forests: A silvicultural approach. *European Journal of Forest Research*, 132, 679–690.
- Osem Y, Zangy E, Bney-Moshe E, Moshe Y, Karni N, and Nisan Y. 2009. The potential of transforming simple structured pine plantations into mixed Mediterranean forests through natural regeneration along a rainfall gradient. *Forest Ecology and Management*, 259, 14–23.
- Oz I. 2021. *Resilience of Aleppo Pine Trees to Drought and Heat as a Function of the Duration of the Stress Period During the Dry Season* (MSc Thesis). Rehovot: The Hebrew University of Jerusalem.

- Ukkola AM, De Kauwe MG, Roderick ML, Abramowitz G, and Pitman AJ. 2020. Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47, 1–9.
- Ungar ED, Rotenberg E, Raz-Yaseef N, Cohen S, Yakir D, and Schiller G. 2013. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 298, 39–51.
- Uni D, Groner E, Soloway E, Hjazin A, Johnswick S, Winters G, et al. 2021. Unexpectedly low $\delta^{13}\text{C}$ in leaves, branches, stems and roots of three acacia species growing in hyper-arid environments. *Journal of Plant Ecology*, 14, 117–131.
- USGCRP. 2017. *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume 1* (Wuebbles DJ, Fahey DW, Hibbard KA, Dokken DJ, Stewart BC, and Maycock TK [Eds]). U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp., doi: 10.7930/J0J964J6. Fig 3: <https://www.climate.gov/media/12886>
- Väänänen PJ, Osem Y, Cohen S, and Grünzweig JM. 2020. Differential drought resistance strategies of co-existing woodland species enduring the long rainless Eastern Mediterranean summer. *Tree Physiology*, 40, 305–320.
- Vargas Zeppetello LR, Battisti DS, and Baker MB. 2020. A new look at the variance of summertime temperatures over land. *Journal of Climate*, 33, 5465–5477.
- Waitz Y and Sheffer E. 2021. Dynamics of mixed pine–oak forests. In: Ne'eman G and Osem Y (Eds). *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Springer. pp. 345–362.
- Wang H, Gitelson A, Sprintsin M, Rotenberg E, and Yakir D. 2020. Ecophysiological adjustments of a pine forest to enhance early spring activity in hot and dry climate. *Environmental Research Letters*, 15, 1–11.
- Way DA and Oren R. 2010. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: A review and synthesis of data. *Tree Physiology*, 30, 669–688.
- Winters G, Otieno D, Cohen S, Bogner C, Ragowloski G, Paudel I, et al. 2018. Tree growth and water-use in hyper-arid Acacia occurs during the hottest and driest season. *Oecologia*, 188, 695–705.
- Yi C, Hendrey G, Niu S, McDowell N, and Allen CD. 2022. Tree mortality in a warming world: Causes, patterns, and implications. *Environmental Research Letters*, 17, 30201.
- Yosef Y, Aguilar E, and Alpert P. 2019. Changes in extreme temperature and precipitation indices: Using an innovative daily homogenized database in Israel. *International Journal of Climatology*, 39, 5022–5045.
- Yosef Y, Saaroni H, and Alpert P. 2009. Trends in daily rainfall intensity over Israel 1950/1–2003/4. *The Open Atmospheric Science Journal*, 3, 196–203
- Zait Y, Konsens I, and Schwartz A. 2020. Elucidating the limiting factors for regeneration and successful establishment of the thermophilic tree *Ziziphus spina-christi* under a changing climate. *Scientific Reports*, 10, 1–12.
- Zait Y and Schwartz A. 2018. Climate-related limitations on photosynthesis and drought-resistance strategies of *Ziziphus spina-christi*. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 1–15.
- Zait Y, Shtein I, and Schwartz A. 2019. Long-term acclimation to drought, salinity and temperature in the thermophilic tree *Ziziphus spina-christi*: Revealing different tradeoffs between mesophyll and stomatal conductance. *Tree Physiology*, 39, 701–716.
- Ziv B, Saaroni H, Pargament R, Harpaz T, and Alpert P. 2014. Trends in rainfall regime over Israel, 1975–2010, and their relationship to large-scale variability. *Regional Environmental Change*, 14, 1751–1764.
- Rogers BM, Solvik K, Hogg EH, Ju J, Masek JG, Michaelian M, et al. 2018. Detecting early warning signals of tree mortality in boreal North America using multiscale satellite data. *Global Change Biology*, 24, 2284–2304.
- Rohatyn S, Rotenberg E, Ramati E, Tatarinov F, Tas E, and Yakir D. 2018. Differential impacts of land use and precipitation on "ecosystem water yield". *Water Resources Research*, 54, 5457–5470.
- Rohatyn S, Rotenberg E, Yakir D, and Carmel Y. 2021. Assessing climatic benefits from forestation potential in semi-arid lands. *Environmental Research Letters*, 16, 1–13.
- Rotenberg E and Yakir D. 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science*, 327, 451–454.
- Rotenberg E and Yakir D. 2011. Distinct patterns of changes in surface energy budget associated with forestation in the semiarid region. *Global Change Biology*, 17, 1536–1548.
- Salomón RL, Peters RL, Zweifel R, Sass-Klaassen UGW, Stegehuis AI, Smiljanic M, et al. 2022. The 2018 European heatwave led to stem dehydration but not to consistent growth reductions in forests. *Nature Communications*, 13, 1–11.
- Schiermeier Q. 2018. Climate as culprit: Weather forecasters will soon provide instant assessments of global warming's influence on heatwaves and floods. *Nature*, 560, 20–22.
- Schiermeier Q. 2019. Europe's mega-heatwave boosted by climate change. *Nature in Focus: News*, 571, 155.
- Schuldts B, Buras A, Arend M, Vitasse Y, Beierkuhnlein C, Damm A, et al. 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology*, 45, 86–103.
- Sheffer E, Cooper A, Perevolotsky A, Moshe Y, and Osem Y. 2020. Consequences of pine colonization in dry oak woodlands: Effects on water stress. *European Journal of Forest Research*, 139, 817–828.
- Shohami D, Dayan U, and Morin E. 2011. Warming and drying of the eastern Mediterranean: Additional evidence from trend analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, 1–12.
- Slingo J and Palmer T. 2011. Uncertainty in weather and climate prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369, 4751–4767.
- Socket T. 2015. *Analyzing tree mortality in the Yatir forest (Israel)* (PhD dissertation). Leipzig: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Stavi I, Yizhaq H, Szitenberg A, and Zaady E. 2021. 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.
- Stefanon M, Dandrea F, and Drobinski P. 2012. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, 7, 1–9.
- Steinitz O, Troupin D, Vendramin GG, and Nathan R. 2011. Genetic evidence for a Janzen–Connell recruitment pattern in reproductive offspring of *Pinus halepensis* trees. *Molecular Ecology*, 20, 4152–4164.
- Tarnita CE, Bonachela JA, Sheffer E, Guyton JA, Coverdale TC, Long RA, et al. 2017. A theoretical foundation for multi-scale regular vegetation patterns. *Nature*, 541, 398–401.
- Tatarinov F, Rotenberg E, Maseyk K, Ogée J, Klein T, and Yakir D. 2016. Resilience to seasonal heat wave episodes in a Mediterranean pine forest. *New Phytologist*, 210, 485–496.
- Tsamir M, Gottlieb S, Preisler Y, Rotenberg E, Tatarinov F, Yakir D, et al. 2019. Stand density effects on carbon and water fluxes in a semi-arid forest, from leaf to stand-scale. *Forest Ecology and Management*, 453, 117573.



עצי סקויה ב-Calaveras big trees state park קליפורניה, ארה"ב 2022
צילום: יקיר פריזלר

מחזור המים המפתיע בנגב בקיץ

נורית אגם* | משה שחק

המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, קמפוס שדה בוקר
 agam@bgu.ac.il *

תקציר

לזריחת השמש ביום המחרת. מקור האדים הוא הבריזה היומית. מחזור מים זה אומנם קטן מאוד, אך גם עקבי מאוד. ניתוח נתונים ראשוני ממדידות של ריכוז פחמן דו-חמצני מצביע על קשר אפשרי בין תוספת המים לקרקע בעקבות ספיחת אדי מים לבין הפעילות הביולוגית בקרקע חשופה במהלך הקיץ בנגב. זהו ממצא חשוב וחדשני, ויש להמשיך ולבחון אותו לעומק כדי להבין את חשיבות התהליך במערכת אקולוגית זו.

יציבותה, תפקודה, וקיימותה של מערכת אקולוגית דמוית סוואנה נקבעים על ידי המשוב בין התועלת לבין התפקוד של המערכת האקולוגית. כדי להבטיח יציבות ותפקוד מיטבי של המערכת שומה עלינו להבין לעומקה את המערכת האקולוגית על היבטיה השונים ואת קשרי הגומלין ביניהם בדגש על התהליכים בעונה היבשה המשפיעים על תפקודי המערכת בעונת הגשמים. בבסיס המחקר המובא כאן עומדת ההשערה שהמבנה והתפקוד של מערכות צחיחות נקבעים על ידי שטפי האנרגיה והמים גם במהלך העונה היבשה. שטפים אלה מניעים את הייצור הראשוני והשניוני ואת תהליכי הפירוק, ולפיכך הם בעלי השפעה מכרעת על היציבות והקיימות של המערכת האקולוגית. כדי לבחון את יחסי הגומלין בין שטפי האנרגיה והמערכת דמוית הסוואנה הוקמה תחנת מדידה בחוות המחקר משאש, המצויה מצפון לצומת הנגב, במרכז המעבר החד מאזור צחיח למחצה לאזור צחיח קיצוני. באתר הוקם מגדל שטף, שלווה במדידות היקפיות נוספות. בניגוד לסברה הרווחת, מצאנו כי קיים מחזור הידרולוגי מובהק וחוזר על עצמו במהלך כל העונה היבשה. במהלך תקופה זו אנו עדים לקליטה של אדי מים מהאטמוספירה אל הקרקע משעות אחר הצהריים ועד

מילות מפתח

מאזן האנרגיה, מישורי הלס, מערכת דמוית סוואנה, ספיחת אדי מים, ריכוז פחמן דו-חמצני

מבוא

לאחרונה נמצאו ממצאים דומים ביער נטוע על ספר המדבר (יער יתיר בצפון-מזרח הנגב) המעידים על ספיחה של אדי מים ישירות מהאטמוספירה לקרקע. אף על פי שכמויות המים קטנות יחסית, רק כ-4% מסך הגשם, חשיבותו של שטף זה ביער היא שהוא עשוי לספק הגנה קריטית מפני התייבשות במהלך הקיץ הארוך, על ידי האטת התנועה כלפי מעלה ואובדן מי הקרקע שנתרו באזור בית השורשים (Qubaja et al., 2020). כמות אדי המים שנספחו ביער יתיר תואמת את כמויות הספיחה היומיות שפורסמו עבור קרקעות חשופות – 0.100–0.144 מ"מ ליום (Kosmas et al., 1998; Jacobs et al., 2000; Ninari and Berliner, 2002; Verhoef et al., 2006).

הממצאים האלה הולידו את התובנה שיש צורך במחקרים שיקשרו בין שטפי אנרגיה פיזיקליים וכלל שטפי המים, הכוללים גשם, נגר, טל ולחות קרקע, לבין המשוב צמח-קרקע המונע על ידי זרימת האנרגיה האקולוגית. במחקר שבחן פירוק נשר עלים באקלים ים תיכוני בישראל (Gliksman et al., 2017) נמצא כי לחות האוויר והתעבות הטל מפעילות תהליכי פירוק בעונה היבשה, וכי תהליכי הפירוק בעונה זו הם תוצאה של פירוק החומר האורגני על ידי חיידקים ואורגניזמים אחרים המונעים על ידי טל ולחות האוויר. מכאן, תהליכי הפירוק בעונה היבשה תלויים במאזני האנרגיה והמים היומיים, אשר בעצמם תלויים במיקרו-אקלים בשכבת האטמוספירה התחתונה.

לנושא שטפי מים ואנרגיה והשפעתם על פירוק וייצור ראשוניים ועל המשוב צמח-קרקע יש חשיבות רבה לתפקוד מערכות אקולוגיות מוגבלות מים, טבעיות ומעשה ידי אדם כאחד. על אף הידע המדעי המוגבל בנושא העלינו את ההשערה הבאה: **המבנה והתפקוד של מערכות צחיחות נקבע על ידי שטפי האנרגיה והמים גם במהלך העונה היבשה. שטפים אלה מניעים את הייצור הראשוני, את הייצור השניוני ואת תהליכי הפירוק, ולפיכך הם בעלי השפעה מכרעת על היציבות והקיימות של המערכת האקולוגית.** מתוך כך נגזר כי יש צורך בהקמת תשתית לחקר שטפי המים והאנרגיה בעונה היבשה כחלק חיוני בחקר ובהבנה של המבנה, התפקוד והמשק של מערכות מוגבלות מים. לשם כך יש לבצע בשלב ראשון מחקר ארוך טווח על שטפי המים והאנרגיה בקנה מידה יומי, עונתי ושנתי כדי לעמוד על החוקיות של השטפים בתנאי אקלים משתנים. מחקר יסודי ואינטגרטיבי המקיף את הנושאים הללו, בשילוב השפעתם על מרכיבים ביוטיים ותפקודם, יבטיח הבנה מעמיקה יותר של המערכת האקולוגית, ויאפשר בניית מודל מתקדם יותר למבנה ולתפקוד של מערכות תומכות חיים באזורים צחיחים בעונת הגשמים ובעונה היבשה. אנו מעריכים שהצטברות הידע בנושא

מערכות אקולוגיות צחיחות, טבעיות ומעשה ידי אדם, הן מוגבלות מים. זו הסיבה שבאופן מסורתי המחקר על המבנה והתפקוד של מערכות אלה התמקד בהשפעת הגשם והנגר בעונת הגשמים על הייצור הראשוני, שמניע את המערכת האקולוגית. עם זאת, מחקרים רבים מצביעים על כך שכדי להבין את מצב המערכת וליצור ממשק מיטבי אין להסתפק בהבנת השפעת קלט המים על פירוק שעושים אורגניזמים בתקופת החורף בלבד. הם מדגישים שפוריותה ויציבותה של המערכת תלויות במשוב קרקע-צומח לאורך השנה (Hooper and Johnson, 1999). משוב זה כולל את תהליכי פירוק נשר העלים שמשפיעים על תפקודי הקרקע במונחים של חומר אורגני, והוא בתורו משפיע על משק המים מחד גיסא ועל אספקת הנוטריינטים לצומח מאידך גיסא (Gliksman et al., 2018).

מחקרים הראו שבמערכות אקולוגיות שונות פירוק של נשר עלים על ידי קרינה וחום בלבד הביא לאיבוד של כ-60% מנשר העלים בעונת היובש (Austin and Vivanco, 2006); מחקרים אחרים הראו כי שטפים אביוטים עשויים להביא למינרליזציה של כ-14% מהייצור הראשוני (Foereid et al., 2011) וכי הם תורמים לייצור הראשוני באספקת נוטריינטים (Rutledge et al., 2010). בתנאי מעבדה נמצא כי פירוק נשר עלים הֶחַל מעל סף של 13% תכולת מים בנשר העלים ולחות יחסית של 75% (Bartholomew and Norman, 1947). מחקרים עכשוויים מצביעים על כך שתהליכי פירוק נשר העלים שונים מתהליכי הייצור הראשוני בכך שהם מושפעים לא רק מקלט המים בעונה הרטובה ומזרימת האנרגיה האקולוגית, אלא גם מזרימת האנרגיה הפיזית (קרינה) ומקלט מים שמקורו אינו גשם (Grünzweig et al., 2007; Parker and Schimel, 2012; Sullivan et al., 2011). במחקרים האלה זוהו פערי ידע בהבנת המבנה והתפקוד של מערכות מוגבלות מים שלא הביאו בחשבון את: (1) שטפי המים שמקורם אינו גשם, כלומר טל ולחות האוויר בתקופות היבשות, והשפעתם על תהליכי הפירוק ועל אספקת הנוטריינטים לצמחים שמווסתים את הייצור הראשוני; (2) שטפי האנרגיה בעונה היבשה והשפעתם על שטפי המים מצד אחד ועל תהליכי פירוק הנשר מצד שני.

משקעים שאינם גשם, קרי ערפילים, טל וספיחה ישירה של אדי מים מהאטמוספירה בקרקע, מהווים תוספת מים חשובה מאוד באזורים צחיחים וצחיחים למחצה (Agam and Berliner, 2006). בנגב נמצא כי מנגנון תוספת המים העיקרי (פרט לגשם) הוא תהליך של ספיחה ישירה של אדי מים מהאטמוספירה לקרקע (Agam and Berliner, 2004).

4-דרך (CNR1 של Kipp & Zonen ו-Net-Radiometer של Apogee), ושטף החום בקרקע נמדד בשלוש חזרות באמצעות פלטות שטף חום (HFT-3, Radiation Energy Balance Systems, Bellevue, Washington) ומעליהן מדידת טמפרטורה באמצעות צמידים תרמיים (thermocouple). תכולת המים בקרקע נמדדה בארבע חזרות בעומקים 5 ו-10 ס"מ בחיישנים (315L של חברת Acclima) שמחוברים לאוגרי נתונים (CR310, Campbell Scientific).

כמו כן, התבצעו מדידות נוספות שמסייעות בהבנת המערכת האקולוגית בעזרת מכשירים שונים:

- מיקרו-ליזימטר. שקילה רציפה של דוגמאות קרקע בלתי מופרות למדידת שינויים בתכולת המים בקרקע (Ninari and Berliner, 2002).
- סינטיילומטר שכבת פני השטח (Boundary Layer Scintillometer). המכשיר מודד את תנודות הערבול של מקדם השבירה של האוויר, והוא הוצב כמתואר (Aצל Florentin and Agam (2017).
- רדיומטר רב-ערוצי למדידת טמפרטורה ואמיסיביות (emissivity); היחס בין כמות הקרינה הכוללת שפולט גוף, לקרינה שפולט גוף שחור אידיאלי בעל אותה טמפרטורה) של פני השטח (Wei et al., 2015).

תוצאות

אתגר המדידה והשוואה בין שטפים

מטבע הדברים, שטפי המים בקיץ היבש קטנים מאוד, והדבר מאתגר את המדידה המדויקת שלהם. במחקרים קודמים הוכחנו שמיקרו-ליזימטרים, בתנאי שנבנים נכון, מודדים באופן מדויק ורציף את שטפי המים הקטנים בקיץ שנובעים מספיחת אדי מים והתאדותם (Ninari and Berliner, 2002). החיסרון העיקרי של המיקרו-ליזימטרים, מלבד הקושי בהתקנתם המדויקת, הוא שהם מייצגים שטח קטן מאוד (0.03 מ"ר). בהינתן ההטרוגניות הטבעית הגדולה של קרקעות, חשוב להגדיל את קנה המידה של המדידה. היות שכך, בחנו את היכולת של מערכת מתאם המערבלים לנטר את השטפים הללו. מערכת זו מבוססת על מדידת השינויים בטמפרטורה ובריכוז אדי המים והפחמן הדו-חמצני בתדירות גבוהה מאוד (10–20 הרץ) במקביל למדידת מהירות הרוח בשלושה ממדים. היתרון הגדול של מדידה זו הוא שהיא ממצעת את השטפים על פני שטח של כ-400 מ"ר (משתנה כתלות בגובה הצבת המערכת ובתנאי הסביבה). חסרונה העיקרי לצורך מדידת השטפים הקטנים הוא שהם קרובים לקצה גבול יכולת הניטור של המערכת. לבחינת התאמת המערכת לניטור השטפים האלה נקטנו

של שטפי האנרגיה והמים לאורך כל השנה והשפעתם על המערכות הטבעיות והמערכות מעשה ידי אדם בנגב תסייע לממשק מושכל ומותאם של שילוב פעילות אנתרופוגנית להפקת מרב הפוריות והמגוון ממערכות מדבריות.

במאמר זה נראה, כי בניגוד לסברה הרווחת, שבמהלך הקיץ הארוך והיבש לא קיים מחזור מים יומי, ומכאן ההנחה המתחייבת שהפעילות הביוטית בתרדמת, בפועל קיים בנגב מהלך יומי קבוע של קליטת מים לקרקע והתאדותם, ונראה עדויות ראשונות לקשר בין מחזור מים זה למחזור הפחמן הדו-חמצני המעיד על פעילות ביוטית.

ההשלכות של מחקרי השטפים וחשיבותם לאסטרטגיית ממשק אדם-טבע בנושא השיקום התפקודי בנגב מתבררים כאשר ממקמים את המחקרים במסגרת הכללית של מבנה ותפקוד מערכת דמוית סוואנה (ערבה מנוקדת עצים ושיחים). למערכת שני מרכיבים: המערכת האקולוגית הייחודית דמוית הסוואנה, ושירותי המערכת האקולוגית שהיא מספקת, ובכללם התועלת שהיא מביאה לאדם. יציבותה וקיימותה של המערכת האקולוגית דמוית הסוואנה נקבעות על ידי המשלב בין התועלת לבין תפקודה של המערכת. לצורך הבנת תהליכי משוב אלה, שומה עלינו להבין לעומקה את המערכת האקולוגית על היבטיה השונים ויחסי הגומלין ביניהם תוך דגש על התהליכים בעונה היבשה המשפיעים על תפקודי המערכת בעונת הגשמים.

מערך הניטור

תחנת המדידה הוקמה בחוות המחקר משאש המצויה מצפון לצומת הנגב, באמצע הדרך בין באר-שבע לשדה בוקר, במרכז המעבר החד מאיזור צחיח למחצה (קו באר-שבע) לאזור צחיח קיצון (שדה בוקר). מיקום ייחודי זה הופך אותה למתאימה במיוחד למחקרים על שטפים במערכת האקולוגית של מישורי הלס בתנאים של מגבלת מים בעידן של שינוי אקלים מהיר.

באתר הוקם מגדל שטף הכולל מערכת מתאם מערבליים (eddy covariance) מסוג Irgason (Campbell Scientific, inc.) שהוצבה בגובה 1 מטר כדי להבטיח אורך נשיבה מספק מכיוון הרוח השכיחה (צפון-מערב). מערכת זו מודדת את מהירות הרוח בשלושה ממדים בתדירות של 20 הרץ, ובמקביל נמדדים באותה תדירות טמפרטורת האוויר, ריכוז אדי המים וריכוז הפחמן הדו-חמצני. מתוך מדידות אלה מחושבים שטפי החום המוחשי והכמוס. רכיבי הקרינה (קרינה קצרת גלים נכנסת ומוחזרת, וקרינה ארוכת גלים נכנסת ויוצאת) נמדדו באמצעות שני מכשירי קרינה

סטייה של כ-10% בשעות השיא של השטף ומהלך יומי זהה מצביעים על התאמה טובה מאוד, ומבססים את השימוש בשיטת מתאם המערבלים לניטור שטפי חום מעל קרקע יבשה בנגב בעונת הקיץ.

שטף החום הכמוס

המעניין מכולם הוא שטף החום הכמוס. באזור הנגב בסוף אוגוסט, מספר חודשים לאחר אירוע הגשם האחרון, מזג האוויר חם ויבש. הסברה הרווחת היא כי לא קיים שטף חום כמוס (כלומר התאדות), שכן כדי שתהיה התאדות צריך שיהיה מקור מים. עם זאת, איור 3 מראה בבירור מהלך יומי של שטף חום כמוס, אומנם קטן, אך עקבי. עוד ניתן לראות, כי השטף משנה את כיוונו מחיובי (התאדות) לשלילי (קליטה של מים לקרקע) בשעות אחר הצהריים, סביב השעה 17:00, מעט לפני ששטף החום לקרקע משנה את כיוונו. שטף החום הכמוס נשאר שלילי עד כשעה לאחר הזריחה.

במקביל למדידות באמצעות המיקרו-ליזימטרים ומערך מתאם המערבלים, ובמטרה להצליח לכמת את מחזור המים היומי בקנה מידה מרחבי גדול יותר, ביצענו במהלך קיץ 2019 מדידות עם רדיומטר אינפרה-אדום רב-ערוצי (CE312, CIMEL, inc., France). מאחר שהחתימה התרמית של הקרקע תלויה בתכולת הרטיבות באמצעות שימוש בשלושה מתוך חמשת הערוצים התרמיים של המכשיר

שני צעדים מקבילים: השלמת מאזן האנרגיה ומדידת שטף החום המוחשי באמצעות סינטיילומטר פני שטח במקביל למערך מתאם המערבלים (Florentin and Agam, 2017). כמו כן בחנו גם את ההיתכנות למדידה של שטף החום הכמוס באמצעות ניטור שינויים באמיסיביות של פני השטח, שתאפשר את הגדלת קנה המידה של המדידה לקנה מידה אזורי.

מאזן האנרגיה

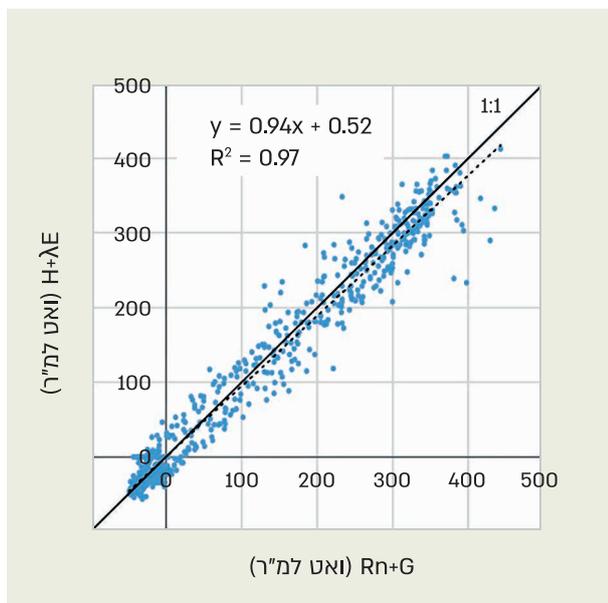
מאזן האנרגיה בפני השטח על קרקע חשופה ניתן לתיאור באמצעות נוסחה (1):

$$Rn = G + H + \lambda E$$

כאשר Rn הקרינה נטו, G – שטף החום לקרקע, H – שטף החום המוחשי, ו- λE שטף החום הכמוס. הקרינה נטו, שהיא סך כל הקרינה קצרת הגל וארוכת הגל הנכנסת, פחות סך כל הקרינה קצרת הגל וארוכת הגל היוצאת, היא האנרגיה הזמינה במערכת. אנרגיה זו משמשת לשלושה שטפים עיקריים – לחימום הקרקע (G), לחימום האוויר (H) ולמעבר פאזה של המים מנוזל לגז, קרי התאדות (λE). שני השטפים האחרונים הם שטפים התלויים במקדם המעבר של האטמוספירה, ושניהם נמדדים על ידי מערך מתאם המערבלים. דרך מקובלת לבחינת איכות הנתונים היא בחינת מידת הסגירה של מאזן האנרגיה. לצורך כך מפחיתים את שטף החום בקרקע מהקרינה נטו ($Rn-G$), וזו האנרגיה הזמינה לשטפים הטורבולנטיים ($H+\lambda E$). מאזן מושלם מציב את הנקודות של האחד ביחס לשני על קו השוויון 1:1. כזה, כאשר המדידות מתבצעות באמצעות מערך מתאם המערבלים, הוא תאורטי בלבד, שכן ידוע שהמכשיר לעולם אינו מסוגל לקלוט את כל קשת המערבלים העוברת דרכו, ולכן ערכי סגירת מאזן (closure; מבוטא באמצעות שיפוע קו הרגרסיה) נעים בדרך כלל בין 0.8 ל-0.95. באיור 1 מוצגות תוצאות בחינת סגירת מאזן האנרגיה עבור מספר ימי מדידה מייצגים. ניתן לראות כי השיפוע של קו הרגרסיה (closure) הוא 0.94. הערך הגבוה מעיד על תקינות המערכת ועל אמינות המדידות.

שטף החום המוחשי

מאחר שהסינטיילומטר ומערך מתאם המערבלים, שמודדים שניהם את שטף החום המוחשי, מבוססים על תאוריה שונה ועל סט הנחות שונה, התאמה טובה ביניהם תעיד, בהכרח, על אמינות המדידות. המהלך היומי של שטף החום המוחשי כפי שנמדד על ידי מערך מתאם המערבלים והסינטיילומטר מוצג באיור 2. בהינתן שהשטח התורם לשני המכשירים אינו זהה, והשטח עצמו הוא שטח טבעי עם שונות מרחבית שעשויה להשפיע על המדידות, מקדם מתאם של 0.97, עם



איור 1

סגירת מאזן האנרגיה

השטפים הטורבולנטיים ($H+\lambda E$) כנגד האנרגיה הזמינה ($Rn-G$)

המעידה על פוטנציאל לשימוש במדידות אמיסיביות לכימות תהליך הספיחה מקרקע לס חשופה. זהו ממצא חדשני וחשוב בעל השלכות נרחבות, ויש להמשיך ולבחון אותו.

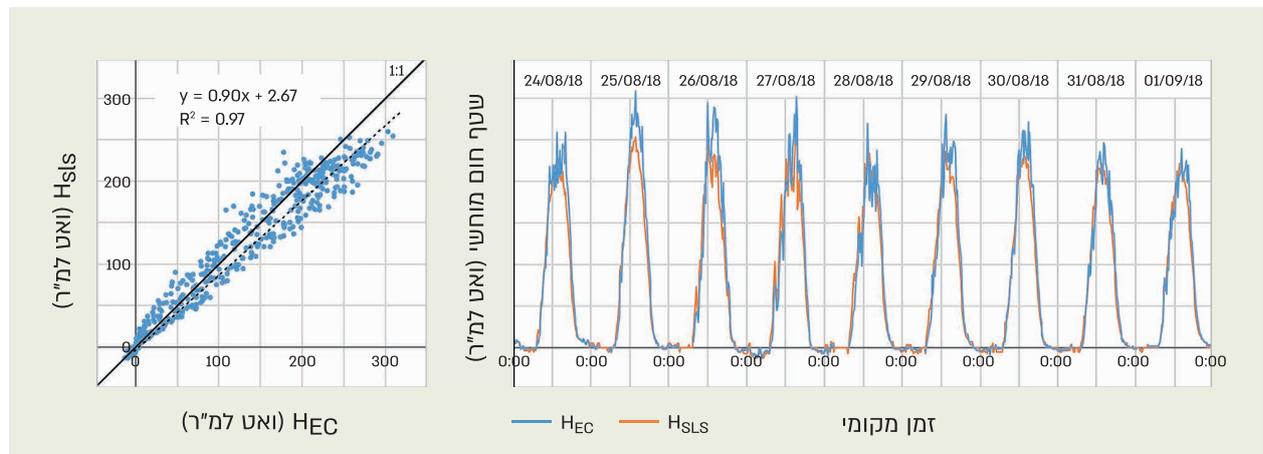
(8.3, 10.6, ו-11.3 מיקרומטר), חישבנו את מדד הספיחה (AdI; נוסחה 2):

$$AdI = \frac{\epsilon_{11.3} - \epsilon_{8.3}}{\epsilon_{10.6}}$$

הספיחה והבריזה

משגיבשנו ביטחון ביכולת שלנו למדוד את שטפי המים הקטנים באופן מדויק במספר שיטות ובקני מידה מרחביים שונים, אפשר להתבונן בתופעה מעניינת זו של קיומו של מחזור מובהק וחוזר על עצמו של מים ואנרגיה, שמתרחש במהלך העונה היבשה (מכחודש לאחר הגשם האחרון), בדרך כלל סביב חודש מאי, ועד לגשם הראשון בסביבות

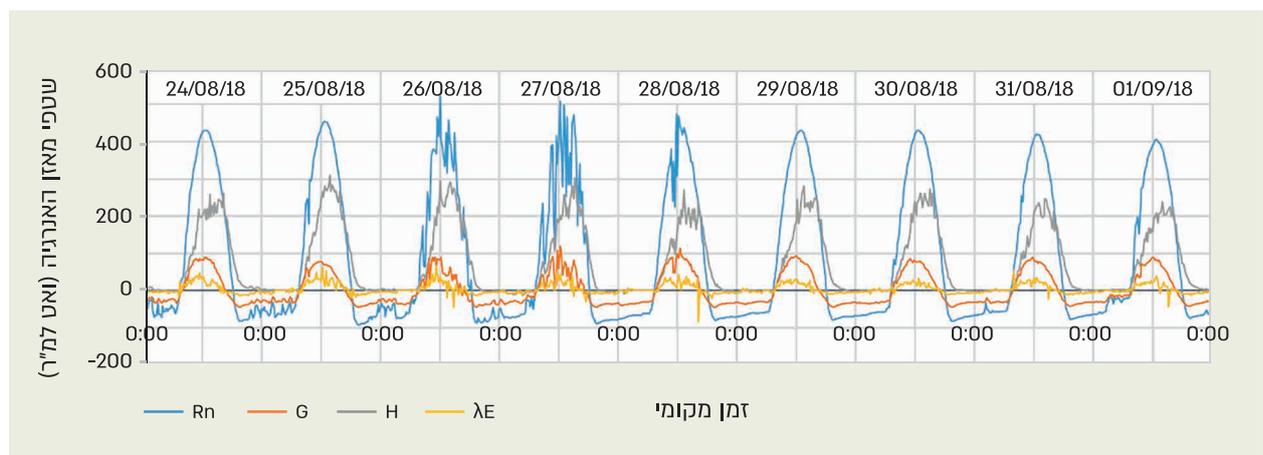
כאשר ϵ היא האמיסיביות של הקרקע, והמספרים התחתיים מציינים את אורכי הגל הספציפיים. איור 4 מציג את מידת ההתאמה בין מדידות המיקרו-ליזימטר למדידות הרדיומטר הרב-ערוצי במהלך קליטת המים בקרקע. ניתן לראות התאמה יפה בין שתי השיטות,



איור 2

המהלך היומי של שטף החום המוחשי במידות מערך מתאם המערבלים והסינטיולומטר

א. מהלכים יומיים של שטף החום המוחשי שנמדדו באמצעות סינטיולומטר ומערך מתאם המערבלים; ב. השוואה בין מדידות שטף החום הכמוס בין הסינטיולומטר למערך מתאם המערבלים (מתוך Florentin and Agam, 2017).



איור 3

מהלכים יומיים של רכיבי מאזן האנרגיה

קרנינה נטו (net radiation), שטף חום בקרקע (soil heat flux), שטף חום מוחשי (sensible heat flux) ושטף החום הכמוס (latent heat flux).

ועד לגשם הראשון (-ספטמבר/אוקטובר). כך שמדובר על כמעט חצי שנה שבמהלכה מתרחש תהליך זה. השאלה המתבקשת היא, אם כך, האם יש לתהליך השפעה על המערכת האקולוגית? יצאנו לבדוק.

השפעת תהליך הספיחה על המערכת האקולוגית

כשלב ראשון, החיבור בין תהליך הספיחה לפעילות של המערכת האקולוגית התבצע באמצעות מדידת ריכוז הפחמן הדו-חמצני במהלך היממה. ההנחה היא כי שטף הפחמן הדו-חמצני מהקרקע מבטא פעילות ביולוגית. מאחר שהמדידות התבצעו מעל קרקע חשופה, פעילות ביולוגית כזו מקורה בפעילות של קרום ביולוגי או בפעילות חיידקית בקרקע. כך או כך, איור 6 מציג את המהלך היומי של ריכוז הפחמן הדו-חמצני שנמדד באמצעות מגדל השטף, במקביל לשינויים בתכולת הרטיבות בקרקע, המייצגים את ספיחת אדי המים והתאדותם, כפי שנמדדו באמצעות המיקרו-ליזימטרים.

הנתונים מראים עלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני מייד לאחר הזריחה, אז תכולת הרטיבות בקרקע היא הגבוהה ביותר, והקרינה מספיקה כדי לשפועל את הפעילות. משעות הזריחה והלאה ריכוז הפחמן הדו-חמצני יורד, למעט עלייה וירידה חדות בשעות הערב, סביב השקיעה. אלה נתונים ראשוניים, המצביעים על קשר אפשרי בין תוספת המים לקרקע בעקבות ספיחת אדי מים לבין הפעילות הביולוגית בקרקע חשופה במהלך הקיץ בנגב. זהו ממצא חשוב וחדשני שיש להמשיך ולבחון אותו לעומק כדי להבין את חשיבות התהליך במערכת אקולוגית זו.

המערכות האקולוגיות דמויות הסוואנה בנגב הן **מערכות אקולוגיות חדשניות** (Novel Ecosystems) בתהליכי

אוקטובר). במהלך תקופה זו אנו עדים לקליטה של אדי מים מהאטמוספירה אל הקרקע משעות אחר הצהריים ועד לזריחת השמש ביום המחרת.

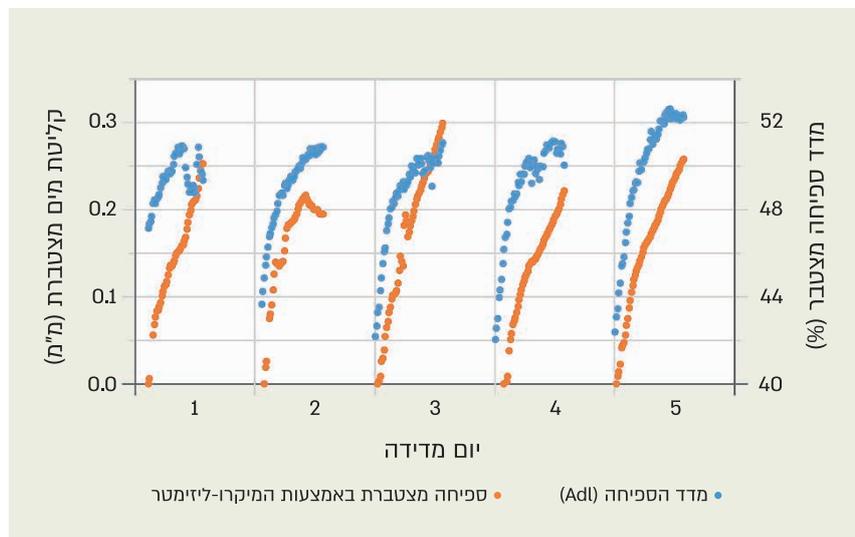
כדי שתהיה קליטה של מים, צריך מקור מים, ואכן נראה כי שעת ההתחלה של התהליך תואמת את שעת ההגעה של הבריזה הימית לאזור (איור 5). הקרבה היחסית לים התיכון (כ-80 ק"מ בקו אווירי) והפרש הטמפרטורה הגדול בין פני הקרקע ופני הים במהלך היום יוצרים תנועת אוויר מעגלית. אוויר חם מעל הקרקע עולה למעלה, ואוויר קריר ולח נכנס מהים. ניתן לראות בבירור את הדומיננטיות המוחלטת של הבריזה (רוח צפון-מערבית) במשטר הרוחות באזור במהלך הקיץ (איור 5א), את הביטוי של הבריזה בעלייה במהירות הרוח בשעות אחר הצהריים ואת התקדמות שעת שיא המהירות ככל שמתרחקים מהים (איור 5ב), ואת העלייה המקבילה בלחץ אדי המים המוסעים עם הרוח (איור 5ד).

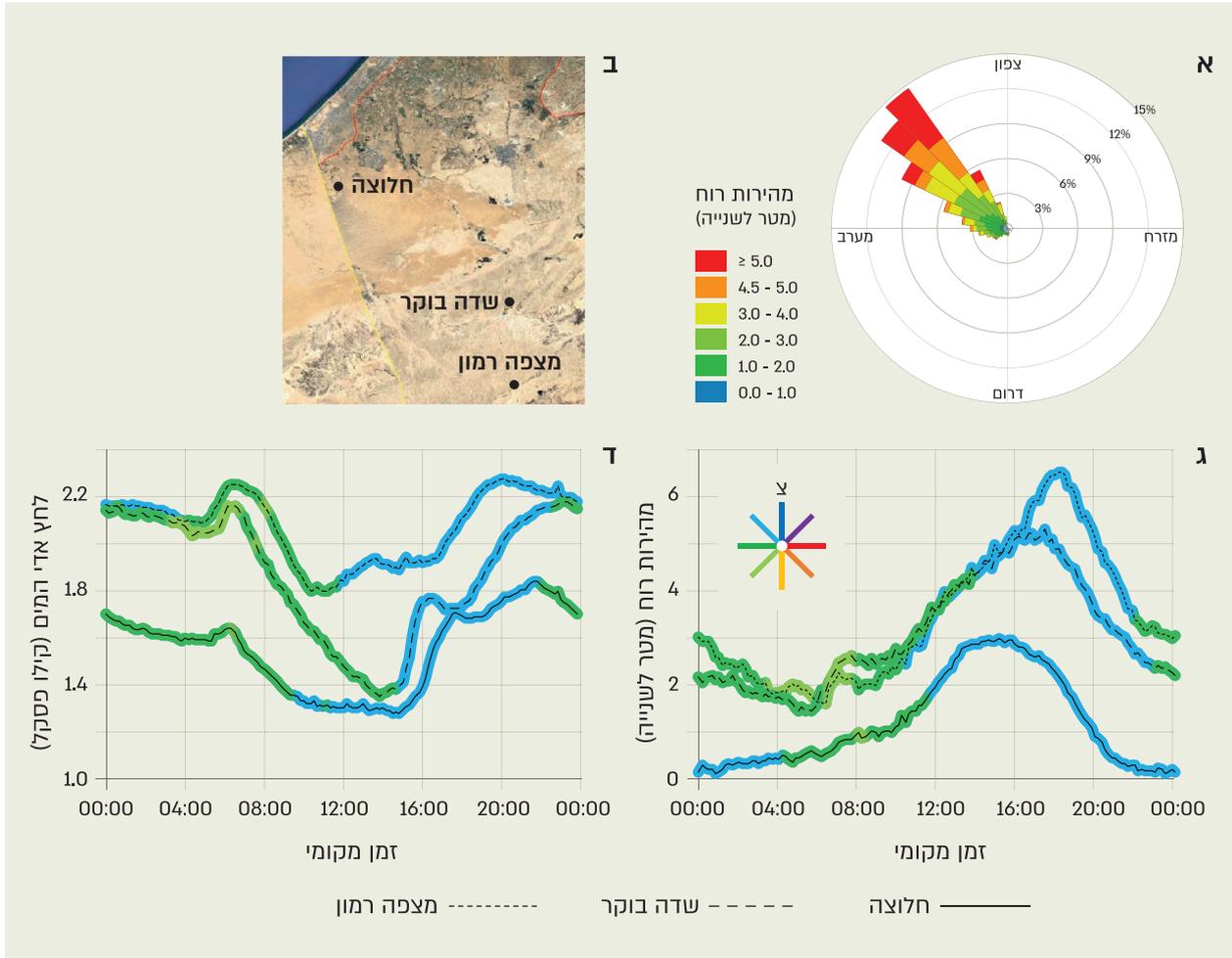
העלייה בלחץ אדי המים באוויר בצירוף קרקע יבשה מאוד יוצרת היפוך מפל (gradient) בלחץ אדי המים, וגורם לשטף של אדי מים מהאוויר אל הקרקע. אדי המים שחוזרים לקרקע נספחים על החלקיקים ונאחזים בהם, וכך מתקבלת עלייה בתכולת הרטיבות בשכבת הקרקע העליונה החל משעות אחר הצהריים עם כניסת הבריזה, ועד לזריחה ביום למחרת. עם הזריחה וכניסת אנרגיה למערכת, אדי המים הספוחים מתחילים להתאדות, ותכולת הרטיבות בקרקע יורדת.

מחזור מים זה אומנם קטן מאוד (מדובר בשינויים של 2%-1% בתכולת הרטיבות ב-5 ס"מ העליונים של הקרקע), אך גם עקבי מאוד, והוא מתרחש למעשה כל יום במהלך העונה היבשה, החל מכחודש אחרי הגשם האחרון (-מאי)

איור 4

השוואה בין מדידות הספיחה המצטברת באמצעות מיקרו-ליזימטר לבין חישוב הספיחה באמצעות מדד הספיחה (AdI) המדידות נעשו במהלך חמישה ימים בתאריכים 5-9 באוגוסט 2019.





איור 5

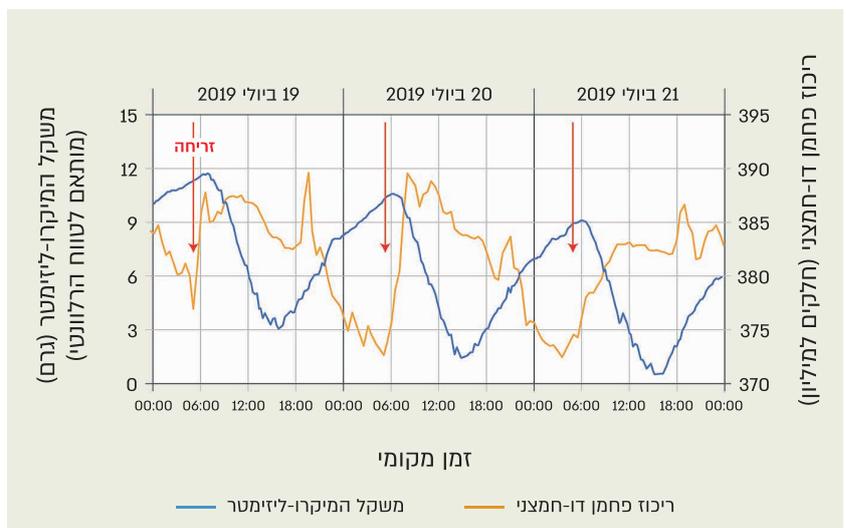
משטר הרוחות והלחות באוויר בהשפעת הבריזה כפונקציה של המרחק מהים

שושנת רוחות בחודשים מאי-אוקטובר בחוות משאש, המעידה על הדומיננטיות המוחלטת של הבריזה מהים במשטר הרוחות (א). שלוש נקודות במרחק משתנה מהים (ב) מראות את מהירות הרוח (ג) ולחץ אדי המים (ד) במהלך חודש יולי. כל נתון הוא הממוצע לחודש יולי בשעה הנתונה. הצבעים מייצגים את כיוון הרוח (בהתאם למקרא הצבעים בלוח ג). ניתן לראות את החדירה ההדרגתית של הבריזה מהחוף פנימה, ובהתאם לכך את העלייה בלחץ אדי המים.

איור 6

המהלך היומי של ריכוז הפחמן הדו-חמצני וספיחה והתאדות של אדי המים בקרקע

ריכוז הפחמן הדו-חמצני נמדד באמצעות מגדל השטף. השינויים בתכולת הרטיבות בקרקע, המייצגים את ספיחת אדי המים והתאדותם, נמדדו באמצעות המיקרו-ליזימטרים. החיצים האדומים מסמנים את שעת הזריחה.



קרקע-צמח בהכנת מאגר נוטריינטים לשימוש הצומח בעונת הגשמים. נוסף על תפקודי המיקרו-אורגניזמים כמפרקים, הם מהנדסי קרומי קרקע, ופעילותם, המונעת על ידי שטפי המים בקיץ, עשויה להשפיע על קרומי הקרקע כמקור נגר לצמחים באירועי גשם בעונת החורף.

לפי מודל זה של מערכת דמוית סוואנה, ממשק מבוסס מדע חייב להיות מוכתב מתפקודה של המערכת האקולוגית בתהליכי ייצור (זרימת אנרגיה) ופירוק (מחזור יסודות) לאורך כל השנה, ולהתחשב בתנודות אקלימיות המניעות את שטפי המים והאנרגיה בעונת הגשמים, כמו גם בעונת היובש. בעונת הגשמים על המחקר והממשק להתמקד בתהליכים הקובעים את הייצור הראשוני ואת יציבותו בעידן של תנודות קיצוניות של שטפי מים ואנרגיה. בעונת היובש עליהם לעסוק בייצור שניוני ובתהליכי פירוק. כל זאת, מתוך הנחה שהשטפים בחורף ובקיץ משלימים זה את זה, ומאפשרים עמידות של המערכת בתנאי אקלים משתנים וקיצוניים.

מיקומו הגאוגרפי של המערך דמוי הסוואנה בישראל, במישורי הלס, באזור המעבר בין אקלים ים תיכוני למדבר,

התפתחות. ממשק מושכל של מערכות ייחודית אלה מחייב מחקר מתמשך על המבנה והתפקוד שלהן, שמונעים, במרחב ובזמן, על ידי שטפי אנרגיה ומים אביוטיים וביוטיים. מאמר זה מתמקד בשטפי המים והאנרגיה בעונת היובש (עונה ללא גשם) ובהערכת חשיבותם לתפקוד המערכת בעונת הגשמים.

מארג התהליכים במערכות האקולוגיות דמויות הסוואנה מקורו בייצור הראשוני של עצים, שיחים ועשבונים, והמשכו בייצור השניוני של בעלי חיים ובתהליכי פירוק על ידי מיקרו-אורגניזמים. המארג מונע על ידי שטפי המים והאנרגיה האביוטיים בעונת היובש (איור 7). המהלך היומי של שטפי המים (לחות אוויר, לחות קרקע וטל) ושטפי האנרגיה משפיעים ישירות ובעקיפין (באמצעות פעילות בעלי חיים) על מאגר נשר העלים וההפרשות שמצטבר בעונת היובש. במקביל ליצירת מאגר נשר הצמחים, שגודלו מוסת על ידי שטפי המים והאנרגיה, מניעים שטפים אלה את פירוקו של המאגר ואת הפיכתו למאגר של חומר אורגני ונוטריינטים. הפירוק מתבצע ישירות על ידי שטפי האנרגיה, ובעקיפין על ידי המיקרו-אורגניזמים ששטפי המים מניעים אותם. תהליכי הפירוק בעונת היובש חשובים למשוב מחזור היסודות



איור 7

מסלולי התפקוד של המערכת דמוית הסוואנה בעונת היובש והשפעתם על תפקודי המערכת בעונת הגשמים
 כל תהליכי הקיץ המתוארים כאן יכולים להיחקר לפי שיטות המחקר הנוכחי.

והאנרגיה למהלך השנה כולה, ובחינת השפעתם על מארג הקשרים במערכת האקולוגית דמוית הסוואנה (איור 7) יסייעו ליצור ממשק מושכל של הכוונת השטפים למטרות של מערכת בת-קיימא המספקת שירותי ויסות, אספקה ונופש.

מעמיד את המערכות האקולוגיות דמויות הסוואנה באתגר אקלימי של תנודות חריפות, המכתיבי שינויים קיצוניים בשטפי המים והאנרגיה. האתגר האקלימי יוצר אתגרים מדעיים וממשקיים של התפתחות וקיום מערכת אקולוגית חדשנית בתנאי קיצון. להבנתנו, הרחבת מחקר שטפי המים

מקורות

- Jacobs AFG, Heusinkveld BG, and Berkowicz SM. 2000. Dew measurements along a longitudinal sand dune transect, Negev desert, Israel. *International Journal of Biometeorology*, 43, 184–190.
- Kosmas C, Danalatos NG, Poesen J, and van Wesemael B. 1998. The effect of water vapour adsorption on soil moisture content under Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 36, 157–168.
- Ninari N and Berliner PR. 2002. The role of dew in the water and heat balance of bare loess soil in the Negev Desert: Quantifying the actual dew deposition on the soil surface. *Atmospheric Research*, 64, 323–334.
- Parker SS and Schimel JP. 2011. Soil nitrogen availability and transformations differ between the summer and the growing season in a California grassland. *Applied Soil Ecology*, 48, 185–192.
- Qubaja R, Amer M, Tatarinov F, Rotenberg E, Preisler Y, Sprintsin M, and Yakir D. 2020. Partitioning evapotranspiration and its long-term evolution in a dry pine forest using measurement-based estimates of soil evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281, 107831.
- Rutledge S, Campbell DI, Baldocchi D, and Schipper LA. 2010. Photodegradation leads to increased carbon dioxide losses from terrestrial organic matter. *Global Change Biology*, 16, 3065–3074.
- Sullivan BW, Selmants PC, and Hart SC. 2012. New evidence that high potential nitrification rates occur in soils during dry seasons: Are microbial communities metabolically active during dry seasons? *Soil Biology & Biochemistry*, 53, 2831.
- Verhoef A, Diaz-Espejo A, Knight JR, Villagarcía L, and Fernández JE. 2006. Adsorption of water vapor by bare soil in an olive grove in southern Spain. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 1011–1027.
- Wei J, Wang D, Gong F, Yan B, and He X. 2015. Thermal infrared radiometer calibration and experimental measurements: Proceedings SPIE 9620, 2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications, 96200V. doi: 10.1117/12.219293.
- ברנד ד, משה י ושחק מ. 2015. שיקום תפקודי של מערכות אקולוגיות ממדברות בצפון הנגב. אגף הייעור, מחלקת יער מרחב דרום ויחידת הפרסומים, קרן קימת לישראל, ירושלים.
- Agam N and Berliner PR. 2004. Diurnal water content changes in the bare soil of a coastal desert. *Journal of Hydrometeorology*, 5(5), 922–933.
- Agam N and Berliner PR. 2006. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments – A review. *Journal of Arid Environments*, 65, 572–590.
- Austin AT and Vivanco L. 2006. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. *Nature*, 442, 555–558.
- Bartholomew WV and Norman AG. 1947. The threshold moisture content for active decomposition of some mature plant materials. *Soil Science Society of America Journal*. <https://doi.org/10.2136/sssaj1947.036159950011000C0052x>
- Florentin A and Agam N. 2017. Estimating non-rainfall-water-inputs-derived latent heat flux with turbulence-based methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 533–540.
- Foereid B, Rivero MJ, Primo O, and Ortiz I. 2011. Modelling photodegradation in the global carbon cycle. *Soil Biology & Biochemistry*, 43, 1383–1386.
- Gliksman D, Haenel S, and Grunzweig JM. 2018. Biotic and abiotic modifications of leaf litter during dry periods affect litter mass loss and nitrogen loss during wet periods. *Functional Ecology*, 32, 831–839.
- Gliksman D, Rey A, Seligmann R, Dumbur R, Sperling O, Navon Y, et al. 2017. Biotic degradation at night, abiotic degradation at day: Positive feedbacks on litter decomposition in drylands. *Global Change Biology*, 23, 1564–1574.
- Grünzweig JM, Gelfand I, Fried Y, and Yakir D. 2007. Biogeochemical factors contributing to enhanced carbon storage following afforestation of a semi-arid shrubland. *Biogeosciences*, 4, 891–904.
- Hooper DU and Johnson L. 1999. Nitrogen limitation in dryland ecosystems: Responses to geographical and temporal variation in precipitation. *Biogeochemistry*, 46, 247–293.



שיטה סלילנית בפארק סיירת שקד – נוף דמוי סוואנה
צילום: אמיר הרמס

ברירה של טיפוסים עמידים ליובש של ברוש מצוי ושיפור שיטת הריבוי הווגטטיבי באמצעות השרשת ייחורים כדי לאפשר שימוש בטיפוסים הנבחרים לנטיעות יערניות

יוסי ריוב * | הדס רגב | משה הוברמן

המכון למדעי הצמח וגנטיקה בחקלאות, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות
joseph.riov@mail.huji.ac.il *

תקציר

בארצות הים תיכון ובארץ. מחקרים אלה הניבו תוצאות סותרות בתחומים שונים, אולם אפשרו לבסס כמה היבטים של שיטת ההשרשה של ברוש מצוי. במחקר הנוכחי נבחנו רק מספר היבטים שנדרשו לפיתוח שיטת השרשה יעילה כדי לאפשר גידול שתילים לנטיעות יערניות: סוג הייחור הנדרש לקבלת שתילים איכותיים, עונת ההשרשה ומועד הטיפול באוקסין לעידוד השתרשות. נמצא, שייחורים בעלי בסיס מעוצה למחצה, שהם גם ארוכים יחסית, מתפתחים בקצב מהיר בתנאי משתלה בהשוואה לייחורים רכים בדרגות שונות. אי לכך, ניתן לקבל שתילים מתאימים לנטיעה בתקופת גידול קצרה יחסית, המאפשרת שמירה על איכותם. בניגוד לתוצאות שהתקבלו במחקרים שנערכו באיטליה וביוון, נמצא במחקר הנוכחי שהשרשה בקיץ עדיפה על השרשה בחורף. דחיית הטיפול באוקסין כחודש לאחר תחילת ההשרשה הקטינה את שיעור הפגיעה בייחורים בעקבות התנוונות בסיסם, ובכך הפחיתה את הפגיעה באיכותם. נוסף על כך, הדחייה בטיפול באוקסין הגדילה את שיעור ההשתרשות של הייחורים, בעיקר כשהשרשה נעשתה בפלגים. על בסיס הידע הקודם בנושא ההשרשה של ברוש מצוי ותוצאות המחקר הנוכחי, מוצעת שיטת השרשה משופרת. שיטה זו כבר הניבה תוצאות חיוביות בהשרשה של טיפוסים שונים של ברוש מצוי.

בעקבות שנות בצורת חוזרות שפקדו את הארץ בעשרים השנים הראשונות של המאה הנוכחית, חלה במרבית האזורים בארץ תמותה רחבת היקף של ברוש מצוי, שניטע לגיוון יערות האורן. המחקר הנוכחי התמקד בשני נושאים: פיתוח טיפוסים עמידים ליובש של ברוש מצוי ושיפור שיטת ההשרשה של הקלונים הנבחרים כדי לאפשר גידול שתילים לנטיעות יערניות. הברירה של טיפוסים עמידים ליובש התבססה בעיקר על עצים ששרדו בחלקה נטועה גדולה ביער יתיר, שמרבית העצים בה נכחדו לאחר מספר שנות בצורת חוזרות. בשלב הראשון של המחקר הוקמו שתי חלקות של עצי אם כמקור לייחורים שנדרשו לביצוע המחקר. בחינת העמידות ליובש של שתילים של הקלונים הנבחרים נעשתה באמצעות מערכת ליזימטרים ניסויית ונטיעה של חלקות מבחן בשטח. שתילים של מספר קלונים נבחרים, שנבחנו במערכת הליזימטרים בהשוואה לשתילים ממקור זרעים סטנדרטי של קק"ל, הראו יכולת לשמור על מאזן מים משופר יחסית במהלך תקופת ההצמאה באמצעות ויסות רמת הדיות, שהתבטא בשיעור הישרדות גבוה יחסית או בהתייבשות מועטה יחסית של ענפים בתום ההצמאה. חלקת מבחן שניטעה ביער יתיר ניזוקה קשה ולא שרדה. חלקת מבחן שנייה ניטעה באתר בנגב הצפוני, ממזרח לקיבוץ גת. שיעור הקליטה של הקלונים הנבחרים בחלקה זו היה 100%, וחזותית הם מתפתחים בקצב מהיר יחסית בהשוואה לשתילים של ברוש מצוי ממקורות זרעים שונים שניטעו בעבר באתר הזה. תוצאות הניסויים במערכת הליזימטרים והתוצאות הראשוניות שהתקבלו מחלקת המבחן, רומזות שהקלונים הנבחרים אכן עמידים ליובש. מחקרים לפיתוח שיטת השרשה של ברוש מצוי נערכו בעבר

מילות מפתח

גידול שתילים, השבחה, שינוי האקלים

מבוא

ידי סגירת הפיוניות. תוצאות חיוביות במערכת הזו תומכות באפשרות שלצמחים שנבחרו אכן יש עמידות ליובש. עם זאת, יש לציין שישנם מנגנונים שונים לעמידות ליובש, כך שגם צמחים שמראים תכונות אנאיזוהידריות יכולים להיות עמידים ליובש. נטיעת חלקות מבחן היא אמצעי הכרחי לבחינת העמידות ליובש לפני קבלת החלטה לגבי שימוש בקלונים הנבחרים לנטיעות יערניות.

שימוש בקלונים שהוכחו כעמידים ליובש, מחייב שיטת ריבוי שתשמר את התכונות הגנטיות שלהם. ניצול מרבי של תכונות גנטיות רצויות יכול להיעשות בשתי דרכים: א. הקמת מטעי אם לזרעים המבוססים על ריבוי וגטטיבי של הורים נבחרים, שבאמצעות הכלאות מבוקרות ביניהם הוכח ששיעור גבוה של הצאצאים המתקבלים מראה את התכונה המבוקשת; ב. גידול שתילים באמצעות ריבוי וגטטיבי על ידי השרשת ייחורים או תרביות רקמה. השיטה השנייה נראית

שיימה יותר לתנאים בישראל, לפחות בתקופה הקרובה. מחקרים על השתרשות ייחורים של ברוש מצוי נעשו בעיקר ביוון ובאיטליה וכן בישראל. נבחנו בהם גורמים שונים הידועים כבעלי השפעה על כושר ההשתרשות של ייחורים: א. הגורם הגנטי – בכל המחקרים שנבחנו בהם ההשתרשות של קלונים שונים, הרקע הגנטי של צמחי האם נמצא כגורם החשוב ביותר שהשפיע על ההשתרשות (Capuana and Lambardi, 1995; Stankova and Panetsos, 1997; Campuana et al., 2000) – כושר ההשתרשות מושפע בדרך כלל מהשלב ההתפתחותי של צמחי האם, והוא גבוה בשלב היובנלי ונמוך או אפסי בשלב הבוגר (Hartmann et al., 2014). בנושא זה קיימים בספרות דיווחים סותרים לגבי ברוש מצוי. אין מידע לגבי משך היובנליות בברוש מצוי, ולכן לא ניתן לקבוע את השלב ההתפתחותי של הייחורים שנבחנו במחקרים השונים. שמלה (1986) מצאה ירידה בכושר ההשתרשות עם העלייה בגיל של עצי האם, אולם בבחינה של כושר ההשתרשות של ייחורים שנלקחו מגבהים שונים של עצים בני ארבע שנים, נמצאה עלייה בשיעור ההשתרשות ובמספר השורשים לייחור עם העלייה בגובה העץ. בניגוד לכך, Capuana and Lambardi (1995) מצאו שיעור השתרשות גבוה יותר בייחורים שנלקחו מהשליש התחתון של עצים בני 14 שנים, בהשוואה לזה שהתקבל בייחורים שנלקחו מהשליש העליון של אותם עצים. Stankova and Panetsos (1997) בדקו את שיעור ההשתרשות של ייחורים שנלקחו מעצים גזומים, פעולה שאמורה לשמר את היובנליות, ומעצים לא גזומים בני ארבע שנים. במחקרם נמצא, שהייחורים מהעצים הלא גזומים השתרשו בשיעור גבוה יותר מאלה שנלקחו מהעצים הגזומים. לעומת זאת, שמלה (1986) לא מצאה הבדל בשיעור ההשתרשות של ייחורים שנלקחו משתילים גזומים ולא גזומים בני שנתיים; ג. עונת ההשרשה – גם לגבי גורם זה

ברוש מצוי (*Cupressus sempervirens*) הוא אחד המינים המקומיים החשובים המשמש לנטיעות יערניות באזורים שונים בארץ. המין הזה ניטע בחלקות נפרדות או בחלקות משולבות עם אורן ירושלים (*Pinus halepensis*) ואורן ברטיה (*Pinus brutia*) למטרת גיוון היערות. המחזוריים התכופים של שנות בצורת מתחילת המאה הנוכחית גרמו לתמותה רחבת היקף של ברוש מצוי, שנצפתה לראשונה ביערות הדרום, ומאוחר יותר גם באזור הים תיכוני. נתונים על אירועי התמותה של ברוש מצוי ביערות באזורים שונים בארץ ועל הגורמים לתמותה, בעיקר עקת יובש, פורסמו לאחרונה (Klein et al., 2019). בשל תופעה זו קטן מאוד היקף הנטיעות החדשות של המין הזה. אין ספק שהגורם העיקרי לתמותה של ברוש מצוי ושל מיני עצי יער אחרים בתקופה האחרונה הוא עקת יובש שנבעה משנות הבצורת. פיתוח טיפוסים עמידים ליובש מקובל כפתרון היעיל ביותר להתגבר על האיום של שינוי האקלים על קיום היערות.

פיתוח טיפוסים עמידים ליובש יכול להיעשות על ידי הכלאות או על ידי ברירה של טיפוסים ששרדו בחלקות שמרבית העצים נכחדו בהן. הגישה השנייה נראית רלוונטית יותר לישראל מבחינה היכולת המעשית לביצוע ההשבחה, לפחות בתקופה הקרובה. ביערות הדרום נותר בחלקות מסוימות מספר קטן של עצי ברוש מצוי, שנראים חיוניים מאוד ויכולים להוות בסיס לסלקציה של טיפוסים עמידים ליובש. לפני השימוש בטיפוסים הללו לנטיעות יערניות יש להוכיח שתכונת העמידות ליובש שלהם גנטית, כלומר שאינה תולדה של תנאי השטח. ההוכחה שתכונת העמידות אכן גנטית, יכולה להיעשות על ידי בדיקות במעבדה או הקמת חלקות מבחן. בספרות מצוינים מספר מנגנונים לעמידות בפני עקת יובש (Larcher, 1995; Takahashi et al., 2020), שניתנים לבחינה במעבדה. אחד מהמנגנונים האלו הוא הימנעות מעקת יובש, שיכולה להתבצע באמצעות הגברת קליטת המים או באמצעות הקטנת איבוד המים על ידי סגירת הפיוניות (Rog et al., 2021). מבחינת האפשרות של סגירת הפיוניות בתגובה לעקת יובש מבחינים בשני סוגי צמחים: 1. צמחים איזוהידריים השומרים על פוטנציאל מים קבוע בעצה באמצעות סגירת הפיוניות בשלב מוקדם של עקת היובש, תכונה המקנה להם עמידות גבוהה יחסית לעקה זו; 2. צמחים אנאיזוהידריים שאינם מסוגלים לווסת את תנועת הפיוניות, ובתנאים של עקת יובש יש ירידה משמעותית בפוטנציאל המים בעצה, שגורמת לתופעות כמו אמבולזים, המסכנות את קיום הצמח (Roman et al., 2015). בפקולטה לחקלאות פותחה מערכת ליזימטרים ניסויית, המאפשרת לעקוב אחר מאזן המים של שתילים במהלך הצמאה ולקבוע אם לשתילים הנבחרים יש יכולת לשמור על פוטנציאל מים קבוע במהלך החשיפה לעקת יובש על

שיעור ההשתרשות של ברוש מצוי. אחסון ייחורים לפני ההשרשה ב-4 מעלות צלזיוס במשך ארבעה שבועות הגדיל משמעותית את שיעור ההשתרשות ואת מספר השורשים לייחור (Capuana and Lambardi, 1995). בכל המחקרים שבחנו השרשה של ברוש מצוי, טיפול בייחורים באוקסין IBA (אינדול-3-חומצה בוטירית) בהטבלה בתמיסה או באבקת טלק שיפר מאוד את כושר ההשתרשות, ללא הבדל משמעותי בין שני הטיפולים. בדרך כלל מקובל להשתמש להשרשה של ברוש מצוי ב-IBA בריכוז של 0.5–0.6% באבקת טלק. חימום המצע במהלך ההשרשה ל-23–25 מעלות נמצא כהכרחי להשרשה של ברוש מצוי. במחקרים שנעשו ביוון ובאיטליה נבחן בדרך כלל מצע פרלייט או מצע של כבול ופרלייט (50:50, נפח/נפח) בישראל נמצא, שלמצע על בסיס ורמיקוליט יש יתרון על המצעים הללו (שמלה, 1986). בכל המחקרים שהוזכרו לעיל, משטר ההרטבה נעשה באמצעות התזה, שתדירותה שונתה בהתאם לעונות השנה. מקובל להקפיד על הרטבה מתמדת של הייחורים, ובהתאם לכך לווסת את תדירות ההתזה (Capuana et al., 2000).

ישנם דיווחים סותרים בספרות. שמלה (1986) מצאה שיעור ההשתרשות גבוה בעונות שונות, עם יתרון מסוים להשרשה בחורף. לעומת זאת, Capuana ו-Lambardi (1995) דיווחו על שיעור ההשתרשות גבוה יחסית בחורף ובאביב, ועל היעדר כמעט מוחלט של ההשתרשות בקיץ ובסתיו. בניגוד לממצאים אלה, Stankova ו-Panetsos (1997) מצאו אומנם שיעור ההשתרשות גבוה יחסית בחורף, אולם באביב הייתה ירידה גדולה בשיעור ההשתרשות; ד. טיב הייחור – בברושים נעשה שימוש בייחורים אמיריים בלבד. במחקרים שנערכו ביוון ובאיטליה צוין שנעשה שימוש בייחורים אמיריים רכים באורך 10–12 ס"מ. שמלה (1986) מצאה, שייחורים מעוצים למחצה שנלקחו מהקודקוד של ענפים צדדיים ראשיים וסווגו כייחורים מדרגה 1, השרשו בשיעור גבוה מזה של ייחורים דומים שנלקחו מענפים צדדיים משניים של ענפים צדדיים ראשיים וסווגו כייחורים מדרגה 2 (איור 1). כמו כן, נמצא שייחורים מעוצים למחצה השרשו בשיעור גבוה מזה של ייחורים רכים מאותה דרגה.

קבוצות המחקר שהוזכרו לעיל בחנו גם את ההשפעה של טיפולים בייחורים לפני ההשרשה ועל תנאי ההשרשה על

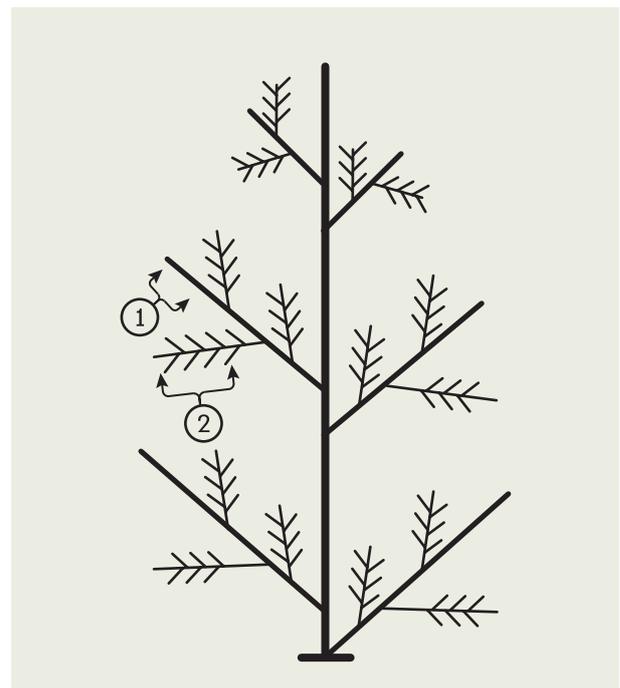
שיטות

ברירה של טיפוסים עמידים ליובש

בשלב הראשון של המחקר נבחרו בשנת 2011 שמונה עצים של ברוש מצוי, חלקם צריפיים וחלקם אופקיים, ששרדו שתי תקופות בצורת מראשית המאה הנוכחית, ובלטו בחיוניותם (איור 2). העצים מצויים בחלקה גדולה של ברוש מצוי ביער יתיר, שכמעט כל העצים שניטעו בה לא שרדו. כל העצים שסווגו כעמידים ליובש, להוציא את הקלון יתיר 6 שהתייבש לפני מספר שנים, נראים חיוניים גם כיום. בשנת 2013 נבחרו שני קלונים נוספים שבלטו בגודלם ובחיוניותם, האחד ביער רמות בצפון באר שבע (ברוש צריפי) והשני ביער דודאים ממערב ליישוב להבים (ברוש אופקי). מכל העצים שסווגו כעמידים ליובש נלקחו ייחורים להכנת שתילים, ששימשו לניסויים לבחינת העמידות ליובש ולנטיעה של שתי חלקות של עצי אם, האחת במרכז וולקני והשנייה בגילת. הייחורים לניסויי ההשרשה המתוארים להלן נלקחו מחלקת עצי האם במרכז וולקני. החלקה הושקתה באופן סדיר במהלך הקיץ.

השרשת ייחורים

אם לא צוין אחרת, נלקחו להשרשה ייחורים מדרגה 2 (איור 1) בעלי בסיס מעוצה למחצה בעונת הקיץ. הייחורים טופלו ב-0.6% IBA באבקת טלק בעת ההשרשה וכחודש לאחריה או כחודש לאחר ההשרשה בלבד. הטיפול ב-IBA כחודש לאחר ההשרשה נעשה לאחר חידוש החתך בבסיס הייחור או סילוק הרקמה הפגועה. הייחורים הושרשו במצע



איור 1

סכמה של מבנה שתיל/עץ של ברוש מצוי, עם ציון מקור הייחורים להשרשה

הסכמה משקפת גם ברוש צריפי וגם ברוש אופקי, הנבדלים בעיקר באורך הענפים הצדדיים הראשיים. 1. קודקוד של ענף צדדי ראשי – ייחור מדרגה 1; 2. ענף צדדי משני של ענף צדדי ראשי – ייחור מדרגה 2. הענפים הצדדיים המשניים הם בדרגות התעצות שונות: רכים מאוד, רכים ובעלי בסיס מעוצה למחצה.

באופן סדיר במשך 10 ימים, ולאחר מכן הופסקה ההשקיה לחלוטין למשך 24 ימים, וחודשה בתום התקופה הזו. נערך מעקב אחר מאזן המים של השתילים במהלך ההצמאה ובסיומה, וכשבועיים לאחר חידוש ההשקיה נקבע שיעור התמותה של השתילים. הניסוי שתואר לעיל נערך באמצע עונת הקיץ. ניסוי דומה נערך בסוף עונת הקיץ, ונבדקה בו באופן חזותי רק מידת הפגיעה בשתילים, שהתבטאה בהתייבשות ענפים, לאחר סיום ההצמאה.

הקמת חלקות מבחן

במהלך המחקר הוקמו שתי חלקות לבחינת הקלונים הנבחרים בתנאי שטח. החלקה הראשונה ניטעה בשנת 2014 ביער יתיר, באתר שנעשתה בו הברירה של הקלונים העמידים ליובש (איור 2). בחלקה זו ניטעו שמונת הקלונים של יער יתיר ושתילים ממקור זרעים סטנדרטי של קק"ל. החלקה השנייה ניטעה בנגב הצפוני ממזרח לקיבוץ גת בשנת 2018. בחלקה זו ניטעו שבעה קלונים של יער יתיר, ובגלל מגבלת מקום לא נכללו בה שתילים ממקור זרעים סטנדרטי של קק"ל. לשתילים בשתי החלקות ניתן הטיפול המקובל לשתילים נטועים, תוך הקפדה על ביצועו.

ניתוח סטטיסטי

ניתוח השונות של ממוצעים של שני טיפולים נעשה באמצעות Student's t-test וניתוח השונות של ממוצעים של יותר משני טיפולים נעשה באמצעות Tukey's test. ערכים באחוזים עברו טרנספורמציה ל-Arcsine.

ורמיקוליט מס' 3: קלקר גרוס (40:60, נפח/נפח) בתפזורת. בניסוי אחד נבחנו גם פלגים של כבול יצוק ופלגים של מצע עטוף בנייר מתכלה. ההתזה במהלך ההשרשה בעונת הקיץ ניתנה כל 10 דקות במשך 10 שניות ובעונת החורף כל 16 דקות במשך 10 שניות. בהשרשה בחורף חומם מצע ההשרשה ל-25 מעלות. השרשת הייחורים נעשתה במתקן ריבוי בפקולטה לחקלאות, הנמצא בחממה מצוננת, בטמפרטורה שאינה עולה על 27 מעלות בחודשי הקיץ.

גידול שתילים מייחורים מושרשים

ייחורים מושרשים הועתקו למגשי גידול (Quick Pots) בעלי 12 תאים, בנפח תא של 340 סמ"ק, שהכילו מצע קלסמן 602:פרלייט (20:80, נפח/נפח) בתוספת 2 גרם לליטר של דשן בשחרור איטי (אוסמוקוט 4-5 חודשים). לאחר כשבועיים של הקשחה במערכת ההתזה, השתילים הועברו להמשך גידול בבית רשת בפקולטה לחקלאות. השתילים הושקו בתוספת דשן NPK 7-3-7 המכיל יסודות קורט (דשן שפיר, דשן גת בע"מ, קריית גת), בריכוז של 120 ח"מ חנקן צרוף במי ההשקיה.

בחינת העמידות ליובש במערכת הליזימטרים

שתילים בני שנתיים ממקור זרעים סטנדרטי של קק"ל ושל קלונים עמידים ליובש מיער יתיר הועתקו למכלים של 3 ליטר וגודלו במשך כחודשיים לפני תחילת הניסוי בחממה לא מבוקרת שמערכת הליזימטרים מוקמה בה. לבחינת העמידות ליובש, השתילים הועמדו על הליזימטרים והושקו

איור 2

עץ של ברוש מצוי בעל מראה חיוני, ששרד בחלקת ברושים גדולה שניטעה ביער יתיר
העץ הזה ועצים נוספים ששרדו בחלקה שימשו מקור לקלונים שסווגו כעמידים ליובש.



תוצאות

ברירה של טיפוסים עמידים ליובש

בחירת העמידות ליובש במערכת הליזימטרים

בשלב הראשון של המחקר נבחנו במערכת הליזימטרים שתילים של קלונים מיער יתיר שסווגו כעמידים ליובש בהשוואה לשתילים ממקור זרעים סטנדרטי של קק"ל. במערכת הזו בוצעו שני ניסויים במתכונת דומה במועדים שונים. בשני הניסויים נבחנו שמונה שתילים של כל מקור.

בניסוי הראשון, שנערך באמצע הקיץ, נבחנו קלון 5 וקלון 8 ושתילים ממקור זרעים סטנדרטי של קק"ל. מעקב אחר מאזן המים בתקופת ההצמאה הראה בבירור, שהשתילים של ברוש מצוי ממקור הזרעים הסטנדרטי איבדו מים בקצב מהיר יחסית במהלך השליש הראשון של הניסוי, ולאחר מכן כמעט ולא נצפה בהם שינוי בהפסד המים (איור 3), מאחר שהשתילים היו בשלב של התייבשות. לעומת זאת, השתילים של קלון 5 וקלון 8 איבדו מים בקצב איטי יחסית עד לסיום הניסוי.

בחינה חזותית של השתילים שבועיים לאחר תום ההצמאה העלתה שכל השתילים של מקור הזרעים הסטנדרטי מתו, בעוד שבקלון 5 לא הייתה תמותה כלל, ובקלון 8 מתו רק שלושה משמונת השתילים שנבחנו (איור 4).

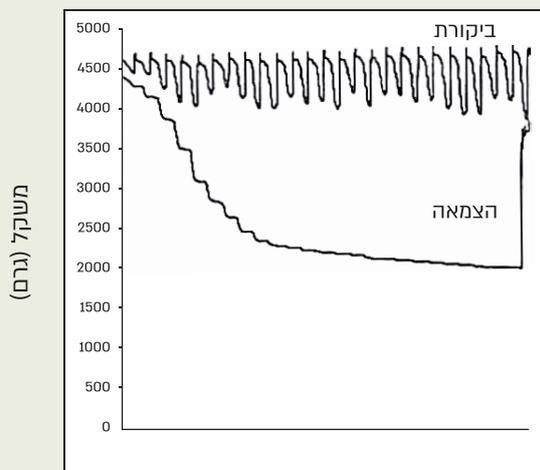
כדי לבסס את התוצאות של הניסוי הראשון נערך ניסוי נוסף במתכונת דומה, ונבחנו בו גם קלון 1 נוסף על קלון 5 וקלון 8. הניסוי נערך בסוף הקיץ, כך שבהשוואה לניסוי הקודם הטמפרטורה הייתה מתונה יותר ואורך היום היה קצר יותר. בניסוי הזה נערכה רק הערכה חזותית של חומרת הפגיעה בשתילים, שהתבטאה בהתייבשות ענפים, שבועיים לאחר תום ההצמאה. בניגוד לניסוי הקודם, לא נצפתה בניסוי הנוכחי תמותה של שתילים, אלא רק התייבשות של ענפים. השתילים ממקור הזרעים הסטנדרטי סבלו משיעור נזק גבוה מאוד (תוצאות שלא הוצגו). מתוך שמונת השתילים של מקור זה שנבחנו בניסוי, רק שתיל אחד לא הראה סימני נזק, וייתכן שבאופן מקרי הוא היה גנוטיפ עמיד יחסית ליובש. בחמישה שתילים ממקור הזרעים הזה, מרבית הענפים היו יבשים לחלוטין, והשתילים היו כנראה קרובים לתמותה. בשני השתילים האחרים אובחן רק נזק קל יחסית. השתילים של קלון 1 לא ניזוקו כלל. בקלון 5, שני שתילים מתוך השמונה הראו נזק קל, שהתבטא בהתייבשות קודקוד

איור 3

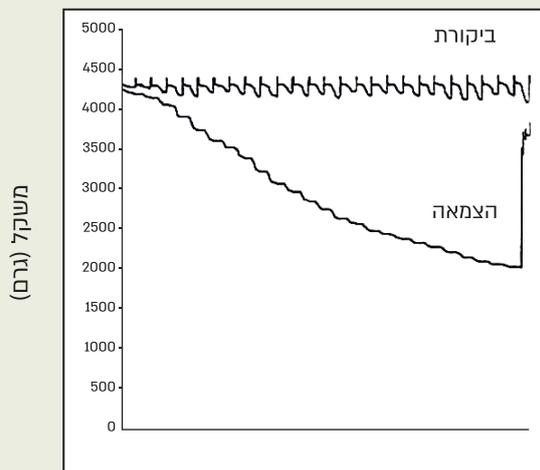
מהלך הפסד המשקל של שתילים של קלונים עמידים ליובש מיער יתיר בהשוואה לשתילים ממקור זרעים סטנדרטי של קק"ל

השתילים עברו תקופת הצמאה של 24 יום במערכת הליזימטרים. בניסוי נבחנו שמונה שתילים של כל מקור. בחלק העליון של האיורים מוצגים שינויי המשקל של שתילי ביקורת של השתילים מהמקורות השונים שהושקו במהלך כל הניסוי.

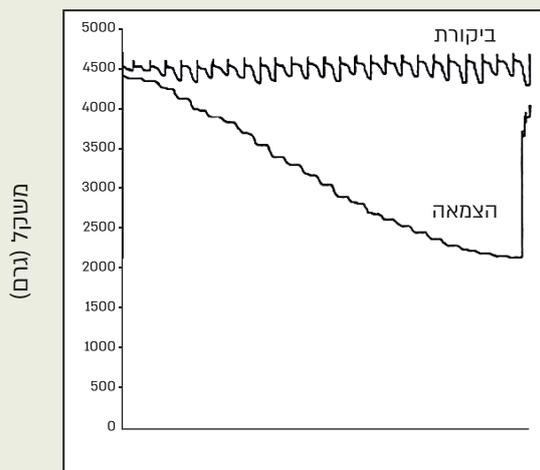
מקור זרעים סטנדרטי



קלון 5



קלון 8



משך ההצמאה (ימים)

השרשת ייחורים

כאמור, ריבוי וגטיבי באמצעות השרשת ייחורים הוא השיטה הרלוונטית לגידול שתילים של טיפוסים נבחרים בתנאים השוררים בישראל. מחקרים שעסקו בהשרשה של ברוש מצוי בארץ ובחו"ל תרמו ידע רב להשרשה של ברוש מצוי, שתואר במבוא. עם זאת, ריבוי המוני של שתילים לנטיעות יערניות מחייב כמות מספקת של ייחורים ושיעור השרשות גבוה. במחקר הנוכחי עסקנו במספר היבטים של השרשת ייחורים, שלגביהם היו תוצאות סותרות במחקרים קודמים או היעדר ידע, שלדעתנו נדרש לכיתוח שיטת השרשה יעילה.

סוג הייחור

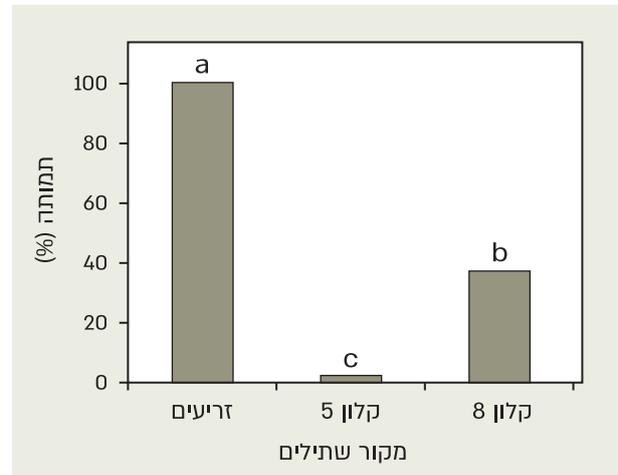
כמצוין לעיל, ניתן להשריש רק ייחורים אמריים של ברוש מצוי. בחירת הייחורים להשרשה מוכתבת על ידי טיבם, כלומר תלויה בסוג הייחור שנותן את התוצאות הרצויות ביותר. לגורם הזה ישנם מספר היבטים: כמות הייחורים, שיעור ההשרשות וקצב ההתפתחות של השתילים המושרשים במשתלה. מבחינה כמותית, ייחורים מדרגה 2 (איור 1) הם הפתרון הטוב ביותר. ייחורים אלה הראו כושר השרשות דומה לזה של ייחורים מדרגה 1 (תוצאות שלא הוצגו). ייחורים מדרגה 2 יכולים להיות בעלי בסיס מעוצה למחצה, רכים או רכים מאוד. מניסיונו (תוצאות שלא הוצגו) ומהניסיון שהצטבר במשתלת גילת של קק"ל (יוסי ריוב, מידע אישי), שלושת סוגי הייחורים הללו משרשים בשיעור גבוה. לפיכך, התמקדנו במחקר הנוכחי בבחינה של קצב ההתפתחות במשתלה של השתילים שהתקבלו מהשרשה של שלושת סוגי הייחורים.

שתילים של מספר קלונים עמידים ליובש שהתקבלו מהשרשת שלושת סוגי הייחורים גודלו בתנאי משתלה בפקולטה לחקלאות. מהתוצאות המוצגות באיור 5 לגבי קלון 1 מיער יתיר העמיד ליובש, ומייצגת את התוצאות

הצמיחה בלבד. ייתכן שהסיבה לכך הייתה הצימוח הנמרץ יחסית של השתילים של הקלון הזה לפני הניסוי. בקלון 8 נכגע רק שתיל אחד מתוך השמונה, אולם הוא הראה סימני נזק מוקדם יחסית לאחר הפסקת ההשקיה, כך שסביר להניח שמדובר בגורם אחר לנזק, כנראה אילוח בפטרייה פתוגנית בצוואר השורש.

חלקות המבחן

החלקה ביער יתיר סבלה מנזקים קשים של רעיית עיזים, למרות השימוש בשרוולי נטיעה. מרבית השתילים לא התפתחו או מתו. בחלקה הסמוכה לקיבוץ גת, שיעור הקליטה של השתילים של הקלונים העמידים היה 100%, ומרבית השתילים הראו קצב צימוח נמרץ בשנים הראשונות לאחר הנטיעה.



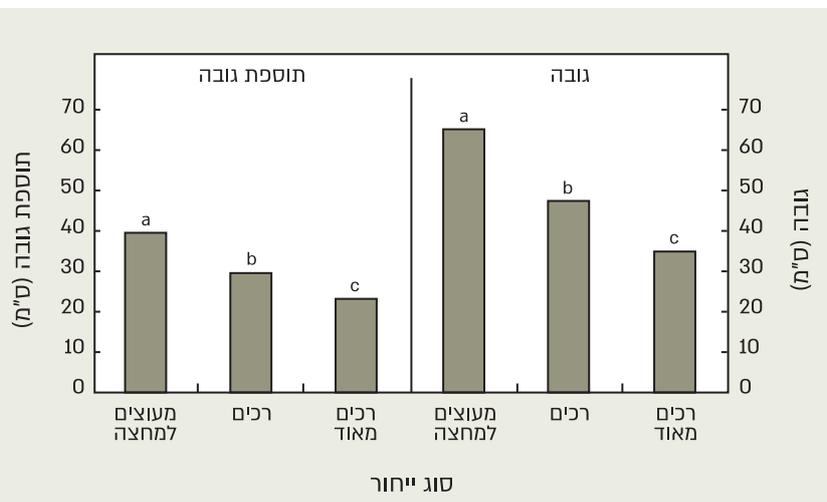
איור 4

שיעור התמותה של השתילים המתוארים במקרא של איור 3 שנבחנו במערכת הליזימטרים שבועיים לאחר תום תקופת ההצמאה אוטוית שונות מציינות הבדלים מובהקים בשיעור התמותה בין השתילים מהמקורות השונים ($p \leq 0.05$).

איור 5

תוספת הגובה והגובה הסופי של שתילים שהתקבלו מסוגים שונים של ייחורים מושרשים מדרגה 2 שנלקחו מקלון 1 העמיד ליובש מיער יתיר לאחר עונת גידול אחת במשתלה

האורך הראשוני הממוצע של הייחורים היה כמפורט להלן: ייחורים מעוצים למחצה – 26.2 ס"מ; ייחורים רכים – 17.5 ס"מ; ייחורים רכים מאוד – 11.7 ס"מ. מכל סוג של ייחורים מושרשים נבדקו 24 שתילים. אוטיות שונות מציינות הבדלים מובהקים בין סוגי הייחורים לגבי כל מדד צימוח בנפרד ($p \leq 0.05$).



גבוה יחסית, וקיימת אפשרות שיש לו השפעה רעילה מסוימת.

ההשפעה של מועד מתן האוקסין על שיעור הפגיעה בבסיס הייחורים נבחנה בשלושה קלונים עמידים ליובש מיער יתיר עם טיפול ב-IBA בתחילת ההשרשה ובלעדיו. שיעור הפגיעה בבסיס הייחורים נקבע לאחר כחודש מתחילת ההשרשה. הטיפול ב-IBA בתחילת ההשרשה הגדיל מאוד את שיעור הייחורים שבסיסם נפגע בשניים מתוך שלושת הקלונים שנבחנו, בהשוואה לייחורים שלא טופלו באוקסין (איור 7).

כדי לבחון את השפעת מועד מתן האוקסין על שיעור ההשתרשות של שלושת הקלונים העמידים ליובש, מחצית מהייחורים טופלו ב-IBA בתחילת ההשרשה וכחודש לאחריה, והמחצית השנייה טופלה באוקסין רק כחודש לאחר תחילת ההשרשה. בכל הייחורים ניתן הטיפול המאוחר באוקסין לאחר סילוק החלק הפגוע או לאחר חידוש החתך בבסיס הייחורים. שיעור ההשתרשות נקבע כחודשיים לאחר מתן הטיפול המאוחר באוקסין. בכל שלושת הקלונים שיעור ההשתרשות שהתקבל בטיפול

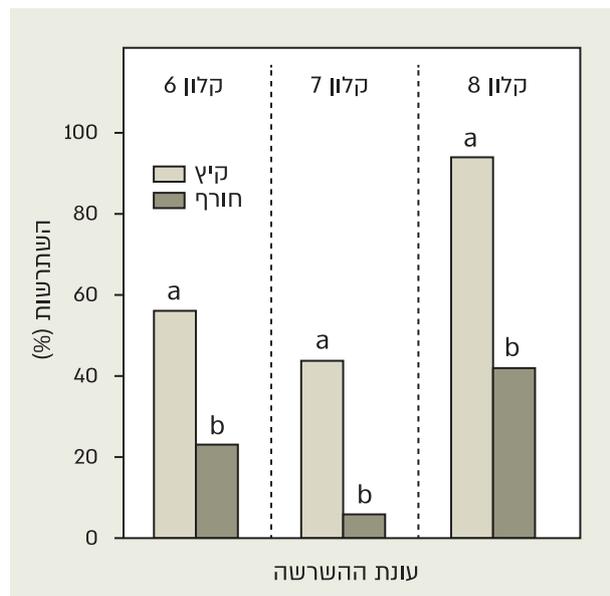
שהתקבלו גם לגבי קלונים אחרים, ניתן לראות שתוספת הגובה לאחר עונת גידול אחת במשתלה גדלה באופן מובהק עם העלייה במידת הקשיחות של הייחורים. בייחורים שבסיסם היה מעוצה למחצה, תוספת הגובה הייתה הגדולה ביותר. בעקבות זאת, וגם בשל ההבדלים באורך הראשוני של הייחורים (ראו המקרא לאיור 5), גובה השתילים היה גדול יותר ככל שעלתה הקשיחות של הייחורים. הבדל נוסף שנראה באופן חזותי, היה קוטר השתילים, שגדל גם הוא בהדרגה עם העלייה בקשיחות של הייחורים. לתוצאות אלה יש משמעות רבה מבחינת משך הגידול הנדרש במשתלה לקבלת שתילים איכותיים לנטיעה.

עונת ההשרשה

עונת ההשרשה היא גורם חשוב בקביעת כושר ההשתרשות של ייחורים. כאמור, לגבי השרשה של ברוש מצוי ישנם דיווחים סותרים, ומרבית המחקרים מורים על יתרון להשרשה בעונת החורף. לעומת זאת, במחקר של שמלה (1986) ובניסויים ראשוניים שערכנו נמצא שיעור השתרשות גבוה גם בקיץ. כדי לקבוע את העונה המתאימה ביותר להשרשה של ברוש מצוי נערך ניסוי מקיף. נעשתה בו השוואה בין שיעור ההשתרשות של שלושה קלונים עמידים ליובש מיער יתיר בקיץ לבין שיעור השתרשותם בחורף. לניסוי נלקחו בשתי העונות שנבחנו ייחורים מדרגה 2 בעלי בסיס מעוצה למחצה מאותם עצי אם, שהושרשו באותם תנאים. יש לציין, שגוון בסיס הייחורים שהושרשו בקיץ היה חום בהיר, בעוד שהגוון של בסיס הייחורים שהושרשו בחורף היה חום כהה עד אפור. צבע חום בהיר של הגבעול מורה שהענף נמצא בצמיחה פעילה, תהליך שיש לו השפעה חיובית על ההשתרשות, בעוד שצבע חום כהה מורה שהענף נמצא בתקופת של הפסקת צמיחה. הייחורים בניסוי טופלו ב-IBA 0.6% לעידוד השתרשות לאחר כחודש מתחילת ההשרשה. בכל שלושת הקלונים שנבחנו בניסוי, שיעור ההשתרשות בקיץ היה גבוה באופן מובהק מזה שהתקבל בחורף (איור 6). התוצאות מורות שלגבי ייחורים שבסיסם מעוצה למחצה, יש יתרון להשרשה בקיץ.

מועד הטיפול באוקסין לעידוד השתרשות

מתן של IBA 0.6% באבקת טלק בתחילת ההשרשה הוא הטיפול המקובל בארץ לעידוד השתרשות של ברוש מצוי. בצמחים מסוימים, לטיפול באוקסין מספר שבועות לאחר תחילת ההשרשה היה יתרון על טיפול באוקסין בתחילת ההשרשה (Luckman and Menary, 2002; Lodama et al., 2016), ועל כן בחנו אפשרות זו גם לגבי ברוש מצוי. תופעה נוספת שעודדה אותנו לבחון את דחיית הטיפול באוקסין, הייתה הפגיעה בבסיס הייחורים של ברוש מצוי במהלך ההשרשה, שעלולה לקרות לחלק גדול מהייחורים, וכפוגמת באיכותם. ריכוז ה-IBA שניתן לעידוד השתרשות



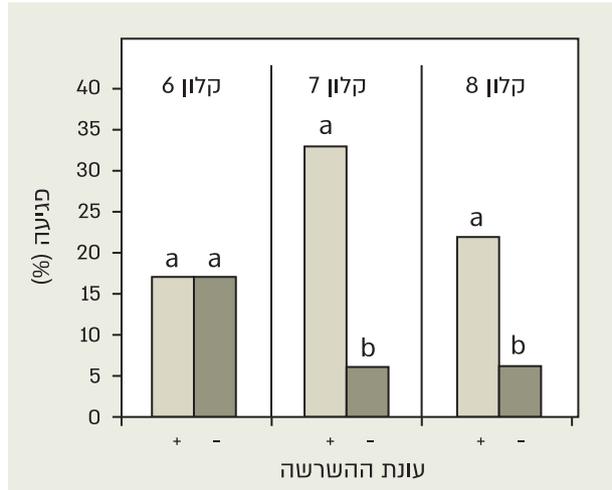
איור 6

השפעת עונת ההשרשה על שיעור ההשתרשות של קלונים עמידים ליובש מיער יתיר

נערכה השוואה בין השרשה בעונת הקיץ לבין השרשה בעונת החורף של ייחורים בעלי בסיס מעוצה למחצה. הייחורים בניסוי טופלו ב-IBA כחודש לאחר תחילת ההשרשה. שיעור ההשתרשות נקבע כחודשיים לאחר הטיפול ב-IBA. מכל קלון נבחנו בכל עונת השרשה 21 ייחורים. אותיות שונות מציינות הבדלים מובהקים בשיעור ההשתרשות בין שתי עונות ההשרשה לגבי כל קלון בנפרד ($p \leq 0.05$).

המאוחר ב-IBA היה גבוה מזה שהתקבל בייחורים שטופלו ב-IBA בתחילת ההשרשה (איור 8). בקלון 6 ובקלון 8 ההבדל בשיעור ההשתרשות בין שני הטיפולים היה מובהק, ואילו בקלון 7 ההבדל בין הטיפולים היה קטן יחסית ולא מובהק. ככל הנראה אין קשר ברור בין חומרת הפגיעה בבסיס הייחורים לשיעור ההשתרשות. מסקנה זו מתקבלת מהשוואה בין חומרת הפגיעה (איור 7) ושיעור ההשתרשות (איור 8) של הקלונים 6 ו-7.

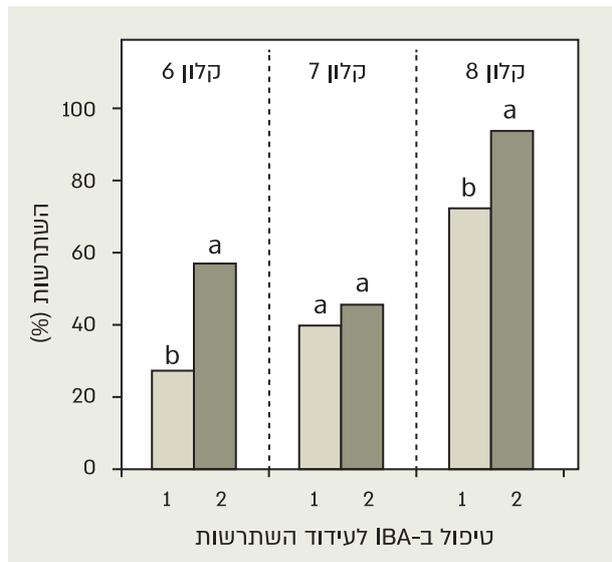
במחקרים של הקבוצה שלנו ובמשלת גילת של קק"ל בוצעה ההשרשה של ברוש מצוי בתפזורת, כלומר לא במגשים או בפלגים, אלא במצע המפוזר על גבי שולחן ההשרשה. השרשה מסחרית של צמחים נעשית בשנים האחרונות בפלגים, המאפשרים העתקה נוחה של ייחורים מושרשים למכלי הגידול. בהנחה שלהשרשה בפלגים יהיה יתרון גם בהכנת שתילים של ברוש מצוי לנטיעות יערניות, בחנו את ההשרשה של המין הזה בפלגים. בניסויים הראשונים שבוצעו בתחום הזה התקבלו בפלגים שיעורי השתרשות נמוכים מאוד (תוצאות שלא הוצגו). בעקבות התוצאות נבחנה האפשרות שדחיית מתן האוקסין תשפר את שיעור ההשתרשות בפלגים. הניסוי נערך בייחורים של הקלון יתיר 8, שהשרשתם נבחנה בשלושה מצעים: תפזורת, פלגים של כבול יצוק ופלגים מנייר. מחצית מהייחורים טופלו ב-IBA והושרשו בתפזורת ובשני סוגי הפלגים. המחצית השנייה, שיועדה לבחינת ההשפעה של הדחייה במתן האוקסין, הושרשה כולה בשלב הראשון בתפזורת. לאחר כחודש נחתך הבסיס של כל הייחורים לסילוק הקטעים הפגועים או לחידוש החתך, והם טופלו ב-IBA. הייחורים שקיבלו את הטיפול המאוחר באוקסין הועברו להשרשה במצעים שהייחורים שטופלו באוקסין בתחילת הניסוי הושרשו בהם, כלומר בתפזורת ובשני סוגי הפלגים. לטיפול המאוחר באוקסין היה יתרון בולט מאוד בשלושת המצעים שנבחנו (תוצאות שלא הוצגו). היתרון של הטיפול המאוחר בלט במיוחד בהשרשה בשני סוגי הפלגים, שבהם שיעור ההשתרשות של ייחורים שקיבלו את הטיפול באוקסין בתחילת ההשרשה היה אפסי (פלגים של כבול יצוק) או נמוך מאוד (פלגים מנייר). עם זאת, בניסוי הנוכחי גם בהשרשה בתפזורת היה יתרון בולט לטיפול המאוחר באוקסין, שהיה גדול מזה שהתקבל בניסוי הקודם (איור 8).



איור 7

השפעת טיפול עם (+) IBA ובלעדיו (-) בתחילת ההשרשה על שיעור הייחורים של קלונים עמידים ליובש מיער יתיר שבבסיסם נפגע במהלך ההשרשה

שיעור הייחורים הפגועים נקבע לאחר כחודש מתחילת ההשרשה. מכל קלון נבחנו בכל טיפול 26 ייחורים. אותיות שונות מציינות הבדלים מובהקים בשיעור הייחורים הפגועים בין שני הטיפולים לגבי כל קלון בנפרד ($p \leq 0.05$).



איור 8

השפעת מועד מתן הטיפול באוקסין על שיעור ההשתרשות של ייחורים של קלונים עמידים ליובש מיער יתיר

בניסוי נבחנו שני טיפולים ב-IBA: (1) מתן IBA בתחילת ההשרשה וטיפול נוסף כחודש לאחר מכן; (2) מתן IBA כחודש לאחר תחילת ההשרשה. הטיפול המאוחר באוקסין ניתן לאחר סילוק החלק הפגוע או חידוש החתך בבסיס הייחורים. שיעור ההשתרשות נקבע כחודשיים לאחר מתן הטיפול המאוחר ב-IBA. מכל קלון נבחנו בכל טיפול 26 ייחורים. אותיות שונות מציינות הבדלים מובהקים בשיעור ההשתרשות בין שני הטיפולים לגבי כל קלון בנפרד ($p \leq 0.05$).

דין

ברירה של טיפוסים עמידים ליובש נחשבת לאמצעי העיקרי להתמודדות עם שינוי האקלים, המאיים על קיומם של היערות בארצות רבות. התמותה רחבת ההיקף של עצים מהמין ברוש מצוי ביערות הנוטעים בארץ, הולכה לעבודת

שצוין לעיל, המחקרים הקודמים הניבו לעיתים תוצאות סותרות, שיכלו לנבוע ממספר סיבות, כמו השפעה של תנאי הסביבה על צמחי האם, מידת רטיבות הקרקע במהלך השנה במטע צמחי האם, שימוש בסוגים שונים של ייחורים, שיטות השרשה שונות (אופן הטיפול באוקסין, סוג המצע, משטר ההתזה וכדומה) ותנאים שונים במתקני הריבוי (טמפרטורה והצללה). על בסיס המידע שהצטבר בקבוצות המחקר השונות, ובעיקר על סמך הניסיון המעשי של הקבוצה שלנו בהשרשה של ברוש מצוי, הוחלט מהם תנאי ההשרשה שאינם מצריכים מחקר נוסף. תנאים אלה כללו את השלב ההתפתחותי של עצי האם, שבברוש מצוי אין לו כנראה השפעה משמעותית על כושר ההשתרשות, הסוג והריכוז של האוקסין, מצע ההשרשה ומשך תדירות ההתזה. המחקר הנוכחי עסק בשלושה היבטים שנראו לנו חשובים לפיתוח שיטת השרשה יעילה: 1. סוג הייחור הנדרש לקבלת התפתחות נאותה של הייחורים המושרשים במשתלה; 2. קביעת עונת ההשרשה המיטיבית; 3. בחינת ההשפעה של דחיית הטיפול באוקסין על יעילות ההשרשה. שיטת ההשרשה המוצעת על בסיס המחקרים הקודמים שתוארו לעיל ולאור תוצאות המחקר הנוכחי מוצגת בסוף הדיון.

לריבוי המוני של קלונים נבחרים נדרש מספר גדול של ייחורים. בברוש מצוי, שהריבוי הווגטיבי שלו באמצעות השרשה חייב להתבסס על ייחורים אמיריים בלבד, ניתן לקבל מספר גדול של ייחורים מענפים צדדיים, בעיקר מדרגה 2 (איור 1). ייחורים אלה נמצאים בדרגות התעצות שונות: ייחורים עם בסיס מעוצה למחצה, ייחורים רכים וייחורים רכים מאוד. אורכם של הייחורים מהסוגים השונים הולך ועולה עם העלייה ברמת ההתעצות (ראו המקרא באיור 5). שיעור ההשתרשות בשלושת סוגי הייחורים הללו גבוה יחסית, ונוסף על כך יש חשיבות גם לקצב ההתפתחות של הייחורים המושרשים במהלך הגידול במשתלה. בדרך כלל מקובל לגדל במשתלה שתילים של עצי יער שמקורם בזרעים במשך עונה אחת. גידול ממושך יותר פוגע לעיתים באיכות השתילים, מאחר שהוא מצריך התאמה של ההשקיה והדישון, שלא תמיד נעשים כנדרש. במחקר הנוכחי נמצא מתאם חיובי בין קצב ההתפתחות של שתילים שמקורם מייחורים מושרשים במשתלה ובין מידת ההתעצות של הייחורים (איור 5). אם נוסיף לכך את האורך הראשוני של הייחורים, שהוא כאמור גדול יותר ככל שההתעצות גבוהה יותר, ניתן לקבל מייחורים שבסיסם מעוצה למחצה שתילים המתאימים לנטיעה במשך עונת גידול אחת במשתלה. אם יש צורך במספר גדול יחסית של שתילים, ניתן להשתמש בשני סוגי הייחורים האחרים, עם עדיפות לייחורים רכים על ייחורים רכים מאוד, תוך הכרה של ייחורים המושרשים האלה נדרשות לפחות שתי עונות גידול במשתלה. יש לציין שבטיפול נאות במהלך הגידול במשתלה, גם השתילים

המחקר הנוכחי. מחקר זה כלל שני תחומים: א. ברירה של טיפוסים עמידים ליובש ובחינת עמידותם לעקה ז; ב. שיפור שיטת ההשרשה של הברוש המצוי כדי לאפשר ניצול של הקלונים הנבחרים לנטיעות יערניות.

בחינת העמידות ליובש של קלונים נבחרים

הברירה של טיפוסים עמידים ליובש במחקר הנוכחי התבססה בעיקר על עצים בעלי מראה חיוני ביער יתיר, ששרדו שנות בצורת חוזרות (איור 2). הוכחת העמידות ליובש היא התנאי הראשון לשימוש בטיפוסים הנבחרים לנטיעות יערניות. בחינה של העמידות ליובש יכולה להיעשות במערכות ניסויים בתנאים מבוקרים או בהקמת חלקות מבחן בשטח. מקובל שההצלחה של הטיפוסים הנבחרים בחלקות מבחן היא הבסיס לקבלת החלטה על שימוש בהם לנטיעות יערניות. עם זאת, תוצאות חיוביות במערכות ניסויים יכולות לתמוך בהנחה, שהטיפוסים שנבחרו על סמך ההישרדות בשטח אכן עמידים ליובש. במערכת הליזימטרים המצויה בפקולטה לחקלאות נערכו שני ניסויים עם שתילים של מספר קלונים מיער יתיר שסווגו כעמידים ליובש בהשוואה לשתילים של ברוש מצוי ממקור זרעים סטנדרטי של קק"ל. נמצא שהקלונים מיער יתיר שומרים על מאזן מים משופר יחסית בתקופת ההצמאה (איור 3), דבר שהתבטא בשיעור הישרדות גבוה יחסית (איור 4) או בנזק מועט יחסית בתום תקופה זו (תוצאות שלא הוצגו) בהשוואה לשתילים ממקור הזרעים הסטנדרטי. התוצאות מורות שהקלונים שסווגו כעמידים ליובש הראו התנהגות שמרנית יותר של ניהול משק המים, המרמזת על התנהגות דמוית איזוהידרית, בעוד שהשתילים ממקור הזרעים הסטנדרטי הראו התנהגות שמרנית פחות של ניהול משק המים, המרמזת על התנהגות דמוית אנאיזוהידרית. השימוש בקלונים שפוחתו בעבודות השבחה מבוסס בעיקר על בחינה שלהם בחלקות מבחן. בתחום הזה יש בידינו רק תוצאות ראשוניות מחלקת המבחן שניטעה ממזרח לקיבוץ גת, באתר שתנאי הגידול בו נחשבים קשים. כל השתילים בחלקה נקלטו והם מתפתחים בקצב מהיר יחסית. אף על פי שמדובר בתוצאות ראשוניות, ניתן לראות בהן, נוסף על התוצאות שהתקבלו במערכת הליזימטרים, תמיכה בהנחת המחקר, שעצים ששרדו מספר מחזורים של שנות בצורת קרוב לוודאי עמידים ליובש.

שיפור שיטת ההשרשה

לריבוי וגטיבי המוני של קלונים נבחרים באמצעות השרשת ייחורים נדרשים מספר תנאים: 1. אספקת כמות מספקת של ייחורים באופן רציף; 2. שיעור השתרשות גבוה; 3. התפתחות נאותה של הייחורים המושרשים בתנאי משתלה. ההשרשה של ברוש מצוי נלמדה בעבר על ידי כמה קבוצות מחקר בישראל ובארצות הים התיכון. כפי

בייחורים לעידוד השתרשות יחסה להשפעתו על השלבים הראשונים של ההשתרשות (Pacurar et al., 2014). להשרשה בכלגים יש יתרון על פני השרשה בתפזורת מבחינת נוחות ההעתקה של הייחורים המושרשים למכלי הגידול. גם כשמתוכננת השרשה בכלגים, עדיפה האפשרות שיושמה במחקר הנוכחי, לבצע את השלב הראשון של ההשרשה בתפזורת ללא טיפול באוקסין, ולאחר סילוק הקטעים הפגועים או חידוש החתך והטיפול באוקסין להעביר את הייחורים לכלגים להשרשה. מתוצאות המחקר הנוכחי נראה שגישה זו צפויה להקטין את הפגיעה באיכות הייחורים ולהניב שיעור השתרשות גבוה מאוד גם בהשרשה בכלגים. גם במתן אוקסין בתחילת ההשרשה היה בדרך כלל צורך לסלק את הקטע הפגוע בבסיס הייחור ולטפל שוב באוקסין, טיפול שהביא לשיעור השתרשות נמוך יחסית בהשרשה בכלגים.

על בסיס הידע שהצטבר במחקרים שנעשו בחו"ל, ובעיקר לנוכח הניסיון ותוצאות המחקרים של הקבוצה שלנו, שיטת ההשרשה המומלצת של ברוש מצוי מפורטת להלן: (א) השרשה בעונת הקיץ; (ב) שימוש בייחורים עם בסיס מעוצה למחצה מענפים צדדיים מדרגה 1 ובעיקר מדרגה 2. את הייחורים ניתן לאסוף גם מעצים בוגרים; (ג) טיפול באוקסין כחודש לאחר תחילת ההשרשה, לאחר חידוש החתך או סילוק החלק הפגוע בבסיס הייחור. האוקסין המומלץ הוא IBA 0.6% באבקת טלק; (ד) מצע ההשרשה המומלץ הוא ורמיקוליט:קלקר גרוס (40:60, נכח/נכח). ההשרשה מתבצעת בתפזורת (מצע הממלא את שולחן ההשרשה). אם מתוכנן שימוש בכלגים, יש לבצע את השלב הראשון של ההשרשה בתפזורת, ולהעתיק את הייחורים לאחר הטיפול הנוסף באוקסין לכלגים; (ה) משטר ההתזה המומלץ בקיץ הוא 10 שניות כל 10 דקות, ובהשרשה בחורף 10 שניות כל 16 דקות; (ו) בהשרשה בחורף יש לחמם את מצע ההשרשה ל-25 מעלות; (ז) ייחורים מושרשים יש להעתיק למגשי גידול של 12 תאים, בנפח תא של 340 סמ"ק.

המחקר הנוכחי הניח את הבסיס לנטיעה של קלונים עמידים ליובש של ברוש מצוי ביערות הארץ, שהשימוש בהם יכול למנוע או להקטין את הנזקים למין הזה משנות בצורת חוזרות, כמו אלה שפקדו את ישראל בעשרים השנים האחרונות. אומנם אין בידינו הוכחה מוחלטת שהקלונים שנבחרו עמידים ליובש, אולם התוצאות שהתקבלו עד עתה רומזות שהקלונים הללו אכן עמידים יחסית ליובש. בקק"ל יש התשתית המתאימה לגידול שתילים של הקלונים הללו לנטיעות יערניות, עצי אם לייחורים ומתקן השרשה, אבל טרם הוחלט לאמץ את המדיניות הזו. לעיתים מועלית הטענה ששימוש במספר קלונים לנטיעות יערניות טומן בחובו סכנה מוגברת לפגיעה מגורמים ביוטיים ואביוטיים בהשוואה ליערות שמקורם מזרעים, המאופיינים במגוון גנטי רחב של עצים. עם זאת, שתי עובדות מורות שאין בשימוש

המתקבלים מהייחורים האלה איכותיים ועונים על הנדרש משתילים המיועדים לנטיעה. בתצפיות שנעשו על עצי אם שהוסר מהם מספר גדול של ייחורים, לא נראתה פגיעה בהתפתחות של העצים. למעשה, בעצים רבים נראתה האצה של צמיחת ענפים, ובטיפוסים צריפיים נצפתה פריצה של ענפים חדשים בעלי צימוח נמרץ.

ההיבט השני שנבחן היה מועד ההשרשה, השרשה בקיץ בהשוואה להשרשה בחורף. תוצאות הניסוי הראו יתרון ברור להשרשה בקיץ (איור 6), ממצא שתאם את התצפיות שנעשו על ידינו במהלך השנים. כמצוין בפרק התוצאות, ההשרשה בקיץ מאפשרת שימוש בייחורים מפותחים שנמצאים בשלב של צמיחה, שבסיסם מעוצה למחצה ובגוון חום בהיר. בייחורים מהסוג הזה הצלחנו לקבל שיעורי השתרשות גבוהים יחסית בקלונים ובטיפוסים שונים של ברוש מצוי שיועדו לשימור. אומנם באיטליה וביוון הומלץ על השרשה של ברוש מצוי בחורף, אולם שיעורי ההשתרשות היו לעיתים נמוכים מהנדרש. בשל סיבה זו הוחלט באיטליה להרבות קלונים של ברוש מצוי העמידים לפטריית הסירידיום באמצעות הרכבה. ניתן להניח שתנאי ההשרשה בישראל ושיטת ההשרשה המבוססת על תוצאות המחקרים של הקבוצה שלנו, מאפשרים להגיע לשיעורי השתרשות גבוהים בעונת הקיץ.

ממצאי המחקר הראו שלדחיייה בחודש של מתן הטיפול באוקסין לעידוד השתרשות של ברוש מצוי יש בדרך כלל שתי השפעות חיוביות בהשוואה לטיפול של מתן האוקסין בתחילת ההשרשה. ההשפעה הראשונה היא הקטנת עוצמת הפגיעה בבסיס הייחורים במהלך ההשרשה (איור 7). מקור הפגיעה הזו הוא כנראה התנוונות הרקמות בבסיס הייחורים בשל היעדר חלוקת תאים, ולא מגורם ביוטי. אומנם להשפעה הזו אין כנראה קשר ישיר להשתרשות, מאחר שנהוג לסלק את החלק הפגוע במהלך ההשרשה, אולם היא מקטינה את הפגיעה באיכות הייחורים. לעיתים הפגיעה אינה מוגבלת לבסיס הייחורים, אלא מקיפה חלק גדול של הייחור, ובכך מקטינה את איכותו. במחקר הנוכחי הוכח, שייחור מפותח בעל בסיס מעוצה למחצה מבטיח קבלת שתיל איכותי, ולכן להקטנת חומרת הפגיעה ישנה חשיבות מעשית. ההשפעה השנייה היא שיפור משמעותי של שיעור ההשתרשות (איור 8). ההשפעה החיובית של דחיית מתן האוקסין על שיעור ההשתרשות אובחנה בהשרשה בתפזורת ובעיקר בהשרשה בשני סוגים של כלגים, בהם שיעור ההשתרשות של ייחורים שטופלו באוקסין בתחילת ההשרשה היה נמוך מאוד (תוצאות שלא הוצגו). עידוד ההשתרשות של ייחורים על ידי דחיית הטיפול באוקסין דווח גם במינים נוספים של צמחים מעוצים (Luckman and Menary, 2002; Lodama et al., 2016). להשפעה החיובית של הדחייה במתן האוקסין יש ענין גם מבחינה ביולוגית, מאחר שההשפעה החיובית של הטיפול באוקסין

תמותה של ברוש מצוי מיובש ביערות הארץ, בעיקר במרחב דרום, הקיפה כמעט את כל העצים בעומדים שנפגעו. בדומה לכך, הנגיעות של ברוש מצוי בפטריית הסיירידיום, גרמה לתמותה כמעט מוחלטת של הברוש המצוי באיטליה, והנטיעות של המין הזה באיטליה מבוססות כיום רק על קלונים עמידים לפטרייה הזו. במחקר הנוכחי פותחו 10 קלונים, שישנה סבירות גבוהה שהם עמידים ליובש, וניתן להשתמש בכולם לנטיעות יערניות.

בקלונים סיכון ממשי: 1. גידולים חקלאיים מבוססים רק על זנים, שחלק מהם הם בני עשרות שנים ולעיתים אף יותר, ואין דיווחים על פגיעה יוצאת דופן בהם. גם יערות מסחריים במספר ארצות מקורם בגנוטיפים בודדים, שלעיתים ניטעים בהיקף גדול מאוד, כמו למשל מכלוא האינקליפטוס יורוגנדיס (*Eucalyptus urograndis*) בברזיל, ואין דיווחים על בעיות ייחודיות שהתעוררו ביערות האלה; 2. בדרך כלל נזקים מגורמים ביוטיים ואביוטיים חלים ברמת המין. למשל,

מקורות

- Luckman GA and Menary RC. 2002. Increased root initiation in cuttings of *Eucalyptus nitens* by delayed auxin application. *Plant Growth Regulation*, 88, 31–35.
- Rog I, Tague C, Jacoby G, Megidish S, Yaacoby A, Wagner Y, and Klein T. 2021. Interspecific soil water partitioning as a driver of increased productivity in a diverse mixed Mediterranean forest. *Journal of Geographical Research: Biogeosciences*, 126, e2021JG006382.
- Roman DT, Novick KA, Brzostek ER, Dragoni D, Rahman F, and Phillips RP. 2015. The role of isohydric and anisohydric species in determining ecosystem-scale response to severe drought. *Oecologia*, 179, 641–654.
- Stankova T and Panetsos K. 1997. Vegetative propagation of *Cupressus sempervirens* L. of Cretan origin by softwood stem cuttings. *Silvae Genetica*, 46, 137–144.
- Pacurar RI, Perrone I, and Bellini C. 2014. Auxin is a central player in the hormone cross-talks that control adventitious rooting. *Physiologia Plantarum*, 151, 83–96.
- Takahashi F, Kuromori T, Yamaguchi-Shinozaki K, and Shinojaki K. 2020. Drought stress responses and resistance in plants: From cellular responses to long-distance intercellular communication. *Frontiers in Plant Science*, 11, 556972.
- שמלה מ. 1986. ריבוי וגטטיבי של ברוש מצוי (*Cupressus sempervirens* L.) על ידי ייחורים (עבודת גמר לתואר שני). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
- Capuana M, Giovannelli A, and Giannini R. 2002. Factors influencing rooting in cutting propagation of cypress (*Cupressus sempervirens* L.). *Silvae Genetica*, 49, 277–281.
- Capuana M and Lambardi M. 1995. Cutting propagation of common cypress (*Cupressus sempervirens* L.). *New Forests*, 9, 111–122.
- Hartmann HT, Kester DE, Davies FT, and Geneve RI. 2014. *Hartmann and Kester's Plant Propagation: Principles and Practices*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Klein T, Cahanovitch R, Sprintsin M, Herr N, and Schiller G. 2019. A nationwide analysis of tree mortality under climate change: Forest loss and its causes in Israel 1948–2017. *Forest Ecology and Management*, 432, 840–849.
- Larcher W. 1995. *Physiological Plant Ecology. Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. Berlin – Heidelberg: Springer.
- Lodama KE, du Toit ES, Steyn SM, Araya HT, Prinsloo G, Du Plooy CP, and Robbertse PJ. 2016. Improving rooting of *Lobostemon furticosus* L. with delayed auxin treatment. *South African Journal of Botany*, 105, 111–115.



יובש מגביל את ההתחדשות ביער יתיר: הסכנה ליער מתעצמת בשל שינוי האקלים

אלה פוזנר¹ | פלג בר און¹ | סתיו ליבנה-לוזון¹ | אורי מורן¹ | מור צמיר-רימון¹
אפרת דנר¹ | אפרת שוורץ² | אייל רוטנברג² | פיודור טטרינוב² | יקיר פרייזלר²
ניתאי זכריה³ | יגיל אסם⁴ | דן יקיר² | תמיר קליין^{1*}

- 1 המחלקה למדעי הצמח והסביבה, מכון ויצמן למדע
 - 2 המחלקה למדעי כדור הארץ וכוכבי הלכת, מכון ויצמן למדע
 - 3 אגף הייעור, קק"ל
 - 4 המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי-מרכז וולקני
- * tamir.klein@weizmann.ac.il

תקציר

זריעים רב-שנתית נבלמה על ידי רעייה, וגובהם הנצבר השתנה בין צפיפויות עומד שונות. הנתונים מצביעים על כך ששרידות זריעים במהלך הקיץ הראשון פועלת כצוואר בקבוק, ומהווה גורם מגביל לקיום היער בקצה היבש והחם של תפוצת היער הנוכחית. כמו כן, כימתנו את התפקידים של גורמי עקה אחרים, כגון קרינה מופחתת, והדגשנו את התפקיד המגביל של רעייה בגדילת זריעים רב-שנתית. יש לעקוב מקרוב אחר התחדשות היער באוכלוסיות רגישות, שכן אובדן יער שנובע משינוי האקלים יכול להתרחש גם ללא תמותה של עצים בוגרים.

ההתחממות המתמשכת ותנאי היובש הנובעים משינוי האקלים העולמי, מעצבים את גורלם של יערות ברחבי העולם. בעוד שתהליכי תמותת עצים נחקרים רבות, תהליכי עיכוב ההתחדשות הטבעית של היער עדיין אינם מפותחים, אף על פי שהם מזיקים באותה מידה לקיימות היער. אוכלוסיות מינים בקצה אזור תפוצתם נמצאות בסיכון גבוה, ולכן נחשבות כמוקדים המועדים להכחדה. מחקר זה נערך ביער אורנים נטוע הגדל באזור צחיח למחצה, בקצה תחום קיומם של יערות, כמודל להישרדות היער בתנאי התחממות ויובש. גיוס זריעים – הכולל נביטת זריעים, שרידות זריעים וגדילת זריעים רב-שנתית – נמדד לאורך שש שנים רצופות. כדי להצביע על תפקידו של היובש תכננו ניסוי שדה, תוך דילול העומדים לשלוש רמות צפיפות ושליטה על משטרי הרעייה. נביטת הזריעים הייתה גבוהה בכל החלקות שנחקרו, אך שרידות הזריעים והגדילה הרב-שנתית היו אפסיות. צפיפות עומד גבוהה ומניעת רעייה השפיעו לטובה על הנביטה. שרידות הזריעים הייתה גבוהה יותר בשנים גשומות. גדילת

מילות מפתח

גדילת זריעים, דילול, התחממות, רעייה, תמותת זריעים

מבוא

חמים ויבשים מקדמים התפתחות מינים עמידים כמו אורן ירושלים (*Pinus halepensis* Miller), האורן הים תיכוני הנפוץ ביותר שגם מפגין סבילות גבוהה לבצורת (Mauri et al., 2021; Bonari et al., 2016; al., 2016). עם זאת, שינויים מהירים וקיצוניים, כגון גלי חום, עלולים להביא את הצחיחות של אזורים אלה למצב קיצוני (Spinoni et al., 2018) ולהפוך אותם לכמעט בלתי אפשריים עבור אוכלוסיות עצים בנות-קיימא. לעיתים קרובות מופיעות אוכלוסיות עצים אלה כאוכלוסיות קצה של תפוצת המין (Voltas et al., 2018; Patsiou et al., 2020). הן נתקלות באתגרים אבולוציוניים משמעותיים יותר עם יכולת הסתגלות ופוטנציאל הגירה נמוכים מחד גיסא, וחשיפה גבוהה לגורמי עקה מאידך גיסא (Lindner et al., 2010; Alberto et al., 2013).

נוסף על המגמה האקלימית, גם התערבויות אנושיות אחרות, כגון בירוא יערות והסבתם לשטחי רעייה ושינוי שימושי קרקע, השפיעו באופן משמעותי על הדינמיקה של היער במשך אלפי שנים. כמו כן, ייעור מעשה ידי אדם גורם לרוב ליצירת עומדים לא מבוקרים ובעלי צפיפות גבוהה, ולעיתים קרובות הם בעלי רגישות גבוהה לשינויים (Allen et al., 2010). בניהול יער ישנו ניסיון למתן את התרחישים הללו על ידי הפחתת צפיפות העומד. דילול גורם למגוון תוצאות, בהן שינוי במאזן המים ובחדירת האור (Simonin et al., 2015; Vesala et al., 2007).

דילול באתרים צחיחים למחצה משפר את הביצועים ואת העמידות של העצים הנותרים (Moreno-Gutierrez et al., 2019; Sohn et al., 2016; Tsamir et al., 2011) ותומך בגיוס זריעים (Mast and Veblen, 1999). עם זאת, גם כאשר צפיפות עומד בינונית עד נמוכה מציגה שרידות גבוהה יותר של זריעים, האינטראקציה של הבצורות הבאות יכולה לדכא את תהליך הגיוס (Kolb et al., 2020). התערבות אנושית משמעותית נוספת היא משטרי הרעייה. הם משפיעים באופן נרחב על החי והצומח של היער, ובייחוד על גיוס זריעים, היות שהזריעים נגישים לאוכלי צמחים וגם בעלי ערך תזונתי גבוה (עיתרים בחלבון ועניים בסיבים) (Öllerer et al., 2019). שינוי תהליך הגיוס על ידי רעייה הוביל להרחבת טווח יער האורנים במקרה אחד (Richardson et al., 2007), או לדיכוי יער מתמשך במקרים אחרים (Chauchard et al., 2021; Connor et al., 2007). השפעות רעייה המקילות על התחדשות יער נמצאו קשורות לעיתים קרובות לתדירות שרפות נמוכה (Richardson et al., 2007) ולתחרות מופחתת עם צמחייה עשבונית (Chauchard et al., 2007), בעוד שהשפעות מזיקות כרוכות בדריסת זריעים צעירים או בפגיעה בהם. בסופו של דבר, השפעת הרעייה תלויה בעוצמת הרעייה, בסוג הרעייה ובסוג המערכת האקולוגית, וההשפעות שליליות יותר ביערות הגדלים באזורים צחיחים למחצה (Gao and Carmel, 2020).

בעידן הנוכחי של שינוי האקלים התחזיות מצביעות על הפרעות אקלימיות ארוכות ותכופות יותר, הכוללות אירועים עוקבים של בצורת (IPCC, 2021). בעשורים האחרונים עלה ממגוון רחב של מחקרים כי ישנו חותם אקלימי משמעותי על מערכות אקולוגיות טבעיות בעולם, שכולל שינויים במגוון הביולוגי ובתפוצת מינים (Petit et al., 2008; Seidl et al., 2017). במערכות האקולוגיות העולמיות יערות ממלאים תפקיד מכריע בעיצוב מחזורי המים והפחמן. נכון לעכשיו יערות רבים מושפעים מההתחממות המתמשכת ומצמצום מקורות המים (Allen et al., 2010; Klein and Hartmann, 2018). ניתוח מקיף מראה שגורמים אלה ממשכים לגרום לאובדן יערות דרך תמותת עצים והפרעה להתחדשות היער (McDowell et al., 2020). בהתחשב בכך שהתפתחות יער היא תהליך איטי, ושהעצים בו בעלי תוחלת חיים ארוכה, לא ברור אם יכולת ההתאמה שלהם תספיק כדי להתגבר על הקצב והעוצמה של השינויים הקרבים (Lindner et al., 2011; Hoffmann and Sgrò, 2010). במצב זה, הכחדת אוכלוסיות עצים היא תוצאה אפשרית בהתחשב בתמותה הגוברת של העצים ובעלייה במספר היערות המופרעים ברחבי העולם. היובש ממלא תפקיד מרכזי בתחזיות אלה, אפילו באזורים עתירי מים, עובדה המראה כי אף יער אינו חסין לשינוי האקלים (Anderegg et al., 2015; McDowell et al., 2020). בעוד שתמותת עצים נחקרת ומתועדת, מעט ידוע על תפקידה של הגבלת ההתחדשות הטבעית של היער, שמונעת את קיימות היער בתנאי התחממות ויובש. במהלך שלבי חייו של העץ הסתגלותו לתנאים משתנים ממלאת תפקיד מהותי. ביצועי העץ הבוגר חשובים לא רק להישרדותו שלו, אלא גם ליכולתו לתמוך בדור הבא. כדי להבטיח את קיימות היער נדרשים שני תהליכים: צמיחת עצים בוגרים והוספת פרטים צעירים חדשים לאוכלוסייה שיחליפו עצים ותיקים או מתים (Keeble, 1988; Oliver and Larson, 1996; Bell et al., 2014).

תהליך הוספת פרט לאוכלוסייה מוגדר כגיוס זריעים, ומורכב משלושה שלבים בסיסיים: (א) נביטת הזרעים; (ב) שרידות הזריעים; (ג) גדילה והתפתחות רב-שנתית של הזריעים (Eriksson and Ehrlén, 2008). ככלל, גיוס דור חדש ליער קיים מחייב את מעבר הזריע משלב אחד למשנהו. בהתחשב בפגיעות של הזריעים בין שלבי חייהם, לא מפתיע ששיעור התמותה שלהם גבוה (Eriksson and Ehrlén, 2020; McDowell et al., 2008). בעיקר בתנאים של שנות יובש עוקבות, התחממות מתמשכת וההשפעות הבאות בעקבותיהן. הוכח כי שרידות הזריעים וביצועי הצמיחה של מיני אורן ים תיכוניים מופחתים באופן משמעותי בתרחישי בצורת עתידיים (Matías et al., 2017). אזורים ביו-אקלימיים

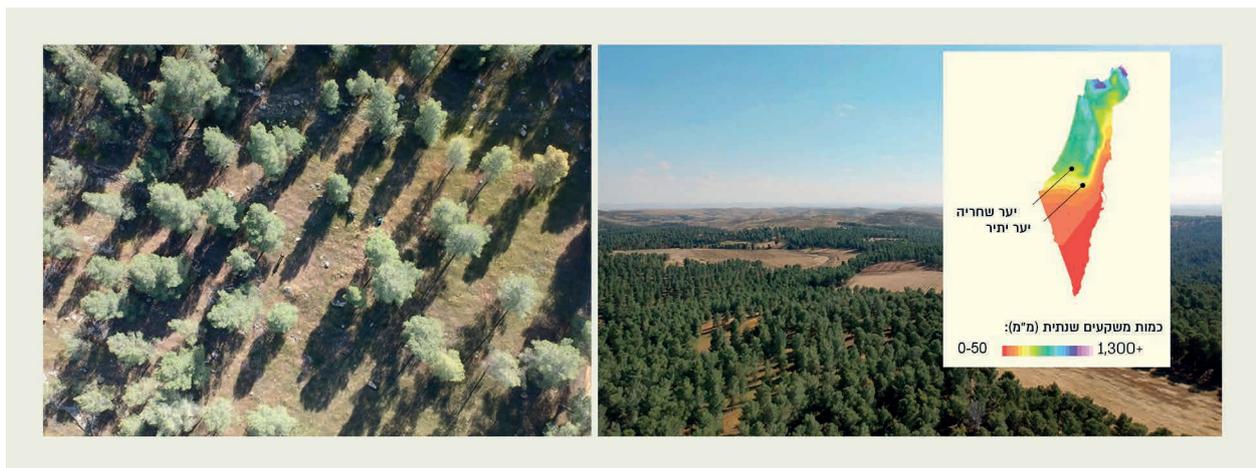
חומרים ושיטות

יער יתיר, סביבה ואקלים

יער יתיר הוא יער נטוע באזור צחיח למחצה (איור 1). אורן ירושלים הוא המין הנטוע העיקרי בו, והוא גם מין האורן המקומי היחיד בישראל ובירדן. היער ממוקם בקצה הצפוני של הנגב ומשתרע על פני 30,000 דונם. היער שוכן באזור מעבר בין שני אזורים ביו-אקלימיים: אזור בעל אקלים צחיח למחצה ואזור בעל אקלים ים תיכוני יבש-חם (UNESCO, 1963). כמות המשקעים השנתית הממוצעת בו היא 285 מ"מ. סלע המקום מורכב מגיר ומקירטון, וסוג הקרקע הוא לס רדוד ממקור איאולי עד לעומק של 20 ס"מ (סיווג על ידי FAO) ואדמת רנדזינה קלה עד עומק של 20–100 ס"מ. בליית הסלע יצרה גבעות עגולות עם שיפועים מתונים, בעלות אחוז גבוה של אבנים וכיסוי סלע עילי (Preisler et al., 2019). מי התהום הם מאקוות (אקוויפר) ההר המערבית של ישראל, וגובה מפלסם הוא 300 מטר מתחת לפני השטח. בשל אי-זמינותם של מי התהום והיעדר מי נגר, המים הזמינים התומכים בקיומה של צמחיית היער הם המשקעים בעונה הגשומה (נובמבר–אפריל) ובמידה מצומצמת ספיחת הלחות וניצולה כמקור מים בעונה היבשה (מאי–אוקטובר) (ויזל, 1984; Schiller and Azmon, 2009; Schiller, 2011; Qubaja et al., 2020). היער ניטע בין השנים 1965–1969, כאשר המשקעים היו מעל לממוצע באזור. השתילים שניטעו היו בני שנה עד שנתיים, והושקו במהלך העונה היבשה הראשונה לאחר השתילה.

חקר השפעות שינוי האקלים על יערות לא יכול להסתפק באתרים ביערות ממוזגים בלבד, ודורש חקירה מעמיקה של אתרי קצה. אתר כזה הוא יער האורנים ביתיר בגבול היבש של תפוצת היערות, בשולי המפל (gradient) האקלימי הים תיכוני של ישראל. יער יתיר מייצג מערכת אקולוגית של יער הגדל באזור צחיח למחצה עם משקעים נמוכים במיוחד ובעקבותיהם גירעונות מים מהותיים (UNESCO, 1963; Rotenberg and Yakir, 2010; Klein et al., 2014; Preisler et al., 2019). באזור זה שינה הייעור הצפוף את הצמחייה הטבעית, והיא הפכה לצמחיית תת-יער שנתונה ללחץ רעייה כבד (Amir and Rechtman, 2006). בהקשר זה, יער יתיר הוא מודל ייחודי לגורמי עקה מרובים הפועלים יחד (אסם ושות', 2009).

השפעת התחדשות היער על עתיד היערות במצב של שינוי אקלים היא נושא שנחקר מעט מאוד עד היום. בהתחשב בעובדה שיער יתיר מייצג אוכלוסיית עצים בקצה גבול קיומו של יער, שיערנו כי (1) הנביטה, שרידות הזרעים וגדילת הזרעים יהיו נמוכות מהנדרש להתחדשות ארוכת טווח של היער, וכי הדבר יסכן את עתיד היער בכללותו. כשהצענו את יתיר כחקר מקרה לניהול יערות במצב של שינוי אקלים, שיערנו עוד כי (2) הפחתת צפיפות היער (דילול) ומניעת רעייה יכולות לשפר את גיוס הזרעים דרך מתן זמינות גבוהה יותר של אור ומים לזרעים ותוך מניעת נזקי רעייה לזרעים, אולם לא ידענו אם יש בכך מספיק כדי להבטיח את קיימות היער.



איור 1

יער יתיר במבט-על

א) מבט מזרחי על יער יתיר מגובה 100–120 מטר. ב) מפת ישראל מחולקת לפי מפל כמות משקעים שנתית ממוצעת של 0–50 מ"מ ועד 1,300+ מ"מ, בין השנים 1991–2020. חיצים עגולים מצביעים על יער יתיר ויער שחריה. המפה לקוחה מאתר השירות המטאורולוגי של ישראל. יער יתיר נמצא בטווח משקעים שנתי של 251–300 מ"מ, ויער שחריה נמצא בטווח של 401–450 מ"מ. ג) מבט על חלקת מחקר ביער יתיר בצפיפות עומד של 20 עצים לדונם, מגובה 40–50 מטר.

סקרי יתיר לגיוס זרעים

שלושת השלבים של גיוס הזרעים נוטרו ביתר במשך שש שנים על ידי סקרים, ונספרו בהם מדגמים שנורמלו לפי דונם. ניטור הנביטה כלל ספירת נבטים חדשים, ובוצע באפריל לכל אורך ורוחב החלקה בשנים 2015–2016 ולאורך חתך רצועה בחלקה בשנים 2018–2020. ניטור שרידות הזרעים כלל ספירת זרעים ששרדו קיץ אחד, ובוצע בספטמבר לאורך ולרוחב החלקה בשנים 2015–2018 ולאורך חתך רצועה בשנים 2019–2020. ניטור גדילת הזרעים הרב-שנתית כלל ספירת זרעים ששרדו לפחות שני קיצים בספטמבר, לאורך ולרוחב כל החלקה מאז 2015. הסקרים כללו ספירת זרעים שהגיעו לגובה של 10 ס"מ לפחות, והם סווגו לארבע קטגוריות גובה של 10–14, 15–24, 25–34, 35+ ס"מ. קצב צמיחת הזרעים ביתר הוא כ-10 ס"מ לשנה, ולכן קטגוריות גובה אלה מייצגות באופן כללי את גיל הזרע.

נתונים מטאורולוגיים

נתונים מטאורולוגיים עבור יתיר נאספו ברציפות מאז שנת 2000 במגדל המטאורולוגי של יער יתיר הממוקם במרכז היער, וכחות מקילומטר אחד מאתר המחקר (Gruntzweig et al., 2007; Rotenberg and Yakir, 2010). נתוני גשם יומיים וטמפרטורת האוויר סופקו משנת 1971 עד 2021 על ידי תחנת הגשם הסטנדרטית של ק"ק⁷ הממוקמת כ-1.5 ק"מ מאתר המחקר, ותחנת השירות המטאורולוגי שני שממוקמת כ-2.2 ק"מ מאתר המחקר.

ניתוח סטטיסטי

ניתוח נתונים בוצע והוצג באמצעות R Core Team (2021) והממשק R Studio (RStudio Team, 2020). הערכנו את ההשפעות של הגורמים הסביבתיים השונים על נביטת זרעים, שרידות זרעים וגדילת זרעים רב-שנתית, באמצעות מודל מעורב לינארי כללי (GLMMs) בהתאם להתפלגות המתאימה לכל אחד מהפרמטרים שנבדקו. הניתוח הסטטיסטי נעשה באמצעות ממשק המשתמש ב-Jamovi (פרויקט 2021), ובאמצעות R Core Team (2021) והממשק R Studio (RStudio Team, 2020). כפי שהוטמע בחבילה "gamlj" (Gallucci, 2021). טיפולי הרעיה נחשבו גורם קבוע, בעוד שהחלקה ותאריך הדגימה נחשבו גורמים אקראיים. רמות הצפיפות, המשקעים השנתיים והטמפרטורה השנתית נכללו כמשתנים בכל המודלים. כאשר בחנו את גדילת הזרעים הרב-שנתית, קטגוריות הגובה נחשבו כגורם קבוע. תקנן של עוצמת האפקט הושג על ידי חלוקת גודל האפקט בסטיית תקן אחת לפני הדמיה גרפית.

יער שחריה, סביבה ואקלים

יער שחריה הוא יער נטוע ים תיכוני יבש-חם הנשלט על

הצמחייה המקומית מורכבת משיחי ספר מדבריים בפיזור נמוך ומשתנה מצפון לדרום, מכיסוי רחב של מיני ערבה ים תיכונית למינים אירנו-טוראניים בכיסוי דליל למחצה (Vogel et al., 1986). כיום הצמחייה המקומית יוצרת את תת-היער הנטוע.

צמחיית היער נתונה למשטרי רעיה מתונים עד כבדים, כפי שהייתה לפני הייעור במשך אלפי שנים (ויזל, 1984). העדר המקומי הנפוץ מורכב מ-150–500 כבשים ועד 10 עיזים, הרועות מדי יום בעונת הרעיה. משטרי הרעיה נאכפים על ידי יערני היער ומוגבלים ל-2,500–3,000 בעלי חיים ליום ברחבי היער, לתקופה של חמישה או שישה חודשים בשנה, בהתאם לכמות המשקעים השנתית. בתקופה שבין פברואר לאפריל צמחיית תת-היער נשלטת על ידי צמחייה עשבונית במקביל לנביטת האורנים, ועל כן היער נתון ללחץ רעיה כבד. במהלך התקופה שלאחר מכן, בחודש מאי, הצמחייה העשבונית מתייבשת עם השתנות העונה, ואיתה יורד לחץ הרעיה. בתקופה היבשה, מיוני עד אוגוסט, העדרים משנים את דפוסי הרעיה וניזונים מזרעי העשבוניים הבשלים ומהצמחייה המעוצה עד סוף עונת הרעיה ביולי-אוגוסט. נוסף על כך, היער תומך באוכלוסיית צבי ישראלי (*Gazella gazella*) של כ-100 פרטים. היער תומך גם בקיומם של מכרסמים גדולים כמו ארנבת מצויה (*Lepus capensis*) ודורבן מצוי (*Hystrix indica*). כמו כן, היער משמש את ביולי לקהילות המקומיות לאורך כל השנה.

ניסוי הדילול והרעיה ביתר

בשטח לא משופע ובו עצים בגיל זהה ובמרחק של 500 מטר מחלקת הניטור הקבועה של המחקר הוגדרו 15 חלקות בשטח של כ-5 דונם (70×70 מטר או 110×50 מטר), עם אזור חיץ של 15 מטר מכל צד של החלקה להגבלת השפעות חיצוניות. במהלך שנת 2009 דוללו החלקות ליצירת שלוש רמות של צפיפות העומדים; חמש חלקות נותרו ללא דילול כדי לדמות את רמת הצפיפות הממוצעת ביער של 30 עצים לדונם, חמש חלקות דוללו לצפיפות בינונית של 20 עצים לדונם, וחמש חלקות דוללו לצפיפות נמוכה של 10 עצים לדונם. בשנת 2010 חולקה כל חלקה לשני חלקים (2.5 דונם כל אחד) כדי לבחון את השפעת הרעיה; חלק אחד של החלקה גודר כדי למנוע כניסת בעלי חיים, והחלק השני נותר נגיש. הוגדרו שני חתכי רצועה מקבילים בגודל 4×30 מטר בכל חלק של החלקה, שפונים ממזרח למערב. שתי יתדות מתכת קבועות קיבעו כל חתך רצועה כדי להבטיח מדידות קבועות במהלך השנים העוקבות. לאורך חתכי רצועה אלה בוצעו סקרי מדידה שנתיים של גיוס זרעים משנת 2015, כלומר שש שנים לאחר הדילול. באותו זמן חלקות המחקר כבר הגיעו למצב יציב (Tsamir et al., 2019), ומכאן שהתוצאות שלנו משקפות דינמיקה ארוכת טווח בשטחים הנתונים למשטרי הדילול והרעיה.

תוצאות

ידי אורן ירושלים (UNESCO, 1963; Osem et al., 2013). הוא ממוקם במורדות הדרום-מערביים של אזור שפלת יהודה (40 ק"מ מצפון-מערב ליתיר) ומשתרע על פני 7,000 דונם. היער נמצא באזור המהווה אזור חדירה אקלימי מצפון הנגב ומוגדר כמפל ההולך והופך צחיח מצפון לדרום. כמו ביתר, המסלע גירני ומעליו קרקע רנדזינה. הצומח המקומי כולל שיחים נמוכים ים תיכוניים וצמחייה עשבונית. כיום השרידים של הצמחייה המקומית מהווים את צמחיית תת-היער. המשקעים באתר יוצרים מי נגר שחודרים למי התהום ולאקוזה או נאגרים במאגרי מים על-קרקעיים, אך בסופו של דבר רובם מתאדים לאטמוספירה. יער שחריה מאופיין ב-400-500 מ"מ משקעים שנתיים (אתר השירות המטאורולוגי).

נביטת זרעים והשרדות זרעים ביער יתיר

במהלך חמש שנות הניסוי נצפה מספר גדל והולך של נבטים, שהגיע לשיא בשנת 2020 (איור 2). לעומת זאת, נצפתה מגמה לא אחידה של שרידות הזרעים, שהושפעה באופן חיובי מהמשקעים השנתיים: בשנים 2015-2016 הגשומות מהממוצע נמצא שיעור גבוה משמעותית של שרידות זרעים, בעוד שבשנים יבשות שיעור השרידות הממוצע היה כחות מ-0.06% (משקעים: $\chi^2_{21}=22.97, P<0.001$; איור 2). עם זאת, לא נמצאה השפעה ארוכת שנים, אלא השפעה הצמודה לשנת הנביטה בלבד; המספר הגבוה ביותר של זרעים ששרדו נספר לאחר שלוש שנים יבשות (2017-2019) בשנת 2020 שהייתה גשומה מעבר לממוצע.

פריסת ניסוי שחריה ומדידות

ביער הוגדרו שש חלקות בגודל 20 דונם ובהן תת-חלקות בגודל 2.5 דונם המהוות את יחידת המדידה של המחקר. העומדים דוללו לרמות צפיפות והוגדרו ל-10, 20 ו-30 עצים לדונם. כל צפיפות מיוצגת בשבע עד עשר חלקות. בכל החלקות לא הייתה רעייה. סקרים לאפיון גדילת הזרעים הרב-שנתית כללו את ספירתם ומדידת גובהם של הזרעים. סקרים אלה בוצעו ביער שחריה בינואר 2009 לאורך החתך, בדומה ליער יתיר. נתונים מטאורולוגיים עבור יער שחריה סופקו על ידי השירות המטאורולוגי מתחנת גת הממוקמת כ-5 ק"מ מאתר המחקר שחריה.

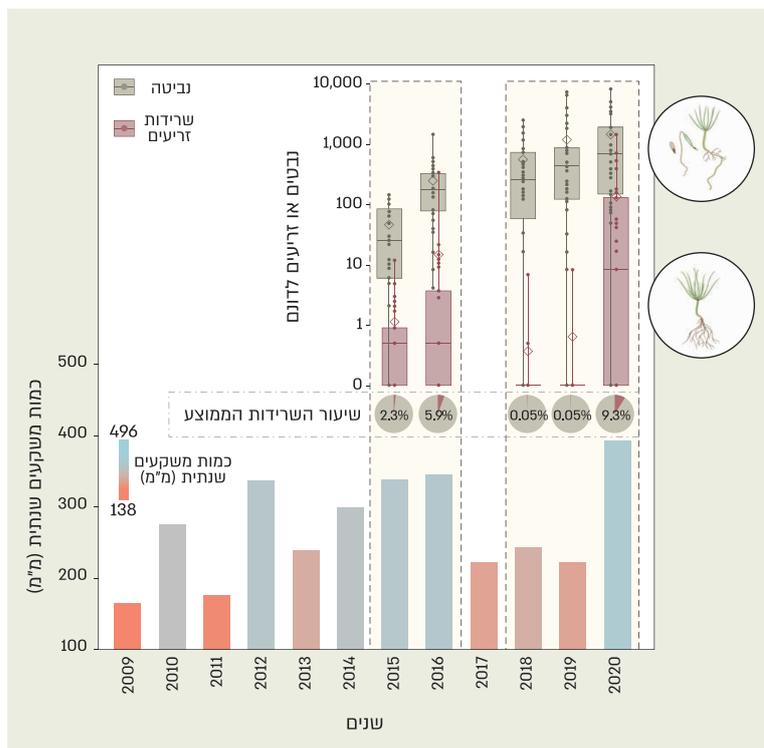
השפעות צפיפות העומד וטיפול הרעייה על נביטת הזרעים ושרידות הזרעים ביער יתיר

מספר נבטים גבוה נספר ככל שצפיפות העומד עלתה, והגיע ל-1,000 עד 10,000 נבטים לדונם (צפיפות העומד: $\chi^2_{21}=20.13, P<0.001$; איור 3א). צפיפות עומד גבוהה הביאה לעלייה בממוצעי הנביטה ושרידות הזרעים (איור 3א). על ידי הפרדת המגמה של השפעת צפיפות העומד בין שני טיפולי הרעייה נחשפה השפעה שלילית משמעותית של הרעייה על נביטת הזרעים (רעייה: $\chi^2_{21}=9.52, P<0.01$; איור 3א), והשפעה משתנה שלה על שרידות הזרעים. עם זאת,

איור 2

נביטה ושרידות זרעים ביער יתיר בשנים 2015-2020, בעקבות הדילול בשנת 2009

הנביטה ושרידות הזרעים מוצגות ביחס לכמות המשקעים השנתית בשנים 2009-2020 עם מקרא מקביל של הנתונים המטאורולוגיים של יער יתיר. נבטים וזרעים שנספרו בכל חלקה מיוצגים כתרשימי קופסה, עם סימני יהלום המייצגים את הממוצע, על ציר לוגריתמי למחצה. הצבע האפור מציין את נתוני הנבטים החדשים בסוף העונה הגשומה (אפריל), והצבע האדום מציין את נתוני הזרעים השורדים בסוף העונה היבשה הבאה (ספטמבר). תרשימי עונה במרכז האזור מייצגים את האחוז הממוצע של הנבטים החדשים (אפור) והזרעים השורדים (אדום) בכל שנה. המספרים מייצגים את שיעור ההשרדות הממוצע.



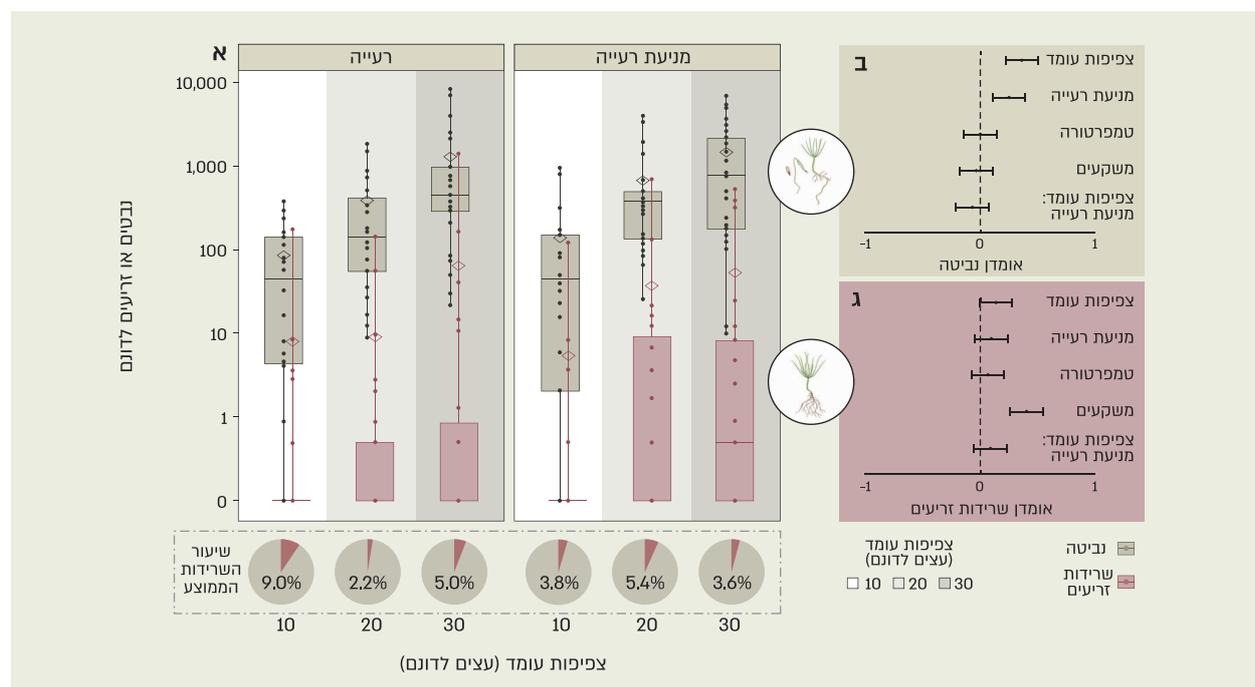
דפוסים ארוכי טווח. נצפתה התפלגות ברורה בכל אחת מצפיפויות העומד, יחד עם השפעה שלילית משמעותית של הרעייה על מספר הזרעים בקטגוריות גובה שונות (רעייה: התפלגות לוגיסטית $\chi^2_{21}=5.39, P<0.05$; התפלגות בינומית שלילית: $\chi^2_{21}=9.88, P<0.01$; אזור 5). נמצאו אינטראקציות מרובות מובהקות בין צפיפות העומד, טיפולי הרעייה וקטגוריות הגובה עבור חלקות ביער יתיר (צפיפות העומד: רעייה: קטגוריות גובה; התפלגות לוגיסטית: $\chi^2_{23}=12.81, P<0.01$; התפלגות בינומית שלילית $\chi^2_{23}=13.75, P<0.01$; אזור 5).

לשם השוואה, בשחריה עמדו מספרי הזרעים על מאות, והזרעים בחלקות בצפיפות הבינונית (20 עצים לדונם) היו גבוהים ומספרם רב יותר (אזור 15). בחלקות בצפיפות נמוכה (10 עצים לדונם) בשחריה היו פחות זרעים, אולם הם היו גבוהים באותה מידה. בחלקות בצפיפות גבוהה של 30 עצים לדונם היו זרעים נמוכים יותר. בטיפולי הרעייה ביער יתיר נמצא כי צפיפות עומד נמוכה תמכה בזרעים הגבוהים. לעומת זאת, הצפיפות הבינונית תמכה באופן יציב ואחיד בגובה הזרעים בכל הקטגוריות, בעוד שהצפיפות הגבוהה הראתה מספרים גבוהים יותר בטווח הנמוך של

שיעור ההישרדות הממוצע לא עלה על 10%, לא בשיעור השרידות הממוצע השנתי (אזור 2), ולא בשיעור השרידות הממוצע של צפיפות העומד וטיפולי הרעייה (אזור 3).

גדילת זרעים רב-שנתית ביערות מקבילים – יער יתיר ושחריה

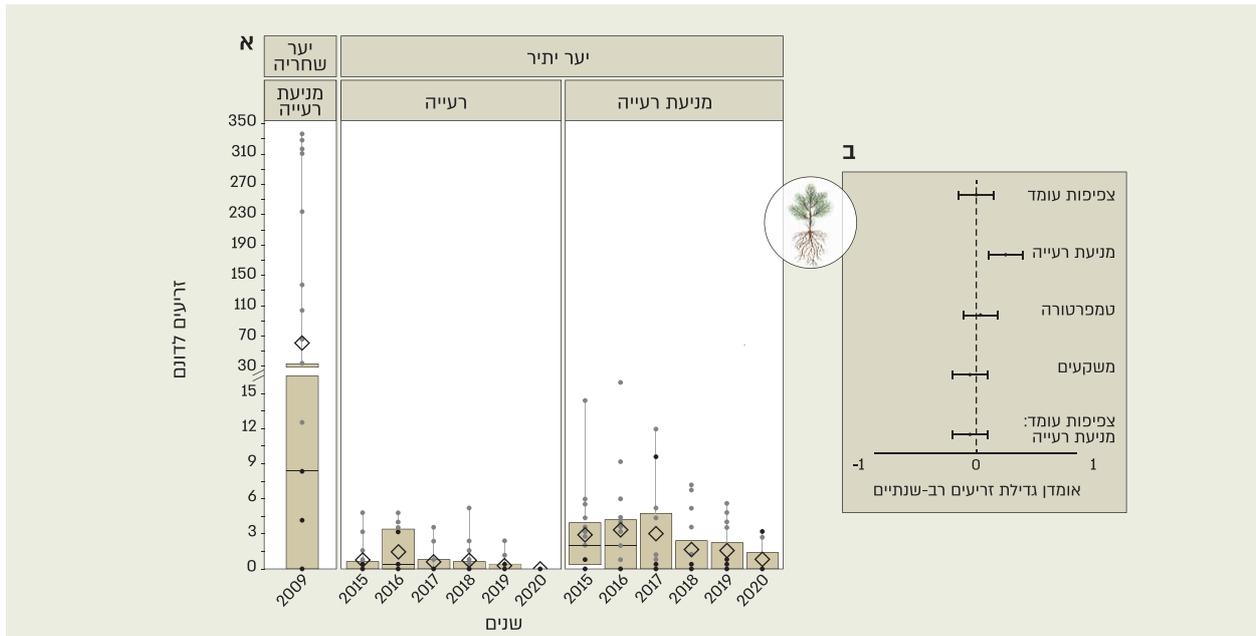
ביער יתיר זרעים ששרדו יותר משני קיצים היו נדירים, לרוב לא יותר מכמה בודדים לדונם. מספרם של זרעים אלה היה נמוך משמעותית בחלקות שהתבצעה בהן רעייה (רעייה: $\chi^2_{21}=33.05, P<0.001$; אזור 4). מספר גבוה של זרעים נספר מ-2015 עד 2017, עם שיא בשנת 2016, ולאחר מכן נצפתה ירידה במספר הזרעים בשנים הבאות. ביער שחריה (רק 40 ק"מ צפונית-מערבית ליתיר, אך עם כמות המשקעים השנתית הגבוהה בכ-80%; ראו שיטות), ממוצע מספר הזרעים שנספרו בשנה אחת (2009) עלה עד ל-50 זרעים לדונם, גבוה בסדר גודל מהמספר ביער יתיר בכל שנה. ביתיר השפעת צפיפות העומד על גדילת הזרעים לא הייתה מובהקת (צפיפות העומד: $\chi^2_{21}=1.06, P=0.3$), בניגוד לשלבים הקודמים של תהליך הגיוס. חלוקת גדילת הזרעים הרב-שנתית לקטגוריות גובה גילתה



איור 3

השפעות רעייה וצפיפות עומד על נביטה ושרידות זרעים ביער יתיר בשנים 2015–2020 (למעט שנת 2017)

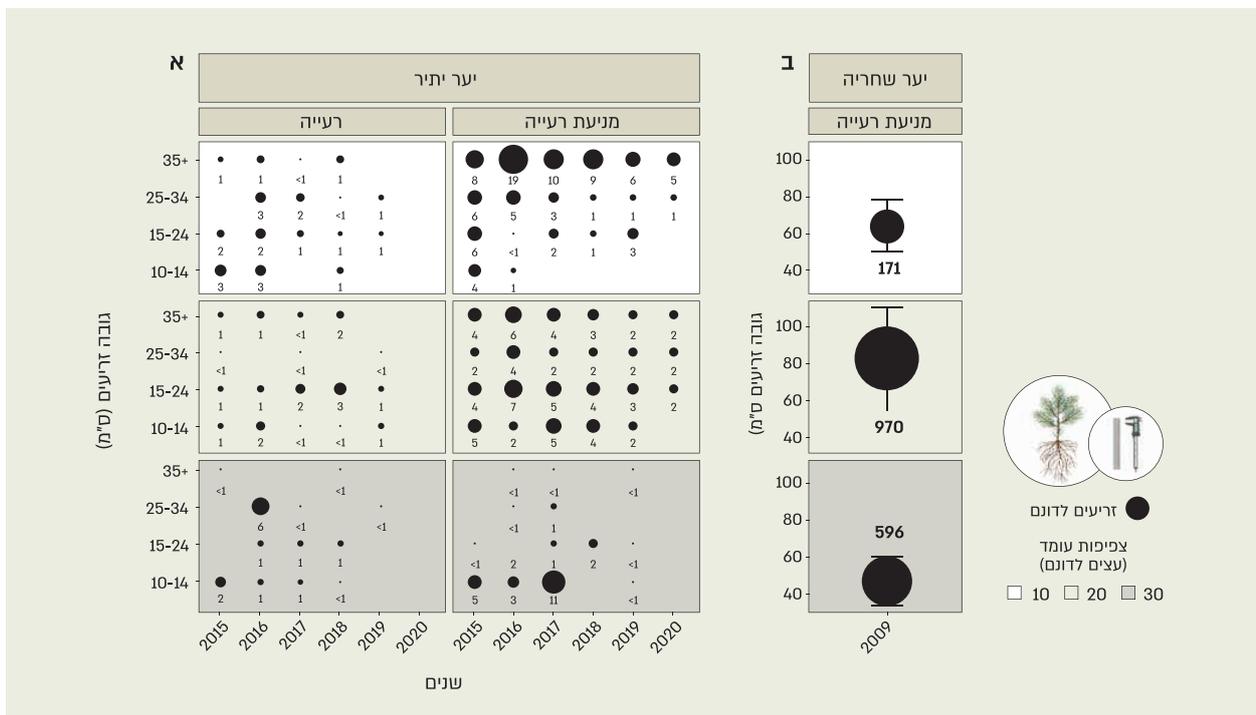
א) נבטים וזרעים שנספרו בכל חלקה מיוצגים כתרשימי קופסה, עם סימני יהלום המייצגים את הממוצע, על ציר לוגריתמי למחצה. הצבע האפור מציין את נתוני הנבטים החדשים בסוף העונה הגשומה (אפריל), והצבע האדום מציין את נתוני הזרעים השורדים בסוף העונה היבשה הבאה (ספטמבר). תרשימי עוגה מייצגים את המספר הממוצע של הנבטים החדשים (אפור) והזרעים השורדים (אדום) בכל צפיפות ובכל טיפולי הרעייה. המספרים מייצגים את שיעור ההישרדות הממוצע. ב) הצגת רווח בר-סמך סטנדרטי של 95% (CI) לאומדן פרמטרים בעלי אפקט קבוע נביטה. ג) הצגת רווח בר-סמך סטנדרטי של 95% (CI) לאומדן פרמטרים בעלי אפקט קבוע בשרידות הזרעים.



איור 4

גדילת זרעים רב-שנתית ביער יתיר בשנים 2015–2020 בטיפול רעייה שונים ובשנת 2009 ביער שחריה בטיפול מניעת רעייה

(א) גדילת זרעים רב-שנתית שנספרו בכל חלקה מיוצגים כתרשימי קופסה, עם סימני יהלום המייצגים את הממוצע. (ב) הצגת רווח בר-סמך סטנדרטי של 95% (CI) לאומדן פרמטרים בעלי אפקט קבוע בגדילת זרעים רב-שנתית.



איור 5

גדילת הזרעים הרב-שנתית בקטגוריות גובה שונות ביער יתיר בשנים 2015–2020 בטיפול רעייה שונים, ובשנת 2009 ביער שחריה בטיפול מניעת רעייה

(א) מספר הזרעים שנספרו בכל צפיפות מיוצג בין קטגוריות גובה כנקודות בגודל משתנה התואם את מספר הזרעים כפי שנספרו בחלקות המחקר ביער יתיר. (ב) הגובה הממוצע של הזרעים שנספרו בכל צפיפות מיוצג כנקודות בגודל משתנה התואמת למספר הכולל של הזרעים שנספרו בכל צפיפות בחלקות המחקר ביער שחריה. שגיאת תקן של הגובה הממוצע מיוצגת בקווי שגיאה.

גורמי העקה מוצג גם כן, ונראה כי צפיפות העומד, בצורת הקיץ ונכחות הרעייה הם הסיכונים העיקריים בשלבי הגיוס (איור 6). באופן כללי, הצמחייה באזורים צחיחים וצחיחים למחצה נפגעת ממחזורי יובש, ומאוחר יותר מלחץ רעייה (Holmgren and Scheffer, 2001). בניגוד למקרים רבים אחרים, פיזור זרעי אורן ירושלים ביתר לא קשור לשרפה, משום שמיעוט צמחיית תת-היער, הרעייה והניהול האינטנסיבי בעיר יתיר גורמים לכך שהוא אינו חשוף לשרפות. לפיכך, היעדר יצירת הדור השני של עצי יער יתיר מעלה שאלה מהותית לגבי יכולת קיומו של יער העומד בקצה תפוצת המין.

לאורך כל תקופת המחקר נצפתה מגמת עלייה בנביטת הזרעים (איור 2), ללא השפעה משמעותית של תנאי האקלים (איור 3). כצפוי, מספר גבוה יותר של עצים לדונם הניב מספר גבוה יותר של נבטים (איור 3), ככל הנראה בעקבות ייצור זרעים גבוה (אסם ושות', 2013). כמו כן, הנביטה הושפעה מהרעייה בכך שחלקות שהייתה בהן רעייה, הראו נביטה נמוכה משמעותית מחלקות ללא רעייה (איור 3). במהלך עונת הנביטה של פברואר עד אפריל, עדרי הצאן (ובמידה פחותה, צבאים ומכרסמים שונים) ניזונים מצמחייה עשבונית ומנבטי האורן שעדיין היו רכים וטעימים לחיך. למרות השפעה זאת, הנביטה הנרחבת האופיינית לאורן ירושלים (Ne'eman et al., 2004), עדיין סיפקה קרקע פורייה כדי לתמוך בשלבי הגיוס הבאים. שרידות הזרעים לא תאמה את העלייה שנצפתה בנביטה

10–14 ס"מ ומספרים שלא מספיקים לגיוס זרעים לכדי החלפת עצים מתים או ותיקים.

כפי שניתן לראות באיור 4, שיא בין-שנתי נצפה בשנים 2015–2017. באיור 5, בקטגוריה של מניעת הרעייה, צפיפות העומד הנמוכה הראתה מספר גבוה יחסית של זרעים בכל הטווחים בשנת 2015, לאחר מכן שיא, בעיקר בקטגורית הגובה של 35+ ס"מ בשנת 2016, ולבסוף ירידה עד 2020. למרות הירידה נשמר מספר ניכר של זרעים גבוהים (25–34, 35+ ס"מ). צפיפות העומד הבינונית (20 עצים לדונם) הראתה גם היא שיא בשנת 2016 ברוב קטגוריות הגובה, ואז ירידה בשנים העוקבות עד 2020. בניגוד לצפיפויות הנמוכה והבינונית, שיא הצפיפות הגבוהה נראה בפיגור בשנה אחת, עם ירידה קיצונית בשנת 2018 שהותירה מספר זניח של זרעים בכל קטגוריות הגובה בשנים העוקבות.

דיון

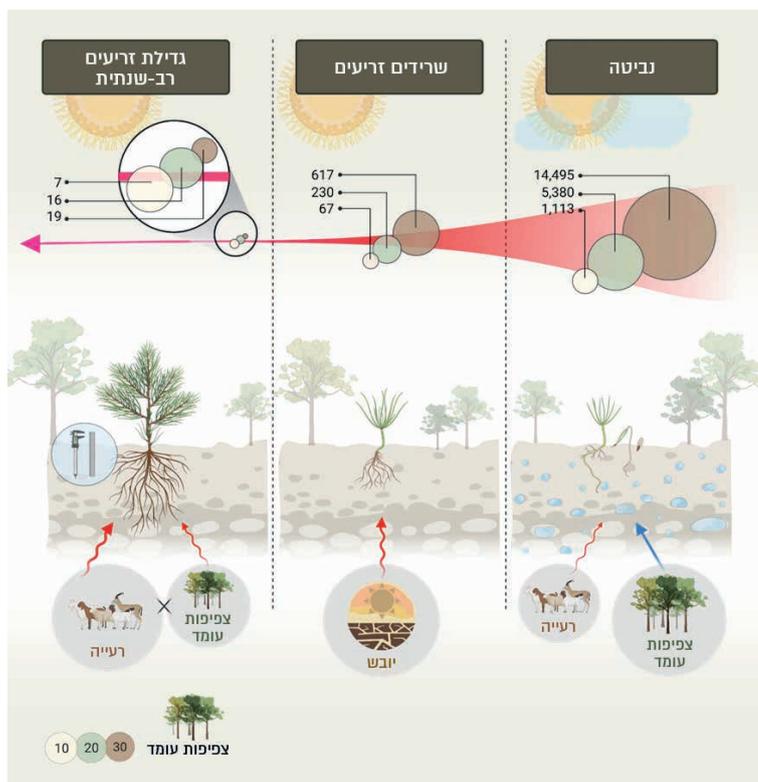
היעדר התחדשות – "הרוצח השקט" של יערות קצה

הצגנו מחקר ראשון מסוגו על עיכוב התחדשות היער בעיר שעיקרו אורן ירושלים באזור אקלים צחיח למחצה בתנאי יובש ורעייה. עיכוב זה מוצג לאורך כל שלבי הגיוס באיור 6, ומציג את המספרים ההולכים והמתמעטים מנביטה רחבה לשרידות נדירה של זרעים, ועד למספרים הנמוכים עוד יותר של זרעים השורדים יותר משנה אחת. תפקידם היחסי של

איור 6

מנגנון הגבלת ההתחדשות בעיר אורנים צחיח למחצה

המספרים מייצגים ממוצעי סכומים שנתיים של כל התצפיות בשנים 2015–2020 (למעט 2017), המציגים את אובדן הזרעים במהלך תהליך הגיוס. גודל העיגול מציין תרומה יחסית של כל גורם; צורת x מציינת אינטראקציה בין שני הפרמטרים, חיצים כחולים ואדומים מציינים השפעות חיוביות ושליליות, בהתאמה. הנביטה גבוהה בעומדים בצפיפות גבוהה, ועדיין משמעותית גם בצפיפות נמוכה, ואילו לרעייה השפעה פחותה. שרידות הזרעים נמוכה מאוד בגלל תנאי יובש קיצוניים בקיץ, עם השפעה פחותה לצפיפות העומד. בניגוד לשני השלבים הקודמים, גדילת הזרעים הרב-שנתית נמוכה יותר ככל שהצפיפות עולה, והשפעת הרעייה מזיקה. האיור נוצר בעזרת BioRender.com.



עבור המפל האקלימי הים תיכוני, השרידות והגדילה הרב-שנתית של הזרעים הושפעו מכמויות המשקעים, אך גם מהאינטראקציה בין גורמי עקה מרובים (Osem et al., 2009). במסגרת מניעת רעייה, הצפיפות הגבוהה (30 עצים לדונם) דיכאה את צבירת הגובה הרב-שנתית של הזרעים. אם חופת היער נפתחת בשל תמותת עץ שכן או דילול מכוון, חדירת אור יכולה לספק תנאים להתפתחות הזרע (Whitmore, 1989), מכיוון שללא קרינה מספקת זרעי האורן לא יוכלו להתפתח (Ne'eman et al., 2004). לכן אנחנו מסיקים כי הזרעים בצפיפות הגבוהה מוגבלים בעקבות ההצללה על ידי העצים הוותיקים. בחלקות המחקר מצאנו שהדינמיקה ארוכת הטווח ביער אינה מספיקה כדי ליצור את פתיחת החופה באופן עצמאי בתנאי הצפיפות הגבוהה (30 זרעים לדונם), ועל כן אין סיכוי לשרידות הזרעים. גובה הזרעים בצפיפות הבינונית (20 לדונם) היו בפיזור אחיד, מה שהדגיש את ההשפעה המתונה והעקבית של צפיפות זו על תהליך הגיוס, כפי שהוצג בשלבים הקודמים. בניגוד לנביטה, צפיפות העומד הנמוכה (10 לדונם) שרמת הקרינה בה היא הגבוהה ביותר, סיפקה את התנאים המועילים ביותר מבחינת גדילת הזרעים הרב-שנתית. ממצא זה תואם למנגנון שהציגו בעבר Tsamir ושות' (2019), שהראו שרמת הקרינה היא גורם מגביל משמעותי גם ביער מואר מאוד כמו יתיר.

מנגנוני תמותה של זרעים

השערתנו הראשונה אושרה: בעוד שנביטת הזרעים הייתה מספקת, צוואר בקבוק משמעותי שנוצר עקב שרידות לא מספקת של זרעים התבטא בהגבלה של גדילת זרעים רב-שנתית, תוך סיכון עתידו של היער כולו. לגבי ההשערה השנייה, אישרנו חלקית שצפיפות עומד מופחתת ומניעת רעייה יכולות לקדם תנאים מאוזנים ובני-קיימא. שלבי גיוס שונים הושפעו באופן שונה מצפיפות העומד, ומניעת הרעייה נמצאה מזיקה רק בחלק מהשלבים. נביטה גבוהה יותר נתמכה בצפיפות עומד גבוהה, בניגוד לגדילת זרעים רב-שנתית טובה יותר שנתמכה בצפיפות נמוכה עד בינונית. לכן, לאורך כל שלבי תהליך הגיוס, באף צפיפות לא הושגו תנאים מיטביים לתהליך התחדשות שמספיק להחליף עצים מתים וותיקים. בהסתכלות על ממצאים אלה, נראה מאוד לא סביר שאפילו לאחר שנים גשומות תפתח אוכלוסיית זרעים שתוכל להחליף עצים מזדקנים, לא במספר ולא בקצב הצמיחה. השערות אלה תומכות בתחזיות הבלתי נמנעות של שינויים בהרכב האוכלוסיות עד הכחדת האוכלוסייה כולה.

מסקנות והשלכות על עתיד יערות הקצה

התחזיות להתחממות כדור הארץ והתגברות אירועי אקלים קיצוניים מעלות תחזיות מדאגות באשר לאוכלוסיית בגבול

לאורך כל תקופת המחקר (איור 2); בעוד שמגמת הנביטה נשמרה גבוהה ואחידה יחסית, ההישרדות ווסתה באופן משמעותי ומהותי על ידי המשקעים השנתיים. אסם ושות' (2013) הראו שנביטת זרעים לא הייתה קשורה לשונות שנתית במשקעים, ושניתן להסבירה על ידי השלבים המוקדמים של הבשלת זרעים ושחרור זרעים, שאינם קשורים ישירות לדפוסים המשקעים לטווח הקצר (נתן ונאמן, 2004). לעומת זאת, שרידות זרעים מייצגת שלב רגיש המושפע מדינמיקת המים השנתית. כמו ביערות ים תיכוניים, שינויים במשקעים ביער יתיר הוצעו בעבר כשולטים בצמיחה, בפעילות ובהישרדות של עצים (Sabaté et al., 2002; Padilla et al., 2007; Osem et al., 2009; Klein et al., 2014; Preisler et al., 2019; Tsamir et al., 2019). כל עוד זרעי האורן קיבלו כמויות משקעים מספיקות, ההישרדות נשמרה הודות למספר הזרעים הרחב שנבט בעונת הנביטה. לדוגמה, שנים עם משקעים שנתיים שגבוהים מהמוצא מראות שיעור שרידות גבוה יחסית, שהגיע לשיא בשנת 2020 עם כמות משקעים שנתית של 394 מ"מ (איור 2). לעומת זאת, השרידות כמעט נכשלה לחלוטין בשנים יבשות, ללא תלות בשיעור הנביטה הנרחב, כפי שהוצג בשנים 2018–2019. מגבלת המים הזו מסמנת את תופעת צוואר הבקבוק בתהליך התחדשות היער, אף על פי שאורן ירושלים הוא מין חלוץ ולמרות העמידות ליובש המאפיינת אותו (Oppenheimer, 1967; Ne'eman and Trabaud, 2000).

מעניין לציין כי השפעות רעייה לא זהו בשלב שרידות הזרעים (איור 3). הדבר יכול להצביע על יתרונות פוטנציאליים למשטרי רעייה אך גם למניעתם. בעלי החיים ניזונים מזרעי האורן, אך במקביל גם ממתחריהם העשבונים (Richardson et al., 2007). לכן, הסרת התחרות מצד העשבונים יכולה למעשה לקדם את שרידותם של הזרעים הצעירים. עם זאת, יש צורך במחקר נוסף כדי להוכיח השערה זו.

גדילת הזרעים הרב-שנתית, שלב הגיוס הסופי, עוכבה באופן מובהק על ידי הרעייה (איור 4). דפוס גדילה משמעותי, שהגיע לשיא ב-2016, נבדל בסדר גודל בין חלקות שהייתה בהן רעייה ובין אלה שהיא נמנעה בהן. מספר התחלתי נמוך של זרעים, שנקבע על ידי צוואר הבקבוק שהוזכר לעיל, הפך למספר זניח בעקבות הרעייה. נוסף על כך, הוכח בעבר שבעלי החיים משנים את תזונתם בתקופות יבשות לרעייה למינים מעוצים הדומים לזרעים (Roever et al., 2015), דבר שעשוי להוביל להתדרדרות של גדילתם.

ההשפעה הפוטנציאלית של רעייה על שרידות הזרעים על ידי הפחתת התחרות הפכה מאוחר יותר למניעה ארוכת טווח של הגידול הרב-שנתי. כפי שנטען בעבר

Osem et al., 2009; Osem et al.) המחקר הנוכחי וקודמיו (al., 2013) הראו שגיוס זרעים ביערות דומים, אך גשומים יותר, היה מספיק כדי להבטיח את התחדשותו וקיימותו של היער. מצד שני, הגורמים הביולוגיים והאביוטיים שעיכבו את התחדשות היער ביתר (איור 6) רלוונטיים ליערות רבים, ובייחוד למינים הנמצאים בקצה תפוצתם (Osem et al., 2009; Allen et al., 2010; McDowell et al., 2020).

תודות

הכותבים מודים לקק"ל על התמיכה המתמשכת בניסוי הדילול והרעייה. תודות מיוחדות למנהל האזור בעבר איציק משה וליערן עבד אבו-אלקיען. חלקות המחקר ביער יתיר הן חלק מרשת ה-LTER, ניטור אקולוגי ארוך טווח. תודות גם לויקטור לוקיאנוב על העזרה בביצוע המדידות בשטח.

התפוצה של אורן ירושלים באתר צחיח למחצה זה, כמו גם באתרים אחרים (Volts et al., 2018; Patsiou et al., 2020; IPCC, 2021). מגמת הגיוס הרב-שנתית שנצפתה כאן מאופיינת בשיעור השרידות השנתי, שלפיו פרטים חדשים מגויסים הלאה לשלבים הבאים ונכנסים למאגר הזרעים, או שאינם שורדים והמאגר מצטמצם (איור 5). אם התנאים בבית הגידול מאפשרים, הזרעים יעברו בין קטגוריות הגובה השונות. המגמה האקלימית בת שלושים השנים של יתיר מציגה בדרך כלל בצורת כל 2–3 שנים בממוצע. כאן זיהינו את הפגיעות של אוכלוסייה זו ליובש, תוך הדגשת המשמעות של מהירות שינוי האקלים ואי-היכולת של אוכלוסיית קצה זו לעמוד בה (Williams et al., 2008; Loarie et al., 2009; Lindner et al., 2010). אינן תומכות בקיומו העתידי של יער יתיר, גם ללא אירוע תמותה פתאומי של עצים, כפי שנראה בעבר (פרייזלר ושות', 2019). האם מחקר זה רלוונטי רק למקרה הייחודי של יער יתיר או שניתן להכליל ממנו גם ליערות אחרים?

מקורות

- Eriksson O and Ehrlén J. 2008. Seedling recruitment and population ecology. *Seedling Ecology and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press. pp 239–254.
- Gallucci M. 2021. gamlj: GAMLj Suite for linear models. R package version 2.4.8.
- Gao J and Carmel Y. 2020. Can the intermediate disturbance hypothesis explain grazing–diversity relations at a global scale? *Oikos*, 129(4), 493–502.
- Hoffmann AA and Sgrò CM. 2011. Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*, 470(7335), 479–485.
- Holmgren M and Scheffer M. 2001. El Niño as a window of opportunity for the restoration of degraded arid ecosystems. *Ecosystems*, 4(2), 151–159.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, et al. (Eds)]. Cambridge University Press.
- Keeble BR. 1988. The Brundtland report: 'Our common future'. *Medicine and War*, 4(1), 17–25.
- Klein T and Hartmann H. 2018. Climate change drives tree mortality. *Science*, 362(6416), 758.
- Klein T, Rotenberg E, Cohen-Hilaleh E, Raz-Yaseef N, Tatarinov F, Preisler Y, and Yakir D. 2014. Quantifying transpirable soil water and its relations to tree water use dynamics in a water-limited pine forest. *Ecohydrology*, 7(2), 409–419.
- Kolb TE, Flathers K, Bradford JB, Andrews C, Asherin LA, and Moser WK. 2020. Stand density, drought, and herbivory constrain ponderosa pine regeneration pulse. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(9), 862–871.
- Lindner M, Maroschek M, Netherer S, Kremer A, Barbati A, Garcia-Gonzalo J, and Marchetti M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709.
- השירות המטאורולוגי הישראלי. 2022. אטלס אקלימי, מהשנים 1981–2020. <https://ims.gov.il/he/ClimateAtlas>
- ויזל י. (עורך). 1984. **הצומח של ארץ ישראל**. בתוך: ע. אלון (עורך). **כרך 8 של האנציקלופדיה החי והצומח של ארץ ישראל**. הוצאת משרד הביטחון והחברה להגנת הטבע. תל אביב.
- Alberto FJ, Aitken SN, Alia R, González-Martínez SC, Hänninen H, Kremer A, et al. 2013. Potential for evolutionary responses to climate change – evidence from tree populations. *Global Change Biology*, 19(6), 1645–1661.
- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, and Cobb N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684.
- Amir S and Rechtman O. 2006. The development of forest policy in Israel in the 20th century: implications for the future. *Forest Policy and Economics*, 8(1), 35–51.
- Anderegg WR, Hicke JA, Fisher RA, Allen CD, Aukema J, Bentz B, and Zeppel M. 2015. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, 208(3), 674–683.
- Bell DM, Bradford JB, and Lauenroth WK. 2014. Early indicators of change: divergent climate envelopes between tree life stages imply range shifts in the western united states. *Global Ecology and Biogeography*, 23(2), 168–180.
- Bonari G, Fernandez-Gonzalez F, Çoban S, Monteiro-Henriques T, Bergmeier E, Didukh YP, and Chytrý M. 2021. Classification of the Mediterranean lowland to submontane pine forest vegetation. *Applied Vegetation Science*, 24(1), e12544.
- Chauchard S, Carcaillet C, and Guibal F. 2007. Patterns of land-use abandonment control tree-recruitment and forest dynamics in Mediterranean mountains. *Ecosystems*, 10(6), 936–948.
- Connor SE, Araújo J, Boski T, Gomes A, Gomes SD, Leira M, and Vannière B. 2021. Drought, fire and grazing precursors to large-scale pine forest decline. *Diversity and Distributions*, 27(7), 1138–1151.

- R Core Team 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>.
- Richardson DM, Rundel PW, Jackson ST, Teskey RO, Aronson J, Bytnerowicz A, and Procheş S. 2007. Human impacts in pine forests: past, present, and future. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 38, 275–297.
- Roever CL, DelCurto T, Rowland M, Vavra M, and Wisdom M. 2015. Cattle grazing in semiarid forestlands: Habitat selection during periods of drought. *Journal of Animal Science*, 93(6), 3212–3225.
- Rotenberg E and Yakir D. 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science*, 327(5964), 451–454.
- RStudio Team 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Sabaté S, Gracia CA, and Sánchez A. 2002. Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest Ecology and Management*, 162(1), 23–37.
- Schiller G. 2011. The Case of Yatir Forest. Bredemeier M, Cohen S, Godbold DL, Lod E, Pichler V, and Schleppi P (Eds). 2010. *Forest Management and the Water Cycle: An Ecosystem-Based Approach* (Vol. 212). Springer Science and Business Media.
- Schiller G and Atzmon N. 2009. Performance of Aleppo pine (*Pinus halepensis*) provenances grown at the edge of the Negev desert: A review. *Journal of Arid Environments*, 73(12), 1051–1057.
- Seidl R, Thom D, Kautz M, Martin-Benito D, Peltoniemi M, Vacchiano G, and Reyer CP. 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395–402.
- Simonin K, Kolb TE, Montes-Helu M, and Koch GW. 2007. The influence of thinning on components of stand water balance in a ponderosa pine forest stand during and after extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3–4), 266–276.
- Sohn JA, Saha S, and Bauhus J. 2016. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 380, 261–273.
- Spinoni J, Vogt JV, Naumann G, Barbosa P, and Dosio A. 2018. Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology*, 38(4), 1718–1736.
- The jamovi project 2021. jamovi (Version 1.6) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.
- Tsamir M, Gottlieb S, Preisler Y, Rotenberg E, Tatarinov F, Yakir D, and Klein T. 2019. Stand density effects on carbon and water fluxes in a semi-arid forest, from leaf to stand-scale. *Forest Ecology and Management*, 453, 117573.
- UNESCO 1963. Bioclimatic Map of the Mediterranean Zone: Ecological Study of the Mediterranean Zone, Explanatory Notes. Unesco-Fao.
- Vesala T, Suni T, Rannik Ü, Keronen P, Markkanen T, Sevanto S, and Hari P. 2005. Effect of thinning on surface fluxes in a boreal forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(2).x
- Vogel JC, Fuhs A, and Danin A. 1986. Geographical and environmental distribution of C3 and C4 grasses in the Sinai, Negev, and Judean deserts. *Oecologia*, 70(2), 258–265.
- Voltas J, Shestakova TA, Patsiou T, Di Matteo G, and Klein T. 2018. Ecotypic variation and stability in growth performance of the thermophilic conifer *Pinus halepensis* across the Mediterranean basin. *Forest Ecology and Management*, 424, 205–215.
- Williams SE, Shoo LP, Isaac JL, Hoffmann A, and Langham G. 2008. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS Biology*, 6(12), e325.
- Loarie SR, Duffy PB, Hamilton H, Asner GP, Field CB, and Ackerly DD. 2009. The velocity of climate change. *Nature*, 462(7276), 1052–1055.
- Mast JN, and Veblen TT. 1999. Tree spatial patterns and stand development along the pine-grassland ecotone in the Colorado Front Range. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(5), 575–584.
- Matías L, Castro J, Villar-Salvador P, Quero JL, and Jump AS. 2017. Differential impact of hotter drought on seedling performance of five ecologically distinct pine species. *Plant Ecology*, 218(2), 201–212.
- Mauri A, Di Leo M, De Rigo D, and Caudullo G. 2016. *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz J, de Rigo D, Caudullo G, Houston Durrant T, Mauri A (Eds). *European Atlas of Forest Tree Species*. 122–123.
- McDowell NG, Allen CD, Anderson-Teixeira K, Aukema BH, Bond-Lamberty B, Chini L, and Xu C. 2020. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, 368(6494), eaaz9463.
- Moreno-Gutierrez C, Barbera GG, Nicolas E, De Luis M, Castillo VM, Martinez-Fernandez F, and Querejeta JL. 2011. Leaf $\delta^{18}O$ of remaining trees is affected by thinning intensity in a semiarid pine forest. *Plant, Cell and Environment*, 34(6), 1009–1019.
- Ne'eman G and Trabaud L. 2000. *Ecology, Biogeography and Management of Pinus halepensis and P. brutia Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Backhuys Publishers.
- Ne'eman G, Goubitz S, and Nathan R. 2004. Reproductive traits of *Pinus halepensis* in the light of fire – a critical review. *Plant Ecology*, 171(1), 69–79.
- Oliver CD and Larson BC. 1996. *Forest Stand Dynamics*. Updated edition. John Wiley & sons.
- Öllerer K, Varga A, Kirby K, Demeter L, Biró M, Bölöni J, and Molnár Z. 2019. Beyond the obvious impact of domestic livestock grazing on temperate forest vegetation – A global review. *Biological Conservation*, 237, 209–219.
- Oppenheimer HR. 1967. *Mechanisms of drought resistance in conifers of the Mediterranean zone and the arid west of the USA*. Hebrew University of Jerusalem.
- Osem Y, Zangy E, Bney-Moshe E, Moshe Y, Karni N, and Nisan Y. 2009. The potential of transforming simple structured pine plantations into mixed Mediterranean forests through natural regeneration along a rainfall gradient. *Forest Ecology and Management*, 259(1), 14–23.
- Osem Y, Yavlovich H, Zecharia N, Atzmon N, Moshe Y, and Schiller G. 2013. Fire-free natural regeneration in water limited *Pinus halepensis* forests: A silvicultural approach. *European Journal of Forest Research*, 132(5), 679–690.
- Padilla FM and Pugnaire FI. 2007. Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival during drought. *Functional Ecology*, 21(3), 489–495.
- Patsiou TS, Shestakova TA, Klein T, Di Matteo G, Sbay H, Chambel MR, and Voltas J. 2020. Intraspecific responses to climate reveal nonintuitive warming impacts on a widespread thermophilic conifer. *New Phytologist*, 228(2), 525–540.
- Petit RJ, Hu FS, and Dick CW. 2008. Forests of the past: a window to future changes. *Science*, 320(5882), 1450–1452.
- Preisler Y, Tatarinov F, Grünzweig JM, Bert D, Ogée J, Wingate L, and Yakir D. 2019. Mortality versus survival in drought-affected Aleppo pine forest depends on the extent of rock cover and soil stoniness. *Functional Ecology*, 33(5), 901–912.
- Qubaja R, Amer M, Tatarinov F, Rotenberg E, Preisler Y, Sprintsin M, and Yakir D. 2020. Partitioning evapotranspiration and its long-term evolution in a dry pine forest using measurement-based estimates of soil evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281, 107831.

הזיקה בין הישרדות של עצי אורן ברוסיה לבין תבנית גדילת רוחב רב-שנתית

רותם אטיאס^{2,1} | עומר גולן³ | אסף אלון^{2,1} | ליאור רגב⁴ | אליזבטה בוארטו⁴
 שי צמרי¹ | צבי מנדל⁵ | רקפת דוד-שורץ^{1*}

- 1 המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי-מרכז וולקני
 - 2 הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות
 - 3 אגף הייעור, קק"ל
 - 4 היחידה לארכאולוגיה מדעית, מכון ויצמן למדע
 - 5 המכון להגנת הצומח, מנהל המחקר החקלאי-מרכז וולקני
- * rakefetd@agri.gov.il

תקציר

מרמזת על שונות גנטית בין העצים ביכולת הצימוח לרוחב. ממצאי המחקר מעידים כי ישנם שלושה משתנים שבכוחם לזהות ואף לחזות היחלשות במצבם הפיזיולוגי של עצי אורן ברוסיה: (א) צימוח רוחב מועט וקבוע לאורך שנים; (ב) צימוח שנוטר ירוד בעקבות תקופת בצורת; (ג) ירידה בצפיפות ובגודל של ביבי השרף. קיים חשש שקצב התמותה, המתון כיום, בעומדי אורן ברוסיה בישראל יואץ עם ההחמרה בתנאי היובש הצפויים בעשורים הבאים. אי לכך, יש לפעול כדי לאתר את טיפוסי העצים עם מדדי הצימוח המתאימים ביותר שיהוו תשתית לדור הבא של עומדי אורן ברוסיה בישראל.

שינוי האקלים בעשרות השנים האחרונות מתאפיין בעליית הטמפרטורות ובפחיתה בכמות המשקעים השנתית באזורים שונים בעולם. לשינויים אלה השפעה ניכרת על צימוח ושרידות עצי יער באזורים הים תיכוניים עד כדי תמותת עצים נרחבת, המתרחשת בשנים האחרונות גם ביערות הנטועים בישראל. בתמותת עצי אורן מעורבת פעילות של חיפושיות קליפה. לא ברור אם ועד כמה משפיעה עקת המים על רגישות העץ לאכלוס קטלני על ידי חיפושיות הקליפה. במחקר הנוכחי בחנו אם מדדי צימוח הרוחב בגזע מהווים סימן לתמותה בעקבות התקפת חיפושיות. התרחבות הגזע נובעת בעיקרה מיצירת טבעת שנתית הכוללת עצה אביבית ועצה קייצית, וכן מביבי שרף, שיש להם תפקיד חיוני בהגנה מפני חיפושיות קליפה. במחקר הנוכחי נערכה השוואה בין עצי אורן ברוסיה חיים לעצים שלא שרדו, בשני עומדים בשפלת יהודה. הנתונים של מדד התחרות, רוחב הטבעות השנתיות והצפיפות והממדים של ביבי השרף נאספו ונתחו. נמצא שגדילת הרוחב אינה אחידה באוכלוסייה, ובשנים שלפני התמותה מדדי הצימוח של העצים המתים היו נמוכים ביחס לעצים ששרדו. שונות בגדילת הרוחב בשתי חלקות בלתי תלויות

מילות מפתח

ביבי שרף, חיפושיות קליפה, טבעת שנתית, תמותת עצים

סקירת ספרות

אם מין זה ישרוד בישראל לנוכח שינוי האקלים שצפוי להחמיר בעשורים הקרובים. תהיות אלה היוו תמריץ לבחון את המאפיינים של הישרדות והתמותה של עצי אורן ברוטיה ותיקים בישראל. במאמר זה אנו מציגים תוצאות מחקר שנבחן בו הקשר בין גדילת הרוחב הרב-שנתית של עצי אורן ברוטיה להישרדותם.

גדילת הרוחב של עצים משקפת את מצבו של העץ. דנדרוכרונולוגיה, כלומר גילאות העץ, היא שיטת תארוך המבוססת על השונות בטבעות השנתיות בגזע. טבעת שנתית בהיקף הגזע מתחילה בהיווצרות תאי עצה גדולים ובהירים (עצה אביבית, early wood) עם העלייה בזמינות המים בתחילת עונת הצימוח, ומסיימת את צמיחתה בשכבת תאים קטנים וכהים (עצה קיציית, late wood) בשל ירידה בזמינות המים ועליית הטמפרטורה (איור 1). עצי אורן יוצרים מדי שנה טבעת אחת, למעט מקרים חריגים שנוצרות בהם שתי טבעות או לא נוצרת טבעת כלל, כתלות בזמינות המים והטמפרטורה (Fritts, 2012). רוחב הטבעות מושפע בעיקר מכמות המשקעים, אך גם מגורמים מגבילים אחרים, כגון פגיעה של מזיקים בעלווה או תחרות עם עצים אחרים בבית הגידול. ניתן לכמת את מידת התחרות שעץ מסוים מצוי בה על ידי השוואת קוטר הגזע עם הקוטר של כל העצים הסמוכים לו, תוך התייחסות למרחק של העצים השכנים מעץ המטרה (Canham et al., 2006). שינויים בצמיחת הרוחב של העץ מאפשרים הערכה ותארוך של מצבי עקה במהלך חי העץ והערכה של חיוניותו (Ogle et al., 2000; Bigler and Bugmann, 2003; Fonti et al., 2010). ההבדלים בתגובה למצבי העקה עשויים להסביר תמותה לעומת הישרדות של עצים באותה האוכלוסייה (Cailleret et al., 2017; DeSoto et al., 2020).

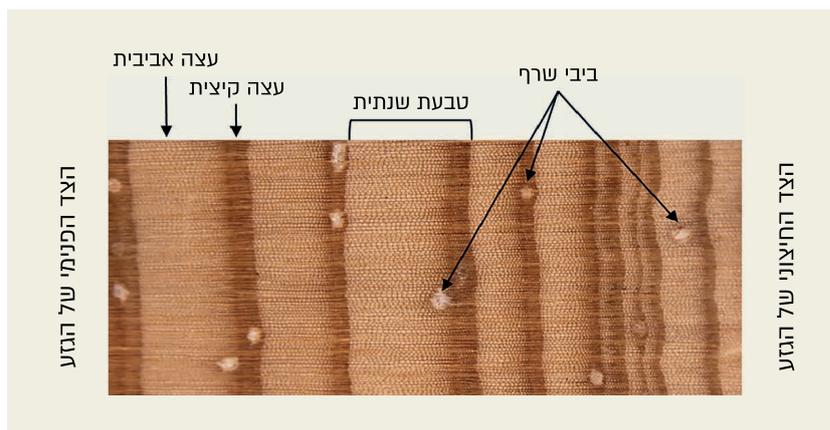
ביבי שרף או תעלות שרף (resin ducts) הם חללים בין-תאיים מוארכים בצורת צינור, המוקפים תאי אפיתל שמפרישים שרף לתוך התעלה. הם נמצאים ברקמות המחטים, בענפים, ובגזע של עצי אורן. צמיחת הרוחב של הגזע כרוכה ביצירתם של ביבי שרף (Werker and Fahn, 1969). השרף מכיל מונוטרפנים ממשפחת ה-oleoresin, הידועים במעורבותם בהגנה על העץ מפני חיפושיות קליפה והפטריית המתלוות אליהן (Lewinsohn et al., 1993; Hall et al., 2013). ביבי השרף פעילים רק בטבעות שנוצרו בשנים האחרונות, וצפיפותם בעצה מושפעת מתנאי בית הגידול (זמסקי, 1970; Reid and Watson, 1966). באורן ירושלים ובאורן ברוטיה מופיעים הביבים רק בעצה המאוחרת של הטבעת השנתית (איור 1). במחקרים שנעשו לאחרונה במדינת קולורדו שבארצות הברית, נמצא כי צפיפות ביבי השרף וגודלם משפיעים במידה רבה על עמידות האורנים *Pinus contorta* ו-*Pinus flexilis* להתקפת חיפושיות קליפה (Ferrenberg et al., 2014). בבחינה של השפעת עקת יובש

תמותת עצי יער היא תופעה נרחבת על רקע שינוי האקלים בכל רחבי העולם (Anderegg et al., 2015). בשל מיקומו הגאוגרפי היער בישראל מושפע במידה רבה מעליית הטמפרטורות ומהירידה בכמות המשקעים האופייניים כיום למזרח הים התיכון (Giorgi and Lionello, 2008). מחקרים שעסקו בתמותת עצי יער בעשור האחרון מצביעים על קשר בין תמותת עצי יער לבין רגישות לבצורת ולטמפרטורות גבוהות (Phillips et al., 2010; Allen et al., 2015; Duke et al., 2017). עם זאת, קיים קושי בבידוד של גורם הבצורת מבין כלל הגורמים העלולים להוביל לתמותת עצים (Seidl et al., 2017). עקת מים ארוכת טווח גורמת להיחלשות העץ עקב כשל הידראולי ולפחיתה במאגרי הפחמן, בעיקר בעצי מחט (McDowell, 2011; Adams et al., 2017). מרבית המקרים שנבחנו מצביעים על כך שתמותת עצי אורן שמוחסת לכשל הידראולי בשל עקת יובש, מקושרת לתקיפה של חיפושיות קליפה (Allen et al., 2010; Anderegg et al., 2015).

אורן ברוטיה (*Pinus brutia* ssp. *brutia* Ten.) גדל באופן טבעי במזרח הים התיכון, בעיקר בטורקיה ובמזרח יוון (Ne'eman et al., 2000; Chambel et al., 2013). הוא אינו גדל באופן טבעי בישראל, אך נכלל בתוכניות הייעור של קק"ל מאז שנות ה-50 של המאה הקודמת. בעקבות הנזקים שגרמה כנימת המצוקוקוס (*Matsucoccus josephi*) ליערות אורן ירושלים (*Pinus halepensis* Miller) בשנות ה-70 של המאה ה-20, הוגברה נטיעת אורן ברוטיה שנחשב עמיד יחסית למצוקוקוס. כיום עומדי ברוטיה מהווים כ-15% מכלל היער הנטוע בישראל (שילר, 2013; Mendel, 1998; Osem et al., 2008; Mendel et al., 2016). עמידותו של אורן ברוטיה לכנימת המצוקוקוס הייתה יתרון ברור על אורן ירושלים, שהיה ועודנו מין שדרה של היער הנטוע בישראל. החיסרון של אורן ברוטיה הוא עמידותו הפחותה ליובש בהשוואה לאורן ירושלים, שהסתגל לתנאים היובשניים למחצה באזור (שילר, 2013; Oppenheimer, 1967; Klein et al., 2013). אורן ירושלים מגיע לגדילה מיטבית בממוצע משקעים שנתי של 400 מ"מ (שילר וחר, 2015), בעוד אורן ברוטיה זקוק לכ-600 מ"מ משקעים שנתיים להשגת גדילה מיטבית (Sarris et al., 2007). בחלק מבתי הגידול המיוערים על ידי אורן ברוטיה בישראל כמות המשקעים קטנה מהדרוש לגדילה מיטבית (שילר, 2013), ולכן עומדים אלה עשויים לחוות עקת מים רב-שנתית. כלומר, החלפה נרחבת של אורן ירושלים באורן ברוטיה כרוכה באתגר של הבטחת מקורות זרעים המצטיינים בעמידות ליובש. רוב מקורות הזרעים של אורן ברוטיה בישראל הם מטורקיה, ומידת ההתאמה שלהם לתנאי האקלים בישראל איננה ברורה. יתרה מזו, לא ברור

איור 1

תמונה של מקטע עצה של אורן ברוטיה
 טבעת שנתית מתחילה בעצה אביבית ומסתיימת בעצה קיציית. רוחב הטבעת מעיד על הכמות היחסית של המשקעים השנתיים. טבעת רחבה מעידה על שנה עם משקעים מרובים, בעוד שטבעת צרה היא עדות לשנה שחונה. ביבי השרף מופיעים כעיגולים בעצה הקיציית בטבעת השנתית.



מ"מ הכוללת שני סטים (משני הצדדים) של כל הטבעות השנתיות באמצעות מקדח (תוצרת Mora®, Dalarna County, Sweden) קדוחה זו נלקחה בגובה 1.3 מטר מבסיס הגזע, בעוד שמהעצים המתים נלקחה פרוסת גזע בגובה 1.3 מטר במקום קדח. הקדוחות והפרוסות שויפו ונבחנו באמצעות מכשיר למדידת רוחב טבעות מסוג LinTab™ 6 (תוצרת Rinntech®, Heidelberg, Germany, Baush and Lomb®) שאליו מחובר מיקרוסקופ בינוקולר (Quebec, Canada). רוחב הטבעות השנתיות נמדד בדיוק של 0.01 מ"מ באמצעות תוכנות לניתוח טבעות עצים: TSAP-Win™ (Rinntech®, Heidelberg, Germany) ו-Tellervo (Brewer, 2014). הנתונים שימשו לקביעת מהלך ההתפתחות של כל עץ בנפרד על בסיס כרונולוגיית האוכלוסייה הממוצעת וציון סטטיסטי (t-score) המחושב על ידי התוכנות. רוחב טבעת העץ השנתית (Ring Width) חושב ממוצע שני הכיוונים של הקדוחה / הפרוסה. הנתונים הומרו לקבלת תוספת הגדילה השנתית (Basal Area Increment, BAI) על פי הנוסחה:

$$BAI_n = \pi r_n^2 - \pi r_{n-1}^2$$

כאשר n הוא מספר הטבעות השנתיות בעץ, ו- r_n הוא הרדיוס בגובה החזה של הגזע מהמרכז ועד לסיום אותה פרוסה שנתית (Bachar et al., 2020).

ניתוח ביבי השרף

הקדוחות והפרוסות צולמו בסטריאומיקרוסקופ NIKON smz25 (NIKON®, Tokyo, Japan) ונותחו באמצעות תוכנת ImageJ (ImageJ java 1.8.0_112 (bit 64)). נתוני ביבי השרף נמדדו עבור עשר השנים האחרונות בכל עץ. השטח של כל ביבי שרף חושב בכל שטח דגימה עבור כל טבעת שנתית, ואחוז שטח ביבי השרף חושב מסך שטח הדגימה. שטח הדגימה הוא אורך הטבעת באותה שנה כפול 5 מ"מ רוחב (רוחב הקדוחה). כמו כן, נמדדה צפיפות הביבים (מספר

בארה"ב על אכלוס בחיפושיות קליפה ב-*Pinus edulis* (בניו מקסיקו) ו-*Pinus ponderosa* (באריזונה), נמצא כי בעצים שמתו בשל התקפת חיפושיות הייתה צפיפות נמוכה של ביבי שרף בשלוש טבעות העץ החיצוניות ביותר, והביבים גם היו קטנים בהשוואה לביבים בעצים שהמשיכו לגדול. לעומת זאת, לא נמצא קשר בין כמות השרף לעמידות לחיפושיות קליפה (Kane and Kolb, 2010; Gaylord et al., 2013). ראוי לציין כי הבדלים בתכונות ביבי השרף נמצאו קשורים להבדלים גנטיים (Moreira et al., 2015). במחקר המדווח כאן, בחנו אם גדילת הרוחב בעצי אורן ברוטיה בשנים שקדמו לתמותה היא משתנה המשפיע על הישרדות העץ. במאמר המשך נתייחס לשאלה הנוגעת למעורבותן של חיפושיות הקליפה המקומיות בתמותת עצי אורן ברוטיה בהקשר זה.

שיטות וחומרים

חלקות המחקר ובחירת העצים

לצורך המחקר נבחרו שני עומדים נטועים של אורן ברוטיה בשפלת יהודה – בהרטוב ובצרעה, ונתונייהם מובאים בטבלה 1. נתוני האקלים באזור המחקר סופקו על ידי השירות המטאורולוגי הישראלי ונלקחו מהתחנה המטאורולוגית בבית ג'מאל (טבלה 1, איור 2). העצים שנדגמו נבחרו באופן אקראי, והמרחק בין עץ לעץ היה 20–30 מטר. בהרטוב נדגמו 22 עצים מתים ו-30 עצים חיים. בצרעה נדגמו 27 עצים מתים ו-29 עצים חיים. בסך הכול, נבדקו 108 עצים. כל העצים המתים היו מאוכלסים בחיפושיות קליפה. סביב כל עץ דגימה סומנו ונמדדו כל העצים השכנים לו, וחושב מדד התחרות NCI (Neighborhood Competition Index) לפי Canham ושות' (2006).

ניתוח גדילת רוחב הגזע

מכל אחד מעצי הדגימה החיים הוצאה קדוחה בקוטר 5

הגבוהה ביותר הייתה 1,028 מ"מ בשנת 1992, ואילו הנמוכה ביותר, 206 מ"מ, נרשמה בשנת 1999. טמפרטורות החורף הממוצעות הנמוכות ביותר (MIWT) והמרביות (MAWT) שנמדדו בינואר היו 8.9°C ו-16.8°C, בהתאמה. טמפרטורות הקיץ הממוצעות הנמוכות ביותר (MIST) והמרביות (MAST) בחודשים החמים ביותר (יולי-אוגוסט) היו 20.8°C ו-32.5°C, בהתאמה (טבלה 1, איור 2). בניתוח מתאם זוגי (pairwise correlation analysis) נמצא מתאם שלילי נמוך אך מובהק בין כמות המשקעים השנתית לבין טמפרטורות חורף MIWT ו-MAWT. לא נמצא קשר בין טמפרטורות קיץ (MIST ו-MAST) לבין כמות המשקעים השנתית (טבלה 1).

מדדי צימוח

לא נמצא הבדל משמעותי בערכי תוספת הגדילה השנתית (BAI), גובה העץ, ומדד התחרות בין העצים המתים לבין העצים החיים בשני עומדי המחקר (טבלה 2). נוסף על כך, לא נמצא קשר בין מדד התחרות לרוחב העץ, או בין מדד התחרות לגובה העצים (מתים או חיים) בשני העומדים, למעט מתאם שלילי חלש בין העצים המתים לבין מדד התחרות בעומד הרטוב ($r = -0.39, p < 0.03$, טבלה 2).

בימים לממ"ר לשנה) עבור הטבעות השנתיות ב-2010–2020 בהנחה שזו התקופה שביבי השרף פעילים בה כפי שדווח קודם (Ferrenberg et al., 2014).

ניתוח סטטיסטי

תוצאות מחקר זה נותחו באמצעות תוכנת SAS JMP 14 (Institute, Inc., Cary, North Carolina). ההבדלים ב-BAI ובמדדי ביבי השרף לאורך השנים בין העצים החיים למתים הוערכו באמצעות ניתוח שונות חד-כיוונית (ANOVA) ואחריו מבחן Tukey's Honestly Significant Difference. השוואה בין קבוצות נערכה באמצעות מבחן one-tailed student's t-test.

תוצאות

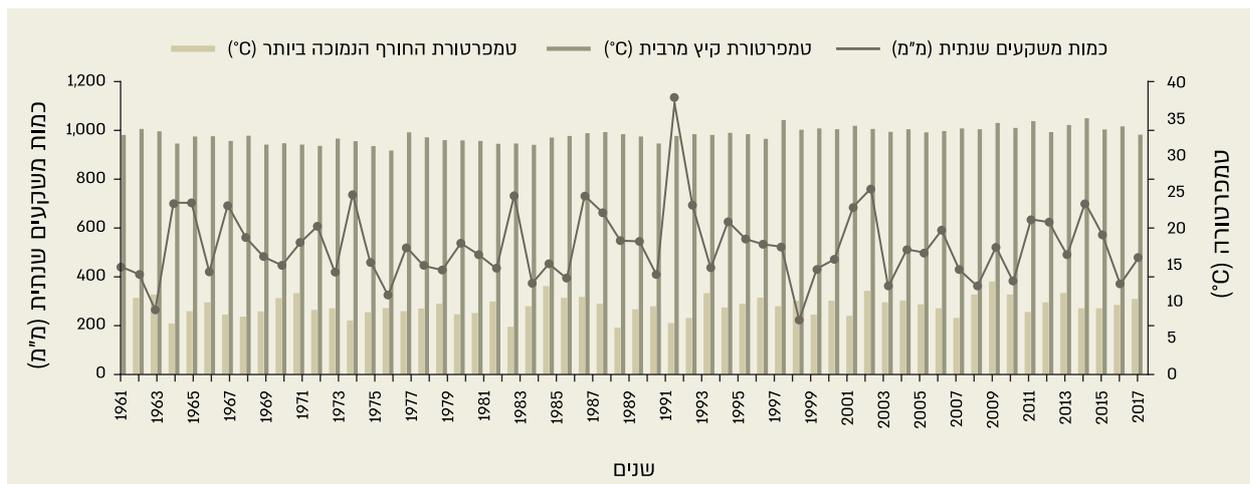
נתוני אקלים

נתוני האקלים חושבו לשנים 1961–2018 לאזור שנמצאים בו העומדים בהרטוב ובצרעה. המשקעים השנתיים הממוצעים (AP) היו 505 ± 20 מ"מ. כמות המשקעים

נתוני העומד	צרעה	הרטוב
מיקום	31.800N, 34.949E	31.768N 34.977E
גובה מעל פני הים (מטר)	290	300
שטח (דונם)	45	70
צפיפות עצים (עצים / דונם)	436	421
צפיפות עצים (עצים / דונם)	1,978	1,953
גיל העצים	41	67
נתוני אקלים (ממוצע \pm שגיאת תקן)		
כמות משקעים שנתית, AP (מ"מ)	505 \pm 19	
טמפרטורת חורף מרבית, MAWT (°C)	16.8 \pm 0.25	
טמפרטורת חורף הנמוכה ביותר, MIWT (°C)	8.9 \pm 0.17	
טמפרטורת קיץ מרבית, MAST (°C)	32.5 \pm 0.13	
טמפרטורת קיץ הנמוכה ביותר, MIST (°C)	20.8 \pm 0.10	
מתאמים		
	AP x MAWT	-0.507 (p < 0.0001)
	AP x MIWT	-0.448 (p = 0.0004)
	AP x MAST	-0.083 (p = 0.538)
	AP x MIST	-0.117 (p = 0.381)

טבלה 1

נתוני האקלים חושבו לשנים 1961–2018. כמות משקעים שנתית (AP); טמפרטורה מרבית בחורף (MAWT); הטמפרטורה הנמוכה ביותר בחורף, ינואר (MIWT); טמפרטורה מרבית בקיץ, יולי-אוגוסט (MAST); הטמפרטורה הנמוכה ביותר בקיץ (MIST).



איור 2

תנאי אקלים כפי שתועדו בתחנה המטאורולוגית בית-ג'ימאל. כמות משקעים שנתיים (מ"מ), ערכים ממוצעים של טמפרטורות קיץ מרביות (ביולי-אוגוסט (MAST, עמודות בחום), וערכים ממוצעים של טמפרטורות החורף הנמוכות ביותר בינואר (MIWT, עמודות בירוק).

הרטוב		צרעה		
עצים מתים	עצים חיים	עצים מתים	עצים חיים	
30	22	27	29	מספר עצים
12.74 ± 0.53	13.23 ± 0.62	12.28 ± 0.55	13.71 ± 0.46	גובה (מטר)
0.22 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.18 ± 0.01	קוטר בגובה החזה (מטר)
0.35 ± 0.14	0.35 ± 0.16	0.32 ± 0.10	0.35 ± 0.10	מדד התחרות
-0.390 p = 0.033	-0.245 p = 0.185	-0.327 p = 0.096	-0.052 p = 0.791	מדד תחרות x קוטר בגובה בית החזה מתאם זוגי (r)
0.211 p = 0.372	0.028 p = 0.917	0.092 p = 0.649	0.100 p = 0.605	מדד התחרות x גובה מתאם זוגי (r)
5.58 ± 0.39	5.37 ± 0.39	5.41 ± 0.29	5.38 ± 0.53	תוספת הגדילה השנתית הכוללת / Σ מספר העצים (סמ"ר)
0.75 ± 0.05	0.59 ± 0.06	0.45 ± 0.04	0.43 ± 0.04	צפיפות ביבי שרף (ביבים לממ"ר)

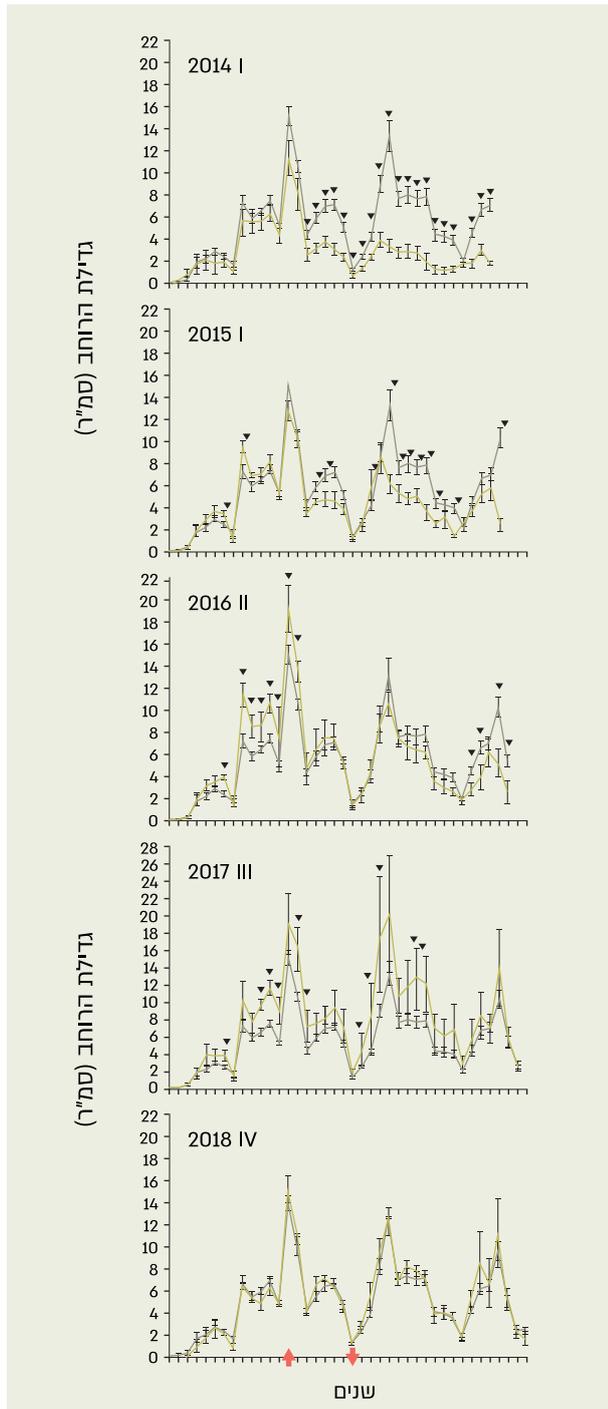
טבלה 2

מבחינת מתאם נעשו בין מדד התחרות (NCI) לבין קוטר העצים שנמדד בגובה בית החזה (Diameter at Breast Height, DBH), ובין NCI לבין גובה העצים (SBA (height)). חלקי מספר עצים היא תוספת הגדילה השנתית הממוצעת לעץ (BAI), וצפיפות ביבי השרף היא הממוצע השנתי בעשר השנים האחרונות לפני התמותה.

ניתוח טבעות שנתיים

וזאת בהנחה כי קיים מכנה משותף לעצים שמתו בגלל חיפושיות קליפה באותה שנה. ואכן, נמצא כי לעצים שמתו באותה שנה היה דפוס צימוח שנתי דומה. מתוך כך, התגלו ארבעה דפוסים צימוח שונים של גדילת רוחב (באיור 3 מוצגות התוצאות מחלקת צרעה). דפוס צימוח I מייצג עצים שמתו בצרעה בשנים 2014 וב-2015, ובהרטוב בשנים

נמצא קשר חיובי וחזק בין תוספת הגדילה השנתית לבין משקעים ממוצעים שנתיים בשני העומדים בעצים החיים והמתים (p < 0.0001, r = 0.6-0.7). מניתוח טבעות העצים נמצא כי התרחשו מספר אירועי תמותה בין השנים 2014 ל-2018. לפיכך, חולקו העצים לקבוצות לפי שנת התמותה,



איור 3

השוואת גדילת רוחב שנתית ממוצעת של עצים חיים ומתים בצרעה לאורך השנים בהתאמה לשנת התמותה

קווים ירוקים מייצגים את כל העצים החיים שנדגמו, וקווים אדומים מייצגים את העצים המתים לפי שנת תמותה המצוינת בפינה השמאלית העליונה של כל גרף. מספר רומי (I-IV) מימין לשנת התמותה מייצג את דפוס הגדילה של אותה קבוצה. משולשים שחורים מייצגים הבדלים מובהקים ($p < 0.05$) בממוצע גדילת הרוחב השנתית בין העצים המתים לחיים. חץ עולה על ציר X מציין את השנה הגשומה ביותר וחץ יורד את השנה השחונה ביותר. קווי הסטייה מייצגים שגיאת תקן.

2014 ו-2018. עצים אלה הראו עיכוב משמעותי בצימוח בהשוואה לעצים החיים ברוב השנים, ובייחוד מאז 1995. העיכוב היחסי בצימוח היה בולט יותר בשנים הגשומות 1983, 1992 ו-2003, דבר המצביע על תגובה חלשה של העצים האלה למשקעים גבוהים. דפוס צימוח II ייצג עצים שמתו בצרעה בשנת 2016. קצב הגידול של העצים האלה היה גבוה יותר מזה של העצים שלא מתו, בייחוד בשנים הראשונות לחייהם, דבר המצביע על תגובה חזקה למשקעים גבוהים, יותר מזו של עצים ששרדו. עם זאת, בעקבות משקעים נמוכים מהממוצע בשנת 1999, ועד מותם בשנת 2016, העצים הללו הראו תגובת צימוח חלשה יותר מהעצים החיים. דפוס צימוח III ייצג עצים שמתו בצרעה בשנת 2017, ושהתאפיינו בקצב גידול גבוה יותר לכל אורך חייהם ועד עשר השנים האחרונות לפני התמותה. קצב הצמיחה הגבוה לא חזר לקדמותו לאחר הבצורת של שנת 2011. דפוס צימוח IV ייצג עצים שמתו בצרעה בשנת 2018, ובהרטוב בשנים 2016 ו-2017. עצים אלה גדלו בקצב צימוח דומה לזה של העצים החיים (איור 3).

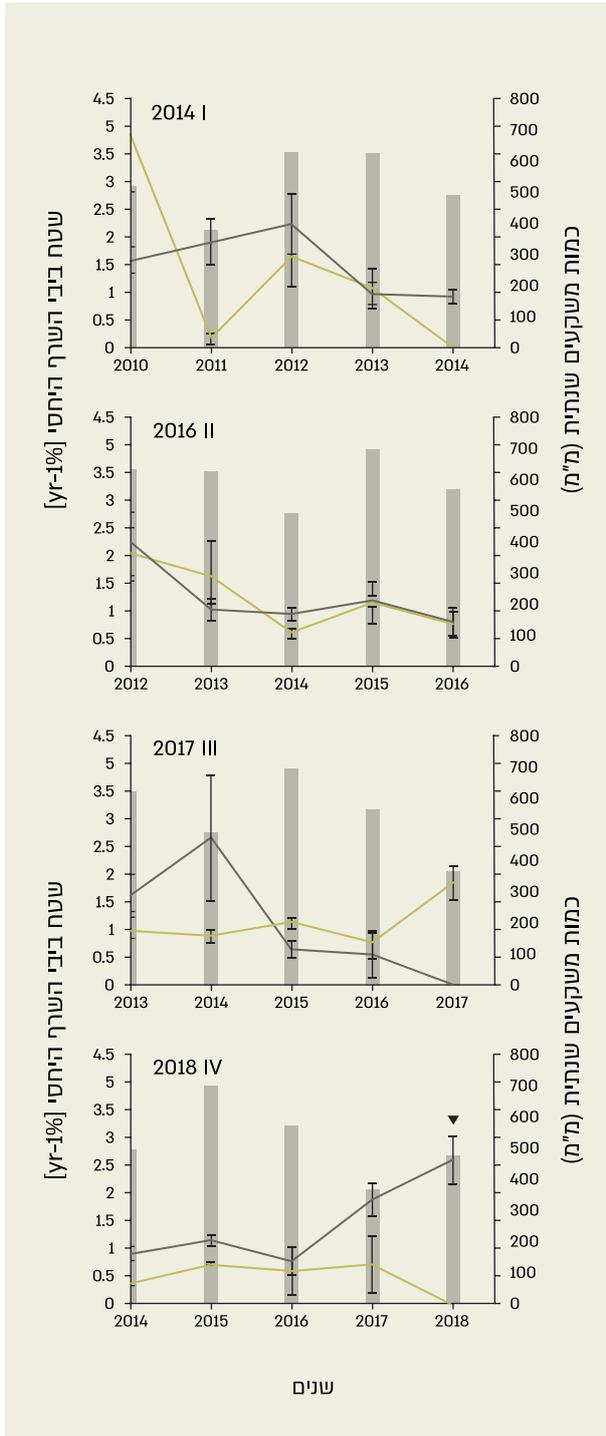
ניתוח ביבי שָׁרף

נמצא מתאם שלילי בין תוספת הגדילה השנתית לצפיפות ביבי השרף בעצים חיים בשני האתרים, הרטוב ($r = -0.82$, $p < 0.0002$) וצרעה ($r = -0.69$, $p < 0.004$), בעוד שלא נמצא קשר בין תוספת הגדילה השנתית לצפיפות ביבי השרף בעצים המתים שנדגמו (טבלה 3). אף לא אחד מהפרמטרים האקלימיים נמצא במתאם מובהק עם צפיפות ביבי השרף (לא מוצג). ניתוח צפיפות ביבי השרף של העצים המתים לפי שנת התמותה מראה כי ברוב המקרים (למעט עצים שמתו בהרטוב בשנת 2014 ובצרעה בשנת 2016) העצים הראו כחיתה משמעותית בצפיפות ביבי השרף בשנה האחרונה לחייהם (איור 4). נוסף על כך, שטח ביבי השרף היחסי (אחוז ביבי שרף מהטבעת) הצטמצם משמעותית בכל העצים בשנה האחרונה לצמיחתם, למעט העצים שמתו בצרעה בשנת 2016 (איור 5). נראה שבעצים שמתו, השונות הבין-שנתית בצפיפות ביבי השרף הייתה רבה יותר.

עומד	עצים	מתאם (r)	מובהקות (p)
הרטוב	חיים	-0.820	0.0002
	מתים	-0.415	0.124
צרעה	חיים	-0.691	0.004
	מתים	0.046	0.870

טבלה 3

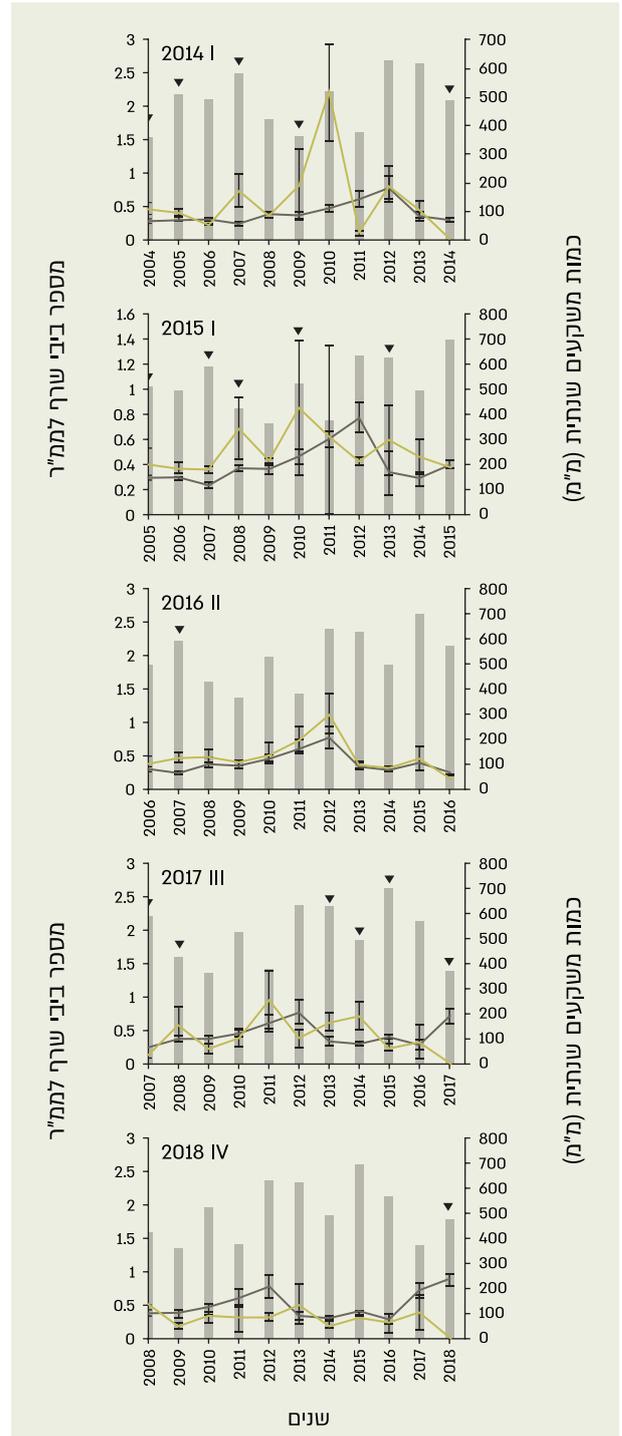
מקדם מתאם פירסון (r) בין צפיפות ביבי השרף לבין גדילת הרוחב של העצים החיים והמתים בהרטוב ובצרעה



איור 5

שטח ביבי השרף היחסי לפי שנות תמותה בחמש השנים שקדמו לתמותה בצרעה

שטח הביבים נקבע כאחוז משטח הטבעת השנתית. קווים כחולים מייצגים עצים חיים, וקווים אדומים מייצגים עצים מתים. משולשים שחורים מייצגים הבדלים מובהקים ($p < 0.05$) בממוצע שטח ביבי השרף היחסי בין העצים החיים למתים. עמודות אפורות מייצגות כמות משקעים שנתית (מ"מ). דפוס גדילת הרחב מצוין על יד שנת התמותה במספר רומי (I-IV). קווי השיאה מייצגים את שגיאת התקן.



איור 4

צפיפות ביבי השרף ב-10 השנים שקדמו לתמותה לפי שנות תמותה העצים בצרעה

קווים ירוקים מייצגים עצים חיים, וקווים אדומים מייצגים עצים מתים. משולשים שחורים מציינים הבדלים מובהקים ($p < 0.05$) בממוצע צפיפות ביבי השרף בין העצים החיים למתים. העמודות מייצגות את כמות המשקעים השנתית (מ"מ). דפוס גדילת הרחב מצוין על יד שנת התמותה במספר רומי (I-IV). קווי הסטייה מייצגים את שגיאת התקן.

על כך שהירידה בצימוח הרוחב לבדה אינה יכולה להסביר את כל מקרי התמותה. באמצעות אותו מסד נתונים של טבעות עצים דיווחו Cailleret ושות' (2019) כי עלייה בשונות הצמיחה הבין-שנתית וירידה בסנכרון הצמיחה באוכלוסיית עצים יכולות לחזות תמותה סלקטיבית של עצי מחט. דבר זה מרמז שקיימת שונות בצימוח הרוחב בעצים בתוך האוכלוסייה, שבאה לידי ביטוי בעיקר בתנאים תת-מיטביים. אנו משערים שהבסיס לשונות זו הוא גנטי, אולם אין לשלול גם השפעה סביבתית (תא השטח) על השונות בתגובת העצים לתנאי בית הגידול.

ארבעה דפוסי הצימוח שנמצאו במחקר הנוכחי בקרב אוכלוסיית העצים המתים, מחזקים את ההנחה כי קיימת שונות בצימוח העצים. אנו מניחים כי הבדלים אלה קיימים ממילא בתוך האוכלוסייה, ומתגברים בשל התנאים התת-מיטביים שהעצים גדלים בהם. הנחה זו מתחזקת לנוכח דפוסי הגדילה הנוספים והשונים זה מזה. דפוסי הצימוח II ו-III הראו צמיחת רוחב מוגברת בהשוואה לעצים חיים (איור 3). עם זאת, בעצים מדפוס צימוח II קצב הצימוח פחת בעקבות הבצורת בשנת 1999, ואילו בעצים עם דפוס צימוח III הצימוח פחת לאחר הבצורת בשנת 2011. סביר להניח שיכולת ההתאוששות של עצים אלה לאחר בצורת פחותה יותר מזו של העצים החיים, ולכן צימוח הרוחב שלהם הלך ודעך עד שירד אל מתחת לכושר הצימוח של העצים החיים. מחקרים קודמים הראו כי פחיתה מהירה בצימוח רוחב לאחר שנים רבות של צימוח מוגבר מצביעה על סיכון גבוה לתמותה (Volts et al., 2013; Hentschel et al., 2014). DeSoto ושות' (2020) הראו כי עצי מחט בעלי כושר התאוששות ירוד נוטים למות לאחר תקופת בצורת. מחקר אחר הציע שפחיתה בצימוח הרוחב לאחר שנים של צימוח מוגבר מאפיינת עצים שחוו כשל הידראולי (Gessler et al., 2018). בעקבות הכשל מופר מעבר המים בעצה, ונגרמים שינויים בפיזיולוגיית העץ, כולל הפסקת גדילה וירידה בתהליכי חילוף חומרים (David-Schwartz et al., 2019; Rehschuh et al., 2020; Skelton, 2020). מחקרים קודמים הראו כי עצי אורן הגדלים בבתי גידול יובשניים למחצה חווים כשל הידראולי (Klein et al., 2013; David-Schwartz et al., 2016). אם נביא בחשבון שתנאי האקלים בחלקות היער שנבחנו במחקר הנוכחי הם מתחת לסף המיטבי של אורן ברוסיה, ניתן להעריך כי העצים המתים סבלו משיעור כלשהו של כשל הידראולי, שחולל את הפחיתה בצימוח הרוחב שלהם. אפשרות של כשל הידראולי לא נבחנה בפועל במחקר הנוכחי.

הקשר בין התפתחות ביבי שרף ותמותת עצים

עקת יובש מגבירה את הסיכון להרעבת פחמן (carbon starvation), דבר המוביל לדלדול מאגרי הפחמן בעץ ולפגיעה בהקצאתו לחלקי העץ הלא יצרניים (Adams et

נתוני האקלים באזור המחקר מצביעים על כך שהעצים שנבחנו נמצאו בעקת מים ממושכת מאחר שכמות המשקעים הממוצעת לאורך כל חייהם היא 505 ± 20 מ"מ לשנה, פחות מהסף (600 מ"מ) שדווח בעבר סף כמיטבי עבור אורן ברוסיה (Sarris et al., 2007). מצאנו שתגובת הצמיחה של העצים לאירועים האקלימיים, שהתבטאה בגדילת הרוחב, שונה אצל עצים שונים באוכלוסיות אורן ברוסיה שנדגמו, ומשליכה על אירועי התמותה שנצפו. העצים שמתו התאפיינו לפחות באחד מדפוסי הגדילה הבאים: (1) צמיחה איטית לאורך השנים, (2) התאוששות מוגבלת לאחר בצורת, (3) פחיתה בצימוח לאחר שנות צמיחה מוגברת, (4) ירידה בצפיפות ביבי השרף ובשטח היחסי שהם תופסים מכלל שטח העצה.

הקשר בין גדילת הרוחב ותמותת עצים

גודל העצים ומדד התחרות של העצים המתים היו דומים לאלה של העצים החיים בשני העומדים. היעדר הבדל במשתנים אלה בין שתי הקבוצות מצביע על כך שתמותת העצים לא נבעה מהבדלים בתנאים המקומיים, והשפעתם על תמותת העצים ככל הנראה שולית. ביתוח כלל העצים מצאנו שמרבית העצים המתים במחקר זה הציגו, בייחוד לאחר שנים יבשות, תגובת צימוח חלשה לשונות הבין-שנתית במשקעים שאופיינית לאקלים הים תיכוני (Tielbörger et al., 2014). לעומתם, העצים החיים הראו תגובת צימוח חדה ביחס למשקעים. חלוקת קבוצת העצים המתים לפי שנות תמותה הראתה שעצים שמתו באותה שנה הציגו דפוס צימוח דומה. דפוס הצימוח I של העצים שמתו בחלקת צרעה בשנת 2014 התאפיין בקצב צימוח איטי יותר מאלה שמתו בשנים שלאחר מכן. דבר דומה ניתן לומר על העצים שמתו בשנים 2015 ו-2016. בשלוש הקבוצות נראה כי שנת 1994, שהייתה שנה מעוטת משקעים (431 מ"מ), הייתה השנה שהחלה בה האטה בצימוח הרוחב. ההאטה באה לידי ביטוי בחולשת העצים, ובסופו של דבר הם מתו. העצים שמתו בשנת 2017 הציגו צימוח טוב יותר מהעצים החיים לאורך השנים, אולם התקשו לחזור לצימוח המוגבר שאפיין אותם לאחר שנת הבצורת ב-2011.

דפוס צימוח I כלל עצים שצמיחת הרוחב שלהם הייתה איטית לאורך כל השנים ביחס לעצים ששרדו. צמיחת רוחב איטית שכזו היא מדד מוכר ומתועד היטב לתמותת עצים (Dorman et al., 2015; Berdanier and Clark, 2016; Gessler et al., 2018). Cailleret ושות' (2017) הראו כי צמיחת רוחב איטית קשורה ל-84% מאירועי התמותה של מינים רבים. מעניין, שאותו מחקר הראה כי צמיחה איטית לאורך השנים שלפני התמותה שכיחה יותר אצל עצי מחט מאשר אצל רחבי עלים. עם זאת, מחקרים אלה מצביעים

העץ. העובדה כי אותות סביבתיים משפיעים על ייצור ביבי השרף פחות מאשר גדילת הרוחב, מעידה על חשיבות ביבי השרף שמשמשים מנגנוני הגנה הכרחיים לשרידותו של העץ. השערה זו נתמכת גם בתוצאות המחקר שערכו פוקס ושות' (2018). מחקרם הראה שבאורן ירושלים הצימוח הוא התהליך הראשון המושפע מבצורת, ואילו מטבוליטים משניים, כולל מדדי שרף, מושפעים מאוחר יותר כתגובה לעקה.

מסקנות

תוצאות המחקר הנוכחי מצביעות על כך שערכוב ממושך בצימוח הרוחב, צימוח רוחב ירוד בעקבות בצורת וירידה במדדי ביבי השרף הם משתנים משמעותיים לזיהוי עצי אורן ברוטיה הנתונים בסכנת תמותה. כמו כן, דפוסים הצמיחה השונים שנמצאו במחקר זה, מעידים על השונות הטבעית באוכלוסיית העצים, המתבטאת בצימוח רוחב שונה על רקע תנאי האקלים הקשים. לנוכח תחזיות שינוי האקלים הצופות לאזורנו עתיד יבש יותר בשל שינוי במשטר המשקעים ועלייה בטמפרטורות (Spinoni et al., 2018), אנו צופים כי תמותת עצים ממין אורן ברוטיה בישראל תתגבר. ניכר כי תמותת העצים מתרחשת בהתאם למצב העץ, כך שעם שינוי האקלים עצים רבים יותר יושפעו לרעה מעקת יובש. עצים שמושפעים לרעה מתקופות יובש נעשים חלשים ונמצאים בסכנת תמותה, בעיקר בעקבות התקפת חיפושיות קליפה. בהתחשב בעובדה שיערות ישראל אינם בית הגידול הטבעי של אורן ברוטיה, מומלץ לעקוב מקרוב אחר חלקות נטועות שמתרחשת בהן תמותת עצים, ולאתר פרטים שמשגשים גם בתקופות עם מיעוט משקעים המלוות בהתקפות חיפושיות קליפה, במטרה לטכח טיפוסים אלה לנטיעות עתידיות.

תודות

מחקר זה בוצע במימון הקרן הקימת לישראל, תוכנית מספר 10-03-4387-18.

בעקבות זאת, ישנה פחיתה בייצור מטבוליטים משניים, ובכללם השרף (al., 2017; Gaylord et al., 2015; Netherer et al., 2015). תוצאות המחקר הנוכחי מדגימות ירידה במדדי ביבי השרף בעצים השייכים לדפוסים גידול III ו-IV שהציגו צימוח מוגבר או דומה לזה של העצים החיים, בהתאמה (איור 3, איור 4). נראה שירידה במדדי ביבי השרף, ולא גדילת הרוחב בעצים אלה, היא הגורם הקובע את רגישותם לתמותה בעקבות התקפת חיפושית קליפה. נוסף על כך, עצים עם דפוסים צימוח I, III ו-IV הציגו פחיתה בשטח היחסי של ביבי השרף שנה לפני התמותה (איור 3, איור 4). תוצאות מחקר זה תואמות מחקרים אחרים שהראו כי צפיפות ביבי שרף וגודלם היחסי מקנים הגנה מפני חיפושיות קליפה באורנים מהמינים *Pinus contorta* Dougl., *Pinus edulis* Engelm. ו-*Pinus flexilis* James (Gaylord et al., 2013; Ferrenberg et al., 2014). מחקרים אלה הראו ששינויים בהרכב או בזרימת השרף אינם משפיעים על רגישות העץ. לעומת זאת, Kolb ושות' (2019) הראו לאחרונה כי עקת יובש מפחיתה באופן משמעותי את זרימת השרף ב-*Pinus ponderosa*, ומגבירה בשל כך את רגישות העצים להתקפת חיפושית קליפה. עם זאת, מחקר שבחן את ביבי השרף בעצי אורן ירושלים בספרד, הראה ירידה בייצור ביבי השרף שנתיים לפני מות העץ שאוכלס בחיפושיות קליפה (Sangüesa-Barreda et al., 2015). חשוב לציין כי השונות במאפייני ביבי השרף קשורה להבדלים גנטיים (Moreira et al., 2015). לפיכך, השונות בצפיפות ביבי השרף בעצי אורן ברוטיה במחקר הנוכחי עשויה לשקף הבדלים גנטיים.

עצים עם דפוס צימוח II לא הראו ירידה בצפיפות ביבי השרף או בשטח הביבים היחסי, דבר המצביע על כך שגדילת הרוחב המועטה הייתה גורם דומיננטי בתמותת עצים אלה. מעניין לציין, שבניגוד לגדילת הרוחב, השינויים בצפיפות ביבי השרף לא נמצאו בזיקה מובהקת עם משקעים או טמפרטורות (תוצאות לא מובאות), וייתכן שהדבר מרמז על פלסטיות נמוכה של תכונה זו. פלסטיות נמוכה מעידה על תכונה יציבה וכנראה משמעותית לקיום

מקורות

Adams HD, Zeppel MJB, Anderegg WRL, Hartmann H, Landhäuser SM, Tissue DT, et al. 2017. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology & Evolution*, 1(9), 1285–1291.

Allen CD, Breshears DD, and McDowell NG. 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8), art129.

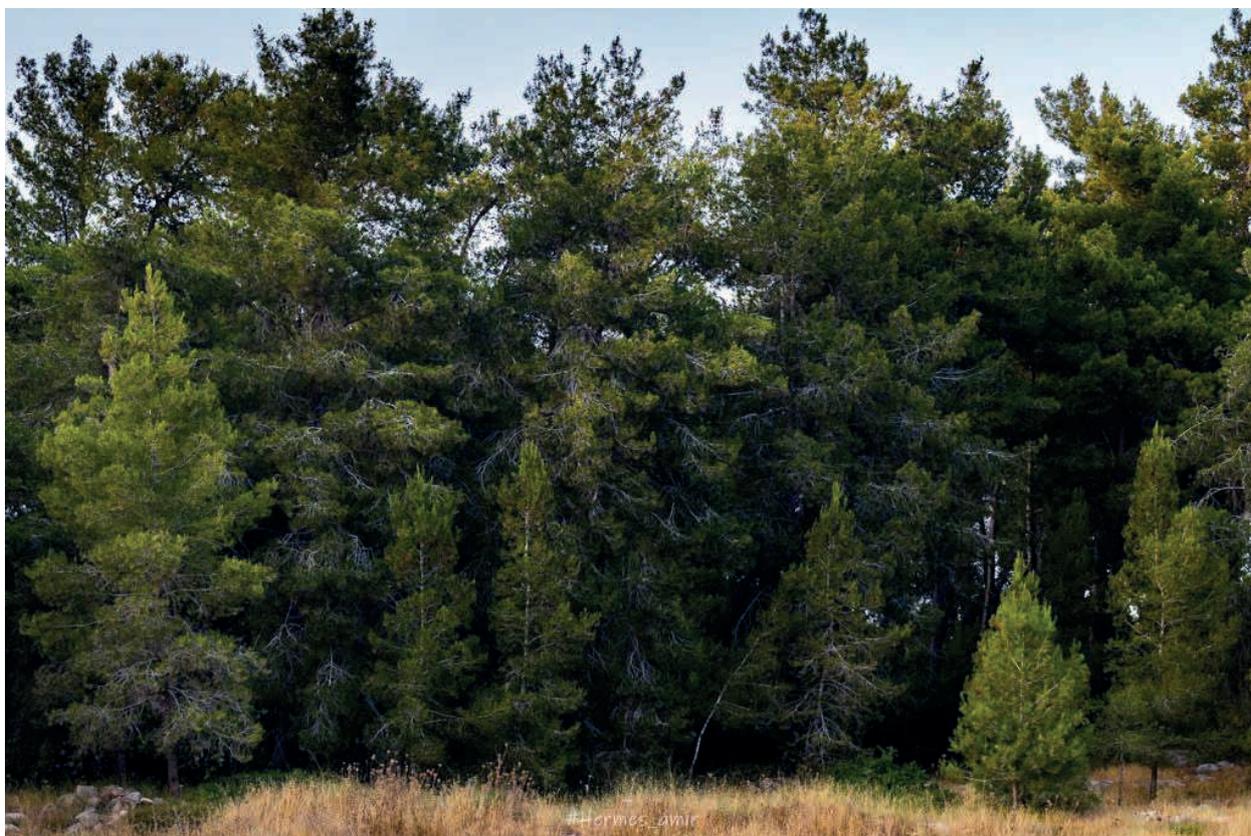
זמסקי א. 1970. השפעת תנאי מיקרו-אקלים על יצירת ביבי שרף והפרשת השרף באורן ירושלים. **ליערן**, 1-2, 7-17.

שילר ג והר נ. 2015. סקר התפתחות העצים במטעי אם לזרעים של אורן ירושלים (*Pinus halepensis*) בישראל (1985–2014). **יער**, 14, 15–23.

שילר ג. 2013. גידול עצי יער ויערות בישראל, **ארץ של סקר המדבר**. <https://israelforests.wordpress.com>

- Fritts H. 2012. *Tree Rings and Climate*. Elsevier Science.
- Gaylord ML, Kolb TE, and McDowell NG. 2015. Mechanisms of piñon pine mortality after severe drought: A retrospective study of mature trees. *Tree Physiology*, 35(8): 806–816.
- Gaylord ML, Kolb TE, Pockman WT, Plaut JA, Yopez EA, Macalady AK, et al. 2013. Drought predisposes piñon–juniper woodlands to insect attacks and mortality. *New Phytologist*, 198(2), 567–578.
- Gessler A, Cailleret M, Joseph J, Schönbeck L, Schaub M, Lehmann M, et al. 2018. Drought induced tree mortality – a tree-ring isotope based conceptual model to assess mechanisms and predispositions. *New Phytologist*, 219(2), 485–490.
- Giorgi F and Lionello P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 3(2–3), 90–104.
- Hall DE, Yuen MMS, Jancsik S, Quesada AL, Dullat HK, and Li M. 2013. Transcriptome resources and functional characterization of monoterpene synthases for two host species of the mountain pine beetle, lodgepole pine (*Pinus contorta*) and jack pine (*Pinus banksiana*). *BMC Plant Biology*, 13, 80.
- Hentschel R, Rosner S, Kayler ZE, Andreassen K, Børja I, Solberg S, et al. 2014. Norway spruce physiological and anatomical predisposition to dieback. *Forest Ecology and Management*, 322, 27–36.
- Kane JM and Kolb TE. 2010. Importance of resin ducts in reducing ponderosa pine mortality from bark beetle attack. *Oecologia*, 164(3), 601–609.
- Klein T, Di Matteo G, Rotenberg E, Cohen S, and Yakir D. 2013. Differential ecophysiological response of a major Mediterranean pine species across a climatic gradient. *Tree Physiology*, 33(1), 26–36.
- Kolb T, Keefover-Ring K, Burr SJ, Hofstetter R, Gaylord M, and Raffa KF. 2019. Drought-mediated changes in tree physiological processes weaken tree defenses to bark beetle attack. *Journal of Chemical Ecology*, 45(10), 888–900.
- Lewinsohn E, Gijzen M, Muzika RM, Barton K, and Croteau R. 1993. Oleoresinosis in Grand Fir (*Abies grandis*) saplings and mature trees (Modulation of this wound response by light and water stresses). *Plant Physiology*, 101(3), 1021–1028.
- McDowell NG. 2011. Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality. *Plant Physiology*, 155(3), 1051–1059.
- Mendel Z. 1998. Biogeography of *Matsucoccus josephi* (Homoptera: Matsucoccidae) as related to host resistance in *Pinus brutia* and *Pinus halepensis*. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(3), 323–330.
- Mendel Z, Branco M, and Battisti A. 2016. Invasive sap-sucker insects in the Mediterranean Basin. In: Paine TD and Lieutier F (Eds). *Insects and Diseases of Mediterranean Forest Systems*. Cham: Springer International Publishing. pp. 261–291.
- Moreira X, Zas R, Solla A, and Sampedro L. 2015. Differentiation of persistent anatomical defensive structures is costly and determined by nutrient availability and genetic growth-defence constraints. *Tree Physiology*, 35(2), 112–123.
- Ne'eman G and Trabaud L. 2000. *Ecology, Biogeography and Management of Pinus halepensis and P. brutia Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Leiden: Backhuys Publishers.
- Netherer S, Matthews B, Katzensteiner K, Blackwell E, Henschke P, Hietz P, et al. 2015. Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *New Phytologist*, 205(3), 1128–1141.
- Ogle K, Whitham TG, and Cobb NS. 2000. Tree-ring variation in pinyon predicts likelihood of death following severe drought. *Ecology*, 81(11), 3237–3243.
- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, and Vennetier M. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660–684.
- Anderegg WRL, Hicke JA, Fisher RA, Allen CD, Aukema J, Bentz B, et al. 2015. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, 208(3), 674–683.
- Bachar A, Markus-Shi J, Regev L, Boaretto E, and Klein T. 2020. Tree rings reveal the adverse effect of water pumping on protected riparian *Platanus orientalis* tree growth. *Forest Ecology and Management*, 458, 117784.
- Berdanier AB and Clark JS. 2016. Multiyear drought-induced morbidity preceding tree death in southeastern U.S. forests. *Ecological Applications*, 26(1), 17–23.
- Bigler C and Bugmann H. 2003. Growth-dependent tree mortality models based on tree rings. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(2), 210–221.
- Brewer PW. 2014. Data management in dendroarchaeology using Tellervo: Tree-Ring Society.
- Cailleret M, Dakos V, Jansen S, Robert EMR, Aakala T, Amoroso MM, et al. 2019. Early-Warning Signals of Individual Tree Mortality Based on Annual Radial Growth. *Frontiers in Plant Science* 9, 1964.
- Cailleret M, Jansen S, Robert EMR, Desoto L, Aakala T, Antos JA, et al. 2017. A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Global Change Biology*, 23(4), 1675–1690.
- Canham CD, Papaik MJ, Uriarte M, McWilliams WH, Jenkins JC, and Twery M. 2006. Neighborhood analyses of canopy tree competition along environmental gradients in New England forests. *Ecological Applications*, 16(2), 540–554.
- Chambel M, Climent J, Pichot C, and Ducchi F. 2013. Mediterranean Pines (*Pinus halepensis* Mill. and *Pinus brutia* Ten). In: Pâques LE (Ed). *Forest Tree Breeding in Europe*. Springer Netherlands. pp. 229–265.
- David-Schwartz R, Paudel I, Mizrahi M, Delzon S, Cochard H, Lukyanov V, et al. 2016. Indirect evidence for genetic differentiation in vulnerability to embolism in *Pinus halepensis*. *Frontiers in Plant Science*, 7, 768.
- David-Schwartz R, Stein H, Raveh E, Granot D, Carmi N, and Klein T. 2019. Plant response to drought stress. In: Dai W (Ed). *Stress Physiology of Woody Plants*. Boca Raton: CRC Press. pp. 93–131.
- DeSoto L, Cailleret M, Sterck F, Jansen S, Kramer K, Robert EMR, et al. 2020. Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees. *Nature Communications*, 11(1), 545.
- Dorman M, Svoray T, Perevolotsky A, Moshe Y, and Sarris D. 2015. What determines tree mortality in dry environments? A multi-perspective approach. *Ecological Applications*, 25(4), 1054–1071.
- Duke NC, Kovacs JM, Griffiths AD, Preece L, Hill DJE, van Oosterzee P, et al. 2017. Large-scale dieback of mangroves in Australia's Gulf of Carpentaria: A severe ecosystem response, coincidental with an unusually extreme weather event. *Marine and Freshwater Research*, 68(10), 1816–1829.
- Ferrenberg S, Kane JM, and Mitton JB. 2014. Resin duct characteristics associated with tree resistance to bark beetles across lodgepole and limber pines. *Oecologia*, 174(4), 1283–1292.
- Fonti P, von Arx G, Garcia-González I, Eilmann B, Sass-Klaassen U, Gärtner H, and Eckstein D. 2010. Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist*, 185(1), 42–53.
- Fox H, Doron-Faigenboim A, Kelly G, Bourstein R, Attia Z, Zhou J, et al. 2018. Transcriptome analysis of *Pinus halepensis* under drought stress and during recovery. *Tree Physiology* 38(3): 423–41.

- Sarris D, Christodoulakis D, and Körner C. 2007. Recent decline in precipitation and tree growth in the eastern Mediterranean. *Global Change Biology*, 13(6), 1187–1200.
- Seidl R, Thom D, Kautz M, Martin-Benito D, Peltoniemi M, Vacchiano G, et al. 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395–402.
- Skelton RP. 2020. Quantifying plant hydraulic function becomes a tall order. *Journal of Experimental Botany*, 71(14), 3927–3929.
- Spinoni J, Vogt JV, Naumann G, Barbosa P, and Dosio A. 2018. Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology*, 38(4), 1718–1736.
- Tielbörger K, Bilton MC, Metz J, Kigel J, Holzapfel C, Lebrija-Trejos E, et al. 2014. Middle-Eastern plant communities tolerate 9 years of drought in a multi-site climate manipulation experiment. *Nature Communications*, 5, 5102.
- Voltas J, Camarero JJ, Carulla D, Aguilera M, Ortiz A, and Ferrio JP. 2013. A retrospective, dual-isotope approach reveals individual predispositions to winter-drought induced tree dieback in the southernmost distribution limit of Scots pine. *Plant, Cell & Environment*, 36(8), 1435–1448.
- Werker E and Fahn A. 1969. Resin ducts of *Pinus halepensis* Mill. – Their structure, development and pattern of arrangement. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 62(4), 379–411.
- Oppenheimer HR. 1967. *Mechanisms of Drought Resistance in Conifers of the Mediterranean Zone and the Arid West of the U.S.A. Part 1: Physiological and Anatomical Investigations*. Final Report on project No. A10-FS 7, Grant No. FGIs-119. Rehovot: The Hebrew University of Jerusalem.
- Osem Y, Ginsberg P, Tauber I, Atzmon N, and Perevolotsky A. 2008. Sustainable management of mediterranean planted Coniferous forests: An Israeli definition. *Journal of Forestry*, 106(1), 38–46.
- Phillips OL, van der Heijden G, Lewis SL, López-González G, Aragão LEOC, Lloyd J, et al. 2010. Drought–mortality relationships for tropical forests. *New Phytologist*, 187(3), 631–646.
- Rehsehuh R, Cecilia A, Zuber M, Faragó T, Baumbach T, Hartmann H, et al. 2020. Drought-induced xylem embolism limits the recovery of leaf gas exchange in Scots pine. *Plant Physiology*, 184(2), 852–864.
- Reid RW and Watson JA. 1966. Sizes, distributions, and number of vertical resin ducts in lodgepole pine. *Canadian Journal of Botany*, 44(4), 519–525.
- Sangüesa-Barreda G, Linares JC, and Camarero JJ. 2015. Reduced growth sensitivity to climate in bark-beetle infested Aleppo pines: Connecting climatic and biotic drivers of forest dieback. *Forest Ecology and Management*, 357, 126–137.



חלקה ותיקה של אורן ברוטיה ביער בן שמן. בחלקה יש התחדשות טבעית של אורנים צילום: אמיר הרמס



המעורבות של חיפושיות קליפה בתמותת עצי אורן ביער הנטוע בישראל

עומר גולן¹ | רתם אטיאס^{2,3} | מאור אלרון¹ | אלכס פרוטסוב⁴ | צבי מנדל⁴

רקפת דוד-שורץ^{2*}

1 אגף הייעור, קק"ל

2 המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי-מרכז וולקני

3 הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות

4 המכון להגנת הצומח, מנהל המחקר החקלאי-מרכז וולקני

* rakefetd@agri.gov.il

תקציר

הטיפול המוגדרים. מערכת הניסוי השנייה הצביעה על תמותה של עצי אורן ברוטיה בעקבות אכלוס, בעיקר על ידי *P. calcaratus* ו-*T. destruens*. מערכת המחקר הראשונה מראה כי חיפושיות קליפה, ובעיקר *O. erosus*, הן גורם משמעותי בתמותת עצי אורן, ובמערכת השנייה לא היה ניתן להצביע בבירור על ההשפעה המובהקת של החיפושיות כגורם תמותה ראשי. עם זאת, המחקר מצביע על כך שתנאי יובש מחלישים את העמידות הפיזיולוגית של העצים ובכך מגבירים את מעורבותם של המינים *P. calcaratus* ו-*T. destruens*, הנחשבים אלימים פחות, בתמותת עצים. עוד עלה כי טיפול באמצעות עצי מלכודת, שהצלחתו מוכיחה את מעורבות החיפושיות בתמותה, מקטין ככל הנראה את אוכלוסיית חיפושיות הקליפה, ומסייע במידת מה בהפחתת שיעור תמותת העצים, כתלות באופן פיזור עצי המלכודת ושמירה על יעילות הפיתיון המוצמד להם.

תמותת עצי יער, בעיקר מיני אורניים, בעקבות התקפת חיפושיות קליפה (Scolytinae) היא תופעה מוכרת בחצי הכדור הצפוני ושכיחה ביערות האורן הנטועים בישראל. מיני חיפושיות הקליפה הנפוצים בישראל הם *Orthotomicus erosus*, *Pityogenes calcaratus* ו-*Tomicus destruens*. לרוב מינים אלה תוקפים וקוטלים עצים במצב פיזיולוגי ירוד, אולם אוכלוסייה גדולה מאפשרת התקפה המונית גם על עצים במצב פיזיולוגי סביר ואכלוס שלהם. עם זאת, לא ברור מתי ובאיזו תדירות חיפושיות הקליפה הן הגורם הישיר לתמותת העצים, ומתי הן תסמין בלבד למצב הפיזיולוגי הירוד של העצים. סוגיה זו נבחנה באמצעות שתי מערכות ניסוי. המערכת הראשונה התבססה על ההנחה שצמצום אוכלוסיית חיפושיות הקליפה באמצעות עצי מלכודת יפחית את התמותה, מתוך הנחה כי לחיפושיות יש תפקיד מובהק בקטילת עצי האורן. במערכת הניסוי השנייה נבחנה שכיחות מיני חיפושיות הקליפה בשני עומדי אורן ברוטיה שנרשמה בהם תמותת עצים בשנים האחרונות. בנסיבות אלה נבחנה מעורבות החיפושיות באמצעות אפיון אופן האכלוס וההיסטוריה של התפתחות העצים שנקטלו. במערכת הניסוי הראשונה נמצא ש-*O. erosus* היה המין השכיח ביותר מבין חיפושיות הקליפה, והפעלת עצי המלכודת צמצמה את שיעור תמותת העצים במתחמי

מילות מפתח

אורן ברוטיה, אורן ירושלים, עצי מלכודת

רקע

מופע של שלוש מחילות המסתעפות מלשכת ההזדווגות (Carle, 1975; Seybold et al., 2016). אף על פי שלרוב *O. erosus* נצפה תוקף עצים מוחלשים, כאשר אוכלוסיית החיפושיות גדולה דיה, תתרחש התקפה גם על עצים בריאים, והם ימותו תוך פרק זמן קצר (Mendel et al., 1985; Mendel et al., 2016).

P. calcaratus נפוץ אף הוא סביב אגן הים התיכון, אך מופיע גם בבתי גידול קרירים מאלה ש-*O. erosus* נפוץ בהם, ונמצא במרכז אירופה לאורך החופים הצפוניים של הים השחור (Mazur et al., 2020). גם מין זה מתפתח על מיני אורן רבים, ובישראל הוא שכיח על החלקים העליונים של הכותרת של אורן ברוטיה, אורן ירושלים, אורן הצנובר (*P. pinea*) ואורן קנרי (*P. canariensis*). אורכם של הבוגרים 2.0–2.6 מ"מ. פעילותו נמשכת בישראל מפברואר עד נובמבר, ושכיחותו נמוכה יחסית בחודשים החמים של הקיץ. *P. calcaratus* הוא מין פוליגמי, שיוצר 4–6 מחילות ביצים לגלריה (אורך מחילת ביצים הוא 1.0–3.5 ס"מ), המפוזרות באופן מעגלי סביב לשכת ההזדווגות (איור 1ב). בישראל מעמידה חיפושית זו כארבעה עד חמישה דורות בשנה, אך דווחו גם חמישה עד שבעה דורות בשנה, כאשר הדור האחרון בעונה חורף מתחת לקליפת העץ עד לאביב הבא (Mendel et al., 2016).

המין *T. destruens* שנפוץ באגן הים התיכון, במרכז אירופה ובמערב אסיה, תוקף מיני אורן רבים (Faccoli, 2007). בישראל מין זה תוקף בעיקר את חלקי הגזע התחתונים של אורן ברוטיה ואורן ירושלים, אך גם את אורן הצנובר ואורן קנרי. המין דווח כגורם העיקרי לתמותת עשרות אלפי עצים באגן הים התיכון בלבד (Lieutier et al., 2016). בבתי גידול ים תיכוניים ממוזגים האוכלוסייה פעילה כל השנה, ואילו בבתי גידול קרים יחסית ההתפתחות מואטת או פוסקת במהלך החורף (Branco et al., 2010; Lieutier et al., 2016). בבתי גידול חמים, כמו בישראל, תקיפת העצים והרבייה מתרחשות במהלך החורף (אוקטובר–מרץ) (Halperin, 1978). האוכלוסייה בישראל מצויה בתרדמת קיץ, ולקראת הסתיו, עם ירידת הטמפרטורות, היא מתחילה את פעילותה וניזונה מענפונים. מבין שלושת מיני חיפושיות הקליפה הנדונים, רק בוגרים של *T. destruens* מבססים את תזונתם באופן משמעותי על ענפונים בעצים חיוניים מאוד ומפותחים. בניגוד לכך, העצים הנבחרים לתקיפה לצורך רבייה חלשים יותר. הפרטים הבוגרים מגיעים לאורך 4.0–4.8 מ"מ.

T. destruens הוא מין מונוגמי מהשבט Hylesinini, ואצלו הנקבה חודרת ראשונה לעץ, והזכר מצטרף אליה לאחר מכן. בניגוד לכך, במינים הפוליגמיים הזכרים הם הזוויג התוקף והנקבות מצטרפות אליהם מאוחר יותר (ביולוגיה

מינים מתת-משפחת חיפושיות קליפה (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) המאכלסים עצי מחט באגן הים התיכון הם מרכיב חשוב בתפקוד המערכת האקולוגית של היער. התפרצות בלתי מבוקרת של אוכלוסיות מיני חיפושיות הנחשבים אלימים, משקפת לעיתים קרובות את מצבם הפיזיולוגי של העצים (Lieutier et al., 2016) ועלולה להיות קטלנית גם לכלל היער. באזורים נמוכים (עד 1,000 מטר מעל פני הים) עצי אורן הם הפונדקאים השכיחים ביערות, והמושפעים העיקריים מאוכלוסיות חיפושיות הקליפה. שלושה מינים הנחשבים לאלימים במידת מה כלפי עצי אורן הם *Orthotomicus erosus*, *Pityogenes calcaratus* ו-*Tomicus destruens*, אך ישנם עוד מיני חיפושיות קליפה רבים אחרים. בישראל מוכרים כ-15 מינים נוספים של חיפושיות קליפה מסוגים שונים מתת-משפחת חיפושיות הקליפה, המאכלסים את עצי האורן (Halperin and Holzschuh, 1984). אומנם מיני *Dendroctonus* בצפון אמריקה אלימים יותר משלושת המינים המקומיים (Lieutier et al., 2016; Seybold et al., 2016), אולם ביערות הנטועים בישראל, ועל רקע תקופות יובש או ממשק דילולים שאינו מותאם בעוצמתו ובתזמונו (Mendel et al., 1992), נוצרים תנאים המאפשרים להם אכלוס נוח של עצי אורן מוחלשים ובניית אוכלוסיות גדולות המחוללות תמותת נרחבת ביער.

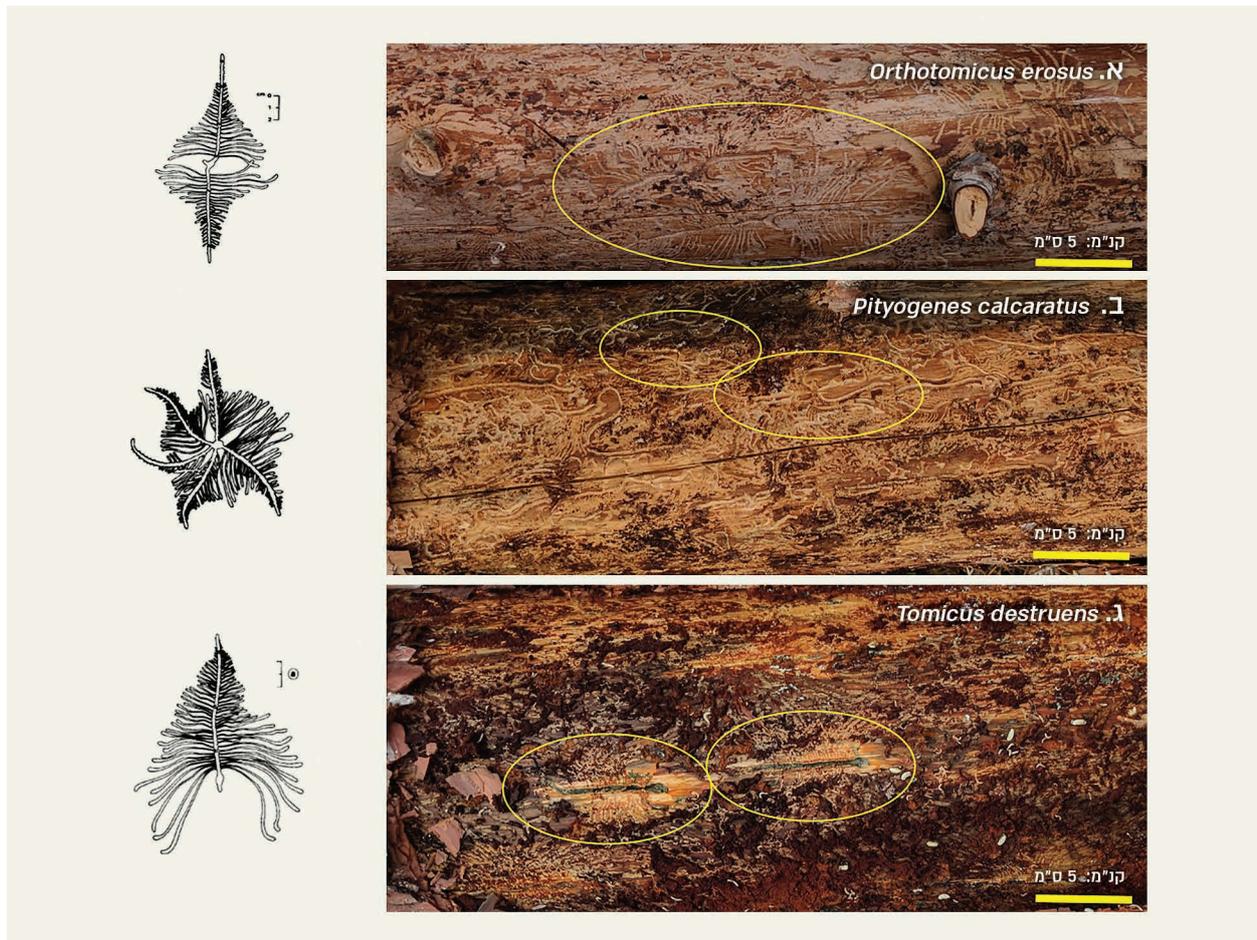
אזור התפוצה הטבעי של *O. erosus* משתרע ממרכז אירופה ודרומה עד צפון אפריקה והאיים האטלנטיים (Balachowsky, 1949). כמין פולש הוא התגלה בדרום אפריקה ב-1968 (Geertsema, 1979) וב-2004 בקליפורניה (Seybold et al., 2016). מין זה מסוגל להתפתח על מיני אורן רבים. באזור אגן הים התיכון הוא שכיח מאוד על שלושה מיני אורן: אורן ירושלים (*Pinus halepensis*), אורן ברוטיה (*P. brutia* ssp. *brutia*) ואורן החוף (*P. pinaster*). אורך הבוגרים מגיע לכ-2.5–3.5 מ"מ. הפעילות העונתית של *O. erosus* נמשכת כל העונה החמה, בדרך כלל מראשית האביב עד תחילת הסתיו, ובמהלכה הוא משלים שלושה עד שבעה דורות, כתלות במיקום הגאוגרפי (Carle, 1975; Mendel et al., 1985; Ghaioule et al., 1998; Özkazanç et al., 1985). חיפושית זו עמידה לטמפרטורות גבוהות כן שההטלה והתפתחות הביצים והזחלים מתרחשות גם בטמפרטורה של 36°C (Mendel and Halperin, 1982). אוכלוסיית *O. erosus* בישראל היא ביגמית, כך שלרוב ניתן לראות שתי מחילות להטלת ביצים, שיוצאות מלשכת ההזדווגות (אחת לכל נקבה) ולאורך סיבי העץ (איור 1א). האוכלוסייה ממערב הים התיכון וזו שהתבססה בקליפורניה הן ברובן פוליגמיות, ובעלות

בהלימה לקוטרי הגזע המיטביים להתפתחותם. לפיכך, עצים בשנותיהם הראשונות מותקפים בעיקר על ידי *O. erosus*, *P. calcaratus* פועל בעיקר בגילי הביניים, ואילו בעומדים מבוגרים חלק ניכר מהגזע מאוכלס על ידי *T. destruens*. החלקים גבוהים מאוכלסים על ידי *O. erosus* וחלקי הגזע הקרובים לצמרת על ידי *P. calcaratus* ולעיתים מינים נוספים קטני ממדים.

רוב מחזור החיים של חיפושיות הקליפה מתקיים בתוך הסות בגזע העץ. שלבי התקיפה ויצירת המחילות על ידי הבוגרים והזחלים מלווים באכלוס הסות על ידי פטריות, בעיקר מהסוגים *Ophiostoma* ו-*Leptographium*, הנישאות על ידי הבוגרים (Kirisits, 2004; Dori-Bachash et al., 2015). פתוגנים אלה מחוללים נזק וגורמים לתמותת העצים בעקבות הרס מערכת הובלת המים של העץ. על פי מצב הסות ומשתנים נוספים ניתן להעריך את הזמן שעבר

אופיינית למיני השבט *Ipini* שמשתייכים אליו *O. erosus* ו-*P. calcaratus*). בניגוד לשני המינים האחרים, נמצא שההתקפות של *T. destruens* ברמת החלקה לא היו תלויות במצב הפיזיולוגי של העצים, אלא באופיו של מנגנון ההתקהלות על העצים המותקפים (Davi et al., 2020). בעוד שזכרים של *O. erosus* ו-*P. calcaratus* יוצרים את ההתקהלות באמצעות הפרשת פרומון ההתקהלות, מונוטרפנים וכהלים שהעץ מייצר בעקבות ניסיונות תקיפה של הבוגרים (Lieutier et al., 2016).

בתקיפה של עצי אורן בוגרים בישראל שלושת המינים מחלקים למעשה את הגזע ביניהם; *T. destruens* תוקף את קטעי הגזע התחתונים העבים, ולפיכך מחילות הזחלים מופיעות בעיקר בעובי הקליפה וכחות בעצה (איור 1). *O. erosus* תוקף את חלקי הגזע המרכזיים, ואילו *P. calcaratus* מאכלס את חלקי הגזע העליונים,



איור 1

גלריות של חיפושיות קליפה על גבי גזע חשוף של אורן ברוסיה

ניתן לזהות את המין שאכלס את העץ לפי דפוס הגלריה האופייני לו (Mendel et al., 1985; Mendel, 2000). א. *Orthotomicus erosus*; ב. *Pityogenes calcaratus*; ג. *Tomicus destruens*. משמאל איורים המתארים את הגלריות של כל מין, לפי Mendel (1985).

ושרפות. נסיבות אלה מחלישות את מנגנוני ההגנה של העץ, וכך מתאפשר אכלוס נוח של חיפושיות קליפה, שמסתיים על פי רוב במות העץ. עלייה בשכיחות העצים המוחלשים מובילה להתעצמות אוכלוסיית חיפושיות הקליפה ולהיווצרות צפיפות המאפשרת הכרעה של עצים בריאים (Lieutier et al., 2016). בישראל, אורן ירושלים ואורן ברוטיה בני 10–30 שנים חווים התפרצויות קשות של *O. erosus* ו-*P. calcaratus* בסוף הקיץ, ושל *T. destruens* בתחילת החורף ובסופו, בעיקר בעקבות פעולות דילול נמרצות ונרחבות (Mendel et al., 1985) (איור 2). כמו כן, נגיעות משמעותית בכנימת מצוקוקוס (*Matsucoccus josephi*) בעצי אורן ירושלים צעירים הופכת אותם ל"טרף קל" במיוחד עבור *P. calcaratus* (Mendel, 2000).

התמודדות עם אוכלוסיות של חיפושיות קליפה בראשית התעצמותן אפשרית באמצעות קטילה המונית של חיפושיות מתוך כוונה לדכא את התעצמות המזיק. השיטה הקלאסית של הפלת עצי מלכודת שימשכו אליהם את החיפושיות התגבשה באירופה במהלך המאה ה-17, עת התחוללו

מאז ההגנה. כמו כן, מצב העלווה של העץ עשוי להעיד על מועד ההתקפה ועל מין החיפושית. עץ שהותקף על ידי חיפושיות קליפה לא יראה סימנים לכך בתחילה. מחטי אורנים שהותקפו באביב או בקיץ על ידי *P. calcaratus* ו-*O. erosus*, משנות את צבען מירוק כהה לירוק בהיר ולאחר מכן לצהוב תוך מספר שבועות, ואז לאדמדם במהלך כחודשיים. לעומת זאת, עלוות העצים שנתקפו בחודשים אוקטובר ונובמבר, תחילה על ידי *O. erosus* ו-*P. calcaratus* ולאחר מכן על ידי *T. destruens*, שומרת על צבעה הירוק לאורך הסתיו והחורף עד לאביב הבא. עובדה זו מקשה על זיהוי עצים פגועים בזמן אמת (Lieutier et al., 2016).

שלושת מיני החיפושיות המתוארים לעיל נחשבים "טורפים מזדמנים" (Raffa et al., 1993), מכיוון שהם מתרבים בדרך כלל בעצים שנפלו או בעצים מוחלשים, אך מדי פעם הם מסוגלים לאכלס ולקטול גם עצים בריאים. הם תוקפים עצים בריאים רק כאשר קיימת באזור אוכלוסייה גדולה של עצים מוחלשים (Gaylord et al., 2010). הסיבות להיחלשות עצי אורן באגן הים התיכון מגוונות, וכוללות מיעוט משקעים



איור 2

תמותת עצים בשל התקפת חיפושיות קליפה ביער אשתאול בשנת 2017
צילום: עומר גולן

דפוס האכלוס ומיני חיפושיות הקליפה שאכלסו את העצים המתים שנותרו בחלקה.

שיטות וחומרים

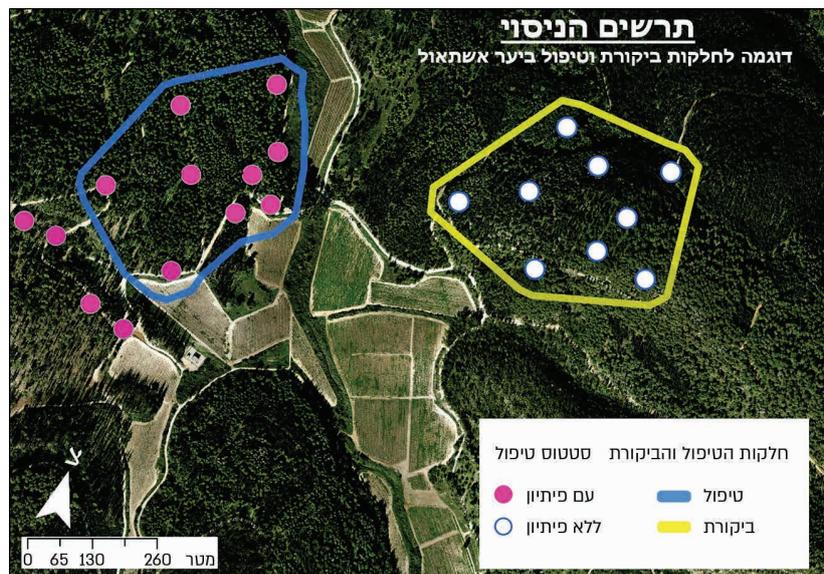
מערכת עצי מלכודת

ניסוי רחב היקף נערך ביערות אשתאול וצרעה. תכנון הניסוי כלל שבעה בלוקים כפולים (המחולקים למתחמי טיפול וביקורת) נטועים באורן ברוטיה, ושלושה עומדים דומים נוספים נטועים באורן ירושלים בשטח של 100–200 דונם לבלוק. גיל העצים נע בין 50 ל-70 שנה. כל בלוק חולק לשתי יחידות, האחת טיפול והשנייה ביקורת. מתחם הטיפול כלל לפחות 4–10 עצי מלכודת פעילים, ובמתחם הביקורת המקביל סומנו עצים שהיוו עצי מלכודת דמה (ללא הטיפול, ראו איור 3) בפיזור מרחבי דומה לזה של עצי המלכודת הפעילים ביחידת הטיפול. עצי המלכודת הפעילים או עצי הדמה היו במרחק של 90–140 מטר זה מזה, כתלות בצפיפות העצים ביער.

עצי המלכודת הפעילים הוכשרו לכך כדלקמן: הקליפה החיצונית גורדה והוברשה להסרה מרבית של קשקשי קליפה רפויים. לאחר מכן רוסס הגזע לאורכו עד 8 מטר מעל פני הקרקע בקוטל חרקים Talstar® בריכוז של 2% Bifenthrin 7.9%, Luxembourg (Industries, Tel) 2% Ipsowit ®) על עצים אלה נתלה פיתיון מסחרי (Standard, Witasek Co, Austria) שיוצר במקור כדי למשוך את חיפושית הקליפה של האשוחית, ונמצא מושך היטב גם את שני מיני חיפושיות הקליפה *O. erosus* ו-*P. calcaratus* (Mendel, 1988). הפיתיון נתלה על הגזע

התפרצויות ענק של חיפושית הקליפה של האשוחית (*Ips typographus*), שקטלו מיליוני עצי אשוחית במרכז היבשת (Gmelin, 1787). נמצא בעבר כי עצי מלכודת מרכזים את החיפושיות סביבם ומגבילים את פיזורן (Klutsch et al., 2017). לקראת סוף המאה ה-20 התגבשה תשתית מדעית להתמודדות עם חיפושיות קליפה בזכות זיהוי פרומני ההתקהלות של המינים החשובים ושילובם במלכודות המתואמות ללכידה המונית. כמו כן, השתפרה קטלניות עצי המלכודת באמצעות ריסוס הגזעים בתכשירי הדברה (Smith et al., 1986, El-Sayed et al., 2006; Borden et al., 2008; Seybold et al., 2018).

התפתחות אוכלוסיות גדולות של חיפושיות קליפה על עצי אורן מוחלשים צפויה להחמיר בשל היובש והטמפרטורות הגבוהות באגן הים התיכון, ומדובר בתרחיש מציאותי החוזה קטילה המונית של עצים בריאים. זוהי גם הנחת המוצא של מחקר זה. עד כה טרם פורסם מחקר מקיף בניסיון לברר את חלקן של חיפושיות הקליפה בתמותת עצי אורן בישראל. במחקר זה נבחנה מעורבותם של מיני חיפושיות הקליפה המקומיים בתמותת עצי אורן ברוטיה ואורן ירושלים ביער הישראלי על רקע תנאי אקלים צחיח למחצה. הבחינה נערכה במסגרת שתי מערכות ניסוי; במערכת הראשונה נבחנה מידת מעורבותן של חיפושיות הקליפה באמצעות צמצום אוכלוסייתן על ידי עצי מלכודת. שאלת המחקר הייתה אם ניתן לצמצם את תמותת עצי האורן במהלך הקיץ באמצעות לכידה המונית של *O. erosus* ו-*P. calcaratus*, מינים הפעילים בעונה החמה. במערכת הניסוי השנייה נבחנה מעורבות חיפושיות הקליפה באמצעות אפיון האכלוס של עצי אורן ברוטיה בוגרים בשני עומדים. שאלת המחקר במערכת זו הייתה אם ניתן לקבוע את תקופת האכלוס ואת מצב העצים שקדם לאכלוס על פי



איור 3

דוגמה לאחד הזוגות הכוללים מתחם טיפול וסמוך לו מתחם ביקורת ביער אשתאול

במאמר קודם בגיליון זה (אטיאס ושות', 2022). בהרטוב נדגמו 22 עצים מתים, ובצרעה נדגמו 27 עצים שמתו במהלך ארבע השנים שקדמו לדגימה. לשם קביעת מיני חיפושיות הקליפה המעורבים בתמותה וצפיפות האכלוס, נכרתו העצים המתים, וקטעי קליפה בשטח של 800–1,000 סמ"ר נותקו מהגזע בשלושה גבהים מפני הקרקע; נמוך (1.3 מטר), אמצע (4.5 מטר) וגבוה (7.5 מטר). העצה החשופה של מקטע הגזע וצידה הפנימי של הקליפה שהוסרה נבדקו. הם צולמו עם סרט מידה ונמדדו להערכת צפיפות הגלריות עבור כל אחד משלושת מיני חיפושיות הקליפה. גם שנת התמותה נקבעה לפי ניתוח הטבעות השנתיות (אטיאס ושות', 2022).

ניתוח סטטיסטי

תוצאות מחקר זה נותחו באמצעות תוכנת JMP 14 (SAS Institute, Inc., Cary, North Carolina). השפעת עצי המלכות על התמותה של עצי האורן נבדקה באמצעות ניתוח דו-גורמי של כל בלוק ויחידות המשנה של מתחמי הטיפול והביקורת הנכללים בו (מערכת ניסוי ראשונה). ההשוואה בין קבוצות העצים שנקטלו במהלך מספר שנים בשני עומדי אורן ברוטיה נערכה במבחן one-tailed Student's t-test (מערכת ניסוי שנייה).

תוצאות

הפחתת תמותת עצי אורן באמצעות עצי מלכות
באופן כללי, תמותת העצים הייתה מועטה בכל עשרת הבלוקים (עד 2.9%). השפעתם של עצי המלכות על תמותת העצים ביער נמדדה באמצעות שני משתנים: (א)

בגובה 2.5 מטר לפחות מעל פני הקרקע. ההצבה החלה ביולי 2018, והפיתיון הוחלף כל 5 שבועות עד סוף אוקטובר 2018. בתחילת דצמבר התבצעו צילומי אוויר של שטח הניסוי ברזולוציה של פיקסל אחד לכל 6 סנטימטרים בגובה 120 מטר מעל פני הקרקע (אופק צילום אוויר, רחובות, ישראל). עצים שמתו במהלך תקופת הניסוי (נתקפו בין יולי לאוקטובר 2018) זוהו על פי צבע הכותרת החום-אדמדם האופייני להם בעת הצילום. הם הופרדו בסקר מעצים חיים ומעצים שנקטלו בעונות החמות הקודמות. מהימנות הזיהוי באמצעות צילומי האוויר אומתה באמצעות בדיקה קרקעית מדגמית של כ-15% מסך כל העצים המתים בשטח המחקר. כל העצים שמתו נספרו בכל מתחם טיפול או ביקורת. נוסף על כך, נספרו באופן נפרד עצים מתים ברדיוס של 50 מטר סביב כל עץ מלכות פעיל או דמה (איור 4).

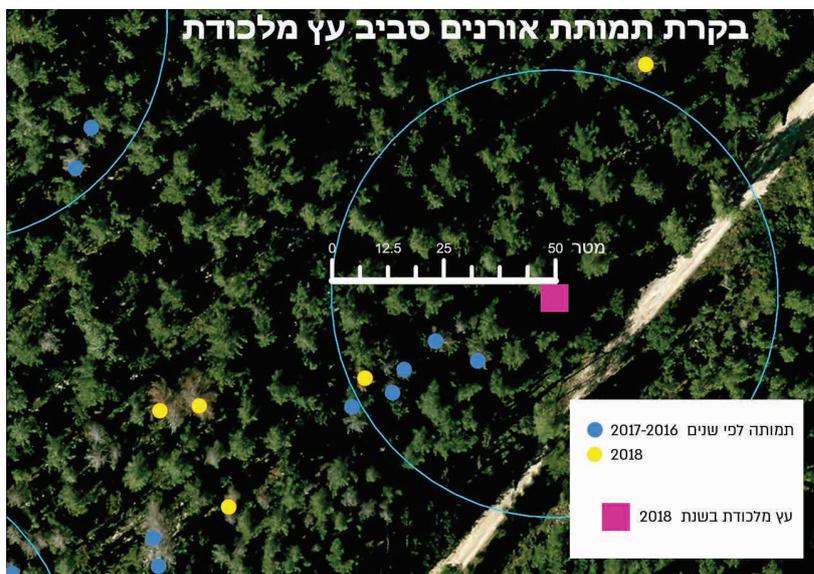
ניטור החיפושיות הפעילות בתקופת הניסוי שתואר לעיל נעשה באמצעות מלכודות משפך מטיפוס לינדגרן (Synergy Semiochemicals LTD, British Columbia, Canada). 12 מלכודות הוצבו באשתאול ו-12 ביער צרעה ביולי 2018. למלכודות הוכנסו פיתיונות מסחריים (Ipsowit® Standard, Witasak Co, Austria) שהוחלפו בחדשים אחת לשלושה שבועות, בעת איסוף החיפושיות שנתפסו ונספרו. ממוצע מספר הפרטים של *O. erosus* ו-*P. calcaratus* שנלכדו חושב עבור כל אחד מהבלוקים שבניסוי.

אפיון דפוס האכלוס

התצפית התבצעה בעומדים נטועים של אורן ברוטיה ביער צרעה שבשפלת יהודה, 'הרטוב' ו'צרעה'. במחקר המתואר כאן נכללו נתוני גדילת הרוחב (המתבטאת בעובי הטבעות השנתיות) שהושאו בין עצים מתים לבין עצים חיים ודווחו

איור 4

הצגת עצי אורן שאוכלסו בחיפושיות קליפה, בשנים 2016–2017 טרם ביצוע הניסוי, ובקיץ 2018 במהלך הניסוי
המעגל המסומן מייצג את טווח ההשפעה ברדיוס של 50 מטר סביב עץ המלכות. כמו כן, נותחה התמותה שהתקבלה בכל המתחם.



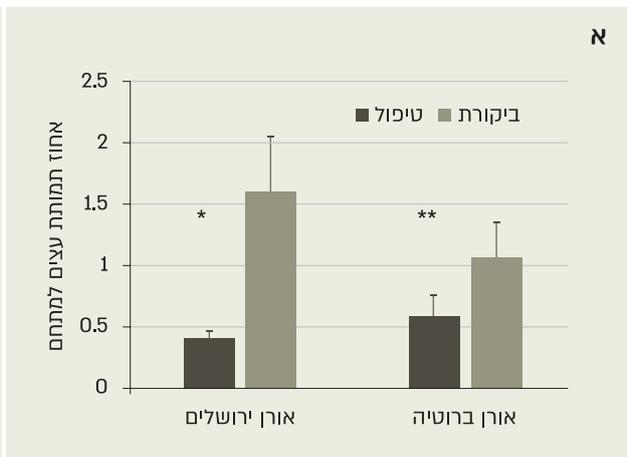
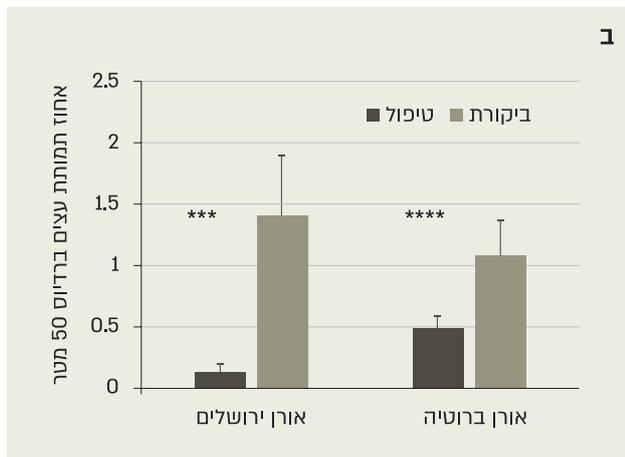
לעומת אלה סביב עצי הדמה (איור 5ב). השפעת הטיפול על התמותה של אורן ירושלים הייתה משמעותית יותר ($P < 0.0001$) מהשפעתו על אורן ברוטיה ($P = 0.0155$).

נתוני מלכודת הניטור הראו כי *O. erosus* היה שכיח יותר לאין שיעור במהלך הקיץ מאשר *P. calcaratus*, ששיעורו בלכידה עלה עם בוא הסתיו (איור 6).

אפיון דפוס אכלוס העצים בחלקות הרטוב וצרעה

תמותת העצים בחלקות הרטוב וצרעה הייתה קשורה בעיקר לאכלוס על ידי *P. calcaratus* ו-*T. destruens*, ובאופן מפתיע נמצאו רק מספר גלריות בודדות של *O. erosus* בשניים מהעצים המתים (טבלה 1). נראה כי מרבית העצים

היחס בין מספר כלל העצים המתים לשאר העצים במתחם עצי המלכודת הפעילים / מתחם ביקורת של הבלוק; (ב) היחס בין העצים המתים ברדיוס של 50 מטר סביב עץ מלכודת (פעיל או דמה, בהתאמה לסוג המתחם) לשאר העצים. לא נמצא מתאם בין שיעור התמותה במתחם לגיל העץ או לצפיפות העצים בבלוק (התוצאות לא מוצגות). יחס העצים המתים לסך כל העצים הנטועים הראה כי תמותת העצים הכללית הייתה קטנה באופן משמעותי במתחמים שטופלו בעצי מלכודת בהשוואה למתחמי הביקורת ($P = 0.026$) (= ללא תלות במין העץ (איור 5א)). ניתוח תמותת העצים בהתאמה למין האורן ברדיוס של 50 מטר סביב עץ מלכודת הצביע על פחיתה משמעותית בתמותת העצים בשני מיני האורן סביב עצי המלכודת הפעילים המטופלים



איור 5

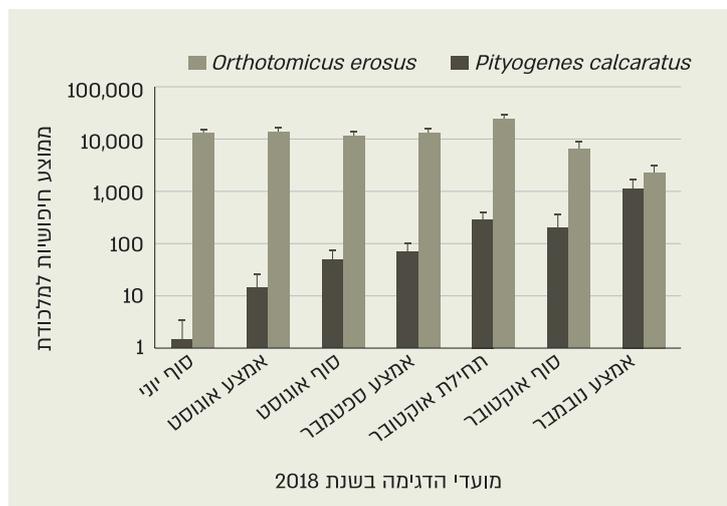
השפעת עצי מלכודת על שיעור תמותת עצי אורן בשפלת יהודה במהלך קיץ-סתיו 2018

א. הבדלים מובהקים בשיעור תמותת אורן ירושלים ואורן ברוטיה בין מתחמי הטיפול (עצי מלכודת פעילים) למתחמים ללא טיפול (עצי מלכודת דמה) מצוינים ב- * ($P = 0.0319$) וב- ** ($P = 0.3389$). ב. שיעור תמותת אורן ירושלים ואורן ברוטיה ברדיוס של 50 מטר מעץ הטיפול או הביקורת. הבדלים מובהקים בין מתחמי הטיפול למתחמי ביקורת מצוינים ב- *** ($P < 0.0001$) וב- **** ($P = 0.0155$). קווי השגיאה מייצגים את שגיאת התקן.

איור 6

ניטור עונתי של *O. erosus* ו-*P. calcaratus* באמצעות מלכודות משפך מסוג לינדגרן ביערות שפלת יהודה בשנת 2018

המלכודות מולאו בפיתיונות מסחריים (Ipsowit © Standard, Witasek Co אוסטריה) שהוחלפו בחדשים אחת לשלושה שבועות. קווי שגיאה מציינים שגיאת תקן.



מידת האלימות של מיני חיפושיות של האורן האופייניים לאגן הים התיכון, ועד כמה הם מהווים גורם ישיר לתמותת העצים. שאלה זו לא התבררה בעבר בעיקר בשל הקושי האובייקטיבי להפריד בין הגורמים המשפיעים על מצבו הפיזיולוגי של האורן לבין המשמעות של רמת האוכלוסייה של החיפושיות ביער. כלומר, נותר ספק אם עץ האורן היה מת גם ללא מעורבות חיפושיות הקליפה. מעקב אחר התפרצויות של אוכלוסיות החיפושיות בישראל ובמקומות אחרים באגן הים התיכון הצביע על קשר נסיבתי ברור בין עליית האוכלוסיות ובין היקף התמותה, בדרך כלל בסמיכות לאירועי יובש. עם זאת, הדיווחים לא הובילו למסקנות ברורות לגבי השפעת החיפושיות, ובאיזו מידה אוכלוסיות גדולות של חיפושיות קליפה שהתפתחו על עצים מוחלשים יגרמו להתקפות שעלולות לגרום לקטילה המונית של עצים בריאים שהיו מתאוששים ללא קושי רב עם סוף תקופת היובש. במחקר זה יצאנו מנקודת הנחה ששני המצבים אפשריים, כלומר, חיפושיות הקליפה אכלסו עצים שלא היו מתאוששים, אך גם כאלה שאלמלא ההתקפה היו שורדים.

אוכלסו על ידי *P. calcaratus* בחלקו העליון של הגזע, ומין זה היה הנפוץ בשני העומדים עד שנת 2017. כל העצים שמתו בשנת 2014 בשני העומדים, ועצים שמתו בשנת 2015 בעומד צרעה, הציגו פעילות של *P. calcaratus* בחלק העליון של הגזע, באמצעו, ובחלק מאזורי הגזע התחתונים. בשנת 2016 *P. calcaratus* שלט בשתי חלקות המחקר, כשהוא מאכלס את כל חלקי הגזע, בעוד שגלריות מעטות של *T. destruens* תועדו בחלק התחתון והאמצעי של הגזע. בעצים שמתו בשנת 2018 בשני העומדים לא נמצאו גלריות של *P. calcaratus* בחלקים האמצעי והתחתון, אלא רק בחלקו העליון של הגזע בחלק מהעצים (טבלה 1).

דיון

אין ספק שאכלוס עצים פונדקאים באוכלוסיות לטנטיות של חיפושיות קליפה ביער הוא פועל יוצא של מצבו הפיזיולוגי הירוד של העץ. השאלה היערנית נסובה סביב

צרעה		הרטוב		מקטע	שנת תמותה
<i>T. destruens</i>	<i>P. calcaratus</i>	<i>T. destruens</i>	<i>P. calcaratus</i>		
0	15	0	7.5 ± 1.3 (4)	עליון	2018
15 (1)	0	5.3 ± 1.3 (4)	0	אמצעי	
14 (1)	0	7.3 ± 0.7 (4)	0	תחתון	
0	18 ± 3.1 (4)	4 (1)	10.7 ± 1.9 (3)	עליון	2017
0	17.3 ± 2.9 (4)	5 ± 0.7 (2)	21 (1)	אמצעי	
6 (1)	10 ± 0 (10)	7.5 ± 0.4 (2)	0	תחתון	
0	18.9 ± 2.6 (8)	0	10 ± 1.2 (8)	עליון	2016
10 (1)	13.0 ± 1.3 (8)	0	14.3 ± 3.1 (6)	אמצעי	
4.5 ± 0.6 (3)	19.0 ± 5.0 (2)	6.2 ± 0.4 (4)	20 ± 2.8 (2)	תחתון	
0	18.3 ± 3.3 (4)	0	0	עליון	2015
0	13.3 ± 1.8 (6)	0	0	אמצעי	
0	13.0 ± 2.4 (4)	0	0	תחתון	
0	20.8 ± 1.9 (4)	0	11.3 ± 1.1 (4)	עליון	2014
0	10.3 ± 0.1 (3)	0	9.5 ± 0.3 (3)	אמצעי	
0	7.0 ± 5.6	0	0	תחתון	

טבלה 1

צפיפות הגלריות של *P. calcaratus* ו-*T. destruens* בעצי אורן ברוטיה לפי שנת תמותה בחלקות צרעה והרטוב

הצפיפות חושבה לפי גלריות ל-100 סמ"ר. צפיפות הגלריות בחלקו העליון, האמצעי, והתחתון של הגזע (7.5, 4.5, ו-1.3 מטר מגובה פני הקרקע, בהתאמה) חושבה כממוצע של מספר העצים (המצויין בסוגריים) שתועד בהם אכלוס בחיפושיות קליפה בגובה הנבדק, ± מצוין את שגיאת התקן.

של חיפושיות ממינים שנחשבים לאגרסיביים פחות – *P. calcaratus* ו-*T. destruens* – בתמותת עצים.

לפי התחזית הרווחת כיום, הקיץ צפוי להתארך בכ-50% באזור מזרח הים התיכון, ואילו החורף צפוי להתקצר ב-56% עד סוף המאה הנוכחית (Hochman et al., 2018). לשינויים הצפויים הללו עשויה להיות השפעה דרמטית על הדינמיקה של אוכלוסיית חיפושיות הקליפה באזור, וזאת נוסף על השפעה על מדדי צימוח העצים.

אוכלוסיית חיפושית קליפה לטנטית ויציבה חיונית לשימור בריאות יערות האורן (Lieutier et al., 2016). המעבר לשלב ההתפרצות בעומדי יער בוגרים מתרחש לעיתים קרובות עקב שינוי אביוטי; לדוגמה, עליית טמפרטורות המאפשרת עלייה בהישרדות ובהתפשטות של חיפושית קליפה, בעיקר של מיני *Dendroctonus* (Zhou et al., 2019). אחת הדוגמאות הבולטות להפרת מאזן כזו היא העלייה החדה בהיקף התמותה של אורן פונדרוסה *P. ponderosa* בסיירה נבדה (ארה"ב) בעקבות הבצורת הקשה של 2012–2015. רוב העצים נקטלו על ידי *D. brevicomis* בשנת 2015, השנה החמה והיבשה ביותר שתועדה באזור זה (Fettig et al., 2019). חיפושית קליפה נוספת שגרמה לתמותת עצים נרחבת היא *D. ponderosae* שהתפשטה והרסה שטחי ענק של *P. contorta* (lodgepole pine) בקולומביה הבריטית (קנדה) (Meddens et al., 2012). נראה כי שינוי אקלים בכלל ועליית הטמפרטורות בפרט, משפיעים באופן חד על התעצמות האוכלוסיות של מיני חיפושית קליפה אלה (Bentz et al., 2010).

ההשפעה הישירה של שינוי האקלים על חיפושיות הקליפה של האורן בישראל טרם התבררה כראוי. קיים חשש כי היחלשות עצי האורן בשל תנאי היובש המחמירים תוביל להתעצמות אוכלוסיותיהן. בהמשך שינוי זה עלול לגרום לאכלוס עצים בריאים ולהפרת שיווי המשקל הקיים בין חיפושיות הקליפה לבין עצי האורן.

מסקנות המחקר

ממצאי המחקר הנוכחי מצביעים על כך שצמצום אוכלוסיית חיפושיות קליפה, בעיקר *O. erosus* ו-*P. calcaratus* אכן מעשי בהיקפים של אלפי דונמים בודדים ביערות המחט בישראל, ופרקטיקה זו עשויה לסייע בצמצום היקף התמותה של עצי אורן. על הצמצום להתבצע כך שאופן פיזור עצי המלכודת יותאם להבטחת יעילותם ולמניעת נזק היקפי לעצים סמוכים. תוצאות המחקר מדגימות את עובדת היותן של חיפושיות קליפה גורם חשוב בתמותת עצי אורן בשפלת יהודה. עם זאת, ניתן לראות בחיפושיות קליפה גורם ברירה, המתיר בעומד את העצים שמתמודדים טוב

התרחשות כל אחד משני המצבים תלויה בתנאי בית הגידול, כלומר במצבם הפיזיולוגי של העצים או בצפיפות אוכלוסיית החיפושיות.

במחקר זה הראינו שצמצום אוכלוסיית חיפושיות הקליפה באמצעות עצי מלכודת הפחית את היקף תמותת העצים במתחמים המטופלים (איור 3). נראה שההשפעה העיקרית של עצי המלכודת הייתה על אוכלוסיית *O. erosus* (איור 4), מין חיפושית הקליפה העיקרי ביערות אורן באזורים הנמוכים באגן הים התיכון (Mendel et al., 1985; Mendel et al., 2016; et al., 1992). מכאן, ש-*O. erosus* גרם במישורן לתמותה והיה הגורם העיקרי המחולל אותה. כלומר, הפחתת התמותה בעומדים המטופלים מוכיחה כי חיפושיות הקליפה הן גורם משמעותי במותם של עצים רבים, ולא רק תסמין למצבם הפיזיולוגי הירוד.

עם זאת, מיני חיפושיות הקליפה שאכלסו את עצי האורן בחלקות הרטוב וצרעה היו *P. calcaratus* ו-*T. destruens*, ואילו *O. erosus*, שמוכר כמין הנפוץ ביותר, כמעט נעדר מהן לחלוטין. שני המינים הראשונים מעופפים בטמפרטורות נמוכות יותר מאשר *O. erosus* (Mendel et al., 1985; Mendel et al., 2005; Ghaïoule et al., 1998; Faccoli et al., 2005), והעלייה בשכיחות של *P. calcaratus* בסתיו ובתחילת החורף ניכרת מתוצאות הלכידה במלכודות משפך (איור 4). היות ש-*T. destruens* תוקף את עצי האורן לצורך רבייה בראשית החורף ובסופו, המסקנה היא כי עצי אורן ברוטיה בחלקות צרעה והרטוב אוכלסו על ידי שני מינים אלה בעונות המעבר ובחורף (אוקטובר–מאי). לפיכך חוזרת ועולה השאלה באיזו מידה *P. calcaratus* ו-*T. destruens* היו גורם ישיר לתמותת העצים. כל עצי אורן ברוטיה שמתו בשנת 2014 ו-2015 אוכלסו על ידי *P. calcaratus* (טבלה 1). עצים אלה הציגו דפוס צימוח ירוד לאורך כל חייהם כפי שדווח במאמר קודם (אטיאס ושות', 2022). *P. calcaratus* מאכלס תחילה את חלקו העליון של הגזע, שהוא גם המקטע הראשון שנפגע מן היובש, ולעיתים העץ חוזר ומתאושש גם לאחר שאיבד את קצה הצמרת. תצפית זו מרמזת כי האוכלוסייה המקומית של *P. calcaratus* הייתה תסמין לעקת המים הקשה שחוו העצים. העובדה כי עצים אלה לא אוכלסו על ידי *O. erosus* מעידה על כך שהעצים היו עדיין חיוניים במחצית השנייה של הקיץ. נראה כי על רקע התמותה של העצים בשנים הקודמות והחל משנת 2016, התפתחה בחלקות אורן הברוטיה במערך הניסוי השני אוכלוסייה של *T. destruens* שאכלסה כצפוי את חלקיו התחתונים של העץ. תופעה זו ניתנת להסבר בכך שהחולשה הפיזיולוגית שאפשרה את התמותה, התפתחה רק לקראת הסתיו, וכך נמנעה למעשה פעילות של *O. erosus* בחלקות. לפיכך, מעורבות חיפושיות הקליפה כגורם ישיר בתמותה בחלקות אלה לא הוכח. מצד שני, נראה כי שינוי האקלים בעשור אחרון מאפשר מעורבות

הבעת תודה

מחקר זה בוצע במימון קרן קימת לישראל, תוכנית מספר 10-03-4387-18, ובתמיכת מלגת רנה קרשון לרותם אטיאס. אבקש להודות לאנשי צוות אזור חוף-שפלה על שיתוף הפעולה והקצאת הזמן והמשאבים לביצוע המהלך בשטח: למנהל האזור גלעד מסטאי, ליערנים איתמר דרוך, נורית היבשר ויוסי שרואני, לאנשי תא ההנדסה בשנות המחקר ניתאי זכריה ואלברט סקריפניקוב, לשמי אלביליה ולמגן מנצור על תמיכתם בביצוע המיזם. תודתנו שלוחה לד"ר מיכאל ספרינצין אשר קידם את היבטי הממ"ג שאפשרו תכנון ושליטה מיטביים.

יותר עם עקת יובש, כל עוד נשמר האיזון בין גודל אוכלוסיות חיפושיות הקליפה לבין בריאות עצי היער. החשש הוא כי היחלשות העצים בעקבות תקופות יובש ארוכות, שצפויות להחמיר עקב שינוי האקלים, עלולה להוביל לגידול אוכלוסיות חיפושיות הקליפה, ולכך יהיו השלכות הרות אסון על היקר תמותת עצי אורן. לנוכח חשש זה גוברת חשיבות הבנת הגורמים המובילים לירידה בבריאות העץ ולמותו, והבנה זו הכרחית להליך קבלת ההחלטות בניהול היער, בהתאם למסקנות קודמות (אטיאס ושות', 2022). מחקר זה מדגים את הצורך בהתערבות פעילה כאשר מסתמנת סכנה של התפרצות המונית של חיפושיות קליפה.

מקורות

- Fettig CJ, Mortenson LA, Bulaon BM, and Foulk PB. 2019. Tree mortality following drought in the central and southern Sierra Nevada, California, U.S. *Forest Ecology and Management*, 432, 164–178.
- Gaylord ML, Hofstetter RW, and Wagner MR. 2010. Impacts of silvicultural thinning treatments on beetle trap captures and tree attacks during low bark beetle populations in ponderosa pine forests of northern Arizona. *Journal of Economic Entomology*, 103(5), 1693–1703.
- Geertsema H. 1979. Insect problems in South African forest plantations. *Wood Southern Africa*, August, 33–36.
- Gmelin JF. 1787. *Abhandlung über die Wurmtröcknis*. Leipzig: Cruisiuschen.
- Ghaïoule D, Abourouh M, Bakry M, and Haddan M. 1998. Insectes ravageurs des forêts au Maroc. *Annales de la Recherche Forestière Au Maroc*, 31, 129–156.
- Halperin J and Holzschuh C. 1984. Contribution to the knowledge of bark beetles (Coleoptera :Scolytoidea) and associated organisms in Israel. *Israel Journal of Entomology* 18, 21–37.
- Hochman A, Harpaz T, Saaroni H, and Alpert P. 2018. The seasons' length in 21st century CMIP5 projections over the eastern Mediterranean. *International Journal of Climatology*, 38(6), 2627–2637.
- Kirisits T. 2004. Fungal associates of European bark beetles with special emphasis on the Ophiostomatoid fungi. In: Lieutier F, Day KR, Battisti A, Grégoire J-C, and Evans HF (Eds). *Bark and Wood Boring Insects in Living Trees in Europe, a Synthesis*. Dordrecht: Springer Netherlands. pp 181–236.
- Klutsch JG, Cale JA, Whitehouse C, Kanekar SS, and Erbilgin N. 2017. Trap trees: An effective method for monitoring mountain pine beetle activities in novel habitats. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(10), 1432–1437.
- Lieutier F, Mendel Z, and Faccoli M. 2016. Bark beetles of Mediterranean conifers. In: Paine TD and Lieutier F (Eds). *Insects and Diseases of Mediterranean Forest Systems*. Cham: Springer International Publishing. pp 105–197.
- Mazur A, Witkowski R, Lomidze N, and Mendzikowski J. 2020. Notes on distribution of *Pityogenes calcaratus* (Eichhoff, 1878) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in Georgia. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 19(4), 183–185.
- אטיאס ר, גולן ע, אלון א, אלרן מ, רגב ל, בוארטו א ושות'. 2022. הזיקה בין הישרדות של עצי אורן ברוטיה לבין תבנית גדילת רוחב רב-שנתית. *יער*, 22, 60–70.
- הלפרין י. 1978. הקמבית בלסטופגוס ומניעת נזקיה באורנים. *ליערן*, 28(1–4), 20–28.
- Balachowsky AS. 1949. *Coleopteres, Scolytides*. Paris: P. Lechevalier.
- Bentz BJ, Régnière J, Fettig CJ, Hansen EM, Hayes JL, Hicke JA, et al. 2010. Climate change and bark beetles of the Western United States and Canada: Direct and indirect effects. *BioScience*, 60(8), 602–613.
- Borden JH, Pureswaran DS, and Lafontaine J-P. 2008. Synergistic blends of monoterpenes for aggregation pheromones of the Mountain Pine Beetle (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Economic Entomology*, 101(4), 1266–1275.
- Branco M, Pereira JS, Mateus E, Tavares C, and Paiva MR. 2010. Water stress affects *Tomicus destruens* host pine preference and performance during the shoot feeding phase. *Annals of Forest Science*, 67, 608.
- Carle P. 1975. Problèmes posés par les ravageurs xylophages des conifères en forêt méditerranéenne. *Revue Forestière Française*, 27(4), 283–296.
- Davi H, Durand-Gillmann M, Damesin C, Delzon S, Petit C, Rozenberg P, et al. 2020. Distribution of endemic bark beetle attacks and their physiological consequences on *Pinus halepensis*. *Forest Ecology and Management*, 469, 118187.
- Dori-Bachash M, Avrahami-Moyal L, Protasov A, Mendel Z, and Freeman S. 2015. The occurrence and pathogenicity of *Geosmithia* spp. and common blue-stain fungi associated with pine bark beetles in planted forests in Israel. *European Journal of Plant Pathology*, 143(4), 627–639.
- El-Sayed AM, Suckling DM, Wearing CH, and Byers JA. 2006. Potential of mass trapping for long-term pest management and eradication of invasive species. *Journal of Economic Entomology*, 99(5), 1550–1564.
- Faccoli M. 2007. Breeding performance and longevity of *Tomicus destruens* on Mediterranean and continental pine species. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 123(3), 263–269.
- Faccoli M, Battisti A, and Masutti L. 2005. Phenology of *Tomicus destruens* (Wollaston) in northern Italian pine stands. In: Lieutier F and Ghaïoule D (Eds). *Entomological Research in Mediterranean Forest Ecosystems*. Paris: INRA Editions. pp 185–193.

- Özkazanç O, İktüeren S, and Yücel M. 1985. Studies on the biology and control of *Orthotomicus erosus* (Woll.) in Mediterranean and Aegean regions. *Ormancilik Arastirma Enstitüsü Yayinlari*, 152, 1–56.
- Raffa KF, Phillips TW, and Salom SM. 1993. Strategies and mechanisms of host colonization by bark beetles. In: Schowalter TD and Filip GM (Eds). *Beetle-Pathogen Interactions in Conifer Forests*. San Diego: Academic Press. pp 103–128.
- Seybold SJ, Bentz BJ, Fettig CJ, Lundquist JE, Progar RA, and Gillette NE. 2018. Management of Western North American bark beetles with semiochemicals. *Annual Review of Entomology*, 63(1), 407–432.
- Seybold SJ, Penrose RL, and Graves AD. 2016. Invasive bark and ambrosia beetles in California Mediterranean forest ecosystems. In: Paine TD and Lieutier F (Eds). *Insects and Diseases of Mediterranean Forest Systems*. Cham: Springer International Publishing. pp 583–662.
- Smith RH. 1986. Trapping western pine beetles with baited toxic trees. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Research Note PSW-382.
- Zhou YT, Ge XZ, Zou Y, Guo SW, Wang T, and Zong SX. 2019. Climate change impacts on the potential distribution and range shift of *Dendroctonus ponderosae* (Coleoptera: Scolytidae). *Forests*, 10(10), 860.
- Meddens AJH, Hicke JA, and Ferguson CA. 2012. Spatiotemporal patterns of observed bark beetle-caused tree mortality in British Columbia and the western United States. *Ecological Applications*, 22(7), 1876–1891.
- Mendel Z. 1988. Attraction of pine bark beetles to the synthetic aggregation pheromone formulation of *Orthotomicus erosus* and *Ips typographus*. *Phytoparasitica*, 16, 109–117.
- Mendel Z. 2000. The phytophagous insect fauna of *Pinus halepensis* and *P. brutia* forests in the Mediterranean. In: Ne'eman G and Trabaud L (Eds). *Ecology, Biogeography and Management of Mediterranean Pine Forest Ecosystems* (1 ed.). Leiden: Wil R. Peters-Backhuys. pp 217–237.
- Mendel Z, Boneh O, and Riov J. 1992. Some foundations for the application of aggregation pheromone to control pine bark beetles in Israel. *Journal of Applied Entomology*, 114, 217–227.
- Mendel Z, Branco M, and Battisti A. 2016. Invasive sap-sucker insects in the Mediterranean Basin. In: Paine TD and Lieutier F (Eds). *Insects and Diseases of Mediterranean Forest Systems*. Cham: Springer International Publishing. pp 261–291.
- Mendel Z and Halperin J. 1982. The biology and behavior of *Orthotomicus erosus* in Israel. *Phytoparasitica*, 10(3), 169–181.
- Mendel Z, Madar Z, and Golan Y. 1985. Comparison of the seasonal occurrence and behavior of seven pine bark beetles (Coleoptera: scolytidae) in Israel. *Phytoparasitica*, 13(1), 21–32.

תחנות המחקר והניטור ארוכי הטווח של קק"ל – חשיבותן לממשק מותאם ולבקרה על התהליכים במערכת האקולוגית לנוכח שינוי האקלים

שילי דור-חיים^{1,2*} | יגיל אסם³ | תמיר קליין⁴ | אלי ארגמן⁵ | ניצן שגב¹ | אסף קרואני⁶

- 1 מו"פ מדבר וים המלח
- 2 המכון לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
- 3 המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי-מרכז וולקני
- 4 המחלקה למדעי הצמח והסביבה, מכון ויצמן למדע
- 5 התחנה לחקר הסחף, משרד החקלאות ופיתוח הכפר
- 6 אגף הייעור, קק"ל
- * shaylidh@post.bgu.ac.il

מבוא

האקולוגיה (כדוגמת שינוי נופי, שינוי בהרכב המינים ועוד), וכן לעקוב אחר תפקודה, ויציבותה של המערכת האקולוגית לנוכח שינוי האקלים. הידע שנצבר ממחקרים אלה מאפשר להבין כיצד המערכת פועלת ולשחזר תהליכים המתקיימים בה, לדוגמה – נגר עילי במערכות מדבריות. המידע הנאסף במסגרת מערך המחקר מסייע בהערכת הבריאות והחיוניות של היער, בכימות שירותי המערכת וגם בניהול היער או השטח הפתוח באופן בר-קיימא. הקשר בין תוצאות המחקרים והניטור ארוך הטווח לממשק הוא נדבך מרכזי בניהול שטחי קק"ל. במאמר זה נסקור את המחקר בתחנות המחקר ארוך הטווח, כבסיס לסדרת מאמרים שיעסקו במחקר בתחנות אלה. המחקר האקולוגי ארוך הטווח יוצר בסיס מידע להתמודדות של ישראל עם שינוי האקלים וליכולת לתת מענה לשאלות ולאתגרים מרכזיים בנושא זה. הממצאים משמשים עוגן לביצוע פעילויות ממשק שמטרתן העיקרית היא התמודדות עם בצורות ושיטפונות (Pratt et al., 2014).

מערך המחקר ארוך הטווח (Long Term – LTER Ecological Research) בקק"ל הוקם לפני כ-30 שנה עם תחנת המחקר הראשונה, פארק סיירת שקד. המטרה הייתה פיתוח דרכי ממשק של מערכות אקולוגיות יובשניות וחקר פעולות ממשק באזורים יובשניים ובתנאים של אקלים משתנה. במהלך השנים הורחב המערך, ונוספו תחנות מחקר ארוך טווח נוספות באזורים עם מערכות אקולוגיות מגוונות המצויות בניהול קק"ל, כמו יערות וסוגים שונים של שטחים פתוחים. כמו כן, נוספו חלקות ניטור ארוך טווח (Long Term Monitoring). כיום המערך כולל חמש תחנות מחקר ארוך טווח (איור 1) וכ-80 חלקות ניטור ארוך טווח שמודדות פרמטרים כמו כמות הגשם, עומק חלחול מי הגשם, אחוז המים בקרקע, הרכב מיני צומח ושטפי חומר ואנרגיה (כמו קיבוע פחמן וייצור ביומסה). מטרת מערך המחקר והניטור ארוכי הטווח היא לסייע בהבנת תהליכים (למשל מדבור) והשפעתם על מבנה המערכת

כחלק מפיתוח מערך המחקר והניטור בקק"ל ומהתאמתו למטרות, ליעדים ולצרכים של מערך הייעור, נערכה חשיבה משותפת של נציגי אגף הייעור עם המנהלים המדעיים של תחנות המחקר ארוך הטווח בקק"ל. בתום התהליך גיבשה כל תחנה מטרות-על ארוכות טווח, מטרות ביניים ומדדים לניטור ארוך טווח. בשנת 2014 החל מערך המחקר לאסוף מידע מתחנות המחקר באמצעות פרוטוקולים אחידים, כדי שתתאפשר השוואה ביניהן. להלן סקירה מפורטת של המחקר שנעשה בתחנות המחקר.

הרשת העולמית של תחנות המחקר האקולוגי ארוך הטווח

תחנות המחקר ארוך הטווח (LTER) של קק"ל (אתר קק"ל) הן חלק מרשת LTER ישראל (אתר רשת LTER ישראל). התחנות הן חלק מהרשת האזורית האירופית (eLTER) ומהרשת הבין-לאומית למחקר אקולוגי ארוך טווח (רשת ILTER). הרשת הבין-לאומית מורכבת ממערך של תחנות מחקר במדינות שונות. מדענים מעורבים במחקר ובניטור של מערכות אקולוגיות בגישה רב-תחומית. החזון של רשת התחנות למחקר ארוך טווח הוא יצירת חברה שהמדע העכשווי והעדכני תורם למניעה ולפתרון של בעיות סביבתיות בה. בתחנות נאספים מדדי אקלים (כגון משקעים), נתונים על מגוון המינים ועל הרכב מינים, שטפים של פחמן דו-חמצני ומים, פירוק חומר אורגני ועוד. נוסף על כך, הידע והנתונים שנאספים בתחנות משמשים חומר לימודי לסטודנטים ולתלמידים במגוון גילים, ובתחנות מתבצעים ימי סיור הפתוחים לקהל הרחב.

מטרות הרשת הבין-לאומית הן: 1. ייסוד וכינון של גוף ידע על מערכות אקולוגיות באמצעות מחקר בין-תחומי בקנה מידה נרחב בזמן ובמרחב; 2. סינתזה של המידע המצטבר באתרי המחקר; 3. בנייה ומיסוד של מאגרי נתונים שיעזרו לקהילה המדעית ולחברה האזרחית למצוא מענה הולם לשאלות סביבתיות חשובות; 4. יצירת ארכיון נגיש לתצפיות ולניסויים ארוכי טווח; 5. הכשרה, הוראה ולמידה של השינויים ארוכי הטווח ורחבי ההיקף של המערכות האקולוגיות העיקריות של כדור הארץ, וחינוך דור חדש של מדענים ואנשי ממשק לחשיבה בין-תחומית ומתכללת תוך שקיפות ושיתוף מידע; 6. פיתוח שיתופי פעולה ותאיאמים ברמה הארצית, האזורית והבין-לאומית בין רשתות למחקר אקולוגי ארוך טווח (Mirtl et al., 2018).



איור 1

פריסת תחנות המחקר ארוך הטווח ברשות קק"ל

תחנת יער הקדושים (KDM); תחנת יער יתיר (YTR); תחנת יער השגרירים (SF); תחנת פארק שקד (PSK); תחנת נחל שיטה (WSH). מקור: Google Earth, 2015.

תחנות המחקר האקולוגי ארוך הטווח של קק"ל

חמש התחנות למחקר ארוך הטווח באחריות קק"ל ממוקמות מהערבה בדרום ועד הרי יהודה במרכז ומייצגות סוגי ממשק שונים. תחנות מחקר יער הקדושים, יער יתיר ויער השגרירים מייצגות יערות נטע-אדם באזור הים תיכוני (יער הקדושים) והצחיח למחצה (יער יתיר ויער השגרירים). תחנת מחקר פארק שקד ממוקמת באזור צחיח למחצה ומייצגת שטח טבעי ללא ממשק ורעייה. התחנה היא מודל למערכת אקולוגית מדברית שעברה קריסה ושקום טבעי. תחנת מחקר נחל שיטה היא תחנת מודל להבנת המערכת האקולוגית של אוכלוסיית השיטים כמין מפתח באזור צחיח קיצון, המושפע בעיקר מתדירות השיטפונות בנחלי הערבה ומעוצמתם.

תחנת LTER יער הקדושים

תיאור כללי

התחנה הוקמה בשנת 2008 והיא ממוקמת על המדרונות המערביים הנמוכים של הרי ירושלים. גובה האתר 390–510 מטר מעל פני הים, ושיפוע המדרון הממוצע הוא כ-25%. האקלים ים תיכוני, עם ממוצע משקעים רב-שנתי של 550 מ"מ. יער הקדושים הוא יער נטע-אדם חד-מיני וחד-גילי של אורן ירושלים (*Pinus halepensis*), שניטע בשנת 1968. הצמחייה הטבעית היא צמחייה מעוצה דלילה המורכבת בעיקר מאלון מצוי (*Quercus calliprinos*), אשחר ארץ-ישראלי (*Rhamnus lyciodes*), אלת המסטיק (*Pistacia lentiscus*), קידה שעירה (*Calicotome villosa*) וסירה קוצנית (*Sarcopoterium spinosum*). כמו כן, גדלה באתר צמחייה עשבונית עשירה של חד-שנתיים, עשבים רב-שנתיים וגאופיטים.

מערך המחקר הוקם כ-40 שנה לאחר נטיעת היער, והוא מתפרס על שטח של כ-200 דונם שחולק לחמישה בלוקים (איור 2). בחלקות הניסוי בוצעו טיפולי דילול בעוצמות שונות.

מטרות

התחנה מיועדת למחקר, לממשק ולניהול של יערות אורן ירושלים בוגרים לטובת עיצוב דור היערות הבא בישראל כיערות בני-קיימא. המחקר מתמקד בדינמיקה של הצמחייה תוך התבססות על תהליכים טבעיים של סוקצסיה ותמיכה במגוון הביולוגי על ידי טיפוח תת-היער.

תובנות מרכזיות

ממצאים מ-15 שנות מחקר ביער הקדושים הראו שדילול



איור 2

תחנת יער הקדושים, מערך חלקות הניסוי

צילום אוויר (2010) של חלקות הניסוי לאחר ביצוע טיפולי הדילול ביער הקדושים. הדילול בוצע בקיץ-סתיו 2009.

היער גרם לשיפור ניכר (עד פי שלושה) בקצב התעבות הגזע וייצור הביומסה של עצי האורן ולירידה ניכרת בשיעור התמותה של העצים (עד פי עשרה). השיפור הניכר במצבם של העצים שנתרו לאחר הדילול מוסבר בעלייה בזמינות המשאבים (אור, מים) בעקבות הפחתת התחרות (Calev et al., 2016). עם זאת, היות שהיער טרם הדילול היה צפוף מאוד (כ-60 עצים לדונם) ודולל בגיל מאוחר יחסית (40 שנה), עוצמת התגובה של עצי היער לדילול מבחינת ממדי החופה הייתה מוגבלת (Kolb et al., 2007), ורמת כיסוי הצמרות של היער נותרה קבועה במהלך השנים שלאחר הדילול, בניגוד לצפוי ביערות צעירים יותר (חת ושפטר, 1983).

התחדשות טבעית וצמיחה של זרעי אורן ירושלים בתת-היער גברו במידה ניכרת (עד פי חמישה ופי שלושה, בהתאמה) בעקבות הדילול, ולעומת זאת, קצב ההתחדשות של זרעי אלון מצוי פחת עקב הדילול. עם זאת, קצב הצמיחה של אלונים שהתבססו טרם הדילול גבר. נוסף על כך, הדילול השפיע על הרכב מיני הצמחים בתת-היער וגרם לעלייה ניכרת במגוון המינים, שיוחסה אף לעלייה בזמינות המשאבים, בעיקר במשאב האור (Zangy et al., 2021). כמו כן, הדילול הביא לצמצום צריכת המים של היער ולשיפור יעילות ניצול המים לקיבוע פחמן.

תחנת LTER יער יתיר

תיאור כללי

התחנה הוקמה בשנת 2000 והיא ממוקמת על הגבול הדרומי של האזור הים תיכוני בחלק הצפוני של הנגב. השטח מאופיין בגבעות בגובה של כ-600–800 מטר מעל פני הים. האתר נמצא ביער שניטע בשנים 1965–1969, ורובו אורן ירושלים (איור 3).

בשנת 2020 צוינו שני עשורים להקמת התחנה ועשור להקמת מערך המחקר ארוך הטווח באתר. כחלק ממערך המחקר הוקמו חלקות ניסוי, ובוצעו בהן ארבעה טיפולי דילול בעוצמות שונות.

הצמחייה מתחת לעצים מורכבת מבני-שיח וממינים עשבוניים חד-שנתיים ורב-שנתיים שמהווים חלק מצומצם מהביומסה של המערכת האקולוגית. בשנים האחרונות נוספו למערך הניטור בתחנה מדידות של ניצול מים בעצים, ומדידות בתת-ההקרע ובמערכות השורשים שבה (רטיבות מים בקרקע וייצור שורשים עדינים).

מטרות

התחנה מיועדת לתרום להבנת השפעות ממשק יער צחיח למחצה על יצרנות היער וחיוניותו, על החידוש הטבעי ועל המגוון הביולוגי. נוסף על כך, באמצעות המחקר בתחנה

בגיליון זה). בחינת רטיבות הקרקע ופוטנציאל המים של הקרקע הראה כי לעצים השפעה ישירה על ייבוש הקרקע בשל צריכת המים. נמצא כי רטיבות הקרקע הולכת ויורדת ככל שמתקרבים אל העצים, גם בדילול הבינוני וגם בדילול החזק. מדד פוטנציאל המים בקרקע מצביע על זמינות מים נמוכה יותר, ככל שצפיפות העצים בחלקה גבוהה יותר. לשינויים בכיסוי היערות עקב שינוי האקלים ופעילות אדם יש השלכות מורכבות אבל חשובות על המים, על קיבוע הפחמן ועל המערכת האקולוגית המקומית (Klein, 2020; Qubaja et al., 2020; Rotenberg et al., 2021).

תחנת LTER פארק שקד

תיאור כללי

התחנה הוקמה בשנת 1997 וממוקמת בפארק האקולוגי סירת שקד בצפון-מערב הנגב ליד אופקים, בגובה 200 מטר מעל פני הים, עם ממוצע גשם שנתי של 200 מ"מ. ככל הנראה, האזור היה נתון ללחץ רעייה כבד במשך אלפי שנים עד להקמת הפארק בניהול קק"ל ב-1987 (Shachak et al., 1998). הניהול כולל רעייה, איסוף מי נגר ושתילת עצים.

מנסים להבין את הגורמים הסביבתיים המשפיעים על קיום היער, לרבות אקלים, צפיפות היער, רעייה והתחדשות טבעית, ולהעריך את הסיכויים להמשך קיומו.

תובנות מרכזיות

יער יתיר כחקר מקרה ליער נטוע באזור מדברי מוכיח כי לאזור צחיח למחצה יש פוטנציאל גדול מהצפוי בקיבוע פחמן. נוסף על כך, תוצאות המחקר לטווח ארוך מראות שיעור באזור צחיח למחצה מוריד באופן משמעותי את טמפרטורת פני השטח. בהיקפים גדולים שינויים אלה יכולים להשפיע על האקלים המקומי. כמו כן, ניסוי הדילול מראה עלייה בקצב צמיחת העצים שנותרו לאחר הדילול. בבחינת הקשר בין הצפיפות וקצב הגדילה מתקבל כי הגידול בהיקף הגזע תלוי בצפיפות החלקה, והגידול המשמעותי חל בצפיפות יער נמוכה של 10 עצים לדונם. מאידך גיסא, בצפיפות זו יכולת ההתחדשות של היער נמוכה מאוד. עם העלייה בצפיפות יש עלייה בנביטה של אורן ירושלים. הזרעים של אורן ירושלים מתים בקיץ הראשון, ורק זרעים בודדים מתפתחים, בעיקר ביער הנטוע בצפיפות הנמוכה. כלומר, אין צפיפות מיטבית שתתמוך בהתחדשות היער ביתיר (ראו מאמרם של פוזנר ושות'



איור 3

תחנת יער יתיר
צילום: אלה פוזנר

המערכת האקולוגית (Paz-Kagan et al., 2014). כמו כן, נצבר ידע על תהליכי התחדשות של הצומח והמערכת האקולוגית באגני היקוות לאחר קריסה, ועל תפקודי הנגר והחומר האורגני כמוסתי התאוששות והתחדשות לאחר עקת בצורת.

מטרות

מטרות המחקר הן הבנת מבנה המערכת האקולוגית, תפקודה ותהליכי שיקום במערכות אקולוגיות צחיחות למחצה, מעקב אחר מערכות משוקמות, בחינת חוסן להתמודד עם שינויים לא צפויים, זיהוי השירותים האקולוגיים הנובעים מפעולות השיקום והפקת המרב משירותים אלה.

תובנות מרכזיות

המחקר ארוך הטווח בפארק סיירת שקד אפשר לחקור את המערכת האקולוגית לפני קריסתה בשל בצורות חוזרות ולאחריהן (Argaman et al., 2020). הוא אפשר לכמת את השפעת השיחים שמתו וקרומי הקרקע הביולוגיים (מיקרואורגניזמים בפני השטח) שנותרו כמהנדסי סביבה על התפתחות המערכת האקולוגית. קיים מחסור במידע לגבי תפקידו של נשר צומח המורכב מחומר אורגני מהצמחייה, פיזורו במערכת והיחס בינו לבין קרומי קרקע ביולוגיים, צמחים עשבוניים, שיחים וקרקע (Zaady et al., 2021). נתונים שיתקבלו ממערכת זו יסייעו לבחון את השתנות המערכת המשוקמת, את מסלול התפתחות המערכת האקולוגית בתנאי סביבה משתנים ואת עמידות המערכת האקולוגית לשינויים סביבתיים לאחר שיקום.

תחנת LTER יער השגרירים

תיאור כללי

התחנה הוקמה בשנת 2008 וממוקמת באגן כרכור-פטיש, 10 ק"מ צפונית לבאר שבע ומערבית ליער דודאים. האקלים יובשני למחצה, וממוצע הגשמים הרב-שנתי כ-230 מ"מ. כתמי הצומח האופייניים מורכבים מקבוצות של עצים נטועים ומצומח עשבוני עונתי. פני השטח באזור נחשפו לתהליכי דלדול של הצומח והקרקע נוכח שינוי האקלים המקומי ולחצי רעייה בלתי מבוקרים, שהובילו לפגיעה מקומית ביציבות המערכת האקולוגית באזור. פגיעה זו התאפיינה בעלייה משמעותית של חתירת בתרונות וסחיפת קרקע מואצת לאורך מדרונות הלס. נדבך חיוני בפעילות קק"ל הוא מיתון תהליכי סחיפה ומניעת הגרעת הקרקע, שימור קרקע ומים עבור פעולות ייעור ופעולות שיקום (קרקע וסביבה) נוכח שינוי האקלים ואסונות טבע (כגון שרפות). כחלק ממערך ניהול השטח התאפשרה רעייה

תחנת המחקר מגודרת (למניעת רעייה) וממוקמת בתוך הפארק, ושטחה כ-300 דונם. אזור התחנה המגודר מייצג שטח טבעי ללא ממשק. בפארק עצמו שטחי קציר נגר שמייצגים את ממשק קק"ל המבוסס על ממצאי המחקרים שנעשו בתחנת המחקר. עד לשנת 2008 הצמחייה השלטת באתר הייתה שיחים: נואית קוצנית (*Noaea mucronate*), חורשף קטן קרקפות (*Atractylis serratuloides*) ומתנן שעיר (*Thymelaea hirsuta*). בשנת 2008 התמוטטה המערכת האקולוגית בעקבות רצף בצורות, והפכה ממערכת שנשלטת בידי שיחים למערכת הנשלטת על ידי עשבוניים חד-שנתיים (איור 4).

המחקר בתחנת פארק שקד בוחן את השפעתן של בצורות חוזרות על תמותה של צמחים מעוצים, שתוצאותיה קריסת



איור 4

פארק סיירת שקד, מצב המערכת האקולוגית בתחנת המחקר לפני קריסת המערכת בעקבות בצורות ואחריה

- א. שנת 1999 – מערכת אקולוגית שיחנית;
- ב. שנת 2008 – קריסת המערכת השיחנית – תמותת השיחים שהביאה לתמותה של חלזונות;
- ג. שנת 2021 – שינוי מצב המערכת האקולוגית ממערכת שיחנית למערכת עשבונית.

תחנת LTER נחל שיטה

תיאור כללי

התחנה הוקמה בשנת 2015 וממוקמת בנחל שיטה, צפונית לקיבוץ יהל, בגובה של כ-230 מטר מעל פני הים, באגן ניקוז המשתרע על פני כ-18,000 דונם. האקלים צחיח קיצוני, המשקעים מעטים (כ-30 מ"מ בשנה), הלחות נמוכה, והטמפרטורות גבוהות. התחנה היא תחנת מודל להבנת השינויים באוכלוסיות השיטים כמין מפתח בסביבה מדברית, במטרה להבין איך לנהל שטחים פתוחים באזורים צחיחים. תחנת המחקר של נחל שיטה היא היחידה בישראל שנערך בה מחקר העוסק בהשפעה של אגן הניקוז על עצי שיטה. הצמחייה בנחל כוללת שני מינים של שיטה (שיטת הנגב [*Vachellia gerrardii*] ושיטה סלילנית [*Vachellia raddiana*]), שיחי בתה (רכפתן מדברי [*Ochradenus baccatus*]), יפרוק המדבר [*Anabasis articulata*], זוגן השיח [*Zygophyllum dumosum*]), ומגוון רחב של עשבוניים חד-שנתיים המופיעים לאחר אירועי גשם (כגון מלעניאל [*Stipa capensis*]), כוכב ריחני [*Asteriscus graveolens*], חומעה ורודה [*Rumex cyprius*]). במדבר צחיח קיצוני רוב קיבוע הפחמן נעשה על ידי עצי שיטה. לכן, לעצים חשיבות עצומה כיצרנים ראשוניים במארג המזון. העצים הם מין מפתח, והם משנים את זמינות הנוטריינטים ואת תכולת המים בקרקע. בריאות ושגשוג של אוכלוסיית השיטים ובריאות המערכת האקולוגית כולה תלויים בזמינות מים. מקור המים בשיטפונות בזק, שתדירותם ועוצמתם משתנים בזמן ובמרחב. בתחנה נערכים מחקרים בתחומי האקו-הידרולוגיה (איור 6). המחקר בנחל שיטה מתמקד באוכלוסיית השיטים ובזמינות המים לעצים, בעוד שיעדי הניטור עוסקים בהטרוגניות אביוטית ובמגוון מינים.

מבוקרת ומפוקחת באתרים שניטעו בהם עצים שנתמכים במערכות קציר נגר של שיחים ולימנים, המסייעות לשיפור זמינות המים לצומח. פעולות הייעור באתר החלו בשנת 2005 ונמשכות עד ימים אלה (איור 5).

מטרות

מטרות המחקר הן בחינת ההשפעות של שינויים ארוכי טווח של נטיעת עצים במערכות קציר נגר על שירותי המערכת האקולוגית (ויסות, אספקה ותרבות) ועל תכונות הקרקע לאחר הפרת פני הקרקע, ניטור יחסי גשם-נגר-סחף וניטור יחסי גומלין קרקע-צמח-מים. נוסף על כך, מבוצע מעקב אחר התפתחות הצומח המעוצה והעשבוני באזורי הנטיעה השונים.

תובנות מרכזיות

בחינת התפתחות הקרקע והצומח באזור לאחר בניית שיחים ולימנים העלתה כי המערכת השתקמה לאחר תשע שנים. כשנבחנה תרומת הנגר בלימנים בשני אתרים שונים נמצא כי מדדי קרקע, כגון פוריות הקרקע, טובים יותר באתרים שהוקמו בהם מערכות של קציר נגר, כדוגמת לימנים (Argaman and Tikotzki, 2021). ניתוח תצלומי לוויין מצביע על עלייה בביומסה הצמחית העשבונית באתרים שניטעו בשנים 2005 ו-2009, לעומת אזור נטיעות צעיר (2016) שהצמחייה בו עדיין בשלבי התפתחות ראשוניים. כמו כן, נמצא שיפור בזמינות המים לצומח לאחר בניית מערכות קצירי הנגר בשני האתרים הוותיקים בהשוואה לאתרי ביקורת שלא הוקמו בהם מערכות קציר נגר (Stavi et al., 2015; Stavi and Argaman, 2016).



איור 5

תחנת יער השגירים, חלקות הדגימה

ימין: אתר נטיעות 2016, בשנת 2019; שמאל: אתר נטיעות 2009, בשנת 2019. צילום: אלי ארגמן



איור 6

תחנת נחל שיטה

ימין: ניטור פרפרים. מרכז: דנדרומטר רושם, מודד באופן רציף את קצב גדילת הגזע של עצי השיטה. צילומים: ניצן שגב שמאל: ניטור עקרבים. עביד צהוב (*Scorpio palmatus*) בתאורה רגילה ובתאורת פנס אולטרה סגול (UV). צילום: איברהים סלמאן

מטרות

מטרות המחקר הן ביסוס ידע להבנת התפקוד, המבנה והבריאות של מערכות אקולוגיות הכוללות עצי שיטה במדבר צחיח קיצון, והתמקדות בעצי השיטה כמהנדסי סביבה וכסמנים לבריאות ולחיוניות של המערכת האקולוגית. כמו כן, נבחנת השפעת עצי השיטה על המגוון הביולוגי, על ההטרונגניות האביוטית ועל מאזני המים והחומר, ומתבצעת הערכה של שירותי המערכת שמספקות מערכות אקולוגיות הכוללות עצי שיטה.

תובנות מרכזיות

אגן הניקוז שהמחקר נערך בו מורכב מערוץ מרכזי ומערוצים משניים. המחקר מדגים את השונות בבית הגידול, בנתוני גודל העץ ובגדילת הגזע. נמצא כי עצים הגדלים בערוץ המרכזי גדולים וגבוהים יותר מעצים הגדלים בערוצים משניים, וכי לעצים בחלקה שנמצאת במעלה ערוץ הזרימה יש עלווה מלאה יותר מאשר לעצים במורד ערוץ הזרימה. תוצאות המחקר הנוגעות למגוון הביולוגי אומנם ראשוניות, אך כבר ניתן לראות כי נחל שיטה הוא בית גידול שתומך

במגוון רחב ביותר של בעלי חיים שמצויים בסכנת הכחדה, וכי חלק מהם מאפיינים בתי גידול שונים באגן הניקוז – ערוץ מרכזי, ערוץ משני ושטח פתוח – ושנבדלים במיקום החלקה – במעלה הנחל או במורדו (Benyamini, 2017). המידע שנאסף בנחל מקדם אותנו בהבנת המערכת האקולוגית הייחודית לאקלים צחיח קיצון המאופיין בעושר מינים ובמגוון מינים גבוה ובלתי צפוי.

סיכום

ברשת תחנות המחקר והניטור ארוכי הטווח של קק"ל הצטבר ידע רב המאפשר בניית מודל משותף לצורכי מחקר, ניטור וממשק, שמשמש מפת דרכים להערכת מצב המערכות הנחקרות. מחקר כזה יקדם את ההבנה ואת כושר החיזוי באשר להשפעות השינויים במשטר הגשמים על המערכות האקולוגיות, ויאפשר לפתח כלי ממשק למיתון ההשפעות של שינוי האקלים.

מקורות

- Benyamini D. 2017. A swarm of millions of *Vanessa cardui* (Linnaeus, 1758) in winter-spring 2015–2016 in the south-east Mediterranean – The missing link. *Atalanta*, 48, 103–128.
- Calev A, Zoref C, Zukerman M, Moshe Y, Zangy E, and Osem Y. 2016. High intensity thinning treatments in mature *Pinus halepensis* plantations experiencing prolonged drought. *European Journal of Forest Research*, 135(3), 551–563.
- eLTER regional network – European Long Term Ecological Research. <https://elter-ri.eu/>
- ILTER – International Long Term Ecological Research. <https://www.ilter.network/>
- Klein T. 2020. A race to the unknown: Contemporary research on tree and forest drought resistance, an Israeli perspective. *Journal of Arid Environments*, 172, 104045.
- חת ד ושפטר א. 1983. התפתחות אורן ירושלים ואורן ברזיה בהשפעת עצמות דלול שונות. **ליערן**, 33(4–1), 13–18.
- פוזנר א, בר און פ, ליבנה-לוזון ס, מורן א, צמיר-רימון מ, דנר א ושות'. 2022. יובש מגביל את ההתחדשות ביער יתיר: הסכנה ליער מתעצמת בשל שינוי האקלים. **יער**, 22, 49–59.
- קק"ל. אתר תחנות LTER קק"ל: https://www.kkl.org.il/forestry_research_lter
- רשת LTER ישראל. אתר. <http://lter-israel.org.il>
- Argaman E, Barth R, Moshe Y, and Ben-Hur M. 2020. Long-term effects of climatic and hydrological variation on natural vegetation production and characteristics in a semiarid watershed: The northern Negev, Israel. *Science of The Total Environment*, 747, 141146.
- Argaman E and Tikotzki I. 2021. Final Report – *Ambassadors Forest LTER: Water Harvesting Impact on Surface Processes 2000–2021*. Submitted to KKL–JNF.

- Rotenberg E, Qubaja R, Preisler Y, Yakir D, and Tatarinov F. 2021. Carbon and energy balance of dry Mediterranean pine forests: A case study. In: Ne'eman G and Osem Y (Eds). *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Cham: Springer. pp. 279–301.
- Shachak M, Sachs M, and Moshe I. 1998. Ecosystem management of desertified shrublands in Israel. *Ecosystems*, 1(5), 475–483.
- Stavi I and Argaman E. 2016. Soil quality and aggregation in runoff water harvesting forestry systems in the semi-arid Israeli Negev. *Catena*, 146, 88–93.
- Stavi I, Fizik E, and Argaman E. 2015. Contour bench terrace (shich/shikim) forestry systems in the semi-arid Israeli Negev: Effects on soil quality, geodiversity, and herbaceous vegetation. *Geomorphology*, 231, 376–382.
- Zaady E, Stavi I, and Yizhaq H. 2021. Hillslope geodiversity effects on properties and composition of biological soil crusts in drylands. *European Journal of Soil Science*, 72(5), 2308–2315.
- Zangy E, Kigel J, Cohen S, Moshe Y, Ashkenazi M, Fragman-Sapir O, et al. 2021. Understory plant diversity under variable overstory cover in Mediterranean forests at different spatial scales. *Forest Ecology and Management*, 494, 119319.
- Kolb TE, Agee JK, Fulé PZ, McDowell NG, Pearson K, Sala A, et al. 2007. Perpetuating old ponderosa pine. *Forest Ecology and Management*, 249(3), 141–157.
- 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.
- 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.
- Pratt RB, Jacobsen AL, Ramirez AR, Helms AM, Traugh CA, Tobin MF, et al. 2014. Mortality of resprouting chaparral shrubs after a fire and during a record drought: Physiological mechanisms and demographic consequences. *Global Change Biology*, 20(3), 893–907.
- 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.



שיטות וכלים מדעיים וישומיים לחיזוי, למניעה ולכיבוי של שרפות יער

מור אשכנזי^{1*} | מאיה מלאת² | נעמי הומינר² | מוני שטרית³ | חן קרוא³

רויטל וויס¹ | חנוך צורף¹

1 אגף הייעור, קק"ל

2 מרחב דרום, קק"ל

3 מרחב צפון, קק"ל

* mora@kkl.org.il

מבוא

על המצב הפיזיולוגי של הצומח והתנאים המטאורולוגיים. נמצא כי השירות המטאורולוגי מפרסם מדי יום מדדי סכנת שרפה, המחושבים בעזרת מודל של שירות היערות האמריקאי (NFDRS). ממודל זה מתקבלים שני המדדים הבאים: 1. מדד התפשטות (BI – Burning Index), המבטא את מידת הקושי לשלוט בשרפה לאחר שניצתה; 2. מדד התלקחות (CI – Component Ignition), המבטא את הסיכוי בין 0 ל-100 שמקור אש יהפוך לשרפה שמצריכה פעולות כיבוי. מודל החיזוי האמריקאי פותח בארה"ב, ומתבסס על בסיס נתוני תכונות הצומח האופייניים לה (מינים שולטים, צפיפותם, רמות הדליקות שלהם ועוד). היות שכך, הוא מתאים לתצורות הצומח השונות שם, ולא דווקא לתצורות הצומח בישראל.

בישראל לא קיים בסיס נתוני צומח מתאים, ולכן החיזוי בארץ מתבסס על מודל אחיד של עשבוניים כדי לצמצם את השפעת השוני בסוגי הצומח על החיזוי. כלומר, החיזוי מתעלם מגורם הדלק הצמחי המצוי בשטח. זו הסיבה שבגינה אנו נדרשים לאפיין מחדש את הצורך בחיזוי סכנת השרפות ולכלול רכיב משתנה שייצג את מצב הצמחייה בהתאם לעונה. מן הממצאים עלו מספר המלצות, הכוללות המלצות לטווח הקרוב, ובהן: א. הגדרת מדד מתאים לישראל

העשור האחרון מאופיין בעלייה במספר שרפות היער ובעוצמתן בעולם בכלל ובישראל בפרט (Keely and Syphard, 2019). בדרך כלל שרפות מתרחשות בשילוב עם מדדים מטאורולוגיים חריגים (מהירות רוח גבוהה ולחות אוויר נמוכה) (Kutiel, 2012). למרות זאת, בעונת השרפות (מאי-נובמבר) בשנת 2021 כמעט לא נמצאה התאמה בין תנאי מזג האוויר לחומרת השרפה (אסם ושות', 2021). אי לכך, גובשו צוותי עבודה במסגרת תוכנית ההכשרה של "יערני העתיד", והם התבקשו לאפיין כלים נדרשים לשיפור המוכנות של קק"ל לעונות הבאות, לבחון את הכלים הקיימים, למצוא להם חלופות אפשריות, לבסס שיטות עבודה ולתת המלצות יישומיות.

צוותי העבודה של אנשי קק"ל התמקדו בשלושה היבטים עיקריים של השרפות:

א. תחזית סיכון שרפות

מטרת התחזית היא לאפיין מועדים שקיימת בהם סבירות גבוהה לפריצת שרפות, כדי לתגבר בהם את כוונות הכיבוי. הצוות האחראי ביצע סקירה נרחבת של הכלים הקיימים לחיזוי סכנת שרפות ברמה יומית, שבועית ועונתית, בדגש

המתאר את מצב הצומח; ב. הוספת מדד יובש המשקף את יובש הצמחייה (אחוז מים ממוצע בצמחייה) על פי העונה, ובחינה כיצד מדד היובש משפיע על מדד התפשטות האש. לטווח זמן רחוק (כעשור שנים) הומלץ להקים בסיס של נתוני צומח המתאימים לתצורות הצומח בישראל (חורש של אלון ואלה, יער אורנים, בתה, עשבונים) שיכללו את המדדים הבאים: אחוז תכולת המים בצומח, צפיפות הצומח ואחוז הכיסוי של הצומח לאורך עונות השנה, כפי שקיים במודל אמריקאי.

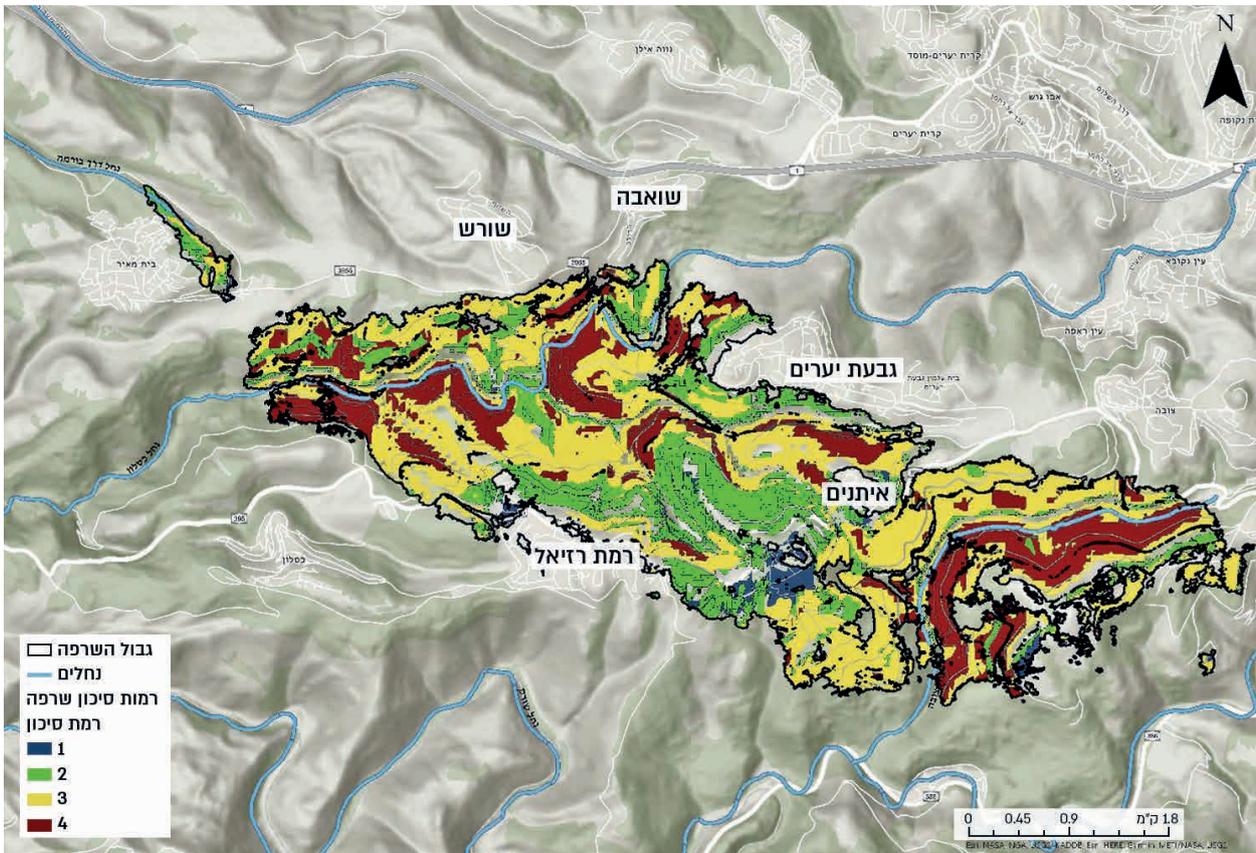
ב. מפת סיכון שרפות

מפת סיכון שרפות (איור 1) היא כלי לתכנון ממשק מניעת שרפות ולתכנון כיבוי אש במהלך השרפה. הצוות בחן את הידע הקיים בקק"ל, נערכה סקירת ספרות, ונלמדו מודלים מהעולם המשתמשים בנתוני צומח, טופוגרפיה וקרבה ליישובים. כמו כן, הוצגה שיטה לחישוב ערכי הפרמטרים המרכיבים את המפה לסכנת השרפה (מפה המכילה את הנתונים הקשורים למצבם הפיזיולוגי של הצמחים). לאחר ביצוע סקירת ספרות נרחבת (Zhang et al., 2014; Akay and Sahin, 2019; Adaktylou et al., 2020; Novo et al.,

ג. מעקב אחר שרפות בזמן אמת ולאחריהן

מטרות הצוות היו: 1. מציאת פתרונות יישומיים זמינים עבור קק"ל כדי לנטר שרפות תוך מתן חשיבות רבה להבדלים שבין ניטור מתמשך ארוך טווח לאחר השרפה לבין ניטור קצר מועד בזמן אמת המצריך נתונים מעודכנים בפרקי זמן קצרים ככל שניתן; 2. בחינת כלים כמותיים ואיכותיים (כגון תצלומי אוויר), סוגי מדדים צמחיים ואלגוריתמים שיאפשרו ניתוח מרחבי מפורט ככל שניתן הכולל בתוכו את שטח השרפה, עוצמות האש וסיווג הצומח; 3. גיבוש תוכנית פעולה מוכנה לשימוש לניטור שרפות החל מפריצתן ועד לשיקום היער.

עבודת הצוות כללה מספר דרכי פעולה, ובהן הערכת המגבלות הקיימות בניטור שרפות כיום, בחינת חלופות קיימות בארץ ובעולם לניטור שרפות באמצעות חישה



מפת סיכון לשרפות באזור הרי יהודה

הנחיות מפורטות לשימוש בכל אחד מהכלים הזמינים, כולל פרקי זמן מציאותיים להמצאת הנתונים (טבלה 1, טבלה 2) ולבסוף, המלצה לסטנדרט אחיד בקק"ל, שיגדיר תוכנית פעולה סדורה לניטור שרפות.

סיכום

במהלך העבודה התבצעה סקירה מקיפה של נושאים הקשורים לשרפות יער וחורש בהיבטים של טרום שרפה, מהלך השרפה (זמן אמת) ולאחר שוך הלהבות. הצוותים השונים ריכזו מידע רלוונטי לכל נושא, מיקדו את הצורך הנדרש של קק"ל בכלים חדשים בתחומים השונים וכן העלו המלצות לפיתוח ולייעול של הכלים הקיימים לטובת הגדלת המוכנות לשרפות גדולות.

מרחוק וכלי ממ"ג (מערכות מידע גאוגרפי), אפיון סוגי הכלים השונים ומידת התאמתם לניטור שרפה בזמן אמת בתחומי ישראל, הגדרת דרכי פעולה עבור הכלים השונים לצורך המצאת הנתונים הנדרשים, מציאת פלטפורמות שונות לקליטת נתונים גולמיים על אודות השרפה, בחינת דרכים לעיבוד המידע והנגשתו לצוותים בשטח באופן אוטומטי ובמהירות ובחינת מודלים אפשריים לחיזוי חזית השרפה לטובת ניהול מאמצי הכיבוי.

התוצרים שעלו מעבודת הצוות כללו המלצות לכלים יישומיים זמינים עבור קק"ל (תצלומי לוויין, רחפנים, כטב"מים [כלי טיס בלתי מאוישים] וכיו"ב) ופירוט דרכי השימוש בהם. השימוש אמור לאפשר ניטור של חזית השרפה ועוצמת האש בזמן אמת, תיחום ועוצמה סופיים של השרפה לאחר הכיבוי, בחינת רמת הפגיעה בצומח וניטור ומעקב אחר התאוששות הצומח בטווח הארוך לאחר השרפה. כמו כן,

טווח זמן לפיתוח	משימה	תוצרים	תכיפות העדכון
קרוב	מיקום חזית האש	תמונה	2 בשעה
		שכבת ממ"ג	2 בשעה
	קו מתאר של השרפה	שכבת ממ"ג	1 ביום
בינוני	קצב התקדמות האש	שכבת ממ"ג	2 בשעה
	עוצמת האש	תמונה/שכבת ממ"ג	2 בשעה
רחוק	חיזוי התקדמות האש	שכבת ממ"ג	2 בשעה
	שיתוף מודיעין בזמן אמת	לוח בקרה אינטראקטיבי	6 ביום

טבלה 1

המלצות למיפוי בזמן השרפה

טווח זמן לפיתוח	משימה	תוצרים	תכיפות העדכון
קרוב	קו מתאר של השרפה	תמונה	1-3 ימים דרך כב"ה
		הערכה של עוצמת השרפה	שכבת ממ"ג
בינוני	ניטור השטח השרוף	שכבת ממ"ג	1 לשנה דרך פנים קק"ל
רחוק	דירוג תצורות הצומח על פי חומרת השרפה	שכבת ממ"ג	1-3 ימים דרך כב"ה

טבלה 2

המלצות למיפוי לאחר שרפה

- Kutiel H. 2012. Weather conditions and forest fire propagation – the case of the Carmel fire, December 2010. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 58.2–3, 113–122.
- Novo A, Fariñas-Álvarez N, Martínez-Sánchez J, González-Jorge H, Fernández-Alonso JM, and Lorenzo H. 2020. Mapping forest fire risk – A case study in Galicia (Spain). *Remote Sensing*, 12(22), 3705.
- Zhang Q, Wollersheim M, Griffiths S, and Maddox I. 2014. National fire risk map for continental USA: Creation and validation. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 18(1), 012134.
- אסם י, צורף ח, אוסטרובסקי ג, אשכנזי מ ופורת י. 2021. השרפה בהרי יהודה – ניתוח, תובנות והמלצות. *אקולוגיה וסביבה*, 12(4).
- Adaktylou N, Stratoulis D, and Landenberger R. 2020. Wildfire Risk Assessment Based on Geospatial Open Data: Application on Chios, Greece. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 516.
- Akay AE and Sahin HM. 2019. Forest fire risk mapping by using GIS techniques and AHP method: A case study in Bodrum (Turkey). *European Journal of Forest Engineering*, 5(1), 25–35.
- Keeley JE and Syphard AD. 2019. Twenty-first century California, USA, wildfires: Fuel-dominated vs. wind-dominated fires. *Fire Ecology*, 15.1, 1–15.



דרך בורמה, סמוך ליישוב בית מאיר. כאן פרצה השרפה בהרי יהודה באוגוסט 2021 צילום רחפי: כאמל עליאן, קק"ל

ניתוח השרפה בהר הרוח (יער החמישה) – יוני 2021

רוני טל*¹ | ענת אידלמן¹ | אלמוג רם²

1 אגף הייעור, קק"ל

2 אזור ההר, קק"ל

* ronit@kkl.org.il

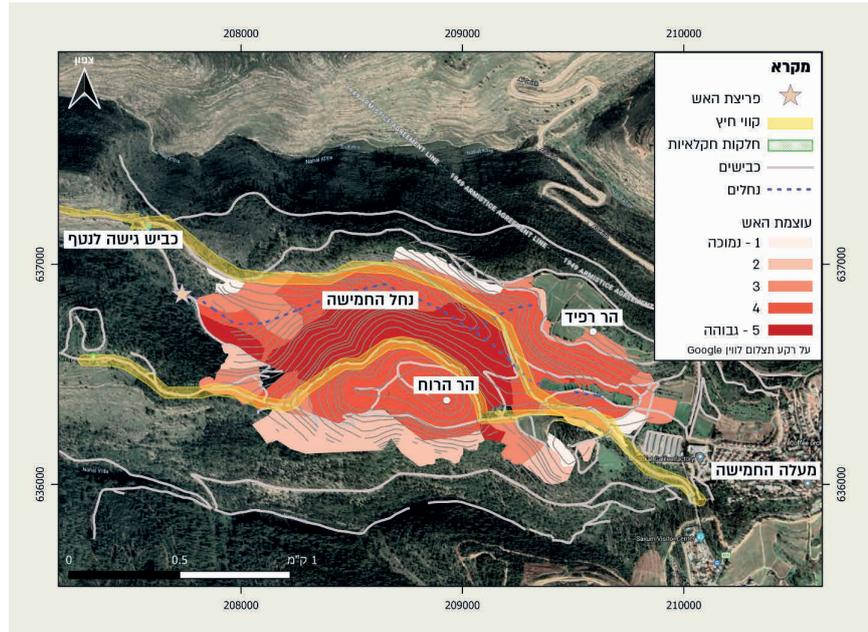
סייע להתפשטות המהירה של האש במעלה הערוץ. חומר צמחי (חי ומת) הוא דלק זמין עבור תהליך הבעירה. למעשה, זהו הגורם היחיד שנתון להשפעה ישירה של מנהלי השטח. הרכב הצומח בשטח השרפה, כמו במרבית יערות הרי ירושלים, היה יער מעורב – כיסוי גבוה של עצי מחט ותחתם עצי חורש ושיחים מפותחים. ייתכן שתצורת צומח זו תורמת ליצירת עוצמת שרפה גבוהה. עם זאת, לא נמצא הבדל מהותי בהרכב הצומח בין השטחים שנשרפו בעוצמה גבוהה לבין השטחים שנשרפו בעוצמה נמוכה.

רוב השטח טופל לפני השרפה בפעולות ממשק שונות: במקומות נגישים כמו שיפועים מתונים, ראש ההר וסמוך לחניונים קולטי קהל, נערכו דילול מתון של עצי מחט והרמת הנוף של עצי מחט ושל עצים רחבי עלים. בצידי הדרכים הראשיות נקבעו אזורי חיץ להפחתת הדלק הזמין (איור 1) ובוצעו בהם הפעולות הרלוונטיות. אזור חיץ הוא רצועה של 10 מטר משני צידי הדרך, שמרבית העצים והשיחים הוסרו ממנה, וסמוכה לה רצועה ברוחב של 15 מטר שצפיפות העצים בה הופחתה למרחק של 7–10 מטר בין צמרות. כמו כן, נוף העצים נגזם והורם לגובה 5–7 מטר, ובוצע דילול גזעים חזק למיני חורש. באזורים שאינם נגישים, כמו ערוץ נחל החמישה, לא התאפשר לבצע טיפול. נוסף על כך, סביב חוות הר הרוח רעה עדר עיזים קטן (60–70 עיזים, לחץ רעייה נמוך) שסייע במעט להפחתת החומר הצמחי בסביבת החווה.

בהר הרוח נשרפו כ-800 דונם של יערות בניהול קק"ל סמוך ליישובים נטף ומעלה החמישה (איור 1) בין התאריכים 8–9 יוני 2021. עוצמת השרפה וקצב התקדמות חזית האש היו מפתיעים ביחס לתנאי מזג האוויר ששררו ביום השרפה. לכן, שרפה זו יכולה לשמש חקר מקרה מעניין להתפתחות שרפות. מאמר זה בוחן את אופן התפשטות השרפה, ומציג ניתוח של מאפייני שרפה תוך שימוש בצילומי רחפן. הממצאים מעלים את הצורך בדיון מחודש על הפעולות היעריניות הנדרשות כדי למנוע שרפות חזקות בעתיד.

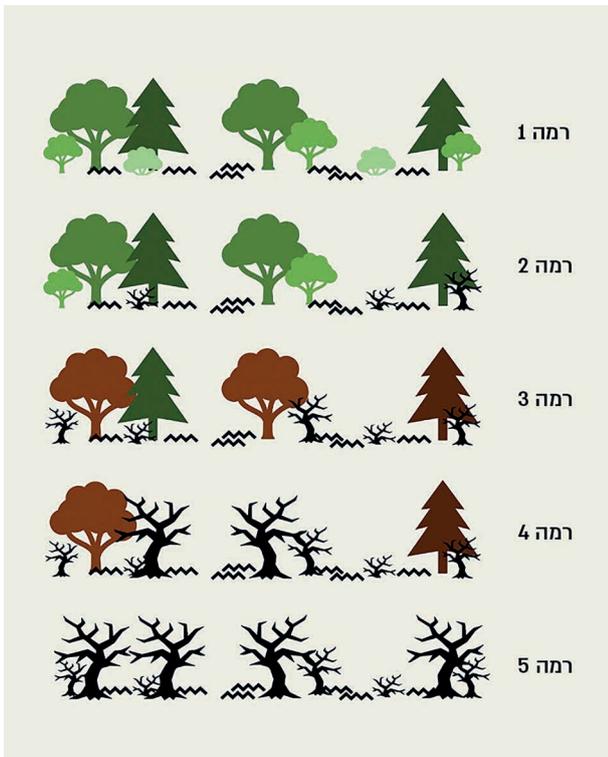
הנתונים שנאספו בתחנת המדידה המטאורולוגית הקרובה לאזור השרפה, בקיבוץ צובה, הראו שביום פריצת השרפה שררו תנאים מטאורולוגיים שגתיים לעונת הקיץ במהלך השעות הראשונות של השרפה: לחות יחסית ממוצעת 39%, טמפרטורה ממוצעת 26.5 מעלות צלזיוס, כיוון הרוח צפון-מערב, מהירות הרוח 4 מטר לשנייה. נוסף על כך, מדד ההתפשטות (BI), מדד המבטא את מידת הקושי לשלוט בשרפה לאחר שזו הוצתה, ומשקלל את מידת היובש של הצומח עם טמפרטורה ולחות) ביום השרפה היה נמוך.

שטח השרפה מתאפיין במדרונות תלולים. אומנם מעלה נחל החמישה מתון בשיפועו, אך ייתכן ששיפועיהם התלולים של המפנה הדרומי של הר רפיד והמפנה הצפוני של הר הרוח תרמו ליצירת תנאי רוחות האופייניים לערוצי נחל עמוקים. כמו כן, ייתכן שמיקום ההתלקחות, בתחתית ערוץ עמוק,



איור 1
 אזור השרפה בין מעלה החמישה לנטף עם חלוקה לעוצמת האש על פי ניתוח צילומי רחפן

מניתוח תמונות הרחפן עולה כי עוצמת האש הגבוהה ביותר הייתה בתוואי נחל החמישה, שעובר במרכז שטח השרפה (איור 1).



איור 2
 רמות עוצמת האש השונות שלפיהן בוצע ניתוח השרפה בהר הרוח

השרפה החלה בתחתית נחל החמישה והתפשטה מזרחה לעבר קיבוץ מעלה החמישה. חזית האש התקדמה במהירות גבוהה מאוד, ולוותה במוקדי כתם (ניצוצות או גחלים מהשרפה שנישאים על ידי הרוח ויוצרים מוקדים חדשים של שרפה, מעבר לגבולות אזור ההצתה של השרפה הראשית). מוקדי הכתם הגבירו את קצב ההתפשטות, ובגללם היה קשה להבין היכן נמצאת החזית בכל רגע נתון. אנשי השטח מעריכים שהאש הגיעה לגבול המזרחי של שטח השרפה תוך שעה בלבד, מרחק של כ-2 קילומטרים. האש נבלמה באופן ברור באזורים שהיה בהם לפחות אחד מהגורמים הבאים: כרם עם מערכת השקיה סדירה; התמתנות שיפוע טופוגרפי; פיזור מעכב בעירה באמצעות מטוסים. אזורי החיץ תרמו להפחתת עוצמת השרפה, אך לא באופן מספק מול קצב התקדמות חזית האש.

ניתוח שרפה יכול להתבצע באמצעים טכנולוגיים שונים, ובהם חישה מרחוק. לצורך הערכת עוצמת האש בשרפה זו השתמשנו בצילומי רחפן של חברת "עין הנץ – צילום אווירי" ובצילומי רחפן שביצעו אנשי קק"ל המנהלים את השטח שנשרף. בכל צילום נבחנה עוצמת האש על ידי חלוקה לחמש דרגות עוצמה שונות (איור 2):

- רמה 1 - שרפת קרקע, צומח עשבוני שרוף וקרקע חרוכה.
- רמה 2 - שרפת תת-יער ללא פגיעה בעצים.
- רמה 3 - שרפת תת-יער משולבת בעצים שרופים בודדים.
- רמה 4 - שרפת צמרות, מיעוט של עצים נותרו עם עלווה פגועה מחום.

רמה 5 - עוצמת השרפה החזקה ביותר: שרפת צמרות, גזעי עצים עירומים, קרקע חרוכה וסלעים מנופצים בעקבות הטמפרטורה הגבוהה.

שאינם קיצוניים, וזאת בעקבות התייבשות הדרגתית וממושכת של העצים ותת-היער. סביר להניח כי שינוי האקלים החזוי יעלה את תדירות השרפות: עונת השרפות צפויה להתארך, וצפויה הרחבה של האזורים המועדים לשרפות. אי לכך, עולה החשיבות של המשך הדיון בדרכי הטיפול ביערות ישראל כהכנה לשרפות.

תודות

במהלך כתיבת מאמר זה בוצעו שיחות עם מנהלי האירוע, אנשי קק"ל המנהלים את השטח, גורמי הכיבוי ואנשי המיפוי ובהם: חנוך צורף, גידי בשן, ג'מאל דויאת, מור אשכנזי, יפתח זיו, ישראל טאובר, יהודה ניסן ואיתי כהן.

במאמר מוצג ניתוח שרפה באמצעים פשוטים וקלים ליישום. מהניתוח עולה כי אזורי החיץ, בשילוב הטופוגרפיה, סייעו בהנמכת עוצמת האש, אולם בפועל צירי התנועה נחסמו ולא אפשרו ביצוע של פעולות כיבוי בעומק השטח. לפיכך, יש לשקול שינויים במפרט אזורי החיץ, ובהם הגדלת רוחב הרצועה הנקייה מעצים והורדת צפיפות העצים בסמיכות לדרכים. זאת ועוד, הכרמים המושקים בלמו את התפשטות השרפה ויש לשקול את שילובם העתידי להגנה מאש באזורים רגישים.

עוצמת השרפה הושפעה מהימצאות חומר צמחי רב (דלק זמין) שנשרף בקלות ובעוצמה על אף תנאי מזג האוויר הרגילים ששררו בימי השרפה. שרפה זו היא עדות לכך שכיום שרפות עזות יכולות להתרחש בתנאי מזג אוויר



כרמים מושקים סמוך ליישוב מעלה החמישה שלא נפגעו בשרפה בהר הרוח, אוגוסט 2021
צילום רחפן



לימנים בצידי הכבישים בנגב – תמונת מצב

גיל סיאקי

מנהל מחלקת יער מרחב דרום קק"ל
Gilsil@kkl.org.il

באזורים אלה (Adhama et al., 2016; Stromeier, 2017). החל משנות ה-60 של המאה הקודמת קק"ל מקימה לימנים ומטפלת בהם. בישראל מעל 400 לימנים, וכולם בנגב. רובם מצויים לאורך כביש 40 (באר שבע-מצפה רמון), כביש 25 (דימונה-באר שבע), כביש 204 (דימונה-שדה בוקר), כביש 211 (צומת טללים-ניצנה) וכביש 31 (צומת שוקת-ערד). העצים שניטעו בעבר בלימנים היו מינים שונים של איקליפטוס (כ-45%), שיטה (כ-13%) ואשל (כ-15%). סוגי עצים אלה מותאמים לנטיעה באזורים יבשים, וניתן לראות פריטים ותיקים שלהם בנגב.

מחלקת יער ושימור קרקע של מרחב דרום בקק"ל עוסקת בעבודות מחקר ובאיסוף נתונים לצורך הרחבת בסיס הידע הקיים הנוגע ללימנים, וזאת לצורך פיתוח כלים לתכנון שיטות לשימור קרקע ולייעור ברחבי הנגב. בשנת 1986 החל ניטור הידרולוגי ארוך טווח של מחלקת יער ושימור קרקע של קק"ל בשיתוף התחנה לחקר הסחף של משרד החקלאות ופיתוח הכפר לצורך הקמת בסיס נתונים הידרולוגי.

במסגרת הניטור נבחרו 22 לימנים, המייצגים אזורים הידרולוגיים שונים ברחבי הנגב. כל לימן נמדד ומופה, וחושבה עבורו עקומת כיוול של היחס בין הגובה המרבי של המים שנאספים בלימן ובין נפח הנגר הנאסף בו. בעזרת מדי גשם זעירים נמדדו במשך השנים כל כמויות המשקעים לאחר אירועי סופת גשם. במקביל, בעזרת מדי רום, נמדדו גובהי הנגר שנאספו בסופות הללו בלימנים. כל לימן שימש, למעשה, כלי למדידת נגר עד ערך מסוים, בהתאם לגובה

לימן (liman) הוא כינוי לאגן סכור קטן, המשמש לאיגום מי גשם באזורים באקלים צחיח, ושברקעיתו נטועות חורשות קטנות המיועדות לגוון את הנוף. הלימנים שונים מאוד מהמרחב הצחיח של הנגב, מאחר שהם יוצרים סביבה לחה וצפופה בעצים (שוחט ושות', 2016). השם לימן מקורו ביוונית, ומשמעו "נמל", מקום נמוך שהמים נקווים בו. הלימנים ממוקמים באזורים מעוטי משקעים, והם למעשה מערכות אקולוגיות מלאכותיות נקודתיות. המערכות מספקות מגוון שירותי מערכת, והחשובים שבהם הם חניונים מוצלים לנופשים, חניוני מנוחה והתארגנות ליחידות שדה באימונים, אספקת עשב וצל למרעה של האוכלוסייה הבדואית, שיפור חזות הנוף בצידי דרכים (גיוון נופי) וכן ייסות הנגר – הלימן מהווה אתר לקליטת מים בעת אירוע גשם (שחק ושות', 2015). חשיבות יתרה נודעת לשירותי המערכת של הלימנים בשל שינוי האקלים. שטח אגן הניקוז המספק מים ללימן יכול לנוע בין עשרות למאות דונמים, וגודלם של 75% מהלימנים קטן יחסית, עד 3 דונם.

מבנה נוסף מעשה ידי אדם הוא שיח – סוללת עפר מלאכותית המוקמת באזורים חצי-מדבריים לרוחב המדרון, בדומה לטרסה. מטרת השיח לעכב את זרימת מי הנגר העילי במורד המדרון ולאפשר למים לחלחל לאדמה. בניית מערכות חקלאיות כמו לימנים ושיחים מתבססת על טכניקות ידע של חקלאות קדומה שהייתה נפוצה בצפון הנגב במשך אלפי שנים (ברנשטיין, 2011). היא אינה ייחודית לישראל ומתבצעת באזורים צחיחים נוספים בעולם, כמו תוניס וירדן, ונחשבת לחלק מהנוף החקלאי התרבותי

המינים של קבוצות טקסונומיות שונות. מחקרים רבים (קרניאלי ושות', 2017) הציעו כי מבין השינויים הרבים שהאדם אחראי להם, ריכוז משאבים, ובעיקר תוספת של חומרי הזנה, הוא גורם מפתח המשפיע על ההרכב והמגוון של המינים באגני ההיקוות המדבריים. נוסף על ריכוז המשאבים ישנן השפעות נוספות שלא נמדדו במחקר זה, כמו שינוי מיקרו-אקלים (הצללה), השפעות הנובעות ממיני העצים שניטעו, עוצמת הרעייה ושינוי בהרכב ובמבנה של חברות אורגניזמים מקבוצות טקסונומיות שונות.

במהלך השנים חלו שינויים רבים בלימנים הנטועים (מבנה, קרקע, צומח) בשל ביצוע עבודות תשתית בשטח אגן הניקוז, פגיעה בסוללות ובמבְרָצי הגלישה, הצטברות אדמת סחף וחדירת מינים של צמחים פולשים. בעקבות זאת, נפגעה יכולת איגום המים בלימנים, ונפגעו מיני עצים נטועים. כל אלה חייבו ביצוע מהלך של שיקום לימנים, שכולל טיפול פיזי בלימנים ובסביבתם הסמוכה ונטיעות השלמה של עצים חדשים.

על פי תוכנית נטיעה שהוכנה בשנת 2014, גודלו שתילים במשתלת גילת במכלים של 25 ליטר ובשקי ענק של 250 ליטר שיועדו לנטיעות בלימנים בלבד. במקביל, הוצאה אדמת סחף מלימנים שנסתמו במשך השנים, ושנפח איגום המים בהם קטן משמעותית. עבודות הוצאת אדמת הסחף התבצעו תוך פגיעה מזערית בשיחים שהתפתחו לאורך השנים (רותם המדבר [*Retama raetam*], סירה קוצנית [*Sarcopoterium spinosum*], מתנן שעיר [*Thymelaea hirsute*], אטד ערבי [*Lycium shawii*]), ובמרחק משורשי עצים ותיקים. הנטיעות התבצעו בעזרת טרקטור מחפרון ומשאית מנוף (בנטיעת עצים בשקי ענק) וגם באופן ידני בלבד (מכלים של 25 ליטר). הצלחת הנטיעות מתבססת על השקיות עזר המתבצעות במכלית מים בשנים הראשונות במהלך הקיץ.

תוכנית הנטיעה כוללת כ-700 עצים מהמינים הבאים: שיטת הנגב (*Vachellia gerrardii*), שיטה סלילנית (*Vachellia raddiana*), אשל הפרקים (*Tamarix aphylla*), אלה אטלנטית (*Pistacia atlantica*), שיזף מצוי (*Ziziphus spina-christi*), חרוב מצוי (*Ceratonia siliqua*), איקליפטוס צווארון (*Eucalyptus torquata*) ואיקליפטוס מריתי (*Eucalyptus spathulate*). האיקליפטוסים הם רק כ-8% מכלל השתילים המתוכננים לנטיעה, וזאת לאחר שנמצא כי עם התמעטות אירועי נגר משמעותיים במהלך מספר שנים ברציפות, עצי איקליפטוס ותיקים הראו סימני עקה והתייבשו. עם זאת, מיני איקליפטוס מסוימים התפתחו היטב ושרדו בתוך הלימנים ואף בתנאים קשים יותר סמוך ללימנים.

הטיפול במינים הפולשים בלימנים מתמקד במינים: שיטה ריסנית (*Acacia salicina*), שיטה כחלחלה (*Acacia saligna*), שיטת ויקטוריה (*Acacia victoriae*) ופרקינסוניה

הסוללה ולמְבָרָץ הגלישה (מתקן שתפקידו הוצאת מים עודפים מהלימן, overflow spillway). נוסף על כך, בכל לימן נמדד קצב החלחול, וכך ניתן לחשב את שארית נפח המים בלימן לאורך זמן (שחק ושות', 2015). נתונים ממחקר זה וממחקרים נוספים, שנערכו במהלך שלשה עשורים, עדיין לא סוכמו, ואנו מקווים לפרסמם באחד מהגיליונות הבאים. בשנת 2016 פורסמה עבודת מחקר (שוחט ושות', 2016) שבדקה את השפעתם של 11 לימנים על הצמחייה ובעלי החיים בלימנים ובסביבתם. נבדקו עושר מיני הצמחים, עושר המינים ומספר הפרטים של עקרבים, עופות ומכרסמים בשלוש נקודות ייחוס: בלימן, במעלה הערוץ המוביל ללימן ובמורד הערוץ המנקז את המים מהלימן. עושר מיני הצמחים היה גבוה ביותר במעלה הערוץ, שם לא הייתה לניקוז המים כל השפעה. עושר המינים היה הנמוך ביותר בתוך הלימן. מספר הפרטים של העקרבים היה נמוך יותר בלימן מאשר בשני בתי הגידול הערוציים. עושר מיני העופות ומספר הפרטים גם בחורף וגם באביב היה גבוה יותר בלימן מאשר בשני בתי הגידול הערוציים. עופות מלווי אדם (עורביים ויונאים) נמצאו בהתאמה גבוהה ללימנים. בלימנים נמצאו מספר פרטים קטן יותר ועושר מינים קטן יותר של מכרסמים מאשר בערוצים המובילים מהם ואליהם. כמו כן, נמצא כי בלימנים שניטעו בהם איקליפטוסים, צפיפות המכרסמים נמוכה משמעותית מאשר בלימנים שניטעו בהם מיני עצים אחרים. מהסקר עולה כי הלימנים יוצרים בית גידול עני יחסית בצמחים ובעלי חיים, למעט עופות.

עבודת מחקר נוספת בדקה את ההשפעות המרחביות של ארבעה לימנים על מגוון הצומח, על עופות ועל פרוקי רגליים (קרניאלי ושות', 2017). מהמחקר עולה כי תחום הלימן שונה מאוד מסביבתו הקרובה מבחינת המגוון הביולוגי, וכי השפעתו מוגבלת לסביבתו הקרובה בלבד. ממצאי מחקר זה מלמדים על השינויים החלים באגני הניקוז מדבריים שמוקמת בהם מערכת קציר נגר כדוגמת לימן. נמצאה השפעה של הלימן על טיב הקרקע, היצרנות הראשונית, מגוון מיני הצומח המעוצה והעשבוני, מגוון פרוקי הרגליים ומגוון מיני העופות.

מערכות קציר הנגר מרכזות משאבים באזור קטן, ובעקבות זאת נוצר שינוי תפקודי ומבני באזור הלימן אל מול מעלה הערוץ ומורד ערוץ הנחל. שינויים אלה כוללים את השונות הטבעית הנובעת מגאומורפולוגיה של אגני הניקוז, הקיימת בין המעלה והמורד של ערוץ הנחל. ממצאי המחקר מעידים שישנו שקלול תמורות (trade off) בין שירותי המערכת האקולוגית שהלימן מספק, כמו צל, מרעה לכבשים ויצרנות ראשונית גבוהה, ובין השינויים המבניים והתפקודיים שנוצרים בו והשפעתו של הלימן על מגוון האורגניזמים שגדלים וחיים בו ובסביבתו הקרובה.

מערכות קציר נגר מרכזות משאבים וגורמות לעלייה בזמינות המשאבים והמים, וכך משפיעות על ההרכב, המבנה ומגוון

בכלל ובליםנים בפרט, מחייבים טיפול מתמשך לאורך מספר שנים כדי להבטיח הצלחה גמורה ומניעת התחדשות מנביטת זרעים או צימוח סורי גזע וסורי שורש. הניסיון להגן סטטוטורית על הלימנים על ידי קידום תוכנית מפורטת ללימנים בנגב עדיין לא צלח, ולכן קיים עדיין קושי בהבטחת היכולת לספק הגנה מיטבית על הלימנים לאורך שנים.

שיכנית (*Parkinsonia aculeata*). הטיפול כולל גיזום של העץ בגובה הקרקע ומריחת החתך בתכשיר הדברה, או ריסוס עלווה לאחר גיזום והקטנת שטח נוף. בשנים האחרונות מתבצע טיפול שונה, המסתמן כטיפול יעיל מאוד, ומבוסס על החדרת חומר הדברה ישירות אל תוך הגזע לאחר פציעתו במספר נקודות. בטיפול זה ניתן להשתמש בכמות מצומצמת של תכשיר הדברה לכל עץ, והוא יעיל מאוד ונוח ליישום. כל הטיפולים להדברת מינים פולשים

מקורות

Adhama A, Wesseling JG, Riksen M, Quessar M, and Ritsema CJ. 2016. A water harvesting model for optimizing rainwater harvesting in the Wadi Oum Zessar watershed, Tunisia. *Agricultural Water Management*, 176, 191–202.

Stromeier S. 2017. *Water Harvesting for Restoring Rangelands in Jordan*. ICARDA.

ברנשטיין א. 2011. הלימנים בנגב – מסמך מדיניות. קק"ל. שוחט א, דומר ע וצביק י. 2016. השפעות אקולוגיות של הלימנים בצפון הנגב על הצומח והחי. דוכיפת צפרות ואקולוגיה. קרניאלי א, פז-כגן ט, צעדי א ושחק מ. 2017. אדפטציה ממשקית לשינוי אקלים בייעור מדברי, היבטים אקולוגיים מבניים ותפקודיים של הלימנים באגני היקוות בנגב. דו"ח לתוכנית מחקר מפ"ק, שחק מ, משה י וברנד ד. 2015. שיקום תפקודי של מערכות אקולוגיות ממודברות בצפון הנגב.



העמסת שתילים של שיטת הנגב בשקי ענק במשתלת גילת לצורך נטיעה בשטח צילום: נחמיה אליאס



שיטים בלימן סמוך לצומת הנגב לאחר אירוע גשם צילום: גיל סיאקי



פריקת שתילים בוגרים של שיטת הנגב ממשאית לצורך נטיעתם בלימן צילום: נחמיה אליאס

התפתחות וצמיחה של שיטים בחלקת אקלום בנגב

תמר כפרי¹ * | דניס לוז'קובוי² | גלעד רייספלד³

1 אזור נגב צפוני, קק"ל
2 אזור ההר, קק"ל
3 מרחב מרכז, קק"ל
* tamarix1@gmail.com

(Cordero et al., 2016). לשיטים קשר מתועד היטב לארץ ישראל. בתקופת התנ"ך שימשו עצי שיטה מקור לחומרי גלם לאדם ("ועֵשֶׂית אֶת-הַקֶּרְשִׁים, לְמִשְׁכָּן, עֲצֵי שִׁטִּים, עֲמֻדִים", שמות כ"ו, 15). בישראל שלושה מינים מקומיים של שיטה הקרובים לשיטים האפריקאיות: שיטה סוככנית (*Vachellia tortilis*), שיטת הנגב (*V. gerrardii*) ושיטה סלילנית (*V. raddiana*). בחמישים השנה האחרונות מתועדת דעיכה של אוכלוסיות מקומיות של שיטים בערבה בשיעור של מעל 60 אחוזים. עצים, בייחוד בסביבה המדברית, הם מרכיב מרכזי במערכת האקולוגית, ובעלי החיים בה מקבלים מהם מזון, צל והגנה. לפיכך, פגיעה בעצים גורמת לפגיעה קשה במערכת האקולוגית כולה (גולד, 2015; Armoza-zvuloni, 2021). עשרות מינים של אורגניזמים קשורים קשר הדוק לשיטים, וחלק מהם נדירים, למשל צבי הערבה, צבי הנגב, קוצן אפור, קיפוד מדבר ואוח מדברי. מכאן, ששיקום נוף דרך נטיעת שיטים יוכל לשמש בסיס לשימור של מערכת אקולוגית רחבה בנגב ובערבה.

בשל היעדר מיני עצים מקומיים מצד אחד וקצב תמותה מואץ של מיני שיטים בבר מצד שני, נבחנה בסקר שיתואר התאמה של עצים זרים מאפריקה הקרובה, שיש להם מבנה נופי דומה לשיטים המקומיות (אשכנזי, 1995; Ginsberg and Atzmon, 2009; Riesman-Berman et al., 2019).

בינאר השנה יצאה החלטת ממשלה לנטיעות עצים במרחב העירוני ככלי למיתון אקלים. אילו מיני עצים ניתן לטעת בהצלחה בשטח המהווה כשליש ממדינת ישראל, בנגב? עצים ניטעו בנגב מאז תקופת הנבטים (במאה הרביעית לפנה"ס) למטרות שונות, כגון סימון מקורות מים ונופש. באר שבע עצמה נוסדה סביב באר מפורסמת המוקפת עצי אשל נטועים (לוז, 1961).

הנגב הוא שטח עצום ומגוון, ובו אזורי מדבר מתון וקיצוני, ולכן לייעור בו שני מאפיינים ייחודיים: א. מיעוט מיני עצים, שמשמעו מגוון ביולוגי נמוך; ב. הפיזור המרחבי של העצים התלוי בנגר עונתי. לרוב הצומח מקובץ סביב מעיינות, לימנים ונחלי אכזב. לעצים באזור צחיח ובאזורי ביניים בין המדבר לים התיכון חשיבות רבה: בעקבות שינוי האקלים שיביא תקופות יובש ארוכות יותר ומדבור מואץ, מיני העצים האלה יוכלו לאכלס אזורים צפוניים יותר. נטיעות עצים בנגב מציבות שלושה אתגרים מרכזיים: א. הישרדות עצים נמוכה; ב. תקופת קליטה ארוכה של עצים; ג. מספר מינים מצומצם המתאים לנטיעה.

עצי השיטה משתייכים למשפחת הקטניות, תת-משפחת המימוסיים. הסוג שיטה כולל כאלף מינים, מהם כמאה גדלים באפריקה. השיטים האלה קוצניות ובעלות נוף סוככני, והן מאפיינות תצורת נוף של סוואנה. בשורשים של מינים מהסוג שיטה מתקיימת סימביוזה עם חיידקים מקבעי חנקן, ועל כן הם חשובים מאוד למחזור החנקן ולטיוב הקרקע

מטרות היעור בנגב

שיטים בקרקע חולית. מוצאם של המינים ממקורות שונים בעולם. בשלב הראשון נבחר אחוז הישרדות של כל מין מאז נטעתם בגילת (כ-20 שנה). לכל מין תשעה פרטים המסודרים בשלושה בלוקים, ומפוזרים אקראית בחלקה, סך הכול כ-300 עצים שנבדקו בשלב הראשון. שיעור הישרדות של 88% לפחות נבחר כסף הישרדות בשל הסבירות שעץ אחד לא יתפתח מסיבה אקראית. מתוך 31 המינים שגדלו בחלקה במשתלת גילת, רק 12 מינים שרדו בשיעור זה. בשלב השני ערכנו מעקב אחר התפתחות פנוטיפית של שבעה מיני עצים (מתוך התריסר): שיטת סֵיאל (*V. seyal*), שיטת אֶלְטִיור (*V. elatior*), שיטת גֵרָארְדִי (*V. gerrardii*), שיטה צהובת גזע (*V. xanthophloea*), שיטה גדולת קרן (*V. grandicornuta*), שיטה סוככנית (*V. tortilis*) ממקור אפריקאי ושיטת שפנר (*V. schaffneri*). ערכנו מדידות שונות לכ-60 עצים משבעה מינים והשוונו ביניהם. מדדנו את גובהם, את קוטר הגזע בגובה מטר (DBH) – מדד המייצג את קצב הצימוח של העץ (איור 1), ואת מדד החופה (Canopy Index) (איור 2). העצים לא עברו גזומים מאז שניטעו, והמדידות נערכו בתקופה שמופע העלווה היה בשיאו.

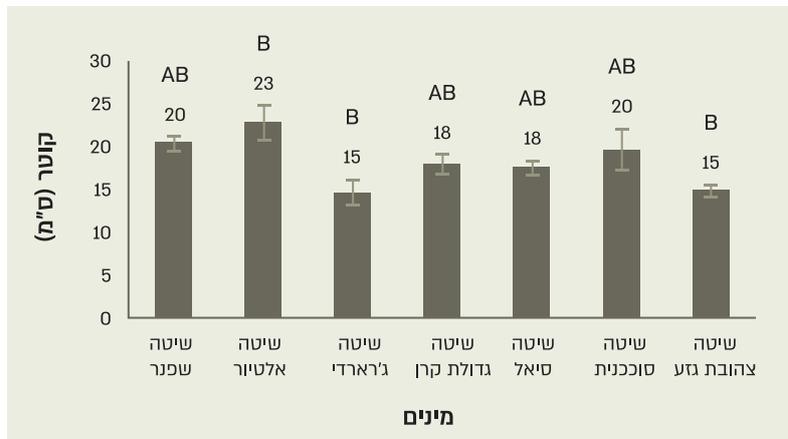
באזורים רבים בנגב כמו גם במדבריות אחרים בעולם, אין התחדשות משמעותית של עצים, אך קיים צורך בשיקום נופי של בתי גידול מדבריים ובמניעת סחף קרקע, הצפות ותופעות דומות (Stanturf et al., 2020). לכן, מטרת הסקר שערכנו הייתה לאפיין מיני עצים שיתאימו למטרות שיקום וגיוון של מערכות אקולוגיות מדבריות. התמקדנו במיני עצים שישמשו לארבע מטרות: הגדלת המגוון הביולוגי המקומי, נטיעות לנופש, ביסוס יער (נטיעת מין חלוץ) ויצירת נוף גבוה לצורך גיוון (Ginsberg and Atzmon, 2009). לשיטים בנגב אפשרויות ריבוי מוגבלות בשל ריבוי לא אחיד מזרעים ותקופת קליטה ארוכה של השתיל המגיע מהמשתלה בשטח (אשכנזי, 1995; Ross, 1979). מגבלות אלה בשילוב דעיכת אוכלוסיות בר בנגב הביאו להחלטתנו לבחון מאפייני צימוח ונוף במיני שיטים ממקורות אפריקאיים, הקרובים מבחינה טקסונומית לשיטים המקומיות. כמו כן, קיים דמיון לשיטים המקומיות מבחינת בית הגידול, הנוף הסוככי, הקוצניות ומיני האורגניזמים הניזונים מהן ומפיצים את הזרעים. הסקר נערך בחלקת האקלום בגילת שגדלים בה 31 מיני

נמצא ששיטת אלטיור היא בעלת הגזע הרחב ביותר ביחס

איור 1

קוטר גזע הממוצע בגובה מטר (בס"מ) בשבעה מיני שיטה

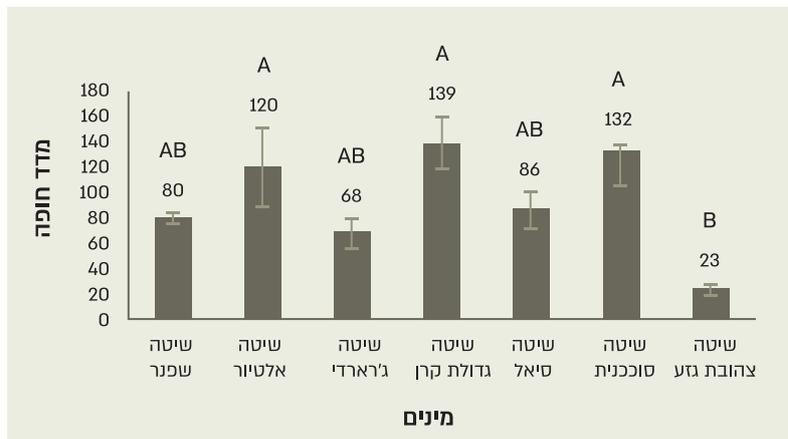
ערך הממוצע ואת המציינת מובהקות (A, AB, B) מופיעים מעל לעמודות. בוצע מבחן שונות (ANOVA) חד-גורמי לבחינת ההבדלים בגובה, בקוטר ובמדד הצמרת. הניתוחים הסטטיסטיים בוצעו בתוכנה jump עם רמת סמך של $\alpha=0.05$. בניתוחי השונות נבחנו התפלגות נורמלית של השיגאה (Sapiro willk test) והומוגניות של שונות (Leaven). לבדיקת ההבדלים בין הנתונים בוצעו ניתוחי post-hoc, וכן בוצעו ניתוחי Tukey-Kremer להשוואה בין המינים שנבדקו.



איור 2

מדד החופה הממוצע של שבעה מיני שיטה

בראש כל עמודה מצוין הערך של מדד החופה (Canopy Index). ערך זה הוא תוצאת חישוב של גודל החופה וצפיפותה. נוסחת החישוב: מדד החופה = שטח כיסוי החופה (מ"ר) X צפיפות העלים. ערך הממוצע ואת המציינת מובהקות (A, AB, B) מופיעים מעל לעמודות.



בנגב. מטרתו העיקרית של **יעור גבוה** נופית ומרוחקת מאתר הנטיעה עצמו, מיישבים ומכבישים. נוכחות חזקה של עצים גבוהים מאפשרת לצמחים נמוכים יותר לגדול לצידם, וכך נוצרים רב-שכבתיות וגיוון. עצים למטרת ייעור זו גבוהים משישה מטרים מפני הקרקע. **יעור לצורכי נופש** מתייחס לצורכי האוכלוסייה המקומית והתיירות המגיעה לנגב. לעצים התואמים מטרה זו יש מפתח חופה גבוה המשקף את האיכות הגבוהה של ההצללה מתחת לחופה. מיני משנה יתאפיינו בערך אסתטי גבוה, שיתבטא בגיוון בצורת העץ ובצבעו. **יעור מהיר** הוא ייעור של מיני עצים בעלי קצב צימוח מהיר יחסית (נבחן על פי קוטר גזע). ייעור מסוג זה מאפשר התבססות מהירה של העצים לאחר נטיעה. לשימור מערכת אקולוגית מדברית אנו מציעים **יעור במינים מקומיים**, כלומר חיזוק אוכלוסיות של עצים מקומיים בנטיעות (אשכנזי, 1995). הרכב העצים, המוצע לנטיעה בהתאם למטרות הייעור השונות המוגדרות כאן, מופיע בטבלה 1, ומוצגים מינים עיקריים לנטיעה רחבת היקף ומינים משניים לגיוון הנטיעות. רגישותה של המערכת האקולוגית המדברית לשינוי האקלים ולשינויים מרחביים בזרימת נגר מציבה אתגר לשיקומה (Stavi et al., 2022). נטיעת עצים בנגב מאפשרת לשקם מערכות אקולוגיות, תומכת במגוון החי והצומח (Stavi et al., 2015; Stanturf et al., 2020; Stavi et al., 2022), וגם מאפשרת להתכונן לתרחיש של תהליך מדבור מואץ. מיני שיטים הם מין מפתח במערכת אקולוגית מדברית שיש לה ערך רב לאדם. מינים כמו שיטה גדולת קרן ושיטת סיאל, מראים פוטנציאל הצלחה גבוה שעדיין לא מומש. מעבר לכך, לפיתוח שיטות לריבוי של שיטים מקומיות יש חשיבות מרובה, וכך גם להשבת מין מקומי, כמו שיטה רעננה (*Senegalita laeta*), שנכחד בשנות ה-60. נטיעת מינים מקומיים היא בעלת ערך בפני עצמה, ויש לבחון אמצעים

למינים הנוספים (קוטר ממוצע של 23 ס"מ), וקצב הצימוח שלה הוא כ-0.5 ס"מ לשנה, מהיר באופן מובהק משאר מיני השיטים שנבחנו (איור 1). קוטר הגזע הממוצע של כל העצים הוא 20 ס"מ. מדד החופה ייצג שני רכיבים של גודל וצפיפות חופה, והוא מכמת את רמת ההצללה של העץ (איור 2). המדד מתחלק לשלוש רמות נבדלות סטטיסטית על פי מבחני השוואה, המצוינים באותיות A, B ו-AB. נמצא שערך מדד החופה של המינים שיטה גדולת קרן, שיטה סוככנית ושיטת אלטיור (A) גבוה באופן מובהק מ-120, שהוא ערך המתאר הצללה גבוהה וצפופה. למינים שיטת סיאל, שיטת שפנר ושיטה גדולת קרן ערכים בין 68-86 (AB) ואילו לשיטה צהובת גזע ערכים של 23 בלבד (B). ערכנו הצלבה בין מטרות הייעור בנגב לבין מאפייני צימוח כמותיים של העצים (טבלה 1). עבור נופש, נבחר מדד החופה כמאפיין מוביל, ועבור ייעור גבוה בעל נצפות ממרחקים נבחר גובה העץ כמאפיין מוביל. בטבלה הגדרנו מין מוביל ומינים מלווים שיהוו מקבץ נוף יערי עם יכולת גמישות והתאמה באתרים שונים. בחרנו במין עיקרי ובמיני מלווים כדי לאזן בין היבטים יעריים ואקולוגיים, כלומר לאפשר יצירת מגוון ביולוגי. בחינת צימוח שיטים בנגב חשובה לשימור מגוון עצום של בעלי חיים, צמחים ויש לה גם השלכות לשימור נוף קדום וליישום מטרות חברתיות ואקולוגיות (Riesman-Berman et al., 2019; Stanturf et al., 2020).

מטרות ייעור בעלות ערך יערי, חברתי ואקולוגי בנגב

הבחירה במיני עצים לייעור מתבססת בעיקר על מדדי הצימוח שלהם ועל יכולתם לשמש לאחת ממטרות הייעור

מטרות הייעור	מין העץ העיקרי	מינים לגיוון
יעור גבוה	שיטת סיאל	שיטה גדולת קרן שיטת אלטיור
יעור נופש	שיטה גדולת קרן שיטה סוככנית	שיטת סיאל שיטת אלטיור
יעור מהיר	שיטת אלטיור	שיטה גדולת קרן שיטת סיאל
יעור במינים מקומיים	שיטת הנגב שיטה סלילנית	שיטה סוככנית שיטה רעננה

טבלה 1

הרכב מינים מומלץ לנטיעה למטרות ייעור שונות

שלושה מיני שיטים לנטיעה, ובהם מין אחד מקומי – שיטה סוככנית. רצוי לבחון עוד את השפעותיהן האקולוגיות של נטיעות אלה על שיקום קרקע ועל שימור מגוון עצום של חי וצומח מקומי. כמו כן, יש לבחון את השפעת הנטיעות במיני מפתח אלה על תהליך המדבור ומופעיו בנגב.

לקידומה במקביל (אשכנזי, 1995). מאחר שבחירת עצים לנטיעה בנגב מאתגרת, וגידולם קשה וארוך יותר מאשר ביתר אזורי הארץ, אנו מציעים במאמר זה כלים השוואתיים לביסוס החלטות אלה. ייחודו של המחקר הוא חיבור בין מטרות ייעור באזורי מדבר לבין אתגרי צימוח שיש לעצים במדבר. מוצע כי קיימת היתכנות טובה להוספת

מקורות

- Riesman-Berman O, Kesar T, and Tel-Zur N. 2019. Native and non-native species for dryland afforestation: Bringing ecosystem integrity and livelihood support. *Annals of Forest Science*, 76, 114.
- Ross JH. 1979. A conspectus of African acacia species. *Memoirs of the botanical survey of South Africa*, No. 44. Republic of South Africa.
- Stanturf JA, Botman E, Kalachev A, Borissova Y, Kleine M, Rajapbaev M, et al. 2020. Dryland forest restoration under a changing climate in Central Asia and Mongolia, a review. *Mongolian Journal of Biological Sciences*, 18(2), 3–18.
- Stavi I, Priori S, and Thevs N. 2022. Editorial: Impacts of climate change and land-use on soil functions and ecosystem services in drylands. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 851751.
- Stavi I, Fizik E, and Argaman E. 2015. Contour bench terrace (shich/shikim) forestry systems in the semi-arid Israeli Negev: Effects on soil quality, geodiversity, and herbaceous vegetation. *Geomorphology*, 231, 376–382.
- אסם י, ברנד ד, טאובר י, פרבולוצקי א וצורף ח. 2014. תורת ניהול היער, מדיניות והנחיות לתכנון וממשק היער. הוצאת אגף הייעור ויחידת הפרסומים, קק"ל.
- אשכנזי ש. 1995. עצי השיטה בנגב והערבה, סקר בעקבות תופעות התיישבות ותמותה. קק"ל.
- גולד ע. 2015. מסמך למדיניות שיטים בערבה. קק"ל.
- לוז נ. 1961. באר שבע: מטרופולין בהתהוות. קובץ מאמרים.
- Armoza-zvuloni R, Shlomi Y, Shem-Tov R, Stavi I, and Abady I. 2021. Drought and anthropogenic effect on Acacia populations: A case study from hyper-arid southern Israel. *Soil Systems*, 5(2), 23.
- Cordero I, Ruiz-Diez B, de la Pena TC, Balaguer L, Lucas MM, Rincon A, et al. 2016. Rhizobial diversity, symbiotic effectiveness and structure of nodules of *Vachellia macracantha*. *Soil Biology and Biochemistry*, 96, 39–54.
- Ginsberg P and Atzmon N. 2009. Semi-arid zone afforestation in Northern Israel: A review. In: Grossberg SP (Ed). *Forest Management*. Hauppauge, N.Y: Nova Science Publishers. pp. 249–270.



מקבץ עצי שיטת הנגב לאורך ערוץ נחל ביער מורן בנגב הצפוני צילום: תמר כפרי

שירותי תרבות ביערות מחטניים לנוכח שינוי האקלים: להמשיך ליהנות מיער מסוג אחר

דניאל אורנשטיין

הפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
danielo@ar.technion.ac.il

מבוא

ידע אלה יאפשר חשיבה ודיון על השפעות אפשריות שעלולות להיות ליערות העתיד על אספקת שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים. כפי שמצוין בכותרת, התפקיד של היער לספק שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים יהיה חשוב מתמיד, אך היער צפוי להיות אחר, והרכב הצמחייה בו יהיה שונה מזה שאנחנו מכירים היום.

מאמר זה הוא מאמר דעה, ומטרתו לעורר את המודעות לחשיבות ההתייחסות לשירותי המערכת האקולוגית לנוכח שינוי האקלים הצפוי בהקשר של ניהול יערות בכלל ויערות מחטניים בפרט.

שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים של היער המחטני בישראל

ישנם שלושה סוגים עיקריים של שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים שיערות מחטניים בישראל מספקים: (א) בילוי, שלוה ורוגע; (ב) ערכי ייחוס (relational values); (ג) ערך אסתטי ונופי (Orenstein, 2021). שירותי המערכת האקולוגית התרבותיים המוזכר ביותר של יערות ים תיכוניים הוא ערך הבילוי בחיק הטבע, והוא נמדד לפי כמויות המבקרים ולפי תוצאות של סקרי דעת קהל (Berneti et al., 2019; Campos et al., 2019). לא מעט מחקרים שבוצעו

העומסים המתמידים של מבקרים ביערות הקק"ל מעידים על כך שהיערות הם ספקים מרכזיים של שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים בישראל. לפי התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע, שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים "מעשירים את חייהם של בני אדם באמצעות תועלת המופקת מהתנסויות פעילות (אקטיביות) וסבילות (פסיביות) או המתייחסת לערך הקיום" (רם, 2018). שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים יכולים להתייחס גם להנאה שלנו, המבקרים, מבילוי בחיק היער וגם לתרומה של הסביבה הטבעית להגדרת הזהות שלנו כיחידים וכחברה (Tal, 2013; Orenstein, 2021). היער המחטני הטיפוסי בישראל מספק לא רק מיקום לפעולות רחבות בחיק הטבע, אלא נתפס בעיני ציבור רחב כחלק מהנוף התרבותי והמסורתי של המדינה, ובמידה מסוימת גם כחלק מהזהות שלה. מצב זה הוא תולדה של תהליך מוכוון ומוצלח מצד מוסדות המדינה, בעיקר של קק"ל, ליצור נוף ייחודי ישראלי, וגם תוצאה של תהליך למידה טבעי של בני האדם שנוטים להתייחס לנופי הילדות שלהם כנוף ה"נכון" והאהוב עליהם.

שינוי האקלים צפוי להשפיע בצורה משמעותית על הרכב היער המחטני בישראל וגם על הרגלי השימוש של האנשים הרואים ביערות מקור בילוי, קיט ונופש. במאמר דעה זה יוצג סיכום קצר של שני תחומי ידע – שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים של היערות המחטניים בישראל ותחזיות של השפעת שינוי האקלים על אותם יערות. החיבור בין תחומי

כך, כפי שאנשים לומדים לאהוב את היער, הם גם יכולים ללמוד שלא לאהוב את היער, בהתאם לדעות של מתנגדי מדיניות נטיעת יערות בישראל שנובעת מזווית אקולוגית, אבל גם פוליטית. במקרה של יערות מחטניים בישראל, ייתכן שחינוך ושיח ציבורי הם מרכיבים מרכזיים בהשפעתם על עדיפויות נוף.

עתיד היער המחטני במשטר שינוי אקלים

האקלים בישראל, כמו בשאר אגן ים התיכון, צפוי להיות יבש יותר וחם יותר בעקבות שינוי האקלים העולמי – חלק מהמגמות האלה כבר נמדדות, כגון עלייה בטמפרטורה הממוצעת, ירידה (אם כי בינתיים לא מובהקת) בכמויות המשקעים, ועלייה בעוצמת הסערות (Hochman et al., 2019; Yosef et al., 2018). על פי המודלים האקלימיים, כמויות המשקעים הממוצעות צפויות לרדת במהלך המאה ה-21 בכל אגני ההיקוות בשיעור ממוצע של כ-10% לקראת סוף המאה. כבר בתקופה הקרובה חזויה עלייה קלה אך מובהקת בשכיחות בצורות ברוב האגנים (ונגר ושות', 2021). הרחבה בנושא הגורמים לשינוי האקלים והשלכותיו ניתן למצוא בגיליון זה (גרוס, 2022).

במשטר אקלים של יובש וחום ישנם חוקרים המצפים לשינוי משמעותי בהרכב ובמבנה של היער המחטני הים תיכוני (Herrero et al., 2021; Moreno et al., 2021), אחרים טוענים שעדיין אין מספיק מידע כדי לקבוע באופן חד-משמעי מה יהיה גורלם של יערות העצים המחטניים באזור (Benito Garzón and Vizcaíno-Palomar, 2021). מחקרים מרחבי העולם מצביעים על איום מצטבר ליערות, שנובע מיחסי גומלין בין שינוי האקלים, שרפות והתפרצויות של מזיקים (Forzieri et al., 2021). אחת מההשלכות של המתואר לעיל היא תמותה נרחבת של עצי אורן (רוטנברג ויקיר, 2018). ייתכן שהשפעת שרפות יער, שהיערות המחטניים באזור הים תיכוני חשופים להן כבר כיום, תלך ותגבר. כמו כן, יובש יביא גם לתמותת עצים שלא עומדים בלחצים הסביבתיים המלווים את שינוי האקלים, והחשיפה להתפרצויות מזיקים תגבר. תרחיש אפשרי הוא שיערות מחטניים יהפכו לבתה ולחורש, בעיקר בקצות שטח התפוצה של אורן ירושלים, כמו בישראל (Moreno et al., 2021). לפי מחקרים שונים, צפוי הרכב חדש של יער, המבוסס על עצים ובני-שיח עמידים יותר לחום וליובש, כגון אלון, בר-זית ואלה. רוטנברג ויקיר (2018) קושרים בין שינוי האקלים החזוי ובין לחצי הפיתוח הצפויים במדינת ישראל, ומשערים כי לנוכח שילוב הלחצים, הדאגה לשרידות היערות והחורשים בישראל תיצור אתגר בכל הנוגע לשמירה על נופי הארץ ועל תנאי המחיה בה.

בישראל מעידים על חשיבות רבה ליערות קק"ל מבחינת מטרת בילוי בטבע. הפעילויות מתרכזות בעיקר בפיקניקים ובטיולים רגליים (קולינס-קריינר וכתר, 2021), מה שמכונה בפי המבקרים ביער בכרמל, "מיטיבי לכת ומיטבי לסת" (הילה שניא, מידע אישי). הפיקניק ביער הוא חלק מרכזי וכפולרי אצל אזרחי ישראל (קולינס-קריינר וכתר 2021; Negev et al., 2019), ונוסף על כך, סקרי מבקרים בשמורת הכרמל מעידים שהמבקרים מפיקים סוגים שונים של תועלת מהשהייה בטבע וביער, כגון רוגע, אוויר נקי ועצם השהייה בחוץ (Negev et al., 2019). חשוב לציין שחלק מהשימושים האלה, כגון פיקניקים, רצוי לנתב למקומות כמו יערות קק"ל, כדי לווסת את העומס והנזקים האקולוגיים שמתלווים לשימושים אלה בשמורות טבע.

ערכי ייחוס (relational values) הם הדרכים שהטבע משפיע בהן על הזהות האינדיבידואלית או הקולקטיבית שלנו, או שהם משקפים את האופן שהטבע מווסת את היחסים בין בני אדם (Chan et al., 2018). מצד אחד, הטבע (ובייחוד היערות) משרתים כ"רקע" למפגשים בין אנשים בלי להתייחס ל"סוג" הטבע (הרכב העצים) או למגוון הביולוגי. כל עוד הטבע מאפשר מפגש מחוץ לבית ומחוץ לעיר, ומספק שירותי מערכת אקולוגית בסיסיים של אוויר נקי, מרחב ותנאי אקלים רצויים בהתאם לעונה (צל, שמש, מים) – סוג העצים רלוונטי פחות למבקרים אלה (זמרני ושות', 2017). מאידך גיסא, בעיני רבים היער המחטני מייצג את זהותם ומחבר בין האדם לאדמה ולנוף (Tal, 2013) – מיערני קק"ל, דרך המבקרים הרבים ועד מחפשי פטריות וצנוברים. עבור המשתמשים האלה ההרכב של הצמחים והחיות כן משמעותי, וכל שינוי ביער מלווה גם בשינויים של הפסד ערכי אצל חלק מהאכלוסייה (Holmgren and Scheffer, 2017).

לאחרונה הקשר בין האוכלוסייה והיער המחטני בא לידי ביטוי בעדיפויות נופיות. מספר מחקרים הוכיחו שהיער הוא אחד הנופים המועדפים בישראל, אם כי מחקרים אחרים הראו תמונה אחרת, ולפיה נופי היער אינם מועדפים יותר או פחות בהשוואה לנופים ישראליים אחרים. בדו"ח שסיכם את המחקרים הללו, הוצע ששיטות מחקר שונות אחראיות לתוצאות הסותרות. מחקרים שבדקים מספר רב יותר של נופים וזוויות הסתכלות שונות על היער, למשל, נוטים לקבל תשובות חיוביות יותר לגבי נופי היער (Orenstein, 2021).

למרות התוצאות הסותרות לגבי העדפה נופית של האוכלוסייה, גם לנוכח ההבדלים שעשויים לנבוע מהבדלים בשיטות המחקר, מסתמנת מסקנה חשובה הנוגעת להטיות אפשריות של סוקרים לגבי הערך התרבותי של היער שעלולות להשפיע על תוצאות של מחקרים שונים. נוסף על

המשך אספקת שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים נוכח שינוי האקלים האזורי – מחשבות לעתיד

יחד עם השינויים בהרכב ובמבנה של היער, חשוב לציין שעלייה בטמפרטורות תשפיע, כנראה, גם על הרגלי הבילוי בחיק הטבע. בימים חמים במיוחד תדירות הביקורים ביערות עשויה לרדת, אנשים יימנעו מיציאה החוצה, ויתרכזו במקומות מוצלים. עלייה בגודל האוכלוסייה בישראל וירידה בכמות השטחים הפתוחים בגלל עיור והרחבת תשתיות שונות יובילו לעלייה בביקוש לאזורי בילוי בטבע מכל סוג. כושר הנשיאה של יערות, שעל פי רוב, רגישים כחות מבחינת המגוון הביולוגי ביחס לשמורות הטבע למיניהן, יאפשר קליטת קהל גדול יותר. עובדה זו מצביעה על התעצמות חשיבותם של היערות כאזורים שמספקים שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים לאוכלוסייה בהשוואה לאזורים רגישים מבחינה אקולוגית. קליטת קהלים גדולים יותר תדרוש הרחבת שטחים ותשתיות ביערות שיעודם נופש וטיילות, כפי שהוגדרו לפי תורת ניהול היער (אסם ושות', 2014).

ישנן שתי אסטרטגיות להתמודדות עם שינוי אקלים: אִפְחוּת (mitigation) והסתגלות (adaptation). האסטרטגיה הראשונה, אִפְחוּת, מתמקדת בצעדים שיכולים להפחית את כמות פליטות גזי החממה לאטמוספירה, כדוגמת מעבר לאנרגיות חלופיות במקום דלקי מחצבים, או הגברת קצב קיבוע הפחמן בצמחייה, למשל דרך ייעור. האסטרטגיה השנייה, הסתגלות, מתמקדת בבלימת ההשפעות הצפויות של שינוי האקלים על החיים של בני האדם, כמו חיזוק קירות מגן מול הים לבלימת ההשפעה של עליית מפלס הים, או מיתון ההשפעות, כמו שתילת עצים במרחב העירוני להורדת עומס החום בעיר. כדי להמשיך לספק שירותי מערכת אקולוגית לחברה הישראלית לנוכח השפעות שינוי האקלים, הפעולות של קק"ל יצטרכו להתמקד בהסתגלות – להתאים את המרחב לאספקת שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים ואחרים תוך הסתגלות לשינוי אקלים.

לפנינו שני אתגרים עיקריים: עליית הטמפרטורות שתגרום להקצנה בתנאי היובש ולהשפעה על הרכב הצמחייה ביערות ולעליית הסיכון לשרפות מצד אחד, ועלייה בביקוש לאזורים מוצלים וקרירים בגלל עליית הטמפרטורות, גידול האוכלוסין וצמצום השטחים הפתוחים, מצד שני. בשל כך, השאלות התכנוניות המרכזיות לקק"ל הן: (א) מה יהיה הביקוש לשירותי מערכת אקולוגית תרבותיים בעתיד כאשר מביאים בחשבון את המגמות של גידול האוכלוסין, הצמצום בשטחים הפתוחים והשינוי בהרגלי הבילוי בחיק הטבע? (ב) איך היערות המחטניים ואזורי טבע אחרים שקק"ל מנהלת יוכלו לספק את שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים שלהם?

אחד התפקידים המרכזיים של היער, לפי תורת היער של קק"ל, הוא לספק מגוון שירותי מערכת לאוכלוסייה, מתוך הכרה בכך שקיומו של האדם ורווחתו תלויים במגוון הביולוגי ובשירותים שהמערכות האקולוגיות מספקות לו (אסם ושות', 2014). הארגון יצטרך להיערך לתכנון חניונים בקנה מידה גדול יותר, שמבטיחים מספיק צל ותשתיות לשימושים אינטנסיביים. באתרים אלה יהיה צורך בחשיבה מחודשת לגבי בחירת הרכב הצמחייה החדשה לשתילה. יש לשקול מעבר לשתילת עצים עמידים ליובש ולטמפרטורות שגבוהות יותר מאלה הקיימות מהיום, ומיני עצים עמידים בפני שרפות. בחירות אלה גם יצטרכו להביא בחשבון, לפי תפיסות של המבקרים, אספקה של צל ונוף ירוק, מגוון ומסודר (אורנשטיין ושות', 2019). חשוב לציין שתכנון אלה חשובות לרוב המבלים ביער, בעוד שמיני העצים הגדלים שם חשובים כחות מבחינתם (זמרני ושות', 2017).

במקביל, ממשק של אזורים רחבים יותר (האזורים שאינם מיועדים לשימוש אינטנסיבי) ידרוש שיקולי עיצוב נוף ואספקת שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים הקשורים לטיולים ולהנאה מהנוף. באזורים אלה רצוי לשים דגש על שלמות מערכתית (ecosystem integrity), כדי ששטחי קק"ל יוכלו להמשיך ולספק שירותי מערכת אקולוגית מכל הסוגים (ויסות, אספקה וגם תרבות) בתנאים משתנים. ניהול כזה לא מתמקד בשימור של הרכב קבוע של מגוון ביולוגי, אלא מבטיח תנאים רצויים ושמירה על משאבים בתוך המערכת (מים, קרקע, נוטריינטים), שיאפשרו פוריות ומגוון בתנאים החדשים שילוו את שינוי האקלים. תורת ניהול היער של קק"ל כבר מכילה את העקרונות האלה, ורואה באתגרים, כמו שרפות ויובש, הזדמנות לחזק את המורכבות של היער ואת העמידות שלו בפני אתגרי העתיד (Osem et al., 2021).

לסיכום, על פי התחזיות יתחוללו שינויים משמעותיים בהרכב היערות בישראל בשל שינוי האקלים באזור, וחלק מהם יהיו קשים לעיכול (תמותה של עצים, עלייה בתדירות של שרפות). על קק"ל – כמטפלת וכמטפחת של יערות בישראל – להוביל את השיח של הסתגלות וניהול נרטיב חדש שמדגיש חוסן ולא שמרנות (כלומר, שהיער אינו חייב להישאר כמו שהיה עד כה). בסופו של דבר, ייתכן ששינוי האקלים יקבע את הרכב היער שישורד וישגשג בנוף הישראלי (עם אורנים או בלעדיהם), וקק"ל תוכל לשנות את השיח ולאפשר את המעבר ליער ולנוף החדש, שמתאימים יותר לתנאי האקלים החדשים. בצורה זו קק"ל תוכל להמשיך לספק שירותי מערכת אקולוגית תרבותיים, לשמור על ההזדהות של אזרחי ישראל עם היערות ולחזק אותה, ולאפשר בילוי מיטבי בחיק הטבע למבקרים הרבים הפוקדים את יערות קק"ל מדי שנה.

תודות

תודה לד"ר רונית כהן ולהילה שגיא על תמיכתן ברעיונות ובכתיבה. תודה למערכת כתב העת יער ולמבקר או המבקר. המאמר.

מקורות

- Herrero A, Ruiz-Benito P, Andivia E, Madrigal-Gonzalez J, Villar-Salvador P, Ratcliffe S, et al. 2021. Mediterranean pine forest distribution: Assessing vulnerability and resilience under climate change. In: Ne'eman G and Osem Y (Eds). *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Cham: Springer. pp. 251–277.
- Hochman A, Harpaz T, Saaroni H, and Alpert P. 2018. The seasons' length in 21st century CMIP5 projections over the eastern Mediterranean. *International Journal of Climatology*, 38, 2627–2637.
- Holmgren M and Scheffer M. 2017. To tree or not to tree: Cultural views from ancient Romans to modern ecologists. *Ecosystems*, 20(1), 62–68.
- Moreno JM, Morales-Molino C, Torres I, and Arianoutsou M. 2021. Fire in Mediterranean pine forests: Past, present and future. In: Ne'eman G and Osem Y (Eds). *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Cham: Springer. pp. 421–456.
- Negev M, Sagie H, Orenstein DE, Shamir SZ, Hassan Y, Amasha H, et al. 2019. Using the ecosystem services framework for defining diverse human-nature relationships in a multi-ethnic biosphere reserve. *Ecosystem Services*, 39, 100989.
- Orenstein DE. 2021. The cultural ecosystem services of Mediterranean pine forests. In: Ne'eman G and Osem Y (Eds). *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Cham: Springer. pp. 631–655.
- Osem Y, Porat Y, Zoref C, and Bonneh O. 2021. Forest policy in Israel – From creation of forest plantations to sustainable management of forest ecosystems. In: Ne'eman G and Osem Y (Eds). *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Cham: Springer. pp. 701–726.
- Tal A. 2013. *All the Trees of the Forest: Israel's Woodlands from the Bible to the Present*. New Haven, Conn: Yale University Press.
- Yosef Y, Aguilar E, and Alpert P. 2019. Changes in extreme temperature and precipitation indices: Using an innovative daily homogenized database in Israel. *International Journal of Climatology*, 39, 5022– 5045.
- אורנשטיין ד, לב מ, פורת י וצוק א. 2019. ערכיות חזותית בעיני מטיילים ביערות ברייה ומירון בעקבות טיפולים לאחר נקי שלג. דו"ח מסכם. קרן קימת לישראל.
- אסם י, ברנד ד, טאבור י, פרבלוצקי א וצורף ח. 2014. תורת ניהול היער בישראל – מדיניות והנחיות לתכנון ולמשק היער. קרן קימת לישראל.
- ונגר ד, חלפון נ ויוסף י. 2021. מגמות היסטוריות ומגמות חזויות בדפוסי המשקעים בישראל עד סוף מאה הנוכחית – דו"ח מסכם. רשות המים. מדינת ישראל משרד התחבורה השירות המטאורולוגי.
- זמרון ח, איזנברג א ואורנשטיין ד. 2017. בין תרבויות של טבע לקהילות של ידע: ידע מקצועי וידע מקומי בתפיסת נופי יערות הכרמל. סוציולוגיה ישראלית, 2(18), 145–156.
- יצחקי ע, לוטן א, צמח שמיר ש, נב מ, וויטנברג ל, שגיא ה, ושות'. 2019. הערכת שירותי המערכת האקולוגית ורווחת האדם בשמורה הביוספירה הר הכרמל – דו"ח מסכם. המשרד להגנת הטביבה.
- קולינסקריינר נ וכתר ע. 2021. העדפות קהל בחינוכי יער. יער, 21, 15–23.
- רטנברג א ויקר ד. 2018. ייעור, אקלים ועתיד היערות בישראל. אקולוגיה וסביבה, 3(9), 22–33.
- רם י. (עורכת). 2018. שירותי תרבות – הפרק המלא. המארג – התכנית הלאומית להערכת מצב הטבע. תל אביב.
- Benito Garzón M and Vizcaino-Palomar N. 2021. Biogeographical patterns of local adaptation and plasticity of Mediterranean pines and their implications under climate change. In: Ne'eman G and Osem Y (Eds). *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Cham: Springer. pp. 71–82.
- Bernetti I, Chirici G, and Sacchelli S. 2019. Big data and evaluation of cultural ecosystem services: An analysis based on geotagged photographs from social media in Tuscan forest (Italy). *iForest*, 12, 98–105.
- Campos P, Caparrós A, Oviedo JL, Ovandoa P, Álvarez-Farizo B, Díaz-Balteiro L, et al. 2019. Bridging the gap between national and ecosystem accounting: Application in Andalusian forests, Spain. *Ecological Economics*, 157, 218–236.
- Chan KM, Gould RK, and Pascual U. 2018. Editorial overview: Relational values: What are they, and what's the fuss about? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 35, A1–A7.
- Forzieri G, Girardello M, Ceccherini G, Spinoni J, Feyen, L, Hartmann H, et al. 2021. Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nature Communications*, 12, 1081.

פרויקט יער האקלים לנטיעת עצים אחראית במרחב המיושב

דניאל כץ

יוזמת האנרגיה הטובה, מיזם חברתי לשינוי אקלים
daniel@goodenergy.org.il

ל"יער האקלים" שני שלבים ביצועיים: שלב ה"כעוטון", ושלב נטיעות הקבע.

ה"כעוטון" דומה במהותו למשתלות קק"ל, ומטרתו טיפוח שתילים בדליים והכנת עץ צעיר לנטיעת קבע בקרקע כעבור שנה. "כעוטונים" אלה מוקמים בבתי ספר, בחוות חקלאיות של משרד החינוך, בחצרות של חברות היי-טק ועוד. את השתילים הצעירים, שמגיעים כתרומה ממשתלות קק"ל, שותלים ילדים ומבוגרים המשתתפים ביום פעילות הכולל הדרכות על משבר האקלים, על חשיבותם של העצים ועל שתילה נכונה. מתוך 14 הכעוטונים שבפרויקט, שמחה וגאווה מיוחדת שמורות לכעוטון הוותיק (2012) והמתחדש מדי שנה על גג דיזנגוף סנטר בתל-אביב, ולאחיו הצעיר הצומח על גג בניין כלל בירושלים (2020).

בנטיעות הקבע מוקד הפרויקט הוא בעבודת קרקע נכונה למטרות קליטה ושרידות של העצים. אנחנו בוחרים מיני עצים מתאימים (לדוגמה, מינים של עצי חורש ים תיכוני, כמו אלון התבור, אלה אטלנטית, שקד מצוי, חרוב מצוי, שיזף מצוי, כליל החורש), מתאימים ומבטיחים מראש את האחריות להשקיה ולטיפול בחמש השנים הראשונות לאחר הנטיעה, ומפקחים על הביצוע ועל התחזוקה בשנתיים הראשונות מתוכן. במסגרת הביקורים של צוות הפרויקט באתר מוחלפים עצים שלא נקלטו בשתילים חדשים. לאחר חמש שנות השקיה ותחזוקה ישרדו מרבית העצים הנבחרים גם

מבצע הייעור יוצא הדופן של קק"ל הפך ב-120 השנים האחרונות את ארץ ישראל לירוקה ומיוערת. עם זאת, פעולות הייעור של קק"ל נעצרות בכניסה לתחום שיפוטן של הרשויות המקומיות. למעשה, ועל אף ניסיונות עבר, כמעט לא נעשות כיום פעולות של נטיעת חורשות בתוך תחומי הערים והיישובים בישראל (Urban Afforestation). "יער האקלים", פרויקט של עמותת יוזמת האנרגיה הטובה, שואף לגשר על הפער שנוצר בתחום הייעור העירוני בארץ. זהו פרויקט נטיעת עצים בערים וביישובים בכל רחבי ישראל. מטרת הפרויקט היא לנטוע כמות משמעותית של עצים בשטחים ציבוריים שוליים במרחב המיושב והבנוי כדרך להתמודדות עם השפעות שינוי האקלים וצפיפות האוכלוסין.

במרחב הבנוי מצויים שטחים ציבוריים מוזנחים, עזובים ומלאי פסולת. על אף מחויבותן הסטטוטורית של הרשויות להנגשת השטחים האלה לציבור התושבים – השטחים נותרים נטושים וללא כל התערבות במשך שנים רבות. בפרויקט יער האקלים אנו עובדים בשיתוף פעולה עם הרשויות המקומיות, והופכים אזורים ציבוריים עזובים לחורשות עצים ירוקות ומזמינות. הפרויקט מהווה המשך לפרויקט הייעור הלאומי של קק"ל, ומטרתו להוסיף כמה שיותר עצים בתוך היישובים ובסביבתם. פרויקט יער האקלים אינו ממוקד באזור גאוגרפי תחום, והוא למעשה מצבור של חורשות עירוניות בכל חלקי הארץ.

מול רשויות מקומיות ומול גורמי קהילה שונים ביישובים עצמם ואיתור מתמיד של שטחים נוספים לנטיעה ביישובים חדשים. בפרויקט תומכות עשרות חברות עסקיות, כמו גם אנשים פרטיים שמתנדבים ומשתתפים בשלבים השונים של הפרויקט. הפרויקט ממשיך לגדול ולהתפתח, וצפויים שיתופי פעולה נוספים עם הקרן הקימת לישראל גם בעתיד. בשנים הקרובות אנו שואפים להמשיך ולנטוע בכמה שיותר רשויות מקומיות מכל הקשת הגאוגרפית, הדמוגרפית והחברתית-כלכלית בישראל. רתימה של שותפים נוספים תאפשר לנו להגדיל את מערך הפרויקט ולנטוע גם בשטחים ציבוריים קטנים יותר. כך נוכל להיכנס יותר לעומק המרחב הבנוי, להוות גורם משמעותי ביישום הרעיון ובקידום תשתיות "יער עירוני" ברשויות המקומיות, ולהביא את שלל יתרונותיו של כל עץ ועץ ממש עד לסף ביתם של כמה שיותר תושבים במדינת ישראל.

ללא מים וטיפול נוסף. כל העצים ניטעים בבורות מתאימים עם חומרי הזנה, ומחוברים למערכות השקיה מסודרות. את הפרויקט מלווים בהתנדבות באופן שוטף יועצים מומחים בתחום השתלנות והיערנות ממנהל המחקר החקלאי-מרכז וולקני של משרד החקלאות ופיתוח הכפר, מומחים פרטיים בתחום וכן משרדו של המדען הראשי של קק"ל. דגש חשוב נוסף בפרויקט הוא ההיבט הקהילתי – ימי הנטיעות בפרויקט נעשים תמיד בשיתוף תושבים וקהילות מקומיות, וזאת מתוך רצון לחבר את תושבי הערים אל העצים ובכך לסייע לטיפוחם ולאחזקתם.

כיום, כשנה וחצי לאחר נטיעת חלקת "יער האקלים" הראשונה בעיר טיבה, ניטעו למעלה מ-5,800 עצים הפזורים ב-32 ערים ויישובים מצפון הארץ ועד דרומה (אתר הפרויקט: <https://www.goodforest.org>). ישנו מערך שלם הכולל הקמה וטיפול בפעוטוני עצים, עבודה



"פעוטון פרדסנות": פעוטון עצים של 500 שתילים שהוקם באתר הפרדסנות ע"ש מינקוב ברחובות צילום: דניאל כץ



יום נטיעות יער האקלים בעיר אלעד, אפריל 2021 צילום: דניאל כץ



יום נטיעות יער האקלים בעיר עכו, פברואר 2021 צילום: דניאל כץ

יער של ספרים

גלעד אוסטרובסקי

מנהל אגף הייעור, קק"ל
Gilado@kkl.org.il

התמוטטות, מאת ג'ארד דיימונד, 2008, הוצאת מטר העץ, מאת ג'ון פאולס, 2021 (1979), הוצאת אסיה

הכולל מרכיבים של לכידות חברתית ומשטר פוליטי יציב; טיבם של יחסי השכנות; יחסי סחר המבטאים את היכולת להסתמך על משאבים מבחוץ וליהנות מפירות המשאבים המקומיים.

הניתוח שלו מרתק, ובמהלכו אנחנו גם לומדים עוד פרק על הגאוגרפיה וההיסטוריה של חבלי ארץ שונים ברחבי העולם. בכל המקרים הנחקרים, לא היה זה משתנה יחיד שבגללו קרסה החברה. תמיד היו מספר גורמים שחברו יחדיו וחוללו את הנפילה. במרביתם, ההתדרדרות כללה בירוא יערות נרחב שגרם להגְרָעַת קרקעות, לפגיעה במשק המים ולירידה חדה בפוריות הקרקע וביכולת לייצר מזון ומשאבי עץ.

הספר כולל פרקים על מחוזות רחוקים וקטנים, כמו אי הפסחא ואיי פיטקרן, גינאה החדשה והאי היספניולה הנחלק בין הרפובליקה הדומיניקנית והאיטי, לצד מדינות גדולות בהיסטוריה המודרנית (יפן, סין, מונטנה בארה"ב). המקרה של אי הפסחא הוא אולי המפורסם ביותר: אי מבודד באוקיינוס השקט שנמצאו בו מערכות של פסלים מרשימים בגובה של 5 מטרים ויותר. כיום האי חשוף מצומח וסחוף רוח, עדות אילמת לקריסה הסביבתית חברתית שאירעה בו, בעוד הממצאים הארכאולוגיים

גיליון שינוי האקלים מארח הפעם שני ספרים השונים זה מזה בתכלית. האחד עוסק במקומו של שינוי האקלים בהתמוטטות חברות אדם, והשני מציע מבט ערכי-רוחני, ובדרכו הפיוטית והמיוחדת קורא לנו לא לוותר על העצים.

שינוי האקלים קיבל הכרה גוברת בשנה האחרונה, ממשלות נזעקות להכין תוכניות פעולה, להעמיד תקציבים ולהתכונן לבאות. אחד הקשיים של האנושות להגיב כראוי לשינוי האקלים הוא חוסר ודאות המתבטא בשני ממדים: לחזות כיצד בדיוק יתבטא שינוי האקלים מבחינת הטמפרטורה ותופעות אקלימיות אחרות, ומה תהיה השפעתו על הסביבה ועל החברה האנושית בהיבטים פיזיים, פוליטיים וחברתיים. אחת הדרכים ללמוד ולנסות להבין היא באמצעות מבט לאחור, לבחון כיצד השפיעו שינויי אקלים במהלך ההיסטוריה על חברות במקומות שונים בעולם ולנסות ללמוד מתגובתן לשינוי. 'התמוטטות' מאת ג'ארד דיימונד הוא ספר רחב יריעה, הכתוב באופן בהיר ומרתק. נאמן לדרך שהתווה ברובים, חיידקים ופלדה' (הוצאת עם עובד, 1997), דיימונד רואה בתנאים הסביבתיים גורם מכריע ביכולת ההסתגלות של חברות, אך כאן הוא הולך צעד נוסף ומציב חמישה היבטים שעל פיהם נבחנים המקרים ההיסטוריים שהתרחשו בהם התמוטטות: השחתת הסביבה וכלוי המשאבים; שינוי אקלים; מצב חברתי-פוליטי

שטח לחקלאות, מאחר שמטרתם הייתה להקים מושבה המבוססת על גידול בקר ומשק חלב. הנורדים הפגינו לזלזול באינואיטים המקומיים שכלכלתם ותרבותם התבססו על הים, ודיג וציד סיפקו את מרב המשאבים שנדרשו להם. את בתיהם (האיגלו) בנו מקרח, ומקור החום היה שומן לווייתנים, וכך לא נזקקו לעץ. הנורדים מיאנו לחקות את האינואיטים וללמוד מיומנויות חדשות, ולכן נטשו לבסוף את גרינלנד. כך, תובנה מרכזית העולה מהספר היא מידת יכולתה של חברה לשמור על הערכים שלה ועל תרבותה, אך גם לדעת לוותר על חלק מן הערכים, להשתנות בהדרגה ולתכנן לטווח הארוך.

הקושי שלנו להתמודד עם משבר האקלים נעוץ בראש ובראשונה בהקשר הערכי של התפתחות האנושות. האדם המודרני התרחק מן הטבע, מסתכל עליו במבט תועלתני, ומנצל אותו למטרותיו שהולכות וגדלות ללא הפסק. 'העץ של ג'ון פאולס מזכיר לנו עובדה כאובה זו: איבדנו את המגע הישיר והבלתי תכליתי עם היער, ויש לכך השלכות הרות אסון. זהו ממזר אישי פילוסופי בזכות הטבע הפראי, שיר



כריכת הספר התמוטטות, מאת ג'ארד דיימונד. לקוח מוויקיפדיה

ומחקרים הבודקים גרגרי אבקת פרחים (pollen) מעידים שהאי היה מיוער בעבר. היערות שכיסו את האי הושמדו, וכך אבדו משאבים חיוניים לקיום: חומר גלם לבניית סירות וכלי עבודה, עץ להסקה וחומר בנייה לבתי המגורים. תרבות שלמה שהייתה מבוססת על עץ השחיתה את המשאב המרכזי של חייה, וכך התמוטטה ונמוגה. מדוע עשו כך? היה זה שילוב של שינוי אקלים והחמרת התנאים הסביבתיים בשילוב עם עוינות בין השבטים שלחמו זה בזה. בידודו של האי לא אפשר לו לפצות על המחסור המקומי באמצעות סחר. כך, מצב פוליטי רעוע בשילוב החרפה אקלימית גרמו לכילוי המשאבים ולהתמוטטות. מצמררת היא ההשוואה בין אי הפסחא המבודד מהעולם לבין כדור הארץ שלנו המבודד מהיקום. איש מבחוץ לא יבוא לעזרתנו.

פרק מעניין מוקדש ליפן, שהשכילה לנהוג בתבונה ופעלה לשמור על היערות שלה (74% משטחה מיוער). בפרק אחר בספר נערכת השוואה מעניינת בין מדינות שכנות שמצבן החברתי-פוליטי-סביבתי שונה באופן ניכר. האיטי סובלת מבעיות רבות, ולעומתה שכנתה, הרפובליקה הדומיניקנית, שפעלה באופן אחר לגמרי, הצליחה לשמור על נכסיה הסביבתיים. דיימונד מעלה על נס את שנות שלטונו הממושכות של השליט חואקין בלגואר (Balaguer) שהגן על היערות וחוקק חקיקה סביבתית נרחבת. הוא לא נמנע מלציין ששלטונו של בלגואר היה שלטון טוטליטרי, מה שמעלה הרהור על הקשר בין מבנה פוליטי והיכולת לשמור ולנהל את משאבי הסביבה.

כיום האנושות נדרשת לפעול כדי למתן את שינוי האקלים ולנסות להיערך לקראתו. אנו מסרבים להבין שהשינוי כבר כאן, ומתקשים לפעול למרות הוודאות המדעית והעדויות המצטברות. בדומה למצבנו, הספר מציג חברות שנדרשו להגיב לשינוי בזמן אמת, כאשר הוא כבר קורה והשפעותיו ניכרות. מסתבר שחלק מהחברות השכילו לעשות מה שאנחנו מתקשים בו עד מאד: ריסון עצמי. ההבנה שהמשאבים מוגבלים, ושכברת ארץ נתונה יכולה לכלכל מספר מוגבל של אנשים, הובילה אותם לנקיטת צעדים, לעיתים אכזריים ביותר (הרג תינוקות, התאבדויות), כדי שהאוכלוסייה תישאר יציבה מבחינה דמוגרפית.

וכאן אנחנו נכנסים אל הממד הערכי-תרבותי שממנו נגזרת יכולת ההסתגלות האנושית. דיימונד מספר את כישלונם של הוויקינגים (הנורדים) להתיישב בגרינלנד, ותולה זאת בעיקר בחוסר יכולתם לסגל שינוי תרבותי. הסיפור של ההתיישבות הנורדית בגרינלנד הוא סיפור של כישלון בגלל שמרנות וחוסר יכולת לאמץ דפוסיים חדשים, שהובילו למשבר סביבתי ולקריסה. וכמו תמיד, הנפגעים הראשונים הם העצים. הנורדים כרתו עצים ושרפו את היער כדי להכשיר

של יצירה אורגנית המתנגדת למדידה ולסדר. הוא נהנה לראות גנים לא מטופלים שהפרא אחז בהם בליבה של העיר, והנה הופיעו מינים חדשים ונדירים כאשר הניחו לפראות ולא-סדר לשוב אלינו.

הוא חוזר ומדגיש שהניכור שלנו מהטבע עמוק ומסוכן. יש שתולים תקוות בתיקון רציונלי, בעוד חינוך ובעוד ידע, בכינון ועדות ובהצעות חוק. אך הוא מחזיר אותנו לנקודת הפתיחה ואומר: "אני פסימיסט. מה שהמדע והתבונה חוללו – אין בכוחם לרפא". לדבריו, כל עוד הטבע נתפס כדבר מה מחוצה לנו, זר ומגודר, הוא אבוד גם לנו בתוכנו.

ואומנם, נדמה שהצדק איתו: בשנת 2021 נשבר שיא פליטות גזי החממה בכל הזמנים. על אף הקורונה שגרמה להאטת הפעילות, למרות "המודעות" הגוברת לשינוי האקלים, חרף ועידות בין-לאומיות ואין ספור יוזמות חקיקה – פליטת גזי החממה רק התגברה. הנחתי את הספר, ויצאתי לשוטט ביער.

הלל לאי-סדר ולחוסר תכליתיות. היער הסבוך הוא מקור האומנות והפליאה, מקור של חיים. היער, על כל מרכיביו, הוא אורגניזם עצום, וערכו האמיתי גדול שבעתיים מסך חלקיו. המיון המדעי, המפרק את המערכת למרכיביה, מפספס משהו גדול שאיננו ניתן למדידה. לטענת פאולס, מאמצי השימור והקטנת ההשפעה הסביבתית של האדם לא יצלחו, אלא אם כן נכיר בכף החובה של המהפכה המדעית ובייחוד בכך שאנו חווים את העולם כפרטים. העץ הבודד הוא רק חלק מחברת העצים ומחברת היער כולו. המיון והמדידה שלו כפרט בודד מרחיקים אותנו מהתמונה האמיתית: היער בכללותו. ומה נותן לנו היער? הרבה יותר משאנו יכולים לומר או לבטא באופן כמותי ומילולי: ההתבוננות בעצים וביערות רק באופן מדעי, כלכלי, טופוגרפי או אסתטי תהא חסרה, אם לא נבין שהתועלת הרבה ביותר שהם מביאים "אינה טמונה בעובדות שאפשר להפיק מהם, לא בגזעים לכריתה או בפרי...". ג'ון פאולס משתמש בביטוי "האישי הרוק" כאיזו מהות פנימית ירוקה



פסלי אבן של דמויות אדם (מואי) על שפת הר הגעש ראנו רארקו, איי הפסחא. לקוח מוויקיפדיה



עצים ששווה להכיר

חגי יבלוביץ'

אגף הייעור, קק"ל
hagay@kkk.org.il

שיטה סלילנית בפארק סירת שקד

השתילים שגודלו מהזרעים שנאספו, ניטעו בשנת 2011 בחלקה ביער השגרירים (צפונית לבאר שבע) כדי לבחון מאיזה עץ-אם מתפתחים צאצאים מצטיינים. צאצאים מצטיינים הם פרטים גדולים, חיוניים ובעלי קצב צימוח מהיר. לאחר שלוש שנים נבחרו שלושה מקורות זרעים מצטיינים למין שיטה זה, שני פרטים מאזור פארק סירת שקד ופרט אחד ממשמר הנגב. קוטר הגזע הממוצע שלהם היה יותר מכפול מקוטר גזע ממוצע של עצי הביקורת (עצי שיטה שגודלו מזרעים שנאספו בערבה). בדיקה שנערכה בשנת 2021 בחלקה מראה שצאצאים של הפרטים האלה ממשיכים להראות יתרון על פני פרטים שמקור הזרעים שלהם אחר. בשל כך, במשתלת קק"ל בגילת מגדלים שתילים ממקורות מצטיינים אלה עבור הנטיעות ביערות הדרום.

שיטה סלילנית (*Vachellia raddiana*) היא השכיחה מבין מיני העצים הגדלים בר בדרום הארץ. העץ גדל באזורים חמים, ובעיקר בערוצי נחלים ובמניפות סחף בערבה ובנגב. השיטה אינה יוצרת טבעות גידול שנתיות, ולכן קשה מאוד לאמוד את גילה.

כיוון שהמין נפוץ מאוד באזורים שונים בנגב ובערבה, קיימת בו שונות גנטית גדולה, שיכולה להוות בסיס לברירה של טיפוסים מוצלחים. הנושא נבחן בפקולטה לחקלאות ובמנהל המחקר החקלאי-מרכז וולקני. לצורך זה נאספו זרעים במאי-יוני 2010 מפרטים מרשימים של עצי שיטה סלילנית. הזרעים נאספו מעצים הגדלים בנגב הצפוני באופן טבעי ובחלקות נטועות, בראשי גבעות או במדרונות, אך לא בערוצים. לערוצים מגיעות כמויות מים גדולות יחסית, ולכן פרט גדול בערוץ אינו בהכרח פרט מצטיין.



איסוף פירות מאחד מפרטי השיטה הסלילנית המצטיינים בפארק סירת שקד, 2021
צילום: אמיר הרמס

■ Bark beetle-related pine mortality in Israeli planted forests and the effect of trap trees

Omer Golan¹, Rotem Attias^{2,3}, Maor Elron¹, Alexie Protasov⁴, Zvi Mendel⁴, Rakefet David-Schwartz^{2*}

The association of extensive mortality of pine trees and bark beetle (Scolytinae) attack is a common phenomenon in the Northern Hemisphere. Bark beetle outbreaks frequently occur in the planted pine forests in Israel and involve three species *Orthotomicus erosus*, *Pityogenes calcaratus* and *Tomicus destruens*. These bark beetle species undergo periods of low population density when they breed on trees stressed by drought or thinning, and on broken trees or those uprooted by wind or thinning slash. It has been suggested that high populations of these scolytids often kill trees. Assessing whether successful colonization of standing pine trees by these species is the result of direct beetle attack or a symptom of poor tree physiology is a challenge and makes it difficult to determine the required management strategy.

The role of bark beetles in tree death in a wide study area was assessed by two experimental systems: (1) a study of the potential effect of drought in a layout of extensive trap trees in stands

of *Pinus halepensis* and *P. brutia*; (2) examining bark beetles colonization in killed pine trees in two planted stands of *P. brutia*. In the first experimental system, trap-trees (baited with lures attractive to both *O. erosus* and *P. calcaratus* and treated with Bifenthrin) significantly reduced the number of dead trees in the trap-tree treated stands compared with similar untreated ones. *O. erosus* was the dominant species in these plots and tree mortality occurred in the second half of the summer (August and September). The second experimental system indicated mainly the association of *P. calcaratus* and *T. destruens* with the killed trees. However, in that system, the colonization was apparently mainly during autumn to early winter (October and November) and we were unable to determine the direct role of the beetles in the tree mortality. The results provided evidence that these pine bark beetles, which are usually considered secondary, are responsible for the tree death, *O. erosus* in particular. Both *P. calcaratus* and *T. destruens* are relatively more active during the low temperature periods, typical of the autumn in Israel. We suggest that the consequence of water scarcity and high temperatures due to climate change during the autumn make the pine trees more prone to beetle attack during their typical activity period.

1 Forest Management, KKL-JNF, Israel

2 Institute of Plant Sciences, Agricultural Research Organization, The Volcani Center

3 Institute of Plant Sciences and Genetics in Agriculture, The Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food and Environment, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot

4 Institute of Plant Protection, Agricultural Research Organization, The Volcani Center

■ The affinity between survival and perennial radial-growth pattern in *Pinus brutia*

Rotem Attias^{1,2}, Omer Golan³, Asaf Alon^{1,2},
Maor Elron³, Lior Regev⁴, Elisabetta Boaretto⁴,
Shai Tamari¹, Zvi Mendel⁵, Rakefet David-
Schwartz¹ *

Climate change in recent decades has been characterized by rising temperatures and a decrease in annual precipitation in various regions in the world. These changes significantly affect the growth and survival of forest trees in the Mediterranean areas to the point of extensive tree mortality, which has also occurred in recent years in planted forests in Israel. Pine tree mortality involves the activity of bark beetles. It is not clear whether and to what extent drought affects tree sensitivity to lethal attacks by bark beetles. The present study examined whether stem increment could indicate mortality following a bark beetle attack. Annual radial stem increment occurs due to the formation of an annual ring that includes earlywood (in the spring), latewood (in the summer), and resin ducts, which have a vital role in protecting against bark beetles. The present study examined whether

growth parameters indicate tree sensitivity to bark beetles. To this end, we compared growth parameters of live and dead *Pinus brutia* trees in two independent stands in the Judean Mountains. These parameters included competition index, annual ring width, and density and dimensions of resin ducts in each ring. Annual ring width was uneven in the population. Growth indices of the dead trees were low relative to the surviving trees in the years before mortality. Variation in radial stem increment in two independent plots implies genetic variation in the population. The findings of this study indicate three variables that can be used to identify and even predict sensitivity to bark beetles in *Pinus brutia* trees: (a) low and constant annual growth over the years; (b) poor growth following a drought period; (c) reduced density and size of resin ducts. There is concern that the current low mortality rate of *Pinus brutia* stands in Israel will accelerate with the worsening drought conditions expected in the coming decades. Therefore, it is necessary to identify individual trees with the most appropriate growth indices to form the infrastructure for the future *Pinus brutia* plantations in Israel.

-
- 1 Institute of Plant Sciences, Agricultural Research Organization, The Volcani Center
 - 2 Institute of Plant Sciences and Genetics in Agriculture, The Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food and Environment, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot
 - 3 KKL-JNF Forest Service
 - 4 Weizmann Institute of Science, Scientific Archaeology Unit, Rehovot
 - 5 Institute of Plant Protection, Agricultural Research Organization, The Volcani Center
- * rakefetd@agri.gov.il

■ **A hidden mechanism of forest loss under climate change: The role of drought in eliminating forest regeneration at the edge of its distribution**

Ella Pozner¹, Peleg Bar-On¹, Stav Livne-Luzon¹, Uri Moran¹, Mor Tsamir-Rimon¹, Efrat Dener¹, Efrat Schwartz², Eyal Rotenberg², Fyodor Tatarinov², Yakir Preisler², Nitai Zechariac³, Yagil Osem⁴, Dan Yakir², Tamir Klein¹ *

The ongoing global warming and associated drying are shaping the fate of forests worldwide. While processes of tree mortality are visible and studied, a decrease in forest regeneration is mostly overlooked, although equally deleterious. Populations at the edge of tree species distribution areas are at higher risk and are hence hotspots for species extinctions.

Here we use a semi-arid pine forest growing at the timberline edge of forest existence as a model for forest survival under warming and drying conditions. Seedling recruitment, including seed germination, seedling survivorship and multiyear seedling growth, was measured over six consecutive years. To pinpoint the role of drought, we designed a field experiment, manipulating stand density at three

levels and grazing regimes.

Seed germination was high across all studied plots, but seedling survivorship and multiyear seedling growth were near-zero. Stand density and grazing exclusion positively affected germination. Seedling survivorship was higher in wetter years. Multiyear seedling growth was stunted by grazing, and seedling height was distributed differently across different stand densities.

Our data indicate that seedling survivorship during the first dry season acts as a bottleneck for forest existence at the dry and hot edge of current forest distribution. We also quantified the roles of other stressors such as shading, and highlighted the eliminating role of grazing on multiyear seedling growth. Forest regeneration should be more closely monitored in sensitive populations, as climate change-driven forest loss can happen even without mature tree mortality

1 Department of Plant and Environmental Sciences, Weizmann Institute of Science, Rehovot

2 Earth and Planetary Science Department, Weizmann Institute of Science, Rehovot

3 KKL-JNF Forest Service

4 Institute of Plant Sciences, Agricultural Research Organization, The Volcani Center

* tamir.klein@weizmann.ac.il

coping with climate change in forest ecosystems. This review discusses how abiotic stresses, such as high temperature, drought, high VPD, elevated CO₂, and high radiation fluxes, limit the growth, survival, and regeneration of forests in Israel and worldwide. We have focused on the ability of forest trees to acclimate to gradual environmental changes that occur over a long period, as opposed to their response to extreme short-term events (e.g., heat waves). We suggest that climate change impacts forests in all the geographic regions of Israel, resulting in complex interactions between trees and their environment. Thus, a nuanced research approach (studying the tree/forest with precise and integrated techniques) combined with long-term monitoring and comprehensive integration of innovative technologies is crucial for early detection and economic intervention.

■ The unexpected water cycle during the summer in the Negev

Nurit Agam *, Moshe Shachak

The stability and sustainability of savannah-like ecosystems are determined by the feedback between their utility and functioning. As opposed to what is commonly assumed, we hypothesized that the structure and function of arid systems are determined by energy and water flows even during

the dry season. It is therefore critical to understand the water and energy fluxes in the ecosystem, and the interrelationships between them, with an emphasis on processes occurring during the dry season. These fluxes drive the primary and secondary production and decomposition processes and therefore have an important impact on the stability and sustainability of the ecosystem. To examine the interaction between energy flows and the savannah-like system, a measuring station was established at the Wadi Mashash Experimental Farm, located north of the Negev junction, in the center of the sharp transition between a semi-arid to an arid region. A flux tower was installed at the site, accompanied by additional ancillary measurements. Contrary to the common belief, we have found that there is a significant and repetitive hydrological cycle throughout the dry season, driven by atmospheric water vapor adsorbed by the soil, from the afternoon until sunrise. The source of the water vapor is the daily breeze from the Mediterranean Sea. Although this water cycle is very small, it is also very consistent. Preliminary data analysis from measurements of carbon dioxide concentration indicates a possible connection between the addition of water to the soil following the adsorption of water vapor and the biological activity in the soil during the summer in the Negev. This is an important and innovative finding, that will be further examined to understand the importance of the process in this ecosystem

The Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, Sede Boqer Campus

* agam@bgu.ac.il

English Abstracts

■ The climate crisis – drivers, effects, future scenarios and potential solutions

Avner Gross

The Earth's surface has been on an accelerated warming trend since the beginning of the 20th century, and the last seven years (2014-2021) have been the warmest sequence of years since measurements began. Global warming is caused by a sharp rise in the atmospheric concentration of greenhouse gases, such as carbon dioxide, methane and nitrogen dioxide, which are emitted at an increasing rate from human activities such as burning fossil fuels, agricultural activities and deforestation. Climate change, which affects every region of the earth, shifts the earth from the relatively stable climate state of the past ten thousand years and increases the frequency, intensity and duration of extreme climatic events such as heat waves, heavy rainfall and droughts. In addition, the increased warming drives a decline in the growth of agricultural outputs and accelerates the rate of glacier melting, which leads to a rapid rise in sea level. Apart from its role as a greenhouse gas that drives global warming, the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere directly affects the function and structure of terrestrial and marine systems. Its increased absorption by terrestrial vegetation, which has led to a process of "global greening", has reached a state of saturation, and disrupted the stoichiometric

balance in vegetated terrestrial ecosystems. At the same time, its increased absorption in ocean water has resulted in continuous processes of ocean acidification that harm the entire marine food chain. According to the scientific consensus, we can prevent the most catastrophic outcomes of climate change if we limit global temperature rise to 2°C compared to the average temperatures of 1850-1900. To achieve this goal we must reach net zero greenhouse gas emissions by the middle of the current century and increase the removal of excess carbon from the atmosphere using natural solutions such as planting forests

■ Forests' response to gradual climate change and increased frequency of extreme events – a global and local perspective

Yakir Preisler^{1*}, Yotam Zait²

The rise in temperature and the increased frequency and severity of extreme events due to climate change will cause profound and possibly irreversible changes in plant community structures, forest densities, and provision of ecosystem services in many habitats worldwide. A key approach to mitigating this climate change is afforestation. Therefore, it is crucial to understand which tree species cope better with changing conditions and what traits are involved with or contribute to

Department of Geography and Environmental Development and School of Sustainability and Climate Change, Ben-Gurion University of the Negev
avnergro@bgu.ac.il

1 Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA1

2 Institute of Plant Sciences and Genetics in Agriculture, the Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food and Environment, the Hebrew University of Jerusalem

* ypreisler@seas.harvard.edu



FOREST

Journal of Forests
and Open Lands
Management

Issue No. 22 | July 2022

Editor:

Dr. Anat Madmony

Editorial Council:

Dr. Anat Madmony
Dr. Gilad Ostrovsky
Dr. Shani Rohatyn

Editorial Board:

Dr. Erez Barkae
Prof. Meni Ben-Hur
Dr. Omri Bonne
Dr. Rakefet David-Schwartz
Avigail Heller
Asaf Karavani
Dr. Tamir Klein
Dr. Idan Kopler
Dr. Doron Markel
Prof. Zvi Mendel
Adi Noy Ivanir
Dr. Daniel E. Orenstein
Dr. Yagil Osem
Dr. Gilad Ostrovsky
Uri Ramon
Prof. Joseph Riov
Dr. Shani Rohatyn
Dr. Efrat Sheffer
Dr. Orit Skutelsky
Dr. Michael Sprintsin
Prof. Dan Yakir

Hebrew Copy Editing:

Inbar Kimchi-Angert

English Text Editing:

Dr. Esther Lachman

Design and Graphics:

Orit Yeshayahu

Address:

"Yaar" Magazine

KKL-JNF

yaar.magazine@kkl.org.il

Publisher

Keren Kayemeth Lelsrael
Jewish National Fund
Land Development Authority
Chief Scientist
Publication Unit, Public Affairs

© Copyright

Forest Journal Online access:

www.kkl.org.il/forest-online-journal

KKL-JNF

www.kkl.org.il

For more information

1-800-350-550

Cover picture

Front cover

Yatir Forest - dense conifer forest. At its center is a young plantation of low-density broad-leaved species. Is this the future for southern forests as a result of climate change?

May 2022

Photo: Roby Yahav

Back cover:

The photo on the front cover was taken from this exposed hill in the Yatir Forest. The difference between the native vegetation and the planted forest is clearly visible.

May 2022

Photo: Roby Yahav



TABLE OF CONTENTS

On the Opening Page Avraham Duvdevani	3	From the Field	
Editorial Gilad Ostrovsky	4	The importance of KKL-JNF Long Term Ecological Research sites using adaptive management to control ecosystem processes in the light of climate change	82
Preparing forest management in Israel for climate change Shani Rohatyn-Blitz, Gilad Ostrovsky	5	Shayli Dor-Haim, Yagil Osem, Tamir Klein, Eli Argaman, Nitzan Segev, Asaf Karavani	
Reviews		Evaluating scientific and applied methods and tools for predicting, preventing and extinguishing forest fires	90
The climate crisis – drivers, effects, future scenarios and potential solutions Avner Gross	8	Mor Ashkenazi, Maya Milet, Naomi Huminer, Moni Shitrit, Ken Karu, Revital Weis, Chanoch Zoref	
Forests' response to gradual climate change and increased frequency of extreme events – a global and local perspective Yakir Preisler, Yotam Zait	15	Analysis of the fire on Mount HaRu'ah (HaHamisha Forest) on June 2021	94
The unexpected water cycle during the summer in the Negev Nurit Agam, Moshe Shachak	28	Roni Tal, Anat Eidelman, Almog Ram	
Original Articles		Limans on roadsides in the Negev – an update	97
Selection of drought-resistant <i>Cupressus sempervirens</i> trees and improving the method of vegetative propagation by cuttings to allow the selected trees to be used for forest plantings Joseph Riov, Hadas Regev, Moshe Huberman	38	Gil Siaki	
A hidden mechanism of forest loss under climate change: The role of drought in eliminating forest regeneration at the edge of its distribution Ella Pozner, Peleg Bar-On, Stav Livne-Luzon, Uri Moran, Mor Tsamir-Rimon, Efrat Dener, Efrat Schwartz, Eyal Rotenberg, Fyodor Tatarinov, Yakir Preisler, Nitai Zecharia, Yagil Osem, Dan Yakir, Tamir Klein	49	<i>Vachellia</i> (Acacia) tree development and growth in acclimation plots in the Negev	100
The affinity between survival and perennial radial-growth pattern in <i>Pinus brutia</i> Rotem Attias, Omer Golan, Asaf Alon, Maor Elron, Lior Regev, Elisabetta Boaretto, Shai Tamari, Zvi Mendel, Rakefet David-Schwartz	60	Tamar Cafri, Denis Loshkovoy, Gilad Riesfeld	
Bark beetle-related pine mortality in Israeli planted forests and the effect of trap trees Omer Golan, Rotem Attias, Maor Elron, Alexie Protasov, Zvi Mendel, Rakefet David-Schwartz	71	Opinions	
		Cultural ecosystem services from Israel's pine forests in the light of climate change: Continuing to enjoy a different kind of forest	104
		Daniel E. Orenstein	
		Very Short Notes	
		The climate-forest project for responsible urban afforestation	108
		Daniel Katz	
		A Forest of Books	
		Collapse by Jared Diamond, 2008	
		The Tree by John Fowles, 1979	110
		Gilad Ostrovsky	
		Know Your Trees	
		<i>Vachellia raddiana</i> in "Sayeret Shaked" Park	113
		Hagay Yavlovich	
		English Abstracts	III



FOREST

Journal of Forests
and Open Lands
Management

Issue No. 22 | July 2022



 **Special issue
on climate change**

Printed on recycled paper

100% green energy