



# יער יתיר: בחינה של השפעת צפיפות העומד וניהול הרעייה על תפקודו של יער מחטני על סף המדבר

יעל גרונולד<sup>1\*</sup> | אלה פוזנר<sup>1</sup> | איל רוטנברג<sup>2</sup> | דן יקיר<sup>2</sup> | תמיר קליין<sup>1</sup>

- 1 המחלקה למדעי הצמח והסביבה, מכון ויצמן למדע
- 2 המחלקה למדעי כדור הארץ וכוכבי הלכת, מכון ויצמן למדע
- \* yael.grunwald@weizmann.ac.il

## תקציר

הוא יוצר יתרון בממשק עתידי. מבחינת התחדשות היער לא נצפה יתרון כזה, שכן כמעט כל הזריעים מתו בקיץ הראשון, והבודדים ששרדו סבלו מנזקי הרעייה. תחנת הניטור ארוך הטווח ביער יתיר מוסיפה נדבך חשוב למערך תחנות המחקר והניטור ארוכי הטווח מבחינת תרומתה המקומית לניהול היער של קק"ל ולהבנת תהליכים אקולוגיים ביער. נוסף על כך, עקב חשיבותו הרבה של יער יתיר כמודל ליער בשינוי אקלים, מהוות תוצאות הניסוי מרכיב בעל חשיבות עולמית לניהול יערות.

יער יתיר הוא יער נטוע של אורן ירושלים בעיקר, הנמצא בשולי המדבר. המחקר ביער הצטרף למערך רשת הניטור ארוך הטווח בשנת 2009, עם ניסוי בעל אופי ממשקי. מספר חלקות יער דוללו לצפיפויות שונות, באופן דומה לתחנה ביער הקדושים: 10, 20, ו-30 עצים לדונם, וכן נבחרו חלקות ביקורת. מחצית מכל חלקה גודרה במטרה לבחון השפעות של רעיית צאן. מדדי הניטור כללו משתנים פיזיולוגיים ברמת העץ – צימוח מחטים, גזע ושורשים, נביטת זריעים ושרידותם, ומשתנים אקולוגיים ברמת החלקה – צימוח תת-היער, רטיבות הקרקע ועוד. ב-13 השנים שחלפו מאז תחילת הניסוי חלה גדילה עודפת עקבית של עצים בחלקות המדוללות, בעיקר בצפיפות הנמוכה של 10 עצים לדונם. אחת מהשערות המחקר הייתה כי הסיבה לכך היא ירידה בתחרות על משאב המים. במחקר נמצא כי הגורם העיקרי היה ירידה בתחרות על משאב האור. מכאן, שהדילול היטיב עם העצים והעלה את יעילות ניצול המים שלהם, ועל כן

### מילות מפתח

אורן ירושלים, דילול, יובש, יער באזור צחיח למחצה

**רקע: היסטוריית היער**

השנתיים שאף הושקו במהלך העונה היבשה הראשונה לאחר השתילה.

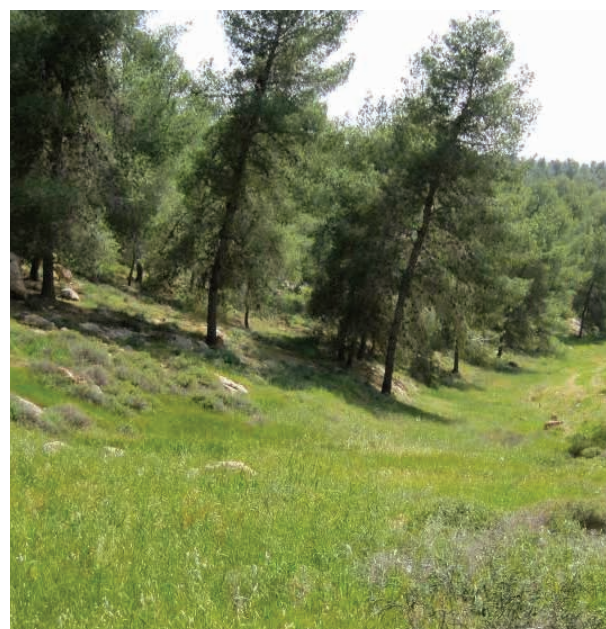
הצמחייה המקומית מורכבת ממיני צמחים של בתת ספר, כגון סירה קוצנית (*Sarcopoterium spinosum*), לענת המדבר (*Artemisia sieberi*) קיפודן בלנש (*Echinops polyceras*), שלהבית קצרת שיניים (*Phlomis brachyodon*) וקדד נאה (*Astragalus cretaceus*). כמו כן, ניתן למצוא באזור שרידים של שיחים ועצים שלחלק מהם זהו גבול תפוצתם הדרומי בארץ – כגון עוזרר קוצני (*Crataegus aronia*), אגס סורי (*Pyrus syriaca*), שקד קטן עלים (*Amygdalus korschinskii*) ואשחר ארץ-ישראלי (*Rhamnus lycioides*). יער יתיר כיסה חלק ניכר מהשטח שהיה קיים בו טיפוס צומח זה, שנותר בשמורת הטבע הר עמשא ובשולי היער. תת-היער שניטע בצפיפות (30–40 עצים לדונם) מתאפיין במיעוט של צמחייה מקומית בכל מקום שחופת העצים ציפופה ואינה מאפשרת חדירה של קרינה. עם זאת, בקרחות ובשולי היער ניתן למצוא שרידי צומח מהטיפוסים הנזכרים לעיל, ובעיקר שיחים אופייניים לספר המדבר בכיסוי דליל, המהווים כיום את הצמחייה המקומית שיוצרת את תת-היער הנטוע (מכון דשא 2006; סולר ושות', 2006; Vogel et al., 1986).

צמחיית תת-היער נתונה למשטרי רעייה מתונים עד כבדים, כפי שהייתה לפני הייעור במשך אלפי שנים (ויזל, 1984). העדר המקומי מורכב מכמה מאות כבשים ועיזים הרועות מדי יום בעונת הרעייה. משטרי הרעייה נאכפים על ידי יערני היער ומוגבלים ל-2,500–3,000 ראשי צאן 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 רעייה כבד. בהמשך, סביב חודש מאי, הצמחייה העשבונית מתייבשת, ואיתה יורד לחץ הרעייה. במהלך העונה היבשה (יוני עד אוגוסט) העדרים ניזונים בעיקר מזרעי העשבונים ומהצמחייה המעוצה. אוכלוסיית חיות הבר ביער יתיר ובסביבתו מורכבת מכ-100 פרטים של צבי ישראלי (*Gazella gazelle*) וממכרסמים גדולים כמו ארנבת מצויה (*Lepus capensis*) ודורבן מצוי (*Hystrix indica*). היער משמש גם אתר בילוי לקהילות המקומיות לאורך כל השנה.

**הקמת חלקות המחקר**

תחנת המחקר הקבועה ביער יתיר הוקמה על ידי קבוצת המחקר של פרופ' דן יקיר ממכון ויצמן למדע בשנת 2000 (Grünzweig et al., 2003) במטרה לחקור את התנהגותו של יער אורנים נטוע על סף המדבר. לאחר מספר שנים של מעקב אחר פעילות היער החלו לעלות שאלות באשר

יער יתיר הוא היער הנטוע הגדול בישראל, והוא משתרע על שטח של כ-30,000 דונם כ-30 ק"מ מזרחית לבאר שבע, באזור ההררי של צפון הנגב (Schiller, 2010). האזור מוגדר כצחיח למחצה, ומקבל כמות משקעים ממוצעת של כ-285 מ"מ בשנה. סלע המקום מורכב מגיר ומקירטון, והקרקה המקומית מורכבת מלס רדוד ממקור איאולי עד לעומק של 20 ס"מ ומאדמת 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., 2021). מי התהום של אקוות ההר המערבי נמצאים בעומק של כ-300 מטר מתחת לפני השטח ואינם זמינים לצמחייה, ולכן צמחיית היער מסתמכת על המשקעים בעונה הגשומה (נובמבר–אפריל) כמקור מים כמעט בלעדי, ובמידה מצומצמת מספיחת הלחות כמקור מים בעונה היבשה (מאי–אוקטובר) (Schiller and Atzmon, 2009; Schiller, 2010; Qubaja et al., 2020). היער ניטע בשנים 1965–1969, והוא מורכב בעיקר מעצי אורן ירושלים (*Pinus halepensis*) (איור 1), ומהווה את גבול התפוצה הדרומי והיבש ביותר בעולם של מין זה ושל יערות אורן בכלל. בשנתיים הראשונות של הנטיעה המשקעים שירדו היו גבוהים במיוחד לאזור (השירות המטאורולוגי הישראלי, 1960–2022) וסייעו מאוד להתבססות השתילים בני



איור 1

**יער יתיר באביב**

בשולי יער האורנים ניתן לראות את תת-היער המורכב משילוב של שיחים ועשבונים מקומיים המכסים את השטחים שאינם מוצללים על ידי העצים. צילום: אלה פוזנר ופלג בר און.

עם תוצאות מחקר הדילול מהחלקות מאפשר מעקב ארוך טווח אחר מגמות של תפקוד היער כתלות בגורמי האקלים והסביבה, תוך שילוב ממשקי ניהול שונים. במסגרת תכנון החלקות הוגדר אזור חיץ של 15 מטר לכל כיוון סביב כל חלקה להגבלת ההשפעות החיצוניות על אזור הניסוי, וסומן באמצעות יתדות מתכת מבוטנות. כמו כן, נקבעו עבור כל חלקה שני חתכי רצועה מקבילים (טרנסקטים) שפונים ממזרח למערב בשטח של 4x30 מ"ר, שהגדירו רצועות מעקב קבועות לניטור מדגמי מדויק לאורך השנים (איור 2).

בהמשך, בשנת 2010, חולקה כל חלקה לשני חלקים של 2.5 דונם כל אחד במטרה לבחון אם מניעת רעייה עשויה לסייע בהתחדשות. לשם כך גודרה מחצית משטחה של כל חלקה למניעת כניסה של עדרים המגיעים מהכפרים הסמוכים, והמחצית השנייה של כל חלקה נותרה נגישה (איור 3). במהלך הקמת החלקות וסימון העצים נערכו מדידות וסקרים מקדימים, שכללו את גובה העצים וקוטר הגזע בגובה החזה (DBH – Diameter at Breast Height) של העצים שנבחרו למעקב ארוך טווח, וכן של העצים העתידיים להיכרת לצורך קביעת כמות הביומסה שתוצא מהיער. נוסף על כך, נערכו מדידות קרינה לקביעת כיסוי העלווה (LAI – Leaf Area Index), ספירת נבטים לאורך החתכים ומדידת כיסוי הצומח המעוצה.

### מטרות המחקר העיקריות של התחנה

בדיקת ההשפעה שיש לצפיפויות שונות של עומדים ביער על יכולת ההתחדשות הטבעית של האורנים ועל חיוניות

ליכולת התחדשותו ושרידותו בטווח הרחוק באופן בר-קיימא, באזור שכמות המשקעים הממוצעת בו נעה סביב 285 מ"מ בשנה וצפייה לרדת עוד בעתיד. הנתונים שנאספו בשנים הראשונות למחקר הצביעו על כך שכנראה יכולת ההתחדשות של היער ושרידותו כיער בר-קיימא מוגבלות, ורצוי להרחיב את שאלת המחקר כך שתכלול בחינה של ממשקים אפשריים לניהול ארוך טווח של היער שיתמכו ביכולתו להתחדש. מחקרים נוספים שהתבצעו ביערות קק"ל והחלו כמה שנים קודם לכן, כגון ביער הקדושים (Calev et al., 2016), ובעולם (Bréda, 2003; Martín-Benito et al., 2010; Ruano et al., 2013; del Campo et al., 2014; Navarro-Cerrillo et al., 2016) מצאו כי דילול היער ומניעה או ניהול מבוקר של רעייה עשויים לתמוך בהתחדשות היער ובהתבססותם של עצים צעירים ולעודד אותן. נמצא שדילול מושכל של עצים בוגרים מקטין את התחרות על משאבים כמו אור, מים וחומרי הזנה, ושמניעת רעייה בתקופות מסוימות של השנה עשויה לצמצם את אכילת הזרעים על ידי עדרי הצאן ולהגדיל את סיכוייהם להתבסס ולהתפתח.

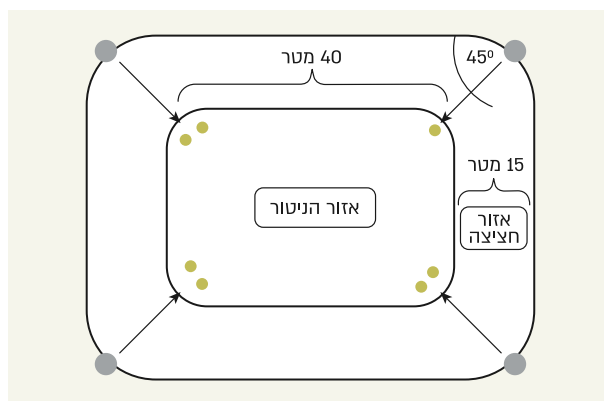
בשנת 2009, לאחר סקר מקיף, נבחרו וסומנו 21 חלקות ניסוי בשטח של כ-5 דונם האחת (70x70 מ"ר או 110x50 מ"ר), הכוללות עצים בני אותו הגיל. 15 מהחלקות דוללו לשלוש רמות צפיפות של 10, 20 ו-30 עצים לדונם, ושש חלקות הוגדרו כחלקות ביקורת מבלי שעברו דילול, ובהן גדלים עצים בצפיפויות שנעות בין 20 ל-40 עצים לדונם. חלקות המחקר שנבחרו משתרעות ברובן על שטח שאינו משופע, ונמצאות במרחק של כ-500 מטר מתחנת הניטור וממגדל השטפים של יער יתיר. שילוב הנתונים מהמגדל



איור 3

#### פריסת חלקות הניסוי ביער יתיר

צבעי המסגרת מייצגים את צפיפות העומד הסופית של החלקה: תכלת – 10 עצים לדונם, כחול – 20 עצים לדונם, ירוק – 30 עצים לדונם, כתום – ביקורת. הצבע האפור מייצג את האזור המגודר בכל חלקה.



איור 2

#### תרשים סכמטי של חלקת מחקר

שטח כל חלקה כ-5 דונם. הנקודות האפורות הן פינות החלקה, והנקודות הירוקות הן העצים שנבחרו באזור הניטור. בשלוש פינות של החלקה נבחרו שני העצים הראשונים (זווית כניסה של 45 מעלות), ובפינה הרביעית נבחר רק עץ אחד.

בקצב השטפים ברמת העץ הבודד עם הירידה בצפיפות העצים, ולכן השערת המחקר השנייה הייתה שבחלקות המדוללות קצב ההטמעה וניצול המים על ידי כלל העצים בחלקה יהיה דומה לזה שבחלקות הצפופות יותר, או נמוך ממנו. מבחינת התחדשות היער השערת המחקר הייתה כי היובש בקיץ מגביל את שרידות הזרעים, וכי לרעייה תפקיד שלילי בהיבט זה.

## השערת המחקר

בהתבסס על מחקרים קודמים שבחנו את השפעות דילול היער, ועל יחסי הגומלין בין המדדים הפיזיולוגיים של תפקוד עצים, הנחת המחקר הייתה שדילול העצים ביער צחיח למחצה ישפיע על שטפי המים, הפחמן והאנרגיה ועל יחסי הגומלין ביניהם בסדרה של אירועים המשפיעים האחד על השני: דילול העצים יביא לעלייה ברמות הקרינה הפוטוסינתטית הפעילה (PAR – Photosynthetic Active Radiation) מתחת לחופה ולעלייה בגירעון לחץ האדים (VPD – Vapor Pressure Deficit) שהעצים שנותרו בחלקה נחשפים אליהם. בעקבות זאת, יעלו קצב הטמעת הפחמן (A – Assimilation), רמת הדיות (T – Transpiration) וקצב הצמיחה ברמת העץ הבודד (G – Growth). לעומת זאת, ברמת החלקה תתקזז העלייה

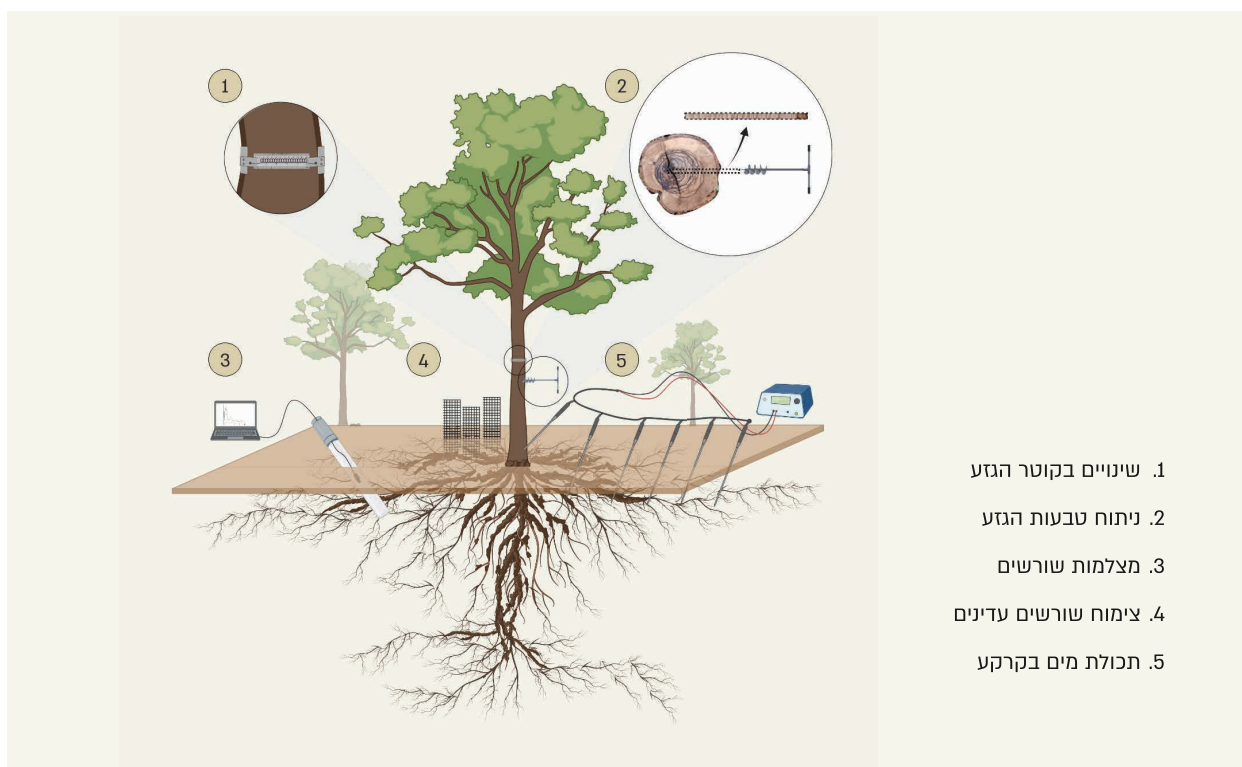
## מדדים עיקריים הנמדדים בתחנת המחקר

במהלך השנה מתבצעות מדידות קבועות:

**שינוי בהיקף גזע העץ ליחידת זמן** – השינוי נמדד באמצעות דנדרומטרים, שהם טבעות ברזל המקיפות את גזע העץ בגובה 1.3 מטר (DBH). קצב שינוי קוטר הגזע בזמן נתון על פי תקופות השנה עשוי להצביע על מידת חיוניות העצים (איור 4).

**מידת שטח העלווה** – שינויים בשטח העלווה הם מדד לקצב גידול העצים, וכך ניתן ללמוד כיצד העצים מושפעים מתנאי הסביבה, ומה מידת חיוניותם.

**כיסוי הצומח המעוצה** – נערך מעקב אחר הגדילה והשרידות



איור 4

תיאור של חלק מהשיטות שיושמו עבור העץ הבודד לבחינת ההשפעה של דילול החלקות המדידות בחנו מדדים מעל לקרקע ומתחתיה כדי להבין טוב יותר כיצד זמינות המים בקרקע משפיעה על הרקמות השונות של העץ.

קודמים שכללו דילול חלקות יער צפופות, נרשמו צמיחה והתחדשות בקרב העצים הנותרים הודות לעלייה מיידית בזמינות האור, וכן ירידה בתמותה בשל יובש שנגרם מתחרות על משאב המים (Moreno-Gutiérrez et al., 2013; Sohn et al., 2011). ההשפעה של הפחתת התחרות ניכרה בייחוד באתרים באזורים יובשניים (Moreno and Cubera, 2008). בשנת 2019 פורסם לראשונה כיצד הגיבו העצים בחלקות הניסוי לטיפולי הדילול במהלך השנים הראשונות למחקר (Tsamir et al., 2019). המחקר בדק את הקשר בין צפיפות העצים לבין קצב קיבוע הפחמן וקצב הדיות, וכיצד מושפעים מכך הצימוח והתחדשות של העצים שנותרו בחלקה, וכן אם ישנה השפעה על יעילות ניצול המים שלהם (Water Use Efficiency – WUE). כמו כן, נערך ניסיון לבדוק כיצד שינויים אלה באים לידי ביטוי ברמת העץ הבודד וברמת החלקה השלמה (Klein et al., 2014).

כדי לבצע את ההערכות האלה נמדדו חילופי הגזים ברמת העלה (קיבוע פחמן דו-חמצני, דיות), השינויים בקוטר הגזע (איור 4), רמות הקרינה שמשמשת לקיבוע פחמן (PAR) ו-VPD. מכיוון שמדידות חילופי הגזים התבצעו ברמת העלה במספר נקודות זמן קבועות (סביב השעות 11:00 ו-14:00), חושב שטח העלים הכולל של העץ הבודד כדי ללמוד על פעילות העץ כולו. החישוב נערך בעזרת משוואות אלומטריות שפותחו במיוחד עבור עצי האורן ביער יתיר, ומביאות בחשבון את קוטר הגזע ואת ממדי הנוף (Grünzweig et al., 2007). שילוב עם מדידות חילופי הגזים ברמת העלה מאפשר לחשב את הקצב היומי והחודשי של חילופי הגזים עבור העץ השלם (Maseyk et al., 2008). הכפלת הערך הממוצע החודשי של העץ הבודד במספר העצים שנותרו בחלקה אפשרה לעריך את השטפים (קיבוע פחמן דו-חמצני, דיות) עבור החלקה כולה. מאזן המים של בית הגידול באזורים לחים כולל בדרך כלל מרכיב של נגר, חלחול לעומק ומי תהום, אך ביער יתיר היבש הוא פשוט יותר. עשור וחצי של מחקר ביער יתיר כבר הראה כי החלחול זניח, מי התהום נמצאים הרחק בעומק, ובתוך היער כמעט ולא נוצר נגר. כך שבפועל, מי הגשם נאגרים ברובם בשכבות הקרקע העליונות, נצרכים על ידי העצים, ונפלטים בשטף הדיות או מתאדים ישירות מפני הקרקע.

תוצאות המחקר שסיכמו את שלוש השנים הראשונות לאחר דילול העצים הראו שכצפוי, רמות הקרינה שמתחת לחופה היו גבוהות יותר משמעותית בהשוואה לחלקות הצפופות יותר, ובעקבות זאת נרשמה עלייה משמעותית בקצב קיבוע הפחמן ברמת העץ הבודד. לעומת זאת, באופן מפתיע, קצב הדיות של העץ הבודד בחלקות המדוללות לא היה גבוה משמעותית מקצב הדיות של העצים שבחלקות

של הצומח המעוצה (בעיקר מינים מקומיים) ומידת כיסוי השטח על ידו כדי לבדוק כיצד מושפע תת-היער מטיפולי הדילול והגידור. האורך, הרוחב והגובה נמדדים עבור כל שיח שנמצא בתחום החתך (ללא תלות במין הצמח).

**התחדשות ושרידות של נבטי אורן** – עד שנת 2014 נספרו ותועדו הנבטים פעם בשנה לאורך החתכים (2 מטר מכל צד), וערך זה נחשב כמייצג לכל החלקה. עם הזמן התברר כי פיזור הנבטים אינו אחיד בכל שטח החלקות, ולכן דגימה לאורך חתכי המדידה הקבועים אינה בהכרח מייצגת. החל משנת 2015 נספרו הנבטים בכל שטח החלקה פעמיים בשנה, באפריל בתום עונת הגשמים (נביטה) ובספטמבר בתום הקיץ (שרידות).

**אורך המחטים** – אנו מניחים שקשר בין אורך המחטים לתנאי האקלים ולטיפולים, ולכן האורך הוא מדד לחיוניות ולמצב של העצים. המחטים נאספות מענפים בגובה 6 מטר משבעה עצים שעליהם מורכבים הדנדרומטרים בכל חלקה, משני מפנים (מזרח ומערב).

**קצב זרימת המים בגזע** – נמדד מאז שנת 2017. כדי לצמצם נזק לציוד מדידה יקר הותקנו והוסרו בכל עונה מחדש התקני הכנה לחישה בארבעה עצים בכל אחת מארבע החלקות (10, 20, 30 עצים לדונם וביקורת). החישה עצמה הותקנה זמנית על גבי הגזעים לתקופות של שלושה ימים בקמפיינים מאורגנים אחת לעונה.

**תכולת המים ופוטנציאל המים בקרקע** – נמדדים מאז שנת 2017 בעזרת חיישנים למדידת תכולת הרטיבות בקרקע ולמדידת פוטנציאל מים של הקרקע. החיישנים הוטמנו בקרקע בארבע חלקות סמוכות (10, 20, 30 עצים לדונם וביקורת) בעומק של 20 ס"מ בשתי נקודות: סמוך לאחד הגזעים, ובמרחק מרבי מגזעי העצים. המדידה מתבצעת באופן רציף, והנתונים נאגרים באוגר נתונים מוזן סוללות (איור 4).

**צימוח שורשים עדינים** – נבדק מאז שנת 2017. גילי רשת (חורים בקוטר 2 מ"מ) המכילים קרקע מהאתר שסוננה משורשים, נטמנים למשך שנתיים בקרקע בעומק של 25 ס"מ. השורשים מופרדים מהקרקע, ונסרקים לקבלת אומדן של צימוח השורשים החדשים בכל חלקה. נוסף על כך, בשנת 2019 תועד צימוח שורשים עדינים בצילומים במצלמת שורשים ייעודית מדי חודש במהלך 12 חודשים רצופים (איור 4).

## ממצאים עיקריים: השפעת צפיפות העומד על תפקודי הפחמן והמים של העצים

השנים הראשונות לאחר הדילול היו באופן טבעי שנות הסתגלות, ונצפתה בהן שונות גבוהה משנה לשנה גם ללא תלות בנתונים המטאורולוגיים והסביבתיים. במחקרים

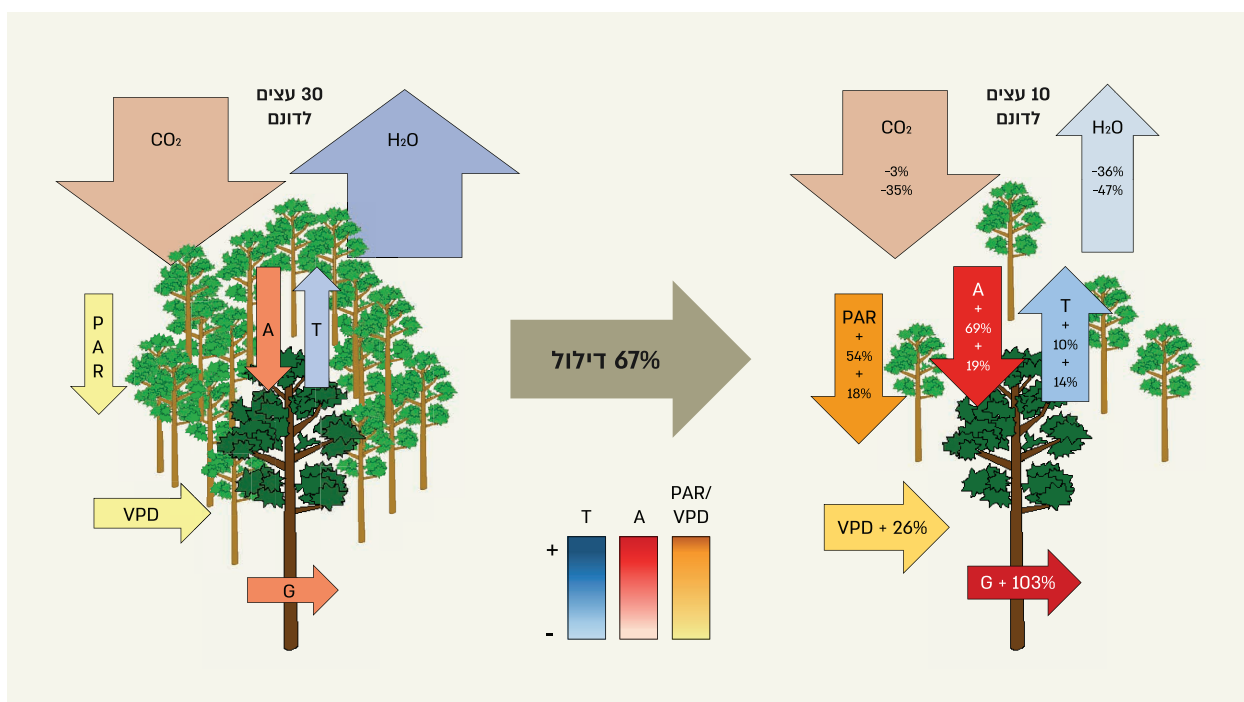


תפקוד העצים בטיפולו הדילול הגיעו לשיאם בתקופה של סוף החורף והאביב (מרץ-מאי), והצטמצמו עם העלייה בטמפרטורות והירידה בלחות האוויר, עד שבתקופת הקיץ כמעט ולא נמדדו הבדלים, משום שבתקופת הקיץ פיוניות העלים פתוחות באופן מינימלי המאפשר הישרדות בלבד במטרה להגן על העץ מפני התייבשות. איור 5 מציג את מאזן השטפים שנמדדו וחושבו בחלקות הצפופות (30 עצים לדונם) בהשוואה למאזן השטפים בחלקות המדוללות (10 עצים לדונם).

### ממצאים עיקריים: השפעת הרעייה והדילול על התחדשות יער אורנים באזור צחיח למחצה

לאחרונה פורסם מחקר שתרגומו פורסם גם בכתב עת זה (פוזנר ושות', גיליון 22, 2022; Pozner et al., 2022), שעקב אחר יכולת ההתחדשות של יער יתיר. במחקר נמצא שאף על פי שבתקופת האביב מספר הזריעים שנובטים גבוה מאוד ויכול להגיע למאות רבות לדונם, יכולתם לשרוד

הצפופות. שינויים אלה במאזן המים של העץ התבטאו בכך שיעילות ניצול המים של העצים (WUE) בחלקות הדלילות (10 עצים לדונם) הייתה גבוהה משמעותית ביחס לזו של העצים בחלקות הצפופות. כיצד ניתן להסביר זאת? ביער יתיר מרבית קיבוע הפחמן מתבצע בסוף החורף ובאביב (מרץ-מאי) כאשר זמינות המים בקרקע גבוהה ואינה גורם מגביל בעקבות תחרות בין העצים על משאב המים (Klein et al., 2014). היות שגם ה-VPD נמוך יחסית בעונה זו, מוליכות הפיוניות של העצים בכל החלקות נוטה להיות דומה. את העלייה ביעילות העצים בחלקות הדלילות ניתן לייחס כנראה למספר הגבוה יותר של מחטים חדשות שנצפו גדלות על העצים בחלקות המדוללות, שגם היו ארוכות יותר מאשר בחלקות הצפופות (כנראה בשל העלייה בזמינות הקרינה). כמו כן, היעילות הפוטוסינתטית ויעילות ניצול המים של מחטים צעירות גבוהות משמעותית משל מחטים ותיקות (Porté and Loustau, 1998). ניתוח הממצאים הראה גם שההבדלים הפיזיולוגיים ברמת תפקוד העץ הבודד (דיות, קיבוע פחמן) לאחר דילול החלקה אינם נשמרים לכל אורך השנה, ונמצא שהם תלויים בעונות השנה. ההבדלים בין



איור 5

#### סיכום סכמטי של ההבדלים בין חלקות הניסוי, שנמדדו או חושבו תאורטית ושנבעו מטיפולו הדילול

הנתונים מתארים את ההשפעה על עצים גדולים ועל שטפי מים, פחמן ואנרגיה. כיוון החץ מצייין את כיוון השטף; גודל החץ ועוצמת הצבע מציינים את הגודל והעוצמה של השטף. הערכים העליונים נמדדו ברמת העלה וחושבו עבור כלל החלקה; הערכים התחתונים חושבו תאורטית על ידי המודל ההידרולוגי RHESSys. הירידה בצפיפות העומד הגדילה את הקרינה הפוטוסינתטית הפעילה (PAR) מתחת לחופה, ובמידה נמוכה יותר את גירעון לחץ האדים (VPD). בעקבות זאת, הטמעת פחמן (A) וצמיחה (G) ברמת העץ הבודד גדלו במידה ניכרת, בעוד הדיות (T) גדלו באופן מתון. העלייה במדדים הפיזיולוגיים והאקו-פיזיולוגיים ברמת העץ הבודד פיצתה על הירידה במספר העצים לשתח עקב הדילול, ונרשמה הפחתה בצריכת המים הכללית ברמת החלקה.

תקופות היובש, וכן משפרת את סיכויי לשרוד. ניתן גם לראות ששיעור כיסוי העלווה הולך וגדל בחלקות המדוללות בשל גדילת נוף העצים שנותרו. העלווה מספקת צל עבור שוכני היער והמבקרים בו, אך בו-בזמן גם מותירה אזורים גדולים יותר מבעבר של שטחים החשופים לקרינה ישירה שמאפשרת התפתחות מחודשת של מינים מקומיים. הצמחייה שהולכת ומתבססת עם השנים באזורים שאינם מוצלים מורכבת משילוב של כיסוי עשבוני צפוף לאחר הגשמים עם שיחים מעוצים קטנים, כגון סירה קוצנית וקיפודן בלנש, המגדילים את המגוון הביולוגי של היער, ומספקים מקור מזון גדול יותר עבור עדרי הכבשים והעיזים ועבור חיות הבר המקומיות.

### סיכום

ניטור ארוך טווח של יער יתיר הוא בעל חשיבות ברמה עולמית, וזאת בשל מיקומו הייחודי על סף המדבר בקצה תפוצתו הדרומי של היער. תוצאות המחקר הן בראש ובראשונה כלי חשוב להסקת מסקנות ותובנות לניהול יער בר-קיימא במדינת ישראל, אך לא פחות חשוב מכך, יער זה הוא מעין "מנהרת זמן" עבור יערות מחטניים באזורים אחרים בעולם שהולכים ומתייבשים. גם אם כיום הם עדיין אינם סובלים מתקופות יובש ממושכות כבצפון הנגב, התחזיות לשינוי האקלים באזורים רבים בעולם צופות שיערות רבים באירופה ובאמריקה ילכו ויתייבשו. מציאת "הנוסחה" לניהול מיטבי של היער בסוג אקלים זה תוכל לאפשר למקבלי החלטות בעולם כולו להתכונן טוב יותר לתנאי העתיד.

בקיץ החם והיבש באזור זה שעל סף המדבר מצומצמת ביותר, ולחץ הרעייה באזור הצחיח מקטין עוד יותר את סיכויי השרידות. נוסף על כך, מעט הזרעים שמצליחים לשרוד בקיץ ולהתקיים עד לעונת הגשמים הבאה, לרוב אינם מצליחים להתפתח כראוי ונשארים קטנים ומנוונים. צמצום מספר העצים בחלקה, שמקטין את התחרות על משאבי המים והאור, לא יצר יתרון להתבססות של עצי אורן חדשים. מחקר זה אישר ואף הרחיב את ממצאיו של יבלוביץ' (2008) מניסוי בהיקף קטן יותר.

בימים אלה, כאשר קיימים נתונים שנאספו מחלקות הניסוי במשך יותר מעשור בתקופה של שינוי האקלים, ניתן להתחיל ולקבל תמונה ברורה יותר באשר לגורלו של היער בראי הזמן בכלל, ואם ניתן לשפר את מצב העצים באמצעות ממשקי ניהול שונים. כעת מנתחים את הנתונים הללו במטרה ללמוד מה הן ההשפעות ארוכות הטווח של טיפולי הדילול ומניעת הרעייה, וכיצד יער בצפיפויות עומד שונות מתמודד עם סביבה כה מאתגרת. בקרוב יתפרסם מחקר נוסף הבוחן את ההשפעה של כמות המשקעים ותקופות של שרב מתמשך על תפקוד העצים בצפיפויות עומד שונות תוך שקלול פרמטרים רבים שנוטרו ברציפות או בנקודות זמן ספציפיות, לרבות זרימת מים בגזע, צימוח שורשים חדשים, ניתוח טבעות הגזע ו-LAI (איור 4). מניתוח התוצאות שהתבצע עד כה ניתן לראות בבירור שדילול החלקות מיטיב עם העצים שנותרו, בשל הפחתת התחרות על משאבי המים היקר כל כך באזור גאוגרפי זה. זמינות המים הגדולה יותר עבור כל אחד מן העצים משפרת את מצב העץ הבודד, ומאפשרת לו להתמודד טוב יותר עם

### מקורות

- Bréda NJJ. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2403–2417.
- Calev A, Zoref C, Tzukerman 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.
- Del Campo A, Fernandes TJG, and Molina AJ. 2014. Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: How much can be modified the water cycle through forest management? *European Journal of Forest Research*, 133(5), 879–894.
- 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(5), 891–904.
- השירות המטאורולוגי הישראלי. נתונים היסטוריים של משקעים לאורך השנים, <https://ims.gov.il/he/data.gov>. 2022–1960
- ויזל י (עורך). 1984. **הצומח של ארץ ישראל**. בתוך: אלון ע (עורך). האנציקלופדיה החי והצומח של ארץ ישראל, כרך 8. הוצאת משרד הביטחון והחברה להגנת הטבע. תל אביב.
- יבלוביץ' ח. 2008. התחדשות טבעית של יערות אורן ירושלים באזורים צחיחים למחצה (עבודת גמר לתואר שני). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
- 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.
- סולר ש, רון מ, פרלמן י ורומן א. 2006. **חבל יתיר, סקר טבע ונוף**. מכון דשא, תל אביב.

- 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 and Environment*, 44(5), 1315–1328.
- 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 (February), 107831.
- Ruano I, Rodriguez-Garcia E, and Bravo F. 2013. Effects of pre-commercial thinning on growth and reproduction in post-fire regeneration of *Pinus halepensis* Mill. *Annals of Forest Science*, 70(4), 357–366.
- Schiller G. 2010. The case of yatir forest. In: Bredemeier M, Cohen S, Godbold D, Lode E, Pichler V, and Schleppei P (Eds). *Forest Management and the Water Cycle*. Ecological Studies vol 212. Dordrecht: Springer. pp. 163–186.
- Schiller G and Atzmon N. 2009. Performance of Aeppo pine (*Pinus halepensis*) provenances grown at the edge of the Negev Desert: A review. *Journal of Arid Environments*, 73(12), 1051–1057.
- Sohn JA., Gebhardt T, Ammer C, Bauhus J, Heinz Häberle K, Matyssek R, and Grams TEE. 2013. Mitigation of drought by thinning: Short-term and long-term effects on growth and physiological performance of Norway spruce (*Picea abies*). *Forest Ecology and Management*, 308, 188–197.
- Tsamir M, Gottlieb S, Preisler Y, Rotenberg E, Tatarinov F, Yakir D, et al. 2019. Forest ecology and management stand density effects on carbon and water fluxes in a semi-arid forest, from leaf to stand-scale. *Forest Ecology and Management*, 453 (June), 117573.
- Vogel JC, Fuls 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.
- Grünzweig JM, Lin T, Rotenberg E, Schwartz A, and Yakir D. 2003. Carbon sequestration in arid-land forest. *Global Change Biology*, 9(5), 791–799.
- Klein T, Rotenberg E, Cohen-Hilaleh E, Raz-Yaseef N, Fyodor 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. *Ecohydrology*, 7(2), 409–419.
- Martin-Benito D, del Rio M, Heinrich I, Helle G, and Cañellas I. 2010. Response of climate-growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 967–975.
- Maseyk KS, Lin T, Rotenberg E, Grünzweig JM, Schwartz A, and Yakir D. 2008. Physiology-phenology interactions in a productive semi-arid pine forest. *New Phytologist*, 178(3), 603–616.
- Moreno G and Cubera E. 2008. Impact of stand density on water status and leaf gas exchange in *Quercus ilex*. *Forest Ecology and Management*, 254(1), 74–84.
- Moreno-Gutiérrez C, Barberá GG, Nicolás E, de Luis M, Castillo VM, Martínez-Fernández F, and Querejeta JI. 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.
- Navarro-Cerrillo RM, Sánchez-Salguero R, Herrera R, Ceacero Ruiz CJ, Moreno-Rojas JM, Manzanedo RD and López-Quintanilla J. 2016. Contrasting growth and water use efficiency after thinning in mixed *Abies pinsapo-Pinus pinaster-Pinus sylvestris* forests. *Journal of Forest Science*, 62(2), 53–64.
- Porté A and Loustau D. 1998. Variability of the photosynthetic characteristics of mature needles within the crown of a 25-year-old *Pinus pinaster*. *Tree Physiology*, 18(4), 223–232.
- Pozner E, Bar-on P, Livne-luzon S, Moran U, Tsamir-Rimon M, Dener E, Schwartz E, et al. 2022. Forest ecology and management 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 (December 2021), 119966.



פריחת כלניות בחלקה מדוללת ביער יתיר. דילול החלקה מאפשר התחדשות של תת-היער על ידי מיני בר מקומיים צילום: אלה פוזנר