



# יער הקדושים – אתר למחקר אקולוגי ארוך טווח ביער נטע-אדם מחטני: ממשק עומדים בוגרים לעיצוב יער העתיד

יגיל אסם\*<sup>1</sup> | אלה זנגי<sup>2,1</sup> | מור אשכנזי<sup>3,2,1</sup> | אילון כלב<sup>3,2,1</sup> | אורי מאירוביץ<sup>2,1</sup>  
רוני טל<sup>3,2,1</sup> | מאיה מילאת<sup>3,2,1</sup> | יוסי משה<sup>1</sup> | חוסיין מוקלדה<sup>1</sup> | משה צוקרמן<sup>3</sup>  
ג'מאל דוויאת<sup>3</sup> | ז'זזה גרינצוויג<sup>2</sup> | חנוך צורף<sup>3</sup>

- 1 המחלקה למשאבי טבע, מנהל המחקר החקלאי – מכון וולקני
  - 2 הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים
  - 3 אגף הייעור, קק"ל
- \* yagil@volcani.agri.gov.il

## תקציר

קטנים. עם זאת, קצב הצמיחה של אלונים מבוססים גבר, עד פי שלושה. הדילול השפיע על הרכב מיני הצמחים בתת-היער וגרם לעלייה ניכרת בעושר המינים (פי 1.6). טיפולי הדילול גרמו לירידה של עד כ-13% ביצרנות של חופת היער שנמדדה בגרם חומר יבש למ"ר, ולעומתה לעלייה הדרגתית ביצרנות תת-היער, עד כדי פי שמונה. עם זאת, עד כה מדד שטח העלים והיצרנות הכוללים של חופת היער ותת-היער טרם השיגו במלואם את הערכים שהתקיימו טרם הדילול. תוצאות המחקר ממחישות את האפקטיביות ארוכת הטווח של טיפולי דילול בעיצוב מבנה היער, בוויסות הדינמיקה והתפקודים של המערכת האקולוגית ובשיפור החוסן בפני יובש גובר עקב שינוי האקלים.

האתר למחקר אקולוגי ארוך טווח ביער הקדושים הוקם בשנת 2009 כדי לבחון שאלות מרכזיות הנוגעות לניהול היערות המחטניים הבוגרים בישראל ולעיצובם כיערות חיוניים, מגוונים וחסונים. המחקר נערך ביער אורן ירושלים בוגר בהרי יהודה, ונבחנו בו השפעות ארוכות טווח של טיפולי דילול שונים על חיוניות עצי היער, ההתחדשות הטבעית בו, המגוון הביולוגי ותפקוד המערכת האקולוגית. בחלוף 12 שנה ממצאי המחקר מראים שדילול היער גרם לשיפור ניכר ביצרנות של עצי האורן שנתרו לאחר הדילול, של עד פי ארבעה, ולירידה ניכרת בשיעור התמותה שלהם, עד פי עשרה. עם זאת, תגובת העצים מבחינת ממדי החופה הייתה מוגבלת, ו"מדד שטח העלים", כלומר שטח עלים ליחידת שטח קרקע, של חופת היער הראה תנודות בין-שנתיות, אך לא הציג מגמה כלשהי לאורך השנים. בעקבות הדילול נרשמה גדילה ניכרת בגיוס פרטים חדשים – עד פי חמישה – ובצמיחה של זריעי אורן ירושלים בתת-היער – עד פי שניים. לעומת זאת, הגיוס של זריעי אלון מצוי דווקא פחת עקב הדילול, ואף נרשמה תמותה מסוימת של פרטים

### מילות מפתח

אורן ירושלים, טיפולי דילול, מדד שטח העלים

## מבוא

(al., 2002; Lagergren et al., 2008).

הנחות המחקר התבססו על מודל קונספטואלי שנשען על "תאוריית שיווי המשקל האקו-הידרולוגי" (Eagleson, 1982) הקושרת בין "מדד שטח העלים" של הצמחייה בכללותה בשטח נתון (שטח עלים במ"ר ליחידת שטח קרקע במ"ר, להלן  $LAI_{ecosystem}$ ), לבין זמינות המים בבית הגידול. על פי גישה זו:

א. בסביבה מוגבלת מים הערך המרבי של  $LAI_{ecosystem}$  שהצמחייה יכולה להגיע אליו (להלן,  $LAI_{max}$ ) מוכתב על ידי זמינות המים בבית הגידול. לפיכך, יער שהתפתח ללא הפרעה והגיע לשיאו, נמצא במצב של "שיווי משקל אקו-הידרולוגי" כלומר, ה- $LAI_{ecosystem}$  שלו שווה ל- $LAI_{max}$  ומשקף את זמינות המים ("מרחב המחיה") בבית הגידול (Long et al., 2004; Osem and O'Hara, 2016).

ב. ככל שה- $LAI_{ecosystem}$  הקיים בפועל נמוך יותר מ- $LAI_{max}$ , מרחב המחיה הפנוי להתפתחות נוספת של הצמחייה רב יותר. לפיכך, ביער שעבר דילול שבעקבותיו נוצרה הפחתה של ה- $LAI_{ecosystem}$ , יש מרחב מחיה פנוי להיווצרות שטח עלים חדש ולשחזור הדרגתי של יצרנות המערכת. ההפרש בין  $LAI_{ecosystem}$ , לאחר הדילול, לבין  $LAI_{max}$ , הנובע מעוצמת הדילול, משקף את גודל מרחב המחיה הפנוי (Long et al., 2004; Osem and O'Hara, 2016).

על פי הנחות אלה שיערנו כי ככל שדילול היער יהיה חזק יותר, כך יתפנה מרחב מחיה רב יותר עבור עצי היער הבוגרים, שנותרו לאחר הדילול, ועבור התחדשות עצים (מחטניים ורחבי עלים) והתפתחות צמחייה שיחית ועשבונית בתת-היער. לתהליכים אלה קשר הדוק לארבעת יעדי הממשק שהוגדרו, אולם המידה והאופן שכל אחד מהמרכיבים הללו יושפע מדילול בעוצמות שונות, נותרו כשאלות פתוחות.

## שיטות

## אתר המחקר

המחקר התבצע ביער אורן ירושלים שניטע בשנת 1968 (בן 41 בתחילת המחקר). שטח האתר כ-300 דונם, והוא ממוקם בשיפולים המערביים של הרי יהודה ברום של 390–510 מטר מעל פני הים. המפנה הטופוגרפי מערבי ברובו ובשיפוע ממוצע של 25%. האקלים הוא ים תיכוני טיפוסי, כ-550 מ"מ גשם בשנה בממוצע, וטמפרטורה ממוצעת של 20°C. המסלע הוא דולומיט מתצורת בינה על גבי גיר קשה מתצורת ורדים. הקרקע רדודה, בעיקר מסוג טרה רוסה אדומה שטופה. הצמחייה הטבעית באזור היא שיחיה ים תיכונית, הנשלטת על ידי סירה קוצנית (*Sarcopoterium spinosum*), אלת המסטיק (*Pistacia lentiscus*) ואשחר ארץ-ישראלי (*Rhamnus licioides*) בליווי פרטים פזורים

בתחילת המאה ה-21 החלה לחלחל בקרב מנהלי היער בישראל ההבנה שהדור הראשון של היערות המחטניים שניטעו עם קום המדינה, קרב אל סיום חייו, ויש צורך להתחיל בתכנון ובניכוש של האסטרטגיה לחידוש היערות הללו (Osem et al., 2008). במסגרת הדיון בסוגיה זו התעוררו מספר שאלות בסיסיות:

- מהי תוחלת החיים של דור היערות נוכחי?
- מהי דמותם הרצויה של יערות העתיד?
- כיצד ראוי לחדש את היערות?

באשר לדמותם של יערות העתיד הוסכם על השאיפה הבאה: "לבסס יערות בריאים וחיוניים המותאמים לתנאי בית הגידול בו הם מצויים, עמידים בכני פגעים ומכגעים, מתקיימים ומתחדשים באופן עצמי, תומכים במגוון ביולוגי רחב ומספקים מגוון תועלות לאדם מבלי לגרום נזק למערכות אקולוגיות שכנות" (אסם ושות', 2014). על בסיס זה נגזרו עבור היערות המחטניים הבוגרים ארבעה יעדי ממשק עיקריים (אסם ושות', 2014; Osem et al., 2008; 2009):

- טיפוח החיוניות ואריכות הימים של דור היער הנוכחי.
- ביסוס הדרגתי של דור היערות הבא על בסיס תהליכי התחדשות טבעית, ככל האפשר.
- הגדלת המורכבות המבנית והמגוון הביולוגי של היער.
- טיפוח החוסן ותפקודי המערכת של היער.

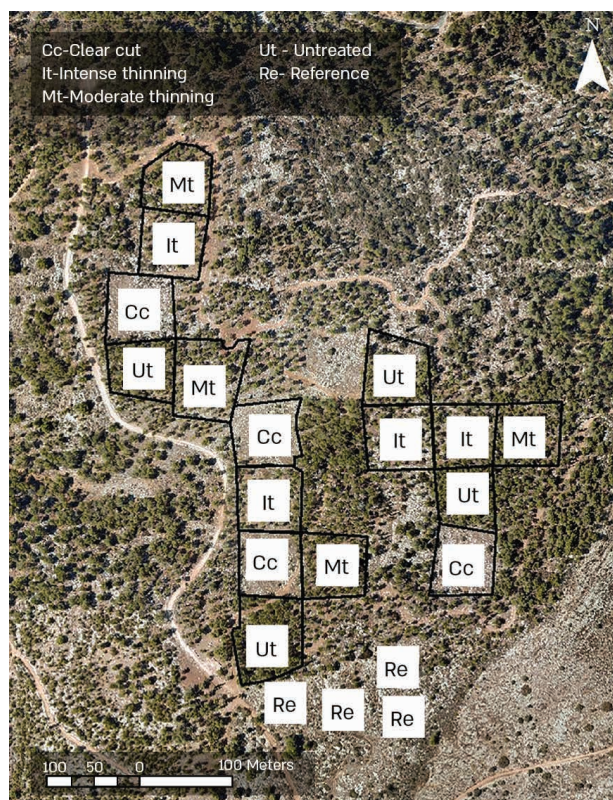
היות שחסר בארץ ניסיון קודם בהתמודדות עם אתגרי הממשק הללו, הוחלט על הקמת "אתר מחקר אקולוגי ארוך טווח" (LTER) ביער מחטני בוגר הגדל בתנאי אקלים ומסלע טיפוסיים לאזור הים התיכוני בישראל. לצורך זה נבחר יער הקדושים, יער אורן ירושלים (*Pinus halepensis* Mill.) שניטע בסוף שנות ה-60 בהרי יהודה, וכיום הוא כבן 50 שנה.

מבין פעולות הממשק הנהוגות ביערות המחטניים בארץ, דילול היער (סילוק סלקטיבי של עצים להפחתת צפיפות העומד) נחשב כטיפול היערי המשמעותי והחשוב ביותר, ונשאלה השאלה: האם ובאיזו מידה ראוי לדלל את היערות המחטניים המבוגרים כדי לקדם את ארבעת יעדי הממשק שפורטו לעיל? יש לציין כי משטר הדילולים המקובל ביערות אורן ירושלים בארץ נועד להתבצע עד גיל 30, מה שמאפשר לעצים להגיב לדילול על ידי צימוח נמרץ של הנוף והגזע (רוח ושות', 1990; אסם וצורף 2020). בגיל מאוחר יותר הולכת ופוחתת יכולת העצים להגיב לדילול, ויעילותו עבורם מוטלת בספק. יתרה מכך, ביערות מבוגרים שגדלו בצפיפות רבה (כמו יער הקדושים), העצים עלולים להגיב באופן שלילי לדילול (עקת דילול), ובעיקר לדילול חזק (DeBell et

של אלון מצוי (*Quercus calliprinos*) (Zangy et al., 2021).

### מבנה הניסוי

בשטח המחקר סומנו 16 חלקות בגודל 70x70 מטר של יער אורן ירושלים בצפיפות אחידה (כ-55 עצים לדונם). החלקות חולקו באופן אקראי לארבעה טיפולי דילול (ארבע חזרות לכל טיפול): א. כריתה מלאה (סילוק 100% מה-LAI של חופת היער, להלן  $LAI_{overstory}$ ); ב. דילול חזק (10 עצים לדונם, סילוק 60% מה- $LAI_{overstory}$ ); ג. דילול מתון (30 עצים לדונם, סילוק 30% מה- $LAI_{overstory}$ ); ד. ביקורת ללא דילול (כ-55 עצים לדונם,  $LAI_{overstory} \approx 2$ ) (Calev et al., 2016). למניעת השפעות שוליים סומן במרכז כל חלקה שטח של 40x40 מטר שבתוכו מתבצעות כל המדידות (להלן, שטח הניסוי). טיפולי הדילול בוצעו במהלך קיץ-סתיו 2009. כמו כן, סמוך לשטח היער שטופל נבחר שטח בלתי מיוער כמערכת ייחוס. בשטח זה סומנו ארבע חלקות ניטור נפרדות בגודל 40x40 מטר (איור 1).



איור 1

### צילום אוויר של מערך הניסוי ביער הקדושים, אוגוסט 2010

הקווים השחורים מסמנים את גבולות חלקות הניסוי (70x70 מטר). הקווים הלבנים מסמנים את גבולות שטח הניטור בכל חלקה (40x40 מטר). טיפולי הדילול בוצעו בארבע חזרות: כריתה מלאה (Cc, 0 עצים לדונם), דילול חזק (It, 10 עצים לדונם), דילול מתון (Mt, 30 עצים לדונם), ביקורת ללא דילול (Ut, כ-55 עצים לדונם) וחלקות ייחוס ללא עצים נטועים (Re).

### מדדים ושיטות מדידה

במאמר זה נתייחס למספר מדדים המייצגים את היבטי המחקר השונים.

1. LAI של עצי חופת היער ( $LAI_{overstory}$ ) ושל צמחיית תת-היער ( $LAI_{understory}$ ) – משקף את שטח העלים ליחידת שטח קרקע של עצי היער הבוגרים (הנטועים) היוצרים את חופת היער בכל חלקה.  $LAI_{overstory}$  נמדד מדי שנה בעונת האביב (יוני) באמצעות מכשיר אופטי ייעודי מסוג SunScan<sup>®</sup> (מאירוביץ, 2018; Webb et al., 2008). כמו כן, לאורך השנים נמדד גם ה-LAI של תת-היער ( $LAI_{understory}$ ), והסכום של  $LAI_{overstory}$  ו- $LAI_{understory}$  שווה ל- $LAI_{ecosystem}$ . לפירוט אופן המדידה של המשתנים הללו ראו מאירוביץ (2018).
2. יצרנות לעץ בודד – מדד זה משקף את חיוניות העצים הנטועים הבוגרים (דור היער הנוכחי). ב-5-15 עצי מדגם בכל חלקה, מלבד החלקות שעברו כריתה מלאה (חמישה עצים בחלקות דילול חזק, עשרה בחלקות דילול מתון ו-15 בחלקות ביקורת), נמדדה מדי שנה העלייה בקוטר הגזע ביחס לקוטרו בשנה הקודמת. המדידה נעשתה באמצעות דנדרומטרים (מדי היקף גזע) קבועים (Calev et al., 2016). העלייה בביימסה היבשה של העץ בכללותו חושבה באמצעות נוסחאות אלומטריות מתאימות (זנגי, 2019).
3. שיעור תמותת עצים – מדד זה משקף את אורך החיים וחיוניות העצים הנטועים הבוגרים. בכל חלקה חושב היחס בין מספר העצים המתים לבין מספר העצים החיים בתחילת הניסוי. מדד זה נאסף מדי שנה בחודשי הסתיו בסקר קרקעי (כלב, 2013).
4. גיוס אורנים בתת-היער – מדד זה משקף את ההתחדשות הטבעית של היער המחטני. זריעי אורן ירושלים (בני שנה לפחות) נספרו בעונת הסתיו בערך כל שלוש שנים בשלוש רצועות דגימה (4x40 מטר) בכל חלקה (זנגי, 2019).
5. צמיחת זריעי אורנים – מדד זה משקף את ההתפתחות של היער המחטני המתחדש. הגובה של זריעי אורן ירושלים נמדד בערך כל שלוש שנים, והגידול היחסי שלהם חושב (העלייה בגובה ביחס לגובה הקודם) (זנגי, 2019).
6. גיוס והתפתחות זריעי אלון מצוי – מדדים אלה משקפים את ההתחדשות הטבעית של עצי חורש, והם נמדדו באופן זהה לזריעי אורנים (זנגי, 2019).
7. עושר מיני צמחים בתת-היער – מדד זה משקף את המגוון הביולוגי ביער. בערך כל שלוש שנים נערכו בכל החלקות סקרי צומח, ובמהלכם זוהו ונספרו כל מיני הצמחים בארבעה ריבועי דגימה בשטח 100 מ"ר כל אחד (Zangy, 2021).
8. יצרנות – מדד זה משקף את תפקוד המערכת האקולוגית.

הדלילות ביותר ( $LAI_{overstory} < 1$ ) לכ-3 ק"ג בשנה בחלקות הצפופות ביותר ( $LAI_{overstory} > 2$ ).

### שיעור התמותה בעצי האורן הבוגרים

נמצא קשר חיובי בעל אופי מעריכי ( $R^2=0.73$ ,  $N=12$ ),  $LAI_{overstory}$  לבין שיעור התמותה המצטבר, והוא עלה מערך זניח של כ-2% בחלקות הדלילות ביותר עד מעל ל-25% בחלקות הצפופות ביותר (איור 3).

### התחדשות טבעית של עצים

בטרם הדילול הגיע מספר זריעי האורנים בחלקות המחקר לכל היותר למספר פרטים בודדים, ומספר זריעי האלונים עמד על כ-40 זריעים לדונם, רובם בגובה 25–100 ס"מ. עשר שנים לאחר הדילול נמצא קשר שלילי בין  $LAI_{overstory}$  לבין גיוס אורנים חדשים בתת-היער ( $R^2=0.34$ ,  $N=16$ ),  $P < 0.018$ , שפחת מכ-25 זריעים לדונם בחלקות הכריתה המלאה ( $LAI_{overstory}=0$ ) לכחמישה זריעים לדונם בחלקות הצפופות ביותר. כמו כן, נמצא קשר שלילי בין ה- $LAI_{overstory}$  לבין קצב הצמיחה של זריעי האורנים ( $R^2=0.79$ ,  $N=16$ ),  $P < 0.001$ , והוא פחת מכ-32% בשנה בחלקות הדלילות לכ-18% בשנה בחלקות הצפופות ביותר. שלא כמו האורנים, אצל האלונים נמצא דווקא קשר חיובי בין ה- $LAI_{overstory}$  של החופה לבין גיוס זריעים חדשים לאחר הדילול ( $R^2=0.37$ ),  $P < 0.01$ ,  $N=16$ , והוא עלה מערך של מינוס שני פרטים (תמותה) לדונם בעשר שנים בחלקות הכריתה המלאה, לפרט אחד לדונם (גיוס) בממוצע בחלקות הצפופות ביותר. לעומת זאת, נמצא קשר שלילי בין  $LAI_{overstory}$  לבין קצב הצימוח של זריעי האלונים ( $R^2=0.59$ ,  $N=16$ ,  $P < 0.005$ ), והוא פחת מכ-15% בשנה בחלקות הכריתה המלאה לכ-5% בחלקות הצפופות ביותר.

### עושר הצומח

בחלקות המחקר נרשמו 316 מינים של צמחים עשבוניים ומעוצים. נמצא קשר לינארי שלילי בין  $LAI_{overstory}$  לבין עושר המינים ( $R^2=0.74$ ,  $N=16$ ,  $P < 0.0001$ ) שעמד על כ-70 מינים ל-100 מ"ר בחלקות הכריתה המלאה, ועל כ-45 מינים ל-100 מ"ר בחלקות הצפופות ביותר. לשם השוואה, בחלקות הייחוס שלא ניטעו, נמדד עושר מינים של כ-100 מינים ל-100 מ"ר. מדדים שונים של מגוון מינים (Sorenson index, Simpson index) הציגו מגמות זהות לאלה שהתקבלו עבור עושר המינים. על פי ניתוחי אורדינציה מסוג RDA, מבין מיני הצמחים שנרשמו בחלקות המחקר הציגו 105 מינים שעיקרם עשבוניים חד-שנתיים, נוכחות רבה יותר באופן מובהק ביער הפתוח, כלומר מספר הדגימות שבהן המין הופיע מתוך סך הדגימות היה גבוה. לעומת זאת, 23 מינים בעיקר שיחים ומטפסים, היו נוכחים יותר ביער הצפוף (איור 4). ראו לציין כי מיני הצמחים שנרשמו בחלקות היער הם

נמדדו הביומסה השנתית של הצמחייה העשבונית והתוספת השנתית של ביומסת הצמחייה המעוצה בתת-היער ובעצי היער הבוגרים. הביומסה העשבונית נמדדה ישירות על ידי איסוף דגימות, ייבוש ושקילה. נפח הצמחייה המעוצה בתת-היער חושב על פי נתוני הכיסוי והגובה של הצמחייה שהופקו מחתכי צומח (זנגי, 2019), והביומסה חושבה מנתוני הנפח באמצעות נוסחאות אלומטריות מותאמות (אשכנזי ושות', 2018). יצרנות העצים חושבה על ידי הכפלת היצרנות הממוצעת לעץ בודד (מדד 2 ברשימה זו) במספר העצים ליחידת שטח בכל חלקה (זנגי, 2019).

### ניתוח הנתונים

הניתוחים נערכו ב-16 חלקות ניסוי (ארבעה טיפולים בארבע חזרות, ראו איור 1). בכל המדדים נערכו ניתוחי גרסיה לבחינת הקשר בין הממוצע או הסכום הרב-שנתי של המדד לבין מדד שטח העלים של חופת היער ( $LAI_{overstory}$ , מדד 1 ברשימה) המשקף באופן כמותי רציף את כיסוי חופת היער בהשפעת הדילול בכל חלקה. ערכנו ניתוחי אורדינציה מסוג RDA (redundancy analyses) למטרות ניתוח ההבדלים בהרכב המינים בהשפעת טיפולי הדילול. חלקות הייחוס שסומנו בשטח הבלתי מיוער שסומן ליער לא נכללו בניתוחים הסטטיסטיים ושימשו להשוואה בלבד, מכיוון שהן מהוות חזרות מדומות (pseudo-replications).

### תוצאות

#### מדד שטח העלים של חופת היער

טיפולי הדילול הפחיתו את מדד שטח העלים של חופת היער ( $LAI_{overstory}$ ) בהתאם לצפיפות העצים שנותרו לאחר הדילול ( $R^2=0.85$ ,  $N=12$ ,  $P < 0.001$ ). במשך 12 שנים לאחר הדילול (2010–2022) ה- $LAI_{overstory}$  הציג תנודות בין-שנתיות, אולם לא נצפתה מגמה כלשהי באף אחד מהטיפולים. הממוצעים הרב-שנתיים של ה- $LAI_{overstory}$  נעו בטווחים של 0.68–1.01 (מ"ר שטח עלים למ"ר קרקע) בטיפולי הדילול החזק של עשרה עצים לדונם, 1.27–1.78 בטיפולי הדילול המתון של 30 עצים לדונם, ו-1.8–2.3 בטיפולי הביקורת ללא דילול. הניתוחים הבאים מציגים את הקשר בין ה- $LAI_{overstory}$  הממוצע (2010–2022) בכל חלקה לבין המדדים השונים של המחקר.

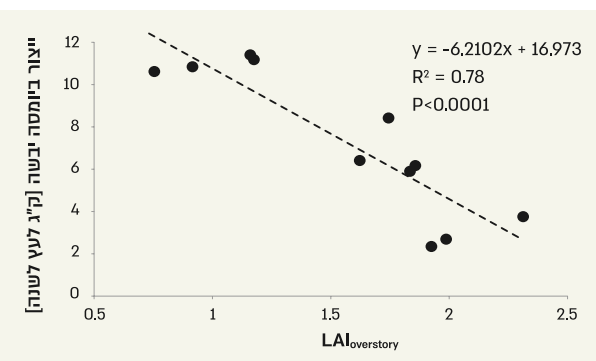
#### יצרנות עצי האורן הבוגרים

נמצא קשר לינארי שלילי מובהק ( $R^2=0.78$ ,  $N=12$ ,  $P < 0.001$ ) בין  $LAI_{overstory}$  לבין היצרנות של עצי האורן (איור 2). ייצור הביומסה היבשה לעץ נע בין כ-12 ק"ג בשנה בחלקות

מינים ים תיכוניים טיפוסיים לאזור הרי יהודה, ורובם ככולם נמצאו גם בחלקות הייחוס הבלתי מיוערות סמוך ליער.

### יצרנות

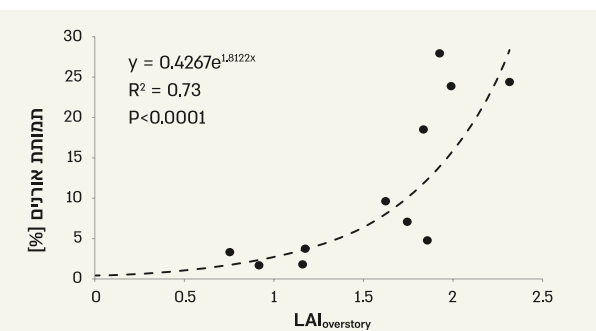
מהתבוננות בשלושת מרכיבי יצרנות היער – צמחייה עשבונית, צמחייה מעוצה בתת-היער ועצי חופת היער – על פני הטווח של  $LAI_{overstory}$ , עלו הדברים הבאים: יצרנות הצמחייה בתת-היער נתרמה בחציה מצמחייה עשבונית (בעיקר חד-שנתית) ובחציה מצמחייה מעוצה (מטפסים, שיחים וזרעי עצים). בחלקות הכריתה המלאה עמדה יצרנות תת-היער על כ-150 גרם חומר יבש למ"ר בשנה, והיא ירדה בצורה ליניארית ( $R^2=0.70$ ,  $N=16$ ,  $P<0.0001$ ) עם העלייה ב- $LAI_{overstory}$  עד לכ-20 גרם חומר יבש למ"ר בשנה בחלקות הצפופות ביותר. לעומת זאת, יצרנות חופת היער עלתה עם העלייה ב- $LAI_{overstory}$  מאפס בחלקות הכריתה המלאה ( $LAI_{overstory}=0$ ) עד לכ-210 גרם חומר יבש למ"ר בחלקות הצפופות ביותר ( $LAI_{overstory}>2$ ). בחישוב היצרנות הכוללת של היער אפשר לראות עלייה מתמתנת ביצרנות עם העלייה ב- $LAI_{overstory}$  ( $R^2=0.40$ ,  $N=16$ ,  $P<0.01$ ) מכ-150 גרם חומר יבש למ"ר בשנה בחלקות הכריתה המלאה, ועד כ-235 גרם חומר יבש למ"ר בשנה בחלקות הביקורת הצפופות. התרומה היחסית של תת-היער ליצרנות הכללית נעה בין 100% בחלקות הכריתה המלאה לכ-10% בחלקות הצפופות ביותר (איור 5).



איור 2

### עלייה שנתית בביומסה היבשה לעץ כתלות במדד שטח העלים בחופת היער

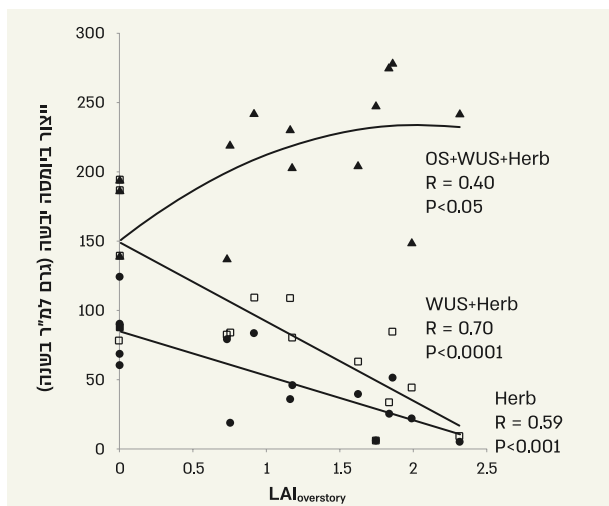
הנתונים משקפים ממוצע של עשר שנים (2010–2020). כל נקודה מייצגת חלקת ניסוי, שלושה טיפולי דילול (ללא טיפול הכריתה המלאה) בארבע חזרות.



איור 3

### שיעור התמותה של עצי אורן בוגרים כתלות במדד שטח העלים בחופת היער

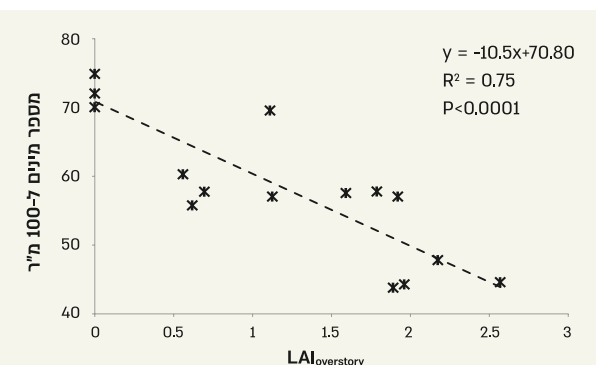
הנתונים משקפים תמותה מצטברת במשך עשר שנים (2010–2020). כל נקודה מייצגת חלקת ניסוי, שלושה טיפולי דילול (ללא טיפול הכריתה המלאה) בארבע חזרות.



איור 5

### ייצור שנתי ממוצע של ביומסה יבשה כתלות במדד שטח העלים בחופת היער

הנתונים מתייחסים לצמחייה עשבונית (Herb), עיגולים, קו רגרסיה תחתון), לצמחייה מעוצה בתת-היער וצמחייה עשבונית (WUV+Herb), ריבועים, קו רגרסיה אמצעי) ולחופת היער, צמחייה מעוצה בתת-היער וצמחייה עשבונית (OS+WUV+Herb), משולשים, קו רגרסיה עליון). כל נקודה מייצגת חלקת ניסוי, ארבעה טיפולי דילול בארבע חזרות.



איור 4

### עושר המינים של הצומח כתלות במדד שטח העלים בחופת היער

הנתונים מתייחסים לעושר המינים שנמדד בשנת 2014, חמש שנים לאחר הדילול. כל נקודה מייצגת חלקת ניסוי, ארבעה טיפולי דילול בארבע חזרות.

## דין

ניכרת בעקבות הדילול (עד פי 1.8). את העלייה בקצב הגיוס והצימוח של האורנים ניתן לייחס בעיקר להיותו של האורן מין אוהב אור, שמתבסס וצומח טוב יותר בתנאי קרינה גבוהה. בעוד שמדי שנה ישנה נביטה רבה של אורנים ביער, היכולת של נבטי האורן לצמוח ולבסס שורש עמוק שיאפשר להם לצלוח את תקופת הקיץ היבשה תלויה באופן קריטי בזמינות אור (Osem et al., 2013).

שלא כמו אורן ירושלים, הגיוס של זריעי אלון מצוי דווקא נפגע מדילול היער, ולמעשה עבר ממצב של גיוס איטי למצב של גריעה, שניתן לייחס אותה לתמותה של אלונים קטנים שסבלו מתחרות קשה עם עשבים עקב פתיחת חופת היער (זנגי, 2019). לעומת זאת, קצב הצימוח של זריעי האלונים שכבר היו מבוססים בתת-היער (כ-40% זריעים לדונם), גבר עקב הדילול בצורה ניכרת (עד כדי פי שלושה). זוהי התנהגות אופיינית למיני יער "מאוחרים" (late successional species) המעדיפים להתבסס בתנאי צל ובשלים מאוחרים יותר לצמוח בתנאי אור (Cooper et al., 2014). להבדלים בדפוסי ההתחדשות של אורן ירושלים לעומת אלון מצוי יש חשיבות מבחינת ניהול היער להכוונת ההתפתחות של יערות מעורבים (מחטניים ורחבי עלים) ועיצובם.

## מגוון הצומח

בתי גידול ים תיכוניים ידועים במגוון הצומח הגבוה שלהם (Medail and Quesel, 1999). מתוצאות המחקר עולה כי יער האורן הנטוע מקיים בתוכו את מגוון הצומח האופייני לאזור הים תיכוני, ומיני הצמחים השונים מנצלים את מגוון הנישות שהיער מספק (Zangy et al., 2021). דילול היער הגדיל את עושר מיני הצמחים בתת-היער עד כדי פי שניים כמעט, ואת העלייה הזו בעושר המינים ניתן לייחס בעיקר לכניסה של מינים עשבוניים חד-שנתיים, שרובם הגדול אוהבי אור, מהשטחים הסובבים את היער (מאגר המינים המקומי – regional species pool) אל תוך החלקות המדוללות (Zangy et al., 2021). בתוך כשנתיים התקרב עושר המינים בחלקות הכריתה המלאה לעושר המינים שנמדד בחלקות הבלתי מיוערות הסמוכות (שטח הייחוס), אם כי גם לאחר עשר שנים מאז הדילול הוא עדיין מעט נמוך יותר. מצד שני, נמצאו מינים שמבחינת הנוכחות שלהם (תדירות ההופעה בדגימות) הראו העדפה דווקא לתנאי היער הצפוף (23 מינים), בהם מיני מטפסים כדוגמת פרסיון גדול (*Prasium majus* L.), שיחים כמו געדה מפושקת (*Teucrium divaricatum* Heldr.), עצים כמו אלה ארץ-ישראלית (*Pistacia palaestina* Boiss.) ועשבים רב-שנתיים כמו מלעניאל קצר מלענים (*Stipa bromoides* (L.) Doerfl.). ממצא זה מכוון לעיצוב יער בעל מגוון רמות כיסוי כאסטרטגיה לעידוד המגוון הביולוגי והמורכבות המבנית של היער (Madrigal-Gonzalez et al., 2013).

המחקר באתר ה-LTER ביער הקדושים מספק פרספקטיבה של יותר מעשור על ההשלכות של טיפולי דילול ביער אורן ירושלים בוגר במספר היבטים שמנהלי היער הגדירו כיעדי ממשק עיקריים. היבטים אלה כוללים את החיוניות ותוחלת החיים של דור היער הראשון, התבססות הדור הבא, מגוון הצומח ויצרנות היער.

## חיוניות עצי היער הבוגרים

מתוצאות המחקר עולה כי ההשפעה של טיפולי הדילול על מדד שטח העלים של חופת היער ( $LAI_{overstory}$ ), שנעו בין סילוק של כ-30% ממנו (דילול מתון) ועד כדי סילוק של 100% ממנו (כריתה מלאה), נשמרה לאורך יותר מעשור מאז הדילול ללא שינוי משמעותי. דפוס זה שונה מהדפוס המוכר ביערות, שלפיו לאחר דילול מתרחשת עלייה מהירה ועקבית ב- $LAI_{overstory}$  בעקבות צימוח מוגבר של העצים שנותרו ביער ונהנים מזמינות משאבים רבה יותר (חת ושפטר, 1983). את חוסר היכולת של העצים להגדיל את שטח העלים שלהם לאחר הדילול ניתן לייחס לגילם המתקדם יחסית בזמן הדילול ולמצב הפיזיולוגי שלהם לאחר שנים ארוכות של גידול בתנאים קשים של צפיפות גבוהה ומגבלת משאבים (Calev et al., 2016). עם זאת, למרות חוסר היכולת להגדיל את כמות העלווה הגדילו העצים בעקבות הדילול את כושר ייצור הביומסה על ידי התעבות הגזע עד כדי פי ארבעה בערך. נתון זה מעיד על השפעה דרמטית של הדילול על חיוניות העצים, וניתן לייחס השפעה זו לעלייה ביעילות של שטח העלים הקיים הודות לזמינות רבה יותר של אור ומשאבי קרקע (מים, מינרלים) ליחידת שטח עלה (Moreno-Gutierrez et al., 2011). נוסף על כך, הדילול הפחית באופן ניכר (עד יותר מפי עשרה) את שיעור תמותת העצים ביער. בעוד שנתון זה עולה בקנה אחד עם שחרור המשאבים לעצים הנותרים עקב הדילול (אפקט השחרור – Moreno-Gutierrez et al., 2011; Giuggiola et al., 2013), ניתן גם לייחס אותו לכך שהדילול סלקטיבי ומתמקד בסילוק העצים החלשים ביותר (אפקט הסלקציה – Stoneman et al., 1997). תוצאות המחקר מראות כי ביצוע דילול ביערות אורן ירושלים ותיקים וצפופים צפוי לשפר את החיוניות ואת אורך החיים של העצים וכן את כושרם להתמודד עם מגבלת משאבים (למשל יובש גובר – Giuggiola et al., 2013).

## התחדשות טבעית של עצים

תוצאות המחקר הראו כי דילול היער האיץ במידה ניכרת את ההתבססות של זריעי אורנים בתת-היער. למרות זאת, שיעור הגיוס גם בחלקות הפתוחות ביותר היה מתון יחסית (כ-25% זריעים לדונם לכל היותר). נוסף על קצב הגיוס המוגבר, גם הקצב של התפתחות זריעי האורן עלה בצורה

לעומת 30–60%, בהתאמה) היא תוצאה של עלייה ביעילות הייצור של שטח העלים שנותר לאחר הדילול, כפי שהוסבר בסעיף הראשון של הדיון בקשר לחיוניות עצי היער. לעומת הירידה ביצרנות חופת היער חלה עלייה הדרגתית ביצרנות תת-היער שתאמה לעוצמת הדילול. עשר שנים לאחר הדילול גדלה היצרנות של תת-היער פי ארבעה בדילול מתון, פי 5.8 בדילול החזק ופי 8.3 בכריתה המלאה. עם זאת, בכל טיפולי הדילול, מדד שטח העלים של הצמחייה והיצרנות הכוללת (חופת היער ותת-היער) טרם השיגו במלואם את הערכים שהתקיימו טרם הדילול. בדילול המתון היצרנות עמדה על כ-96% מערך השיא, בדילול החזק על כ-86% ובכריתה המלאה על כ-64%. לפיכך, בכל הטיפולים המערכת האקולוגית טרם שבה למצב של שיווי משקל אקו-הידרולוגי (Osem et al., 2016).

## סיכום

המחקר המתמשך ביער הקדושים מספק פרספקטיבה של עשור על ההשפעות של טיפולי דילול ביער אורן ירושלים בוגר ומפותח, הגדל בסביבה ים תיכונית מוגבלת מים. תוצאות המחקר הראו כי טיפולי הדילול שיפרו את חיוניות העצים וצמצמו את התמותה שלהם, עודדו גיוס והתפתחות זריעי אורנים, צמצמו גיוס אלונים אך עודדו התפתחות של זריעי אלונים מבוססים, והגדילו את מגוון הצומח ואת היצרנות בתת-היער וזאת במחיר צמצום היצרנות של חופת היער.

תוצאות המחקר ממחישות את האפקטיביות של טיפולי דילול בעיצוב מבנה היער ובחיוניות מגוון תהליכים המכתיבים את הדינמיקה והתפקוד של המערכת האקולוגית. ממשק דילולים המשמר את מדד שטח העלים של הצמחייה בכללותה ( $LAI_{ecosystem}$ ) מתחת לערך המרבי ( $LAI_{max}$ ) יבטיח זמינות משאבים רבה יותר לצמחייה הקיימת ביער ויתרום להתמודדות עם מחסור מים גובר עקב בצורות ושינוי האקלים.

לפירוט נרחב יותר בנושא השפעות הדילול על הרכב המינים ביער ראו Zangi ושות' (2021).

## יצרנות

הנחה בסיסית של מחקר זה הייתה ששטח היער הנחקר מצוי בשיווי משקל אקו-הידרולוגי, שמשמעותו ערכים מרביים של מדד שטח העלים של הצמחייה בכללותה ( $LAI_{ecosystem}$ ) ושל יצרנות, המשקפים ניצול מלא של משאבי בית הגידול, בדגש על משאב המים. הנחנו כך, היות שמדובר ביער בוגר, צפוף ומפותח, שלא חווה הפרעה משמעותית או דילול יערי במשך עשרות שנים. על פי נתוני המחקר אפשר לראות שערך מדד שטח העלים המרבי שבית הגידול יכול לתמוך בו ( $LAI_{max}$ ) בשטח המחקר קרוב ל-3 מ"ר שטח עלים למ"ר קרקע. ערך זה מתקיים לאורך זמן עם תנודות בין-שנתיות קלות בחלקות הלא מדוללות של היער. עצי חופת היער תורמים 60–75% ממנו ( $LAI_{overstory} = 2.3-1.8$ ), והשאר נתרם על ידי צמחיית תת-היער. במצב זה היצרנות השנתית הכוללת של היער, שמורכב מעצים בוגרים, מתת-יער מעוצה ומצמחייה עשבונית, עומדת על כ-235 גרם חומר יבש למ"ר בשנה בממוצע (לעשר שנים). ערך זה משקף את הייצור ראשוני נטו של היער (Net Primary Productivity) (- NPP).

ההנחה הבאה של המחקר הייתה כי דילול שיפחית את שטח העלים הפעיל ליחידת שטח קרקע ביער יגרום להפחתה מיידית ביצרנות היער ובו-בזמן לשחרור משאבים עבור הצמחייה הנוותרת בהתאם לעוצמת הדילול, ושהמשאבים הזמינים יובילו להאצת הצימוח (צבירת שטח עלים) ולעלייה הדרגתית ביצרנות. אכן, טיפולי הדילול גרמו להפחתה של 30% (דילול מתון), 60% (דילול חזק) ו-100% (כריתה מלאה) ממדד שטח העלים בחופת היער ( $LAI_{overstory}$ ), 18%, 36% ו-60% מה- $LAI_{ecosystem}$  בהתאמה). בעקבות זאת, חלה ירידה ביצרנות של חופת היער בכ-10 גרם למ"ר בשנה (4%) בדילול המתון, 30 גרם למ"ר בשנה (13%) בדילול החזק, ועד כ-80 גרם למ"ר בשנה (100%) בכריתה המלאה. הירידה המתונה יחסית ביצרנות בהשוואה לירידה ב- $LAI_{overstory}$  (13%–4)

## מקורות

חת ד ושפטר א. 1983. התפתחות אורן ירושלים ואורן ברוטיה בהשפעת עצמות דילול שונות. *ליערן*, 33 (4–1), 13–18.  
 כלב א. 2013. *טיפולי דילול ביער אורן ירושלים בוגר: השפעות על בריאות וחיוניות עצי היער* (עבודת גמר לקבלת תואר מוסמך). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.  
 מאירוביץ א. 2018. *השפעת טיפולי דילול על התארגנות שטח עלים ביערות אורן ירושלים מוגבלי מים* (עבודת גמר לקבלת תואר מוסמך). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.  
 רוח מ, אבני ג, בונה ע, ברוידא ד, קפלן י ושפטר א. 1990. *תכנית מעודכנת לניהול וטיפול ביערות נטע אדם*. מפ"ק, אגף הייעור, קק"ל.

אסם י וצורף ח. 2020. *תורת ניהול היער בישראל, דילול יער מחטני*. ירושלים: אגף הייעור קרן קיימת לישראל.  
 אסם י, ברנד ד, טאובר י, פרבולוצקי א וצורף ח. 2014. *תורת ניהול היער בישראל, מדיניות והנחיות לתכנון ולמשק היער*. ירושלים: אגף הייעור, קרן קיימת לישראל.  
 אשכנזי מ, אונגר י"ד, משה י, יחזקאל א, צורף ח ואסם י. 2018. טיפול באזורי חיץ לאש והשפעתו על סכנת שריפה ביערות מחטניים. *אקולוגיה וסביבה*, 9(30–39).  
 זנגי א. 2019. *יחסי גומלין בין כיסוי חופת היער לבין צומח התת-יער* (חיבור לקבלת תואר דוקטור). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.

- Moreno-Gutierrez C, Barbera GG, Nicolas E, De Luis M, Castillo VM, Martinez-Fernandez F, et al. 2011. Leaf d 18O of remaining trees is affected by thinning intensity in a semiarid pine forest. *Plant Cell and Environment*, 34, 1009–1019.
- Osem Y and O'Hara K. 2016. An ecohydrological approach to managing dryland forests: Integration of leaf area metrics into assessment and management. *Forestry*, 89, 338–349.
- Osem Y, Touber I, Atzmon N, and Perevolotsky A. 2008. Sustainable management of Mediterranean planted coniferous forests: An Israeli definition. *Journal of Forestry*, 106(1), 38–46.
- 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 plantation into mixed Mediterranean forests through natural regeneration along a rainfall gradient. *Forest Ecology and Management*, 259, 14–23.
- Stoneman GL, Crombie DS, Whitford K, Hingston FJ, Giles R, Portlock CC, et al. 1997. Growth and water relations of *Eucalyptus marginata* (jarrah) stands in response to thinning and fertilization. *Tree Physiology*, 17, 267–274.
- Webb N, Wood J, and Nicholl C. 2008. User Manual for the SunScan Canopy Analysis System Delta-T Devices Ltd.
- Zangy E, Kigel J, Cohen S, Moshe Y, Ashkenazi M, Fragmen-Sapir O, et al. 2021. Understory plant diversity under variable overstory cover in Mediterranean forests at different spatial scales. *Forest Ecology and Management*, 494, 1–10.
- 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, 551–563.
- Cooper A, Shapira O, Zaidan S, Moshe Y, Zangi E, and Osem Y. 2014. Oak restoration in a pine plantation: Effect of overstory light interception on understory oak performance in a water limited forest. *European Journal of Forest Research*, 133, 661–670.
- DeBell DS, Harrington CA, and Shumway J. 2002. *Thinning shock and response to fertilizer less than expected in young Douglas-fir stand at wind- river experimental forest*. Research Paper, PNW-RP-547, Pacific Northwest Research Station, Forest Service, Department of Agriculture, United States.
- Eagleson PS. 1982. Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems: 1. Theory and hypotheses. *Water Resources Research*, 18, 325–340.
- Giuggiola A, Bugmann H, Zingg A, Dobbertin M, and Rigling A. 2013. Reduction of stand density increases drought resistance in xeric Scots pine forests. *Forest Ecology and Management*, 310, 827–835.
- Lagergren F, Lankreijer H, Kučera J, Cienciala E, Mölder M, and Lindroth A. 2008. Thinning effects on pine forest transpiration in central Sweden. *Forest Ecology and Management*, 259, 2312–2323.
- Long JN, Dean TJ, and Roberts SD. 2004. Linkages between silviculture and ecology: Examination of several important conceptual models. *Forest Ecology and Management*, 200, 249–261.
- Madrigal-Gonzalez J, Garcia-Rodriguez JA, Puerto-Martin A, Fernandez-Santos B, and Alonso-Rojo P. 2010. Scale-dependent effects of pines on the herbaceous layer diversity in a semi-arid Mediterranean ecosystem. *Community Ecology*, 11, 77–83.
- Medail F and Quezel P. 1999. Biodiversity hotspots in the Mediterranean basin: Setting global conservation priorities. *Conservation Biology*, 13, 1510–1513.

מדידות שטח עלים. יער הקדושים,  
יוני 2016  
צילום: אורי מאירוביץ

