



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,

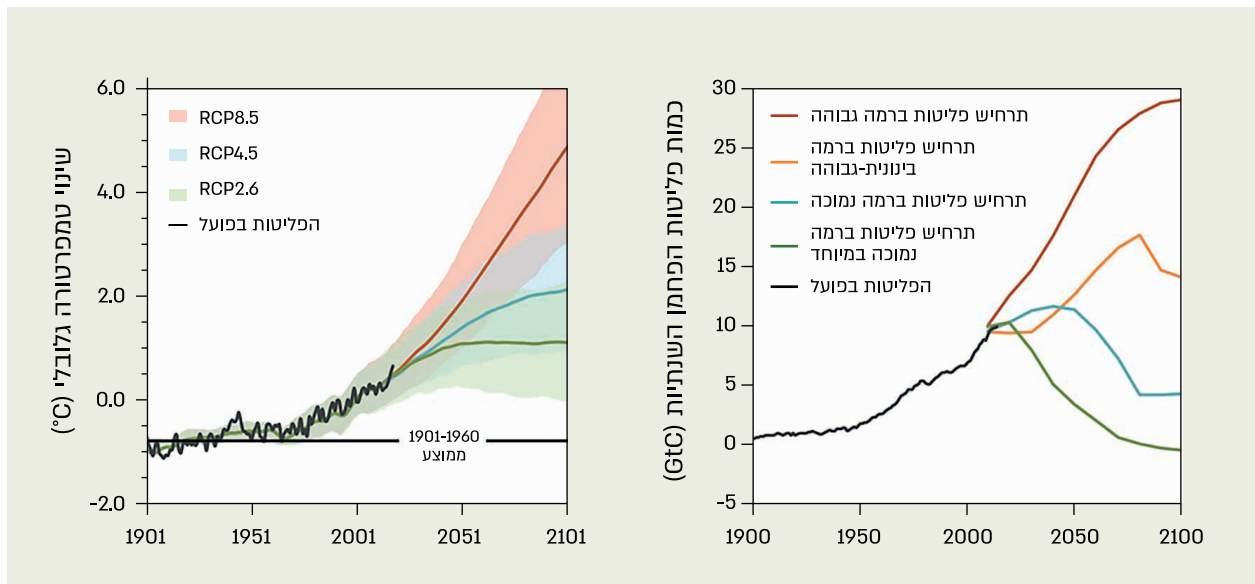
מילות מפתח

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 כחותה 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 לשינוי 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 אהבי 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 אהבי 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).

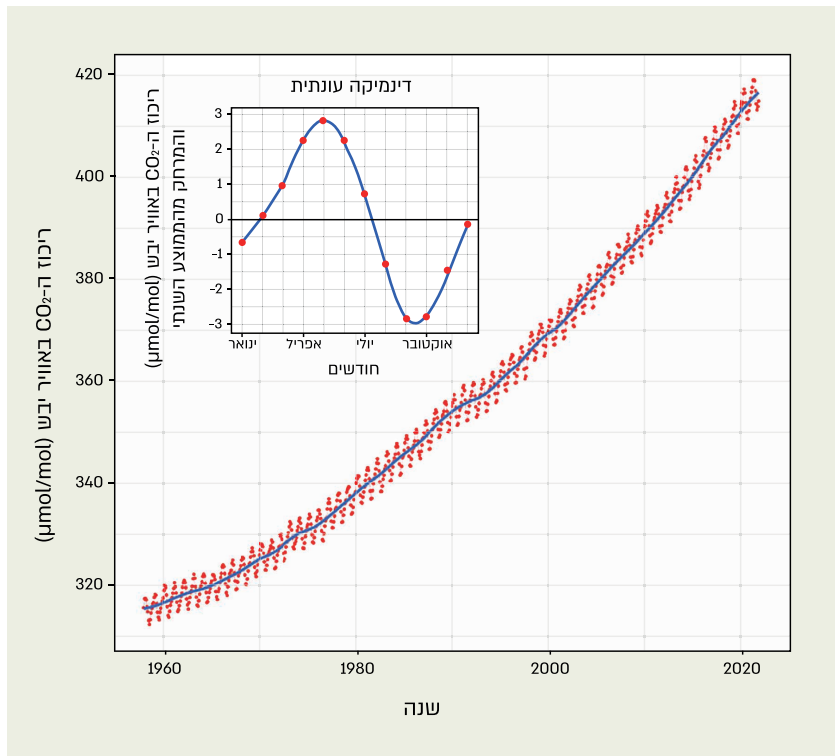
תגובות יערות בארץ ובעולם לירידה בזמינות המים

זמינות המים בקרקע היא גורם משמעותי ומכריע בתהליכי גדילה והתפתחות וכן בסיכויי ההישרדות 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; Yi et al., 2022; Hartmann et al., 2022; Klein et al., 2019; Preisler et al., 2019; 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 הוזלה 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 הגעשית, 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 החלטות 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 (Soczek, 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 הייעור 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 ח, 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.kk.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. *Ecohydrology*, 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