



חורש חמים, יער קריר: שימוש בצילום תרמי להערכת ניצול מים בעצי חורש ויער

עומרי לפידות^{1*} | תימאה איגנט² | רונית רוד² | עידו רוג¹
ויקטור אלחנתיס² | תמיר קליין^{1**}

1 המחלקה למדעי הצמח והסביבה, מכון ויצמן
2 המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני, בית דגן
* Lapidot4@gmail.com
** tamir.klein@weizmann.ac.il

תקציר

מבין סוגי היער הקיימים, החורש הים תיכוני חשוף במיוחד לתנודות בזמינות המים. לכן, ניטור דפוסי ניצול המים של מיני העצים העיקריים בו הוא מפתח לכימות מאזן המים המקומי והאזורי. השיטות הקיימות למדידת ניצול מים בעצים על פני שטחים נרחבים מוגבלות ומאומצות, ולכן שיטות עקיפות עשויות להיות יעילות יותר. התאדות מים דרך פיוניות בשטח הפנים של העלה מתבטאת בקירור, ועל כן הבדלי הטמפרטורה בין העלה לאוויר סביבו ($\Delta T_{\text{leaf-air}}$) יכולים לשמש אומדן מהימן לניצול המים של העץ.

במחקר זה מדדנו את קצב הדיות ישירות וכן בעזרת מצלמה תרמית מהקרקע כדי לבחון את הקשר בין דיות לבין $\Delta T_{\text{leaf-air}}$ במיני עצים עיקריים בחורש וביער. ביצענו ניסויים מבוקרים במקביל למדידות ביער בחמישה מיני עצים הנבדלים בצורת העלה (מחטניים: אורן ירושלים וברוש מצוי; רחבי-עלים פשוטים: אלון מצוי וחרוב מצוי; רחבי-עלים מורכב: אלת המסטיק). כמו כן, השתמשנו בגישה כמותית של חישוב מאזן האנרגיה של העלה לשם הערכת קצב הדיות מתוך הצילום התרמי, בהשוואה למדידה הישירה.

תצפיותינו מראות כי השימוש בצילום תרמי מאפשר לאמוד הבדלים בטמפרטורת העלה הקשורים לדיות במינים שונים ולהעריך את קצב הדיות בסביבה הטבעית. מצאנו כי מחטי האורן והברוש היו קרות משמעותית בהשוואה ליתר העלים, וכי $\Delta T_{\text{leaf-air}}$ תלוי בקצב הדיות וייחודי למין העץ.

מילות מפתח

דיות, חילופי גזים, עצים מחטניים, עצים רחבי-עלים, צילום תרמי, קירור באידוי

הקדמה

Crop Water Stress Index; Idso et al., 1981; Jackson) CWSI (et al., 1981). מחקרים קודמים מצאו כי טמפרטורת העלווה, הנמדדת באמצעים תרמיים, מושפעת ממבנה חופת העלים (צפיפות החופה, כיסוי עלים וכו') (Leuzinger and Körner, 2007) וכן מתכונות העלה (גודל, צורה וזווית) (Jarvis and McNaughton, 1986; Bridge et al., 2013). תכונות אלה קובעות את מידת ההתנגדות האווירודינמית להולכת חום, כך שעלייה בגודל העלה ובצפיפות חופת העלים מתבטאת בטמפרטורת עלווה גבוהה יותר.

כיום מדידת קצב אידי המים מן העלים ומוליכות הפיוניות נעשית במדידה ישירה של עלה בודד בעזרת תא מדידה המצויד בחיישן אינפרה-אדום לפחמן דו-חמצני ולאדי מים (Klein et al., 2013). שיטה זו נחשבת מדויקת אך קשה לביצוע על פני שטחים נרחבים, וחשופה לטעויות מדידה הנובעות ממספר מוגבל של פרטים וחזרות. נוסף על כך, מחקרים קודמים מראים כי מדידה של עלה בודד אינה משקפת את מצב העץ כולו (Ferraz et al., 2016). ההתפתחות המואצת בטכנולוגיות החישה התרמית וההתקדמות בתחום הליווינים וכלי התעופה הבלתי מאוישים מאפשרות לבצע מדידות מרחוק ברזולוציה מרחבית גבוהה ובקנה מידה גדול. שיטה זו אינה פולשנית, ולכן אינה משפיעה על תפקוד העץ בזמן המדידה. יתרה מכך, היא מאפשרת לאסוף מידע על מספר רב של עצים בפרק זמן קצר. למרות זאת, השימוש בצילום תרמי ביער עדיין מועט, והידע על טמפרטורת העלווה של מיני עצים שונים בחורש הים תיכוני מוגבל.

בעקבות תחזיות האקלים הצופות שינויים בזמניות המים בקרקע והצורך בניטור דפוסי ניצול מים בקנה מידה גדול, מטרת המחקר היא לבחון את הקשר בין קצב הדיות לבין הבדלי הטמפרטורה בין העלה לאוויר סביבו ($\Delta T_{\text{leaf-air}}$) בחמישה מינים עיקריים בחורש וביער וכן לבחון את השימוש בצילום תרמי ככלי להערכת ניצול המים. השערותינו היו כי עבור כל מיני העצים הנחקרים, יש קשר שלילי בין קצב הדיות לבין $\Delta T_{\text{leaf-air}}$ וכי מדידה עקיפה של קצב הדיות, המבוססת על חישובי מאזן אנרגיה, תהיה קרובה למדידה הישירה באמצעות תא מדידה.

שיטות וחומרים

אתר המחקר ועצי המחקר

המחקר נערך באזור שפלת הרי יהודה (E 34°57', N 31°43', גובה 320 מטר מעל פני הים), בחלקת יער נטועה הממוקמת כ-4 ק"מ דרום-מערבית לבית שמש. חלקת היער נשלטת בעיקר בעצי אלון מצוי ואורן ירושלים. אזור זה מתאפיין באקלים ים תיכוני עם טמפרטורה שנתית ממוצעת של 20°C וכמות משקעים שנתית ממוצעת של 490 מ"מ. במחקר קודם של Klein ושות' (2013) באותה חלקת יער נמדדו קצבי דיות והטמעה נמוכים וכן ערכים גבוהים של יעילות ניצול המים (היחס בין קצב הטמעת פחמן דו-חמצני למוליכות פיוניות). הנתונים מעידים על עקת מים ועל רמת פעילות נמוכה של הצמחייה בתקופה היבשה (מאי-אוקטובר), בניגוד לרמת פעילות גבוהה שנרשמה בתקופה הרטובה בשנה (נובמבר-אפריל). לפיכך, כדי לבחון את הקשר שבין

חורש ים תיכוני, תצורת יער נרחבת סביב אגן הים התיכון, מאופיין במגוון מינים של עצים נמוכים ושיחים, לרוב קשי-עלים (סקלרופיליים) וירוקי-עד, הגדלים בצפיפות זה לצד זה (Danin, 1988). מערכת אקולוגית זו מושפעת בעיקר מטמפרטורת האוויר ומתכולת המים בקרקע, ועל כן חשופה לפגיעה בעקבות שינוי אקלים קיצוני (Lavorel et al., 1998). למעשה, תחזיות האקלים מנבאות כי אזור אגן הים התיכון יושפע משינוי האקלים יותר מכל אזור אחר על פני כדור הארץ בשל מיקומו הגאוגרפי בשולי רצועת המדבריות העולמית (Giorgi, 2006). התחזיות מצביעות על עלייה בטמפרטורת האוויר, וכן על תקופות יובש ממושכות יותר מבעבר (Goubanova and Li, 2007). במקביל חל שינוי במשטר הגשמים ובאופן הפיזור של הגשם במהלך העונה (יוסף ושות', 2019). שינויים אלה, בתורם, יוצרים מאזן מים שלילי לעצים וזמניות מים מוגבלת בקרקע.

למיני העצים ביער ובחורש הים תיכוני ישנם מנגנוני הישרדות שונים להתמודדות עם מחסור במים ועם תנאי יובש קיצוניים. במהלך הקיץ צמחים "חסכנים" (איזוהידריים) כמו אורן ירושלים (*Pinus halepensis*), עץ מחטני בעל מערכת שורשים רדודה יחסית, ממצעים את מוליכות הפיוניות בעלים בתגובה להתייבשות הקרקע וכך מצמצמים את אובדן המים המשתחררים בדיות (Klein et al., 2011). מנגד, צמחים "בזבזנים" (בעלי בקרת פיוניות אנהיזוהידרית) כמו אלון מצוי (*Quercus calliprinos*), עץ רחב-עלים בעל מערכת שורשים עמוקה, שומרים על פתיחת פיוניות ממושכת גם בתקופות שהקרקע יבשה, וכך מתאפשרות יצרנות ראשונית וגדילה בתנאים קיצוניים (Klein et al., 2013). הבדלים אלה במנגנוני בקרת הפיוניות (אנ/איזוהידרי) ובאופן ניצול המים בקרקע יוצרים שינויים בזמניות המים במרחב ובזמן, ומשפיעים על מאזן המים המקומי והאזורי. בשל כך, ישנה חשיבות לניטור דפוסי ניצול המים של מיני העצים העיקריים ביער.

ניצול המים על ידי העץ הוא תהליך רציף, המתחיל מקליטת המים במערכת השורשים, דרך הובלה בצינוניות העצה ועד דיות דרך פיוניות העלים. בזמן התאיידות המים מן העלה אל הסביבה משתחרר חום כמוס, שגורם לקירור שטח פני העלה בתהליך המכונה "קירור באידוי" (evaporative cooling). בעקבות זאת, ככל שעולה קצב הדיות כך טמפרטורת העלה יורדת. לפיכך, מדידת הבדל הטמפרטורה בין העלווה לאוויר יכולה לשמש אומדן מהימן לקצבי הדיות ולמוליכות הפיוניות, וכן למצב המים בעץ (Campbell and Norman, 1990; Fuchs, 1990; Jones, 1992). לתהליך הקירור באידוי יש תפקיד מרכזי בשרירות צמחים בתנאי יובש וחום קיצוניים על ידי מניעת התחממות יתר של רקמות הצמח (Schymanski et al., 2013) ושמירת טמפרטורת העלה בטווח המיטבי לפעילות אנזימטית (Burke and Upchurch, 1989). כבר בשנות ה-60 נעשה שימוש בעקרון הקירור באידוי בביצוע סקרים של טמפרטורת העלווה ככלי להערכת מצב המים ביבולים חקלאיים ולתכנון מועדי ההשקיה (Tanner, 1963; Fuchs and Tanner, 1966). בהמשך פותחו מדדים ייעודיים המבוססים על מדידות הבדל החום בין העלווה לאוויר, כמו למשל מדד עקת מים

מיקרובולומטר הרגיש לתחום הספקטרי של 7.5–14 מיקרומטר, רזולוציה 768×1027 פיקסלים, רגישות תרמית ל- 0.02°C , דיוק של 1°C (עבור טמפרטורות בין 5 ל-150 מעלות) ומצלמה דיגיטלית 5 מגה-פיקסל מובנית. בכל אחד מסבבי המדידות מוקמה המצלמה התרמית בנקודת צילום קבועה ובמרחק ידוע, ואפשרה ללכוד את השטח המואר המרבי של חופת העץ. בכל אחד מהעצים חושבו ערכי הטמפרטורה של חופת העלים מתוך שטח של 2,500 פיקסלים שנבחר ממרכז האזור המואר של חופת העלים בעזרת תוכנת FLIR ResearchIR Max (FLIR Systems, ארה"ב). הבחירה באזור המואר של העלווה נעשתה כדי להימנע מקירור העלים הנובע מהצללה עצמית או מעצים שכנים.

הערכת קצב דיות מתוך הצילום התרמי

הערכת קצב הדיות (E) מתוך הצילום התרמי מתבססת על מאזן האנרגיה של העלה, שלפיו טמפרטורת העלה (T_{Leaf}) תלויה בחום הנכנס מאנרגיית השמש ובחום היוצא באידוי ובהסעת חום. מאזן האנרגיה ניתן לתיאור באמצעות המשוואה (Jones, 1992):

$$\frac{T_{\text{leaf}}}{dt} + R_{\text{net}} + M - G - \lambda E - H$$

כאשר R_{net} הוא אנרגיית הקרינה נטו (קצרת גל וארוכת גל) המקלטת בעלה, M הוא אנרגיית חום מטבולית הנוצרת בתהליכי פוטוסינתזה ונשימה (בדרך כלל היא פחות מ-1% מאנרגיית הקרינה ולכן היא זניחה), G הוא שטף האנרגיה אל הקרקע (מניחים שאינו רלוונטי לעלים בחופת העץ), λE הוא אובדן חום כמוס בעקבות אידוי מים מן העלה (G הוא החום הדרוש לאידוי מים) ו-H הוא שטף חום מוחשי עקב הסעה או קרינה. במצב יציב, כאשר $\frac{T_{\text{leaf}}}{dt}$ מתאפס, אובדן חום בעקבות אידוי מים שווה לאנרגיית הקרינה נטו פחות שטף החום המוחשי. שטף החום המוחשי תלוי בהפרש הטמפרטורה שבין העלה לאוויר שסביבו ולשכבת הגבול שנוצרת סביב העלה. לכן, צילום תרמי של צידו המואר של העלה, בד בבד עם מדידת טמפרטורת האוויר ומהירות הרוח, יאפשרו לחשב את קצב הדיות (להרחבה ראו Jones, 1992).

תוצאות

קצב דיות והפרש הטמפרטורה בין העלה לסביבה ($\Delta T_{\text{leaf-air}}$) בעצי יער בוגרים

קצבי הדיות של עצי יער בוגרים נמדדו בשני ימי שדה בתקופת האביב, ב-20 וב-26 במרץ 2018 ביער הראל. לאחר החורף תכולת המים בקרקע גבוהה יחסית, וקצבי הדיות אינם מוגבלים. תכולת הרטיבות בקרקע נמדדה בעומקים של 5, 25 ו-35 ס"מ: 10.92 ± 0.03 , 6.34 ± 0.02 ו- 8.11 ± 0.01 אחוזים ביום המדידה הראשון ו- 12.09 ± 0.02 , 7.3 ± 0.01 ו- 8.36 ± 0.01 אחוזים ביום המדידה השני, בהתאמה. הבדלים משמעותיים נצפו בקצבי הדיות בין מיני העצים השונים (איור 1; ממוצע לשמונה פרטים מכל מין). הברוש והאלון הראו דפוסי התנהגות דומים עם דיות מרבי בשעות הצהריים, בקצב של 2.10 ± 0.33 ו- 1.04 ± 0.13 מילימול מים למ"ר בשנייה, בהתאמה. מנגד,

קצב הדיות לבין $\Delta T_{\text{leaf-air}}$, ימי המדידה נערכו בחודש מרץ 2018, בזמן שקצבי הדיות ותכולת המים בקרקע גבוהים יחסית. המחקר התבצע על חמישה מיני העצים העיקריים המרכיבים את תצורות היער והחורש הים תיכוני. המינים נבחרו על פי צורת העלה (רחבי-עלים ומחטניים) וצורת הבקרה על מוליכות פיוניות (אנ/איזוהידרית). מבין המינים רחבי-העלים שנבחרו, האלון המצוי, המתאפיין בנטייה לאנאיזוהידריות, שומר על מוליכות הפיוניות בפוטנציאל מים קטן מ- $[-4.0]$ מגה-פסקל (Klein et al., 2013), כלומר, הפיוניות נשארות פתוחות גם כשהאדמה יבשה מאוד. לעומת זאת, אלת המסטיק (*Pistacia lentiscus*) והחרוב המצוי (*Ceratonia siliqua*) מתאפיינים בבקרה איזוהידרית עם ערכי פוטנציאל מים גבוהים יותר באמצע היום, $[-2.1]$ ו- $[-1.8]$ מגה-פסקל, בהתאמה (Trifilò et al., 2015), משמע, הם סוגרים פיוניות באדמה יבשה. בקרב מיני המחטניים שנבחרו, אורן ירושלים, המתאפיין בבקרה פיוניות איזוהידרית, ממצער את מוליכות הפיוניות בעלים בפוטנציאל מים של $[-3.1]$ מגה-פסקל (Klein et al., 2011), בניגוד לברוש המצוי בעל בקרה פיוניות אנאיזוהידרית, שהספף שלו לסגירת פיוניות הוא $[-4.5]$ מגה-פסקל (Froux et al., 2005).

נתונים מטאורולוגיים

נתונים מטאורולוגיים סופקו על ידי השירות המטאורולוגי הישראלי. טמפרטורת האוויר והלחות היחסית נמדדו בגובה סטנדרטי של שני מטרים מעל הקרקע בתחנה המטאורולוגית בית ג'מל, הממוקמת כ-1.4 ק"מ מאתר המחקר. מהירות הרוח נמדדה בגובה סטנדרטי של עשרה מטרים, בתחנה המטאורולוגית נתיב הל"ה, הממוקמת כ-4.5 ק"מ מאתר המדידה. בשתי תחנות המדידה נמדד ממוצע מדי עשר דקות.

מדידת קצבי דיות

עשרים עצי יער בוגרים (5 מיני עצים 4×4 פרטים לכל מין) נבחרו וסומנו למדידות חוזרות של קצבי דיות במהלך שני ימי שדה במהלך חודש מרץ 2018. במהלך כל יום שדה, המדידה התבצעה בשלושה מחזורים (בוקר 9:00–11:00, צהריים 11:00–13:00 ואחר הצהריים 13:00–15:00). בעזרת תא מדידה נישא המצויד בחיישן אופטי אינפרה-אדום לפחמן דו-חמצני ולאדי מים (Walz, GFS-3000), גרמניה). הטמפרטורה, הלחות היחסית ועוצמת האור בתא כונו כך שיהיו זהות לתנאי הסביבה.

תכולת מים ופוטנציאל מים בקרקע

תכולת המים (%) ופוטנציאל המים בקרקע נמדדו באמצעות חיישן רטיבות קרקע נפחי EC-5 וחיישן פוטנציאל מים MPS-6 (Decagon devices Inc., ארה"ב). החיישנים הוטמנו במרכז חלקת היער בעומקים של 5, 25 ו-30 ס"מ מתחת לפני השטח. החיישנים חוברו לאוגר נתונים Em50 (Decagon devices Inc., ארה"ב) שתוכנת לאיסוף הנתונים מדי 30 דקות.

צילום תרמי וניתוח תמונה

צילום תרמי של חופת העלים נעשה באמצעות מצלמה תרמית לא מקוררת FLIR T1030 (FLIR Systems, ארה"ב) עם חיישן

מהחשיפה הישירה לקרינת השמש. טמפרטורת פני שטח העלה נקבעת על ידי מאזן האנרגיה שבין החום הנקלט שמגיע מקרינת השמש לבין החום הנפלט בדיות ובהסעה (Campbell and Norman, 1992; Jones, 1990). מדידות הדיות של עצי האלון בימי המדידה מצביעות על קצבי דיות נמוכים יחסית לשאר המינים (איור 1). ייתכן שברמות דיות נמוכות אלה, עבור האלון הקירור באידי חלש מהחימום של קרינת השמש, ולכן נראית עלייה ב- $\Delta T_{\text{leaf-air}}$. הממצאים מראים כי הקשר בין טמפרטורת העלה לקצב הדיות הוא תלוי-מין, ולכן נשאלת השאלה: כיצד טמפרטורת העלים משתנה בין מיני עצים הנבדלים זה מזה בצורת העלה?

טמפרטורות העלים מראות כי מיני עצים בעלי עלים מחטניים היו קרים בצורה משמעותית (איור 3) והציגו התפלגות טמפרטורות צרה יותר מזו של מיני עצים רחבי-עלים (איור 2). ההבדלים יכולים לנובע מהשוני בגודל ובצורה של העלה, שמשפיע על מהירות זרם האוויר ועל שכבת הגבול שנוצרת סביב פני השטח של העלה. המהירות ושכבת הגבול משפיעות על מעבר אדי מים וחום אל הסביבה (Domingo et al., 1996). עלים קטנים ודקים, כדוגמת מחטים כשל האורן והברוש, מאופיינים בהתנגדות נמוכה למעבר חום, ולכן הטמפרטורה שלהם תהיה קרובה לטמפרטורת האוויר או מתחתיה (איור 2). במחקר ביער ממוזג הוצע כי ההבדל בטמפרטורת העלים של מיני עצים שונים נובע גם מהשוני בצורה ובמבנה של חופת העלים (Leuzinger and Körner, 2007). גורמים אלה משפיעים על חדירת הרוח מבעד לחופת העלים ועל ערבול האוויר, שמשפיעים על היווצרות שכבת הגבול סביב העלה. כלומר, מיני עצים בעלי חופת עלים צפופה וסגורה צפויים להיות חמים יותר ממיני עצים בעלי חופת עלים פתוחה ומרווחת (Scherrer et al., 2011). ואכן, ההנחות הללו נמצאו נכונות, ומצאנו כי בקרב עצי יער בוגרים, עצי חרוב בעלי חופת עלים פתוחה יחסית היו קרים מעצי אלון בעלי חופת עלים סגורה וצפופה. באותו אופן, בקרב המינים המחטניים, עצי הברוש היו חמים מעצי האורן (איור 2).

השוואה בין מדידה ישירה ועקיפה של קצב הדיות

הערכות קצב הדיות מתוך התמונות התרמיות מראות כי המדידה העקיפה, המחושבת על בסיס משוואות מאזן אנרגיה, הייתה קרובה יחסית למדידה הישירה, אולם קיימת הערכת יתר. ייתכן כי ההבדלים נובעים מאופני המדידות. בעוד שמדידה ישירה מבוססת על חישוב היחס של כמות מולקולות המים הנכנסת והיוצאת מתוך תא מדידה סגור ובו עלה בודד, הצילום התרמי מבוסס על חישוב הקרינה המוחזרת מחופת העלים בסביבה פתוחה. מחקרים קודמים מסבירים כי בתא מדידה סגור שוררים תנאי מיקרו-אקלים שונים מאלה שבסביבה הפתוחה, כמו מהירות רוח גבוהה ואוויר יבש יותר, שמשפיעים על קצב הדיות הנמדד (Inoue et al., 1990), ולכן לא ניתן להשליך ממדידה של עלה בודד על מצב העץ כולו (Ferraz et al., 2016). באופן כללי, נראה כי השימוש בשיטה העקיפה היה מדויק יותר עבור רחבי-עלים מאשר עבור עלים מחטניים, כפי שצפוי ממשוואות שפותחו תחילה עבור עלה שטוח ובהמשך עברו התאמה לצורת גליל. תוצאות המחקר שלנו מלמדות כי הגישה הכמותית לחישוב קצב הדיות אומנם טובה, אך עודנה מוגבלת במידת הדיוק שלה עבור מינים שונים, ולכן יש לפתח

החרוב, האלה והאורן הראו קצב דיות מרבי בשעות הבוקר (2.62 ± 0.34 , 2.35 ± 0.39 ו- 1.90 ± 0.22 , בהתאמה) שירד בהתמדה עד שעות אחר הצהריים (1.41 ± 0.24 , 1.56 ± 0.37 ו- 0.93 ± 0.14 , בהתאמה).

בכל המינים פרט לאורן נמצא כי טמפרטורת העלים גבוהה יותר מסביבתם. רק מחטי האורן היו קרות באופן מובהק משאר המינים ($0.26 \pm 1.17^\circ\text{C}$ מתחת לטמפרטורת הסביבה) (איור 1). נוסף על כך, בכל המינים למעט הברוש נראתה עלייה מתמדת ב- $\Delta T_{\text{leaf-air}}$ משעות הבוקר ועד שעות אחר הצהריים (איור 1). עלייה זו בטמפרטורת העלים מראה עקביות עם הירידה המתמדת בקצבי הדיות. המחטניים נבדלו מרחבי-העלים גם בטמפרטורה הממוצעת הנמוכה יותר וגם בהתפלגות הצרה יותר סביב הערך הממוצע (איור 2, איור 3). בחינת הקשר בין קצב הדיות $\Delta T_{\text{leaf-air}}$ באמצעות רגרסיה ליניארית הראתה כי ביום המדידה השני כל מיני העצים מלבד האלון הציגו קווי רגרסיה בעלי שיפוע שלילי (-1.15 עבור האלה, -1.67 עבור האורן, -1.96 עבור החרוב ו- -4.87 עבור הברוש).

השוואה בין מדידה ישירה לבין הערכה של קצבי הדיות

מתוך הצילום התרמי

קצבי הדיות שנמדדו בצורה ישירה, באמצעות תא מדידה, הוצגו כנגד ערכים שחושבו מתוך הצילום התרמי (איור 4), על בסיס משוואת מאזן האנרגיה של העלה. קו 1:1 אלכסוני מייצג התאמה מלאה בין המדידה הישירה (ציר X) לבין ההערכה (ציר Y) של קצבי הדיות. עבור כל המינים, טווחי הערכים המחושבים של קצבי הדיות נעו בין 0 ל-6 מילימול מים למ"ר בשנייה. השגיאה המוחלטת הממוצעת (Mean Absolute Error) שנמדדה עבור כל מין נעה בין 0.99 לבין 1.54 מילימול מים למ"ר בשנייה. בחרוב נרשמה השגיאה הנמוכה ביותר, ובאורן – הגבוהה ביותר. באופן כללי, 66 אחוזים מתוך כלל ערכי קצבי הדיות היו מעל קו 1:1, משמע, בשימוש בצילום התרמי ישנה הערכת יתר של קצבי הדיות בהשוואה למדידת טמפרטורת עלה ישירה באמצעות תא מדידה.

דיון ומסקנות

הקשר בין קצב הדיות לבין $\Delta T_{\text{leaf-air}}$

במחקר זה נמצא קשר הפוך בין קצב הדיות לבין $\Delta T_{\text{leaf-air}}$, כמצופה מאפקט הקירור שנוצר כאשר מים מתאדים ומשתחררים מהפיוניות שעל פני העלה (Gates, 1968). מעבר של מים מפאזה נוזלית לפאזה גזית צורך אנרגיה בצורת חום כמוס המגיע מהעלה, ולפיכך, בשעות הבוקר, כאשר קצב הדיות גבוה יחסית לשאר היום, הקירור באידי שומר על העלווה קרירה, בניגוד לשעות אחר הצהריים (איור 1). תצפיות אלה מאשרות את היכולת של הצילום התרמי להבחין בהבדלי טמפרטורה הקשורים לדיות. מעניין לראות כי ביום המדידה השני נצפה קירור באידי לאורך היום בכל מיני העצים הנבדקים מלבד באלון. ייתכן שהסיבה לתוצאות החרגות עבור האלון, כלומר לעלייה בטמפרטורת פני העלה במקביל לעלייה בקצב הדיות (המתבטאת במתאם חיובי בין שני המשתנים), קשורה להתחממות הנובעת

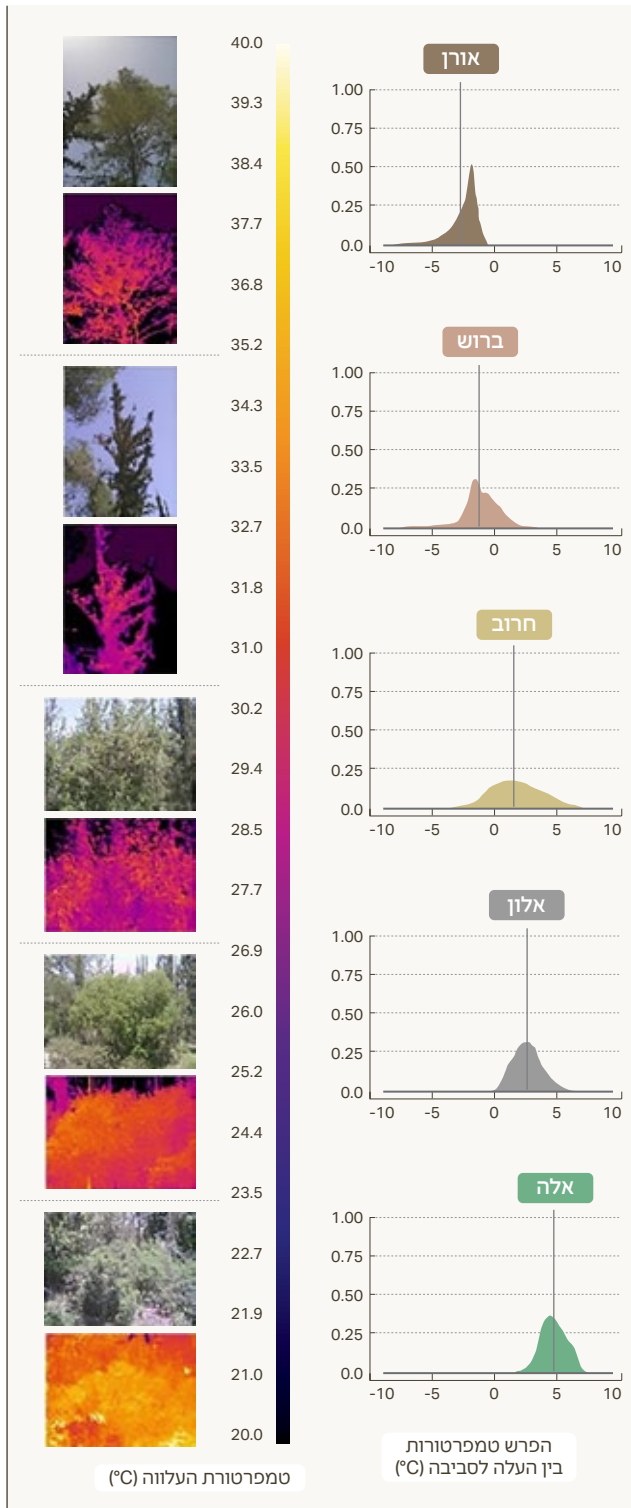


Figure 2
Foliage temperature
 Probability density function graphs of $\Delta T_{\text{leaf-air}}$ of five tree species in the Harel Forest on 26 March 2018 (right); thermal vs. RGB images of the tree species (left).

איור 2
טמפרטורת העלווה
 פונקציות השכיחות של ההפרש בין טמפרטורת העלה לאוויר סביבו במיני העצים הבוגרים ביער הראל ב-26 במרץ 2018 (ימין), תמונות תרמיות צבעוניות לצד תמונות דיגיטליות רגילות של מיני העצים השונים (שמאל).

התאמות ייחודיות לכל מין. בו-בזמן, התוצאות מדגישות כי השימוש בתא מדידה לייצוג קצב הדיות של העץ השלם – מוגבל.

מחקר זה מראה כי צילום תרמי הוא כלי המאפשר לאמוד הבדלים בטמפרטורת העלה הקשורים לדיות במינים שונים בסביבה הטבעית ביער. עם זאת, הקשר בין קצב הדיות לבין טמפרטורת העלים ייחודי לכל מין, ומושפע מהבדלים בתכונות העלה כמו גודל וצורה, וכן ממבנה חופת העלים של העץ. היות שגורמים אלה קובעים את כמות המים שמוחלפת עם האטמוספירה וכן את קרינת השמש המגיעה אל הקרקע, ייתכן שלהרכב חברת המינים ביער ישנה השפעה על האקלים המקומי והאזורי. על כן, אפשר לומר כי לחורש הטבעי בישראל, הנשלט בעצים רחבי-עלים (בעלי חופת עלים צפופה ועלים גדולים), תהיה השפעה חזקה יותר על התחממות האקלים המקומי מאשר ליערות אורנים.

יתרה מכך, כאשר שיוניים בקצב הדיות מגולמים מרמת העלה הבודד אל רמת העץ השלם ולרמת היער, הם נעשים משמעותיים עבור מחזור המים בקרקע (Klein et al., 2013). לכן, מדידת קצב הדיות והבנת דפוסי צריכת המים במיני עצים עיקריים ביער ובחורש הים תיכוני באמצעות סקרי טמפרטורות בקנה מידה גדול עשויות לאפשר ניהול נכון ויעיל יותר של היער בישראל. כלים של חישה מרחוק כבר שולבו בהצלחה במחקר היער בישראל, למשל ממדי צמחייה המבוססים על תצלומי לוויין בתחום האדום והאינפרא-אדום הקרוב (Dorman et al., 2013). במחקרים נוספים השתמשו במדדים אלה להערכת התאדות ויצרנות של היער (Helman et al., 2016, 2017) ואף שיעור תמותת עצים (Dorman et al., 2015). מחקרנו עשוי להרחיב את השימוש בכלים הללו לתחום האינפרא-אדום, ולשפר הערכות של ניצול מים של עצי יער.

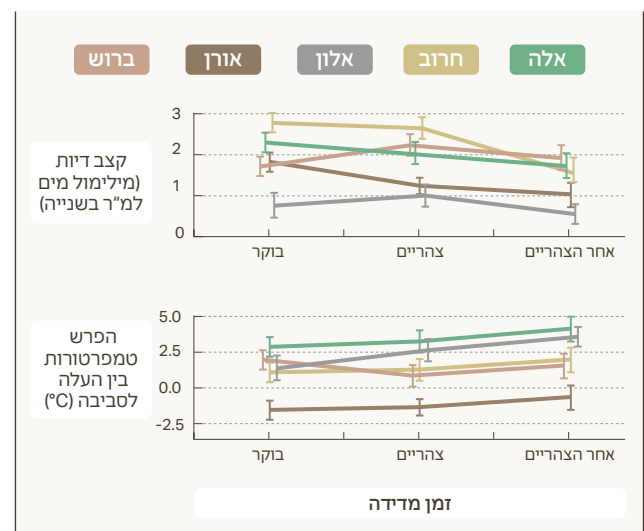
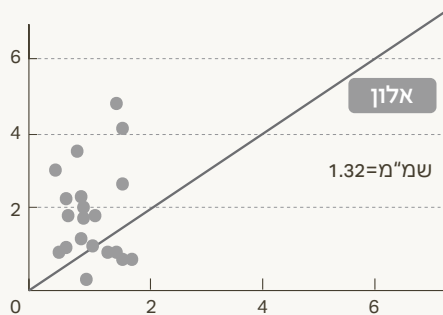
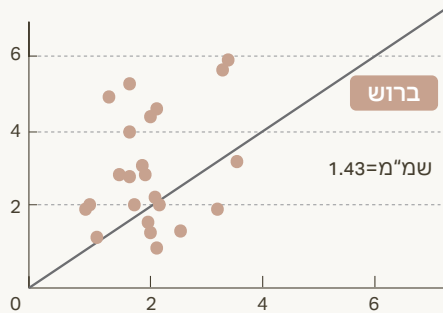
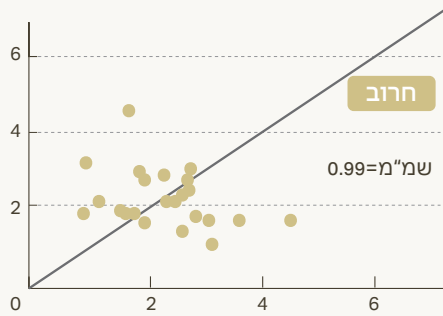
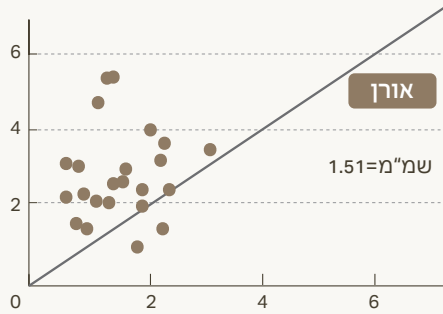
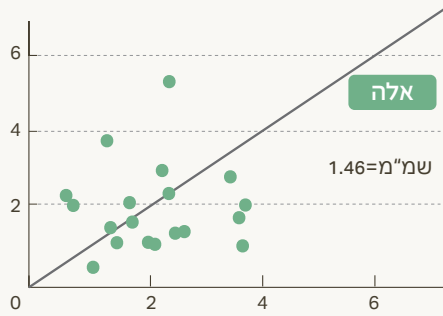


Figure 1
Diurnal changes in transpiration rate and leaf-air temperature differences in mature trees in the Harel Forest

איור 1
שינויים יומיים בקצב הדיות והפרש הטמפרטורות בין העלה לאוויר סביבו במיני עצים בוגרים ביער הראל

הערכה של קצב הדיות מתוך הצילום התרמי (מילימול מים למ"ר בשנייה)



מדידה ישירה של קצב הדיות (מילימול מים למ"ר בשנייה)

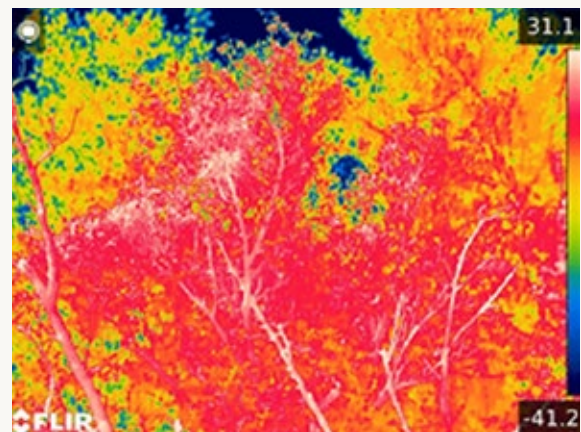


Figure 3

A thermal image (below) and an RGB image (above) of a mature *C. siliqua*, with *P. halepensis* trees in the background, in the Harel forest

The color scale representing the temperature range is on the right side. The thermal image demonstrates how conifer canopies are cooler than nearby, neighboring broadleaf canopies.

איור 3

תמונה תרמית צבעונית (למטה) לצד תמונה דיגיטלית רגילה (למעלה) של עץ חרוב בוגר לצד עצי אורן ירושלים בוגרים ביער הראל
בצידה הימני של התמונה התרמית ניתן לראות את סקלת הצבעים שמייצגים את טווח הטמפרטורות בתמונה. התמונה התרמית ממחישה כיצד חופת העלים של מיני עצים מחטניים קרירה מזו של עצים רחבי-עלים שכנים הנמצאים בקרבתם.

Figure 4

Comparison between measured and estimated Tr values that were calculated from the thermal images of each tree species
Diagonal black lines are 1:1 lines, representing full agreement between the variables. Mean absolute errors are reported.

איור 4

השוואת מדידה ישירה של קצב הדיות כנגד ערכים המחושבים מתוך הצילום התרמי עבור כל אחד ממיני העצים
הקו האלכסוני הוא קו 1:1 שמייצג התאמה מלאה בין שני המשתנים. שמ"מ מצוין שגיאה מוחלטת ממוצעת (mean absolute error)

- Helman D, Lensky IM, Yakir D, and Osem Y. 2017. Forests growing under dry conditions have higher hydrological resilience to drought than do more humid forests. *Global Change Biology*, 23(7), 2801-2817.
- 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.
- Idso SB, Jackson RD, Pinter PJ, Reginato RJ, and Hatfield JL. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55.
- Inoue Y, Kimball BA, Jackson RD, Pinter PJ, and Reginato RJ. 1990. Remote estimation of leaf transpiration rate and stomatal resistance based on infrared thermometry. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51, 21-33.
- Irmak S, Haman DZ, and Bastug R. 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*, 92, 1221-1227.
- Jackson RD, Idso SB, Reginato RJ, and Pinter PJ. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17, 1133-1138.
- Jarvis PG and McNaughton KG. 1986. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15, 1-49.
- Jones HG. 1992. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge: Cambridge university press.
- Jones HG, Hutchinson PA, May T, Jamali H, and Deery DM. 2018. A practical method using a network of fixed infrared sensors for estimating crop canopy conductance and evaporation rate. *Biosystems Engineering*, 165, 59-69.
- Klein T, Cohen S, and Yakir D. 2011. Hydraulic adjustments underlying drought resistance of *Pinus halepensis*. *Tree Physiology*, 31, 637-648.
- Klein T, Shpringer I, Fikler B, Elbaz G, Cohen S, and Yakir D. 2013. Relationships between stomatal regulation, water-use, and water-use efficiency of two coexisting key Mediterranean tree species. *Forest Ecology and Management*, 302, 34-42.
- Lavorel S, Canadell J, Rambal S, and Terradas J. 1998. Mediterranean terrestrial ecosystems: Research priorities on global change effects. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7, 157-166.
- Leuzinger S and Körner C. 2007. Tree species diversity affects canopy leaf temperatures in a mature temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146, 29-37.
- Scherrer D, Bader MKF, and Körner C. 2011. Drought-sensitivity ranking of deciduous tree species based on thermal imaging of forest canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1632-1640.
- Schymanski SJ, Or D, and Zwieniecki M. 2013. Stomatal control and leaf thermal and hydraulic capacitances under rapid environmental fluctuations. *PLoS one*, 8, e54231.
- Tanner CB. 1963. Plant temperatures 1. *Agronomy Journal*, 55, 210-211.
- Trifilò P, Nardini A, Gullo MAL, Barbera PM, Savi T, and Raimondo F. 2015. Diurnal changes in embolism rate in nine dry forest trees: Relationships with species-specific xylem vulnerability, hydraulic strategy and wood traits. *Tree Physiology*, 35, 694-705.
- יוסף י, בהר"ד ע, אוזן ל, כרמנה י, חלפון נ, פורשפן א, לוי י וסחיו נ. 2019. שינויי האקלים בישראל, מגמות עבר ומגמות חזיות במשטר הטמפרטורות והמשקעים. השירות המטאורולוגי, בית דגן, דו"ח מחקר.
- Aubrecht DM, Helliker BR, Goulden ML, Roberts DA, Still CJ, and Richardson AD. 2016. Continuous, long-term, high-frequency thermal imaging of vegetation: Uncertainties and recommended best practices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228, 315-326.
- Bridge LJ, Franklin KA, and Homer ME. 2013. Impact of plant shoot architecture on leaf cooling: A coupled heat and mass transfer model. *Journal of the Royal Society Interface*, 10, 20130326.
- Burke JJ and Upchurch DR. 1989. Leaf temperature and transpirational control in cotton. *Environmental and Experimental Botany*, 29, 487-492.
- Campbell GS and Norman JM. 1990. Estimation of plant water status from canopy temperature: An analysis of the inverse problem. In: MD Steven and Clark JA (Eds). *Applications of Remote Sensing in Agriculture*. London: Butterworths London. pp. 255-271.
- Cohen Y, Alchanatis V, Meron M, Saranga Y, and Tsipris J. 2005. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*, 56, 1843-1852.
- Danin A. 1988. Flora and vegetation of Israel and adjacent areas. *The Zoogeography of Israel*, 30, 251-276.
- Domingo F, Van Gardingen PR, and Brenner AJ. 1996. Leaf boundary layer conductance of two native species in southeast Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81, 179-199.
- 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.
- Dorman M, Svoray T, Perevolotsky A, Moshe Y, and Sarris D. 2015. What determines tree mortality in dry environments? A multi-perspective approach. *Ecological Applications*, 25(4), 1054-1071.
- Ferraz TM, Rodrigues WP, Netto AT, de Oliveira Reis F, Pecanha AL, de Assis FAMM, de Sousa EF, Glenn DM, and Campostrini E. 2016. Comparison between single-leaf and whole-canopy gas exchange measurements in papaya (*Carica papaya* L.) plants. *Scientia Horticulturae*, 209, 73-78.
- Froux F, Ducrey M, Dreyer E, and Huc R. 2005. Vulnerability to embolism differs in roots and shoots and among three Mediterranean conifers: Consequences for stomatal regulation of water loss? *Trees*, 19, 137-144.
- Fuchs M. 1990. Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water stress. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 253-261.
- Fuchs M and Tanner CB. 1966. Infrared thermometry of vegetation 1. *Agronomy Journal*, 58, 597-601.
- Gates DM. 1968. Transpiration and leaf temperature. *Annual Review of Plant Physiology*, 19, 211-238.
- Giorgi F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33 L08707.
- Goubanova K and Li L. 2007. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 57, 27-42.

