



דו"ח סופי 2021-2024 מחקר ק/ק 12814/19 - מחקר מס' 1851:

ניטור וניהול מאזן המים ביערות יובשניים תחת שינויי אקלים בעזרת חישה מרחוק לוויינית וחיישנים קרקעיים

Monitoring and managing forests water balance under climate change using an integrated satellite remote sensing and ground sensors

יגיל אסם, המחלקה למשאבי טבע מכון וולקני

טריין פז כגן, המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן גוריון

דן יקיר, המחלקה למדעי כדור הארץ וכוכבי לכת, מכון וייצמן.

אייל רוטנברג, המחלקה למדעי כדור הארץ וכוכבי לכת, מכון וייצמן.

יוסי משה, המחלקה למשאבי טבע מכון וולקני

משה ולדיסלב דובינין, המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון

דו"ח זה מסתמך במלואו על עבודת הדוקטורט של משה ולדיסלב דובינין אשר הושלמה לאחרונה.

## תקציר

תחזיות אקלימיות צופות עליה בטמפרטורה, ירידה במשקעים ועליה בתדירות בצורות באזורים יובשניים בכל העולם. שינויים אלה כבר גורמים להתייבשות ואף לתמותה של יערות באזורים שונים בעולם. לאור מגמה זו, ישנה חשיבות לניטור מאזן המים וניהול מוכוון משק המים של יערות ישראל. **מטרת המחקר הייתה פיתוח כלי יישומי לניטור מאזן המים ביערות מחטניים יובשניים, בקנה מידה רחב, כמערכת התראה אקולוגית ובבסיס לקביעת משטר דילולים ביער בהתאמה לתנאי משק המים.** המטרות הפרטניות שהוגדרו: (1) פיתוח מודל לחיזוי מאזן המים ביערות יבשים על בסיס נתוני הדמיות לוויין בשילוב עם מדידות של חיישני רטיבות קרקע ומגדלי שטפים, (2) בחינת הקשרים בין מאזן המים לבין תפקוד היער כפי שבא לידי ביטוי בקצב קיבוע הפחמן (ייצור ראשוני ברוטו GPP), אידוי (E) דיות (T) אידוי דיות (ET), יחס אידוי-דיות לגשם (ETP) ויעילות ניצול מים ברמת האקוסיסטמה (WUE<sub>E</sub>) וברמת העלווה (WUE<sub>c</sub>) (3) בחינת הקשרים בין מבנה עומד היער (אנדקס שטח העלים - LAI), בטיפולי דילול שונים, לבין תפקוד היער. על מנת לנהל "ממשק יער מוכוון משק מים" שכזה דרוש מידע רציף בנוגע למאזן מהמים של היערות ורמת התפקוד שלהם בשטחים נרחבים. חישה מרחוק לוויינית מאפשרת לכסות שטחי יער נרחבים ברזולוציה עיתית גבוהה ומהווה על כן, כלי בעל פוטנציאל רב למעקב ארוך טווח אחר מאזן המים ביערות. כלי זה הפך לזמין ויעיל יותר רק בשנים האחרונות עקב פיתוח של לוויינים חדשים כדוגמת Sentinel בעלי רזולוציות עיתית, מרחבית וספקטראלית גבוהות. עם זאת, על מנת להשיג מידע מהימן על מאזן המים ותפקוד היער באמצעות חישה מרחוק נדרשת עבודת כיול אל מול מדידות קרקעיות של תכולת מים בקרקע ושטפי פחמן ומים כפי שנעשה בעבודה זו.

המחקר התבסס על תשתית קיימת של שני אתרי מחקר אקולוגי ארוך טווח ביערות יתיר וקדושים, ושילב מדידות של תחנות שטפי גזים ביער יתיר וכן נתונים זמניים מיערות נוספים בעולם בעלי מאפיינים דומים. האתרים הנוספים שנבחרו היו שני יערות מחטניים בהם נאספו נתוני מגדלי השטפים באזור הסיירה-נוודה בקליפורניה. כמו כן, נאספו נתונים של מדי רטיבות קרקע ביער יתיר ולפני שנה הוקמה מערכת חיישני רטיבות קרקע גם ביער הקדושים. בשנה השלישית פיתחנו את היכולת לחלק את האידוי-דיות

השנתי ביער (ET) לשלושה מרכיבים: אידוי מהקרקע ( $E_s$ ), אידוי של מי גשם שיורטו על ידי עלוות היער ( $E_i$ ) ודיות על ידי צמחיית היער (T). הפירוק התבצע על ידי מודל המתבסס על נתוני אינדקס שטח העלים וכיסוי הצמחייה והוא מאפשר להבין את ההשפעה של מבנה היער על המרכיבים השונים של צריכת המים ולהעריך בנפרד את יעילות ניצול המים ברמת האקוסיסטמה ( $WUE_e = GPP/ET$ ) וברמת העלווה ( $WUE_c = GPP/T$ ).

תוצאות המחקר מראות כי על ידי דילול ניתן להפחית את צריכת המים של יערות המחט בארץ ולשפר את יעילות ניצול המים שלהם. הראנו כי יער בוגר שלא דולל מגיע לשיעור צריכת מי גשם (ETP) של כ-100% הן ביער הארידי והן בסמיארידי. הדילול הפחית את שיעור צריכת מי הגשם לכ-70% ובכך הותיר חלק משמעותי של מי הגשם שלא חזרו לאטמוספירה. ההנחה היא כי המים העודפים הללו נצברים בקרקע ויכולים לשמש כעתודה לשנים עוקבות. על פי גישה זו, ניתן לקבוע את ה LAI של כל יער בהתאם לרמת היובשנות שלו כך שיחס צריכת המים שלו לא יעלה על 80%. כמובן, ניתן להקדים ולבצע דילולים בהתאם לרמת היובשנות הצפויה בעתיד על פי תרחישי שינוי אקלים.

לסיכום, באמצעות המידע שמספק המחקר ניתן להתאים את מבנה יערות המחט בישראל לתנאי האקלים (בדגש על זמינות המים) באזורי הארץ השונים, ליצור שולי בטיחות למיתון ההשפעות של שנות בצורת ולמקסם את יעילות ניצול המים בכל מקום. הכוונה כזו של מבנה היערות תאפשר למתן השפעות שינוי אקלים על היערות ולהוביל לתפקוד מיטבי שלהם בתנאי יובש גובר.

## Abstract

Climate projections indicate rising temperatures, decreasing precipitation, and increasing drought frequency in dryland regions worldwide. These changes are already causing forest desiccation and mortality in various parts of the world. Considering these trends, monitoring forest water balance and implementing water-oriented forest management are essential for the sustainable management of Israel's forests. The objective of this study was to develop an applied tool for large-scale monitoring of water balance in dryland conifer forests, serving both as an ecological early-warning system and as a scientific basis for defining thinning regimes adapted to water availability. The specific objectives of the study were: (1) to develop a model for predicting water balance in dry forests based on satellite remote sensing data integrated with in situ measurements from soil moisture sensors and eddy covariance flux towers; (2) to examine the relationships between forest water balance and ecosystem functioning, as reflected in gross primary production (GPP), evaporation (E), transpiration (T), evapotranspiration (ET), the ratio of evapotranspiration to precipitation (ETP), and water use efficiency at both the ecosystem ( $WUE_e$ ) and canopy ( $WUE_c$ ) levels; and (3) to assess the relationships between forest stand structure (leaf area index, LAI), under different thinning treatments, and forest functioning.

The implementation of such a "water-oriented forest management" approach requires continuous information on forest water balance and functional status over large areas. Satellite-based remote sensing enables broad forest coverage at high temporal resolution and therefore represents a powerful tool for long-term monitoring of forest water balance. However, its effective application has become feasible only in recent years with the launch of new satellite missions, such as Sentinel, offering improved temporal, spatial, and spectral resolutions. Nevertheless, obtaining reliable estimates of forest water balance and

function from remote sensing requires careful calibration against ground-based measurements of soil water content and carbon and water fluxes, as conducted in this study. The research was based on existing infrastructure from two long-term ecological research sites in the Yatir and HaKedoshim forests. It incorporated eddy covariance flux measurements from the Yatir Forest, as well as data from additional conifer forests worldwide with similar characteristics. These included two coniferous forest sites in the Sierra Nevada, California, where flux tower data were available. In addition, soil moisture sensor data were collected in the Yatir Forest, and a new soil moisture sensor network was established in the HaKedoshim Forest during the study period. In the third year of the study, we developed the ability to partition annual forest evapotranspiration (ET) into three components: soil evaporation ( $E_s$ ), evaporation of intercepted rainfall from the forest canopy ( $E_i$ ), and transpiration by forest vegetation (T). This partitioning was achieved using a model based on leaf area index and vegetation cover, allowing improved understanding of how forest structure influences the different components of water consumption. This approach enabled the separate evaluation of water-use efficiency at the ecosystem level ( $WUE_e = GPP/ET$ ) and at the canopy level ( $WUE_c = GPP/T$ ).

The results demonstrate that forest thinning can reduce water consumption in Israel's coniferous forests and improve their WUE. We showed that mature, unthinned forests reach precipitation consumption rates (ETP) of approximately 100% in both arid and semi-arid conditions. Thinning reduced precipitation consumption to approximately 70%, leaving a substantial fraction of rainfall that did not return to the atmosphere. It is assumed that this excess water accumulates in the soil and may serve as a reserve for subsequent years. Based on this framework, the optimal LAI of a forest can be defined as a function of aridity, such that precipitation consumption does not exceed 80%. Furthermore, thinning interventions can be implemented proactively based on projected future aridity under climate change scenarios. In conclusion, the findings of this study provide a scientific basis for adapting the structure of Israel's conifer forests to regional climatic conditions, with particular emphasis on water availability. Such adaptation can create safety margins to mitigate the impacts of drought years and maximize WUE across different regions. Water-oriented forest structuring offers a viable strategy to moderate the effects of climate change on forests and promote their optimal functioning under increasing aridity.

**Keywords:** Dryland forests, Forest water balance, Evapotranspiration partitioning, Remote sensing, Water use efficiency

## רקע ומטרות המחקר

**פיתוח מודל מבוסס חישה מרחוק להערכת קיבוע פחמן, אידי -דיות ויעילות ניצול מים להערכת השפעת טיפולי דילול על מאזני מים ביערות מחט בישראל.**

מאזן המים ביערות מבטא את ההפרש בין כמות המים הזורמת אל תוך המערכת לבין כמות המים היוצאת ממנה. הוא נקבע על ידי מספר מרכיבים הכוללים גשם, נגר עילי וחלחול מים בקרקע כתהליכים הידרולוגיים הקובעים את כמות המים המזינה את בית השורשים של צמחיית היער, אל מול דיות מעלי הצמחים ( $T$ -transpiration), אידי ( $E$ -evaporation) וחלחול לעומק הקרקע, כתהליכים הגורמים מים מבית השורשים. בעוד שהתהליכים המזינים מים תלויים בגורמים אביוטיים קרי, מאפייני האקלים (גשם), הקרקע (חלחול) והטופוגרפיה (נגר עילי), התהליכים הגורמים מים תלויים בשילוב של גורמים אביוטיים כגון תנאי אקלים (קרינה, טמפרטורה, רטיבות, רוח) הקובעים את הדרישה האטמוספירית למים וגורמים ביוטיים כגון הרכב ומבנה הצמחייה המשפיעים על תהליכי פוטוסינתזה (הטמעה/ יצרנות ראשונית/ קיבוע פחמן) ודיות [1]. מעקב אחר מאזן המים ביער מאפשר, בין השאר, הערכה רציפה של זמינות המים לצמחיית היער. כאשר זמינות המים בבית השורשים גבוהה צפויה פעילות נמרצת של קיבוע פחמן וטרנספירציה. לעומת זאת, כאשר זמינות המים פוחתת ונוצר מחסור במים הצמחים מגיבים בסגירה חלקית או מלאה של הפיוניות בעלים ומגבילים את איבוד המים בדיות [2,3]. לצד הירידה בדיות מתרחשת גם ירידה בקצב קיבוע פחמן [1]. היחס בין קצב קיבוע הפחמן לבין קצב הדיות מכמת את "יעילות ניצול המים" על ידי צמחיית היער (water Canopy water use efficiency –  $WUE_c = GPP/T$ ) ומשקף את רמת התפקוד של הצמחייה. לעומת זאת, היחס בין קצב קיבוע הפחמן לאידי-דיות מכמת את יעילות ניצול המים האקוסיסטמית ( $WUE_e = GPP/ET$ ) ומשקף את תפקוד המערכת האקולוגית השלמה לרבות איבוד מים על ידי אידי ( $E$ ). יעילות ניצול המים של הצמחייה ושל האקוסיסטמה עשויות להשתנות הן כתלות בתנאי האקלים והן כתלות במאפייני היער, קרי הרכב מיני הצמחים, צפיפות הצמחייה גובהה ועוד. קצב קיבוע הפחמן, צריכת המים ויעילות ניצול המים הם שלושה מדדים קריטיים להערכת תפקוד המערכת האקולוגית של יערות בכלל, ויערות יבשים בפרט, בתנאים משתנים של אקלים, זמינות מים ותצורות יער [6], [7]. בנוסף לאילו אנו מציעים לבחון עוד שני מדדים מרכזיים המתייחסים המשקפים את משק המים ותפקוד צמחיית היער: (1) יעילות שטח העלים ( $LAE$ ) בקיבוע פחמן על פי היחס בין אינדקס שטח העלים לקצב קיבוע הפחמן ( $LAE = GPP/LAI$ ), (2) שיעור ניצול מי הגשם על פי היחס בין אידי-דיות לכמות הגשם ( $ETP = ET/P$ ). במקביל לתהליכים הביו-גיאוכימיים מתקיימים ביער גם תהליכים ביו-גיאופיזיים המושפעים מהתכונות הפיזיקליות של הצמחים, כגון מידת ההחזרה של קרינת השמש (reflectivity) ופליטה של קרינה תרמית (emissivity) ומידת החספוס של כסות הצומח שמשפיעים על תנאי האקלים בסביבת היער הקרובה [4][5][6]. תהליכים אילו ניתנים למדידה על ידי מערכת למדידת שטפי גזי חממה, אנרגיה ומים [7]. התהליכים הכימיים והפיזיקליים יוצרים משובים חוזרים מורכבים, המשפיעים על עוצמות חילופי האנרגיה שבין האטמוספירה לבין הקרקע וכך משפיעים על מערכת האקלים [11].

ניטור של מאזני המים והפחמן ביערות (קרקע, צמח, אטמוספירה) ובחינת הקשר בין המאזנים הללו לבין תנאי הסביבה ומאפייני היער מצריכים שימוש במערכות מיוחדות המודדות שטפי גזים באופן רציף על פני הזמן [8]. מדידות כאלה נעשות כיום ע"י תחנות שטפי גזים הכוללות חיישן תלת ממדי למדידות מהירות וכיוון זרימת האוויר, חיישן למדידת ריכוז פחמן דו-חמצני וחיישן למדידת ריכוז אדי מים באוויר

[9]. מערכת החיישנים מוצבת מעל חופת היער ומבצעת מדידות בתדירות גבוהה של המשתנים הנ"ל (להלן, מגדל שטפים). ממגדלי השטפים, בשיטת eddy covariance, מתקבלים ערכים של שטפי פחמן ומים (ביחידות של גרם פחמן וק"ג מים למ"ר ליחידת זמן) וגם חום ממשי וחום כמוס [11][10]. בישראל קיימת מערכת קבועה אחת של מגדל שטפים ביער יתיר וכן מספר מערכות ניידות. המערכות הללו מאפשרות לכמת שטפי פחמן דו-חמצני, דיות ואנרגיה המוחלפים בין חופות הצמחים והאטמוספירה באופן רציף ועל פני שנים רבות. שיטה זאת נחשבת מדויקת ואמינה מאוד אך יש לה שני חסרונות עיקריים: היא מאד יקרה ומסוגלת לייצג אזור מצומצם יחסית שמהווה את החתימה (footprint) של מגדל השטפים. גודל החתימה תלוי בגובה החיפוש מעל הנוף ובתנאי האקלים בזמן המדידה. לדוגמה ביער יתיר שבו מוצבים החיישנים בגובה 19 מטר מעל חופות העצים, שטח החתימה נע בין שניים לחמישה דונם בלבד. מגבלה נוספת של מגדל השטפים היא חוסר היכולת להציבו בשטחים בעלי טופוגרפיה משופעת המאפיינים שטחי יער רבים. בנוסף לכל זאת, על מנת לקבל מאזן מים שלם הכולל גם מידע לגבי כמות המים הנצברת בקרקע וזמינה לצמחייה, נדרשת מערכת נלווית של חיישני קרקע המודדים באופן רציף את תכולת המים בעומקים שונים של הקרקע ומייצגים את אזור בית השורשים (חתך הקרקע הרלוונטי לקליטת מים על ידי הצמחייה).

מתוך הכרה במגבלה של פריסת מגדלי שטפים ומדידות רטיבות קרקע על פני שטחי יער נרחבים ובמספר רב של נקודות, במחקר זה פיתחנו שיטה שתאפשר מעקב אחר מאזני מים ופחמן ביער על בסיס אמצעים מתקדמים של חישה מרחוק לוויינית תוך כיוול, ואימות המדידות מול מערכות חיישנים קרקעיים. שיטה זו מאפשרת מעקב אחר מאזן המים ותפקוד היער (קיבוע פחמן, צריכת מים ויעילות ניצול מים) בקנה מידה מרחבי גדול המייצג מגוון בתי גידול וטיפוסי יער (הרכב מינים, גיל, צפיפות וכד'). מגדל השטפים הקיים ביער יתיר (מגדל נייח) ושני מגדלי שטפים ביערות מחטניים יובשניים בקליפורניה שימשו לכיוול וולידציה של שטפי המים והפחמן המתקבלים על ידי חישה מרחוק. בשנה הראשונה של המחקר פיתחנו גישה המשלבת מערכות לווייניות ברזולוציה מרחבית גבוהה, ובעזרת מודל המשלב את החתימה של מגדל השטפים שיפרנו את הקשרים בין המידע ספקטראלי למדידות הקרקעיות של אידי דיות וקיבוע פחמן. הפיתוח שנעשה בחלק זה של המחקר הושלם ותוצאותיו פורסמו בעיתון המדעי – Science of the Total Environment (Dubinin et al. 2023). בשנה השנייה המשכנו בפיתוח המודל תוך התייחסות לרמות דילול שונות ביערות הקדושים (סמיארידי) ויתיר (ארידי). כמוכן, פתחנו מודל להערכת אינדקס שטח עלים על ידי חישה מרחוק (Sentinel 2). בחלק זה של המחקר בחננו השפעת טיפולי הדילול שבוצעו בשנת 2009 על אנדקס שטח העלים, מאזני הפחמן והמים והקשרים השונים בין שלושת המשתנים, כפי שנמדדו בשנים 2017-2022 בשני היערות המחטניים הפרושים על פני מפל יובש אקלימי. בנוסף, פיתחנו את הקשר בין מדדים ספקטראליים לרטיבות קרקע שנמדדה על ידי חיישני לחות קרקע. בשנה השלישית פיתחנו את היכולת לחלק את האידי-דיות השנתית ביער (ET) לשלושה מרכיבים: אידי מהקרקע (Es), אידי של מי גשם שיורטו על ידי עלוות היער (Ei) ודיות על ידי צמחיית היער (T). הפירוק התבצע על ידי מודל המתבסס על נתוני אינדקס שטח העלים וכיסוי הצמחייה והוא מאפשר להבין את ההשפעה של מבנה היער על המרכיבים השונים של צריכת המים ולהעריך בנפרד את יעילות ניצול המים ברמת האקוסיסטמה ( $WUE = GPP/ET$ ) וברמת העלווה ( $WUE = GPP/T$ ). השפעת טיפולי הדילול (2009) על המשתנים החדשים שהופקו נבחנו בשני היערות בשנים 2017-2022.

## הערכת תכולת מים בקרקע באמצעות חישה מרחוק

רטיבות פני הקרקע (SSM surface soil moisture) מבטאת את אגירת מי הגשמים בשכבת הקרקע העליונה, הנקראת *aeration zone*. חלק זה של פרופיל הקרקע הוא חיוני להתפתחות צמחיית היער מכיוון שהוא מכתוב את כמות המים הזמינים לשורשי הצמח ולכן הוא מווסת את התהליכים הפיזיולוגיים המרכזיים המשפיעים על הצמיחה. SSM ממלאת תפקיד חשוב בחילופי החום הכמוס בין האטמוספירה לבין פני הקרקע באמצעות תהליכי דיות-ואידוי. רטיבות פני קרקע מהווה מרכיב חיוני במחזור ההידרולוגי ובגידול הצמחייה. רטיבות הקרקע משתנה מאוד בזמן ובמרחב עקב הטרוגניות של תכונות הקרקע, טופוגרפיה, כיסוי צמחייה, אירועי גשם ושיעורי אידוי-דיות. מדידות שדה מבוססת TDR הן שיטה מקובלת ומדויקת לניטור של רטיבות הקרקע. אך שיטה זאת מוגבלת מאד מבחינת היכולת לכסות שטחים נרחבים. הפיתוח של טכנולוגיות לווייניות מאפשר להעריך את השונות המרחבית-והעיתית ברטיבות הקרקע. בעזרת חיישני רטיבות קרקע ניתן לבחון את מידת הדיוק של הערכות מבוססות חישה מרחוק לוויינית. ישנן מספר מערכות חישה שנמצאו יעילות להערכה כמותית של רטיבות קרקע בקנה מידה רחב ובהן מערכות אופטיות, מערכות תרמיות ומערכות מבוססות מכ"ם. תוצרי תצפית של לווייניים הוכחו ככלי יעיל להערכת רטיבות הקרקע ברזולוציות גבוהות של זמן ומרחב. אם זאת, לכל מערכת יש את היתרונות והחסרונות שלה בהקשר של רמת הדיוק, רזולוציה מרחבית וזמינות המידע. ההתקדמות בתחום החישה מרחוק מבוססת לוויין הבילה לפתרונות משמעותיים להערכת רטיבות הקרקע בהתבסס על נתונים מכ"ם או נתונים אופטיים/תרמית בתחום האינפרא אדום. מחקר זה נועד לשפר גם את הערכת רטיבות הקרקע ברזולוציה מרחבית ועיתית גבוהה, באמצעות מודל הטרפז האופטי (OPTRAM) המונע על ידי נתוני Copernicus Sentinel-2.

### השפעת טיפולי דילול על צריכה ויעילות ניצול המים ולאורך מפל יובשניות

הכלי המרכזי שקיים בידי מנהלי היער לניהול מיטבי של מבנה ותפקוד היער הוא הכוונת צפיפות עצי היער באמצעות טיפולי דילול [15,16]. דילול היער משפיע באופן ישיר על כמות המשאבים (אור, מים ונוטריינטים) הזמינים לעצים הנותרים ביער [1,17]. סוגיית הדילול והשפעתו על משק המים נחקרה במקומות שונים בעולם וגם בישראל [1]. מחקרים שונים מצביעים על קשר ישיר בין צפיפות היער לבין צריכת המים של היער. מחקרים רבים הראו כי טיפולי דילול העלו באופן משמעותי את קצב קיבוע הפחמן, קצב הדיות וקצב הצימוח של עצים ביער וזאת כתלות במין העץ, בזמן שעבר מאז הדילול, בעונת השנה ועוד [1]. כמו כן, נמצא כי דילול יכול לשפר את עמידות העצים בפני בצורות בטווח הקצר והארוך [18,19]. אולם משטרי הדילול של יערות ישראל אינם מתבססים כיום באופן ישיר על מדידות מאזן מים ואינם מתייחסים באופן פרטני לכושר הנשיאה של בית הגידול בכל מקום ומקום (ניהול מוכוון משק מים). ניהול מוכוון משק מים כזה נועד לשפר את עמידות היערות בפני בצורת ולמקסם את יעילות ניצול המים שלהם לקיבוע הפחמן. במחקר זה ניצלנו את קיומם של שני אתרי מחקר ארוכי טווח הממוקמים ביערות מחט לאורך מפל הגשם בישראל, יער יתיר (280 מ"מ, אינדקס יובשנות (AI)  $1.4=P/PET$ ) ויער הקדושים (550 מ"מ, אינדקס יובשנות (AI)  $2.4=P/PET$ ). בשני האתרים הוקם מערך ניסוי של טיפולי דילול בשנת 2009 והדינמיקה של צמחיית היער מנוטרת בהם באופן רציף במהלך העשור האחרון. בשני האתרים מותקנים חיישנים למדידות אקלים ומיקרו אקלים, זרימת מים בגזעי עצים ועוד. בנוסף, שני האתרים מכוסים באופן מלא על ידי הלוויין Sentinel-2 הסורק אותם מידי כמה ימים ומספק מידע ברזולוציה מרחבית המאפשר להתבונן בכל חלקת יער שעברה טיפול דילול באופן נפרד ולהפיק עבודה מודל חיזוי המשקף את המבנה והתפקוד של היער כפי שפורט לעיל.

דילול הוצע ככלי ניהול יעיל לשיפור מאזני המים ביערות יובשניים, ושיפור עמידות לבצורת. מחקרים שונים אשר בוצעו בישראל סיפקו ראיות לכך שדילול יערות אורנים, קריטי להישרדותו של היער – על מנת שהעצים המאכלסים את היער יקבלו מדי שנה את כמויות המים המספיקות להם על מנת לצמוח ולשגשג, ולכן יש להגיע לצפיפות מסוימת של העצים. החישוב של הצפיפות האופטימאלית מתחשב, בין היתר, בפרמטרים כמו צריכת המים הממוצעת של כל עץ, כמות המשקעים הממוצעת באותו אזור ועוד. דילול היער משפיע על זמינות האור והמים ביערות יובשניים. הדילול מפחית את הטרנספירציה, המרכיב העיקרי ב-ET, ואת יירוט מי הגשם, ובכך מגדיל את זמינות המים עבור הצמחייה שנותרה. מצד שני, דילול היער מגביר את אידוי המים מהקרע בעקבות חשיפת קרקעת היער לקרינה ועליה בטמפרטורות הקרקע. יתרה מכך, בעקבות דילול, ישנה עלייה בזמינות המשאבים (אור ומים) שמובילה בדרך כלל לצמיחה מוגברת וצריכת מים מוגברת הן של העצים הנותרים והן של צמחייה מעוצה ועשבונית בתת-היער. בעוד שמחקרים רבים בחנו את ההשפעות של טיפולי דילול על מבנה ויצרנות היער, הרבה פחות ידוע על ההשפעות של דילול כאמצעי לשיפור עמידות היער לבצורת ולשינויי אקלים וכיצד טיפולי הדילול משפיעים על צריכת המים ויעילות השימוש במים בזמן ובמרחב.

המטרה הכללית של הייתה לחקור, לאורך מפל צחיחות סמיארידי-ארידי, את השפעת צפיפות היער על תפקוד המערכת האקולוגית. כדי לענות על מטרה זו, בחנו את האינטראקציות בין טיפולי דילול יער (רמות דילול שונות) ותנאי אקלים (כלומר, כמות גשם שנתית או אנדקס יובשנות) על קיבוע פחמן (GPP), דיות (T), אידוי (E), אידוי-דיות (ET), שיעור ניצול מי הגשם (ETP), יעילות ניצול מים אקוסיסטמית (WUEe), יעילות ניצול מים של העלווה (WUEc) ויעילות שטח עלים. לשם כך, בדקנו את השונות של כל הפרמטרים הללו על פני טיפולי דילול שונים, בשני אתרים (יתיר לעומת הקדושים) במשך חמש שנים הידרולוגיות. המודל התבסס על הפיתוח והחיזוי שהוצג בסעיף הקודם.

## **תוצאות ודין**

### **הערכת רטיבות קרקע באמצעות חישה מרחוק**

במחקר זה נעשה שימוש במערכת של חיישני רטיבות קרקע הממוקמת ביער יתיר ואוספת נתונים ברמה חצי שנתית משנת 2018. כמו כן במקביל, הוקמה לפני שנה וחצי מערכת חדשה קבועה של חיישנים המודדים באופן רציף את תכולת המים בקרקע באזור בית השורשים (עד 1.5 מ' עומק) ביער הקדושים. החיישנים משדרים נתונים למחשב באמצעות כבלים לצורך ניטור רציף וארוך טווח של רטיבות קרקע.

הקרקע באתר המחקר ביער יתיר רדודה יחסית ומגיעה ל-0.7–1.0 מ' בלבד. האבניות שנמדדה בעומק הקרקע (0–1.2 מ') היא 15%–60%, וכיסוי הסלע של פני השטח נע בין 9% ל-37%, כפי שתואר לאחרונה בפירוט [20]. הקרקע היא קרקעת לס ממקור אאולי עם מרקם חרסית-סילטי (31% חול, 41% סילט ו-28% חרסית). מי התהום עמוקים (< 300 מ'), כך שהסיכוי של קליטת מים על ידי עצים ממי התהום נמוכה מאוד. בכדי לבצע מעקב אחר מאזן המים מספר מדדים נלקחו בחשבון. בחלק זה נציג את התוצאות הראשוניות שהתקבלו ונסביר את המודלים מבוססי חישה מרחוק עימם בחרנו לעבוד בכדי להעריך את תכולת המים בקרקע.

תכולת המים בקרקע נמדדה במהלך שנות הניסוי בעזרת רשת חיישנים, שכוילו במעבדה להערכת רטיבות הקרקע בעומקים שונים. המדידה מתבצעת בעומקים שונים 0, 20, 30, 40 ס"מ. נשתמש בראשי התיבות SM לציון תכולת המים בקרקע. החיישנים המפוזרים בשטח כוללים חיישנים בכתימי יער שונים: מתחת לעץ, חיישנים בשטח הפתוח, וחיישנים בין חופות העצים (איור 1).



**איור 1:** חלקות מדידה לחות קרקע ביער יתיר הבוללת שלושה מיקומים שונים לחיישנים: (1) מתחת לעץ, (2) בשטח הפתוח (3) ברווחים בין העצים. עומק החיישנים כולל 0, 20, 30, 40 ס"מ.

בבדי לחקור את השונות המרחבית-עיתית של SSM, חישה מרחוק יכולה לשמש כגישה חלופית, המספקת נתונים ביעילות גבוהה. נתוני החישה מרחוק המשמשים להערכת SSM כוללים תחומים ספקטראליים שונים, התחום microwave, תחום האינפרא אדום-תחום האינפרא אדום הרחוק (SWIR). ישנן מספר גישות להערכת רטיבות קרקע בעזרת חישה מרחוק. במחקר זה נעשה שימוש במספר מודלים ידועים ושילוב ביניהם להערכת רטיבות קרקע בעזרת חישה מרחוק. המודל הראשון התבסס על מידע מבוסס חישה מרחוק תרמית הקשורה ליכולת אגירת החום ולמוליכות התרמית של שכבת הקרקע, המשתנים בהתאם ל-SSM. המדידה התרמית מושפעת מהתפשטות אנרגיית החום ותהליך ספיחת מים בקרקע, ובכך יכולה לקשר בין שינוי טמפרטורת פני הקרקע היומי (LST) לבין SM-פני השטח. צורה פשוטה של אינרציה תרמית, Apparent Thermal Inertia (ATI), הוכחה בקשר חזק מאוד עם רטיבות קרקע [21]. התיאוריה של ATI מסבירה את השונות היומית של ה-LST והאלבדו, אשר ניתן להעריך בקלות באמצעות נתונים תרמיים בשתי נקודות זמן של טמפרטורות קיצון (ערכי מינימום ומקסימום). את הקשר הזה (ATI) ניתן לבטא בעזרת המשוואה הבאה:

$$ATI = (1 - \alpha) / \Delta T$$

כאשר  $\Delta T$  הוא הפרש ה-LST היומי המרבי,  $\alpha$  הוא אלבדו פני השטח. ניתן לקבוע את  $\Delta T$  באמצעות מפות ה-LST המתקבלות מנקודת עם ערכי הטמפרטורה המינימאלית והמקסימאלית, וניתן לקבוע את  $\alpha$  באמצעות נתונים אופטיים (בדרך כלל ע"י חישה מולטי-ספקטראלית). היחס הפשוט בין SM ו-ATI יכול לבוא לידי ביטוי באופן הבא:

$$\theta = a * ATI + b$$

כאשר a ו-b הם פרמטרים אמפיריים, אותם ניתן לקבוע בעזרת נתונים קרקעיים וספציפיים לכל אתר.



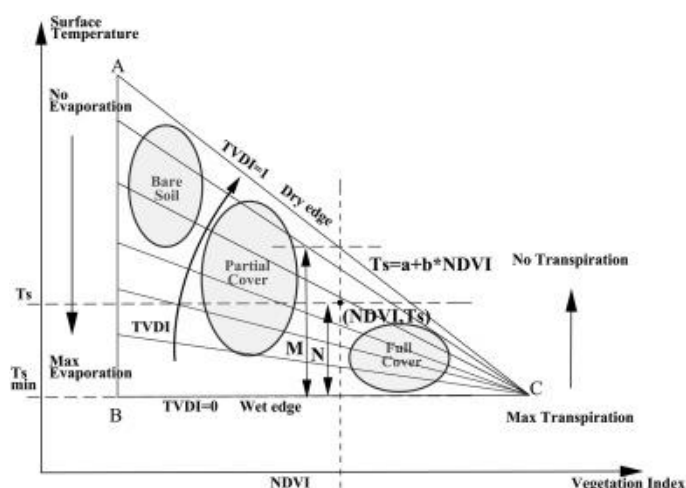
המודל השני מודל Kubelka-Munk (KM) הוא מודל פשוט להערכת SM בעזרת חישה מולטי-ספקטראלית. המודל משתמש בנתונים של אורך גל המתייחס לבליעות מים בתחום ספקטראלי של SWIR שפותח על בסיס תיאוריית Kubelka-Munk [22]. במודל נעשה שימוש באורכי גל בעלי רגישות לבליעות מים כגון אורכי הגל הנמצאים בתחום של SWIR. החישוב נעשה על בסיס המשוואה הבאה:

$$\theta/\theta_s = (r - r_d)/(r_s - r_d)$$

כאשר רטיבות הקרקע מחושבת על בסיס היחס של הקרקע הנמצא בסטורציה ( $r_s$ ) לקרקע יבשה ( $r_d$ ), אל מול הקרקע הנמדדת ( $r$ ). כך ניתן להעריך את SM בפשטות מנתוני ההחזרה על בסיס נתוני חישה מרחוק בתחום של SWIR.

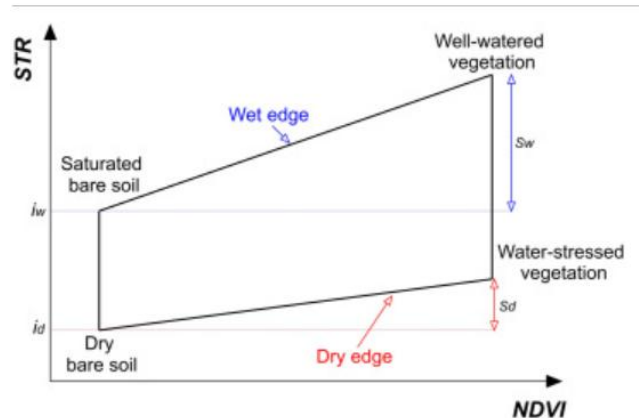
המודל השלישי אותו בחננו מוגדר temperature-vegetation triangle מבוסס על הקשר המובנה בין טמפרטורת פני הקרקע (LST) לבין ET. לפיכך, ניתן להשתמש בטמפרטורת פני הקרקע ובהחזר הצמחייה להערכת SM על ידי חישה מרחוק. ניתן ליצור את המשולש באמצעות חלוקה של פיזור הצמחייה מערך נמוך (קרקע חשופה) לגבוה (כסוי צומח מלא) של הצמחייה ו-LST (מטמפרטורה נמוכה לגבוהה), תוך התייחסות לתנאי רטיבות קרקע שונים (מהקצה היבש ועד הקצה הרטוב) ותנאי כיסוי הצומח (מאדמה חשופה לתנאי צמחייה צפופים) [23]. המודל הקונספטואלי של Temperature-vegetation triangle מוצג באיור 2. בנוסף בחנו את האפשרות להשתמש במודל של temperature-vegetation triangle, אך במקום להשתמש במידע תרמי להשתמש בנתוני KM לחיזוי רטיבות קרקע.

**איור 2:** המבנה הקונספטואלי לחישוב Temperature-vegetation triangle ממדדים מבוססים על ערכי טמפרטורה מינימלית ומקסימאלית, ערכי NDVI ולחות הקרקע הזמינה באתר בזמן המדידה [23].



המודל הרביעי (OPTRAM) Optical TRapezoid Model מסתמך על קשר פיזיקלי ליניארי בין תכולת רטיבות הקרקע לבין אורך הגל הייעודי לבליעות בתחום ה SWIR של 2100 ננומטר, shortwave infrared transformed reflectance (STR). שילוב של מידע זה עם מדדים של כיסוי צומח מאפשרים לבחון את התפלגות הפיקסלים בתוך המרחב הטרפזי כאשר בוחנים את היחס בין ערכי STR וערכי Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). לשם כך, השתמשנו בנתונים Sentinel-

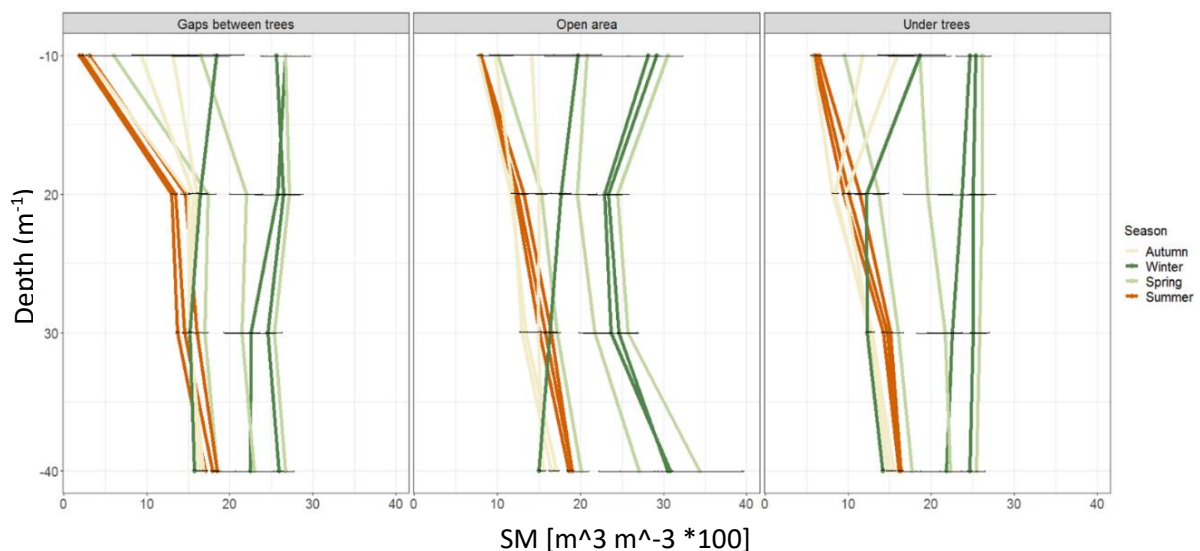
2 ממרץ 2017 עד אפריל 2021 כדי לבדוק את חוזק המתאם בין חיישני רטיבות הקרקע למודל OPTRAM (אירו 3).



**איור 3:** המבנה הקונספטואלי לחישוב, Optical Trapezoid Model (OPTRAM). המדדים מבוססים על ערכי מודל Kubelka-Munk מינימלית ומקסימלית באורך גל של 2100 ננומטר, ערכי NDVI ולחות הקרקע הזמינה באתר בזמן המדידה.

#### מדדות רטיבות קרקע על ידי חיישנים

מהתבוננות בפרופיל רטיבות קרקע לאורך עומק הקרקע אפשר לראות כיצד רטיבות הקרקע משתנה לאורך השנה, כאשר עונת הקיץ היא העונה היציבה ביותר (איור 4). הרטיבות בעונות האחרות משתנה בהתאם להתפלגות המשקעים, כאשר עונות המעבר, אביב וסתיו, הן בעלות השונות הגבוהה ביותר בפרופיל רטיבות הקרקע (איור 4).

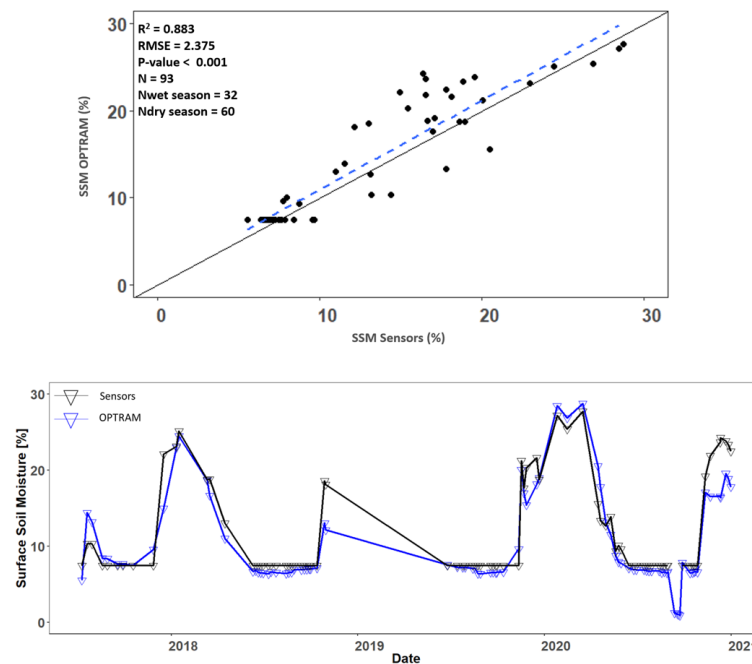


**איור 4:** שינויים בפרופיל רטיבות קרקע הנמדד על ידי החיישנים לאורך שנה הידרולוגית 2017-2020 ביער יתיר.

### הערכת רטיבות קרקע באמצעות Sentinel-2A על בסיס מודל OPTRAM

פיתוח מודל לחות המבוסס על מודל OPTRAM הראה תוצאות מבטיחות ( $R^2 = 0.88$ , איור 5 עליון). המודל שפותח כלל את מרבית החודשים, סה"כ 93 הדמאות לאורך התקופה של 2017-2020. כצפוי מרבית התצפיות הראו לחות קרקע נמוכה, לעומת חודשי החורף שהראו רטיבות גבוהה. זמינות ההדמאות בחודשי החורף הייתה נמוכה יחסית זאת מכיוון שהרבה מהדמאות החורף היו מעוננות, ולכן לא נכללו במודל. המודל מתייחס רק לחיישנים בעומק 0-10 ס"מ בשטח הפתוח (ללא כיסו עצים). הערכה של רטיבות קרקע בעומקים עמוקים יותר, אינה אפשרית מאחר וחיישני הלויין רגישים רק לפני הקרקע העליונים.

נבחן הקשר בן ערכי החיישנים הממוצעים לנתוני החישה לאורך השנים ונראה כי ישנה התאמה סבירה אשר דורשת פיתוח נוסף של המודל. בהתבסס על המודל שפותח, נעשתה הערכה של רטיבות הקרקע ביער יתיר. איור 5 תחתון מציג את ההשתנות של רטיבות הקרקע לאורך שנות המחקר 2018-2020. רטיבות הקרקע הגבוה ביותר נצפתה בחורף ובחלקים מסוימים ביער אשר שמרו על רטיבות גבוהה לאורך כל השנה. מנתוני המודל נראה כי ערכי רטיבות הקרקע המינימאליים נעים בין 5-9 % אשר נחשבים לערכים גבוהים לקרקע מדברית.



**איור 5:** מודל להערכת רטיבות קרקע על בסיס 95 הדמאות לוויין Sentinel-2A לתקופה בין 2018-2021 המידע מהווה ערך ממוצע לכל החיישנים הנמצאים בגובה של 0-30 ס"מ בפני הקרקע.

### ניטור תכולת מים בקרקע ביער הקדושים

החל מדצמבר 2022 החלה לפעול ביער הקדושים מערכת חדשה לניטור תכולת הרטיבות בקרקע. בהתאם לתכנית המחקר, הצבנו ביער הקדושים מערך חיישני לחות קרקע מסוג TDR שמטרתו לנטר את תכולת המים בקרקע בשני טיפולי דילול (1 דילול חזק ל-10 עץ/דונם, 2 ביקורת ללא דילול כ-50

עץ/דונם. כל טיפול נבחן בשתי חלקות שונות המשמשות כחזרות (2 חזרות לטיפול). בכל חלקה הוצבו שישה חיישנים בשלושה עומקים שונים בקרקע (שני חיישנים בכל עומק) – 1 (50 ס"מ, 2 (100 ס"מ, 3 (150 ס"מ. המערכת משדרת באופן רציף (בכל חצי שעה) נתוני תכולת רטיבות (%). החל מחודש אוקטובר 2023 ועד לימים אלה אנו עוקבים אחר תכולת הרטיבות בקרקע לאורך השנה ההידרולוגית. בשלב זה טרם הושלמה שנה ההידרולוגית מלאה אחת. כמובן, נראה שהקרקע שהופרה בבמידה נכרת בעת התקנת המערכת טרם שבה למצב יציב. לפיכך הנתונים המתקבלים ממערכת החיישנים ביער הקדושים לא נחשבים בשלב זה כמיהמנים ויש צורך להמשיך ולאסוף נתונים בשנים הבאות בטרם ניתן יהי לעשות בנתוני לחות הקרקע שימוש ראוי. כיול נתוני לחות הקרקע לחישה לויינית ושימוש בנתונים אלה ליצירת מאזני מים הכוללים את אוגר המים בקרקע לא הושלם במחקר זה ויהיה צורך להשלים משימה זו במחקר המשך.

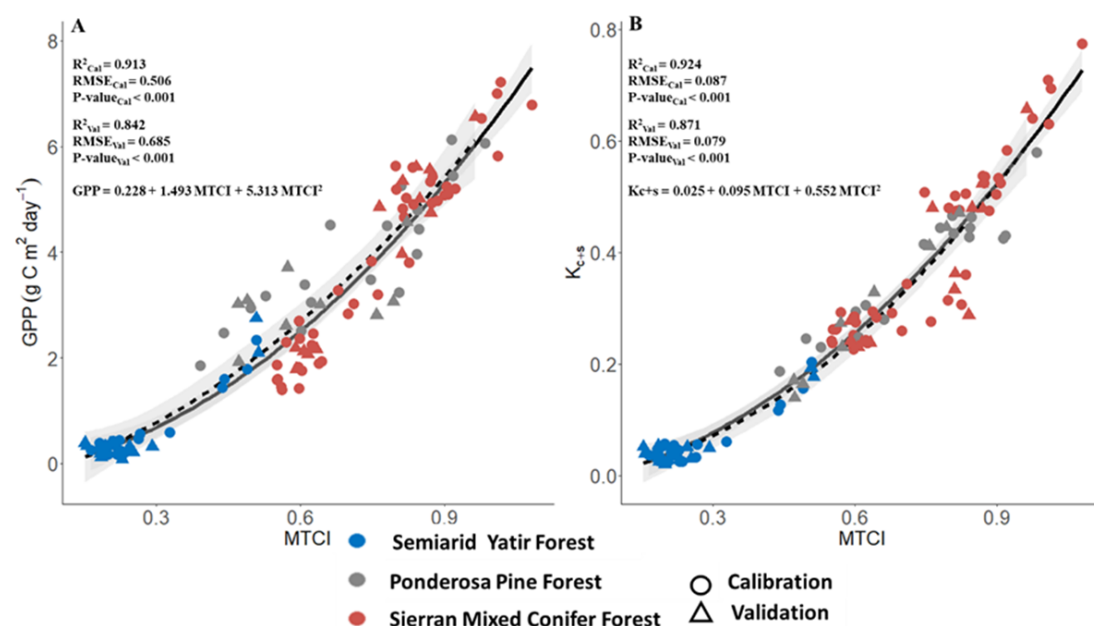
### מסקנות ראשוניות

תוצאות מודל ה-OPTRAM אפשרו לנו להעריך את רטיבות קרקע באמצעות לוויין ה-Sentinel-2A. עם זאת בשלב זה, המודל עדיין בעל מגבלות רבות, כאשר המגבלה העיקרית היא הרזולוציה המרחבית של נתוני הלוויין. לפיתוח הערכת רטיבות הקרקע באמצעות חישה לוויינית נדרשת עבודת מחקר נוספת.

### **הערכת מבנה ותפקוד היערות**

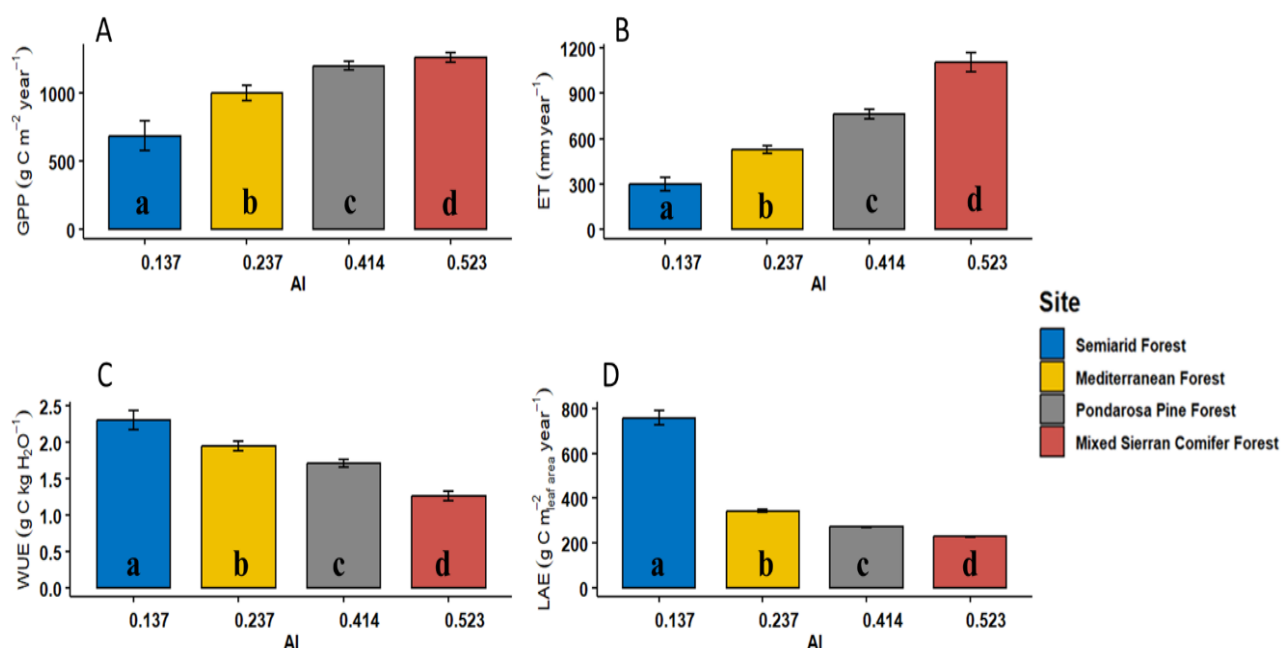
#### תפקוד היערות כתלות בצחיחות אקלימית

פותח מודל לחיזוי GPP ו-ET על בסיס הקשר בין אינדקס הצמחייה MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) ממדידות לווייניות לשטפים שנמדדו בשלושה מגדלי שטפים בישראל וקליפורניה (איור 6).



**איור 6:** מודלים אמפיריים להערכת GPP ומקדם הגידול (Kc+s) בעזרת אינדקס MTCl (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) מלווין סנטינל-2. אידיי דיות מחושב על ידי הכפלת מקדם הגידול ב ETo המחושב מנתוני אקלים בזמן אמת. נתוני השטפים הופקו שמשלושה מגדלי שטפים ביערות מחט בישראל ובקליפורניה.

על ידי הערכות מבוססות לוויין בדקנו את הקשר בין הייצור ראשוני ברוטו (GPP), אידיי-דיות (ET) יעילות ניצול מים אקוסיסטמית ( $WUE = GPP/ET$ ), ויעילות שטח העלים ( $LAE = GPP/LAI$ ) לבין אנדקס היובשנות (aridity index - AI) במספר יערות מחטניים לאורך מפל אקלימי גלובלי הכוללים שני יערות מחט בקליפורניה (אקלים תת-לך ואקלים תת-לך-יבש), יער הקדושים (סמיארידי) ויער יתיר (ארידי). התוצאות הראו כי הייצור הראשוני עולה בעקביות עם העלייה באנדקס היובשנות. ביער יתיר הוא הנמוך ביותר ( $690 \text{ gr C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) בעוד שביערות המחט באזור התת-לך בקליפורניה הוא גבוה פי 2 בערך ( $1260 \text{ gr C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ). מבחינת אידיי-דיות נמצא כי גם מדד זה עולה עם בהדרגה לאורך המפל האקלימי כאשר ביער יתיר הערכים הנמוכים ביותר ( $300 \text{ mm day}^{-1}$ ) וביערות באזור התת-לך מתקבלים ערכים גבוהים פי 4 בערך. כאשר מתבוננים ביעילות ניצול המים ( $WUE \text{ gr C mm}^{-1}$ ) וכן ביעילות שטח העלים נמצא כי ביער יתיר התקבלו הערכים הגבוהים ביותר ומשקפים התאמה טובה ליובש (איור 7).

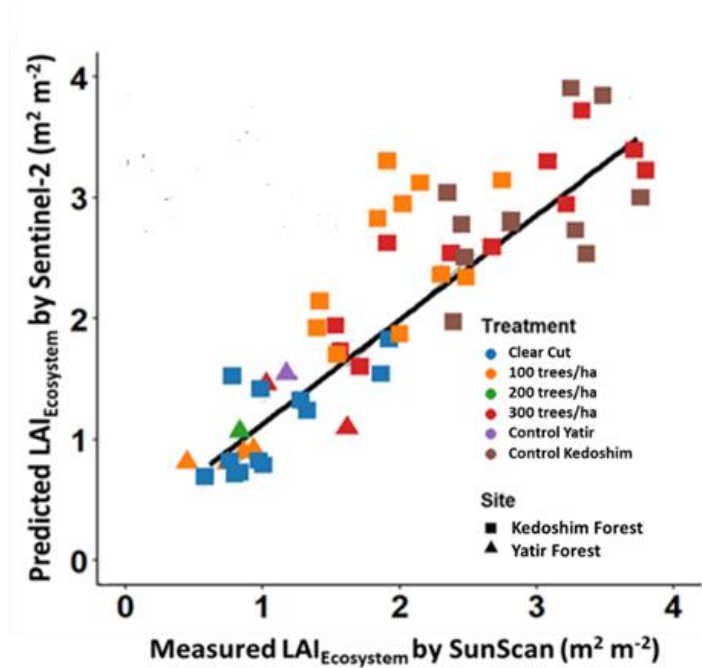


**איור 7:** ייצור ראשוני ברוטו, אידיי-דיות, יעילות ניצול מים ויעילות שטח עלים בארבע יערות מחט לאורך מפל יובשנות גלובלי. היערות כוללים יערות מחט מעורבים (אקלים תת לח), יערות אורן פונדרוסה (אקלים תת-לח-יבש), יערות אורן ירושלים בקדושים (אקלים סמיארידי) וביתיר (אקלים ארידי).

### השפעת טיפולי דילול על תפקוד היערות

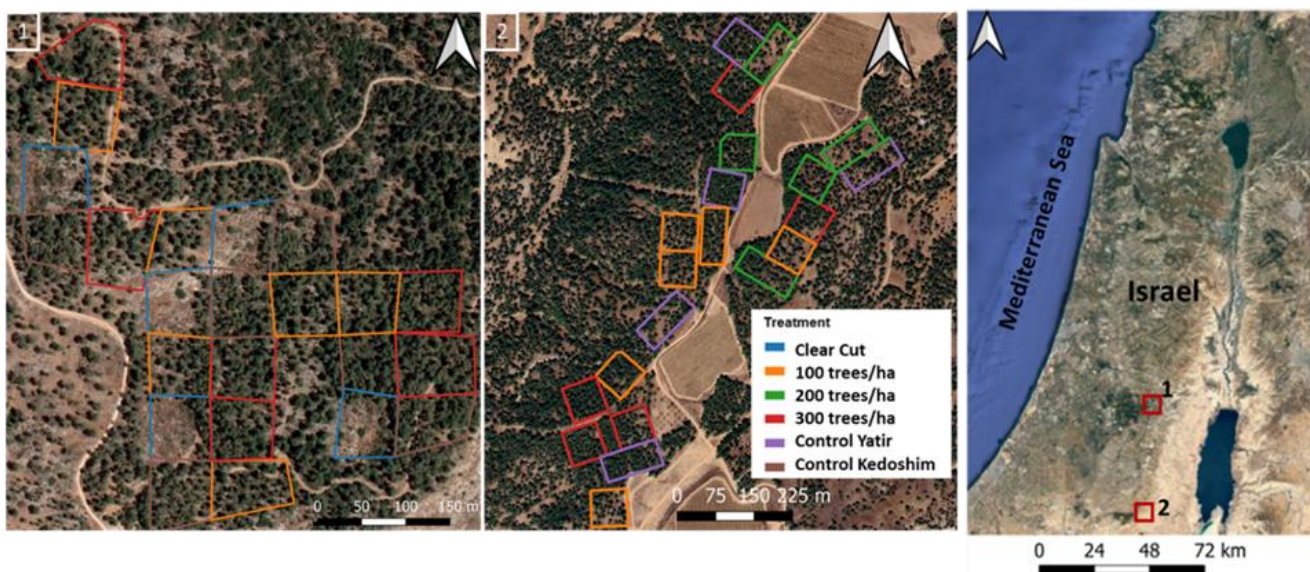
בעזרת המודל שהוזכר בסעיף הקודם ובתוספת מודל שפותח לצורך הערכת אינדקס שטח העלים וכויל אל מול מדידות קרקעיות של מדד זה (איור 8) הערכנו את הייצור הראשוני ברוטו (GPP), אידיי-דיות (ET)

יעילות ניצול מים אקוסיסטמית ( $WUE_e = GPP/ET$ ), ויעילות שטח העלים ( $LAE = GPP/LAI$ ) בחלקות יער שעברו טיפולי דילול שונים ביער הקדושים (סמיארידי) וביער יתיר (ארידי).



**איור 8:** מודל PLSR (Partial Least Square Regression) להערכת LAI על ידי אינדקסים ספקטראליים מלוויין סנטינל-2. נתוני ה LAI הופקו על ידי מדידות קרקעיות עם מכשיר SunScan ביערות קדושים ויתיר.

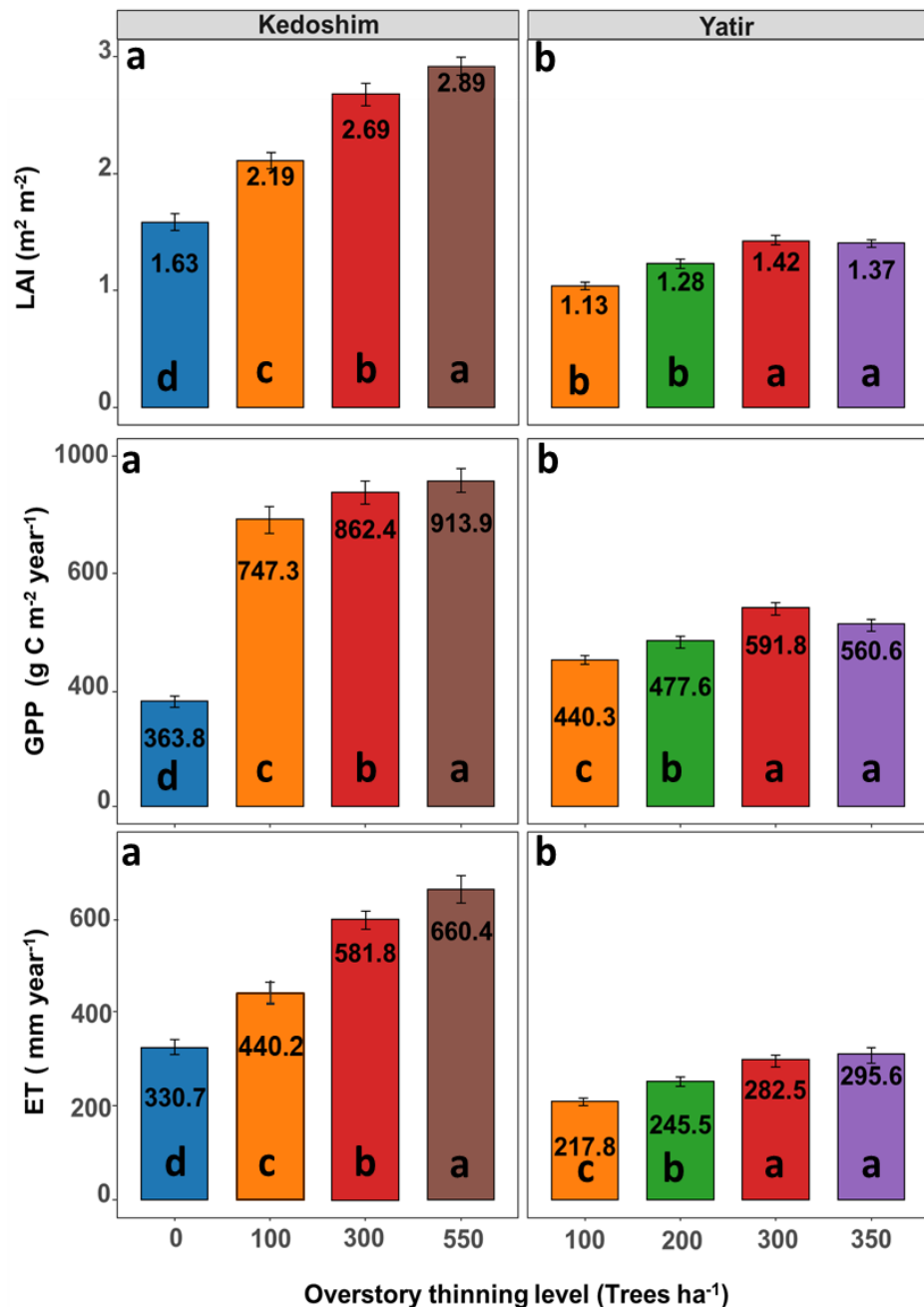
בעזרת נתוני גשם שנתיים חישבנו גם את יחס האידי-דיות לגשם (ETP). בנוסף, בעזרת נתוני ה- LAI ונתוני כיסוי הצומח בכל חלקה פרקנו את מדד האידי-דיות למרכיביו קרי, אידו מהקרקע ( $E_s$ ), אידוי מים שנתפסו על ידי העלווה ( $E_i$ ) ודיות ( $T$ ). חלוקה זו אפשרה לנו לחשב גם את יעילות ניצול המים של העלווה ( $WUE_c = GPP/T$ ). טיפולי הדילול התבצעו בשנת 2009 (איור 9) והערכות השטפים ואינדקס שטח העלים התבצעו בשנים 2017-2022.



**איור 9:** מערך טיפולי הדילול שבוצעו ביער הקדושים (תמונה מס' 1) וביער יתיר (2) בשנת 2009.

מניתוח השונויות של מזדי המבנה והתפקוד השונים עלו הדברים הבאים:

ללא דילול ה- LAI ביתיר היה נמוך בכ- 55% לעומת קדושים. בהתאם לכך ה- GPP וה- ET היו נמוכים יותר ביער יתיר (בכ- 40% ו 55% בהתאמה, איור 10) .



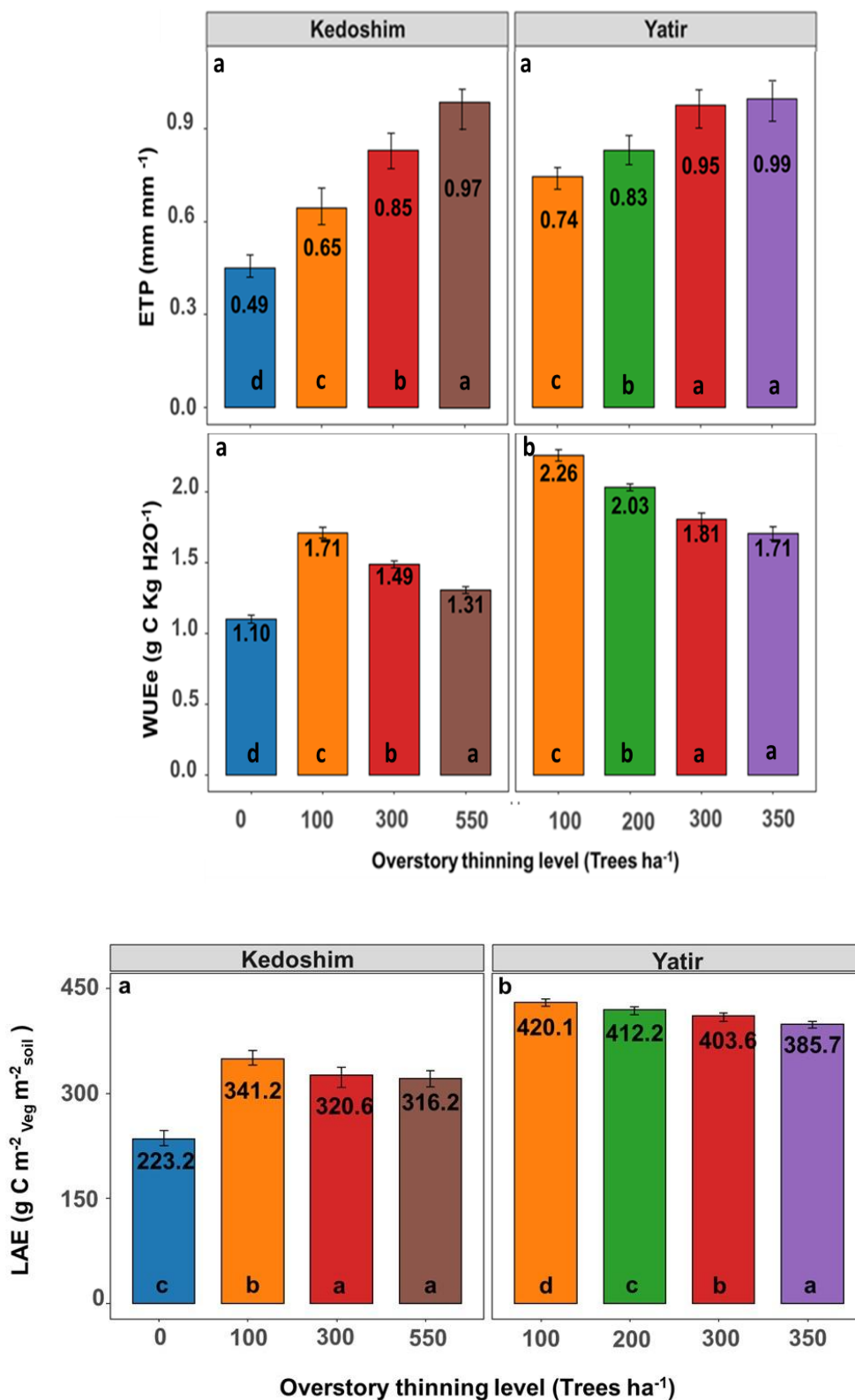
**איור 10:** השפעת טיפולי דילול (2009) על LAI, GPP, ו- ET (2017-2022) ביער קדושים וביער יתיר.

ביתיר, דילול חזק (10 עץ/דונם) הפחית את ה- LAI בכ- 20% ואת ה- GPP וה- ET בכ- 20% ו- 25% בהתאמה. בקדושים דילול חזק הפחית את ה- LAI, GPP, ו- ET בכ- 25%, 20% ו- 35% בהתאמה.



הירידה ב LAI אם כתוצאה מאקלים יבש יותר (יתיר לעומת קדושים) ואם כתוצאה מדילול, גרמה לירידה חדה יותר ב- ET מאשר ב GPP (איור 10).

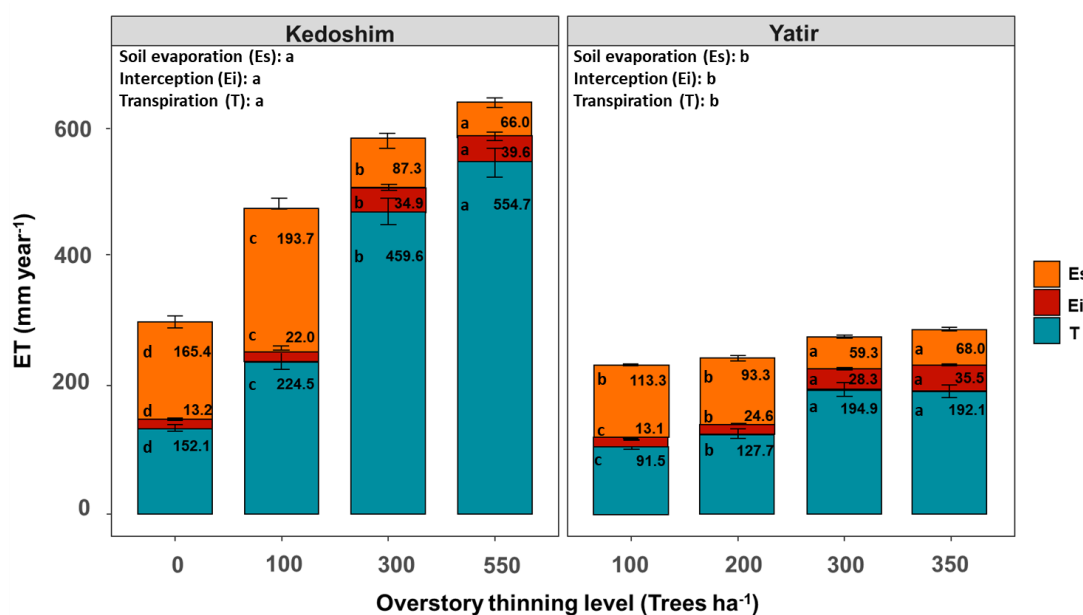
בשני היערות הדילול הפחית את שיעור ניצול הגשם (ETP) מכ-100% עד לכ- 75% ביתיר וכ- 65% בקדושים. בקדושים טיפול הכריתה המלאה הפחית את שיעור ניצול הגשם עד כדי 50% (איור 11).



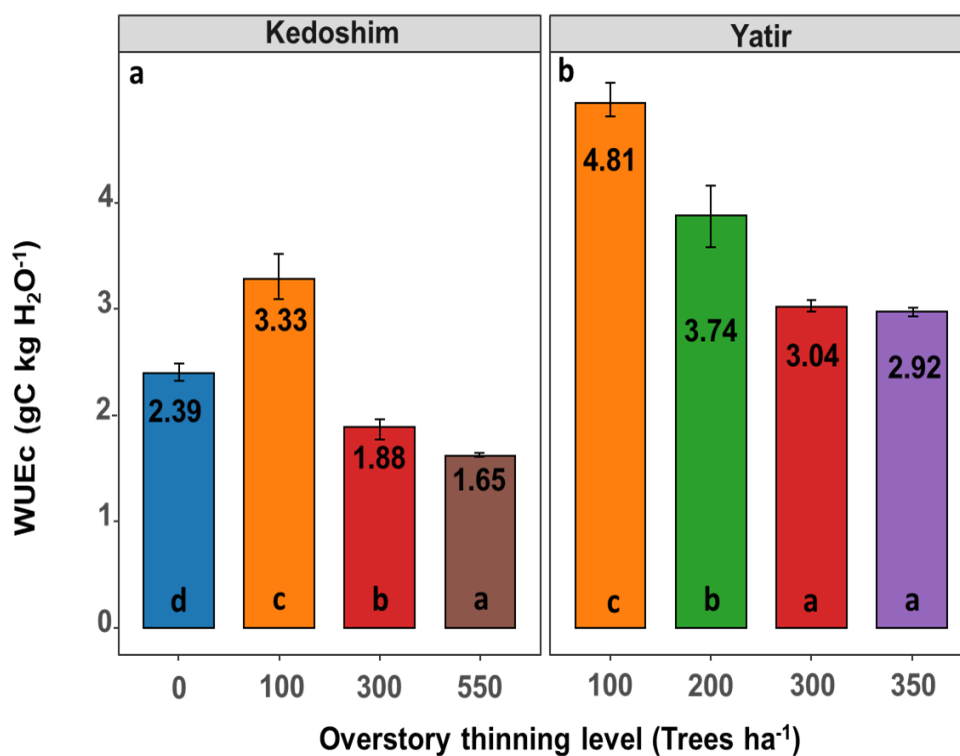


**איור 11:** השפעת טיפולי דילול (2009) על  $ET$ ,  $WUE_e$  ו-  $LAE$  (2017-2022) ביער קדושים וביער יתיר.

בשני היערות דילול היער שיפר את יעילות ניצול המים האקוסיסטמית עד כדי שיפור ב- 30%. לעומת זאת טיפול הכריתה המלאה ביער הקדושים גרם לירידה ביעילות ניצול המים בהשוואה לטיפול הביקורת ללא דילול (איור 11). השפעות הדילול על יעילות שטח העלים ( $LAE$ ) היו דומות ל  $WUE$  אך מתונות יותר (שיפור בכ- 10% על ידי דילול חזק).



**איור 12:** השפעת טיפולי דילול (2009) על  $ET$  וחלוקתו ל  $T$ ,  $E_s$  ו-  $E_i$  (2017-2022) ביער קדושים וביער יתיר.



**איור 13:** השפעת טיפולי דילול (2009) על WUEc (2017-2022) ביער קדושים וביער יתיר.

בשני היערות הדילול גרם להפחתת הדיות (T) כאשר דילול חזק הפחית את הדיות בכ- 60% בקדושים ובכ- 50% ביתיר (איור 12). אידי מפני הקרקע (Es) גדל כתוצאה מהדילול עד כ- פי 3 בקדושים ופי 1.7 ביתיר (איור 12). יעילות ניצול המים של העלווה ( $WUEc = GPP/T$ ) השתפרה עד כ- פי 2 בקדושים ופי 1.7 ביתיר (איור 13). גם טיפול הכריתה המלאה ביער הקדושים שיפר את יעילות ניצול המים של העלווה (פי 1.5 בערך) אך פחות מהשפעת טיפול הדילול החזק (איור 13).

מסיכום נתוני המחקר עולה כי יעילות ניצול המים של העלווה ( $WUEc$ ) ביער יתיר גבוהה יותר מזו שביער הקדושים וניתן לייחס זאת לשני גורמים: 1) אנדקס שטח עלים ( $LAI$ ) נמוך יותר וכתוצאה מכך חשיפה רבה יותר של העלים לשמש המגבירה את יעילות קיבוע הפחמן, 2) התאמה אקופיזיולוגית, בעיקר וויסות פיוניות חזק יותר המשפר את יעילות ניצול המים בתנאים צחיחים יותר.

הדילול גרם להפחתת צריכת המים ( $ET$ ) וקיבוע הפחמן ( $GPP$ ) על ידי הפחתת שטח העלים הפעיל ( $LAI$ ). הפחתת  $ET$  על ידי הדילול הייתה חזקה יותר מהפחתת  $GPP$  ולכן הדילול שיפר את יעילות ניצול המים של העלווה בשני היערות. השיפור ביעילות ניצול המים מוסבר על ידי הגדלת החשיפה של העלים לאור עקב הדילול ושיפור היעילות הפוטוסינתטית כתוצאה מכך. הסבר זה מקבל תמיכה על ידי השיפור שנמדד גם ביעילות שטח העלים ( $LAE$ ). עם זאת, התמורה להפחתת  $LAI$  בשיפור יעילות ניצול המים של העלווה ( $WUEc$ ) הייתה רבה יותר בקדושים מאשר ביתיר מה שמצביע על קשר לא ליניארי בין  $LAI$  לבין  $WUEc$ . במילים אחרות התמורה להפחתת  $LAI$  בשיפור  $WUEc$  גבוהה יותר כאשר חופת היער סגורה ( $LAI$  גבוה) ופוחתת בהדרגה כאשר החופה פתוחה יותר ( $LAI$  נמוך).

בשונה מ-  $WUEc$  יעילות ניצול המים האקוסיסטמית ( $WUEe$ ) השתפרה במידה דומה בשני היערות. הסיבה להבדל זה קשורה בכל הנראה להשפעת הדילול על האידי ממהקרקע ( $Es$ ). השפעה זו הייתה חזקה יותר בקדושים מאשר ביתיר (שוב, קשר לא ליניארי). לפיכך, ביער הקדושים בו החופה סגורה יותר השפעה חזקה יותר של פתיחת החופה על  $WUEc$  התקזזה עם השפעה חזקה יותר על  $Es$ .

## **סיכום**

תוצאות המחקר מראות כי על ידי דילול ניתן להפחית את צריכת המים של יערות המחט בארץ ולשפר את יעילות ניצול המים שלהם. הראנו כי יער בוגר שלא דולל מגיע לשיעור צריכת מי גשם ( $ETP = ET/P$ ) של כ- 100% הן ביער הארידי והן בסמיארידי. הדילול הפחית את שיעור צריכת מי הגשם לכ- 70% ובכך הותיר חלק משמעותי של מי הגשם שלא הושבו לאטמוספירה. ההנחה היא כי המים העודפים הללו נצברים בעומק הקרקע ויכולים לשמש כעתודה לשנים עוקבות. על פי גישה זו, ניתן לקבוע את  $LAI$  של כל יער בהתאם לאנדקס היובשנות שלו ( $AI = P/PET$ ) כך שה-  $ETP$  שלו לא יעלה על 80%. כמובן, ניתן להקדים ולבצע דילולים בהתאם לרמת היובשנות הצפויה בעתיד על פי תרחישי שינוי אקלים.

להלן דוגמא לתחשיב שכזה עבור יער יתיר ויער הקדושים:

- כיום אנדקס היובשנות ( $AI = P/PET$ ) בקדושים הוא 0.24 וביתיר הוא 0.14.
- בתנאים הנוכחיים אנדקס שטח העלים המקסימאלי ( $LAI_{max}$ ) עומד על 2.9 ביער הקדושים ו- 1.4 ביער יתיר.
- על פי תחזיות שינוי אקלים צפויה באזורנו הפחה במשקעים בכ- 25%.

- ירידה כזו בכמות המשקעים תוביל לירידה באינדקס היובשנות ל  $AI=0.2$  בקדושים ו-  $AI=0.11$  ביתיר.
  - על פי הקשר שפתחנו בין  $AI$  ל-  $LAI_{max}$ , התאמת מבנה היער לרמת היובשנות החדשה תדרוש הפחתה של ה-  $LAI$  בקדושים ל-  $2.2$  (-24%) ביתיר ל-  $0.9$  (-35%).
  - הפחתה כזו של ה-  $LAI$  תוביל להפחתת ה-  $ET$  מ-  $660$  ל-  $550$  מ"מ לשנה בקדושים (-17%) ומ-  $295$  ל-  $230$  מ"מ בשנה ביתיר (-22%).
  - בנוסף, הפחתת ה-  $LAI$  תוביל לשיפור יעילות ניצול המים מ-  $1.3$  ל-  $1.8$  בקדושים (+36%) ומ-  $1.7$  ל-  $2.5$  ביתיר (+48%).
  - על מנת להשיג את הפחתת ה-  $LAI$  הנדרשת במקרה של הפחתת הגשם ב-25% יש לסלק כ-  $12$  מתוך  $40$  עצים לדונם בקדושים (-30%) וכ-  $11$  מתוך  $30$  עצים לדונם ביתיר (-37%).
  - ההנחיות הנ"ל מתאימות על מנת להתאים את צריכת המים לכמות הגשם המופחתת (-25%) אך ללא יצירת שולי ביטחון ( $GSO=100\%$ ). כדי להוסיף שולי ביטחון של 20% ( $GSO=80\%$ ) למצב החדש של גשם מופחת יש לדלל את היערות בצורה חזקה יותר קרי, בקדושים  $20$  מתוך  $40$  עצים לדונם, וביתיר  $15$  מתוך  $30$  עצים לדונם.
- המחקר מציג גישה יישומית באמצעותה ניתן לנטר באופן נרחב את מבנה היערות המחט בארץ ותפקודם ולהתאים את צפיפות עצי היער לצחיחות בית הגידול לרבות יצירה של שולי ביטחון.

## רשימת ספרות:

1. Tsamir, M.; Gottlieb, S.; Preisler, Y.; Rotenberg, E.; Tatarinov, F.; Yakir, D.; Tague, C.; Klein, T. Stand density effects on carbon and water fluxes in a semi-arid forest, from leaf to stand-scale. *For. Ecol. Manage.* **2019**, *453*, 117573.
2. Rotenberg, E.; Yakir, D. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science* (80-. ). **2010**, *327*, 451–454.
3. Yaseef, N.R.; Yakir, D.; Rotenberg, E.; Schiller, G.; Cohen, S. Ecohydrology of a semi-arid forest: partitioning among water balance components and its implications for predicted precipitation changes. *Ecohydrology* **2010**, *3*, 143–154, doi:10.1002/eco.65.
4. Claussen, M.; Brovkin, V.; Ganopolski, A. Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change. *Geophys. Res. Lett.* **2001**, *28*, 1011–1014.
5. Betts, R.A.; Boucher, O.; Collins, M.; Cox, P.M.; Falloon, P.D.; Gedney, N.; Hemming, D.L.; Huntingford, C.; Jones, C.D.; Sexton, D.M.H. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. *Nature* **2007**, *448*, 1037–1041.
6. Bonan, G.B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* (80-. ). **2008**, *320*, 1444–1449, doi:10.1126/science.1155121.
7. Moffat, A.M.; Papale, D.; Reichstein, M.; Hollinger, D.Y.; Richardson, A.D.; Barr, A.G.; Beckstein, C.; Braswell, B.H.; Churkina, G.; Desai, A.R. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agric. For. Meteorol.* **2007**, *147*, 209–232.
8. Helman, D.; Osem, Y.; Yakir, D.; Lensky, I.M. Relationships between climate, topography, water use and productivity in two key Mediterranean forest types with different water-use strategies. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, *232*, 319–330.

9. Helman, D.; Lensky, I.M.; Osem, Y.; Rohatyn, S.; Rotenberg, E.; Yakir, D. A biophysical approach using water deficit factor for daily estimations of evapotranspiration and CO<sub>2</sub> uptake in Mediterranean environments. *Biogeosciences* **2017**, *14*.
10. Grunzweig, J.M.; Lin, T.; Rotenberg, E.; Schwartz, A.; Yakir, D. Carbon sequestration in arid-land forest. *Glob. Chang. Biol.* **2003**, *9*, 791–799, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00612.x.
11. Hinojo-Hinojo, C.; Castellanos, A.E.; Huxman, T.; Rodriguez, J.C.; Vargas, R.; Romo-León, J.R.; Biederman, J.A. Native shrubland and managed buffelgrass savanna in drylands: Implications for ecosystem carbon and water fluxes. *Agric. For. Meteorol.* **2019**, *268*, 269–278.
12. Reichstein, M.; Falge, E.; Baldocchi, D.; Papale, D.; Aubinet, M.; Berbigier, P.; Bernhofer, C.; Buchmann, N.; Gilmanov, T.; Granier, A. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Glob. Chang. Biol.* **2005**, *11*, 1424–1439.
13. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome* **1998**, *300*, D05109.
14. Kljun, N.; Calanca, P.; Rotach, M.W.; Schmid, H.P. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geosci. Model Dev.* **2015**, *8*, 3695–3713.
15. McDowell, N.G.; Allen, C.D. Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nat. Clim. Chang.* **2015**, *5*, 669–672.
16. Floyd, M.L.; Clifford, M.; Cobb, N.S.; Hanna, D.; Delph, R.; Ford, P.; Turner, D. Relationship of stand characteristics to drought-induced mortality in three Southwestern piñon–juniper woodlands. *Ecol. Appl.* **2009**, *19*, 1223–1230, doi:10.1890/08-1265.1.
17. Guarín, A.; Taylor, A.H. Drought triggered tree mortality in mixed conifer forests in Yosemite National Park, California, USA. *For. Ecol. Manage.* **2005**, *218*, 229–244, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2005.07.014.
18. Sohn, J.A.; Gebhardt, T.; Ammer, C.; Bauhus, J.; Häberle, K.-H.; Matyssek, R.; Grams, T.E.E. Mitigation of drought by thinning: short-term and long-term effects on growth and physiological performance of Norway spruce (*Picea abies*). *For. Ecol. Manage.* **2013**, *308*, 188–197.
19. Moreno, G.; Cubera, E. Impact of stand density on water status and leaf gas exchange in *Quercus ilex*. *For. Ecol. Manage.* **2008**, *254*, 74–84.
20. Preisler, Y.; Tatarinov, F.; Grünzweig, J.M.; Bert, D.; Ogée, J.; Wingate, L.; Rotenberg, E.; Rohatyn, S.; Her, N.; Moshe, I. Mortality versus survival in drought-affected Aleppo pine forest depends on the extent of rock cover and soil stoniness. *Funct. Ecol.* **2019**, *33*, 901–912.
21. Minacapilli, M.; Cammalleri, C.; Ciraolo, G.; D'Asaro, F.; Iovino, M.; Maltese, A. Thermal inertia modeling for soil surface water content estimation: A laboratory experiment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2012**, *76*, 92–100.
22. Kubelka, P.; Munk, F. An article on optics of paint layers. *Z. Tech. Phys* **1931**, *12*, 259–274.
23. Liu, L.; Liao, J.; Chen, X.; Zhou, G.; Su, Y.; Xiang, Z.; Wang, Z.; Liu, X.; Li, Y.; Wu, J. The Microwave Temperature Vegetation Drought Index (MTVDI) based on AMSR-E brightness temperatures for long-term drought assessment across China (2003–2010). *Remote Sens. Environ.* **2017**, *199*, 302–320.