



מחזור המים המפתיע בנגב בקיץ

נורית אגם* | משה שחק

המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, קמפוס שדה בוקר

* agam@bgu.ac.il

תקציר

לזריחת השמש ביום המחרת. מקור האדים הוא הבריזה היומית. מחזור מים זה אומנם קטן מאוד, אך גם עקבי מאוד. ניתוח נתונים ראשוני ממדידות של ריכוז פחמן דו-חמצני מצביע על קשר אפשרי בין תוספת המים לקרקע בעקבות ספיחת אדי מים לבין הפעילות הביולוגית בקרקע חשופה במהלך הקיץ בנגב. זהו ממצא חשוב וחדשני, ויש להמשיך ולבחון אותו לעומק כדי להבין את חשיבות התהליך במערכת אקולוגית זו.

יציבותה, תפקודה, וקיימותה של מערכת אקולוגית דמוית סוואנה נקבעים על ידי המשוב בין התועלת לבין התפקוד של המערכת האקולוגית. כדי להבטיח יציבות ותפקוד מיטבי של המערכת שומה עלינו להבין לעומקה את המערכת האקולוגית על היבטיה השונים ואת קשרי הגומלין ביניהם בדגש על התהליכים בעונה היבשה המשפיעים על תפקודי המערכת בעונת הגשמים. בבסיס המחקר המובא כאן עומדת ההשערה שהמבנה והתפקוד של מערכות צחיחות נקבעים על ידי שטפי האנרגיה והמים גם במהלך העונה היבשה. שטפים אלה מניעים את הייצור הראשוני והשניוני ואת תהליכי הפירוק, ולפיכך הם בעלי השפעה מכרעת על היציבות והקיימות של המערכת האקולוגית. כדי לבחון את יחסי הגומלין בין שטפי האנרגיה והמערכת דמוית הסוואנה הוקמה תחנת מדידה בחוות המחקר משאש, המצויה מצפון לצומת הנגב, במרכז המעבר החד מאזור צחיח למחצה לאזור צחיח קיצון. באתר הוקם מגדל שטף, שלושה במדידות היקפיות נוספות. בניגוד לסברה הרווחת, מצאנו כי קיים מחזור הידרולוגי מובהק וחוזר על עצמו במהלך כל העונה היבשה. במהלך תקופה זו אנו עדים לקליטה של אדי מים מהאטמוספירה אל הקרקע משעות אחר הצהריים ועד

מילות מפתח

מאזן האנרגיה, מישורי הלס, מערכת דמוית סוואנה, ספיחת אדי מים, ריכוז פחמן דו-חמצני

מבוא

לאחרונה נמצאו ממצאים דומים ביער נטוע על ספר המדבר (יער יתיר בצפון-מזרח הנגב) המעידים על ספיחה של אדי מים ישירות מהאטמוספירה לקרקע. אף על פי שכמויות המים קטנות יחסית, רק כ-4% מסך הגשם, חשיבותו של שטף זה ביער היא שהוא עשוי לספק הגנה קריטית מפני התייבשות במהלך הקיץ הארוך, על ידי האטת התנועה כלפי מעלה ואובדן מי הקרקע שנתרו באזור בית השורשים (Qubaja et al., 2020). כמות אדי המים שנשפכו ביער יתיר תואמת את כמויות הספיחה היומיות שפורסמו עבור קרקעות חשופות – 0.100–0.144 מ"מ ליום (Kosmas et al., 1998; Jacobs et al., 2000; Ninari and Berliner, 2002; Verhoef et al., 2006).

הממצאים האלה הולידו את התובנה שיש צורך במחקרים שיקשרו בין שטפי אנרגיה פיזיקליים וכלל שטפי המים, הכוללים גשם, נגר, טל ולחות קרקע, לבין המשוב צמח-קרקע המונע על ידי זרימת האנרגיה האקולוגית. במחקר שבחן פירוק נשר עלים באקלים ים תיכוני בישראל (Gliksman et al., 2017) נמצא כי לחות האוויר והתעבות הטל מפעילות תהליכי פירוק **בעונה היבשה**, וכי תהליכי הפירוק בעונה זו הם תוצאה של פירוק החומר האורגני על ידי חיידקים ואורגניזמים אחרים המונעים על ידי טל ולחות האוויר. מכאן, תהליכי הפירוק בעונה היבשה תלויים במאזני האנרגיה והמים היומיים, אשר בעצמם תלויים במיקרו-אקלים בשכבת האטמוספירה התחתונה.

לנושא שטפי מים ואנרגיה והשפעתם על פירוק וייצור ראשוניים ועל המשוב צמח-קרקע יש חשיבות רבה לתפקוד מערכות אקולוגיות מוגבלות מים, טבעיות ומעשה ידי אדם כאחד. על אף הידע המדעי המוגבל בנושא העלינו את ההשערה הבאה: **המבנה והתפקוד של מערכות צחיחות נקבע על ידי שטפי האנרגיה והמים גם במהלך העונה היבשה. שטפים אלה מניעים את הייצור הראשוני, את הייצור השניוני ואת תהליכי הפירוק, ולפיכך הם בעלי השפעה מכרעת על היציבות והקיימות של המערכת האקולוגית.** מתוך כך נגזר כי יש צורך בהקמת תשתית לחקר שטפי המים והאנרגיה בעונה היבשה כחלק חיוני בחקר ובהבנה של המבנה, התפקוד והממשק של מערכות מוגבלות מים. לשם כך יש לבצע בשלב ראשון מחקר ארוך טווח על שטפי המים והאנרגיה בקנה מידה יומי, עונתי ושנתי כדי לעמוד על החוקיות של השטפים בתנאי אקלים משתנים. מחקר יסודי ואינטגרטיבי המקיף את הנושאים הללו, בשילוב השפעתם על מרכיבים ביוטיים ותפקודם, יבטיח הבנה מעמיקה יותר של המערכת האקולוגית, ויאפשר בניית מודל מתקדם יותר למבנה ולתפקוד של מערכות תומכות חיים באזורים צחיחים בעונת הגשמים ובעונה היבשה. אנו מעריכים שהצטברות הידע בנושא

מערכות אקולוגיות צחיחות, טבעיות ומעשה ידי אדם, הן מוגבלות מים. זו הסיבה שבאופן מסורתי המחקר על המבנה והתפקוד של מערכות אלה התמקד בהשפעת הגשם והנגר בעונת הגשמים על הייצור הראשוני, שמניע את המערכת האקולוגית. עם זאת, מחקרים רבים מצביעים על כך שכדי להבין את מצב המערכת וליצור ממשק מיטבי אין להסתפק בהבנת השפעת קלט המים על פירוק שעושים אורגניזמים בתקופת החורף בלבד. הם מדגישים שפוריותה ויציבותה של המערכת תלויות במשוב קרקע-צומח לאורך השנה (Hooper and Johnson, 1999). משוב זה כולל את תהליכי פירוק נשר העלים שמשפיעים על תפקודי הקרקע במונחים של חומר אורגני, והוא בתורו משפיע על משק המים מחד גיסא ועל אספקת הנוטריינטים לצומח מאידך גיסא (Gliksman et al., 2018).

מחקרים הראו שבמערכות אקולוגיות שונות פירוק של נשר עלים על ידי קרינה וחום בלבד הביא לאיבוד של כ-60% מנשר העלים בעונת היובש (Austin and Vivanco, 2006; Rutledge et al., 2010). מחקרים אחרים הראו כי שטפים אביוטים עשויים להביא למינרליזציה של כ-14% מהייצור הראשוני (Foereid et al., 2011) וכי הם תורמים לייצור הראשוני באספקת נוטריינטים (Rutledge et al., 2010). בתנאי מעבדה נמצא כי פירוק נשר עלים החל מעל סף של 13% תכולת מים בנשר העלים ולחות יחסית של 75% (Bartholomew and Norman, 1947). מחקרים עכשוויים מצביעים על כך שתהליכי פירוק נשר העלים שונים מתהליכי הייצור הראשוני בכך שהם מושפעים לא רק מקלט המים בעונה הרטובה ומזרימת האנרגיה האקולוגית, אלא גם מזרימת האנרגיה הפיזית (קרינה) ומקלט מים שמקורו אינו גשם (Grünzweig et al., 2007; Parker and Schimel, 2012; Sullivan et al., 2011). במחקרים האלה זוהו פערי ידע בהבנת המבנה והתפקוד של מערכות מוגבלות מים שלא הביאו בחשבון את: (1) שטפי המים שמקורם אינו גשם, כלומר טל ולחות האוויר בתקופות היבשות, והשפעתם על תהליכי הפירוק ועל אספקת הנוטריינטים לצמחים שמווסתים את הייצור הראשוני; (2) שטפי האנרגיה בעונה היבשה והשפעתם על שטפי המים מצד אחד ועל תהליכי פירוק הנשר מצד שני.

משקעים שאינם גשם, קרי ערפילים, טל וספיחה ישירה של אדי מים מהאטמוספירה בקרקע, מהווים תוספת מים חשובה מאוד באזורים צחיחים וצחיחים למחצה (Agam and Berliner, 2006). בנגב נמצא כי מנגנון תוספת המים העיקרי (פרט לגשם) הוא תהליך של ספיחה ישירה של אדי מים מהאטמוספירה לקרקע (Agam and Berliner, 2004).

4-דרך (CNR1 של Kipp & Zonen ו-Net-Radiometer של Apogee), ושטף החום בקרקע נמדד בשלוש חזרות באמצעות פלטות שטף חום (HFT-3, Radiation) (Energy Balance Systems, Bellevue, Washington) ומעליהן מדידת טמפרטורה באמצעות צמידים תרמיים (thermocouple). תכולת המים בקרקע נמדדה בארבע חזרות בעומקים 5 ו-10 ס"מ בחיפושנים (315L של חברת Acclima) (Scientific) שמחוברים לאוגרי נתונים (CR310, Campbell).

כמו כן, התבצעו מדידות נוספות שמסייעות בהבנת המערכת האקולוגית בעזרת מכשירים שונים:

- מיקרו-ליזימטר. שקילה רציפה של דוגמאות קרקע בלתי מופרות למדידת שינויים בתכולת המים בקרקע (Ninari and Berliner, 2002).
- סינטיילומטר שכבת פני השטח (Boundary Layer Scintillometer). המכשיר מודד את תנודות הערבול של מקדם השבירה של האוויר, והוא הוצב כמתאר (Aצל Florentin and Agam (2017).
- רדיומטר רב-ערוצי למדידת טמפרטורה ואמיסיביות (emissivity; היחס בין כמות הקרינה הכוללת שפולט גוף, לקרינה שפולט גוף שחור אידיאלי בעל אותה טמפרטורה) של פני השטח (Wei et al., 2015).

תוצאות

אתגר המדידה והשוואה בין שטפים

מטבע הדברים, שטפי המים בקיץ היבש קטנים מאוד, והדבר מאתגר את המדידה המדויקת שלהם. במחקרים קודמים הוכחנו שמיקרו-ליזימטרים, בתנאי שנבנים נכון, מודדים באופן מדויק ורציף את שטפי המים הקטנים בקיץ שנובעים מספיחת אדי מים והתאדותם (Ninari and Berliner, 2002). החיסרון העיקרי של המיקרו-ליזימטרים, מלבד הקושי בהתקנתם המדויקת, הוא שהם מייצגים שטח קטן מאוד (0.03 מ"ר). בהינתן ההטרוגניות הטבעית הגדולה של קרקעות, חשוב להגדיל את קנה המידה של המדידה. היות שכך, בחנו את היכולת של מערכת מתאם המערבלים לנטר את השטפים הללו. מערכת זו מבוססת על מדידת השינויים בטמפרטורה ובריכוז אדי המים והפחמן הדו-חמצני בתדירות גבוהה מאוד (10–20 הרץ) במקביל למדידת מהירות הרוח בשלושה ממדים. היתרון הגדול של מדידה זו הוא שהיא ממצעת את השטפים על פני שטח של כ-400 מ"ר (משתנה כתלות בגובה הצבת המערכת ובתנאי הסביבה). חסרונה העיקרי לצורך מדידת השטפים הקטנים הוא שהם קרובים לקצה גבול יכולת הניטור של המערכת. לבחינת התאמת המערכת לניטור השטפים האלה נקטנו

של שטפי האנרגיה והמים לאורך כל השנה והשפעתם על המערכות הטבעיות והמערכות מעשה ידי אדם בנגב תסייע לממשק מושכל ומותאם של שילוב פעילות אנתרופוגנית להפקת מרב הפירות והמגוון ממערכות מדבריות.

במאמר זה נראה, כי בניגוד לסברה הרווחת, שבמהלך הקיץ הארוך והיבש לא קיים מחזור מים יומי, ומכאן ההנחה המתחייבת שהפעילות הביוטית בתרדמת, בפועל קיים בנגב מהלך יומי קבוע של קליטת מים לקרקע והתאדותם, ונראה עדויות ראשונות לקשר בין מחזור מים זה למחזור הפחמן הדו-חמצני המעיד על פעילות ביוטית.

ההשלכות של מחקרי השטפים וחשיבותם לאסטרטגיית ממשק אדם-טבע בנושא השיקום התפקודי בנגב מתבררים כאשר ממקמים את המחקרים במסגרת הכללית של מבנה ותפקוד מערכת דמוית סוואנה (ערבה מנוקדת עצים ושיחים). למערכת שני מרכיבים: המערכת האקולוגית הייחודית דמוית הסוואנה, ושירותי המערכת האקולוגית שהיא מספקת, ובכללם התועלת שהיא מביאה לאדם. יציבותה וקיימותה של המערכת האקולוגית דמוית הסוואנה נקבעות על ידי המשוב בין התועלת לבין תפקודה של המערכת. לצורך הבנת תהליכי משוב אלה, שומה עלינו להבין לעומקה את המערכת האקולוגית על היבטיה השונים ויחסי הגומלין ביניהם תוך דגש על התהליכים בעונה היבשה המשפיעים על תפקודי המערכת בעונת הגשמים.

מערך הניטור

תחנת המדידה הוקמה בחוות המחקר משאש המצויה מצפון לצומת הנגב, באמצע הדרך בין באר-שבע לשדה בוקר, במרכז המעבר החד מאזור צחיח למחצה (קו באר-שבע) לאזור צחיח קיצון (שדה בוקר). מיקום ייחודי זה הופך אותה למתאימה במיוחד למחקרים על שטפים במערכת האקולוגית של מישורי הלס בתנאים של מגבלת מים בעידן של שינוי אקלים מהיר.

באתר הוקם מגדל שטף הכולל מערכת מתאם מערבליים (eddy covariance) מסוג Irgason (Campbell Scientific, inc.) שהוצבה בגובה 1 מטר כדי להבטיח אורך נשיבה מספק מכיוון הרוח השכיחה (צפון-מערב). מערכת זו מודדת את מהירות הרוח בשלושה ממדים בתדירות של 20 הרץ, ובמקביל נמדדים באותה תדירות טמפרטורת האוויר, ריכוז אדי המים וריכוז הפחמן הדו-חמצני. מתוך מדידות אלה מחושבים שטפי החום המוחשי והכמוס. רכיבי הקרינה (קרינה קצרת גלים נכנסת ומוחזרת, וקרינה ארוכת גלים נכנסת ויוצאת) נמדדו באמצעות שני מכשירי קרינה

סטייה של כ-10% בשעות השיא של השטף ומהלך יומי זהה מצביעים על התאמה טובה מאוד, ומבססים את השימוש בשיטת מתאם המערבלים לניטור שטפי חום מעל קרקע יבשה בנגב בעונת הקיץ.

שטף החום הכמוס

המעניין מכולם הוא שטף החום הכמוס. באזור הנגב בסוף אוגוסט, מספר חודשים לאחר אירוע הגשם האחרון, מזג האוויר חם ויבש. הסברה הרווחת היא כי לא קיים שטף חום כמוס (כלומר התאדות), שכן כדי שתהיה התאדות צריך שיהיה מקור מים. עם זאת, איור 3 מראה בבירור מהלך יומי של שטף חום כמוס, אומנם קטן, אך עקבי. עוד ניתן לראות, כי השטף משנה את כיוונו מחיובי (התאדות) לשלילי (קליטה של מים לקרקע) בשעות אחר הצהריים, סביב השעה 17:00, מעט לפני ששטף החום לקרקע משנה את כיוונו. שטף החום הכמוס נשאר שלילי עד כשעה לאחר הזריחה.

במקביל למדידות באמצעות המיקרו-ליזימטרים ומערך מתאם המערבלים, ובמטרה להצליח לכמת את מחזור המים היומי בקנה מידה מרחבי גדול יותר, ביצענו במהלך קיץ 2019 מדידות עם רדיומטר אינפרה-אדום רב-ערוצי (CE312, CIMEL, inc., France). מאחר שהחתימה התרמית של הקרקע תלויה בתכולת הרטיבות באמצעות שימוש בשלושה מתוך חמשת הערוצים התרמיים של המכשיר

שני צעדים מקבילים: השלמת מאזן האנרגיה ומדידת שטף החום המוחשי באמצעות סינטיילומטר פני שטח במקביל למערך מתאם המערבלים (Florentin and Agam, 2017). כמו כן בחנו גם את ההיתכנות למדידה של שטף החום הכמוס באמצעות ניטור שינויים באמיסיביות של פני השטח, שתאפשר את הגדלת קנה המידה של המדידה לקנה מידה אזורי.

מאזן האנרגיה

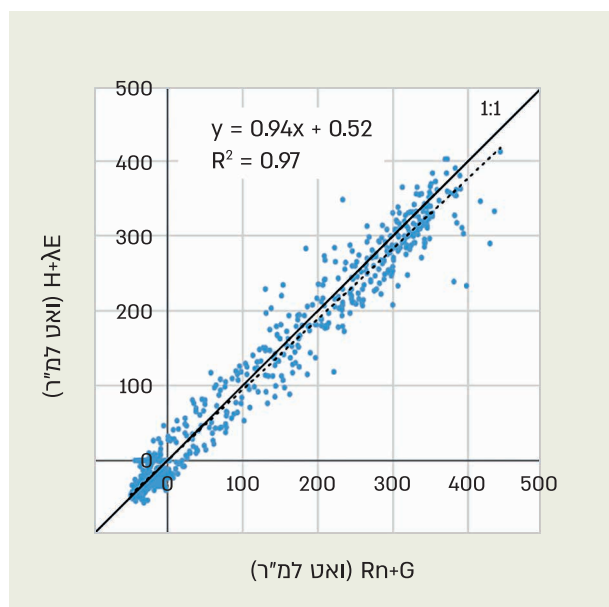
מאזן האנרגיה בפני השטח על קרקע חשופה ניתן לתיאור באמצעות נוסחה (1):

$$Rn = G + H + \lambda E$$

כאשר Rn הקרינה נטו, G – שטף החום לקרקע, H – שטף החום המוחשי, ו- λE שטף החום הכמוס. הקרינה נטו, שהיא סך כל הקרינה קצרת הגל וארוכת הגל הנכנסת, פחות סך כל הקרינה קצרת הגל וארוכת הגל היוצאת, היא האנרגיה הזמינה במערכת. אנרגיה זו משמשת לשלושה שטפים עיקריים – לחימום הקרקע (G), לחימום האוויר (H) ולמעבר פאזה של המים מנוזל לגז, קרי התאדות (λE). שני השטפים האחרונים הם שטפים התלויים במקדם המעבר של האטמוספירה, ושניהם נמדדים על ידי מערך מתאם המערבלים. דרך מקובלת לבחינת איכות הנתונים היא בחינת מידת הסגירה של מאזן האנרגיה. לצורך כך מכינים את שטף החום בקרקע מהקרינה נטו ($Rn-G$), וזו האנרגיה הזמינה לשטפים הטורבולנטיים ($H+\lambda E$). מאזן מושלם מציב את הנקודות של האחד ביחס לשני על קו השוויון 1:1. מאזן כזה, כאשר המדידות מתבצעות באמצעות מערך מתאם המערבלים, הוא תאורטי בלבד, שכן ידוע שהמכשיר לעולם אינו מסוגל לקלוט את כל קשת המערבלים העוברת דרכו, ולכן ערכי סגירת מאזן (closure; מבוטא באמצעות שיפוע קו הרגרסיה) נעים בדרך כלל בין 0.8 ל-0.95. באיור 1 מוצגות תוצאות בחינת סגירת מאזן האנרגיה עבור מספר ימי מדידה מייצגים. ניתן לראות כי השיפוע של קו הרגרסיה (closure) הוא 0.94. הערך הגבוה מעיד על תקינות המערכת ועל אמינות המדידות.

שטף החום המוחשי

מאחר שהסינטיילומטר ומערך מתאם המערבלים, שמודדים שניהם את שטף החום המוחשי, מבוססים על תאוריה שונה ועל סט הנחות שונה, התאמה טובה ביניהם תעיד, בהכרח, על אמינות המדידות. המהלך היומי של שטף החום המוחשי כפי שנמדד על ידי מערך מתאם המערבלים והסינטיילומטר מוצג באיור 2. בהינתן שהשטח התורם לשני המכשירים אינו זהה, והשטח עצמו הוא שטח טבעי עם שונות מרחבית שעשויה להשפיע על המדידות, מקדם מתאם של 0.97, עם



איור 1

סגירת מאזן האנרגיה

השטפים הטורבולנטיים ($H+\lambda E$) כנגד האנרגיה הזמינה ($Rn-G$)

המעידה על פוטנציאל לשימוש במדידות אמיסיביות לכימות תהליך הספיחה מקרקע לס חשופה. זהו ממצא חדשני וחשוב בעל השלכות נרחבות, ויש להמשיך ולבחון אותו.

(8.3, 10.6, ו-11.3 מיקרומטר), חישובנו את מדד הספיחה (AdI; נוסחה (2):

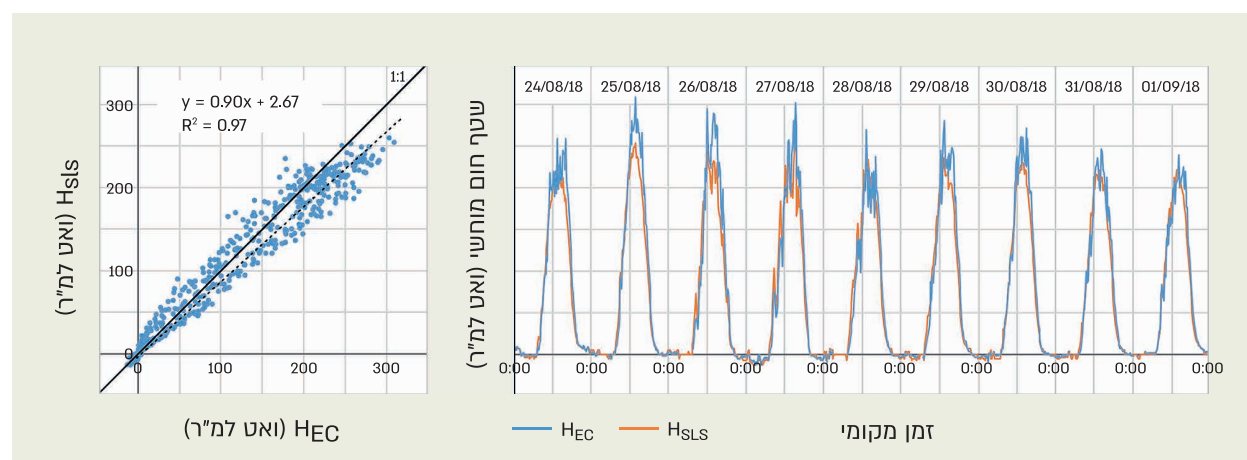
$$AdI = \frac{\varepsilon_{11.3} - \varepsilon_{8.3}}{\varepsilon_{10.6}}$$

הספיחה והבריזה

משגיבשנו ביטחון ביכולת שלנו למדוד את שטפי המים הקטנים באופן מדויק במספר שיטות ובקני מידה מרחביים שונים, אפשר להתבונן בתופעה מעניינת זו של קיומו של מחזור מובהק וחוזר על עצמו של מים ואנרגיה, שמתרחש במהלך העונה היבשה (מכחודש לאחר הגשם האחרון, בדרך כלל סביב חודש מאי, ועד לגשם הראשון בסביבות

כאשר ε היא האמיסיביות של הקרקע, והמספרים התחתיים מציינים את אורכי הגל הספציפיים.

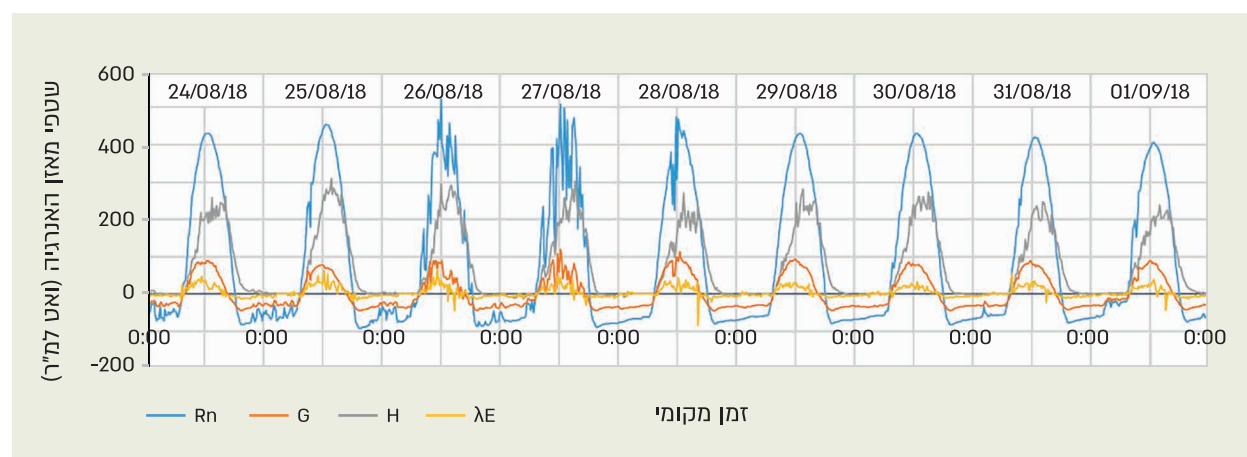
איור 4 מציג את מידת ההתאמה בין מדידות המיקרו-ליזימטר למדידות הרדיומטר הרב-ערוצי במהלך קליטת המים בקרקע. ניתן לראות התאמה יפה בין שתי השיטות,



איור 2

המהלך היומי של שטף החום המוחשי במדידות מערך מתאם המערבלים והסינטיולומטר

א. מהלכים יומיים של שטף החום המוחשי שנמדדו באמצעות סינטיולומטר ומערך מתאם המערבלים; ב. השוואה בין מדידות שטף החום הכמוס בין הסינטיולומטר למערך מתאם המערבלים (מתוך Florentin and Agam, 2017).



איור 3

מהלכים יומיים של רכיבי מאזן האנרגיה

קרינה נטו (net radiation), שטף חום בקרקע (soil heat flux), שטף חום מוחשי (sensible heat flux) ושטף החום הכמוס (latent heat flux).

ועד לגשם הראשון (-ספטמבר/אוקטובר). כך שמדובר על כמעט חצי שנה שבמהלכה מתרחש תהליך זה. השאלה המתבקשת היא, אם כך, האם יש לתהליך השפעה על המערכת האקולוגית? יצאנו לבדוק.

השפעת תהליך הספיחה על המערכת האקולוגית

כשלב ראשון, החיבור בין תהליך הספיחה לפעילות של המערכת האקולוגית התבצע באמצעות מדידת ריכוז הפחמן הדו-חמצני במהלך היממה. ההנחה היא כי שטף הפחמן הדו-חמצני מהקרקע מבטא פעילות ביולוגית. מאחר שהמדידות התבצעו מעל קרקע חשופה, פעילות ביולוגית כזו מקורה בפעילות של קרום ביולוגי או בפעילות חיידקית בקרקע. כך או כך, איור 6 מציג את המהלך היומי של ריכוז הפחמן הדו-חמצני שנמדד באמצעות מגדל השטף, במקביל לשינויים בתכולת הרטיבות בקרקע, המייצגים את ספיחת אדי המים והתאדותם, כפי שנמדדו באמצעות המיקרו-ליזימטרים.

הנתונים מראים עלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני מייד לאחר הזריחה, אז תכולת הרטיבות בקרקע היא הגבוהה ביותר, והקרינה מספיקה כדי לשפועל את הפעילות. משעות הזריחה והלאה ריכוז הפחמן הדו-חמצני יורד, למעט עלייה וירידה חדות בשעות הערב, סביב השקיעה. אלה נתונים ראשוניים, המצביעים על קשר אפשרי בין תוספת המים לקרקע בעקבות ספיחת אדי מים לבין הפעילות הביולוגית בקרקע חשופה במהלך הקיץ בנגב. זהו ממצא חשוב וחדשני שיש להמשיך ולבחון אותו לעומק כדי להבין את חשיבות התהליך במערכת אקולוגית זו.

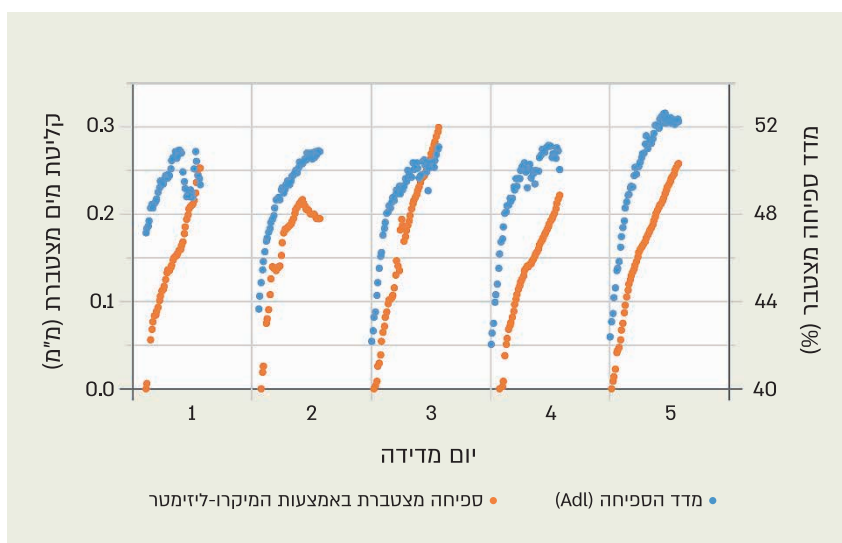
המערכות האקולוגיות דמויות הסוואנה בנגב הן **מערכות אקולוגיות חדשניות** (Novel Ecosystems) בתהליכי

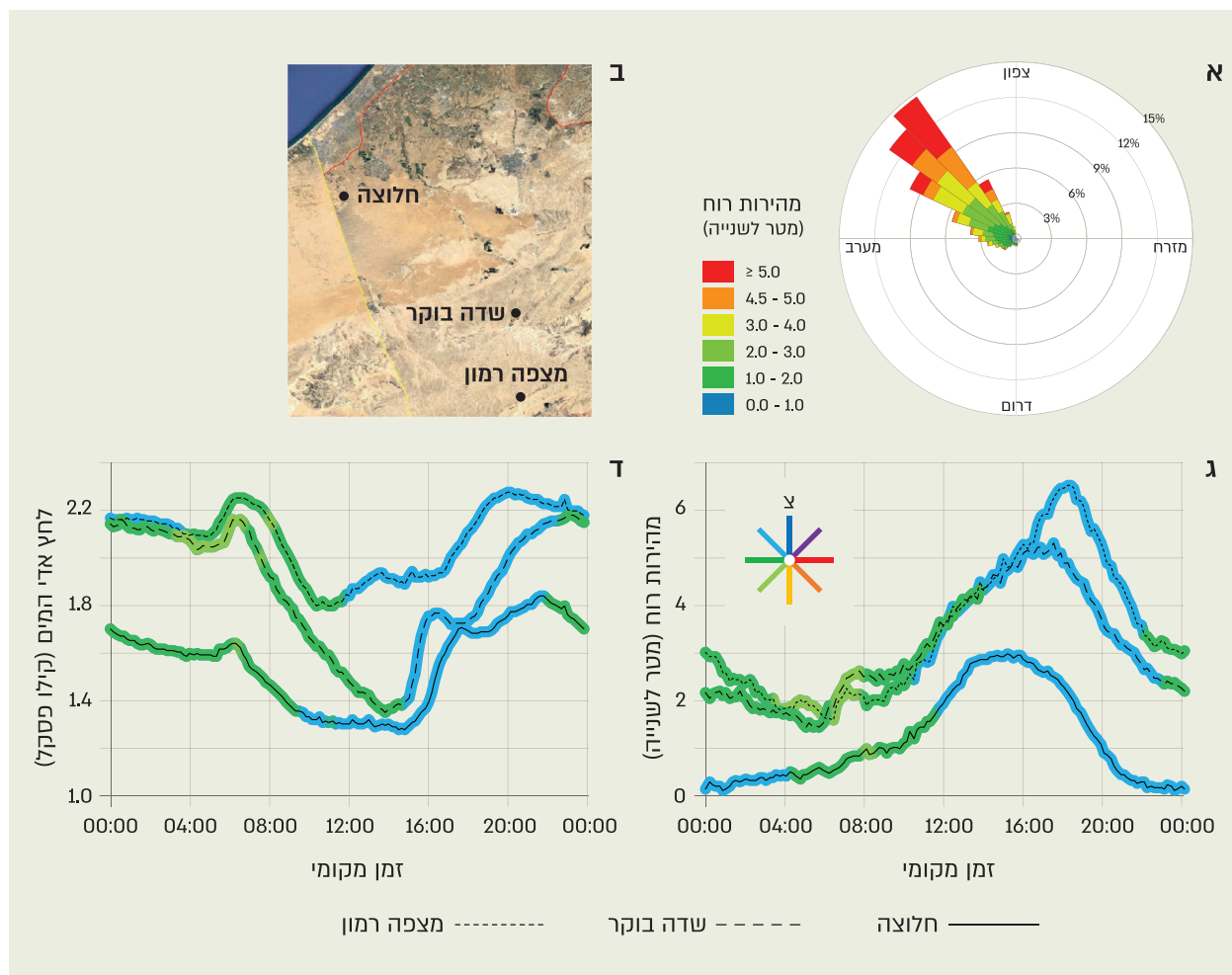
אוקטובר). במהלך תקופה זו אנו עדים לקליטה של אדי מים מהאטמוספירה אל הקרקע משעות אחר הצהריים ועד לזריחת השמש ביום המחרת.

כדי שתהיה קליטה של מים, צריך מקור מים, ואכן נראה כי שעת ההתחלה של התהליך תואמת את שעת ההגעה של הבריזה הימית לאזור (איור 5). הקרבה היחסית לים התיכון (כ-80 ק"מ בקו אווירי) והפרש הטמפרטורה הגדול בין פני הקרקע ופני הים במהלך היום יוצרים תנועת אוויר מעגלית. אוויר חם מעל הקרקע עולה למעלה, ואוויר קריר ולח נכנס מהים. ניתן לראות בבירור את הדומיננטיות המוחלטת של הבריזה (רוח צפון-מערבית) במשטר הרוחות באזור במהלך הקיץ (איור 5א), את הביטוי של הבריזה בעלייה במהירות הרוח בשעות אחר הצהריים ואת התקדמות שעת שיא המהירות ככל שמתרחקים מהים (איור 5ב), ואת העלייה המקבילה בלחץ אדי המים המוסעים עם הרוח (איור 5ד).

העלייה בלחץ אדי המים באוויר בצירוף קרקע יבשה מאוד יוצרת היפוך מכל (gradient) בלחץ אדי המים, וגורם לשטף של אדי מים מהאוויר אל הקרקע. אדי המים שחודרים לקרקע נספחים על החלקיקים ונאחזים בהם, וכך מתקבלת עלייה בתכולת הרטיבות בשכבת הקרקע העליונה החל משעות אחר הצהריים עם כניסת הבריזה, ועד לזריחה ביום למחרת. עם הזריחה וכניסת אנרגיה למערכת, אדי המים הספוחים מתחילים להתאדות, ותכולת הרטיבות בקרקע יורדת.

מחזור מים זה אומנם קטן מאוד (מדובר בשינויים של 1%-2% בתכולת הרטיבות ב-5 ס"מ העליונים של הקרקע), אך גם עקבי מאוד, והוא מתרחש למעשה כל יום במהלך העונה היבשה, החל מחדוש אחרי הגשם האחרון (-מאי)





איור 5

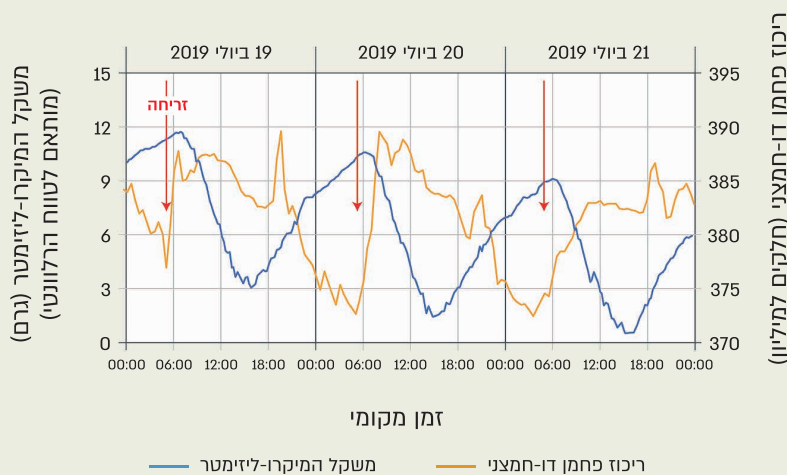
משטר הרוחות והלחות באוויר בהשפעת הבריזה כפונקציה של המרחק מהים

שושנת רוחות בחודשים מאי-אוקטובר בחוות משאש, המעידה על הדומיננטיות המוחלטת של הבריזה מהים במשטר הרוחות (א). שלוש נקודות במרחק משתנה מהים (ב) מראות את מהירות הרוח (ג) ולחץ אדי המים (ד) במהלך חודש יולי. כל נתון הוא הממוצע לחודש יולי בשנה הנתונה. הצבעים מייצגים את כיוון הרוח (בהתאם למקרא הצבעים בלוח ג). ניתן לראות את החדירה ההדרגתית של הבריזה מהחוץ פנימה, ובהתאם לכך את העלייה בלחץ אדי המים.

איור 6

המהלך היומי של ריכוז הפחמן הדו-חמצני וספיחה והתאדות של אדי המים בקרקע

ריכוז הפחמן הדו-חמצני נמדד באמצעות מגדל השטף. השינויים בתכולת הרטיבות בקרקע, המייצגים את ספיחת אדי המים והתאדותם, נמדדו באמצעות המיקרו-ליזימטרים. החיצים האדומים מסמנים את שעת הזריחה.



קרקע-צמח בהכנת מאגר נוטריינטים לשימוש הצומח בעונת הגשמים. נוסף על תפקודי המיקרו-אורגניזמים כמפרקים, הם מהנדסי קרום קרקע, ופעילותם, המונעת על ידי שטפי המים בקיץ, עשויה להשפיע על קרום הקרקע כמקור נגר לצמחים באירועי גשם בעונת החורף.

לפי מודל זה של מערכת דמוית סוואנה, ממשק מבוסס מדע חייב להיות מוכתב מתפקודה של המערכת האקולוגית בתהליכי ייצור (זרימת אנרגיה) ופירוק (מחזור יסודות) לאורך כל השנה, ולהתחשב בתנודות אקלימיות המניעות את שטפי המים והאנרגיה בעונת הגשמים, כמו גם בעונת היובש. בעונת הגשמים על המחקר והממשק להתמקד בתהליכים הקובעים את הייצור הראשוני ואת יציבותו בעידן של תנודות קיצוניות של שטפי מים ואנרגיה. בעונת היובש עליהם לעסוק בייצור שניוני ובתהליכי פירוק. כל זאת, מתוך הנחה שהשטפים בחורף ובקיץ משלימים זה את זה, ומאפשרים עמידות של המערכת בתנאי אקלים משתנים וקיצוניים.

מיקומו הגאוגרפי של המערך דמוי הסוואנה בישראל במישורי הלס, באזור המעבר בין אקלים ים תיכוני למדבר,

התפתחות. ממשק מושכל של מערכות ייחודיות אלה מחייב מחקר מתמשך על המבנה והתפקוד שלהן, שמונעים, במרחב ובזמן, על ידי שטפי אנרגיה ומים אביוטיים וביוטיים. מאמר זה מתמקד בשטפי המים והאנרגיה בעונת היובש (עונה ללא גשם) ובהערכת חשיבותם לתפקוד המערכת בעונת הגשמים.

מארג התהליכים במערכות האקולוגיות דמויות הסוואנה מקורו בייצור הראשוני של עצים, שיחים ועשבונים, והמשכו בייצור השניוני של בעלי חיים ובתהליכי פירוק על ידי מיקרו-אורגניזמים. המארג מונע על ידי שטפי המים והאנרגיה האביוטיים בעונת היובש (איור 7). המהלך היומי של שטפי המים (לחות אוויר, לחות קרקע וטל) ושטפי האנרגיה משפיעים ישירות ובעקיפין (באמצעות פעילות בעלי חיים) על מאגר נשר העלים וההפרשות שמצטבר בעונת היובש. במקביל ליצירת מאגר נשר הצמחים, שגודלו מווסת על ידי שטפי המים והאנרגיה, מניעים שטפים אלה את פירוקו של המאגר ואת הפיכתו למאגר של חומר אורגני ונוטריינטים. הפירוק מתבצע ישירות על ידי שטפי האנרגיה, ובעקיפין על ידי המיקרו-אורגניזמים ששטפי המים מניעים אותם. תהליכי הפירוק בעונת היובש חשובים למשוב מחזור היסודות



איור 7

מסלולי התפקוד של המערכת דמוית הסוואנה בעונת היובש והשפעתם על תפקודי המערכת בעונת הגשמים
כל תהליכי הקיץ המתוארים כאן יכולים להיחקר לפי שיטות המחקר הנוכחי.

והאנרגיה למהלך השנה כולה, ובחינת השפעתם על מארג הקשרים במערכת האקולוגית דמוית הסוואנה (איור 7) יסייעו ליצור ממשק מושכל של הכוונת השטפים למטרות של מערכת בת-קיימא המספקת שירותי ויסות, אספקה ונופש.

מעמיד את המערכות האקולוגיות דמויות הסוואנה באתגר אקלימי של תנודות חריפות, המכתיב שינויים קיצוניים בשטפי המים והאנרגיה. האתגר האקלימי יוצר אתגרים מדעיים וממשקיים של התפתחות וקיום מערכת אקולוגית חדשנית בתנאי קיצון. להבנתנו, הרחבת מחקר שטפי המים

מקורות

- Jacobs AFG, Heusinkveld BG, and Berkowicz SM. 2000. Dew measurements along a longitudinal sand dune transect, Negev desert, Israel. *International Journal of Biometeorology*, 43, 184–190.
- Kosmas C, Danalatos NG, Poesen J, and van Wesemael B. 1998. The effect of water vapour adsorption on soil moisture content under Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 36, 157–168.
- Ninari N and Berliner PR. 2002. The role of dew in the water and heat balance of bare loess soil in the Negev Desert: Quantifying the actual dew deposition on the soil surface. *Atmospheric Research*, 64, 323–334.
- Parker SS and Schimel JP. 2011. Soil nitrogen availability and transformations differ between the summer and the growing season in a California grassland. *Applied Soil Ecology*, 48, 185–192.
- Qubaja R, Amer M, Tatarinov F, Rotenberg E, Preisler Y, Sprintsin M, and Yakir D. 2020. Partitioning evapotranspiration and its long-term evolution in a dry pine forest using measurement-based estimates of soil evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281, 107831.
- Rutledge S, Campbell DI, Baldocchi D, and Schipper LA. 2010. Photodegradation leads to increased carbon dioxide losses from terrestrial organic matter. *Global Change Biology*, 16, 3065–3074.
- Sullivan BW, Selman PC, and Hart SC. 2012. New evidence that high potential nitrification rates occur in soils during dry seasons: Are microbial communities metabolically active during dry seasons? *Soil Biology & Biochemistry*, 53, 2831.
- Verhoef A, Diaz-Espejo A, Knight JR, Villagarcía L, and Fernández JE. 2006. Adsorption of water vapor by bare soil in an olive grove in southern Spain. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 1011–1027.
- Wei J, Wang D, Gong F, Yan B, and He X. 2015. Thermal infrared radiometer calibration and experimental measurements: Proceedings SPIE 9620, 2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications, 96200V. doi: 10.1117/12.219293.
- ברנד ד, משה י ושחק מ. 2015. שיקום תפקודי של מערכות אקולוגיות ממדברות בצפון הנגב. אגף הייעור, מחלקת יער מרחב דרום ויחידת הכרסומים, קרן קימת לישראל, ירושלים.
- Agam N and Berliner PR. 2004. Diurnal water content changes in the bare soil of a coastal desert. *Journal of Hydrometeorology*, 5(5), 922–933.
- Agam N and Berliner PR. 2006. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments – A review. *Journal of Arid Environments*, 65, 572–590.
- Austin AT and Vivanco L. 2006. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. *Nature*, 442, 555–558.
- Bartholomew WV and Norman AG. 1947. The threshold moisture content for active decomposition of some mature plant materials. *Soil Science Society of America Journal*. <https://doi.org/10.2136/sssaj1947.036159950011000C0052x>
- Florentin A and Agam N. 2017. Estimating non-rainfall-water-inputs-derived latent heat flux with turbulence-based methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 533–540.
- Foeroid B, Rivero MJ, Primo O, and Ortiz I. 2011. Modelling photodegradation in the global carbon cycle. *Soil Biology & Biochemistry*, 43, 1383–1386.
- Gliksman D, Haenel S, and Grunzweig JM. 2018. Biotic and abiotic modifications of leaf litter during dry periods affect litter mass loss and nitrogen loss during wet periods. *Functional Ecology*, 32, 831–839.
- Gliksman D, Rey A, Seligmann R, Dumbur R, Sperling O, Navon Y, et al. 2017. Biotic degradation at night, abiotic degradation at day: Positive feedbacks on litter decomposition in drylands. *Global Change Biology*, 23, 1564–1574.
- Grünzweig JM, Gelfand I, Fried Y, and Yakir D. 2007. Biogeochemical factors contributing to enhanced carbon storage following afforestation of a semi-arid shrubland. *Biogeosciences*, 4, 891–904.
- Hooper DU and Johnson L. 1999. Nitrogen limitation in dryland ecosystems: Responses to geographical and temporal variation in precipitation. *Biogeochemistry*, 46, 247–293.



שיטה סלילנית בפארק סיירת שקד – נוף דמוי סוואנה
צילום: אמיר הרמס