

משרד החקלאות - דו"ח לתוכניות מחקר
לקרן המדען הראשי

קוד זיהוי	א. נושא המחקר (בעברית)
304 - 0505 - 16	הערכת האופוטורנספירציה מגידולים בחלקות קטנות באמצעות שיטת חידוש פני השטח

ג. כללי			
מוסד מחקר של החוקר הראשי			
מינהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני			
סוג הדו"ח	תאריכים		
מסכם שנת המחקר: 3 / 3	תקופת המחקר		
	עבודה מוגשת הדו"ח		
	התחלה	סיום	תאריך משלוח הדו"ח למקורות המימון
	שנה 08 / 2014	שנה 07 / 2017	שנה 09 / 2017

ב. צוות החוקרים		
חוקר ראשי	שם משפחה	שם פרטי
	טנאי	יוסף
חוקרים משניים		
1	כהן	שבתאי
2		
3		
4		
5		
6		
7		

ד. מקורות מימון עבור מיעוד הדו"ח		
שם מקור המימון	קוד מקור מימון	סכום שאושר למחקר בשנת תיקצוב הדו"ח בשקלים
קרן המדען הראשי	020382	120000

ה. תקציר
<p>ה. תקציר שים לב - על התקציר להיכתב בעברית לפי סעיף ה' שבהנחיות לכתיבת דיווחים</p> <p>הצגת הבעיה: לאחרונה הוצעה בספרות העולמית האפשרות ליישם את שיטת חידוש פני השטח בשטחים קטנים יחסית. ממצא זה מעלה את האפשרות לקבל הערכות של האופוטורנספירציה בחלקות קטנות. בנוסף, פותחה בשנים האחרונות שיטת SR שאינה דורשת כיוול. מטרות המחקר: לבחון את ישימות שיטת "חידוש פני השטח" (SR) למדידת שטף החום המוחשי והערכת האופוטורנספירציה בחלקות קטנות. המטרות הספציפיות הן: (א) לבחון האם כיוול השיטה עבור חלקה גדולה ואחידה, ניתן ליישום ישיר – או דורש התאמה – עבור חלקות קטנות יותר של אותו גידול. (ב) בחינת שיטת SR שאינה דורשת כיוול לחלקות קטנות בבתי רשת ובשדה הפתוח. שיטות עבודה: בשנה א' המדידות נערכו בבית רשת לגידול פלפל. הוצבה מערכת קורלציית הערבוליים במורד הרוח והוצבו 5 חיישני תרמוקפלים מיניאטוריים לבחינת שיטת SR, במרחקים שונים מקצה המבנה המייצגים חלקות קטנות בגודל משתנה. חיישני זרימת מים בגבעול ב – 24 צמחי פלפל, מדדו בצורה בלתי תלויה את הטרנספירציה. בשנה ב' נערכו מדידות בשדה כותנה. הוצבה מערכת קורלציית הערבוליים במרכז השדה והוצבו 9 חיישני תרמוקפלים מיניאטוריים לבחינת שיטת SR, במרחקים שונים מהקצה המערבי של השדה המייצגים חלקות בגודל משתנה. חיישני זרימת מים בגבעול הותקנו ב – 12 צמחי פלפל, ומדדו את הטרנספירציה. בשנה ג' נערך ניסוי השלמה בשדה כותנה. הוצבה מערכת קורלציית ערבוליים ושתי תחנות עם אנומטרס אולטראסוניים וחיישני תרמוקפלים מיניאטוריים. נבחנו מודלים שונים של טביעת רגל על הממצאים של שנה ב', לבחינת השפעת גודל החלקה על שיטת SR. תוצאות עיקריות לתקופת הדו"ח: בבית הרשת לגידול פלפל שיטת SR הפיקה תוצאות טובות וק לנקודת מדידה אחת ולא ניתן היה למיין תוצאות אלה לפי אורכי נשיבה שונים. בנקודה זו, לכל אורכי הנשיבה, התקבל מקדם כיוול של 0.4 עם חותך של 10.3. לכן נבחנה גם שיטת FV שנתנה תוצאות טובות לכל החיישנים ואיפשרה בחינת השפעת גודל החלקה על מקדם הכיוול והמתאם. מקדם הכיוול של שיטת FV לכלל החיישנים השתנה עד 15% עם אורך הנשיבה והיה בעל ערך ממוצע של 3.8. מקדם המתאם של גרף הכיוול הציג מגמת עלייה עם אורך הנשיבה. הערכות האופוטורנספירציה היו בסטייה של בין 9% עד 23%, ורוב מקדמי המתאם היו מעל 0.56. בשדה הכותנה התקבלה סגירה טובה מאד של מאזן האנרגיה בשיעור 0.99. שיטת SR הפיקה תוצאות טובות לכל אורכי הנשיבה עם מקדם כיוול בין 0.60 ל- 1.34, כאשר השינויים הגדולים נבעו משימוש במודלים שונים לחישוב טביעת הרגל. במימון לפי אורכי נשיבה גיאומטריים (גודל החלקה), נראה כי השפעת אורך הנשיבה על מקדם הכיוול היא קטנה. הערכות האופוטורנספירציה עבור המימון לפי אורכי נשיבה גיאומטריים היו בסטייה של עד 15% מהערך שנמדד ע"י מערכת קורלציית הערבוליים וכול מקדמי המתאם היו מעל 0.77. מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות: התוצאות שהתקבלו מראות ששיטת SR הפיקה הערכות טובות של האופוטורנספירציה בחלקות קטנות בגדלים שונים בשדה פתוח. בבית הרשת שנבחנו, שיטת FV הייתה יעילה יותר ויכולה לשמש תחליף לשיטת SR.</p>

ו. אישורים

הנני מאשר שקראתי את ההנחיות להגשת דיווחים לקרן המדען הראשי והדו"ח המצ"ב מוגש לפיהן

חוקר ראשי	מנהל המחלקה	מנהל המכון (פקולטה)	אמרכלות (רשות המחקר)	רשות המחקר	תאריך (שנה) (חודש) (יום)
-----------	-------------	---------------------	----------------------	------------	--------------------------

דו"ח מסכם לתכנית מחקר מספר 304-0505-16

הערכת האופוטנספירציה מגידולים בחלקות קטנות

באמצעות שיטת 'חידוש פני השטח'

**Estimation of evapotranspiration from crops in small plots using the
"surface renewal" technique**

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

יוסף טנאי המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי

שבתאי כהן המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי

Josef Tanny, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Volcani Center, P.O.B. 6, Bet Dagan 50250. Email: tanai@volcani.agri.gov.il

Shabtai Cohen, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Volcani Center, P.O.B. 6, Bet Dagan 50250. Email: ywshep@volcani.agri.gov.il

ספטמבר 2017

אלול תשע"ז

הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים.

הממצאים אינם מהווים המלצות לחקלאים.



חתימת החוקר:

ניסויי השדה, עיבוד הנתונים והכנת הדו"ח נעשו בעזרתם של:
נתאי היימן, ויקטור לוקיינוב, יחזקאל כהן, יובל מצליח, אורי אחימן

עמוד

תוכן עניינים

2	תקציר
3	מבוא – רקע מדעי ומטרות המחקר לתקופת הדו"ח
5	פירוט עיקרי הניסויים והתוצאות לתקופת הדו"ח
6	תוצאות עיקריות
18	דיון
21	סיכום עם שאלות מנחות

תקציר

הצגת הבעיה: לאחרונה הוצעה בספרות העולמית האפשרות ליישם את שיטת חידוש פני השטח בשטחים קטנים יחסית. ממצא זה מעלה את האפשרות לקבל הערכות של האופוטורנספירציה בחלקות קטנות. בנוסף, פותחה בשנים האחרונות שיטת SR שאינה דורשת כיוול. מטרות המחקר: לבחון את ישימות שיטת "חידוש פני השטח" (SR) למדידת שטף החום המוחשי והערכת האופוטורנספירציה בחלקות קטנות. המטרות הספציפיות הן: (א) לבחון האם כיוול השיטה עבור חלקה גדולה ואחידה, ניתן ליישום ישיר – או דורש התאמה – עבור חלקות קטנות יותר של אותו גידול. (ב) בחינת שיטת SR שאינה דורשת כיוול לחלקות קטנות בבתי רשת ובשדה הפתוח. שיטות עבודה: בשנה א' המדידות נערכו בבית רשת לגידול פלפל. הוצבה מערכת קורלציית הערבולים במורד הרוח והוצבו 5 חיישני תרמוקפלים מיניאטוריים לבחינת שיטת SR, במרחקים שונים מקצה המבנה המייצגים חלקות קטנות בגודל משתנה. חיישני זרימת מים בגבעול ב – 24 צמחי פלפל, מדדו בצורה בלתי תלויה את הטרנספירציה. בשנה ב' נערכו מדידות בשדה כותנה. הוצבה מערכת קורלציית הערבולים במרכז השדה והוצבו 9 חיישני תרמוקפלים מיניאטוריים לבחינת שיטת SR, במרחקים שונים מהקצה המערבי של השדה המייצגים חלקות בגודל משתנה. חיישני זרימת מים בגבעול הותקנו ב – 12 צמחי כותנה, ומדדו את הטרנספירציה. בשנה ג' נערך ניסוי השלמה בשדה כותנה. הוצבה מערכת קורלציית ערבולים ושתי תחנות עם אנמומטרים אולטראסוניים וחיישני תרמוקפל מיניאטוריים. נבחנו מודלים שונים של טביעת רגל על הממצאים של שנה ב', לבחינת השפעת גודל החלקה על שיטת SR. תוצאות עיקריות לתקופת הדו"ח: בבית הרשת לגידול פלפל שיטת SR הפיקה תוצאות טובות רק לנקודת מדידה אחת ולא ניתן היה למיין תוצאות אלה לפי אורכי נשיבה שונים. בנקודה זו, לכל אורכי הנשיבה, התקבל מקדם כיוול של 0.4 עם חותך של 10.3. לכן נבחנה גם שיטת FV שנתנה תוצאות טובות לכל החישובים ואיפשרה בחינת השפעת גודל החלקה על מקדם הכיוול והמתאם. מקדם הכיוול של שיטת FV לכלל החישובים השתנה עד 15% עם אורך הנשיבה והיה בעל ערך ממוצע של 3.8. מקדם המתאם של גרף הכיוול הציג מגמת עלייה עם אורך הנשיבה. הערכות האופוטורנספירציה היו בסטייה של בין 9% עד 23%, ורוב מקדמי המתאם היו מעל 0.56. בשדה הכותנה התקבלה סגירה טובה מאד של מאזן האנרגיה בשיעור 0.99. שיטת SR הפיקה תוצאות טובות לכל אורכי הנשיבה עם מקדם כיוול בין -0.60 ל- 1.34, כאשר השינויים הגדולים נבעו משימוש במודלים שונים לחישוב טביעת הרגל. במיין לפי אורכי נשיבה גיאומטריים, נראה כי השפעת אורך הנשיבה (גודל החלקה) על מקדם הכיוול היא קטנה. הערכות האופוטורנספירציה עבור המיין לפי אורכי נשיבה גיאומטריים היו בסטייה של עד 15% מהערך

שנמדד ע"י מערכת קורלצית הערבולים וכול מקדמי המתאם היו מעל 0.77. מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות: התוצאות שהתקבלו מראות ששיטת SR הפיקה הערכות טובות של האופוטורנספירציה בחלקות קטנות בגדלים שונים בשדה פתוח. בבית הרשת שנבחן, שיטת FV הייתה יעילה יותר ויכולה לשמש תחליף לשיטת SR.

מבוא – רקע מדעי ומטרות המחקר לתקופת הדו"ח

מדד כמותי של צריכת המים יכול ללמד את החקלאי מהו הפיצוי הנדרש עבור המים שאבדו לאטמוספירה ולשפר את ניהול ההשקיה. מדידה ישירה של אופוטורנספירציה של כלל הנוף של כל סוגי הגידולים ניתן לבצע בשיטת קורלצית הערבולים (Eddy Covariance – EC). קבוצת המחקר שלנו הוכיחה את אמינותה של שיטה זו בבתי רשת. אמנם, שיטה זו (EC) נחשבת כיום לשיטה האמינה והמדויקת ביותר למדידה ישירה של האופוטורנספירציה של כלל הנוף; אולם, הפעלתה מורכבת, היא מבוססת על מיכשור יקר ולא ניתנת לתפעול יום-יומי ע"י מדריך או חקלאי. מכאן נובע שיש חשיבות לפיתוח שיטה זולה ופשוטה יותר למדידה אמינה של שטף האופוטורנספירציה של הגידול החקלאי שתהיה זמינה לשימוש יום-יומי ע"י המגדל.

השיטה המוצעת במחקר זה למדידת שטפים טורבולנטיים כמו אופוטורנספירציה היא שיטת חידוש פני השטח (SR). השיטה מבוססת על תהליך החלפת גושי אוויר בין האטמוספירה לצמחיה. קצב החלפת גושי האוויר ואמפליטודת הטמפרטורה שלהם מייצגים את שטף החום המוחשי עד כדי מקדם כיול. בעקבות גילוי ממצאים אלו פותחו שיטות מתמטיות לניתוח סיגנלים של טמפרטורה ולחישוב שטף החום המוחשי מתוכם. ידיעת שטף החום המוחשי יכולה לשמש בסיס להערכת האופוטורנספירציה תוך ביצוע מדידות נלוות של קרינה נטו ושטף חום לקרקע ושימוש במאזן האנרגיה. השיטה נבחנה על ידינו בשנים האחרונות בהצלחה בשדה פתוח (Rosa et al., 2013, Rosa & Tanny, 2015) ובבתי רשת (Mekhmandarov et al., 2015).

אחד היתרונות של שיטת SR, שנדון בספרות המדעית רק בשנים האחרונות (Castellvi, 2012), הוא האפשרות למדוד את שטף החום המוחשי מעל צמחים נמוכים, בשטחים קטנים יחסית. מאחר וטביעת הרגל (Footprint), כלומר, השטח המשפיע על חיישן SR, דומה לזו של חיישן EC בתת השכבה האינרציאלית (Castellvi, 2012), ניתן להניח כי בהצבה בגובה נמוך יחסית, אורך הנשיבה (Fetch) הנדרש לשיטת SR קטן ביחס לזה הנדרש עבור מערכת EC. מאחר ושיטת FV, שטף-שונות (Flux-Variance), מבוססת על אותה מדידה ובסיס נתונים כמו SR, ניתן לבחון גם את יישום שיטת FV בחלקות קטנות. ממצאים חדשים אלה מעלים את האפשרות לבצע מדידות שטף חום מוחשי ומהן להעריך את האופוטורנספירציה בחלקות קטנות, לדוגמה, בתי רשת קטנים, חלקות גידול קטנות או בניסויים בהם מבוצעים טיפולים במספר חלקות עם חזרות. בחלקות כאלה לא ניתן ליישם שיטות מעבר טורבולנטי אחרות המחייבות אורך נשיבה גדול, כמו שיטת קורלצית הערבולים.

מטרות המחקר כפי שהופיעו בהצעה המקורית:

מטרת המחקר היא לבחון את יעילות שיטת "חידוש פני השטח" (SR) למדידת שטף החום המוחשי והערכת האופוטורנספירציה בחלקות קטנות. המטרות הספציפיות הן: (א) לבחון האם כיול

השיטה עבור חלקה גדולה ואחידה, ניתן ליישום ישיר – או דורש התאמה – עבור חלקות קטנות יותר של אותו גידול. (ב) בחינת יעילות שיטת SR שאינה דורשת כיוול לחלקות קטנות. שתי המטרות הספציפיות ייבחנו הן בבית רשת והן בשדה פתוח. בשנה א' תבחן גם שיטת FV בבית רשת.

התיאוריה של שיטת חידוש פני השטח

מתוך סיגנל הטמפרטורה הנמדד בתדר גבוה (10Hz) מחושבים אמפליטודה וזמן מחזור של רמפות של טמפרטורה בשיטת Structure function (Van Atta, 1977). המשוואות הבאות מייצגות את התיאוריה הבסיסית של ניתוח נתוני הטמפרטורה:

$$\begin{aligned}
 (2) \quad \overline{(\Delta T)^2} &= \overline{(\Delta T_r)^2} + \overline{(\Delta T_e)^2} \\
 (1) \quad \Delta T &= \Delta T_e + \Delta T_c + \Delta T_r \quad (3) \quad \overline{(\Delta T)^3} = \overline{(\Delta T_c)^3} \\
 (4) \quad \overline{(\Delta T)^5} &= \overline{(\Delta T_c)^5} + 10 \cdot \overline{(\Delta T_r)^2} \cdot \overline{(\Delta T_c)^3} \\
 (5) \quad \overline{(\Delta T)^n} &\cong \frac{1}{L} \sum_{i=1+j}^L (T_i - T_{i-j})^n \\
 (6) \quad a^3 + \left(10 \cdot \overline{(\Delta T)^2} - \frac{\overline{(\Delta T)^5}}{\overline{(\Delta T)^3}} \right) a - 10 \overline{(\Delta T)^3} &= 0 \\
 (7) \quad l+s &= -r \cdot a^3 / \overline{(\Delta T)^3} \quad (8a) \quad H_{NC} = \rho \cdot c_p \frac{a}{l+s} z \\
 & \quad (8b) \quad H_{SR} = \alpha H_{NC}
 \end{aligned}$$

במשוואות אלה: ΔT הוא הפרש טמפרטורה מדוד (מ"צ), a היא אמפליטודת הטמפרטורה הממוצעת של הרמפות (מ"צ, ממוצע לחצי שעה), $l+s$ הוא זמן המחזור הממוצע של הרמפות (שנייה, ממוצע לחצי שעה), z הוא עיכוב הזמן (שניה), H_{NC} הוא גובה החיפוש (מ'), H_{SR} הוא שטף החום המוחשי הבלתי מכויל שמתקבל בשיטת SR (וואט/מ²), H_{EC} הוא שטף החום המכויל (וואט/מ²), כאשר α הוא מקדם הכיול (חסר מימד) המתקבל מתוך רגרסיה ליניארית בין H_{NC} , לבין H_{EC} שהוא שטף החום המוחשי המדוד בשיטת קורלציית הערבולים ומשמש כערך ייחוס.

שיטת SR שאינה דורשת כיוול

בשיטה זו מקדם הכיול α אינו מחולץ מהכיוול כמתואר בסעיף ב', אלא מחושב ישירות על בסיס תאוריית MOST בשיטה איטרטיבית. הנוסחה היא (Castellvi et al., 2012, Eq. 1):

$$(9) \quad \alpha = \left[\frac{k}{\pi} \frac{(z^* - d)}{z^2} u_* \phi_h^{-1}(\zeta) \right]^{1/2}$$

כאשר ϕ_h היא פונקציית יציבות, d הוא העתקת מישור האפס, וזמן המחזור של הרמפה הוא $\tau = l + s$.

התיאוריה של שיטת שונות השטח (Flux Variance – FV)

מתוך סיגנל הטמפרטורה המדוד מחושבת סטיית התקן החצי שעתית (σ_T), המשמשת לחישוב שטף החום המוחשי לפי הנוסחה הבאה שנגזרת מתאוריית הדמיות של מונין-אובוקוב (Monin Obukhov Similarity Theory – MOST) (Wesson et al., 2001, Eq. 7):

$$(10) \quad H_{FV} = \rho c_p \langle w' T' \rangle = \rho c_p \left(\frac{\sigma_T}{C_T} \right)^{3/2} \left(\frac{kg(z-d)}{T} \right)^{1/2}$$

המקדם C_T הוא מקדם כיול שערכו המקובל בספרות הוא 0.99. שאר הביטויים בנוסחה הם תכונות פיסיקליות של האוויר וכן משתנים התלויים בגובה הנוף וגובה החיפוש.

פירוט עיקרי הניסויים והתוצאות לתקופת הדו"ח

כללי: בשנה א' נערך ניסוי שדה בבית רשת 25 מש לגידול פלפל בערבה, בשנה ב' נערך ניסוי בשדה כותנה באזור תל נוף, ובשנה ג' נערך ניסוי השלמה בשדה כותנה באזור נגבה.



שנה א'- בית רשת 25 מש לגידול פלפל

תיאור אתר הניסוי ומערכות המדידה

בשנה א' הניסוי החל להתבצע בבית רשת צל לגידול פלפל בבקעת הירדן באזור גילגל. פריסת הצידוד החלה בחודש ספטמבר והתקדמה בהדרגה. לצערנו בתחילת ינואר 2015 נגנב רוב הצידוד כולל אוגרי נתונים שכללו כרטיסי זיכרון עם נתונים מדודים וחיישני לחות ורוח מתקדמים. לכן, למרות השקעת המשאבים, לא ניתן היה לקבל תוצאות משמעותיות מניסוי זה. החל מחודש ינואר ביצענו ניסוי חדש עם רכיבי ציוד בודדים שנותרו בידינו לאחר הגניבה. להלן תיאור מערך הניסוי והתוצאות.

הניסוי בוצע בבית רשת לגידול פלפל ליד מושב חצבה (ערבה). ממדי בית הרשת היו 200×100 מ' כאשר הממד הארוך היה בכוון צפון-צפון מערב (אזימוט 340°). צמחי פלפל נשתלו ב-13-11 אוגוסט 2014. המבנה היה מכוסה ברשת נגד חרקים ארוגה לבנה, 25 מש, עם גג שטוח בגובה של 4 מ' מעל פני הקרקע. התקנת החיישנים החלה באמצע ינואר 2015 והמדידות הסתיימו ב-25 אפריל 2015. דו"ח זה מציג תוצאות לתקופה של 27 ימים, מ-30 מרס עד 25 אפריל 2015. גובה הצמחים בתקופת המדידה היה 2.1 מ'.

הוצבו 2 מערכות קורלציית ערבולים (EC) ומערכת תרמוקפלים ליישום שיטות חידוש פני השטח (SR) ושונות השטף (FV). מערכת קורלציית הערבולים אחת (ראה איור 1-א) כללה חיישן רוח אולטרא סוני תלת צירי (CSAT3, Campbell Sci., USA), וחיישן לחות מסוג קריפטון היגרומטר (H_2O , Campbell Sci., USA) שבדיעבד התברר שהיה לא תקין. מערכת נוספת שהוצבה בסמוך, כללה חיישן רוח אולטראסוני תלת צירי בלבד (81000, R. M. Young, USA). המערכות מדדו בתדר גבוה (10 Hz) את שלושת רכיבי מהירות הרוח, הטמפרטורה, ואת ריכוז אדי המים באוויר (מערכת דרומית בלבד). המערכות הוצבו בגובה של 3 מ' מעל פני הקרקע. שתי מערכות קורלציית הערבולים הוצבו במיקום המאפשר אורך נשיבה של כ-150 מ' לרוח הצפון-מערבית הנפוצה באזור.

	
<p>איור 1-ב: פריסת מערכות המדידה בבית הרשת בחצבה. נקודות a, b, c, d, e – תרמוקפלים מניאטוריים. נקודה e – מערכות קורלציית הערבולים. נקודה f – מדידות זרימת המים בגבעול בשיטת פולס החום. (תמונת בית הרשת מתוך Google Earth).</p>	<p>איור 1-א: מערכת קורלציית הערבולים מוצבת על עמוד בבית הרשת לגידול פלפל בחצבה. ניתן לראות את מד הרוח האולטרא-סוני, מד לחות קריפטון, וקופסאות אלקטרוניקה מחוברות לעמוד.</p>

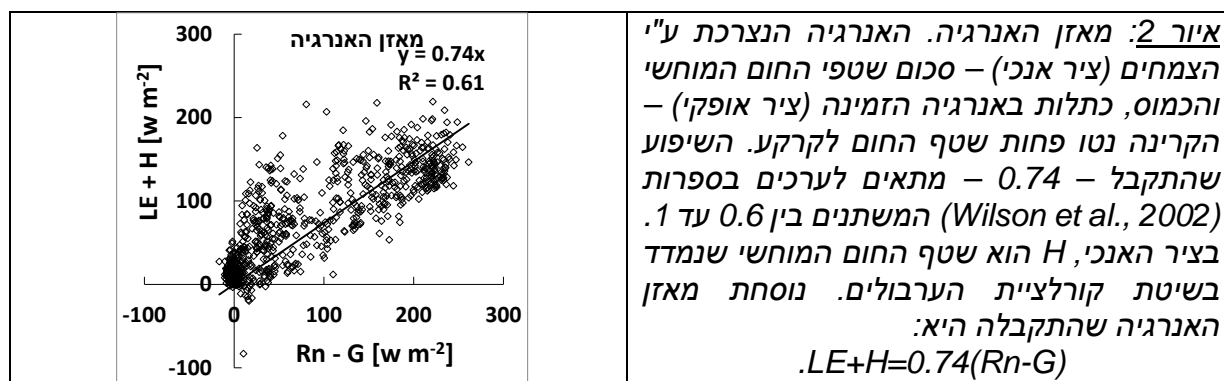
תרמוקפלים מניאטוריים נפרסו בנקודות שונות בבית הרשת כמתואר במפה באיור 1-ב'. הפריסה נועדה לבחון מרחקי נשיבה שונים מקצה בית הרשת המייצגים מדידה מחלקות קטנות באורך משתנה. המערכת כללה 5 חיישני תרמוקפל מניאטוריים מסוג T, בקוטר $50\mu\text{m}$ (COCO-002, Omega Eng., UK). התרמוקפלים a, b, c, e הוצבו בגובה 2.3 מ', מעט מעל קצה הצמחים, ותרמוקפל d בגובה 2.8 מ'.

מערכת למדידת זרימת המים בגבעול המבוססת על שיטת פולס החום (Heat Pulse) הוצבה באזור הצפוני של בית הרשת (נקודה f, איור 1-ב'). חיישנים הוצבו ב-24 צמחי פלפל שמתוכם 10 צמחים הפיקו נתונים אמינים עם מהלך יומי סביר (משעה 04:00 עד 19:30) של זרימת מים בגבעול. חיישנים נוספים מדדו את שאר רכיבי מאזן האנרגיה והמיקרואקלים. חיישן קרינה נטו הוצב מתחת לרשת ומעל לצמחים, בגובה 3.5 מ' מעל פני הקרקע. שלושה חיישני שטף חום קרקעי הוטמנו בתוך הקרקע, בעומק 0.08 מ'. טמפרטורת ולחות אוויר נמדדו ע"י חיישן HMP45C (Campbell Sci., USA). כל המידע שהתקבל ממערכות המדידה נרשם והוקלט ע"י אוגרי נתונים (CR5000, CR23x Campbell Sci., USA) עם כרטיס הרחבת זיכרון בנפח של 2 GB.

תוצאות עיקריות

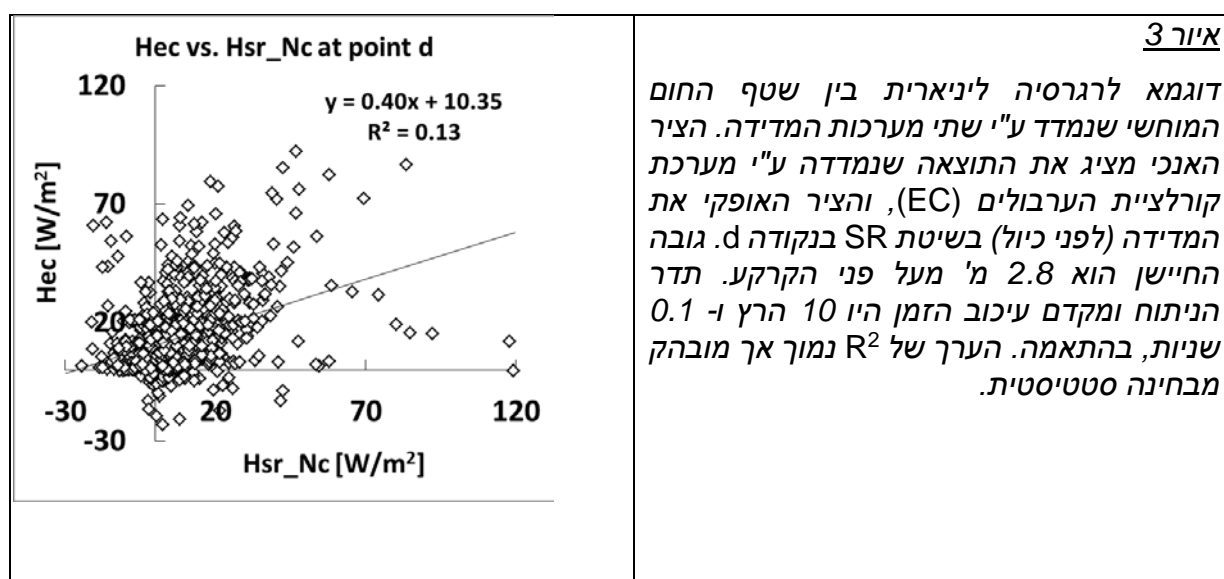
ניתוח סגירת מאזן האנרגיה

מאזן האנרגיה המוצג באיור 2 מבטא את היחס בין האנרגיה הזמינה לצמחיה לבין האנרגיה המנוצלת על ידי הצמחיה כחום מוחשי וחום כמוס. עקב תקלת חיישן הלחות (קריפטון), שטף החום הכמוס חושב מתוך מדידות זרימת המים בגבעול. סגירה מושלמת של מאזן האנרגיה תיתן שיפוע של 1. הגרף מציג שיפוע של 0.74, עם $R^2=0.61$, ערך סביר התומך באמינות המדידות ומאפשר להתייחס לשטף החום המוחשי שנמדד בשיטת קורלציית הערבולים כערך ייחוס לשיטות הנבחנות במחקר זה.



חישוב מקדמי הכיול והמתאם – שיטת חידוש פני השטח (SR):

ניתוח בשיטת SR הפיק מספר חריג של אמפליטודות שליליות (שטף חום מוחש שלילי) לחישובים a,b,c,e. לכן הניתוח נעשה לחישוב d בלבד שהפיק תוצאות סבירות. איור 3 מראה דוגמה של רגרסיה ליניארית בין שטפי החום המוחשי כפי שנמדדו ע"י מערכת קורלציית הערבולים וע"י מערכת SR עבור חישוב התרמוקפל המיניאטורי בנקודה d (מיקום הנקודות מוצג באיור 1-ב). לכל רגרסיה כזאת מתקבל ערך של מקדם כיול α שהוא השיפוע של הקו, ומקדם מתאם R^2 . שטף החום המוחשי שנמדד בשיטת SR (לפני כיול) מחושב לפי נוסחה (8a).

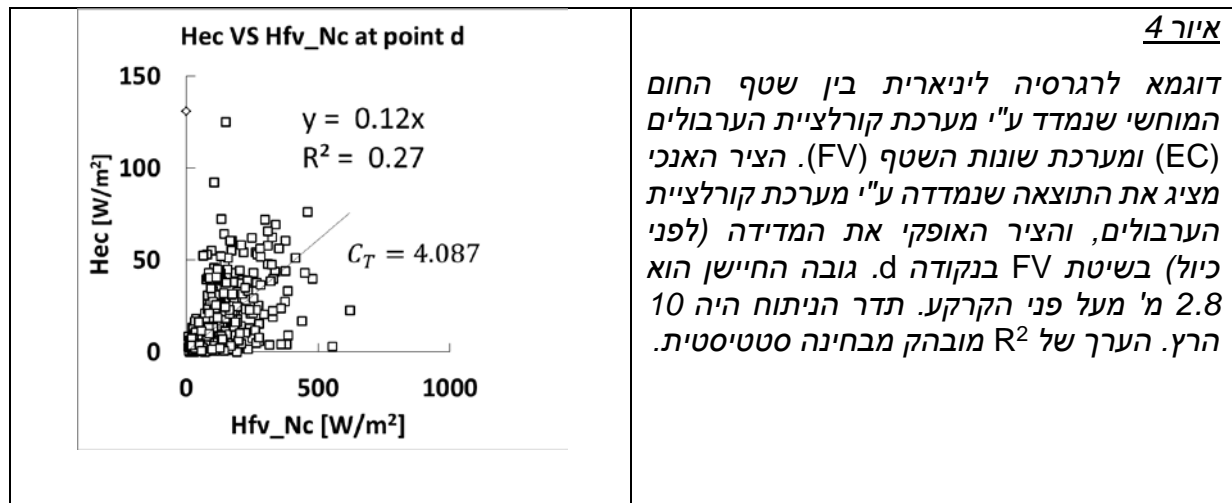


למרות שחישוב d הפיק תוצאה סבירה לכלל אורכי הנשיבה ביחד, מיון התוצאות לפי אורכי נשיבה שונים המייצגים חלקות קטנות בגודל משתנה פגע באיכות התוצאות ולכן לא המשכנו את ניתוח הנתונים בשיטה זו, אלא רק בשיטת FV שנתנה תוצאות טובות יותר.

חישוב מקדמי הכיול והמתאם – שיטת שונות השטף (FV):

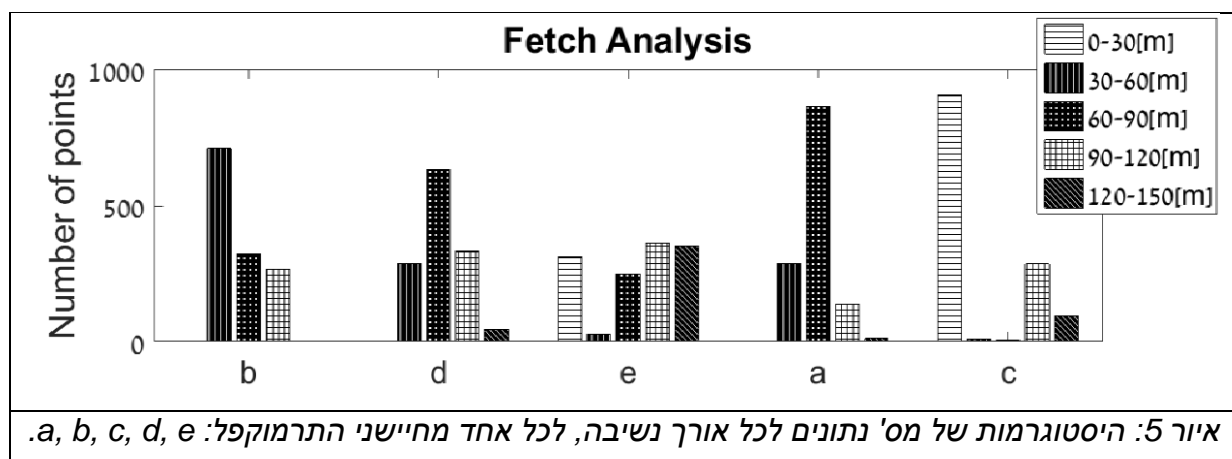
איור 4 מראה דוגמה של רגרסיה ליניארית בין שטפי החום המוחשי כפי שנמדדו ע"י מערכת קורלציית הערבולים וע"י מערכת FV עבור חישוב התרמוקפל המיניאטורי בנקודה d (איור 1-ב). לכל רגרסיה כזאת מתקבל ערך של מקדם הכיול C_T המחושב מתוך השיפוע של הקו, ומקדם מתאם R^2 . שטף החום

המוחשי שנמדד בשיטת FV (לפני כיול) מחושב לפי נוסחה (10). בשיטה זו נערכו חישובים עבור כל חיישני התרמוקפל כמוצג בהמשך.



השפעת אורך הנשיבה (fetch)

המטרה העיקרית של המחקר הנוכחי היא בחינת ההשפעה של גודל החלקה על מקדמי הכיול. במחקר זה גודל החלקה מיוצג על ידי אורך הנשיבה מקצה המבנה עד לחיפוש. כאמור לעיל, המשך הניתוח נערך רק עבור שיטת FV. אורך הנשיבה החצי שעתי חושב על סמך אזימוט הרוח החצי שעתי והגיאומטריה של בית הרשת. בהמשך נערך מיון של כל הנתונים החצי שעתיים לפי אורך הנשיבה. איור 5 מציג היסטוגרמות של מספר הנתונים החצי שעתיים לפי אורכי נשיבה שונים (כלומר, גדלים שונים של חלקות) בתחום 0-150 מ', עבור כל אחד מהחיישנים.



לכל טווח אורכי נשיבה נערכה רגרסיה בין שטפי החום המוחשי שהתקבל ע"י מערכת EC לבין זה המחושב בשיטת FV. רגרסיות אלה הפיקו את המקדם C_T למערכת FV. טבלה 1 להלן מציגה נתונים סטטיסטיים לגבי המקדם C_T ולגבי מקדם המתאם, עבור חיישן d (טבלה עליונה), ועבור כלל החיישנים (טבלה תחתונה), לאורכי הנשיבה השונים. ניתן להבחין בברור כי מקדם הכיול C_T אינו משתנה הרבה עם אורך הנשיבה. לכל מרחקי הנשיבה הוא נע בין 3.5 עד 4.4, אך מקדם המתאם באופן כללי נמצא במגמת עליה עם אורך הנשיבה. הממצא בולט במיוחד לטבלה המציגה את תוצאות כל החיישנים שם התקבלו אף מקדמי מתאם שליליים לאורכי הנשיבה הקטנים, עד 60 מ'.

	חיישן d	אורך נשיבה במטרים				
		0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
C _T	NaN		3.47	4.41	3.76	3.57
R ² C _T	NaN		0.00	0.12	0.33	0.32
slope verification	NaN		0.90	0.85	0.77	0.81
R ² verification	NaN		0.37	0.71	0.65	0.72

	כל החיישנים	אורך נשיבה במטרים				
		0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
CT		3.85	3.76	4.10	3.61	3.70
R ² CT		-0.12	-0.01	0.05	0.15	0.15
slope verification		0.91	0.90	0.90	0.85	0.79
R ² verification		0.63	0.56	0.68	0.62	0.63

טבלה 1: מקדם הכיול C_T של שיטת FV (שורה 1), ומקדם המתאם של הרגרסיה בין שטפי החום המוחשי בשיטת EC ו-FV (שורה 2), עבור אורכי נשיבה שונים. שיפוע (שורה 3) ומקדם המתאם (שורה 4) עבור אימות האופוטטרנספירציה. טבלה עליונה – חיישן d, טבלה תחתונה – כל החיישנים. התאים המסומנים בירוק מציינים ערכים מובהקים של R², ברמה של 5%.

אימות - חישוב האופוטטרנספירציה בחלקות בגדלים שונים

לאחר קבלת הערכים של מקדמי הכיול וחישוב שטף החום המוחשי בשיטת FV, חושבה האופוטטרנספירציה (שטף החום הכמוס) כשארית מתוך מאזן האנרגיה (איור 2). ערכים חצי שעתיים שהתקבלו בדרך זו הושוו בגרף רגרסיה עם הטרנספירציה שהתקבלה מתוך מדידת זרימת המים בגזע בשיטת פולס החום. ההנחה היא שהקרינה נטו ושטף החום לקרקע אחידים בכל בית הרשת ולכן ניתן להשתמש באותו מאזן אנרגיה לכל גדלי החלקות הנבחנו.

הניתוח נעשה לפי אותה חלוקת אורכי נשיבה והתוצאות מוצגות גם כן בטבלה 1, בשורות 3 ו-4. שורה 3 מציגה את השיפוע של גרף האימות (שטף חום כמוס מחושב מפולס החום כנגד זה המחושב בשיטת FV), ושורה 4 מציגה את מקדם המתאם של גרף זה. תוצאות האימות מציגות סטייה בין ההערכה למדידה בשיעורים שבין 9% עד 23%. מקדמי המתאם סבירים ורובם מעל 0.56.

שיטת SR שאינה דורשת כיול

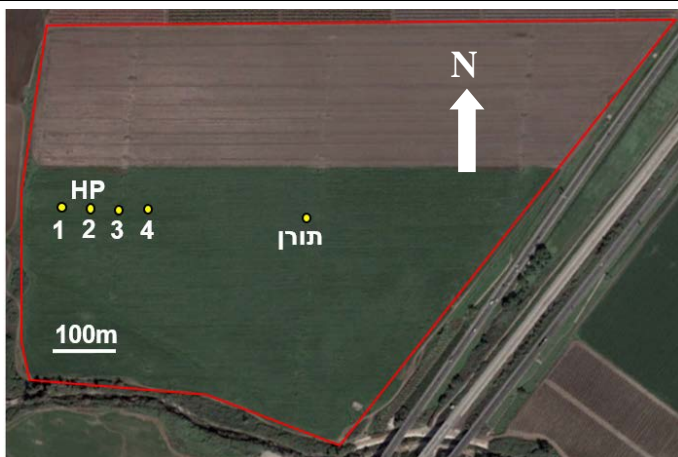
חישוב זה נעשה עבור נתוני חיישן d שעבורו התקבלה תוצאה סבירה בשיטת SR לכל מרחקי הנשיבה. כאמור לעיל החישוב נעשה לפי נוסחה 9 בשיטה איטרטיבית עד להתכנסות של פרמטר היציבות. התכנסות בדיוק של 0.1% התקבלה לאחר 11 צעדי חישוב. ממוצע של ערכי אלפא (מקדם הכיול של שיטת SR) שקטנים מ-10, היה 0.85. ערך זה גבוה מהערך 0.4 המופיע באיור 3, אך באיור 3, התקבל שיפוע עם חותך של 10.3, וכאן מדובר על שיפוע בלבד, עם חותך אפס. לכן, נראה שהתוצאה שהתקבלה ע"י שיטת SR שאינה דורשת כיול סבירה. מסיבות שהוסברו לעיל, לא ניתן היה לבחון את שיטת SR שאינה דורשת כיול עבור אורכי נשיבה שונים.

שנים ב' ו- ג' – שדה כותנה

א. תיאור אתר הניסוי ומערכות המדידה – שנה ב'

הניסוי בוצע בשדה כותנה של מושב יסודות, ליד מחנה תל נוף. השדה היה בעל צורת טרפז, עם אורך ממוצע של 780 מ' ורוחב 540 מ', כאשר הממד הארוך היה בכיוון מזרח-מערב (אזימוט 270°). (ראה איור 6). צמחי כותנה נשתלו ב- 10 מרץ 2016. התקנת החיישנים החלה בסוף יוני 2016 והמדידות הסתיימו ב- 18 ספטמבר 2016. דו"ח זה מציג תוצאות לתקופה של 21 ימים לא רצופים, מ- 20 יולי עד 15 אוגוסט 2016. גובה הצמחים בתקופה זו עלה מ 1.2 מ' עד 1.4 מ'. הפסקות במדידה נבעו עקב ריסוס אווירי שחייב הנמכת תורן המדידה.

הוצבה מערכת קורלציית ערבולים (EC) ומערכת תרמוקפלים מיניאטוריים ליישום שיטת חידוש פני השטח (SR). מערכת קורלציית הערבולים (איור 6-א') כללה חיישן רוח אולטרא-סוני תלת צירי (CSAT3, Campbell Sci., USA), וחיישן לחות מסוג IRGA (LI-7500A, LI-COR, USA). המערכת מדדה בתדר גבוה (20 Hz) את שלושת רכיבי מהירות הרוח, הטמפרטורה, ואת ריכוז אדי המים באוויר. המערכת הוצבה בגובה של 3.65 מ' מעל פני הקרקע, ובמיקום המאפשר אורך נשיבה של כ- 400 מ' לרוח הצפון-מערבית הנפוצה באזור (איור 6-ב') וזאת לצורך אפיון כלל השדה.



איור 6-ב': פריסת מערכות המדידה בשדה הכותנה בתל-נוף. נקודות 1,2,3,4 – תרמוקפלים מיניאטוריים. תורן - מערכת קורלציית הערבולים וחיישנים נוספים. HP – מדידות זרימת המים בגבעול בשיטת פולס החום. שטח גידול הכותנה מוקף בקו אדום. (תמונת השדה מתוך Google Earth).

איור 6-א': מערכת קורלציית הערבולים מוצבת על עמוד בשדה הכותנה בתל-נוף. ניתן לראות את מד הרוח האולטרא-סוני, מד לחות IRGA, חיישן קרינה נטו, חיישן טמפר' ולחות אוויר וקופסאות אלקטרוניקה מחוברות לעמוד.

תרמוקפלים מיניאטוריים נפרסו בנקודות שונות בשדה כמתואר במפה באיור 6-ב'. הפריסה נועדה לבחון מדידה מחלקות בגדלים שונים המיוצגות ע"י מרחקי נשיבה שונים מקצה השדה. המערכת כללה 9 חיישני תרמוקפל מיניאטוריים מסוג T, בקוטר $50\mu\text{m}$ (COCO-002, Omega Eng., UK).

התרמוקפלים מדדו בתדר של 10Hz. גבהי ההצבה של התרמוקפלים בנקודות המדידה השונות רשומים בטבלה להלן:

נקודת מדידה (איור 1-ב')	גובה החיישנים (מ')
1	1.5
2	1.83 ; 1.5
3	2.3 ; 1.5
4	2.8 ; 1.5
תורן (תוצאות לא מוצגות בדו"ח זה)	3.65 ; 1.5

חיישנים נוספים מדדו את שאר רכיבי מאזן האנרגיה והמיקרו-אקלים. חיישן קרינה נטו הוצב מעל לצמחים, בגובה 3.65 מ' מעל פני הקרקע (איור 6-א'). ארבעה חיישני שטף חום קרקעי הוטמנו בתוך הקרקע, בעומק 0.08 מ'. שני תרמוקפלים למדידת טמפרטורת הקרקע הוטמנו בעומקים של 0.02 מ' ו- 0.06 מ' מעל כל חיישן שטף חום לקרקע. טמפרטורה ולחות אוויר נמדדו ע"י חיישן HMP45C (Campbell Sci., USA). מערכת למדידת זרימת המים בגבעול המבוססת על שיטת פולס החום (Heat Pulse) הוצבה באזור נקודה 2 (איור 6-ב') מצפון לחיישן התרמוקפל. חיישנים הוצבו ב- 12 צמחי כותנה. כל המידע שהתקבל ממערכות המדידה נרשם והוקלט ע"י אוגרי נתונים (CR3000, CR23x Campbell Sci, USA) עם כרטיסי הרחבת זיכרון בנפח של 2 GB.

ב. תיאור אתר הניסוי ומערכות המדידה – שנה ג' (ניסוי השלמה)

המטרה העיקרית של ניסוי ההשלמה הייתה אפיון השונות המרחבית של מהירות החיכוך בשדה כותנה, וזאת לצורך הפעלת מודלים של טביעת רגל (Footprint) עבור החיישנים המיניאטוריים המודדים חלקות קטנות בגודל משתנה, כפי שיוצג בהמשך. הניסוי בוצע בשדה כותנה של קיבוץ נגבה, ליד הקיבוץ. השדה היה בעל צורת מלבן, עם אורך של 760 מ' ורוחב 530 מ', כאשר הממד הארוך היה בכיוון צפון דרום (אזימוט 14°). התקנת החיישנים החלה בסוף יולי 2017 והמדידות הסתיימו ב- 17 ספטמבר 2017. גובה הצמחים בתקופה זו עלה מ 1.4 מ' עד 1.6 מ'.

הוצבה מערכת קורלציית ערבולים (EC) אשר כללה חיישן רוח אולטרא-סוני תלת צירי (CSAT3, Campbell Sci., USA), וחיישן לחות מסוג קריפטון היגרומטר (KH2O, Campbell Sci., USA). המערכת מדדה בתדר גבוה (10 Hz) את שלושת רכיבי מהירות הרוח, הטמפרטורה, ואת ריכוז אדי המים באוויר. המערכת הוצבה בגובה של 3.7 מ' מעל פני הקרקע, ובמיקום המאפשר אורך נשיבה של כ- 450 מ' לרוח הצפון-מערבית הנפוצה באזור. מערכת זו מדדה ערכי ייחוס של כלל השדה.

מדי רוח הוצבו בשתי נקודות שונות בשדה בדומה לפריסת התרמוקפלים מהניסוי בשנה ב'. הפריסה נועדה לבחון השפעת חלקות קטנות המיוצגות ע"י מרחקי נשיבה שונים מקצה השדה. המערכת כללה 2 חיישני רוח אולטרא סוני תלת צירי (81000, R. M. Young, USA) אשר מדדו בתדר גבוה (10 Hz) את שלושת רכיבי מהירות הרוח. החיישנים הוצבו בגבהים של 1.7 ו- 1.9 מ' במיקומים המאפשרים אורכי נשיבה של כ- 50 ו- 100 מ' לרוח הצפון-מערבית הנפוצה באזור.

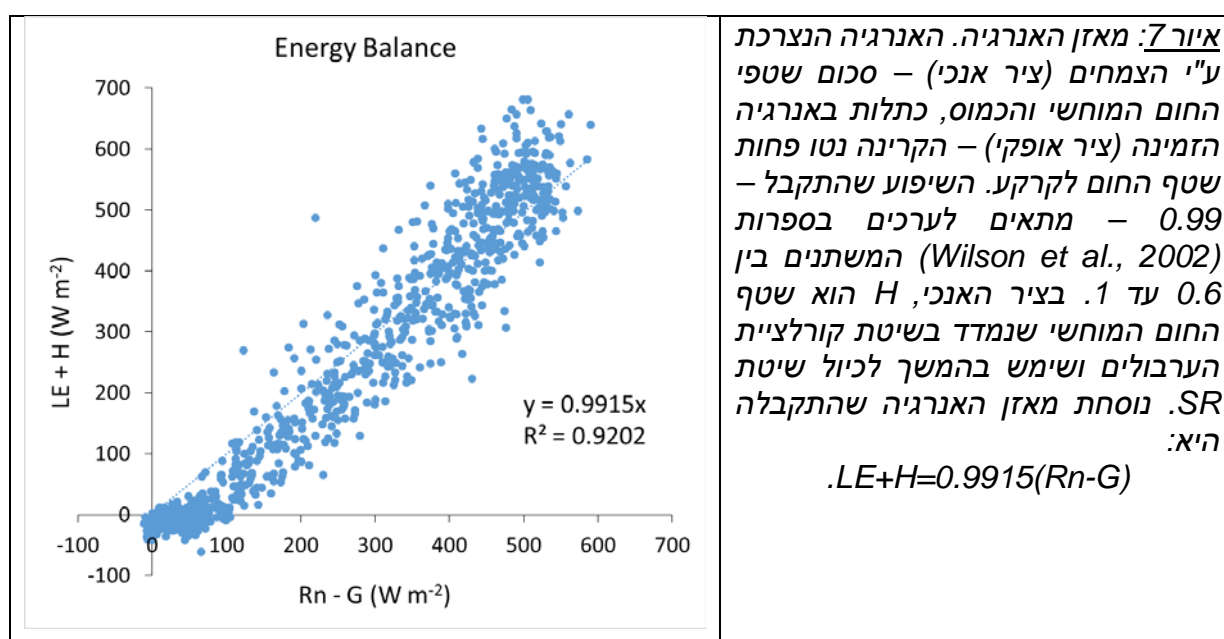
חיישנים נוספים מדדו את שאר רכיבי מאזן האנרגיה והמיקרו-אקלים. חיישן קרינה נטו הוצב מעל לצמחים, בגובה 3.7 מ' מעל פני הקרקע. טמפרטורה ולחות אוויר נמדדו ע"י חיישן HMP45C

(Campbell Sci., USA). כל המידע שהתקבל ממערכות המדידה נרשם והוקלט ע"י אוגרי נתונים (CR3000 Campbell Sci, USA) עם כרטיסי זיכרון בנפח של 2 GB.

תוצאות עיקריות משנים ב' ו- ג' (כותנה)

ניתוח סגירת מאזן האנרגיה

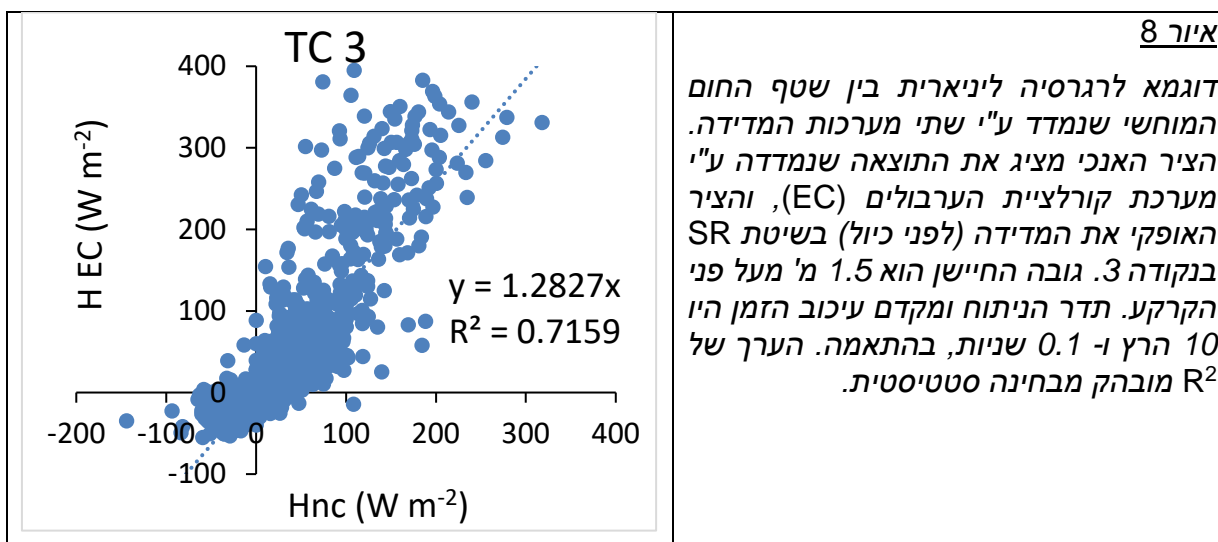
מאזן האנרגיה המוצג באיור 7 מבטא את היחס בין האנרגיה הזמינה לצמחיה לבין האנרגיה המנוצלת על ידי הצמחיה כחום מוחשי וחום כמוס. סגירה מושלמת של מאזן האנרגיה תיתן שיפוע של 1. הגרף מציג שיפוע של 0.99, עם $R^2=0.92$, ערך מצוין התומך באמינות המדידות ומאפשר להתייחס לשטף החום המוחשי שנמדד בשיטת קורלציית הערבולים עבור כלל השדה כערך ייחוס למדידות מהחלקות הקטנות באמצעות השיטות הנבחנות במחקר זה.



חישוב מקדמי הכיול והמתאם – שיטת חידוש פני השטח (SR):

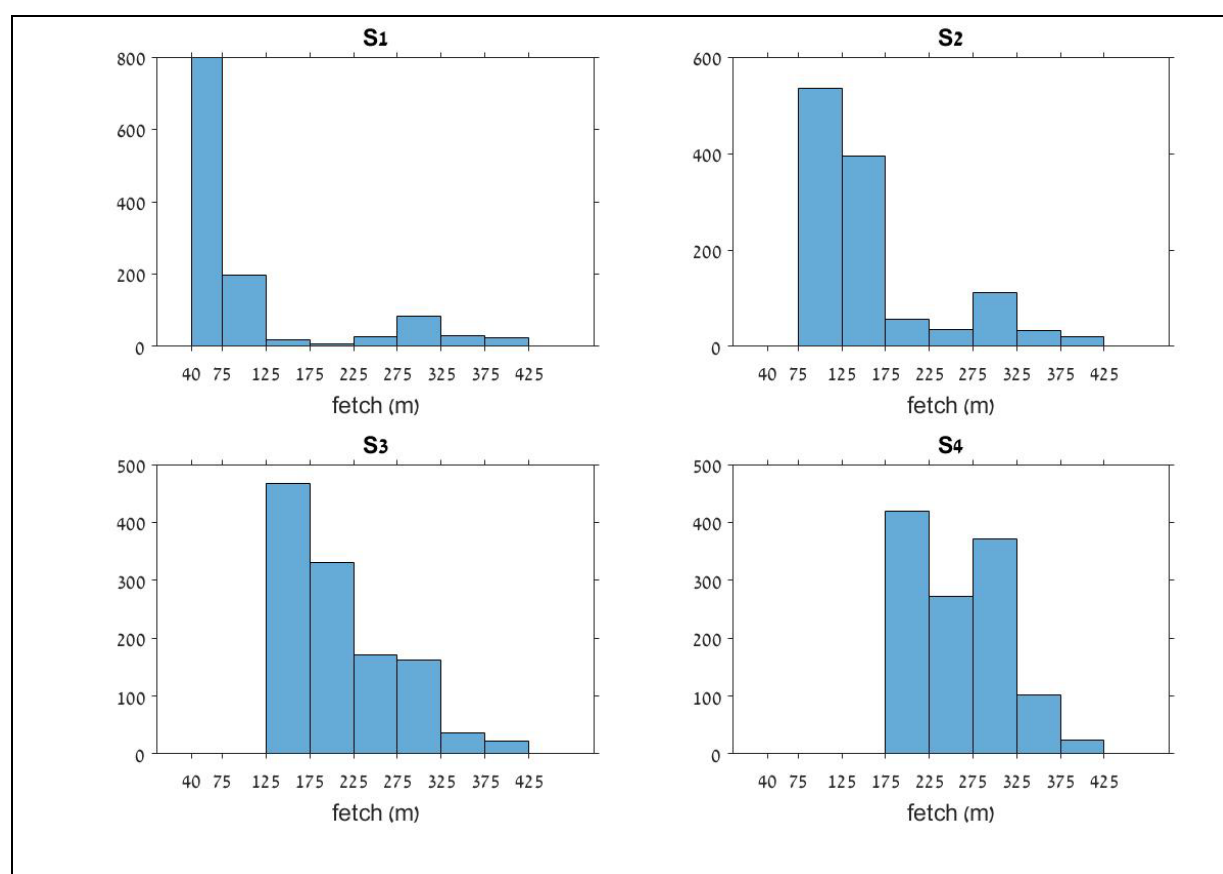
איור 8 מראה דוגמה של רגרסיה ליניארית בין שטפי החום המוחשי (חצי שעתי) כפי שנמדדו ע"י מערכת קורלציית הערבולים וע"י מערכת SR עבור חישן התרמוקפל המיניאטורי בנקודה 3 (מיקום הנקודות מוצג באיור 6-ב'). לכל רגרסיה כזאת מתקבל ערך של מקדם כיול α שהוא השיפוע של הקו, ומקדם מתאם R^2 . שטף החום המוחשי שנמדד בשיטת SR (לפני כיול) מחושב לפי נוסחה (8a).

איור 8

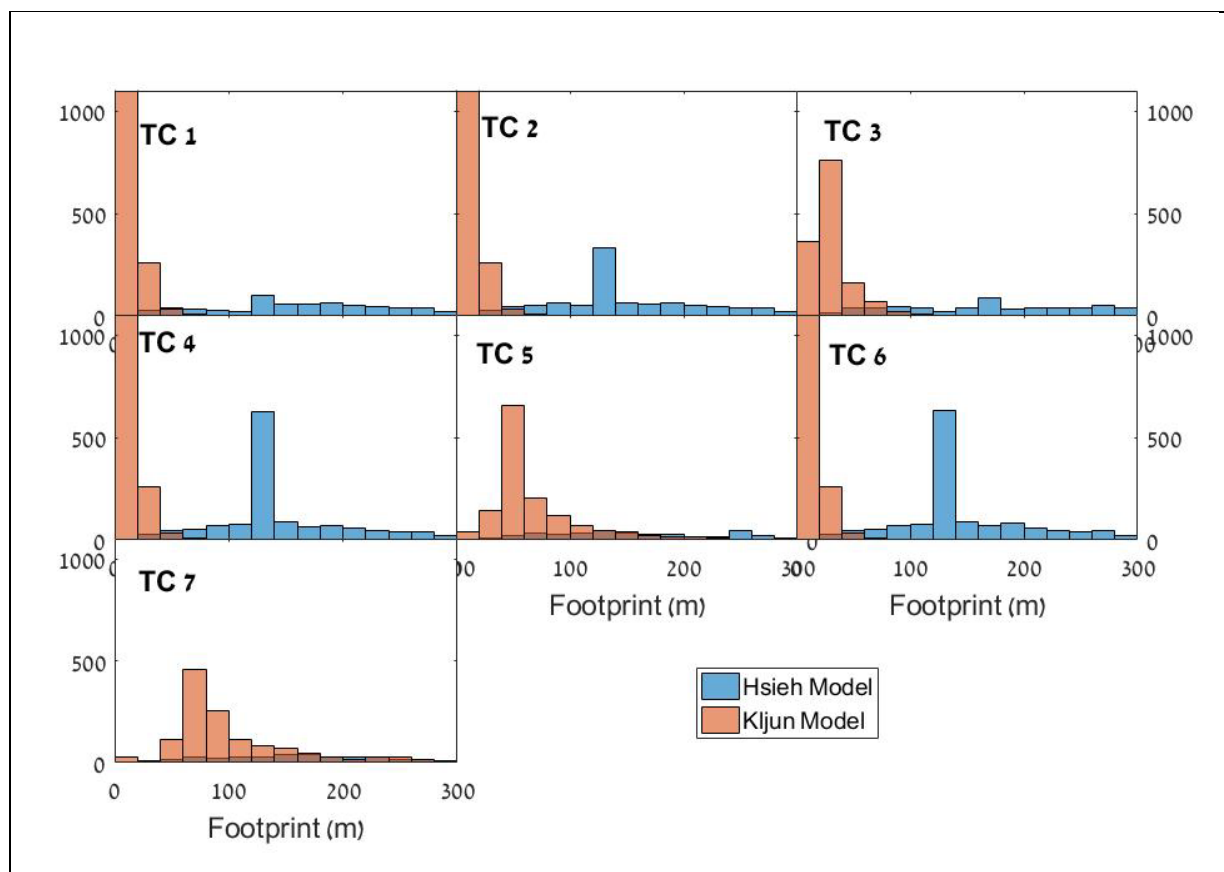


השפעת אורך הנשיבה (fetch)

המטרה העיקרית של המחקר הנכחי היא בחינת ההשפעה של גודל החלקה המיוצגת ע"י אורך הנשיבה על מקדם הכיול.



איור 9: היסטוגרמות של מס' נתונים לכל תחום אורך נשיבה (גודל חלקה), לכל אחד מהמיקומים של חיישני התרמוקפל: 1,2,3,4 (מפה באיור 6-ב'). ההיסטוגרמות חושבו עד מרחק נשיבה של 425 מ' מתוך הנחה שמעל ערך זה, שכבת הגבול בשווי משקל ואין השפעה למרחק הנשיבה.



איור 10: היסטוגרמות של מס' נתונים לכל תחום אורך פוטפרינט, לכל אחד מחיישי התרמוקפל, המחושבים לפי שני המודלים השונים: Kljun et al. (2004) ו-Hsieh et al. (2000).

אורך הנשיבה החצי שעתי לכל חיישן חושב על סמך אזימוט הרוח החצי שעתי והגיאומטריה של שדה הכותנה. בהמשך נערך מיון של כל הנתונים החצי שעתיים לפי אורך הנשיבה. איור 9 מציג היסטוגרמות של מספר הנתונים החצי שעתיים לאורכי נשיבה שונים בתחום 0-425 מ', עבור כל אחד מהחיישנים. ההיסטוגרמות באיור 9 מייצגות בברור את מיקום החיישן בשדה ביחס לרוח השלטת. עבור חיישן 1 שמוקם סמוך לקצה השדה רוב אורכי הנשיבה היו עד 100 מ', ואילו בחיישן 4 שמוקם כ-200 מ' מהקצה המערבי של השדה נמדדו אורכי נשיבה עד 350 מ', וזאת עבור רוחות שבאו מכיוון שאינו של הרוח השלטת. איור 10 מציג היסטוגרמות של מרחקי נשיבה לפי מודלים של טביעת רגל (ראה פרוט בהמשך).

ניתוח השפעת אורכי הנשיבה, כלומר גודל החלקה הנמדדת, על מקדם המשקל של שיטת SR בוצע בשלוש דרכים. (הניתוח הנוכחי לא כלל את חיישי התרמוקפל שהוצבו על התורן). בדרך הראשונה החישוב נערך בנפרד לכל חיישן, עבור כל אורכי הנשיבה הזמינים לאותו חיישן (טבלה 2 להלן). עבור אותה שיטת מיון הנתונים, טבלה 3 מציגה השוואה בין כיוול שיטת SR, כאשר ערך הייחוס של H התקבל ישירות מהמדידה בשיטת EC לבין הכיוול כאשר H התקבל כשארית מאזן האנרגיה לפי שיטת פולס החום. בטבלה 3 ניתן לראות הבדלים קטנים בין מקדמי הכיוול שהתקבלו בשתי השיטות. בדרך השנייה נערך מיון לפי אורכי הנשיבה הגיאומטריים (לפי מידות השדה), במשותף עבור כל מיקומי החיישנים – 1,2,3,4, והחישובים נערכו בנפרד לכל תחום של אורכי נשיבה, בין 0-225 מ' (טבלה 4 להלן). בדרך

השלישית, עבור כל ערך מדוד (חצי שעתי) חושבו שני מודלים של טביעת רגל, מודל Kljun, ומודל Hsieh, ומיון הנתונים בוצע לפי אורך טביעת הרגל של 90% מהשטף (איור 10). אורך טביעת הרגל מייצג את גודל החלקה שבפועל השפיעה על החיפוש. בשלושת הדרכים, החישוב כלל את השלבים הבאים: (א) חישוב אמפליטודה וזמן מחזור לפי נוסחאות (6,7); (ב) חישוב H_{NC} לפי משוואה (8a) ורגרסיה של H_{EC} vs. H_{NC} (או מחישוב H כשארית מאזן האנרגיה, כאשר החום הכמוס מחושב ממדידות פולס החום), ממנה חולץ מקדם הכיול α ; (ג) חישוב H_{SR} (לפי נוסחה 8b) וחילוף שטף החום הכמוס (או פוטנציאל רגריסיה) ממאזן האנרגיה תוך שימוש בנוסחה $LE_{SR} = Rn - G - H_{SR}$; (ד) ביצוע רגרסיה של LE_{EC} vs. LE_{SR} , לאימות התוצאה. טבלאות 2 ו-3 מציגות נתונים סטטיסטיים לגבי החישוב בדרך הראשונה וטבלה 4 את התוצאות לפי הדרך השנייה. בטבלה 4 ניתן להבחין בברור כי מקדם הכיול α אינו משתנה הרבה עם אורך הנשיבה. לכל מרחקי הנשיבה α השתנה בין 0.86 עד 1.14, ללא מגמה ברורה. מקדם המתאם הגבוה ביותר נמצא באורך הנשיבה הקצר ביותר. ממצא זה נמצא בקרוב בהתאמה בשתי שיטות הניתוח. בטבלה 2, חיישנים מס' 1-3L היו בעלי R^2 קרוב ל-0.7 לכל אורכי הנשיבה, ובטבלה 4, אורך הנשיבה הנמוך ביותר הציג מתאם גבוה ביותר של $R^2 = 0.65$.

חיישן (מס' נתונים ברגרסיה)							
4U (889)	4L (616)	3U (869)	3L (834)	2U (1345)	2L (1328)	1 (1278)	
1.24	0.59	0.44	0.89	1.28	1.35	0.85	α
0.37	0.39	0.40	0.69	0.71	0.69	0.70	R^2
0.85	0.97	0.96	0.90	0.98	0.99	1.02	שיפוע התאמה LE
0.77	0.95	0.94	0.87	0.90	0.89	0.88	R^2 התאמה LE
U – חיישן עליון; L – חיישן תחתון							
<p><u>טבלה 2: מיון לפי חיישן: מקדם הכיול α של שיטת SR (שורה 1), ומקדם המתאם של הרגרסיה בין שטפי החום המוחשי בשיטת EC ו-SR (שורה 2), עבור מיקומי החיישנים השונים. שיפוע (שורה 3) ומקדם המתאם (שורה 4) עבור אימות האופוטנרנספירציה. כל הערכים של R^2, היו מובהקים ברמה של 5%.</u></p>							

	חיישן (מס' נתונים ברגרסיה)				
	4L	3L	2U	1	
	1.76	0.95	1.22	0.93	α
	0.72	0.64	0.73	0.68	R^2
	1.79	1.03	1.33	0.88	β
	0.45	0.40	0.52	0.41	R^2

U – חיישן עליון; L – חיישן תחתון

טבלה 3: השוואת מקדמי כיול ל SR לפי שיטות EC ו-HP: מקדם הכיול α של שיטת SR (שורה 1), ומקדם המתאם של הרגרסיה בין שטפי החום המוחשי בשיטת EC ו-SR (שורה 2), עבור חיישנים שונים. מקדם הכיול β של שיטת SR (שורה 3), ומקדם המתאם של הרגרסיה בין שטפי החום המוחשי בשיטת HP ו-SR (שורה 4), עבור חיישנים שונים. כל הערכים של R^2 , היו מובהקים ברמה של 5%. הערכים שונים מאלו בטבלה 2 כי נלקחו רק נתונים זמינים בו זמנית לשתי הסדרות לצורך ההשוואה.

	אורך נשיבה (גודל חלקה) (מ') (מס' נתונים ברגרסיה)				
	175-225 (733)	125-175 (960)	75-125 (831)	40-75 (587)	
	0.89	1.06	1.14	0.86	α
	0.55	0.54	0.51	0.65	R^2
	0.96	0.98	1.00	1.05	שיפוע התאמה LE
	0.84	0.83	0.86	0.83	R^2 התאמה LE

טבלה 4: מיון לפי אורך נשיבה גיאומטרי: מקדם הכיול α של שיטת SR (שורה 1), ומקדם המתאם של הרגרסיה בין שטפי החום המוחשי בשיטת EC ו-SR (שורה 2), עבור אורכי נשיבה שונים. שיפוע (שורה 3) ומקדם המתאם (שורה 4) עבור אימות האופוטורנספירציה. כל הערכים של R^2 , היו מובהקים ברמה של 5%.

תוצאות של מהירות החיכוך, u_* , מניסוי ההשלמה בשנה ג' לצורך שילובם במודלים של הפוטפרינט:

תוצאות הניסוי בשנה ג' נתנו את הקשר שבין מהירות החיכוך של הרוח (u_*) בחיישן המוצב בתורן לבין החיישנים המוצבים במרחק 50 ו 100 מ' מקצה השדה בכיוון הרוח השלטת:

$$u_{*50} = 1.27 \times u_{*100}; u_{*100} = 1.20 \times u_{*100}$$

על פי נוסחאות הקשר הללו, בוצע תיקון ל u_* שנמדד בתורן, והערכים המתוקנים הוכנסו בחישוב הפוטפרינט (גודל חלקה משפיע) בשני המודלים. טבלה 5 מציגה את הממצאים ממדינים לפי מרחקי נשיבה ממודלים אלה. בשני המודלים ניתן לראות כי אין מגמה ברורה של השתנות מקדם הכיול עם אורך הנשיבה.

פוטפרינט לפי מודל Kljun (מ') (מס' נתונים ברגרסיה)				
60-120 (900)	30-60 (1166)	15-30 (2127)	0-15 (2367)	
1.01	0.60	0.98	0.99	α
0.36	0.33	0.60	0.62	R^2
0.85	0.93	1.00	0.94	שיפוע התאמה LE
0.81	0.90	0.91	0.84	R^2 התאמה LE

פוטפרינט לפי מודל Hsieh (מ') (מס' נתונים ברגרסיה)				
175-225 (554)	125-175 (1453)	75-125 (546)	25-75 (396)	
1.34	0.87	1.14	1.06	α
0.48	0.53	0.56	0.39	R^2
0.70	0.92	0.84	0.71	שיפוע התאמה LE
0.75	0.87	0.63	0.77	R^2 התאמה LE

טבלה 5: מיון לפי מודל פוטפרינט: מקדם הכיול α של שיטת SR (שורה 1), ומקדם המתאם של הרגרסיה בין שטפי החום המוחשי בשיטת EC ו-SR (שורה 2), עבור אורכי פוטפרינט שונים המחושבים לפי שני מודלים שונים (טבלה עליונה וטבלה תחתונה). שיפוע (שורה 3) ומקדם המתאם (שורה 4) עבור אימות האוּפּוּטְרַנְסְפִּירַצִּיה. כל הערכים של R^2 , היו מובהקים ברמה של 5%.

אימות - חישוב האופוטטרנספירציה בחלקות בגדלים שונים והשוואה לכלל השדה

לאחר קבלת הערכים של מקדמי הכיול וחישוב שטף החום המוחשי בשיטת SR, חושבה האופוטטרנספירציה (שטף החום הכמוס) כשארית מתוך מאזן האנרגיה (איור 7). ערכים חצי שעתיים שהתקבלו בדרך זו הושוו בגרף רגרסיה עם האופוטטרנספירציה שהתקבלה ממערכת קורלציית הערבולים. ההנחה היא שהקרינה נטו ושטף החום לקרקע אחידים בכל בית הרשת ולכן ניתן להשתמש באותו מאזן אנרגיה לכל אורכי הנשיבה.

הניתוח נעשה לפי אותה חלוקת אורכי נשיבה (גדלי חלקות) והתוצאות מוצגות גם כן בטבלאות 2,4,5 בשורות 3 ו-4 בכל טבלה. שורה 3 מציגה את השיפוע של גרף האימות (שטף חום כמוס מחושב מקורלציית הערבולים כנגד זה המחושב בשיטת SR), ושורה 4 מציגה את מקדם המתאם של גרף זה. תוצאות האימות מציגות סטייה בין ההערכה למדידה בשיעור של עד 15% לכל שיטות המיון פרט לחישוב לפי מודל טביעת הרגל של Hsieh שם התקבלה סטייה מרבית של 30% לאורכי הנשיבה הקצרים ביותר והארוכים ביותר. מקדמי המתאם בכל השיטות היו גבוהים מ-0.63.

שיטת SR שאינה דורשת כיול

חישוב זה נעשה עבור נתוני חישן תרמוקפל שהוצב בגובה 1.83 מ' (נקודה 2 באיור 6 – ב'). נותחו נתונים ל 11 ימים (לא רצופים), בין 20.7.2016, עד 4.8.2016 (סה"כ 528 ערכים חצי שעתיים). כאמור לעיל החישוב נעשה לפי נוסחה 9 בשיטה איטרטיבית עד להתכנסות של פרמטר היציבות. האיטרציה הכרחית מאחר ופונקציית היציבות כוללת את שטף החום המוחשי המחושב לפי α . התכנסות בדיוק של 0.001% התקבלה לאחר 12 או 13 צעדי חישוב. לכל חצי שעה מחושב ערך של אלפא, והממוצע של

ערכי אלפא (מקדם הכיול של שיטת SR) עבור $H_{SR} < 1000$ (נבחר כגבול עליון), היה 4.15, גבוה בערך פי 4 מהערכים שהתקבלו בשיטת החישוב הרגילה. רגרסיה של ערכי H מחושבים לפי שיטת SR שאינה דורשת כיול מול ערכי H_{EC} מדודים בשיטת EC, נתנה מקדם מתאם גבוה יחסית של $R^2 = 0.69$. לכן נראה שהתוצאה שהתקבלה ע"י שיטת SR שאינה דורשת כיול היא סבירה.

דיון

שנה א': מחקר זה הוא ניסיון ראשון לבחון את היעילות של שיטות פשוטות, כמו "חידוש פני השטח" (SR), ו"שטף-שונות" (FV), להערכת אוופוטורנספירציה בחלקות קטנות. בהתאם לתוכנית המחקר, החלקות הקטנות יוצגו ע"י אורכי נשיבה משתנים. ניסיון קודם שלנו הראה כי שיטת SR פחות יעילה בבתי רשת נגד מזיקים (50 מש). לכן מחקר זה התחיל בבית רשת צל עם רשת דלילה יחסית, אך עקב גניבת הציוד עברנו לבית רשת אחר שהיה זמין בעל רשת 25 מש, מעט דלילה יותר מ-50 מש. ההערכה הייתה שתחת רשת זו שיטת SR תפיק תוצאות סבירות. למרות זאת, השיטה הפיקה תוצאות טובות רק בחיפוש d, וגם שם לא ניתן היה לקבל תוצאות סבירות כאשר נערך מיון של התוצאות לפי אורכי נשיבה שונים. ייתכן והסיבה היא שחיפוש d הוצב בגובה 2.8 מ', גבוה מעט לעומת שאר החיפשים שהוצבו קרוב יותר לקצה הנוף בגובה 2.3 מ', אם כי בעבר קיבלנו תוצאות סבירות גם מחיפשים שהיו קרובים מאד לקצה הצמחים. פריסת החיפשים, בהתאמה עם הרוח הנפוצה שהייתה או צפון מערבית או צפון מזרחית, הביאה למצב שבארבעה מתוך 5 חיפשים היו נפוצים ביותר אורכי נשיבה עד 90 מ' (איור 5). המרחק הגדול ביותר של 150 מ' היה נפוץ בחיפוש e, ובמידה פחותה בחיפוש c, עקב כיווני הרוח. ניתוח מקדם הכיול C_t והמתאם (של רגרסיית שטף החום המוחשי) בשיטת FV (טבלה 1) מראה כי מקדם הכיול לכל החיפשים השתנה בין 3.61, עד 4.1, שינוי של כ-15% כתלות במרחקי הנשיבה, עם ערך ממוצע של 3.8. תוצאה זו מציעה כי לגודל החלקה, המיוצג ע"י אורך הנשיבה, השפעה מועטה על מקדם הכיול, ולכן ניתן להשתמש במקדם הכיול של כלל הנוף גם לחלקות הקטנות יותר. מעניין לציין כי מקדם כיול זה גדול פי 4 בערך מהמקדם המקובל בספרות לשטח פתוח, שם ערכו קרוב ל-1. נראתה מגמה של עליית מקדם המתאם R^2 עם אורך הנשיבה. ממצא זה מצביע על כך שבאורך נשיבה גדול יותר גבוהה יותר רמת האמינות של הקשר בין שטפי החום המוחשי המתקבלים בשתי השיטות.

שנים ב' + ג': ניסיון קודם שלנו בעגבניות לתעשייה ובכותנה הראה כי שיטת SR יעילה בהערכת אוופוטורנספירציה של כלל השדה (Rosa et al., 2013; Rosa and Tanny, 2015), ולכן הניסויים בשנים ב'+ג' נערכו גם הם בגידול כותנה. בשנה ב' חיישני התרמוקפל המיניאטוריים (לא כולל החיפוש שהוצב על התורן הראשי) נפרשו כך שעבור הרוח השלטת באזור, רוח צפון-מערבית, יתקבל טווח של חלקות בגדלים שונים (אורכי נשיבה) עד כ-225 מ'. נבחנו שלוש שיטות ניתוח ומיון, לייצוג הגדלים השונים של החלקות: לפי מיקום חיישן, לפי אורך נשיבה גיאומטרי ולפי מודל טביעת רגל.

חום מוחשי: נמצא כי מקדם הכיול α לא השתנה הרבה עם אורך הנשיבה (טבלה 4) ולא נצפתה מגמת שינוי ברורה. כמעט אותו ערך, 0.86 ו-0.89 התקבל לאורך הנשיבה הקצר ביותר, 40-75 מ', והארוך ביותר, 175-225 מ', בהתאמה. בערכי ביניים של אורך נשיבה התקבלו מקדמי כיול מעט גבוהים יותר,

של 1.14 ו-1.06. ממצא זה מרמז על כך שלאורך הנשיבה השפעה קטנה על מקדם הכיול. לכן, נראה שמקדם הכיול שמתקבל לכלל הנוף יכול לשמש גם למדידה של חלקות קטנות. גם מקדם המתאם R^2 לא הציג השתנות ברורה עם אורך הנשיבה. גם בניתוח לפי מודלים של פוטפרינט (טבלה 5) לא נצפתה מגמה ברורה של השתנות מקדם הכיול עם אורך הנשיבה. במודל של Kljun, נצפתה ירידה של מקדם המתאם באורכי הנשיבה הגדולים יותר. נערכה השוואה בין החישוב לפי מדידה ישירה של חום מוחשי בשיטת EC, לבין חילוץ החום המוחשי ממאזן האנרגיה כאשר החום הכמוס מחושב לפי מדידת פולס החום (טבלה 3). ההשוואה מציגה מקדמי כיול די קרובים בשתי השיטות, אבל מקדמי המתאם היו גבוהים יותר בחישוב לפי המדידה הישירה בשיטת קורלציית הערבולים. זה נובע כנראה מכך שהחישוב של H המבוסס על מדידות פולס החום הוא עקיף ומכניס שגיאה לתהליך.

אופופטרנספירציה: בניתוח הנתונים לפי מיקום חיישן (טבלה 2) ולפי אורך נשיבה גיאומטרי (טבלה 4) וכן לפי המודל של Kljun (טבלה 5), התקבלו הערכות טובות של האופופטרנספירציה עם סטייה מרבית של 15%. הניתוח לפי המודל של Hsieh (טבלה 5) הפיק הערכה של אופופטרנספירציה עם סטייה של כ-30% לאורכי הנשיבה הקצרים והארוכים. ממצאים אלה מראים יכולת סבירה של שיטת SR להערכת האופופטרנספירציה מחלקות קטנות בשדה פתוח. יש לזכור כי בהערכת האופופטרנספירציה הנחנו כי הקרינה נטו ושטף החום לקרקע אחידים בכל השדה, שהיא הנחה סבירה לשדה כותנה בשתילה צפופה. במחקר זה נבחנו לראשונה מודלים של טביעת רגל עבור חיישני תרמוקפל מיניאטוריים, וזאת ע"י התאמת הערך של מהירות החיכוך למיקומים השונים בשדה, נתון שהתקבל מניסוי ההשלמה. המודלים שנבחרו הם שני מודלים נפוצים המופעלים בתוכנת EDDYPRO של חברת LICOR, תוכנה חינומית ונפוצה מאד לעיבוד וניתוח נתונים של מערכות קורלציית הערבולים. התוצאות מראות הבדלים גדולים באורכי הנשיבה המתקבלים באמצעות שני המודלים השונים. נערך גם מיון לפי אורכי נשיבה גיאומטריים (אזימוט רוח ומידות השדה). בכל שיטות החישוב הערכים של מקדם הכיול היו בדרך כלל די דומים, וגם אם נצפו שינויים, לא ניתן היה להבחין במגמה ברורה של שינוי.

השיטה של חידוש פני השטח שאינה דורשת כיול נבדקה עבור אחד החיישנים, וללא מיון של אורכי הנשיבה. הממצאים מראים מקדם מתאם גבוה יחסית של $R^2=0.69$ ומצביעים על יעילותה של השיטה בשדה הכותנה. העדר הצורך בכיול מאפשר ליישם את השיטה גם ללא בדיקה מוקדמת עם מערכת ייחוס יקרה ומורכבת (קורלציית הערבולים) לצורך כיול, ולכן יאפשר בעתיד יישום השיטה בדרך פשוטה וזולה יותר.

Castellvi, F., Consoli, S. and Papa, R. (2012). Sensible heat flux using two different methods based on surface renewal analysis. A study case over an orange orchard in Sicily. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 58-64.

Hsieh, Cheng-I, G. Katul, and T. Chi. (2000). An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. *Advances in Water Resources*, 23: 765-772.

Kljun, N., P. Calanca, M. W. Rotach, and H. P. Schmid. (2004). A simple parameterization for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology*, 112: 503-523.

Mekhmandarov, Y., Pirkner, M., Achiman, O., Tanny, J. (2015). Application of the surface-renewal technique in two types of screenhouses: sensible heat flux estimates and turbulence characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 203, 229-242.

Rosa, R., Dicken, U., and Tanny, J. (2013). Estimating evapotranspiration from processing tomato using the surface renewal technique. *Biosystems Engineering*, 114(4), 406-413.

Rosa, R., Tanny, J. (2015). Surface renewal and eddy covariance measurements of sensible and latent heat fluxes of cotton during two growing seasons. *Biosystems Engineering*, 136, 149-161.

Van Atta, C.W. (1977) Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer, *Archives in Mechanics* 29, pp. 161–171.

Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B. E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., Verma, S., 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites, *Agric. Forest Meteorol.* 113, 223-243.

הערכת האופוטורנספירציה מגידולים בחלקות קטנות באמצעות שיטת חידוש פני השטח

סיכום עם שאלות מנחות

1. מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
מטרות המחקר היו: 1. לבחון את ישימות שיטת "חידוש פני השטח" (SR) למדידת שטף החום המוחשי והערכת האופוטורנספירציה בחלקות קטנות. 2. בחינת שיטת SR שאינה דורשת כיול.
אלו ממטרות המחקר הושגו בעבודת המחקר הנוכחית: הניסויים בוצעו כמתוכנן ושתי מטרות המחקר הושגו.
2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח: הניסויים נעשו בבית רשת לגידול פלפל ובשדה כותנה. בכל אתר הוצבה מערכת קורלציית הערבולים, חיישני תרמוקפל מיניאטוריים למדידות בשיטת SR, ומערכת פולס החום למדידת זרימת המים בגבעולי הצמחים. כדי לייצג את החלקות הקטנות, הנתונים מוינו בשלוש שיטות: לפי מיקום חיישן, לפי אורך נשיבה גיאומטרי (עד קצה בית הרשת או שדה הכותנה הפתוח) ולפי מודלים של טביעת הרגל. בשלושת השיטות התקבלו מקדמי מתאם מובהקים לשטף החום המוחשי. מקדם הכיול α לא השתנה במגמה ברורה עם אורך הנשיבה (גודל החלקה) ולכל מרחקי הנשיבה הוא השתנה בין 0.60 עד 1.34. הערכות של אופוטורנספירציה לחלקות בגדלים שונים התקבלו עם סטייה של עד 15% בין הערך המדוד בשיטת EC, לערך המחושב לפי שיטת חידוש פני השטח, פרט לחישוב טביעת הרגל (גודל החלקה) לפי מודל Hsieh, שם התקבלה סטייה עד 30% בהערכת האופוטורנספירציה.
3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכן: בבית רשת לגידול פלפל 25 מ"ש, שיטת SR לא פעלה ביעילות הנדרשת ולכן נבחנה שיטה חלופית, FV, שפעלה בצורה יעילה וניתנת ליישום להערכת האופוטורנספירציה. בשדה הכותנה שיטת SR פעלה ביעילות. התוצאות שהתקבלו מראות ששיטת SR יעילה ליישום בשדה כותנה בחלקות בגדלים שונים. נראה כי מקדם הכיול של כלל הנוף ניתן ליישום גם בחלקות קטנות. העובדה כי זוהי שיטה פשוטה שאינה דורשת ציוד יקר ומורכב תאפשר בעתיד שימוש שלה ע"י מגדלים או מדריכים חקלאיים לקבלת הערכות רציפות ואמינות של האופוטורנספירציה גם בחלקות קטנות ובינוניות, שיסייעו בניהול ההשקיה. זוהי אחת ממטרות העל של מחקר זה.
4. הבעיות שנותרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה: לא חלו שינויים במהלך העבודה.
5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח? התוצאות של שנה א' סוכמו במאמר:
Effect of variable fetch on flux-variance estimation of whole canopy sensible and latent heat fluxes in a pepper screenhouse.
המאמר התקבל לפרסום ב:
Acta Horticulturae: International Symposium on Sensing Plant Water Status - Methods and Applications in Horticultural Science (In Press).
6. פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט).