

דו"ח מסכם לתכנית מחקר מספר 304-0433-11

**שיטה זולה למדידה בזמן אמיתי של צריכת המים של עגבניות לתעשייה
בעמק החולה**

**A cheap technology for real-time measurement of water consumption
of industry tomato at the Hula valley**

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
משה מירון	מיג"ל
מוטי פרס	מיג"ל
שאול גרף	מיג"ל

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: vwshep@volcani.agri.gov.il

Moshe Meron, MIGAL, P.O.B. 831, Kiryat Shmona 11016. Email: meron@migal.org.il

Moti Peres, MIGAL, P.O.B. 831, Kiryat Shmona 11016.

Shaul Graph, MIGAL, P.O.B. 831, Kiryat Shmona 11016.

נובמבר 2012

כסלו תשע"ג

הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים.

הממצאים אינם מהווים המלצות לחקלאים.

חתימת החוקר: _____

ניסויי השדה, עיבוד הנתונים והכנת הדו"ח נעשו בעזרתם של:

מר רפאל רוסה (וולקני)

ד"ר יוסף ציפריס (מיג"ל).

עמוד**תוכן עניינים**

תקציר	2
מבוא – רקע מדעי ומטרות המחקר לתקופת הדו"ח	2
פירוט עיקרי הניסויים והתוצאות לתקופת הדו"ח	3
תאור אתרי הניסוי ושיטות המדידה	3
תוצאות עיקריות	7
דיון	16
סיכום עם שאלות מנחות	17

תקציר

הצגת הבעיה: בקרת השקיה אמינה ובזמן אמת מחייבת ידיעה טובה של האופוטורנספירציה של הגידול החקלאי, אלא שבאמצעים הקיימים היום מידע זה אינו בר השגה בפרקטיקה החקלאית. השיטות הקיימות למדידת מצב המים בצמח ברובן נקודתיות ומוגבלות בכסוי המרחבי והעיתי. קבוצת המחקר שלנו ערכה בשנים האחרונות מדידות ישירות של אופוטורנספירציה של כלל הנוף תוך שימוש בשיטת קורלציית הערבולים אך שיטה זו מורכבת ואינה זמינה לשימוש ע"י מדריך או חקלאי.

מטרת המחקר: המטרה העיקרית של המחקר הנוכחי היא לבחון ולהתאים שיטה אחרת, זולה ופשוטה יותר, למדידה של אופוטורנספירציה של גידולים חקלאיים. השיטה מבוססת על עקרון "חידוש פני השטח" (Surface Renewal- SR).

שיטות עבודה: הניסויים נערכו בחוות גד"ש בעמק החולה. בשנה הראשונה נבחנה השיטה בשדה עגבניות לתעשייה ובשנים השנייה והשלישית בשדה כותנה. החל מהשנה השנייה נבחר גידול כותנה במקום עגבניות לתעשייה מאחר וחל צמצום בשטחי עגבניות לתעשייה באתר הניסוי. בכל שנה הוצבו שלוש מערכות מדידה: לזיזמטרים, מערכת קורלציית הערבולים ומערכת SR הכוללת גם מדידת רכיבי מאזן האנרגיה. המערכות הוצבו במרכז השדה כדי למנוע השפעות קצה. בכל שנה המדידות נערכו בקיץ שהיא עונת הגידול וההשקיה העיקרית באזור. חלק מימי המדידה שימשו לכיול שיטת SR וחלק לאימות שלה.

תוצאות עיקריות: שיטת SR הייתה יעילה הן לעגבניות לתעשייה והן לכותנה. ערכי אופוטורנספירציה שהתקבלו בשיטת SR עבור ימי האימות נתנו תוצאות בהתאמה טובה עם הערכים שנמדדו ישירות ע"י מערכת קורלציית הערבולים לאותם ימים. בשתי שנות המדידות בכותנה, בחלק מתקופת המדידה נמצאה התאמה טובה בין מקדמי הכיול משנת 2011 ושנת 2012. בשנה השנייה ההתאדות מהליזימטרים הייתה בהתאמה סבירה עם ההתאדות שנמדדה ע"י מערכת קורלציית הערבולים והתקבל יחס יומי ממוצע של 1.13 בין המדידות עבור 52 ימי מדידה. בשנה השלישית התקבל יחס יומי ממוצע של 1.07 בין המדידות עבור 55 ימי מדידה.

מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות: התוצאות לגבי יישום שיטת SR בכותנה מציעות כי המגבלה העיקרית ביישום השיטה לאורך שנים היא בחירת חיישן טמפרטורה מתאים. נראה כי עם חיישן מתאים, ניתן לערוך לגידול מסוים כיול בשנה אחת ולהשתמש באותם מקדמי כיול בשנים הבאות.

מבוא – רקע מדעי ומטרות המחקר לתקופת הדו"ח

בקרת השקיה אמינה ובזמן אמת מחייבת ידיעה טובה של האופוטורנספירציה של הגידול החקלאי, אלא שבאמצעים הקיימים היום מידע זה אינו בר השגה בפרקטיקה החקלאית. ניהול השקיה כיום מתבסס על

התאדות פוטנציאלית מנתונים מטאורולוגיים, מוכפלים באחוז הכסוי של הצמחייה, ומותאמים למצב הגידול בעזרת מקדמים אמפיריים ובעזרת היזון חוזר ממדידות בשטח. כיום רוב הגישות של ההיזון החוזר לצורך בקרת ותיזון ההשקיה מבוססות על מדדים עקיפים, כלומר, מדדים המציינים את מצב המים בצמח או בקרקע לידו. קיימות שיטות למדידה של צריכת המים בפועל (כמו ליזימטר, פולס החום או פורומטר) אך המשותף להן הוא שברובן נקודתיות ומוגבלות בכסוי המרחבי, או מוגבלות בכסוי העיתי. לכן בתנאי השונות המרחבית בשטחים החקלאיים, וכן בשונות העתית בתוך היממה ולאורך התקופה בין המדידות, התוצאות במקרים רבים מטעות, ונדרשת מיומנות להערכת האמינות שלהן. מדידה ישירה של אוופוטנספירציה של כלל הנוף של כל סוגי הגידולים ניתן לבצע בשיטת קורלצית הערבולים (Eddy Covariance – EC). שיטה זו מודדת את שטף אדי המים בשכבת הגבול של האוויר מעל לגידול החקלאי. בעוד ששיטה זו (EC) נחשבת כיום לשיטה האמינה והמדויקת ביותר למדידה ישירה של האופוטנספירציה של כלל הנוף, הפעלתה מורכבת, היא מבוססת על מיכשור יקר ולא ניתנת לתפעול ע"י מדריך חקלאי או חקלאי. מכאן נובע שיש חשיבות לפיתוח שיטה זולה ופשוטה יותר למדידה אמינה של שטף האופוטנספירציה של הגידול החקלאי שתהיה זמינה לשימוש יום-יומי ע"י החקלאי או המדריך החקלאי. השיטה המוצעת במחקר זה להערכת שטף האדים (אופוטנספירציה) מהנוף היא שיטת חידוש פני השטח (SR). זוהי שיטה פשוטה וזולה יחסית המבוססת על מדידה בתדר גבוה של טמפרטורת האוויר באזור הנוף וניתוח מתמטי של האות המתקבל. בשילוב עם מדידות נלוות של קרינה נטו ושטף חום לקרקע, ניתן לחלץ את האופוטנספירציה כשארית של מאזן האנרגיה.

מטרות המחקר כפי שהופיעו בהצעה המקורית:

המטרה העיקרית של המחקר הנוכחי היא לפתח ולהתאים שיטה זולה למדידה רציפה של אוופוטנספירציה של כלל הנוף. השיטה תהיה מבוססת על עקרון "חידוש פני השטח" – (Surface Renewal - SR). המטרה הספציפית היא לכויל את שיטת "חידוש פני השטח" (SR) עבור גידולי עגבניות לתעשייה וכותנה בעמק החולה כנגד ערכי שטף חום מוחשי שיימדדו ישירות ע"י מערכת קורלצית הערבולים (EC) שתוצב בשטח סימולטאנית עם מערכת SR. תהליך הכיול יתבסס על אופטימיזציה והתאמה של שיטת SR לתנאי הגידול בעמק החולה מבחינת גובה החיפוש, קוטר החיפוש ותדר הדגימה.

המטרה הספציפית לכל שנה הייתה: לימוד השפעת הגובה (ביחס לנוף), התדר וקוטר החיפוש של מדידת הטמפרטורה ע"י החיפשים המיניאטוריים על הביצועים של שיטת SR, והשוואה עם מדידות האימות ע"י שיטת קורלצית הערבולים וע"י ליזימטרים.

הערה: המטרה הכללית של המחקר היא ייעול השימוש במים שפירים באזורים נעדרי חלופה. אזור המחקר הוא עמק החולה וגידול המודל שנבחר מלכתחילה הוא עגבניות לתעשייה. בשנה הראשונה נחקר גידול זה, אך בשנה השנייה, עקב שינויים בשוק המקומי והעולמי, שטחי העגבניות לתעשייה בחוות גד"ש צומצמו ולעומת זאת התרחבו שטחי גידול הכותנה. מאחר ובוחנים שיטת קורלצית הערבולים המשמשת לכיול מחייבת שטח מדידה גדול, הוחלט, בתיאום עם לשכת המדען הראשי, לערוך החל מהשנה השנייה את הניסוי בגידול כותנה במקום עגבניות לתעשייה.

פירוט עיקרי הניסויים והתוצאות לתקופת הדו"ח

א. תאור אתרי הניסוי ומערכות המדידה

אתרי הניסוי:

שנה א: הניסוי בוצע בשדה עגבניות לתעשייה בחוות גד"ש בעמק החולה (33°11'N, 35°35'E).

ממדי החלקה היו כ – 250 X 500 מ², כאשר המימד הארוך היה בכיוון מזרח-מערב. עגבניות לתעשייה

נשתלו ב – 15 מאי 2010 בצפיפות של 2500 צמחים לדונם, והקטיף התחיל ב- 28 באוגוסט 2010. השקיה נעשתה בשבועיים הראשונים ע"י ממטרות ובהמשך ע"י טפטפות. בתקופת המדידה המדווחת כאן, גובה צמחי העגבנייה היה כ- 0.6 מ'. מערכות המדידה הוצבו באזור הדרום-מזרחי של השדה מה שאפשר אורך נשיבה של כ – 250 מ' לרוח הצפון-מערבית השלטת באזור.

שנים ב' ו- ג': הניסוי בוצע בשדה כותנה בחוות גד"ש בעמק החולה ($N 33^{\circ}11'$, $E 35^{\circ}35'$). ממדי החלקה היו כ – 250×700 מ², כאשר המימד הארוך היה בכוון מזרח-מערב. זרעי כותנה נזרעו ב – 1 וב-3 אפריל 2011 ו-2012, בהתאמה, בצפיפות של 9000 צמחים לדונם. ההשקיה הופסקה ב- 2 בספטמבר וב-30 אוגוסט 2011 ו-2012, בהתאמה. בכל שנה, מערכות המדידה הוצבו באזור הדרום-מזרחי של השדה מה שאפשר אורך נשיבה של בין 200 ל – 400 מ' לרוח הצפון-מערבית השלטת באזור.

מערכות המדידה

מערכת המדידה האטמוספירית כללה מערכת קורלציית ערבולים (EC) למדידה ישירה של אוופורטנספירציה ומערכת תרמוקפלים ליישום שיטת חידוש פני השטח (SR). מערכת קורלציית הערבולים כללה חיישן רוח אולטרא-סוני תלת צירי (CSAT3, Campbell Sci., USA), וגז אנלייזר אינפרא אדום (IRGA, LI-7500, LI-COR, USA). המערכת מדדה בתדר גבוה (20 Hz) את שלושת רכיבי מהירות הרוח והטמפרטורה הקולית, וכן את ריכוזי אדי המים והפחמן הדו-חמצני באוויר (ראה איור 1). בשנה א' (2010) החיישנים הוצבו בגובה של 1.5 מ' מעל פני הקרקע. בשנה ב' (2011) המערכת הוצבה תחילה בגובה של 1.5 מ', ביום 192 הועלתה לגובה 2.67 מ' וביום 219 המערכת הוגבהה לגובה של 3.35 מ'. בשנה ג' (2012) המערכת הוצבה בגובה קבוע של 3.5 מ'.

בשנה א', מערכת חיישני SR הוצבה על אותו עמוד של מערכת EC. המערכת כללה 5 חיישני תרמוקפל מיניאטוריים שיוצרו במעבדתנו מחוטי תרמוקפל TYPE T, בקוטר של 0.076 מ"מ. החיישנים הוצבו ב – 5 גבהים: 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 מ' מעל פני הקרקע. בשנה ב' מערכת חיישני SR הוצבה במרחק של כ-10 מ' דרומית לתורן של מערכת EC. המערכת כללה 6 חיישני תרמוקפל מיניאטוריים שיוצרו במעבדתנו מחוטי תרמוקפל TYPE T, בקוטר של 0.08 מ"מ וחיישן עבה אחד בקוטר חוט של 0.511 מ"מ. בשנה ג' המערכת כללה 8 חיישני תרמוקפל מיניאטוריים שיוצרו במעבדתנו מחוטי תרמוקפל TYPE T, בקוטר של 0.08 מ"מ ו-2 חיישנים מסחריים תוצרת חברת OMEGA באותו קוטר. החיישנים הוצבו בגבהים מנורמלים (גובה חיישן חלקי גובה הצמחים) שנעו בין 0.80 עד 2.35. בכל הניסויים טמפרטורת האוויר נמדדה ע"י התרמוקפלים בתדר של 20 Hz. בכל שנה נבחן גם יישום שיטת SR באמצעות מדידות הטמפרטורה של האנמומטר האולטרא סוני. מדידות אלה הן בתדר גבוה (20Hz), אך נפח המדידה גדול יחסית לחיישני התרמוקפל המיניאטוריים.

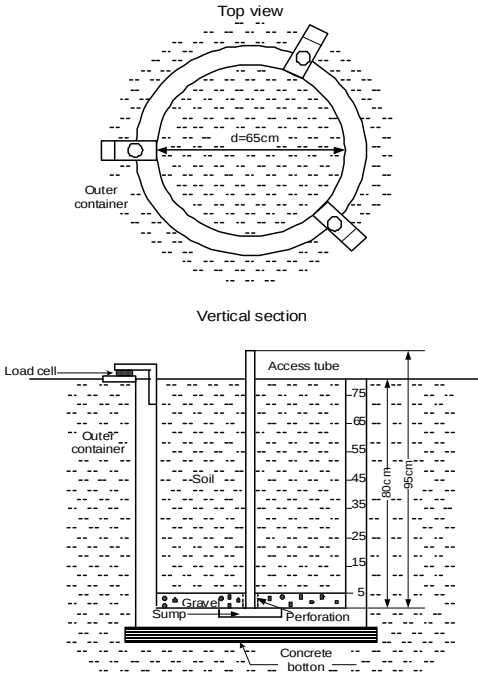
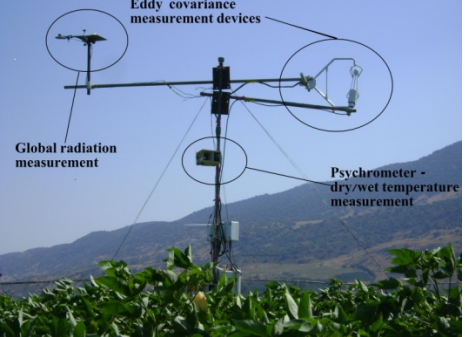
בכל שנה, חיישנים נוספים הותקנו כדי למדוד את שאר רכיבי מאזן האנרגיה. חיישן קרינה נטו הוצב בגובה 2 מ' מעל פני הקרקע. ארבעה חיישני שטף חום קרקעי הוצבו בתוך הקרקע, בעומק 0.08 מ', שניים באזור של קרקע רטובה (סמוך לטפטפת) ושניים באזור של קרקע יבשה. מעל כל חיישן שטף חום קרקעי נטמנו בתוך הקרקע שני תרמוקפלים למדידת השתנות אגירת החום בשכבה העליונה של הקרקע.

כל המידע משתי מערכות המדידה נרשם והוקלט ע"י אוגר נתונים (CR3000, Campbell Sci, USA) המצויד בכרטיס הרחבת זיכרון בנפח של 2 GB. בשנה א' המערכות הוצבו בשטח מיד לאחר השתילה (בחודש מאי) אך שרשרת של תקלות טכניות גרמה לכך ששתיהן פעלו במקביל באופן תקין רק במשך 13

ימים, בין ה - 13 ל-25 אוגוסט. שישה מתוך 13 ימי המדידה שימשו לכיול שיטת SR ע"י השוואת החום המוחשי עם EC והשאר שימשו לאימות. בשנה ב' מדידות נערכו מיום 2 יוני (יום 153) עד יום 6 לספטמבר (יום 249), עם הפסקה (עקב פגיעת טרקטור בצידוד) בין 16 ליוני (יום 167) עד 10 ליולי (יום 191), סה"כ 72 ימי מדידה. בשנה ג' מדידות נערכו מיום 1 יוני (יום 153) עד 11 לספטמבר (יום 255). בתקופה זו צמחי הכותנה גדלו מגובה 0.3 מ' עד 1.5 מ'. ב-2011 וגם ב-2012 חלק מימי המדידה שימש לכיול וחלק לאימות.

מערכת האימות הקרקעית כללה שלושה לזימטרים שהותקנו במרכז החלקה (ראה איורים 1 ו-2). מטרת מדידה זו לאמת את המדידות המתקבלות ע"י המערכות האטמוספיריות. כל מיכל היה בקוטר 0.65 מ' ועומק 0.8 מ'. חמישה ס"מ בתחתית של כל מיכל מולאו בחצץ כך שנפח הקרקע האפקטיבי בכל מיכל היה 0.249 מ"ק. המשקל הכללי של כל לזימטר כולל הקרקע היה כ- 500 ק"ג. המיכל היה תלוי בחופשיות על מיכל חיצוני ונשען על שלושה מאזני שקילה מדגם TEDEA HUNTLEIGH 3411 Shear Beam Load Cells. האות של מאזני השקילה נקרא ע"י אוגרי נתונים מסוג CR21X, CR3000 (Campbell Sci, USA). הרזולוציה של מערכת השקילה הייתה 30 גר' שהם שווי ערך להתאדות של 0.1 מ"מ מים. תיקון טמפרטורה אמפירי ייושם ע"י שימוש בחיישן טמפרטורה מסוג תרמוקפל. צינוריות הוחדרו למרכז המיכל ושימשו לשאיבת מי הנקז.

בשנה הראשונה, הלזימטרים הותקנו ב - 3/5/2010. כיול של הלזימטרים נעשה בתאריכים 15/6/2010 ו- 13/7/2010 ונמצא קשר ליניארי מובהק בין המשקל למוצא הלזימטר. עקב עודף השקיה נותקו הלזימטרים ממערכת ההשקיה של כל השדה והושקו ידנית לפי חישוב של התאדות פוטנציאלית ושימוש בפני השטח המאדים שחושב לפי תצלום אנכי כמקדם גידול. לערך המתקבל הוספו 15% מי שטיפה למניעת המלחה של הקרקע.

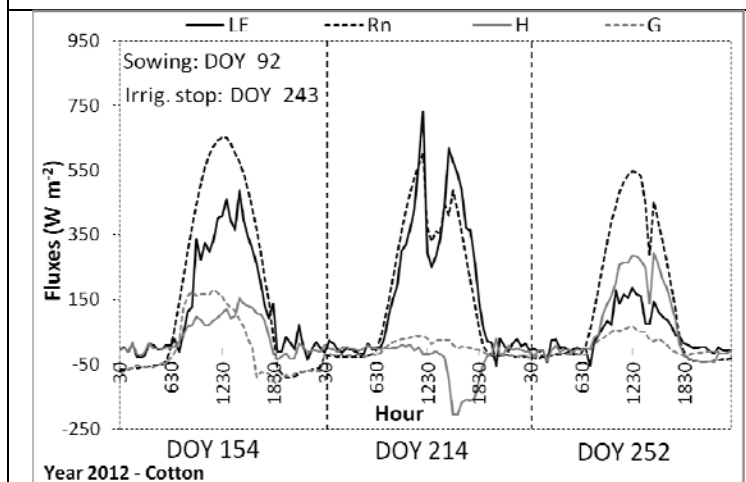
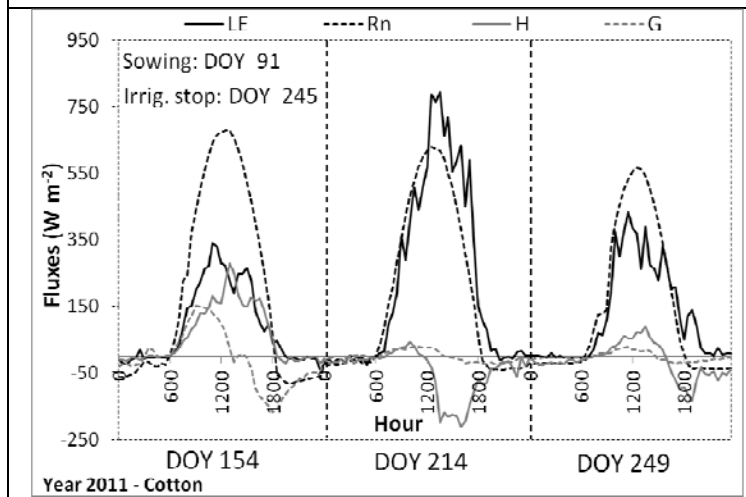
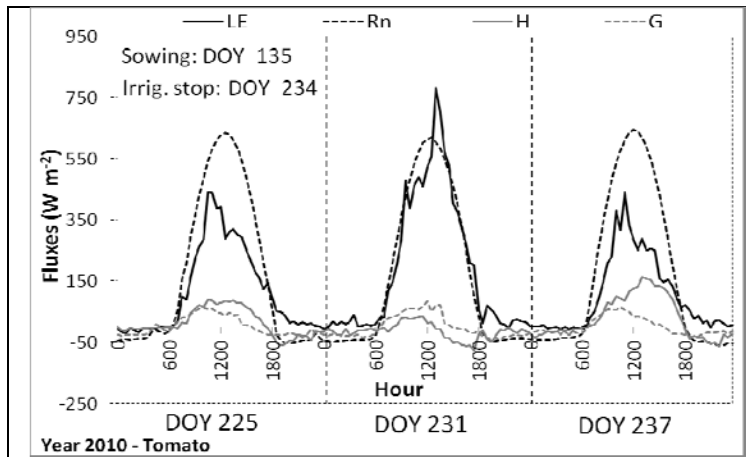
	 
איור 2: שרטוט סכמטי של הלזימטר. למעלה: מבט על, למטה: חתך צד.	איור 1: למעלה: מערכת קורלציית הערבולים וחיישני הקרינה והטמפרטורה מוצבים בשדה. למטה: תצלום של הלזימטר ושלושת זרועות בשדה הכותנה.

בשנה השנייה הליזימטרים הותקנו במרכז החלקה ב – 27/4/2011. כיול של הליזימטרים נעשה בתאריך 5/5/2011 ושוב נמצא קשר ליניארי מובהק בין המשקל למוצא הליזימטר. בתאריך 28/4/2011 נשתלו בכל ליזימטר 4 שתילי כותנה בשלב גידול זהה לשדה כולו. השתילים בליזימטרים הוצבו במקביל לשתילי השדה ובאותם מרחקי שתילה. הליזימטרים הופעלו כשלושה חודשים, בין 14 ליוני עד 13 ספטמבר 2011, עם השקיה אחרונה ב – 11 ספטמבר. הליזימטרים הושקו ע"י השלמת כמות מים מהשקיה קודמת + 15% לשטיפת מלחים.

בשנה השלישית, הניסוי נערך במתכונת ובשיטות דומות לשנה השנייה, תוך מיקום הליזימטרים בשורות התרנים של מערכת ה-SR. ההשקיה העיקרית החלה ב 9 ליוני עם שטח כסוי של 0.35 מ"ר בכל הליזימטרים. כעבור שבועיים שטח הכסוי עלה ל 0.43, 0.37, ו 0.53 בליזימטרים מס 1, 2, ו-3 בהתאמה. הצמחים בליזימטר 2 היו נמוכים יותר בגלל נזק מכאני, ואילו הצמחים בליזימטר 3 תפסו מרחב אווירי גדול יותר בגלל פיגור בגידול הכותנה בשורות הסמוכות. החל מכסוי מלא של הצמחים בליזימטרים 1 ו 2- שטחי הכסוי נלקחו כ 0.8 מ"ר בהתאם לקטע השורה של 0.8 מטר שתפוסה על ידם, כלומר הפסד משקל של 1 ק"ג = 1.25 מ"מ התאדות. שטח הכסוי של ליזימטר 3 הוערך ב - 40% גדול יותר, לערך של 1.12 מ"ר. ההתאדות חושבה מתוך הפסד המשקל של הליזימטר מותאם לשטח הכסוי. השקיה בליזימטרים החלה ב – 9 יוני, 2012.

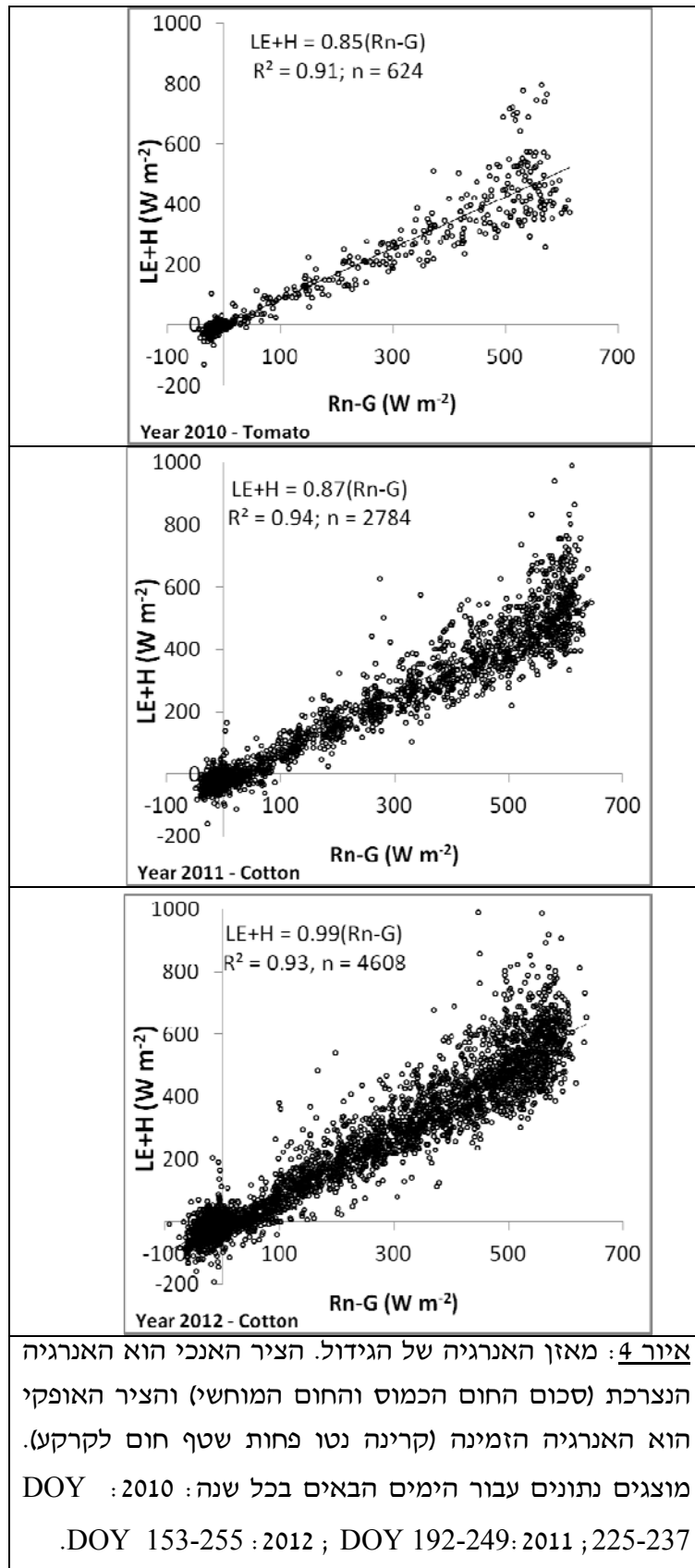
ב. תוצאות עיקריות

מדידות שטפי האנרגיה:



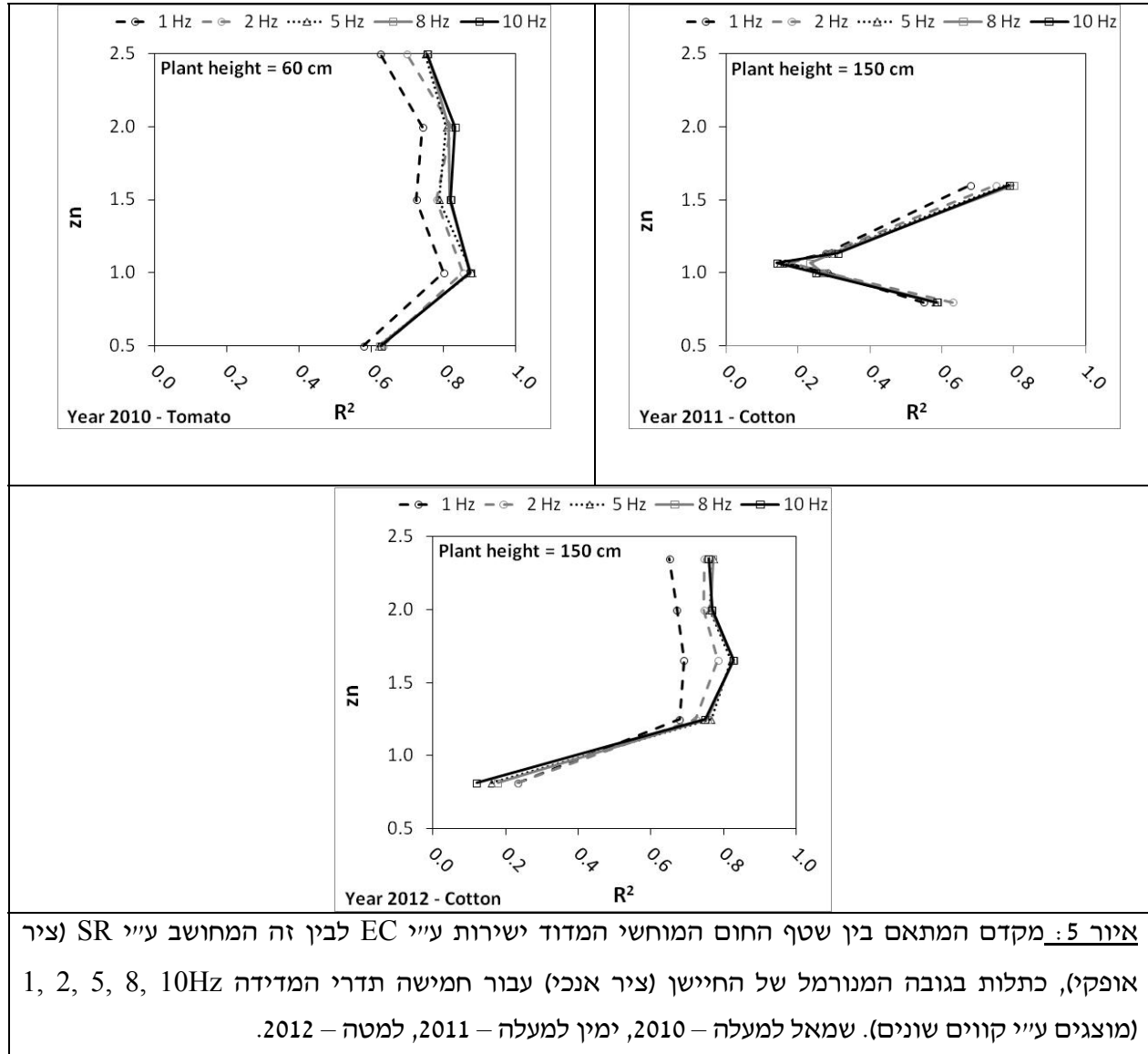
איור 3: שטפי האנרגיה. קו שחור - אווטרנספירציה; קו שחור מרוסק - קרינה נטו; קו אפור - שטף חום מוחשי; קו אפור מרוסק - שטף חום לקרקע. למעלה - 2010, אמצע - 2011, למטה - 2012.

מערכת קורלציית הערבולים מספקת מידע על שטפי החום המוחשי והחום הכמוס (אוטרנספירציה). כדי לאמת מדידות אלה נהוג למדוד את שאר רכיבי מאזן האנרגיה של הגידול החקלאי, הקרינה נטו ושטף החום לקרקע. אימות זה חשוב לביסוס ההשוואה בין שיטת EC ל- SR המוצגת בהמשך. איור 3 מציג מהלכים יומיים של שטפי האנרגיה בשלושה ימים בשלבים שונים של הגידול בכל אחת משנות הניסוי. בגרף השמאלי בכל שנה, הגידול קטן ושטף הקרקע החשוף יחסית גדול. ההשקיה יחסית נמוכה ולכן האוטרנספירציה נמוכה ושטף החום המוחשי גבוה יחסית. בגרף האמצעי הגידול בגובה מרבי ואז האוטרנספירציה גבוהה ובצהריים נמדד שטף חום מוחשי שלילי, הנובע מצינון הצמחים (ע"י טרנספירציה) ומעבר חום מוחשי מהאוויר החם אל הצמחים. בתום הגידול, לאחר הפסקת ההשקיה, שוב יורדת האוטרנספירציה לערך נמוך. ניתן גם לראות את הירידה ההדרגתית בקרינה נטו לאורך תקופת הגידול (פרט ל- 2010 בה תקופת המדידה הייתה קצרה) הקשורה עם השתנות עונות השנה, החל מסוף האביב (חודש יוני) עם קרינה מרבית, וכלה בתחילת הסתיו (ספטמבר).



מתוך נתוני השטפים הנמדדים מוצגים מאזני האנרגיה לפי בסיס של חצי שעה. איור 4 מציג את מאזני האנרגיה לתקופת המדידה בשלוש שנות הניסוי. השיפועים של קווי הרגרסיה הם 0.85, 0.87 ו- 0.99, ומקדמי המתאם הם 0.91, 0.94 ו- 0.93, בהתאמה. ממצאים אלה מציגים סגירה טובה של מאזן האנרגיה כפי שמקובל בספרות העולמית למדידות מסוג זה. ממצאים אלה מאמתים את מדידות שטפי החום המוחשי והכמוס ע"י שיטת קורלצית הערבולים בכל אחת משנות המחקר.

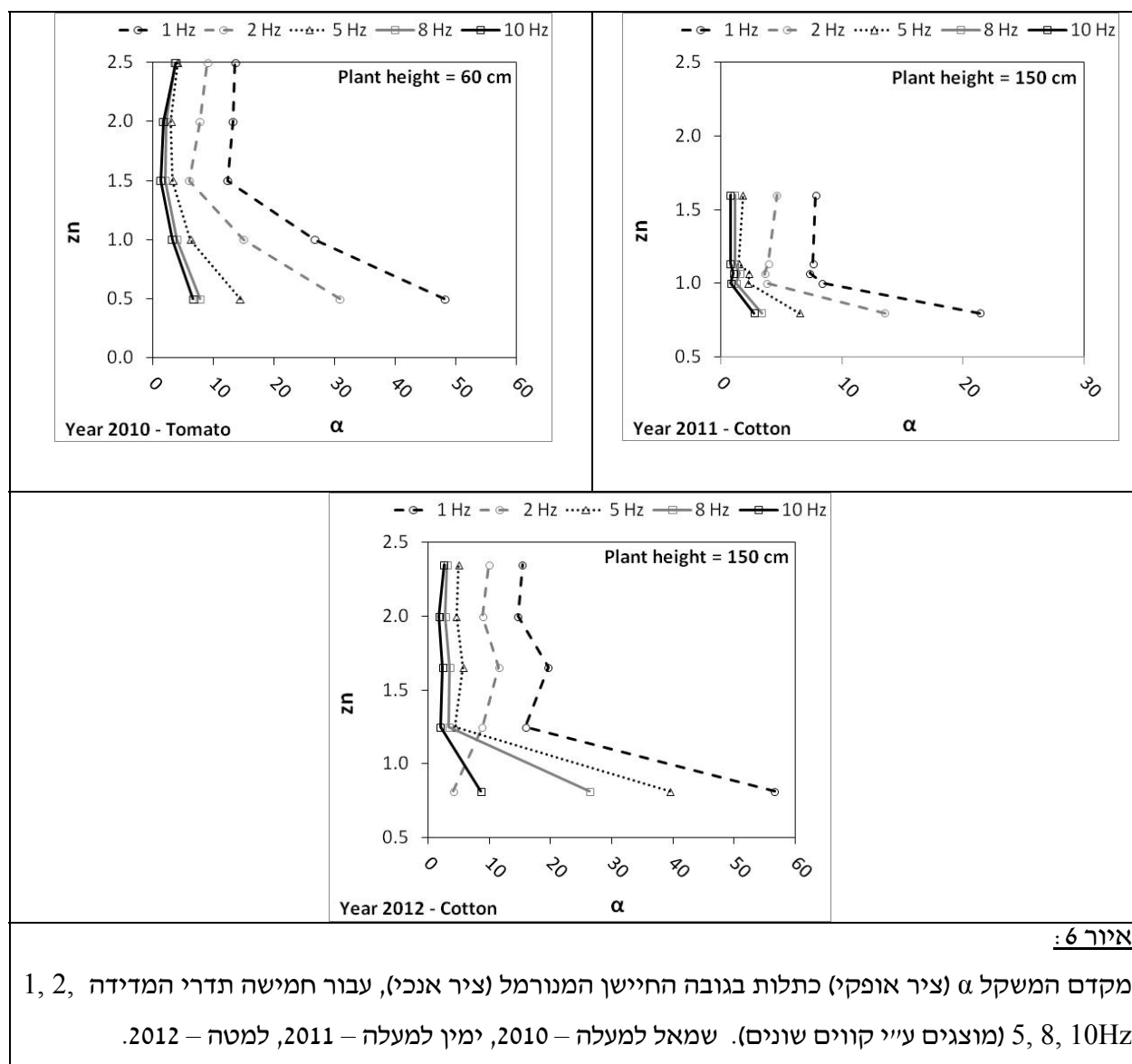
מדירות בשיטות SR ו-EC: אופטימיזציה של גובה ותדר המדידה נערכה ע"י חישוב שטף החום המוחשי בשיטת SR והשוואתו עם השטף שנמדד ישירות ע"י מערכת EC. ערכים אופטימאליים הוגדרו כאלה שנותנים מקדם מתאם (R^2) גבוה ביותר בגרף הליניארי (לא מוצג) של שטף החום המוחשי המדוד ישירות כנגד זה המחושב בשיטת SR. השתנות הגובה המנומל התקבלה כתוצאה מהשינוי בגובה הצמחים במשך תקופת הגידול.



איור 5 מציג את R^2 כתלות בגובה המנומל של החישן עבור תדרי מדידה בטווח בין 1-10 Hz, שהוא הטווח המתאים לזמן התגובה של חישני התרמוקפל המיניאטוריים. נערך גם ניתוח נתונים לחישן התרמוקפל בעל הקוטר הגדול יותר (2011). התוצאות של חישן זה היו תמיד פחות טובות מאלו של החישנים המיניאטוריים.

האיור מראה כי ערך מרבי של R^2 התקבל תמיד עבור תדרי מדידת טמפרטורה של 8Hz או 10Hz. עבור עגבניות לתעשייה (2010) התקבל ערך מרבי של $R^2 = 0.87$, בגובה חישן מנומל של 1. עבור כותנה

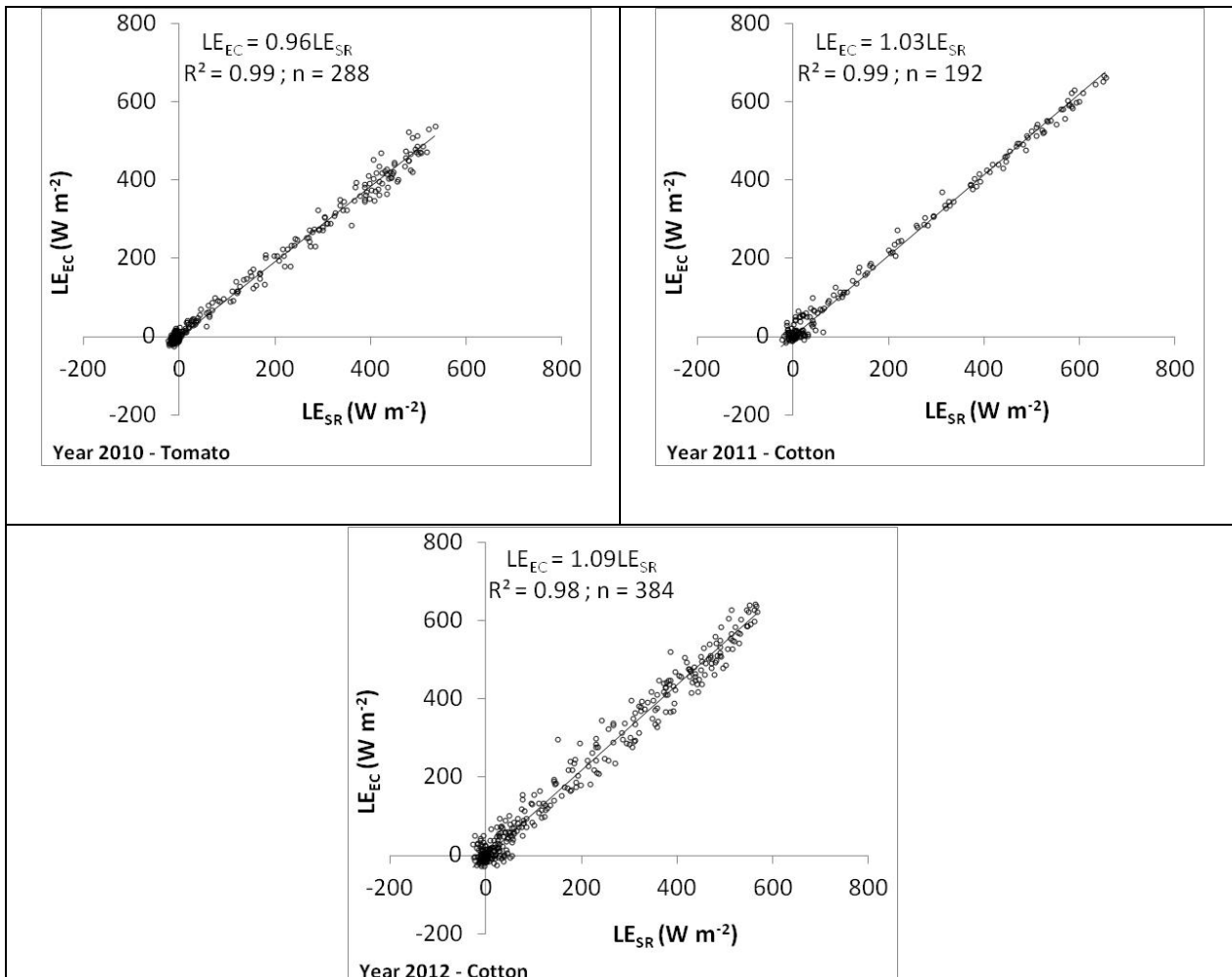
התקבלו ערכים מרביים של R^2 של 0.80, 0.83, בגבהים מנורמלים של 1.6 ו-1.65, ב 2011 ו- 2012, בהתאמה. ניתן לראות כי גם בתדר 2Hz התקבלו ערכי R^2 מיטביים של 0.85, 0.75 ו- 0.79, עבור אותם גבהים מנורמלים, בשנים 2010, 2011 ו- 2012, בהתאמה. נבחנו גם מקדמי מתאם לתנאים של אטמוספירה יציבה ולא יציבה בנפרד, אך המתאם הגבוה ביותר התקבל כאשר נבחנו כל התנאים ביחד, ללא הפרדה. את הקשר בין שטפי החום המוחשי הנמדדים בשתי השיטות ניתן לבטא באמצעות הביטוי: $H_{EC} = \alpha H_{SR}$ כאשר α הוא מקדם כיוול (או מקדם משקל). איור 6 מציג את מקדם המשקל כתלות בגובה המנורמל ותדר המדידה.



באיור 6 ניתן לראות כי הקטנת תדר המדידה גורמת להגדלה של מקדם המשקל. בנייתו של הנתונים נמצא יחס קרוב ל-1:1, בין α_M/α_H , לבין f_M/f_H , כאשר M מציין כל אחת מהתדירויות, ו- H מציין את התדר המקסימלי, 10Hz. מכאן ניתן לראות כי מקדם המשקל למעשה מתקן את השגיאה הנוצרת עקב תדר דגימה נמוך מדי שאינו מצליח לזהות את התדרים הגבוהים. בתדר של 10Hz, השתנות מקדם המשקל עם הגובה הייתה קטנה יחסית. מעל גובה מנורמל מסוים נצפה שינוי קטן במקדם המשקל בכל התדרים. גובה זה היה,

1.5, 1.0, ו- 1.25, עבור, 2010, 2011 ו- 2012 בהתאמה. לממצא זה חשיבות מעשית בכך ששינוי קטן בגובה אינו משנה את הערך של מקדם המשקל.

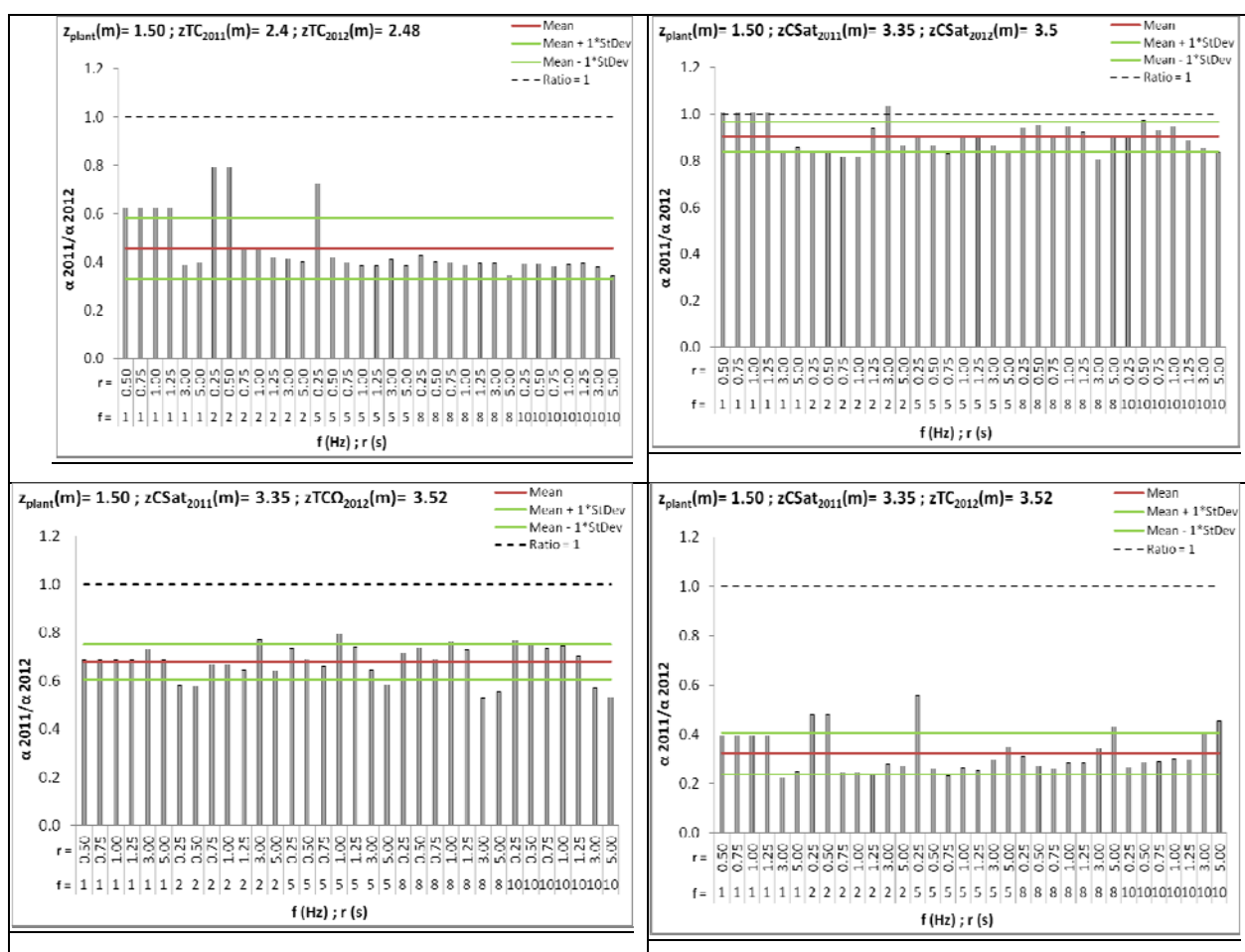
ערכים של שטף חום מוחשי שהתקבלו ע"י שיטת SR בשילוב עם רכיבי מאזן האנרגיה של קרינה נטו ושטף חום לקרקע, שימשו להערכה של האופוטורנספירציה כשארית של מאזן האנרגיה. רגרסיה ליניארית בין ערכים חצי שעתיים מדודים בשיטת קורלציית הערבולים (LE_{EC}) ומוערכים בשיטת חידוש פני השטח (LE_{SR}) מוצגת באיור 7 עבור מדידות בתדר 10Hz בשלוש שנות המחקר.



איור 7: אופוטורנספירציה חצי שעתית. מדידה ישירה ע"י מערכת קורלציית הערבולים (ציר אנכי) כנגד הערכה לפי שיטת SR בתדר 10Hz (ציר אופקי). **שנת 2010:** ימי כיול: DOY 225-231, ימי אימות: DOY 232-237 **שנת 2011:** ימי כיול: DOY 234-237, ימי אימות: DOY 238-241. **שנת 2012:** ימי כיול: DOY 234-240, ימי אימות: DOY 226-233. שמאל למעלה – 2010, ימין למעלה – 2011, למטה – 2012.

איור 7 מראה כי בכל אחת משנות המחקר נמצאה התאמה טובה מאד בין המדידה הישירה לבין ההערכה לפי שיטת SR. רגרסיות דומות נערכו עבור המדידות בתדרים נמוכים יותר. לדוגמה, בשנה השנייה (כותנה, 2011) עבור תדר 5Hz, התקבל היחס: $LE_{EC} = 0.95LE_{SR}$ ($R^2 = 0.92$); ועבור תדר 2Hz, התקבל היחס: $LE_{EC} = 0.94LE_{SR}$ ($R^2 = 0.92$). כלומר, ניתן להפעיל את שיטת SR גם בתדרים נמוכים יותר.

מאחר ושיטת SR דורשת כיוול, נשאלה השאלה האם ניתן, עבור גידול מסוים ובאזור אקלימי נתון, לבצע כיוול באמצעות שיטת EC במשך עונה אחת, ואז להשתמש במקדמי הכיוול (מקדם המשקל α) בשנים עוקבות, ללא צורך בכיוול חוזר כל שנה. או, במילים אחרות, עד כמה משתנים מקדמי הכיוול משנה לשנה. שאלה זו נבחנה במחקר הנוכחי מאחר וביצענו ניסויים בכותנה בשתי שנים עוקבות, 2011 ו-2012. לבחינת שאלה זו חושבו היחסים בין מקדמי הכיוול שהתקבלו בשנת 2011 ו-2012 והם מוצגים בגרפים של איור 8. היחסים בין מקדמי הכיוול מוצגים עבור חיישנים שונים שהוצבו בגובה דומה בכל אחת מהשנים. היחסים חושבו עבור אותם ימים בשנה (בשתי השנים) ועבור אותם תדרי דגימה וערך של פרמטר Time-lag, שהוא אחד הפרמטרים בניתוח המתמטי לחישוב שטף החום המוחשי בשיטת SR.



איור 8: יחס בין מקדמי הכיוול α , שהתקבלו בשנת 2011 לאלה שהתקבלו בשנת 2012, בשדה כותנה בעמק החולה. שמאל למעלה – שני חיישני תרמוקפל שיוצרו במעבדה (יחס ממוצע = 0.46 ± 0.13); ימין למעלה – שני חיישני אנמומטר אולטרא-סוני (יחס ממוצע = 0.90 ± 0.06); שמאל למטה – חיישן אולטרא-סוני וחיישן מסחרי (יחס ממוצע = 0.68 ± 0.07); חיישן אולטרא-סוני וחיישן שיוצרו במעבדה (יחס ממוצע = 0.32 ± 0.08).

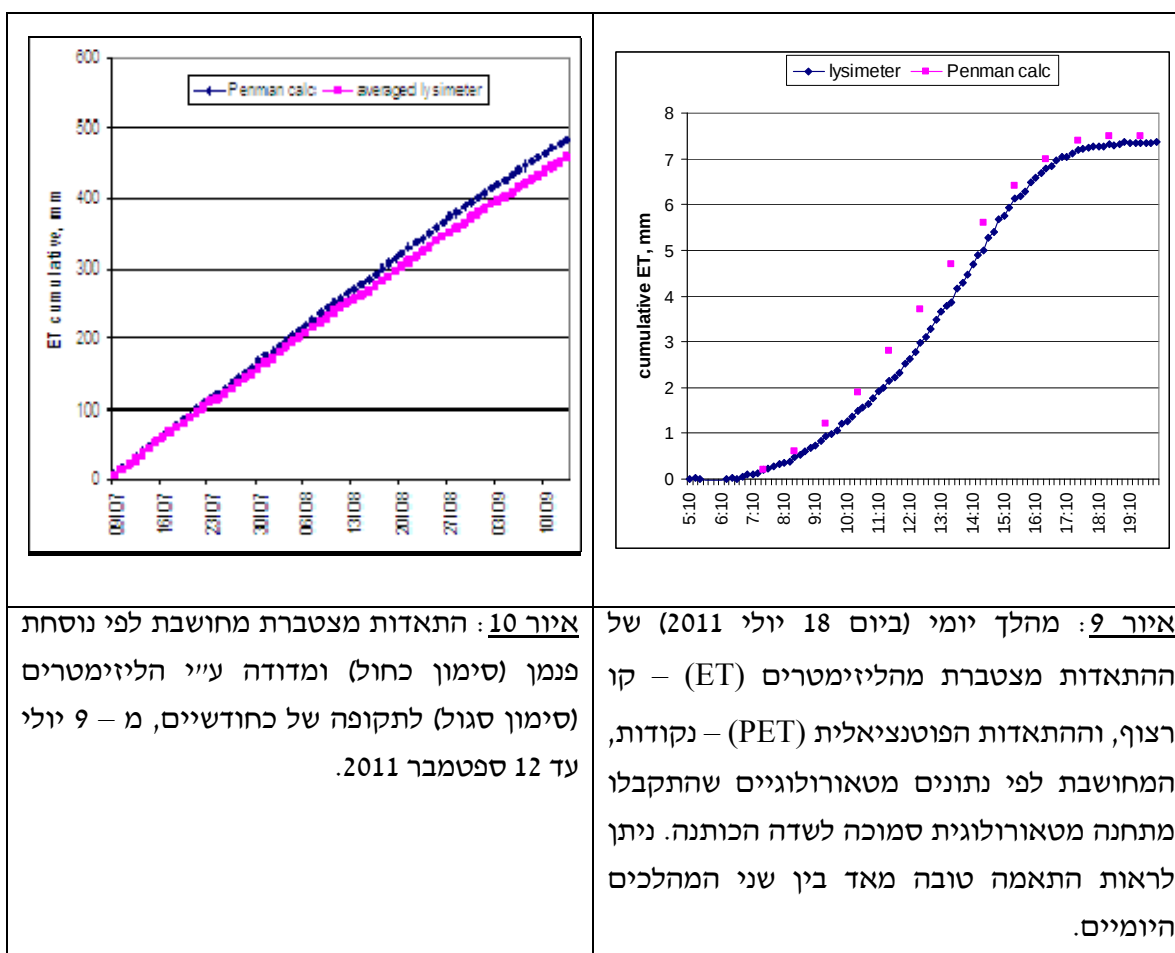
התוצאות באיור 8 מראות כי היחס הקרוב ביותר ל-1 התקבל ע"י שימוש בנתונים משני חיישני האנמומטר האולטרא-סוני. מובן שאין כוונה כי חיישן זה ישמש בעתיד ביישום השיטה אך ממצא זה מראה כי בחירת

חיישן בעל תגובה מהירה מספיק, נותן ערכים קרובים של מקדם המשקל בשתי שנים שונות. מקדם מעט נמוך יותר התקבל ע"י השוואת התוצאות בין החיישן האולטרא-סוני לחיישן המסחרי. השימוש בחיישנים שיוצרו במעבדה נתן יחסים נמוכים יותר, ולכן אינם מומלצים לשימוש שוטף בשיטת SR. המסקנה היא כי החיישן המיניאטורי המסחרי הוא המומלץ לשימוש לאור מחירו הזול יחסית, ופשטות השימוש בו.

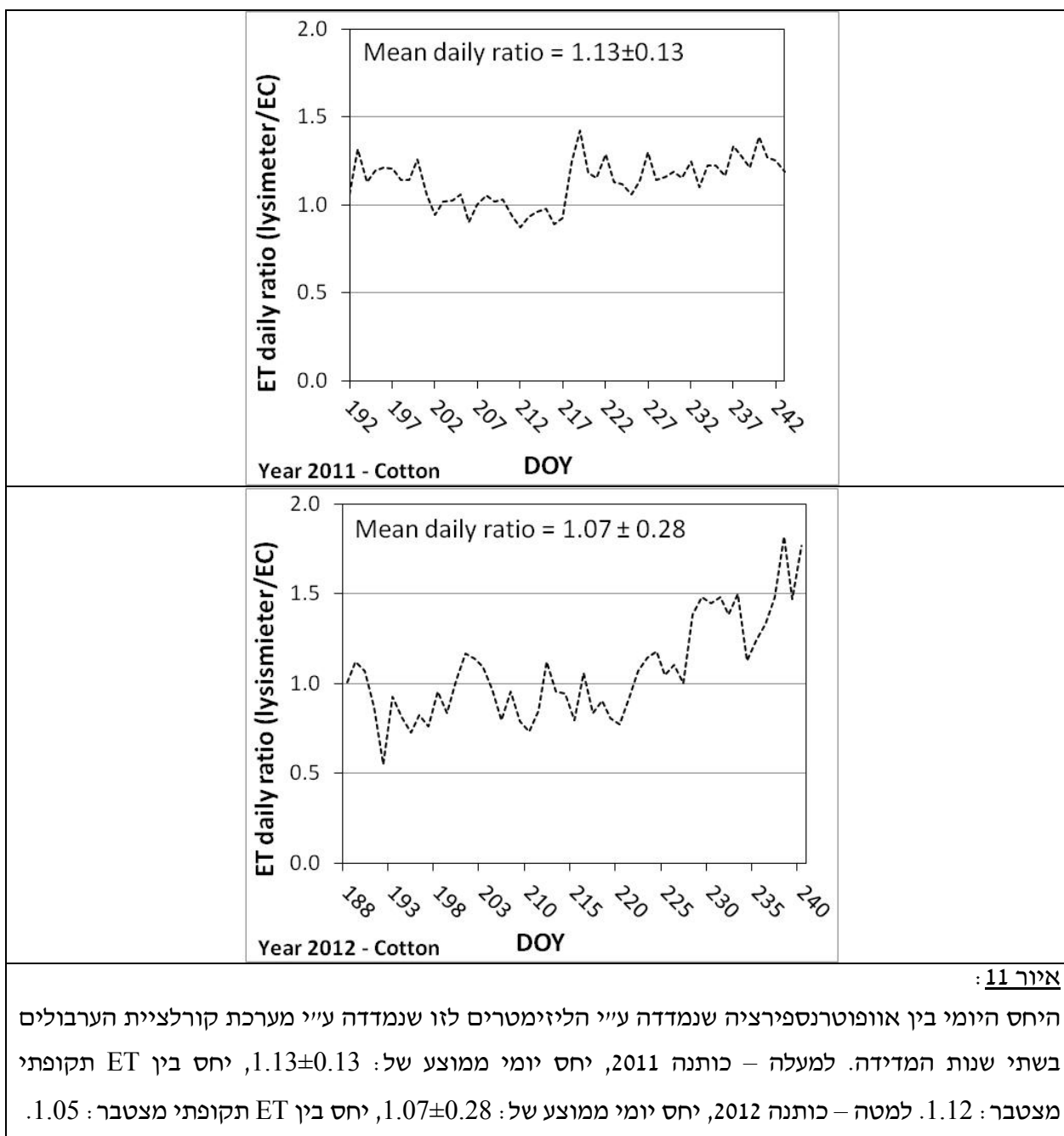
מדידות בליזימטרים

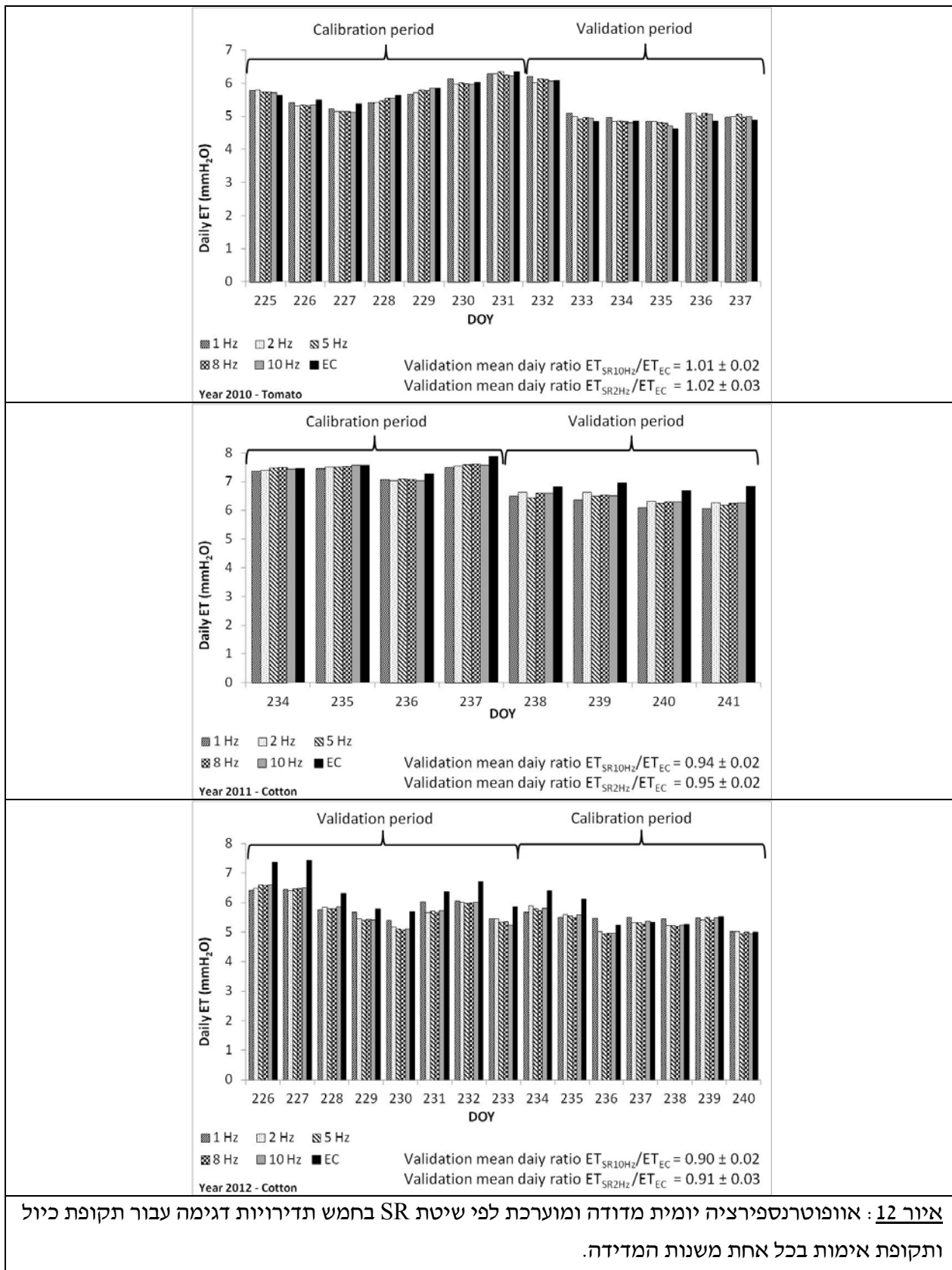
איור 9 מראה מהלך יומי טיפוסי של התאדות מצטברת מהליזימטרים והתאדות פוטנציאלית משדה כותנה (2011). ניתן לראות התאמה טובה מאד בין שני המהלכים היומיים. איור 10 מראה את ההתאדות המצטברת לאורך תקופה של כחודשיים. ניתן לראות גם כאן התאמה טובה בין שני הערכים בעיקר עבור הצמחים הצעירים יותר. בהמשך, פחתה מעט ההתאדות המדודה וזאת עקב הזדקנות צמחי הכותנה. ממצאים דומים התקבלו בגידול הכותנה בשנת 2012.

בשנת 2011 בוצעו מדידות של טמפרטורת העלים (תוצאה לא מוצגת) באמצעות חיישן IR (תוצרת Apogee). נמצאה התאמה טובה מאד בין הערכים המדודים של הצמחים בליזימטרים ובשדה, ממצא שמראה כי הצמחים בליזימטרים ובשדה היו באותו מצב מים.



איור 11 מראה את היחס היומי בין המדידה בליזימטרים לבין המדידה בשיטת קורלציית הערבולים בשתי שנות המדידות בכותנה. בשנת 2011 התקבלה התאמה סבירה בין המדידה בשתי השיטות, עם יחס יומי די אחיד ובעל ערך ממוצע של 1.13. בשנת 2012 התקבל גם כן יחס יומי ממוצע סביר של 1.07, אך נצפתה מגמה של עליית היחס לקראת סוף עונת הגידול. ייתכן ששינוי זה נבע מהבדלים בין השקיית הליזימטרים להשקיית השדה לקראת סוף תקופת הגידול.





איור 12 מציג את האוופוטנספירציה היומית המדודה בשיטת EC והמוערכת לפי שיטת SR בחמישה תדרי דגימה שונים. בכל שנה, הגרפים מראים התאמה טובה מאד בין המדידה הישירה להערכה, גם בתדר הגבוה

של 10Hz, וגם בתדר הנמוך של 2Hz. הסטייה המקסימלית של 10% התקבלה בכותנה, בשנת 2012, עבור תדר דגימה של 10Hz. גרפים אלה ממחישים את יכולתה של שיטת SR להעריך בדיוק טוב את האופוטנספירציה היומית. נראה כי אין השפעה רבה לשינוי תדר הדגימה בתחום התדרים המוצג באיור. ממצא זה ממחיש שוב את הפוטנציאל הטמון בהפעלת שיטת SR באמצעות מערכות איסוף נתונים פשוטות יחסית הפועלות בתדרי דגימה נמוכים.

דיון

התוצאות שהתקבלו הראו כי שיטת SR נתנה תוצאות בהתאמה טובה עם המדידה הישירה בשיטת קורלצית הערבולים. עבור עגבניות לתעשייה גובה מנורמל אופטימאלי היה 1, ועבור כותנה הגובה האופטימאלי המנורמל היה כ- 1.6. החיישן שהוצב בגבהים אלה והמדידה בתדר של 10Hz נתנו מתאם גבוה בין שטף החום המוחשי המדוד ישירות לזה המוערך ע"י שיטת SR. נציין כי בתקופות מדידה נוספות שאינן מוצגות בדו"ח זה התקבלו מתאמים גבוהים גם בגבהים מנורמלים אחרים. המדידה בתדר של 2Hz ובגבהים מנורמלים אחרים נתנה התאמה טובה גם כן עם המדידה הישירה. לממצא זה חשיבות יישומים רבה. המדידה בתדר נמוך תאפשר, בעתיד, יישום השיטה באמצעות מערכות מדידה זולות יותר מאלה הנדרשות למדידות בתדר גבוה.

נבחנה ההשתנות של מקדם המשקל משנה לשנה באותו גידול, ונמצא כי השתנות זו תלויה בסוג החיישן. שימוש בחיישן אולטרא-סוני נתן ערך די קבוע (יחס של 90%), אך חיישן זה יקר מאוד והפעלתו מורכבת ולכן הוא אינו מעשי לשימוש. ההתאמה בין החיישן האולטרא-סוני לחיישן המסחרי הייתה סבירה (כ- 70%) ולכן נראה כי החיישן המסחרי, המיוצר תחת ביקורת איכות קפדנית, הוא המומלץ לשימוש. חשוב לציין כי החיישן המסחרי גם כן זול יחסית ולכן תואם לשיטה המוצעת.

שיטה זולה למדידה בזמן אמיתי של צריכת המים של עגבניות לתעשייה בעמק החולה

סיכום עם שאלות מנחות

1. מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
המטרות לשלושת השנים היו בחינת השפעת גובה החיישן, תדר המדידה וקוטר החיישן על הביצועים של שיטת SR. המטרות הושגו והתקבלו הממצאים הנדרשים.
2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח
מהסיבה שהוסברה בגוף הדו"ח הניסויים החל מהשנה השנייה נערכו בשדה כותנה במקום עגבניות לתעשייה. נבחר שדה כותנה בחוות גד"ש בעמק החולה. בשדה הוצבו מערכות המדידה האטמוספיריות, שכללו מערכת קורלציית הערבולים ומערכת תרמוקפלים למדידה בשיטת "חידוש פני השטח" (SR). סמוך למערכות אלו הוצבו שלושה ליזימטרים לאימות המדידות. כל המערכות הותקנו בשדה סמוך לשתילה. הניסויים בוצעו בהצלחה וכל שנה נאספו נתונים לאורך תקופה של כחודשיים, מרבית תקופת הגידול של הכותנה. התוצאות שהתקבלו הראו כי שיטת SR נתנה תוצאות בהתאמה טובה עם המדידה הישירה בשיטת קורלציית הערבולים. עבור עגבניות לתעשייה גובה מנורמל אופטימאלי היה 1, ועבור כותנה הגובה האופטימאלי המנורמל היה כ- 1.6. החיישן שהוצב בגבהים אלה והמדידה בתדר של 10Hz נתנו מתאם גבוה בין שטף החום המוחשי המדוד ישירות לזה המוערך ע"י שיטת SR. נציין כי בתקופות מדידה נוספות שאינן מוצגות בדו"ח זה התקבלו מתאמים גבוהים גם בגבהים מנורמלים אחרים. המדידה בתדר של 2Hz ובגבהים מנורמלים אחרים נתנה התאמה טובה גם כן עם המדידה הישירה. מדידות ההתאדות מהליזימטרים נמצאו בהתאמה טובה עם מדידות בשיטת קורלציית הערבולים.
3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו.
בוצעו בהצלחה כל המשימות שתוכננו למחקר. מצאנו ששיטת SR יעילה להערכת האוטרנספירציה במגוון תנאי הפעלה של גובה חיישן מנורמל ותדר מדידה. האפשרות ליישם את השיטה בתדר נמוך של 2Hz חשובה ביותר שכן היא מאפשרת את הפעלת השיטה עם מיכשור זול יחסית למדידה של טמפרטורה ולא תידרש מדידה בתדר גבוה שהיא גם יקרה יותר. נבחנו ההשתנות של מקדם המשקל משנה לשנה באותו גידול, ונמצא כי השתנות זו תלויה בסוג החיישן. שימוש בחיישן אולטרא-סוני נתן ערך די קבוע, אך הוא אינו מעשי לשימוש. נראה כי החיישן המסחרי נתן ערך סביר ולכן הוא מומלץ לשימוש.
4. הבעיות שנתקו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה.
השפעת קוטר החיישן על ביצועי המערכת נבדקה בכל שנה ע"י הצבת חיישן תרמוקפל אחד בקוטר גדול. חיישן זה תמיד נתן תוצאות פחות טובות מהחיישנים המיניאטוריים. תוצאותיו אינן מוצגות בדו"ח. עקב תקלות טכניות, לא התאפשר לנו לבחון את יעילות החיישן המסחרי בשתי שנים עוקבות. הממצאים מרמזים כי הוא יעיל יותר מחיישנים מייצור עצמי במעבדה. מחירו הזול יחסית תואם את מטרות המחקר.
5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח? פורסם מאמר:
Rosa, R., Dicken, U., and Tanny, J. (2012). Estimating evapotranspiration from processing tomato using the surface renewal technique. Biosystems Engineering, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.06.011>
6. פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט).