

דו"ח מסכם לתכנית מחקר מספר 13-0444-304

**פיתוח טכנולוגיה זולה למדידת צריכת מים של גידולים תחת רשתות  
בשיטת 'חידוש פני השטח'**

**Development of a cheap method of measuring crop water use under  
screens by the "surface renewal" technique**

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

יוסף טנאי      המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי  
שבטאי 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](mailto: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](mailto:vwshep@volcani.agri.gov.il)

יולי 2014

תמוז תשע"ד

**הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים.**

**הממצאים אינם מהווים המלצות לחקלאים.**

חתימת החוקר: \_\_\_\_\_

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

יוני מכמנדרוב (וולקני)

אורי אחימן (וולקני)

ויקטור לוקיאנוב (וולקני)

מורן פירקנר (וולקני)

**עמוד****תוכן עניינים**

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| תקציר .....                                      | 2  |
| מבוא – רקע מדעי ומטרות המחקר .....               | 2  |
| פירוט עיקרי הניסויים והתוצאות לתקופת הדו"ח ..... | 3  |
| דיון .....                                       | 18 |
| סיכום עם שאלות מנחות .....                       | 20 |

**תקציר**

**הצגת הבעיה:** שטחי הגידול של מטעים וירקות תחת רשתות ובבתי רשת הולך ומתרחב. קיים היום ידע רחב על השקיה של גידולים בשדה הפתוח אך הגידול תחת רשתות משרה מיקרואקלים שונה שבעקבותיו משתנות גם דרישות ההשקיה – ועל כך הידע מועט יחסית. קבוצת המחקר שלנו ערכה בשנים האחרונות מדידות ישירות של אוופוטנספירציה של גידולים בבתי רשת תוך שימוש בשיטת קורלציית הערבולים (Eddy Covariance – EC). בעוד ששיטה זו (EC) נחשבת כיום לשיטה האמינה והמדויקת ביותר למדידה ישירה של האוופוטנספירציה של כלל המטע, הפעלתה מורכבת יחסית, היא מבוססת על מכשור יקר ואינה יישומית למדריך החקלאי או לחקלאי. **מטרת המחקר:** המטרה העיקרית של המחקר הנוכחי היא לבחון ולהתאים שיטה אחרת, זולה ופשוטה יותר, למדידה של אוופוטנספירציה של גידולים חקלאיים תחת רשתות. השיטה מבוססת על עקרון "חידוש פני השטח" (Surface Renewal- SR). **שיטות עבודה:** בשנתיים הראשונות נבחנו השיטה בבתי רשת לגידול בננה ופלפל בחוף הכרמל ובבית הערבה, בהתאמה. בכל בית רשת הוצבו בו בעת שתי מערכות מדידה: מערכת קורלציית הערבולים ומערכת SR, וחיישנים למדידת רכיבי מאזן האנרגיה. השנה השלישית הוקדשה להשלמת עיבוד וניתוח הנתונים, ותחילת עבודה על מערכת שתבצע את החישובים בזמן אמיתי בשדה. **תוצאות עיקריות:** התקבלו רגרסיות ליניאריות מובהקות של שטף חום מוחשי בשיטת SR כנגד המדידה הישירה בשיטת EC. המתאם הגבוה ביותר התקבל בשני בתי הרשת עבור חיישנים שהוצבו סמוך לרשת, מעליה, ועבור תדר ניתוח נתונים של 10 הרץ. התקבלו מקדמי מתאם גבוהים ומובהקים גם בתדרים נמוכים יותר, עד 2 הרץ. באטמוספירה בלתי יציבה התקבל בד"כ מתאם גבוה יותר מאשר באטמוספירה יציבה. התקבלה התאמה טובה בין אוופוטנספירציה מדודה בשתי השיטות. **מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות:** השיטה תפקדה טוב יותר תחת רשת הצל (בננה) בהשוואה לרשת נגד מזיקים (פלפל) וזאת כנראה עקב חדירותה הגבוהה יותר של רשת הצל לתנועה הטורבולנטית של האוויר. ניתן להשתמש בשיטה להערכת האוופוטנספירציה בבתי רשת. **שימוש יומיומי ע"י המגדלים יתאפשר לאחר פיתוח מערכות מדידה פשוטות וזולות לאיסוף הנתונים והכנת תשתיות לשידור נתונים למגדלים.**

**מבוא – רקע מדעי ומטרות המחקר**

בקרת השקיה אמינה ובזמן אמת מחייבת ידיעה טובה של האוופוטנספירציה של הגידול החקלאי אלא שבאמצעים הקיימים היום מידע זה אינו בר השגה בפרקטיקה החקלאית. נהוג השקיה כיום מתבסס על התאדות פוטנציאלית מנתונים מטאורולוגיים, ומותאם למצב הגידול בעזרת מקדמים אמפיריים ובעזרת היזון חוזר ממדידות בשטח. כיום רוב הגישות של ההיזון החוזר לצורך בקרת ותיזמון ההשקיה מבוססות על מדדים עקיפים, כלומר, מדדים המציינים את מצב המים בצמח או בקרקע לידו. מדד כמותי של צריכת המים יכול היה ללמד את החקלאי מהו הפיצוי הנדרש עבור המים שאבדו לאטמוספירה.

מדידה ישירה של טרנספירציה ברמת הצמח השלם יכולה להיעשות במספר שיטות כמו מדידת זרימת המים בגזע או בגבעול או שקילה בליזימטרים, וברמת העלה באמצעות פורומטר. המשותף לשיטות הקיימות הוא שהן ברובן נקודתיות ומוגבלות בכסוי המרחבי, או מוגבלות בכסוי העיתי. הערכה רציפה של

שטף ההתאדות האמיתית מכלל הנוף בבית רשת, כפי שמוצע על ידינו, חסינה לשונות העתית והמרחבית, ויכולה לתרום ליעול ההשקיה ושיפור היבולים. מדידה ישירה של אוופוטנספירציה 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 האוופוטנספירציה 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 האוופוטנספירציה של הגידול החקלאי שתהיה זמינה לשימוש יום-יומי.

השיטה המוצעת במחקר זה למדידת שטפים טורבולנטיים כמו אוופוטנספירציה היא שיטת חידוש פני השטח (SR). זוהי שיטה פשוטה וזולה יחסית להערכת שטף החום המוחשי בנוף צמחי. השיטה מבוססת על זיהוי תצורות הזרימה הטורבולנטית של הרוח. לדוגמה, אם נציב חיישן טמפרטורה באוויר מעל או בתוך הנוף, הסינגל שלו כתלות בזמן יראה תצורות חוזרות ונשנות של "רמפות" (שיני מסור) – עלייה הדרגתית בטמפרטורה ובסופה נפילה חדה. כל עליית טמפרטורה מייצגת את התחממות גוש האוויר והנפילה החדה מייצגת את החלפתו בגוש אוויר קריר יותר. קצב החלפת גושי האוויר ואמפליטודת הטמפרטורה שלהם מייצגים את שטף החום המוחשי עד כדי מקדם כיוול. בעקבות גילוי ממצאים אלו פותחו שיטות מתמטיות לניתוח סינגלים אלו ולחישוב שטף החום המוחשי מתוכם. ידיעת שטף החום המוחשי יכולה לשמש בסיס להערכת האוופוטנספירציה תוך ביצוע מדידות נלוות של קרינה נטו ושטף חום לקרקע ושימוש במאזן האנרגיה.

כל המחקרים שבוצעו עד כה בשיטה זו (SR) נערכו בשדה פתוח. סביבת בית הרשת משרה מיקרואקלים שונה ולכן יש צורך לבחון ולכיל את השיטה לסביבה זו. אחת ההשפעות הבולטות של בית הרשת היא הפחתת מהירות הרוח ביחס למטע פתוח. במצב זה צפוי כי קצב החלפת מערבולות האוויר יהיה נמוך יותר בהשוואה לשדה פתוח. כמו כן, עקב ההצללה, צפויה להתקבל אמפליטודה של טמפרטורת אוויר נמוכה יותר בהשוואה לשדה הפתוח. מכאן החשיבות בבחינת שיטת SR בבתי רשת.

#### מטרות המחקר כפי שהופיעו בהצעה המקורית:

המטרה העיקרית של המחקר הנוכחי היא לפתח ולהתאים שיטה זולה למדידה רציפה של אוופוטנספירציה של כלל הנוף לגידולים בבתי רשת. השיטה תהיה מבוססת על עקרון "חידוש פני השטח" – Surface Renewal (SR). המטרה הספציפית היא לכיל את שיטת "חידוש פני השטח" (SR) עבור גידולי בננה ופלפל בבתי רשת כנגד ערכי שטף חום מוחשי שיימדדו ישירות ע"י מערכת קורלצית הערבולים (EC) שתוצב סימולטאנית בבית הרשת עם מערכת SR. תהליך הכיול יתבסס על אופטימיזציה והתאמה של שיטת SR לתנאי המטעים שייבחנו מבחינת גובה הצבת חיישן הטמפרטורה, קוטר החיישן ותדר הדגימה.

#### פירוט עיקרי הניסויים והתוצאות

השנתיים הראשונות של המחקר הוקדשו לעריכת ניסויי שדה מקיפים בשני בתי רשת נפוצים בישראל – האחד לגידול בננה והשני לגידול פלפל. השנה השלישית הוקדשה לעיבוד וניתוח הנתונים, ביצוע האופטימיזציות, והתחלת עבודה על מערכת SR פשוטה שתספק ערכי התאדות ברמה יומית למגדל.

#### א. תיאור אתרי הניסוי ומערכות המדידה בשתי שנות הניסויים

שנה א': הניסוי בוצע במטע בננה בבית רשת באזור חוף הכרמל (ליד עתלית). ממדי בית הרשת היו

כ – 230 X 450 מ', כאשר הממד הארוך היה בכיוון מערב-מזרח. צמחי בננה (זן גרנד נייך) נשתלו באביב 2011.

רשת צל ארוגה שקופה, בעלת אחוז הצללה נומינאלי של 8.5%, נפרשה בגובה 5.5 מ' מעל המטע. מוצגות תוצאות לשתי תקופות: בין ה- 18 יולי, עד 1 אוגוסט 2011 (14 ימים, 208-213, 199-206, **שתכונה להלן** "צמחים קטנים" עם גובה ממוצע של 3.5 מ'), ובין ה- 10 לאוגוסט עד ה- 16 לאוגוסט (7 ימים 222-229, **שתכונה להלן** "צמחים גדולים" עם גובה ממוצע של 4.3 מ').

מערכת המדידה כללה מערכת קורלציית ערבולים (EC) למדידה ישירה של שטף חום מוחשי ואופוטורנספירציה 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 (10 Hz) את שלושת רכיבי מהירות הרוח והטמפרטורה הקולית, וכן את ריכוז אדי המים באוויר. המערכת הוצבה בגובה של 4.5 מ' מעל פני הקרקע (ראה איור 1-א).

|                                                                                                                                  |                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                |                         |
| <p>איור 1-ב: פריסת חיישני תרמוקפל מיניאטוריים על עמוד במטע הבננה בבית הרשת. חיישנים אלה שימשו להערכת שטף חום מוחשי בשיטת SR.</p> | <p>איור 1-א: מערכת קורלציית הערבולים במטע בננה בבית הרשת. הנתונים ממערכת זו שימשו ייחוס לכיול שיטת SR.</p> |

מערכת חיישני SR (איור 1-ב) הוצבה במרחק של כ- 5 מ' דרומית לתורן של מערכת EC. המערכת

כללה 9 חיישני תרמוקפל מיניאטוריים שיוצרו במעבדתנו מחוטי תרמוקפל TYPE T, בקוטר של 0.08 מ"מ (40-SLE AWG, 79 $\mu$ m). קוטר החוט נבחר על בסיס חישוב זמן תגובה של כדור בקוטר כפול, (Lumped heat capacity analysis) שצפה זמן תגובה נמוך מ- 0.1 שנייה לקבלת שינוי של 63% בטמפרטורה של החיישן. הקוטר המעשי של החיישנים היה בטווח של 90-270 $\mu$ m. הוצבו 2 חיישנים מעל הרשת, ו- 7 חיישנים מתחת לרשת, חלקם בתוך הנוף וחלקם במרווח שבין הרשת לצמחים. בתקופת "צמחים גדולים" הוצבו בגובה של 4 מ' שישה חיישנים נוספים בקטרים שונים, בטווח בין 125 – 425  $\mu$ m. שתי מערכות המדידה, EC ו-SR, הוצבו במרכז בית הרשת מה שאפשר אורך נשיבה גדול מ- 200 מ' לרוח הצפון-מערבית השלטת באזור.

חיישנים נוספים הותקנו כדי למדוד את שאר רכיבי מאזן האנרגיה. חיישן קרינה נטו הוצב מתחת לרשת ומעל לצמחים, בגובה 5 מ' מעל פני הקרקע. שישה חיישני שטף חום קרקעי הוטמנו בתוך הקרקע, בעומק 0.08 מ', שלושה באזור של קרקע רטובה (סמוך לטפטפת) ושלושה באזור של קרקע יבשה. מעל כל חיישן שטף חום קרקעי הוטמנו בתוך הקרקע שני תרמוקפלים למדידת השתנות אגירת החום בשכבה

העליונה של הקרקע. כל המידע שהתקבל משתי מערכות המדידה נרשם והוקלט ע"י אוגר נתונים (CR5000, Campbell Sci, USA) המצויד בכרטיס הרחבת זיכרון בנפח של 2 GB.

**שנה ב':** הניסוי בוצע במטע פלפל בבית רשת בצפון ים המלח (ליד קיבוץ בית הערבה). ממדי בית הרשת היו כ - 120 X 116 מ'. שתילי פלפל נשתלו באוגוסט 2012 בתעלות קומפוסט ברוחב 60 ס"מ, שתי שורות שתילים בכול ערוגה. סה"כ עומד השתילה הוא 3.5 צמחים למ"ר (איור 2-א). רשת שקופה 50 מש, בעלת אחוז הצללה של 25-29%, נפרשה בגובה 3.8 מ' מעל לקרקע. בתחילת העונה (ספטמבר 2012) ובסוף העונה (מרץ-מאי 2013) נפרשה גם רשת צל שחורה במטרה להפחית מעוצמת קרינת השמש. המערכות הותקנו בשטח בספטמבר 2012 ומדדו (לא ברציפות) עד מאי 2013. דו"ח זה מציג תוצאות של שתי תקופות, חורף ואביב. עונת החורף מ- 4 לינואר עד 23 לפברואר (סה"כ 30 ימי מדידה לא רצופים). עונת האביב מ- 28 לפברואר עד 10 לאפריל (סה"כ 36 ימי מדידה לא רצופים).

מערכת המדידה כללה מערכת קורלציית ערבולים (EC) למדידה ישירה של שטף חום מוחשי ואופוטורנספירציה 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). חיישן רוח דומה הוצב גם בגובה 3 מ' בתוך בית הרשת. המערכת מדדה בתדר גבוה (10 Hz) את שלושת רכיבי מהירות הרוח והטמפרטורה הקולית, וכן את ריכוז אדי המים באוויר. המערכת הוצבה מעל לרשת, בגובה של 5 מ' מעל פני הקרקע (איור 2-ב).



חיישני SR (תרמוקפלים) הוצבו ע"ג התורן הראשי בצמוד למערכות מדידת הרוח. המערכת כללה 9 חיישני תרמוקפל מיניאטוריים TYPE T, בקוטר של 0.08 או 0.05 מ"מ. קוטר החוט נבחר על בסיס חישוב זמן תגובה של כדור בקוטר כפול (Lumped heat capacity analysis) שצפה זמן תגובה של כ - 0.1 שנייה לקבלת שינוי של 63% בטמפרטורה של החיישן. הוצבו 4 חיישנים מעל הרשת וחמישה חיישנים בין צמרת הצמחים לרשת. עד תאריך 3.1.2013, נעשה שימוש רק בחיישנים בקוטר 0.08 מ"מ. לאחר תאריך זה הוחלפו 2 חיישנים מעל הרשת וארבעת החיישנים מתחת לרשת לחיישנים בעלי קוטר של 0.05 מ"מ. חיישני התרמוקפלים הינם מתוצרת OMEGA מסוג SLE. שתי מערכות המדידה, SR ו-EC, הוצבו באזור הדרום מזרחי של החלקה מה שאפשר אורך נשיבה של כ- 120 מ' לרוח הצפון-מערבית השלטת באזור.

חיישנים נוספים הותקנו כדי למדוד את שאר רכיבי מאזן האנרגיה בתדירות מדידה של 1 שניה, ומוצעו כל חצי שעה. חיישן קרינה נטו הוצב מעל הרשת בגובה 5 מ' מעל פני הקרקע. ארבעה חיישני שטף חום קרקעי הוטמנו בקרקע, בעומק 0.08 מ', שניים באזור של קרקע רטובה (סמוך לטפטפת) ושניים באזור

של קרקע יבשה. מעל כל חיישן שטף חום קרקעי הוטמנו בתוך הקרקע שני תרמוקפלים למדידת השתנות אגירת החום בשכבה העליונה של הקרקע. רישום הנתונים בתדר הגבוה נעשה ע"י אוגר נתונים CR5000 המצויד בכרטיס הרחבת זיכרון בנפח של 2 GB. הנתונים שנמדדו בתדירות הנמוכה נרשמו באוגר נתונים מסוג CR23x. שני אוגרי הנתונים מתוצרת Campbell Sci. USA. תחנה מטאורולוגית חיצונית מדדה מהירות וכוון רוח (10 מ"/ש), קרינה גלובאלית (2 מ"/ש) וטמפרטורה ולחות אוויר (4 מ"/ש). התחנה הוצבה כ- 50 מ' צפונית מערבית לבית הרשת.

#### ב. התיאוריה של שיטת חידוש פני השטח

מתוך סיגנל הטמפרטורה הנמדד מחושבים אמפליטודה וזמן מחזור של רמפות בשיטת Structure function. המשוואות הבאות מייצגות את התיאוריה הבסיסית של ניתוח סיגנל הטמפרטורה:

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

במשוואות אלה:  $\Delta T$  הוא הפרש הטמפרטורה המדוד בין שתי נקודות זמן (מ"צ);  $r$  הוא פרמטר של עיכוב זמן (שניה);  $a$  היא אמפליטודת רמפות הטמפרטורה הממוצעת לחצי שעה (מ"צ);  $l+s$  הוא זמן המחזור של רמפה ממוצעת לחצי שעה (שניה);  $z$  הוא גובה החיישן (מ');  $H_{NC}$  הוא שטף החום המוחשי הבלתי מכויל שמתקבל בשיטת SR (וואט/מ<sup>2</sup>);  $H_{SR}$  הוא שטף החום המכויל (וואט/מ<sup>2</sup>); כאשר  $\alpha$  הוא מקדם הכיול (חסר מימד) המתקבל מתוך רגרסיה ליניארית בין  $H_{NC}$ , לבין  $H_{EC}$  שהוא שטף החום המוחשי המדוד בשיטת קורלציית הערבולים. מהלך החישוב: תחילה מחשבים את המומנטים של הפרשי הטמפרטורה, משוואות (2), (3) ו- (4). כל מומנט מחושב לפי המתכונת המופיעה במשוואה (5). צעד החישוב בנוסחה (5) נקבע לפי תדר ניתוח הנתונים ופרמטר העיכוב. המומנטים המתקבלים מוצבים במשוואה ממעלה שלישית (6), והפתרון שלה נותן את האמפליטודה הממוצעת של הרמפה,  $a$ , לפרק הזמן הנבחן. משוואה ממעלה שלישית מספקת שלושה פתרונות ולכן תמיד נבחר או הפתרון הממשי היחיד (כאשר שני הפתרונות הנוספים מרוכבים) או הפתרון שסימנו שונה מהסימן של שני האחרים (במקרה של שלושה פתרונות ממשיים). משך הרמפה,  $l+s$ , מחושב לפי נוסחה (7). שני פרמטרים אלה משמשים לחישוב שטף החום הבלתי מכויל לפי נוסחה (8a). נוסחה (8b) היא רגרסיית הכיול.

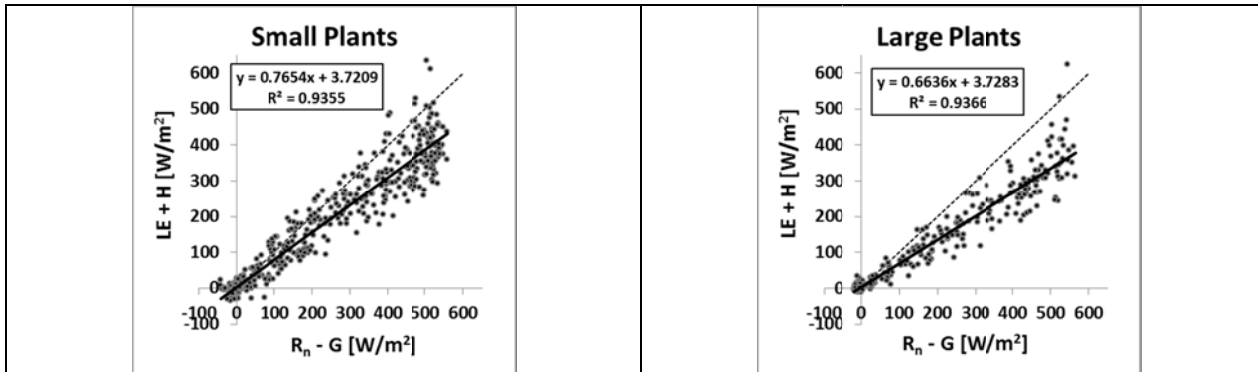
#### ג. תוצאות עיקריות

##### מאזני האנרגיה של בתי הרשת

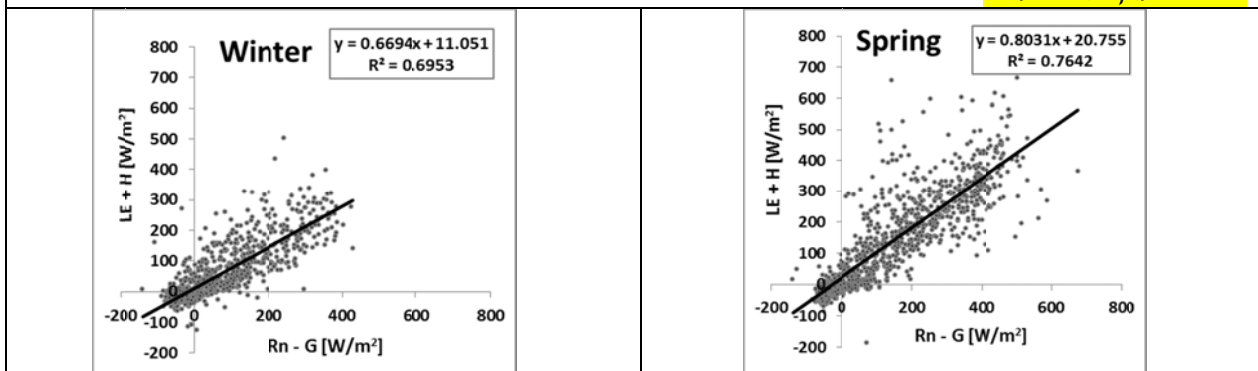
כדי לאמת את איכות התוצאות שמתקבלות ע"י מערכת קורלציית הערבולים, וכן לצורך הערכת האופוטורנספירציה בשיטת SR, נבחנו מאזני האנרגיה בניסויי השדה. איורים 3 ו-4 מציגים את מאזני



האנרגיה עבור שתי התקופות בכל אחד מהניסויים: הבננה והפלפל, בהתאמה. בשני הניסויים התקבל מאזן אנרגיה עם שיפוע (מקדם סגירה) המקובל בספרות (Wilson et al. 2002, Ag. For. Met. 113, 223-243) וערכים נמוכים מאד של חיתוך ציר  $Y$ . בבננה, סגירת האנרגיה הייתה גבוהה יותר כאשר הצמחים היו קטנים יותר (0.76 לעומת 0.66). בפלפל, סגירת האנרגיה הייתה גבוהה יותר באביב (0.8) מאשר בחורף (0.67), כאשר שטפי האנרגיה היו גבוהים יותר. התוצאות תומכות באמינות מדידות השטפים בשיטת קורלציית הערבולים. נוסחאות רגרסיה אלה (המופיעות בגרפים) שימשו לחישוב  $LE$  כאשר  $H$  מחושב בשיטת חידוש פני השטח.

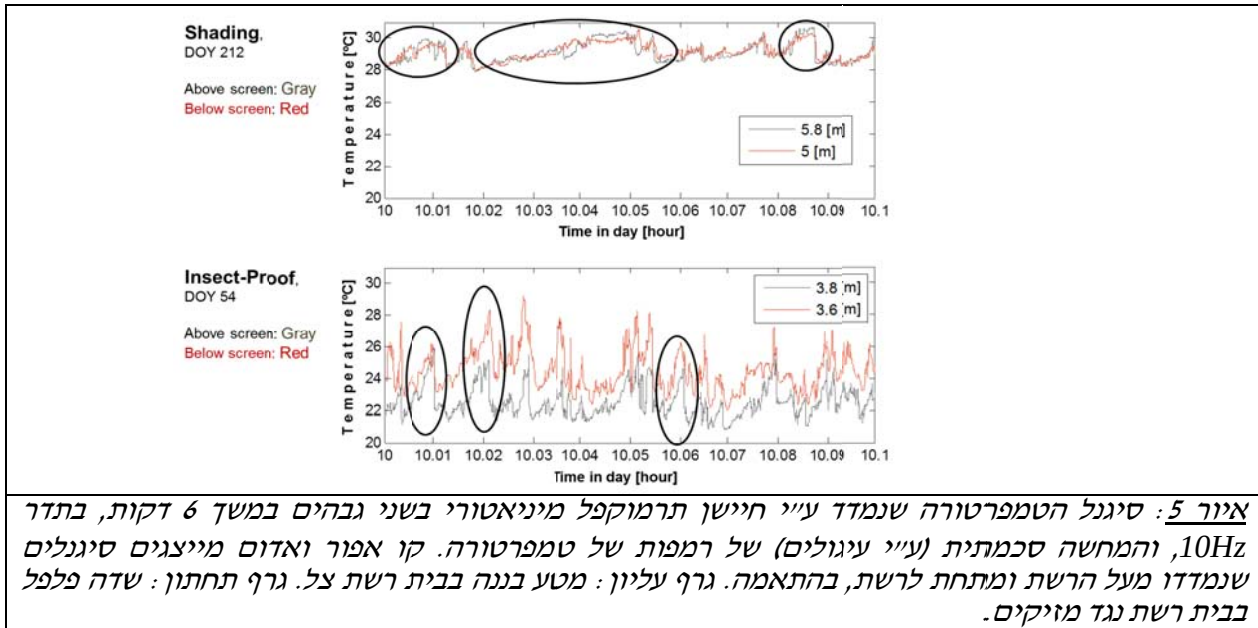


איור 3: מאזני האנרגיה שהתקבלו בבית רשת לגידול בננה בתקופה של "צמחים קטנים" (שמאל), ובתקופת "צמחים גדולים" (ימין). ציר  $Y$  מציג את השטף של סה"כ האנרגיה הנצרכת ע"י הגידול החקלאי בצורת חום מוחשי ( $H$ ) וחום כמוס ( $LE$ ), וציר  $X$  מציג את השטף של האנרגיה הזמינה כהפרש בין הקרינה נטו ( $R_n$ ) לשטף החום לקרקע ( $G$ ). הקו הרציף והקו המנוקד הם קו הרגרסיה וקו היחס 1:1, בהתאמה. כל נקודה מייצגת ערך חצי שעתי.



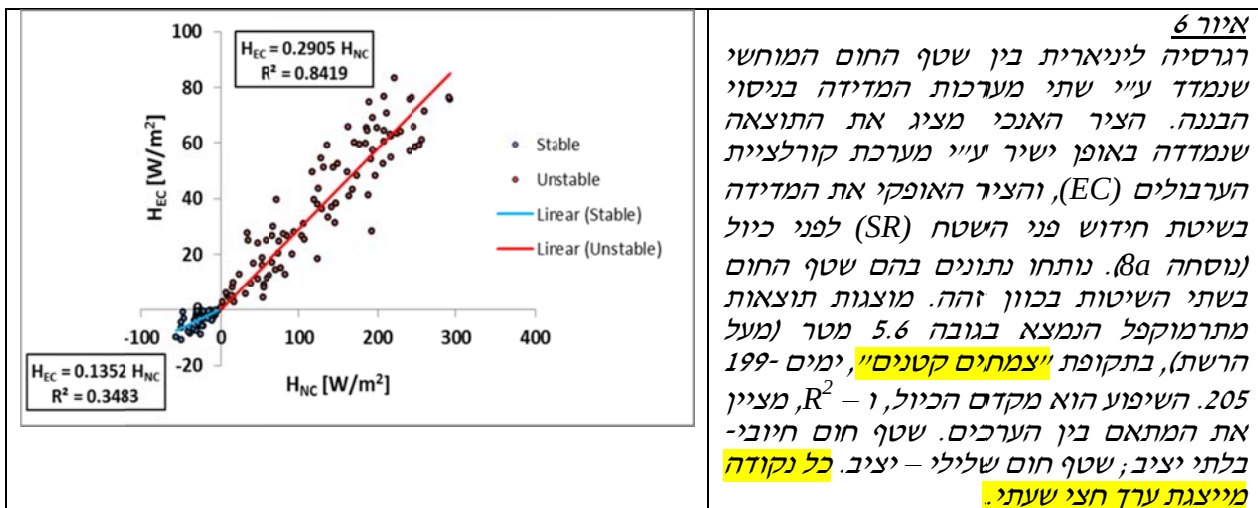
איור 4: מאזני האנרגיה שהתקבלו בבית הרשת להגנה ממזיקים בו גודל פלפל. תקופת החורף (שמאל), תקופת האביב (ימין). ציר  $Y$  מציג את השטף של סה"כ האנרגיה הנצרכת ע"י הגידול החקלאי בצורת חום מוחשי ( $H$ ) וחום כמוס ( $LE$ ), וציר  $X$  מציג את השטף של האנרגיה הזמינה כהפרש בין הקרינה נטו ( $R_n$ ) לשטף החום לקרקע ( $G$ ). הקו הרציף הוא קו הרגרסיה המוצגת בגרף. כל נקודה מייצגת ערך חצי שעתי. סיגנל הטמפרטורה ומבנה הרמפות

איור 5 מציג דוגמה של סיגנל הטמפרטורה שנמדד בתדר 10Hz בשני גבהים, אחד מעל והשני מתחת לרשת, בשני בתי הרשת שנבדקו, בו ניתן לראות רמפות של טמפרטורה (מודגשות ע"י העיגולים) המייצגות החלפה של גושי אוויר. הנוכחות של הרמפות ממחישה את היתכנות שיטת חידוש פני השטח בתנאי הניסוי. זוהי המחשה ויזואלית בלבד. בפועל זיהוי וחישוב מאפייני הרמפות נעשה בשיטה המתמטית המתוארת בסעיף ב' לעיל. באיור 5 ניתן להבחין גם כי הפרש הטמפרטורה בין האזור מעל ומתחת לרשת, גדול יותר ברשת נגד מזיקים לעומת רשת הצל.



#### חישוב מקדמי הכיול והמתאם

איור 6 מראה דוגמה של רגרסיה ליניארית בין שטפי החום המוחשי החצי שעתיים כפי שנמדדו ע"י מערכת קורלציית הערבולים וע"י מערכת SR בניסוי בבית הרשת של הבננה. לכל חיישן בוצעה רגרסיה כזאת בתדר ניתוח נתונים שונה, בטווח בין 1-10 הרץ. מרגרסיה כזאת מתקבלים ערך של מקדם הכיול  $\alpha$  שהוא השיפוע של הקו, ומקדם מתאם  $R^2$ . הרגרסיות נערכו למצבים של יציבות ואי-יציבות של שכבת הגבול, בנפרד. בניתוח הנתונים הוגדרו קריטריונים לסינון של שטפים ולכן כל אחת מהרגרסיות שבוצעו מבוססת על מספר שונה של נקודות. אופטימיזציה של התוצאה הסופית נעשתה לפי ערך מרבי של  $R^2$ .



#### מקדם המתאם ומקדם הכיול – השפעת גובה המדידה, היציבות האטמוספירית ותדר הדגימה

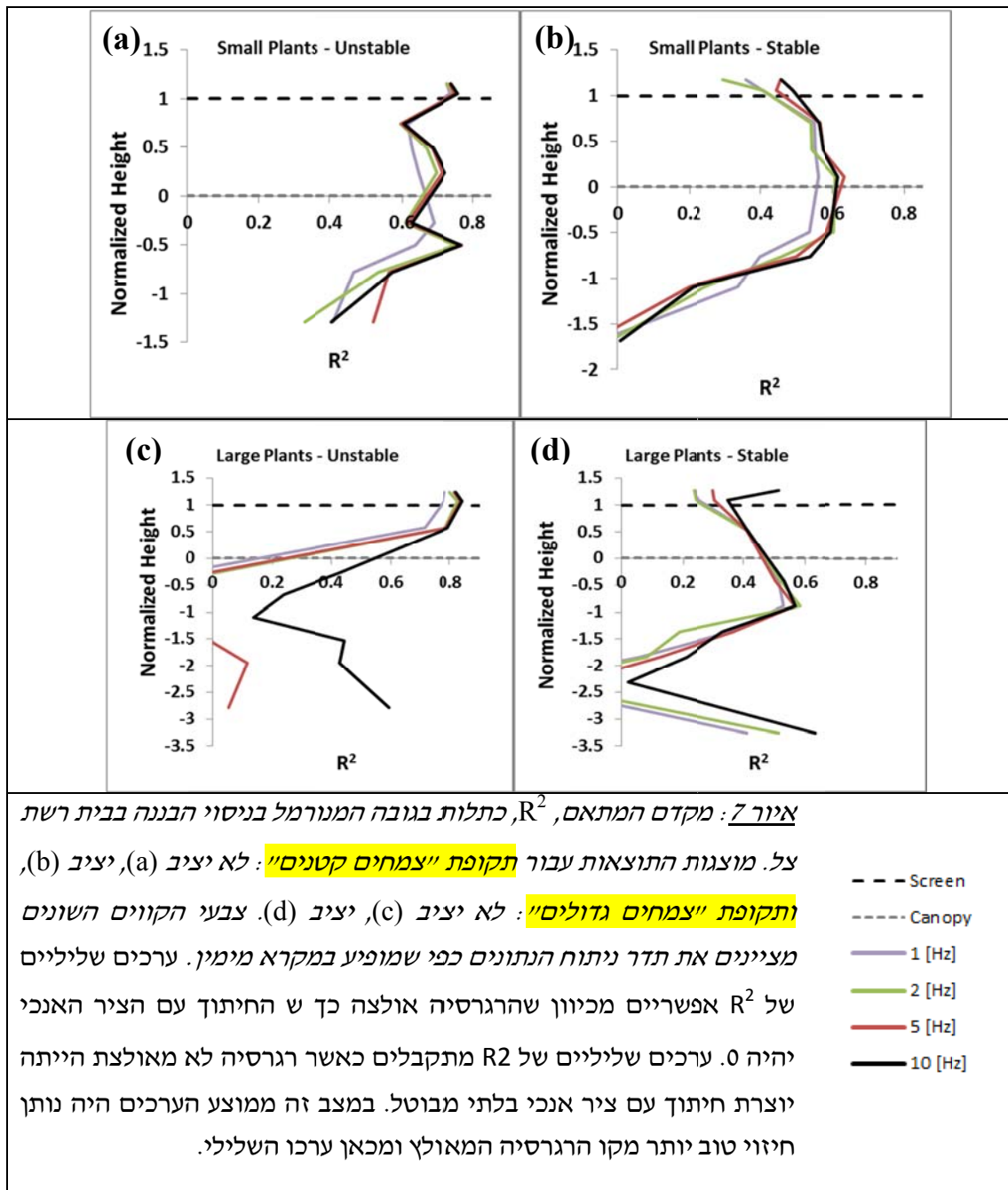
איור 7 מציג תוצאות כיול עבור ניסוי הבננה. מוצגים ערכים של מקדם המתאם  $R^2$ , כתלות בגובה המנורמל,

המוגדר:  $z_s = \frac{z - h_c}{h_s - h_c}$ . בביטוי זה,  $z$  הוא גובה החיישן,  $h_c$  הוא גובה קצה הנוף,  $h_s$  הוא גובה הרשת. לכן,

בגרפים אלה,  $z_s = 0$  מייצג את קצה הנוף,  $z_s = 1$  מייצג את גובה הרשת,  $z_s < 1$  מייצג את תחום הנוף. לכל

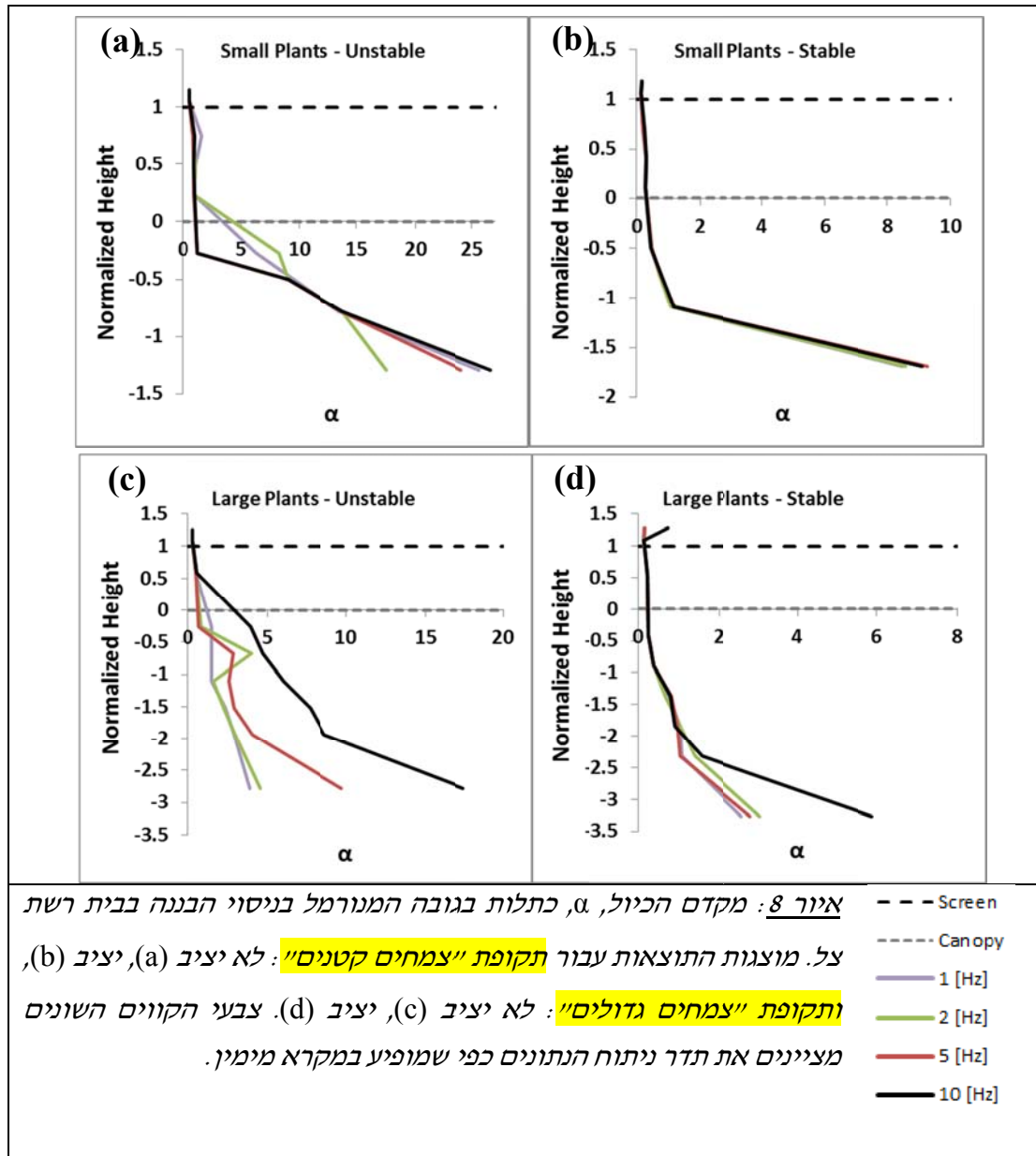


גובה מוצג הערך הגבוה ביותר של  $R^2$ , מתוך הערכים שהתקבלו לערכים שונים של  $r$  (פרמטר עיכוב הזמן). כל ערכי  $R^2$  באזור שבקצה הנוף ומעליו היו מובהקים ברמה של 95%.



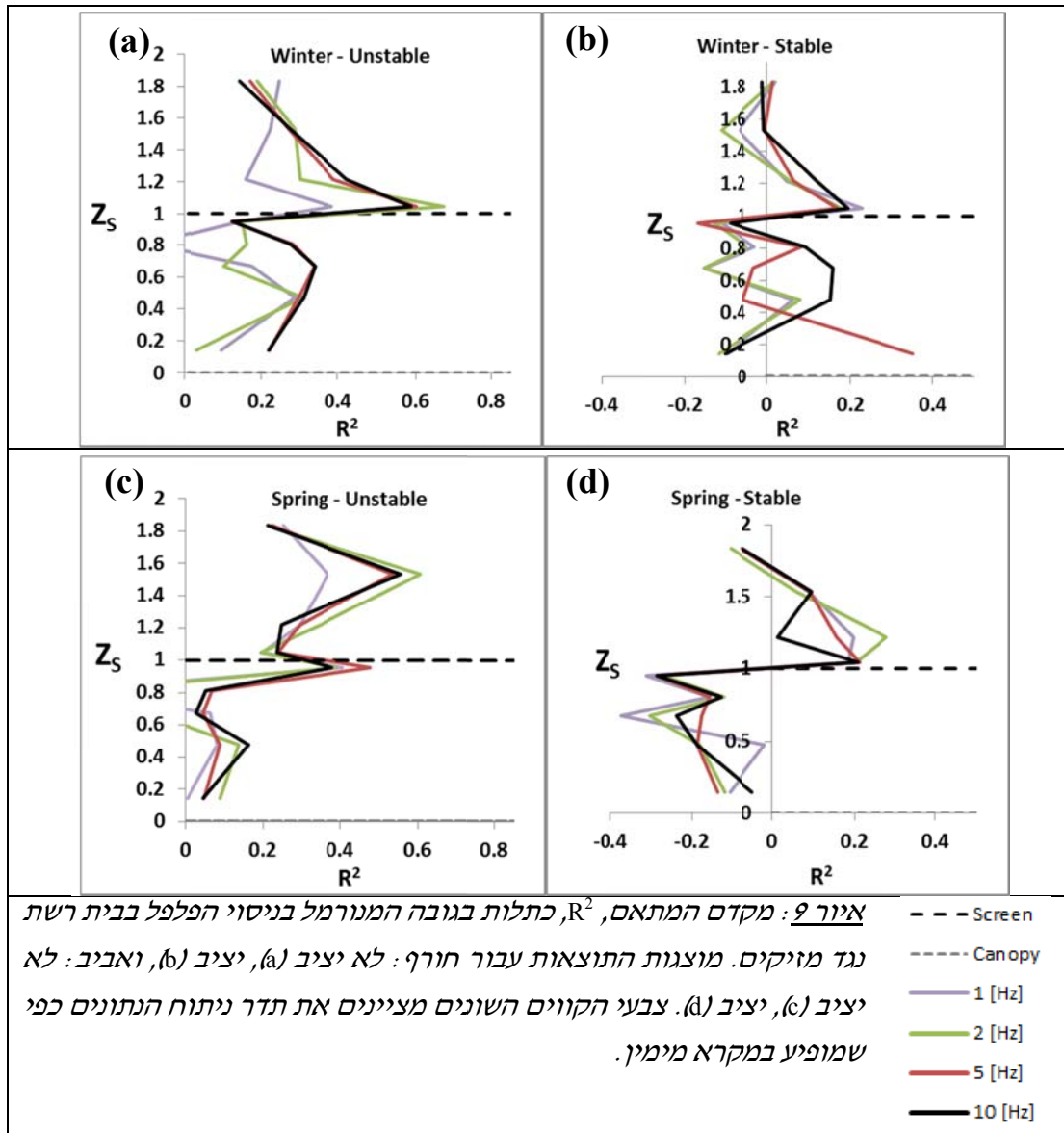
באיור 7 ניתן לראות כי בצמחים הקטנים, בתחום של קצה הנוף ומעליו ( $z_s \geq 0$ ) התקבלו מקדמי מתאם גבוהים יותר למצב בלתי יציב מאשר למצב היציב. זוהי תוצאה שמאפיינת גם את התוצאות שהתקבלו בספרות עבור גידולים חשופים. במצב הבלתי יציב, שהוא המצב הרלוונטי לשעות היום ולכן יותר מעניין אותנו, התקבל מתאם מרבי סמוך לרשת מעליה, בצמחים קטנים וגדולים, ולכן גובה זה מוגדר כגובה אופטימלי. בדרך כלל ניתוח הנתונים בתדר 10Hz היה מיטבי. אולם, במצב הבלתי יציב ובגובה האופטימלי, הפחתת תדר ניתוח הנתונים עד 2Hz, כמעט לא השפיע על מקדם המתאם. איור 8 מציג, במתכונת דומה לאיור 7, את השתנות מקדם הכיול  $\alpha$  עם הגובה. ניתן לראות בברור כי מקדם הכיול יורד עם הגובה, כפי

שדווח בספרות המדעית לצמחים חשופים. עבור צמחים קטנים ותדר של 10Hz, ההשתנות של  $\alpha$  עם הגובה אינה גדולה.

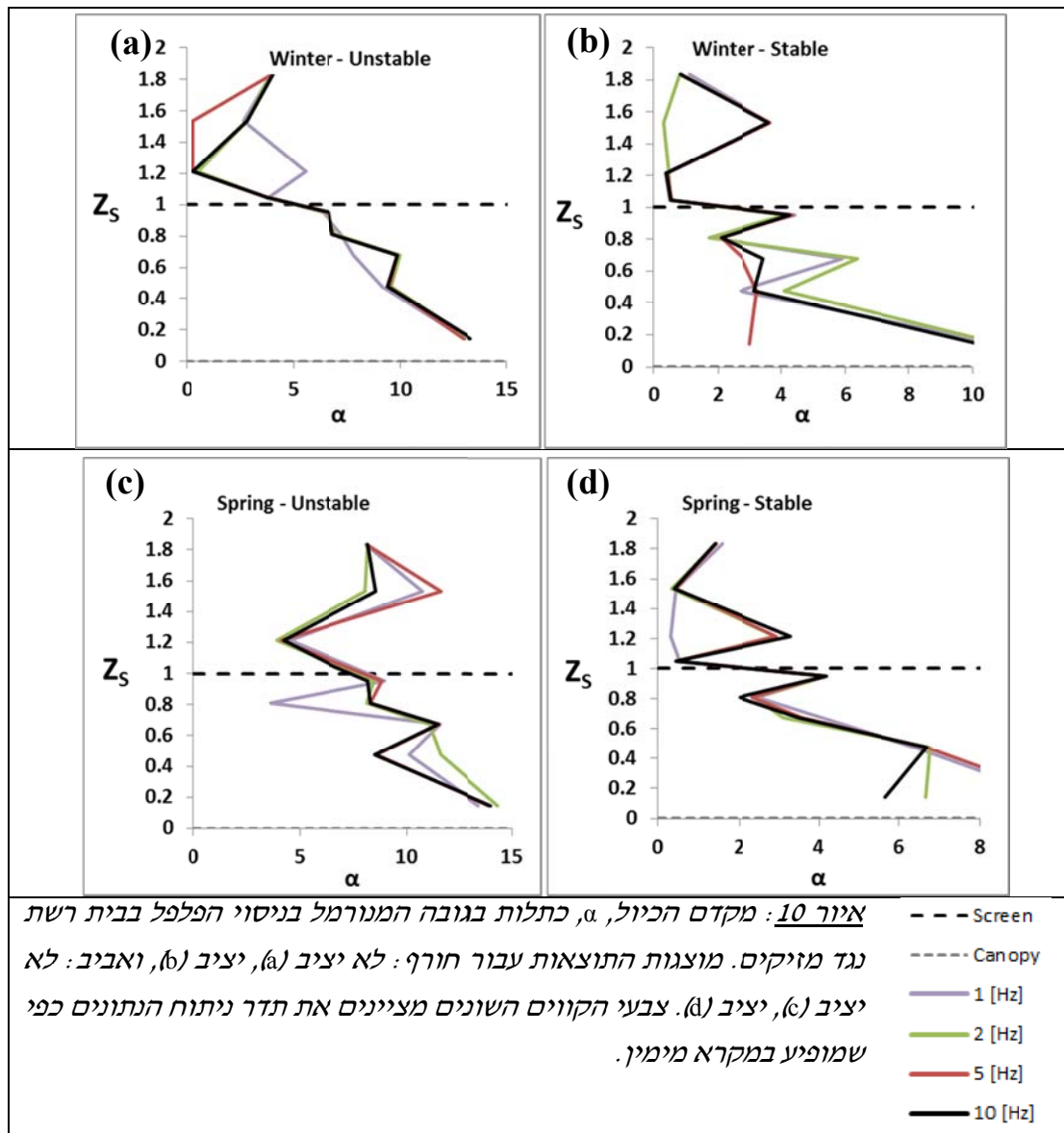


איור 9 מציג את השתנות מקדם המתאם  $R^2$  עם הגובה המנורמל בבית הרשת נגד מזיקים בו גודל פלפל, במתכונת דומה של איור 7. האיור מציג את מקדמי המתאם עבור עונות החורף והאביב, ובכל עונה מוצגות התוצאות לתנאים של שכבת גבול יציבה ובלתי יציבה. מקדמי המתאם עבור בית רשת זה נמוכים משמעותית מאלו שהתקבלו עבור מטע הבננה בבית רשת צל. במצבים יציבים התקבלו ערכים נמוכים של מקדם המתאם, אך במצבים בלתי יציבים, ומעל לרשת, התקבלו ערכים סבירים בחלק מהגבהים. גם כאן ניתן לראות כי הערך הגבוה ביותר של מקדם המתאם התקבל מעל לרשת (לתנאים יציבים ובלתי יציבים) וממצא זה תואם את התוצאה שהתקבלה במטע הבננה. בתנאים בלתי יציבים, ומעל לרשת, ניתן להפחית את תדר ניתוח הנתונים עד 2Hz, ללא השפעה משמעותית על מקדם המתאם. ממצא זה מציע כי ניתן לדגום בתדר נמוך ולקבל תוצאה אמינה, ולכך יש משמעות לגבי פיתוח מערכת מדידה זולה בעתיד, שלא תתבסס

על מדידות בתדר גבוה שהן יקרות ודורשות נפח זיכרון גדול. עיבוד נתונים בתדר של 1Hz, הפחית באופן יותר משמעותי את מקדם המתאם בחלק מהגבהים.

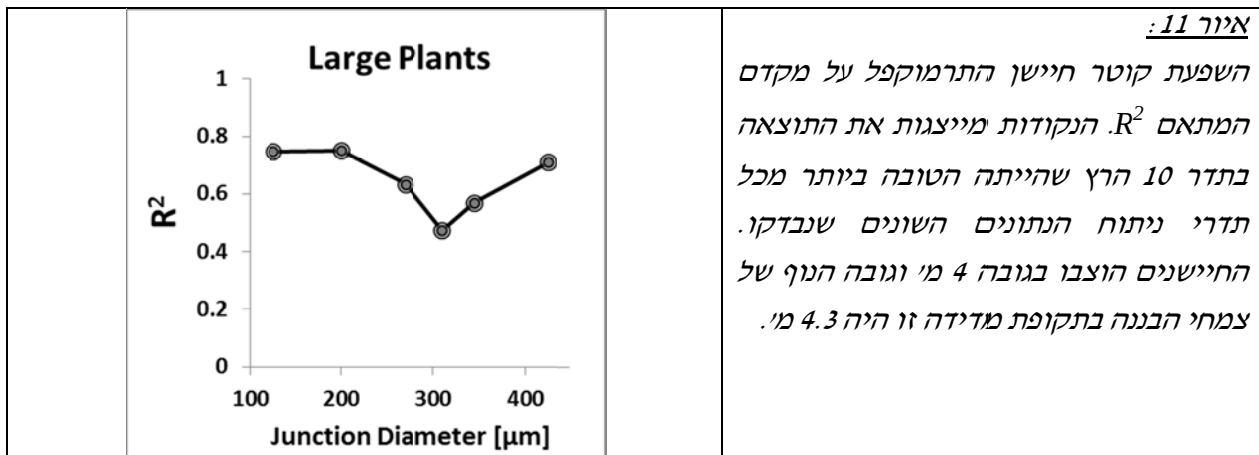


איור 10 מציג את השתנות מקדם הכיול  $\alpha$  עם הגובה עבור בית הרשת נגד מזיקים. בבית רשת זה ההשתנות של מקדם הכיול עם הגובה פחות מסודרת בהשוואה לתוצאות ממטע הבננה. מעל לרשת ניתן לראות מגמת ירידה של המקדם עם הגובה, אם כי בגובה רב יותר מעל לרשת, באזור של  $z_s \approx 1.6$  נצפתה עליה של  $\alpha$  עם הגובה, בתנאים בלתי יציבים. הערכים של  $\alpha$  היו בדרך כלל גדולים מאלה שהתקבלו בבית הרשת של הבננה. כמו כן, לא נראית בגרפים אלה תלות כלשהי של  $\alpha$  בתדר ניתוח הנתונים.



### השפעת קוטר החיפוש

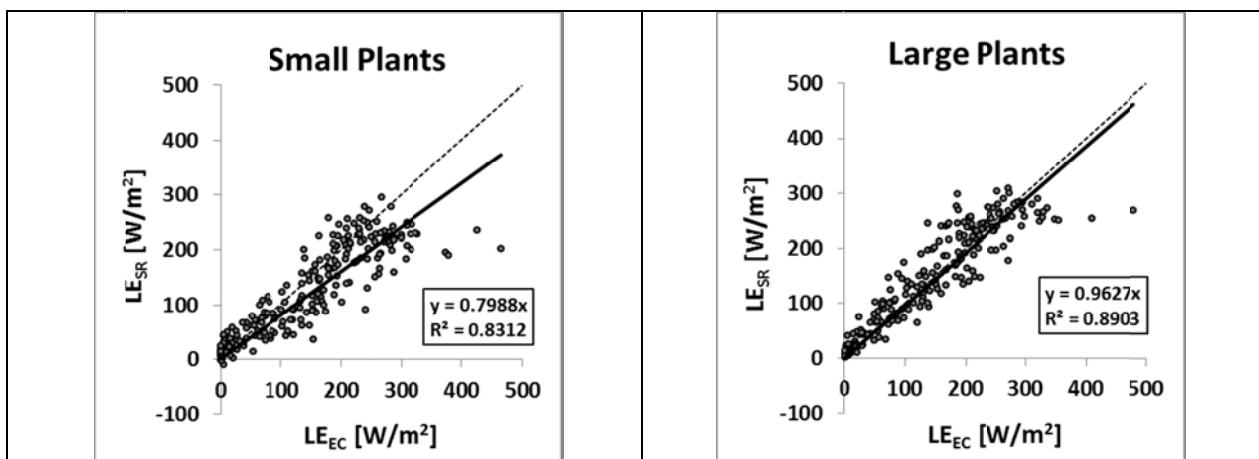
בשנה הראשונה של מחקר זה, בבית הרשת לגידול בננה, הוצבו בגובה 4 מ' 6 חיישני תרמוקפל בקטרים שונים: 125, 200, 270, 310, 345, 425 מיקרון. השפעת קוטר החיפוש על מקדם המתאם מוצגת באיור 11. שני החיישנים הקטנים ביותר, עד קוטר 200 מיקרון, נתנו את ערכי  $R^2$  הגבוהים ביותר מכל הקטרים שנבדקו. עד קוטר חיפוש של 310 מיקרון ירד מקדם המתאם עם עליית הקוטר, כצפוי, אך בקטרים גדולים יותר התקבלו ערכים גדולים מהצפוי. אין לנו הסבר לעלייה בלתי צפויה זו ויתכן שהיא קשורה לייצור העצמי של החיישנים הכרוך במבנה לא אחיד של צומת התרמוקפל. נציין כי במחקר אחר בשדה פתוח (304-0433) ראינו בברור כי מקדם המתאם עלה עם ירידה בקוטר החיפוש.



כתוצאה ממדידות אלה, בשנה השנייה של מחקר זה השתמשנו רק בחיישנים מסחריים של חברת OMEGA בעלי קוטר של  $76\mu\text{m}$  או חיישנים קטנים יותר מאותו יצרן בקוטר  $50\mu\text{m}$ . חיישנים אלה זולים מאד (כ- \$5 לחיישן), ולכן מתאימים לגישה של מערכת מדידה בעלות נמוכה.

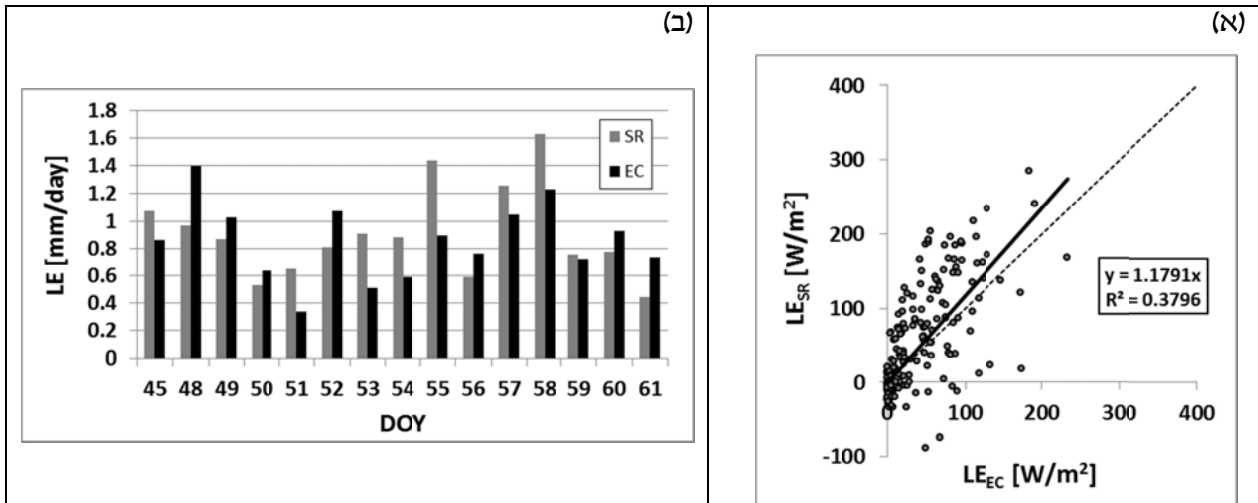
#### אימות שיטת SR: הערכת האופוטורנספירציה

לאחר חישוב שטף החום המוחשי בשיטת SR, תוך שימוש במקדמי הכיול ( $\alpha$ ) המוצגים באיורים 8 ו- 10, מחלצים את האופוטורנספירציה כשארית מאזן האנרגיה תוך שימוש בנוסחאות הרגרסיה המופיעות באיורים 3 ו-4 בהתאמה. כדי לבחון את היכולת של שיטת SR להעריך את האופוטורנספירציה, חושבו ערכים חצי שעתיים של האופוטורנספירציה. ערכים חצי שעתיים אלה, עבור שתי תקופות המדידה בניסוי הבננה מוצגים באיור 12 כנגד הערכים המדודים ישירות בשיטת קורלציית הערבולים. השיפועים של הקווים שהתקבלו הם 0.8 לתקופת "צמחים קטנים", ו- 0.96 לתקופת "צמחים גדולים", שהם נמוכים בכ- 20% ו- 4% מערך של 1, בהתאמה. תוצאה זו ממחישה את יכולת ההערכה הטובה של האופוטורנספירציה באמצעות שיטת SR, בעיקר עבור תקופת "צמחים גדולים".



**איור 12:** אימות שיטת SR. אופוטורנספירציה מוערכת ע"י שיטת SR ( $LE_{SR}$  ציר אנכי) כנגד ערכים מדודים בשיטת קורלציית הערבולים ( $LE_{EC}$  ציר אופקי), עבור בית רשת צל עם גידול בננה. "צמחים קטנים" (שמאל): תרמוקפל בגובה מנורמל של 1.64, (גובה אמיתי 5.8 מ'), בתדר ניתוח נתונים של 10 הרץ, ומקדם כיול של 0.62. "צמחים גדולים" (ימין): תרמוקפל בגובה מנורמל של 1.3, (גובה אמיתי 5.6 מ'), בתדר ניתוח נתונים של 10 הרץ, ומקדם כיול של 0.3. כל נקודה מייצגת ערך חצי שעתי.

עבור ניסוי הפלפל בבית רשת נגד מזיקים הרגרסיה בין ערכים מדודים ישירות בשיטת EC לבין הערכים המחושבים לפי שיטת SR לתקופת החורף מוצגת באיור 13א'. השיפוע של הקו שהתקבל הוא 1.18, גבוה בכ- 18% מערך רצוי של 1, מה שממחיש את יכולת ההערכה **הסבירה** של שיטת SR **אפילו במבנה עם הרשת הצפופה**. איור 13ב' מציג ערכי אווטרנספירציה יומית מחושבת (מ"מ מים) לפי שיטת SR ומדודה לפי שיטת EC. **ההתאדות הכוללת ל-15 ימים המוצגים בגרף הייתה 13.6 מ"מ לפי SR שהיא גבוהה ב-6% מההתאדות הכוללת לפי EC שהייתה 12.8 מ"מ**. נראה לכן כי ברמה תקופתית (כשבועיים) התקבלה התאמה טובה מאד בין השיטות.



**איור 13:** אימות שיטת SR בניסוי פלפל בבית רשת להגנה ממזיקים. אוטרנספירציה מוערכת ע"י שיטת SR כנגד ערכים מדודים בשיטת קורלציית הערבולים. תרמוקפל בגובה מנורמל של 1.21, (גובה אמיתי 4.15 מ') תקופת החורף (אימות), בתדר ניתוח נתונים של 10 הרץ. מקדמי הכיול הם 0.347 ו- 0.387 עבור שטף חום חיובי ושלילי, בהתאמה. א) רגרסיה בין ערכים חצי שעתיים. הרגרסיה מובהקת ברמה של 95% עבור מספר הדגימות המוצג בגרף, כלומר ההסתברות לקבל  $R^2 \geq 0.3796$  בהנחה שאין קשר בין המשתנים קטנה מ-5%. ב) ערכים יומיים.

$$LE_{Sr} = 0.6741(Rn - G) + 11.455 - H_{sr} \quad \text{לפי:}$$

#### טבלה מסכמת

הטבלה הבאה מסכמת את כל ממצאי הכיול ואת תוצאות האימות של שיטת SR כפי שבוצעו במחקר זה בשני הניסויים, שתי תקופות בכל ניסוי. הערכים מוצגים עבור תנאים אופטימליים שנתנו  $R^2$  מרבי.

|                           | Units | C1 – Small plants | C1 – Large plants | C2 - Winter | C2 – Spring |
|---------------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
| z                         | m     | 5.6               | 5.6               | 4.15        | 3.8         |
| $z_s$                     | -     | 1.051             | 1.095             | 1.214       | 1.048       |
| Height relative to screen | -     | 1.018             | 1.018             | 1.12        | 1.027       |



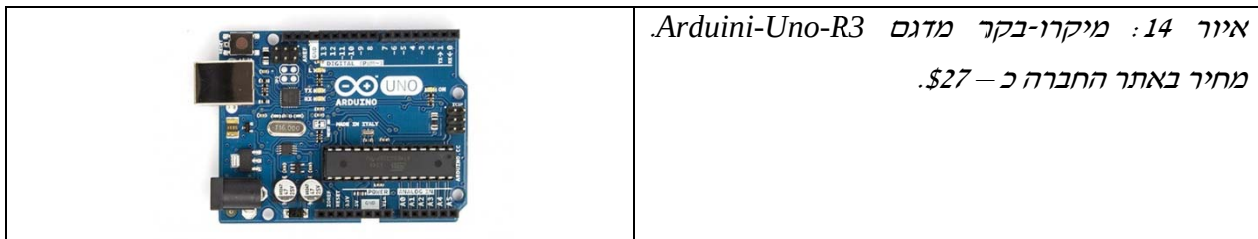
|                            |            |       |       |       |       |
|----------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|
| $R^2$ (of H)               | -          | 0.936 | 0.939 | 0.645 | 0.707 |
| A (of H)                   | -          | 0.819 | 1.028 | 1.075 | 0.995 |
| B (of H)                   | $W m^{-2}$ | 0.915 | 0.874 | 4.046 | -7.86 |
| $R^2$ (of LE)              | -          | 0.867 | 0.918 | 0.415 | 0.181 |
| A (of LE)                  | -          | 1.091 | 1.265 | 0.394 | 0.345 |
| B (of LE)                  | $W m^{-2}$ | 4.26  | -1.47 | 20.1  | 21.6  |
| % filtered                 | %          | 11.61 | 12.5  | 31.67 | 39.71 |
| r (unstable)               | s          | 0.9   | 0.7   | 0.2   | 40    |
| r (stable)                 | s          | 0.3   | 0.4   | 3.5   | 2     |
| f (unstable)               | Hz         | 10    | 10    | 10    | 5     |
| f (stable)                 | Hz         | 10    | 10    | 10    | 5     |
| number of intervals in fit | -          | 297   | 168   | 492   | 492   |
| $\alpha_{unstable}$        | -          | 0.635 | 0.291 | 0.347 | 7.1   |
| $\alpha_{stable}$          | -          | 0.155 | 0.135 | 0.387 | 0.449 |

#### ד. תחילת פיתוח מערכת "חידוש פני השטח" בזמן אמיתי

המטרה ארוכת הטווח של מחקר זה היא פיתוח מערכת SR שתוצב בשדה לאחר שעברה כיוול, ותאפשר לחקלאי לקבל מידע על האופוטורנספירציה היומית מבית הרשת בזמן אמת. מערכת כזאת תכלול חיישן טמפרטורה מיניאטורי, מד קרינה נטו, מד שטף חום לקרקע, ואוגר נתונים פשוט. שקלנו שתי גישות לפיתוח מערכת כזאת: א) ניתוח מלא של סיגנל הטמפרטורה ע"י המערכת כל 30 דקות. ניתוח זה יכלול חישוב מומנטים מסדר שני שליש וחישובי של סיגנל הטמפרטורה, ופתירת משוואה מסדר שליש לחישוב מאפייני הרמפות, לפי סעיף ב' לעיל. בהמשך על המערכת לבצע רישום של שטפי האנרגיה בלבד לכרטיס זיכרון כל 30 דקות, עריכת הסיכום היומי, ואפשרות שידור האופוטורנספירציה היומית לחקלאי פעם ביום. ב) רישום סיגנל הטמפרטורה לאורך תקופה של מספר ימים לפי בחירה, העברת וניתוח הנתונים ע"י מחשב חיצוני אשר יבצע את החישובים (כמו בסעיף א') ויפיק את ערכי האופוטורנספירציה עבור מספר ימים. לגישה הראשונה יש עדיפות בהפקת מידע יומי לחקלאי, אך היא מחייבת אוגר נתונים בעל יכולות חישוב גבוהות יחסית. הגישה השנייה דורשת רישום בלבד, לכן אוגר הנתונים יכול להיות פשוט יותר, אך היא תספק את המידע לחקלאי לא בזמן אמת אלא אחת לכמה ימים. לכן אימצנו, בשלב ראשוני זה של הפיתוח, את הגישה הראשונה.

בדקנו את האפשרות של שימוש במיקרו-בקר זול הזמין כיום בשוק ומאפשר מדידת מספר חיישנים. המיקרו-בקר שנבחר הוא מסוג ארדואינו (<http://www.arduino.cc>) שהוא פלטפורמה מבוססת

על קוד פתוח הכוללת חומרה ותוכנה קלים לתפעול (איור 14). למעבד זה מספר מגבלות. המיקרופרוססור מכיל 6 כניסות נפרדות למדידת מתח אנלוגי בין 0-5 וולט, עם A/D של 10 ביט. מכאן רזולוציית המדידה מוגבלת והיא  $4.9\text{mV}$  ועל מנת לקבל את הרזולוציה הנדרשת יש לחבר את התרמוקפל להגברה של לפחות  $\text{Gain} = 1225$ . לצורך זה נבחר מגבר מסוג AMP02 (<http://www.analog.com/en/specialty-amplifiers/instrumentation-amplifiers/amp02/products/product.html>) - \$12. השגיאה בהגברה הנדרשת הינה בסדר גודל של 0.5%. הספרייה של פונקציות מתמטיות של המעבד היא מוגבלת. בפרט חסרות פונקציות של  $\text{asin}$ ,  $\text{acos}$ , ההכרחיות לפתירת משוואה מסדר 3 (מש' 6). לכן לא ניתן לבצע את החישובים של רמפות הטמפרטורה בזמן אמת ע"ג המעבד, אלא יש צורך לרשום את הנתונים לכרטיס זיכרון ומדי פעם למשוך את הנתונים למחשב חיצוני שיבצע את החישובים. לשם כך נרכשה תושבת לכרטיס זיכרון SD, וכרטיס זיכרון SD של 2 GB. מגבלה נוספת היא משך רישום הנתונים. רישום ערך בודד לוקח יותר מעשירית שניה, ולכן לא ניתן למדוד בתדר של 10 הרץ ולרשום כל נתון מיד לאחר שנמדד. מגבלות אלה מנעו מאיתנו אפשרות בחינה של מעבד זה בשדה. ייתכן ויש צורך במעבד חזק יותר, אך זה לא נבדק במסגרת פרויקט זה.



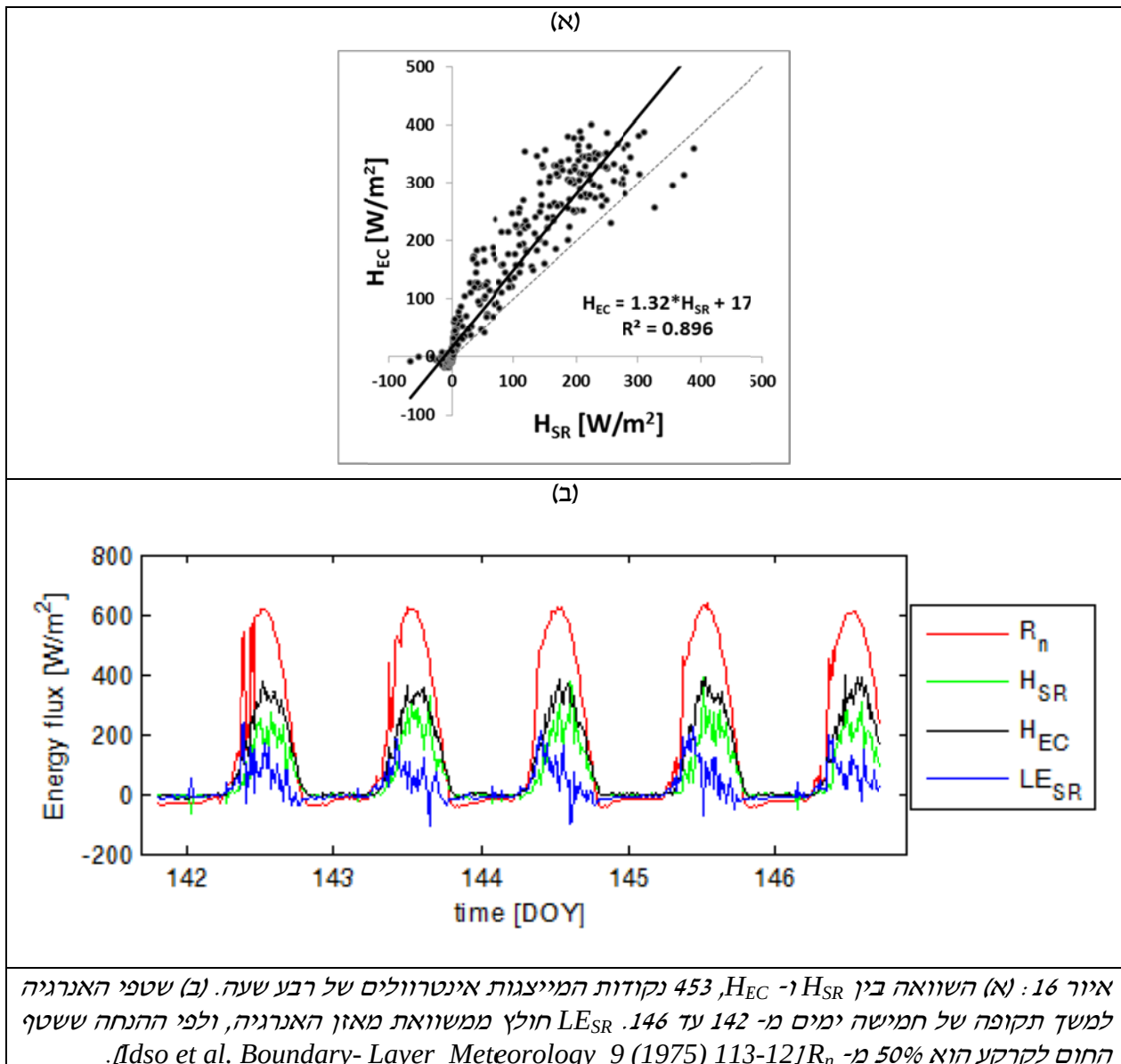
מאחר ורצינו לבחון מערכת עצמאית המסוגלת לבצע את עיבוד וניתוח הנתונים בשטח בזמן אמיתי, בחרנו להפעיל את המערכת עם אוגר נתונים חזק, דגם CR3000, המאפשר ביצוע כל החישובים בזמן אמיתי. הוקמה מערכת אשר כללה מד רוח תלת-צירי, תרמופייל למדידת קרינה נטו וחיישן תרמוקפל מניאטורי (איור 15). המערכת הוצבה בשדה פתוח באתר מרכז וולקני, מעל קרקע חשופה. כיוון הרוח בשעות היום היה בעיקר צפון מערבי עם אורך נשיבה (fetch) של בין 130 מ' (מערב) עד 280 מ' (צפון-מערב). המערכת מדדה ברציפות במשך 5 ימים.



איור 15: צילום המערכת להערכת האופוטורנספירציה בזמן אמת שהוצבה במרכז וולקני

שיטת עיבוד הנתונים כללה מדידת הטמפי' בתדירות של 10 הרץ, ושמירת המדידה למערך של  $J=10$  תאים אשר עודכן מיד לאחר כל מדידה.  $J$  נבחר להיות 10, ע"מ שמקדם הזמן (time-lag) יהיה 1 שניה. לאחר מילוי המערך (לאחר שניה) חושב ההפרש של כל מדידה מזו שנלקחה  $J$  מדידות לפני כן. המומנטים השני השלישי והחמישי של הפרש הטמפרטורה (משוואות 2, 3, 4) חושבו באופן מתמשך, ובתום אינטרוול המיצוע (נבחר 15 דקות מסיבות טכניות) חושבה אמפליטודת רמפת הטמפרטורה וכן משך הרמפה מתוך המומנטים הממוצעים. חישוב זה בוצע ע"י פתירת המשוואה מסדר שלישי (משוואה 6). פתרון זה כלל בדיקת מספר הפתרונות הממשיים, ושימוש בחישוב אנליטי מתאים. בתחילת כל אינטרוול מיצוע, אופסו המשתנים והחלה מדידה חדשה. יש לציין כי ניתן בשיטה זו לחשב בו זמנית את שטף החום המוחשי בשימוש במקדמי זמן שונים. כל החישובים האלו בוצעו בזמן אמיתי באמצעות אוגר הנתונים.

לאחר חישוב מאפייני הרמפה, חושב שטף החום המוחשי, והתקבל הערך הלא מכוייל (משוואה 8a). ערך זה הוכפל במקדם הכיול בהתאם למצב היציבות ההידרוסטטית (יציב לערכים שליליים, ובלתי יציב לערכים חיוביים). מקדם הכיול נבחר לפי ניסויים קודמים מעל קרקע חשופה, והיה 2 עבור מצבים בלתי יציבים, ו-1 עבור מצבים יציבים.



התוצאות מוצגות באיור 16. איור 16' מציג רגרסיה לינארית בין שטף החום המוחשי שנמדד ע"י שתי השיטות, קורלציית הערבולים ( $H_{EC}$ ), וחידוש פני השטח ( $H_{SR}$ ). כפי שנראה התקבל מתאם מצוין בין שתי המדידות, עם  $R^2=0.896$ . הערכת החסר של שיטת חידוש פני השטח נובעת כנראה עקב הבחירה השרירותית של מקדם הכיול במקרה זה. איור 16' מציג מהלכים יומיים של שטפי אנרגיה עבור 5 ימי המדידה. נראית התאמה טובה בין המהלכים היומיים של שני שטפי החום המוחשי (קו שחור וקו ירוק). כצפוי, ההתאדות מהקרע נמוכה מאד כי המדידות נערכו בשדה חשוף ובלתי מושקה. נראה כי עיקר ההתאדות נבע מאירוע גשם שהתרחש כשבוע לפי המדידות.

### דיון

בתי רשת יוצרים שינויים במיקרו-אקלים, בעיקר החלשת מהירות הרוח וקצב האווירור וכן הפחתת הקרינה, כפי שהראינו במחקרים קודמים שלנו. שיטת SR מבוססת על זרימת הגזירה של האוויר מעל לנוף ועל תהליך של החלפת מערבולות אוויר ולכן יש עניין מיוחד בבחינת התאמת השיטה לבתי רשת. ממצאי המחקר מראים כי בשני סוגי בתי הרשת שנחקרו התקבלו מקדמי מתאם מובהקים ברוב גבהי המדידה שנבדקו וכן בתדרי ניתוח נתונים בטווח בין 2 עד 10 הרץ. מעניינת במיוחד ההשוואה בין בית רשת צל בו גדל מטע בננה לבית רשת נגד מזיקים (50 מ"ש) בו גדל פלפל. תחת הרשת נגד המזיקים מקדמי המתאם היו, באופן כללי, נמוכים יותר מאלה שהתקבלו בבית הרשת בו גודלו צמחי בננה, שם הרשת דלילה יותר ומשרה התנגדות נמוכה יותר לחדירת הרוח. ניתוחים של מאפיינים טורבולנטיים של הזרימה שביצענו (לא מוצגים בדו"ח זה מפאת חוסר מקום) הראו בברור השפעה חזקה יותר של הרשת נגד מזיקים על זרימת האוויר בהשוואה לרשת הצל.

גורם נוסף שמצאנו כמשפיע על תפקוד המערכת הוא היציבות האטמוספירית של שכבת הגבול. ניתן לראות כי בשני בתי הרשת, מקדמי המתאם היו גבוהים יותר במצבים בלתי יציבים מאשר במצבים יציבים. לדוגמה, לבננה מעל לנוף במצב יציב התקבלו מקדמי מתאם נמוכים מ-0.6, ובמצב בלתי יציב גבוהים מ-0.6. ממצא זה ניתן להסביר כדלהלן: תהליך החלפת המערבולות שהוא הבסיס לשיטת SR מבוסס על שני מנגנונים פיסיקליים: הראשון הוא הגרדיאנט האנכי של מהירות הרוח האופקית בשכבת הערבוב סמוך לעלווה אשר יוצר אי יציבות הידרודינמית שעשויה להוביל לייצור מערבולות. תהליך זה מתגבר או מרוסן ע"י המנגנון השני המושפע מהריבוד האטמוספירי. בריבוד בלתי יציב, האוויר סמוך לעלווה חם יותר (וקל יותר) מזה שמעליו, ולכן מוגברת הנטייה של החלפת המערבולות. לעומת זאת, בריבוד יציב האוויר הסמוך לעלווה קריר יותר (וכבד יותר) מזה שמעליו, ומרסן את חילוף המערבולות. לכן במצבים בלתי יציבים המנגנון של חילוף המערבולות יותר אינטנסיבי, קל יותר לפענוח, והשיטה יעילה יותר. מבחינה מעשית, נזכור כי מצבים בלתי יציבים מאפיינים בד"כ את שעות היום בעוד מצבים יציבים את שעות הלילה. לכן, ממצא זה מבטיח פעולה תקינה של המערכת בשעות היום שהן השעות המעניינות אותנו, שכן בשעות אלה מתרחשת עיקר האופוטורנספירציה.

בשני בתי הרשת התקבלו ערכי מתאם גבוהים מעל לרשת. זהו ממצא מעניין, בעיקר לגבי מטע הבננה, שם מערכת EC המשמשת לייחוס הוצבה מתחת לרשת, והצפי הוא שהמתאם המרבי יתקבל כאשר חיישן התרמוקפל סמוך פיסיית למערכת EC. מתברר שהסמיכות הפיסיית בין המערכות אינה הקריטריון למתאם גבוה; הקריטריון הוא **כנראה** קיום התהליך הפיסיקלי של תנועת המערבולות והחלפתן על פני השטח. כנראה שבבתי רשת, עקב הפחתת מהירות הרוח תחת הרשת תהליך זה נפגם ולכן המערכת פועלת באופן מיטבי כאשר חיישן הטמפרטורה ממוקם מעל הרשת, שם מהירות הרוח גבוהה יותר. **ואכן בחישוב שערנו (שאינו מוצג כאן) סטיית התקן של הטמפרטורה בשעות היום מתחת לרשת הייתה נמוכה באופן**

מובהק מזו שמעל הרשת. כמו כן, בגובה רב יותר מעל הרשת נצפתה ירידה של סטיית התקן של הטמפרטורה, וזה תאם לירידה במקדם המתאם  $R^2$  עם הגובה.

הידע על מקדם הכיול  $\alpha$  חשוב ליישום השיטה בתנאי אמת. הכוונה היא כי לאחר כיול תוצב מערכת SR שתכלול חיישן טמפרטורה מיניאטורי, הסינגל שלו יעבור עיבוד וניתוח, ובידיעת מאפייני הרמפות של הטמפרטורה ומקדם הכיול, יחושב שטף החום המוחשי. נראה כי במטע הבננה, ברוב המקרים אין שינוי גדול של  $\alpha$  עם הגובה באזור שמעל לצמחים (איור 8, צמחים קטנים, 10 הרץ). אחת הפרשנויות הניתנות בספרות למשמעות הפיסיקלית של  $\alpha$  אומרת שהוא גורם תיקון כתוצאה מחימום לא אחיד של מערבולות האוויר וכן מייצג את המיקום היחסי בין חיישן הטמפרטורה למערבולת האופיינית. העובדה ש  $\alpha$  משתנה מעט עם הגובה מציעה כי מיקום המערבולות לא השתנה הרבה ביחס למיקום החיישן. בבית הרשת נגד מזיקים נמצאו שינויים יותר משמעותיים של  $\alpha$  עם הגובה (איור 10) וגם ערכים יותר גבוהים שלו, מה שמציין אי אחידות גבוהה יותר בפילוג הטמפרטורה במערבולת, והשתנות רבה יותר של המערבולות במקרה זה. להשתנות חלשה של  $\alpha$  עם הגובה יש גם יתרון מעשי. המשמעות היא ששינויים בגובה הצבת חיישן הטמפרטורה לא יגרמו שגיאה גדולה בחישוב שטף החום המוחשי.

קבלת מקדמי מתאם גבוהים בתדירויות נמוכות עד כדי 2 הרץ, מציעה כי תהליכי חילוף המערבולות בבתי הרשת איטיים יחסית. התדר הנמוך ביותר שנבדק בספרות העולמית בגידולים חשופים היה 4 הרץ, וגם אז התקבלו תוצאות טובות. האפשרות ליישם את השיטה בתדרים נמוכים (עד כדי 2 הרץ, ואפילו 1 הרץ בתנאים מסוימים), חשובה ביותר שכן היא תאפשר בעתיד את הפעלת השיטה ללא צורך במדידה בתדר גבוה וכך יתאפשר שימוש עם מכשור זול. 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 שיסייעו בניהול ההשקיה. זוהי אחת ממטרות העל של מחקר זה.

התחלנו לעבוד על מערכת שתחשב את שטף החום המוחשי והאופוטורנספירציה בזמן אמיתי. נבדק מיקרו-בקר זול ונפוץ בשוק אך הוא לא נמצא מתאים לביצוע החישובים הנדרשים בשיטה זו. לכן, לצורך הדגמה בלבד, עבדנו עם אוגר נתונים חזק יותר שנמצא ברשותינו. הראינו כי ניתן לבצע את כל החישובים בזמן אמיתי והמערכת תהיה מסוגלת לספק לחקלאי את המידע על האופוטורנספירציה היומית. בעתיד, יש מקום לבחון מיקרו-בקרים חזקים יותר שמסוגלים לבצע את החישובים הנדרשים, ועדיין נמכרים במחיר זול לאין שעור מאוגרי הנתונים המקובלים.

#### מצגות בכנסים שנבעו מהמחקר

- Mekhmandarov, Y., Pirkner, M., Dicken, U., Tanny, J. (2012). Surface Renewal Estimates of Sensible Heat Flux: Optimization for Banana and Grapevine Greenhouses. Presented at the International Conference of Agricultural Engineering – CIGR-AgEng 2012, Valencia, Spain.
- Mekhmandarov, Y., Achiman, O., Pirkner, M. and Tanny, J. (2014). Estimating sensible heat exchange between screen-covered canopies and the atmosphere using the surface renewal technique. Presented at the General Assembly of the European Geosciences Union (EGU), Vienna, Austria.

## פיתוח טכנולוגיה זולה למדידת צריכת מים של גידולים תחת רשתות

### בשיטת 'חידוש פני השטח'

#### סיכום עם שאלות מנחות

1. מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה: המטרה העיקרית של המחקר הנוכחי היא לפתח ולהתאים שיטה זולה למדידה רציפה של אוופוטנספירציה של כלל הנוף לגידולים בבתי רשת. השיטה תהיה מבוססת על עקרון "חידוש פני השטח" – Surface Renewal (SR). המטרה הספציפית היא לכייל את שיטת "חידוש פני השטח" (SR) עבור גידולי בננה ופלפל בבתי רשת כנגד ערכי שטף חום מוחשי שיימדדו ישירות ע"י מערכת קורלצית הערבולים (EC) שתוצב סימולטאנית בבית הרשת עם מערכת SR. תהליך הכיול יתבסס על אופטימיזציה והתאמה של שיטת SR לתנאי המטעים שייבחנו מבחינת גובה הצבת חיישן הטמפרטורה, קוטר החיישן ותדר הדגימה.

2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח: מערכות המדידה הוצבו במטעי בננה ופלפל כמתוכנן. המערכות כללו מערכת קורלצית הערבולים ומערכת תרמוקפלים למדידה בשיטת "חידוש פני השטח" (SR). הניסויים בוצעו בהצלחה ונאספו נתונים לאורך שתי תקופות בכל ניסוי. ערכים מרביים של  $R^2$  התקבלו מעל לרשת וסמוך לה. התקבלו מקדמי מתאם גבוהים יותר במטע הבננה ברשת הצל מאשר בשדה הפלפל ברשת נגד מזיקים. כמו כן מקדמי המתאם היו גבוהים יותר במצבים של אטמוספירה בלתי יציבה מאשר באטמוספירה יציבה. התוצאות הטובות ביותר התקבלו בתדר של 10 הרץ אך נמצאו גבהים בהם התקבל מקדם מתאם גבוה עבור תדרי ניתוח נמוכים יותר של 1, 2, ו-5 הרץ. התוצאות שהתקבלו הראו כי שיטת SR נתנה ערכי אוופוטנספירציה בהתאמה טובה עם המדידה הישירה בשיטת קורלצית הערבולים. ההתאמה הייתה טובה יותר כאשר נבחנה האוופוטנספירציה הכוללת לאורך תקופה של כשבועיים, ביחס להשוואת הערכים בסקלת זמן חצי שעתית. התחלנו בפיתוח מערכת שתערוך מדידות וחישובים בזמן אמיתי, והוכחנו היתכנות של מערכת כזאת.

3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו: בוצעו בהצלחה כל המשימות שתוכננו למחקר. מצאנו ששיטת SR יעילה להערכת שטף החום המוחשי במגוון תנאי הפעלה של גובה חיישן מנורמל ותדר ניתוח נתונים. התוצאה מראה כי תנאי הזרימה הטורבולנטית בבתי רשת אלה מתאימים ליישום שיטת SR. האפשרות ליישם את השיטה בתדר נמוך עד כדי 2Hz, חשובה ביותר שכן היא תאפשר בעתיד את הפעלת השיטה עם מכשור זול ועמיד יחסית למדידה של טמפרטורה בתנאי שדה ולא תידרש מדידה בתדר גבוה שהיא גם יקרה יותר. זוהי אחת ממטרות העל של מחקר זה. יש מקום להמשך הבדיקה של מערכות איסוף נתונים זולות שהן גם בעלות יכולת חישוב מתאימה לצרכי שיטת חידוש פני השטח. **שימוש יומיומי**

**ע"י המגדלים יתאפשר רק לאחר פיתוח מערכות מדידה פשוטות וזולות לאיסוף הנתונים ושידורם למגדלים.**

4. הבעיות שנותרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה: לא היו בעיות ולא חלו שינויים במהלך העבודה.

5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח? תוצאות שנה א' הוצגו בהרצאה בכנס AgEng 2012 שהתקיים ביולי 2012 בספרד. תוצאות מסכמות הוצגו בכנס EGU שנערך באפריל 2014 בווינה, אוסטריה. מאמר מסכם לכתב עת מדעי בינלאומי נמצא בהכנה.

6. פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט).