

שיפור אומדן האופוטראנספירציה של מטעים וירקות מכוסים ברשתות

Improving the evapotranspiration estimation of orchards and vegetable crops covered with screens

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.
אברהם גרוה 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

Avraham Grava, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Volcani Center, P.O.B. 6, Bet Dagan 50250.

מרץ 2012

ניסן תשע"ב

מורן פירקנר ביצעה את רוב הניסויים במחקר זה, עיבדה וניתחה את התוצאות וסייעה בהכנת הדו"ח.

הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים.

הממצאים אינם מהווים המלצות לחקלאים.

חתימת החוקר: _____

תוכן עניינים

| <u>שם הפרק</u> | <u>עמוד</u> |
|------------------------------|-------------|
| תקציר | 2 |
| מבוא | 3 |
| פרוט עיקרי הניסויים והתוצאות | 3 |
| סיכום עם שאלות מנחות | 18 |

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. מודלים המבוססים על מדידות מטאורולוגיות סטנדרטיות מאפשרים אומדן של האופוטורנספירציה בזמן אמת. ידע טוב של מודלים אלה יאפשר יישום רחב שלהם בקרב החקלאים.

מטרת המחקר: מטרת המחקר הנוכחי היא לבחון ולשפר מודלים של אופוטורנספירציה של גידולים מכוסים ברשתות, ולייעל את השימוש בהם, ע"י מדידות ישירות בשני גידולים (בננה וגפן) ובשני אזורי אקלים שונים בארץ (מישור החוף, בקעת הירדן). חקירת גידולים שונים ואזורי אקלים שונים תאפשר בחינה אמינה של המקדמים בנוסחאות המודלים, מה שיוביל לחיזוי מדויק יותר, שיפור באומדן האופוטורנספירציה בזמן אמת והגדלת החיסכון במים.

מהלך ושיטות עבודה: בכל אחת משלוש שנות המחקר נערך ניסוי מקיף במטע מכוסה ברשת. בשנה הראשונה והשלישית נבחן מטע בננה מכוסה ברשת בחוף הכרמל ובשנה השנייה נבחן כרם ענבי מאכל בבקעת הירדן. בכל ניסוי נערכו מדידות מיקרואקלים ומדידות אופוטורנספירציה בשיטת קורלציית הערבולים. כן נערכו מדידות פוטוסינתזה ומוליכות פיוניות ברמת העלה. כמו כן, בשנה הראשונה נערכו מדידות לאיפיון תכונות קרינתיות של הרשתות שיושמו בניסויי השדה. בכל ניסוי שדה נבחנו המודלים הבאים: מודל אופוטורנספירציה ייחוס בתנאי פנים בית הרשת, מודל אופוטורנספירציה מגידול אמיתי בתנאי פנים בית הרשת עם התנגדות לפי פילוג לוגריתמי או התנגדות שכבת הגבול של העלה, ומודל אופוטורנספירציה מגידול מכוסה ברשת לפי תנאים חיצוניים ופנימיים. יושם אילוץ של סגירת מאזן האנרגיה כדי לנטרל השפעת מאזן האנרגיה על ההשוואה בין יעילות המודלים. בניסוי בבקעה נבחן יישום מודל אופוטורנספירציה מגידול אמיתי עם התנגדות שכבת הגבול של העלה לפי קשרים אמפיריים בין משתנים בתוך ומחוץ לבית הרשת.

תוצאות עיקריות: בכל הניסויים התקבלו מאזני אנרגיה סבירים, עם אחוזי סגירה בין 74% ל – 104%, המראים על אמינות מדידות השטפים בשיטת קורלציית הערבולים. מבחני הרגישות הראו כי בבקעת הירדן יש תרומה גבוהה יחסית לרכיב האווירודינאמי בהשוואה לתרומתו בחוף הכרמל. זאת מאחר ובבקעת הירדן הקרינה והרוח משפיעות בשעות שונות של היום. ההתנגדות האווירודינאמית המבוססת על פרופיל לוגריתמי בתוך בית הרשת, נמצאה כלא מתאימה לשימוש במודלים לחיזוי אופוטורנספירציה יומית תחת רשת אך התוצאה השתפרה בחישוב לאורך זמן. לעומת זאת, שכלול המודל ע"י החלפתה בהתנגדות שכבת הגבול של העלה שיפר במידה ניכרת את ההתאמה עם המדידות. אפיון מדויק יותר של התנגדות זו ע"פ אופי תנועת האוויר ליד העלה ואופן ההסעה שיפר בצורה מועטה בלבד את ההתאמה עם המדידות, רק בחוף הכרמל. בהפעלת מודל אופוטורנספירציה מגידול אמיתי בבקעה, עם משתנים חיצוניים בלבד וקשרי פנים-חוץ אמפיריים התקבלה תוצאה בתחום של בין 88%-98% מהמדידה.

מסקנות: ברמה שבועית ומעלה מודל אוופוטנספירציה ייחוס בתנאי פנים בית הרשת נמצא בהתאמה טובה ביותר עם המדידות באזור חוף הכרמל בשתי שנות המדידה, ואילו מודל אוופוטנספירציה מגידול אמיתי בתנאי פנים בית הרשת עם התנגדות לפי פילוג לוגריתמי נתן את החיזוי הטוב ביותר בבקעת הירדן. מודל האוופוטנספירציה מגידול מכוסה ברשת שימושי יותר מאחר ומבוסס בחלקו על נתונים חיזוניים. הוצעו מספר דרכים לשיפור המודלים והשימוש בהם. חלק מדרכים אלה דורש את המשך המחקר.

מבוא – רקע מדעי ומטרות המחקר לתקופת הדו"ח

החקלאות בישראל עוברת בשנים האחרונות מהפכה בתחום השימוש ברשתות ובבתי רשת והשטח הכולל של גידולים תחת רשתות עולה בהתמדה ועומד כיום על יותר מ – 60,000 דונם. הסיבות העיקריות לגידול בבית רשת הן הגנת הצמח מפני מזיקים, הגנה נגד קרה וברד בגידולי חורף (בעיקר שסק ומטעים נשירים), הגנה מעודפי קרינה הגורמת לצריבות שמש ותופעות פיסולוגיות שליליות אחרות בקיץ והצללה לצורך חסכון במים. הרשת הפרושה מעל לנוף הצמחים מקטינה את החלפת התנע, המסה והחום בין הגידול לאטמוספירה ולכן יוצרת מיקרואקלים שונה משמעותית מזה השורר מחוץ לרשת, בעיקר מבחינת הפחתת עוצמת הקרינה ומהירות הרוח וכן מבחינת טמפרטורת ולחות האוויר.

למרות התרחבות שטחי הגידול תחת רשתות, עדיין קיימים משתנים שלא נבחנו בצורה יסודית בסביבת גידול זו וגם אם נבחנו, עדיין לא הוטמעו ע"י החקלאים. אחד מהם הוא מנת המים הנדרשת בתנאי האקלים שמשרה הרשת. בעוד שדרישת המים לגידולים פתוחים נחקרה וידועה לרוב הגידולים וברוב אזורי האקלים בעולם, לא קיים היום מידע כזה עבור גידולים תחת רשתות. אמנם בשנים האחרונות בוצעו מספר מחקרים בתחום זה, בעיקר ע"י קבוצת המחקר שלנו, אך מחקרים אלו היו מוגבלים לגידולים בודדים, כל אחד באזור אקלים אחר. לפיכך נראה כי כדי ללמוד מהי מנת ההשקיה האופטימאלית לכל גידול ובכל אקלים חיוני לבצע מספר רב של ניסויי השקיה על מגוון גידולים, סוגי רשתות ואזורי אקלים. אולם, מחקרים כאלה יהיו יקרים ביותר ויגזלו זמן ומשאבים רבים. לעומת זאת קיימים כיום מודלים מסוג של משוואת פנמן-מונטית שבשילוב עם מודל מאזן הקרינה של הרשת מסוגלים לחזות בדיוק טוב יחסית את האוופוטנספירציה של הגידול בזמן אמיתי. מודלים אלו הותאמו בעבר לגידולים פתוחים, ללא כיסוי רשת, אך קיימים מעט מאד דיווחים בספרות על יישום והתאמה של מודלים כאלה לגידולים תחת רשתות או בבתי רשת. נראה אם כן כי ניתן להשיג שיפור באומדן האוופוטנספירציה באמצעות פיתוח וכיול של מודלים אמניים ובעלי יכולת חיזוי טובה בתנאי אקלים שונים. שימוש במודלים אלו יביא להשקיה אופטימאלית ולחסכון מרבי במים.

תכנית המחקר מתמקדת בנושאים הבאים:

- א. מדידת אוופוטנספירציה והמיקרואקלים של מטעים וירקות בבתי רשת באזורי אקלים שונים בארץ.
- ב. יישום של מודלים למעבר קרינה דרך רשתות ולצריכת מים ומיקרואקלים של גידולים בבתי רשת.
- ג. השוואה בין המודלים למדידות תוך ניסיון לשפר את כיול המודלים ולהצביע על המנגנונים השולטים על תהליך הגדלת החיסכון במים בכל אזור.

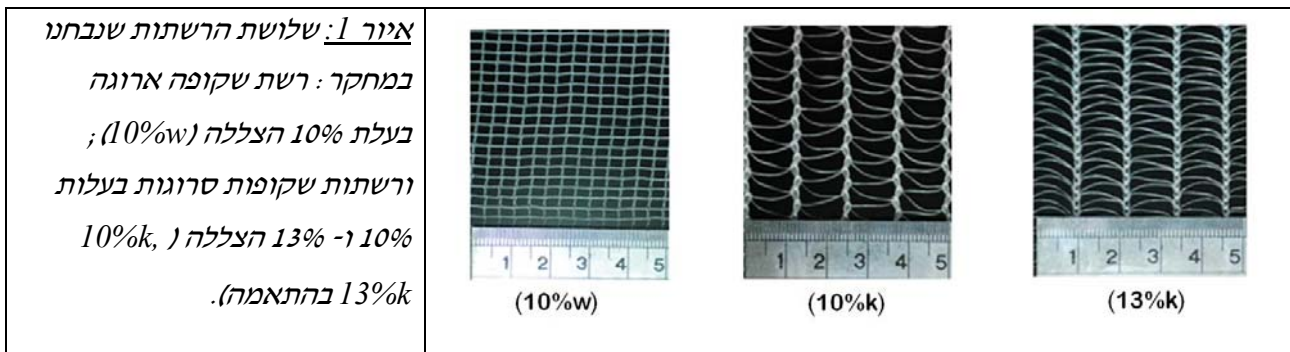
פירוט עיקרי הניסויים והתוצאות

חומרים ושיטות:

אפיון תכונות קרינתיות של רשתות

בניסוי נבחנו שלושה רשתות המצויות בשימוש רחב בשטחי חקלאות הדורשים הגנה מרוח או מקרינה, כגון בננה וגפן מאכל. הרשתות הנפוצות הינן שקופות, בעלות אחוז הצללה שבין 15%-8%. מרקם הרשת יכול להיות סרוג (knitted) או ארוג (woven). בניסוי לאפיון תכונות קרינתיות של רשתות נבחרו רשתות מן הנפוצות ביותר – רשת

בעלת 10% הצללה ע"פ היצרן (פולישק בע"מ) ארוגה (10%w) וסרוגה (10%k), ורשת בעלת 13% הצללה סרוגה (13%k) (איור 1). בנוסף, נבחנה השפעת כיוון פריסת הרשת הסרוגה – כאשר הפסים העבים מופנים לכיוון צפון-דרום (N-S) ומזרח מערב (E-W).



הניסוי נערך על גג הבניין של המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה במנהל המחקר החקלאי בבית דגן. מיקום זה גבוה משאר המבנים באזור - גורם המצמצם את השפעת החזרי הקרינה מעצמים קרובים. הרשתות הונחו על מסגרת מלבנית של 2.5 מ' על 3 מ' בגובה של 0.6 מ' מעל הקרקע וכיסו את המסגרת כולה. רשת צל שחורה 90% הונחה על רצפת הגג על מנת לצמצם את השפעת החזרי הקרינה מלמטה. הוצבו מדי קרינה למדידות שטפי קרינה מעלה ומטה בגובה 0.3 מ' מעל הרשת. מערכת זהה של מדי קרינה הוצבה 0.3 מ' מתחת לרשת. מעל ומתחת לרשת הוצבו חיישני הקרינה הבאים: מד קרינה גלובאלית, מד קרינה נטו, מד קרינה לגלים ארוכים, מד קרינה פוטוסניטטית PAR. מעל הרשת הוצבו חיישנים שהיו מכוונים הן כלפי מעלה (לשמיים) והן כלפי מטה (לרשת). קרינה מפוזרת נמדדה ע"י מד קרינה Pyranometer שהוצב תחת קשת הצללה סטנדרטית וע"י הצללת מד הקרינה באופן ידני עם דיסק בקוטר 10 ס"מ ממרחק של כ-1 מ'. חמישה חיישני טמפרטורה (קוטר 0.05 מ"מ) הוצמדו לרשת ומדדו את הטמפרטורה. נמדדו מהירות וכיוון רוח על גג הבניין. המכשירים השונים חוברו לאוגר נתונים ומדדו פעם בשנייה. ממוצעים נרשמו כל 5 דקות. איור 2 מציג תצלום של הרשת ומערכת החיישנים המוצבים על גג הבניין.



מהנתונים שנאגרו הוסרו המדידות שנלקחו בתנאי עננות וחושבו העבירות, החזרה ובליעה של כל רשת ע"פ משוואות מאזני קרינה.

מדידות מיקרואקלים ואופוטורנספירציה בבתי רשת

אתרי הניסויים ומערכות המדידה: שלושה ניסויים למדידת אופוטורנספירציה בבתי רשת מסחריים נערכו בין השנים 2009-2011. בשנה הראשונה הניסוי נערך בבית רשת לגידול בננות בחוף הכרמל. בשנה השניה – בית רשת לגידול ענבי מאכל בבקעה, ובשנה השלישית – נעשתה חזרה על הניסוי בבית רשת לבננות בחוף הכרמל לביסוס התוצאות. תיאור אתרי הניסוי מפורט בטבלא 1.

| חוף הכרמל 2011 | בקעה 2010 | חוף הכרמל 2009 | |
|-----------------------|--|-----------------------|-------------------------|
| ים תיכוני | ערבתי – צחיח למחצה | ים תיכוני | אזור אקלימי |
| 23 מ' | 280- מ' | 23 מ' | גובה מפני הים |
| 3.8.11-29.8.11 | 6.6.10 - 5.5.10 | 3.8.11-22.8.11 | תאריכי מדידה |
| DOY 225-241 | DOY 125-157 | DOY 225-234 | (לתוצאות סופיות) |
| בננה, זן גרנד-ניין | גפן למאכל, זן S.B.S | בננה, זן גרנד-ניין | גידול |
| מלבני, שטוח, סגור | מלבני, שטוח, סגור בכיוון מזרח-מערב (כיוון הרוח הדומיננטית) | מלבני, שטוח, סגור | מבנה בית הרשת |
| 100 דונם | 40 דונם | 80 דונם | גודל הבית רשת |
| (230x450 מ"ר) | (175x240 מ"ר) | (200x400 מ"ר) | |
| 5.5 מ' | 3.1 מ' | 6 מ' | גובה הרשת |
| 8.5% שקופה ארוגה | 10% שקופה ארוגה | 10% שקופה ארוגה | סוג הרשת |

טבלא 1: מאפייני אתרי הניסויים בשלושת שנות המדידות.

בשלושת הניסויים הותקן מערך מדידה דומה אשר כלל תחנת מדידה פנימית בתוך בית הרשת ותחנה מטאורולוגית חיצונית. בתחנה הפנימית הותקנה על עמוד מרכזי בבית רשת מערכת קורלציית הערבולים (EC) אשר כללה מד רוח אולטרא-סוני תלת צירי וחישן למדידת ריכוז אדי המים באוויר. מנתוני ה-EC חושב שטף האופוטורנספירציה (LE) ושטף החום המוחשי (H). מיקום המערכת יצר מרחק נשיבה מקסימאלי (Fech) מכל קצוות המבנה, כך שהשטפים הנמדדים מייצגים את הגידול בבית רשת, ע"פ מודל Footprint (Schmid, 1994). על עמוד קרוב הותקנו מדי הקרינה מעל הנוף: קרינה נטו (250-60000 nm), קרינה גלובלית (285-2800 nm) וקרינה בתחום הפוטוסינתטי (400-700 nm). בפריסה אנכית הותקנו מספר פסיכרומטרים מוצלים ומאווררים למדידת טמפרטורת הגולה היבשה והלחה. לצורך מדידת שטף החום לקרקע (G) הותקנו חיישני HF בעומק של 0.08 מ' מתחת לפני הקרקע באופן מקביל באזור הרטוב של הקרקע- בין הצמחים, ובאזור היבש של הקרקע- בין השורות. מעל כל חיישן הוטמנו שני מדי טמפרטורה מסוג תרמוקפל (Type T; cooper-constantan) בעומק 0.06 מ' ו- 0.02 מ' מתחת לפני הקרקע לחישוב אוגר החום בשכבה העליונה של הקרקע (S), בהתאם להמלצות של Campbell Scientific, Inc. (Campbell Sci., 1998). תחנה מטאורולוגית חיצונית הוקמה במרחק של עד קילומטר מבית הרשת למדידת התנאים המטאורולוגיים החיצוניים השוררים באזור הניסוי אשר אינם מושפעים מבית הרשת. התחנה מדדה את כיוון ועוצמת הרוח, טמפרטורה, לחות וקרינה גלובלית. מערכת קורלציית הערבולים מדדה ורשמה בתדירות של 10Hz. שאר המכשירים מדדו בתדירות של 1Hz וממוצעים חושבו ונרשמו כל חצי שעה. אוורור הפסיכרומטרים הופעל למשך 15 דק' בסוף כל חצי שעה, לכן מדידות הטמפרטורה נרשמו כממוצע של 10 הדקות האחרונות בכל חצי שעה. כל הנתונים נאגרו באוגרי נתונים CR5000X, CR10X, AM416. החשמל למכשירים סופק ממצברים

12V אשר הוטענו ע"י פנלים סולריים שהוצבו על גבי הרשתות.

חישובי השטפים: שטף אדי המים (אוופוטנספירציה) התקבל על ידי חישוב הקו-ואריאנס בין תנודות המהירות האנכית והלחות. יש להדגיש כי השטף הנמדד (LE) הוא השטף של כלל המטע. הנתונים הגולמיים עברו סדרת תיקונים לפי ההמלצות בספרות עבור שיטת קורלצית הערבולים. נערך גם חישוב של שטף החום המוחשי (H), ע"י חישוב הקו-ואריאנס בין תנודות המהירות האנכית והטמפרטורה. גם כאן הנתונים הגולמיים עברו תיקונים כמקובל בספרות.

מדידות LAI: בבקעת הירדן (גפן מאכל) – אחת לשבועיים נקטפו כ- 50 עלים מאותו צמח (n_m) ונספרו כל העלים בצמח (n). העלים נסרקו במעבדה במכשיר DELTA T Device למדידת השטח המצטבר של העלים (S_m [cm^2]). חלוקת השטח המצטבר שנמדד במספר העלים שנמדדו נתן את שטח העלה הממוצע והכפלת האחרון במספר העלים בצמח נתן את שטח העלים לצמח. מדד ה- LAI חושב מחלוקת שטח העלים לצמח בשטח הקרקע לצמח

$$LAI_{Bikaa} = \frac{n \times (S_m \cdot 10^{-5})}{n_m \cdot 1.5 \times 3} \quad \text{בודד (משוואה 1):}$$

בחוף הכרמל (בננה) - אחת לתשעה ימים בממוצע נמדדו עבור ארבעה צמחים קבועים שנבחרו באקראי: גובה הצמחים (h), מספר עלים, אורך העלים (L) ורוחב העלים במרכזם (L_w). חישוב שטח העלים התבסס על היחס בין הצורה הגיאומטרית של עלי הבננה למלבן. יחס זה נמדד בעבודות קודמות ונמצא כקבוע השווה ל- 0.78. מדד ה- LAI חושב ע"י סכימת שטחי כל העלים בצמח, הכפלה בארבעה צמחים שנסתלו בכל בית (הצמחים זהים גנטית ולכן בעלי LAI דומה) וחלוקה בשטח הקרקע לכל בית. לבסוף חושב ממוצע עבור ארבעת הצמחים שנמדדו

$$LAI_{Carmel} = \left(\frac{4 \times \sum (L_i \times L_w \times 0.78)}{4.5 \times 3.5} \right) \quad \text{(משוואה 2):}$$

מוליכות פיוניות (G_s): מהלך יומי של מוליכות פיוניות נמדד פעם אחת בכל ניסוי בתקופה בה ה- LAI היה הגדול ביותר. בכרמל נעשה שימוש במכשיר LI-6400 (LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA) ובבקעה במכשיר CIRAS-2 (CIRAS-2, PP Systems International, Inc., Amesbury, MA, USA). המדידות בוצעו בין השעות 7:00-18:00 באופן הבא: כל שעה וחצי בוצעו מדידות של מוליכות הפיוניות (G_s), טמפרטורת העלה והסביבה (T_l, T_a) וקרינה פוטוסינטטית (PAR) בחמישה עלים שונים לפחות, שלמים וירוקים אשר קיבלו קרינה ישירה מהשמש. עבור כל שעת מדידה חושבו ממוצעי המדידות של סה"כ העלים שנמדדו. המוליכות המדודה כתלות ב- PAR

הותאמה לנוסחא $G_s = \frac{Gl_{max}}{1 + \frac{S_{photons}}{PAR}}$, כאשר מקדמי הנוסחא $Gl_{max}, S_{photons}$ נמצאו בעזרת פונקציית סולבר של אקסל ע"פ ההפרש המינימאלי בין תוצאת החישוב למוליכות המדודה.

המודלים הנבחנים במחקר:

משוואה 3 מציגה את מודל פמן-מונטית המתאר את ההתאדות (LE) כפונקצייה של משתנים מטאורולוגיים והתנגדויות למעבר חום ומסה של הצמחייה (r_s) ושל שכבת האוויר מעל הצמחייה (r_a). זהו מודל קלאסי לחיזוי ההתאדות ע"פ FAO56:

LE – אופוטורנספירציה $[J s^{-1} m^{-2}]$, Δ – שיפוע עקומת לחץ האדים $[kPa \text{ } ^\circ C^{-1}]$, R_n – קרינה נטו $[J s^{-1} m^{-2}]$, G – שטף חום לקרקע $[J s^{-1} m^{-2}]$, ρ_a – צפיפות האוויר בלחץ קבוע $[Kg m^{-3}]$, C_p – חום סגולי של האוויר $[J Kg^{-1} \text{ } ^\circ K^{-1}]$, e_s – לחץ אדים ברוויה $[kPa]$, e_a – לחץ אדים $[kPa]$, γ – קבוע פסיכרומטרי $[kPa \text{ } ^\circ K^{-1}]$.

המודלים שנבחנו במחקר זה מהווים למעשה וריאציות שונות של המודל במשוואה 3, כמפורט להלן:

1. מודל של התאדות ייחוס RET – זוהי משוואת פנמן-מונטית' המותאמת לגידול דשא בעל פרמטרים קבועים: לחיזוי התאדות פוטנציאלית עם הכפלתו במקדמי גידול המתאימים לגידול ספציפי בשלבי גידול שונים. במחקר זה מודל RET מחושב בתנאים של פנים בית הרשת.

2. מודל של התאדות מגידול אמיתי PM – זוהי משוואת פנמן מונטית' המותאמת לגידול אמיתי ע"י חישוב ההתנגדויות עבור גידול ספציפי: התנגדות הצמחייה- $r_s [s m^{-1}]$, מחושבת מהתנגדות הפיוניות, $r_l [s m^{-1}]$

$$4. \quad r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad \text{וממדד שטח העלים, LAI [-] (משוואה 4):}$$

והתנגדות אווירודינאמית- $r_a [s m^{-1}]$, המבוססת על הפרופיל הלוגריתמי של הרוח (משוואה 4).

$$5. \quad r_a = \frac{\ln\left[\frac{Z_m-d}{Z_{0m}}\right] \ln\left[\frac{Z_h-d}{Z_{0h}}\right]}{K^2 u_z} \quad \text{גם מודל זה מחושב בתנאים של פנים בית הרשת.}$$

r_a – התנגדות אווירודינאמית $[s m^{-1}]$ – גובה מדידת הרוח $Z_h [m]$ – גובה מדידת הלחות $d [m]$ – גובה העתקת האפס של הצמחים, $Z_{0m} [m]$ – אורך החספוס למעבר מומנטום, $0.123h [m]$ – $Z_{0h} [m]$ – אורך החספוס למעבר חום ואדים, $0.1Z_{0m} [m]$ – קבוע וון-קרמן, $0.41 [-]$ – $u_z [m s^{-1}]$ – מהירות הרוח בגובה $Z [m s^{-1}]$.

3. מודל של התאדות מגידול אמיתי בבית רשת SET – מודיפיקציה של מודל PM עם התאמה לגידול תחת רשת (Möller et al., 2004) (משוואה 6).

6.

מודל זה לוקח בחשבון שנוכחות הרשת יוצרת שכבת גבול נוספת המהווה התנגדות למעבר אדי המים מהצמחייה לאטמוספירה. התנגדות זו נקראת התנגדות שכבת הגבול ($r_b [s m^{-1}]$) והיא מתארת את השכבה הדקה שבין משטח העלה לאוויר הזורם מעליו. התנגדות זו תלויה בגודל העלה ($D [m]$) ובמהירות הרוח בגובה הצמחייה ($u_{in} [m s^{-1}]$). באופן תיאורטי התנגדות זו קיימת כל הזמן, אך נוכחות הרשת והפחתת מהירות הרוח תחת הרשת מגדילה את המשקל שלה בתרומתה להתאדות. ישנם ביטויים רבים להתנגדות זו בספרות. באופן כללי היא מאופיינת ע"י משטר הזרימה של האוויר בשכבה זו (למינרי או טורבולנטי) ואופי הסעת האוויר (הסעה טבעית, מאולצת או מעורבת). המודל המקורי פורסם עם התנגדות המתאימה לזרימה טורבולנטית (משוואה א7): $r_b = 220 \frac{D^{0.2}}{u_{in}^{0.8}}$. א7. מתוצאות הניסויים שבצענו נמצא שבחוף הכרמל, הזרימה במהלך היום הינה טורבולנטית, אך בבקעה הזרימה נמצאה כלמינארית, לכן התנגדות שכבת הגבול בבקעה חושבה ע"י משוואה המתאימה לזרימה למינארית (משוואה ב7): $r_b = 305 \frac{D^{0.5}}{u_{in}^{0.5}}$. ב7. תיקון נוסף שמודל SET מציע הוא תיקון לגובה ממנו מתחיל הפרופיל הלוגריתמי של הרוח – $0.8H$ (H – גובה הרשת). היתרון המשמעותי של מודל זה הוא השימוש במשתנים חיצוניים לחיזוי התאדות בתוך הבית רשת. המשתנים של

המודל הינם חיזוניים מלבד הקרינה נטו (R_n), שטף החום לקרקע (G), מהירות הרוח הפנימית לחישוב התנגדות r_b והתנגדות הפיוניות (r_l).

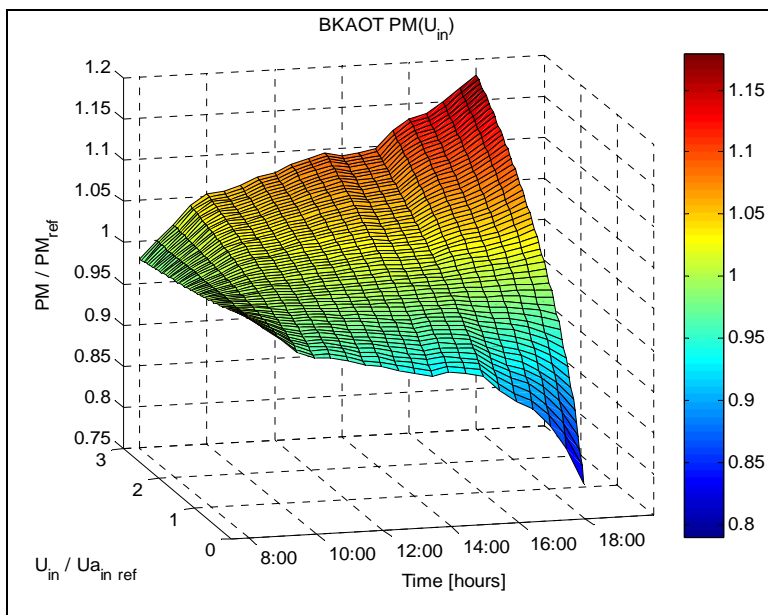
המודלים שימשו לחישוב אווטרנספירציה חצי שעתית אשר הסיכום שלה לאורך יממה נתן אווטרנספירציה יומית. נערכה השוואה בין האוטרנספירציה היומית המדודה והמחושבת ע"י שלושת המודלים.

מבחני רגישות למודלים: על מנת לבחון את האפשרויות לשיפור חיזוי המודלים באזורי האקלים השונים, ננקטו שני מבחני רגישות:

(1) Decoupling / Coupling - בחינת התרומה היחסית של האיבר הקרינתי והאיבר האווירודינמי על המודלים בבקעה ובכרמל: ניתוח זה מאפשר לאבחן האם האוטרנספירציה המחושבת מושפעת מסביבת האקלים הקרובה לגידול, כלומר רוח וגירעון לחץ האדים - VPD, מצב זה נקרא מצומד - Coupled, לעומת מצב בו האוטרנספירציה מושפעת יותר מסביבת האקלים הרחוקה, כלומר קרינת השמש - R_n , מצב הנקרא לא מצומד - Decoupled. מקדם אי הצימוד Ω מבוטא ע"י משוואה 8. כאשר $\Omega > 0.5$, המערכת פחות מצומדת לאקלים הסביבה הקרובה - ותרומת האיבר הקרינתי גדולה יותר, וההיפך - כאשר $\Omega < 0.5$, המערכת יותר מצומדת לאקלים הסביבה הקרובה והאוטרנספירציה מושפעת יותר מהאיבר האווירודינמי (ע"פ Monteith and Unsworth, 1990 ערכי Ω של 0.8-0.9 ימצאו בסביבה של צמחיה נמוכה, לעומת ערכים 0.1-0.2 שימצאו בסביבת יערות).

$$8. \quad \Omega [-] = (\Delta + \gamma) / (\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a))$$

(2) ניתוחי רגישות למודלים - זוהי בדיקה עד כמה מידת השינוי בכל משתנה עשויה להשפיע על מידת השינוי במודל. ניתוח זה נעשה על מנת להבין טוב יותר את השפעות המשתנים השונים שבמודלים על יכולת חיזוי המודלים. ניתוח הרגישות חושב כדלהלן: עבור כל חצי שעה ביום חושבו המודלים מן הערכים הממוצעים החצי שעתיים של המשתנים שבמודל ($model_{ref}$). לאחר בחירת המשתנה לגביו נבחנת רגישות המודל, חושב המודל מחדש עבור כל חצי שעה כאשר כל משתני המודל הם הערכים הממוצעים החצי שעתיים ורק המשתנה שנבחר מוכפל בפקטורי הכפלה שונים (נבחר פקטור הנע בין 0-3 במרווחים של 0.05). לבסוף, חולקה תוצאת המודל שנתקבלה עבור כל פקטור הכפלה בתוצאת הייחוס $model_{ref}$ יחס זה נתן את השתנות המודל עקב השינוי במשתנה הספציפי שנבחר. באיור 3 המוצג כדוגמה, ניתן לראות כי השתנות מהירות הרוח משפיעה יותר על המודל בשעות אחה"צ מאשר בשעות הבוקר. זאת מאחר ואחה"צ הקרינה נחלשת והשפעה היחסית של הרוח גבוהה יותר.



איור 3: ניתוח רגישות של מודל PMrb למהירות רוח פנימית בבקעה הירדן. ציר Y מציג את פקטור ההכפלה (בין 0-3) בו הוכפלה מהירות הרוח הממוצעת בכל חצי שעה ביום. ציר Z מתאר את מידת השינוי במודל עקב השינוי במהירות הרוח בלבד לאורך שעות היממה המוצגות בציר X. מימין לגרף מוצג אינדקס הצבעים המתארים את מידת השתנות המודל.

הגישות השונות לשיפור כיוול המודלים והשימוש בהם שנבחנו במחקר הם:

- תיקון ההתנגדות האווירודינמית במודל PM – מודל פנמן מונטית' קלאסי מכיל רכיב של התנגדות אווירודינמית (ra) בין הצמחייה לאטמוספירה המבוסס על הפרופיל הלוגריתמי של הרוח, אך בהפעלת המודל בתנאים של בית רשת, שימוש בהתנגדות זו אינו בהכרח נכון מכיוון שפרופיל הרוח בתוך המבנה לא-דווקא מתנהג בצורה לוגריתמית. תוצאות ניסוי למדידת פרופילים אנכיים של פרמטרים אקלימיים בתוך בית רשת (אשר נערך בתאריך ה- 22/6/11 באותו בית רשת בו נערך הניסוי הנוכחי – גרף לא מוצג) תומכות בהשערה זו; בניסוי זה התקבל פרופיל ליניארי של הרוח בין הצמחים לרשת. ההשערה היא שהתנגדות שכבת הגבול בין הצמחים לרשת תלויה באופי זרימת האוויר על העלים. בהנחה שקיימת הסעת אוויר מאולצת בבית רשת, כלומר תנועת אוויר חזקה יחסית, הצבת ההתנגדות z במודל, הלוקחת בחשבון את מהירות הרוח וגודל העלה, נותנת התאמה טובה יותר מאשר שימוש בהתנגדות המבוססת על הפרופיל הלוגריתמי של הרוח.

- בדיקת אופי הסעת האוויר בשכבת הגבול של העלים ובחינת השפעתה על ביטוי ההתנגדות ועל תוצאת המודלים - התנגדות שכבת הגבול z מחושבת ממקדם הסעת החום בין הצמחייה לסביבה (h_H). מקדם זה תלוי בגודל העלה (L) ובמספר נוסלט (Nu). מספר Nu מהווה בסיס להשוואה בין קצבי איבוד חום בקונבקציה מגופים דומים החשופים לעוצמות רוח שונות, וחישובו משתנה עבור אופי הסעת וזרימת האוויר: הסעת האוויר יכולה להיות טורבולנטית או למינרית, כתלות במהירות הרוח. כן יכולה להיות הסעה מאולצת – תנועת אוויר המושפעת בעיקר מהרוח או הסעה טבעית – עקב הבדלים בצפיפויות האוויר; או הסעה מעורבת – כאשר קיימת גם הסעה מאולצת וגם טבעית. מבדיקה שערכנו נמצא כי גם בבקעה וגם בחוף הכרמל הסעת האוויר הייתה ברובה מעורבת (טבלא 2). לכן על מנת לאפיין בצורה מדויקת יותר את התנגדות שכבת הגבול בנינו אלגוריתם המחשב לכל חצי שעה את אופי הזרימה ואופי ההסעה של האוויר ולפי זה מחשב את ההתנגדות המתאימה עבור כל מצב, להלן rbm.

| אופי הסעה | בקעה | חוף הכרמל |
|-----------|------|-----------|
| מאולצת | 24% | 0% |
| טבעית | 10% | 14% |
| מעורבת | 66% | 86% |

טבלא 2: התפלגות אופי הסעת האוויר בבקעה ובחוף הכרמל 2011 (%)

- מודל קרינה נטו תחת הרשת – המגבלה העיקרית במודל בית הרשת היא השימוש בקרינה נטו מדודה תחת הרשת – משתנה שאינו זמין לחקלאים. נבדקה אפשרות של מידול הקרינה נטו תחת הרשת לפי קרינה גלובאלית וטמפרטורה חיצוניים ומקדמי עבירות והחזרה של קרינה קצרת וארוכת גלים לרשת הספציפית.

- כיוול המודלים לפי קשרי פנים-חוץ - אחת המגבלות של המודלים הקלאסיים היא השימוש בנתונים פנימיים שאינם נגישים לחקלאים. נבדקה אפשרות של כיוול מודל הייחוס RET ומודל PMTrb לנתונים חיצוניים בלבד הזמינים מתחנות מטאורולוגיות ע"י בניית קשרים בין משתני המודלים תחת הרשת למשתנים חיצוניים בתקופה מסויימת (תקופת כיוול) והרצה של המודלים עם משוואות אלה בתקופה אחרת (תקופת אימות). נערכה השוואה בין האופוטורנספירציה היומית המדודה (LEf) למחושבת ע"י המודלים המחושבים ממשתנים מדודים וממשתנים מחושבים ממשוואות הכיוול.

תוצאות:

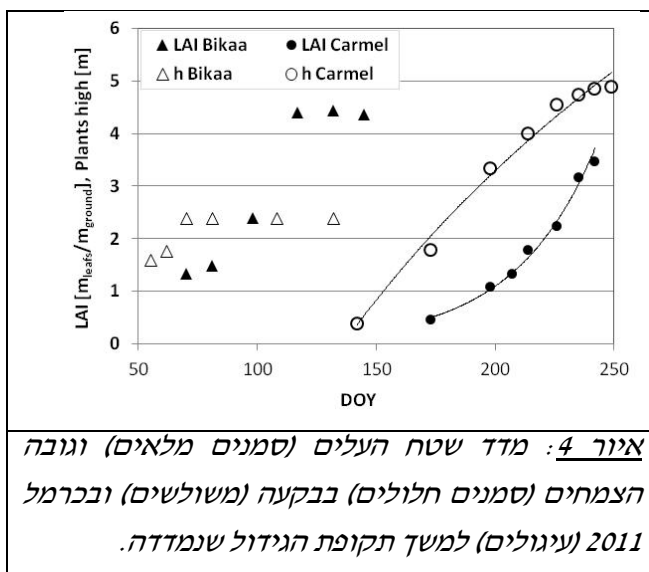
אפיון תכונות קרינתיות של רשתות

ערכי ההחזרה, העברה והבליעה של שלושת הרשתות: 10%w, 10%k, 13%k עבור אורכי גל שונים: קרינה גלובאלית (285-2800 nm), PAR - קרינה בתחום הפוטוסינתזה (400-700 nm), NIR - קרינה ארוכת גלים בתחום הקרוב (692-2800 nm) וקרינה גלובלית ישירה מוצגות בטבלא 3:

| 13%k (N-S) | 13%k (E-W) | 10%k (N-S) | 10%k (E-W) | 10%w | Radiation Type | Radiation Range |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------|-------------------|--------------------|
| 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | Reflectance | Global |
| 0.69 | 0.72 | 0.71 | 0.73 | 0.75 | Transmittance | |
| 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.18 | 0.16 | Absorptance | |
| 0.13 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | Reflectance | PAR |
| 0.63 | 0.82 | 0.84 | 0.85 | 0.76 | Transmittance | |
| 0.24 | 0.08 | 0.06 | 0.05 | 0.15 | Absorptance | |
| 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | Reflectance | NIR |
| 0.92 | 0.97 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | Transmittance | |
| 0.04 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | Absorptance | |
| 0.57 | 0.59 | 0.59 | 0.70 | | Transmittance | Direct |

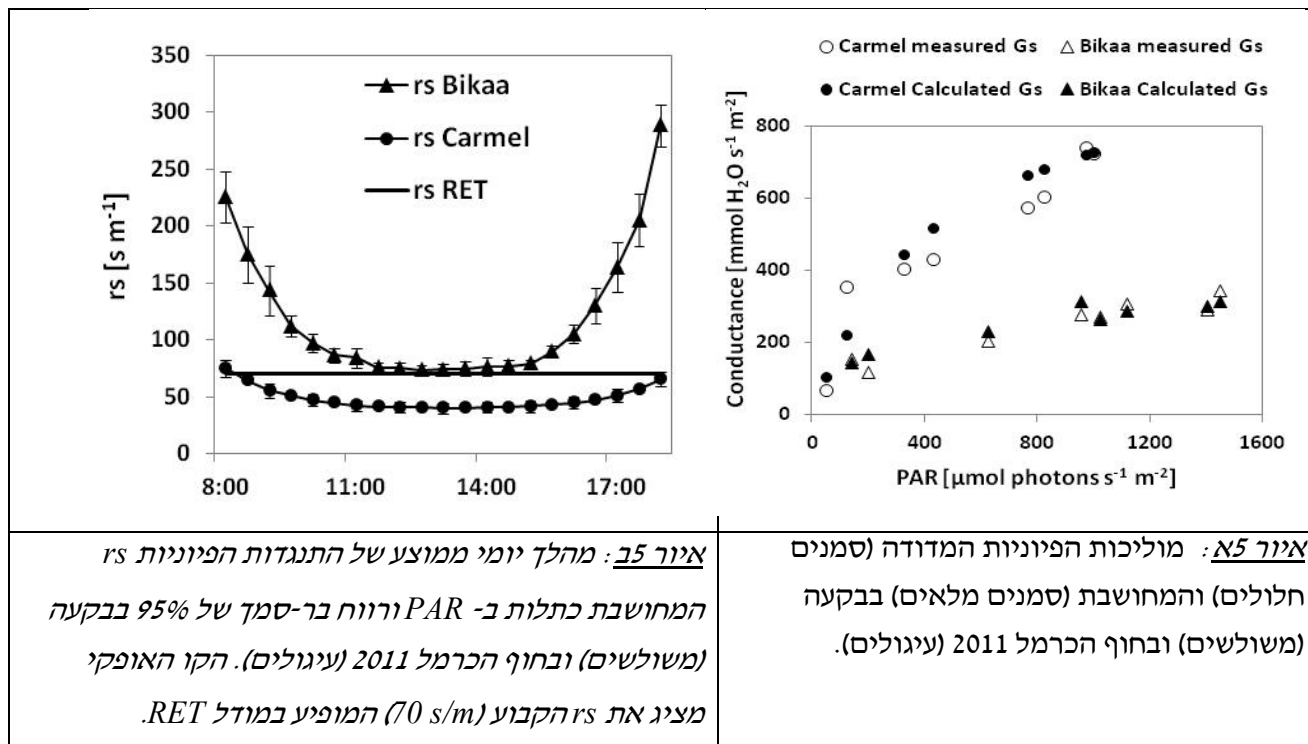
טבלא 3: ממוצעי ערכי ההחזרה, העברה והבליעה של שלושת הרשתות: 10%w, 10%k, 13%k עבור קרינה גלובאלית, פוטוסינתטית PAR, ארוכת גלים בתחום הקרוב NIR וקרינה ישירה.

מדידות מיקרואקלים ואופוטורנספירציה בבתי רשת



מדד שטח העלים - LAI: איור 4 מתאר את העלייה ב LAI ובגובה הצמחים במהלך עונת הגידול. תקופות המדידה המוצגות במחקר זה הינן עבור ה- LAI הגדול ביותר על מנת לקבל הערכה אמينة ביותר של המודלים המתאימים לכיסוי מלא של הצמחייה. תקופות המדידה המוצגות במחקר: בבקעה - DOY 125-157 (5/5/10-6/6/10), LAI > 4, h = 2.4m; בחוף הכרמל - DOY 225-241 (13/8/10-), h > 4m, LAI > 2. (29/8/11).

מוליכות פיוניות: איור 5 מצג את מוליכות הפיוניות הממוצעת המדודה והמחושבת בבקעה ובחוף הכרמל כתלות ב-PAR. המקדמים לחישוב המוליכות בבקעה: $S_{\text{photons}}=11583$, $GI_{\text{max}}=2317$ ובכרמל: $GI_{\text{max}}=1053$, $S_{\text{photons}}=445$. באיור 5 ניתן לראות את התנגדות הפיוניות, r_s , המחושבת ע"פ היחס בין מוליכות הפיוניות ומדד שטח העלים, LAI. ניתן לראות שבמהלך היום התנגדות הצמחייה בבקעה עומדת על ערך של כ- 60 s m^{-1} הדומה לערכה הקבועה של התנגדות מודל היחס RET, 70 s m^{-1} . התנגדות הצמחייה בחוף הכרמל מעט נמוכה יותר ועומדת במהלך היום על ערך של כ- 40 s m^{-1} .



מאזן האנרגיה: השיטה המקובלת בספרות לאימות מדידות של אוופוטנספירציה (LE) היא מדידה בלתי תלויה של שאר רכיבי מאזן האנרגיה: קרינה נטו (R_n), שטף חום מוחשי (H) ושטף חום לקרקע (G) וחקירת סגירת מאזן האנרגיה. בכל ניסוי הקשר בין האנרגיה הזמינה $R_n - G$, לבין האנרגיה הנצרכת ע"י המטע $LE + H$ הוצג ע"י קו ישר (גרפים לא מוצגים) שהותאם לנתונים ע"י שיטת הריבועים הפחותים. נוסחאות הקווים שהתקבלו הינם:

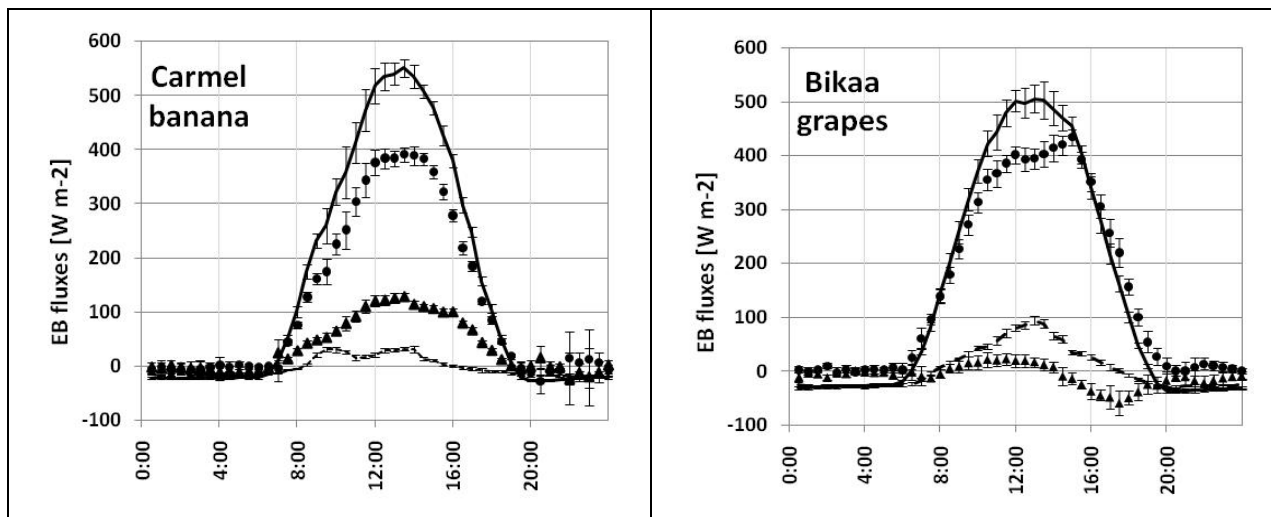
$$Carmel_{08}: LE+H [W m^{-2}] = 1.06(R_n - G) - 20.24 \quad (R^2 = 0.79)$$

$$Bikaa: LE+H [W m^{-2}] = 1.04(R_n - G) - 6.93 \quad (R^2 = 0.76)$$

$$Carmel_{11}: LE+H [W m^{-2}] = 0.74(R_n - G) + 4.37 \quad (R^2 = 0.94)$$

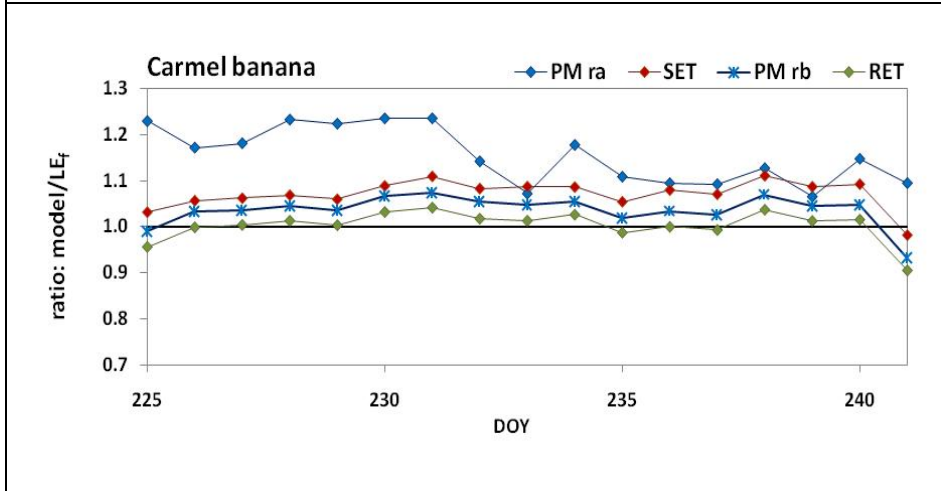
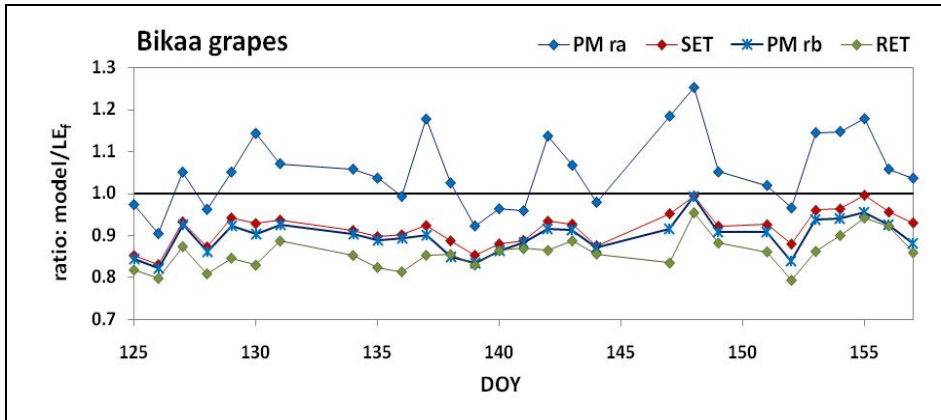
כל השיפועים שהתקבלו סבירים, בהתאמה עם ממצאים מהספרות, ומאמתים את מדידות השטפים בשיטת EC. מטרת המחקר הנוכחי היא השוואה בין מודלים למדידות בניסויים שונים כאשר המודלים הנבחנו מבוססים על רכיבי מאזן האנרגיה R_n ו- G . על מנת ליצור בסיס משותף להשוואה בין המודלים למדידות, ומאחר והתקבלו סגירות אנרגיה שונות בניסויים השונים, ערכנו סגירה מאולצת של מאזן האנרגיה (LE forcing) ע"י שימוש ביחס בואן (Bowen Ratio) מדוד, $B = H / LE$. בהתאם לפעולה זו ערך האוופוטנספירציה החצי שעתי החדש מחושב לפי: $LE_f = (R_n - G) / (1 + B)$, וזה הערך בו השתמשנו להשוואה עם המודלים.

איור 6 מציג מהלך יומי ממוצע של רכיבי מאזן האנרגיה בבקעה ובכרמל 2011 לתקופה בה הגידול הגיע לכיסוי המירבי. באיור זה LE_f ו- H_f , החום הכמוס והמוחש, בהתאמה, הם הערכים שהותאמו לסגירת מאזן האנרגיה כמוסבר לעיל. ניתן לראות בכרמל את המהלך הברור של עליית האופוטורנספירציה בשעות הבוקר וירידה בשעות אחר הצהריים, ואילו בבקעה האופוטורנספירציה מגיעה לשיאה בשעות אחר הצהריים. כמו כן ניתן לראות כי בכרמל שטף החום לקרקע G נמוך יחסית משטף החום המוחשי H , לעומת הבקעה שם ההתנהגות הפוכה; יותר אנרגיה נקלטת בקרקע מאשר אנרגיה שמשחררת כחום מוחשי. חשוב לציין כי קוי הרווח בר-סמך הקטנים יחסית מראים כי לא הייתה שונות גדולה במהלכי רכיבי האנרגיה בין ימי המדידה השונים.



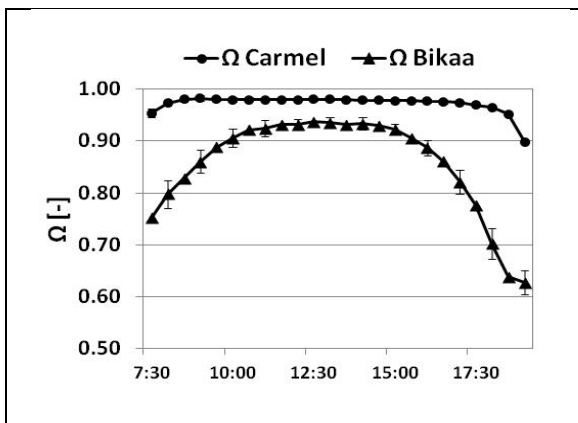
איור 6: מהלך יומי ממוצע של רכיבי מאזן האנרגיה בבקעה (28 יום: 5.5.10-6.6.10) ובחוף הכרמל (17 יום: 13.8.11-29.8.11). קו רצוף – קרינה נטו (R_n), עיגולים, משולשים - חום כמוס (התאדות- LE_f), וחום מוחשי (H_f) בהתאמה, קו שחור מקווקו – שטף חום לקרקע (G). הקווים האנכיים הם רווח בר-סמך של 95%.

השוואה בין המדידה למודלים: איור 7 מציג את היחס היומי הממוצע בין האופוטורנספירציה היומית המחושבת ע"י המודלים לבין המדידה המתוקנת. שלושת המודלים נותנים חיזוי קרוב למדידה – בתחום סטייה של עד כ-20%. ניתן לראות כי ישנה התאמה טובה מאוד בין המודלים של התאדות ייחוס RET , מודל התאדות בית רשת SET , ומודל PM_{rb} לעומת מודל PM_{ra} שנתן באופן מובהק הערכת יתר של התאדות. ממצא זה מחזק את הטענה שהתנגדות אווירודינאמית המבוססת על פרופיל לוגריתמי של הרוח אינה מתאימה לאפיון ההתנגדות בשכבה שבין הצמחייה לרשת, ולעומת זאת שימוש בהתנגדות שכבת הגבול של העלים נותן באופן מובהק תוצאות חיזוי הקרובות יותר למדידה. ממצאים אלו ממחישים את חשיבות השפעת אפיון ההתנגדויות על התוצאות הסופיות של המודלים. דבר נוסף שניתן לראות באיור זה הוא שמודל התאדות בית רשת SET , המחושב מנתוני רוח, טמפרטורה ולחות חיצוניים, נותן תוצאה דומה מאוד למודלים המבוססים על נתונים פנימיים בלבד.



איור 7: היחס בין התאדות יומית מחושבת ע"פ המודלים להתאדות יומית מדודה (LE_f) עבור צמחים גדולים בבקעה (גרף עליון) ובחוף הכרמל 2011 (גרף תחתון). המודלים המוצגים: מודל פנמן-מונטית' לגידול אמיתי עם התנגדות אווירודינאמית לוגריתמית, $PMra$, ועם התנגדות שכבת הגבול של העלה, $PMrb$, (מעוינים כחולים וכוכביות כחולות בהתאמה); מודל בית הרשת SET (מעוינים אדומים) ומודל הייחוס RET (מעוינים ירוקים).

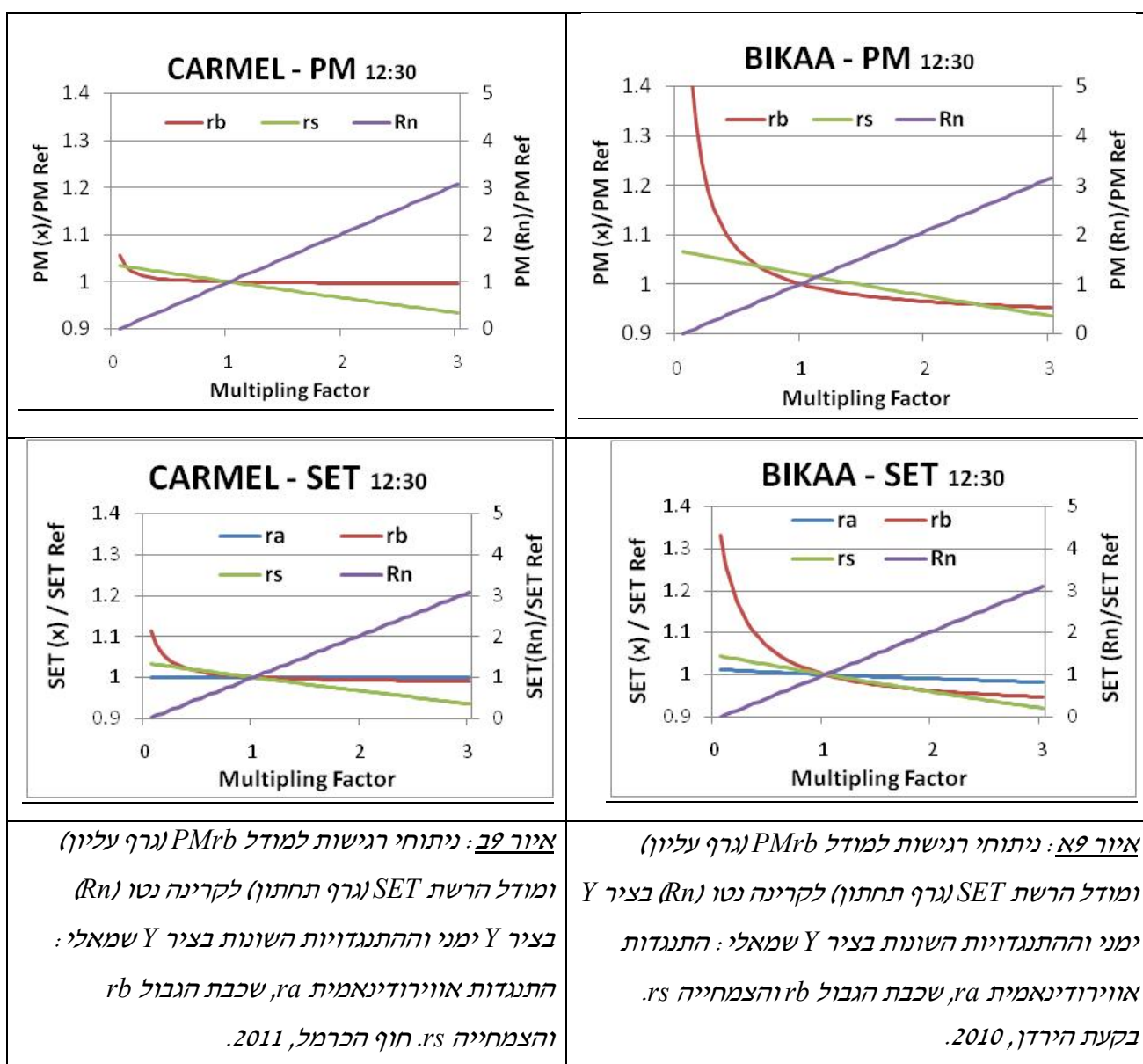
מבחני רגישות למודלים:



איור 8: מהלך יומי ממוצע של מקדם אי הצימוד Ω ורווח בר-סמך של 95%. עבור הבקעה (משולשים) וחוף הכרמל 2011 (עיגולים).

(1) Decouplin / Coupling - מהלך יומי ממוצע של מקדם אי-הצימוד בבקעה ובכרמל (איור 8) מראה כי בשני האתרים האופוטורנספירציה אינה מצומדת ומושפעת יותר מן האיבר הקרינתי מאשר האווירודינאמי. עם זאת, בבקעה קיימת יותר השפעה של האיבר האווירודינאמי על כלל האופוטורנספירציה מאשר בחוף הכרמל. בנוסף, ניתן לראות באיור 8 את הירידה המשמעותית של מקדם הצימוד בבקעה בשעות הערב. מדיקות שערכנו, נמצא כי ירידה זו נובעת מעליה בעוצמת הרוח בשעות הערב; עוצמת הרוח תחת הרשת הן בבקעה והן בחוף הכרמל הגיעו לערכים דומים של עד כ- 1 ms^{-1} , אך מכיוון שבחוף הכרמל הרוחות החזקות מגיעות עם בריזת הים בשעות הצהריים, כאשר הקרינה בשיאה, התרומה של האיבר האווירודינאמי ביחס לאיבר הקרינתי קטנה. לעומת זאת, בבקעת הירדן הרוחות החזקות מגיעות בשעות הערב, כאשר הקרינה נמוכה יותר, ולכן תרומת האיבר האווירודינאמי לשה"כ האופוטורנספירציה גדולה יותר. תוצאות אלו משמעותיות לתהליך בחינת שיפור המודלים. נראה שכל "טיפול" במשתני האיבר האווירודינאמי ישפיע מעט על שיפור חיזוי האופוטורנספירציה באקלים ים תיכוני, אך יתכן ויוכל להשפיע על שיפור החיזוי באקלים מצומד יותר כמו בקעת הירדן.

(2) ניתוח רגישות למודלים – ניתוחי רגישות של מודל PM_{rb} ומודל SET לקרינה נטו (R_n) ולהתנגדויות השונות באיבר האווירודינמי לשעה 12:30 מוצגים באיור 9א עבור בקעת הירדן ו- 9ב עבור חוף הכרמל 2011. ניתן לראות שבשני אזורי האקלים, לקרינה נטו ההשפעה החזקה ביותר על המודלים. כמו כן, ניתן לראות את ההבדל המשמעותי בין הבקעה לכרמל מבחינת ההשפעה של התנגדות שכבת הגבול של העלה- r_b; אותו שינוי יחסי בהתנגדות r_b גורם לשינוי הרבה יותר משמעותי באופוטורנספירציה בבקעה מאשר בחוף הכרמל. תוצאות אלו מתאימות למקדם אי הצימוד שהוצג בסעיף הקודם. ההשפעה הגדולה יותר של r_b על המודלים מתקבלת בהקטנתו, כלומר במהירויות רוח חזקות או עבור גידולים עם גודל עלה קטן. בנוסף ניתן לראות ששינויים בהתנגדות האווירודינמית r_a במודל הרשת SET אינם בעלי השפעה על תוצאת המודל הן בבקעה והן בכרמל. הסיבה לכך היא שהתנגדות זו מופיעה במודל כמכנה ביחס r_b/r_a וערכה נמוך מערך r_b. השתנות בהתנגדות הצמחייה r_s משפיעה באופן יחסי קטן על השתנות המודלים הן בבקעה והן בכרמל.

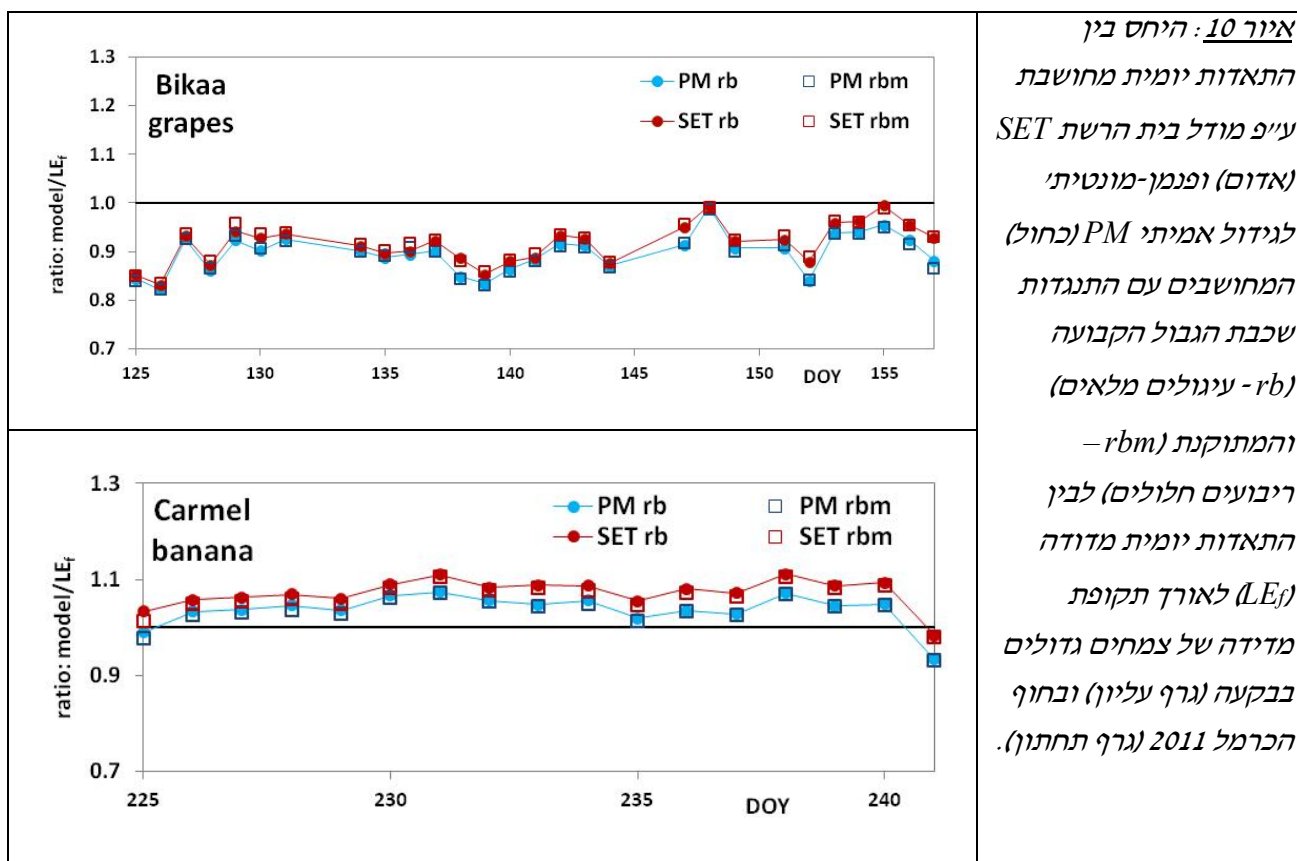


יש לציין כי התוצאות המוצגות בגרפים נבחרו באופן אחיד לשעה 12:30 בלבד. באיור 3 המציג את רגישות מודל PMrb למהירות הרוח הפנימית ניתן לראות שבשעות הערב המודל רגיש הרבה יותר לשינויים ברוח מאשר בשעות הבוקר והצהריים.

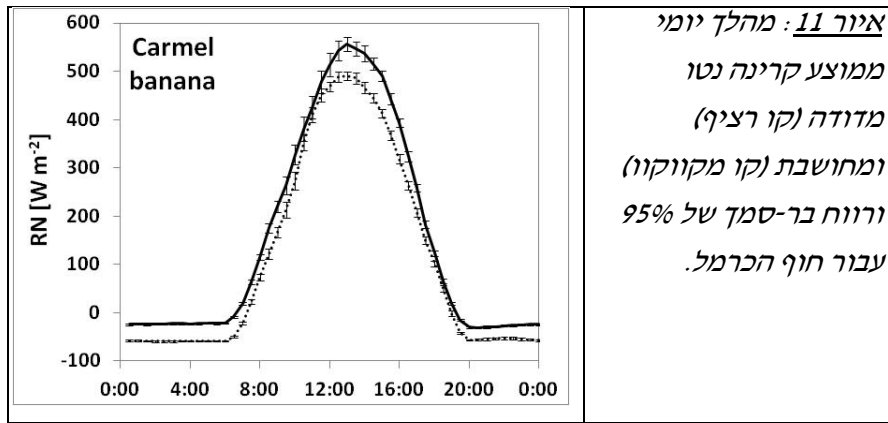
ניתוח רגישות זה בוצע על כל משתני המודל השונים. הפוטנציאל הגלום בהשפעת התנגדות rb על המודל הביאה להשערה שאיפיון מדויק יותר של התנגדות זו, כפי שמוצג בהמשך, יכול לסייע בחיזוי אמין ומדויק יותר של האופוטנספירציה.

דרכים אפשריות לשיפור המודלים והשימוש בהם

- אפיון מדויק של שכבת הגבול וחישוב התנגדות rbm –
 התיקון השפיע בעיקר על הערכים הגבוהים של ההתנגדות אשר נתקבלו בשעות הלילה כשההתאדות נמוכה מאוד (גרפים לא מוצגים). לכן ברזולוציה יומית נמצא שיפור קל מאד אך לא משמעותי, בחיזוי המודלים עם ההתנגדות המתוקנת (rbm) (איור 10). תוצאות דומות נתקבלו גם עבור הניסוי בחוף הכרמל 2009 (גרף לא מוצג).

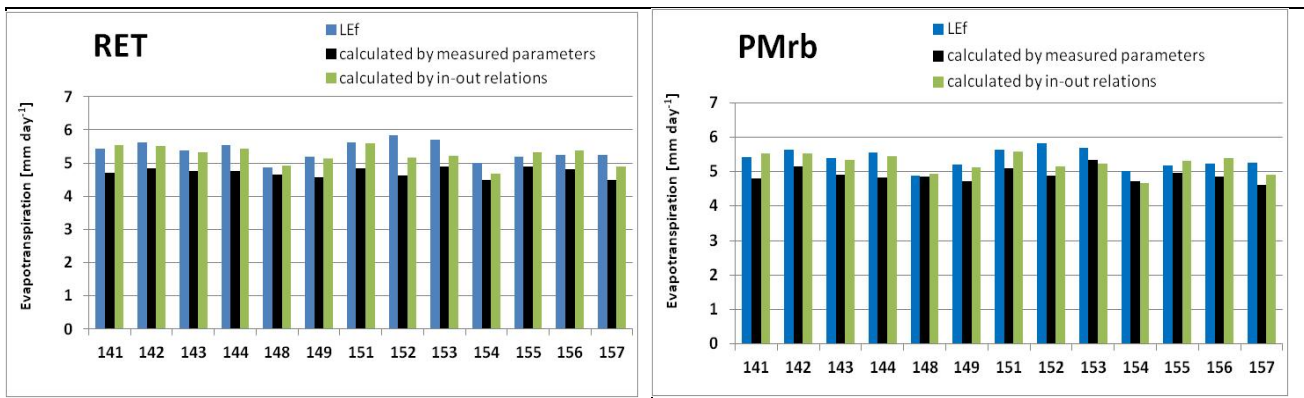


- מודל קרינה נטו תחת הרשת – חישוב הקרינה נטו תחת הרשת בחוף הכרמל 2011 היה בהתאמה טובה מאוד לקרינה נטו המדודה (מתאם של 0.98), אך הראה סטייה של כ- 10% פחות מהקרינה המדודה בשעות הצהריים (איור 11). בבקעת הירדן מידול הקרינה נטו תחת הרשת נתן תוצאה פחות טובה עם סטייה של כ- 35% פחות מהמדידה. בעוד שחיזוי הקרינה נטו קצרת הגל היה בהתאמה טובה למדידה, הסטייה שהתקבלה נגרמה בעיקר עקב החישוב של הקרינה ארוכת הגל. לכן, מידול הקרינה נטו תחת הרשת דורש המשך עבודה, ולא נכלל בחישוב המודלים המוצגים בדו"ח זה.



• כיוול המודלים לפי קשרי פנים-חוץ –

שיטה זו נבחנה עבור הניסוי בבקעה בלבד. תקופת הכיוול נערכה למשך 16 יום בין ה- 5/5/10-20/5/10 (DOY125-140) ותקופת האימות נערכה למשך 17 יום בין ה- 21/5/10-11/6/10 (DOY 141-157). נבנה מערך משוואות המבטאות את הקשרים בין נתוני פנים-חוץ ונבחן האימות של קשרים אלו (לא מוצג). בהשוואה בין המדידה (LE_f) למודלים המחושבים ממשוואות הכיוול ומהמדידות (איור 12) נמצא כי המודל המחושב מקשרי פנים-חוץ נתן חיזוי טוב מאוד ביחס למודל המחושב מהמדידות, ובמקרה ספציפי זה, אף חיזוי טוב יותר ביחס למדידה. שיטה זו יכולה להיות כלי שימושי לחקלאי ליישום מודלים לחיזוי האופוטורנספירציה תחת הרשת, אך יש צורך בתקופות כיוול לגידול מסוים באזור אקלימי מסוים ותחת רשת מסוימת, ועבור תקופות הגידול השונות במהלך עונת הגידול.



איור 12: אופוטורנספירציה מדודה (עמודות כחולות), מחושבת ע"י נתונים מדודים (עמודות שחורות) ומחושבת ע"י קשרי פנים-חוץ (עמודות ירוקות) עבור מודל היחוס RET ומודל פנמן-מונטית עם שינוי ההתנגדות $PMrb$.

טבלא 4 מסכמת את האופוטורנספירציה היומית המדודה והמחושבת מהמודלים וסטיית התקן בבקעה בחוף הכרמל 2009 ו-2011, וכמו כן, את היחסים הממוצעים בין כל מודל למדידה, עם סטיות התקן.

| אזור | השקיה | LEf | RET | PM log ra | PM const rb | PM mixed rb | SET const rb | SET mixed rb |
|----------------|---------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| חוף הכרמל 2009 | 4.60 ±0.21 | 2.78 ±0.26 | 3.52 ±0.29 | 3.38 ±2.88 | 3.68 ±0.32 | 3.59 ±0.32 | 4.27 ±0.12 | 4.18 ±0.11 |
| | 1.67 ±0.23 | - | 1.27 ±0.08 | 1.15 ±1.00 | 1.33 ±0.09 | 1.29 ±0.09 | 1.55 ±0.14 | 1.51 ±0.14 |
| בקעת הירדן | 5.63 ±0.66 | 5.43 ±0.56 | 4.63 ±0.42 | 5.69 ±0.59 | 4.85 ±0.47 | 4.85 ±0.48 | 4.95 ±0.45 | 4.97 ±0.46 |
| | 1.05 ±0.19 | - | 0.86 ±0.04 | 1.05 ±0.09 | 0.90 ±0.04 | 0.90 ±0.04 | 0.92 ±0.04 | 0.92 ±0.04 |
| חוף הכרמל 2011 | 4.62 ±0.33 | 4.17 ±0.26 | 4.18 ±0.25 | 4.81 ±0.41 | 4.31 ±0.26 | 4.29 ±0.25 | 4.46 ±0.25 | 4.43 ±0.24 |
| | 1.11 ±0.11 | - | 1.00 ±0.03 | 1.15 ±0.06 | 1.04 ±0.03 | 1.03 ±0.03 | 1.07 ±0.03 | 1.06 ±0.03 |

טבלא 4: אופוטורנספירציה יומית מדודה ומחושבת מהמודלים וסטיות התקן בבקעה בחוף הכרמל (שורות אפורות), והיחסים הממוצעים בין כל מודל למדידה וסטיות התקן.

בבקעת הירדן מודל PMra נתן את הממוצע התקופתי הקרוב ביותר למדידה, אך גם את סטיית התקן הגבוהה ביותר בשלושת הניסויים. סטיית התקן הגבוהה מעידה על הרגישות הגבוהה של מודל זה; המשמעות היא שברמה היומית בכדי לחשב צפי השקיה ע"פ מודל רצוי לא להסתמך על PMra. ברמה היומית שכלול מודל פנמן-מונטית' קלאסי ע"י החלפת ההתנגדות הלוגריתמית ra בהתנגדות שכבת הגבול של העלה rb שיפר במידה ניכרת את ההתאמה עם המדידות (איור 7). עם זאת, אפיון מדויק יותר של התנגדות שכבת הגבול של העלים rbm לא נתן שינוי משמעותי בתוצאת המודל ברמה היומית, אך שיפר קלות את התוצאה ברמה תקופתית בניסויים שנערכו בחוף הכרמל (איור 10). בחוף הכרמל המודל המיטבי בשתי שנות הניסויים היה מודל הייחוס RET, אך המגבלה בשימוש במודלים הקלאסיים היא הצורך בנתונים פנימיים שאינם נגישים למגדל. ניסיון לשיפור השימוש במודלים ע"י כיוול המשתנים הפנימיים לפי משתנים חיצוניים הנגישים לחקלאי הראה תוצאות טובות מאוד. זהו כלי שניתן להשתמש בו, אך הוא דורש תקופת כיוול לתנאים הספציפיים של כל בית רשת. המודל המועדף יותר לשימוש הן בבקעה והן בחוף הכרמל הוא מודל בית הרשת SET שנתן חיזוי יחסית טוב. המגבלה במודל בית הרשת – עדיין קיימים מספר משתנים פנימיים תחת הרשת. המשתנים הפנימיים הם: R_n - מדידה שאינה זמינה בדרך כלל; G - ניתן לחזות על פי R_n ; U_{in} - עבור התנגדות שכבת הגבול rb, ניתן למדוד בצורה זולה; r_s - התנגדות הצמחייה, ניתן למדל על פי קרינה חיצונית.

הבעת תודה: תודנו למורן פירקנר אשר ביצעה את הניסויים ועיבוד וניתוח הנתונים. תודה לאורי דיקן על הסיוע בהקמת מערכות הניסוי ובעיבוד הנתונים. תודתנו לחן סלומון על שאפשר לנו לבצע את המדידות בבית רשת לענבי מאכל של בקעות-ארגמן ולערטל טובין על שאפשר לנו לבצע את המדידות בבית רשת של תאגיד 'בננות-החוף'. תודה לאור שפירא על העזרה במדידות הפוטוסינתזה בבקעה.

סיכום עם שאלות מנחות

1. מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה: מטרות המחקר תאמו את תוכנית העבודה עם שינוי חלקי במיקום ביצוע הניסויים. כמתוכנן, נמדדה אופוטורנספירציה ממוצע מכוסה בבית רשת בהשקיה אחידה ונבחנו מודלים מיקרו-מטאורולוגיים לחיזוי האופוטורנספירציה בבתי רשת. השינוי שבוצע הוא שבמקום מדידות בבית רשת לגידול פלפל בערבה, המדידות בשנה ב' נערכו בבית רשת לגידול ענבי מאכל בבקעת הירדן.
2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח: נערכו מדידות אופוטורנספירציה בשלושה בתי רשת מסחריים: ענבי מאכל בבקעת הירדן, ושני בתי רשת לגידול בננה בחוף הכרמל. המדידה נעשתה ע"י שיטת קורלצית הערבולים. הופעלו חמישה מודלים של אופוטורנספירציה הנבדלים ברכיבי ההתנגדות האווירודינאמית. נערכה השוואה בין המדידות והמודלים השונים. תוצאות מאזן האנרגיה הראו אי סגירה של עד – 26% באנרגיה, אשר תוקן (לצורך ההשוואה עם המודלים) ע"י הפעלת אילוף סגירת מאזן האנרגיה. ההשוואה בין המדידות למודלים הראתה סטייה של עד כ – 20% מהמדידה. ברמה תקופתית, בחוף הכרמל המודל RET היה בהתאמה טובה ביותר עם המדידה ואילו בבקעה מודל PM. מודל PM עם התנגדות לוגריתמית אינו מומלץ לשימוש ברמה יומית. ניתוחי רגישות הראו מיהם רכיבי המודל המשמעותיים ונערכו ניסיונות לשפר אותם. נמצאה השפעה בולטת של האיבר האווירודינאמי במודלים בבקעת הירדן בשעות אחה"צ. לכן באזור זה יש חשיבות למודל אמין יותר של איבר זה וההתנגדויות המופיעות בו.
3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכן: בוצעו בהצלחה המשימות שתוכננו. נראה כי יש חשיבות להתאמת אברי ההתנגדויות במודלים לתנאי בית הרשת. איפיון התנגדות שכבת הגבול הביא לשיפור קל מאד, אך הוא משמעותי מבחינה מתודית מאחר ונמצא כי בבתי רשת, ברוב המקרים, ההסעה היא מעורבת ונדרש איפיון משוכלל של ההתנגדות. שיפור גישה זו במחקר המשך ייתכן ע"י הכללת השפעת שיפוע העלים והתנועה שלהם עקב הרוח. בוצעה בהצלחה התאמת המשתנים הפנימיים בבית הרשת לפי משתנים חיצוניים. המתאם הגבוה שהתקבל בקשרים אלה ממחיש את העובדה כי בית הרשת הוא מבנה חצי פתוח באינטראקציה חזקה עם הסביבה החיצונית. לעומת זאת, המערכת הצמחית עצמה אינה מצומדת לסביבתה הקרובה כפי שהראה מקדם אי-הצימוד הגבוה.
4. הבעיות שנתרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה: מודל SET הוא יעיל לשימוש בבתי רשת וזאת מאחר וחלק מהמשתנים שמופיעים בו הם חיצוניים. לכך יש יתרון מבחינת זמינות המודל לחקלאי, שכן ברוב המקרים המשתנים הזמינים לחקלאי מתקבלים מתחנות מטאורולוגיות חיצוניות ולא ממדידות פנימיות. עדיין, גם במודל זה יש מספר משתנים פנימיים (לדוגמה, קרינה נטו) שיש עוד צורך לשכלל את המידול שלהם. חל שינוי במיקום המדידות וסוג הגידול בהשוואה לתוכנית המחקר המקורית. במקום מדידות בבית רשת לגידול פלפל בערבה, המדידות נערכו בבית רשת לגידול ענבי מאכל בבקעת הירדן. הסיבה לשינוי במיקום הניסוי היא אילוצים טכניים שמנעו מאיתנו ביצוע המדידות בערבה. חשוב להדגיש כי בשיטות בהן אנו עובדים אנו משווים בין מדידה ישירה למודלים, כאשר המודלים מותאמים לסוג הגידול הנבחר ולתנאי האקלים. אחת המטרות המרכזיות של המחקר היא בחינת השפעת האזור האקלימי על יעילות חיזוי המודלים ומבחינה זו אזור בקעת הירדן דומה מאד לאזור הערבה.
5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: הוצג פוסטר בכנס ביוון שהתקיים ביוני 2011 – GreenSys2011. פורסם מאמר בכתב העת: Biosystems Engineering, 2010, 107(4), 317-327.
6. פרסום הדו"ח: אנו ממליצים לפרסם את הדו"ח ללא הגבלה (ספריות ואינטרנט).