

**ייעול בקרת האקלים וההשקיה בחממות על סמך ערכים ממוצעים של
פוטוסינתזה ודיות**

מאיר טייטל¹, שבתאי כהן², אמנון שוורץ³, מוטי ברק¹, דוד שמואל⁴, חנה יחזקאל⁴, אלי מתן⁴

¹ המכון להנדסה חקלאית, ² המכון לקרקע מים וסביבה, ³ הפקולטה לחקלאות, ⁴ חוות הבשור

**Improving greenhouse control by using average values of transpiration and
photosynthesis**

Teitel¹, M., Cohen², S., Shwartz³, A., Barak¹, M., Shemuel⁴, D., Yechezkel⁴ H., Matan⁴,
E.

¹ Institute of Agricultural Engineering, A.R.O., the Volcani Center, P.O.Box 6, Bet
Dagan, Israel 50250, grteitel@agri.gov.il

²Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, Agricultural Research
Organization, The Volcani Center, P. O. B. 305, Bet Dagan, 50250, Israel

³Faculty of Agriculture, Hebrew University of Jerusalem, Rehovot.

⁴MOP DAROM, Besor experimental station, Mobile post 4, 85400, Israel

תקציר

בשנים האחרונות התפתחה מאוד טכנולוגיה של בקרה בעזרת פרמטרים צמחיים (פיטומוניטור <http://www.phytech.co.il>). טכנולוגיה זו מבוססת על רגשים ייחודיים המודדים את מצב הצמח בזמן נתון וכן את קצב ההתפתחות שלו. תוכנה ייחודית המנתחת את המידע המתקבל מהרגשים מאפשרת קבלת החלטות ביחס לביצוע טיפולים כגון: השקיה, ודישון בזמן הנכון ובכמות המדויקת לשם קבלת יבול באיכות מיטבית, תוך שימוש במינון אופטימאלי של תשומות. מערכת הפיטומוניטור כבר הוכיחה את יעילותה במקרים רבים. החיסרון המשמעותי של מערכת הפיטומוניטור המקובלת כיום, הוא שהיא מתבססת על מספר בודד (שניים שלושה או מעט יותר, במקרה הטוב) של צמחים לקבלת החלטות לגבי צמחים השתולים בשטח של מספר דונמים. על מנת להתגבר על בעיה זו מוצע במחקר הנוכחי לפתח שיטת מדידה אמינה של ערכי פוטוסינטזה ודיות אינטגרליים המייצגים את כלל הצמחים במבנה. במסגרת המחקר פותחו מודלים תיאורטיים לחישוב השינוי בתכולת אדי המים וריכוז הפחמן הדו חמצני (פד"ח) באוויר בתלות במרחק מהכניסה למבנה. המודלים אומתו בעזרת תוצאות ניסויים שבוצעו בחממת פלפל הנתונה לאוורור מאולץ שאורכה 24 מטר. בניסויים הנ"ל נמדדו טמפרטורת ולחות האוויר בפתחי הכניסה והיציאה של המבנה. בו זמנית נמדדה הדיות של 12 צמחים באזורים שונים בחממה ע"י ליזימטרים. מהכפלת ההפרש בין כמות אדי המים ביציאת האוויר מהמבנה לזה שבכניסה בספיקת האוויר העובר דרך המבנה, חושבה הדיות האינטגרלית של כלל הצמחים. נערכה השוואה בין הערכים האינטגרליים וערכי הדיות שנמדדו ע"י הליזימטרים ושהתקבלו מתוצאות המודל. חישובי הדיות מהפרש הלחות בין יציאת האוויר והכניסה ומתוצאות המודל היו בהתאמה טובה מאוד לתוצאות שהתקבלו מהליזימטרים. במקביל למדידת הטמפרטורה ולחות האוויר נמדדו גם ריכוזי הפחמן הדו חמצני (פד"ח) באוויר בפתחי הכניסה והיציאה. צריכת הפד"ח ע"י כלל הצמחים התקבלה מהכפלת הפרש ריכוז הפד"ח בספיקת האוויר דרך המבנה. ערכי צריכת הפד"ח האינטגרליים של כלל הצמחים בחממה היו בהתאמה טובה עם הממוצע שחושב ממדידות של הרבה עלים בודדים בעזרת מכשיר COR 6200 LI ועם תוצאות המודל שפותח. הניסויים מראים קורלציה גבוהה בין קרינת השמש לקצב ירידת ריכוז הפד"ח וקצב עליית כמות אדי המים באוויר החממה, דבר המצביע על רגישות טובה של המערכת לשינויים חדים ומהירים בקרינה ועל פוטנציאל טוב של יישום השיטה המוצעת לאפיין פוטוסינטזה ודיות ממוצעת במבנה.

1. מבוא

היתרון הגדול של גידול בבתי צמיחה בהשוואה לשדה הפתוח הוא בכך שבחממות ניתן לבקר את האקלים ורמת המזיקים וכתוצאה מכך לשלוט על תנאי הגידול. ע"י כך, משיגים יבול גדול יותר ואיכות טובה יותר בצורה משמעותית, בהשוואה לשדה, וניתן לשלוט בצורה מיטבית על עיתוי הקטיף והאספקה לצרכן. בדרך כלל מבוססת בקרת האקלים בחממות על מדידת פרמטרים פיזיקאליים וכימיים באוויר ובמי ההשקיה (לדוגמא: טמפרטורה, לחות, רמת אור, EC, PH וכד') ובעזרתם מאפיינים את תנאי הגידול ושולטים על מערכות ניהול האקלים (מאווררים, מסחררים, מזרן לח, מסך תרמי, תנור חימום, ברזי השקיה וכד'). החיסרון העיקרי של שיטת בקרה זו שהיא מבוססת על התנאים בסביבת הצמח ולא על מצב הצמחייה בחממה. למרות שגישה זו לבקרה על האקלים בחממה חשובה ושימושית מאוד, לעיתים היא אינה מדויקת מאחר והיא מבוססת על הנחות (מודלים) הקושרים את ההשפעה של סביבת הצמח על ביצועיו (Ehret et al., 2003).

בשנים האחרונות התפתחה מאוד טכנולוגיה של בקרה בעזרת פרמטרים צמחיים (פיטומוניטור <http://www.phytech.co.il>). טכנולוגיה זו מבוססת על רגשים יחודיים המודדים את מצב הצמח בזמן נתון וכן את קצב ההתפתחות שלו. תוכנה ייחודית המנתחת את המידע המתקבל מהרגשים מאפשרת קבלת החלטות ביחס לביצוע טיפולים כגון: השקיה, ודישון בזמן הנכון ובכמות המדויקת לשם קבלת יבול באיכות מיטבית, תוך שימוש במינון אופטימאלי של תשומות. מערכת הפיטומוניטור כבר הוכיחה את יעילותה במקרים רבים. החיסרון של מערכת הפיטומוניטור המקובלת כיום, הוא שהיא מתבססת על מספר בודד (שניים שלושה או מעט יותר, במקרה הטוב) של צמחים לקבלת החלטות לגבי צמחים השתולים בשטח של מספר דונמים.

לאור העובדה ששטחן של החממות הנבנות כיום הולך וגדל והשונות בין הצמחים במבנה גדול היא די גדולה, סביר להניח שקבלת החלטות על סמך צמח אחד או שניים עשויה להיות לא אמינה ולעיתים שגויה בחממה בה הגידול הוא אינטנסיבי. לכן, אחת הדרישות הבסיסיות ממערכת פיטומוניטור מתקדמת, היא שהמערכת תוכל לנטר מספר קבוצות של צמחים (10 עד 15 צמחים בכל קבוצה) בו זמנית, ולא צמח בודד כפי שמבוצע בהרבה מקרים היום.

יתרונות השימוש בפיטומוניטור (Ehret et al., 2003):

- החקלאי מקבל אינפורמציה מהימנה יותר על מצבו של הצמח.
- המערכת יכולה לתת התראה על שינוי פתאומי בקצב גדילה וצריכת מים או כניסה למצב של עקה.
- אפשרות להשוות מצב הצמחייה בעונות השונות של השנה.
- אפשר להשתמש בנתונים לאימות מודלים טובים יותר למיקרואקלים והשקיה בחממה.

2. שיטות וחומרים

תיאור החממה בה נערכו הניסויים:

המדידות התבצעו בחממה הממוקמת בחוות הבשור, בנגב המערבי בקרבת חוף הים התיכון. החממה הייתה בעלת שישה גמלונים ושטח רצפה של 1080 m^2 (אורך 24 m ורוחב גמלון 7.5 m). וכיוון מרזבים צפון-דרום. עבור הניסויים בחרנו להשתמש בשני גמלונים בלבד, המזרחי ביותר והסמוך אליו. שני הגמלונים הופרדו מיתר הגמלונים על ידי יריעת פוליאאתילן מסוג IR מפזר C-460 (Ginegar Plastic Products Ltd.). אותו סוג יריעה שימש גם לצורך כיסוי החממה. לאחר ההפרדה שטח רצפת שני הגמלונים היה 360 m^2 , גובה מרזב 3.5 m ונפח החממה כ 1584 m^3 . אוורור החממה נעשה בעזרת שני מאווררים הממוקמים בצידה הדרומי של החממה בגובה 0.85 מטר מהקרקע (ראה איור 1). המאווררים ינקו אוויר שנכנס דרך פתח בקיר הנגדי (הצפוני) של החממה. אורך הפתח היה 15 m וגובהו 0.93 m. בפתח הותקן מזרן לח שברוב הניסויים שביצענו לא פעל. על פני המזרון הלח והמאווררים בצד הפונה אל מחוץ לחממה נפרשה רשת 50 מש נגד חרקים כמקובל בחממות מסחריות.

תיאור גידול הצמחים ומדידות אינדקס שטח העלים

שתילים של צמחי פלפל *Capsicum annuum var. Selica* נקנו בגיל ארבעה שבועות וגובה של חמישה סנטימטר ממשלת "שורשים" במושב עין הבשור. סך הכול נשתלו 1068 צמחים כך שצפיפות השתילה הייתה 3.2 צמחים למטר רבוע. האדמה בחוות הבשור היא אדמה חולית עם תכולת חרסית עד 10%. האדמה כוסתה על ידי יריעת פוליאאתילן בכדי להקטין הפליטה של פד"ח ואדי מים מן הקרקע אל חלל החממה. הצמחים הושקו פעם ביום בעזרת טפטפות. דישון ניתן

דרך מערכת ההשקיה, כאשר תמיסת המזון התבססה על דשן שפר של 1.5-2 ליטר למטר קוב מים ביחס נוטריאנטים של 5:3:8 (אשלגן: זרחן: חנקן בהתאמה) ובנוסף לכך הוזרקו לתוך מי ההשקיה מיקרו אלמנטים 3-6% של דשן קורטין (דשנים וחומרים כימיים בע"מ). צמחי הפלפל נשתלו בערוגות, שתי שורות צמחים לערוגה וההדליה נעשתה בשיטה הספרדית. אינדקס שטח העלים (LAI) התקבל מדגימת ארבעה צמחים מספר פעמים לאורך עונת הגידול. סה"כ נמדד אינדקס שטח העלים חמש פעמים במהלך הניסוי. בצמחים שנדגמו נמדד שטח העלים בעזרת מכשיר ייעודי (LI-COR 3100 area meter) ולאחר מכן חושב אינדקס שטח העלים על ידי חלוקת שטח העלים בשטח החממה (שטח שביל בטון מרכזי ליד המזרון הלח, 30 מ"ר, לא נלקח בחשבון).

מדידת טרנספירציה בליזימטרים

הטרנספירציה מהצמחים נמדדה ע"י ליזימטרים (עבור פירוט החישוב ראה פרק תיאוריה). למטרה זו נשתלו צמחים בדליים בנפח של 50 ליטר במצע מנותק מסוג פרלייט "חקלאות 2", גודל גרגר 1.2 mm (חבורת הבונים, מושב הבונים). בחממה הוצבו שישה ליזימטרים כשעל כל ליזימטר דלי עם שני צמחים. משטח השקילה של כל ליזימטר היה במידות 50x50 cm (חברת כרכום בע"מ) וצויד במתמר בעל יכולת שקילה עד 50 ק"ג בדיוק של 8.33 גרם (חברת Vishay Tedeo –Huntleigh, דגם 1042). הליזימטרים מוקמו בשתי ערוגות צמחים, אחד בצד המזרחי והשני בצד המערבי של שני הגמלונים. בכל ערוגה שלושה ליזימטרים, כך שאחד הושם קרוב למזרון הלח בתחילת השורה, אחד במרכז השורה והשלישי בסופה של השורה בקרבת המאווררים (ראה איור 1). הצמחים קיבלו השקיה ודשן בעזרת מערכת השקיה בטפטוף באופן דומה לצמחים האחרים שנשתלו בחממה בקרקע החולית. הצמחים אשר גדלו בדליים פיגרו בתחילת הגידול בקצב הגדילה לעומת הצמחים שגדלו באדמה ועל מנת לעודד את הצמיחה שלהם נקטפו הפירות בצמחים אלו כך שבהמשך העונה הצמחים התאוששו והיו דומים מבחינת הגובה ואינדקס שטח העלים לאלה שהיו שתולים בקרקע. הצמחים המודלים בדליים שעל הליזימטרים נתמכו ע"י מוטות שהיו תקועים בדליים כך שהדלי והצמחים שעליו היו למעשה מנותקים מהסביבה ולא הייתה הפרעה לשקילה.

מדידת טמפרטורה ולחות

טמפרטורות היבש והלח של האוויר נמדדו בעזרת שני טרמוקפלים מונחים בקופסא מאווררת ומוגנת מקרינת שמש ישירה (דיוק המכשיר $0.5^{\circ}C$). הטמפרטורות נמדדו בשש נקודות בסמוך לליזימטרים:

- שתי נקודות בצד כניסת האוויר לחממה (צפון)
- שתי נקודות במרכז החממה
- שתי נקודות בצד יציאת אוויר מהחממה ליד המאווררים (דרום).

טמפרטורת העלים נמדדה בעזרת טרמוקפלים זעירים שנעצו בעורק הראשי של העלים מצידו התחתון של העלה. המדידות בוצעו בצמחים שהונחו על הליזימטרים: בקרבת המזרון הלח בתחילת השורה, במרכז השורה ובסופה של השורה בקרבת המאווררים. טמפרטורת עלים נמדדה בשלושה גבהים: שני עלים בחלקו התחתון של הצמח, שני עלים במרכז הצמח ושני עלים בחלקו העליון של הצמח כך שסך הכול נמדדו 36 עלים בחממה (שש עלים על כל ליזימטר). מיקום נקודות המדידה נתון באיור 1 של פרק זה.

מדידת מהירות זרימת האוויר בחממה

ספיקת האוויר דרך החממה חושבה ממדידת מהירות האוויר בפתח הכניסה לחממה (משטח המזרון הלח). מהירות האוויר נמדדה ב- 20 נקודות בעזרת מד מהירות פרופלור ארבעה להבים (AV-2, Airflow, UK) ובעזרת מד מהירות כדור להט (דגם (TSI (8475) בתוך החממה בסמוך לצמחים בשלושת האזורים השונים: בקרבת מזרון לח, מרכז החממה ובקרבת המאווררים. ספיקת אוויר חושבה מהכפלת מהירות האוויר הממוצעת (ממוצע של 20 נקודות המדידה) בשטח המזרון הלח.

מדידות קרינה

הקרינה נמדדה בתוך החממה ומחוצה לה. מחוץ לחממה הותקן מד קרינה גלובלית על גבי תורן מטראולוגי

(LI-COR, LI-200SZ Pyranometer Sensor). בתוך החממה התקנו מדי הקרינה הבאים:

- מד קרינה גלובלית LI-COR LI-200SZ Pyranometer Sensor (דיוק המכשיר $\pm 5W m^2$).
- מד קרינה נטו (Q7.1, Rebs, USA)
- מד קרינה בתחום ה-PAR : LI-COR LI-190SZ Quantum Sensor

מד הקרינה נטו הותקן בגובה 3.4 מטר מעל הקרקע ומדי קרינה הגלובלית ו-PAR הוצבו כחצי מטר מעל הצמחים. בנוסף לכך נמדדה גם קרינה בתחום ה-PAR בתחתית השורה בעזרת מד קרינה פס וגם ובאזורים השונים בחממה בעזרת מכשיר הנישא ידנית. למיקום מדי הקרינה בחממה ראה איור 1 של פרק זה.

מדידות פחמן דו חמצני (פד"ח) CO₂

ריכוזי הפד"ח באוויר נמדדו בפנים ומחוץ לחממה בעזרת מכשיר Infra Red Gas Analyzer , IRGA (WMA:) PP-Systems rugged CO₂ analyzer , רזולוציה של 1 ppm). אוויר משלוש נקודות על פני כל מאוורר נדגם באופן רציף בעזרת משאבת וואקום והוזרם לאחר שעורבב אל מכשיר המדידה. אחת ל- 20 שניות נדגמה היציאה האנלוגית של המכשיר ע"י אוגר הנתונים. על מנת לקבל אפיון של שינוי ריכוז הפד"ח מחוץ לחממה במשך יממה, נדגם האוויר מחוץ לחממה במשך חמש יממות רצופות. חושבו הממוצע וסטיית התקן של חמש היממות עבור כל דקה והממוצע שימש כבסיס נתונים לחישוב ריכוז הפד"ח באוויר שניכנס לחממה דרך המזרון הלח לימים בהם ריכוז הפד"ח מחוץ לחממה לא נמדד באופן ישיר. ברוב ימי הניסוי נערכו מספר דגימות אקראיות של האוויר מחוץ לחממה, לאורך היום, כדי לבדוק אם יש התאמה לערכים הממוצעים שנמדדו בחמש היממות.

מדידת פוטוסינתזה

מדידות פוטוסינתזה של עלים בודדים בוצעו בעזרת מכשיר LI-COR 6200 (LI-COR Lincoln, Nebraska USA). הפוטוסינתזה נמדדה בשלושה גבהים: שלושה עלים בחלקו התחתון של הצמח, שלושה עלים במרכז הצמח ושלושה עלים בחלקו העליון של הצמח. המדידות התבצעו בשלושת האזורים: בקרבת המזרון הלח בתחילת השורה, במרכז השורה ובסופה של השורה בקרבת המאווררים. לפרוט הימים והשעות בהם בוצעו המדידות ראה טבלה 1.

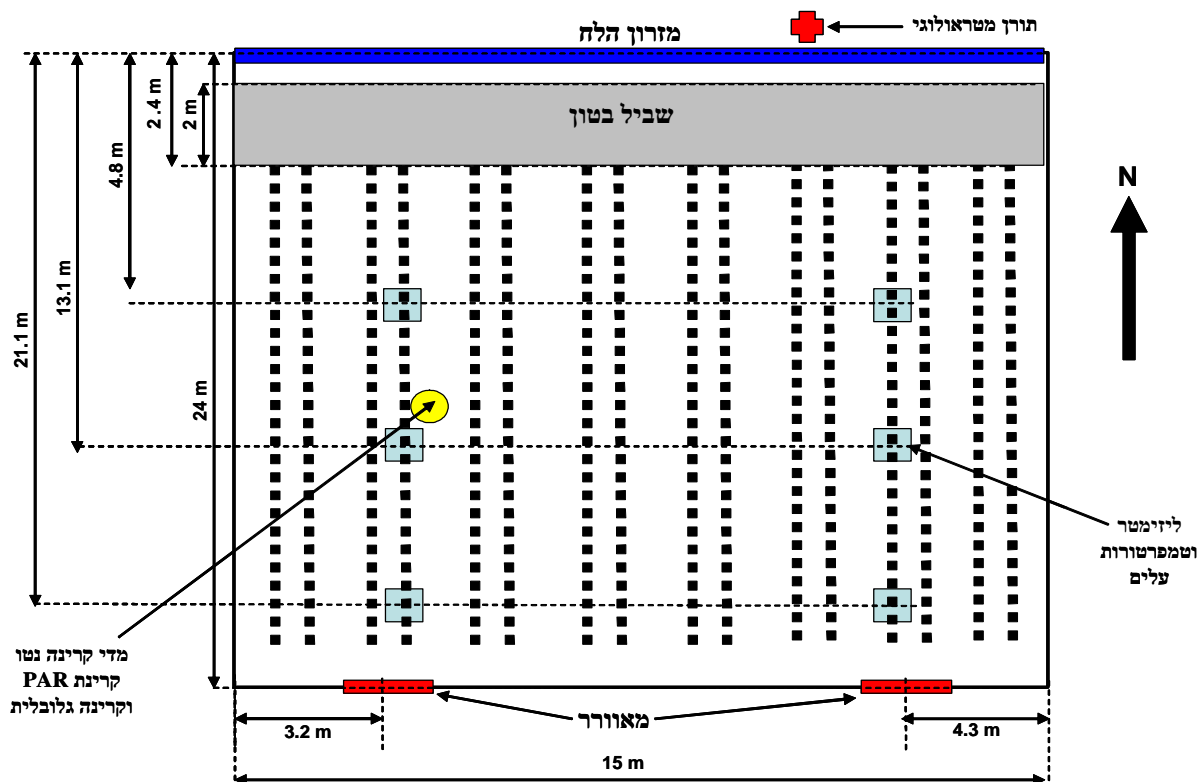
איסוף, אגירה ועיבוד נתונים

כל החיישנים מלבד התרמוקפלים שמדדו טמפרטורת עלים חוברו לאוגר נתונים (Campbell scientific 23x) ישירות. התרמוקפלים שמדדו טמפרטורת עלים חוברו לאוגר הנתונים דרך מולטיפלקסר (Multiplexer AM416 , Campbell)

(Scientific, Inc). אוגר הנתונים אסף את המידע מהחיישנים כל 20 שניות, ביצע ממוצע של הקריאות אחת לדקה (בחלק מימי הניסוי המיצוע נערך על פני שתי דקות) ורשם את הערכים הממוצעים בזיכרון. איסוף המידע והעברתו למחשב לצורך עיבוד נתונים התבצע פעם ביום בסוף היום. כל המידע נוח בתוכנת Microsoft Office Excel 2003 ו-MATLAB.

טבלה 1: סיכום בסיס נתונים עבור צריכת פד"ח בעזרת מכשיר LI-COR

תאריך	ספר העלים שנדגמו	שיטת מדידה	זמן המדידה, שעות
4/4/07	43	מדידה בשלושה גבהים	9:00-14:00
5/4/07	18	עלים עליונים בלבד	14:00-17:00
15/5/07	41	מדידה בשלושה גבהים	10:00-13:00
16/5/07	63	מדידה בשלושה גבהים	9:00-13:00
11/7/07	62	מדידה בשלושה גבהים	8:00-15:00
17/7/07	21	מדידה בשלושה גבהים	10:00-13:00



איור 1: סרטוט סכמטי של פנים החממה. מסמל את נקודת המדידה של ליזימטרים. בסמוך לליזימטר נמדדו טמפרטורות הלח והיבש בגובה 1.5 מטר וטמפרטורות עלים בשלושה גבהים (0.5, 1, 1.5 m). מסמל נקודת מדידה של קרינת PAR - מסמל את התורן המטראולוגי.

3. תיאוריה

טרנספירציה

מאזן מסה של אדי מים במערכת פתוחה נתון על ידי :

$$sE = u_o w_o - u_i w_i \quad (1)$$

m^{-2} - שטח העלה s

$mol m^{-2} s^{-1}$ - קצב הטרנספירציה E

$mol s^{-1}$ - ספיקה מולרית הנכנסת לתא u_i

$mol s^{-1}$ - ספיקה מולרית היוצאת מהתא u_o

$mol H_2O \quad mol air^{-1}$ - שבר מולי של אדי המים הנכנסים לתא w_i

$mol H_2O \quad mol air^{-1}$ - שבר מולי של אדי המים היוצאים מהתא w_o

מאחר ו:

$$u_o = u_i + sE \quad (2)$$

ניתן לכתוב:

$$sE = (u_i + sE)w_o - u_i w_i \quad (3)$$

לאחר ארגון מחדש של המשוואה מתקבלת משוואה המתארת קצב הטרנספירציה:

$$E = \frac{u_i (w_o - w_i)}{s(1 - w_o)} \quad (4)$$

על מנת לחשב את קצב הטרנספירציה בחממה צריך לדעת את הספיקה המולרית הנכנסת. בעזרת מדידת מהירות זרימת האוויר בפתח הכניסה (על פני מזרון הלח שדרכו נכנס האוויר לחממה) ניתן לחשב את הספיקה המולרית באופן הבא: ראשית נחשב את הספיקה נפחית:

$$Q = vA \quad (5)$$

$m^3 s^{-1}$ - ספיקה נפחית Q

$m s^{-1}$ - מהירות זרימת האוויר בכניסה למזרון הלח v

m^2 - שטח מזרון הלח A

וכעת ניתן לחשב את הספיקה המולרית

$$u_i = \frac{Q\rho}{M_w air} \quad (6)$$

$Kg m^3$ - צפיפות האוויר ρ

$Kg mol^{-1}$ - $M_w air$ - משקל מולקולארי של האוויר

$mol\ s^{-1}$ u_i - ספיקה מולרית הנכנסת לתא

מטעמי נוחות של מדידת הפרמטרים של האוויר במקום לחשב עם שבר מולי של אדי המים חושבה הטרנספירציה בעזרת לחות הסגולית. מעבר יחידות משבר מולי ללחות סגולית הוא באמצעות הכפלה ביחס של משקלים המולקולריים של האוויר לבין מים.

$$\frac{M_w^{air}}{M_w^{H_2O}} \quad (7)$$

את הלחות סגולית של האוויר ω ניתן לחשב בעזרת משוואה הבאה:

$$\omega = 0.62198 \frac{e}{P - e} \quad (8)$$

החישוב של לחץ האדים באוויר e כמקובל בעזרת משוואות של (ASHRAE HANDBOOK (2005).

פוטוסינתזה נטו

מאזן מסה של פחמן דו חמצני (פד"ח) במערכת פתוחה נתון על ידי :

$$s a = u_i c_i - u_o c_o \quad (9)$$

s - שטח העלה m^{-2}

a - קצב הפוטוסינתזה $\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$

u_i - ספיקה מולרית הנכנסת לתא $mol\ air\ s^{-1}$

u_o - ספיקה מולרית היוצאת מהתא $mol\ air\ s^{-1}$

c_i - שבר מולי של פד"ח הנכנס לתא $\mu mol\ CO_2\ mol\ air^{-1}$

c_o - שבר מולי של פד"ח היוצא מהתא $\mu mol\ CO_2\ mol\ air^{-1}$

אם נשתמש במשוואה מספר 2 נוכל לכתוב:

$$s a = u_i c_i - (u_i + sE) c_o \quad (10)$$

הסיבה שטרנספירציה מופיעה במשוואה נועצה בכך שהיא משמשת בתור פקטור תיקון עבור דילול האוויר מהאידיוי של מים מהעלה אל חלל תא המדידה וכתוצאה מכך מדוללים שאר הגזים וביניהם גם את הפד"ח. לאחר ארגון מחדש של המשוואה 10 מתקבלת משוואה המתארת את הפוטוסינתזה נטו:

$$a = \frac{u_i (c_i - c_o)}{s} - E c_o \quad (11)$$

את איבר של הטרנספירציה במשווה יש להכפיל ביחס משקלים המולוקולרים של מים ואוויר על מנת לקבל את הפוטוסינתזה ביחידות $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$:

$$a = \frac{u_i(c_i - c_o)}{s} - E c_o \frac{M_{wH_2O}}{M_{wair}} \quad (12)$$

הערכת צריכת פד"ח ע"י הצמחים בעזרת מאזן מסה על החממה:

הערכת צריכת הפד"ח הכללית של צמחי החממה נעשתה ע"י הכפלת הספיקה המולרית של אוויר דרך החממה בהפרש ריכוזי הפד"ח בין כניסה ליציאה .

$$C = \frac{u \cdot \Delta CO_2}{10^6} \quad (13)$$

C - צריכת פחמן דו חמצני על ידי הצמחייה בחממה $\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1}$

u - ספיקה המולרית של אוויר $\text{mol}_{air} \text{ s}^{-1}$

ΔCO_2 - הפרש בריכוזים של פחמן דו חמצני בין צד כניסה ליציאה של האוויר לחממה $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}_{air}$

הערכת צריכת הפד"ח וטרנספירציה של הצמחים בעזרת מדידות של מכשיר LI-COR :

מכשיר ה LI-COR מאפשר מדידה של פוטוסינתזה בעלים בודדים. ביום מדידה נתון חושבה צריכת הפד"ח על סמך מדידות פוטוסינתזה של עלים בודדים כפי שמפורט להלן. ההנחה הייתה שממוצע הפוטוסינתזה של כל העלים שנמדדו מייצג את הפוטוסינתזה הממוצעת של כל הצמחים בחממה.

אופן החישוב צריכת פד"ח ממדידות ע"י מכשיר LI-COR :

$$C = \frac{P \cdot LAI \cdot Ag}{10^6} \quad (14)$$

C - צריכת פחמן דו חמצני על ידי הצמחייה החממה $\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1}$

P - פוטוסינתזה ממוצעת של כל העלים שנמדדו עם מכשיר LI-COR $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

LAI - אינדקס שטח העלים $\text{m}^2_{leaf} \text{ m}^{-2}_{ground}$

Ag - שטח הקרקע m^2_{ground}

חישוב הטרנספירציה :

הטרנספירציה של עלה בודד חושבה ממשוואה (15).

$$E = \frac{\rho \cdot Cp(e(Tc) - ea) \cdot gt}{\gamma} \quad (15)$$

$W m^{-2}$	E - טרנספירציה
$Kg m^{-3}$	ρ - צפיפות האוויר
$JKg^{-1}K^{-1}$	Cp - קיבול חום סגולי של אוויר
kPa	$e(Tc)$ - לחץ אדים בחללים הבין תאים של העלה
C°	Tc - טמפרטורה של העלה
kPa	ea - לחץ אדים באוויר
$m s^{-1}$	gt - מוליכות כללית של הצמחייה לאידוי מים
$kPa K^{-1}$	γ - קבוע פסיכרומטרי

מוליכות כללית של הצמחייה לאידוי מים gt חושבה באופן הבא:

$$gt = \frac{1}{r_t} \quad (16)$$

כאשר r_t ($s m^{-1}$) היא ההתנגדות הכוללת של הנוף הצמחי אידוי המים:

$$r_t = r_a + r_c \quad (17)$$

התנגדות הצמחים לאידוי המים r_c מחושבת בהסתמך על ידיעת אינדקס שטח העלווה ובעזרת מדידת התנגדות הפיונית של העלה בעזרת מכשיר ה LI-COR 6200 :

$$r_c = \frac{r_s}{LAI} \quad (18)$$

r_s - התנגדות הפיוניות של העלה לאידוי המים $s m^{-1}$

r_a ($s m^{-1}$) היא סך כל ההתנגדות בהסעה :

$$r_a = r_x + \frac{r_b}{LAI} \quad (19)$$

כאשר r_x היא ההתנגדות לאוורור ו r_b היא התנגדות שכבת הגבול של עלה בודד (Fuchs (2006):

$$r_b = 300 \left(\frac{D}{V} \right)^{0.5} \quad (20)$$

r_b - התנגדות שכבת הגבול של עלה בודד $s m^{-1}$

D - קוטר הממוצע של עלה m

V - מהירות הזרם אוויר בחממה $m s^{-1}$

את מהירות הזרם אוויר בחממה ניתן לחשב כך :

$$V = \frac{Y}{r_x Z} \quad (21)$$

Y - המרחק בין פתח כניסת האוויר (מזרון הלח) לבין מאוורר המוציא את האוויר מהחממה m

Z - גובה הממוצע של החממה m

ההתנגדות לאוורור r_x ($s m^{-1}$) מחושבת כך:

$$r_x = \frac{3600}{X Z} \quad (22)$$

X - מספר חילופים של נפח אוויר החממה h^{-1}

את מספר החילופים של נפח אוויר החממה ניתן לחשב כך:

$$X = \frac{v A_{wet pad} 3600}{Z Y B} \quad (23)$$

v - מהירות זרם האוויר הנכנס דרך מזרון הלח $m s^{-1}$

$A_{wet pad}$ - שטח מזרון הלח m^2

B - רוחב החממה m

לאחר שחושבו ערכי הטרנספירציה לכל העלים שנמדדו, חושבה הטרנספירציה הממוצעת לשעה ע"י מיצוע הערכים של כל העלים שנמדדו באותה השעה.

4. תוצאות

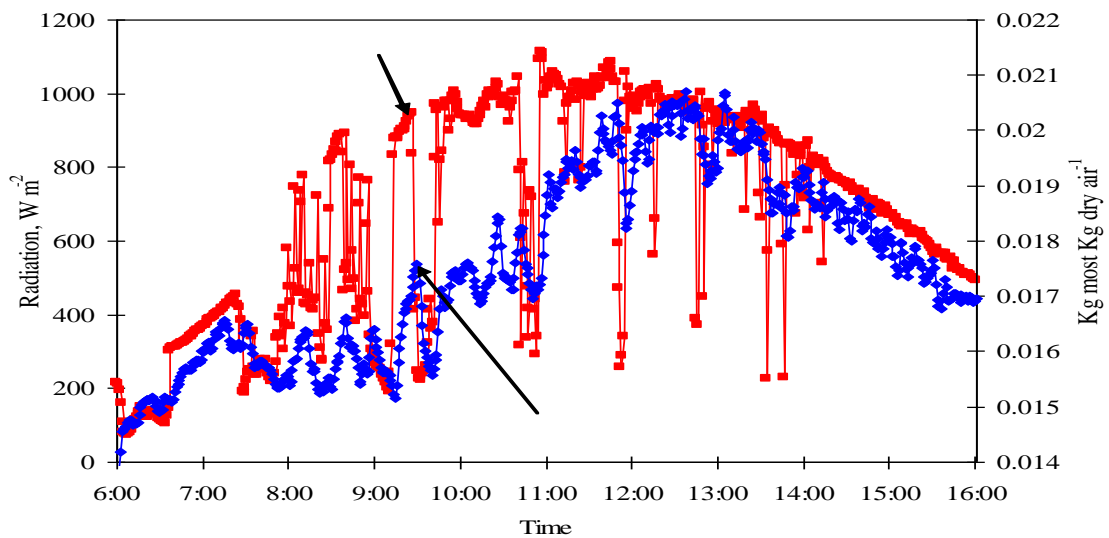
טרנספירציה ואדי המים

קרינה גלובלית ולחות סגולית באוויר

איור 1 מראה את המהלך היומי של הלחות הסגולית באוויר ביציאה מהחממה יחד עם הקרינה הגלובלית מחוץ לחממה עבור יום אחד בחודש יוני. האיור מראה כי במקביל לעליה בקרינה ישנה עליה בלחות הסגולית כתוצאה מהטרנספירציה של הצמחים, כצפוי. מהשעה 6:00 בבוקר ועד 12:00 כשקרינת השמש עולה יש עליה בלחות הסגולית של האוויר. אחר הצהריים, מהשעה 12:00 ועד 17:00 כשקרינת השמש יורדת יש ירידה בהתאמה של ערכי הלחות הסגולית של האוויר ביציאה מהמבנה. ניתן לראות כי השינויים החדים בערכי הקרינה עקב עננות גורמים גם לשינויים חדים בערכי הלחות הסגולית. בשעה 9:10 כשהקרינה עולה מ192 ווט\מ"ר ל 878 ווט\מ"ר יש עליה חדה בלחות הסגולית מ 0.0151 ק"ג מים\ק"ג אוויר ל 0.0162 גר\ק"ג. עליה נוספת בקרינה ל 947 ווט\מ"ר העלתה את הלחות הסגולית ל 0.0175 ק"ג מים\ק"ג אוויר. ב 9:20 כשהקרינה ירדה הייתה ירידה חדה

של הלחות הסגולית לערך של 0.0156 ק"ג מים\ק"ג אוויר ואז, עליה נוספת בקרינה מעלה שוב את הלחות הסגולית ל0.0171 ק"ג מים\ק"ג אוויר.

איור 2 מציג את הטרנספירציה הממוצעת כפי שחושבה ממאזן מסת אדי מים על פני החממה כפונקציה של הטרנספירציה שהתקבלה משקילת הצמחים ע"י הליזימטרים. הממוצע בוצע על תקופה של שעה כי רק במשך שעה היה שינוי משמעותי של משקל הצמחים בהשוואה לשגיאת המתמר. האיור מציג נתונים של ארבעה ימים וכל נקודה מייצגת ממוצע על פני שעה. ניתן לראות כי יש מתאם טוב בין שתי שיטות המדידה. קו המגמה בגרף הוא בעל שיפוע של 0.916 ומקדם מתאם של $R^2 = 0.88$. המתאם הטוב מצביע על כך שמאזן מסת אדי מים בין כניסה ויציאה של האוויר בחממה הנתונה לאוורור מאולץ יכול לתת אינפורמציה אמינה לגבי הטרנספירציה מהצמחים.

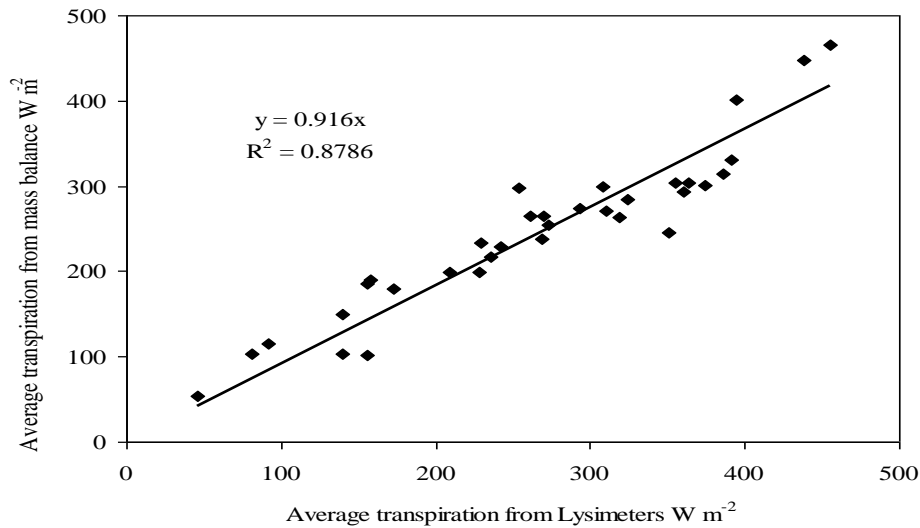


איור 1: המהלך היומי של הלחות הסגולית באוויר בצד יציאת האוויר מהמבנה וקרינה גלובלית מחוץ לחממה. הציר האופקי מציין את שעות היום, ציר האנכי בצד שמאל מציין את הקרינה הגלובלית וציר האנכי בצד ימין מציין את הלחות הסגולית באוויר בצד יציאת אוויר מהחממה. קו אדום (ריבועים) מסמל קרינה מחוץ לחממה וקו כחול (מעוינים) מסמל את הלחות הסגולית בצד יציאת אוויר מהחממה. כל נקודה מייצגת ממוצע על פני דקה.

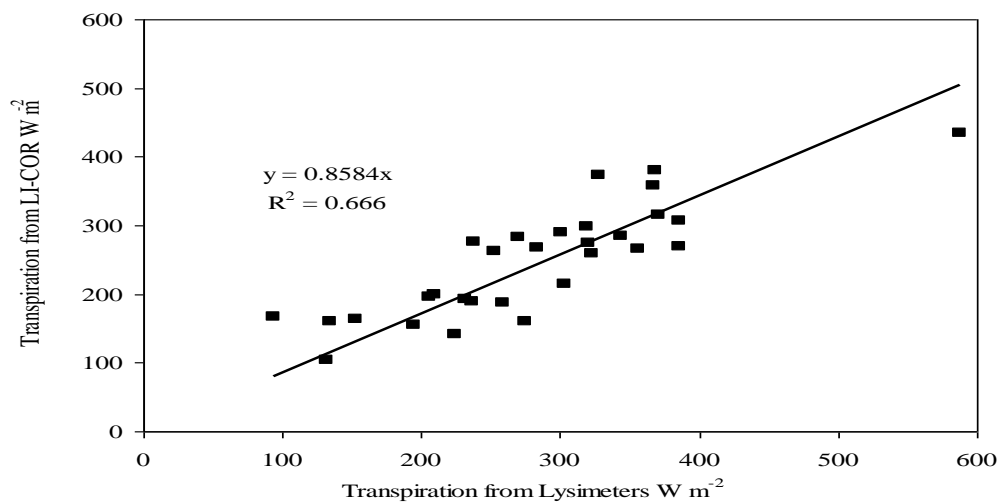
איור 3 מציג את הטרנספירציה הממוצעת על פני שעה כפי שהתקבלה ממדידות של עלים בודדים ע"י מכשיר LI COR-6200 כפונקציה של הטרנספירציה הממוצעת שנמדדה ע"י הליזימטרים. קו המגמה בגרף הוא בעל שיפוע של 0.86 ומקדם מתאם של $R^2 = 0.67$, כלומר ישנו מתאם טוב בין שתי שיטות מדידה. ניתן לומר שמדידה במכשיר ה LI-COR היא שיטה אמינה להערכת טרנספירציה בחממה. רצוי לציין כי במדידות עם מכשיר LI-COR 6200 יש צורך במדידת מספר גדול של עלים על מנת לקבל אינפורמציה מייצגת ומתאם טוב.

איור 4 מציג את המהלך היומי של טרנספירציה שעתית ממוצעת שחושבה ממאזן מסת אדי מים על פני החממה וכפי שנמדדה משקילת הצמחים ע"י הליזימטרים. הממוצע בוצע על תקופה של שעה כי רק במשך שעה היה שינוי משמעותי של משקל הצמחים בהשוואה לשגיאת המתמר. האיור מציג נתונים של שלושה ימים וכל נקודה מייצגת ממוצע על פני שעה. האיור מראה מגמה דומה לזו של הקרינה כי במקביל לעליה בקרינה ישנה עליה בטרנספירציה של הצמחים, כצפוי. מהשעה 7:00 בבוקר ועד 12:00 כשקרינת השמש עולה יש עליה בטרנספירציה של הצמחים.

אחר הצהריים, מהשעה 12:00 ועד 17:00 כשקרינת השמש יורדת יש ירידה בהתאמה בטרנספירציה של הצמחים במבנה.

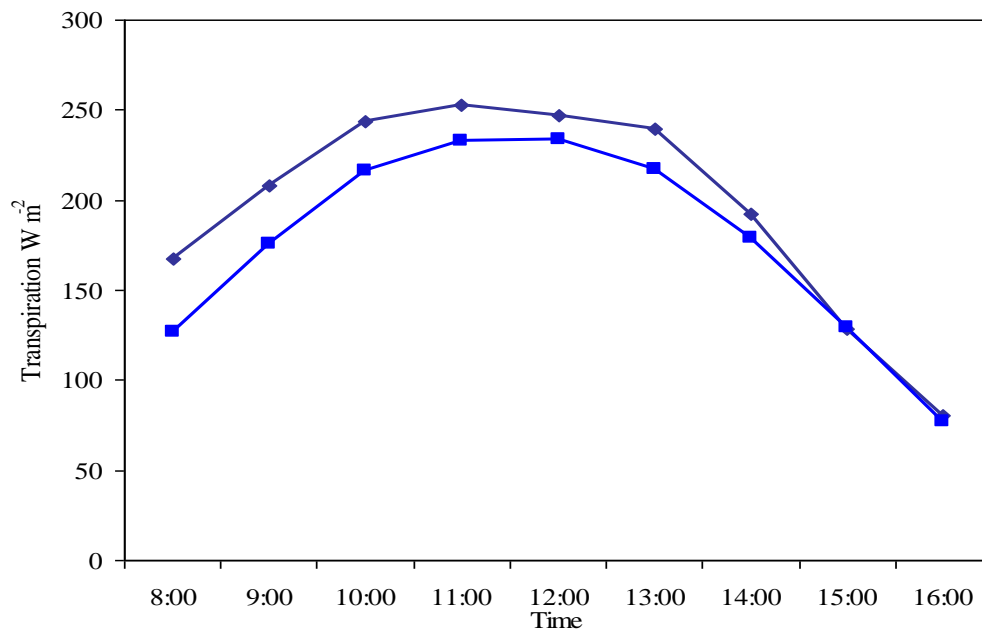


איור 2: טרנספירציה ממוצעת לשעה שנמדדה בעזרת ליזימטרים ובעזרת מאזן מסה של חממה (האיור מציג נתונים של ארבעה ימי מדידה). הציר האופקי מציין טרנספירציה מליזימטרים וציר האנכי מציין את הטרנספירציה מדודה בשיטת מאזן מסה.



איור 3: הטרנספירציה ממוצעת לשעה שנמדדה בעזרת ליזימטרים ובעזרת מכשיר LI-6200 (האיור מציג נתונים של ארבעה ימי מדידה). הציר האופקי מציין טרנספירציה מליזימטרים וציר האנכי מציין את הטרנספירציה מדודה בעזרת מכשיר LI-6200.

איור 5 מציג ערכים ממוצעים של ההפרש המדוד בלחות הסגולית על פני החממה כפונקציה של ההפרש בלחות הסגולית שהתקבל מסימולציה בתוכנת Matlab של המודל שפותח בעבודה זו לחיזוי שינוי בלחות הסגולית בחממה. האיור מציג נתונים של שמונה ימים וכל נקודה מייצגת ממוצע על פני שעה. ניתן לראות כי יש מתאם טוב בין הערכים המדודים לבין החיזוי של המודל. קו המגמה בגרף הוא בעל שיפוע של 1.08 ומקדם מתאם של $R^2 = 0.96$. המתאם הטוב מצביע על כך שהמודל לחיזוי שינוי בלחות הסגולית בחממה הנתונה לאוורור מאולץ יכול לתת אינפורמציה אמינה לצורך חיזוי הטרנספירציה מצמחים בחממה.



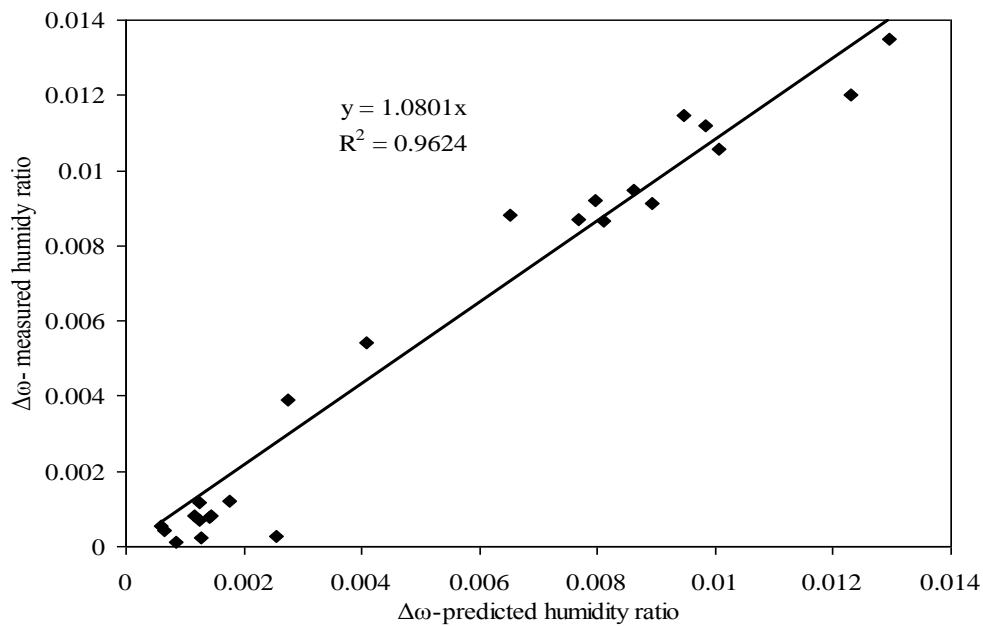
איור 4: המהלך היומי של הטרנספירציה שעתית ממוצעת שחושבה ממאזן מסת אדי מים על פני החממה (קו כחול בהיר, ריבועים) וכפי שנמדד משקילת הצמחים ע"י הליזימטרים (קו כחול כהה, מעוינים). הציר האופקי מציין את שעות היום וציר האנכי בצד שמאל מציין את הטרנספירציה בחממה.

פוטוסינתזה

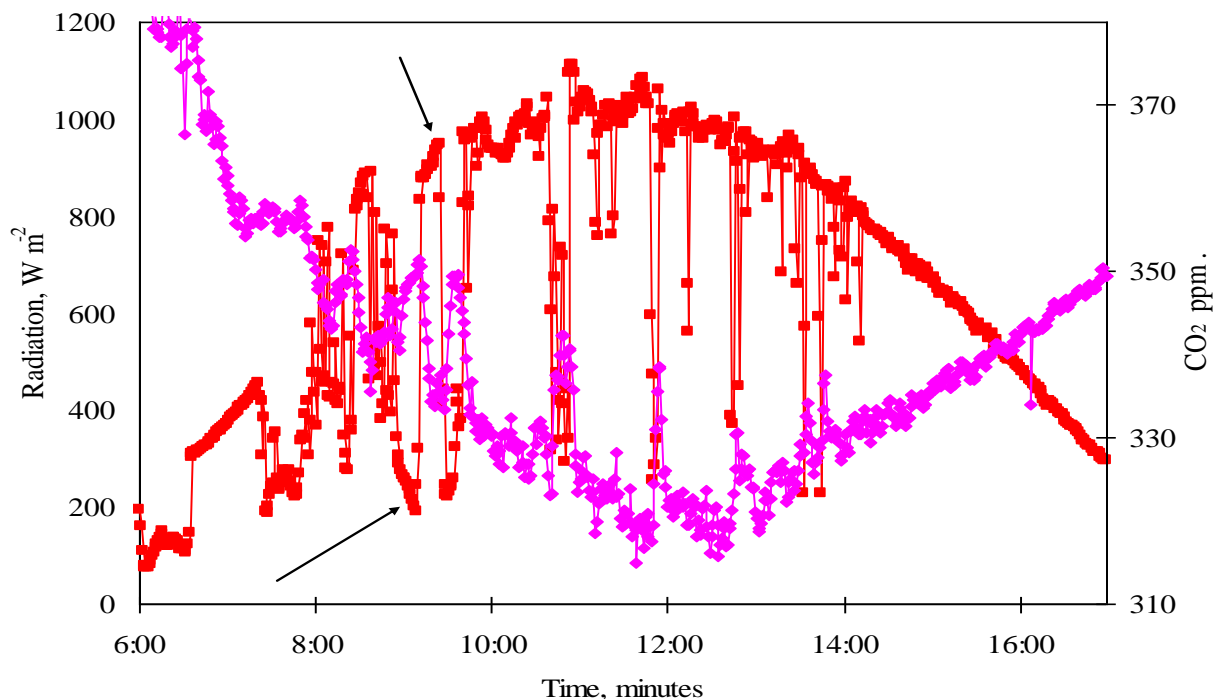
קרינה גלובלית ופחמן דו חמצני

איור 6 מציג את המהלך היומי של ריכוז הפד"ח ביציאה מהחממה יחד עם הקרינה הגלובלית מחוץ לחממה עבור אותו היום המוצג באיור 1. ניתן לראות שבמקביל לעליה בקרינה בשעות הבוקר (משעה 6 ועד 12) ישנה ירידה הדרגתית בריכוז הפד"ח באוויר החממה. הקרינה מגיעה לשיאה בשעות הצהריים (11:00-12:00) ובהתאם לכך ריכוז הפד"ח הולך ויורד ומגיע לערכים מינימאליים בסביבות השעה (11:30 – 12:30). אחר הצהריים ערכי קרינת השמש קטנים עם הזמן וריכוז הפד"ח באוויר החממה עולה בהתאמה. איור 6 מראה גם כי כאשר ישנה ירידה פתאומית בעוצמת הקרינה כתוצאה מהופעת ענן ישנה עליה מיידית בריכוז הפד"ח. כאשר הקרינה חוזרת לערכים הגבוהים גם ריכוז הפד"ח יורד בהתאמה. לדוגמה, בסביבות השעה 9:10 (מסומן בחץ באיור) יש עליה חדה בקרינת השמש מ-192 ווט"מ"ר ל-878 ווט"מ"ר. עליה זו גרמה לירידה חדה בריכוז הפד"ח מ-351 ppm ל-334 ppm. הקרינה המשיכה לעלות מעט עד שהגיעה לערך של כ-947 ווט"מ"ר וריכוז הפד"ח באוויר נשמר בערך

הנמוך כ 333 ppm. בשעה 9:20 לערך שוב ירדה הקרינה והגיעה לערך של 245 ווט\מ"ר (מסומן בחץ באיור) וכתוצאה מכך עלה ריכוז הפד"ח באוויר החממה ל 350 ppm.



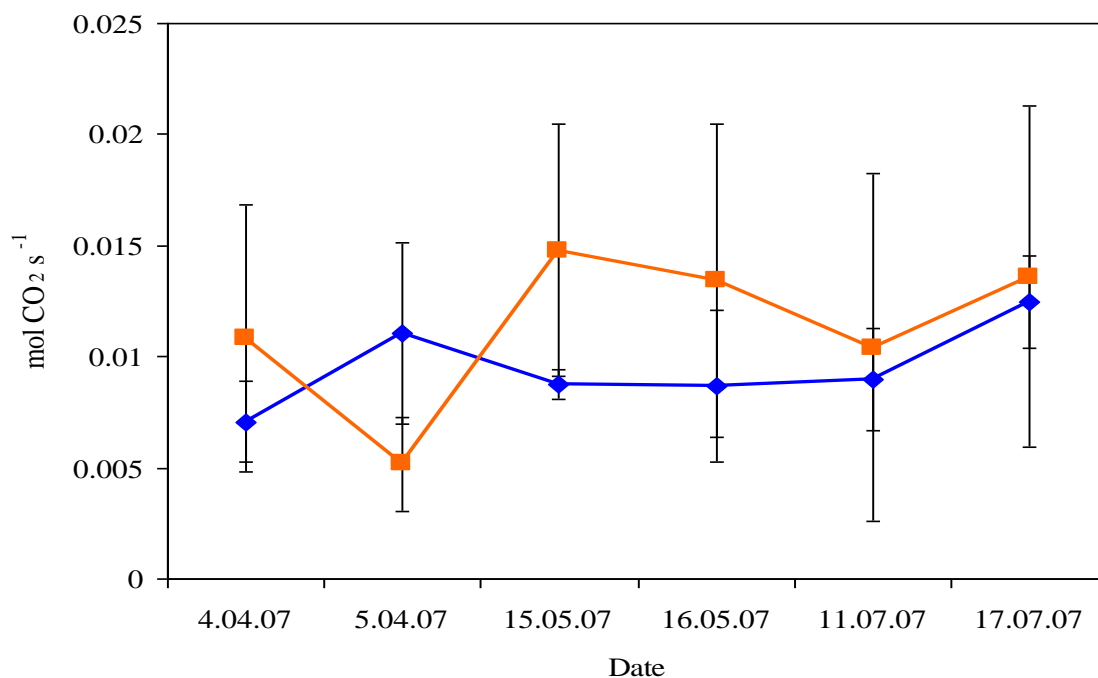
איור 5: ערכים ממוצעים של ההפרש המדוד בלחות הסגולית על פני החממה (ציר האופקי) כפונקציה של ההפרש בלחות הסגולית שהתקבל מסימולציה בתוכנת Matlab של המודל לחיזוי שינוי בלחות הסגולית בחממה (ציר האנכי). האיור מציג נתונים של שמונה ימים וכל נקודה מייצגת ממוצע על פני שעה.



איור 6: מהלך היומי של ריכוזי CO₂ בצד יציאת האוויר מהמבנה וקרינה גלובלית מחוץ לחממה. הציר האופקי מציין את שעות היום, ציר האנכי בצד שמאל מציין את הקרינה הגלובלית וציר האנכי בצד ימין מציין את הריכוז פחמן דו חמצני בצד יציאת אוויר מהחממה. קו אדום (ריבועים) מסמל קרינה מחוץ לחממה וקו וורוד (מעוינים) מסמל ריכוז CO₂ בצד יציאת אוויר מהחממה. החיצים מסמנים זמנים בהם יש שינויים חדים בקרינה הגורמים לשינויים בריכוז פד"ח באוויר.

צריכת פחמן דו חמצני על ידי צמחייה בחממה

איור 7 מציג את צריכת הפד"ח על ידי הצמחייה בחממה בימים שונים לאורך תקופת הגידול (תחילת אפריל עד אמצע יולי). האיור מראה שתי עקומות האחת מתארת את הצריכה שחושבה מתוך מאזן מסה על החממה והשנייה מתארת את הצריכה הממוצעת כפי שחושבה מערכים מדודים של הרבה עלים בודדים על ידי מכשיר LI-COR (ראה פרק תיאוריה). ניתן לראות שהצריכה הממוצעת נעה בין 0.005 לבין $0.015 \text{ mol CO}_2 \text{ s}^{-1}$. לא היה הבדל מובהק בין הצריכה המחושבת בשיטת מאזן מסה לבין הצריכה המחושבת בעזרת מדידות ממכשיר ה-LI-COR. נראה כי שתי שיטות המדידה מראות על עליה קלה בצריכת הפד"ח בחודש יולי כאשר הצמחים גבוהים ובעלי עלווה מפותחת לעומת חודש אפריל בו הצמחים קטנים יותר ובעלי שטח עלווה קטן יותר.

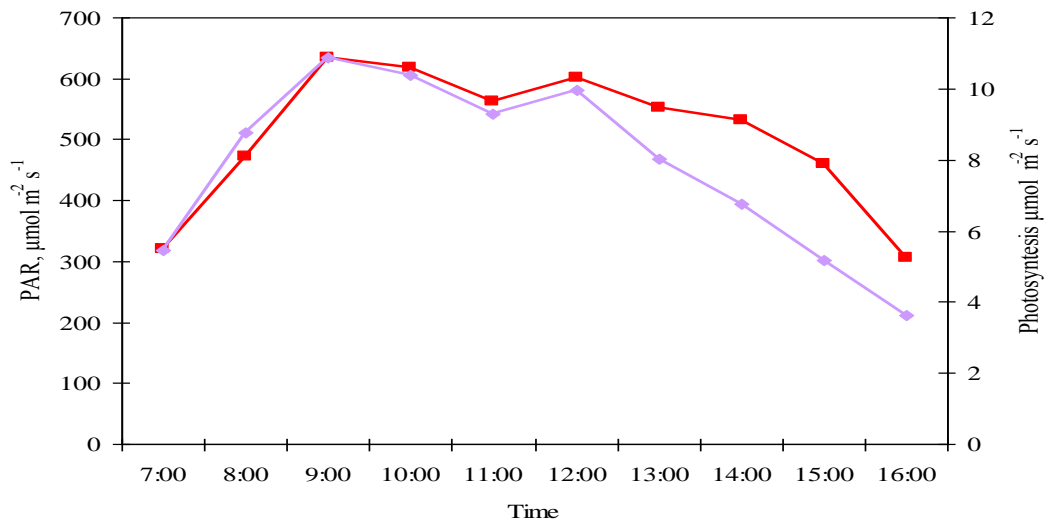


איור 7 : צריכת פחמן דו חמצני על ידי צמחייה בחממה ביומים שונים. הציר האופקי מציין יום מסוים שעבורו חושבה הצריכה של CO_2 , ציר האנכי מציין צריכה מחושבת של CO_2 . קו כחול (מעוינים) מסמן את הצריכה של CO_2 מחושבת בשיטת מאזן מסה, קו כחול (ריבועים) מסמן את הצריכה של CO_2 , מחושבת בעזרת מדידות ממכשיר ה-LI-COR כפי שתיארנו לעיל.

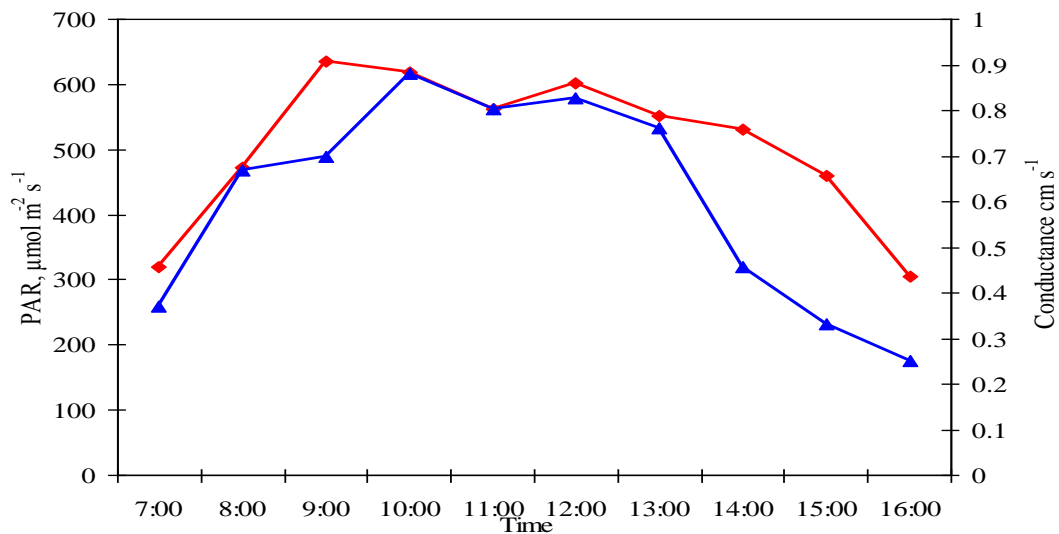
איור 8 מציג את המהלך היומי של קרינת PAR ופוטוסינתזה שעתית ממוצעת שנמדדה בעזרת מכשיר ה-LI-COR 6200. הממוצע בוצע על נתונים של שעה עבור תשעה ימי מדידה במהלך עונת הגידול. ניתן לראות שפוטוסינתזה בשעות הבוקר היא סביבות הערכים של $5.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ולאחר מכן כאשר רמת הקרינה עולה יש עליה ברמת הפוטוסינתזה עד השעות 9 ו 10 שבהם הקרינה ופוטוסינתזה מגיעות לשיא של $630 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ו- $11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ בהתאמה. לאחר מכן רמת הפוטוסינתזה מתחילה לרדת בהתאם לירידה ברמת הקרינה. כאשר הקרינה יורדת לערכים של $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, הערכים של פוטוסינתזה יורדים ל $4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

איור 9 מציג את המהלך היומי של קרינה בתחום ה PAR ומוליכות פיוניות ממוצעת שנמדדה בעזרת מכשיר ה LI-COR 6200. הממוצע בוצע על נתונים של שעה עבור תשעה ימי מדידה במהלך עונת הגידול. מוליכות פיוניות היא בעלת מהלך יומי דומה לזה של פוטוסינתזה (איור 8) כפי שניתן לראות שבשעות הבוקר היא סביבות הערכים של 0.37 cm s^{-1} כאשר רמת הקרינה היא בסביבות ה $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. לאחר מכן כאשר רמת הקרינה עולה יש

עליה במוליכות פיוניות עד השעות 9 ו 10 שבהם הקרינה ומוליכות פיוניות מגיעות לשיא $630 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ו 0.88 cm s^{-1} בהתאמה. לאחר מכן בשעות אחר הצהרים מוליכות פיוניות מתחילה לרדת בהתאם לירידה ברמת הקרינה, כפי שניתן לראות כאשר הקרינה יורדת לערכים של $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, הערכים של מוליכות פיוניות יורדים ל 0.25 cm s^{-1} .



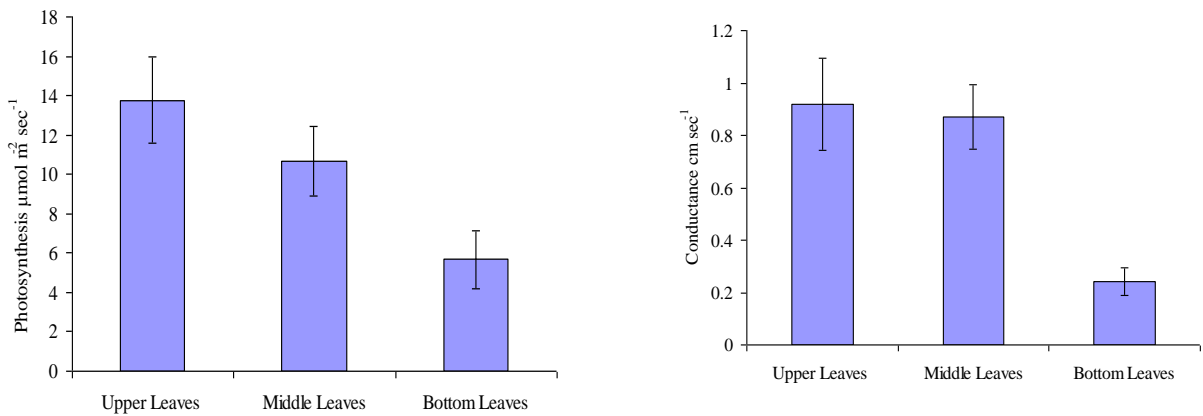
איור 8: מהלך היומי של פוטוסינתזה וקרינה בתחום ה PAR. הערכים מייצגים ממוצע של שעה מנתונים שנמדדו בעזרת מכשיר ה LI-COR 6200. הציר האופקי מציין את שעות היום, ציר האנכי בצד שמאל מציין את הקרינה בתחום ה PAR וציר האנכי בצד ימין מציין את הפוטוסינתזה ממוצעת בחממה. קו הסגול (מעוינים) מייצג את הפוטוסינתזה וקו האדום (ריבועים) את הקרינה בתחום ה PAR.



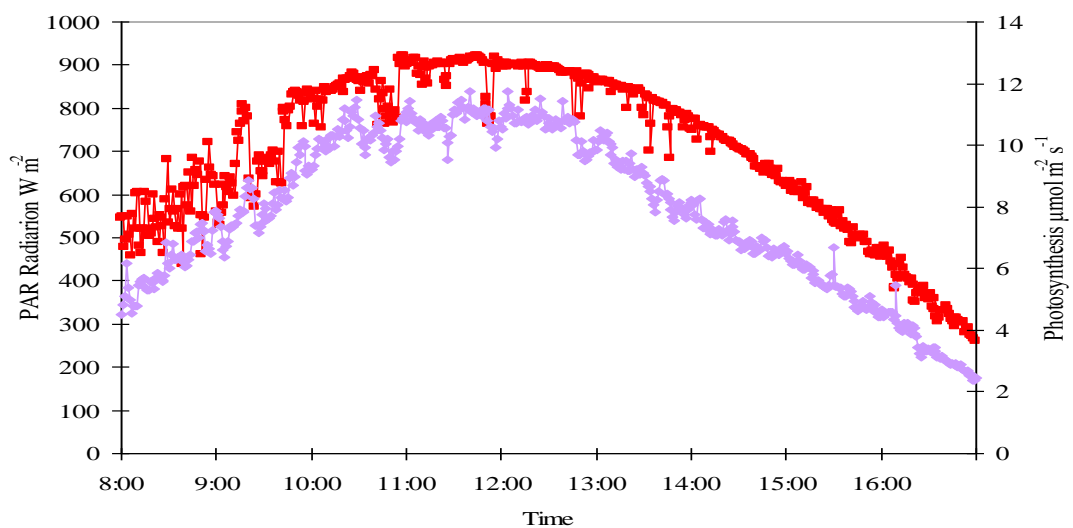
איור 9: מהלך היומי של קרינה בתחום ה PAR ומוליכות פיוניות ממוצעת שנמדדה בעזרת מכשיר ה LI-COR 6200. הממוצע בוצע על נתונים של שעה עבור תשעה ימי מדידה במהלך עונת הגידול. הציר האופקי מציין את

שעות היום, ציר האנכי בצד שמאל מציין את הקרינה בתחום ה PAR וציר האנכי בצד ימין מציין את המוליכות פיוניות הממוצעת בחממה. קו כחול (משולשים) מייצג את מוליכות פיוניות וקו האדום (מעוינים) את הקרינה בתחום ה PAR.

באיורים 10 ו 11 מוצגות השוואות של ערכי פוטוסינתזה ומוליכות פיוניות ממוצעים אשר נמדדו בעזרת מכשיר ה LI-COR 6200. הממוצע בוצע על נתונים שנאספו במהלך תשעה ימי מדידה לאורך עונת הגידול. פוטוסינתזה ומוליכות פיוניות נמדדו בשלוש שכבות עלים: עלים בחלקו התחתון של הצמח, במרכזו ובחלקו העליון של הצמח. ערכי פוטוסינתזה ומוליכות פיוניות היו גבוהים יותר בשכבות עלים העליונה והמרכזית בהשוואה לשכבת העלים התחתונה.

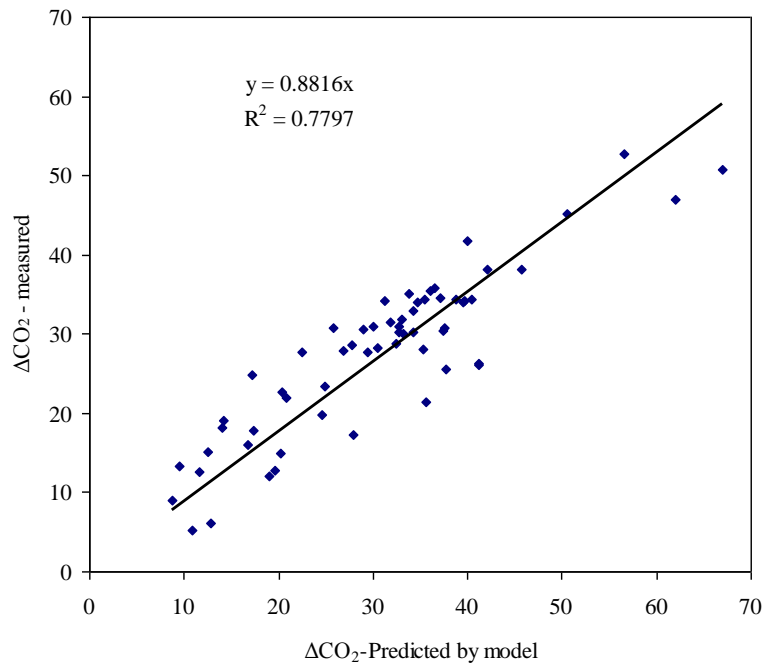


איור 10: מוליכות פיוניות ממוצעת בשלוש שכבות העלים איור 11: פוטוסינתזה ממוצעת בשלוש שכבות עלים. איור 12 מציג את המהלך היומי הממוצע של קרינה בתחום ה PAR ופוטוסינתזה בחממה כפי שחושבה בשיטת מאזן מסה (ראה פרק תיאוריה). איור המוצג מתבסס על נתונים של חמישה ימי מדידה. רמת הפוטוסינתזה עולה משעות הבוקר עד שעות הצהריים במקביל לעלייה ברמת הקרינה ומגיעה לערכים הגבוהים ביותר באזור השעה 12. בשעות אחר הצהריים רמת הקרינה יורדת בחממה ובהתאם לכך גם רמת הפוטוסינתזה.



איור 12: מהלך היומי של פוטוסינתזה ממוצעת (קו הסגול, מעוינים) וקרינה בתחום ה PAR (קו האדום, ריבועים). הציר האופקי מציין את שעות היום, ציר האנכי בצד שמאל מציין את הקרינה בתחום ה PAR וציר האנכי בצד ימין מציין את הפוטוסינתזה ממוצעת בחממה.

איור 13 מציג השוואה בין תוצאות מודל לחיזוי הפרש ריכוז הפד"ח באוויר בין פתח כניסת האוויר והיציאה בהשוואה למדידות. כל נקודה מייצגת ממוצע של שעה, סה"כ ההשוואה מתייחסת לעשרה ימים. האיור מראה התאמה טובה בין תוצאות המודל והניסויים. שיפוע קו הרגרסיה העובר דרך הנקודות הוא 0.88 עם מקדם $R^2=0.78$. כלומר, המודל (ראה פרק תיאוריה) יאפשר לחזות את ריכוז הפד"ח בנקודות שונות לאורך החממה די טוב.



איור 13. הפרש בריכוז הפד"ח באוויר בין פתח כניסת האוויר והיציאה. תוצאות מדודות כפונקציה של תוצאות המודל שפותח בעבודה זו.

1. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.

במשך עבודת המחקר בוצעו ניסויים בחממת וורדים קטנה ובחממת פלפל גדולה הנתונים לאוורור מאולץ ע"י מאווררים. בניסויים נמדדו הפרשי הלחות הסגולית וריכוז הפחמן הדו חמצני (פד"ח) באוויר בין פתח הכניסה והיציאה של האוויר. הניסויים בחממה הקטנה לא הניבו תוצאות טובות בשל המרחק הקצר בין פתח היציאה לפתח כניסת האוויר (8 מטר). שגיאות המדידה היו מסדר גודל של הפרשים שרצינו למדוד בלחות הסגולית ובריכוז הפד"ח. הניסויים בחממת הפלפל (24 מטר בין פתח יציאת האוויר והכניסה) הניבו תוצאות טובות. קצב הטרנספירציה והפוטוסינתזה של צמחי פלפל שתולים בקרקע נמדדו בחממה הממוקמת בתחנת ניסיונות בבשור במהלך חודשי האביב והקיץ. הערכת צריכת הפד"ח ואיזוי המים על ידי הצמחייה בוצעה בעזרת מאזן מסה של אדי מים ופד"ח על כל נפח החממה בין כניסת ויציאת האוויר מהחממה. הערכים שהתקבלו ממאזן המסה על החממה הושוו לערכים מדודים של טרנספירציה בשיטת הליזימטרים ולערכים של פוטוסינתזה מדודים, במספר רב של צמחים, על ידי מכשיר LI-COR 6200. התוצאות הראו שקיימים הבדלים בין ערכי הצריכה של פד"ח שנמדדו בשיטה המקובלת עם מכשיר ה-LI-COR לבין שיטת מאזן המסה על החממה, אך ההבדלים לא היו מובהקים כפי שהראו סטיות התקן הגדולות בשתי שיטות המדידה. התקבל מתאם טוב בין מדידות טרנספירציה על ידי ליזימטרים לבין מאזן מסה של אדי מים על פני כל החממה. פותחו מודלים לחיזוי שינויים בפד"ח ובלחות הסגולית לאורך החממה המאפשרים לחזות את ריכוז הפד"ח והלחות לאורך המבנה.

2. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו.

בחממה הנתונה לאוורור מאולץ יש עליה בכמות אדי המים וירידה בריכוז הפחמן הדו חמצני (פד"ח) שבאוויר בין פתח יציאת האוויר והכניסה, כצפוי. בחממה ארוכה (במקרה שלנו, 24 מטר אורך גמלון) ניתן למדוד את השינויים בין היציאה והכניסה ולנצל את הערכים המדודים לחישוב ערכי טרנספירציה ופוטוסינתזה ממוצעים של כלל הצמחים במבנה. יתרה מכך, המערכת רגישה לשינויים חדים בקרינת השמש (כפי שקורה בימים מעוננים) ומסוגלת לאבחן שינויים חדים בקרינת שמש הגורמים לשינויים בריכוז הפחמן הדו חמצני וכמות אדי המים באוויר ליד פתח יציאת האוויר (ליד המאווררים). קיימת התאמה טובה בין המודלים שפיתחנו לחיזוי השינויים בריכוז הפד"ח וכמות אדי המים באוויר לאורך החממה ובין תוצאות הניסויים. נראה כי השיטה המוצעת במחקר זה (כימות פוטוסינתזה ודיות ממוצעת בחממה) תוכל להיות מיושמת בחממות להערכת ערכי טרנספירציה ופוטוסינתזה ממוצעים לשיפור הבקרה בחממות. הדבר דורש מעקב נוסף בגידולים אחרים, שיפור המודלים ושיטות המדידה על מנת להקטין שגיאות מדידה.

3. הבעיות שנתרו לפתרון ואו השינויים שחלו במהלך העבודה.

הניסויים בעבודה זו בוצעו על גידול פלפל בלבד. ראוי לבדוק את השיטה המוצעת בגידולים נוספים. רצוי לבדוק את רגישות השיטה המוצעת לאבחון תקלות והפעלות שונות (צינון, העשרה בפד"ח, הצללה, מחסור בהשקיה וכד') ולא רק לשינויים בקרינה כפי שבוצע בעבודה זו.

$s^{-1} \cdot 3m$

4. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח.

מאמר בעברית נשלח לביקורת מדעית ואושר לפרסום. העבודה התקבלה להצגה בשני כנסים בינלאומיים העומדים להתקיים באפריל ויוני 2008:

(1 International Symposium on Strategies Towards Sustainability of Protected Cultivation (in Mild Winter Climate), באנטליה, 6 - 10 אפריל 2008.

(2 כנס AgEng2008, בכרתים, 22 - 26 יוני 2008.

כמו כן הוצגו תוצאות העבודה בסמינר במכון לקרקע מים וסביבה בחודש ינואר 2008.

פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: רק בספריות