

<b>תקופת המחקר:</b> 2000-2002	<b>קוד מחקר:</b> 306-0400-02
<b>Subject:</b> MICROCLIMATE OF CROPS UNDER SCREENS	<b>שם המחקר:</b> מיקרואקלים של גידולים תחת רשתות
<b>Principal investigator:</b> COHEN SHABTAI	<b>חוקר ראשי:</b> שבתאי כהן
<b>Cooperative investigator:</b> ITZHAK SEKER, LEVANA KORDOVA, TEITEL MEIR, RAVEH ERAN, JOSEF TANNY	<b>חוקרים שותפים:</b> יצחק סקר, לבנה קורדובה, מאיר טייטל, ערן רוה, יוסף טנאי
<b>Institute:</b> Agricultural Research Organization (A.R.O.)	<b>מוסד:</b> מינהל המחקר החקלאי, ת.ד. 6 בית דגן 50250

### תקציר

במחקר זה נלמדו השינויים במיקרו-אקלים סביב הצמח החלים בעקבות הכנסתו לבית רשת המונע כניסת מזיקים. המחקר כלל ניסויים לקביעת פרמטרים פסיקליים של בית רשת, התאמתם של הפרמטרים הנ"ל למודל של טמפרטורות ותצורות מים, ניסויים לאימות המודל, ומדידות פיסיוולוגיות לקביעת תגובות כלליות של גידולים לרשתות. נבדקו פלפלים בבית רשת המשמש כהגנה נגד חרקים. נמצא בין היתר, שבגלל הירידה ברמת הקרינה בבית הרשת חלה ירידה חדה בצריכת מים של הגידול ביחס לצריכה בחוץ.

בשנה השלישית והאחרונה נערך ניסוי למדידת פרמטרים קרינתיים של הרשתות ובנה מודל המסכם את הידע שנלמד על מאזן האנרגיה בבית הרשת וצריכת המים של הגידול שבו. הניסוי נערך על גג בניין שליד המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה. המודל נבנה על בסיס מודל פנמן-מונטית מתואם לתנאי בית רשת ומודל מאזן קרינה של רשת, וכלל שני פרמטרים חופשיים, העברה והחזרת קרינה קצרת גל ע"י הרשת. ערכי הפרמטרים נקבעו בשיטה נומרית ע"י השוואת תוצאות המודל לערכים מדודים של צריכת מים. החיזויים שהתקבלו עבור טמפרטורת אוויר ולחות בבית הרשת היו קרובים מאוד לערכים המדודים. לאחר ניתוח מלא של המדידות שנעשו בגג נוכל לבדוק האם ניתן לקבוע ערכים של העברה והחזרה מניסויי גג. הדו"ח המלא מכיל סימולציות של אקלים בית רשת למספר אתרים בארץ על בסיס נתונים מתחנות מטאורולוגיות סטנדרטיות.

פרסומים:

Paper presented at the conference: Product and Process Innovation for Protected Cultivation in Mild Winter Climate, ISHS, Sicily 2002.

Moller, M., Tanny J, Cohen S, Teitel M. 2003. Micrometeorological Measurements in a Screenhouse. Acta Hort. In press.

Tanny, J. S. Cohen, M. Teitel (2003). Screenhouse microclimate. an experimental study. Biosystems Engineering, 84(3), 331-341.

Moller, M. 2002. The effects of insect-proof nets on exchange of mass and momentum in a screenhouse for pepper cultivation in central Israel. MSc.

Thesis. Dresden Univ of Technology, Germany.

טנאי י', מולר מ', כהן ש', טייטל מ', רוה ע', סקר י' וגרווה א' 2003. אפיון מיקרואקלים בבית רשת בו גדל פלפל. גן שדה ומשק, בדפוס.

## מיקרואקלים של גידולים תחת רשתות

### Microclimate of Crops Under Screens

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ולהנהלת ענף הירקות

ע"י

שבתאי כהן	המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי
יוסף טנאי	המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי
מרקוס מולר	המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי
מאיר טייטל	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי
יצחק סקר	שה"ם
ערן רווח	תחנת נסיונות איזורית גילת, מינהל המחקר החקלאי

**Shabtai Cohen**, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Volcani Center, P.O.B. 6, Bet Dagan 50250. Email: [vwshep@agri.gov.il](mailto:vwshep@agri.gov.il)

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

**Markus Moeller**, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Volcani Center, P.O.B. 6, Bet Dagan 50250. Email: [marmoeller@yahoo.de](mailto:marmoeller@yahoo.de)

**Meir Teitel**, Institute of Agricultural Engineering, ARO, Volcani Center, P.O.B. 6, Bet Dagan 50250. Email: [grteitel@agri.gov.il](mailto:grteitel@agri.gov.il)

**Yitzchak Seker**, Shaham, Extension Service, Ministry of Agriculture. E-mail: [iseker@shaham.moag.gov.il](mailto:iseker@shaham.moag.gov.il)

**Eran Raveh**, Gilat Regional Research Station, Ministry of Agriculture, Email: [eran@agri.gov.il](mailto:eran@agri.gov.il)

הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים.

חתימת החוקר:

**תקציר**

במחקר זה נלמדו השינויים במיקרו-אקלים סביב הצמח החלים בעקבות הכנסתו לבית רשת המונע כניסת מזיקים. המחקר כלל ניסויים לקביעת פרמטרים פסיקליים של בית רשת, התאמתם של הפרמטרים הנ"ל למודל של טמפרטורות ותצרוכת מים, ניסויים לאימות המודל, ומדידות פיסיולוגיות לקביעת תגובות כלליות של גידולים לרשתות. נבדקו פלפלים בבית רשת המשמש כהגנה נגד חרקים. נמצא בין היתר, שבגלל הירידה ברמת הקרינה בבית הרשת חלה ירידה חדה בצריכת מים של הגידול ביחס לצריכה בחוץ.

בשנה השלישית והאחרונה נערך ניסוי למדידת פרמטרים קרינתיים של הרשתות ונבנה מודל המסכם את הידע שנלמד על מאזן האנרגיה בבית הרשת וצריכת המים של הגידול שבו. הניסוי נערך על גג בניין שליד המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה. המודל נבנה על בסיס מודל פנמן-מונטית מתואם לתנאי בית רשת ומודל מאזן קרינה של רשת, וכלל שני פרמטרים חופשיים, העברה והחזרת קרינה קצרת גל ע"י הרשת. ערכי הפרמטרים נקבעו בשיטה נומרית ע"י השוואת תוצאות המודל לערכים מדודים של צריכת מים. החיזויים שהתקבלו עבור טמפרטורת אוויר ולחות בבית הרשת היו קרובים מאוד לערכים המדודים. לאחר ניתוח מלא של המדידות שנעשו בגג נוכל לבדוק האם ניתן לקבוע ערכים של העברה והחזרה מניסויי גג. הדו"ח המצ"ב מכיל סימולציות של אקלים בית רשת למספר אתרים בארץ על בסיס נתונים מתחנות מטאורולוגיות סטנדרטיות.

- Paper presented at the conference: Product and Process Innovation for Protected Cultivation in Mild Winter Climate, ISHS, Sicily 2002.
- Moller, M., Tanny J, Cohen S, Teitel M. 2003. Micrometeorological Measurements in a Screenhouse. Acta Hort. In press.
- Tanny, J. S. Cohen, M. Teitel (2003). Screenhouse microclimate. an experimental study. Biosystems Engineering, 84(3), 331-341.
- Moller, M. 2002. The effects of insect-proof nets on exchange of mass and momentum in a screenhouse for pepper cultivation in central Israel. MSc. Thesis. Dresden Univ of Technology, Germany.
- טנאי י', מולר מ', כהן ש', טייטל מ', רוזה ע', סקר י' וגרוזה א' 2003. אפיון מיקרואקלים בבית רשת בגדל פלפל. גן שדה ומשק, בדפוס.

### מיקרואקלים של גידולים תחת רשתות

דו"ח מחקר לשנה ג', שנת 2002 = לפרויקט מספר 306-0400-02

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ולהנהלת ענף הירקות

ע"י שבתאי כהן, יוסף טנאי, מרקוס מולר, מאיר טייטל, יצחק סקר וערן רוזה

### מבוא ומטרות המחקר לתקופת הדו"ח

בשנים האחרונות חלה מהפכה בתחום של שימוש ברשתות בחקלאות בארץ. חקלאים רבים עוברים לגדל בבתי רשת, מנהרות רשת וכיסויי רשת. בזמן הגשת הצעת המחקר השטח הכולל עמד על כ- 10,000 דונם, והיום מדובר ביותר מ-15,000. הידע המדעי הקיים אודות המיקרו-אקלים השורר בבתי רשת הוא מועט, ועדיין לא קיים מודל המתאר ומאפשר לחזות את אופן השפעת הפרמטרים הסביבתיים על המיקרו-אקלים של הגידול. לפיכך, הרחבת הידע בנושא זה תביא לשימוש נרחב ויעיל יותר בקרב החקלאים.

מחקר זה למד על השינויים במיקרו-אקלים סביב הצמח החלים בעקבות הכנסתו לבית רשת המונע כניסת מזיקים. המחקר כלל ניסויים לקביעת פרמטרים פיסיקליים, התאמתם של הפרמטרים הנ"ל למודל של טמפרטורות וצריכת מים, ניסויים לאימות המודל, ומדידות פיסיולוגיות לקביעת התגובות הכלליות של גידולים לרשתות. נבדקו פלפלים בבית רשת המשמש כהגנה נגד חרקים.

תכנית המחקר התמקדה בנושאים הבאים:

- א. לימוד משטר זרימת האוויר בבתי רשת. המחקר כלל ניסויים למדידת ההתנגדות של רשתות מסוגים שונים למעבר אוויר, פרמטריזציה של הרשתות כדי שניתן יהיה לחזות את תנועת האוויר כתלות במהירות הרוח ומבנה הרשת, ובניית מודל לחיזוי התנגדות זאת בתוך מבנים.
- ב. לימוד מאזן הקרינה של רשתות מסוגים שונים. המטרה היתה להגיע למודל שיחזה את שטפי הקרינה הישירה והדיפוזיבית מעל ומתחת לרשת כתלות בתכונות של החומרים שבו, במידת הכיסוי, ובגיאומטריה של הרשת.
- ג. חיזוי של מיקרו-אקלים של גידול בבית רשת, הכולל טמפרטורת אוויר ועלים, התפלגות מהירות הרוח, ותפרוסת הקרינה בנוף. בוצעו ניסויי שדה לאימות המודל.
- ד. ניסויים פיסיולוגיים לקביעת התגובות הכלליות של גידולים לרשתות.

ה. פיתוח מודל המסכם את הידע לגבי מיקרואקלים בתי רשת, וסימולציה של אקלים וצריכת מים של גידול בבית רשת לאזורים שונים של הארץ.

לא נבדקו יכולים עבור ניסוי זה מכיוון שהמטרה היתה ללמוד על האקלים בבית רשת מסחרי. לאומת זאת, קיים מעקב אחר היבולים בבית רשת שבו עבדנו באבן יהודה מטעם שה"מ. נתונים אלו עבור עונת 2002 הם:

המבנה הנמוך (שבו נעשו המדידות, גובה 3.2 מ') נשתל - 5/5 ותחילת קטיף - ב- 5/8 מרווחי שתילה: שורות בודדות 1 מ' בין השורות ו 0.3 מ' בין הצמחים. סה"כ 3330 צמחים לדונם.

יבול סוג א' כ-8 טון לד'. אין נתון לגבי היבול מסוג ב'.

סיום הקטיף: אמצע דצמבר.

המבנה הגבוה (גובה כ-4 מ'): נשתל ב- 28/5 ותחילת הקטיף: 23/8 מרווחי השתילה: 1.15 מ' בין השורות ו 0.3 מ' בין הצמחים. עומד לד' סה"כ 2900 צמחים לד'.

יבול סוג א' כ-7 טון לד'. אין נתון לגבי יבול מסוג ב'.

סיום הקטיף: אמצע דצמבר

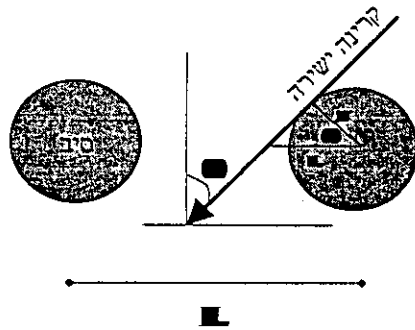
נתונים אלה מראים על יבול מסחרי טוב ואיכותי לעונה קצרה זאת (2 טון לחודש קטיף). כנראה שמבחינת הצמח היתרונות של בית רשת מפצות על הירידה בעוצמת הקרינה.

### המטרות לשנה השלישית היו:

- מדידת מאזן הקרינה של רשתות מסוגים שונים במתקן שנבנה לשם כך על גג בנין שליד המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה.
- השלמת בניית מודל מתמטי המתאר את מאזן האנרגיה והאקלים בתוך בית רשת.
- סימולציה של אקלים בית רשת באזורים שונים בארץ לפי נתוני תחנות מטאורולוגיות בכל אזור.

### מדידות של תכונות של רשתות במתקן בבית דגן

על מנת למדוד את תכונות של רשתות בתנאים טבעיים נבנו מתקנים על גג של מבנה ליד המכון למדעי הקרקע המים והסביבה בבית דגן. המבנה הבסיסי הוא מסגרת ריבועית אופקית במימדים של 3 X 3 מ' וגובהו כ-0.5 מ' מעל פני הגג. רשתות נפרסו על הרשת ומכשירי קרינה מסוגים שונים הותקנו מעל ומתחת לרשת על מנת למדוד מאזן קרינה שלם של הרשתות בתחום הגלים הקצרים והארוכים. תאור של המתקן וניתוח של הנוסחות למעבר קרינה בגלים ארוכים וקצרים במצב זה פורסמו בעבר (Cohen and Fuchs, 1997). בניסוי הנוכחי פרסנו רשתות 50 מ"ש "ביונט" ו-"אנטי-וירוס", 25 מ"ש ואחרות. בנוסף לניתוחים על בסיס הנוסחות המתוארות בפירסום הנ"ל נעשה ניסיון לקבוע את התוספת לקרינה מפוזרת מתחת לרשת הנובעת מפזור של הקרינה הישירה ע"י הרשת. לצורך מטרה זאת צבענו רשת בצבע שחור כדי לקבוע את ההעברה של הרשת בלי הפזור הנוסף הנ"ל. למרות שהמדידות התבצעו בסתיו 2002 ניתוח התוצאות לא הסתיים עדיין ולכן נביא פה רק דוגמאות לתוצאות עבור קרינה קצרת גל כאשר יתר התוצאות, הכוללות תכונות עבור קרינה ארוכת גל יתפרסמו בעתיד.



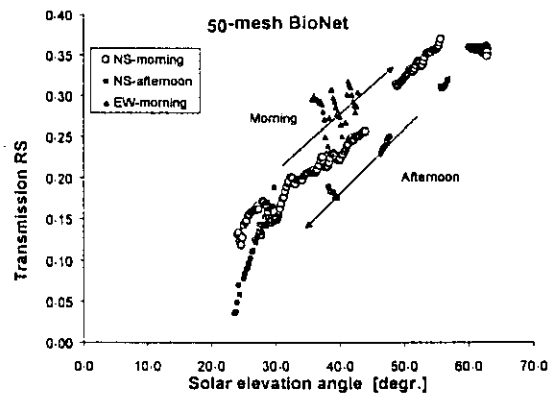
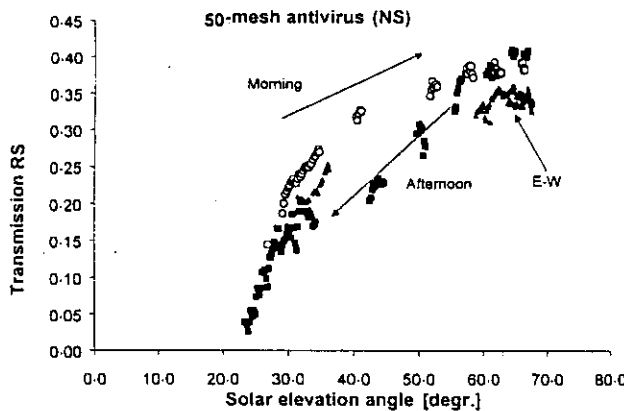
מעבר קרינה ישירה דרך רשת המורכב מסיבים :

הגיאומטריה הרלוונטית למעבר קרינה דרך רשת המורכבת מסיבים עם שטח חתך עגול מובאת באיור 1. לפי הציור, מוצקות הרשת  $S$ , כלומר היטל הצל במאונך לכיוון הקרינה, הוא :

$$(1) \quad S = \frac{2r}{L \cos \theta}$$

איור 1. גיאומטריה של רשת - 2 סיבים.

כאשר  $r$  הוא רדיוס הסיב,  $L$  המרחק בין מרכזי 2 סיבים צמודים ו-  $\theta$  היא זווית הזנית של הקרינה הישירה (כלומר השמש). כאשר  $S=1$  נקבל מוצקות



איור 3. העברת קרינה ישירה קצרת גל ע"י רשתות 50 מ"מ מסוגים "ביונט" ו-"אנטי-וירוס" בתלות בזווית השמש. החורים המלבניים של הרשת היו בכיוון צפון דרום, אלא בנקודות המצויינות שהרשת עמד מזרח-מערב (E-W).

מקסימלית וזה מגדיר את זווית החסימה של הרשת :

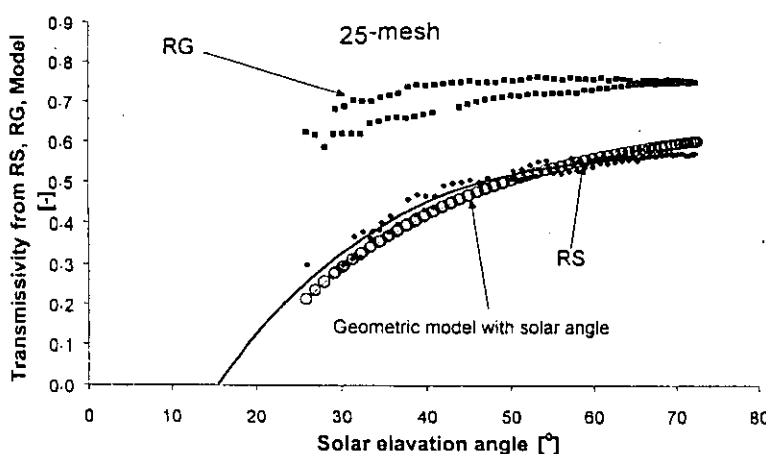
$$(2) \quad \theta = \cos^{-1} \frac{2r}{L}$$

בנוסף, ניתן לבצע אינטגרציה של  $S$  על פני כל השמים על מנת לקבל את המעבר של קרינה דרך רשת שחורה : (D)

$$(3) \quad D = \int_{\Omega} S d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} S \sin \theta d\theta d\phi$$

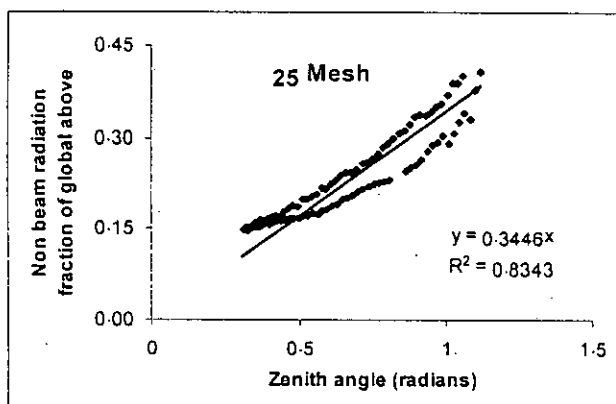
כאשר  $\Omega$  מציינ זווית מוצקה ו-  $\phi$  הוא זווית הציוד. פתרון אנליטי של (1) ו-(3) נותן :

$$(4) \quad D = 1 - \frac{2r}{L} \left( 1 - \ln \frac{2r}{L} \right)$$



איור 2. העברת קרינה קצרת גל גלובלית (RG) וישירה (RS) על ידי רשת 25 מ"מ. בנוסף למדידות, הותאמה קו עבור מודל להעברה דרך רשת בעלת סיבים בעובי קבוע.

איורים 2 ו-3 מראים את הקשר שבין העברת קרינה קצרת גל ישירה לבין זווית הגבהת השמש. כיוון החורים המלבניים ברשת היה צפון-דרום חוץ מהנקודות שמצויין לגביהן שהרשת עמדה מזרח-מערב. ניתן לראות שזווית החסימה של הרשתות היא כ-15° עבור 25 מ"מ ו-23° עבור 50 מ"מ. ניתן להשוות את המספרים האלה לזווית החסימה המחושבת מ-(2) עבור סיב בעובי 0.23 מ"מ ומרחק ממוצע בין סיבים 0.54 ו-1.0 מ"מ (ראה להלן לגבי מוצקות) עבור 25 מ"מ ו-50 מ"מ, ונקבל זוויות של 13° ו-25° בהתאמה. כשהשמש מתקרבת לאמצע השמיים העברת הרשת מתקרבת ל-0.58 עבור 25 מ"מ ו-0.45 עבור 50 מ"מ. לעומת זאת, כמות נכבדת של הקרינה מפורזת כלפי מטה ע"י הרשת, וזה מסביר למה העברת קרינה גלובלית ע"י הרשת גבוהה יותר ופחות מושפעת מזווית השמש (איור 2). במקרה זה (25 מ"מ) העברת קרינה גלובלית הינה בין 0.73 ל-0.76 בזוויות שמש שמעל ל-30°



איור 4. העברה של קרינה לא-ישירה ע"י רשת 25 מ"מ. הנתונים הם הפרש בין ההעברה של קרינה גלובלית לבין העברה של קרינה ישירה חזויה לפי המודל הגיאומטרי.

ניתוח גיאומטרי יותר מפורט של הצל שהרשת מטילה נותן תאור כמעט מושלם של ההעברה של קרינה ישירה ע"י הרשת (המודל לא מובא כאן). ניתן לראות את ההתאמה הזאת באיור 2 (הקו הגיאומטרי). אם נניח שהסיבים הם מחזירי אור ספקולריים (Specular reflectors) אזי התוספת לקרינה העוברת את הרשת הנובעת מהחזרים של הסיבים אחד לשני תהיה בקשר ישיר עם זווית הזנית, ובזנית (

0) לא תהיה תוספת. איור 4 מראה את ההפרש בהעברת קרינה כללית נמדדת לבין ההעברה של קרינה ישירה חזויה לפי המודל הגיאומטרי. רגרסיה ליניארית של התוצאה בהנחת אינטרספט 0 נותן התאמה טובה, אבל הנקודות מתחילות לסטות כלפי מעלה בערכים שמתחת לזווית זנית של 30° (כ-0.5 רדיאן). האיור מדגים את התופעה המוזכרת למעלה לגבי החזרים מהסיבים.

#### מודל המסכם את מאזן האנרגיה בבית רשת:

מאזן האנרגיה של בית הרשת ניתן ע"י:

$$(5) \quad H + \lambda E = R_n - G$$

כאשר  $H$  ו- $\lambda E$  הנם שטפי חום מוחשי וכמוס המשתחררים דרך העלווה, בהתאמה,  $R_n$  הוא הקרינה נטו הנקלטת ע"י הנוף הצמחי, ו- $G$  הוא שטף חום הנכנס לקרקע. ניתן לבטא חום כמוס כ-

$$(6) \quad \lambda E = \frac{\rho c_p e_s(T_c) - e_a}{\gamma r_c + r_b + r_a}$$

ואת שטף החום המוחשי כ-

$$(7) \quad H = \frac{\rho c_p (T_c - T_a)}{r_b + r_a}$$

כאשר  $e_s$  ו- $e_a$  הם לחץ אדים ברוויה בטמפרטורת הנוף ( $T_c$ ) ולחץ אדים באוויר מסביב, בהתאמה,  $\rho$  ו- $c_p$  הם צפיפות האוויר והחום הסגולי, בהתאמה,  $T_a$  הוא טמפרטורת האוויר מסביב ו- $\gamma$  הוא הקבוע

הפסיכרומטרי. התנגדות הנוף למעבר אדים הוא  $r_b$ ,  $r_c$  הוא התנגדות נוספת למעבר דרך שכבות הגבול שבין הנוף העליון לבין הרשת האופקית (כלומר גג המבנה), ו- $r_a$  הוא ההתנגדות האווירודינמית של שכבת הגבול שמעל לרשת.

אנו הפעלנו את הקירוב הרגיל של פנמן:

$$(8) \quad e_s(T_c) = e_s(T_a) - \Delta(T_a - T_c)$$

כאשר  $\Delta$  הוא שיפוע השינוי בלחץ אדי המים עם הטמפרטורה. הצבת (8) לתוך (6) נותנת:

$$(9) \quad \lambda E = \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{e_s(T_a) - \Delta(T_a - T_c) - e_a}{r_c + r_b + r_a}$$

צמצום נוסחה (7) בנוסף להכנסת מאזן האנרגיה (6) נותן:

$$(10) \quad T_c - T_a = \frac{R_n - G - \lambda E}{\rho c_p} (r_a + r_b)$$

החלפה של הפרש הטמפרטורות ב-(10) לפי נוסחה (9) נותן:

$$(11) \quad \lambda E = \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{e_s(T_a) + \frac{\Delta(r_a + r_b)}{\rho c_p} (R_n - G - \lambda E) - e_a}{r_c + r_b + r_a}$$

סידור מחדש של (11) נותן:

$$(12) \quad \lambda E = \frac{\rho c_p}{\gamma(r_c + r_b + r_a)} \left[ e_s(T_a) + \frac{\Delta(r_a + r_b)}{\rho c_p} (R_n - G) - \frac{\Delta(r_a + r_b)}{\rho c_p} \lambda E - e_a \right]$$

ולאחר צמצומים נוספים:

$$(13) \quad \lambda E \left[ 1 + \frac{\Delta \left( 1 + \frac{r_b}{r_a} \right)}{\gamma \left( 1 + \frac{r_c + r_b}{r_a} \right)} \right] = \frac{\rho c_p}{\gamma r_a \left( 1 + \frac{r_c + r_b}{r_a} \right)} [e_s(T_a) - e_a] + \frac{\Delta \left( 1 + \frac{r_b}{r_a} \right) (R_n - G)}{\gamma \left( 1 + \frac{r_c + r_b}{r_a} \right)}$$

נגדיר ש:

$$(14) \quad \gamma^* = \gamma \left( 1 + \frac{r_c + r_b}{r_a} \right)$$

לאחר הצבת (14) לתוך (13) נקבל את הצורה הסופית של נוסחת פנמן-מונטית מתואמת למצב שלנו:

$$(15) \quad \lambda E = \frac{\Delta \left( 1 + \frac{r_b}{r_a} \right) (R_n - G)}{\gamma^* + \Delta \left( 1 + \frac{r_b}{r_a} \right)} + \frac{\rho c_p [e_s(T_a) - e_a]}{r_a \left[ \gamma^* + \Delta \left( 1 + \frac{r_b}{r_a} \right) \right]}$$

את נוסחה (15) ניתן לפתור בעזרת מדידות של טמפרטורה ולחות האוויר החיצוני, קרינת שמש, ורוח, כאשר קשרים נוספים נקבעו לקשר בין אקלים לבין ההתנגדויות הרלוונטיות ומעברי קרינה בתוך בית הרשת.

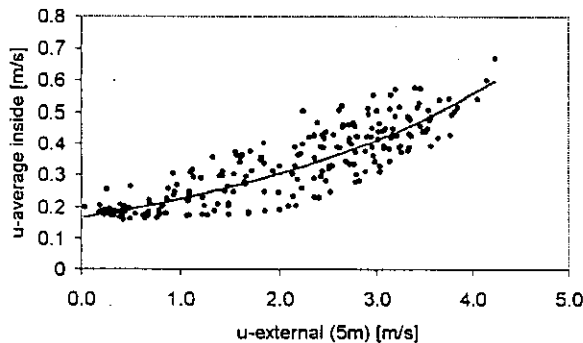
### פתרונות לערכי התנגדויות למעבר עבור הסימולציה במודל המסכם:

מספר פרמטרים במודל (נוסחה 15) נקבעו מקשרים נוספים שנמצאו ממדידות נוספות, שנעשו בעיקר בבית רשת באבן יהודה. להלן סיכום קצר של קשרים אלה, כאשר תאור מפורט של המדידות וגזירת הפונקציות נמצאים בפרסומים אחרים.

התנגדות  $r_a$  חושבה לפי (Fuchs et al. 1987):

$$r_a = \frac{\ln(z-d)/z_0 * \ln(z-d)/z_E}{k^2 u(z)} \quad (16)$$

כאשר  $z$  הוא גובה מדידת הרוח  $u$ ,  $d$  הוא גובה העתקה,  $z_0$  ו- $z_E$  הם אורך חספוס רגיל ועבור מעבר חום מוחשי, בהתאמה. המקדם  $k$  הוא מקדם וון קרמן (0.41).



איור 5. הקשר שבין מהירות רוח בתוך בית רשת לזה שמחוץ לו. המדידות נעשו בבית רשת באבן יהודה

התנגדות  $r_b$  נלקחה לפי עבודת Boulard and Wang (2000):

$$r_b = 220 D^{0.2} / u_{in}^{0.8} \quad (17)$$

כאשר  $u_{in}$  הוא מהירות הרוח בתוך בית רשת בגובה הצמחים. מדידות רוח בבית רשת באבן יהודה (איור 5) הראו שניתן להעריך מהירות זאת לפי:

$$u_{in} = 0.1667 * \exp(0.3014 * u_{ext}). \quad (18)$$

ההתנגדות  $r_c$  היא התנגדות של הנוף למעבר

אדי מים, שהיא סיכום של

התנגדות פיוניות של כל העלים.

התנגדות זאת חושבה לפי הקשר

שבין התנגדות עלים לקרינה

פוטוסינתטית (PAR) וערך מדד

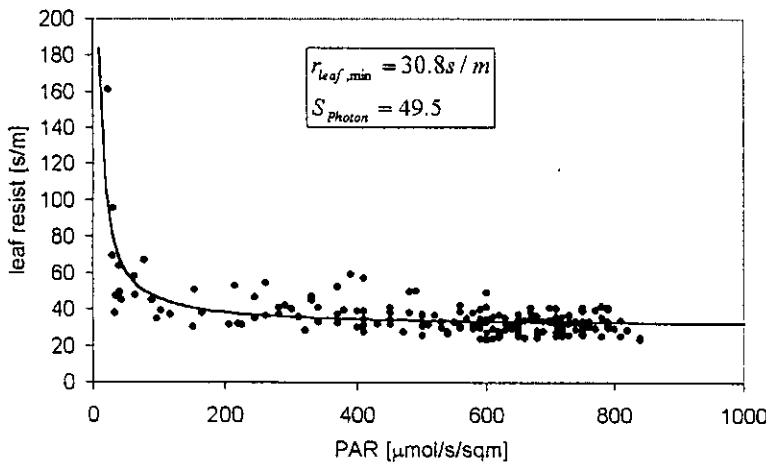
שטח עלים (LAI).

$$r_c = 59(1 + 389 / PAR) / (LAI / 2) \quad (19)$$

מדידות של הקשר בין התנגדות

עלים לקרינה פוטוסינתטית

מובאת באיור 6.



איור 6. התנגדות עלים למעבר אדי מים בתלות בקרינה פוטוסינתטית. המדידות נעשו בעזרת פורומטר (Licor LI1600) בעלי פלפל בבית רשת באבן יהודה.

קרינה נטו מתחת לרשת 50 מ"ש:

לסימולציות, קבענו קרינה נטו

מתחת לרשת ממשוואות מאזני קרינה, מודל לקרינה בגלים ארוכים משמיים צלולים בהירים(!),

ומדידות של היחס בין קרינת שמש קצרת גל בתוך לזה שמחוץ לבית רשת עם גידול פלפל מפותח

(שנמדד באבן יהודה).

ניתן לתאר קרינה קצרת גל בבית הרשת לפי:

$$\begin{aligned}
 I_d &= I_0 \tau_r + I_u \rho_r \\
 I_u &= I_d \rho_c \\
 I_n &= I_d - I_u
 \end{aligned}
 \quad (20)$$

כאשר  $I, \rho, \tau$  הם שטף, החזרה, והעברת קרינה ישירה בהתאמה, והציונים התחתונים  $u, d, 0, r, c$  ו- $n$  מציינים כלפי מעלה ומטה, התחלתי (כלומר מעל לבית רשת), גג, חופת עלווה, ונטו, בהתאמה. ניתן לחבר בין הנוסחאות ע"מ לקבל:

$$I_n = I_0 \tau_r + I_d \rho_c (\rho_r - 1) \quad (21)$$

שטף הקרינה קצרת גל כלפי מטה בתוך בית הרשת נמצא בהתאמה ליניארית מובהקת עם השטף הגלובלי החיצוני, כך ש:

$$I_d = A I_0 \quad (22)$$

כאשר  $A$  הוא השיפוע הליניארי מרגרסיה. אם נציב את נוסחה (22) ב-(21) נקבל:

$$I_d = \frac{I_0 (A - \tau_r)}{\rho_c \rho_r}$$

ופיתרון עבור  $I_n$  נותן:

$$I_n = I_0 \tau_r + \frac{I_0}{\rho_r} (A - \tau_r) (\rho_r - 1) \quad (23)$$

נוסחה 23 יכולה לשמש לחישוב קרינה קצרת גל נטו בלי צורך לדעת מה מקדם ההחזרה של הנוף. שטף קרינה ארוכת גל ( $L$ ) בתוך בית הרשת מתואר לפי:

$$\begin{aligned}
 L_d &= (1 - S_r) L_0 + S_r \varepsilon_r \sigma T_r^4 + (1 - \varepsilon_r) S_r L_n \\
 L_n &= \sigma T_c^4
 \end{aligned}
 \quad (24)$$

כאשר  $T$  ו- $S$  הם טמפרטורה ומוצקות של הרשת,  $\varepsilon$  הוא אימסיביות, ו- $\sigma$  הוא מקדם סטפן בולצמן. אם נניח שהרשת והנוף הם באותה טמפרטורה נמצא ש:

$$L_n = (1 - S_r) (L_0 - \sigma T^4) \quad (25)$$

בנוסף, נניח שקרינה ארוכת גל מהשמיים מתנהגת לפי מודל אמפירי פשוט לשמיים צלולים (Monteith and Unsworth, 1990):

$$L_0 = 213 + 5.5 T_a \quad (26)$$

ונקבל:

$$L_n = (1 - S_r) (213 + 5.5 T_a + \sigma T_a^4) \quad (27)$$

כאשר הציון התחת  $a$  מציין אוויר מחוץ לבית הרשת.

לסיכום, הקרינה נטו הוא סכום קרינה קצרת גל וארוכת גל, כך ש:

$$R_n = I_n + L_n \quad (28)$$

#### מוצקות של רשת 50-מ"ש ביונט:

פרטי הרשת שנלקחו מהיצרן (חבי מטאור, קרית אריה) הם שעובי החוטים הוא 0.23 מ"מ והחור המלבני הינו במימדים של 0.26 X 0.82 מ"מ. פרטים אלה אומתו במעבדה שלנו במדידות

ישירות של רשת. חישוב גיאומטרי ישיר לפי פרטים אלה נותן מוצקות בסיסית של הרשת  $S_r = 0.59$ .

#### פיתרון של נוסחת פנמן-מונטית המתואם לבית רשת ומאזן הקרינה:

פיתרון המודל היה ע"י פיתרון של נוסחה 15 עבור  $\lambda E$  כאשר הוצבו ערכים התחלתיים משוערים של  $\tau_r$  ו- $\rho_r$  ועם שימוש בתנאי אקלים מדודים (טמפרטורת אוויר, לחות יחסית, קרינה גלובלית, ומהירות רוח) שנמדדו מחוץ לבית הרשת באבן יהודה במשך עשרה ימים שבהם נמדד בנוסף קצב זרימת מים בגבעולים של יותר מ-10 צמחי פלפל בבית רשת. הנחנו שקצב זרימת מים בגבעולים מהווה את כל צריכת המים של החממה, כפי שנמצא במדידות (ראה דו"ח שנה א' לגבי זניחות התאדות מהקרע). ערכים מחושבים של צריכת מים ( $\lambda E$ ) הושוו לערכים שרשומים המדודים עבור כל ה-10 ימים וחושב סכום ריבועים של הטעויות. הפעלנו את כלי ה-"solver" של Excel על מנת למצוא ערכים מתאימים של  $\tau_r$  ו- $\rho_r$  שיתנו ערך מינימלי של סכום הריבועים. בשיטה זו קיבלנו את הערכים הסופיים:

$$\tau_r = 0.46$$

$$\rho_r = 0.29$$

השוואת התוצאות המחושבות של טמפרטורה ולחות יחסית של האוויר בתוך בית הרשת לערכים המדודים הראה שבין השעות 10 ל-17 הערך החזוי של טמפרטורה היה תוך חצי מעלה מהמדוד וערך הלחות היחסית תוך 5%. התאמה זאת נראית לנו מצוינת.

לעומת זאת, השוואת ערכי קרינה נטו חזויים לפי המודל לא תואמים את הערכים שנמדדו בבית רשת באבן יהודה. ההפרש הוא פחות מ- $150 \text{ W/m}^2$  ומסתכם עבור יום שלם בכ-1.5 מ"מ התאדות. דרושה עוד עבודה ע"מ לקבוע מקור אי התאמה זאת. בינתיים יש להתייחס לתוצאות הסימולציה כראשוניות בלבד. הסימולציה כן תואמת את המדידות הישירות שנעשו של איבוד מים מהצמחים (דרך מדידות זרימת מים בגבעולים) וגם את תוצאות מדידת שטף אדי מים מעל לבית רשת (בשיטת קורלצית ערבוליים), אך אינה תואמת את המדידות של קרינה נטו בבית רשת.

#### סימולציה של אקלים וצריכת מים של פלפל בבית רשת לאזורים שונים של הארץ

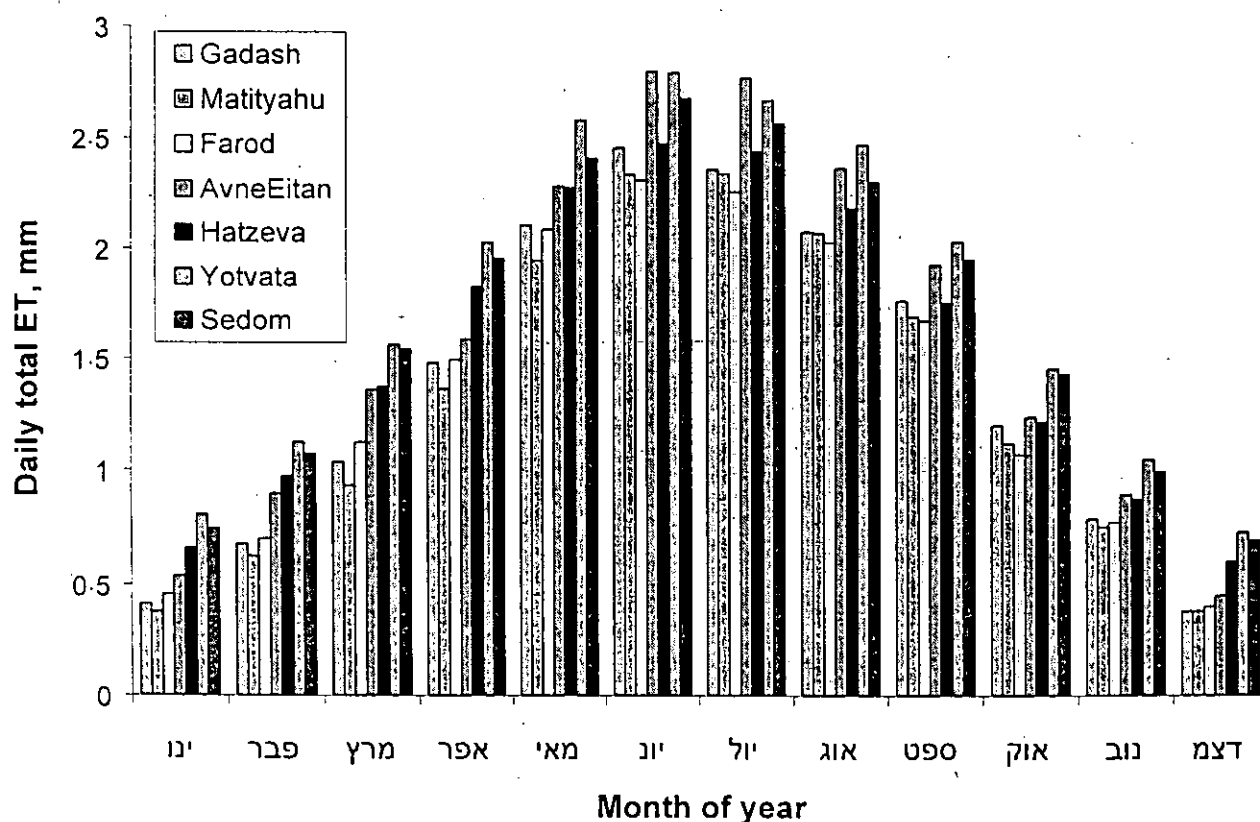
הסימולציה הבסיסית של מאזן אנרגיה של בית רשת יחד עם איבוד מים מגידול פלפל בוגר בו הורצה לפי הנוסחאות המובאות לעיל (נוסחא 15 ואחרים). נאספו נתונים מטאורולוגים ממספר אתרים בגליל העליון (המקור: יוסף ציפריס, מיג"ל) ובערבה (המקור: ישראל צברי, חוות יאיר) ע"מ לקבל מושג לגבי האקלים החזוי של בתי רשת לאזורים אלה. הנתונים הבסיסיים הנדרשים להרצת המודל הם טמפרטורת אוויר, לחות יחסית, קרינה גלובלית (שמש) ומהירות רוח. הנתונים ששמשו לקלט המודל הם ממוצעים חודשיים על בסיס שעות ממדידות של 5 השנים האחרונות. האתרים (תחנות מטאורולוגיות) הם, עבור הערבה: יוטבתה, חצבה, וסדום, ועבור הגליל העליון ורמת הגולן: חוות גידולי שדה בעמק החולה, חוות מתתיהו בהרי הגליל המזרחי, פרוד בגליל המרכזי, ואבני איתן ברמת הגולן הדרומי.

איור 7 מראה את הצריכה היומית החזויה באתרים אלו. בגדול, ניתן לראות שבכל האזורים צריכת מים לא תעלה על 2.5-3 מ"מ ליום בחודשים החמים. דבר זה נובע מהאקלים המיוחד של בית רשת, ובעיקר מהירידה בקרינת שמש הנכנסת למבנה. יש לציין שיש עדיין ספק לגבי תוצאות אלה

(ראה בסעיף הקודם) ויכול להיות שהצריכה גבוהה במעט. בנוסף, לא נלקחה בחשבון בסימולציה ההשפעה של הטמפרטורה על תפקוד הצמח.

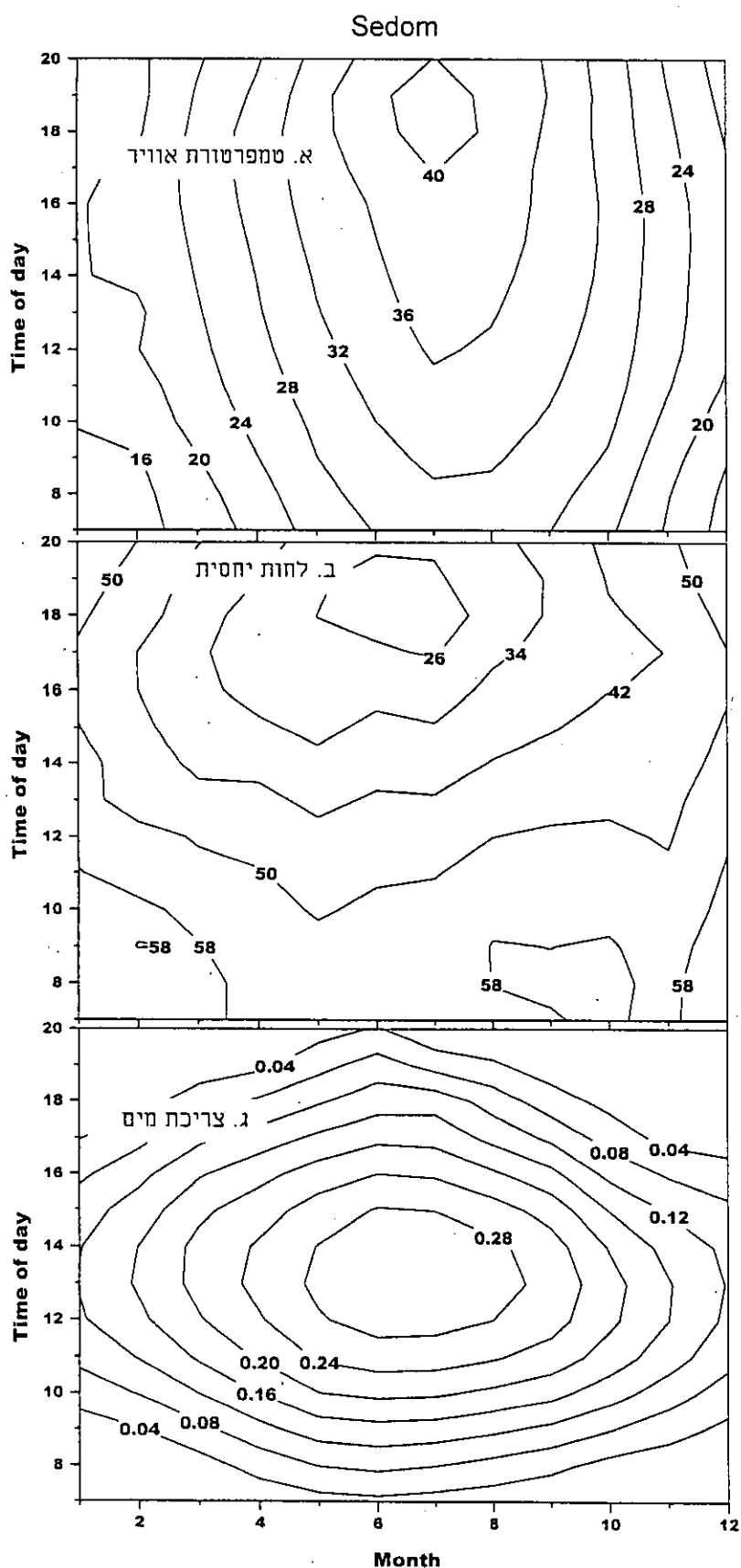
איורים 8 עד 11 מביאים את הפריסה של טמפרטורה ולחות יחסית של האוויר, וצריכת מים חזויה, על בסיס שעתי עבור כל חודשי השנה. הגרפים הם תלת מימדים. עיון באיורים אלה יכול אולי לשמש כנקודת מוצא לתכנון מיקום של בתי רשת ועונת הגידול בהם. מה שלא מובא בגרפים אלה הוא טמפרטורת העלווה, שכן לחיזוי זה דרושה עוד עבודה על התפלגות קרינה בנוף ושילוב ידע זה במודל. ייתכן שלעלווה העליונה טמפרטורה קצת יותר גבוהה מהאוויר. עוד דבר בעייתי הוא טיפול בימים חריגים, כגון ימים חמים, שעלולים להרוג את הצמחים. בגרפים אלה מופיעים נתונים של ימים ממוצעים בלבד. הרצות אלה נוכל להריץ בהמשך אם תהיה דרישה. תקוותנו שאיורים אלה והרצות נוספות של המודל יעזרו לתכנון נכון של ניסויים נוספים לשימוש בבתי רשת באזורים שונים של הארץ.

איור 7. צריכת מים חזויה של פלפל בוגר בבית רשת לפי נתונים מטאורולוגיים מתחנות באזור הגליל העליון ובערבה. הנתונים הם סיכומים של מהלכים יומיים עבור יום ממוצע בחודש, במ"מ מים ליום.



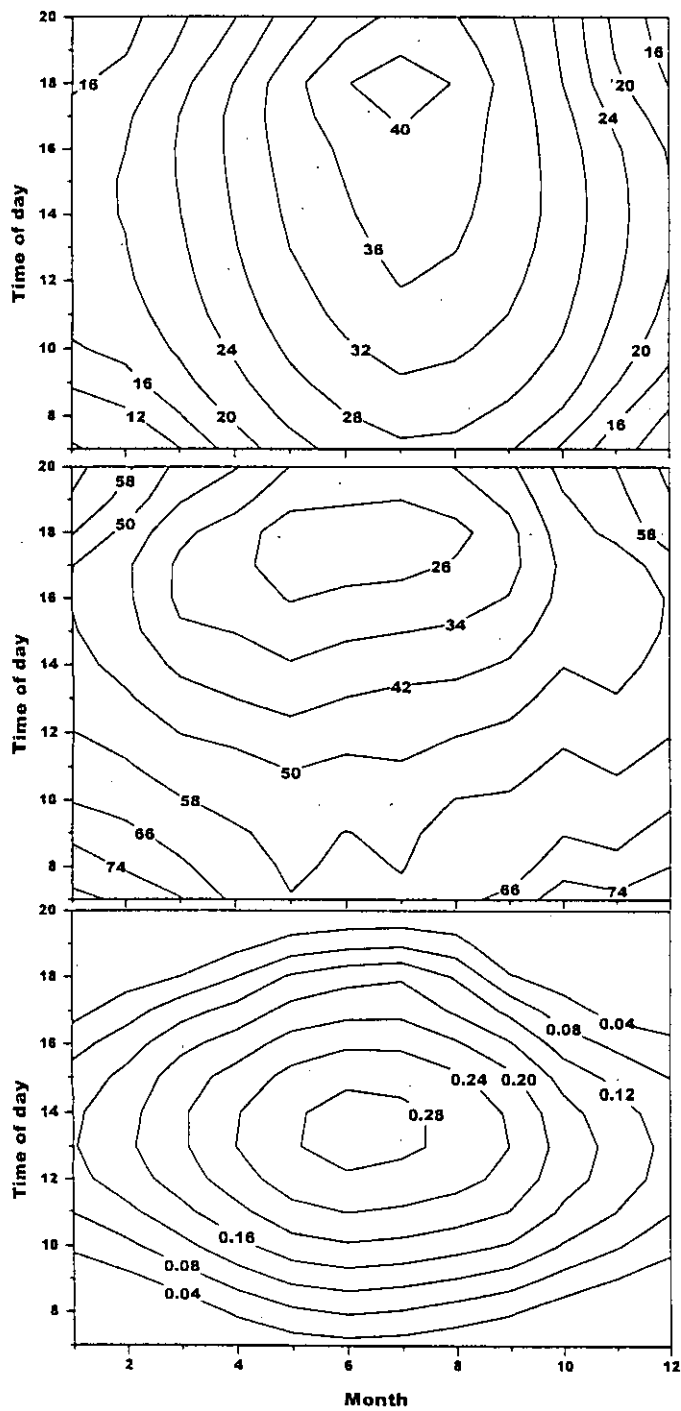
איור 8. תוצאות סימולציה של אקלים בית רשת על פי נתונים מטאורולוגיים מסדום. הנתונים הם ממוצעים רב שנתיים שעותיים. א. טמפרטורת אוויר פנימי (מ"צ), ב. לחות יחסית (%), ג. דיות מפלפל מפותח, מ"מ לשעה. האיור

הוא תלת מימדי ומתאר את המהלך השעתי של האקלים לפי חודשי השנה. בדפים הבאים ניתן למצוא סימולציות באותה מתכונת עבור עוד 6 תחנות: בערבה (חצבה ויוטבתה) ובגליל העליון (פרוד, חוות מתתיהו, חוות גד"ש בעמק החולה, ואבני איתן בדרום רמת הגולן).

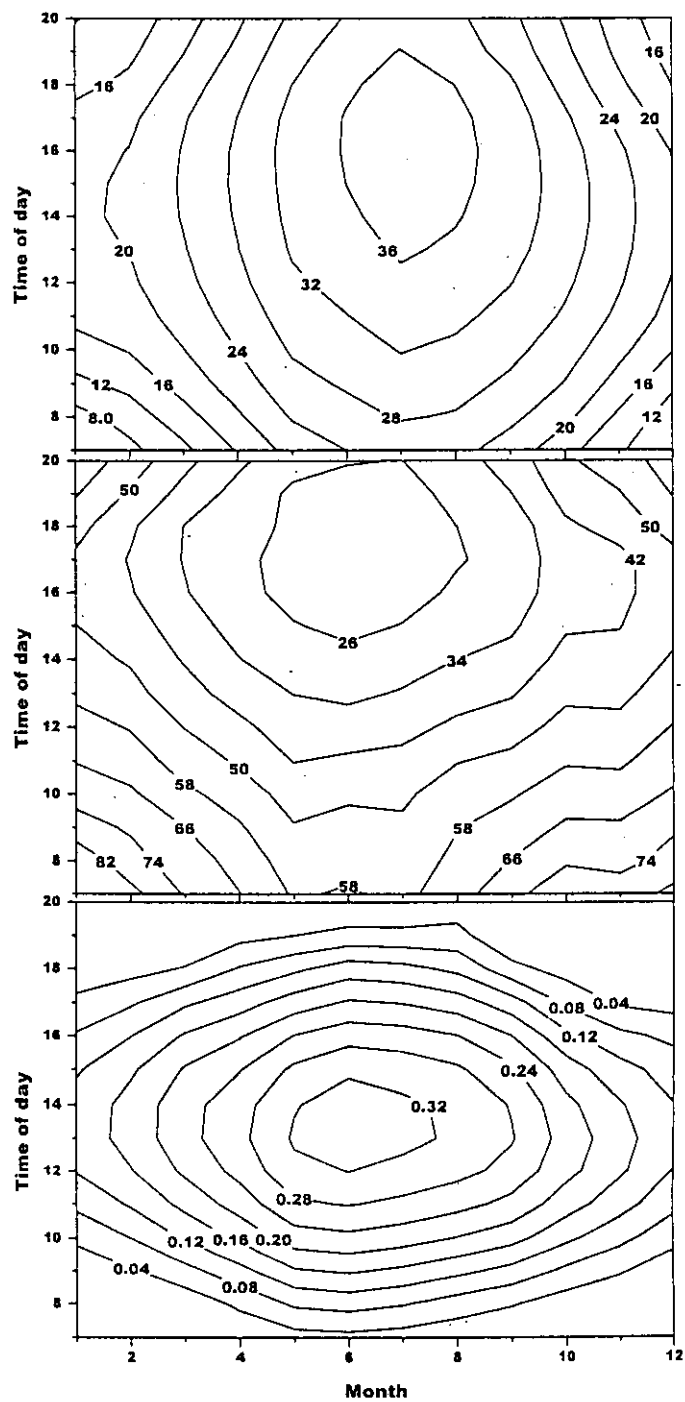


איור 9. סימולציות של אקלים בית רשת בערבה התיכונה צפונית (חצבה) ובערבה הדרומית (יוטבתה). הגרפים מתארים מהלך יומי וחדשי של טמפרטורת אוויר (מ"צ, גרף עליון) לחות יחסית (% , גרף אמצעי), וצריכת מים (מ"מ לשעה, גרף תחתון) של גידול פלפל בוגר.

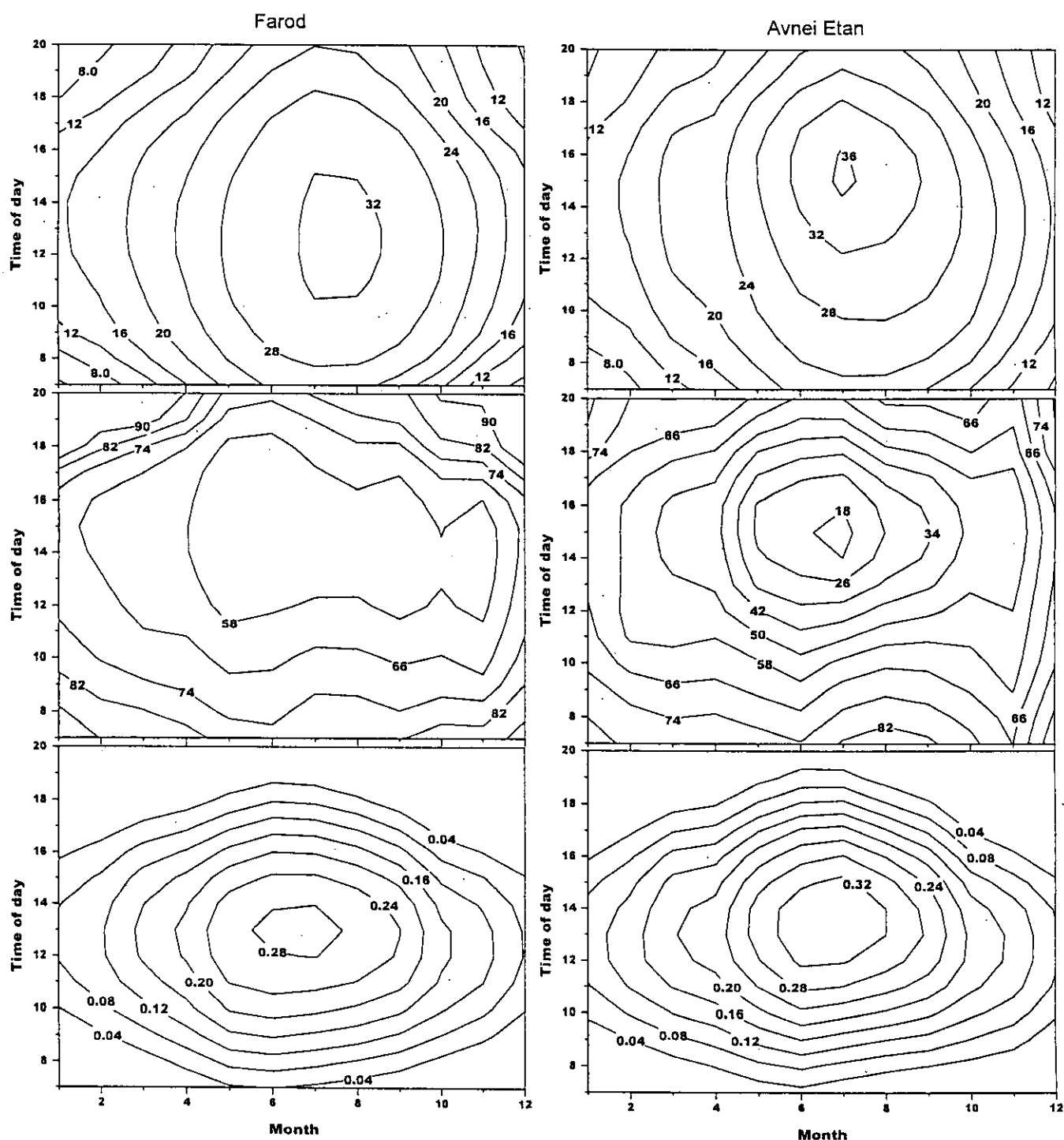
Hatzeva



Yotvata

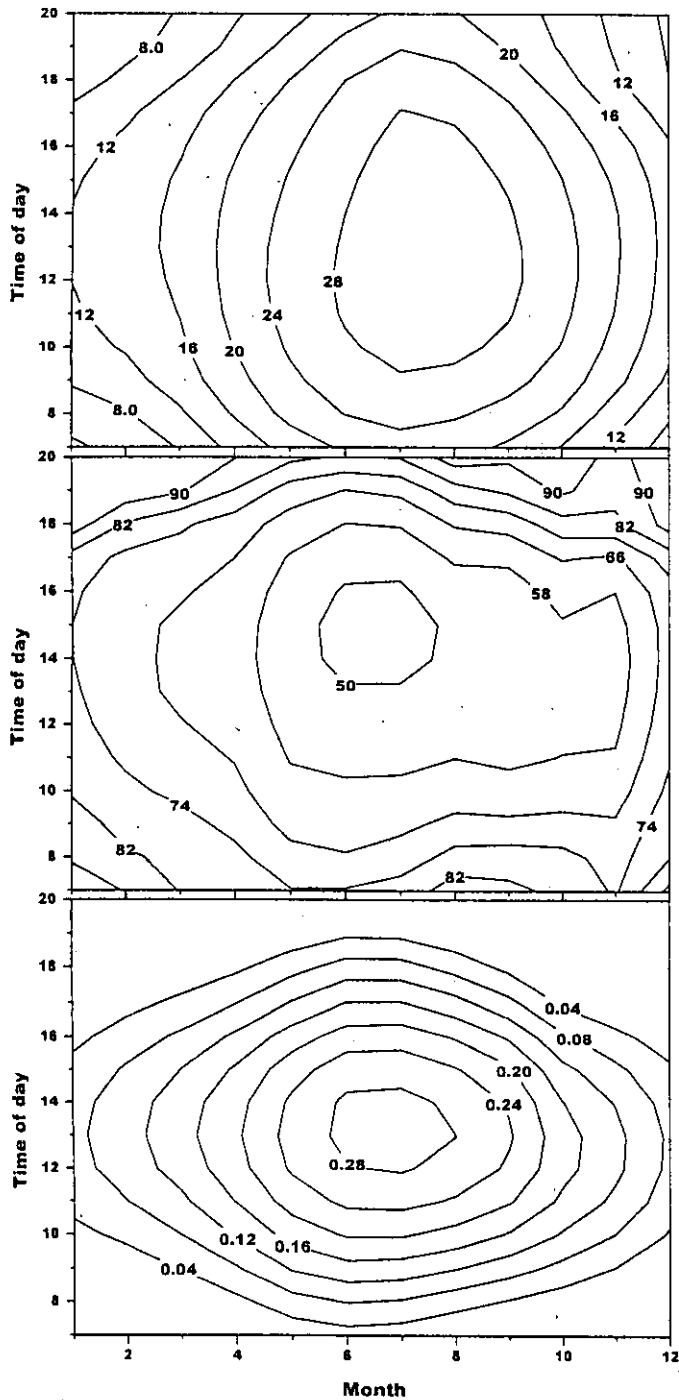


איור 10. סימולציות של אקלים בית רשת בדרום רמת הגולן (אבני איתן) ובגליל המרכזי (פרוד).  
הגרפים מתארים מהלך יומי וחודשי של טמפרטורת אוויר (מ"צ, גרף עליון) לחות יחסית (%), גרף  
אמצעי), וצריכת מים (מ"מ לשעה, גרף תחתון) של גידול פלפל בוגר.

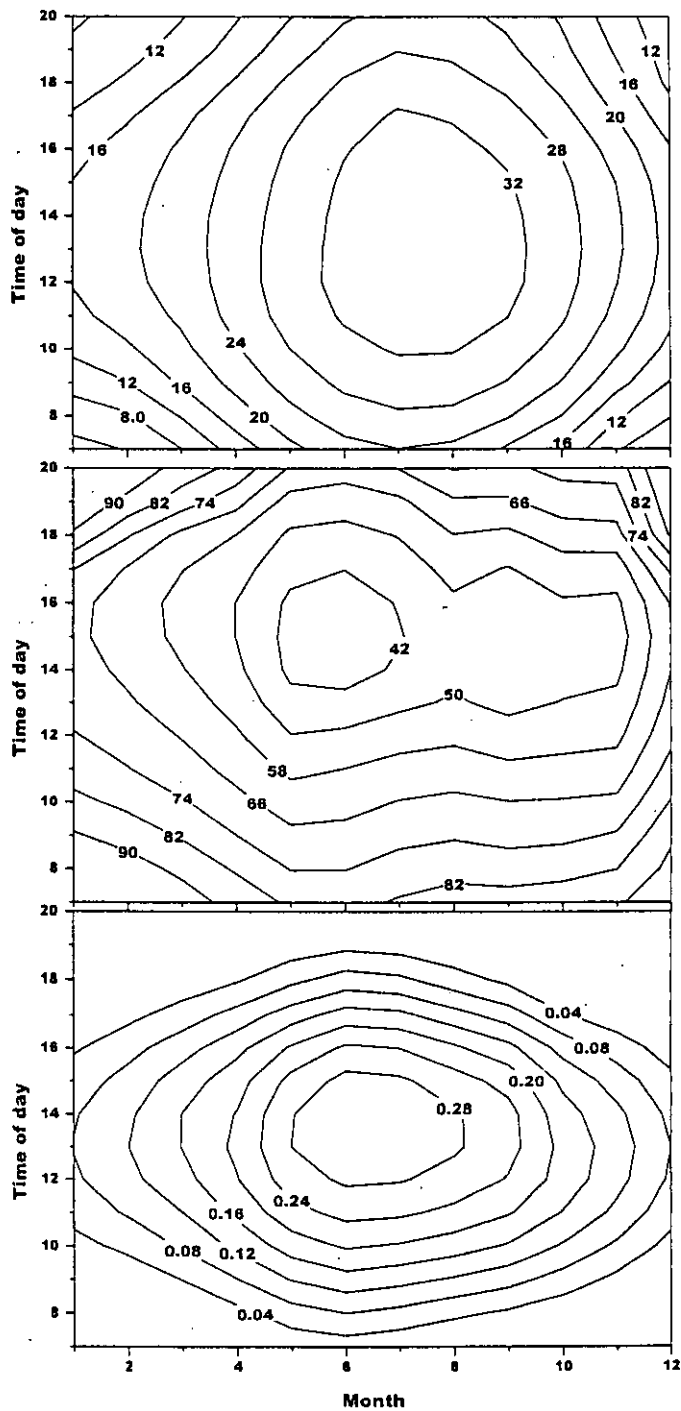


איור 11. סימולציות של אקלים בית רשת במערב עמק החולה (חוות גד"ש) ובגב ההר של הגליל המזרחי (חוות מתיתיהו). הגרפים מתארים מהלך יומי וחדשי של טמפרטורת אוויר (מ"צ, גרף עליון) לחות יחסית (% , גרף אמצעי), וצריכת מים (מ"מ לשעה, גרף תחתון) של גידול פלפל בוגר.

Matityahu



Gadash



### סקירה קצרה של הישגי הפרוייקט שדווחו בשנים קודמות ודיון כללי:

כהכללה אקלים בית רשת מהווה אקלים מוגן מרוח ובעל כושר מוגבל להחלפת אוויר עם הסביבה. בתנאים אלה של חוסר תנועת אוויר ליד הצמחים מאזן האנרגיה של הגידול נחשב מנותק (Decoupled), ורוב הקרינה הנשארת במבנה נפלטת כחום כמוס, כלומר בהתאדות. הרשת עצמה חוסמת הרבה מקרינת השמש ולכן הקרינה הנשארת במבנה ובגידול שבו היא כחצי עד שני שליש ממה שצפוי להיקלט על ידי אותו גידול בשדה פתוח. דבר זה גורם לירידה פרופורציונלית בצריכת המים של הגידול ביחס לשדה הפתוח. לעומת זאת כנראה שאין פגיעה גדולה בקצב הפוטוסינתזה של הגידול, שאכן היבולים המתקבלים בבתי רשת בתנאים אלה הם טובים מאוד. מדידות של הקשר שבין פוטוסינתזה לבין קרינה פוטוסינתטית הראו שכצפוי העלה רווי באור בכ-שליש מעוצמת שמש מלאה.

פרוייקט זה כלל שני ניסויים בבתי רשת באבן יהודה לקביעת הפרמטרים הרלוונטיים להעברת קרינה, תנע ומסה בתוך בית רשת ובין בית הרשת אל מחוצה לו. בניסיון הראשון נמצא בעזרת חישובי זרימת מים בגבעולים שצריכת מים של גידול הפלפל בבית רשת נמוכה מהצפוי. בניסוי השני אומתה הצריכה הזאת בעזרת אותם מכשירים לאחר כיוול חוזר, ובעזרת מדידה בלתי תלויה של קורלציה ערבולים מעל לבית רשת. בנוסף בוצעו מספר מדידות פיסיולוגיות של הקשר בין פוטוסינתזה לעוצמת קרינה פוטוסינתטית בעלים בודדים של פלפל (דו"ח שנה ב') והקשר בין מוליכות עלים (פיוניות) לקרינה פוטוסינתטית. הקשר הראשון לא בא לידי ביטוי במודל המסכם, אולם ייתכן שבעתיד נרחיב את המודל הני"ל ע"מ לכלול חיזוי של כמות הפוטוסינתזה, ובמקרה זה נתונים אלה חיוניים. הקשר בין מוליכות עלים לקרינה נכנס למודל בפונקציה המתארת את ההתנגדות של העלווה למעבר אדי מים.

נעשו מדידות לקביעת מפל לחץ אוויר על רשת מצפיפיות שונות (דו"ח שנה א'). דבר זה נחשב צעד ראשון בפיתוח מודל שיאפשר חיזוי של החלפת אוויר ומהירויות רוח בבתי רשת מצפיפיות רשת שונות. הסימולציה מטפלת בבית רשת העשוי מרשת 50 מש בלבד (שהוא הכי רלוונטי לחקלאות כרגע). נעשו מדידות של אקלים בתי רשת בערבה, אחת במושב צופר, והשניה בתחנת יאיר. במושב צופר נמדדו אקלים וצריכת מים בשני בתי רשת צמודים, האחד מרשת 50 מש והשני מרשת 25 מש. התוצאות הראו שההתנגדות למעבר אדי מים ב-25 מש גבוהה מזה של 50 מש, דבר שאינו הגיוני. עיון במיקום בתי הרשת הראה שכנראה כיווני דפנות בתי הרשת והרוחות גורמים לתופעה המצוינת לעיל, והרוח החיצונית שנמדדה במקום אחד איננה מאפיין את הרוח הנושבת מעל וממול לדפנות של כל אחד מבתי הרשת. לכן, התוצאות לא הובאו בדוחות. באבן יהודה בית הרשת נמצא בשדה פתוח ולכן ראינו אותו כמקרה כללי יותר. לגבי המדידות בתחנת יאיר, הם נעשו בחורף האחרון (הנוכחי) וטרם הספקנו לנתח אותם.

המטרה הסופית של הפרוייקט היה להגיע למודל סימולציה של אקלים וצריכת מים בבית רשת. דבר זה נעשה והתוצאות מובאות בדו"ח זה.

### רשימת ציטוטים:

- Boulard, T. and Wang, S., 2000, Greenhouse crop simulation from external climate conditions: Agricultural & Forest Meteorology, 100, p. 25-34.
- Cohen, S. and Fuchs, M., 1999, Measuring and predicting radiometric properties of reflective shade nets and thermal screens: Journal of Agric. Enging Res., 73, p. 245-255.
- Fuchs, M., Cohen, Y., and Moreshet, S., 1987, Determining transpiration from meteorological data and crop characteristics for irrigation management: Irrigation Science, 8, p. 91-99.
- Monteith, J.L. and Unsworth, M.H., 1990, Principles of Environmental Physics. London, Arnold, p. 1-291.

## מיקרואקלים של גידולים תחת רשתות

סיכום עם שאלות מנחות:

1. מטרת המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
  - א. מדידות של מאזן קרינתי של רשתות שונות שבשימוש בבתי רשת.
  - ב. בניית מודל מאזן אנרגיה של גידול בבית רשת הכוללת חיזוי לסביבה וצריכת מים של הגידול.
  - ג. בדיקת המודל מול נתונים מדודים מבית רשת.
  - ד. הרצת המודל לאזורים שונים של הארץ.
2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.
 

ניסויים לקביעת תכונות קרינתיות של רשתות מצפיפויות שונות (50 מש ו-25 מש) וגם מסוגים שונים (כגון ביונט ואנטי-וירוס) בוצעו במתקן שנבנה לפי המתואר בהצעת המחקר. חלק מהתוצאות מובאות כאן.

נבנה מודל המסכם את הידע שנצבר בפרוייקט לגבי מעברי קרינה, מסה ותנע במערכת של גידול בבית רשת. המודל חוזה צריכת מים ואקלים בבית רשת. המודל הורץ לאזורים שונים בארץ על בסיס נתונים מתחנות מטאורולוגיות מתאימות.

3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו.

איורים המתארים את האקלים החזוי בבתי רשת באזורים שונים מהארץ מובאים כאן. אנו תקווה שהם ישמשו לתכנון מיקום ועונת הגידול בבתי רשת. ייתכן שבהמשך נוסיף מודל החוזה פוטוסינתזה בבתי רשת וגם שנסגור חלק מהספקות לגבי הסימולציה הנוכחית, שהיא ראשונית בלבד.

4. הבעיות שנותרו לפתרון ואו השינויים שחלו במהלך העבודה.
 

קיים פער בין מדידות צריכת מים של הגידול בבית רשת (בעזרת שתי שיטות בלתי תלויות) לבין מדידות קרינה נטו במבנה. דבר זה מטיל ספק בתוצאות המודל. לעומת זאת אנו סבורים שמדידות צריכת המים נכונות ולכן הסימולציה מותאמת לנתונים אלו.

חיזוי טמפרטורת נוף והקשר בין טמפרטורת הנוף לתהליכים צמחיים טרם הוכנס למודל. אנו מקווים שבעתיד תהיה לנו אפשרות להשלים את הפרטים האלה של המודל ולעדכן את החיזויים.

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

Paper presented at the conference: Product and Process Innovation for Protected Cultivation in Mild Winter Climate, ISHS, Sicily 2002.

Moller, M., Tanny Y, Cohen S, Teitel M. 2003. Micrometeorological Measurements in a Screenhouse. Acta Hort. In press.

Tanny, J. S. Cohen, M. Teitel (2003). Screenhouse microclimate. an experimental study. Biosystems Engineering, 84(3), 331-341.

Moller, M. 2002. The effects of insect-proof nets on exchange of mass and momentum in a screenhouse for pepper cultivation in central Israel. MSc. Thesis. Dresden Univ of Technology, Germany.

טנאי י', מולר מ', כהן ש', טייטל מ', רווח ע', סקר י' וגרווה א' 2003. אפיון מיקרואקלים בבית רשת בו גדל פלפל. גן שדה ומשק, בדפוס