

חיפוי קרקע בפוליאתיילן ככלי להתמודדות עם מחלות עלווה "מוגברות לחות" בגידולי ירקות חממה

עבודת גמר
מוגשת לפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה
של האוניברסיטה העברית בירושלים לשם קבלת תואר
"מוסמך למדעי החקלאות"

מאת
גל זיו

עבודה זו נעשתה בהדרכתם של:

פרופסור דני שטיינברג

המכון להגנת הצומח, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן

דוקטור שבתאי כהן

המכון למדעי הקרקע המים והסביבה מינהל המחקר החקלאי, בית דגן

ברצוני להודות לכל מי שסייע לי בעריכת המחקר וכתיבת עבודה זו. תודה לפרופסור דני שטיינברג ודוקטור שבתאי כהן על ההנחיה המסורה והרבה עצות מועילות. תודה לדוקטור יגאל אלעד ודוקטור יוסי טנאי על העזרה בתכנון ועריכת הניסויים. תודה לאברהם גרבה, מרכוס מולר וצוות חוות הבשור על העזרה הטכנית שבלעדיה לא הייתי מצליח בהקמת מערך הניסויים, הפעלתו ותחזוקתו. תודה לקרן קנט על הסיוע הכלכלי.

תקציר

צמחי עגבנייה (*Lycopersicon esculentum* Mill.) הגדלים במבני גידול חשופים לפגעים רבים התוקפים את נוף הצמחים ועלולים לגרום לנזקים משמעותיים ולסכן את הגידול כולו. המחלה החמורה ביותר של עגבניות בגידול חסוי בישראל היא מחלת הכימשון הנגרמת על ידי הפטרייה *Phytophthora infestans* (Montage) de Bary. מחלת הכימשון עלולה לגרום לנזקים חמורים עד לאובדן מוחלט של היבול בזמן קצר של ימים עד שבועות. הבעיה חמורה בגידול קונבנציונאלי והיא קשה הרבה יותר בגידול אורגני משום שאמצעי ההדברה העומדים לרשות המגדלים מעטים ויעילותם מוגבלת. *P. infestans* שייכת לפתוגנים אוהדי הלחות המתפתחים וגורמים לנזקים רק כששוררים תנאי לחות גבוהה וליתר דיוק, כשקיימים מים חופשיים ולו כשכבה דקה ביותר, לפרקי זמן ארוכים. ניתן לנצל זאת לפיתוח אמצעים פסיקאליים ידיוותיים לסביבה להתמודדות עם מחלת הכימשון על ידי קיצור משך רטיבות העלווה. דוגמא לאמצעי כזה היא חיפויי הקרקע במבנה הגידול ביריעות פוליאטילן.

בסדרת ניסויים מקדימים שבוצעה בשנים 2003-2005, בחוות הבשור, על ידי ד"ר שבתאי כהן, ד"ר יגאל אלעד ופרופסור דני שטיינברג נמצא כי חיפוי הקרקע במבנה הגידול בפוליאטילן הפחית את מידת הנגיעות של צמחי עגבנייה במחלת הכימשון. בנוסף להשפעת חיפוי הקרקע על מחלת הכימשון נמצאו גם הבדלים מיקרואקלימיים בין מבני הגידול בהם הקרקע הייתה מחופה בפוליאטילן לבין מבנים בהם הקרקע הייתה חשופה. תוצאות הניסויים המקדימים הראו שבמבנים עם קרקע מחופה ביריעות פוליאטילן הקרקע הייתה חמה יותר ונוצר פחות טל בלילה לעומת מבנים עם קרקע חשופה. אבל המנגנון הפיזיקאלי שבעטיו נגרמו הבדלים אלה במיקרואקלים ובנגיעות במחלת הכימשון לא היה ברור.

חשוב להבין את השפעת חיפוי הקרקע במבנה הגידול ביריעות פוליאטילן על המנגנונים הפיזיקליים המתקיימים במבנה בלילה ומונעים או מפחיתים יצירת טל על העלווה, כי הבנת מנגנון השפעת חיפוי הקרקע בפוליאטילן על יצירת הטל תאפשר חיזוי של יעילות השיטה במניעת מחלות עלווה מוגברות לחות דוגמת מחלת הכימשון במצבים שונים, באזורים שונים ובגידולים שונים. כמו כן, הבנת המנגנון תעזור לקבוע את סוג הפוליאטילן היעיל ביותר במניעת התפתחות המחלה. לאור האמור לעיל למחקר שנערך הוגדרו שתי מטרות. ראשית, למדוד ולהבין את המנגנון באמצעותו משפיע חיפוי קרקע בפוליאטילן על התפתחות מחלות עלווה מוגברות לחות במבנה גידול. המטרה השנייה הייתה, לפתח מודל לתיאור התופעה שיאפשר להגדיר את המצבים בהם ניתן להשתמש בחיפוי ככלי לבקרת מחלות אוהדות לחות.

כדי להשיג את מטרות המחקר נערכו שני ניסויי שדה בחוות הבשור ($31^{\circ}16'N$, $34^{\circ}24'E$, 75m) (a.m.s.l). הניסויים נערכו ב- 16 מבני גידול מסוג מנהרה עבירה, במימדים של 6m אורך, 6.3m רוחב ו- 2.5m גובה. המבנים כוסו ביריעת פוליאטילן IR מפזר בעובי 150 μ m. שני פתחי המבנה כוסו ברשת 50 מש. הניסויים נערכו בשתי עונות גידול, סתיו ואביב בהתאם לעונות הגידול המקובלות באזור הבשור. העונה הראשונה, סתיו 2005, נמשכה מחודש ספטמבר ועד דצמבר בשנת 2005. העונה השנייה, אביב 2006, נמשכה מחודש פברואר ועד אפריל בשנת 2006.

בכל ניסוי נכללו ארבעה טיפולים בארבע חזרות. הטיפולים היו: 1. קרקע מחופה בפוליאטילן שקוף; 2. קרקע מחופה בפוליאטילן כסוף (צד עליון כסוף וצד תחתון שחור); 3. קרקע מחופה בפוליאטילן שחור (כל החיפויים היו מתוצרת גניגר מוצרי פלסטיק בע"מ) ו- 4. קרקע חשופה כביקורת. במבנים עם חיפויי הקרקע, כוסה כל השטח ביריעות החיפוי והצמחים נשתלו בקרקע דרך חורים שנוקבו ביריעות. צמחי העגבנייה גודלו על פי השיטות המקובלות לגידול עגבניות בחוות הבשור. במהלך הניסויים בוצע ניטור נרחב של המיקרואקלים במבני הגידול ומחוץ להם. במהלך שני הניסויים התפתחה מחלת הכימשון. הניסויים שבוצעו

בעונות סתיו 2005 ואביב 2006 הופסקו כאשר חומרת מחלת הכימסון במבנים עם הקרקע החשופה הייתה 48% ו-77%, בהתאמה.

במקביל לעריכת ניסויי השדה פותח מודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הגידול כשהקרקע חשופה או מחופה ביריעות פוליאאתילן מסוגים שונים. חיזוי השפעת החיפוי על טמפרטורת הקרקע (המהווה את המסה התרמית העיקרית במערכת האנרגטית של המבנה) יוכל לשמש להערכת ההשפעה של החיפוי על יצירת טל, קיצור משך רטיבות העלווה ומניעת מחלות עלווה מוגברות לחות כמו כימסון. לאחר בחינת מהימנות המודל נערכה בעזרתו סדרה של שישה ניסויי הדמיה בהם נבחנה ההשפעה של גורמים שונים על טמפרטורת הקרקע במבנה הגידול.

תוצאות ניסויי השדה שנערכו בחוות הבשור בעונות סתיו 2005 ואביב 2006 הראו שחיפוי קרקע מבנה הגידול ביריעות פוליאאתילן הקטין בצורה מובהקת את חומרת הנגיעות במחלת הכימסון של צמחי העגבנייה. לא נמצאו הבדלים מובהקים בהשפעות של סוג יריעת הפוליאאתילן ששימש לחיפויי הקרקע בניסויים על חומרת המחלה. בנוסף להשפעת חיפוי הקרקע ביריעות פוליאאתילן על חומרת מחלת הכימסון במבני הגידול, חיפוי הקרקע העלה את טמפרטורת הקרקע ב- 2°C בממוצע. הקרקע המחופה ביריעות הפוליאאתילן השקוף הייתה החמה ביותר ואחריה הקרקע המחופה בפוליאאתילן הכסוף והקרקע החשופה, בהתאמה. בניגוד לטמפרטורת הקרקע, בטמפרטורת האוויר לא נמצאו הבדלים בין הטיפולים. כמו כן נמצא שחיפוי הקרקע הגדיל את שטף האנרגיה הזמינה לצמחים בלילה. שטף האנרגיה הזמינה לנוף בלילה היה מרבי במבנים עם החיפוי השקוף ואחריה החיפוי הכסוף והקרקע החשופה בהתאמה. בנוסף לאמור לעיל, חיפוי הקרקע של מבנה הגידול הקטין את מספר אירועי הטל שהתרחשו במבני הגידול ב-80% ובליחות בהם נוצר טל קיצר החיפוי את משך בו היו תנאים ליצירת הטל ב-60%.

לאור הממצאים הללו נראה כי המנגנון באמצעותו חיפוי הקרקע במבני גידול ביריעות פוליאאתילן מונע יצירת טל ומפחית את נזקי מחלת הכימסון בצמחי עגבנייה הוא: 1. ככל שהקרקע חמה יותר היא פולטת יותר אנרגיה לצמחים במבנה. לכן, במבני גידול עם קרקע מחופה בפוליאאתילן (החמה יותר מהקרקע חשופה) נפלטת יותר אנרגיה מהקרקע לנוף בלילה; 2. פליטת האנרגיה המוגברת מגבירה גם את קליטת האנרגיה של הצמחים בלילה; 3. כתוצאה מתוספת קליטת האנרגיה בצמחים במבנים עם קרקע מחופה בפוליאאתילן משתנה מאזן האנרגיה שלהם והם מתקררים לאט יותר מהצמחים במבנים עם הקרקע החשופה; 4. במבנים עם קרקע מחופה בפוליאאתילן טמפרטורת העלווה יורדת מתחת לטמפרטורת הטל של האוויר בפחות מקרים ולמשך פחות זמן בכל אירוע טל. כלומר נוצר פחות טל במבנים עם חיפוי קרקע מפוליאאתילן, לעומת מבנים עם קרקע חשופה. המבנים עם חיפוי הקרקע מספקים תנאי מיקרואקלים פחות מתאימים להתפתחות מחלות עלווה מוגברות לחות מהמבנים עם הקרקע החשופה שמעודדים התפתחות מחלות כאלה. התוצאה מהאמור לעיל הייתה שחומרת מחלת הכימסון במבנים עם קרקע חשופה הייתה גדולה יותר מבמבנים בהם הקרקע חופתה ביריעות פוליאאתילן.

לאחר הבנת המנגנון באמצעותו חיפוי קרקע בפוליאאתילן השפיע על התפתחות מחלת הכימסון פיתחנו מודל להערכת השפעת החיפויים על טמפרטורת הקרקע במבני גידול עם חיפויי קרקע שונים או עם קרקע חשופה. המודל שפותח נמצא מהימן על פי מבחני המובהקות הסטטיסטית ברמת מובהקות $P \leq 0.05$. עם זאת, בחינה איכותית של טמפרטורת הקרקע החזויה מראה תמונה מורכבת יותר מכיוון שהמודל חזה במדויק רק את טמפרטורת הקרקע בלילה ולא הצליח לחזות את טמפרטורת הקרקע בשעות היום. למרות אי דיוק זה בחיזוי טמפרטורת הקרקע ביום, הוחלט שהמודל מתאים לצרכי המחקר וכי הוא צפוי לסייע בחיזוי מהימן של השפעת חיפוי הקרקע במבני הגידול ביריעות פוליאאתילן על מניעת מחלות עלווה מוגברות לחות. זאת,

בעקבות הממצאים שהתגלו בניסויים שערכנו המצביעים על כך שהלילה הוא פרק הזמן הקריטי ביממה בכל הנוגע ליצירת טל במבני הגידול.

לאחר שהתברר שהמודל אמין ביצענו בו סידרה של ניסויי הדמיה בהם בחנו את החשיבות של גורמים שונים כמו סוג היריעה, מצב העננות, עונת השנה ומימדי נוף הצמחים ואת השפעתם על טמפרטורת הקרקע במבני הגידול כאמצעי לחיזוי השפעת חיפוי הקרקע בפוליאאתילן על יצירת הטל ומשך רטיבות העלווה המשפיעים על התפתחות מחלות עלווה מוגברות לחות כמו כימשון.

לפי תוצאות ניסויי ההדמיה וניסויי השדה שערכנו חיפוי הקרקע במבנה הגידול ביריעות פוליאאתילן צפוי להיות כלי יעיל להפחתת הנגיעות במחלות עלווה מוגברות לחות בכל מקום בארץ ובכל עונה (למעט במהלך אירועי גשם). נסייג ונאמר שהחיפוי יהיה יעיל כנגד מחלות עלווה מוגברות לחות הדורשות משך רטיבות עלווה ארוך כמו כימשון הדורשת 8-10 שעות רטיבות רצופות, ולא כנגד מחלות שדורשות משך רטיבות עלווה קצר של שעה עד שעתיים כמו כשותית במלפפון או שמשך רטיבות העלווה איננו גורם מכריע במחזור חייהן ובמידת הנזק שיגרם מהן כמו קמחוניות בעגבניות. בשלב זה קשה לקבוע האם לסוג היריעה שתשמש לחיפוי הקרקע צפויה להיות השפעה על יעילות השיטה במקומות שונים. הסיבה לקושי בבחירת היריעה שתהיה היעילה ביותר באזור מסוים נעוצה בכך שכל אחת מהיריעות שנבחנו בניסויים השפיעה באופן שונה על המיקרואקלים במבנה הגידול למרות שלא נמצאו ביניהן הבדלים בקיצור משך רטיבות העלווה במבנים. הגורמים לסתירה זו הם המורכבות של תהליכי היצירה והייבוש של הטל על העלווה במבנה גידול והעובדה שיצירת טל היא תהליך שמתרחש רק כשטמפרטורת העלווה תתקרר מתחת לסף זה ללא עריכה של סף שהיא טמפרטורת הטל של האוויר במבנה. קשה לחזות מתי העלווה תתקרר מתחת לסף זה ללא עריכה של מאזן אנרגיה כולל לנוף הצמחים במבנה הגידול בתנאי הסביבה המסוימים לאותו אזור. לכן קשה גם לחזות כיצד ישפיעו יריעות חיפוי שונות על משך רטיבות העלווה באזורים שונים בארץ בהם תנאי הסביבה שונים. למרות זאת, בכל הניסויים שערכנו יריעת חיפוי הקרקע מהפוליאאתילן השקוף הביאה להתחממות המרבית של המערכת האנרגטית במבני הגידול ולכן אם קיים ספק באשר לבחירת סוג יריעת החיפוי שתהיה היעילה ביותר בתנאי סביבה מסוימים יש להעדיף את יריעת החיפוי השקופה.

תוכן העניינים

1	מפתח סימנים.....
4	1. מבוא.....
5	2. סקירת ספרות.....
5	2.1. מחלת הכימשון.....
5	2.1.1. מחלת הכימשון בעגבניות בגידולים חסויים.....
6	2.1.2. מניעה של מחלת הכימשון בעגבניות בגידולים חסויים.....
7	2.2. זרימת חום בקרקע.....
7	2.2.1. שינויים בטמפרטורת הקרקע בזמן ובמרחב.....
7	2.2.2. זרימת חום ואגירתו בקרקע.....
8	2.2.3. תכונותיה התרמיות של הקרקע.....
8	2.3. המיקרו אקלים ומאזני האנרגיה והמסה במבני גידול.....
13	2.4. המיקרואקלים ויצירת טל במבני גידול בלילה.....
15	2.5. מודלים לחיזוי המיקרואקלים במבני גידול.....
16	2.6. יריעות פוליאתילן לחקלאות.....
19	3. שיטות וחומרים.....
19	3.1. ניסויי השדה.....
20	3.2. מדידות.....
20	3.2.1. מדידות מיקרואקלימיות.....
20	3.2.2. מדידת קצב החלפת האוויר במבנה.....
22	3.3. חישובים.....
22	3.3.1. טמפרטורת האוויר לחץ אדי המים באוויר וטמפרטורת הטל במבנה.....
23	3.3.2. טמפרטורת הקרקע במבנה.....
23	3.3.3. הקרינה נטו של נוף הצמחים והאנרגיה הזמינה לנוף.....
23	3.3.4. קצב החלפת האוויר ומהירות הרוח במבנה.....
24	3.4. איתור תקלות.....
24	3.4.1. איתור תקלות בחיישני טמפרטורה.....
24	3.4.2. איתור תקלות בחיישני שטף החום בקרקע.....
24	3.5. כיול חיישנים.....
25	3.5.1. כיול מדי קרינה נטו.....
25	3.5.2. כיול מדי שטף חום בקרקע.....
26	3.6. הרצת המודל.....
26	3.6.1. בחינת מהימנות המודל.....
26	3.6.2. ניסויי הדמיה.....
29	3.7. ניתוח תוצאות.....
30	4. תוצאות.....
30	4.1. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאתילן על התפתחות מחלת הכימשון.....
30	4.2. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאתילן על המיקרואקלים במבני הניסוי.....
30	4.2.1. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאתילן על טמפרטורות האוויר והקרקע.....

31	4.2.2	השפעת חיפוי הקרקע בפוליאטילן על יצירת טל ומאזן האנרגיה במבנים בלילה.....
33	4.3	מודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הניסוי.....
35	4.3.1	מציאת הקשר בין מהירות וכיוון הרוח לקצב החלפת האוויר במבני הניסוי.....
37	4.3.2	קביעת התכונות הקרינתיות של היריעות במבני הניסוי.....
39	4.4	בחינת תקפות המודל.....
40	4.5	ניסויי הדמיה.....
46	5	5. דיון
46	5.1	השפעת חיפוי קרקע על התפתחות מחלת הכימסון.....
47	5.2	השפעת חיפוי קרקע על המיקרואקלים במבני הניסוי.....
47	5.2.1	השפעת חיפוי קרקע בפוליאטילן על טמפרטורות האוויר והקרקע.....
48	5.2.2	השפעת חיפוי קרקע בפוליאטילן על יצירת טל ומאזן האנרגיה במבנים בלילה.....
49	5.3	מודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הניסוי.....
50	5.3.1	מציאת הקשר בין מהירות וכיוון הרוח לקצב החלפת האוויר במבני הניסוי.....
50	5.3.2	קביעת התכונות הקרינתיות של היריעות במבני הניסוי.....
52	5.4	בחינת תקפות המודל.....
52	5.5	ניסויי הדמיה.....
58		מקורות
62		נספחים
62	1	פיתוח מודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הגידול.....
62	1.1	מודל לחיזוי שטף הקרינה מהשמיים מחוץ למבנה ובתוכו.....
62	1.1.1	קרינת שמש קצרת גל מהשמיים.....
62	1.1.2	קרינה ארוכת גל מהשמיים.....
63	1.1.3	קרינה בתוך המבנים.....
63	1.1.3.1	קרינה קצרת גל מפוזרת המגיעה לקרקע החשופה או לחיפוי.....
63	1.1.3.2	קרינה קצרת גל ישירה בפני הקרקע החשופה או החיפוי.....
65	1.1.3.3	קרינה ארוכת גל בפני הקרקע החשופה או החיפוי.....
65	1.2	מודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבנה.....
65	1.2.1	מאזן הקרינה בפני הקרקע.....
71	1.2.2	מאזני חום מוחשי וכמוס בפני הקרקע.....
72	1.2.3	פתרון מאזן האנרגיה של הקרקע לחיזוי טמפרטורת הקרקע.....

מפתח סימנים

(°)	זווית הצידוד (אזימוט) של השמש (בכיוון השעון) ביחס לצפון	ϕ
(°)	ההפרש בין זווית הצידוד (אזימוט) של שורות השתילה לזווית הצידוד (אזימוט) של השמש	δ
(°)	זווית הצידוד (אזימוט) של שורות השתילה (בכיוון השעון) ביחס לצפון	ϕ_r
(W m ⁻²)	השינוי בשטף החום בקרקע, G עם העומק z	$\partial G/\partial z$
(°C s ⁻¹)	השינוי בטמפרטורת הקרקע ביחידת זמן	$\partial T/\partial t$
	מקדם התיקון לחישוב קרינה ארוכת גל משמיים מעוננים	a
	קבוע לחישוב e ו-TD בגובה פני הים (613.75)	A
(°C)	האמפליטודה של שינוי הטמפרטורה בפני השטח (מחצית ההפרש בין טמפרטורות המקסימום והמינימום)	A(0)
	אלבדו הקרקע החשופה	a _{BS}
	אלבדו פני הקרקע המחופה	a _{mulch}
(cm ³ cm ⁻³)	תכולת הרטיבות הנפחית הממוצעת בקרקע	θ_{ave}
	קבוע לחישוב e ו-TD בגובה פני הים (17.5)	B
	היחס בין רוחב השבילים הכולל במבנה לרוחב המבנה	c
	קבוע לחישוב e ו-TD בגובה פני הים (240.97)	C
(ppm)	ריכוז הגז הסמן לפי הזמן מתחילת המדידה	C(t)
(ppm)	ריכוז הגז הסמן בתחילת המדידה	C ₀
	קבוע חסר יחידות לחישוב אמסיביות השמיים	c _a
	מקדם ההעברה של הנוף לקרינה קצרת גל	τ_{canopy}
	קבוע לחישוב אמסיביות השמיים	c _b
(mbar ^{-0.5})	קיבול החום הסגולי ליחידת שטח של שכבת קרע	C _i
(J m ⁻² °K ⁻¹)	קיבול החום הסגולי של המינרלים בקרקע	C _m
(J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	קיבול החום הסגולי של החומר האורגני בקרקע	C _o
(J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	קיבול החום הסגולי של האוויר בלחץ קבוע	C _p air
(J m ⁻³ °K ⁻¹)	קיבול החום ליחידת שטח של הקרקע	C _s
(kJ m ⁻² °C ⁻¹)	קיבול החום הנפחי של הקרקע	C _v
(J m ⁻³ °K ⁻¹)	קיבול החום הסגולי של המים	C _w
(J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	עומק הדעיכה, המציין את מידת הדעיכה באמפליטודה של גל הטמפרטורה עם העומק ואת שינוי הפאזה של הגל עם הזמן	D
(m)	השינוי בטמפרטורת הקרקע בפרק הזמן בו נערך המאזן	dT _s /dt
(°C s ⁻¹)	לחץ אדי המים באוויר	e
(Pa)	השינוי בתכולת אדי המים באוויר במבנה	E _a
(kg m ³ t ⁻¹)	לחץ אדי המים באוויר מחוץ למבנה	e _{a out}
(mbar)	לחץ אדי המים באוויר במבנה עם קרקע חשופה	e _{aBS}
(Pa)	האנרגיה הזמינה לנוף הצמחים	E _c
(W m ⁻²)	שטף אדי המים מהאוויר המתעבים על הצמחים והכיסוי של המבנה	E _c
(kg m ³ t ⁻¹)	שטף אדי המים מהכיסוי והקרקע לאוויר במבנה	E _e
(kg m ³ t ⁻¹)	לחץ אדי המים ברוויה בטמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע חשופה	e _{sBS}
(Pa)	לחץ אדי המים בפני משטח כלשהו	e _{surf}
(Pa)	שטף אדי המים מהצמחים לאוויר	E _t
(kg m ³ t ⁻¹)	שטף אדי המים היוצאים מהמבנה על ידי האוויר	E _v
(kg m ³ t ⁻¹)	פונקצית רכיבי מאזן האנרגיה של הקרקע	F(T _s)
(W m ⁻²)	"ההבדל" בין ההתאדות בפועל להתאדות הפוטנציאלית מפני הקרקע	f _{pathBS}
(W m ⁻²)	שטף החום בקרקע	G
(W m ⁻²)	שטף החום בפני הקרקע	G(0,t)
(W m ⁻²)	שטף החום בקרקע בשביל	G _p
(W m ⁻²)	שטף החום בקרקע בשורה	G _r
(W m ⁻²)	שטף החום המוחשי מהקרקע	H
(W m ⁻²)	שטף החום המוחשי מפני הקרקע המחופה בפוליאיתילן כסוף	H _{BIM}
(W m ⁻²)	שטף החום המוחשי מפני הקרקע החשופה	H _{BS}
(W m ⁻²)	תוספת האנרגיה ליחידת שטח במבנה הכוללת תוספת אנרגיה בקרינה וחום מוחשי וכמוס	H _{gh}
(m)	גובה הצמחים	h _{plant}
(W m ⁻²)	שטף החום המוחשי מפני הקרקע המחופה בפוליאיתילן שקוף	H _{TRM}
	קבוע פון קרמן (0.41)	k
(m)	אורך המבנה	l
(m ² m ⁻²)	אינדקס שטח העלווה	LAI
(W m ⁻²)	שטף החום הכמוס של אידוי מים מהקרקע	LE
(W m ⁻²)	שטף החום הכמוס מפני קרקע חשופה	LE _{BS}
(W m ⁻²)	שטף החום הכמוס (חום לאידוי מים) ממשטח כלשהו לאוויר	LE _{surf}
(s m ⁻¹)	ההתנגדות האווירודינאמית של האוויר למעבר חום ואדי מים	r
(W m ⁻²)	שטף הקרינה קצרת הגל מתחת לפני יריעת חיפוי קרקע בכיוון מעלה	R' _{sw} ↑

$(W m^{-2})$	שטף הקרינה קצרת הגל מתחת לפני יריעת חיפוי קרקע בכיוון מטה	$R'_{sw\downarrow}$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה ארוכת הגל מיריעת חיפוי הקרקע לכיוון הנוף	R_{\uparrow}
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה ארוכת הגל מכיסוי המבנה לכיוון הנוף	R_{\downarrow}
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה ארוכת הגל שפולט הנוף	R_{canopy}
$(s m^{-1})$	ההתנגדות האווירודינאמית של האוויר למעבר אדי מים	r_E
$(s m^{-1})$	ההתנגדות האווירודינאמית של האוויר למעבר חום	r_H
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים	R_{lw}
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה ארוכת הגל משמיים בהירים	$R_{lw\ clear}$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה ארוכת הגל משמיים מעוננים	$R_{lw\ cloudy}$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה ארוכת הגל העולה למעלה מפני יריעת חיפוי הקרקע או הקרקע החשופה	$R_{lw\uparrow}$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה ארוכת הגל הכולל בכיוון מטה המגיע לפני יריעת חיפוי הקרקע או הקרקע החשופה	$R_{lw\downarrow}$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה נטו המדוד מעל לנוף	$R_n\ above\ canopy$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה נטו המדוד מתחת לנוף	$R_n\ below\ canopy$
$(W m^{-2})$	מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני יריעת חיפוי קרקע כלשהי	$R_n\ mulch\ lw$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה קצרת הגל נטו בפני יריעת חיפוי קרקע כלשהי	$R_n\ mulch\ sw$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה נטו מעל לנוף הצמחים	R_{nac}
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה נטו מתחת לנוף הצמחים	R_{nbc}
$(W m^{-2})$	מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופים בפוליאיתילן כסוף	$R_{nBIM\ lw}$
$(W m^{-2})$	מאזן הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע המחופים בפוליאיתילן כסוף	$R_{nBIM\ sw}$
$(W m^{-2})$	מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע החשופה	$R_{nBS\ lw}$
$(W m^{-2})$	מאזן הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע החשופה	$R_{nBS\ sw}$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה נטו של נוף הצמחים	R_{nc}
$(W m^{-2})$	מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופים בפוליאיתילן שקוף	$R_{nTRM\ lw}$
$(W m^{-2})$	מאזן הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע המחופים בפוליאיתילן שקוף	$R_{nTRM\ sw}$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה הגלובאלית	R_S
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה קצרת הגל המפוזרת מהשמיים	$R_S\ dif$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה קצרת הגל הישירה מהשמיים	$R_S\ dir$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה קצרת הגל בפני השטח בשביל	$R_s\ path$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה קצרת הגל בפני השטח בשורה	$R_s\ row$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה קצרת הגל בפני החיפוי או הקרקע החשופה	$R_s\ total$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה ארוכת הגל שפולטת הקרקע	R_{soil}
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה קצרת הגל העולה למעלה מפני יריעת חיפוי הקרקע או הקרקע החשופה	$R_{sw\uparrow}$
$(W m^{-2})$	שטף הקרינה קצרת הגל הכולל בכיוון מטה המגיע לפני יריעת חיפוי הקרקע או הקרקע החשופה	$R_{sw\downarrow}$
$(W m^{-2})$	הקבוע הסולארי	S
$(W m^{-2})$	זמן	t
(s)	טמפרטורת הקרקע בנקודה מסוימת במרחב ובזמן	$T(z,t)$
$(^{\circ}C)$	היא טמפרטורת פני הקרקע	T_0
$(^{\circ}C)$	טמפרטורת האוויר היבש	T_a
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת האוויר מחוץ למבנה	$T_{a\ out}$
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע מחופה בפוליאיתילן כסוף	T_{aBIM}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע חשופה	T_{aBS}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע מחופה בפוליאיתילן שקוף	T_{aTRM}
$(^{\circ}C)$	טמפרטורת הקרקע הממוצעת במחזור של גל הטמפרטורה	T_{ave}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת כיסוי המבנה במבנה עם חיפוי קרקע כסוף	T_{cBIM}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת כיסוי המבנה במבנה עם הקרקע החשופה	T_{cBS}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת כיסוי המבנה	T_{cover}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת כיסוי המבנה במבנה עם חיפוי קרקע שקוף	T_{cTRM}
$(^{\circ}C)$	הנמוכה בין טמפרטורות האוויר הלח והיבש	T_{min}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת חיפוי הקרקע	T_{mulch}
(s^{-1})	קצב החלפת האוויר במבנה	TOR
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת שכבת הקרקע העליונה	T_s
$(^{\circ}K)$	הטמפרטורה היומית הממוצעת של שכבת הקרקע העליונה, ביום הקודם	$T_{s\ ave}$
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת פני הקרקע מתחת לחיפוי הכסוף	T_{sBIM}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת פני הקרקע החשופה	T_{sBS}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת השמיים	T_{sky}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת הקרקע בשביל	T_{sp}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת הקרקע בשורה	T_{sr}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת הקרקע הנוכחית	T_s^t
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת הקרקע הנחזית	$T_s^{t+\Delta t}$
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת פני הקרקע מתחת לחיפוי השקוף	T_{sTRM}
$(^{\circ}K)$	טמפרטורת משטח כלשהו	T_{sur}

(°C)	טמפרטורת האוויר הלח	T_w
(°C)	היא טמפרטורת פני הקרקע בעומק z	T_z
(m s ⁻¹)	מהירות הרוח בתוך המבנה	u
(W m ⁻² °C ⁻¹)	מקדם איבוד האנרגיה הכללי ליחידת שטח במבנה הכולל איבודי אנרגיה בקרינה וחום מוחשי וכמוס	U_{gh}
(m)	היחס בין θ_{sat} ל- θ_{ave}	W_1
(m)	רוחב השביל	W_{path}
(m)	גובה מדידת מהירות הרוח מפני הקרקע	z
(m)	עומק הנקודה בקרקע	z
(m)	גובה החיכוך מפני הקרקע	z_0
(Pa °K ⁻¹)	מקדם הפיזור של הנוף לקרינה קצרת גל	β
(s)	הקבוע הפסיכרומטרי	γ
	מרווח הזמן בין התחזיות	Δt
	אמסיביות החיפוי הכסוף	ϵ_{BIM}
	אמסיביות הקרקע החשופה	ϵ_{BS}
	אמסיביות כיסוי המבנה	ϵ_{cover}
	אמסיביות חיפוי הקרקע	ϵ_{mulch}
	אמסיביות השמיים הבהירים	ϵ_s
	אמסיביות השמיים	ϵ_{sky}
	אמסיביות הקרקע	ϵ_{soil}
	אמסיביות החיפוי השקוף	ϵ_{TRM}
	חלקם היחסי בקרקע של המים	θ
(cm ³ cm ⁻³)	תכולת הרטיבות הנפחית בקרקע בשבילים	θ_{path}
(cm ³ cm ⁻³)	תכולת הרטיבות הנפחית בקרקע בשורות השתילה	θ_{row}
(W m ⁻¹ °K ⁻¹)	המוליכות התרמית של הקרקע	λ
(W m ⁻¹ °C ⁻¹)	המוליכות התרמית של הגז בקרקע	λ_g
(W m ⁻¹ °C ⁻¹)	המוליכות התרמית של המינראלים בקרקע	λ_m
(W m ⁻¹ °C ⁻¹)	המוליכות התרמית של המים בקרקע	λ_w
(kg m ⁻³)	צפיפות האוויר	ρ_{air}
	מקדם ההחזרה של החיפוי הכסוף לקרינה קצרת גל	$\rho_{BCM sw}$
	מקדם ההחזרה של החיפוי הכסוף לקרינה ארוכת גל	$\rho_{BIM lw}$
	מקדם ההחזרה של הקרקע החשופה לקרינה ארוכת גל	$\rho_{BS lw}$
	מקדם ההחזרה של החיפוי לקרינה ארוכת גל	$\rho_{cover lw}$
(kg m ⁻³)	צפיפות המינרלים בקרקע	ρ_m
	מקדם ההחזרה של חיפוי הקרקע לקרינה ארוכת גל	$\rho_{mulch lw}$
	מקדם ההעברה לקרינה קצרת גל של יריעת חיפוי קרקע כלשהי	$\rho_{mulch sw}$
(kg m ⁻³)	צפיפות החומר האורגני בקרקע	ρ_o
(J m ⁻³ °C ⁻¹)	קיבול החום הנפחי של הקרקע	$\rho_s C_s$
	מקדם ההחזרה של החיפוי השקוף לקרינה ארוכת גל	$\rho_{TRM lw}$
	מקדם ההחזרה של החיפוי השקוף לקרינה קצרת גל	$\rho_{TRM sw}$
	צפיפות המים	ρ_w
(kg m ⁻³)	קבוע סטפן בולצמן	σ
(W m ⁻² °K ⁻⁴)	מקדם ההעברה של האטמוספירה לקרינה קצרת גל	τ
	מקדם ההעברה של החיפוי הכסוף לקרינה ארוכת גל	$\tau_{BIM lw}$
	מקדם ההעברה של הקרקע החשופה לקרינה ארוכת גל	$\tau_{BS lw}$
	מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל	$\tau_{cover lw}$
	מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה קצרת גל	$\tau_{cover sw}$
	מקדם ההעברה של חיפוי הקרקע לקרינה ארוכת גל	$\tau_{mulch lw}$
	מקדם ההעברה לקרינה ארוכת גל של יריעת חיפוי קרקע כלשהי	$\tau_{mulch sw}$
	מקדם ההעברה לקרינה קצרת גל של יריעת חיפוי קרקע כלשהי	$\tau_{mulch sw}$
	מקדם ההעברה של החיפוי השקוף לקרינה ארוכת גל	$\tau_{TRM lw}$
	מקדם ההעברה של החיפוי השקוף לקרינה קצרת גל	$\tau_{TRM sw}$
	חלקו היחסי בקרקע של הגז	Φ_g
	חלקם היחסי בקרקע של המינרלים	Φ_m
	חלקו היחסי בקרקע של החומר האורגני	Φ_o
(°)	זווית הזניט של השמש	Ψ
(°)	הזווית הקריטית לשמש הנמצאת ישירות מעל לשביל	Ψ_c
(°)	הזווית שבין האנך לבין היטל של זווית השמש על משטח מאונך לכיוון השורה וניצב לקרקע	Ψ_r
(s ⁻¹)	התדירות הזוויתית	ω
(m ² s ⁻¹)	היחס בין מוליכות החום של הקרקע לקיבול החום הנפחי שלה	κ

1. מבוא

צמחי עגבנייה (*Lycopersicon esculentum*) הגדלים במבני גידול חשופים לפגעים רבים התוקפים את נוף הצמחים ועלולים לגרום לנזקים משמעותיים ואף לסכן את הגידול כולו. המחלה החמורה ביותר של עגבניות בגידול חסוי בישראל היא מחלת הכימסון הנגרמת על ידי הפטרייה *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary. מחלת הכימסון עלולה לגרום לנזקים חמורים עד לאובדן מוחלט של היבול בזמן קצר של ימים עד שבועות (כהן, 1998; 2006; Cohen et al., 2005; Becktell et al., 1992; Harrison, 1992). הבעיה חמורה בגידול קונבנציונאלי והיא קשה הרבה יותר בגידול אורגני משום שאמצעי ההדברה העומדים לרשות המגדלים מעטים ויעילותם מוגבלת.

פתוגנים הגורמים למחלות צמחים מתחלקים לשתי קבוצות: פתוגנים "מוגברי לחות" וכאלה ש"אינם מוגברי לחות" (אלעד, 1998; 1999; Elad). פתוגנים השייכים לקבוצה הראשונה מתפתחים וגורמים לנזקים רק כששוררים תנאי לחות גבוהה ולעיתים קרובות, כשקיימים מים חופשיים ולו כשכבה דקה, לפרקי זמן ארוכים. בקבוצה זו נכללת הפטרייה הגורמת למחלת הכימסון (*P. infestans*) בעגבניות וניתן לנצל זאת לפיתוח אמצעים פיסיקאליים ידידותיים לסביבה להתמודדות עם המחלה כמו חיפוי הקרקע ביריעות פוליאטילן.

בעבודה זו נעסוק בהתמודדות עם מחלות צמחים פטרייתיות מוגברות לחות בירקות חממה על ידי חיפוי הקרקע במבנה הגידול בפוליאטילן והבנת המנגנון לפיו פועלת השיטה. עבודה זו מתבססת על סדרת ניסויים מקדימים שבוצעה בשנים 2003-2005, בחוות הבשור, על ידי ד"ר שבתאי כהן, ד"ר יגאל אלעד ופרופסור דני שטיינברג. בניסויים המקדימים שנערכו בחוות הבשור נמצא כי חיפוי הקרקע במבנה הגידול בפוליאטילן הפחית את מידת הנגיעות של צמחי עגבנייה במחלת הכימסון. בנוסף להשפעת חיפוי הקרקע על מחלת הכימסון נמצאו גם הבדלים מיקרואקלימיים בין מבני הגידול בהם הקרקע הייתה מחופה בפוליאטילן לבין מבנים בהם הקרקע הייתה חשופה. תוצאות הניסויים המקדימים הראו שבמבנים עם קרקע מחופה ביריעות פוליאטילן הקרקע הייתה חמה יותר ונוצר פחות טל בלילה לעומת מבנים עם קרקע חשופה. אבל המנגנון הפיזיקאלי שבעטיו נגרמו הבדלים אלה במיקרואקלים ובנגיעות במחלת הכימסון לא היה ברור.

כפי שנאמר לעיל חיפוי הקרקע במבנה גידול בפוליאטילן משפיע על טמפרטורת הקרקע ומשך הזמן בו העלווה רטובה במהלך הלילה. ניתן לשער שבמבני הגידול בהם הקרקע מחופה בפוליאטילן אגירת החום בקרקע במשך היום גדולה מאגירת החום בקרקע במבנים בהם הקרקע חשופה. חום זה משתחרר לחדרים בלילה ומעלה את טמפרטורת האוויר והעלווה. עליית הטמפרטורה מונעת או מעכבת את התקררות העלווה מתחת לטמפרטורת הטל של האוויר במבנה. כתוצאה מהתהליכים הללו מתקצר משך הזמן בו העלווה רטובה מטל ולכן נמנעת התפתחות מחלת הכימסון הנגרמת על ידי *P. infestans* השייכת לפתוגנים "מוגברי הלחות".

חשוב להבין את השפעת חיפוי הקרקע במבנה הגידול ביריעות פוליאטילן על המנגנונים הפיסיקליים המתקיימים במבנה בלילה ומונעים או מפחיתים יצירת טל על העלווה, כי הבנת מנגנון השפעת חיפוי הקרקע בפוליאטילן על יצירת הטל תאפשר חיזוי של יעילות השיטה במניעת מחלות עלווה מוגברות לחות דוגמת מחלת הכימסון במצבים שונים, באזורים שונים ובגידולים שונים. כמו כן, הבנת המנגנון תעזור לקבוע את סוג הפוליאטילן היעיל ביותר במניעת התפתחות המחלה. לאור האמור לעיל למחקר שנערך הוגדרו שתי מטרות. ראשית, למדוד ולהבין את המנגנון באמצעותו משפיע חיפוי קרקע בפוליאטילן על התפתחות מחלות עלווה מוגברות לחות במבנה גידול. המטרה השנייה הייתה, לפתח מודל לתיאור התופעה שיאפשר להגדיר את המצבים בהם ניתן להשתמש בחיפוי ככלי לבקרת מחלות אוהדות לחות.

2. סקירת ספרות

2.1. מחלת הכימסון

מחלת הכימסון פוגעת בצמחים שונים ממשפחת הסולניים, עיקר הפגיעה הוא בתפוחי אדמה ועגבניות. המחלה הופיע לראשונה באמצע המאה ה-19 בצפון אמריקה ואירופה בגידול תפוחי אדמה. במאה ה-19 באירלנד מחלת הכימסון גרמה נזקים כבדים לגידול תפוחי האדמה עד לאובדן כמעט מוחלט של היבול בשנת 1946. אובדן יבול תפוחי האדמה באירלנד באותן שנים גרם לרעב כבד שהביא להגירה המונית של האירים לארצות הברית. במאה ה-20 התגלתה מחלת הכימסון גם בדרום אמריקה. כיום מצויה המחלה ברוב הארצות המגדלות תפוחי אדמה (כהן, 1998; Ristaino, 2002). המחלה עלולה לגרום לנזקים כלכליים כבדים עד לאובדן מוחלט של היבול (Beckett et al., 2005).

את הכימסון מחוללת הפטרייה *Phytophthora infestans* (Montage) de Bary, ממחלקת ה-Oomycetes. לפטרייה תפטיר בלתי מסיים היוצר בתנאי לחות גבוהה מנבגים דמויי לימון. בהתאם לטמפרטורה, מנבגי הפטרייה עשויים לנבט בעצמם באמצעות קורי נביטה או לשחרר 8 חי-נבגים הנעים במים בעזרת שני שוטונים. לפני נביטת החי-נבג הוא מפתח דופן ואחר כך נובט באמצעות יצירת קור נביטה. אחד התנאים ההכרחיים לנביטה מוצלחת הוא הימצאות מים חופשיים על פני הפונדקאי. המנבגים נובטים ישירות כשהטמפרטורות גבוהות ונעות בטווח שבין 22-25°C. לעומת זאת, בטמפרטורות נמוכות הנעות בין 4-21°C המנבגים משחררים חי-נבגים (כהן, 1998; Harrison, 1992).

לאחר הדבקה של הפונדקאי, הפטרייה יוצרת כתמים חומים על הנוף הצמחי. בעלים הכתמים מוקפים בטבעת ירוקה-אפורה. לעומתם, בגבעולים ופטוטורות הכתמים חומים ומאורכים. בתנאי לחות נאותים הפטרייה מנביגה בעיקר בלילה, על גבי תפטיר הבוקע מהפיוניות. בבוקר עם עליית הטמפרטורה והירידה בלחות היחסית של האוויר, ניתקים המנבגים מהתפטיר ונישאים באוויר. מנבגים שנחתו על גבי פונדקאי מתאים נובטים בנוכחות מים חופשיים (כהן, 1998; Harrison, 1992).

הפטרייה *P. infestans* שייכת לפתוגנים "מוגברי הלחות". פתוגנים השייכים לקבוצה זו מתפתחים וגורמים לנזקים רק כששוררים תנאי לחות גבוהה וליתר דיוק כשקיימים מים חופשיים ולו כשכבה דקה ביותר לפרקי זמן ארוכים על פני הפונדקאי (אלעד, 1998; Elad, 1999). השלבים הרגישים ביותר להימצאות מים במהלך מחזור החיים של הפטרייה הם הנביטה והחדירה לרקמה הצמחית (Harrison, 1992). תהליכי הנביטה והחדירה לפונדקאי יושלמו רק אם ימצאו מים חופשיים במשך כל זמן הדרוש להשלמתם. בדרך כלל נדרשות 8-10 שעות רטיבות רצופות ויותר. במרבית המקרים אם העלווה מתייבשת לפני סיום תהליך ההדבקה נבט הפטרייה לא ישרוד והתפתחות המחלה תיעצר גם אם כעבור זמן ישתנו התנאים והעלווה תשוב ותירטב (Campbell and Madden, 1990; Harrison, 1992).

2.1.1. מחלת הכימסון בעגבניות בגידולים חסויים

גידול ירקות במבני גידול בהשקעה נמוכה (low-cost greenhouse production systems) הוא שיטת הגידול הנפוצה באזור אגן הים התיכון לפי Baille (1996) ובה נעסוק בעבודה זו. הבסיס לשיטה הוא השימוש במבני גידול המכוסים ביריעות פוליאטילן, עם מערכות בקרת האקלים בסיסיות, האפשרות למגדל שליטה חלקית בלבד בתנאי המיקרואקלים השוררים במבנה. בשל בקרת האקלים המוגבלת מבני גידול אלה מתאפיינים בתנאים של טמפרטורות מתונות ושינויים בלחות של האוויר (לחות גבוהה השוררת בעיקר בשעות הלילה המאוחרות ובבוקר) וכן, התעבות של טל ומשך רטיבות עלווה ארוך (Baille, 1996). תנאי אקלים אלה

מתאימים להתפתחות של מחלות עלווה מוגברות לחות כמו הכימסון (Elad, 1999; Jewett and Jarvis, 2001) ובישראל זו המחלה המסוכנת ביותר בגידול עגבניות חסוי. הסיבה שמחלת הכימסון מסוכנת כל כך בגידול עגבניות חסוי היא שבמבני גידול לעגבניות באזורנו מתקיימים התנאים הדרושים להתפתחות המחלה לפי "משולש המחלה" (Campbell and Madden, 1990). ראשית, צמחי העגבנייה רגישים ומהווים פונדקאי מתאים. כמו כן, אוכלוסיה גדולה ואלימה של הפטרייה *P. infestans* מחוללת מחלת הכימסון מצויה בסביבה ותנאי המיקרואקלים במבנים מעודדים התפתחות כימסון. המיקרואקלים במבני הגידול מספק לפטרייה טמפרטורה הקרובה לאופטימום ההתפתחות שלה (20°C), הלחות הגבוהה באוויר מתאימה ליצירת המנבגים והשינויים בלחות מתאימים להפצתם. מספר המנבגים של *P. infestans* מעלה אחד בתנאים מתאימים יכול להגיע למיליון (Harrison, 1992). יתרה מכך, אם הטמפרטורות במבנה הגידול נמוכות מ- 21°C , אירוע שכיח בלילות בעונות גידול העגבניות באזורנו, כל מנבג נובט ישחרר שמונה חי נבגים והסכנה תגדל פי כמה. בנוסף לכך, בשעות הבוקר כשהאוויר במבנה הגידול מתחמם והלחות היחסית יורדת משתחררים המנבגים שנוצרו בלילה לחלל הסגור במבנה הגידול. בנוסף, משך רטיבות העלווה במבנים ארוך מספיק לנביטה מוצלחת. כל אלה, מתאימים להדבקה ולהתפתחות הכימסון. אם שוררים במבנה הגידול לעגבניות תנאי מיקרואקלים מיטביים, סביר שיתרחשו מספר מחזורי הדבקה וההתפתחות של מגיפת הכימסון תהיה מהירה מאוד ויגרמו לנזקים כבדים לגידול תוך זמן קצר של ימים עד שבועות (כהן, 1998; Beckett et al., 2005; Harrison, 1992). עקום ההתפתחות של המחלה כשתנאי הסביבה מעודדים את הפתוגן הוא בעל צורה סיגמואידית (Harrison, 1992). בשלבי המחלה הראשונים חלקה היחסי של העלווה הנגועה עולה אקספוננציאלית עם העלייה במספר מחזורי ההדבקה. קצב התפתחות המחלה קטן רק כשמרבית העלווה כבר נגועה בכימסון וחלקה היחסי של העלווה הבריאה המתאימה לנביטת מנבגים חדשים פוחת.

2.1.2. מניעה של מחלת הכימסון בעגבניות בגידולים חסויים

אחת הדרכים היעילות לצמצום נזקי מחלת הכימסון היא מניעה של התפרצות המחלה (כהן, 1998; Harrison, 1992). בשונה מגידול בשדה הפתוח, מבנה גידול מאפשר שליטה על תנאי המיקרואקלים ולכן יכול לאפשר שליטה בתנאי המיקרואקלים לבקרה על התפרצות המחלה (Elad, 1999; Jewett and Jarvis, 2001). הבקרה על התפרצות מחלת הכימסון במבנה גידול אפשרית מכיוון שהתפתחות *P. infestans* תלויה בקיומם של תנאי לחות גבוהה ורטיבות לפרקי זמן ארוכים. מניעת רטיבות העלווה או צמצום משך הרטיבות מתחת לפרק הזמן הדרוש להשלמת תהליך הנביטה צפויים למנוע את התפרצות המחלה ואת הנזק שהיא גורמת. במבני גידול שאינם מצוננים בערפול או מושקים בהתזה, מים חופשיים נוצרים על העלווה כתוצאה מהתעבות טל (Jolliet, 1999). התעבות טל יכולה להתרחש על כיסוי המבנה ולטפטף ממנו על העלווה או, להתרחש ישירות על העלווה. לפי Giacomelli and Roberts (1993) למניעה או צמצום של טפטוף טל מכיסוי המבנה ניתן להשתמש ביריעת כיסוי המונעת הצטברות טיפות (anti-drip) (סעיף 2.6). כדי למנוע או לצמצם את הצטברות הטל על העלווה מהתעבות ישירה יש לאפשר תנועת אוויר בנוף הצמחים ולהגדיל ככל האפשר את גרעון לחץ אדי המים (vapor pressure deficit) בין האוויר והעלווה (ראה 2.3) (Harrison, 1992; Jewett and Jarvis, 2001). ניתן להשיג אוורור משופר של הנוף באמצעות שתילה מרווחת בכיוון מתאים, דילול הנוף ושימוש במסחררי אוויר. ניתן להגדיל את גרעון לחץ אדי המים במבנה באמצעות חימום האוויר במבנה או החלפתו באוויר יבש באמצעות אוורור. צמצום משך רטיבות העלווה אפשרי גם באמצעות הארכת משך הזמן בו טמפרטורת העלווה גבוהה מטמפרטורת הטל של האוויר במבנה. יעד זה ניתן להשגה בין היתר על ידי

הקטנת איבוד הקרינה התרמית ארוכת הגל מהמבנה בעזרת שימוש ביריעות תרמיות לכיסוי מבנה הגידול (ראה 2.6) (Elad, 1999; Jewett and Jarvis, 2001).

2.2. זרימת חום בקרקע

כשהשמש זורחת מעל לקרקע חלק מהאנרגיה שלה נקלטת בפני הקרקע ומחממת אותם (Campbell and Norman, 1998). החום מועבר מפני השטח בהולכה לשכבות קרקע עמוקות יותר, בשטפי חום מוחשי וכמוס (כלומר, אידוי מים) לאטמוספירה ובפליטה של קרינת חום ארוכת גל מפני השטח. ערכי השיא של טמפרטורת הקרקע נוצרים לאחר השיא בקרינה הסולארית מכיוון שהקרקע היא תווד עם קיבול חום והתנגדות למעבר חום. מסיבה זו הטמפרטורה בפני השטח משתנה בקצב ושיעור גדולים יותר מהטמפרטורה בעומק הקרקע.

2.2.1. שינויים בטמפרטורת הקרקע בזמן ובמרחב

טמפרטורת הקרקע משתנה בזמן ובמרחב (Campbell and Norman, 1998). שינוי הטמפרטורה בזמן הוא תופעה מחזורית סינוסואידלית המתרחשת בו בזמן במחזורים המושפעים מעוצמת קרינת השמש הפוגעת בפני הקרקע. המחזור האחד הוא יומי והמחזור השני הוא שנתי. לעומת השינוי בזמן, שינוי טמפרטורת הקרקע במרחב מתבטא בגרדיאנט טמפרטורות לעומקו של פרופיל הקרקע. בנוסף לכך, טמפרטורות הקרקע הקיצוניות מורגשת בפני השטח והשינוי היומי בטמפרטורת הקרקע קטן עם העומק. התוצאה היא שהמועדים בהם טמפרטורת הקרקע נמצאת בערכי המקסימום והמינימום וערכי טמפרטורות אלה משתנים עם העומק. לדוגמה, ככל שנעמיק בקרקע שיא הטמפרטורה היומי יקטן ויתקיים בשעות מאוחרות יותר.

2.2.2. זרימת חום ואגירתו בקרקע

קיבול החום של קרקע והתנגדותה למעבר חום הם גדולים יחסית (Campbell and Norman, 1998). לכן, כמות החום שנאגרת בקרקע היא גדולה ביחס לכמות החום העוברת דרכה. זו הסיבה שהקרקע היא המסה התרמית העיקרית במערכת של מבנה גידול (Kimball, 1973; Avissar and Mahrer, 1982; Bailli, 1996; Day and Bailey, 1999; Abdel-Ghany and Kozai, 2006; Baille et al., 2006). זו גם הסיבה שלצורך חיזוי המיקרואקלים במבנה יש להתחשב בעריכת מאזני האנרגיה של המבנה באגירת החום של הקרקע בעוד שקיבול החום של שאר רכיבי המערכת נחשב לזניח.

מקובל להשתמש במשוואת רצף המבוססת על חוק פורייה (Fourier) לחישוב השתנות טמפרטורת הקרקע עם הזמן והעומק (Sellers, 1969; Monteith and Unsworth, 1990; Campbell and Norman, 1998). משוואת הרצף היא: $\rho_s C_s \partial T / \partial t = -\partial G / \partial z$. במשוואה זו: $\rho_s C_s$ הוא קיבול החום הנפחי של הקרקע ($J m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$); $\partial T / \partial t$ הוא השינוי בטמפרטורת הקרקע ביחידת זמן ($^\circ C s^{-1}$); ו- $\partial G / \partial z$ הוא השינוי בשטף החום בקרקע, G עם העומק z ($W m^{-3}$).

פתרון אנליטי מקובל למשוואת הרצף לצורך הדמיית השתנות טמפרטורת הקרקע במרחב ובזמן מתקבל בעזרת מספר הנחות עבודה (Campbell and Norman, 1998). אם נניח שעומק הקרקע הוא אינסופי והתכונות התרמיות של הקרקע אחידות לכל אורכו של חתך הקרקע ובנוסף, נניח שהשתנות טמפרטורת פני הקרקע היא סינוסואידלית אזי, פתרון משוואת הרצף הוא: $T(z,t) = T_{ave} + A(0) \exp(-z/D) \sin(\omega t - z/D)$. במשוואה זו: $T(z,t)$ היא טמפרטורת הקרקע בנקודה מסוימת במרחב ובזמן ($^\circ C$); T_{ave} היא טמפרטורת הקרקע הממוצעת במחזור של גל הטמפרטורה ($^\circ C$); $A(0)$ היא האמפליטודה של שינוי הטמפרטורה בפני השטח (מחצית ההפרש בין טמפרטורות המקסימום והמינימום) ($^\circ C$); z הוא עומק הנקודה בקרקע (m); D הוא עומק הדעיכה, המציין את מידת הדעיכה באמפליטודה של גל הטמפרטורה עם העומק ואת שינוי הפאזה

של הגל עם הזמן (m); ω היא התדירות הזוויתית של גל הטמפרטורה השווה ליחס בין 2π לזמן המחזור (s^{-1});
 ו- t הוא הזמן מתחילת המחזור של גל הטמפרטורה (s). מהפתרון למשוואת הרצף מתקבל ששטף החום בפני
 הקרקע הוא: $G(0,t)=2^{0.5}A(0)\lambda/D \sin(\omega t+\pi/4)$ במשוואה זו: $G(0,t)$ הוא שטף החום בפני הקרקע
 ($W m^{-2}$); ו- λ היא מוליכות החום של הקרקע ($W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$).

קיימות גם דרכים אחרות לחישוב שטף החום בפני הקרקע. לפי Acs et al. (1991) דרך נוספת
 לחישוב שטף החום הרגעי בפני הקרקע כשידועה טמפרטורת פני הקרקע הרגעית והממוצעת למחזור של גל
 הטמפרטורה היא: $G=-(\omega\lambda\rho_s C_s/2)^{0.5}(T_0-T_{ave})$. במשוואה זו G הוא שטף החום בקרקע ($W m^{-2}$); ו- T_0 היא
 טמפרטורת פני הקרקע ($^\circ C$). דרך אחרת לחישוב שטף החום בקרקע בעומק z כשטמפרטורות הקרקע בפני
 השטח ובעומק z ידועות לפי Luo et al. (1992) היא: $G=-k(T_0-T_z)/z$ במשוואה זו: T_z היא טמפרטורת
 הקרקע בעומק z ($^\circ C$).

2.2.3 תכונותיה התרמיות של הקרקע

שתי התכונות התרמיות המרכזיות של הקרקע הן קיבול החום הסגולי והמוליכות התרמית (Campbell and Norman, 1998). בעזרת שתי תכונות אלה ניתן לחשב את עומק הדעיכה; פרופיל הטמפרטורה; ושטף החום בקרקע. שלושת הגדלים הללו הם המאפיינים את תכונות הקרקע כמסה תרמית.

הקרקע מורכבת משלושה מקטעים בעלי קיבול חום משמעותי: המינרלים; המים; והחומר האורגני.
 קיבול החום הנפחי של הקרקע שווה לסכום קיבולי החום של מרכיבי הקרקע השונים ומחושב באמצעות
 המשוואה: $\rho_s C_s = \Phi_m \rho_m C_m + \theta \rho_w C_w + \Phi_o \rho_o C_o$ במשוואה זו: $\rho_s C_s$ הוא קיבול החום הנפחי של הקרקע
 ($J m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$); Φ_m ; θ ; ו- Φ_o הם חלקיהם היחסיים בנפח הקרקע של המינרלים; המים; והחומר האורגני,
 בהתאמה. ρ_m ; ρ_w ; ו- ρ_o הן הצפיפויות של המינרלים; המים; והחומר האורגני, בהתאמה ($kg m^{-3}$). C_w ; C_m ;
 ו- C_o הם קיבולי החום הסגוליים של המינרלים; המים; והחומר האורגני, בהתאמה ($J kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$).

לפי Campbell and Norman (1998) המוליכות התרמית של הקרקע תלויה במוליכות התרמית
 וחלקם היחסי בנפח של: המים; הגז; והמינרלים וניתן לחשב אותה בעזרת המשוואה:
 $\lambda = (\theta \xi_w \lambda_w + \Phi_g \xi_g \lambda_g + \Phi_m \xi_m \lambda_m) / (\theta \xi_w + \Phi_g \xi_g + \Phi_m \xi_m)$ במשוואה זו λ היא המוליכות התרמית של הקרקע
 ($W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$); Φ_m ; θ ; ו- Φ_g הם חלקיהם היחסיים בנפח הקרקע של: המים; הגז; והמינרלים, בהתאמה. ξ_w ;
 ξ_m ; ו- ξ_g הם מקדמי השכלול של: המים; הגז; והמינרלים, בהתאמה. המקדמים הללו משכללים את צורתם
 של שלושת המרכיבים, המוליכות התרמית שלהם וחלקם בנפח הקרקע. λ_w ; λ_g ; ו- λ_m הן המוליכויות
 התרמיות של המים; הגז; והמינרלים, בהתאמה ($W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$). בנוסף לכך, חישוב עומק הדעיכה מתבצע על
 ידי המשוואה: $D = (2\kappa/\omega)^{0.5}$ במשוואה זו: D הוא עומק הדעיכה (m); κ הוא היחס בין מוליכות החום של
 הקרקע לקיבול החום הנפחי שלה ($m^2 s^{-1}$); ו- ω היא התדירות הזוויתית של גל הטמפרטורה (s^{-1}).

2.3 המיקרו אקלים ומאזני האנרגיה והמסה במבני גידול

תפקידו של מבנה גידול חקלאי מסחרי הוא לשמש כסביבה יעילה לתפוקה כלכלית מקסימאלית של יבול
 (Day and Bailey, 1999). לצרכים מעשיים מקובל להתייחס אל מבנה הגידול כסביבה אחידה בעלת
 מיקרואקלים השונה מהאקלים הסובב את המבנה והתלויה בו למרות שבפועל הסביבה המיקרואקלימית
 במבנה איננה אחידה (Jewett and Jarvis, 2001).

לפי Baille (1996) את הסביבה במבנה הגידול נהוג לחלק לשלוש תת סביבות שביניהן מתקיימים יחסי גומלין. תת הסביבות הן האוויר, הצמחים והקרקע. בין הסביבה במבנה הגידול ומחוץ לו ובין תת הסביבות במבנה מתקיימים תהליכי חילוף אנרגטיים של קרינה אלקטרומגנטית וחום מוחשי וכמוס וכן, חילופי מסה (Day and Bailey, 1999).

שלושה תחומים עיקריים של אורכי גל "שולטים" בסביבה האלקטרומגנטית (קרינתית) במבנה גידול (Day and Bailey, 1999): הקרינה הפעילה פוטוסינטטית (photosynthetic active radiation) באורכי גל של 400-700nm; הקרינה האינפרה אדומה הקרובה (near infrared radiation) באורכי גל של 700-3000nm; והקרינה האינפרה אדומה הרחוקה הנקראת גם הקרינה התרמית ארוכת הגל (far infrared radiation) באורכי גל של 5-30µm. מקור הקרינה בשני התחומי אורכי הגל הראשונים היא השמש שמתנהגת כגוף שחור ונמצאת בטמפרטורה של כ-6000°K. לעומת זאת, הקרינה התרמית נפלטת מכל גוף בעל טמפרטורה הקרובה לטמפרטורות הרגילות על פני כדור הארץ.

כדי לאמוד את שטפי הקרינה המשפיעים על המיקרואקלים במבנה הגידול יש להתייחס תחילה לשטפי הקרינה מחוץ לו. מקור שטפי קרינה אלה היא השמש והאטמוספירה (Campbell and Norman, 1998). מהשמש מגיעה קרינה קצרת גל (300-3000nm) שחלקה ישירה וחלקה מפוזרת על ידי האטמוספירה. מתוך הספקטרום הזה הקרינה האולטרה סגולה באורכי גל של 300-400nm נבלעת כמעט כולה באטמוספירה (Day and Bailey, 1999). בנוסף מגיעה מהשמיים קרינה תרמית ארוכת גל הנפלטת מהאטמוספירה (Campbell and Norman, 1998; Day and Bailey, 1999).

נהוג לכנות את שטף הקרינה קצרת הגל המגיעה אל פני כדור הארץ מהשמש הקרינה הגלובאלית (Campbell and Norman, 1998). הקרינה הגלובאלית היא הסכום של שטפי הקרינה הישירה מהשמש וקרינת השמש המפוזרת על ידי האטמוספירה של כדור הארץ. שטף הקרינה הישירה מהשמש שווה למכפלה של הקבוע הסולארי במקדם ההעברה של האטמוספירה לקרינה סולארית ישירה. בדומה לו, שטף הקרינה המפוזרת שווה למכפלה של הקבוע הסולארי במקדם הפיזור של האטמוספירה לקרינה סולארית.

גודלם של מקדמי ההעברה והפיזור של האטמוספירה לקרינה סולארית תלוי במרחק שהקרן עוברת באטמוספירה ובתכונות האטמוספירה כמו תכולת אדי המים באוויר והעננות. המקדמים הקרינתיים של האטמוספירה מחושבים בדרך כלל לפי מודלים אמפיריים. מודל אמפירי מקובל לקביעת מקדמי ההעברה והפיזור של האטמוספירה לקרינה סולארית הוא המודל של Liu and Jordan (1960) (ראה נספחים 1.1.1). השמיים הם בעלי טמפרטורה גדולה מאפס ולכן הם מקור לקרינה תרמית ארוכת גל. שטף הקרינה ארוכת הגל הנפלטת מהשמיים תלוי לפי חוק סטפן-בולצמן בטמפרטורת השמיים ובאמסיביות שלהם ומחושב על ידי משוואת בולצמן לפיה $R_{lw} = \epsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4$. במשוואה זו: R_{lw} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים ($W m^{-2}$); ϵ_{sky} היא אמסיביות השמיים. אמסיביות היא היחס בין שטף הקרינה התרמית שפולט גוף לשטף הקרינה התרמית שפולט גוף שחור באותה הטמפרטורה (Campbell and Norman, 1998; Day and Bailey, 1999); σ הוא קבוע סטפן-בולצמן שערכו $5.67E^{-8} (W m^{-2} \text{ } ^\circ K^{-4})$; ו- T_{sky} היא טמפרטורת השמיים ($^\circ K$).

השמיים אינם גוף אחיד. לכן, לפי Campbell and Norman (1998) לא ניתן למדוד את הטמפרטורה או האמסיביות שלהם. כדי לחשב את שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים יש לקבוע אמפירית את הטמפרטורה והאמסיביות האפקטיבית שלהם. מקובל להניח כי טמפרטורת השמיים האופרטיבית היא טמפרטורת האוויר (Brutsaert, 1984). אמסיביות השמיים מחושבת בדרך כלל לפי מודלים אמפיריים ותלויה בטמפרטורת האוויר, תכולת אדי המים באטמוספירה ומצב העננות. הכלל המנחה בקביעת אמסיביות השמיים

הוא ששמיים בהירים הם בעלי אמסיביות נמוכה ולשמיים מעוננים אמסיביות גבוהה. בספרות קיימים מספר מודלים לחישוב אמסיביות השמיים כמו המודלים של Brutsaert (1982) או Monteith and Unsworth (1990) (ראה נספחים 1.1.2).

התכונות העיקריות של מבנה הגידול הקובעות את היחסים בין הקרינה האלקטרומגנטית מחוץ לו והקרינה בתוכו הן מקדמי ההעברה, ההחזרה והבליעה שלו לקרינה אלקטרומגנטית קצרת גל ומקדמי ההעברה, ההחזרה והאמסיביות של המבנה לקרינה תרמית ארוכת הגל. תכונות אלה הן שונות בחומרים שונים ולכל תחום אורכי גל (Campbell and Norman, 1998; Day and Bailey, 1999). בשל המורכבות של מערכת כמו מבנה גידול, מציין Baille (1999) כי קשה למדוד במדויק את הערכים של מקדמי ההעברה, ההחזרה והבליעה הקרינתיים של המבנה. למרות ההבדלים בתכונות הקרינתיות בין החומרים השונים, את כל החומרים מאחד הכלל לפיו סכום המקדמים הקרינתיים של כל גוף באורך גל מסוים שווה לאחד. הכלל נובע מחוק שימור האנרגיה ויכול לסייע בקביעת ערכי המקדמים הקרינתיים כמשוואה במערכת משוואות לחישובם או לבחינת מהימנות של תוצאות שהתקבלו.

כמו שטפי הקרינה האלקטרומגנטית מחוץ למבנה הגידול גם שטפי הקרינה בתוך המבנה נחלקים לקרינה סולארית קצרת גל וקרינה תרמית ארוכת גל. הקרינה הסולארית משמשת בחלקה הקטן לפוטוסינתזה וחלקה הגדול גורם לחימום האוויר, הגידול והקרקה במבנה. Baille (1999) מציע ערכים מייצגים להתפלגות האנרגיה הסולארית החודרת למבנה גידול. לפי Baille (1999) כ- 60% מהקרינה הגלובאלית חודרת למבנה, כ- 50% מהקרינה שחדרה למבנה נבלעת בנוף הצמחים, כ- 30% מהקרינה שחדרה למבנה מוחזר מהנוף והחלק הנותר (כ- 20% מהקרינה שחדרה למבנה) פוגע בפני הקרקע. מרבית הקרינה הפוגעת בקרקע (כ- 85%) נבלעת בה. משתמע מכך שכ- 10% בממוצע משטף הקרינה הגלובאלית נאגרים כחום בקרקע של מבנה גידול בשעות היום.

בקביעת מאזן הקרינה ארוכת הגל במבנה יש לקחת בחשבון את שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים וכן את שטפי הקרינה הנפלטת ממקורות פנימיים במבנה (Day and Bailey, 1999). הגורמים בתוך מבנה גידול (ללא מערכת חימום) המשפיעים על מאזן הקרינה ארוכת הגל הם כיסוי המבנה, נוף הצמחים והקרקה. מכיוון שמאזן הקרינה של כל אחד מהגורמים הללו מושפע ממאזן הקרינה התרמית ארוכת הגל של הגורמים האחרים, קביעת מאזן הקרינה ארוכת הגל במבנה היא תהליך מורכב מאוד. כדי לפשט את הבעיה מקובל להשתמש בהנחות עבודה שונות שיאפשרו פתרון של מאזן הקרינה ארוכת הגל (Rosa 1988; Silva et al., 1991; Day and Bailey, 1999).

מלבד תהליכי חילוף קרינה גם חילופי חום ומסה מתרחשים במבנה הגידול. לפי Campbell and Norman (1998) תהליכים אלה תלויים ביחס ישר בכוח המניע ובהתנגדות התווך המוליך למעבר. ככל שהכוח המניע גדל וההתנגדות קטנה קצב החילוף גדל. לכן, מקובל לתאר תהליכי חילוף חום מוחשי וכמוס בין משטח לאוויר לפי חוק אוהם. במשוואות לתיאור מעברי חום מוחשי הכוח המניע הוא הפרש הטמפרטורה והמשוואה המקובלת לתיאורם היא $H_{surf} = \rho C_p (T_{surf} - T_a) / r_H$. במשוואה זו: H_{surf} הוא שטף החום המוחשי $(W m^{-2})$; ρ היא צפיפות האוויר $(kg m^{-3})$; C_p הוא קיבול החום הסגולי של האוויר בלחץ קבוע $(J m^{-3} K^{-1})$; T_{surf} היא טמפרטורת המשטח $(^{\circ}K)$; T_a היא טמפרטורת האוויר $(^{\circ}K)$; ו- r_H היא ההתנגדות האווירודינאמית של האוויר למעבר חום $(s m^{-1})$. בדומה למשוואת חילוף החום המוחשי, המשוואה המקובלת לתיאור מעבר חום כמוס היא $LE_{surf} = \rho C_p \gamma^{-1} (e_{surf} - e_a) / r_E$. במשוואה זו: LE_{surf} הוא שטף החום הכמוס $(W m^{-2})$; γ הוא

הקבוע הפסיכרומטרי ($e_{surf}; Pa \text{ } ^\circ K^{-1}$) הוא לחץ אדי המים בפני המשטח ($e_a; Pa$); הוא לחץ אדי המים באוויר (P_a); ו- r_E היא ההתנגדות האווירודינאמית של האוויר למעבר אדי מים ($s \text{ m}^{-1}$).

תהליכי חילוף החום ואדי המים בין משטח לאוויר סביבו מתקיימים בשני מנגנונים עיקריים בהתאם לתנאי הסביבה (Zhang and Lemeur, 1992). תהליכי הסעה חופשית (free convection) מתקיימים כשהאוויר מסביב למשטח ניח ונשלטים על ידי הפרש הטמפרטורה בין המשטח לאוויר. לעומתם, תהליכי הסעה מאולצת (forced convection) מתקיימים כשהאוויר נייד ונשלטים על ידי מהירות האוויר. גם שילוב של שני המנגנונים יכול להתקיים. לאופיים של תהליכי החילוף השפעה על ההתנגדויות האווירודינאמיות למעבר חום ואדי מים של שכבת הגבול.

ההתנגדויות האווירודינאמיות למעבר חום ואדי מים בין משטח לאוויר תלויות בתכונות שכבת הגבול מסביב למשטח ובתכונות המשטח עצמו. לפי Day and Bailey (1999) שכבת הגבול מוגדרת כשכבת האוויר בה מתקיימים מפלי טמפרטורה ולחץ אדי מים מסביב למשטח כלשהו. ההתנגדות האווירודינאמית תלויה בתכונות האוויר בשכבת הגבול סביב המשטח כמו אופי זרימת האוויר, הטמפרטורה ותכולת אדי המים של האוויר ובתכונות המשטח כמו גודלו האופייני, הטמפרטורה והלחות שלו (Stanghellini, 1987; Zhang and Lemeur, 1992; Campbell and Norman, 1998; Day and Bailey, 1999).

ההתנגדות האווירודינאמית למעבר חום ואדי מים בין משטח לאוויר סביבו ניתנת למדידה כשהמשטח הוא קטן ואחיד כמו עלה בודד. כאשר אופיו של המשטח מורכב יותר (לדוגמא, עלווה של צמח שלם) נקבעת ההתנגדות האווירודינאמית בצורה אמפירית (Stanghellini, 1987; Zhang and Lemeur, 1992). לפי Zhang and Lemeur (1992) לאופיו של תהליך ההסעה ולהפרש הטמפרטורה בין המשטח לאוויר השפעה לא רק על גודל ההתנגדות האווירודינאמית אלא, גם על בחירת המשוואה שתתאר אותה במדויק. כפי שראינו קביעה מדויקת של ההתנגדות האווירודינאמית היא מורכבת. מורכבות הנושא ניכרת לא רק בהגדרת תנאי הסביבה במערכת ובבחירת המשוואה לתיאור ההתנגדות האווירודינאמית. פן אחר במורכבות זו הוא רגישותה הרבה של ההתנגדות לשינויים מיקרוקלימיים בסביבה. (Stanghellini, 1987) שחקרה את ההתנגדות האווירודינאמית של עלים במבנה גידול, מצאה שהיא רגישה מאוד למהירות האוויר ומימדי העלה האופייניים. לפי Stanghellini ככל שהעלה ומהירות הרוח קטנים יותר, לטעות בקביעתם תהיה השפעה גדולה יותר על הערכת ההתנגדות האווירודינאמית של האוויר. לכן, לטעות כזו תהיה השפעה ניכרת על דיוק ההערכה של חילופי החום המוחשי והכמוס במבנה. במבני גידול מהירות אוויר היא קטנה בדרך כלל (Day and Bailey, 1999) ולכן קשה להעריך במדויק את חילופי החום המוחשי והכמוס המתרחשים בהם.

למרות הקושי בקביעה מדויקת של ההתנגדות האווירודינאמית של האוויר למעבר חום ואדי מים מקובל להשתמש במדד זה להערכת שטפי החום המוחשי והכמוס במבני גידול. כדי לפשט ככל האפשר את קביעת ההתנגדות האווירודינאמית משתמשים בהנחות עבודה. דוגמא להנחה מקובלת היא שההתנגדויות למעברי חום ואדי מים באוויר שוות (Stanghellini, 1987). הנחה מקובלת אחרת היא שתנאי האטמוספירה במבנה הגידול יציבים (Tanny et al., 2006). שימוש בהנחה האחרונה מאפשר קביעת התנגדות אווירודינאמית לקרקע ללא התחשבות בהפרשי טמפרטורה בין הקרקע לאוויר (Monteith and Unsworth, 1990) (ראה נספחים 1.2.2).

לאחר שסקרנו את מרכיבי מאזן האנרגיה במבנה הגידול ננסה לסכמם כלליות. לפי Baille (1999) ניתן לתאר באופן כללי מאזן האנרגיה במבנה גידול במצב שיווי משקל בפרק זמן כלשהו (t) תוך שימוש במשוואה לפיה האנרגיה הנקלטת במבנה שווה לאנרגיה הנפלטת ממנו בתוספת השינוי באנרגיה הנאגרת

בקרקה המבנה. המשוואה לתיאור מאזן האנרגיה היא $H_{gh} = U_{gh}(T_i - T_o) + C_s(dT_s/dt)$ במשוואה זו: H_{gh} היא תוספת האנרגיה ליחידת שטח במבנה הכוללת תוספת אנרגיה בקרינה וחום מוחשי וכמוס ($W m^{-2}$); U_{gh} הוא מקדם איבוד האנרגיה הכללי ליחידת שטח במבנה הכולל איבודי אנרגיה בקרינה וחום מוחשי וכמוס ($W m^{-2}$); T_i ו- T_o הן טמפרטורות האוויר מתוך ומחוץ למבנה, בהתאמה; C_s הוא קיבול החום ליחידת שטח של הקרקע ($kJ m^{-2} °C^{-1}$); ו- dT_s/dt הוא השינוי בטמפרטורת הקרקע בפרק הזמן בו נערך המאזן ($°C s^{-1}$).

חילופי המסה במבנה גידול כוללים בעיקר חילופי חמצן, פחמן דו חמצני ואדי מים. חילופי החמצן והפחמן הדו חמצני אינם נוגעים ישירות לנושא עבודה זו ולכן, לא נעסוק בהם.

לפי Day and Bailey (1999) למאזן אדי המים באוויר במבנה גידול השפעה גדולה על תנאי המיקרואקלים במבנה. מאזן אדי מים באוויר במבנה ללא מערכת ערפול מושפע בעיקר משני מקורות עיקריים לתוספת אדי מים ושני מבלעים לסילוקם (Jolliet, 1999). המקורות לאדי מים הם ההתאדות מהקרקע והדיות מהצמחים. המבלעים לאדי המים הם התעבות טל על כיסוי המבנה והעלווה וכן אדי המים המוסעים החוצה מהמבנה על ידי אוורור. שינוי בתנאי המיקרואקלים במבנה הגידול יכול להביא להתאדות של המים שהתעבו על המבלעים ולהפוך אותם למקורות לאדי מים עד לאידוי כל המים שהצטברו עליהם.

למבנה גידול יש נפח פנימי המוגדר על ידי הכיסוי שלו. לכן, לפי Jolliet (1999) חוק שימור אדי המים תקף באוויר בתוך המבנה. חוק השימור קובע כי סכום המקורות לאדי מים באוויר שווה לסכום המבלעים בתוספת השינוי בתכולת אדי המים באוויר בתוך המבנה. לכן, ניתן לתאר את מאזן אדי המים באוויר במבנה גידול בכל פרק זמן (t) בעזרת משוואת המאזן $E_t + E_e = E_c + E_v + E_a$. במשוואה זו: t הוא פרק הזמן לעריכת המאזן; E_t הוא שטף אדי המים מהצמחים לאוויר ($kg m^3 t^{-1}$); E_e הוא שטף אדי המים מהכיסוי והקרקע לאוויר במבנה ($kg m^3 t^{-1}$); E_c הוא שטף אדי המים מהאוויר המתעבים על הצמחים והכיסוי של המבנה ($kg m^3 t^{-1}$); E_v הוא שטף אדי המים היוצאים מהמבנה על ידי האוורור ($kg m^3 t^{-1}$); ו- E_a הוא השינוי בתכולת אדי המים באוויר במבנה ($kg m^3 t^{-1}$). כמו תהליכי חילוף החום גם תהליכי חילוף אדי המים במבנה הגידול מושפעים מגורמי הסביבה. בשונה מחילופי החום המושפעים רק מגורמים פיסיקאליים, תהליכי חילוף אדי המים מושפעים גם מגורמים ביולוגיים כמו התנגדות הפיוניות למעבר אדי מים (Stanghellini, 1987; Zhang and Lemeur, 1992; Fuchs et al., 1997; Jolliet, 1999).

כפי שראינו תהליכי החילוף של החום ואדי המים בתוך מבנה הגידול ובין המבנה לסביבה החיצונית שלו קשורים קשר ישיר לאופי זרימת האוויר במבנה וקצב החלפות האוויר בין המבנה לסביבתו החיצונית (Day and Bailey, 1999; Bartzanas et al., 2004). במבנה גידול עם מערכת אוורור טבעית קצב החלפות האוויר נקבע בעיקר על ידי גורמי אקלים חיצוניים. הגורמים העיקריים הם מהירות וכיוון הרוח (הכוח המניע הוא הפרשי לחץ); הפרשי הטמפרטורה והלחות בין הפנים והחוץ והקרינה הגלובאלית (כוחות ציפה) (Gary and Baille, 1999). במבנה גידול צר וארוך עם פתחי צד דוגמת מנהרה עבירה, עיקר החשיבות בקביעת קצב החלפות האוויר נודעת למהירות וכיוון הרוח מחוץ למבנה (Boulard et al., 1997). עם זאת כשמירות הרוח נמוכה ובין פנים המבנה לחוץ קיים הפרש טמפרטורות גדול, גם לכוחות הציפה ועומס החום חשיבות בקביעת זרימת האוויר במבנה (Bartzanas et al., 2004).

ניתן להעריך את קצב החלפות האוויר במבנה גידול באמצעות במספר שיטות (Bartzanas et al., 2004). השיטה הראשונה היא מדידה ישירה של קצב החלפת האוויר באמצעות מדידה של קצב הדעיכה עם הזמן של ריכוז גז סמן שהוכנס למבנה (Kittas et al., 1995; Boulard et al., 1997). שיטה נוספת היא חישוב

קצב החלפת האוויר במבנה ממאזן האנרגיה של המבנה (Wang & Deltour, 1996; Demrati et al., 2001). חסרון של שיטות אלה הוא בהעדר אפשרות מיפוי של מאפייני זרימת האוויר ופרופיל הטמפרטורה במבנה (Boulard et al., 1997). לכן, בשנים האחרונות הולך וצובר תאוצה השימוש בתוכנות מחשב להדמיה של תנועת נוזלים (computational fluid dynamics programs) שמאפשרות חיזוי קצב החלפת האוויר ואופי תנועת האוויר במבנה (Lee, 1998; Kacira et al., 1998; Woodruff, 1997; Boulard et al., 1997; Short, 1996; and Short, 2000;2001).

2.4. המיקרואקלים ויצירת טל במבני גידול בלילה

חילופי הקרינה הסולארית והתרמית במבנה גידול מכתיבים את יתר תהליכי העברת האנרגיה של המבנה (Rosa, 1988). בשעות הלילה קרינה סולארית איננה מגיעה מהשמש לצדו של כדור הארץ הפונה הרחק מהשמש. בשעות אלה מבנה הגידול מתקרר בעיקר על ידי פליטה של קרינה תרמית ארוכת גל (Silva and Day and Bailey, 1999; Rosa, 1987). לכן, תנאי המיקרואקלים במבנה בלילה שונים מאלה השוררים בו בשעות היום. כך לדוגמא, בשעות היום השטף הגבוהה יחסית של הקרינה הגלובאלית גורם להתחממות של הסביבה במבנה הגידול ומחוץ לו. הקרינה הגלובאלית הפוגעת בקרקע המבנה ביום גורמת לשטף האנרגיה אל הקרקע להיות חיובי והקרקע מתחממת. לעומת זאת בלילה, כששטף הקרינה הגלובאלית הוא אפס, פני הקרקע פולטים חום וקרינה ומתקררים ושטף האנרגיה מהקרקע הוא שלילי.

תוצאה נוספת של התחממות האוויר במבנה הגידול ביום היא ירידה בהתנגדות האווירודינאמית למעבר חום ואדי מים של שכבת הגבול המקיפה את המשטחים במבנה (Zhang and Lemeur, 1992; Day and Bailey, 1999). לכן, בשעות היום שטפי החום המוחשי והכמוס במערכת המיקרואקלימית של מבנה גדולים בדרך כלל מהשטפים בשעות הלילה. לדוגמא, Zhang and Lemeur (1992) מצאו שכשהשמיים היו בהירים שטף החום המוחשי המרבי במבנה הגידול ביום היה גדול פי ששה מאשר בלילה. הם דווחו ששטף החום הכמוס המרבי ביום בהיר היה 300 W m^{-2} לעומת אפס בלילה. עם זאת, כשהשמיים היו מעוננים המצב השתנה. אז, שטף החום המוחשי במבנה היה גדול רק פי שניים ביום לעומת שטף החום בשעות הלילה. כמו כן, שטף החום הכמוס המרבי ביום מעונן ירד ל- 120 W m^{-2} ושטף החום הכמוס בלילה מעונן עלה ל- 20 W m^{-2} לעומת אפס בלילה בהיר.

תנאי האקלים מחוץ למבנה הגידול מכתיבים את תנאי המיקרואקלים בתוכו ביום ובלילה. קאנץ (1984) חקרה את השפעת תנאי האקלים בלילה על המיקרואקלים במנהרה עבירה עם כיסוי פוליאאתילן וצמחי מלפפון. הבדיקות נערכו במקביל בשני מבנים סמוכים. הקרקע במבנה הראשון חופתה בפוליאאתילן שקוף ובמבנה השני הייתה הקרקע חשופה. קאנץ השוותה טמפרטורות ממוצעות בלילה בין המבנים ומצאה שבלילה בהיר כשהקרקע מחופה ביריעת פוליאאתילן, טמפרטורות האוויר מחוץ למבנה הייתה גבוהה מטמפרטורת האוויר בתוכו ב- 3.3°C , העלווה הייתה קרה ב- 0.1°C מהאוויר במבנה והקרקע הייתה חמה ממנו ב- 3.2°C . לעומתו, במבנה בו הקרקע הייתה חשופה טמפרטורות האוויר מחוץ למבנה הייתה נמוכה מטמפרטורת האוויר בתוכו ב- 3°C , העלווה הייתה קרה ב- 3°C מהאוויר במבנה והקרקע הייתה חמה ממנו ב- 2°C .

יצירת טל היא התעבות של אדי מים מהאוויר על משטח כלשהו (Agam et al., 2006). כדי שיווצר טל על משטח טמפרטורת המשטח צריכה להיות נמוכה מטמפרטורת הטל של האוויר בשכבת הגבול המקיפה אותו. בתנאים "טבעיים" טמפרטורת המשטח יורדת מתחת לטמפרטורת הטל של האוויר סביבו אם חלקה

היחסי של ההתקררות הקרינתית במאזן האנרגיה של המשטח יהיה מכריע. התקררות קרינתית כזו מתרחשת לרוב רק בתנאי שזרימת האוויר מסביב למשטח לא טורבולנטית (Richards, 2005).

יצירת טל במבנה גידול מתרחשת בתהליך זהה. תהליך יצירת הטל במבני גידול משויך לעיתים לשעות הלילה (קאנץ, 1984; Luo and Goudriaan, 2000). יש לסייג אמירה זו ולציין שאין מניעה שהתעבות טל תתרחש גם ביום כשהתנאים מתאימים, בעיקר במבני גידול שהלחות של האוויר בתוכם גבוהה (Pieters et al., 1995). לאחר שנוצרה טיפת טל על משטח, היא מתחילה לגדול בשל היוצרות מפל ריכוזים של מולקולות מים מסביבה (Agam et al., 2006). כך, גדלות טיפות המים על המשטח עד שהן באות במגע עם שכנותיהן ומתאחדות לטיפה גדולה.

התעבות טל מהאוויר קשורה בשני תהליכים אטמוספריים מנוגדים. מחד, כדי שמשטח יתקרר מתחת לטמפרטורת הטל דרושה התקררות קרינתית שלו. קצב ההתקררות תלוי בעיקר באמסיביות השמיים שהם המבלע המרכזי לקרינה תרמית בלילה. אמסיביות השמיים עולה ככל שהאוויר באטמוספירה מכיל יותר לחות. כלומר כשהלחות באוויר גבוהה קצב יצירת הטל צפוי לרדת. מנגד, לחות באוויר דרושה ליצירת טל. כלומר כשהלחות גבוהה קצב יצירת הטל צפוי לעלות.

התכונות הקרינתיות של משטח רטוב שונות מאלה של משטח יבש מכיוון שהמים אטומים למעבר קרינה אלקטרומגנטית ארוכת גל (Garzoli and Blackwell, 1981). תופעה זו היא בעלת חשיבות אנרגטית ומיקרואקלימית במבנה גידול כשמתרחשת התעבות של טל על כיסוי המבנה בלילה וזאת משתי סיבות. ראשית, לתכונות התרמיות של כיסוי מבנה הגידול השפעה מכרעת על מאזן הקרינה התרמית ארוכת הגל במבנה. שנית, בלילה בהעדר מערכת חימום, הקרינה התרמית ארוכת הגל היא המרכיב הדומיננטי במאזן האנרגיה הכולל של המבנה (Silva and Rosa, 1987). קאנץ (1984) מצאה שהתעבות טל על כיסוי המבנה יכולה להקטין עד 15% את איבוד החום הכולל מהמבנה. בתנאים כאלה ניתן להניח שגם התקררות נוף הצמחים במבנה תהיה איטית יותר ופחות טל יתעבה על העלווה. מכאן שאפשרית גם ההנחה שהתעבות טל על כיסוי המבנה יכולה לסייע בקיצור משך רטיבות העלווה בתנאי שמים מהכיסוי לא מטפטפים על העלווה.

כפי שצוין לעיל למשך רטיבות העלווה השפעה מכרעת על התפתחות מחלות. לכן, הערכת משך הזמן בו תישאר העלווה רטובה לאחר שנוצר עליה טל היא כלי חשוב לחיזוי התפרצות של מחלות (Byrne et al., 2007; Dalla Marta et al., 1998). אולם, קשה למדוד ולחזות את משך רטיבות העלווה (Dalla Marta et al., 2007). מקור הקושי במורכבות של תהליכי ההתעבות וההתאדות של טל על צמחים. מורכבות התהליכים נעוצה ביחסי ההדדיות בין העלה הבודד; מבנה הנוף של הצמח; והמיקרואקלים. לדוגמא, משך רטיבות העלווה הנגרמת מטל ארוך יותר בחלקי הצמח העליונים ומתקצר כשמתקרבים לפני הקרקע. זאת, מכיוון שחלקי הצמח העליונים מאבדים יותר קרינה לשמיים. דוגמא נוספת היא מיקומו במרחב של העלה הבודד הקובע את משך הרטיבות שלו, שכן הוא המכתיב את מידת החשיפה של העלה לרוח ולקרינה סולארית.

שתי דרכים עיקריות משמשות להערכת משך רטיבות העלווה לצורך מניעת התפרצות מחלות בגידולים חקלאיים. ניתן למדוד את משך הרטיבות באמצעות חיישנים או לחזות אותו באמצעות מודלים. לפי Magarey et al. (2006b) הדרך המקובלת בחקלאות היא מדידה של משך הרטיבות באמצעות חיישנים. זאת מכיוון שהמודלים לחיזוי משך רטיבות העלווה הם מורכבים ודורשים בדרך כלל נתוני קלט שחלקם קשים להערכה. יתרה מכך, המורכבות של המשוואות במודלים אלה דורשת לרוב פתרון מקורב. למרות זאת, מאז שנות השמונים של המאה ה-20 פותחו עשרות מודלים לחיזוי משך רטיבות העלווה מטל וגשם.

אחד המודלים הראשונים לחיזוי משך רטיבות העלווה מטל בגידול בשטח פתוח פותח על ידי Pedro and Gillespie (1982). המודל מתבסס על מאזן האנרגיה של העלווה. החיזוי נערך בעזרת נתונים הנמדדים

בתחנה מטאורולוגית שכללו את טמפרטורת האוויר, טמפרטורת הטל, מהירות הרוח והעננות. בעזרת פתרון מאזן האנרגיה של עלה בודד חושב הפרש הטמפרטורות בין העלה לאוויר. לאחר מכן, חושב שטף החום הכמוס של העלים. כששטף החום הכמוס היה קטן מאפס נוצר טל והוא היה קיים עד ששטף החום הכמוס היה חיובי במשך זמן שהספיק לאידוי כל הטל שהתעבה. בחינת רגישות המודל העלתה שגיאה של שעה אחת לעלים חשופים לשמש ישירה ושעה וחצי לעלים מוצלים.

המודל של Pedro and Gillespie (1982) היווה יריית פתיחה במרוץ לפיתוח מודלים אחרים לחיזוי משך רטיבות העלוה בגידולים שונים בשדה (Huber and Gillespie, 1992; Gleason et al., 1994; 1995; Papastamati et al., 2004; Jacobs et al., 2005; Kim et al., 2005; Dalla Marta et al., 2005; 2007; Magarey et al., 2006a,b). עיקר העבודה שנעשתה בתחום התמקדה בפיתוח ושכלול גישת מאזן האנרגיה של Pedro and Gillespie (1982) לחיזוי משך רטיבות העלוה והתאמת המודלים לגידולים שונים בתרחישים ומיקומים שונים.

Zhang et al. (1997) פיתח כנראה את המודל הראשון לחיזוי של משך רטיבות העלוה במבנה גידול. המודל מבוסס על עבודתם של Avissar and Mahrer (1982) ומאפשר פתרון מקורב של מאזני האנרגיה והלחות במבנה לחיזוי טמפרטורות האוויר והעלוה והלחות היחסית. בעזרת הנתונים הללו חושב ההפרש בין טמפרטורות הטל של האוויר וטמפרטורות העלוה לקביעת משך הרטיבות שלה בשגיאה של כשעתיים ליום. ככל הנראה מאז Zhang et al. (1997) לא פותח מודל נוסף לחיזוי משך רטיבות העלוה במבנה גידול. קיימות בספרות גם דוגמאות בודדות של ניסיונות לחזות את משך רטיבות העלוה בגישות שאינן פיסיקאליות. לדוגמא, Francl and Panigrahi (1997) פיתחו מודל לחיזוי משך רטיבות העלוה בחיטה בעזרת Artificial neural networks שהיא מערכת ממוחשבת לעיבוד מידע שפותחה במקור לחקר המוח. בין נתוני הקלט של המודל היו הלחות היחסית וקריאות של חיישני רטיבות. המודל הצליח לחזות את משך רטיבות העלוה בשגיאה של שעה ביום.

2.5. מודלים לחיזוי המיקרואקלים במבני גידול

חיזוי תנאי המיקרואקלים השוררים במבנה הגידול עשוי גם לסייע למגדלים בניהול היצור החקלאי (Abdel-Ghany and Kozai, 2006). במרוצת השנים פותחו מספר מודלים מתמטיים לחיזוי המיקרואקלים במבני גידול לפי תנאי האקלים החיצוני. המודלים כללו גם משתנים המתארים את התכונות של מרכיבי מערכת מבנה הגידול. מרבית המודלים התבססו על פתרון מאזן האנרגיה במבנה בשווי משקל, במערכת אנרגטית המורכבת מארבע שכבות: 1. כיסוי המבנה; 2. האוויר במבנה; 3. הצמחים; ו-4. הקרקע. במרבית המודלים נלקחה רק הקרקע בחשבון כמסה תרמית במערכת האנרגטית.

אחד המודלים הראשונים לחיזוי המיקרואקלים במבני גידול פותח על ידי Kimball (1973). המודל התבסס על מערכת משוואות שפיתח Businger (1963) לתיאור מאזן האנרגיה במבנה גידול בארבעת השכבות האנרגטיות (כיסוי, אוויר, צמחים וקרקע) כתלות באקלים החיצוני ותכונות המבנה. הנעלמים במערכת המשוואות היו הטמפרטורה ולחץ אדי המים בכל שכבה. Kimball (1973) היה מהראשונים להשתמש במחשב לפתרון מקורב של מערכת המשוואות בהנחה שאגירת החום של ארבעת מרכיבי המערכת קטנה וזניחה ביחס לגודלם של שטפי האנרגיה במערכת. לכן, התאפשר פתרון מערכת המשוואות במצב של שיווי משקל אנרגטי בו סכום כל שטפי האנרגיה במערכת שווה לאפס. התחזיות לטמפרטורות האוויר והקרקע ושטפי הקרינה שחושבו על פי המודל של Kimball (1973) היו קרובות לנתונים מדודים.

Avissar and Mahrer (1982) פתחו ואמתו מודל דומה לזה של Kimball (1973). ההבדל העיקרי בין המודל שלהם למודלים דומים שהתפרסמו עד תקופתם היה שהמודל שלהם היה מקיף יותר והתיימר לחזות את התנאים במבנה במהלך עונת גידול. המודל אומת מול נתוני טמפרטורה ולחות שנמדדו לאורך תקופה ארוכה במספר דגמים של מבני גידול והצליח לחזות במגוון תרחישים את טמפרטורות האוויר והקרקע בשגיאה של 2°C ו- 1°C , בהתאמה ואת הלחות היחסית בשגיאה של עד 12%. בנוסף לאימות המודל נערכו לו גם מבחני רגישות שהראו שחלופות שונות לחישוב מקדם חילוף האנרגיה הכולל של המבנה עם הסביבה גרמו להבדלים של עד 15°C ; 6°C ; ו- 5°C בטמפרטורות נוף הצמחים; האוויר; והקרקע, בהתאמה.

Abdel-Ghany and Kozai (2006) הציעו מודל דינאמי לחיזוי המיקרואקלים במבנה גידול עם צמחים בעציצים וקרקע מחופה ביריעת פוליאטילן שחור. גם הם השתמשו במערכת משוואות לתיאור מאזן האנרגיה בארבע השכבות האנרגטיות (קרקע, צמחים, אוויר וכיסוי). אך, בניגוד למודלים אחרים פתרון מערכת המשוואות שלהם לא נערך במצב שיווי משקל אנרגטי אלא במצב דינאמי. תוצאות החיזוי של טמפרטורת האוויר והלחות היחסית במבנה הגידול שהושו חזותית לנתונים מדודים, הראו התאמה טובה. מהימנות חיזוי טמפרטורת הקרקע והעלווה לא נבחנה.

חיזוי המיקרואקלים במבני גידול מתאפשר גם בגישות לא פיסיקאליות. לדוגמא, Seginer et al. (1994) הציעו מודל לחיזוי הטמפרטורה והלחות באוויר במבני גידול למטרות בקרת אקלים לפי נתוני האקלים מחוץ למבנה. המודל מורכב מרשתות ניאורליות (Neural Networks) שהן סוג של מודל קופסא שחורה יחידה (one black-box type model) לחיזוי תופעות לא ליניאריות. בעזרת הרשתות הניאורליות מחקה מחשב התנהגות של מערכת משוואות אלגבריות עם שכבות קלט ופלט ומתאים להן מקדמים לפי הקשרים האמפיריים בין המדדים המיקרואקלימיים מחוץ למבנה ובתוכו. המודל חזה את טמפרטורת האוויר הלח והיבש במבנה בשגיאה של 1.18°C ו- 0.93°C , בהתאמה.

Litago et al. (2005) הציעו מודל סטטיסטי לחיזוי הטמפרטורה והלחות היחסית באוויר במבנה גידול לעגבניות במהלך עונת גידול. החיזוי מתבצע בעזרת שני מודלים נפרדים לפתרון מאזני האנרגיה והמסה של האוויר במבנה. כל מודל פותר "משוואת מבנה יחיד" (a single structural equation model). צורתן הסופית של שתי המשוואות במודל נקבעה לפי ההתאמה המיטבית של הנתונים החזויים והמדודים שנבחנו בעזרת קואינטגרציה ותיקון טעויות (co-integration and error correction methods). תוצאות ההדמיה הראו התאמה טובה מאוד בין הנתונים החזויים למדודים. טמפרטורת האוויר והלחות היחסית נחזו בשגיאה קטנה של 0.4°C ו-0.8%, בהתאמה.

יתרונם של מודלים אמפיריים מתבטא בפשטותם היחסית וברמת הדיוק הגבוהה שלהם (Seginer et al., 1994; Litago et al., 2005). חסרונם הבולט מתבטא בכך שניתן ליצור אותם רק לאחר שמבנה הגידול בנוי. לכן, הם לא מתאימים למטרות תכנוניות. לעומתם, מודלים פיסיקאליים הם מסורבלים וקשים ליישום. אך, מאפשרים חיזוי השפעתם האפשרית של גורמים שונים למטרות תכנון (Kimball, 1973; Avissar and Mahrer, 1982; Abdel-Ghany and Kozai, 2006; Singh et al., 2006).

2.6. יריעות פוליאטילן לחקלאות

פוליאטילן הוא מתוצרי הפלסטיק החשובים והנצרכים ביותר בחקלאות. בכל שנה משתמשים חקלאים בעולם במיליון טונות של פוליאטילן לכיסוי של מבני גידול וחיפוי קרקע (Dilara and Briassoulis, 2000). אורך החיים הממוצע של יריעת פוליאטילן המוגדר כמשך הזמן בו שומרת היריעה על תכונותיה הפיסיקאליות

(בדרך כלל עד הידרדרות של 50%) נע בין שנת גידול אחת עד ארבע שנים. משך חיי היריעה מושפע מתנאי הסביבה אליהם היא נחשפה ותכונותיה הכימיות. לדוגמא, גורמים סביבתיים שונים כמו קרינת השמש והטמפרטורה יוצרים שינויים כימיים בפולימר וכך, משנים לאורך זמן את תכונותיו הפיסיקאליות כמו חוזק ותכונותיו הקרינתיות. ניתן לשפר את עמידות יריעת הפוליאטילן בעזרת שימוש בתוספים כמו אתילן וניל אצטט (ethylene vinyl acetate). לכן, במרבית יריעות הפוליאטילן המשמשות כיום בחקלאות יש תוספת של 4-10% אתילן וניל אצטט. תוספת כזו משפרת את האלסטיות, החוזק ועמידות היריעה לקרינה אולטרה סגולה. כמו כן, תוספת אתילן וניל אצטט מקנה ליריעה אפקט תרמי המתבטא בהגדלת האמסיביות.

קיימים כמה סוגים של פוליאטילן הנבדלים בצפיפותם אך, פוליאטילן בצפיפות נמוכה (low density) הוא הנפוץ ביותר בחקלאות. זאת בשל היחס עלות-תועלת הגבוהה שלו בשימוש חקלאי לעומת סוגי הפוליאטילן האחרים שהם יקרים ממנו או בעלי תכונות לא רצויות בחקלאות (Dilara and Briassoulis, 2000). לכן, מעתה נתייחס רק לפוליאטילן בצפיפות נמוכה להלן, פוליאטילן.

פוליאטילן הוא פולימר גבישי למחצה המורכב ממולקולות שרשרתיות של אתילן. ביריעת פוליאטילן הפולימר יוצר לסירוגין אזורים בעלי מבנה גבישי ואמורפי. עיקר ההידרדרות בתכונות החומר עם הזמן מתרחשת באזורים האמורפיים. חלק מהתכונות המכאניות של יריעת הפוליאטילן נקבע מהשילוב בין המבנה השרשרתי של המולקולות ושיטת הייצור בהוצאה ומתיחה (extrusion). שילוב גורמים זה מביא לארגון כיווני של המולקולות השרשרתיות ביריעה במקביל לציר המתיחה. כתוצאה מכך, התכונות המכאניות של היריעה משתנות לפי הכיוון. לדוגמא, האלסטיות של היריעה מרבית במקביל לציר המתיחה ומזערית בכיוון הניצב (Dilara and Briassoulis, 2000).

בעזרת טכנולוגיות חדשות ניתן לייצר יריעות פוליאטילן בעלות תכונות שונות כמו: מגוון צבעים, תכונות תרמיות משופרות (IR), מניעת טפטוף (anti-drip) והעברה בררנית של קרינה (Giacomelli and Roberts, 1993). שימוש ביריעות פוליאטילן בעלות תכונות כאלה עשוי לאפשר שליטה טובה יותר במיקרואקלים של הגידול בהשקעת משאבים נמוכה יחסית. לכן, יש לעמוד על תכונותיהן הפיסיקאליות של היריעות שהן בעלות חשיבות בתהליכי חילוף האנרגיה עם הסביבה.

קיבול החום של יריעות פוליאטילן הוא קטן ולכן נודעת חשיבות יתרה לתכונות הקרינתיות שלהן (Dilara and Briassoulis, 2000). שני תחומי אורכי גל של קרינה אלקטרומגנטית הם בעלי חשיבות מכרעת בקביעת המיקרואקלים החקלאי, הקרינה קצרת הגל ($0.2-0.7\mu\text{m}$) שמקורה מהשמש והקרינה התרמית ארוכת הגל ($>3\mu\text{m}$) שנפלטת מכל הגופים בסביבה (Papadakis et al., 2000). ליריעות פוליאטילן יש תכונות שונות בכל הנוגע ליכולת הקליטה, הפליטה וההחזרה שלהן לקרינה בכל תחום של אורכי גל. לכן, במהלך הבחירה של יריעת פוליאטילן לצורך מסוים, יש להגדיר את הדרישות ולהתייחס בנפרד לתכונות היריעה הנוגעות לקרינת השמש (תכונות פוטומטריות) והקרינה התרמית (תכונות תרמיות).

נביא מספר דוגמאות לשימושים חקלאיים בתכונותיהן של יריעות פוליאטילן שונות. תחילה יריעות פוליאטילן צבעוניות המשמשות בחקלאות בעיקר לחיפוי הקרקע (Giacomelli and Roberts, 1993). השימוש ביריעות בצבעים שונים נועד לרוב לדחיית מזיקים כמו כנימות עש (*Bemisia argentifolii*) בעגבניות בשדה הפתוח (Csizinsky et al., 1995) ולהשפעה על תנאי המיקרואקלים מעל ומתחת לפני הקרקע (Tarara, 2000). בהמשך נביא מספר דוגמאות לשינוי המיקרואקלים בעזרת חיפוי קרקע שונים.

יריעות תרמיות, יריעות אל-נטף ויריעות שקופות בררניות משמשות בעיקר לכיסוי מבני גידול. היריעות התרמיות נועדו לצמצם את איבוד החום בקרינה באמצעות תוספי IR המגדילים את אמסיביות

היריעה ובכך מצמצמים בשיעור ניכר את איבוד הקרינה התרמית במערכת מבנה הגידול (Giacomelli and Roberts, 1993). ביריעות אל-נטף, תוסף מיוחד משנה את תכונות פני השטח של היריעה ומקטין את זווית המגע עם היריעה של טיפות המים המתעבות. כתוצאה מכך על פני יריעות אל-נטף נוצרת שכבת מים רציפה. בשל כוחות התאחיזה של המים וכוח הכובד הם זורמים על פני היריעה לחלקה התחתון וניגרים ממנה. לעומת זאת, על יריעות פוליאטילן ללא תוסף אל-נטף מתעבות טיפות שגדלות (ראה 2.4). ונושרות לבסוף מצידה התחתון של היריעה בשל משקלן ועלולות להרטיב את העלווה. יריעות שקופות ברניות בתחום הקרינה הסולארית שהן מעבירות ובאופייה (קרינה ישירה או מפוזרת) מאפשרות שליטה טובה יותר במאזן הקרינה ובאמצעותו במיקרואקלים של הגידול. שימוש מושכל בתכונות מאפשר לצמצם נזקי מחלות, לשפר את ההטמעה ולהעלות את איכות וכמות היבול (Giacomelli and Roberts, 1993; Tarara, 2000; Papadakis et al., 2000; Jewett and Jarvis, 2001).

כפי שצוין שני השימושים העיקריים של יריעות פוליאטילן בחקלאות הם כיסוי מבני גידול וחיפוי הקרקע. בבחירת יריעה לשימוש חקלאי על המגדל להכיר את השיקולים הקשורים לתכונות היריעה. Giacomelli and Roberts (1993) דנים בשיקולים בבחירה של יריעות פוליאטילן לכיסוי של מבני גידול. לדעתם בעת בחירת התכונות הרצויות של כיסוי למבנה גידול יש להתייחס בעיקר ליכולת העברת הקרינה הסולארית של היריעה ולתרומתה האפשרית לשימור האנרגיה במערכת. ניקח לדוגמא, יריעת כיסוי שמעבירה קרינה אולטרה סגולה (את חלקה של הקרינה האולטרה סגולה שלא נבלע באטמוספירה) ובעלת מקדם העברה גבוהה לקרינה פעילה פוטוסינטטית. יריעה כזו תורמת להתחממות מערכת מבנה הגידול במהלך היום. בבחירה של יריעות פוליאטילן לכיסוי של מבני גידול יש להביא בחשבון גם את תכונות היריעה הנוגעות לקרינה תרמית ארוכת גל (Giacomelli and Roberts, 1993). לדוגמא, יריעה עם אמסיביות נמוכה ומקדם העברה גבוה לקרינה תרמית תסייע לאיבוד מהיר של עודפי החום מהמערכת. לעומתה, יריעה עם אמסיביות גבוה ומקדם העברה נמוך לקרינה תרמית תסייע באגירת החום במבנה הגידול. כך על ידי הגדרת הצרכים המיקרואקלימיים ניתן להתאים יריעת כיסוי לצרכים החקלאיים. Tarara (2000) מביאה דוגמאות לשיקולים חקלאיים בבחירה של יריעות פוליאטילן לחיפוי קרקע. לפי Tarara בבחירה של יריעת פוליאטילן לחיפוי פני הקרקע עלינו לקחת בחשבון את השפעת היריעה על תנאי המיקרואקלים מעל ומתחת לפני הקרקע. לדוגמא, שימוש ביריעות פוליאטילן שקוף ושחור לחיפוי הקרקע מביא לעליה בטמפרטורת הקרקע הממוצעת לאורך עונת הגידול לעומת השימוש ביריעות פוליאטילן לבן או כסוף שיכול להעלות או להוריד במעט את טמפרטורת הקרקע הממוצעת לאורך העונה. מעל פני הקרקע, חיפוי הקרקע ביריעות פוליאטילן כסופה יכול להעלות בעשרות אחוזים את שיעור הקרינה הפעילה פוטוסינטטית שנקלטת בנוף לעומת יריעת חיפוי שחורה או קרקע חשופה. בדוגמא אחרת, שימוש ביריעת פוליאטילן כסופה העלה את טמפרטורת נוף הצמחים ביום והוריד את טמפרטורת הנוף בלילה. לא רק תכונות יריעת הפוליאטילן לחיפוי הקרקע קובעות את אופי השפעתה על המיקרואקלים. גם לשילוב בין תכונותיה של היריעה והאופן בו היא נפרסת בשטח השפעה על תנאי המיקרואקלים שיווצרו (Tarara, 2000). כך לדוגמא, ככל שהיריעה צמודה יותר לפני הקרקע חשיבותה במאזן האנרגיה של העברת החום בהולכה בין היריעה לקרקע גדלה לעומת העברת הקרינה הסולארית. לכן כשיריעת החיפוי נוגעת בפני הקרקע, פוליאטילן שחור אטום לקרינה סולארית מגדיל את טמפרטורת המקסימום של הקרקע ביום לעומת יריעת חיפוי מפוליאטילן שקוף. ההפך הוא הנכון כשיריעת החיפוי איננה צמודה לפני הקרקע.

3. שיטות וחומרים

המחקר לבחינת השפעת סוגי חיפויי הקרקע השונים מפוליאתילן על התפתחות מחלת הכימסון במבני גידול לעגבניות התנהל במקביל בשדה ובמעבדה. במסגרת המחקר נערכו שני ניסויי שדה כדי להבין את מנגנון ההשפעה של חיפויי הקרקע מפוליאתילן על התפתחות מחלת הכימסון במבני הגידול ובמקביל להם פותח מודל לחיזוי השפעת חיפויי הקרקע ביריעות פוליאתילן שונות על טמפרטורת הקרקע במבנים. לאחר פיתוח ואימות המודל נערכה באמצעותו סדרת ניסויי הדמיה. ניסויי השדה נערכו במבני גידול לעגבניות, במהלך שתי עונות ובמסגרתם נערך ניטור מקיף של המיקרואקלים במבנים עם חיפויי קרקע שונים מפוליאתילן וקרקע חשופה. מערך החיפויים הוצב בתוך מבני הגידול ומחוץ להם ומדד את נתוני המיקרואקלים במבנים במהלך שתי עונות הגידול ותוך כדי התפתחות של מחלת הכימסון. במקביל לעריכת ניסויי השדה הוחל בפיתוח המודל לחיזוי השפעת חיפויי קרקע שונים מפוליאתילן על טמפרטורת הקרקע במבנה הגידול תוך שימוש בנוסחאות מהספרות. לאחר פיתוח המודל הוא נבחן ואומת בעזרת מערך הנתונים המיקרואקלימיים שנמדד בניסויי השדה. המודל המאומת שימש לעריכת סדרת ניסויי הדמיה לבחינת השפעתם הצפויה של מדדים שונים על טמפרטורת הקרקע במבני הגידול ובאמצעותה על משך רטיבות העלוה במבנים.

3.1. ניסויי השדה

כדי לבחון כיצד משפיע סוג הפוליאתילן המשמש לחיפוי קרקע מבנה הגידול על התפתחות מחלת הכימסון בצמחי עגבנייה (*Lycopersicon esculentum* Mill.), נערכו בחוות הבשור (31°16'N, 34°24'E, 75m) ניסויי גידול מסוג מנהרה עבירה, במימדים של 6m אורך, 6.3m רוחב ו-2.5m גובה. המבנים כוסו ביריעת פוליאתילן IR מפזר בעובי 150µm מתוצרת גניגר מוצרי פלסטיק בע"מ. שני פתחי המבנה כוסו ברשת 50 מש. צמחי עגבנייה נשתלו בשלוש שורות כפולות שהמרחק ביניהן היה 0.9m. הניסויים נערכו בשתי עונות גידול, סתיו ואביב בהתאם לעונות הגידול המקובלות באזור הבשור. העונה הראשונה, סתיו 2005, נמשכה מחודש ספטמבר ועד דצמבר בשנת 2005. העונה השנייה, אביב 2006, נמשכה מחודש פברואר ועד אפריל בשנת 2006.

בכל ניסוי נכללו ארבעה טיפולים בארבע חזרות. הטיפולים היו: 1. קרקע מחופה בפוליאתילן שקוף; 2. קרקע מחופה בפוליאתילן כסוף (צד עליון כסוף וצד תחתון שחור); 3. קרקע מחופה בפוליאתילן שחור (כל החיפויים היו מתוצרת גניגר מוצרי פלסטיק בע"מ) ו-4. קרקע חשופה כביקורת. במבנים עם חיפויי הקרקע, כוסה כל השטח ביריעות החיפוי והצמחים נשתלו בקרקע דרך חורים שנוקבו ביריעות. צמחי העגבנייה גודלו על פי השיטות המקובלות לגידול לעגבניות בחוות הבשור. אולם, במהלך הגידול לא יושמו חומרי הדברה קוטלי פטריות במבני הניסוי. במהלך הניסויים בוצע ניטור נרחב של המיקרואקלים במבני הגידול ומחוץ להם כמפורט בהמשך. בניסויים התפתחה מחלת הכימסון. הניסוי שבוצע בעונת סתיו 2005, הופסק כאשר חומרת מחלת הכימסון הייתה 48% במבנים עם הקרקע החשופה. הניסוי בעונת אביב 2006, הופסק כאשר חומרת המחלה הייתה 77% במבנים עם הקרקע החשופה.

החל מהשתילה של צמחי העגבנייה במבני הגידול נערך אחת לשבוע מעקב אחר התפתחות מחלות בנוף הצמחים במבנים. השאיפה הייתה שמחלת הכימסון תתפתח באופן טבעי ולכן לא לבצע אילוח מלאכותי בתחילת העונה. אבל, מאחר והתפתחות המחלה במבני הגידול היוותה תנאי להצלחת הניסויים, הוחלט שאם לא תתפתח המחלה באופן טבעי עד למועד מסוים, שהוגדר מראש, יאולחו הצמחים באופן מלאכותי. בעונת סתיו 2005 לא התפתחה המחלה עד לאמצע חודש נובמבר ובתאריך 17 לנובמבר 2005 בוצע אילוח מלאכותי. בכל מבנה רוסס תרחיף מנבגי הפטרייה *P. infestans* על ארבעה צמחים שנמצאו בשורות הקיצוניות בסמוך לפתחי המבנה. האילוח בוצע בשעות אחר הצהריים המאוחרות אחרי שהצמחים הורטבו על ידי מערכת

ממטירוניים שהוצבה בכל אחד מהחדרים. המשך התפתחות המחלה וההדבקה של הצמחים שנמצאו במרכז המבנה התרחש באופן טבעי. בעונת אביב 2006 התרחשה בתחילת חודש אפריל הדבקה טבעית בכימסון של צמחי העגבנייה במבני הניסוי.

בלא תלות במקור המידבק (טבעי או מלאכותי), עוצמת הנגיעות בכל אחד ממבני הניסוי הוערכה בשורת הצמחים המרכזית. המדד המוערך היה חומרת המחלה (באחוזים), מדד המבטא את החלק היחסי של העלווה שנפגע מהתפתחות המחלה. לאחר הופעת המחלה בוצעו ההערכות נגיעות מידי שבוע על ידי אותו הדוגם. התוצאות נותחו במבחן של ניתוח שונות (ANOVA) וכשערכי F של המבחן היו מובהקים נקבעו הבדלים בחומרת המחלה בין הטיפולים השונים על ידי מבחן HSD בדרגת מובהקות של $P \leq 0.05$.

2.3. מדידות

3.2.1. מדידות מיקרואקלימיות

כדי להבין את המנגנון באמצעותו משפיע חיפוי קרקע בפוליאיתילן על מאזן האנרגיה ותנאי המיקרואקלים במבני הניסוי, נערך ניטור מיקרואקלימי נרחב בתוך מבני הניסוי ומחוץ להם. בשל היקפו הנרחב של מערך המדידות ומכיוון שמספר החישובים הזמינים היה מוגבל, הוחלט לא לבצע מדידות מיקרואקלימיות במבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאיתילן שחור. זאת, כדי להגדיל את מספר החזרות של המדידות בטיפולים האחרים. ההחלטה התקבלה על סמך ממצאי הניסויים המקדימים שהראו כי ההשפעות על טמפרטורת הקרקע ומשך רטיבות העלווה בטיפול זה הן מתונות לעומת מבנים בהם חופתה הקרקע פוליאיתילן שקוף או כסוף.

מערך המדידות המיקרואקלימיות שנערכו בשתי עונות הגידול מפורט בטבלה 1 ותאור סכמאטי הממחיש את מיקום החישובים במבני ומחוץ להם מובא באיור 1. טמפרטורת האוויר הלח והיבש נמדדה על ידי שני צמידים חומניים נחושת-קונסטנטן בפסיכרומטר מאוורר. טמפרטורת הקרקע נמדדה בין הצמחים בשורה שם הקרקע הייתה לחה ובשביל בין השורות שם הקרקע הייתה יבשה, על ידי צמד חומני נחושת-קונסטנטן מצופה אפוקסי. המדידות בקרקע נערכו בשביל ובין שורות השתילה מכיוון שידוע שטמפרטורת הקרקע ושטף החום בקרקע שונים מאוד בין קרקע יבשה לרטובה (Monteith and Unsworth, 1990). טמפרטורת העלים נמדדה על ידי צמד חומני נחושת-קונסטנטן 40 גייג'. טמפרטורת הפוליאיתילן ששימש לחיפוי נמדדה באביב 2006 בשורה ובשביל על ידי צמד חומני נחושת-קונסטנטן 40 גייג' שהודבק לפוליאיתילן באמצעות דבק אפוקסי על צידו העליון. שטף החום בקרקע נמדד על ידי מדי שטף חום מסוג HFT-3.1, REBS, USA. הקרינה נטו במבנה נמדדה על ידי מד קרינה נטו מסוג Siemens Ersking, SE. הקרינה ארוכת הגל מהשמיים נמדדה באביב 2006 על ידי מד קרינה מסוג Epplly P.I.R Pyrgeometer. קרינה קצרת גל נמדדה על ידי מד קרינה Kipp and Zonen CM5. מהירות וכיוון הרוח נמדדו באביב 2006 על ידי מד רוח מסוג Young.

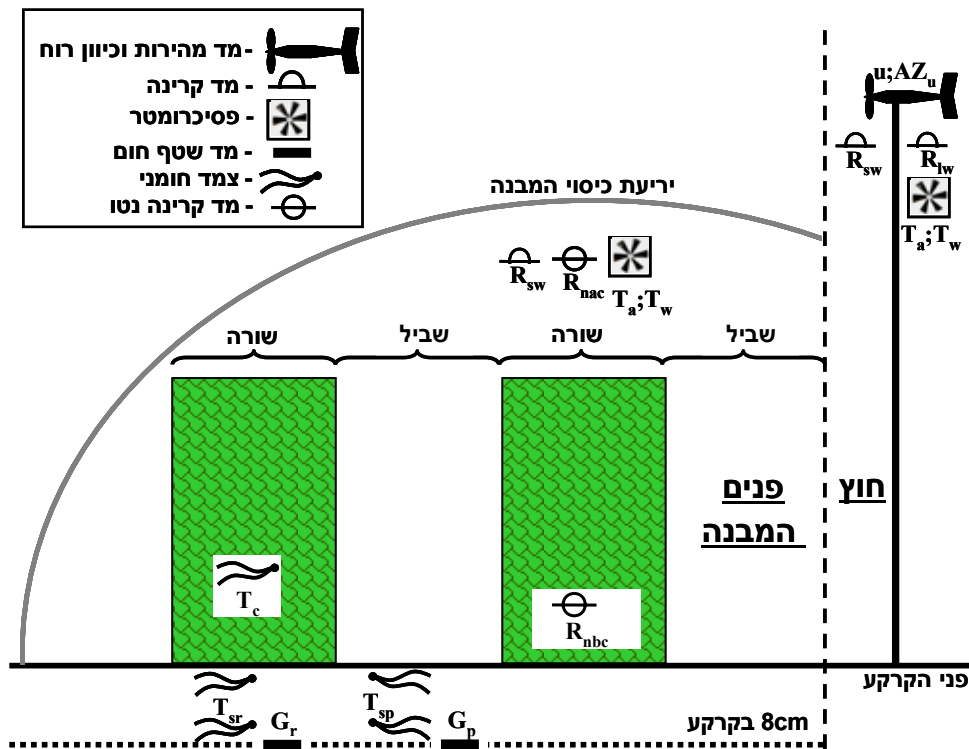
3.2.2. מדידת קצב החלפת האוויר במבנה

קצב החלפת האוויר במבנה הגידול משפיע על תנאי המיקרואקלים השוררים בו (Boulard et al., 1997). עיקר השפעתו של קצב החלפת האוויר על המיקרואקלים מתבטאת בתהליכי הסעת חום מוחשי וכמוס. השפעת קצב החלפת האוויר על תהליכי הסעת החום קשורה בשני גורמים מרכזיים. ראשית, קצב החלפת האוויר הוא בין הגורמים המרכזיים המכתיבים את מהירות התנועה של האוויר במבנה. לכן, קצב החלפת האוויר הוא מהגורמים העיקריים בקביעת התנגדות האווירודינאמית למעבר חום ואדי מים של האוויר. בנוסף, אם תנאי הטמפרטורה והלחות של האוויר שונים בתוך המבנה ומחוץ לו אזי קצב החלפת האוויר ישפיע על הפרשי הטמפרטורה ולחץ אדי המים בין המבנה לחוץ ובין המשטחים שבמבנה לאוויר הנמצא בו.

טבלה 1: פירוט המדידות המיקרואקלימיות שנערכו בניסויים בחוות הבשור. המדידות בתוך המבנה נערכו בשלושה טיפולים למעט מדידת טמפרטורת יריעת החיפוי שנמדדה בשני חיפויים. מספר החיפויים בעונה מתקבל מהכפלת מספר הטיפולים במספר החזרות.

מספר חיישנים בעונה	מספר חזרות בעונה	עונות מדידה	מיקום מדידה	מדד
9	3	2	בתוך המבנה בגובה 2m	טמפרטורת האוויר היבש
1	1	2	מחוץ למבנה בגובה 3m	
9	3	2	בתוך המבנה בגובה 2m	טמפרטורת האוויר הלח
1	1	2	מחוץ למבנה בגובה 3m	
9	3	2	בשורה בפני הקרקע	טמפרטורת הקרקע
9	3	2	בשביל בפני הקרקע	
9	3	2	בשורה בעומק 7cm	
9	3	2	בשביל בעומק 7cm	
27	9	2	בצד התחתון של העלה בגובה 30cm מהקרקע	טמפרטורת העלים
2	1	1	בשורה	טמפרטורת החיפוי
2	1	1	בשביל	
9	3	2	בשורה בעומק 8cm	שטף החום בקרקע
9	3	2	בשביל בעומק 8cm	
3	1	2	בשורה בגובה 15cm	קרינה נטו
3	1	2	בשורה בגובה 2m	
1	1	1	מחוץ למבנה בגובה 2m	קרינה ארוכת הגל מהשמיים
3	1	2	בשורה בגובה 2m	קרינה קצרת גל
1	1	2	מחוץ למבנה בגובה 3m	
2	1	1	בגובה 4.5m מחוץ למבנה	מהירות וכיוון הרוח
118	-	-	-	סה"כ

המדידות נערכו אחת לחמש שניות והממוצעים נאגרו אחת לחצי שעה בעזרת שני אוגרי נתונים מסוג CR10X ושני מולטיפלקסרים (AM32) מתוצרת Campbell Scientific Logan, UT. אוגרי הנתונים חוברו למודם סלולארי שאפשר פיקוח ואיסוף הנתונים מהמעבדה בבית דגן.



איור 1: תאור סכמאטי של מבנה גידול עם קרקע חשופה, המציג את מערך החיישנים (לפי טבלה 1). החיישנים משמאל לקו המקווקו מוקמו בתוך המבנה והחיישנים מימין לקו המקווקו מוקמו מחוץ למבנה. G_r ו- T_{sr} הם טמפרטורת הקרקע ושטף החום בקרקע בין הצמחים בשורה, בהתאמה; G_p ו- T_{sp} הם טמפרטורת הקרקע ושטף החום בקרקע בשביל בין שורות הצמחים, בהתאמה; T_c היא טמפרטורת העלווה; R_{nbc} ו- R_{nac} הן הקרינה נטו מתחת ומעל לנוף הצמחים, בהתאמה; R_{sw} היא הקרינה קצרת הגל; T_w ו- T_a הן טמפרטורות האוויר היבש והלח, בהתאמה; u ו- AZ_u הם מהירות וכיוון הרוח, בהתאמה; R_{lw} היא הקרינה ארוכת הגל מהשמיים.

מבני הניסוי בחוות הבשור אווררו באורור טבעי. לכן צפוי שקצב החלפת האוויר במבנים יהיה תלוי בעיקר במהירות וכיוון הרוח מחוץ למבנה (Boulard et al., 1997). קצב החלפת האוויר במבנה שווה ליחס שבין נפח האוויר שעבר במבנה ביחידת זמן לנפח החלל הפנימי של המבנה. כדי לקבוע את הקשר בין מהירות וכיוון הרוח מחוץ למבנה לקצב החלפות האוויר נערך ניסוי בו השתמשנו בגז סמן (N_2O). בסך הכול נערכו 48 מדידות ששימשו לקביעת הקשר בין מהירות וכיוון הרוח וקצב החלפת האוויר. המדידות נערכו בארבעה ימי מדידה בשנת 2007 (3, 7, 11 בינואר ו-1 בפברואר). שיטת המדידה הייתה לפי (Boulard et al. 1997). השיטה מתבססת על מדידה רציפה של ריכוז הגז הסמן במבנה וניטור בו זמני של מהירות וכיוון הרוח מחוץ למבנה. בתחילת כל מדידה הוזרק הגז הסמן למבנה הניסוי במשך 10 שניות. לאחר מכן הופעלו במבנה שני מאווררים שהוצבו ליד שני פתחי המבנה כשהם פונים זה כלפי זה. המאווררים כובו כשריכוז הגז הסמן במבנה הגיע לערך קטן מ-80ppm. המדידה נמשכה עד שריכוז הגז הסמן במבנה הגיע לערך קטן מ-30ppm. כדי להבטיח פיזור אחיד ככל האפשר של הגז הסמן במבנה פוזר הגז דרך 10 צינורות גומי שנתלו בגובה 1.5m במבנה. קריאת ריכוז הגז התבצעה מצינור גומי נוסף שנתלה במרכז המבנה גם הוא בגובה 1.5m. מהירות וכיוון הרוח נמדדו מחוץ למבנה בגובה 4.5m מעל לקרקע, על ידי מד רוח מסוג Young. נתוני ריכוז הגז הסמן ומהירות וכיוון הרוח נאספו באוגר נתונים מסוג Campbell scientific, CR10X Logan, UT. נתוני ריכוז הגז הסמן והרוח נמדדו כל חמש שניות. נתוני ריכוז הגז הסמן נאספו כל חמש שניות. לעומתם, לנתוני המהירות וכיוון הרוח חושב ערך ממוצע שנאסף באוגר הנתונים פעם בדקה.

3.3. חישובים

3.3.1. טמפרטורת האוויר לחץ אדי המים באוויר וטמפרטורת הטל במבנה

טמפרטורת האוויר במבנה נקבעה כטמפרטורת האוויר בגובה 2m מטר. לחץ אדי המים באוויר בגובה 2m חושב מטמפרטורת האוויר הלח והיבש בעזרת הנוסחה הפסיכרומטרית (משוואה 1).

$$e = e_s(T_w) - 0.67 |T_a - T_w| \quad \text{משוואה 1:}$$

כאשר $e_s(T_w)$ חושב לפי נוסחת Tetens, $e_s(T_a) = A \exp[B T_a / (T_a + C)]$ (Jones, 1992).

במשוואות אלה: e הוא לחץ אדי המים באוויר (Pa); $e_s(T_w)$ הוא לחץ אדי המים ברוויה של אוויר בטמפרטורת לח (T_w) כלשהיא (Pa); A ; B ; C הם קבועים לגובה פני הים (613.75, 17.5, 240.97, בהתאמה); T_a היא טמפרטורת האוויר היבש בגובה 2 מטר ($^{\circ}C$); T_w היא טמפרטורת האוויר הלח בגובה 2m ($^{\circ}C$).

טמפרטורת הטל TD היא הטמפרטורה שבה האוויר רווי באדי מים בלחות הנוכחית. לכן, כאשר ידוע ערכו של לחץ אדי המים באוויר (e) ניתן לפתור את נוסחת Tetens עבור טמפרטורת הטל (TD). אז, טמפרטורת הטל המתקבלת מופיעה במשוואה 2.

$$TD = C \ln(e/A) / [B - \ln(e/A)] \quad \text{משוואה 2:}$$

במשוואה זו: TD היא טמפרטורת הטל של האוויר ($^{\circ}C$); e לחץ אדי המים באוויר (Pa); A ; B ; C הם קבועים לגובה פני הים שערכיהם: 613.75; 17.5; 240.97, בהתאמה.

3.3.2. טמפרטורת הקרקע במבנה

טמפרטורת שכבת הקרקע העליונה נקבעה כטמפרטורת הקרקע בעומק 7cm. כדי לקבוע ערך מיצג לטמפרטורת הקרקע במבנה הוחלט לקבוע ערך ממוצע לטמפרטורת הקרקע שישכלל את השבילים (קרקע יבשה) והשורות השתילה (קרקע רטובה) לפי משוואה 3 (Tanny et al., 2006).

$$T_s = c T_{sr} + (1-c) T_{sp} \quad \text{משוואה 3:}$$

במשוואה זו: T_s היא טמפרטורת הקרקע במבנה ($^{\circ}\text{K}$); c הוא היחס בין רוחב השבילים הכולל במבנה לרוחב המבנה; T_{sr} היא טמפרטורת הקרקע בשורה ($^{\circ}\text{K}$); ו- T_{sp} היא טמפרטורת הקרקע בשביל ($^{\circ}\text{K}$).

3.3.3. הקרינה נטו של נוף הצמחים והאנרגיה הזמינה לנוף

לצורך חישובי שטפי האנרגיה נקבע כי שטף חיובי מעיד על התחממות. שטף הקרינה נטו של הנוף חושב כהפרש בין שטף הקרינה נטו מעל (R_{nac}) ומתחת לנוף (R_{nbc}) בגובה 2m ו-15cm, בהתאמה (משוואה 4).

$$R_{nc} = R_{nac} - R_{nbc} \quad \text{משוואה 4:}$$

נוף חם פולט יותר קרינה ארוכת גל ושטף הקרינה נטו שלו גבוהה יותר. לפי חוק סטפן בולצמן, שטף הקרינה ארוכת הגל הנפלט מהנוף תואם לטמפרטורת הנוף בחזקה רביעית. שטפי הקרינה הנפלטים מהנוף גדלים ככל שטמפרטורת הנוף גבוהה יותר. שטף הקרינה נטו של הנוף הוא ההפרש בין שטפי הקרינה ארוכת הנקלטים בנוף והנפלטים ממנו. שטפי הקרינה התרמית הנקלטים בנוף מגיעים מהקרקע ומכיסוי מבנה הגידול לנוף. השטפים של הקרינה הנקלטת מהקרקע והכיסוי מגיעים מכיוון מטה ומעלה, בהתאמה. לכן חישוב ההפרשים בקרינה נטו מעל ומתחת לנוף הוא המדד לחישוב הקרינה נטו של הנוף.

האנרגיה הזמינה לנוף חושבה כהפרש בין שטף הקרינה נטו מעל לנוף בגובה 2m ושטף החום G בעומק

8cm בקרקע (משוואה 5).

$$E_c = R_{nc} - G \quad \text{משוואה 5:}$$

במשוואה זו: E_c היא האנרגיה הזמינה לנוף הצמחים (W m^{-2}); R_{nc} הוא שטף הקרינה נטו של הנוף (W m^{-2}); ו- G הוא שטף החום בעומק 8cm בקרקע (W m^{-2}).

האנרגיה הזמינה לנוף היא מדד כמותי לאנרגיה הנפלטת מהקרקע ונקלטת בנוף. כששטף האנרגיה הזמינה לנוף חיובי הנוף קולט אנרגיה מהקרקע ומתחמם. בשל ההתנגדות האווירודינאמית הגדולה למעברי חום ואדי מים בתוך מבנה הגידול בלילה שטפי החום המוחשי והכמוס קטנים ביחס לשטפי הקרינה התרמית ועיקר האנרגיה הנקלטת בנוף בלילה היא קרינה ארוכת גל. מקורות הקרינה התרמית בלילה הם הקרקע הפולטת ומחזירה קרינה בכיוון מעלה וכיסוי המבנה הפולט מעביר ומחזיר קרינה בכיוון מטה. הקרקע היא המסה התרמית העיקרית במערכת ולכן המקור המרכזי לקרינה ארוכת גל בלילה. האנרגיה הנקלטת בנוף גדלה ככל שההפרש בין טמפרטורת הקרקע וטמפרטורת הנוף גדול יותר. שטף החום בקרקע הוא מדד לאנרגיה הנפלטת מהקרקע ונקלטת בחלקה בנוף והקרינה נטו מעל הנוף היא מדד לקרינה הנפלטת מהנוף. לכן האנרגיה הזמינה לנוף (ההפרש בין הקרינה נטו מעל לנוף ושטף החום בקרקע) היא מדד לקליטת אנרגיה מהקרקע בנוף.

בדומה לקביעת הערך המייצג של טמפרטורת הקרקע במבנה (ראה 3.3.2), גם לשטף החום בקרקע

המבנה נקבע ערך מייצג לפי משוואה 6.

$$G = c G_r + (1-c) G_p \quad \text{משוואה 6:}$$

במשוואה זו: G הוא שטף החום בקרקע (W m^{-2}); G_r הוא שטף החום בקרקע בשורה (W m^{-2}); ו- G_p הוא שטף החום בקרקע בשביל (W m^{-2}).

3.3.4 קצב החלפת האוויר ומהירות הרוח במבנה

קצב החלפת האוויר במבנה חושב לפי Boulard et al. (1997) מפונקציה הדעיכה של ריכוז הגז הסמן לפי הזמן (משוואה 7).

$$C(t) = C_0 \exp(-\text{TOR } t) \quad \text{משוואה 7:}$$

במשוואה זו: $C(t)$ הוא ריכוז הגז הסמן לפי הזמן מתחילת המדידה (ppm); t הוא הזמן מתחילת המדידה (s); C_0 הוא ריכוז הגז הסמן בתחילת המדידה (ppm); ו- TOR (Turn Over Rate) הוא קצב החלפת האוויר במבנה (s^{-1}).

קצב החלפת האוויר במבנה משפיע על מהירות האוויר במבנה. בהנחה שהאוויר במבנה נע בין פתחי המבנה אזי, במבנה גידול מסוג מנהרה עבירה בעלת שני פתחי צד (כמו מבני הגידול שבהם נערכו הניסויים בחוות הבשור), האוויר צפוי לנוע אופקית במקביל לציר המחבר בין הפתחים. במקרה כזה ניתן לקבוע את מהירות האוויר האופקית הממוצעת במבנה לפי משוואה 8.

$$u = I \text{ TOR} \quad \text{משוואה 8:}$$

במשוואה זו: u היא מהירות הרוח בתוך המבנה ($m \text{ s}^{-1}$); ו- I הוא אורך המבנה (m).

3.4 איתור תקלות

כדי לקבל נתונים מהימנים ככל האפשר, התבצעה בקרת איכות שבועית של קריאות החיישנים שאפשרה לאתר חיישנים לא תקינים ושמרה על תקינות מערכת איסוף הנתונים. כשנתגלתה תקלה היא תוקנה במידת האפשר או שנתוני החיישן הפגום נפסלו לשימוש. עיקר התקלות שהתגלו במהלך הניסויים היו במדידות הטמפרטורות של הקרקע והאוויר ושטף החום בקרקע.

3.4.1 איתור תקלות בחיישני טמפרטורה

מדידות הטמפרטורה בניסויים נערכו בעזרת צמדים חומניים מסוג נחושת-קונסטנטן. צמד חומני הינו חיישן טמפרטורה רגיש בעל שגיאת מדידה המוערכת כ- $\pm 0.1-0.25^\circ\text{C}$ (Rosenberg, 1974). אוגר הנתונים קובע את הטמפרטורה במיקום החיישן על ידי מדידת הפרשי מתח של מיקרו וולטים הנוצרים בחיישן. לכן, הצמד החומני רגיש במיוחד להפרעות חשמליות זעירות שעלולות לשבש את מדידת הטמפרטורה. הפרעות כאלה התגלו בעיקר במדידת טמפרטורת האוויר הלח והיבש בשעות הלילה כשהלחות במבנה הייתה קרובה ל-100%. תקלה אפשרית נוספת היא תזוזה של החיישן ממקומו. תקלת מיקום כזו ניתן לאתר בעיקר במדידות של תופעות גליות כמו שינוי יומי של טמפרטורה ושטף החום בקרקע. איתור התקלה נעשה בעזרת מעקב אחר נתוני הגל היומי של תופעות אלה.

לאיתור תקלות במדידת טמפרטורת ולחות האוויר שמשה ההנחה שברגע נתון באותה נקודת מדידה, טמפרטורת האוויר היבש לא יכולה להיות קטנה מטמפרטורת האוויר הלח. מכיוון ששגיאת המדידה של צמד חומני היא $\pm 0.1-0.25^\circ\text{C}$, הוחלט שלא להתחשב בקריאה של חיישן שטמפרטורת האוויר הלח שלו הייתה גבוהה מטמפרטורת האוויר היבש, ביותר מרבע מעלה.

לאיתור תקלות במדידת טמפרטורת הקרקע נערכה השוואה גראפית בין קריאות החיישנים השונים באותו טיפול, מיקום (שביל או שורה) ועומק בקרקע. לאיתור תקלות במיקום החיישן שימשה ההנחה כי הקרקע בכל המבנים אחידה. לכן, התכונות התרמיות של הקרקע היו זהות בנקודת המדידה של כל החיישנים באותו טיפול, מיקום (שביל או שורה) ועומק בקרקע. משתמע מכך שבמצב תקין, צפויים חיישני טמפרטורת הקרקע ליצור גל סינכרוניזציה יומי בעל אורך גל, שעת מקסימום ושעת מינימום דומים. ההבדל בין החיישנים צפוי להיות רק במשרעת הגל המתקבל. אם התגלה הפרש פאזה בין החיישנים נבדק מיקומם בשטח והם מוקמו מחדש.

3.4.2 איתור תקלות בחיישני שטף החום בקרקע

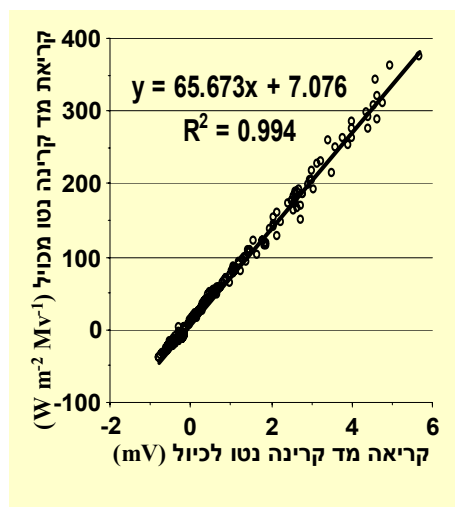
בדומה לאיתור תקלות במדידת טמפרטורת הקרקע, לאיתור תקלות במדידת שטף החום בקרקע שימשה ההנחה לגבי אחידות הקרקע בתוך כל טיפול, מיקום במבנה ועומק (ראה 3.4.1). בנוסף, ידוע כי ביום הקרקע מתחממת (שטף חיובי) ובלילה הקרקע מתקררת (שטף שלילי). בעזרת הצגה גראפית של הגל היומי של שטף החום בקרקע ותוך שימוש בשתי הנחות אלה, אותרו חיישני שטף חום שלא היו תקינים או שהוזזו ממקומם. שיטת איתור התקלה זהה לשיטה לאיתור תקלות במדידת טמפרטורת הקרקע לפי הגל היומי של הטמפרטורה (ראה 3.4.1). במקרה של איתור חיישן שטף חום לא תקין נבדק מיקומו בשטח והוא הוחלף או מוקם מחדש.

3.5 כיול חיישנים

שטפי האנרגיה הליליים במבנה גידול לא מחומם צפויים לנוע בין וואטים בודדים למ"ר עד מאות וואטים למ"ר. ניטור מדויק של שטפי אנרגיה בערכים כאלה חייב שימוש במכשירים מכוילים בעלי רגישות גבוהה למדידת שטפי הקרינה ארוכת הגל נטו במבנה ושטף החום בקרקע. לצורך השגת המטרה כוילו על ידינו לפני תחילת המדידות כל מדי הקרינה נטו ומדי שטף החום בקרקע שלא כוילו על ידי היצרן. הכיולים נערכו בעזרת מדי קרינה נטו ומדי שטף חום חדשים שכוילו על ידי היצרן.

3.5.1 כיול מדי קרינה נטו

כיול מדי קרינה נטו נערך על גג מזופת במכון וולקני. מדי הקרינה נטו הוצבו בגובה 1m מעל לגג לצד שני מדי קרינה נטו מסוג REBS, USA, Q*7.1, שכוילו על ידי היצרן. המדידות נערכו אחת לחמש שניות והממוצעים נאגרו אחת לדקה באוגר נתונים Campbell Scientific, Logan, UT CR10X.



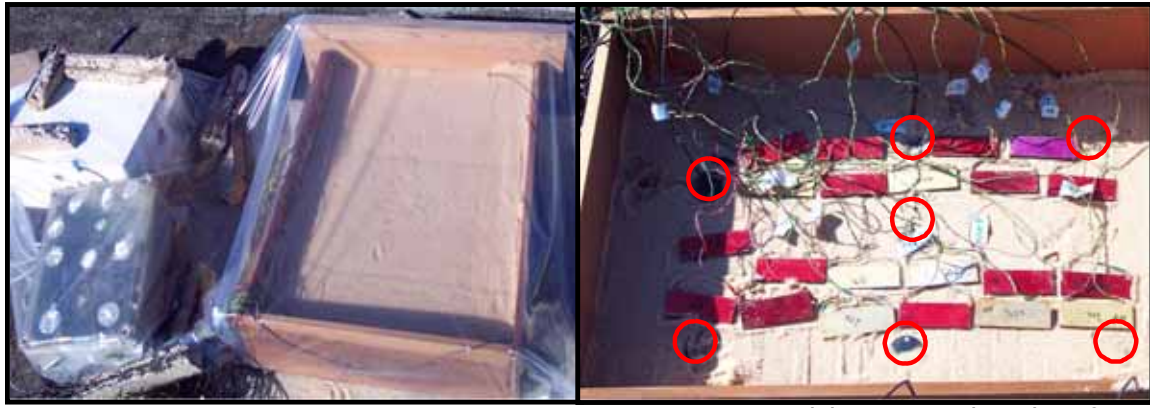
איור 2: דוגמא לעקום כיול למד קרינה נטו.

כדי לקבוע את הכיול ($W m^{-2} mV^{-1}$) של כל מד קרינה נטו, חושב שטף הקרינה נטו הממוצע מהנתונים שנמדדו בשני מדי הקרינה נטו המכוילים. לאחר מכן נערכו התאמות ליניאריות לקבלת עקום כיול בין המתח שמדד כל מד קרינה נטו לא מכויל לבין שטף הקרינה נטו הממוצע שנימדד. שיפוע הישר שהתקבל שימש לכיול של מד הקרינה נטו.

דוגמא לעקום כיול למד קרינה נטו מסוג Siemens Ersking, SE שלא היה מכויל מתואר באיור 2. כל עקומי הכיול שהתקבלו היו בעלי מתאם טוב מאוד ($R^2 > 0.97$). המתאם היה טוב יותר עבור שטפי קרינה נטו נמוכים המתאימים לערכים הצפויים של הקרינה נטו במבנה גידול בלילה.

3.5.2 כיול מדי שטף חום בקרקע

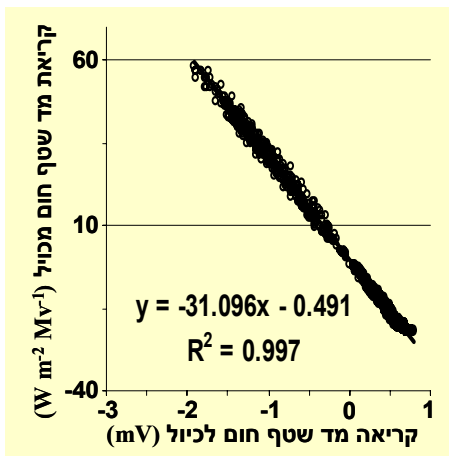
כיול מדי שטף החום בקרקע נערך על גג בניין המכון לקרקע ומים במרכז וולקני. לצורך הכיול השתמשנו בארגז חול ובשבעה חיישני שטף חום מסוג HFT-3.1, REBS, USA שכוילו על ידי היצרן. ארגז החול היה עשוי עץ והכיל שכבת חול דיונה לח. בשלב הראשון הוכנסה לארגז שכבת חול בעובי 12cm. על גבי השכבה הראשונה פוזרו החיישנים לכיול והחיישנים המכוילים (איור 3) ועליהם פוזרה שכבת חול נוספת בעובי 8cm. הארגז כוסה ביריעת פוליאטילן שקוף בעובי 50 μ m. המדידות נערכו אחת לחמש שניות והממוצעים נאגרו אחת לדקה באוגר נתונים Campbell Scientific, Logan, UT CR10X.



איור 3: צילום של מערכת הכיול לחישוב שטף החום בקרקע. מיקום החיישנים בעלי כיול היצרן מסומנים בעיגול.

כדי לקבוע את הכיול ($W m^{-2} mv^{-1}$) של כל מד שטף חום, נערכה התאמה ליניארית לקבלת עקום כיול בין המתח שמדד מד שטף החום שדרש כיול, לבין שטף החום בקרקע שנימדד בחיישן המכיל הקרוב אליו ביותר. שיפוע הישר המתקבל הוא הכיול של מד שטף החום. דוגמא לעקום כיול למד שטף חום בקרקע מתואר באיור 4. כל עקומי הכיול שהתקבלו היו בעלי מתאם טוב מאוד ($R^2 > 0.96$). השיפוע השלילי מעיד שמד שטף החום ששימש לכיול הוצב כשצידו העליון פונה מטה.

3.6. הרצת המודל



איור 4: דוגמא לעקום כיול למד שטף חום בקרקע.

במסגרת המחקר פותח מודל לחיזוי של טמפרטורת הקרקע במבנים בהם הקרקע נשארה חשופה ובמבנים בהם הקרקע חופתה ביריעות פוליאתילן שקוף או כסוף. המודל פותח על בסיס מודל קיים לחיזוי טמפרטורת קרקע חשופה לפי Acs et al. (1991). כדי שהמודל מהספרות יתאים לתנאי הסביבה, המבנה וסוגי החיפויים שהיו בניסויים בחוות הבשור בעונות סתיו 2005 ואביב 2006, בוצעו בו שלוש התאמות. ההתאמה הראשונה הייתה קביעת הקשרים האמפיריים בין תנאי המיקרואקלים מחוץ למבנה לאלה השוררים בתוכו. ההתאמה השנייה הייתה לסוג הקרקע בחוות הבשור. לבסוף, הותאם גם מאזן הקרינה בפני הקרקע המחופה או החשופה לתנאי הניסוי על ידי הגדרה מחדש של משוואות מאזני הקרינה בפני

הקרקע או החיפוי כך שיתאימו לתכונות המבנה, הצמחים, הקרקע וחיפוי הקרקע. הפיתוחים הנ"ל מתוארים בעבודה זאת בפרק "תוצאות" (ראה 4.3).

המודל חוזה את טמפרטורת הקרקע כפונקציה של טמפרטורת הקרקע בצעד הזמן הקודם וכן מאזן האנרגיה ונתונים סביבתיים ואחרים בצעד זמן שעבר. על מנת לפתור את המודל נבנה גיליון Excel שבו מערכת הנוסחאות נפתרת בצעדי זמן של חצי שעה כל אחד ובמשך 10 ימים רצופים. לקביעת טמפרטורת הקרקע בזמן ההתחלתי נלקחה טמפרטורת הקרקע הממוצעת ביום הקודם (T_{s_ave}). בכל ההרצות נמצא שהמודל התכנס לטמפרטורות סבירות ולמהלך יומי קבוע תוך 3 ימים מתוך ה-10 שבגיליון. בדיווח על תוצאות המודל למצבים קבועים נלקחו תוצאות שהתקבלו ביום ה-4 של הריצה. בריצות שדימו מצבים לא יציבים, לדוגמא, חיזוי השתנות טמפרטורת הקרקע ביום מעונן ואחריו 2 ימים בהירים. במקרה כזה המודל הורץ תחילה 4 ימים במצב מעונן עד להתייצבות. אחר כך, שונו התנאים ביום ה-5 ואילך למצב הבהיר. התחזית ליום מעונן ואחריו שני ימים בהירים הוצגה עבור הימים מספר 4, 5 ו-6 מתחילת ההרצה.

3.6.1. בחינת מהימנות המודל

כדי לבחון את מהימנות תחזיות המודל (verification) נבחנו התחזיות לטמפרטורת הקרקע במשך 36 שעות רצופות בתאריך 1-2 בדצמבר מול הנתונים המדודים לאותם הימים בעונת סתיו 2005. הבחינה נערכה בשני אופנים שונים. תחילה נערכה בחינה איכותית על ידי השוואה חזותית של הגל היומי של טמפרטורת הקרקע החזויה והמדודה. לאחר מכן נערכה בחינה כמותית של התחזיות על ידי בחינת המובהקות הסטטיסטית של השיפוע והחותך של קו המתאם לישר 1:1 בין התוצאות המדודות לחזויות, ברמת מובהקות $P \leq 0.05$.

3.6.2. ניסויי הדמיה

לאחר בחינת מהימנות המודל נערכה סדרה של שישה ניסויי הדמיה בהם נבחנה ההשפעה של גורמים שונים על טמפרטורת הקרקע במבנה הגידול. מטרת ניסויי ההדמיה הייתה לנסות להעריך כיצד ישפיעו גורמים אלה על טמפרטורת הקרקע במבנה ועל ידי כך לשער מה תהיה השפעתם על משך הטל במבנה בלילה. בעזרת ההדמיות ניתן היה ליצור מגוון תרחישים שישמשו לקביעת היעילות המשוערת של חיפויי הקרקע בפוליאטילן במניעת מחלת הכימסון במבנה גידול לעגבניות. ניסויי ההדמיה שנערכו מופיעים הטבלה 2. בניסוי ההדמיה הראשון נבחנה ההשפעה של מצב העננות ומשכו על הגל היומי של טמפרטורת הקרקע במבנה גידול במשך שלוש יממות רצופות. בניסוי זה נכללו שלושה טיפולים. הטיפולים הם: 1. קרקע מחופה בפוליאטילן שקוף; 2. קרקע מחופה בפוליאטילן כסוף; ו- 3. קרקע חשופה. לשם ההדמיה הוגדר מצב של שמיים בהירים כשמיים ללא כל עננים ושמיים מעוננים הוגדרו כשמיים המכוסים לחלוטין בעננים מסוג altocumulus, האופייניים לאזורנו בימים מעוננים בעונת הסתיו והאביב. בניסוי נערכו 4 הדמיות לפי התנאים ביום מייצג (1 בדצמבר 2005) במבנה גידול עם צמחי עגבנייה בוגרים בגובה 2m ו- $LAI=4.68$. בהדמיה הראשונה נבחנה ההשפעה של שלושה ימי שמש רצופים על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השנייה נבחנה ההשפעה של שני ימי שמש שלאחריהם היה יום מעונן אחד על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השלישית נבחנה ההשפעה של יום שמש אחד שלאחריו היו שני ימים מעוננים על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה הרביעית נבחנה ההשפעה של שלושה ימים מעוננים רצופים על טמפרטורת הקרקע.

טבלה 2: פירוט ניסויי ההדמיה שנערכו בעזרת המודל שפותח לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הגידול.

מספר ההדמיות בניסוי	מספר טיפולים	המדד הנבחן	הגורמים שהשפעתם נבחנה	מספר ניסוי ההדמיה
4	3	השתנות הגל היומי של טמפרטורת הקרקע	מצב העננות ומשכו	1
4	3		מימדי הנוף	2
4	3		סוג הקרקע ומצב העננות	3
4	3		מצב העננות ועונת השנה	4
6	12	טמפרטורת הקרקע המרבית והמזערית במהלך היממה	התכונות הפוטומטריות של יריעת החיפוי	5
6	12		התכונות התרמיות של יריעת החיפוי	6

בניסוי ההדמיה השני נבחנה השפעת מימדי הנוף של צמחי עגבנייה על הגל היומי של טמפרטורת הקרקע במבנה גידול במשך 36 שעות. בניסוי נכללו שלושה טיפולים. הטיפולים הם: 1. קרקע מחופה בפוליאטילן שקוף; 2. קרקע מחופה בפוליאטילן כסוף; ו- 3. קרקע חשופה. בכל הדמיה הוזנו למודל נתוני הגובה ואינדקס שטח העלווה (LAI) של הצמחים כפי שנמדדו במהלך הניסויים בחוות הבשור. בניסוי נערכו 4 הדמיות לפי התנאים ביום המייצג (1 בדצמבר 2005) ולמצב של שמיים בהירים (לפי הגדרת שמיים בהירים בניסוי ההדמיה הראשון). בהדמיה הראשונה נבחנה ההשפעה של מבנה ללא צמחים ($LAI=0$) על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השנייה נבחנה ההשפעה של צמחים צעירים מאוד בגובה 43cm ($LAI=1$) על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השלישית נבחנה ההשפעה של צמחים צעירים בגובה 1.27m ($LAI=3$) על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה הרביעית נבחנה ההשפעה של צמחים בוגרים בגובה 2.12m ($LAI=5$) על טמפרטורת הקרקע.

בניסוי ההדמיה השלישי נבחנה השפעת סוג הקרקע ומצב העננות על הגל היומי של טמפרטורת הקרקע במבנה גידול במשך 36 שעות. בניסוי נכללו שלושה טיפולים. הטיפולים הם: 1. קרקע מחופה בפוליאאתילן שקוף; 2. קרקע מחופה בפוליאאתילן כסוף; ו-3. קרקע חשופה. לשם ההדמיה הוגדרו יום שמש ויום מעונן באופן דומה לניסוי ההדמיה הראשון. כמו כן נבחרו שתי קרקעות מייצגות, קרקע חולית וקרקע חרסיתית. הניסוי כלל 4 הדמיות לפי התנאים ביום המייצג (1 בדצמבר 2005) במבנה גידול עם צמחי עגבנייה בוגרים בגובה 2m ו-LAI=4.68. בהדמיה הראשונה נבחנה השפעה של יום שמש וקרקע חולית על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השנייה נבחנה השפעה של יום מעונן וקרקע חולית על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השלישית נבחנה השפעה של יום שמש וקרקע חרסיתית על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה הרביעית נבחנה השפעה של יום מעונן וקרקע חרסיתית על טמפרטורת הקרקע.

בניסוי ההדמיה הרביעי נבחנו השפעת מצב העננות ועונת השנה על הגל היומי של טמפרטורת הקרקע במבנה גידול במשך 36 שעות. בניסוי נכללו שלושה טיפולים: 1. קרקע מחופה בפוליאאתילן שקוף; 2. קרקע מחופה בפוליאאתילן כסוף; ו-3. קרקע חשופה. יום שמש ויום מעונן הוגדרו בדומה לניסוי ההדמיה הראשון. כמו כן נבחרו שני ימים מייצגים לעונות הגידול המקובלות באזור הבשור. הימים הנבחרים היו 1 בדצמבר 2005 שנבחר לייצג את עונת הסתיו ו-10 באפריל 2006 שייצג את עונת האביב. בניסוי נערכו 4 הדמיות לפי התנאים בימים המייצגים בשמיים בהירים או מעוננים, במבנה גידול עם צמחי עגבנייה בוגרים בגובה 2m ו-LAI=4.68. בהדמיה הראשונה נבחנה השפעה של יום סתווי שמשי על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השנייה נבחנה השפעה של יום סתווי מעונן על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השלישית נבחנה השפעה של יום אביבי שמשי על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה הרביעית נבחנה השפעה של יום אביבי מעונן על טמפרטורת הקרקע.

בניסוי ההדמיה החמישי נבחנה השפעת התכונות הפוטומטריות של הפוליאאתילן ששימש לחיפוי הקרקע על טמפרטורת הקרקע היומית המרבית והמזערית במבנה גידול. בניסוי היו 12 טיפולים בשתי קבוצות. קבוצות הטיפולים היו: 1. יריעות חיפוי שקופות לקרינה קצרת גל; ו-2. יריעות חיפוי אטומות לקרינה קצרת גל. בניסוי נערכו 6 הדמיות. בכל הדמיה נבחנו זו מול זו שתי יריעות לפי התנאים ביום מייצג (1 בדצמבר 2005) במבנה גידול עם צמחי עגבנייה בוגרים בגובה 2m ו-LAI=4.68. בכל הדמיה שונו התכונות הפוטומטריות של היריעות כדי לבחון מספר סוגי יריעות. שינוי התכונות הפוטומטריות של היריעות נעשה תוך שמירה על מערכת כללים שנקבעה מראש במטרה לאפיין את תכונותיהן. תחילה שונה מקדם ההחזרה של יריעת החיפוי לקרינה קצרת גל. לאחר מכן, מערכת הכללים אפשרה לקבוע את שאר התכונות של יריעת החיפוי שהתחייבו מהכללים.

הכלל הראשון במערכת הכללים שנקבעה להגדרת התכונות הפוטומטריות היה שליריעת פוליאאתילן שקופה ואטומה יש את אותן התכונות התרמיות של החיפוי השקוף והכסוף ששימשו במודל, בהתאמה (ראה טבלה 5). הכלל השני היה שביריעות פוליאאתילן שקוף סכום מקדמי ההחזרה וההעברה הפוטומטריים שווה לאחד. הכלל השלישי היה שביריעות פוליאאתילן אטום סכום מקדמי ההעברה וההחזרה הפוטומטריים גדול מאפס. הכלל הרביעי היה שביריעות פוליאאתילן שקוף מקדם ההעברה הפוטומטרי שונה מאפס. הכלל החמישי והאחרון היה שביריעות פוליאאתילן אטום מקדם ההעברה הפוטומטרי הוא אפס. פירוט התכונות הפוטומטריות של יריעות חיפוי הקרקע בניסויי ההדמיה החמישי מופיע בטבלה 3.

בניסוי ההדמיה השישי נבחנה השפעת התכונות התרמיות של חיפוי קרקע שונים מפוליאאתילן על טמפרטורת הקרקע היומית, המרבית והמזערית במבנה גידול. בניסוי היו 12 טיפולים בשתי קבוצות. קבוצות הטיפולים היו: 1. יריעות חיפוי מפוליאאתילן דמוי שקוף; ו-2. יריעות חיפוי מפוליאאתילן דמוי כסוף. בניסוי נערכו 6 הדמיות בהן נבחנו זו מול זו שתי יריעות לפי התנאים ביום המייצג (1 בדצמבר 2005) במבנה גידול עם צמחי עגבנייה בוגרים בגובה 2m ו-LAI=4.68. בכל הדמיה שונו התכונות התרמיות של יריעות החיפוי תוך

שמירה על מערכת כללים שנקבעה מראש במטרה לאפיין את תכונות היריעות. שינוי התכונות התרמיות נעשה על ידי שינוי מקדם ההחזרה של יריעות החיפוי לקרינה אלקטרומגנטית ארוכת גל. לאחר מכן ניתן היה לקבוע את שאר התכונות התרמיות של יריעות החיפוי כיוון שהן נקבעו על פי מערכת הכללים בה השתמשנו.

טבלה 3: פירוט התכונות הפוטומטריות של יריעות חיפוי הקרקע בניסויי ההדמיה לבחינת השפעת תכונותיהן על טמפרטורת הקרקע היומית המרבית והמוזערית.

מספר הדמיה לבחינת תכונות פוטומטריות	מקדם החזרה פוטומטרי יריעה שקופה	מקדם החזרה פוטומטרי יריעה שקופה	מקדם החזרה פוטומטרי יריעה שקופה	מקדם החזרה פוטומטרי יריעה אטומה
1	0.1	0.9	0.1	0
2	0.2	0.8	0.2	0
2	0.3	0.7	0.3	0
4	0.5	0.5	0.5	0
5	0.7	0.3	0.7	0
6	0.9	0.1	0.9	0

לצורך ניסוי ההדמיה השישי הוגדרו שתי קבוצות יריעות חיפוי פוליאאתילן דמיוניות: יריעות "דמוי חיפוי שקוף" ויריעות "דמוי חיפוי כסוף". לפי מערכת הכללים שנקבעה היו ליריעות דמוי חיפוי שקוף תכונות פוטומטריות של חיפוי שקוף וליריעות דמוי חיפוי כסוף היו תכונות פוטומטריות של חיפוי כסוף (ראה טבלה 5). שני כללים נוספים שנקבעו היו: 1. היריעות אטומות לקרינה ארוכת גל; ו- 2. סכום המקדמים התרמיים של היריעות הוא אחד. פירוט התכונות התרמיות של היריעות בניסוי ההדמיה השישי מופיע בטבלה 4.

טבלה 4: פירוט התכונות התרמיות של יריעות חיפוי הקרקע בניסויי ההדמיה לבחינת השפעת תכונותיהן על טמפרטורת הקרקע היומית, המרבית והמוזערית.

מספר הדמיה לבחינת התכונות התרמיות	מקדם החזרה תרמי יריעה שקופה	מקדם החזרה תרמי יריעה שקופה	מקדם החזרה תרמי יריעה שקופה	מקדם החזרה תרמי יריעה שקופה	מקדם החזרה תרמי יריעה שקופה	מקדם החזרה תרמי יריעה שקופה
1	0.1	0.9	0.1	0.9	0	0.9
2	0.3	0.7	0.3	0.7	0	0.7
2	0.4	0.6	0.4	0.6	0	0.6
4	0.6	0.4	0.6	0.4	0	0.4
5	0.8	0.2	0.8	0.2	0	0.2
6	0.9	0.1	0.9	0.1	0	0.1

3.7. ניתוח תוצאות

תוצאות המדידות נותחו בשיטות סטטיסטיות מקובלות לפי סוג המשתנה הנמדד (במידה שמספר החזרות אפשר ניתוח סטטיסטי). לנתוני הנגיעות במחלת הכימשון בוצע ניתוח שונות מתאים (ANOVA) וכשערכי F של המבחן היו מובהקים נקבעו הבדלים בחומרת המחלה בין הטיפולים השונים על ידי מבחן HSD בדרגת מובהקות של $P \leq 0.05$. ניתוח נתוני הנגיעות בוצע בתוכנת JMP. במדידות מיקרואקלימיות בהן שגיאת המדידה של החיישנים הייתה ידועה וערכה היה משמעותי ביחס לערכו של הנתון הנמדד (כמו במקרה של ההפרש בין טמפרטורת האוויר והטל במבני הגידול בלילה), הוצגה שגיאת המדידה בתוצאות. בסיכום השפעת חיפוי הקרקע בפוליאאתילן על משך יצירת טל במבני הגידול בלילה בוצע חישוב של שגיאת התקן והיא הוצגה בתוצאות. לבדיקת מהימנות תחזיות המודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הגידול נבדק המתאם בין נתונים מדודים לתחזיות המודל על ידי ניתוח רגרסיה ליניארי ונבחנה המובהקות של מקדם המתאם בדרגת מובהקות של $P \leq 0.05$. חישוב שגיאת התקן של משך יצירת טל במבני הגידול בלילה וניתוח מהימנות תחזיות המודל בוצעו בתוכנת Excel (מתוך Office 2003).

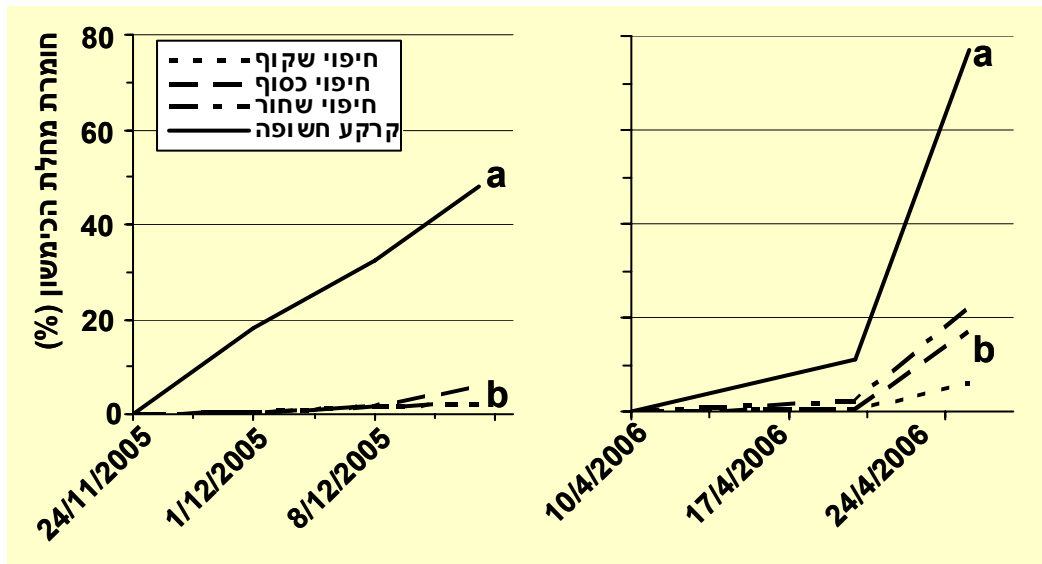
4. תוצאות

4.1. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על התפתחות מחלת הכימסון

חיפוי קרקע מבנה הגידול ביריעות פוליאיתילן שקוף כסוף או שחור הקטין בצורה מובהקת את חומרת הנגיעות במחלת הכימסון בניסויים שנערכו בחוות הבשור בעונות סתיו 2005 ואביב 2006 (איור 5). לא נמצאו הבדלים מובהקים בהשפעות של חיפויי הקרקע השונים שנבדקו בניסויים.

בעונת סתיו 2005 התפתחות המחלה מהדבקה עד להפסקת הניסוי נמשכה כשלושה שבועות. בתקופה זו קצב התפתחות המחלה היה קבוע במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה. לעומת זאת, במבנים בהם הקרקע חופתה ביריעות הפוליאיתילן, מחלת הכימסון כמעט שלא התפתחה. עם הפסקת הניסוי הייתה חומרת המחלה במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה 48% לעומת 3.3% במבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאיתילן (איור 5).

בעונת אביב 2006 התפתחות המחלה מהדבקה עד להפסקת הניסוי נמשכה כשבועיים. בשונה מעונת סתיו 2005, בעונת אביב 2006 היו להתפתחות מחלת הכימסון שני שלבים. בשלב הראשון שנמשך כעשרה ימים, התפתחה המחלה בקצב מתון יחסית בעיקר במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה. לעומת זאת, במבנים בהם הקרקע הייתה מחופה ביריעות פוליאיתילן כמעט ולא התפתחה מחלה כלל. בשלב השני שנמשך כשבוע התגבר קצב התפתחות המחלה בכל המבנים. עם הפסקת הניסוי באביב 2006 הייתה חומרת המחלה 77% במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה לעומת 15% במבנים בהם הקרקע חופתה ביריעות פוליאיתילן (איור 5).



איור 5: השפעת חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על התפתחות מחלת הכימסון במבני הניסוי בחוות הבשור בעונות סתיו 2005 ואביב 2006. ערכים שלידם אותיות שונות באותה עונה, שונים זה מזה במובהק לפי מבחן HSD ($P \leq 0.05$).

4.2. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על המיקרואקלים במבני הניסוי

במהלך הניסויים נוצר והצטבר טל באופן טבעי על הצמחים, בהתאם לתנאים המיקרואקלימיים ששררו במבני הגידול. לצורך ניתוח הנתונים אופיינו שלושה מצבים שונים של טל. הראשון, כשלא אובחנה יצירת טל בכל המבנים; השני, כאשר אובחנה יצירת טל רק במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה; והשלישי, כשאובחנה יצירת טל בכל המבנים. מדידות השפעת חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על תנאי המיקרואקלים במבנים מוצגות להלן על פי מצבי הטל השונים.

4.2.1. השפעת חיפוי קרקע בפוליאיתילן על טמפרטורות האוויר והקרקע

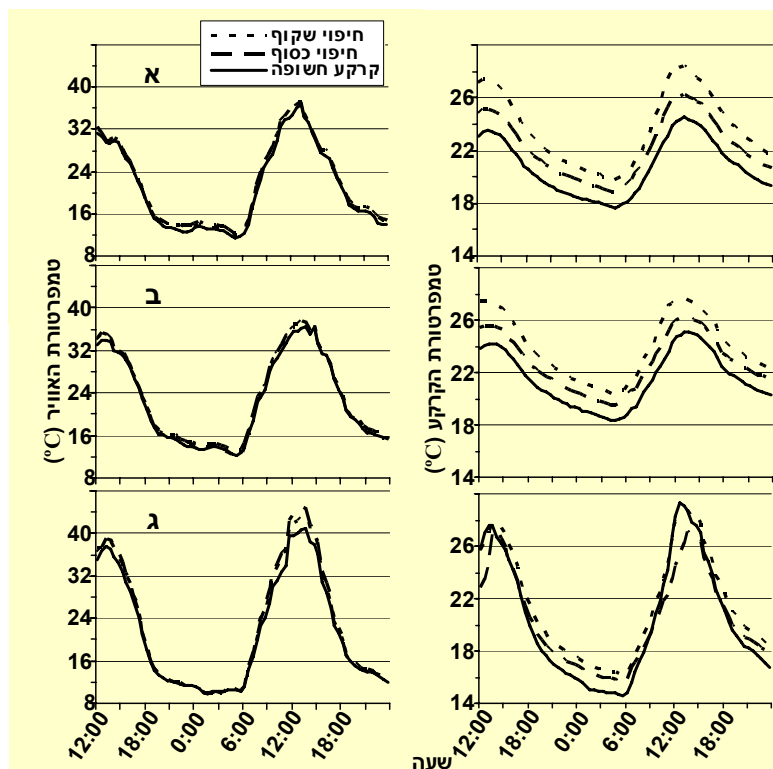
טמפרטורת הקרקע השתנתה בצורה גלית במשך היממה. טמפרטורת הקרקע המרבית נמדדה בצהריים והטמפרטורה הנמוכה ביותר נמדדה לפני עלות השחר. בשני הניסויים טמפרטורת הקרקע הייתה גבוהה יותר

במבנים בהם חופתה הקרקע בפוליאטילן מאשר במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה. בנוסף להיות הקרקע במבנים המחופים חמה יותר מאשר במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה, טמפרטורת הקרקע המחופה בפוליאטילן שקוף הייתה הגבוהה ביותר שנמדדה, אחריה טמפרטורת הקרקע המחופה בפוליאטילן הכסוף ולבסוף, הקרקע החשופה בה הייתה הטמפרטורה הנמוכה ביותר. דירוג זה בטמפרטורת הקרקע בין הטיפולים נמדד בשלושת מצבי הטל שאובחנו (איור 6).

גם טמפרטורת האוויר השתנתה בצורה גלית לאורך היממה בדומה לטמפרטורת הקרקע (איור 6). יתרה מכך, ערכי הטמפרטורה הגבוהים והנמוכים של האוויר נמדדו בו זמנית עם ערכי השיא והשפל בגל היומי של טמפרטורת הקרקע. בשונה מהמדרג בין הטיפולים בטמפרטורת הקרקע, במהלך היומי של טמפרטורת האוויר במבנים לא נמדדו הפרשים עקביים בין מבנים עם קרקע מחופה וחשופה או בין סוגי החיפוי השונים בשלושת מצבי הטל (איור 6).

4.2.2. השפעת חיפוי קרקע בפוליאטילן על יצירת טל ומאזן האנרגיה במבנים בלילה

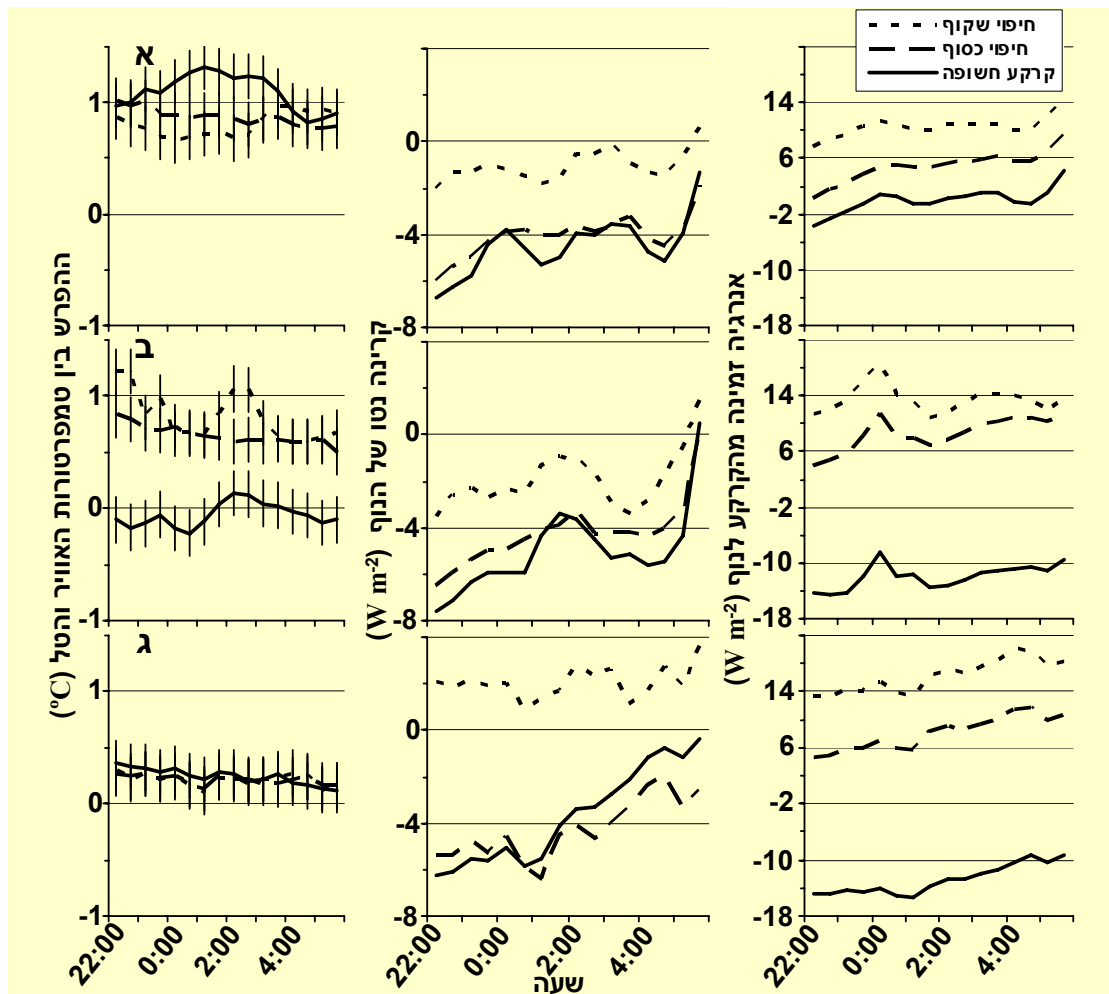
במהלך הניסויים נקבע אם נוצר טל במבנים על ידי חישוב ההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל בתוך המבנים בגובה 2m. כשהפרש הטמפרטורות היה קטן או שווה מסכום שגיאות המדידה ($e = \pm 0.2^\circ\text{C}$) נקבע שנוצר טל. יצירת טל לא נמדדה ישירות על ידי חיישנים ולא חושבה לפי טמפרטורת הנוף מכיוון שהאחרונה נמדדה בגובה 30cm ובגובה זה לא נצפתה הדבקה של מחלת הכימסון. ההדבקה בכימסון התרחשה בעיקר בחלקים העליונים של הנוף לכן הנחנו שיצירת הטל התרחשה בחלקים הגבוהים של הנוף. חיישן הטמפרטורה הקרוב ביותר לחלקו העליון של הנוף היה טמפרטורת האוויר בגובה 2m לכן זה מדד הטמפרטורה שנבחר לקביעת יצירת טל. יצירת הטל התרחשה בעיקר בלילה, בדרך כלל החל מהשעה 22⁰⁰ ועד השעה 05³⁰ לפנות בוקר. במקרה המוקדם ביותר שנרשם במהלך שתי העונות נוצר טל בשעה 19⁰⁰, כשעתיים לאחר רדת החשיכה. השעה המאוחרת ביותר שנמדדה בה נוצר עדיין טל הייתה 08⁰⁰, כשעתיים לאחר זריחת השמש.



איור 6: השפעת קרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאטילן על המחזור היומי של טמפרטורות האוויר בגובה 2m והקרקע בעומק 7cm, במבנה בשלושה מצבים של יצירת טל במבני הניסוי: א. ללא טל, בתאריך 12-13 לאפריל 2006; ב. טל נוצר במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה, בתאריך 19-20 לאפריל 2006; ג. טל נוצר בכל המבנים, בתאריך 6-7 לאפריל 2006.

במצב הראשון כשלא אובחנה יצירת טל בכל המבנים, ההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל היה גדול מאפס בכל הטיפולים שנמדדו (איור 7א). במצב השני, כשאובחנה יצירת טל רק במבנים בהם קרקע הייתה חשופה, ההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל היה אפס ואף נמוך מכך רק במבנים עם קרקע חשופה (איור 7ב). במצב הטל השלישי כשאובחנה יצירת טל בכל המבנים, ההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל הגיע לאפס בכל המבנים (איור 7ג). מצב הטל השלישי אובחן רק במהלך אירוע גשם אז האוויר רווי באדי מים. שטף הקרינה נטו של הנוף בלילה חושב על ידי חישוב ההפרש בין שטפי הקרינה נטו שנמדדו מעל ומתחת לנוף. שטף הקרינה נטו של הנוף בלילה היה נמוך ושליילי בדרך כלל (שטף שליילי מצביע על התקררות). השטף המרבי של הקרינה נטו שנמדד בלילה בניסוי בעונת אביב 2006 היה 5.9 W m^{-2} והמזערי היה -11.4 W m^{-2} .

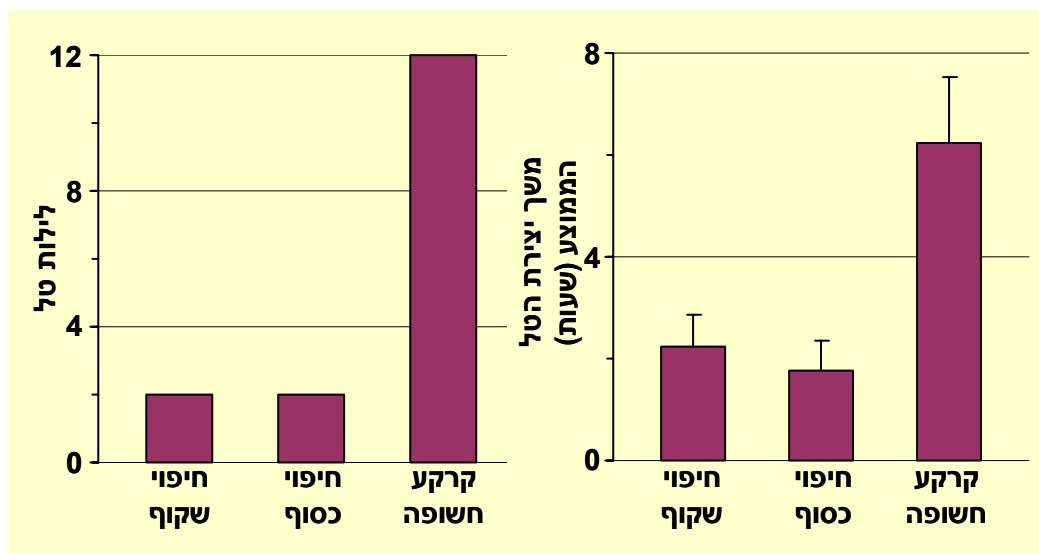
במהלך הניסויים נמדדו הבדלים בערכו של שטף הקרינה נטו של הנוף לאורך הלילה משקיעת השמש ועד זריחתה (איור 7). לפי תוצאות המדידות שנערכו ניתן לחלק את מהלך שטף הקרינה נטו של הנוף בלילה לשלושה חלקים. בחלקו הראשון של הלילה משעה 18^{00} עד שעה 20^{00} (משקיעת השמש ועד כשעה לאחר מכן), שטף הקרינה נטו של הנוף ירד מהר, הפך לשליילי והגיע לערכו הנמוך ביותר לאותו לילה (תוצאות לא מוצגות). בחלק השני של הלילה משעה 20^{00} - 22^{00} שטף הקרינה נטו עלה שוב בצורה חדה (תוצאות לא מוצגות). בחלק השלישי והאחרון של הלילה המוצג באיור 7 (22^{00} - 05^{30}), שטף הקרינה נטו של הנוף עלה שוב במתינות עד לזריחת השמש.



איור 7: השפעת קרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאטילן על יצירת הטל בגובה 2m, הקרינה נטו של הנוף והאנרגיה הזמינה לנוף בלילה, בשלושה מצבים של יצירת טל במבני הניסוי בלילה: א. ללא טל, בתאריך 12-13 לאפריל 2006; ב. טל נוצר במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה, בתאריך 19-20 לאפריל 2006; ג. טל נוצר בכל המבנים, בתאריך 6-7 לאפריל 2006. הקווים האנכיים מיצגים את שגיאת החישוב של ההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל ($e = \pm 0.2^\circ\text{C}$).

שטף הקרינה נטו של הנוף בלילה במבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאטילן שקוף היה הגבוה ביותר שנמדד בשלושת מצבי הטל (איור 7). לעומת החיפוי השקוף, שטפי הקרינה נטו של הנוף בלילה במבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאטילן כסוף ובמבנה בהם הקרקע הייתה חשופה, היו בעלי ערכים דומים בדרך כלל. כך לדוגמא, שטף הקרינה נטו הממוצע בחלקו השלישי של הלילה בשלושת הלילות המוצגים באיור 7, היה $0.3W m^{-2}$ בחיפוי שקוף לעומת, $4.2W m^{-2}$ ו- $4.4W m^{-2}$ בחיפוי כסוף וקרקע חשופה, בהתאמה.

שטף האנרגיה הזמינה לנוף בלילה חושב כהפרש בין שטף החום בקרקע שנימדד בעומק 8cm לבין הקרינה נטו מעל הנוף. שטף האנרגיה הזמינה לנוף בלילה במבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאטילן שקוף היה הגבוה ביותר בשלושת מצבי הטל שאובחנו בניסוי ואחריו שטף האנרגיה הזמינה לנוף במבנים עם חיפוי כסוף וקרקע חשופה בהתאמה (איור 7). במצב הראשון, כשלא אובחן טל, שטף האנרגיה הזמינה לנוף בלילה היה גבוה בשלושת הטיפולים לעומת לילות עם טל. כשאובחן טל במצבים השני והשלישי, שטף האנרגיה הזמינה לנוף בקרקע החשופה היה שלילי בעוד שבקרקע מחופה שטף האנרגיה הזמינה היה חיובי (איור 7ב, ג7). באיור 8 מוצג סיכום של 26 יממות בהן נקבע אם הצטבר טל במבני הניסוי בעונת אביב 2006. מהתוצאות עולה כי ב- 54% מהלילות לא אובחן טל באף אחד מהמבנים (המצב הראשון); ב- 38% מהלילות אובחן טל רק בחדרים עם קרקע חשופה (המצב השני) וב- 8% מהלילות אובחן טל בכל החדרים (המצב השלישי). בנוסף נמצא כי בלילה בו אובחנה יצירת טל בכל המבנים היה משך הזמן בו נוצר הטל ארוך פי 3 במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה ממשך הזמן בו נוצר טל במבנים בהם הקרקע הייתה מחופה (איור 8).



איור 8: השפעת חיפוי קרקע בשני סוגי פוליאטילן על מספר הלילות בהם נוצר טל ומשך הזמן הממוצע של יצירת הטל בלילה בניסוי שבוצע בעונת אביב 2006 בין התאריכים 6 באפריל וה- 5 במאי. הקווים האנכיים מציגים את שגיאת התקן (בקרקע מחופה n=2, בקרקע חשופה n=12).

4.3. מודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הניסוי

מתוצאות הניסויים שנערכו בחוות הבשור עלה שבמבני גידול בהם הקרקע הייתה חשופה חומרת הנגיעות במחלת הכימשון הייתה גבוהה יותר מאשר במבנים בהם הקרקע חופתה ביריעות פוליאטילן (איור 5). בנוסף עלה מהתוצאות שבמבנים בהם הקרקע הייתה חשופה נוצר טל ביותר לילות ולמשך זמן ארוך יותר מאשר במבנים בהם הקרקע חופתה ביריעות פוליאטילן (איור 8). לכן, במבנים עם חיפוי קרקע משך רטיבות העלווה הקצר יחסית לא התאים להתפתחות מחלת הכימשון. לעומתם, במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה תנאי המיקרוקלים עודדו את התפתחות המחלה.

מתוצאות הניסויים עלה שקרקע מחופה בפוליאתיילן פלטה יותר אנרגיה והביאה לתוספת בקליטת האנרגיה בעלוה בלילה. כך, האט חיפוי הקרקע בפוליאתיילן את התקררות הנוף ומנע או קיצר את משך יצירת הטל (איורים 6-8). זהו כנראה המנגנון באמצעותו הצליח חיפוי פוליאתיילן ליצור תנאים שאינם מתאימים להתפתחות מחלת הכימסון במבנים בהם חופתה הקרקע ולכן, הקטין החיפוי את חומרת המחלה (איור 5).

לאחר הבנת המנגנון באמצעות חיפוי קרקע בפוליאתיילן השפיע על התפתחות מחלת הכימסון פיתחנו מודל להערכת השפעת החיפויים על טמפרטורת הקרקע במבני גידול עם חיפויי קרקע שונים או עם קרקע חשופה. חיזוי השפעת החיפוי על טמפרטורת הקרקע יוכל לשמש להערכת ההשפעה של החיפוי על יצירת טל, קיצור משך רטיבות העלוה ומניעת מחלות עלווה מוגברות לחות כמו כימסון.

את נתוני הקלט של המודל שפותח במהלך המחקר (טבלה 5) ניתן לחלק לשתי קבוצות. בקבוצה הראשונה נכללים נתוני הקלט הקבועים בזמן ובקבוצה השנייה נכללים נתוני הקלט המשתנים במהלך הזמן. נתוני הקלט הקבועים בזמן הם תכונות המבנה, הקרקע, הצמחים, יריעות הפוליאתיילן השונות ומצב העננות. נתוני הקלט המשתנים בזמן נחלקו לשתי קבוצות משנה לפי מיקומם: מחוץ למבנה או בתוך המבנה. כל נתוני הקלט המשתנים בזמן שבתוך המבנה נאמדו בעזרת מודלים תוך התחשבות בתכונות הקבועות בזמן. נתוני הקלט המשתנים בזמן מחוץ למבנה נחלקו גם הם לשניים, נתוני קלט שנמדדו או כאלה שנאמדו בעזרת מודל. נתונים הקלט המדודים של המודל היו טמפרטורת ולחץ אדי המים של האוויר מחוץ למבני הגידול וטמפרטורת הקרקע היומית הממוצעת במבנה ביום הקודם. לעומתם, נתוני הקלט החיזויים התחלקו לשלוש קבוצות. בקבוצה הראשונה היו טמפרטורת האוויר ולחץ אדי המים של האוויר במבנים. בקבוצה השנייה היו שטפי הקרינה ובקבוצה השלישית היה קצב החלפת האוויר במבנה.

המודל הותאם לתנאי הסביבה בחוות הבשור תוך שימוש בשני ימים מייצגים המדמים את התנאים בשתי העונות בהן נערכו הניסויים. כיום מייצג לעונת הסתיו נבחר התאריך 1 בדצמבר 2005 וכיום מייצג לעונת האביב נבחר התאריך 10 באפריל 2006. בכל אחד מהימים הוכנסו למודל נתוני קלט לשני מצבי עננות שונים: מצב של שמיים בהירים ומצב של עננות מלאה.

טמפרטורת האוויר ולחץ אדי המים של האוויר במבנים נאמדו על פי אותם הנתונים שנמדדו מחוץ למבנה. האומדן התבצע באמצעות שתי משוואות אחת לחיזוי טמפרטורת האוויר במבנה והשנייה לחיזוי הלחות במבנה. הקלט של המשוואות היה טמפרטורת האוויר והלחות מחוץ למבנה והפלט היה אותם הנתונים בתוך המבנה. המשוואות התקבלו מעקומי רגרסיה בין הנתונים המדודים מחוץ למבנה ובתוכו. עקומי הרגרסיה הראו התאמה טובה ($R^2 > 0.92$) בין הטמפרטורה ולחות האוויר מחוץ למבנה ובתוכו.

שטפי הקרינה מחוץ למבנה נאמדו בעזרת מודלים אמפיריים לחיזויים (ראה נספחים 1.1). המודלים פותחו ממודלים קיימים מהספרות לחיזוי הקרינה הגלובאלית קצרת הגל והקרינה ארוכת הגל מהשמיים. נתוני הקלט למודלים היו המיקום הגיאוגרפי ותנאי העננות וכן הטמפרטורה והלחות של האוויר מחוץ למבנה. החישובים בוצעו למצבים בהם השמיים בהירים ולמצבים בהם השמיים מעוננים, בתנאי טמפרטורת האוויר ולחות האוויר שנמדדו בחוות הבשור בימים המייצגים שנבחרו.

שטפי הקרינה בתוך המבנה בגובה פני הקרקע או החיפוי נחזו בעזרת שטפי הקרינה מחוץ למבנה תוך התחשבות בגיאומטריית השתילה, גובה הצמחים, LAI ותכונות כיוסי המבנה. בשונה משאר נתוני הקלט המשתנים שערכם עודכן מידי חצי שעה, קצב החלפת האוויר במבנים (אחד ממשתני הקלט של המודל) השתנה רק בין שעות היום והלילה, נקבעו ערכים מייצגים קבועים ליום וללילה. קביעת קצב החלפת האוויר התבססה על ערכים מייצגים שנבחרו על סמך מדידות שייצגו מצב של רוח מתונה בשעות היום ורוח חלשה בשעות הלילה. הערכים לא נלקחו מהקשר שבין מהירות הרוח וקצב החלפות אוויר בגלל אי הדיוק שהתקבל בקשר זה במדידה הניסויית (איור 10) והחשש ששימוש בקשר זה ייתן ערכים נמוכים מאוד של קצב החלפות אוויר שגורמים לערכים גבוהים מאוד של התנגדות אווירודינמית.

פיתוח המודל התבסס על מספר הנחות עבודה. הנחות העבודה שימשו לחיזוי אנליטי של מאזני הקרינה ומאזני החום בפני חיפוי הקרקע או פני הקרקע החשופים במבנה. לחיזוי מאזני הקרינה **ארוכת הגל** בתוך המבנה נעשה שימוש בשלוש הנחות עבודה. ההנחה הראשונה הייתה שאין צמחים במבנה. ההנחה השנייה הייתה שטמפרטורת החיפוי זהה לטמפרטורת הקרקע. ההנחה השלישית הייתה שטמפרטורת כיסוי המבנה שווה לערך הממוצע של טמפרטורת האוויר במבנה ומחוץ לו. שלוש הנחות עבודה נוספות שימשו לקביעת **מאזני החום** של הקרקע במבנה. ההנחה הראשונה הייתה שההתנגדות האווירודינאמית למעבר חם ואדי מים מפני הקרקע הן שוות (Stanghellini, 1987). ההנחה השנייה הייתה שההתנגדות האווירודינאמית למעבר חום ואדי מים מפני הקרקע איננה תלויה בטמפרטורה (Monteith and Unsworth, 1990; Tanny et al., 2006). ההנחה השלישית הייתה ששטף החום הכמוס מפני קרקע מחופה בפוליאתיילן הוא אפס.

4.3.1. מציאת הקשר בין מהירות וכיוון הרוח לקצב החלפת האוויר במבני הניסוי

קצב החלפת האוויר במבנה שווה ליחס שבין נפח האוויר שעבר במבנה ביחידת זמן לנפח המבנה. כדי למצוא את הקשר בין מהירות וכיוון הרוח לקצב החלפת האוויר השעתי במבני הניסוי נמדד קצב הדעיכה של ריכוז הגז הסמן N_2O במבנה כפונקציה של הזמן, מהירות הרוח וכיוונה. הנתונים שנמדדו שמשו להכנת עקום המתאר את ירידת ריכוז הגז הסמן (ב- ppm) במשך הזמן (בשניות). עקומי הדעיכה שהתקבלו היו בעלי אופי אקספוננציאלי ומקדם התאמה גבוה של קו הרגרסיה ($R^2 > 0.9$). בסך הכול נערכו 48 מדידות של קצב החלפת האוויר במהלך ארבעה ימי מדידה. בזמן שנערכו המדידות, שררו תנאי רוח מגוונים שאפשרו בדיקת ההשפעה של מהירויות וכיווני רוח שונים על קצב החלפת האוויר במבנה.

קצב החלפת האוויר לשעה במבנה חושב ממשוואת הדעיכה לפי (Boulard et al., 1997). זאת על ידי הכפלה של מקדם הדעיכה האקספוננציאלי מעקום הדעיכה של ריכוז הגז הסמן במבנה ב- 3600 שניות לשעה. באיור 9 ניתן לראות דוגמה לעקום מייצג של דעיכת ריכוז הגז הסמן לפי הזמן שנמדד בניסוי.

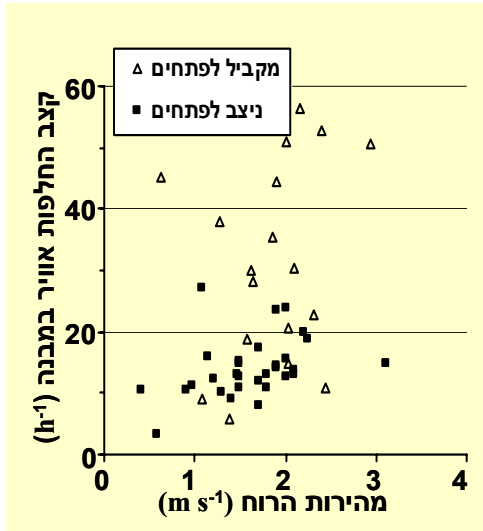
לצורך מציאת הקשר בין מהירות וכיוון הרוח מחוץ למבנה וקצב החלפת האוויר במבנה נקבע כי כשכיוון הרוח בין צפון מערב לצפון מזרח או בין דרום מערב לדרום מזרח הרוח תוגדר כמקבילה לפתחים של המבנה. בכל כיוון רוח אחר, הרוח הוגדרה כניצבת לפתחי המבנה.

בבדיקת הקשר בין קצב החלפות האוויר למהירות וכיוון הרוח מחוץ למבנה נמצא כי לשני האחרונים השפעה גדולה על קצב החלפת האוויר במבני הניסוי (איור 10). כך לדוגמה, הקצב המרבי של החלפת האוויר שנמדד היה 56.5 החלפות לשעה כשמהירות הרוח הייתה 2.16 m s^{-1} מכיוון צפון-צפון-מזרח. באופן דומה, קצב החלפת האוויר המזערי שנמדד היה 3.2 החלפות לשעה כשמהירות הרוח 0.6 m s^{-1} מכיוון מערב.

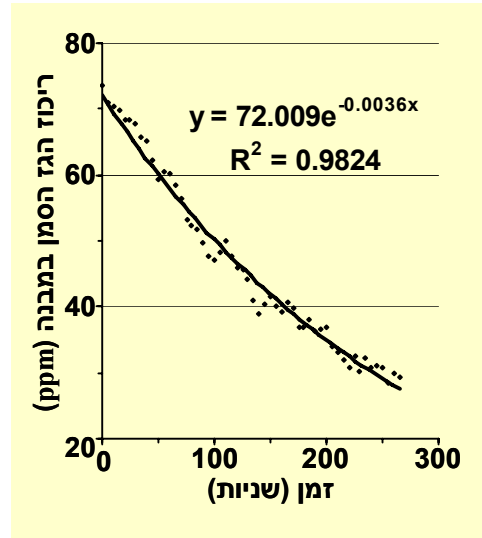
מנתונים אלה עולה כי רגישות קצב החלפת האוויר לשינוי בכיוון הרוח ביחס לפתחי המבנה הייתה גדולה מהרגישות לשינוי במהירות הרוח (איור 10). התוצאות הראו כי עבור מהירות רוח דומה התקבלו קצבי החלפת אוויר שונים כשכיוון הרוח השתנה. לדוגמה, בעשר המדידות בהן מהירות הרוח הייתה $1.4-1.6 \text{ m s}^{-1}$ התקבלו 10 קצבי החלפת אוויר שונים, בין 5.8 ל- 29.9 החלפות אוויר לשעה, בהתאם לכיוון הרוח. בנוסף הראו המדידות כי להתגברות הרוח במקביל לפתחי המבנה, הייתה השפעה גדולה יותר על קצב החלפת האוויר מהתגברות דומה לה בניצב לפתחים. כך לדוגמה, טווח ההשתנות של קצב החלפת האוויר לרוח במקביל לפתחים היה בין 9 ל- 56.5 החלפות אוויר לשעה. לעומתו טווח ההשתנות של קצב החלפת האוויר לרוח בניצב לפתחים היה בין 3.2 ל- 27 החלפות אוויר לשעה.

טבלה 5: נתוני הקלט למודל חיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הניסוי (בסדר סימן עולה).

יחידות	ערך	סימן	שם הנתון
-	בהיר או מעונן	-	מצב העננות
-	0.17	a	מקדם התיקון של סטפן בולצמן לשמיים מעוננים
-	0.3	a _{BS}	אלבדו הקרקע הממוצע במבנה
-	0.23	a _{mulch}	אלבדו קרקע מחופה הממוצע במבנה
-	4/7	c	היחס בין רוחב השבילים ורוחב המבנה
-	0.68	c _a	קבוע לחישוב אמסיביות השמיים
mbar ^{-0.5}	0.036	c _b	קבוע לחישוב אמסיביות השמיים
J gr ⁻¹ °K ⁻¹	1.006	C _p air	קיבול החום של האוויר בלחץ קבוע
J m ⁻³ °K ⁻¹	2007143	C _{soil}	קיבול חום הנפחי של הקרקע
m	2.5	h	גובה המבנה
m	2	h _{plant}	גובה הצמחים
-	0.41	k	קבוע פון קרמן
m	6	l	אורך המבנה
m ² m ⁻²	4.67	LAI	אינדקס שטח העלווה
W m ⁻²	1366	S	הקבוע הסולארי
hr ⁻¹	20	TOR	קצב החלפות אוויר ביום
hr ⁻¹	10	TOR	קצב החלפות אוויר בלילה
m	6.3	w	רוחב המבנה
m	0.9/0.9	W _{path} /W _{row}	רוחב השבילים ורוחב שורות הכולל במבנה
m	1	z	גובה מדידת מהירות הרוח במבנה
m	0.0001	z ₀	גובה החיכוך למדידת מהירות הרוח במבנה
-	0.5	β	מקדם הפיזור של הנוף לקרינה קצרת גל
Pa °K ⁻¹	65	γ	הקבוע הפסיכרומטרי
-	0.34	ε _{Bmulch lw}	אמסיביות של חיפוי הקרקע הכסוף
-	0.04	ε _{cover lw}	אמסיביות של כיסוי המבנה
-	0.65	ε _{soil lw}	אמסיביות הקרקע
-	0.34	ε _{TRmulch lw}	אמסיביות של חיפוי הקרקע השקוף
cm ³ cm ⁻³	0.06	θ _{path}	תכולת המים הנפחית בקרקע בשביל
cm ³ cm ⁻³	0.26	θ _{row}	תכולת המים הנפחית בקרקע בשורה
cm ³ cm ⁻³	0.4	θ _{sat}	תכולת המים הנפחית בקרקע ברוויה
Kg m ⁻³	1.2	ρ _{air}	צפיפות האוויר
-	0	ρ _{Bmulch lw}	מקדם העברה לקרינה ארוכת גל של חיפוי הקרקע הכסוף
-	0.63	ρ _{Bmulch sw}	מקדם החזרה לקרינה קצרת גל של חיפוי הקרקע הכסוף
-	0.6	ρ _{cover lw}	מקדם החזרה לקרינה ארוכת גל של כיסוי המבנה
-	0.19	ρ _{cover sw}	מקדם החזרה לקרינה קצרת גל של כיסוי המבנה
-	0.24	ρ _{soil lw}	מקדם החזרה לקרינה ארוכת גל של הקרקע
-	0.6	ρ _{TRmulch lw}	מקדם החזרה לקרינה ארוכת גל של חיפוי הקרקע השקוף
-	0.59	ρ _{TRmulch sw}	מקדם החזרה לקרינה קצרת גל של חיפוי הקרקע השקוף
W m ⁻² °K ⁻⁴	5.67 E ⁻⁸	σ	קבוע סטפן בולצמן
-	0.6	τ	הוא מקדם ההעברה של האטמוספירה לקרינה קצרת גל
-	0.6	τ _{Bmulch lw}	מקדם החזרה לקרינה ארוכת גל של חיפוי הקרקע הכסוף
-	0	τ _{Bmulch sw}	מקדם העברה לקרינה קצרת גל של חיפוי הקרקע הכסוף
-	0.29	τ _{cover lw}	מקדם העברה לקרינה ארוכת גל של כיסוי המבנה
-	0.81	τ _{cover sw}	מקדם העברה לקרינה קצרת גל של כיסוי המבנה
-	0.02	τ _{TRmulch lw}	מקדם העברה לקרינה ארוכת גל של חיפוי הקרקע השקוף
-	0.38	τ _{TRmulch sw}	מקדם העברה לקרינה קצרת גל של חיפוי הקרקע השקוף
s ⁻¹	0.000073	ω	תדירות זוויתית של גל הטמפרטורה בקרקע
W m ⁻¹ °K ⁻¹	0.9	λ _{mulch}	מוליכות חום של קרקע מחופה
W m ⁻¹ °K ⁻¹	0.65	λ _{soil}	מוליכות חום של הקרקע
Pa	משתנה	e _{a out}	לחץ אדי מים באוויר מחוץ למבנה
W m ⁻²	משתנה	R _{lw}	קרינה ארוכת גל מהשמיים
W m ⁻²	משתנה	R _s	הקרינה הגלובלית
°K	משתנה	T _{a out}	טמפרטורת האוויר מחוץ למבנה
°K	משתנה	T _{s ave}	טמפרטורת הקרקע הממוצעת ביום הקודם
°	משתנה	ψ	היא הזווית בין השמש לאנך לפני כדור הארץ



איור 10: השפעת מהירות וכיוון הרוח על קצב החלפות האוויר במבני הניסוי ב- 48 מדידות על פני ארבעה ימי מדידה בין התאריכים 3 בינואר ל- 1 בפברואר 2007.



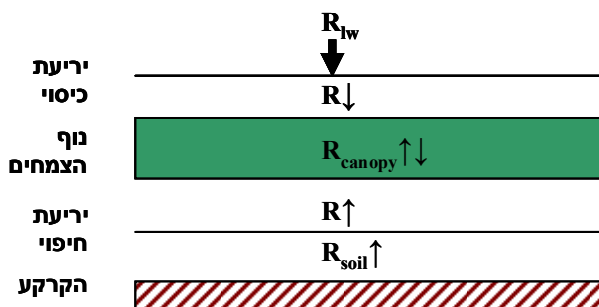
איור 9: השתנות ריכוז גז הסמן ששימש להגדרת קצב החלפות האוויר בחלל המבנה כתלות בזמן בתאריך 1 לפברואר 2007 בשעה 09:13.

4.3.2 קביעת התכונות הקרינתיות של היריעות במבני הניסוי

לצורך קביעת התכונות הקרינתיות של היריעות במבני הניסוי חושבו מאזני קרינה ליריעות השונות. מאזני הקרינה חושבו בנפרד ליריעות הפוליאטילן ששימשו לכיסוי המבנה וליריעות ששימשו לחיפוי הקרקע. יתרה מזו, לכיסוי המבנה נקבעו התכונות הפוטומטריות בנוסף לתכונות התרמיות.

קביעת התכונות הפוטומטריות של כיסוי המבנה נעשתה תוך שימוש בהנחת העבודה שהכיסוי השקוף לא בולע קרינה קצרת גל. לכן, מקדם ההעברה של הכיסוי לקרינה קצרת גל (τ_{cover_sw}) שווה ליחס בין שטף הקרינה קצרת הגל מעל לנוף בכיוון מטה (R_{sw_ac}) ושטף הקרינה הגלובלית (R_s). בהתאם להנחה כי הכיסוי איננו בולע קרינה קצרת גל, מקדם ההחזרה של הכיסוי (ρ_{cover_sw}) שווה למשלים של מקדם ההעברה לאחד. הנתונים לחישוב התכונות הפוטומטריות של הכיסוי נמדדו בשעות היום בתאריכים ה- 9 עד 16 באפריל 2006. תוצאות חישוב מקדמי הקרינה קצרת הגל של כיסוי המבנה הראו כי ערכו של מקדם ההעברה לקרינה קצרת גל הוא 0.7 וערכו של מקדם ההחזרה הוא 0.3.

קביעת התכונות התרמיות של יריעות הפוליאטילן בניסוי נעשתה על ידי גרסיה רבת משתנים של מאזני הקרינה ארוכת הגל במבנה שחושבו מנתונים מיקרואקלימיים מדודים. המחשה של מאזני הקרינה מתוארת באיור 11. הנתונים המיקרואקלימיים המדודים היו: הקרינה ארוכת הגל מהשמיים, טמפרטורת הנוף, טמפרטורת האוויר מעל לנוף, טמפרטורת חיפוי הקרקע וטמפרטורת הקרקע. הנתונים המיקרומטאורולוגיים נמדדו במהלך הלילה מהשעה 20³⁰ ועד 05⁰⁰ בתאריכים ה- 9 עד 16 באפריל 2006. חישוב מאזני הקרינה ארוכת הגל לצורך קביעת התכונות התרמיות של היריעות בניסוי, נעשה תוך שימוש בארבע הנחות עבודה. ההנחה הראשונה הייתה שנוף הצמחים הוא גוף שחור. ההנחה השנייה הייתה שהנוף מכסה את שטח רצפת המבנה. ההנחה השלישית הייתה שהקרקע היא גוף שחור. ההנחה הרביעית והאחרונה הייתה שטמפרטורת כיסוי המבנה שווה לטמפרטורת האוויר מעל לנוף הצמחים.



איור 11: המחשה של שטפי הקרינה ששימשו לקביעת התרמיות של יריעות הפוליאטילן במבנה. R_{lw} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים; R_{canopy} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מנוף הצמחים; R_{soil} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהקרקע; R הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מכיסוי המבנה בכיוון מטה; R הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מחיפוי הקרקע בכיוון מעלה.

החישובים לקביעת התכונות התרמיות של יריעות הפוליאתילן לכיסוי המבנה וחיפוי הקרקע נערכו בנפרד. לצורך קביעת התכונות התרמיות של היריעות נערכו גרסיות ליניאריות רבות משתנים בעזרת תוכנת Excel לכל אחד מהטיפולים בניסוי. הגרסיות לקביעת תכונות הכיסוי נערכו על משוואה 11 המתקבלת ממשוואות 9 ו-10 ומתארת את מאזן הקרינה ארוכת הגל המדודה מעל לנוף הצמחים בכיוון מטה מהכיסוי לנוף. בנוסף, לצורך קביעת התכונות התרמיות של חיפוי הקרקע במבנה נערכו שתי גרסיות אחת לכל סוג חיפוי. הגרסיות לקביעת התכונות התרמיות של חיפוי הקרקע נערכו על משוואה 14 המתקבלת ממשוואות 12 ו-13 ומתארת את מאזן הקרינה ארוכת הגל המדודה מתחת לנוף הצמחים בכיוון מעלה מהחיפוי לנוף.

$$R_{\downarrow} = R_{n_above_canopy} + R_{canopy} \quad \text{משוואה 9:}$$

$$R_{\downarrow} = \varepsilon_{cover} \sigma T_{cover}^4 + \tau_{cover} R_{lw} + \rho_{cover_lw} R_{canopy} \quad \text{משוואה 10:}$$

$$R_{n_above_canopy} + R_{canopy} = \varepsilon_{cover} \sigma T_{cover}^4 + \tau_{cover_lw} R_{lw} + \rho_{cover_lw} R_{canopy} \quad \text{משוואה 11:}$$

$$R_{\uparrow} = R_{n_below_canopy} - R_{canopy} \quad \text{משוואה 12:}$$

$$R_{\uparrow} = \varepsilon_{mulch} \sigma T_{mulch}^4 + \tau_{mulch_lw} R_{soil} + \rho_{mulch_lw} R_{canopy} \quad \text{משוואה 13:}$$

$$R_{n_below_canopy} - R_{canopy} = \varepsilon_{mulch} \sigma T_{mulch}^4 + \tau_{mulch_lw} R_{soil} + \rho_{mulch_lw} R_{canopy} \quad \text{משוואה 14:}$$

במשוואות אלה: R_{\downarrow} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהכיסוי לכיוון הנוף ($W m^{-2}$); $R_{n_above_canopy}$ הוא שטף הקרינה נטו המדוד מעל לנוף ($W m^{-2}$); R_{canopy} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל שפולט הנוף ($W m^{-2}$); ε_{cover} היא אמסיביות כיסוי המבנה, T_{cover} היא טמפרטורת כיסוי המבנה ($^{\circ}K$); τ_{cover_lw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; R_{lw} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים ($W m^{-2}$); ρ_{cover_lw} הוא מקדם ההחזרה של החיפוי לקרינה ארוכת גל; R_{\uparrow} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהחיפוי לכיוון הנוף ($W m^{-2}$); $R_{n_below_canopy}$ הוא שטף הקרינה נטו המדוד מתחת לנוף ($W m^{-2}$); ε_{mulch} היא אמסיביות חיפוי הקרקע; T_{mulch} היא טמפרטורת חיפוי הקרקע ($^{\circ}K$); τ_{mulch_lw} הוא מקדם ההעברה של חיפוי הקרקע לקרינה ארוכת גל; R_{soil} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל שפולטת הקרקע ($W m^{-2}$); ו- ρ_{mulch} הוא מקדם ההחזרה של חיפוי הקרקע לקרינה ארוכת גל.

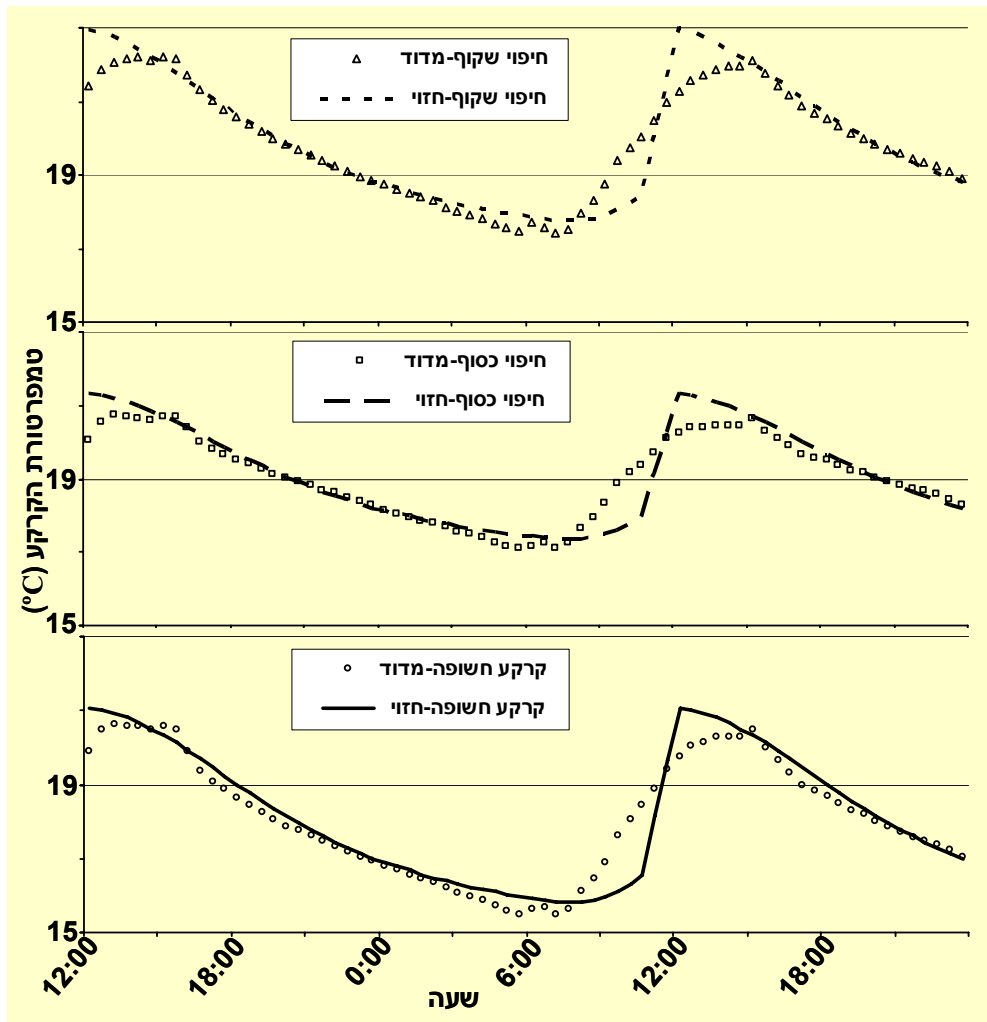
תוצאות הגרסיות שנערכו למשוואות מאזן הקרינה בהן השתמשנו לקביעת המקדמים התרמיים של כיסוי המבנה וחיפוי הקרקע מופיעות בטבלה 6. בכל הגרסיות שנערכו היו ערכי מקדם המתאם (R^2) גבוהים מ-0.99 וסכום המקדמים שהתקבלו היה בין 0.98 ל-1. לקביעת המקדמים התרמיים של כיסוי המבנה בוצעו גרסיות בשלושת הטיפולים בניסוי. בכול הגרסיות התקבלו תוצאות דומות. נמצא כי מקדם ההחזרה של הכיסוי היה גבוה ומקדמי ההעברה והאמסיביות נמוכים (טבלה 6). לקביעת המקדמים התרמיים של יריעות החיפוי בוצעה גרסיה אחת לחיפוי השקוף ואחת לחיפוי הכסוף. לשני החיפויים התקבל מקדם העברה אפס לקרינה ארוכת גל. לחיפוי השקוף התקבלו אמסיביות ומקדם החזרה שווים ולחיפוי הכסוף התקבל מקדם החזרה גדול ב-20% מהאמסיביות (טבלה 6).

טבלה 6: התכונות התרמיות שחושבו ליריעות הפוליאתילן בניסוי.

סוג היריעה	ε_{lw}	τ_{lw}	ρ_{lw}
כיסוי מבנה	0.05	0.11	0.83
חיפוי שקוף	0.5	0.01	0.5
חיפוי כסוף	0.4	0.01	0.59

4.4. בחינת תקפות המודל

לבחינת מהימנות המודל (verification), נבחנה ההתאמה בין תחזיות המודל ונתונים שנמדדו למעשה. הבחינה הייתה איכותית (בדיקה חזותית של מגמות והבדלים בין חזוי למדוד) אך היא בוצעה גם בשיטות כמותיות (בדיקת מובהקות המתאמים בין חזוי למדוד בכלים סטטיסטיים). תחזית המודל לטמפרטורת הקרקע הייתה מדויקת יותר בשעות החשכה מאשר בשעות האור בכל טיפולי חיפוי הקרקע (איור 12). המודל לא חזה במדויק את מהלך טמפרטורת הקרקע בשעות היום כשמאזן הקרינה קצרת הגל היה גדול מאפס. לעומת זאת, בשעות הלילה הצליח המודל לחזות את טמפרטורת הקרקע במבני הניסוי בדיוק גבוה. ביום בין השעה 06³⁰ לשעה 17³⁰, ערכו המוחלט של ההפרש הממוצע בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה לכל הטיפולים היה 0.47°C. ערכו של ההפרש הגדול ביותר בין טמפרטורת הקרקע המדודה לחזויה ביום 1.9°C אובחן בשעה 10³⁰. לעומת זאת, בלילה בין השעה 18⁰⁰ לשעה 06⁰⁰, ערכו המוחלט של ההפרש הממוצע בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה היה רק 0.14°C. ערכו של ההפרש הגדול ביותר בין טמפרטורת הקרקע המדודה לחזויה בלילה 0.5°C אובחן בשעה 10³⁰.

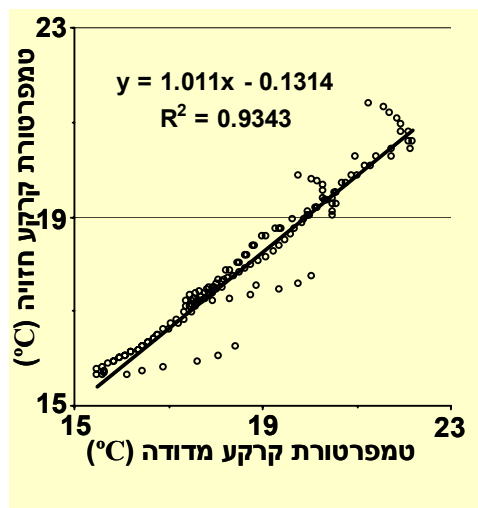


איור 12: השפעת קרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאיתילן על המהלך יומי של טמפרטורת קרקע המדודה וחזויה במודל בתאריך 1-2 בדצמבר 2005.

דיוקן של תחזיות המודל היה שונה בין הטיפולים השונים ביום ובלילה (איור 12). ביום, התחזית המדויקת ביותר של טמפרטורת הקרקע הייתה בקרקע שחופתה בפוליאיתילן כסוף ואחריה הקרקע החשופה

והחיפוי השקוף שהראו דיוק כמעט זהה. בלילה, התחזית של טמפרטורת הקרקע המחופה הייתה מדויקת יותר מהתחזית לקרקע חשופה כשעבור שני חיפויי הקרקע היה הדיוק כמעט זהה. ביום בחיפוי הכסוף, ערכו המוחלט של ההפרש הממוצע בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה היה 0.31°C בעוד שבשני הטיפולים האחרים ערכו המוחלט של ההפרש הממוצע בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה היה 0.55°C . בלילה, בקרקע מחופה ערכו המוחלט של ההפרש הממוצע בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה היה 0.1°C . בו זמון, בקרקע חשופה ערכו המוחלט של ההפרש הממוצע בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה היה 0.22°C .

נכונות המודל נבחנה גם בכלים סטטיסטיים. מטרת המבחן הייתה לבדוק האם טמפרטורת הקרקע



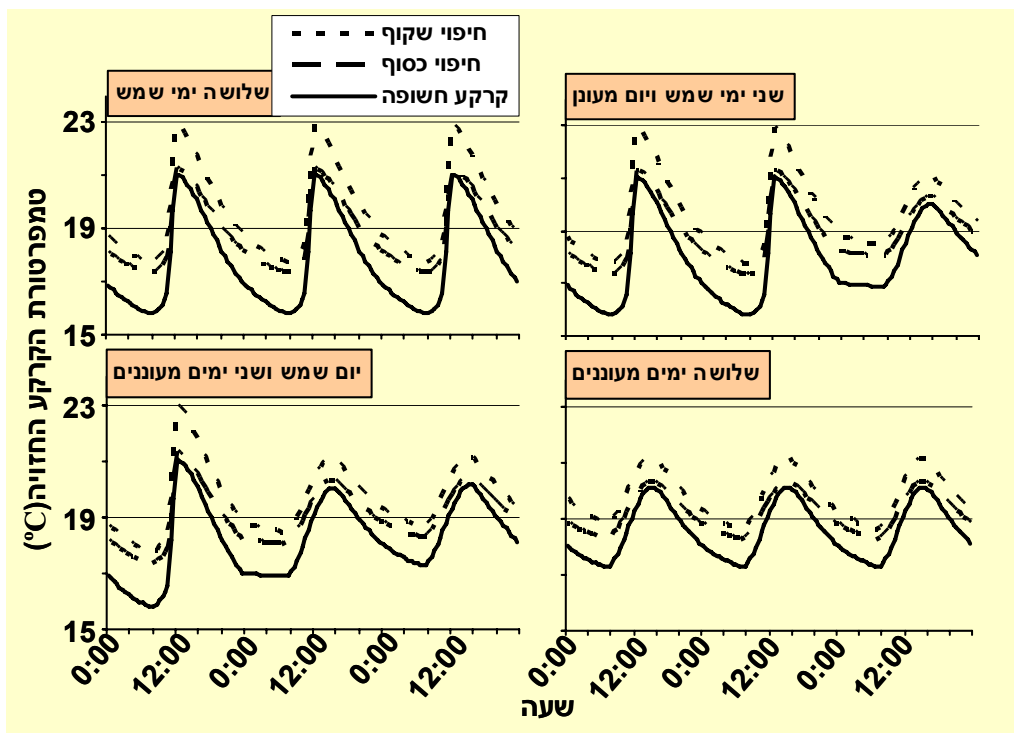
איור 13: ההתאמה בין טמפרטורת הקרקע המדודה והחזויה במודל בתאריך 1-2 בדצמבר 2005.

החזויה שונה במובהק מטמפרטורת הקרקע המדודה, לאותו פרק זמן. כדי לקבוע זאת, נבחנה המובהקות של הרגרסיה הליניארית המתארת את המתאם בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה בשלושת הטיפולים לאורך יממה. ההתאמה הכמותית בין הנתונים המדודים לתחזיות המודל מוצגת באיור 13. בחינת מובהקות שיפוע קו הרגרסיה שהתקבל, הראתה שהוא איננו שונה במובהק מקו 1:1 ובחינת מובהקות החותך הראתה שהוא איננו שונה במובהק מאפס, לפי רמת מובהקות $P \leq 0.05$ ($n=144$). כלומר, תחזיות טמפרטורת הקרקע של המודל נמצאו מהימנות ברמת מובהקות זו.

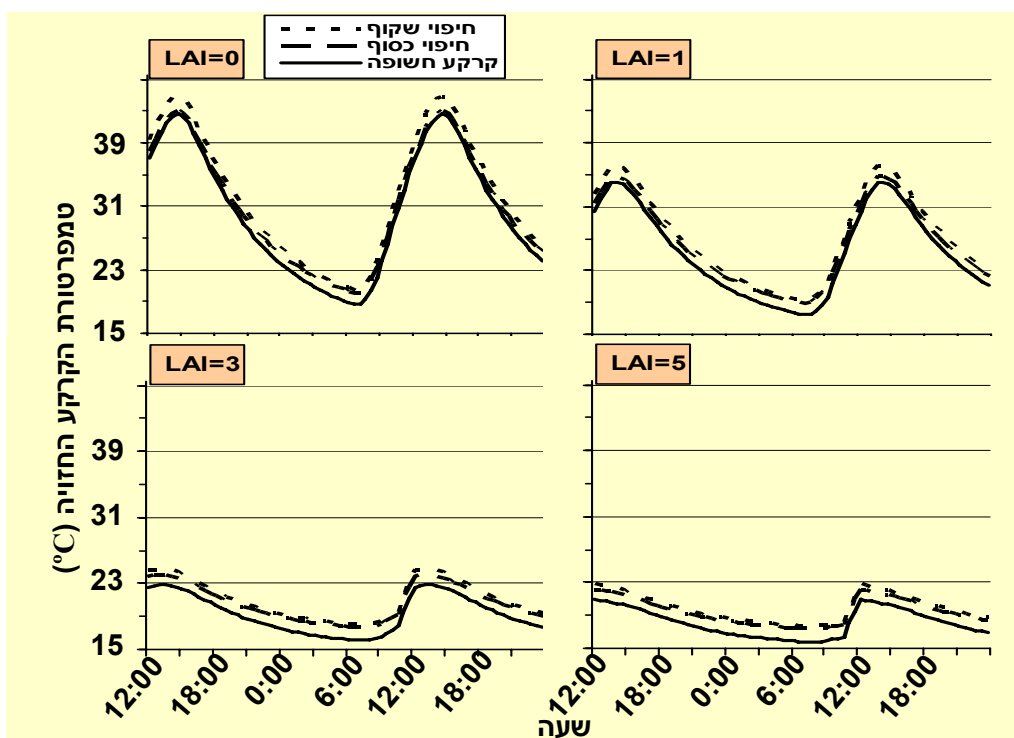
4.5. ניסויי הדמיה

לאחר שהתברר שהמודל אמין ביצענו בו סידרה של ניסויי הדמיה בהם בחננו את החשיבות של גורמים שונים ואת השפעתם על טמפרטורת הקרקע. תחזית המודל להשפעת מצב העננות ומשכו על טמפרטורת הקרקע מוצגת באיור 14. לפי התחזית, עננות תגרום לירידה של טמפרטורת הקרקע המרבית ביום ועליה של טמפרטורת הקרקע המזערית בלילה, לעומת שמיים בהירים. בנוסף, לפי התחזית הגל היומי של טמפרטורת הקרקע יתייצב לאחר כשמונה שעות משינוי תנאי העננות. המודל חזה כי המעבר מתנאי שמש לעננות ישפיע בצורה שונה על טמפרטורת הקרקע בטיפולים השונים. בחיפוי השקוף טמפרטורת הקרקע המרבית תרד ב- 0.8°C והטמפרטורה המזערית תעלה ב- 0.7°C . בחיפוי הכסוף טמפרטורת הקרקע המרבית תרד ב- 0.8°C והטמפרטורה המזערית תעלה ב- 1°C . בקרקע החשופה טמפרטורת הקרקע המרבית תרד ב- 0.7°C והטמפרטורה המזערית תעלה ב- 1.5°C .

תחזית המודל להשפעת שינוי במימדי נוף הצמחים במבנה על טמפרטורת הקרקע מוצגת באיור 15. מימדי הנוף שנבחנו כללו את אינדקס שטח העלווה (LAI) וגובה הצמחים המתאים לו (h_{plant}), כפי שנמדדו. מימדי הנוף בהם השתמשנו בהדמיות שתוצאותיהן מתוארות באיור 15 מייצגים את שלבי הגידול השונים החל בתרום שתילה ($LAI=0$) ועד נוף מפותח ($LAI=5$; ו- $h_{\text{plant}}=2.12\text{m}$). לפי תחזית המודל ככל שהנוף מפותח יותר טמפרטורת הקרקע צפויה להיות נמוכה יותר. כמו כן, ככל שהנוף מפותח יותר הפרש טמפרטורות הקרקע בין קרקע מחופה וחשופה יהיו גדולים יותר. בנוסף, בחינת השפעת מימדי הנוף על טמפרטורת הקרקע הראתה שנוף מפותח מוריד את טמפרטורת הקרקע המרבית בשיעור גדול יותר מאשר את טמפרטורת הקרקע המזערית. בחינת אופייה של השפעת מימדי הנוף על טמפרטורת הקרקע מגלה שההשפעה איננה ליניארית ושיעור הירידה בטמפרטורת הקרקע קטן ככל שהנוף מתפתח.



איור 14: השפעת מצב העננות ומשכו על המהלך היומי של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בקרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאיתילן לאורך שלוש יממות.



איור 15: השפעת אינדקס שטח העלווה (LAI) על המהלך היומי של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בקרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאיתילן.

תחזית המודל להשפעת סוג הקרקע ומצב העננות על טמפרטורת הקרקע מוצגת באיור 16. ההדמיות בוצעו עבור שני סוגי קרקע (חולית וחרסיתית) ושני מצבי עננות (שמיים בהירים או מעוננים). נתוני הקלט הקבועים בזמן המאפיינים את הקרקעות הנבחנות מופיעים בטבלה 7. לפי תחזית המודל למצב העננות השפעה גדולה יותר על טמפרטורת הקרקע מאשר לסוג הקרקע (איור 16). שינוי במצב העננות משמיים

בהירים למעוננים הוריד את טמפרטורת הקרקע היומית המרבית הממוצעת בכל הטיפולים ב- 1.1°C בקרקע חולית וב- 1°C בקרקע חרסיתית. בדומה לכך טמפרטורת הקרקע היומית המזערית הממוצעת בכל הטיפולים עלתה ב- 1.2°C בקרקע חולית וב- 1°C בקרקע חרסיתית.

טבלה 7: נתוני הקלט הקבועים בזמן לקרקע חולית וחרסיתית לפי Campbell and Norman (1998)

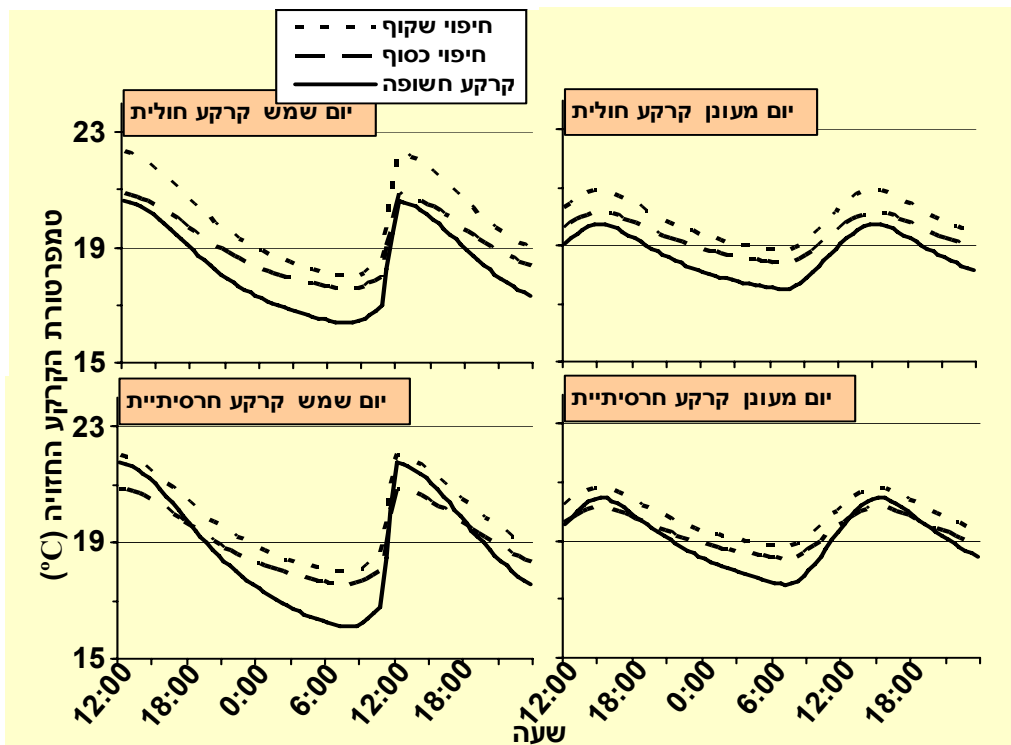
יחידות	ערך	סימן	הנתון
$\text{MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$	2.53	$C_{\text{soil s}}$	קיבול חום נפחי קרקע חולית
$\text{MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$	2.53	$C_{\text{soil c}}$	קיבול חום נפחי קרקע חרסיתית
$\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$	1.014	λ_s	מוליכות החום בקרקע חולית
$\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$	0.47	λ_c	מוליכות החום בקרקע חרסיתית
	0.24	$a_{\text{BS s}}$	אלבדו הקרקע החולית
	0.11	$a_{\text{BS c}}$	אלבדו הקרקע חרסיתית
	0.36	$W_{i s}$	פונקצית "המרחק מההתאדות פוטנציאלית" מפני הקרקע החולית
	0.32	$W_{i c}$	פונקצית "המרחק מההתאדות פוטנציאלית" מפני הקרקע חרסיתית
	0.21	$a_{\text{mulch s}}$	אלבדו פני הקרקע החולית המחופה
	0.21	$a_{\text{mulch c}}$	אלבדו פני הקרקע חרסיתית המחופה
	0.65	$\epsilon_{\text{soil lw s}}$	אמסיביות הקרקע החולית
	0.65	$\epsilon_{\text{soil lw c}}$	אמסיביות הקרקע חרסיתית
	0.24	$\rho_{\text{soil lw s}}$	מקדם ההחזרה לקרינה ארוכת גל של קרקע חולית
	0.24	$\rho_{\text{soil lw c}}$	מקדם ההחזרה לקרינה ארוכת גל של קרקע חולית

בחינת השפעת החיפוי על טמפרטורת הקרקע בשני סוגי הקרקע העלתה כי לסוג הקרקע השפעה בעיקר על טמפרטורת הקרקע החשופה המרבית. כשהקרקע הייתה מחופה לסוג הקרקע כמעט לא הייתה השפעה על טמפרטורת הקרקע. לדוגמא, בקרקע חרסיתית חשופה טמפרטורת הקרקע היומית המרבית צפויה להיות גבוהה ב- 1.1°C ביום שמש וב- 0.8°C ביום מעונן, בהשוואה לקרקע חולית חשופה. לעומת זאת, ההפרש בטמפרטורת הקרקע המרבית בין חיפוי כסוף לשקוף צפוי לרדת רק ב- 0.2°C עם שינוי סוג הקרקע מחולית לחרסיתית.

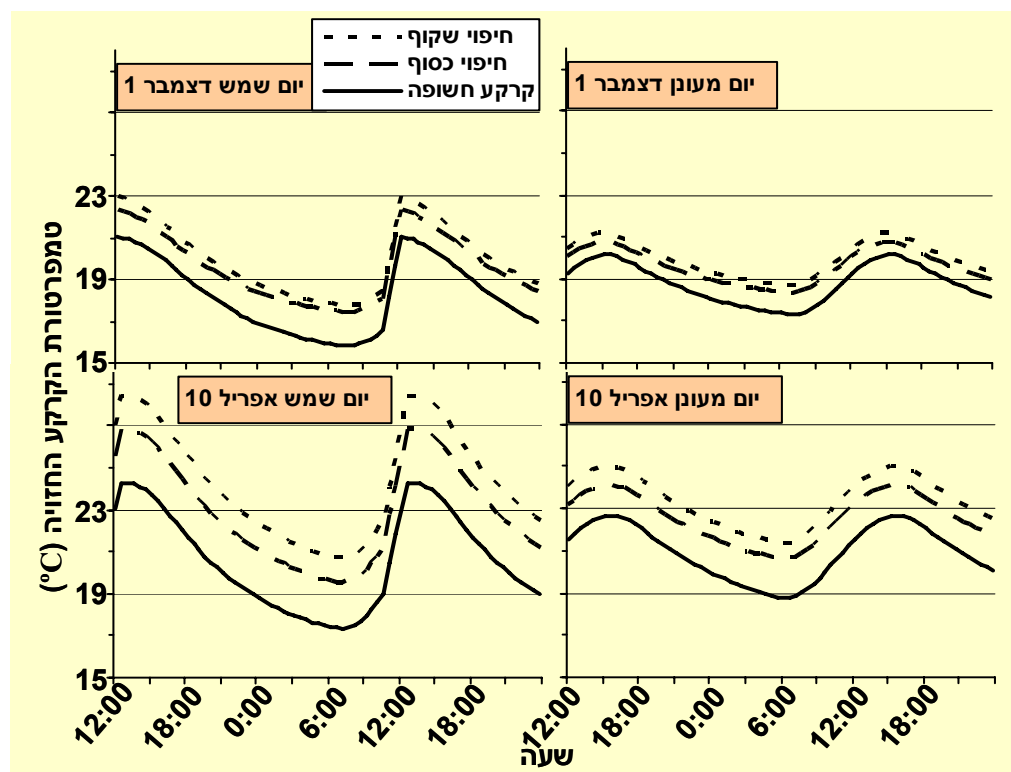
תחזית המודל להשפעת עונת השנה ומצב העננות על טמפרטורת הקרקע מוצגת באיור 17. בוצעו הדמיות עבור שני ימים מייצגים לסתיו ולאביב (1 בדצמבר ו-10 באפריל) ולכל אחד מהם עבור שמיים בהירים או מעוננים. לפי תחזית המודל, השפעת עונת השנה גדולה מהשפעת מצב העננות על טמפרטורת הקרקע היומית. לדוגמא, חילוף העונה מסתיו לאביב העלה את טמפרטורת הקרקע המרבית הממוצעת לכל הטיפולים ב- 4°C כשהשמיים בהירים וב- 3.2°C כשהשמיים מעוננים. כמו כן, שינוי העונה מסתיו לאביב העלה את טמפרטורת הקרקע המזערית הממוצעת לכל הטיפולים ב- 2.2°C כשהשמיים היו בהירים וב- 2.1°C כשהשמיים היו מעוננים.

מלבד השפעת העונה על טמפרטורת הקרקע הממוצעת לכל הטיפולים השפיעה העונה גם על הפרשי הטמפרטורות בין הטיפולים. השפעת העונה על התחממות הקרקע בין הטיפולים התבטאה בכך שבאביב התחממות הקרקע בהשפעת החיפוי צפויה להיות גדולה יותר. לדוגמא, חיפוי קרקע העלה את טמפרטורת הקרקע היומית המרבית ביום בהיר באביב לעומת הסתיו ב- 2.1°C ו- 1.5°C בחיפוי השקוף והכסוף, בהתאמה. באופן דומה, העלה החיפוי גם את טמפרטורת הקרקע היומית המזערית ביום בהיר באביב לעומת הסתיו ב- 1.3°C ו- 0.5°C בחיפוי השקוף והכסוף, בהתאמה. השפעה דומה של העונה והחיפוי על טמפרטורת הקרקע נחזתה גם בימים מעוננים. לדוגמא, חיפוי קרקע העלה את טמפרטורת הקרקע היומית המרבית ביום מעונן באביב לעומת הסתיו ב- 1.3°C ו- 0.8°C בחיפוי השקוף והכסוף, בהתאמה. באופן דומה, העלה החיפוי

גם את טמפרטורת הקרקע היומית המזערית ביום מעונן באביב לעומת הסתיו ב- 1.2°C ו- 0.4°C מעלות בחיפוי השקוף והכסוף, בהתאמה.

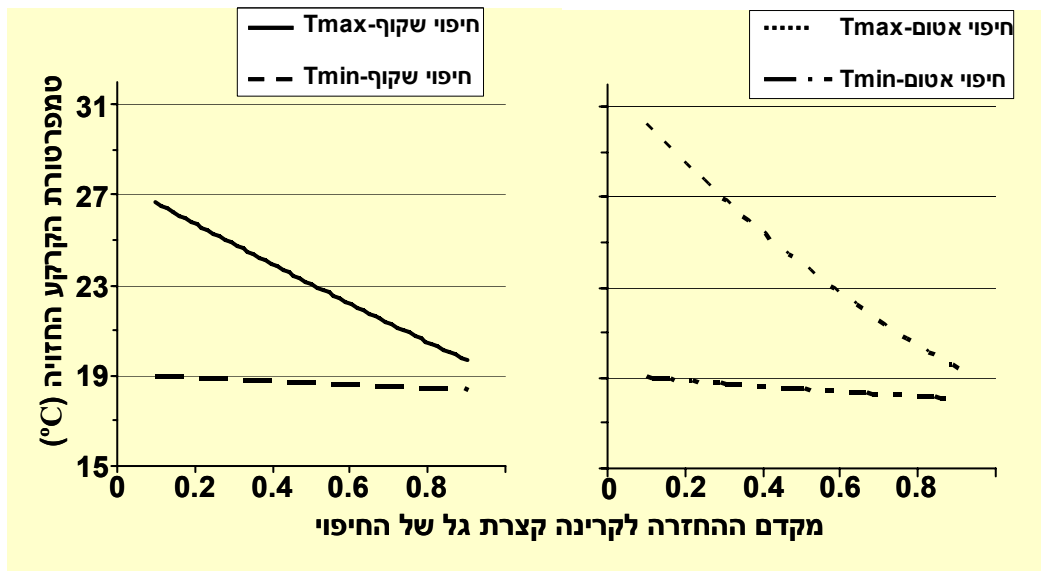


איור 16: השפעת סוג הקרקע ומצב העננות על המהלך היומי של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בקרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאיתילן.



איור 17: השפעת עונת השנה ומצב העננות על המהלך היומי של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בקרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאיתילן.

תחזית המודל להשפעת התכונות הפוטומטריות של חיפוי הקרקע על טמפרטורת הקרקע מוצגת באיור 18. השפעת התכונות הפוטומטריות נבחנה על ידי שינוי התכונות הפוטומטריות של חיפוי קרקע בפוליאתילן "שקוף" או "אטום", תוך שמירה על התכונות התרמיות של החיפוי השקוף והכסוף. כדי להבדיל בין חיפוי שקוף ואטום נקבעו ארבעה כללים. הכלל הראשון היה שבפוליאתילן שקוף סכום מקדמי ההחזרה וההעברה הוא אחד. הכלל השני היה שבפוליאתילן אטום סכום מקדמי ההעברה וההחזרה גדול מאפס. הכלל השלישי היה שבפוליאתילן שקוף מקדם ההעברה שונה מאפס. הכלל הרביעי והאחרון היה שבפוליאתילן אטום מקדם ההעברה הוא אפס. עבור כל אחד מהחיפויים נבחנה השפעת שינוי מקדם ההחזרה לקרינה קצרת גל על טמפרטורת הקרקע המרבית והמזערית, בהתאם לארבעת הכללים שנקבעו.



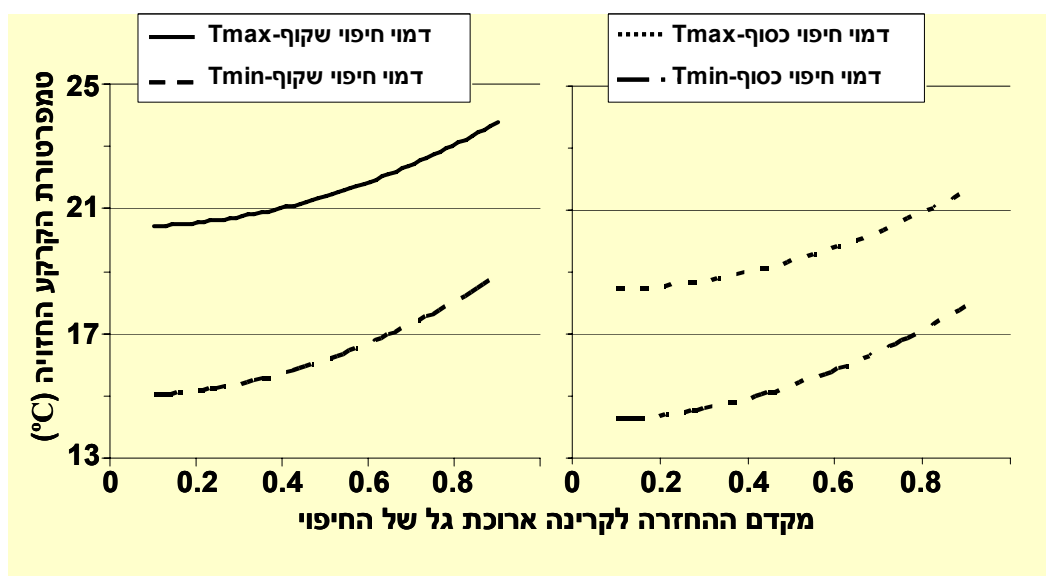
איור 18: השפעת מקדם ההחזרה של החיפוי לקרינה קצרת גל (ρ_{mulch_sw}) על המקסימום והמינימום היומיים של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאתילן.

ההדמיות שבוצעו בהתאם לכללים שנקבעו הראו שהשפעת השינוי במקדם ההחזרה לקרינה קצרת גל של החיפוי על טמפרטורת הקרקע היא כמעט ליניארית ($R^2 > 0.99$) למעט טמפרטורת המקסימום בחיפוי האטום שהראתה השפעה כמעט ריבועית ($R^2 > 0.99$). הגדלת מקדם ההחזרה של החיפוי תביא לירידה בטמפרטורת הקרקע. יתרה מכך, בחיפוי אטום שיעור הירידה בטמפרטורת הקרקע המרבית בתחום ערכי מקדם ההחזרה שנבחן, צפויים להיות גדולים ב- 3.9°C מחיפוי שקוף. עם זאת, השינוי הצפוי בטמפרטורת הקרקע המזערית עם השינוי בערך מקדם ההחזרה, בתחום הערכים הנבחן בשני החיפויים, צפוי להיות קטן מ- 1°C . בעוד שהשינוי בטמפרטורת הקרקע המרבית באותו תחום ערכי המקדם, צפוי להיות של 10.7°C ו- 6.8°C בחיפוי השקוף והכסוף, בהתאמה. טמפרטורת הקרקע המרבית הגבוהה ביותר שנחזתה בחיפוי שקוף הייתה גבוהה ב- 3.9°C מהחיפוי האטום. עם זאת, בטמפרטורת הקרקע המזערית הגבוהה ביותר כמעט לא הורגש שינוי.

השתמשנו במודל לבחינת השפעת התכונות התרמיות של חיפוי הקרקע על טמפרטורת הקרקע. השפעת התכונות התרמיות נבחנה על ידי שינוי בשני סוגי יריעות חיפוי דמיוניים. לסוג האחד, "דמוי חיפוי שקוף" תכונות פוטומטריות של חיפוי שקוף ולסוג השני, "דמוי חיפוי כסוף" תכונות פוטומטריות של חיפוי כסוף. שני סוגי היריעות שנבחנו אטומים לקרינה ארוכת גל וסכום המקדמים התרמיים שלהם הוא אחד. עבור כל אחד מהחיפויים נבחנה השפעת שינוי מקדם ההחזרה לקרינה ארוכת גל על טמפרטורת הקרקע המרבית והמזערית.

לפי תחזית המודל, השפעת שינוי מקדם ההחזרה לקרינה ארוכת גל של החיפוי על טמפרטורת הקרקע המרבית והמזערית היא כמעט ריבועית ($R^2 > 0.99$) (איור 19). התחזית מראה שככל שמקדם ההחזרה גדול יותר טמפרטורת הקרקע צפויה להיות גבוהה יותר. כמו כן צופה המודל ששיעור העלייה של טמפרטורת הקרקע המרבית והמזערית עם עליית ערך מקדם ההחזרה יהיה דומה בשני סוגי החיפוי שנבחנו. בנוסף מראה התחזית ששיעור השינוי של טמפרטורת הקרקע המזערית עם שינוי מקדם ההחזרה גדול במקצת משיעור השינוי של טמפרטורת הקרקע המרבית.

תוצאות ההדמיה מראות גם ששיעור השינוי בטמפרטורת הקרקע עם השינוי בערך מקדם ההחזרה של החיפוי לקרינה ארוכת גל דומה בשני סוגי החיפוי. למרות זאת, ערכי טמפרטורת הקרקע שהתקבלו שונים בשני החיפויים ועל פי התחזית טמפרטורת הקרקע בדמוי חיפוי שקוף צפויה להיות גבוהה יותר מדמוי חיפוי כסוף. לדוגמא, טמפרטורות הקרקע המרבית והמזערית הגבוהות ביותר החזויות בדמוי חיפוי שקוף היו גבוהות ב- 2.2°C ו- 0.9°C מדמוי חיפוי כסוף, בהתאמה.



איור 19: השפעת מקדם ההחזרה של החיפוי לקרינה ארוכת גל ($\rho_{mulch_{lw}}$) על המקסימום והמינימום היומיים של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בחיפוי קרקע בשני סוגי יריעות פוליאיתילן.

5. דיון

5.1. השפעת חיפוי קרקע על התפתחות מחלת הכימשון

חיפוי קרקע המבנה ביריעות פוליאאתילן שקוף כסוף או שחור הקטין בצורה מובהקת את חומרת הנגיעות במחלת הכימשון של צמחי העגבנייה בניסויים שנערכו בחוות הבשור בעונות סתיו 2005 ואביב 2006 (איור 5). לא נמצאו הבדלים מובהקים בהשפעות של סוג יריעת הפוליאאתילן ששימש לחיפוי הקרקע בניסויים על חומרת המחלה. תוצאות אלה חוזרות על תוצאות הניסויים המקדימים שנערכו בחוות הבשור בשנים 2003-2005 והראו השפעות דומות של חיפוי קרקע בפוליאאתילן על חומרת הנגיעות בכימשון בעגבניות.

בעקבות ניסויים אלה הועלתה ההשערה שמנגנון הפעולה של חיפוי הקרקע במניעת מחלת הכימשון קשור בהשפעת החיפוי על תנאי המיקרואקלים במבני הגידול ובפרט על יצירת טל במבנים בלילה ומשך רטיבות העלווה. ההשערה נתמכת על ידי תוצאות הניסויים שנערכו בחוות הבשור והצביעו על הקשר ההדוק בין התפתחות מחלת הכימשון במבני גידול לעגבניות לבין תנאי הסביבה ששררו במבנים.

התפתחות מחלת הכימשון במבני הניסוי בחוות הבשור במהלך שתי העונות סתיו 2005 ואביב 2006 הייתה בעלת אופי שונה (איור 5). ראשית, בעונת סתיו 2005 התפתחות המחלה מהדבקה עד להפסקת הניסוי נמשכה כשלושה שבועות מ- 24 בנובמבר עד 15 בדצמבר. לעומתה, בעונת אביב 2006 התפתחות המחלה מהדבקה עד להפסקת הניסוי נמשכה רק שבועיים (מ- 10 באפריל עד 25 באפריל) ובסיומם חומרת המחלה במבנים עם קרקע חשופה הייתה גדולה ב- 30% מחומרת המחלה בעונת סתיו 2005. מלבד משך ההתפתחות של הכימשון, גם אופי התפתחות המחלה במבני הניסוי בשתי עונות הניסויים היה שונה. בעונת סתיו 2005 קצב התפתחות המחלה היה קבוע במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה ובמבנים עם חיפוי קרקע המחלה כמעט לא התפתחה. לעומתה, בעונת אביב 2006 היו להתפתחות מחלת הכימשון שני שלבים. בשלב הראשון שנמשך מה- 10 באפריל עד 20 באפריל, התפתחות המחלה הייתה מתונה ובשלב שני שנמשך מה- 20 באפריל עד 25 באפריל, התפתחות המחלה הייתה מואצת.

כדי לנסות ולהסביר את ההבדלים הללו בהתפתחות מחלת הכימשון בשתי עונות הניסוי יש לעמוד תחילה על מספר הבדלים בתנאי הסביבה ששררו במהלך. אחד ההבדלים בתנאים בין עונות הניסויים היה במקור המדבק שהביא להתפתחות הכימשון. בעונת סתיו 2005 בוצעה הדבקה מלאכותית ב- 17 בנובמבר, בעוד שבאביב 2006 ההדבקה הייתה טבעית. הבדלים אחרים היו בתנאי האקלים ששררו בשתי העונות. לדוגמה, במהלך התפתחות מחלת הכימשון בעונת סתיו 2005 לא היו אירועי גשם לעומת עונת אביב 2006 שבמהלכה ירד גשם בבשור במשך מספר ימים בתאריכים 5-8 באפריל, לפני התפרצות המחלה. בנוסף, במהלך עונה זו היו 7 לילות רצופים בהם אובחנה יצירת טל במבני הניסוי בתאריכים 14-20 באפריל. דוגמה נוספת היא טמפרטורת האוויר הממוצעת במבני הגידול במהלך התפתחות המחלה בשתי העונות. בסתיו 2005 טמפרטורת האוויר הממוצעת בתקופת התפתחות הכימשון הייתה 18°C לעומת 20.5°C באביב 2006.

נראה כי ההבדלים בתנאי הסביבה בשתי העונות סתיו 2005 ואביב 2006 יכולים להצביע על גורמים להתפתחות השונה של מחלת הכימשון במהלך (איור 5). תחילה, התפתחות הכימשון בעונת סתיו 2005 יכולה להיות מוסברת על ידי נוכחות אוכלוסייה גדולה ואלימה של הפטרייה *P. infestans* מחוללת מחלת הכימשון במבני הניסוי בעקבות ההדבקה המלאכותית. גם משך התפתחות המחלה הארוך והמתון בעונת סתיו 2005 יכול להיות מוסבר בחלקו בתנאי הסביבה שלא היו אידיאליים להתפתחות המחלה. בתקופת התפתחות המחלה לא ירד גשם המעלה את הלחות באוויר והטמפרטורה ממוצעת של האוויר במבנים הייתה כ- 18°C שתי מעלות פחות מהאופטימום להתפתחות הפטרייה. לעומת סתיו 2005, בעונת אביב 2006 תנאי הסביבה היו מתאימים הרבה יותר להתפתחות מחלת הכימשון. ראשית, טמפרטורת האוויר הממוצעת במבני הניסוי הייתה 20.5°C . טמפרטורה הקרובה מאוד לטמפרטורה האופטימאלית להתפתחות *P. infestans*, 20°C .

בנוסף, ימי גשם עם לחות גבוהה ב- 5-8 באפריל מועד סמוך לתחילת התפתחות המחלה בתוספת טל בלילה במבנים עם הקרקע החשופה ב- 10 באפריל, סייעו להדבקה והתבססות ראשונית של הפטרייה. אחרי ההדבקה הטבעית התפתח הכימיון בקצב מתון רק במבנים עם קרקע חשופה שבהם אובחנה יצירת טל במהלך 7 לילות רצופים בין ה- 14 ל- 20 באפריל. ב- 20 באפריל חלה עליה חדה בחומרת המחלה במבני הניסוי עם הקרקע החשופה, לאחר שבעה ימים עם תנאים כמעט אופטימאליים להתפתחות מחלת הכימיון שכללו נוכחות מדבק ופונדקאי מתאים, טמפרטורה קרובה לאופטימום ההתפתחות של הפטרייה, לחות גבוהה ונוכחות מים חופשיים בעיקר במבני הגידול עם הקרקע החשופה. ככל הנראה בשל גורמים שהוזכרו לעיל התפתחות מחלת הכימיון בצמחי העגבנייה בעונת אביב 2006 הייתה מהירה ואלימה יותר מעונת סתיו 2005 (איור 5) (כהן, 1998; Jewett and Jarvis, 2001; Elad, 1999; Harrison, 1992; Campbell and Madden, 1990; Becktell et al., 2005).

5.2. השפעת חיפוי קרקע על המיקרואקלים בחממה

5.2.1. השפעת חיפוי קרקע בפוליאיתילן על טמפרטורות האוויר והקרקע

חיפוי הקרקע במבני הגידול העלה את טמפרטורת הקרקע ב- 2°C בממוצע (איור 6). תוצאות דומות התקבלו על ידי קאנץ (1984) ו-Tarara (2000). בקרקע המחופה בפוליאיתילן שקוף הייתה טמפרטורת הקרקע הגבוהה ביותר ואחריה טמפרטורת הקרקע המחופה בפוליאיתילן הכסוף. לעומת טמפרטורת הקרקע, בטמפרטורת האוויר לא נמצאו הבדלים בין הטיפולים (איור 6).

כדי לנסות להסביר את ההבדלים בטמפרטורות הקרקע והעדר ההבדלים בטמפרטורת האוויר בין הטיפולים השונים, נעמוד תחילה על מספר הבדלים בתכונות בין האוויר והקרקע. לאוויר קיבול חום קטן והוא כמעט ואיננו קולט קרינה תרמית. לעומתו, לקרקע קיבול חום גדול והיא קולטת קרינה כמעט כמו גוף שחור (Kimball, 1973; Avissar and Mahrer, 1982; Monteith and Unsworth, 1990; Bailli, 1996; Campbell and Norman, 1998; Day and Bailey, 1999; Abdel- Baille et al., 2006; Ghany and Kozai, 2006; Singh et al., 2006). כמו כן, בניגוד לקרקע המוצקה האוויר במבני הגידול זורם ומוחלף באוויר החיצוני על ידי מערכת האוורור או דרך פתחיו של המבנה.

ההבדלים בתכונות הפיסיקאליות בין האוויר והקרקע במבני הגידול הם הגורם לכך שטמפרטורת האוויר במבנה מושפעת בעיקר על ידי טמפרטורת האוויר החיצוני המחליף אותו (Seginer et al., 1994; Litago et al., 2005). לעומת האוויר, תכונות הקרקע משפיעות על הטמפרטורה שלה בעיקר על ידי מאזני הקרינה והחום של הקרקע (Campbell and Norman, 1998; Day and Bailey, 1999). מאזני הקרינה ושטפי החום של הקרקע מושפעים מנוכחות יריעת הפוליאיתילן המשמשת לחיפוי הקרקע בשל תכונותיה הפיסיקאליות וביניהן תכונות קרינתיות, הולכת חום והאטימות לאדי מים (Tarara, 2000).

כאמור תכונות הקרקע המחופה שונות מתכונות הקרקע החשופה וכך גם תכונות הקרקע המחופה ביריעות פוליאיתילן בעלות תכונות שונות. שנויים אלה יכולים להסביר חלק מההבדלים בטמפרטורת הקרקע בין הטיפולים (קרקע מחופה הייתה חמה יותר מחשופה וכן קרקע מחופה בפוליאיתילן שקוף הייתה חמה יותר מקרקע המחופה בפוליאיתילן כסוף) (איור 6). לדוגמא, לקרקע חשופה אמסיביות גבוהה וקרובה לאחד בדרך כלל (Baille et al., 2006) בעוד שלפוליאיתילן אמסיביות נמוכה הרבה יותר (Pieters and Deltours, 1997), לכן הקרקע החשופה פולטת יותר קרינה תרמית ומתקררת מהר יותר בלילה מקרקע מחופה.

גם המקדמים התרמיים השונים שחושבו על ידינו ליריעות החיפוי השקופה והכסופה (טבלה 6) משפיעים על טמפרטורת הקרקע הנמצאת תחתן. לפי ערכי המקדמים שנמצאו, יריעות החיפוי השקופה

והכסופה מעבירות רק 1% מהקרינה התרמית הנפלטת מפני הקרקע ומחזירות חזרה לפני הקרקע 50% ו-59% מהקרינה הנפלטת מהקרקע, בהתאמה. גם האמסיביות של היריעה השקופה גדולה ב-10% מזו של היריעה הכסופה ולכן הקרינה התרמית הנפלטת מהיריעה השקופה בשל הטמפרטורה שלה גדולה ב-10% מהקרינה הנפלטת מהיריעה הכסופה (הקרינה התרמית נפלטת מהיריעה לשני כיוונים: בכיוון המבנה וכן בכיוון הקרקע). כך מסייעות היריעות בשמירה על טמפרטורת קרקע גבוהה יותר בקרקע המחופה בכלל ובקרקע המחופה ביריעת חיפוי הפוליאאתילן השקוף שפולטת ומחזירה יותר קרינה מיריעת החיפוי הכסוף, בפרט. כך גם משפיעות היריעות על מאזן הקרינה של נוף הצמחים בלילה שהרי היריעה פולטת ומחזירה קרינה תרמית גם בכיוון מעלה וחלקה נקלט בנוף הצמחים.

באיור 7, דוגמא להשפעה של ההבדלים בטמפרטורת הקרקע על מאזן האנרגיה של נוף הצמחים במבני הגידול בלילה. לפי איור 6 בכל מצבי הטל, בין השעות 22^{00} ל- 06^{00} טמפרטורת הקרקע הייתה גבוהה יותר בקרקע המחופה בפוליאאתילן שקוף מאשר בזו שחופתה ביריעה הכסופה או הקרקע החשופה. אם נתבונן בשטפי האנרגיה הזמינה מהקרקע לנוף בלילה באותם ימים ושעות (איור 7), נראה שגם בנתון הזה מתקיים אותו מדרג בין הטיפולים כמו בטמפרטורת הקרקע לפי איור 6. יתרה מכך, בלילות במהלכם נוצר טל (איור 7) ואיור 7), שטף האנרגיה הזמינה מהקרקע לנוף הצמחים בלילה במבנים עם קרקע חשופה היה שלילי (שטף שלילי מעיד על התקררות) ובמבנים עם הקרקע המחופה בפוליאאתילן אותו השטף היה חיובי בלילה. שטף האנרגיה במבנים עם הקרקע החשופה היה חיובי רק בלילה בו לא נוצר טל בכל המבנים (איור 7). בלילה זה היה שטף האנרגיה הזמינה מהקרקע לנוף חיובי בכל הטיפולים.

5.2.2. השפעת חיפוי קרקע בפוליאאתילן על יצירת טל ומאזן האנרגיה במבנים בלילה

משך יצירת הטל (הזמן במהלכו מתעבה טל מהאוויר במבנה הגידול על העלווה) שונה ממשך רטיבות העלווה (הזמן במהלכו העלווה רטובה מטל). הסיבה לכך היא שלאחר יצירת הטל הוא נשאר ולא מתאדה מהעלווה עד ששטף החום הכמוס (שטף האנרגיה לאידוי הטל, כששטף החום הכמוס חיובי הטל מתאדה) מהעלווה לאוויר חיובי במשך מספיק זמן לאידוי כל הטל שנוצר (Pedro and Gillespie, 1982).

קשה לקבוע במדויק מתוצאות הניסוי את משך רטיבות העלווה במבני הגידול מכיוון שהוא לא נמדד או חושב. עם זאת, תוצאות הניסויים שנערכו בחוות הבשור מראות שבמבני גידול בהם הקרקע חופתה ביריעות פוליאאתילן שקוף וכסוף נוצר טל בפחות לילות ובמשך פחות זמן בלילה בו נוצר טל (איור 8). במקביל חומרת מחלת הכימשון במבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאאתילן הייתה נמוכה מחומרת המחלה במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה (איור 5).

בעקבות תוצאות אלה, לדעתנו הגורם לכך שבמבני הגידול בהם חופתה הקרקע בפוליאאתילן חומרת הנגיעות במחלת הכימשון הייתה פחותה, הוא שבמבנים אלה היה משך רטיבות העלווה קצר יותר בדומה למשך יצירת הטל. כמו כן במבנים עם חיפוי קרקע אובחנה יצירת טל רק במהלך אירוע גשם (איור 7). אז האוויר רווי באדי מים וההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל קטן במיוחד והחיפוי לא מצליח למנוע את יצירת הטל. לכן אם אלה פני הדברים, עלינו לשאול מהו המנגנון באמצעותו חיפוי הקרקע במבני הגידול ביריעות הפוליאאתילן הפחית את יצירת טל.

יצירת טל היא התעבות של אדי מים מהאוויר על משטח כלשהו וכדי שיווצר טל על משטח הטמפרטורה שלו צריכה להיות נמוכה מטמפרטורת הטל של האוויר בשכבת הגבול המקיפה אותו. לכן כאמור, אם טמפרטורת העלים גבוהה ולו במעט מטמפרטורת הטל של האוויר בשכבת הגבול מסביבם לא ייווצר עליהם טל (Agam et al., 2006).

במבני הגידול בהם הקרקע הייתה מחופה ביריעות פוליאאתילן שטף האנרגיה הזמינה מהקרקע לנוף בלילה היה גדול יותר מאשר במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה (איור 7). מקור האנרגיה הזמינה מהקרקע לחימום הנוף הצמחי בלילה היה ככל הנראה שטפי האנרגיה הנפלטת מהקרקע החמה למבנה בשתי דרכים

עיקריות: כקרינה תרמית וכחום מוחשי. בלילה, ההתנגדות האווירודינאמית למעבר חום מוחשי וכמוס מהקרקע היא גדולה לכן שטפי החום קטנים ועיקר חילופי האנרגיה במבנה הגידול הם בקרינה תרמית. חלק משטפי האנרגיה מהקרקע נקלט בצמחים ומהווה מרכיב מרכזי במאזן האנרגיה של הנוף בלילה (Baille et al., 2006). הקובע את קצב התקררות העלווה בשעות אלה. תוספת האנרגיה הנקלטת בצמחים בלילה במבני הגידול עם הקרקע המחופה מאיטה את התקררותם. תוספת אנרגיה זו מספיקה למניעת יצירת טל במרבית הלילות (איור 8) למעט במהלך אירוע גשם (איור 7g) אז דרושה אנרגיה רבה יותר לחימום העלווה כדי למנוע יצירת טל.

לעומת האנרגיה הזמינה מהקרקע לחימום הנוף הצמחי בלילה, הקרינה נטו של נוף הצמחים הראתה הבדלים בשטפי הקרינה רק בין המבנים עם חיפוי הקרקע השקוף למבנים עם החיפוי הכסוף והקרקע החשופה (איור 7). לא נמצאו הבדלים עקביים בין החיפוי הכסוף לקרקע החשופה בהם שטפי הקרינה נטו של נוף הצמחים בלילה היו דומים. קשה לקבוע אם הערכים של הקרינה נטו של הנוף שקיבלנו היו מהימנים. יתכן שהייתה בעיה במדידת הקרינה נטו מתחת לנוף שהיא מדידה מסובכת מכיוון שהמיקום הנמוך של מד הקרינה מצמצם את "שדה הראייה" שלו בעיקר מכיוון מטה וחריגה מקומית בגודל שטפי הקרינה התרמית, יכולה לגרום לקריאה לא מייצגת של חיפוי זה. אך, מכיוון שלא היו חזרות במדידת הקרינה נטו מתחת לנוף איתור תקלות כאלה היה בעייתי. לכן, יש להתייחס לערכי הקרינה נטו של הנוף שנמדדו בניסויים בחשדנות והשפעת חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על הקרינה נטו של הנוף בלילה דורשת בדיקה נוספת.

לסיכום, המנגנון באמצעותו חיפוי הקרקע במבני גידול ביריעות פוליאיתילן מונע יצירת טל ומפחית את נזקי מחלת הכימסון בצמחי עגבנייה הוא: 1. ככל שהקרקע חמה יותר היא פולטת יותר אנרגיה לצמחים שבמבנה הגידול הן בקרינה תרמית והן בחום מוחשי (Campbell and Norman, 1998). לכן, במבני גידול עם קרקע מחופה בפוליאיתילן (החמה יותר מהקרקע חשופה) נפלטת יותר אנרגיה מהקרקע לנוף בלילה; 2. כתוצאה מפליטת האנרגיה המוגברת גם קליטת האנרגיה של הצמחים בלילה מוגברת; 3. תוספת קליטת האנרגיה בצמחים במבנים עם קרקע מחופה בפוליאיתילן משנה את מאזן האנרגיה שלהם ובעקבותיה הם מתקררים לאט יותר מהצמחים במבנים עם קרקע חשופה; 4. במבנים עם קרקע מחופה בפוליאיתילן טמפרטורת העלווה יורדת מתחת לטמפרטורת הטל של האוויר בפחות מקרים ולמשך פחות זמן בכל אירוע טל. כלומר נוצר פחות טל במבנים עם חיפוי קרקע מפוליאיתילן, לעומת מבנים עם קרקע חשופה. המבנים עם חיפוי הקרקע מספקים תנאי מיקרואקלים פחות מתאימים להתפתחות מחלות עלווה מוגברות לחות מהמבנים עם הקרקע החשופה שמעודדים התפתחות מחלות כאלה. התוצאה מהאמור לעיל הייתה שחומרת מחלת הכימסון במבנים עם קרקע חשופה הייתה גדולה יותר מבמבנים בהם הקרקע חופתה ביריעות פוליאיתילן.

5.3. מודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הניסוי

לאחר הבנת המנגנון באמצעותו חיפוי קרקע בפוליאיתילן השפיע על התפתחות מחלת הכימסון פיתחנו מודל להערכת השפעת החיפויים על טמפרטורת הקרקע במבני גידול עם חיפוי קרקע שונים או עם קרקע חשופה. חיזוי השפעת החיפוי על טמפרטורת הקרקע יוכל לשמש להערכת ההשפעה של החיפוי על יצירת טל, קיצור משך רטיבות העלווה ומניעת מחלות עלווה מוגברות לחות כמו כימסון.

המודל שפותח במסגרת המחקר שונה ממודלים אחרים לחיזוי תנאי המיקרואקלים במבני גידול בעיקר בשני אופנים. ראשית, הוא מתמקד רק בחיזוי טמפרטורת הקרקע המהווה את הגורם המרכזי במאזן האנרגיה של מבנה הגידול בלילה (Baille et al., 2006). שנית, המודל מאפשר פתרון אנליטי פשוט של מאזן האנרגיה של הקרקע בעזרת תוכנת Excel ולא מחייב מציאת פתרון מקורב של מערכת המשוואות שאופייני

למודלים אחרים (Kimball, 1973; Avissar and Mahrer, 1982; Abdel-Ghany and Kozai, 2006; Singh et al., 2006). לכן, המודל שפותח הוא מודל פשוט וקל ליישום לצורך עריכת ניסויי הדמיה, בדומה למודלים סטטיסטיים לחיזוי המיקרואקלים במבני גידול (Seginer et al., 1994; Litago et al., 2005). חידוש נוסף של המודל הוא שחיזוי טמפרטורת הקרקע נערך במבנה גידול עם או ללא צמחים וחיפוי קרקע ביריעת פוליאאתילן מכל סוג שהוא שתכונותיה הקרינתיות ידועות.

5.3.1. מציאת הקשר בין מהירות וכיוון הרוח לקצב החלפת האוויר במבני הניסוי

לקצב החלפת האוויר במבנה חשיבות מכרעת בקביעת מאזני האנרגיה והמסה במבני הגידול. לכן לצורך פיתוח המודל, נערכה סידרת ניסויים למדידה ישירה על ידי גז סמן של קצב החלפת האוויר במבני הניסוי. הניסויים הראו כי קצב החלפת האוויר במבני הניסוי הוא בעל רגישות גדולה לשינויים במהירות וכיוון הרוח (איור 10) בדומה לתוצאות שהתקבלו על ידי Boulard et al. (1997). לא נמצא קשר פשוט בין מהירות הרוח החיצונית לקצב החלפות האוויר בתוך המבנים. למרות שנצפו קצבי חילופי אוויר גדולים יותר בזמנים בהם הרוח נשב בניצב לפתחי המנהרות העבירות מאשר בזמנים שכיוון הרוח היה במקביל לפתחים, גם לקשר זה לא נצפתה חוקיות ברורה. בכל מקרה, שעות הלילה מאופיינות על ידי קצבי החלפות אוויר קטנים יותר מאשר ביום. כמו כן, לצורך חישובי התנגדויות למעברי חום ומסה קצבי החלפות אוויר מאוד נמוכים הם בעייתיים במיוחד (Stanghellini, 1987). לכן, הוחלט שלצורך פיתוח המודל יילקחו שני ערכים מייצגים לקצב החלפת האוויר במבנים, אחד ליום והשני ללילה, כדי לנסות לצמצם את השגיאה בחישוב מאזן האנרגיה של הקרקע במבנה הגידול.

5.3.2. קביעת התכונות הקרינתיות של היריעות במבני הניסוי

לצורך פיתוח המודל היה הכרח לקבוע את התכונות הקרינתיות של יריעות הפוליאאתילן לכיסוי מבני הגידול וחיפוי הקרקע. התכונות התרמיות של יריעות הפוליאאתילן במבני הניסוי נקבעו על ידי רגרסיה רבת משתנים. הרגרסיה נערכה על המשוואות של מאזני הקרינה התרמית שנמדדו בלילה. מאזני הקרינה התרמית חושבו בנפרד ליריעות הפוליאאתילן ששימשו לכיסוי המבנה וליריעות ששימשו לחיפוי הקרקע. ליריעת כיסוי המבנה נקבעו גם התכונות הפוטומטריות מתוך מדידות הקרינה קצרת הגל משני צידי היריעה בשעות היום.

תוצאות הניסויים לקביעת התכונות הקרינתיות של יריעות כיסוי מבני הגידול נראו מהימנות מכיוון שערכי המקדמים שהתקבלו בהם וסכומם חזרו על עצמם בכל הטיפולים. יתרה מכך, סכום המקדמים שהתקבל בכל הניסויים ובכל הטיפולים היה דומה וערכו קרוב לאחד (1-0.97) כמתחייב מחוק שימור האנרגיה (Campbell and Norman, 1998).

ערכי המקדמים הפוטומטריים שהתקבלו ליריעות הכיסוי של המבנים (יריעות פוליאאתילן IR מפזר בעובי $150\mu\text{m}$ מתוצרת גניגר מוצרי פלסטיק בע"מ) התאימו לנתונים באתר האינטרנט של היצרן (www.ginegar.com) ולנתונים מקבילים בספרות (Giacomelli and Roberts, 1993; Pieters and Deltour, 1997; Papadakis et al., 2000). לעומתם, המקדמים התרמיים שהתקבלו ליריעות הפוליאאתילן לכיסוי המבנים (טבלה 6) היו שונים מאוד מנתוני היצרן (www.ginegar.com) והנתונים בספרות (Giacomelli and Roberts, 1993; Pieters and Deltour, 1997).

ההבדלים המרכזיים בין ערכי המקדמים התרמיים שהתקבלו ליריעות כיסוי המבנים וערכי הספרות והיצרן היה בערכי האמסיביות הנמוכים ומקדם ההחזרה הגבוה של היריעה, לעומת הספרות והיצרן. זאת בניגוד לערך מקדם ההעברה שהתקבל בניסויים שהיה נמוך רק במעט מנתוני הספרות (ערכי מקדמי ההעברה וההחזרה לקרינה ארוכת גל לא נבחנו מול נתוני היצרן כיוון שהללו לא פורסמו). האמסיביות שהתקבלה ליריעות כיסוי המבנים בניסוי הייתה נמוכה מאוד (0.05), למרות שעל מבני הגידול בניסויים נפרשו יריעות

פוליאתילן IR מפזר שהן יריעות תרמיות ולפי היצרן והספרות הן אמורות להיות בעלות אמסיביות גבוהה (0.85 ו- 0.8, בהתאמה). תופעה הפוכה התגלתה בערך מקדם ההחזרה לקרינה תרמית שהתקבל ליריעות הכיסוי של מבני הגידול לפי תוצאות הניסויים. ערך מקדם ההחזרה לקרינה ארוכת גל שנמצא על ידינו ליריעות הכיסוי של מבני הניסוי היה גבוהה (0.83) בעוד שלפי הספרות ערכו אמור להיות נמוך מאוד (0.03). לעומת האמסיביות ומקדם ההחזרה לקרינה תרמית, ערך מקדם ההעברה של יריעת הכיסוי שהתקבלו (0.11) היו נמוכים רק במעט מנתוני הספרות (0.18).

ההבדלים הגדולים בין המקדמים התרמיים שהתקבלו לכיסוי המבנה בניסויים ונתוני היצרן והספרות ליריעות דומות, מערערים את מהימנות התוצאות שהתקבלו. לכן, נערכה בדיקה חוזרת של החישובים. הבדיקה החוזרת לא שינתה את ערך התוצאות המקוריות שהתקבלו. מאחר שהתוצאות חזרו על עצמן, ניסינו לשער מהם הגורמים שהשפיעו על התוצאות.

כדי לנסות להסביר את ההבדלים הגדולים בתכונות התרמיות של היריעות שהתקבלו מהניסויים שערכנו ונתוני הספרות יש להזכיר תחילה את ההנחות ששימשו לצורך עריכת מאזן הקרינה התרמית מעל לנוף הצמחים שאפשר את קביעת המקדמים התרמיים של יריעת כיסוי המבנה ברגרסיה. ההנחה הראשונה הייתה שנוף הצמחים הוא גוף שחור. ההנחה השנייה הייתה שהנוף מכסה את כל שטח רצפת המבנה. ההנחה השלישית והאחרונה הייתה שטמפרטורת כיסוי המבנה שווה לטמפרטורת האוויר מעל לנוף הצמחים.

נראה שחלק מההנחות הללו ששימשו לעריכת משוואות מאזני הקרינה התרמית מעל לנוף שעליהן גם נערכה הרגרסיה לקביעת ערכי המקדמים הקרינתיים, אינן תקפות במקרה הנדון. לדעתנו שתי ההנחות הראשונות שקבעו שנוף הצמחים הוא גוף שחור שמכסה את כל שטח רצפת המבנה היו המקור לשגיאה שהתקבלה בערכי המקדמים התרמיים של כיסוי מבני הניסוי כיוון שהן לא תואמות לספרות ולמציאות במבני הניסוי בעת עריכת המדידות. אנו הנחנו שהצמחים הם גוף שחור בעוד שבספרות מקובל להתייחס אל נוף הצמחים כגוף "כמעט שחור" בעל אמסיביות גדולה מ- 0.95 אך קטנה מאחד (Levit and Gaspar, 1988; Zhang et al., 1997; Campbell and Norman, 1998; Abdel-Ghany and Kozai, 2006; כמו כן, נוף הצמחים במבני הגידול היה אמנם מפותח בעת עריכת הניסויים אך בשל שיטת הגידול (שורות שתילה והדליה לגובה) הנוף לא כיסה בפועל את כל שטח הרצפה. לא נמצאה סיבה להטיל ספק בתקפותה של ההנחה השלישית לפיה טמפרטורת הכיסוי הייתה שווה לטמפרטורת האוויר מעל לצמחים במבנה בלילה.

בעתיד ניתן אולי להימנע משיבושים דומים לאלה שהזכרנו בקביעה של מקדמים תרמיים של יריעות כיסוי במבנה גידול, על ידי הימנעות משימוש בהנחות עבודה לגבי אופיו הקרינתי של נוף הצמחים במבנה. הדבר יתאפשר אם נמדוד את שטפי הקרינה במבנה ללא צמחים לפני שתילת הגידול במקביל לשימוש בהנחה שתכונות היריעה הן קבועות בזמן. יש לקחת בחשבון שהשימוש בהנחה האחרונה צריך גם הוא להיות זהיר מכיוון שתכונותיה של יריעת כיסוי מפוליאתילן משתנות בפרקי זמן ארוכים בתלות בסוג היריעה ובהתאם לאקלים במבנה הגידול ומחוץ לו (Dilara and Briassoulis, 2000; Briassoulis et al., 2004). כמו כן חשוב לזכור שגם משקעים של אבק והתעבות טל על היריעה גורמים לשינויים בתכונותיה הקרינתיות (קאנץ', 1984; Garzoli and Blackwell, 1981).

כמו תוצאות הניסויים לקביעת התכונות התרמיות של יריעות כיסוי המבנים, גם תוצאות הניסויים לקביעת התכונות הקרינתיות של יריעות חיפוי הקרקע במבני הגידול (החיפוי השקוף והחיפוי הכסוף) נראות מהימנות מכיוון שסכום המקדמים התרמיים שהתקבלו עבורן היה קרוב לאחד. בחינה מקיפה יותר של מהימנותם של ערכי המקדמים לא התאפשרה מכיוון שהיריעות ששימשו לחיפוי הקרקע במבני הגידול הן ייחודיות ונתונותיהן הקרינתיות לא פורסמו על ידי היצרן (גניגר מוצרי פלסטיק בע"מ) וככל הידוע לנו, גם לא על ידי אחרים.

כאמור לצורך פיתוח המודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הגידול היה צורך בקביעת מקדמים קרינתניים ליריעות הכיסוי של המבנים ויריעות חיפויי הקרקע. מכיוון שהמקדמים התרמיים של כיסוי המבנה שחישבו בניסויים שערכנו לא התאימו לנתוני הספרות והיצרן ונתוני היצרן היו חלקיים ולא כללו את מקדמי ההעברה וההחזרה של היריעה, הוחלט לקבוע את המקדמים התרמיים של יריעות כיסוי מבני הגידול במודל בדרך אחרת. המקדמים התרמיים של כיסויי המבנה נקבעו בעזרת המודל. ערכי המקדמים התרמיים של כיסוי המבנה נקבעו כך שטמפרטורת הקרקע שתקבל מהמודל תהייה הקרובה ביותר לטמפרטורת המדודה בכל הטיפולים ובלבד שתכונות כיסוי המבנה תהינה זהות בכל הטיפולים שהרי בכולם היו יריעות כיסוי זהות. המקדמים שהתקבלו מהמודל בדרך זו (טבלה 5) היו בעלי ערך ביניים בין נתוני הניסוי (טבלה 6) ונתוני הספרות והם שימשו בניסויי ההדמיה שנערכו באמצעות המודל.

כאמור לצורך פיתוח המודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הגידול היה הכרח גם בקביעת מקדמים קרינתניים של יריעות חיפוי הקרקע שנפרשו בהם. המקדמים קרינתניים של יריעות הפוליאאתילן השקוף והכסוף לחיפוי הקרקע במבני הגידול ששימשו לעריכת ניסויי ההדמיה במודל נקבעו על פי הניסויים לקביעת ערכם (טבלה 6). ערכים אלה נבחרו מכיוון שהם היו הנתון המהימן ביותר שהיה ברשותנו לצורך פיתוח המודל. ערכם של המקדמים כפי שהתקבלו לאחר עריכת הרגרסיה לקביעתם (טבלה 6), שונה רק מעט במהלך הכיול הסופי של המודל וכך התקבל ערכם הסופי (טבלה 5).

5.4. בחינת תקפות המודל

המודל שפותח במסגרת המחקר לשם חיזוי של טמפרטורת הקרקע במבנים בהם הקרקע נשארה חשופה ובמבנים בהם הקרקע חופתה ביריעות פוליאאתילן שקוף או כסוף נמצא מהימן על פי מבחני המובהקות הסטטיסטית ברמת מובהקות $P \leq 0.05$ (איור 13). עם זאת, בחינה איכותית של טמפרטורת הקרקע החזויה מראה תמונה מורכבת יותר מכיוון שהמודל חזה במדויק רק את טמפרטורת הקרקע בלילה ולא הצליח לחזות את טמפרטורת הקרקע בשעות היום (איור 12). נראה כי הגורם לאי דיוק זה הוא הטיפול בקרינה קצרת הגל מהשמש בשבילים בין השורות (ראה נספחים 1.1.3). שאינו מאפשר לקבל מהלך נכון של טמפרטורת הקרקע בשעות הצהריים. זאת מכיוון שבמודל כל שטח השביל מקבל קרינת שמש ישירה אם זווית השמש מתחת לזווית הקריטית ולא מקבל כלום כאשר זווית השמש מעל לערך הקריטי. כמות האנרגיה שמגיעה לפני הקרקע במשך היום נכונה כנראה, אך ההתפלגות שלה בזמן ובמרחב איננה נכונה.

למרות אי דיוק זה בחיזוי טמפרטורת הקרקע ביום, הוחלט שהמודל מתאים לצרכי המחקר וכי הוא צפוי לסייע בחיזוי מהימן של השפעת חיפוי הקרקע במבני הגידול ביריעות פוליאאתילן על מניעת מחלות עלווה מוגברות לחות. זאת, בעקבות הממצאים שהתגלו בניסויים שערכנו ומראים שהלילה הוא פרק הזמן הקריטי ביממה בכל הנוגע ליצירת טל במבני הגידול. יתרה מכך התוצאות האלה היו עקביות והן גם מגובות בממצאים דומים מהספרות (קאנץ, 1984; Agam et al., 2006; Luo and Goudriaan, 2000).

5.5. ניסויי הדמיה

לאחר שהתברר שהמודל אמין ביצענו בו סידרה של ניסויי הדמיה בהם בחנו את החשיבות של גורמים שונים ואת השפעתם על טמפרטורת הקרקע במבני הגידול כאמצעי לחיזוי השפעת חיפוי הקרקע בפוליאאתילן על יצירת הטל ומשך רטיבות העלווה. כפי שצוין אלה הגורמים המשפיעים על התפתחות מחלות עלווה מוגברות לחות כמו כימשון.

תוצאות ניסוי ההדמיה הראשון הראו שהשפעת מצב העננות על טמפרטורת הקרקע הייתה גדולה ביום ובלילה בכל הטיפולים (איור 14). כשהשמיים היו מעוננים טמפרטורת הקרקע ירדה ביום ועלתה בלילה, לעומת טמפרטורת הקרקע כשהשמיים בהירים. תגובת המערכת האנרגטית במבנה הגידול לשינוי מצב העננות

הייתה מהירה ובאה לידי ביטוי בעיקר במבני גידול בהם הקרקע הייתה חשופה. במבנים כאלה טמפרטורת הקרקע עלתה יותר מזו שבמבנים בהם הקרקע הייתה מחופה, לעומת טמפרטורת הקרקע בלילה בהיר. התחממות הקרקע ביום פוחתת בהשפעת העננות כנראה בשל אופי הקרינה: כאשר השמיים מעוננים הקרינה קצרת הגל המגיעה לפני הקרקע מהשמש היא מפוזרת ולכן עוצמתה פחותה. לעומת זאת, בלילה מתרחשת תופעה הפוכה בהשפעת העננות בשמיים מכיוון שהאמסיביות הגבוהה של השמיים המעוננים מקטינה את איבוד האנרגיה בקרינה תרמית ארוכת גל ממערכת מבנה הגידול. לכן, בלילה מעונן קצב ההתקררות של הקרקע נמוך יותר מקצב התקררות הקרקע בלילה בהיר (Agam et al., 2006) ובעקבות הקרקע כל המערכת האנרגטית במבנה הגידול מתקררת לאט יותר. הקרקע החשופה הייתה הרגישה ביותר לשינויים במצב העננות מכיוון שהיא בעלת אמסיביות גדולה יותר מחיפויי הקרקע השקוף והכסוף (טבלה 5) ולכן היא נוטה לפלוט יותר קרינה תרמית בכל מקרה.

ננסה לחזות לפי ניסוי הדמיה הראשון את השפעת חיפויי הקרקע ומצב העננות על יצירת טל אפשרית במבני הגידול. לפי תוצאות ההדמיה הראשונה בכל מצב עננות, חיפוי הקרקע השקוף צפוי להיות היעיל ביותר במניעת טל ואחריו החיפוי הכסוף והקרקע החשופה, בהתאמה (איור 14). כמו כן, כאשר השמיים בהירים הסכנה של יצירת טל במבני הגידול גדולה יותר ממצב של שמיים מעוננים הודות להתקררות המהירה יותר של מרכיבי המערכת האנרגטית במבנה הגידול בלילה ובראשם הקרקע. יש לסייג ולומר שתחזית זו יכולה להשתנות אם יורד גשם והלחות באוויר גבוהה במיוחד מכיוון שאז למרות העננות משך רטיבות העלווה עלול להיות ארוך במיוחד בשל הגרעון הנמוך של לחץ אדי המים בין העלווה לאוויר במבנה הגידול (Elad, 1999). במקרה של גשם יש להניח שייוצר טל העלווה במבנה הגידול בין אם הקרקע במבנה מחופה ובין אם לאו. עם זאת, לאחר הפסקת הגשם התחממות מהירה יותר של הקרקע המחופה בפוליאטילן תאפשר אידוי מהיר של הטל וקיצור משך רטיבות העלווה לעומת מבנים עם קרקע חשופה.

תוצאות ניסוי ההדמיה השני הראו שהשפעת מימדי הנוף על טמפרטורת הקרקע הייתה גדולה ביום ובלילה בכל הטיפולים (איור 15). התפתחות הנוף הורידה את טמפרטורת הקרקע ביום ובלילה בשיעור שהלך וקטן, עיקר ההשפעה הייתה על הטמפרטורה המרבית של הקרקע ביום. התפתחות הנוף הורידה בלילה את טמפרטורת הקרקע החשופה בשיעור העולה על ירידת טמפרטורת הקרקע המחופה בחיפוי השקוף והכסוף שהראו טמפרטורת קרקע דומה.

הסיבות לכך שהתפתחות הנוף הקטינה את טמפרטורת הקרקע ביום ובלילה היו כנראה שגדילת מימדי נוף הצמחים הגבירה את חסימת קרינת השמש הישירה ומנעה בעדה מלהגיע לפני הקרקע. כתוצאה מכך הקרקע התחממה פחות ביום והתחילה את הלילה בטמפרטורה נמוכה יותר ככל שהעלווה הייתה גדולה ומפותחת יותר. הסיבה לכך שלא נמצאו הבדלים בטמפרטורת הקרקע בין הקרקע המחופה בחיפוי השקוף והכסוף הייתה שלשתי יריעות החיפוי שנבחנו יש תכונות תרמיות דומות (טבלה 5). לכן הגיוני שטמפרטורת הקרקע מתחתן בלילה תהייה דומה.

אם ננסה לחזות לפי ניסוי ההדמיה השני את השפעת חיפויי הקרקע ומימדי הנוף הצמחים על יצירת טל אפשרית ומשך רטיבות העלווה במבני הגידול. הרי שלפי תוצאות ניסוי ההדמיה השני יריעת חיפוי מפוליאטילן שקוף או כסוף תסייע במניעה של טל בכל מצב התפתחות של נוף הצמחים במבנה הגידול. אם כי, ככל שהנוף מפותח יותר הסבירות ליצירת טל במבני הגידול גדלה בין אם הקרקע מחופה בפוליאטילן או חשופה מכיוון שטמפרטורת הקרקע לאורך כל היממה תלך ותהייה נמוכה יותר ועימה תרד גם אגירת החום במערכת האנרגטית של מבנה הגידול כולו. לכן, הסכנה שטמפרטורת הנוף תרד מתחת לטמפרטורת הטל של האוויר צפויה לגדול כשנוף הצמחים מפותח יותר. יתרה מזאת כשנוף הצמחים מפותח הסכנה של פגיעת מחלות עלווה מוגברות לחות גדלה גם מכיוון שבנוף מפותח טל שנוצר צפוי להתאדות לאט ומשך רטיבות העלווה לאחר יצירת טל צפוי להתארך (Elad, 1999; Dalla Marta et al., 2007).

תוצאות ניסוי ההדמיה השלישי הראו שלמצב העננות ולחיפוי הקרקע השפעה גדולה יותר על טמפרטורת הקרקע מאשר לסוג הקרקע וכן ששמיים מעוננים כמו גם קרקע מחופה ביריעות פוליאתילן מעלים את טמפרטורת הקרקע ביום ובלילה (איור 16). התוצאות אינן מפתיעות מכיוון שסוג הקרקע לא השפיע בצורה דרמטית על תכונותיה של הקרקע הנוגעות למאזן האנרגיה שלה (טבלה 7). לעומת סוג הקרקע, מצב העננות (Agam et al., 2006) וחיפוי הקרקע בפוליאתילן הם בעלי השפעה מכרעת על מאזן האנרגיה בפני הקרקע ביום ובלילה.

אם ננסה לחזות לפי ניסוי הדמיה השלישי את השפעת חיפוי הקרקע וסוג הקרקע על יצירת טל ומשך רטיבות העלווה במבנה הגידול בתנאים של שמיים בהירים ומעוננים הרי שכפי שראינו השפעת סוג הקרקע על יצירת טל ומשך רטיבות העלווה צפויה להיות קטנה בעוד שהשפעות העננות וחיפוי הקרקע בפוליאתילן צפויות להיות גדולות כפי שהסברנו להלן.

תוצאות ניסוי ההדמיה הרביעי מראות שלעונת השנה השפעה גדולה יותר על טמפרטורת הקרקע מלמצב העננות וכי עונת השנה צפויה לשנות את מידת השפעת חיפוי הקרקע במבנה הגידול על טמפרטורת הקרקע, לעומת קרקע חשופה (איור 17). בנוסף, עונת השנה צפויה לשנות את מידת ההתחממות של הקרקע בהשפעת החיפוי בין אם הוא שקוף או כסוף.

נראה כי תופעות אלה של השפעת העונה על טמפרטורת הקרקע בכל מצב עננות קשורות בכך שבאביב שטף הקרינה הגלובלית הוא גדול יותר מאשר בסתיו ולכן הקרקע חמה יותר באביב בכל מצב עננות. נראה שהשפעת התגברות שטף הקרינה הגלובלית באביב עולה על השפעת תוספת הקרינה התרמית למאזן האנרגיה של הקרקע בשל העננות בשמיים. לכן, השפעת העונה ניכרת יותר מהשפעת העננות על טמפרטורת הקרקע. בנוסף, התגברות שטף הקרינה הגלובלית באביב מגדילה כנראה את השפעת החיפוי על טמפרטורת הקרקע לעומת קרקע חשופה מכיוון שהחיפוי מעלה את טמפרטורת הקרקע ביום לעומת קרקע חשופה בשיעור גדול מספיק להגדלת טמפרטורת הקרקע לאורך כל המחזור היומי שלה. נראה כי בעונה בה שטף הקרינה הגלובלית גדול יחסית כמו באביב לחיפוי השקוף יכול להיות יתרון יותר גדול במניעת טל מאשר בעונות אחרות.

אם ננסה לחזות לפי ניסוי ההדמיה הרביעי את השפעות חיפוי הקרקע בפוליאתילן, עונת השנה ומצב העננות על יצירת טל ומשך רטיבות העלווה במבני הגידול, נוכל לומר שבאביב הסיכון של יצירת טל בלילה צפוי להיות נמוך יותר מאשר בסתיו בכל מצב עננות, מכיוון שכפי שמראות תוצאות ההדמיה הרביעית השפעת העונה על התחממות המערכת האנרגטית של מבנה הגידול צפויה לעלות על השפעת מצב העננות. בנוסף, נראה כי בשל אותם הגורמים מידת ההשפעה של יריעות החיפוי על המערכת האנרגטית במבנה הגידול אינה זהה לכל אורך השנה. לכן ניתן לשער שבאביב יתגלו הבדלים במשך רטיבות העלווה בין חיפויי הקרקע השקוף והכסוף ויעילות החיפוי השקוף תעלה על זו של החיפוי הכסוף במניעת מחלות עלווה מוגברות לחות, הודות לקיצור משך רטיבות העלווה על ידי צמצום משך יצירת הטל ובנוסף לכך התאדות מהירה יותר של טל שנוצר. יש לסייג ולומר כי תחזיות אלה אינן עולות בקנה אחד עם תוצאות הניסויים שנערכו בחוות הבשור. התוצאות של הניסויים בבשור לא הראו יתרון מובהק לחיפוי הקרקע השקוף במניעת טל (איור 8) ולא במניעת מחלת הכימשון (איור 5) לעומת החיפוי הכסוף. זאת למרות שנצפתה טמפרטורת קרקע גבוהה יותר מתחת לחיפוי הקרקע השקוף, לעומת החיפוי הכסוף (איור 6). התוצאות האלה חזרו על עצמן בשתי העונות של הניסויים (סתיו 2005 ואביב 2006) ובניסויים המקדימים שנערכו בשנים 2003-5 בבשור.

ננסה לעמוד על מספר גורמים שיוכלו לישב את הסתירה בין משך יצירת הטל החזוי באביב בעקבות ההדמיה הרביעית (איור 17) ומשך רטיבות העלווה המדוד באביב 2006 (איור 8) וכן את העדר ההבדלים בהשפעת החיפויים השונים על חומרת מחלת הכימשון באביב 2006 (איור 5). יתכן שהשפעת סוג החיפוי לא הורגשה בקיצור משך יצירת הטל משום ששני החיפויים הצליחו לשמור את הטמפרטורות של רכיבי המערכת

האנרגטית במבנה הגידול מעל לטמפרטורת הטל באוויר במבנה. כאמור כשהטמפרטורה של משטח גדולה מטמפרטורת הטל של האוויר מסביבו לא יתעבה עליו טל מהאוויר (Agam et al., 2006). גודל ההפרש בין טמפרטורות המשטח והאוויר לא משפיע על משך יצירת הטל וכל עוד ההפרש חיובי לא נוצר טל. באופן דומה ניתן להסביר גם את ההשפעה הדומה של שתי היריעות בצמצום חומרת מחלת הכימסון. אם שתי היריעות מנעו יצירת טל בשיעור דומה ניתן לשער כי גם השפעתן בקיצור משך רטיבות העלווה הייתה דומה, לכן גם לא נמצאה השפעה שונה של החיפויים השונים על חומרת מחלת הכימסון.

תוצאות ניסוי ההדמיה החמישי שבחן את השפעת התכונות הפוטומטריות של חיפוי הקרקע על טמפרטורת הקרקע מוצגות באיור 18. התוצאות הראו שהשפעת השינוי במקדם ההחזרה לקרינה קצרת גל של יריעת החיפוי על טמפרטורת הקרקע היא כמעט ליניארית ($R^2 > 0.99$) למעט טמפרטורת המקסימום בחיפוי האטום שהראתה השפעה כמעט ריבועית ($R^2 > 0.99$) והגדלת מקדם ההחזרה של החיפוי תוריד את טמפרטורת הקרקע בכלל וטמפרטורת הקרקע המרבית בפרט. יתרה מכך, ביריעת חיפוי אטומה, הירידה בטמפרטורת הקרקע המרבית עם הגדלת מקדם ההחזרה של היריעה לקרינה קצרת גל תהיה גדולה יותר מיריעה שקופה. כמו כן, טמפרטורות הקרקע המזעריות החזויות בכל סוגי היריעות שנבחנו דומות וטמפרטורות הקרקע המרביות גבוהות יותר ביריעות האטומות לעומת השקופות לכל ערך של מקדם ההחזרה.

ננסה לעמוד על הגורמים לתוצאות שהתקבלו בניסוי ההדמיה החמישי. תחילה, הקשר הישיר (כמעט ליניארי) בין ערכי מקדם ההחזרה של היריעה וטמפרטורות המקסימום והמינימום של הקרקע המהלך היום, קשור כנראה בחשיבות הגדולה של מאזן הקרינה במאזן האנרגיה הכולל של הקרקע, כפי שהתבטאה במודל. במודל ערכי ההתנגדות האווירודינאמית למעבר חום ואדי מים מהקרקע לאוויר היו גדולים מאוד בשל תנועת האוויר האיטית שנחזתה במבנה. כתוצאה מכך גודלם של שטפי החום המוחשי והכמוס מהקרקע לאוויר היה קטן מאוד והשפעתם על מאזן האנרגיה של הקרקע כמעט ולא הורגשה לעומת השפעת מאזני הקרינה. הדומיננטיות של מאזן הקרינה במאזן האנרגיה הכולל של הקרקע הביאה כנראה להתאמות הליניאריות והריבועיות בין מקדם ההחזרה של היריעה לקרינה קצרת גל וטמפרטורת הקרקע המרבית והמזערית באותו היום. יתכן שטמפרטורת המקסימום בחיפוי האטום הראתה השפעה ריבועית ולא ליניארית בגלל החזרי הקרינה הנוספים בין החיפוי לכיסוי המבנה.

הירידה בטמפרטורות הקרקע המרבית והמזערית עם הגדלת מקדם ההחזרה של היריעה היא הגיונית שהרי פחות קרינה נקלטת בקרקע ככל שמקדם ההחזרה של היריעה גבוה יותר. יתרה מכך, ביריעות האטומות השינוי בערכו של מקדם ההחזרה לקרינה קצרת גל משפיע יותר על טמפרטורת הקרקע מהיריעות השקופות מכיוון שלא עוברת דרכן קרינה קצרת גל ישירות לקרקע וכל מאזן הקרינה של הקרקע מתחת ליריעה הוא בתחום הקרינה התרמית ארוכת הגל. עם זאת, יש להתייחס בספקנות לתחזית טמפרטורת הקרקע המרבית ביום משתי סיבות עיקריות. ראשית, מכיוון שהן שונות מתוצאות הניסויים שנערכו בבשור והראו שטמפרטורות הקרקע המרביות ביום בקרקע המחופה ביריעות חיפוי אטומות היו נמוכות יותר מטמפרטורות הקרקע המחופה בחיפוי השקוף. שנית, משום שהמודל לא הצליח לחזות במדויק את טמפרטורות הקרקע בשעות היום מסיבות המוסברות לעיל (איור 12).

אם ננסה לחזות לפי ניסוי ההדמיה החמישי את השפעות המקדמים הפוטומטריים של חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על יעילותו במניעת טל וקיצור משך רטיבות העלווה הרי שככל שהחיפוי מחזיר פחות קרינה קצרת גל הוא צפוי להיות יעיל יותר בקיצור משך רטיבות העלווה בשל תרומתו להתחממות הקרקע והמערכת האנרגטית במבנה הגידול בעיקר ביום. התחממות כזו תסייע לאידוי טל שנוצר בלילה ויבוש מהיר יותר של העלווה. עם זאת, לא צפויה כנראה השפעה של התכונות הפוטומטריות של יריעת החיפוי על יצירת הטל בלילה.

תוצאות ניסוי ההדמיה השישי שבחן את השפעת התכונות התרמיות של חיפוי הקרקע על טמפרטורת הקרקע מוצגות באיור 19. תוצאות ההדמיה מראות שהשפעת שינוי מקדם ההחזרה לקרינה ארוכת גל של החיפוי על טמפרטורת הקרקע המרבית והמזערית היא כמעט ריבועית ($R^2 > 0.99$) וככל שמקדם ההחזרה גדול יותר טמפרטורת הקרקע צפויה להיות גבוהה יותר בשני סוגי היריעות שנבחנו דמוי חיפוי שקוף ודמוי חיפוי כסוף. בנוסף שיעור ההשפעה של התכונות התרמיות של היריעה על טמפרטורת הקרקע המזערית עולה על שיעור ההשפעה על טמפרטורת הקרקע המרבית.

אם נשווה בין השפעת התכונות הפוטומטריות לתכונות התרמיות של היריעה על טמפרטורת הקרקע נראה מגמות הפוכות. עליה בערך מקדם ההחזרה הפוטומטרי הביאה לירידה בטמפרטורת הקרקע ולהיפך, עליה בערך מקדם ההחזרה התרמי הביאה לעליה בטמפרטורת הקרקע. בנוסף, נראה שההשפעה של התכונות הפוטומטריות על טמפרטורת הקרקע המזערית הייתה קטנה בעוד ששיעור ההשפעה של התכונות התרמיות על אותה הטמפרטורה היה גדול.

הסיבה להבדלים בשפעת התכונות הפוטומטריות והתרמיות על טמפרטורת הקרקע קשורה כנראה בתכונות הקרינתיות שנקבעו ליריעות ובתרחישים הקרינתיים השונים לכל אחד מתחומים אלה של הקרינה. ראשית, ניתן לשער שככל שערך מקדם ההחזרה של היריעה לקרינה תרמית עולה, יותר קרינה ארוכת גל תוחזר מהיריעה לפני הקרקע ולכן טמפרטורת הקרקע תעלה. ההפך הוא הנכון לקרינה קצרת גל שעיקר השפעתה על מאזן האנרגיה של הקרקע הייתה עקיפה והתרחשה באמצעות שינוי מאזן האנרגיה של יריעת החיפוי בעצמה שבתורה גרמה לשינוי שטפי האנרגיה שעברו בין החיפוי ובין פני הקרקע בצורות אחרות של אנרגיה, כמו קרינה תרמית והולכת חום ולא בקרינה קצרת הגל.

נראה כי שני גורמים חוברים יחד ומביאים להבדל השני בהשפעת התכונות הפוטומטריות והתרמיות על טמפרטורת הקרקע עליו הצביעו ניסויי ההדמיה החמישי והשישי. כאמור לפי ההדמיות החמישית והשישית, התכונות הפוטומטריות כמעט לא משפיעות על טמפרטורת הקרקע המזערית בעוד שהשפעתן של התכונות התרמיות על הטמפרטורה המזערית של הקרקע גדולה. הגורמים לכך היו כנראה הקרינה התרמית שהיא כאמור המרכיב המשפיע ביותר במאזן האנרגיה של הקרקע במבנה הגידול בלילה (Silva and Rosa, 1987; Day and Bailey, 1999) והעובדה שהקרקע היא המסה התרמית העיקרית במערכת האנרגטית של מבנה הגידול (Businger, 1963; Kimball, 1973; Avissar and Mahrer, 1982; Zhang et al., 1997). אם אלה פני הדברים הרי שהגיוי להניח שהשפעת הקרינה התרמית על טמפרטורת הקרקע המזערית שנמדדת בסוף הלילה, תהיה גדולה.

אם ננסה לחזות לפי ניסוי ההדמיה השישי את השפעות המקדמים התרמיים של חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על יעילותו במניעת טל וקיצור משך רטיבות העלווה הרי שככל שהחיפוי מחזיר יותר קרינה ארוכת גל הוא צפוי להיות יעיל יותר בקיצור משך רטיבות העלווה בשל העובדה שהחיפוי מסייע להתחממות המערכת האנרגטית במבנה הגידול והדבר מורגש בעיקר בלילה. התחממות המערכת האנרגטית תסייע בשמירת טמפרטורת הנוף מעל לטמפרטורת הטל של האוויר בשעות הלילה במהלך נוצר בדרך כלל הטל.

לסיכום, השימוש בחיפוי קרקע ביריעות פוליאיתילן היא שיטה יעילה בכל מקום בארץ ובכל עונה (למעט במהלך עם מחלות עלווה בגידולי ירקות חממה). השיטה צפויה להיות יעילה בכל מקום בארץ ובכל עונה (למעט במהלך אירועי גשם). יש לסייג אמירה זו מכיוון שהחיפוי משפיע בעיקר בכך שהוא מקצר את משך רטיבות העלווה מטל. לכן הוא יהיה יעיל כנגד מחלות עלווה מוגברות לחות הדורשות משך רטיבות עלווה ארוך, ולא כנגד מחלות שדורשות משך רטיבות עלווה קצר או מחלות שמשך רטיבות העלווה איננו גורם מכריע במחזור חייהן ובמידת הנזק שיגרם מהן. כמו כן, בשלב זה קשה לקבוע האם לסוג היריעה שתשמש לחיפוי הקרקע צפויה להיות השפעה על יעילות השיטה במקומות שונים. הסיבה לקושי בבחירת היריעה שתהיה היעילה ביותר באזור מסוים נעוצה בכך שכל אחת מהיריעות שנבחנו בניסויים השפיעה באופן שונה על המיקרואקלים

במבנה הגידול למרות שלא נצפו ביניהן בניסויים הבדלים בקיצור משך רטיבות העלווה במבנים. הגורמים להבדל בין תוצאות ההדמיות שהראו יתרון לחיפוי שקוף לתוצאות הניסויים בבשור בהם לא נמצא הבדל בין שני סוגי החיפויים הם כנראה המורכבות של תהליכי היצירה והייבוש של הטל על העלווה במבנה גידול והעובדה שיצירת טל היא תהליך שמתרחש רק כשטמפרטורת העלווה יורדת ולו במעט מתחת לטמפרטורת סף שהיא טמפרטורת הטל של האוויר במבנה. קשה לחזות מתי העלווה תתקרר מתחת לסף זה ללא עריכה של מאזן אנרגיה כולל לנוף הצמחים במבנה הגידול בתנאי הסביבה המסוימים. לכן קשה גם לחזות כיצד ישפיעו יריעות חיפוי שונות על משך רטיבות העלווה באזורים שונים בארץ בהם תנאי הסביבה שונים. למרות זאת, בכל הניסויים שערכנו יריעת חיפוי הקרקע מהפוליאתילן השקוף הביאה להתחממות המרבית במבני הגידול ולכן אם קיים ספק באשר לבחירת סוג יריעת החיפוי שתהיה היעילה ביותר בתנאי סביבה מסוימים יש להעדיף את יריעת החיפוי השקופה.

מקורות

1. אלעד, י. 1998. התפתחות מחלות בגידולים חסויים. עמודים 127-136 במחלות צמחים בישראל. רותם, י., פלטי, י. ובן יפת, י. (עורכים). הוצאת מינהל המחקר החקלאי
2. כהן, י. 1998. כימסון בתפוחי אדמה. עמודים 247-256 במחלות צמחים בישראל. רותם, י., פלטי, י. ובן יפת, י. (עורכים). הוצאת מינהל המחקר החקלאי
3. קאנץ, ד. 1984. התאדות לילית בחממה כמנגנון צורך אנרגיה. עבודה לקבלת תואר מגיסטר למדעים בהנדסה חקלאית. סנט הטכניון- מכון טכנולוגי לישראל
4. Abdel-Ghany, A. M. and Kozai, T. 2006. Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. *Renewable Energy* 31(10):1521-1539
5. Acs, F., Mihailovic, D. T. and Rajkovic, B. 1991. A coupled soil-moisture and surface-temperature prediction model. *Journal of Applied Meteorology* 30(6):812-822
6. Agam, N. and Berliner, P. R. 2006. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments- a review. *Journal of Arid Environments* 65:572-590
7. Avissar, R. and Mahrer, Y. 1982. Verification study of a numerical greenhouse microclimate model. *Transitions of the American Society of Agricultural Engineering* 25:1711-1720
8. Baille, A. 1996. Overview of greenhouse climate control in Mediterranean regions. *Cahiers Options méditerranéennes* 31:59-76
9. Baille, A. 1999. The greenhouse energy cycle. Pages 265-286 In: *The Greenhouse Ecosystem*. Stanhill, G. and Enoch, H. Z. (Editors). Elsevier. The Netherlands
10. Baille, A., Lopez, J. C., Bonachela, S., Gonzalez-Real, M. M. and Montero, J. I. 2006. Night energy balance in a heated low-cost plastic greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 137:107-118
11. Bartzanas, T., Boulard, T. and Kittas, C. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering* 88(4):479-490
12. Becktell, M. C., Daughtrey, M. L. and Fry, W. E. 2005. Epidemiology and management of petunia and tomato late blight in the greenhouse. *Plant Disease* 89(9):1000-1008
13. Bhumralker, C. M. 1975. Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model. *Journal of Applied Meteorology* 14:1246-1258
14. Boulard, T., Feuilloley, P. and Kittas, C. 1997. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. *Journal of Agricultural Engineering Research* 67:249-266
15. Briassoulis, D., Aristopoulou, A., Bonora, M. and Verlodt, I. 2004. Degradation characterization of agricultural low-density polyethylene films. *Biosystems Engineering* 88(2):131-143
16. Brunt, D. 1932. Notes on radiation in the atmosphere: 1. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society* 58:389-420
17. Brutsaert, W. 1982. *Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications*. D. Reidel. Hingham, Massachusetts
18. Brutsaert, W. 1984. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. Boston: D. Reidel.
19. Businger, J. A. 1963. The glasshouse (greenhouse) climate. Pages 277-318 In: *Physics of Plant Environment*. Van Wijk, W. R. (Editor). North-Holland Publishing Co. Amsterdam
20. Byrne, J. M., Hausbeck, M. K., Meloche, C. and Jarosz, A. M. 1998. Influence of dew period and temperature on foliar infection of greenhouse-grown tomato by *Colletotrichum coccodes*. *Plant Disease* 82(6):639-641
21. Campbell, C. L. and Madden, L. V. 1990. *Introduction to plant disease epidemiology*. John Wiley and Sons. New York
22. Campbell, G. S. and Norman, J. M. 1998. *An Introduction to environmental biophysics*. Springer-Verlag. New York
23. Cohen, S., Ziv, G., Elad, Y., Grava, A. and Shtienberg, D. 2006. Influence of polyethylene mulch on night microclimate, dew point and *Phytophthora infestance* infection in non heated tomato greenhouses in southern Israel. *Acta Horticulturae* 718:277-282
24. Csizinsky, A. A., Schuster, D. J. and King, J. B. 1995. Color mulches influence yield and pest populations in tomatoes. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 120:778-784
25. Dalla Marta, A., Magarey, R. D. and Orlandini, S. 2005. Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132:84-95

26. Dalla Marta, A., Magarey, R. D., Martinelli, L. and Orlandini, S. 2007. Leaf wetness duration in sunflower (*Helianthus annuus*): Analysis of observations, measurements and simulations. *European Journal of Agronomy* 26(3):310-316
27. Day, W. and Bailey, B. J. 1999. Physical principles of microclimate modification. Pages 71-99 In: *The Greenhouse Ecosystem*. Stanhill, G. and Enoch, H. Z. (Editors). Elsevier. The Netherlands
28. Demrati, H., Boulard, T., Bekkaoui, A. and Bouirden, L. 2001. Natural ventilation and climatic performance of a large-scale banana greenhouse. *Journal of Agriculture Engineering Research* 80(3):261-271
29. Dilara1, P. A. and Briassoulis, D. 2000. Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* 76:309-321
30. Elad, Y. 1999. Plant diseases in greenhouses. Pages 191-210 In: *The Greenhouse Ecosystem*. Stanhill, G. and Enoch, H. Z. (Editors). Elsevier. The Netherlands
31. Francl, L. J. and Panigrahi, S. 1997. Artificial neural network models of wheat leaf wetness. *Agricultural and Forest Meteorology* 88:57-65
32. Fuchs, M. and Tanner, C. B. 1967. Evaporation from a drying soil. *Journal of Applied Meteorology* 6:852-857
33. Fuchs, M., Dayan, E., Shmuel, D. and Zipori, I. 1997. Effects of ventilation on the energy balance of a greenhouse with bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 86:273-282
34. Gary, G. and Baille, A. 1999. The greenhouse carbon cycle. Pages 287-301 In: *The Greenhouse Ecosystem*. Stanhill, G. and Enoch, H. Z. (Editors). Elsevier. The Netherlands
35. Garzoli, K. V. and Blackwell, J. 1981. An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 26:203-214
36. Giacomelli, G. A. and Roberts, W. J. 1993. Greenhouse covering systems. *Horticulture Technology* 3:50-58
37. Gleason, M. L., Mac Nab, A. A., Pitblado, R. E., Rickar, M. D., East, D. A. and Latin, R. X. 1995. Disease-warning systems for processing tomatoes in eastern North America: Are we there yet? *Plant Disease* 79:113-121
38. Gleason, M. L., Taylor, S. E., Laughlin, T. M. and Koehler, K. J. 1994. Development and validation of an empirical model to estimate the duration of dew periods. *Plant Disease* 78:1011-1016
39. Goudriaan, J. 1977. *Crop micrometeorology: a simulation study*. Simulation Monographs Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen, The Netherlands
40. Harrison, J. R. 1992. Effects of the aerial environment on late blight of potato foliage- a review. *Plant Pathology* 41(4):384-416
41. Huber, L. and Gillespie, T. J. 1992. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology* 30:553-577
42. Jacobs, A. F. G., Heusinkveld, B. G. and Kessel, G. J. T. 2005. Simulating of leaf wetness duration within a potato canopy. *NJAS Wageningen Journal of Life Sciences* 53:151-166
43. Jewett, T. J. and Jarvis, W. R. 2001. Management of the greenhouse microclimate in relation to disease control- a review. *Agronomie* 21:351-366
44. Jolliet, O. 1999. The greenhouse water cycle. Pages 303-326 In: *The Greenhouse Ecosystem*. Stanhill, G. and Enoch, H. Z. (Editors). Elsevier. The Netherlands
45. Jones, G. H. 1992. *Plants and Microclimate*. Cambridge University Press. Cambridge
46. Kacira, M., Short, T. H. and Stowell, R. 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated multi-span, sawtooth greenhouses. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 41(3):833-836
47. Kim, K. S., Taylor, S. E., Gleason, M. L., Villalobos, R. and Arauz, L. F. 2005. Estimation of leaf wetness duration using empirical models in northwestern Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology* 129:53-67
48. Kimball, B. A. 1973. Simulation of the energy balance of a greenhouse. *Agricultural Meteorology* 11:243-60
49. Kittas, C., Draoui, B. and Boulard, T. 1995. Quantification of the ventilation of a greenhouse with a roof opening. *Agricultural and Forest Meteorology* 77:95-111
50. Lee, I. B. and Short, T. H. 2000. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 43(3):745-753

51. Lee, I. B. and Short, T. H. 2001. Verification of computational fluid dynamic temperature simulations in a full-scale naturally ventilated greenhouse. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 44(1):119-127
52. Levit, H. J. and Gaspar, R. 1988. Energy budget for greenhouses in humid temperate climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 42:241-254
53. List, R. J. 1971. *Srnrthsonian Meteorological Tables*, 6 eddition. Smithsonian Institution Press. Washington D. C.
54. Litago, J., Baptista, F. J., Meneses, J. F., Navas, L. M., Bailey, B. J. and Sa'nchez-Giro'n, V. 2005. Statistical modeling of the microclimate in a naturally ventilated greenhouse. *Biosystems Engineering* 92:365-381
55. Liu, B. Y. H. and Jordan, R. C. 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* 4(3):1-19
56. Luo, Y., Loomis, R. S. and Hsiao, T. C. 1992. Simulation of soil temperature in crops. *Agricultural and Forest Meteorology* 61:23-38
57. Luoa, W. and Goudriaan, J. 2000. Dew formation on rice under varying durations of nocturnal radiative loss. *Agricultural and Forest Meteorology* 104:303-313
58. Magarey, R. D., Russo, J. M., Seem, R. C., 2006a. Simulation of surface wetness with a water-budget and energy balance approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 139:373-381
59. Magarey, R. D., Seem, R. C. and Russo, J. M. 2006b. Grape canopy surface wetness: Simulation versus visualization and measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* 139:361-372
60. Monteith J. L., Unsworth M. 1990. *Principles of Environmental Physics*, 2 edition. Edward Arnold. London
61. Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mugnozza, G., Vox, G., Feuilleley, P. and Stoffers, J. A. 2000. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* 77(1):7-38
62. Papastamati, K., McCartney, H. A., van den Bosch, F. 2004. Modeling leaf wetness duration during the rosette stage of oilseed rape. *Agricultural and Forest Meteorology* 123:69-78
63. Pedro, M. J. and Gillespie, T. J. 1982. Esemating dew duration. 2. Utilizing standard weather station data. *Agricultural Meteorology* 25:297-310
64. Pieters, J. G. and Deltours, J. M. 1997. Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* 68:125-137
65. Pieters, J. G., Deltoure, J. M. J. J. and Debruyckere, M. J. G. 1995. Onset of condensation on the inner and outer surface of greenhouse covers during night. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61:165-171
66. Richards, K. 2005. Urban and rural dewfall surface moisture and associated canopy level air temperature and humidity measurements for Vancouver Canada. *Boundary-Layer Meteorology* 114:143-163
67. Ristaino, J. B. 2002. Tracking historic migrations of the Irish potato famine pathogen, *Phytophthora infestans*- a review. *Microbes and Infection* 4:369-1377
68. Rosa, R. 1988. Solar and thermal radiation inside a multispan greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 40(4):285-295
69. Rosenberg, N. J. 1974. *Microclimate: the biological environment*. John Wiley and Sons. New York.
70. Seginer, I. Boulard, B. J. and Bailey, B. J. 1994. Neural network models of the greenhouse climate. *Journal of Agricultural Engineering Research* 59:203-216
71. Sellers, W. D. 1969. *Physical climatology*. The University of Chicago Press. Chicago and London
72. Short, T. H. 1996. Selecting the greenhouse structure your crop needs. *Grower Talks*, Summer Issue, July:8-9
73. Silva, A. M. and Rosa, R. 1987. Radiative heat loss inside a greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 37:155-162
74. Silva, A., Miguel, A. and Rosa, R. 1991. Thermal radiation inside a single span greenhouse with a thermal screen. *Journal of Agricultural Engineering Research* 49:285-298
75. Singh, G., Singh, P. P., Lubanaa, P. P. S. and Singh, K. G. 2006. Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy* 31(10):1541-1560
76. Stanghellini, C. 1987. *Transpiration of Greenhouse Crops- An Aid to Climate Management*. Wageningen University. Wageningen
77. Tanny, J., Haijun, L. and Cohen, S. 2006. Energy balance closure and application of the eddy covariance technique in a banana screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 139:105-118

78. Tarara, M. J. 2000. Microclimate modification with plastic mulch. *Horticultural Science* 35(2):169-180
79. Wang, S. and Deltour, J. 1996. An experimental ventilation function for large greenhouse based on a dynamic energy balance model. *Agricultural Engineering Journal* 5:103-112
80. Woodruff, V. I. 1997. Analysis of vent designs for naturally ventilated gutter connected greenhouses. Masters Thesis. Ohio State University. Columbus, Ohio
81. Zhang, L. and Lemeur, R. 1992. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 58:209-228
82. Zhang, Y., Mahrer, Y. and Margolin, M. 1997. Predicting the microclimate inside a greenhouse: an application of a one-dimensional numerical model in an unheated greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 86:291-297

נספחים

1. פיתוח מודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הגידול

במסגרת המחקר פותח מודל לחיזוי של טמפרטורת הקרקע במבנים בהם הקרקע נשארה חשופה ובמבנים בהם הקרקע חופתה ביריעות פוליאאתילן שקוף או כסוף. נתוני הקלט של המודל מופיעים בטבלה 5.

1.1. מודל לחיזוי שטף הקרינה מהשמיים מחוץ למבנה ובתוכו

שטף הקרינה מכיוון השמיים אל המבנה הוא סכום של שני שטפים. השטף הראשון הוא של הקרינה קצרת הגל או הקרינה הגלובלית (R_S). שטף הקרינה קצרת הגל הינו סכום של שטף הקרינה הישירה (R_{S_dir}) ושטף הקרינה המפוזרת (R_{S_dif}). השטף השני הוא של הקרינה ארוכת הגל (R_{lw}).

1.1.1. קרינת שמש קצרת גל מהשמיים

חיזוי אמפירי של שטף הקרינה הגלובלית כנתון קלט למודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע נערך בשני תרחישים. בתרחיש הראשון השמיים היו בהירים ובשני השמיים היו מעוננים. כשהשמיים בהירים, שטף הקרינה הגלובלית נחזה לפי Campbell and Norman (1998). לעומת זאת כשהשמיים מעוננים, שטף הקרינה הגלובלית נחזה לפי עבירות אטמוספרית עבור עננים מסוג altocumulus לפי List (1971), למצב של שמיים אחידים.

כשהשמיים בהירים הקרינה הגלובלית מורכבת מקרינה ישירה ומפוזרת. בתרחיש כזה, חיזוי שטף הקרינה הגלובלית נעשה תוך שימוש במשוואות 15, 16 ו-17 (Liu and Jordan, 1960; Campbell and Norman, 1998). לעומת זאת כשהשמיים מעוננים, לא מגיעה מהשמיים קרינה קצרת גל ישירה והקרינה הגלובלית כולה מפוזרת. בתרחיש כזה, שטף הקרינה הגלובלית נחזה על ידי שימוש בטבלאות לחיזוי שטף הקרינה הגלובלית לפי סוג העננים והזווית הזניט של השמש בשמיים אחידים (List, 1971).

$$R_S = R_{S_dir} + R_{S_dif} \quad \text{משוואה 15}$$

$$R_{S_dir} = \tau S^{1/\cos \Psi} \quad \text{משוואה 16}$$

$$R_{S_dif} = 0.3(1 - \tau^{1/\cos \Psi}) S \cos \Psi \quad \text{משוואה 17}$$

במשוואות אלה: R_S הוא שטף הקרינה הגלובלית ($W m^{-2}$); R_{S_dir} הוא שטף הקרינה קצרת הגל הישירה מהשמיים ($W m^{-2}$); R_{S_dif} הוא שטף הקרינה קצרת הגל המפוזרת מהשמיים ($W m^{-2}$); τ הוא מקדם ההעברה של האטמוספירה לקרינה קצרת גל; S הוא הקבוע הסולארי ($W m^{-2}$); ו- Ψ היא זווית הזניט של השמש השווה לזווית בין השמש לאנך לפני כדור הארץ בנקודה מסוימת על פני כדור הארץ (*).

1.1.2. קרינה ארוכת גל מהשמיים

חיזוי אמפירי של שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים בוצע גם הוא עבור תרחיש של שמיים בהירים ותרחיש של שמיים מעוננים. החיזוי נעשה על פי טמפרטורת האוויר (T_{a_out}) ולחץ אדי המים באוויר (e_{a_out}) שנמדדו מחוץ למבני הניסוי. בתרחיש הראשון כשהשמיים בהירים נחזה שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים (R_{lw_clear}) לפי משוואת סטפן-בולצמן כשאמסיביות השמיים (ϵ_s), נקבעה לפי Brunt (1932) ו- Brutsaert (1982) (משוואות 18 ו-19, בהתאמה). בתרחיש השני, כשהשמיים מעוננים נחזה שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים (R_{lw_cloudy}) לפי Brutsaert (1982), על ידי הכפלת ערכו של שטף הקרינה ארוכת הגל שהתקבל לשמיים בהירים במקדם התיקון של סטפן-בולצמן (a), לחישוב שטף הקרינה ארוכת הגל משמיים מעוננים (משוואה 20).

$$R_{lw_clear} = \epsilon_s \sigma T_{a_out}^4 \quad \text{משוואה 18}$$

כאשר:

$$\epsilon_s = c_a + c_b e_{a_out}^{0.5} \quad \text{משוואה 19}$$

$$R_{lw_cloudy} = (1+a)R_{lw_clear} \quad \text{משוואה 20}$$

במשוואות אלה: R_{lw_clear} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל משמיים בהירים ($W m^{-2}$); ϵ_s היא אמסיביות השמיים הבהירים; σ הוא קבוע סטפן-בולצמן ($W m^{-2} K^{-4}$); T_{a_out} היא טמפרטורת האוויר מחוץ למבנה ($^{\circ}K$); c_a הוא קבוע חסר יחידות; c_b הוא קבוע ($mbar^{-0.5}$); e_{a_out} הוא לחץ אדי המים באוויר מחוץ למבנה ($mbar$); R_{lw_cloudy} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל משמיים מעוננים ($W m^{-2}$); ו- a הוא מקדם התיקון של סטפן-בולצמן לקרינה ארוכת גל משמיים מעוננים.

1.1.3 קרינה בתוך המבנים

שטף הקרינה הפוגע בפני חיפוי הקרקע או בפני הקרקע החשופה בתוך המבנה צפוי להיות שונה משטף הקרינה מכיוון השמיים מחוץ למבנה בשל שני גורמים עיקריים. ראשית, התכונות הקרינתיות של כיסוי המבנה ותנאי הסביבה מכתיבים את גודל שטף הקרינה מהכיסוי כלפי מטה. שנית, נוכחות צמחים במבנה משפיעה על גודל שטף הקרינה הפוגע בפני חיפוי הקרקע או פני הקרקע החשופים.

בחיזוי השפעת הצמחים על שטף הקרינה בפני החיפוי או הקרקע החשופה נלקחו בחשבון מספר נתונים. ראשית, נלקחה בחשבון גיאומטריית השתילה הקובעת את רוחב השורות והשבילים וכיוונם. בנוסף, קובעת גיאומטריית השתילה גם את חלקו היחסי של רוחב השבילים הכולל ביחס לרוחב המבנה (c). נלקחו בחשבון גם מימדי הנוף הכוללים את גובה הצמחים ואינדקס שטח העלווה LAI.

1.1.3.1 קרינה קצרת גל מפוזרת המגיעה לקרקע החשופה או לחיפוי

כמוזכר לעיל, הטיפול מתחלק בין קרינה ישירה לקרינה מפוזרת. נתחיל בטיפול בשטף הקרינה המפוזרת הפוגע בפני החיפוי או הקרקע החשופה. שטף הקרינה המפוזרת מהשמש מתחת לנוף חושב על ידי הכפלת שטף הקרינה המפוזרת מהשמש העוברת את כיסוי המבנה במקדם ההעברה של הנוף לקרינה קצרת גל שחושב לפי Goudriaan (1977) בעזרת משוואה 23 מבלי להתחשב בשורות של הנוף.

$$\tau_{canopy_dif} = \exp[-0.5(1-\beta)^{0.5}LAI] \quad \text{משוואה 23}$$

במשוואה זו: τ_{canopy_dif} הוא מקדם ההעברה של הנוף לקרינה קצרת גל מפוזרת; β הוא מקדם הפיזור; ו- LAI הוא אינדקס שטח העלווה.

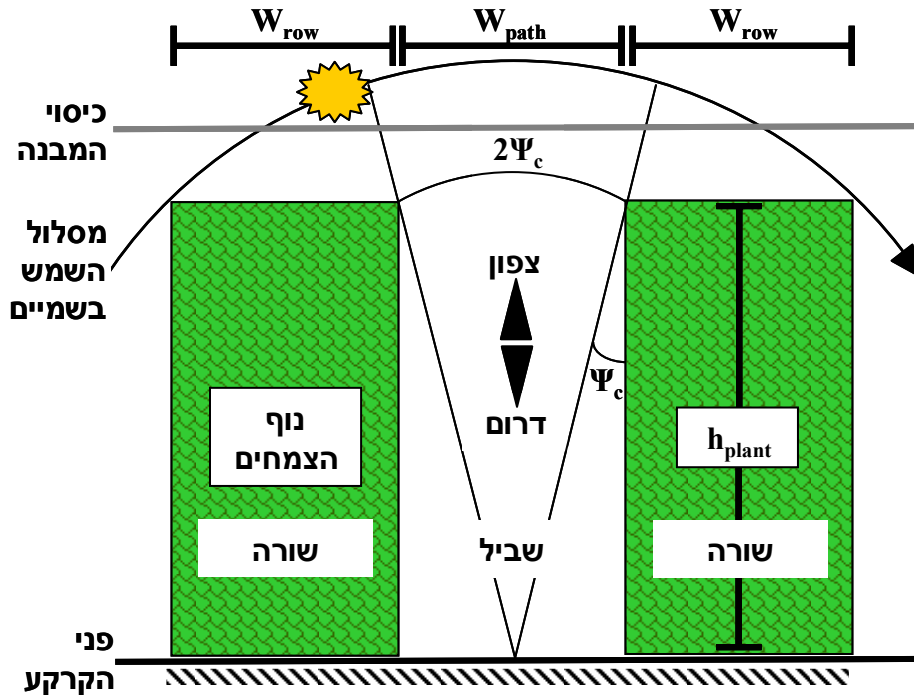
לצורך חישוב רכיב הקרינה המפוזרת במאזן הקרינה קצרת הגל מהשמש בפני הקרקע המוחפיה והחשופה, נלקח בחשבון שטף הקרינה המפוזרת קצרת הגל מתחת לנוף כשטף הקרינה המפוזרת הפוגע בפני הקרקע גם בשביל וגם בשורה בכל השעות היום. לקביעת מאזן הקרינה קצרת הגל הכולל בפני הקרקע חובר שטף הקרינה המפוזרת לשטף הקרינה הישירה שחושב בנפרד.

1.1.3.2 קרינה קצרת גל ישירה בפני הקרקע החשופה או החיפוי

לצורך חיזוי שטף הקרינה קצרת הגל הישירה המגיע לפני החיפוי או הקרקע החשופה חולקו פני הקרקע במבנה לשני סוגי אזורים. השבילים שאינם מכוסים צמחיה היו סוג אחד של פני שטח והשורות המכוסות בצמחים היו את הסוג השני (איור 20). שטף הקרינה קצרת הגל הישירה המגיע לפני השטח או החיפוי חושב בנפרד לכל סוג אזור (R_{s_path} ; R_{s_row}). שטף הקרינה קצרת הגל הישירה הכללית המגיע לפני השטח (R_{s_total}) חושב על ידי שיכלול רוחבם היחסי של השבילים והשורות ביחס לרוחב המבנה (משוואה 21).

$$R_{s_total} = c R_{s_path} + (1-c)R_{s_row} \quad \text{משוואה 21}$$

במשוואה זו: R_{s_total} הוא שטף הקרינה קצרת הגל הישירה הכללית המגיעה לפני החיפוי או הקרקע החשופה במבנה ($W m^{-2}$); c הוא היחס בין רוחב השבילים הכולל במבנה לרוחב המבנה; R_{s_path} הוא שטף הקרינה קצרת הגל המגיע לפני השטח בשביל ($W m^{-2}$); ו- R_{s_row} הוא שטף הקרינה קצרת הגל המגיע לפני השטח בשורה ($W m^{-2}$).



איור 20: תאור סכמטי של מבנה גידול, המציג את גיאומטריית השתילה ומימדי הנוף הגיאומטריים ששמשו לחישוב שטפי הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע. Ψ_c היא זווית השווה לחצי זווית השמש הקריטית לחישוב השעות בהן השמש ממוקמת ישירות מעל לשורות והשבילים במבנה; W_{row} הוא רוחב שורות הצמחים במבנה; W_{path} הוא רוחב השבילים בין שורות הצמחים במבנה; h_{plant} הוא גובה נוף הצמחים במבנה.

שטף הקרינה קצרת הגל הישירה תלוי במיקומה של השמש בשמיים. בשעות היום בהן השמש נמצאת מעל לשבילים פני השטח של השבילים חשופים למלוא הקרינה הגלובלית העוברת את כיסוי המבנה (איור 20). בשאר שעות היום השמש נמצאת בזווית ופני השטח בשבילים חשופים לחלק הקרינה הגלובלית שהצליח לחדור מבעד לנוף הצמחים. ניתן לקבוע חלק זה לפי מקדם ההעברה של הנוף לקרינה קצרת גל ישירה (τ_{canopy_dir}) הנקבע לפי משוואה 23. חישוב זווית השמש הקריטית (Ψ_c) לקביעת השעות בהן השמש נמצאת מעל לשבילים והשורות במבנה הוא גיאומטרי ומוצג במשוואה 22. החישוב לוקח בחשבון את רוחב השביל וגובה הצמחים לפי איור 20. לעומת השבילים, פני השטח בשורות מתחת לנוף חשופים במשך כל שעות היום רק לחלק של הקרינה הגלובלית המצליח לחדור מבעד לנוף הצמחים.

הקרינה הישירה על הקרקע בשביל שבין השורות חושבה על בסיס הזווית שבין האנך לבין היטל של זווית השמש על משטח מאונך לכיוון השורה וניצב לקרקע. זווית זאת היא $\Psi_r = \tan^{-1}(\tan \Psi \sin \delta)$. במשוואה זו: δ מבטא את ההפרש בין כיוון השורה (ϕ_r) לזווית צידוד (אזימוט) השמש (ϕ), או $\delta = \phi - \phi_r$ ($^\circ$); ו- Ψ היא זווית הזניט של השמש, השווה לזווית בין השמש לאנך לפני כדור הארץ בנקודה מסוימת על פניו ($^\circ$).

$$\Psi_c = \tan^{-1}(W_{path}/2 h_{plant}) \quad \text{משוואה 22}$$

במשוואה זו: Ψ_c היא הזווית הקריטית לקביעה שהשמש נמצאת מעל לשביל ($^\circ$); h_{plant} הוא גובה הצמחים (m); ו- W_{path} הוא רוחב השביל (m).

קביעת מקדם ההעברה של הנוף לקרינה קצרת גל ישירה (τ_{canopy_dir}) נעשתה אמפירית לפי Goudriaan (1977) (משוואה 23).

$$\tau_{canopy_dir} = \exp[-0.5(1-\beta)^{0.5}LAI/\cos \Psi] \quad \text{משוואה 23}$$

במשוואה זו: τ_{canopy} הוא מקדם ההעברה של הנוף לקרינה קצרת גל; β הוא מקדם הפיזור; LAI הוא אינדקס שטח העלווה; ו- Ψ היא זווית הזניט של השמש ($^\circ$).

לסיכום, בשעות היום בהן $\Psi_c > \Psi_r$ אזי, R_{s_total} חושב לפי משוואה 21. ביתר שעות היום R_{s_total} חושב לפי העבירות של הנוף בעזרת משוואה 23 בלבד.

1.1.3.3 קרינה ארוכת גל בפני הקרקע החשופה או החיפוי

לצורך חיזוי שטף הקרינה ארוכת הגל המגיע לפני החיפוי או הקרקע החשופה נעשה שימוש בהנחת העבודה שאין צמחים במבנה. זאת, על מנת לאפשר פתרון אנליטי של מאזן הקרינה ארוכת הגל. גודלו של שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים המגיע לפני החיפוי או הקרקע החשופה במודל נחזה בהתאם להנחות העבודה לפי שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים מחוץ למבנה והתכונות התרמיות של כיסוי המבנה ופני הקרקע המחופה או החשופה (משוואות 51, 52 ו- 58) (ראה 1.1.2.1).

1.2 מודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבנה

המודל לחיזוי טמפרטורת הקרקע המחופה או החשופה (T_s) במבנה הוא מודל דינאמי בצעד זמן של חצי שעה. כבסיס השתמשנו במודל הקיים מהספרות (Acs et al., 1991). המודל מתבסס על משוואת Bhumralker (1975) המתארת חילופי שטף חום בין פני הקרקע לשכבה עמוקה יותר (משוואה 24).

$$C_i \partial T_g / \partial t = F(T_s) \quad \text{משוואה 24}$$

כאשר:

$$C_i = 0.07C_v + (\lambda C_v / 2\omega)^{0.5} \quad \text{משוואה 25}$$

$$F(T_s) = R_{n_sw} + R_{n_lw}(T_s) - LE(T_s) - H(T_s) - (\omega C_v \lambda / 2)^{0.5} (T_s - T_{s_ave}) \quad \text{משוואה 26}$$

במשוואות אלה: C_i הוא קיבול החום הסגולי ליחידת שטח של שכבת קרקע ($J m^{-2} K^{-1}$); C_v הוא קיבול החום הנפחי של הקרקע ($J m^{-3} K^{-1}$); λ היא המוליכות התרמית של הקרקע ($W m^{-1} K^{-1}$); ω היא התדירות הזוויתית (s^{-1}); $F(T_s)$ היא פונקציה רכיבי מאזן האנרגיה של הקרקע ($W m^{-2}$); LE הוא שטף החום הכמוס של אידוי מים מהקרקע ($W m^{-2}$); H הוא שטף החום המוחשי מהקרקע ($W m^{-2}$); T_s היא טמפרטורת שכבת הקרקע העליונה בעובי 7cm ($^\circ K$); ו- T_{s_ave} היא הטמפרטורה היומית הממוצעת של שכבת הקרקע העליונה בעובי 7cm, ביום הקודם ($^\circ K$).

1.2.1 מאזן הקרינה בפני הקרקע

מאזן הקרינה בפני הקרקע או החיפוי הוא ההפרש בין הקרינה המגיעה מכיסוי המבנה ופוגעת בפני קרקע או יריעת החיפוי והקרינה העולה מפניהם כלפי מעלה. מאזן הקרינה הכולל מורכב מהמאזנים הנפרדים של הקרינה קצרת הגל והקרינה ארוכת הגל. מאזני הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע המחופה בפוליאאתילן שקוף (R_{nTRM_sw}) (משוואה 37) וכסוף (R_{nBIM_sw}) (משוואה 38) והמאזן נטו בפני הקרקע החשופה (R_{nBS_sw}) (משוואה 44) מורכבים מההפרש בין הקרינה הישירה והמפוזרת הפוגעות בפני יריעת החיפוי או הקרקע החשופה (משוואות 27 ו- 39, בהתאמה), לקרינה המוחזרת מפניהם (משוואות 28 ו- 40, בהתאמה). מאזן

הקרינה ארוכת הגל נטו בפני הקרקע המחופה בפוליאיתילן שקוף (R_{nTRM_lw}) (משוואה 51) וכסוף (R_{nBIM_lw}) (משוואה 52) והמאזן נטו בפני הקרקע החשופה (R_{nBS_lw}) (משוואה 58), הם ההפרש בין הקרינה ארוכת הגל היורדת מכיסוי המבנה לכיוון פני יריעת החיפוי או הקרקע החשופה (משוואות 45 ו-53, בהתאמה) והקרינה ארוכת הגל העולה מפניהם (משוואות 46 ו-54, בהתאמה).

חיפוי של פני הקרקע משנה את תכונותיהם הקרינתיות. לכן, משוואות מאזן הקרינה בפני קרקע המחופים ביריעות פוליאיתילן שונות ממשוואות מאזן הקרינה בפני קרקע חשופה. בנוסף לכך, גם סוגי חיפוי קרקע שונים משנים את תכונותיהם הקרינתיות של פני הקרקע המחופה. לכן, משוואות מאזן הקרינה בפני קרקע מחופים בפוליאיתילן שקוף שונות ממשוואות מאזן הקרינה בפני קרקע מחופים בפוליאיתילן כסוף.

לעריכת מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני יריעת חיפוי קרקע כלשהי ($R_{n_mulch_sw}$) (בהנחה שהיריעות שאנו מטפלים בהם לכיסוי המבנה וחיפוי הקרקע אינן בולעות קרינה קצרת גל) חושב ההפרש בין שטף הקרינה קצרת הגל הכולל בכיוון מטה ($R_{sw\downarrow}$), המגיע לפני יריעת החיפוי ושטף הקרינה העולה מפני היריעה למעלה $R_{sw\uparrow}$ (איור 21).

המשוואה לחישוב השטף הכולל של הקרינה קצרת הגל בכיוון מטה (משוואה 27) הייתה:

$$R_{sw\downarrow} = \tau_{cover_sw} R_s + \rho_{cover_sw} R_{sw\uparrow} \quad \text{משוואה 27}$$

המשוואה לחישוב השטף הכולל בכיוון מעלה (משוואה 28) הייתה:

$$R_{sw\uparrow} = \tau_{mulch_sw} R'_{sw\uparrow} + \rho_{mulch_sw} R_{sw\downarrow} \quad \text{משוואה 28}$$

במשוואות אלה: $R'_{sw\downarrow}$ ו- $R'_{sw\uparrow}$ הם שטפי הקרינה קצרת הגל מתחת לפני החיפוי בכיוון מטה ומעלה, בהתאמה.

שטף הקרינה קצרת הגל מתחת ליריעת החיפוי בכיוון מטה (משוואה 29) היה:

$$R'_{sw\downarrow} = \tau_{mulch_sw} R_{sw\downarrow} + \rho_{mulch_sw} R'_{sw\uparrow} \quad \text{משוואה 29}$$

השטף מתחת ליריעת החיפוי בכיוון מעלה (משוואה 30) היה:

$$R'_{sw\uparrow} = a_{mulch} R'_{sw\downarrow} \quad \text{משוואה 30}$$

במשוואות אלה: τ_{cover_sw} ו- ρ_{cover_sw} הם מקדמי ההעברה וההחזרה לקרינה קצרת גל של יריעת הכיסוי של המבנה, בהתאמה; τ_{mulch_sw} ו- ρ_{mulch_sw} הם מקדמי ההעברה וההחזרה לקרינה קצרת גל של יריעת חיפוי הקרקע, בהתאמה; a_{mulch} הוא אלבדו הקרקע מתחת לחיפוי; ו- R_s הוא שטף הקרינה הגלובאלית ($W m^{-2}$).

מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני חיפוי הקרקע (משוואה 31) היה לכן:

$$R_{n_mulch_sw} = R_{sw\downarrow} - R_{sw\uparrow} \quad \text{משוואה 31}$$

אם כן, לפנינו מערכת של חמש משוואות (משוואות 27; 28; 29; 30; ו-31) בחמישה נעלמים ($R_{sw\downarrow}$; $R_{sw\uparrow}$; $R'_{sw\downarrow}$; $R'_{sw\uparrow}$; ו- $R_{n_mulch_sw}$) לתיאור מאזן הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע המחופה ביריעת חיפוי כלשהי במבנה גידול.

לצורך הצגת חישוב משוואות מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני החיפוי נשתמש בארבעה משתני עזר (D, C, B, A) כאשר:

$$D = \tau_{cover_sw} R_s; C = \tau_{mulch_sw}^2 \rho_{cover_sw}; B = 1 - a_{mulch_sw} \rho_{mulch_sw}; A = 1 - \rho_{cover_sw} \rho_{mulch_sw}$$

לאחר פתרון מערכת המשוואות (27; 28; 29; ו-30) והשימוש במשתני העזר משוואות שטפי הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע המחופה (משוואות 27-30) קיבלו את הצורות הבאות (משוואות 32; 33; 34; ו-35):

$$R_{sw\downarrow} = D / (A - a_{mulch} C / B) \quad \text{משוואה 32}$$

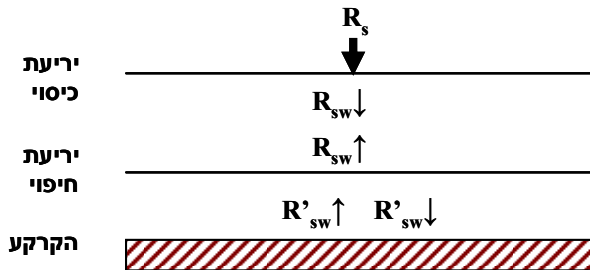
$$R_{sw\uparrow} = D / (A - a_{mulch} C / B) (\rho_{mulch_sw} + \tau_{mulch_sw}^2 a_{mulch} / B) \quad \text{משוואה 33}$$

$$R'_{sw\downarrow} = \tau_{mulch_sw} D/B(A - a_{mulch} C/B) \quad \text{משוואה 34}$$

$$R'_{sw\uparrow} = a_{mulch} \tau_{mulch_sw} D/B(A - a_{mulch} C/B) \quad \text{משוואה 35}$$

כמו כן, משוואת מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני יריעת חיפוי קרקע כלשהי (משוואה 31) קבלה את הצורה הבאה (משוואה 36):

$$R_{n_mulch_sw} = D(1 - \rho_{mulch_sw} - \tau_{mulch_sw}^2 a_{mulch}/B)/(A - a_{mulch} C/B) \quad \text{משוואה 36}$$



איור 21: המחשה של שטפי הקרינה קצרת הגל ששימשו לקביעה של מאזן הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע המחופה במבנה. R_s הוא שטף הקרינה הגלובלית; $R_{sw\downarrow}$ הוא שטף הקרינה קצרת הגל מכיסוי המבנה בכיוון מטה; $R_{sw\uparrow}$ הוא שטף הקרינה קצרת הגל מחיפוי הקרקע בכיוון מעלה; $R'_{sw\downarrow}$ הוא שטף הקרינה קצרת הגל מתחת לחיפוי הקרקע בכיוון מטה; $R'_{sw\uparrow}$ הוא שטף הקרינה קצרת הגל מתחת לחיפוי הקרקע בכיוון מעלה.

מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני שטח מחופים בפוליאיתילן שקוף (R_{nTRM_sw}) מתואר במשוואה 37. בתיאור מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע המחופה ביריעה שקופה יש לקחת בחשבון שמקדם ההעברה של החיפוי השקוף לקרינה קצרת גל ($\tau_{TRM_mulch_sw}$) גדול מאפס. לכן, חלק מהקרינה המגיעה מלמעלה לפני החיפוי חודר דרך היריעה ופוגע בפני הקרקע. גודלו של שטף זה נקבע לפי גודלו של מקדם ההעברה של החיפוי השקוף לקרינה קצרת גל. לאחר שהקרינה חדרה מבעד לחיפוי היא פוגעת בפני הקרקע. חלק מהקרינה הפוגעת בפני הקרקע מתחת לחיפוי מוחזר מהם כלפי מעלה. גודלו של שטף זה נקבע לפי אלבדו הקרקע המחופה (a_{mulch}). החלק משטף הקרינה קצרת הגל המוחזרת כלפי מעלה מפני הקרקע עובר שוב את החיפוי כלפי מעלה לפי מקדם ההעברה של החיפוי השקוף לקרינה קצרת גל ($\tau_{TRM_mulch_sw}$).

$$R_{nTRM_sw} = \tau_{cover_sw} R_s [1 - \rho_{TRM_sw} - \tau_{TRM_sw}^2 a_{mulch} / (1 - \rho_{TRM_sw} a_{mulch})] / [1 - \rho_{cover_sw} \rho_{TRM_sw} - \rho_{cover_sw} \tau_{TRM_sw}^2 a_{mulch} / (1 - \rho_{TRM_sw} a_{mulch})] \quad \text{משוואה 37}$$

במשוואה זו: R_{nTRM_sw} הוא מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע המחופים בפוליאיתילן שקוף ($W m^{-2}$); τ_{cover_sw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה קצרת גל; R_s הוא שטף הקרינה הגלובלית ($W m^{-2}$); ρ_{cover_sw} הוא מקדם ההחזרה של כיסוי המבנה לקרינה קצרת גל; ρ_{TRM_sw} הוא מקדם ההחזרה של החיפוי השקוף לקרינה קצרת גל; a_{mulch} הוא אלבדו פני הקרקע המחופה; ו- τ_{TRM_sw} הוא מקדם ההעברה של החיפוי השקוף לקרינה קצרת גל.

מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני שטח מחופים ביריעת פוליאיתילן כסוף (R_{nBIM_sw}) מתואר במשוואה 38. בתיאור מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע המחופה ביריעה הכסופה יש לקחת בחשבון שהקרינה קצרת הגל, לא חודרת דרך החיפוי ולכן איננה פוגעת בפני הקרקע.

$$R_{nBIM_sw} = \tau_{cover_sw} R_s (1 - \rho_{BIM_sw}) / (1 - \rho_{cover_sw} \rho_{BIM_sw}) \quad \text{משוואה 38}$$

במשוואה זו: R_{nBIM_sw} הוא מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע המחופים בפוליאיתילן כסוף ($W m^{-2}$); τ_{cover_sw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה קצרת גל; R_s הוא שטף הקרינה הגלובלית ($W m^{-2}$);

ρ_{cover_sw} הוא מקדם ההחזרה של כיסוי המבנה לקרינה קצרת גל; ו- ρ_{BCM_sw} הוא מקדם ההחזרה של החיפוי הכסוף לקרינה קצרת גל.

לעריכת מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע החשופה ($R_{n_BS_sw}$) חושב ההפרש בין שטף הקרינה קצרת הגל הכולל בכיוון מטה ($R_{sw\downarrow}$), המגיע לפני הקרקע ושטף הקרינה העולה מפני הקרקע למעלה ($R_{sw\uparrow}$) (איור 22).

המשוואה לחישוב השטף הכולל של הקרינה קצרת הגל בכיוון מטה (משוואה 39) הייתה:

$$R_{sw\downarrow} = \tau_{cover_sw} R_s + \rho_{cover_sw} R_s \quad \text{משוואה 39}$$

המשוואה לחישוב השטף הכולל של הקרינה קצרת הגל בכיוון מעלה (משוואה 40) הייתה:

$$R_{sw\uparrow} = a_{BS} R_{sw\downarrow} \quad \text{משוואה 40}$$

מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע החשופה (משוואה 41) היה:

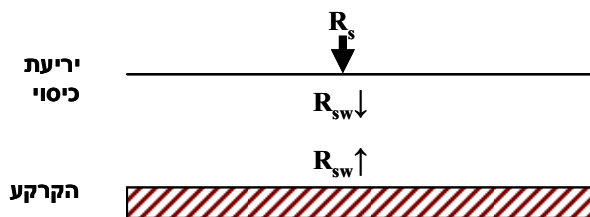
$$R_{n_BS_sw} = R_{sw\downarrow} - R_{sw\uparrow} \quad \text{משוואה 41}$$

אם כן, לפנינו מערכת של שלוש משוואות (משוואות 39; 40; ו- 41) בשלושה נעלמים ($R_{n_BS_sw}$; $R_{sw\uparrow}$; $R_{sw\downarrow}$) לתיאור מאזן הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע החשופה במבנה גידול.

לאחר פתרון מערכת המשוואות (משוואות 39-41) שטפי הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע החשופה (משוואות 39; 40) קיבלו את הצורות הבאות (משוואות 42; 43):

$$R_{sw\downarrow} = \tau_{cover_sw} R_s / (1 - \rho_{cover_sw} a_{BS}) \quad \text{משוואה 42}$$

$$R_{sw\uparrow} = a_{BS} \tau_{cover_sw} R_s / (1 - \rho_{cover_sw} a_{BS}) \quad \text{משוואה 43}$$



איור 22: המחשה של שטפי הקרינה קצרת הגל ששימשו לקביעה של מאזן הקרינה קצרת הגל בפני הקרקע המוחפיה במבנה. R_s הוא שטף הקרינה הגלובלית; $R_{sw\downarrow}$ הוא שטף הקרינה קצרת הגל מכיסוי המבנה בכיוון מטה; $R_{sw\uparrow}$ הוא שטף הקרינה קצרת הגל מהקרקע בכיוון מעלה.

מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע החשופה מתואר במשוואה 44. בתיאור מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע החשופה יש לקחת בחשבון שהקרינה איננה חודרת דרך פני הקרקע.

$$R_{nBS_sw} = \tau_{cover_sw} R_s (1 - a_{BS}) / (1 - \rho_{cover_sw} a_{BS}) \quad \text{משוואה 44}$$

במשוואה זו: R_{nBS_sw} הוא מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע החשופה ($W m^{-2}$); τ_{cover_sw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה קצרת גל; R_s הוא שטף הקרינה הגלובלית ($W m^{-2}$); ρ_{cover_sw} הוא מקדם ההחזרה של כיסוי המבנה לקרינה קצרת גל; ו- a_{BS} הוא אלבדו הקרקע החשופה.

לעריכת מאזן הקרינה התרמית ארוכת הגל נטו בפני יריעת חיפוי קרקע כלשהי ($R_{n_mulch_lw}$) (בהנחה שהעלווה איננה משפיעה על מאזן הקרינה ארוכת הגל) חושב ההפרש בין שטף הקרינה ארוכת הגל הכולל בכיוון מטה ($R_{lw\downarrow}$), המגיע לפני יריעת החיפוי ושטף הקרינה העולה מפני היריעה למעלה ($R_{lw\uparrow}$) (איור 23).

המשוואה לחישוב השטף הכולל של הקרינה קצרת הגל בכיוון מטה (משוואה 45) הייתה:

$$R_{lw\downarrow} = \tau_{cover_lw} R_{lw} + \rho_{cover_lw} R_{lw\uparrow} + \epsilon_{cover} \sigma T_{cover}^4 \quad \text{משוואה 45}$$

המשוואה לחישוב השטף הכולל בכיוון מעלה (משוואה 46) הייתה:

$$R_{lw\uparrow} = \tau_{mulch_lw} \epsilon_{soil} \sigma T_{soil}^4 + \rho_{mulch_lw} R_{lw\downarrow} + \epsilon_{mulch} \sigma T_{mulch}^4 \quad \text{משוואה 46}$$

במשוואות אלה: τ_{cover_lw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; R_{lw} הוא שטף הקרינה התרמית ארוכת הגל מהשמיים ($W m^{-2}$); ρ_{cover_lw} הוא מקדם ההחזרה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; ϵ_{cover} היא אמסיביות כיסוי המבנה; σ הוא קבוע סטפן-בולצמן ($W m^{-2} K^{-4}$); T_{cover} היא טמפרטורת כיסוי המבנה ($^{\circ}K$); τ_{mulch_lw} הוא מקדם ההעברה של יריעת החיפוי לקרינה ארוכת גל; ϵ_{soil} היא אמסיביות פני הקרקע; T_{soil} היא טמפרטורת פני הקרקע ($^{\circ}K$); ρ_{mulch_lw} הוא מקדם ההחזרה של יריעת החיפוי לקרינה ארוכת גל; ϵ_{mulch} היא אמסיביות יריעת החיפוי; ו- T_{mulch} היא טמפרטורת יריעת החיפוי ($^{\circ}K$). מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני חיפוי הקרקע (משוואה 47) היה:

$$R_{n_mulch_lw} = R_{lw\downarrow} - R_{lw\uparrow} \quad \text{משוואה 47}$$

אם כן, לפנינו מערכת של שלוש משוואות (משוואות 45; 46; ו- 47) בשלושה נעלמים ($R_{lw\uparrow}$; $R_{lw\downarrow}$; ו- $R_{n_mulch_lw}$) לתיאור מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופה ביריעת חיפוי קרקע כלשהי במבנה גידול. לצורך הצגת חישוב משוואת מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני החיפוי (משוואה 47) נשתמש בחמישה משתני עזר (A, B, C, D, ו- E) כאשר:

$$E = \tau_{cover_sw} R_{lw}; D = \epsilon_{cover} \sigma T_{cover}^4; C = \epsilon_{mulch} \sigma T_{mulch}^4; B = \epsilon_{soil} \sigma T_{soil}^4; A = 1 - \rho_{cover_lw} \rho_{mulch_lw}$$

לאחר פתרון מערכת המשוואות (משוואות 45-47) והשימוש במשתני העזר (A, B, C, D, ו- E) משוואות שטפי הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופה (משוואות 45, 46) קיבלו את הצורות הבאות (משוואות 48, 49):

$$R_{lw\downarrow} = (E + \rho_{cover_lw} \tau_{mulch_lw} B + \rho_{cover_lw} C + D) / A \quad \text{משוואה 48}$$

$$R_{lw\uparrow} = \tau_{mulch_lw} B + \rho_{mulch_lw} (E + \rho_{cover_lw} \tau_{mulch_lw} B + \rho_{cover_lw} C + D) / A + C \quad \text{משוואה 49}$$

כמו כן, משוואת מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני חיפוי קרקע כלשהו (משוואה 47) קבלה את הצורה הבאה (משוואה 50):

$$R_{n_mulch_lw} = (E + \rho_{cover_lw} \tau_{mulch_lw} B + \rho_{cover_lw} C + D) (1 - \rho_{mulch_lw}) / A - \tau_{mulch_lw} B - C \quad \text{משוואה 50}$$

לצורך חישוב מאזני הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופה בפוליאתילן שקוף (TRM) וכסוף (BIM) נעשה שימוש בהנחה שטמפרטורת יריעת החיפוי שווה לטמפרטורת הקרקע מתחת ליריעה ($T_{TRM} = T_{soil_TRM}$; ו- $T_{BIM} = T_{soil_BIM}$).



לאור האמור לעיל, מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופה בפוליאתילן שקוף ($R_{n_TRM_lw}$) מתואר במשוואה 51. בתיאור מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני הקרקע המחופה ביריעת פוליאתילן שקוף יש לקחת בחשבון שהחיפוי אטום לקרינה ארוכת גל.

משוואה 51 :

$$R_{nTRM_lw} = (\tau_{cover_lw} R_{lw} + \rho_{cover_lw} \varepsilon_{TRM} \sigma T_{soil_TRM}^4 + \varepsilon_{cover} \sigma T_{cTRM}^4) (1 - \rho_{TRM_lw}) / \\ / (1 - \rho_{cover_lw} \rho_{TRM_lw}) - \varepsilon_{TRM} \sigma T_{soil_TRM}^4$$

במשוואות זו: R_{nTRM_lw} הוא מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופים בפוליאאתילן שקוף ($W m^{-2}$); τ_{cover_lw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; R_{lw} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים ($W m^{-2}$); ρ_{cover_lw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; ε_{TRM} היא אמסיביות החיפוי השקוף; σ הוא קבוע סטפן-בולצמן ($W m^{-2} K^{-4}$); T_{sTRM} היא טמפרטורת פני הקרקע מתחת לחיפוי השקוף ($^{\circ}K$); ρ_{TRM_lw} הוא מקדם ההחזרה של החיפוי השקוף לקרינה ארוכת גל; ε_{cover} היא אמסיביות כיסוי המבנה; ו- T_{cTRM} היא טמפרטורת כיסוי המבנה במבנה עם חיפוי קרקע שקוף ($^{\circ}K$).
מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני הקרקע המחופה בפוליאאתילן כסוף מתואר במשוואה 52. בתיאור מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני הקרקע המחופה ביריעת פוליאאתילן כסוף יש לקחת בחשבון שהחיפוי אטום לקרינה ארוכת גל.

משוואה 52 :

$$R_{nBIM_lw} = (\tau_{cover_lw} R_{lw} + \rho_{cover_lw} \varepsilon_{BIM} \sigma T_{soil_BIM}^4 + \varepsilon_{cover} \sigma T_{cBIM}^4) (1 - \rho_{BIM_lw}) / \\ / (1 - \rho_{cover_lw} \rho_{BIM_lw}) - \varepsilon_{BIM} \sigma T_{soil_BIM}^4$$

במשוואות זו: R_{nBIM_lw} הוא מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופים בפוליאאתילן כסוף ($W m^{-2}$); τ_{cover_lw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; R_{lw} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים ($W m^{-2}$); ρ_{cover_lw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; ε_{BIM} היא אמסיביות החיפוי כסוף; T_{soil_BIM} היא טמפרטורת פני הקרקע מתחת לחיפוי הכסוף ($^{\circ}K$); ε_{cover} היא אמסיביות כיסוי המבנה; ρ_{BIM_lw} הוא מקדם ההחזרה של החיפוי הכסוף לקרינה ארוכת גל; ו- T_{cBIM} היא טמפרטורת כיסוי המבנה במבנה עם חיפוי קרקע כסוף ($^{\circ}K$).

לעריכת מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני הקרקע החשופה ($R_{n_BS_lw}$) חושב ההפרש בין שטף הקרינה ארוכת הגל הכולל בכיוון מטה ($R_{lw\downarrow}$), המגיע לפני הקרקע ושטף הקרינה העולה מפני הקרקע למעלה ($R_{lw\uparrow}$) בהנחה שפני הקרקע אטומים לקרינה (איור 24). המשוואה לחישוב השטף הכולל של הקרינה ארוכת הגל בכיוון מטה (משוואה 53) הייתה:

$$R_{lw\downarrow} = \tau_{cover_lw} R_{lw} + \rho_{cover_lw} R_{lw\uparrow} + \varepsilon_{cover_lw} \sigma T_{cBS}^4 \quad \text{משוואה 53}$$

המשוואה לחישוב השטף הכולל בכיוון מעלה (משוואה 54) הייתה:

$$R_{lw\uparrow} = \varepsilon_{BS} \sigma T_{sBS}^4 + \rho_{BS_lw} R_{lw\downarrow} \quad \text{משוואה 54}$$

במשוואות אלה: τ_{cover_lw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; R_{lw} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים ($W m^{-2}$); ρ_{cover_lw} הוא מקדם ההחזרה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; ε_{cover_lw} היא אמסיביות חיפוי המבנה; T_{cBS} היא טמפרטורת כיסוי המבנה במבנה עם קרקע חשופה ($^{\circ}K$); ε_{BS} הוא מקדם האמסיביות של הקרקע החשופה; T_{sBS} היא טמפרטורת פני הקרקע החשופה ($^{\circ}K$); ו- ρ_{BS_lw} הוא מקדם ההחזרה של הקרקע החשופה לקרינה ארוכת גל.

מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני הקרקע החשופה (משוואה 55) היה:

$$R_{n_BS_lw} = R_{lw\downarrow} - R_{lw\uparrow} \quad \text{משוואה 55}$$

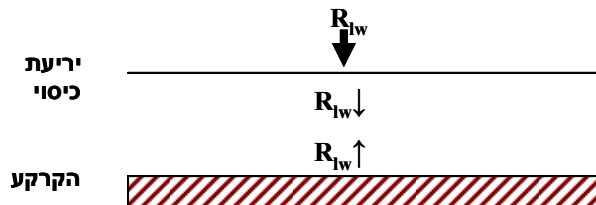
אם כן, לפנינו מערכת של שלוש משוואות (משוואות 53; 54; ו-55) בשלושה נעלמים ($R_{n_BS_lw}$; $R_{lw\uparrow}$; $R_{lw\downarrow}$) לתיאור מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע החשופה במבנה גידול.

לאחר פתרון מערכת המשוואות (משוואות 53; 54; ו-55) שטפי הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע

החשופה קיבלו את הצורות הבאות (משוואות 56; 57):

$$R_{lw\downarrow} = (\tau_{cover_sw} R_{lw} + \rho_{cover_lw} \epsilon_{BS_lw} \sigma T_{sBS}^4 + \epsilon_{cover_lw} \sigma T_{cBS}^4) / (1 - \rho_{cover_lw} \rho_{BS_lw}) \quad \text{משוואה 56}$$

$$R_{lw\uparrow} = \epsilon_{BS_lw} \sigma T_{sBS}^4 + \rho_{BS_lw} (\tau_{cover_sw} R_{sky_lw\downarrow} + \rho_{cover_lw} \epsilon_{BS_lw} \sigma T_{sBS}^4 + \epsilon_{cover_lw} \sigma T_{cBS}^4) / (1 - \rho_{cover_lw} \rho_{BS_lw}) \quad \text{משוואה 57}$$



איור 24: המחשה של שטפי הקרינה התרמית ארוכת הגל ששימשו לקביעה של מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופה במבנה. R_{lw} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהשמיים; $R_{lw\downarrow}$ הוא שטף הקרינה ארוכת הגל המבנה בכיוון מטה; $R_{lw\uparrow}$ הוא שטף הקרינה ארוכת הגל מהקרקע בכיוון מעלה.

מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע חשופה מתואר במשוואה 58.

משוואה 58:

$$R_{nBS_lw} = (\tau_{cover_lw} R_{lw} + \rho_{cover_lw} \epsilon_{BS_lw} \sigma T_{sBS}^4 + \epsilon_{cover_lw} \sigma T_{cBS}^4) / (1 - \rho_{BS_lw}) / ((1 - \rho_{cover_lw} \rho_{BS_lw}) - \epsilon_{BS_lw} \sigma T_{sBS}^4)$$

במשוואה זו: R_{nBS_lw} הוא מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע החשופה ($W m^{-2}$); τ_{cover_lw} הוא מקדם ההעברה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; R_{lw} הוא שטף הקרינה ארוכת הגל ($W m^{-2}$); ρ_{cover_lw} הוא מקדם ההחזרה של כיסוי המבנה לקרינה ארוכת גל; ϵ_{BS_lw} הוא מקדם האמסיביות של הקרקע החשופה; T_{sBS} היא טמפרטורת פני הקרקע החשופה ($^{\circ}K$); ϵ_{cover_lw} הוא מקדם האמסיביות של כיסוי המבנה; T_{cBS} היא טמפרטורת כיסוי המבנה במבנה עם הקרקע החשופה ($^{\circ}K$); ρ_{BS_lw} הוא מקדם ההחזרה של הקרקע החשופה לקרינה ארוכת גל.

1.2.2. מאזני חום מוחשי וכמוס בפני הקרקע

שטפי החום המוחשי והכמוס חושבו תוך שימוש במודל של התנגדות אווירודינאמית. לפי Acs et al. (1991) שטף החום המוחשי בפני קרקע המחופה בפוליאטילן שקוף או כסוף וקרקע חשופה (H_{BS} ; H_{BIM} ; H_{TRM}) מתוארים במשוואות 59, 60 ו-61, בהתאמה.

$$H_{TRM} = \rho_{air} C_{p_{air}} (T_{sTRM} - T_{aTRM}) / r \quad \text{משוואה 59}$$

$$H_{BIM} = \rho_{air} C_{p_{air}} (T_{sBIM} - T_{aBIM}) / r \quad \text{משוואה 60}$$

$$H_{BS} = \rho_{air} C_{p_{air}} (T_{sBS} - T_{aBS}) / r \quad \text{משוואה 61}$$

במשוואות אלה: H_{TRM} הוא שטף החום המוחשי מפני הקרקע המחופה בפוליאטילן שקוף ($W m^{-2}$); ρ_{air} היא צפיפות האוויר ($kg m^{-3}$), $C_{p_{air}}$ הוא קיבול החום הסגולי של האוויר בלחץ קבוע ($J m^{-3} ^{\circ}K^{-1}$); T_{aTRM} היא טמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע מחופה בפוליאטילן שקוף ($^{\circ}K$); ו- r היא ההתנגדות האווירודינאמית של האוויר למעבר חום ואדי מים המתוארת במשוואה 63 ($s m^{-1}$).

במשוואה 60: H_{BIM} הוא שטף החום המוחשי מפני הקרקע המחופה בפוליאתיילן כסוף ($W m^{-2}$); ו- T_{aBIM} היא טמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע מחופה בפוליאתיילן כסוף ($^{\circ}K$).

במשוואה 61: H_{BS} הוא שטף החום המוחשי מפני הקרקע החשופה ($W m^{-2}$); ו- T_{aBS} היא טמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע חשופה ($^{\circ}K$).

שטף החום הכמוס בפני קרקע חשופה (LE_{BS}) מתואר במשוואה 62.

$$LE_{BS} = \rho_{air} C_{p_{air}} / \gamma / r [c(f_{pathBS} e_{sBS} - e_{aBS}) + (1-c)(f_{rowBS} e_{sBS} - e_{aBS})] \quad \text{משוואה 62}$$

במשוואה זו: LE_{BS} הוא שטף החום הכמוס מפני קרקע חשופה ($W m^{-2}$); γ הוא הקבוע הפסיכרומטרי ($Pa \ ^{\circ}K^{-1}$); f_{pathBS} היא פונקציה חסרת מימדים המתארת את "ההבדל" בין ההתאדות מפני הקרקע להתאדות הפוטנציאלית מפני הקרקע (משוואה 64); e_{sBS} הוא לחץ אדי המים ברוויה בטמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע חשופה (Pa); ו- e_{aBS} הוא לחץ אדי המים באוויר במבנה עם קרקע חשופה (Pa).

ההתנגדות האווירודינאמית של פני הקרקע החשופה למעבר חום ואדי מים באטמוספירה יציבה (r) לפי Fuchs and Tanner (1967), Monteith and Unsworth (1990) ו- Tanny et al. (2006), מתוארת במשוואה 63.

$$r = 1 / (k^2 u) [\ln(z+z_0)/z_0] \quad \text{משוואה 63}$$

במשוואה זו: k הוא קבוע פון קרמן; u היא מהירות הרוח בתוך המבנה ($m s^{-1}$); z הוא גובה מדידת מהירות הרוח מפני הקרקע (m); ו- z_0 הוא גובה החיכוך מפני הקרקע בו מהירות הרוח שווה לאפס (m).

פונקציה "ההפרש" בין ההתאדות מפני הקרקע להתאדות הפוטנציאלית מפני הקרקע (f_{pathBS}) היא פונקציה מפוצלת המתוארת במשוואה 64.

$$f_{pathBS} = W_1 / 0.75, \quad W_1 < 0.75 \quad \text{משוואה 64}$$

$$f_{pathBS} = 1, \quad W_1 < 0.75$$

במשוואה זו: W_1 הוא היחס בין תכולת הרטיבות הנפחית הממוצעת בקרקע θ_{ave} , לתכולת הרטיבות הנפחית ברוויה של הקרקע θ_{sat} או: $W_1 = \theta_{ave} / \theta_{sat}$. מתוארת על ידי משוואה 65.

$$\theta_{ave} = c \theta_{path} + (1-c) \theta_{row} \quad \text{משוואה 65}$$

במשוואה זו: θ_{ave} היא תכולת הרטיבות הנפחית הממוצעת בשכבת פני הקרקע העליונה בעובי $7cm$; θ_{path} היא תכולת הרטיבות הנפחית בשכבת פני הקרקע העליונה בעובי $7cm$ בשבילים; ו- θ_{row} היא תכולת הרטיבות הנפחית בשכבת פני הקרקע העליונה בעובי $7cm$ בשורות.

1.2.3 פתרון מאזן האנרגיה של הקרקע לחיזוי טמפרטורת הקרקע

פתרון המאפשר חיזוי בפרקי זמן קבועים של טמפרטורת הקרקע נעשה על ידי שימוש במשוואה 66.

$$T_s^{t+\Delta t} = T_s^t + F^t(T_s) / \{C_i / \Delta t - [\partial F(T_s) / \partial T_s]_t\} \quad \text{משוואה 66}$$

במשוואה זו: $T_s^{t+\Delta t}$ היא טמפרטורת הקרקע הנחזית ($^{\circ}K$); T_s^t היא טמפרטורת הקרקע הנוכחית ($^{\circ}K$); Δt הוא מרווח הזמן בין התחזיות (s); והפונקציה $\partial F(T_s) / \partial T_s$ מציינת את השינוי בערכה של פונקציה רכיבי מאזן האנרגיה של הקרקע עם השתנות טמפרטורת הקרקע, בין תחזיות ($W m^{-2}$).

Abstract

Tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) growing in protected culture are exposed to many foliar pathogens which can cause heavy crop damage and even crop loss. The disease most threatening tomato plants growing in protected culture in Israel is the late blight pathogen *Phytophthora infestans* (Montage) de Bary. Late blight can lead to crop destruction within a few weeks. The problem is severe in conventional production systems and even worse in organic production due to lack of efficient means of disease control. *P. infestans* belongs to the group of "pathogens promoted by wetness", meaning that late blight develops and causes great damage only under conditions when canopy wetness duration exceeds several hours per day. This fact can be used to develop effective environmentally friendly physical means for late blight disease control due to the dependence of the pathogen on canopy wetness. An example is mulching the ground in the growth structure with polyethylene.

A series of preliminary experiments in 2003-2005 at the Besor Experimental Station by Drs. Yigal Elad and Shabtai Cohen and Prof. Dani Shtienberg demonstrated that mulching the soil surface of the growth structure with polyethylene reduced late blight infection of tomato plants. In addition to influencing the disease, the mulch caused micrometeorological differences between mulched and non mulched structures. Preliminary experimental results showed that the polyethylene mulch elevated soil temperature compared to non mulched soil and less dew was formed in mulched structures. Nevertheless, the mechanism of the mulch influence on the microclimate and pathogen was not fully understood.

Understanding the mechanism by which polyethylene mulch influences night microclimate and reduces dew duration is crucial for future development of soil mulching with polyethylene as a tool for managing wetness-promoted foliar diseases in different settings, locations and crops. In addition, understanding the mechanism of the mulch influence can enable identification of the most efficient type of polyethylene mulch for disease control. In light of the above the research had two aims. Firstly, to measure and understand the mechanism by which polyethylene soil mulch influences the development of wetness-promoted foliar diseases in the growth structure, and secondly, to develop a model to describe the system that will enable identification of the circumstances in which the mulch can be effective as a tool for the control of wetness-promoted foliar diseases.

In order to achieve these objectives two experiments were conducted in the Besor Experimental Station in Israel (31°16'N, 34°24'E, 75 m a.m.s.l). The experiments were in 16 walk-through tunnels, each 6.3m wide, 6m long and 2.5m high, clad with diffusing, IR polyethylene 150µm thick. The two ends of the tunnels were covered with 50 mesh screen material. The experiments were conducted in two growing seasons corresponding to the conventional growing seasons in the Besor area. The fall season was from September to December 2005 and the spring season was from February to April, 2006.

Each experiment included four treatments and four repetitions. The treatments were: clear, black, and bi-color (upper side metallic grey, bottom side black) polyethylene (Ginagar Plastic Products Ltd.) mulches, and non-mulch control. In structures with mulched soil the entire ground area of the structure was covered with the mulch sheet and the plants were planted through holes in the mulch. The tomato plants were maintained according to standard practice in that region. During the experiments extensive micrometeorological measurements were made inside and outside the structures. During both seasons late blight disease developed in the growth structures. The experiments in fall 2005 and spring 2006 were concluded when the infected canopy exceeded 48% and 77% of the whole canopy, respectively.

Results of the field experiments in fall 2005 and spring 2006 showed that mulching the soil surface of the growth structure with polyethylene significantly reduced the late blight disease severity. However, no significant differences were found between the different mulch types with respect to their influence on disease severity. The mulch also influenced microclimatic conditions in the structures and increased soil temperature by an average of 2°C. Soil mulched with transparent polyethylene was the highest followed by the bicolor mulched soil and the non mulched soil, respectively. In contrast to soil temperature, air temperature of all treatments was similar. In addition, mulching the soil increased the flux of the ‘canopy-available-energy’, i.e. the net radiation absorbed by the canopy, at night. This energy flux was the largest in structures with the transparent polyethylene mulch followed by the bicolor mulched soil and the non mulched soil, respectively. Moreover, mulching the soil surface with polyethylene mulch reduced the number of dew events by 80% and the duration of each dew event by 60%.

In view of these findings it appears that the mechanism by which polyethylene mulch reduces dew duration and late blight infection of tomato plants is: 1. The warmer the ground is the more energy it emits to the canopy. Therefore in growth structures with polyethylene mulched soil (which is warmer than the non-mulched soil) more energy is emitted to the canopy at night; 2. As a result, additional energy is radiated from the soil to the plants at night; 3. The additional energy absorbed by the canopy in the mulched structures changes the energy balance of the canopy and it cools slower than the canopy in the non mulched structures; 4. In structures with polyethylene mulched soil the canopy temperature drops below the dew-point temperature on fewer occasions and for shorter periods of time on each dew occasion. Meaning less dew is formed in structures with polyethylene mulched soil as compared to structures with non mulched soil. The structures with polyethylene mulched soil provide less suitable microclimatic conditions for the development of wetness-promoted foliar diseases than structures with non mulched soil. The result is that late blight in the mulched structures is less severe than in non-mulched structures.

After understanding the mechanism by which polyethylene soil mulch influences the development of the late blight disease a model was developed to assess the influence of mulches of different types and bare soil on soil temperature in the growth structures. Predicting the mulch

influence on soil temperature (the main thermal mass in the structure) should enable assessment of the mulch influence on dew formation and the reduction of canopy wetness duration for the prevention of wetness-promoted foliar diseases like late blight. After validation of the model, a series of simulation experiments were conducted in order to test the influence of different factors on soil temperature in the structure.

Model results were not significantly different from measurements at a significance level of $P \leq 0.05$. Nevertheless, a visual assessment of the daily soil temperature course shows a more complex picture since the model predicted accurately the soil temperature at night but failed to predict the course of soil temperature during the day. In spite of the inaccuracy of the soil temperature during the day, it was decided that the model is suitable for the purposes of the research and will assist in reliably predicting the influence of polyethylene soil mulch on the prevention of foliar diseases promoted by wetness. This is based on the experimental findings that indicated that nighttime is the critical period for dew formation in the growth structures and that soil temperature is the main factor involved.

A series of simulations with the model tested the influence of different factors, e.g. the type of polyethylene used for the mulch, cloudiness, season and canopy dimensions, on the soil temperature in the growth structures. Simulations of this type could be a means for predicting the mulch influence on dew formation and canopy wetness duration.

According to the simulations and the field experiments conducted, mulching the soil of a growth structure with polyethylene should be an effective tool for reducing the susceptibility to foliar diseases promoted by wetness all over Israel in every season, except during rain events. The clear polyethylene mulch resulted in the highest nighttime soil temperatures both in the experiments and simulations. However, the influence of the different types of plastic on the actual measured dew duration and disease development was not significantly different. The reasons for the disagreement between the measurements and the model of soil temperature may be related to the complexity of dew formation and the evaporative process in the structures. Dew forms when canopy temperature drops even slightly below the threshold of the air dew point temperature in the structure. Although the model was able to predict nighttime soil temperature accurately, additional model development will be necessary in order to complete the canopy energy balance and predict the moment at which the canopy cools down below the dew point. Therefore, the current model cannot predict the influence of the different polyethylene mulch types on canopy wetness duration in different regions with different climates. Nevertheless, as shown in this study, model simulations of soil temperature should give an indication of whether mulches would reduce dew duration if the model were run with climate data from different regions. By the same reasoning, since the transparent polyethylene soil mulch caused the maximum increase in temperatures in the growth structure in all the experiments and simulations, according to the current understanding of the mulch influence, it should be the mulch of choice.

This research was carried out under supervision of:

Prof. Dani Shtienberg

Department of Plant Pathology, Agricultural Research Organization, Bet Dagan

Ph.D Shabtai (Shep) Cohen

Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, Agricultural

Research Organization, Bet Dagan

**Polyethylene mulch as a tool for managing
"wetness promoted" foliar diseases of
greenhouse vegetables**

M. Sc. Thesis submitted to the Faculty of Agricultural,
Food and Environmental Quality sciences of
The Hebrew University of Jerusalem

**By:
Gal Ziv**

Rehovot

December 2007