

חיפוי קרקע ביריעות פוליאטילן ככלי להתמודדות עם מחלות עלווה בגידולי ירקות חממה.

חוקרים שותפים:

דני שטיינברג ויגאל אלעד - המכון להגנת הצומח, מינהל המחקר החקלאי.
שבתאי כהן ומרסל פוקס - המכון לקרקע ומים, מינהל המחקר החקלאי.
יואל מסיקה ויצחק סקר - שה"מ, משרד החקלאות.
אלי מתן וטרגרמן מרים - מו"פ דרום.

תקציר:

1. הצגת הבעיה: במחקר קודם נמצא שחיפוי קרקע חממות בפוליאטילן שצידו התחתון שחור וצידו העליון בצבע אפור הפחית בצורה משמעותית את מחלת הכימשון בחממות עגבנייה יחסית לחממות שהקרקע בהן הייתה חשופה. לא היה ברור המנגנון באמצעותו השפיע החיפוי על התפתחות המחלה.

2. מטרת המחקר: המטרה ארוכת הטווח של המחקר היא לפתח את טכנולוגית החיפוי בפוליאטילן ככלי להפחתת השימוש באמצעי הדברה כימיים בירקות חממה בלי להתפשר על איכות בקרת המחלות. המטרות הספציפיות של המחקר הן: 1. להגדיר את המנגנון בו משפיע חיפוי הקרקע בפוליאטילן על תנאי המיקרואקלים בחממה; 2. לבחון את השפעת חיפוי הקרקע בפוליאטילן על התפתחות מחלות נוף בעגבניות ובגידולים אחרים, באזורים עם תנאים אקלימיים שונים.

3. שיטות ומהלך העבודה: מטרה 1: המחקר להגדרת המנגנון בו משפיע חיפוי הקרקע בפוליאטילן על תנאי המיקרואקלים בחממה התנהל במקביל בשדה ובמעבדה. ניסויי השדה נערכו בחוות הבשור במבנים בהם גודלו עגבניות במהלך שתי עונות; הניסויים כללו מבנים בהם הקרקע נשארה חשופה ומבנים בהם הקרקע חופתה בסוגי פוליאטילן שונים. במבנים נערך ניטור מקיף של מדדי מיקרואקלים שונים ומערך החיישנים הוצב בתוך המבנים ומחוץ להם. במבנים אלו התפתחה באופן טבעי מגיפות של מחלת הכימשון. במקביל לעריכת ניסויי השדה הוחל בפיתוח המודל לחיזוי השפעת חיפוי קרקע בסוגי פוליאטילן שונים 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 העלווה במבנים. מטרה 2: במהלך שלוש שנות המחקר בוצעו על ידו ועל ידי אחרים 15 ניסויים בהם נבחנו השפעת חיפוי קרקע ביריעות פוליאטילן על התפתחות מחלות צמחים. בסך הכל נכללו בניסויים 6 גידולים והתפתחו בהם 9 מחלות שונות. הניסויים בוצעו בתחנות מחקר באזור הבשור, הערבה התיכונה, הערבה הצפונית, הבקעה ועמק בית שאן.

4. תוצאות עיקריות: החיפוי מעלה את טמפרטורת הקרקע במשך היום ובכך משנה את שטף החום מהקרקע בלילה. שינוי זה גורם להעלאת טמפרטורת העלים מעל לנקודת הטל ומקטין את משך הרטיבות. החיפוי היה יעיל כנגד מחלות עלווה מוגברות לחות הדורשות משך רטיבות עלווה ארוך (8-10 שעות רטיבות רצופה) כמו כימשון, עובש אפור או עובש עלים. יעילותו הייתה פחותה, ולעיתים הוא לא היה יעיל כלל כנגד מחלות הדורשות משך רטיבות עלווה קצר להתפתחותן (1-3 שעות) כמו כשורתית במלפפונים, או כנגד מחלות בהן אתר ההדבקה ייחודי או שישנם גורמים משפיעים אחרים (כמו עובש אפור בבזיל ובליזיאנטוס). החיפוי לא היה יעיל כנגד פתוגנים שרטיבות העלווה לא מהווה גורם חיוני במחזור החיים שלהן, כמו קימחון בחצילים או קימחונית בפלפל.

5. מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות: חיפוי הקרקע במבנה הגידול ביריעות פוליאטילן הוא כלי יעיל להפחתת הנגיעות במחלות עלווה מוגברות לחות בכל מקום בארץ ובכל עונה (למעט במהלך אירועי גשם). נוסף להשפעת החיפוי על המחלות התברר שלחיפוי יש השפעה משמעותית, חיובית ולעיתים שלילית, על התפתחות הצמחים עצמם. ממצאי המחקר ובעיקר ההשפעה הדרמטית של החיפוי על מחלת הכימשון בעגבניות נפוצו במהירות. חיפוי קרקע בפוליאטילן הפך במהירות לחלק אינטגרלי של ממשק גידול חממות העגבניה; אלה המגודלות בשיטות אורגניות וגם אלה המגודלות בשיטות קונבנציונאליות. טכנולוגית החיפוי מומלצת עתה על ידי שרות ההדרכה והמקצוע כחלק מממשק גידול הבזיל. בנוסף, ניתן לראות יותר ויותר מבנים של גידולים אחרים בהם הקרקע מחופה ביריעות פוליאטילן.

1. מבוא

במהלך מחקר שבוצע על ידי חלק ממגישי הצעה זו (ושמומן מקרן המדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר) נבחנו גישות לא-כימיות להתמודדות עם מחלות עלווה בחממות עגבניות המגודלות בשיטות אורגניות. הממצא העיקרי שעלה מהמחקר היה שחיפוי קרקע בפוליאאתילן שצידו התחתון שחור וצידו העליון כסוף השפיע בצורה משמעותית על התפתחות מחלות נוף אוהבות לחות (בניהן כימסון, עובש אפור ועובש עלים): בעוד שבמבני גידול בהן הייתה הקרקע חשופה התפתחו מגיפות (ובמיוחד כימסון) קשות עד כדי השמדה מוחלטת של הצמחים, הרי שבאלה בהן הקרקע חופתה בפוליאאתילן המחלה התפתחה מאוחר יותר וחומריתה בסופו של דבר הייתה נמוכה מאד. כל זאת – ללא יישום אף של ריסוס אחד בחומר הדברה!!! השפעה כל כך דרמטית של אמצעי לא-כימי כנגד מחלת הכימסון אינה שכיחה; בדרך כלל יעילותם של האמצעים הלא-כימיים פחותה בהרבה (אם בכלל קיימת). השפעה דומה התקבלה גם בניסויים שבוצעו בשנות המחקר האחרות. מדידות שבוצעו במהלך הניסויים הראו שבמבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאאתילן היו במהלך הלילה פחות שעות בהן הלחות היחסית הייתה גבוהה מ- 90% (מדד המבטא בקירוב את משך הרטיבות) מאשר במבנים בהם הקרקע נשארה חשופה. ממצא זה עשוי להסביר **ביולוגית** את ההשפעה של החיפוי, אך עדיין הוא לא מספק הסבר **פיסיקלי** לתופעה. הבנת המנגנון הפיסיקלי חיונית מפני שבלעדיו לא ניתן לדעת אם החיפוי יהיה יעיל בכל אזורי גידול העגבניות, בכל שנה ובכל גידול. יותר מכך, לא ניתן לחזות מתי החיפוי **לא** יהיה יעיל. לא ברור גם אם יש לסוג הפוליאאתילן המשמש לחיפוי השפעה. כיום משתמשים המגדלים באותו סוג פוליאאתילן בו השתמשו בניסויים. לא ברור האם שימוש בסוגי פוליאאתילן אחרים (כמו למשל, שחור או שקוף) ישפרו או יפחיתו את יעילות החיפוי. בעקבות הממצאים הועלו כמה היפותזות להסבר השפעת חיפוי הקרקע בפוליאאתילן על התפתחות הכימסון; כולן קשורות להשפעת החיפוי על תנאי המיקרואקלים בחממה, מאזן האנרגיה של הצמחים והקרקע ומשך רטיבות העלווה. המטרה ארוכת הטווח של המחקר היא לפתח את טכנולוגית החיפוי בפוליאאתילן ככלי להפחתת השימוש באמצעי הדברה כימיים בירקות חממה בלי להתפשר על איכות בקרת המחלות. המטרות הספציפיות של המחקר הן: 1. להגדיר את המנגנון בו משפיע חיפוי הקרקע בפוליאאתילן על תנאי המיקרואקלים בחממה; 2. לבחון את השפעת חיפוי הקרקע בפוליאאתילן על התפתחות מחלות נוף בעגבניות ובגידולים אחרים, באזורים עם תנאים אקלימיים שונים.

2. פירוט עיקרי הניסויים

2.1. המנגנון בו משפיע חיפוי הקרקע על תנאי המיקרואקלים בחממה

[חלק זה של המחקר היווה את הבסיס לעבודת הגמר של מר גל זיו. כאן יוצגו רק חלק מהממצאים. הממצאים המלאים

מפורטים בעבודת הגמר שהוגשה לפקולטה לחקלאות ברחובות]

המחקר להגדרת המנגנון בו משפיע חיפוי הקרקע בפוליאאתילן על תנאי המיקרואקלים בחממה התנהל במקביל בשדה ובמעבדה. ניסויי השדה נערכו בחוות הבשור במבנים בהם גודלו עגבניות במהלך שתי עונות; הניסויים כללו מבנים בהם הקרקע נשארה חשופה ומבנים בהם הקרקע חופתה בסוגי פוליאאתילן שונים. במבנים נערך ניטור מקיף של מדדי מיקרואקלים שונים ומערך החיישנים הוצב בתוך המבנים ומחוץ להם. במבנים אלו התפתחה באופן טבעי מגיפות של מחלת הכימסון. במקביל לעריכת ניסויי השדה הוחל בפיתוח המודל לחיזוי השפעת חיפוי קרקע בסוגי פוליאאתילן שונים 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 העלווה במבנים.

2.1.1. מדידות לקביעת השפעת חיפוי הקרקע בפוליאטילן על תנאי המיקרואקלים במבני הגידול

כדי לבחון כיצד משפיע חיפוי הקרקע בפוליאטילן מסוגים שונים על תנאי המיקרואקלים במבני הגידול נערכו בחוות הבשור שני ניסויים. בכל ניסוי נכללו 16 מבני גידול מסוג מנהרה עבירה, במימדים של 6 מ' אורך, 6.3 מ' רוחב ו-2.5 מ' גובה. המבנים כוסו ביריעת פוליאטילן IR מפזר בעובי 150 מיקרומטר מתוצרת גיגר מוצרי פלסטיק בע"מ. שני פתחי המבנה כוסו ברשת 50 מש. צמחי עגבנייה נשתלו בשלוש שורות כפולות שהמרחק ביניהן היה 0.9 מ'. 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 גיגר מוצרי פלסטיק בע"מ) ו-4. קרקע חשופה (היקש). במבנים בהם הקרקע חופתה, כוסה כל השטח ביריעות הפוליאטילן והצמחים נשתלו בקרקע דרך חורים שנוקבו ביריעות. צמחי העגבנייה גודלו על פי השיטות המקובלות לגידול עגבניות בחוות הבשור. אולם, במהלך הגידול לא יושמו חומרי הדברה קוטלי פטריות במבני הניסוי.

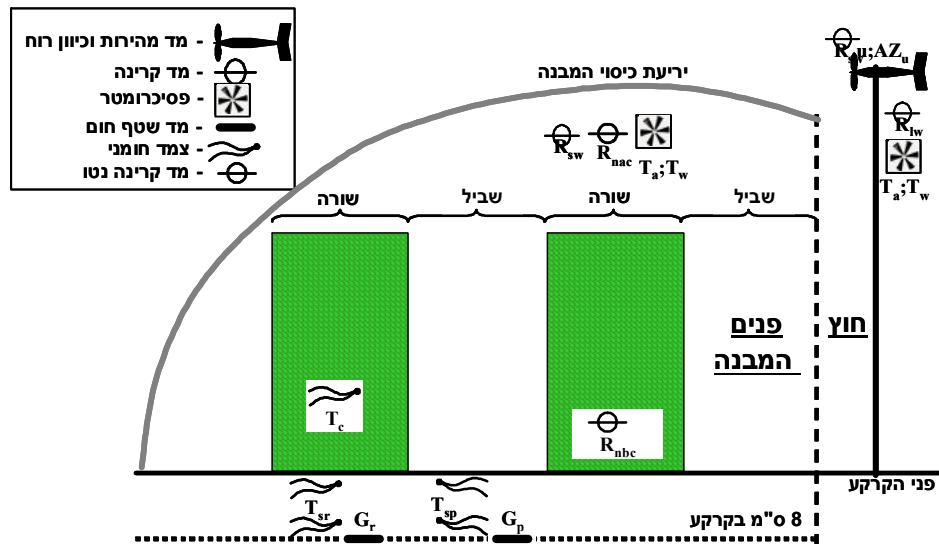
כדי להגדיר את המנגנון באמצעותו משפיע חיפוי קרקע בפוליאטילן על מאזן האנרגיה ותנאי המיקרואקלים במבני הגידול נערך ניטור מיקרואקלימי נרחב בתוך מבני הניסוי ומחוץ להם. בשל היקפו הנרחב של מערך המדידות ומכיוון שמספר החיפויים הזמינים היה מוגבל, הוחלט לא לבצע מדידות מיקרואקלימיות במבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאטילן 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 פוליאטילן שקוף או כסוף. מערך המדידות המיקרואקלימיות שנערכו בשתי עונות הגידול מפורט בטבלה 1 ותאור סכמאטי הממחיש את מיקום החיפויים במבני ומחוץ להם מובא באיור 1. טמפרטורת האוויר הלח והיבש נמדדה על ידי שני צמדים 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. טמפרטורת העלים נמדדה על ידי צמד חומני נחושת-קונסטנטן 40 גייג'. טמפרטורת הפוליאטילן ששימש לחיפוי נמדדה באביב 2006 בשורה ובשביל על ידי צמד חומני נחושת-קונסטנטן 40 גייג' שהודבק לפוליאטילן 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 Epply P.I.R Pyreometer. קרינה קצרת גל נמדדה על ידי מד קרינה Kipp and Zonen CM5. מהירות וכיוון הרוח נמדדו באביב 2006 על ידי מד רוח מסוג Young. 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. החישובים שבוצעו עם נתונים אלה פורטו בהרחבה בעבודת הגמר של גל זיו. חלק מהם מפורטים בנספח מספר 1.

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 בפוליאטילן על תנאי המיקרואקלים במבנים מוצגות להלן על פי מצבי הטל השונים. 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

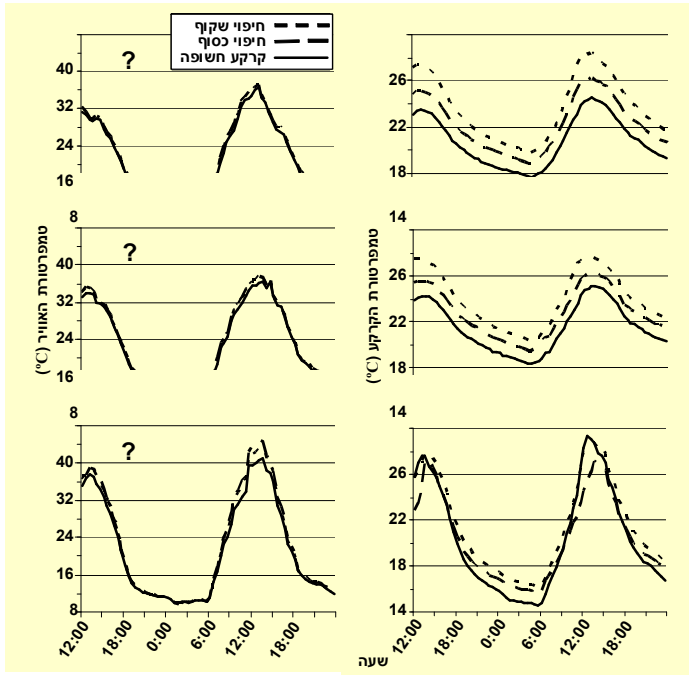
במבנים המחופים חמה יותר מאשר במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה, טמפרטורת הקרקע המוחפה בפוליאטילן שקוף הייתה הגבוהה ביותר שנמדדה, אחריה טמפרטורת הקרקע המוחפה בפוליאטילן הכסוף ולבסוף, הקרקע החשופה בה הייתה הטמפרטורה הנמוכה ביותר. דירוג זה בטמפרטורת הקרקע בין הטיפולים נמדד בשלושת מצבי הטל שאובחנו (איור 2). גם טמפרטורת האוויר השתנתה בצורה גלית לאורך היממה בדומה לטמפרטורת הקרקע. 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 מוחפה וחשופה או בין סוגי החיפוי השונים בשלושת מצבי הטל (איור 2).

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

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



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



איור 2: 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.

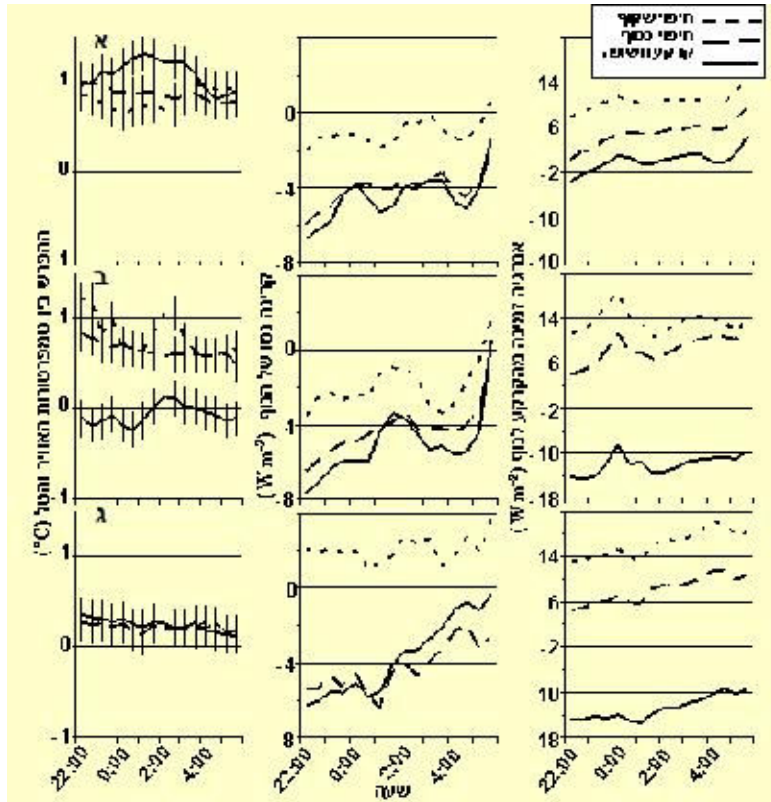
במהלך הניסויים נקבע אם נוצר טל במבנים על ידי חישוב ההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל בתוך המבנים בגובה 2 מ'. כשהפרש הטמפרטורות היה קטן או שווה מסכום שגיאות המדידה ($e = \pm 0.2^\circ\text{C}$) נקבע שנוצר טל. יצירת טל לא נמדדה ישירות על ידי חיישנים ולא חושבה לפי טמפרטורת הנוף מכיוון שהאחרונה נמדדה בגובה 30 ס"מ 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 2 מ' לכן זה מדד הטמפרטורה שנבחר לקביעת יצירת טל. יצירת הטל התרחשה בעיקר בלילה, בדרך כלל החל מהשעה 22^{00} ועד השעה 05^{30} לפנות בוקר. במקרה המוקדם ביותר שנרשם במהלך שתי העונות נוצר טל בשעה 19^{00} , כשעתיים לאחר רדת החשיכה. השעה המאוחרת ביותר שנמדדה בה נוצר עדיין טל הייתה 08^{00} , כשעתיים לאחר זריחת השמש.

במצב הראשון כשלא אובחנה יצירת טל בכל המבנים, ההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל היה גדול מאפס בכל הטיפולים שנמדדו (איור 3א). במצב השני, כשאובחנה יצירת טל רק במבנים עם קרקע חשופה (איור 3ב). חשופה, ההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל היה אפס ואף נמוך מכך רק במבנים עם קרקע חשופה (איור 3ב). במצב הטל השלישי כשאובחנה יצירת טל בכל המבנים, ההפרש בין טמפרטורות האוויר והטל הגיע לאפס בכל המבנים (איור 3ג). 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 5.9W m^{-2} והמזערי היה -11.4W m^{-2} .

במהלך הניסויים נמדדו הבדלים בערכו של שטף הקרינה נטו של הנוף לאורך הלילה משקיעת השמש ועד זריחתה (איור 3). 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.

שטף הקרינה נטו של הנוף בלילה במבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאטילן שקוף היה הגבוה ביותר שנמדד בשלושת מצבי הטל (איור 3). לעומת החיפוי השקוף, שטפי הקרינה נטו של הנוף בלילה במבנים בהם

הקרקע חופתה בפוליאתיילן כסוף ובמבנה בהם הקרקע הייתה חשופה, היו בעלי ערכים דומים בדרך כלל. כך לדוגמה, שטף הקרינה נטו הממוצע בחלקו השלישי של הלילה בשלושת הלילות המוצגים באיור 3, היה -0.3 W m^{-2} בחיפוי שקוף לעומת, -4.2 W m^{-2} ו- -4.4 W m^{-2} בחיפוי כסוף וקרקע חשופה, בהתאמה.



איור 3: רשפעת קרקע רשיפה וריפוי הקרקע בשני ימי פוליאתיילן על יצירת הטל בגובה 20 cm, קרינה נטו של החוף ו האוויר וזמינה ללילה וללילה, בשלישה מצבים של יצירת טל במבני הניסוי בלילה: א. ללא טל, בתאריך 12-13 לאפריל 2006; ב. טל נוצר במבנים בהם הקרקע הייתה חשופה, וימי 19-20 לאפריל 2006; ג. טל ניצר בכל המבנים, בתאריך 6-7 לאפריל 2006. הקווים ראנכיים כיצויים את שינוי החשיפה של ההפרש בין כספריטורת הארץ והטל ($\pm 0.2^\circ \text{C}$).

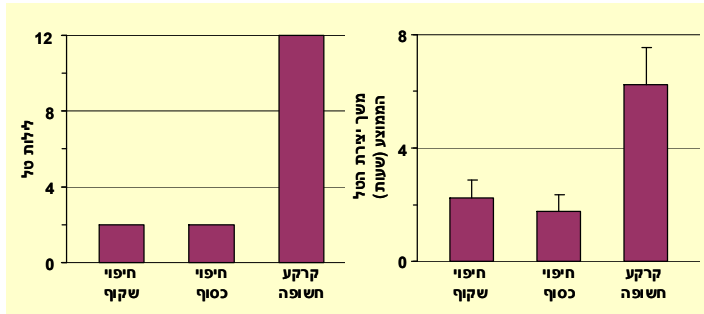
שטף האנרגיה הזמינה לנוף בלילה חושב כהפרש בין שטף החום בקרקע שנימדד בעומק 8cm לבין הקרינה נטו מעל הנוף. שטף האנרגיה הזמינה לנוף בלילה במבנים בהם הקרקע חופתה בפוליאתיילן שקוף היה הגבוה ביותר בשלושת מצבי הטל שאובחנו בניסוי ואחריו שטף האנרגיה הזמינה לנוף במבנים עם חיפוי כסוף וקרקע חשופה בהתאמה (איור 3). 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 3, ג).

באיור 4 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 4).

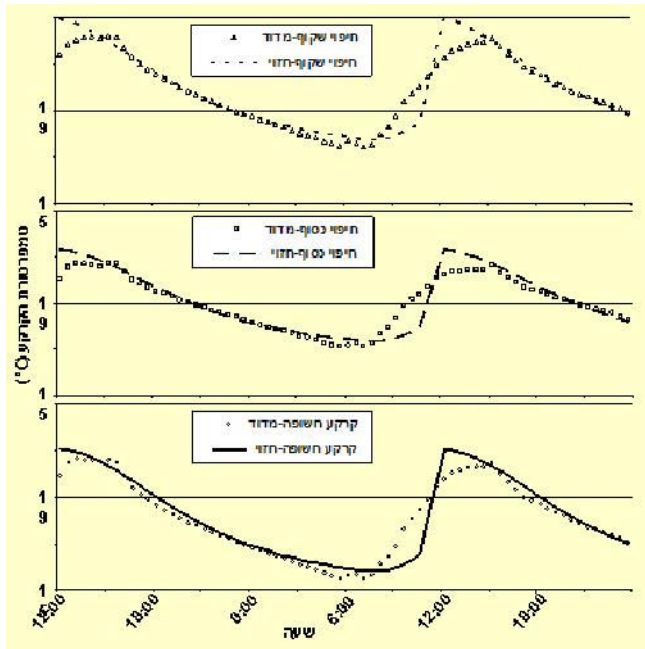
2.1.2. פיתוח מודל לחיזוי השפעת חיפוי הקרקע ביריעות פוליאתיילן ואימותו

לאחר הבנת המנגנון באמצעותו חיפוי קרקע בפוליאתיילן משפיע על תנאי המיקרואקלים במבני הגידול פיתחנו מודל להדמיית השפעת החיפויים על טמפרטורת הקרקע במבנים בהם הקרקע מחופה בפוליאתיילן ובמבנים בהם הקרקע נשאר חשופה. חיזוי השפעת החיפוי על טמפרטורת הקרקע שימש כאומדן להשפעה של החיפוי על יצירת טל, קיצור משך רטיבות העלווה ומניעת מחלות עלווה מוגברות לחות כמו כימשון. המודל מפורט בנספח מספר 2. מהימנות המודל (verification) נבחנה תוך התאמת תחזיות המודל לנתונים 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). בדו"ח זה תוצג הבחינה האיכותית. תחזית המודל לטמפרטורת הקרקע הייתה מדויקת יותר בשעות החשכה מאשר בשעות האור בכל טיפולי חיפוי הקרקע (איור 5). 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 מ"צ. ערכו של ההפרש הגדול ביותר בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה היה 1.9 מ"צ 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 מ"צ. ערכו של ההפרש הגדול ביותר בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה בלילה היה 0.5 מ"צ אובחן בשעה 10³⁰.



איור 4: השפעת חיפוי קרקע בשני סוגי פוליאתיילן 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 מיצגים את שגיאת התקן (בקרקע מחופה n=2, בקרקע חשופה n=12).



איור 5: השפעת קרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאתיילן 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 5). ביום, התחזית המדויקת ביותר של טמפרטורת הקרקע הייתה בקרקע חשופה בפוליאתיילן כסוף ואחריה הקרקע החשופה והחיפוי השקוף שהראו דיוק כמעט זהה. בלילה, התחזית של טמפרטורת הקרקע החשופה 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 מ"צ בעוד שבשני הטיפולים האחרים ערכו המוחלט של ההפרש הממוצע בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה היה 0.55 מ"צ. בלילה, בקרקע מחופה ערכו המוחלט של ההפרש הממוצע בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת

הקרקה המדודה היה 0.1 מ"צ. בו בזמן, בקרקע חשופה ערכו המוחלט של ההפרש הממוצע בין טמפרטורת הקרקע החזויה לטמפרטורת הקרקע המדודה היה 0.22 מ"צ.

2.1.3. 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 הכימיון במבנה גידול לעגבניות. ניסויי ההדמיה שנערכו מופיעים בטבלה 2. בארבעת ניסויי ההדמיה הראשונים נכללו הטיפולים הבאים: 1. קרקע מחופה בפוליאטילן שקוף; 2. קרקע מחופה בפוליאטילן כסוף; ו-3. קרקע חשופה.

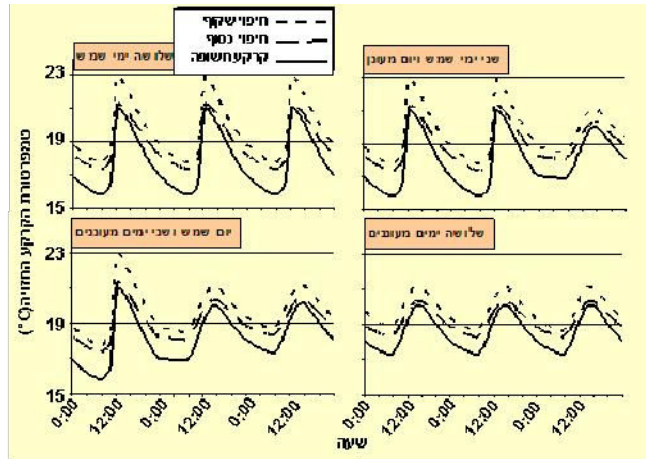
טבלה 2: פירוט ניסויי ההדמיה שנערכו בעזרת המודל שפותח לחיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הגידול.

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		מצב העננות ועונות השנה	3
6	12	טמפרטורת הקרקע המרבית והמזערית במהלך היממה	התכונות הפוטומטריות של יריעת החיפוי	4
6	12		התכונות התרמיות של יריעת החיפוי	5

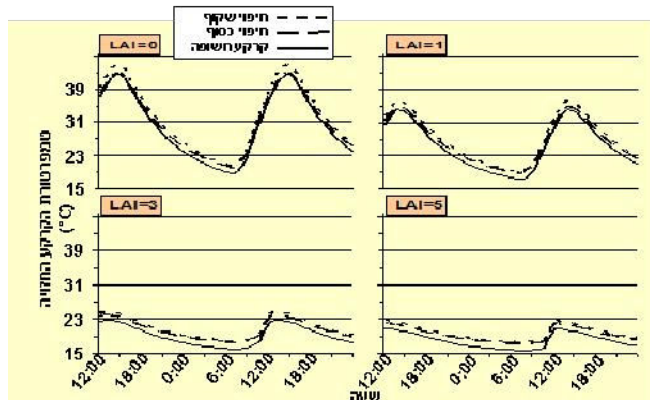
בניסויי ההדמיה הראשון נבחנה ההשפעה של מצב העננות ומשכו על הגל היומי של טמפרטורת הקרקע במבנה גידול במשך שלוש יממות רצופות. לשם ההדמיה הוגדר מצב של שמיים בהירים כשמיים ללא כל עננים ושמיים מעוננים הוגדרו כשמיים המכוסים לחלוטין בעננים מסוג altocumulus, האופייניים לאזורנו בימים מעוננים בעונות הסתיו והאביב. בניסוי נערכו 4 הדמיות לפי התנאים ביום מייצג (1 בדצמבר 2005) במבנה גידול עם צמחי עגבנייה בוגרים בגובה 2 מ' ו- $LAI=4.68$. בהדמיה הראשונה נבחנה השפעה של שלושה ימי שמש רצופים על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השנייה נבחנה השפעה של שני ימי שמש שלאחריהם היה יום מעונן אחד על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השלישית נבחנה השפעה של יום שמש אחד שלאחריו היו שני ימים מעוננים על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה הרביעית נבחנה השפעה של שלושה ימים מעוננים רצופים על טמפרטורת הקרקע. מניסויי ההדמיה עלה שעננות 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 בקרקעות המחופות בסוגי פוליאטילן שונים. בחיפוי השקוף טמפרטורת הקרקע המרבית תרד ב-1.7 מ"צ והטמפרטורה המזערית תעלה ב-0.7 מ"צ. בחיפוי הכסוף טמפרטורת הקרקע המרבית תרד ב-0.8 מ"צ והטמפרטורה המזערית תעלה ב-1 מ"צ. בקרקע החשופה טמפרטורת הקרקע המרבית תרד ב-0.7 מ"צ והטמפרטורה המזערית תעלה ב-1.5 מ"צ (איור 6).

בניסויי ההדמיה השני נבחנה השפעת מימדי הנוף של צמחי עגבנייה על הגל היומי של טמפרטורת הקרקע במבנה גידול במשך 36 שעות. 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 בניסויי ההדמיה הראשון). בהדמיה הראשונה נבחנה השפעה של מבנה ללא צמחים ($LAI=0$) על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השנייה נבחנה השפעה של צמחים צעירים מאוד בגובה 43 ס"מ ($LAI=1$) על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה השלישית נבחנה השפעת צמחים צעירים בגובה 1.27 מ' ($LAI=3$) על טמפרטורת הקרקע. בהדמיה הרביעית נבחנה השפעת צמחים בוגרים בגובה 2.12 מ' ($LAI=5$)

על טמפרטורת הקרקע. תחזית המודל להשפעת שינוי במימדי נוף הצמחים במבנה על טמפרטורת הקרקע מוצגת באיור 7. 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.



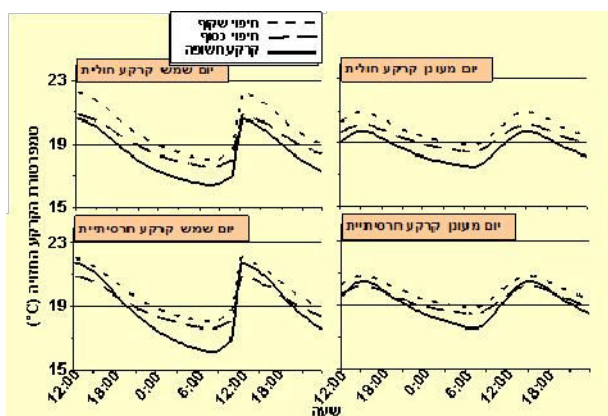
איור 6: השפעת מצב העננות ומשכו על המהלך היומי של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בקרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאאתילן לאורך שלוש יממות.



איור 7: השפעת אינדקס שטח העלוה (LAI) על המהלך היומי של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בקרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאאתילן.

בניסוי ההדמיה השלישי נבחנו השפעת עונת השנה ומצב העננות על הגל היומי של טמפרטורת הקרקע במבנה גידול במשך 36 שעות. 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. יום שמש ויום מעונן הוגדרו בדומה לניסוי ההדמיה הראשון. בניסוי נערכו 4 הדמיות לפי התנאים בימים המייצגים בשמיים בהירים או מעוננים, במבנה גידול עם צמחי עגבנייה בוגרים בגובה 2 מ' - $LAI=4.68$. 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. תחזית המודל להשפעת עונת השנה ומצב העננות על טמפרטורת הקרקע מוצגת באיור 8. 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 מ"צ כשהשמיים בהירים וב-3.2 מ"צ כשהשמיים מעוננים. כמו כן, שינוי העונה מסתיו לאביב העלה את טמפרטורת הקרקע המזערית הממוצעת לכל הטיפולים ב-2.2 מ"צ כשהשמיים היו בהירים וב-2.1 מ"צ 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 התבטאו 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 ו- 1.5 מ"צ בחיפוי השקוף והכסוף, בהתאמה. באופן דומה, העלה החיפוי גם את טמפרטורת הקרקע היומית המזערית ביום בהיר באביב לעומת הסתיו ב- 1.3 ו- 0.5 מ"צ 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 ו- 0.8 מ"צ בחיפוי השקוף והכסוף, בהתאמה. באופן דומה, העלה החיפוי גם את טמפרטורת הקרקע היומית המזערית ביום מעונן באביב לעומת הסתיו ב- 1.2 ו- 0.4 מ"צ מעלות בחיפוי השקוף והכסוף, בהתאמה.

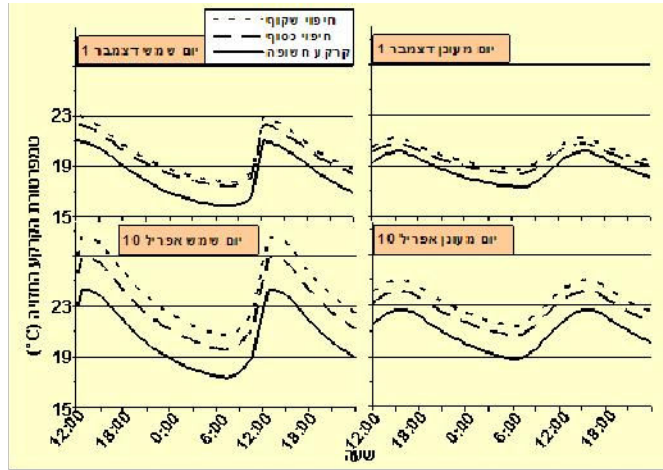


איור 8: השפעת סוג הקרקע ומצב העננות על המהלך היומי של טמפרטורת הקרקע החוזרה במודל, בקרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאתילן.

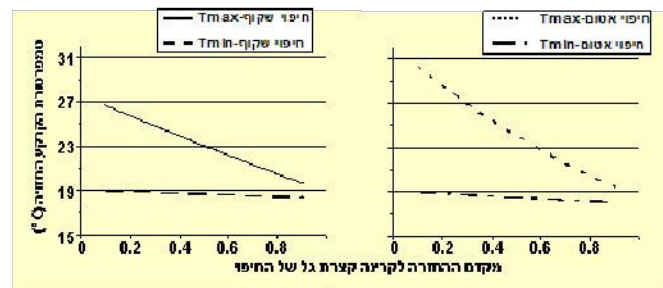
בניסוי ההדמיה הרביעי נבחנה השפעת התכונות הפוטומטריות של הפוליאתילן ששימש לחיפוי הקרקע על טמפרטורת הקרקע היומית המרבית והמזערית במבנה גידול. בניסוי היו 12 טיפולים בשתי קבוצות. קבוצות הטיפולים היו: 1. יריעות חיפוי שקופות לקרינה קצרת גל; ו- 2. יריעות חיפוי אטומות לקרינה קצרת גל. בניסוי נערכו 6 הדמיות. בכל הדמיה נבחנו זו מול זו שתי יריעות לפי התנאים ביום מייצג (1 בדצמבר 2005) במבנה גידול עם צמחי עגבנייה בוגרים בגובה 2 מ' ו- $LAI=4.68$. בכל הדמיה שונו התכונות הפוטומטריות של יריעות החיפוי 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 ולאחר מכן נקבעו שאר התכונות של יריעת החיפוי. על פי ההדמיות שבוצעו נראה 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 מ"צ מחיפוי שקוף. עם זאת, השינוי הצפוי בטמפרטורת הקרקע המזערית עם השינוי בערך מקדם ההחזרה, בתחום הערכים הנבחן בשני החיפויים, צפוי להיות קטן מ- 1 מ"צ. בעוד שהשינוי בטמפרטורת הקרקע המרבית באותו תחום ערכי המקדם, צפוי להיות של 10.7 מ"צ ו- 6.8 מ"צ בחיפוי השקוף והכסוף, בהתאמה. טמפרטורת הקרקע המרבית הגבוהה ביותר שנחזתה בחיפוי שקוף הייתה גבוהה ב- 3.9 מ"צ מהחיפוי האטום. עם זאת, בטמפרטורת הקרקע המזערית הגבוהה ביותר כמעט לא הורגש שינוי (איור 9).

בניסוי ההדמיה האחרון נבחנה השפעת התכונות התרמיות של חיפוי קרקע שונים מפוליאתילן על טמפרטורת הקרקע היומית, המרבית והמזערית במבנה גידול. בניסוי היו 12 טיפולים בשתי קבוצות. קבוצות הטיפולים היו: 1. יריעות חיפוי מפוליאתילן דמוי שקוף; ו- 2. יריעות חיפוי מפוליאתילן 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 2 מ' ו- $LAI=4.68$. בכל הדמיה שונו התכונות התרמיות של יריעות החיפוי תוך שמירה על

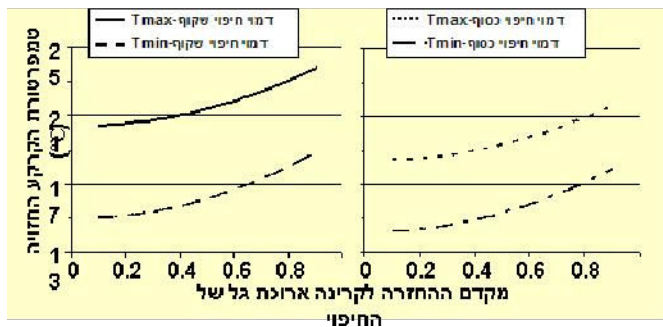
מערכת כללים שנקבעה מראש במטרה לאפיין את תכונות היריעות. שינוי התכונות התרמיות נעשה על ידי שינוי מקדם ההחזרה של יריעות החיפוי לקרינה אלקטרומגנטית קצרת או ארוכת גל. לאחר מכן ניתן נקבעו שאר התכונות התרמיות של יריעות החיפוי. תחזיות המודל בשני מצבים אלה מפורטים באיורים 10 ו- 11.



איור 9: השפעת עונת השנה ומצב העננות על המהלך היומי של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בקרקע חשופה וחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאאתילן.



איור 10: השפעת מקדם ההחזרה של החיפוי לקרינה קצרת גל ($\rho_{mulch_{sw}}$) על המקסימום והמינימום היומיים של טמפרטורת הקרקע החזויה במודל, בחיפוי קרקע בשני סוגי פוליאאתילן.



איור 11: 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 פוליאאתילן.

2.2. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאאתילן על התפתחות מחלות נוף

במהלך שלוש שנות המחקר בוצעו על ידנו ועל ידי אחרים 15 ניסויים בהם נבחנה השפעת חיפוי הקרקע ביריעות פוליאאתילן על התפתחות מחלות צמחים. בסך הכל נכללו בניסויים 6 גידולים והתפתחו בהם 9 מחלות שונות. הניסויים בוצעו בתחנות מחקר באזור הבשור, הערבה התיכונה, הערבה הצפונית, הבקעה ועמק בית שאן. מקום הניסויים, הגידולים והמחלות שהתפתחו בהן מוצגים בטבלה מספר 3. רוב הניסויים בוצעו במנהרות עבירות בגודל 6×6.5 מ' (או יותר) כשכל אחת מהן שימשה כחזרה בניסוי והיא חופתה (או לא) ביריעות הפוליאאתילן הנבחנות. במקצת הניסויים הוצב יותר מטיפול חיפוי אחד בתוך מבנה גידול. במקרים אלה הוערכה השפעת הטיפולים רק בחלק המרכזי של טיפול החיפוי תוך השארת שוליים רחבים מכל צידי האזור הנדגם. בכל הניסויים היו לפחות 4 חזרות לטיפול והניסויים הוצבו במתכונת של בלוקים באקראי. במרבית המקרים התפתחו מגיפות טבעיות של הפתוגנים השונים. בשני ניסויים (כימיון בעגבניות באביב 2006 ועובש אפור בבזיל בחוות עדן 2006/7) לא התפתחו המחלות באופן טבעי וצמחים שנמצאו בשולי חלקות הניסויי אולחו בהדבקה מלאכותית. הפצת המחלה מהצמחים המאולחים לצמחים שנמצאו בחלקות הדגימה התרחשה באופן טבעי. בלא תלות במקור

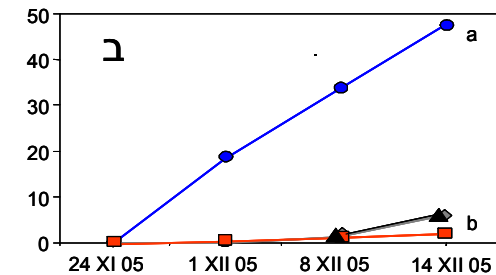
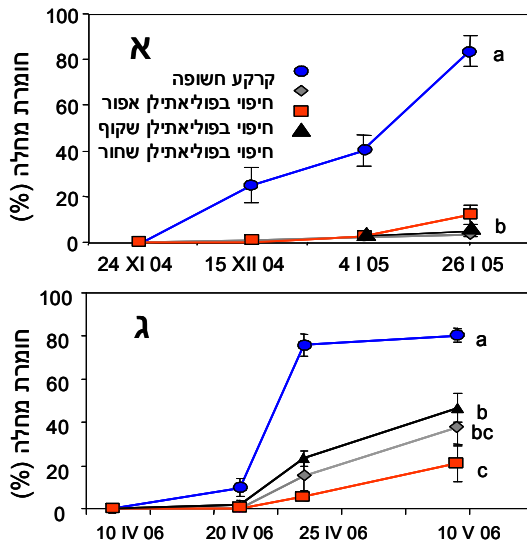
המידבק (טבעי או מלאכותי), עוצמת הנגיעות בכל אחד ממבני הניסוי הוערכה בשורת הצמחים המרכזית. המדד המוערך היה חומרת המחלה (באחוזים), מדד המבטא את החלק היחסי של העלווה שנפגע מהתפתחות המחלה. התוצאות נותחו במבחן של ניתוח שונות (ANOVA) וכשערכי F של המבחן היו מובהקים נקבעו הבדלים בחומרת המחלה בין הטיפולים השונים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

טבלה מספר 3. פירוט הניסויים שבוצעו במסגרת תוכנית המחקר שבהם נבחנה השפעת חיפוי הקרקע ביריעות פוליאטילן על מחלות צמחים בגידולים שונים. בחלק מהניסויים התפתחה יותר ממחלה אחת.

גידול	מחלה	מס' ניסויים	מקום הביצוע	הערות
עגבנייה	כימשון	3	חוות הבשור	בניסויים נבחנה השפעת סוגי פוליאטילן שונים
	עובש עלים	1	חוות הבשור	
מלפפונים	כשותית	4	חוות הבשור	נבחנה גם ההשפעה על היבול
	פתים	1	חוות הבשור	
פלפל	קימחונית	2	חוות הבשור, חוות גילגל	בגילגל נבחנה גם ההשפעה על היבול
	עובש אפור	1	חוות גילגל	בגילגל נבחנה גם ההשפעה על היבול
בזיל	עובש אפור	2	עין תמר, חוות עדן	בשני הניסויים נבחנה גם ההשפעה על היבול.
ליזיאנטוס	עובש אפור	2	חוות הבשור וחוות יאיר	הניסויים בוצעו על ידי נורית שפירא ורוחי רבינוביץ
תצילים	קימחון, זבוב המינהרות וחלפת	1	חוות הבשור	הניסויים בוצעו על ידי יגאל אלעד ושמעון פיבניה

2.2.1. השפעת סוג הפוליאטילן ששימש לחיפוי הקרקע על כימשון בעגבניות

השפעת סוג יריעת הפוליאטילן ששימשה לחיפוי הקרקע על התפתחות מחלת הכימשון בתפוחי אדמה נבחנה בשלושה ניסויים שבוצעו בחוות הבשור; שניים מהם בוצעו בעונת הסתיו והשלישי באביב. בכל הניסויים התפתחה מחלת הכימשון בעוצמה גבה בחלקות ההיקש, הבן הקרקע נשארה חשופה. בחלקות שבהן הקרקע חופתה ביריעות פוליאטילן, אפור, שחור או שקוף, הייתה חומרת המחלה נמוכה במובהק מזו שבחלקות ההיקש במהלך כל הניסוי, והיא נשארה נמוכה מאד עד לסוף הניסויים. רק בניסוי שבוצע באביב 2006, בו לא התפתחה מגיפה טבעית וצמחים בשולי מבני הניסוי אולחו בהדבקה מלאכותית היו הבדלים ביעילות בין סוגי הפוליאטילן: חומרת המחלה הנמוכה ביותר הייתה במבנים שחופו ביריעות פוליאטילן שקוף (איור 11).

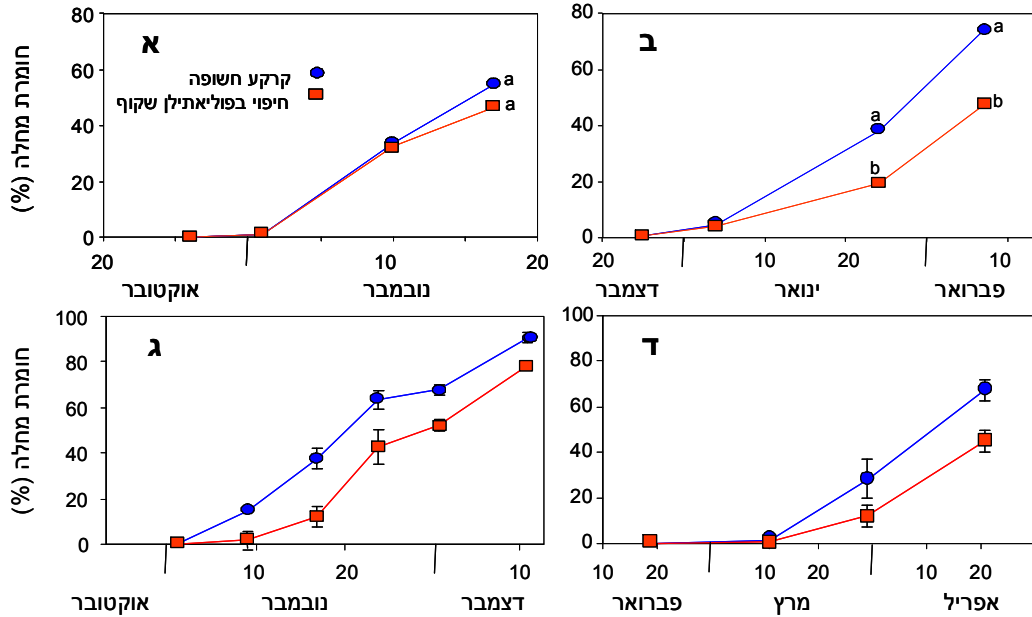


איור 11: השפעת חיפוי הקרקע ביריעות פוליאטילן על התפתחות מחלת הכימשון במנהרות עגבניה בניסויים שבוצעו בחוות הבשור בסתו 2004/5 (א), סתיו 2005/6 (ב) ואביב 2006 (ג). בשני הניסוי הראשונים התפתחה מחלה באופן טבעי; בניסוי השלישי אולחו צמחים שנמצאו בשולי המבנים. ערכים שלידם אותיות שונות שונים זה מזה מבוהק כנקבע על פי מבחן HSD ($P \leq 0.05$). הקווים האנכיים מייצגים את שגיאת התקן ($n=4$).

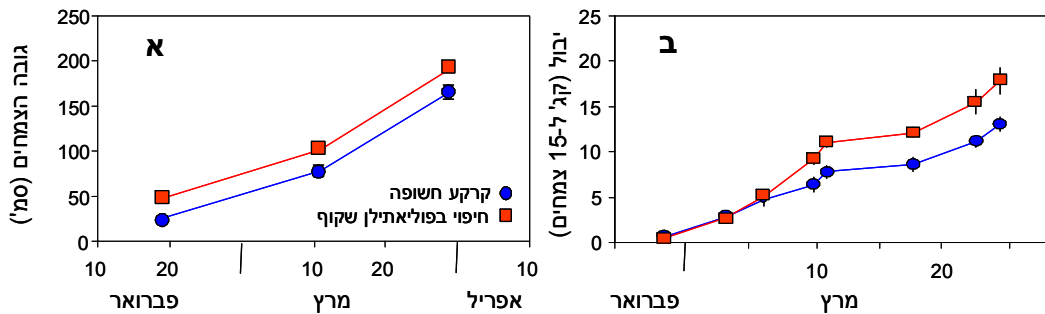
2.2.2. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאטילן שקוף על כשותית במלפפונים

הגורם למחלת הכשותית במלפפונים, הפטרייה *Pseudoperonospora cubensis* זקוקה לנוכחות של מים חופשיים להתפתחותו. לכן, נראה היה שלחיפוי הקרקע ביריעות פוליאטילן תהיה השפעה משמעותית על חומרת המגיפה שתפתח. החיפוי אמנם הפחית את חומרת הכשותית בשלושה מארבעת הניסויים שבוצעו בחוות הבשור במהלך ארבע עונות גידול שונות, אבל שיעור ההשפעה היה פחות מזה שהתקבל בניסויי העגבנייה והכימשון (איורים 12 ו-11, בהתאמה). בכל המקרים הייתה השפעת החיפוי בהפחתת המחלה משמעותית יותר בחלק התחתון של

הצמחים מאחשר במרכזם או בחלקם העליון (תוצאות לא מוצגות). בניסויים גם נצפתה השפעה של החיפוי על התפתחות הצלחים עצמם (בלי קשר להשפעה על המחלה); הצמחים היו גבוהים יותר והתפתחו מהר יותר בחלקות המחופות. בניסוי שבוצע בעונת האביב 2008 כומתה השפעה זו. צמחי המלפפון היו גבוהים יותר והיבול היה גבוה יותר בחלקות בהן הקרקע חופתה ביריעות פוליאאתילן מאשר החלקות ההיקש בהן הקרקע נשארה חשופה (איור 13).



איור 12. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאאתילן שקוף על חומרת הנגיעות במחלת הכשותית במלפפונים בניסויים שבוצעו בחוות הבשור בסתיו 2006/7 (א), חורף 2006/7 (ב), סתיו 2007/8 (ג) ואביב 2008 (ד). סימנים שלידם אותיות שונות שונים זה מזה במובהק כנקבע על ידי מבחן HSD (ברמת מובהקות של 0.05). הקווים האנכיים מייצגים את שגיאת התקן.

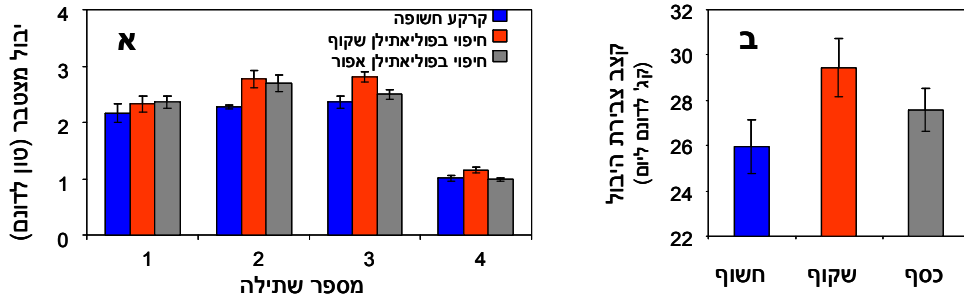


איור 13. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאאתילן שקוף על התפתחות צמחי המלפפון (א) ועל היבול שנקטף במהלך חודש מרץ (ב) בניסוי שבוצע בחוות הבשור באביב 2008. הקווים האנכיים מייצגים את שגיאת התקן.

2.2.3. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאאתילן שקוף על צמחי בזיל ועל עובש אפור

הגורם למחלת העובש האפור בבזיל, הפטרייה *Botrytis cinerea* זקוקה לנוכחות של מים חופשיים לנביטת הנבגים ולהדבקה. אולם, מאחר ואתר ההדבקה הוא הפצעים הנוצרים על גדמי הגבעולים אחרי הקציר, הנחנו שיעילות חיפוי הקרקע כנגד המחלה תהיה מוגבלת. הבזיל הוא צמח ממוצא טרופי הזקוק לטמפרטורות גבוהות יחסית להתפתחות תקינה; יותר מכך, בטמפרטורות נמוכות יחסית (מחתחת ל-12 מעלות) מתפתחים על העלים סימני השחרה פיזיולוגיים הנקראים נזקי צינה. חיפוי הקרקע ביריעות פוליאאתילן השפיעו בצורה משמעותית על קצב התפתחות הצמחים (בבזיל זו השפעה ישירה על היבול) בשני ניסויים שבוצעו באזורים שונים והפחיתו את נזקי

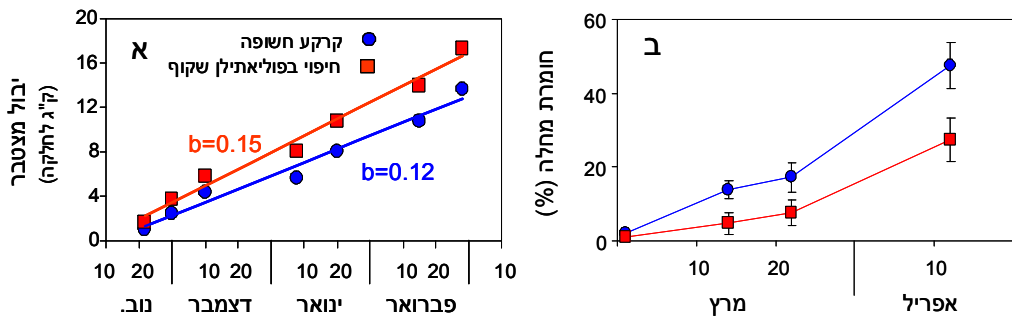
הצינה (איורים 14 ו- 15). החיפוי גם הפחית במובהק, אם כי לא בצורה מוחלטת את התפתחות מחלת העובש האפור על הצמחים אחרי הקציר (איור 16).



איור 14: השפעת חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על יבול בזיל בניסוי שבוצע בעין תמר בסתיו-אביב 2006/7 על ידי נורית שפירא. א. היבול המצטבר הכללי; ב. הקצב הממוצע של צבירת היבול. בניסוי נכללו ארבעה מועדי שתילה שבכל אחד מהם נקצר היבול מידי שבוע עד 3 שבועות, על פי התפתחות הצמחים. הקווים האנכיים מייצגים את שגיאת התקן.



איור 15: השפעת חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על התפתחות כתמי צינה בבזיל בניסוי שבוצע בתחנת זוהר בסתיו-חורף 2007/8 על ידי נורית שפירא. א. קרקע חשופה; ב. הקרקע חופתה ביריעות פוליאיתילן שקוף.

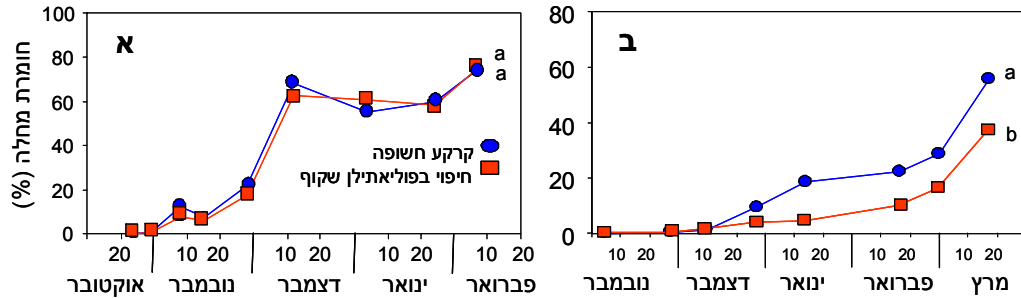


איור 16: השפעת חיפוי הקרקע בפוליאיתילן שקוף על יבול הבזיל (בחלקת ניסוי באורך של 3 מ' ערוגה) ועל חומרת הנגיעות במחלת העובש האפור בתצפית שבוצעה בעונת 2006/7 בחוות עדן על ידי רוחי רבינוביץ בשיתוף עם אורי ירמיהו. הערך של b מציין את קצב צבירת היבול (ק"ג לחלקת ניסוי ליום); הקווים האנכיים מייצגים את שגיאת התקן.

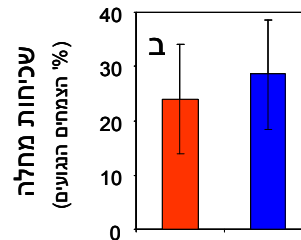
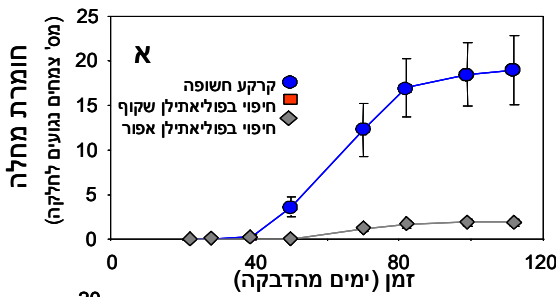
2.2.4. השפעת חיפוי הקרקע ביריעות פוליאיתילן שקוף על מחלות בגידולים שונים

במהלך שנות המחקר נבחנה השפעת חיפוי הקרקע ביריעות פוליאיתילן על ההתפתחות ועל החומרה של מחלות שונות בגידולים שונים. הניסויים בוצעו על ידי אחרים באזורים שונים בארץ. הממצאים מפורטים באיורים 17, 18 ו- 19. כצפוי, החיפוי לא הפחית את חומרת הנגיעות במחלת הקימחוניית בפלפל, משום שהתפתחות גורם המחלה, הפטרייה *Leveillula taurica*, לא מושפעת מנוכחות (או אי נוכחות) מים חופשיים על העלים. בניסוי שבוצע בחוות גילגל בסתיו-חורף 2007/8 נצפתה השפעה שלילית של החיפוי. צמחי הפלפל נשתלו לתוך חורים שנחתכו ביריעות הפוליאיתילן השקוף בסוף חודש אוגוסט. החיפוי גרם לחימום הקרקע והצמחים שנשתל באזורים המוחופים סבלו קשות מהחום. כדי למנוע את מותם, נחתכו יריעות הפוליאיתילן באזורים הנמצאים בין השורות, בתוך כל ערוגה, וגולגלו. בסתיו נפרשו היריעות המגולגלות מחדש. בכל מקרה, התפתחות הצמחים שגדלו באזור המוחופה נפגעה קשה והנגיעות בכשותית באזור המוחופה הייתה גבוהה יותר מאשר באזורים שלא חופו ביריעות פוליאיתילן (איור 17). לממצא זה חשיבות רבה ליישומים המסחריים של החיפוי באזורים ובעונות בהם טמפרטורות הקרקע גבוהות. בניסויים שבוצעו על ידי יגאל אלעד הייתה לחיפוי הקרקע בפוליאיתילן שקוף השפעה על התפתחות מחלת העובש האפור בליזיאנטוס במספר ניסויים, אך לא בניסויים

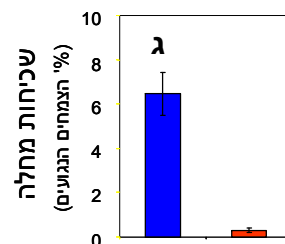
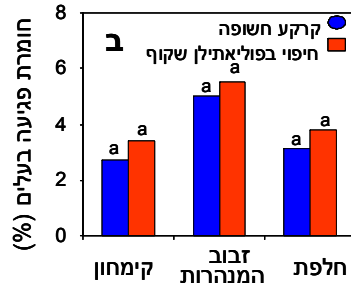
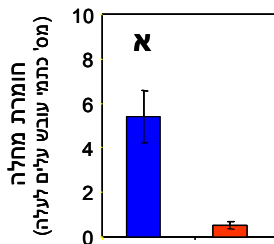
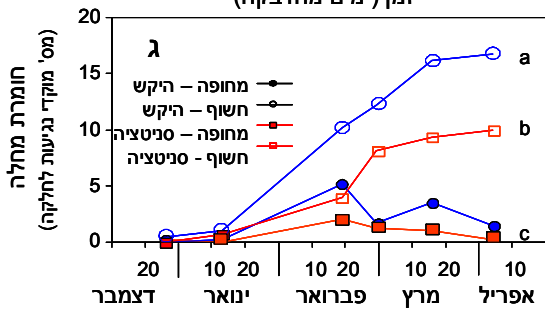
אחרים שבוצעו על ידי אותו החוקר או על ידי אחרים (איור 18). נושא זה נכלל במסגרת מחקר בנושא ונראה שההצלחה – או אי ההצלחה – של החיפוי נובעת מגודל החורים בהם נשתלו הצמחים. נושא זה ידווח בנפרד במסגרת פרויקט בוטריטיס בליזיאנטוס. השפעת החיפוי על עובש אפור בפלפל נבחנה בניסוי שבוצע בחוות גילגל. הניסוי הוצב בבית רשת (בניגוד לכל הניסויים האחרים שבוצעו במבנים שחופו בפוליאטילן) עקב תצפיות של מגדלים באזור שדיווחו על השפעות חיוביות של החיפוי. בניסוי התפתחה מחלת העובש האפור באופן טבעי, אך עקב תנאי הסביבה (חורף שחון וחס) חומרת המחלה הייתה נמוכה ולא ניתן להסיק מסקנות משמעותיות לגבי יעילות החיפוי (איור 18). בניסויים אחרים שבוצעו בחוות הבשור הייתה לחיפוי הקרקע ביריעת פוליאטילן שקופה השפעה מעמדתית מאד על עובש עלים בעגבניות, ועל פתיום (מחלת קרקע) במלפפונים, אך לא הייתה כל השפעה על קימחון, זבוב מינהרות וחלפת בחצילים (איור 19).



איור 17. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאטילן על התפתחות מחלת הקימחונייה בפלפל. חוות הבשור סתיו-אביב 2006/7; ב. חוות גילגל, סתיו-אביב 2007/8. סימנים או עמודות שלידן אותיות שונות (באותו תאריך דגימה) שונים זה מזה במובהק כנקבע על ידי מבחן HSD (ברמת מובהקות של 0.05).



איור 18. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאטילן על מחלת העובש האפור בגידולים שונים. א. לזיאנטוס, חוות הבשור סתיו-אביב 2005/6 (הניסוי בוצע על ידי גאל אלעד). ב. לזיאנטוס, חוות יאיר סתיו-אביב 2005/6 (הניסוי בוצע על ידי שמעון פיבוני). ג. פלפל, חוות גילגל חורף-אביב 2008. בניסוי זה בוצע גם טיפול סניטציה (סימנים ריקים) בהם הורחקו האיברים עליהם נראו תסמיני העובש האפור. סימנים או עמודות שלידן אותיות שונות שונים זה מזה במובהק כנקבע על ידי מבחן HSD (ברמת מובהקות של 0.05). הקווים האנכיים מייצגים את שגיאת התקן.



איור 19. השפעת חיפוי הקרקע בפוליאטילן על פגעים בגידולים שונים. א. עובש עלים בעגבניות, חוות הבשור סתיו 2004/5; ב. חוות הבשור, סתיו 2005/6. ג. פתיום במלפפון, חוות הבשור, סתיו 2007/9. עמודות שלידן אותיות שונות שונים זה מזה במובהק כנקבע על ידי מבחן HSD (ברמת מובהקות של 0.05).

3. דיון

בסדרת ניסויים שבוצעה בשנים 2003-2005 בחוות הבשור מצאנו שחיפוי הקרקע במבנה הגידול בפוליאיתילן אפור 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 בפוליאיתילן לבין מבנים בהם הקרקע הייתה חשופה: במבנים עם קרקע מחופה ביריעות פוליאיתילן היה משך הזמן בו נוצר טל בלילה קצר יותר מזה שבמבנים בהם הקרקע הייתה חשופה. המנגנון הפיזיקאלי שבעטיו נגרמו הבדלים אלה במיקרואקלים ובנגיעות במחלת הכימשון לא היה ברור. חשוב להבין את המנגנונים הפיסיקליים באמצעותם השפיע חיפוי הקרקע על תנאי המיקרואקלים במבני הגידול כי הבנת המנגנון תאפשר חיזוי של יעילות השיטה במניעת מחלות במצבים שונים, באזורים שונים ובגידולים שונים. כמו כן, הבנת המנגנון תעזור לקבוע את סוג הפוליאיתילן היעיל ביותר במניעת התפתחות המחלה.

ממצאי המחקר עלה כי המנגנון באמצעותו חיפוי הקרקע במבני גידול ביריעות פוליאיתילן מונע יצירת טל הוא כלהלן: 1. במבני גידול בהם הקרקע מחופה בפוליאיתילן, הקרקע מתחממת יותר במהלך היום מאשר במבנים בהם הקרקע חשופה. 2. ככל שהקרקע חמה יותר, היא פולטת יותר אנרגיה לצמחים במבנה; לכן נפלטת יותר אנרגיה מהקרקע לנוף ביום וגם בשעות הלילה. 3. פליטת האנרגיה המוגברת בלילה מגבירה את קליטת האנרגיה על ידי הצמחים הנמצאים במבנים המוחפים. 4. כתוצאה מתוספת קליטת האנרגיה בצמחים במבנים המוחפים משתנה מאזן האנרגיה שלהם והם מתקררים לאט יותר מהצמחים במבנים בהם הקרקע חשופה. 5. במבנים עם קרקע מחופה בפוליאיתילן טמפרטורת העלווה יורדת מתחת לטמפרטורת הטל של האוויר מאוחר יותר בלילה, ולמשך זמן קצר יותר בכל אירוע טל; כלומר נוצר פחות טל במבנים עם חיפוי קרקע מפוליאיתילן, לעומת מבנים עם קרקע חשופה. כתוצאה מכך נוצרים במבנים בהם הקרקע חופה ביריעות פוליאיתילן תנאי מיקרואקלים המתאימים פחות להתפתחות מחלות שמים חופשיים חיוניים להתפתחותן.

לאחר הבנת המנגנון באמצעותו חיפוי קרקע בפוליאיתילן השפיע על תנאי המיקרואקלים במבנה פיתחנו מודל להערכת השפעת החיפויים על טמפרטורת הקרקע במבני גידול עם חיפויי קרקע שונים או עם קרקע חשופה. לאחר אימותו, השתמשנו בו לביצוע סידרה של ניסויי הדמיה בהם בחנו את החשיבות של גורמים שונים כמו סוג היריעה המשמשת לחיפוי הקרקע, מצב העננות, עונת השנה ומימדי נוף הצמחים ואת השפעתם על טמפרטורת הקרקע במבני הגידול. מדד זה שימש אותנו כאמצעי לחיזוי השפעת חיפוי הקרקע בפוליאיתילן על יצירת הטל ועל משך רטיבות העלווה. מתוצאות ניסויי ההדמיה עלה שחיפוי הקרקע במבנה הגידול ביריעות פוליאיתילן צפוי להיות כלי יעיל להפחתת הנגיעות במחלות עלווה מוגברות לחות בכל מקום בארץ ובכל עונה (למעט במהלך אירועי גשם). 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 תנאי המיקרואקלים שהתפתחו במבני 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 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 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 בפוליאיתילן השקוף ביאה 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. במהלך המחקר בוצעו על ידנו ועל ידי אחרים ניסויים רבים באזורי הארץ השונים בהם נבחנו השפעת החיפוי על מחלות שונות בגידולים שונים. הבנת המנגנון הפיזיקלי בו משפיע החיפוי על תנאי המיקרואקלים

במבני הגידול מאפשרת להסביר את ההשפעה שהתקבלה על גורמי המחלות השונים בגידולים השונים. החיפוי היה יעיל כנגד מחלות עלווה מוגברות לחות הדורשות משך רטיבות עלווה ארוך (8-10 שעות רטיבות רצופה) כמו כימיון, עובש אפור או עובש עלים. יעילותו הייתה פחותה, ולעיתים הוא לא היה יעיל כלל כנגד מחלות הדורשות משך רטיבות עלווה קצר להתפתחותן (1-3 שעות) כמו כשותית במלפפונים, או כנגד מחלות בהם אתר ההדבקה ייחודי (כמו עובש אפור בבזיל שם ההדבקה מתרחשה בעיקר בגדמים הנוצרים על הגבעולים לאחר הקטיף) או שישנם גורמים משפיעים אחרים (כמו בליזיאנטוס, בו אתר ההדבקה של העובש האפור הוא העלים התחתונים הנוגעים בקרקע הרטובה). החיפוי לא היה יעיל כנגד פתוגנים שרטיבות העלווה לא מהווה גורם חיוני במחזור החיים שלהן, כמו קימחון או קמחונית. במהלך הניסויים נצפו גם השפעות בלתי צפויות, כמו ההשפעה על מחלת הפתיום במלפפונים. פתיום היא מחלת קרקע וכנראה חימום הקרקע בחלקות שחופו בפוליאאתילן גרם להיווצרות תנאים סב-אופטימליים לגורם המחלה. ממצא בלתי צפוי אחר התקבל מהבקעה שם דיווחו מגדלים על השפעה חיובית של החיפוי על עובש אפור בפלפל שגדל בבתי רשת. הנחת העבודה שלנו הייתה שהחיפוי יהיה יעיל רק במבנים המחופים בפוליאאתילן (חממות ומינהרות עברות). בניסוי שבצענו בבקעה לא התפתחה המחלה ברמות גבוהות מספיק שאיפשרו להסיק מסקנות מהימנות לגבי יעילות החיפוי במבנים אלה.

בנוסף להשפעת החיפוי על המחלות התברר שלחיפוי יש השפעה משמעותית, חיובית ואף שלילית, על התפתחות הצמחים עצמם. חימום הקרקע פגע בצמחי פלפל שנשתלו בבקעה בסוף הקיץ. הצמחים נפגעו קשות מטמפרטורות הקרקע הגבוהות יותר ששררו מתחת ליריעות הפוליאאתילן. דיווחים על תופעות דומות התקבלו ממגדלי עגבניות מרמת הנגב; גם הם חיפו את הקרקע בשתילות סוף הקיץ. נראה שיש להמנע מכך, או שיש למצוא פתרונות להפחתת חימום הקרקע בתקופה החמה (כמו יצירת חורי שתילה גדולים או חיתוך הפוליאאתילן בין השורות בתוך ערוגה וגלגולו). השפעות חיוביות של החיפוי על הצמחים נצפו, נמדדו ודווחו על ידי מגדלים בגידולים שונים. חימום הקרקע הגדיל את קצב הצימוח של הגידולים (עגבניות, בזיל, חצילים, מלפפונים) בחורף כשטמפרטורות הקרקע היו נמוכות. החיפוי הגביר את קצב הצימוח והעלה אל היבולים בזיל ובמלפפונים. התברר שחיפוי הקרקע גם הפחית את חומרת נזקי הצינה בבזיל במהלך החורף.

מידע אודות ממצאי המחקר ובעיקר על ההשפעה הדרמטית של החיפוי על מחלת הכימיון בעגבניות נפוצו במהירות. בניסוי השדה שבצענו ביקרו עשרות אם לא מאות מבקרים בניהם חוקרים, מדריכים וחקלאים. האחרונים יישמו את הטכנולוגיה במשקיהם עוד לפני שהמחקר הסתיים ודווח רשמית על הממצאים. חיפוי קרקע בפוליאאתילן הפך במהירות לחלק אינטגרלי של ממשק גידול חממות העגבניה; אלה המגודלות בשיטות אורגניות וגם אלה המגודלות בשיטות קונבנציונאליות. חלק ממגדלי הבזיל נהגו לחפות את הקרקע ביריעות פוליאאתילן עוד לפני המחקר הנוכחי, אך טכנולוגיה זו מומלצת עתה על ידי שרות ההדרכה והמקצוע כחלק מממשק הגידול. ניתן לראות יותר ויותר מבנים בהם מגודלים גידולים אחרים בהם הקרקע מחופה ביריעות פוליאאתילן.

4. פרוט מלא של הפרסומים המדעיים

4.1. בעל פה

במהלך המחקר דווח על ממצאי המחקר בפורומים שונים בארץ ובעולם. בחלק מהמקרים ניתנו הרצאות שעסקו רק בנושא המחקר (ימי עיון למגדלים, למדריכי שה"מ ולאחרים). לדוגמא, דווח על הממצאים ביום עיון של מדריכי פרחים וירקות של שה"מ שנערך בבית דגן בתאריך 6 למרץ 2008. וביום עיון לחוקרים ומדריכים ממדינות דרום אמריקה שאורגן על ידי חברת פלסטיק גניגר שהתקיים בבית דגן בתאריך 18 למרץ 2003. במקרים אחרים נכללו חלק מהממצאים בהרצאות שעסקו בגישות לא-כימיות להתמודדות עם מחלות צמחים. כך למשל דוחח על ממצאי המחקר בכינוס השנתי של הוועידה הפיטופתולוגית הישראלית שנערך בבית דגן ב-5-4 לפברואר, 2008;

בכינוס הבינלאומי השנתי של GILB (העוסק במחלת הכימיון בתפוחי אדמה ועגבניות) שהתקיים בביג'ין, סין בין התאריכים 3-6 למרץ 2008. הרצאה דומה תנתן בכינוס הארבע-שנתי של החברה העולמית לפיטופתולוגיה (ISPP) שיתקיים בטורינו, איטליה, בין התאריכים 24-29 לאוגוסט.

4.2. בכתב

זיו, ג. 2007. 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.

Cohen S., Ziv, G., Grava, A, Elad, Y. and Shtienberg, D. (2006) Influence of polyethylene mulch on night microclimate, dew point and *Phytophthora infestans* infection in non-heated tomato greenhouses in southern Israel. *Acta Horticulturae*. 718: 277-282.

4. הבעות תודה

למחקר זה תרמו רבים שאינם נכללים ברשימת החוקרים השותפים בהצעת המחקר. ברצוננו לציין את שמותיהם ולהודות להם על תרומתם ועל כך שאיפשרו לנו להשלים את המחקר על פי התוכנית, ומעבר לכך. גל זיו ביצע את עבודת המוסמך שלו בהנחיית שבתאי כהן ודני שטיינברג. הוא פיתח את המודל לבחינת השפעת החיפויים על תנאי המיקרוקלים במבנה, וכל התוצאות המוצגות בדו"ח בנושא זה נכללו בעבודת הגמר שלו. בחלק זה של המחקר היה שותף גם אברהם גרווה מהמכון לקרקע ומים במינהל המחקר החקלאי. לניסוי השדה הרבים שבוצעו במהלך המחקר שותפים דליה רב דוד, מנחם בורנשטיין וחיים וינטל מהמכון להגנת הצומח ממינהל המחקר החקלאי. מרבית הניסויים בוצעו בחוות הבשור והצלחתם היא תוצאה של כושר הביצוע של אנשי החווה ברשותו של אלי מתן. את הניסויים בחוות הבשור ניהלו וביצעו חנה יחזקאל, ליאנה גדות ודוד שמואל. תודתנו נתונה להם. בצענו גם ניסוי בחוות גלגל שבבקעה שבניהולה של זיוה גלעד. בניסוי זה השתתפו צ'ומי מהחווה ותמר אלון משה"מ. נורית שפירא ודר' שמעון פיבוניה ממו"פ ערבה ורוחי רבינוביץ ממו"פ בית שאן בחנו את יעילות החיפוי בניסויים שונים ובאדיבותם איפשרו לכלול חלק ממצאי הניסויים שלהם בדו"ח זה. בניסוי בחוות עדן היה שותף גם דר' אורי ירמיהו ממינהל המחקר החקלאי. המחקר מומן באופן חלקי על ידי שולחן מגדלי הירקות של מועצת הצמחים. תודתנו נתונה להם.

6. נספחים

[החומר המפורט להלן הועתק כלשונו מעבודת הגמר של גל זיו. המקורות המצוטטים מופיעים בעבודה עצמה]

6.1. חישובים

6.1.1. 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 מטמפרטורות 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 ; ו- C הם קבועים לגובה פני הים (17.5, 613.75, 240.97, בהתאמה); T_a היא טמפרטורת האוויר היבש בגובה 2 מטר ($^{\circ}\text{C}$); ו- T_w היא טמפרטורת האוויר הלח בגובה 2m ($^{\circ}\text{C}$).

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 ($^{\circ}\text{C}$); e לחץ אדי המים באוויר (Pa); A ; B ; ו- C הם קבועים לגובה פני הים שערכיהם: 17.5; 613.75; ו-240.97, בהתאמה.

6.1.2. 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 ($^{\circ}\text{K}$).

6.1.3. 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).

$$E_c = R_{nc} - G$$

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.

$$G = c G_r + (1-c) G_p$$

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 ($W m^{-2}$).

6.1.4 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).

$$C(t) = C_0 \exp(-TOR t)$$

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.

$$u = l TOR$$

משוואה 8 :

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

6.2 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. את נתוני הקלט של המודל (טבלה 4) 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 הפוליאאתילן 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 החזויים 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 כיסוי 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 האווירודינמית למעבר חום ואדי מים מפני הקרקע הן שוות (Stanghellini, 1987). ההנחה השנייה הייתה שההתנגדות האווירודינמית 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 בפוליאאתילן הוא אפס.

6.2.1. 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}).

טבלה 4: נתוני הקלט למודל חיזוי טמפרטורת הקרקע במבני הניסוי (בסדר סימן עולה).

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

6.2.2. 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 אטמוספירית 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 (°).

6.2.3. 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.

6.2.4. 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.

6.2.4.1. 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.

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

במשוואה זו: $\tau_{\text{canopy_dif}}$ 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 גל מהשמש בפני הקרקע המחופה והחשופה, נלקח בחשבון שטף הקרינה המפוזרת קצרת גל מתחת לנוף כשטף הקרינה המפוזרת הפוגע בפני הקרקע גם בשביל וגם בשורה בכל השעות היום. לקביעת מאזן הקרינה קצרת גל הכולל בפני הקרקע חובר שטף הקרינה המפוזרת לשטף הקרינה הישירה שחושב בנפרד.

6.2.4.2. קרינה קצרת גל ישירה בפני הקרקע החשופה או לחיפוי

לצורך חיזוי שטף הקרינה קצרת גל 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. שטף הקרינה קצרת גל הישירה המגיע לפני השטח או החיפוי חושב בנפרד לכל סוג אזור (R_{s_path} ; R_{s_row}). שטף הקרינה קצרת גל 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 גל הישירה הכללית המגיע לפני החיפוי או הקרקע החשופה במבנה ($W \text{ m}^{-2}$); c הוא היחס בין רוחב השבילים הכולל במבנה לרוחב המבנה; R_{s_path} הוא שטף הקרינה קצרת גל המגיע לפני השטח בשביל ($W \text{ m}^{-2}$); ו- R_{s_row} הוא שטף הקרינה קצרת גל המגיע לפני השטח בשורה ($W \text{ m}^{-2}$).

שטף הקרינה קצרת גל 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 ($\tau_{\text{canopy_dir}}$) 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 ($^\circ$).

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

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 ($\tau_{\text{canopy_dir}}$) נעשתה אמפירית לפי Goudriaan (1977) (משוואה 23).

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

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.

6.2.4.3. קרינה ארוכת גל בפני הקרקע החשופה או החיפוי

לצורך חיזוי שטף הקרינה ארוכת הגל המגיע לפני החיפוי או הקרקע החשופה נעשה שימוש בהנחות 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).

6.3. 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:

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

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

במשוואות אלה: C_i הוא קיבול החום הסגולי ליחידת שטח של שכבת קרקע ($J m^{-2} ^\circ K^{-1}$); C_v הוא קיבול החום הנפחי של הקרקע ($J m^{-3} ^\circ K^{-1}$); λ היא המוליכות התרמית של הקרקע ($W m^{-1} ^\circ K^{-1}$); ω היא התדירות הזוויתית (s^{-1}); $F(T_s)$ היא פונקציית 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 ($^\circ K$).

6.3.1. מאזן הקרינה בפני הקרקע

מאזן הקרינה בפני הקרקע או החיפוי הוא ההפרש בין הקרינה המגיעה מכיסוי המבנה ופוגעת בפני קרקע או ריעת 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 המוחפה בפוליאיתילן שקוף (R_{nTRM_sw}) (משוואה 37) וכסוף (R_{nBIM_sw}) (משוואה 38) והמאזן נטו בפני הקרקע החשופה (R_{nBS_sw}) (משוואה 44) מורכבים מהפרש 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 המוחפה 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 המוחפים ביריעות פוליאיתילן שונות ממשוואות מאזן הקרינה בפני קרקע חשופה. בנוסף לכך, גם סוגי חיפוי קרקע שונים משנים את תכונותיהם הקרינתיות של פני הקרקע המוחפה. 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 ($R_{sw\uparrow}$).

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: $R'_{sw\uparrow}$ ו- $R'_{sw\downarrow}$ 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 המוחפה ביריעת חיפוי כלשהי במבנה גידול.

לצורך הצגת חישוב משוואות מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני החיפוי נשתמש בארבעה משתני עזר (A),

(B, C ו-D) 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 המוחפה (משוואות 30-27) 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, משוואות מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני יריעת חיפוי קרקע כלשהי (משוואה 31) קבלה את הצורה הבאה (משוואה 36):

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

מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני שטח מחופים בפוליאאתילן 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 לפני מקדם ההעברה של החיפוי השקוף לקרינה קצרת גל ($\tau_{TRM_mulch_sw}$).

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

$$/[1 - \rho_{cover_sw} \rho_{TRM_sw} - \rho_{cover_sw} \tau_{TRM_sw}^2 a_{mulch}/(1 - \rho_{TRM_sw} a_{mulch})]$$

במשוואה זו: R_{nTRM_sw} הוא מאזן הקרינה קצרת הגל נטו בפני הקרקע המחופים בפוליאאתילן 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 החזרה של כיסוי המבנה לקרינה קצרת גל; ρ_{TRM_sw} הוא מקדם החזרה 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 פוליאאתילן 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 בפוליאאתילן 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 החזרה של כיסוי המבנה לקרינה קצרת גל; ו- ρ_{BIM_sw} הוא מקדם החזרה 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 ($R_{sw\uparrow}$).

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 ($R_{sw\uparrow}$; $R_{sw\downarrow}$; ו- $R_{n_BS_sw}$) 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):

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

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

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 $R_{lw\uparrow}$. 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 ($R_{lw\downarrow}$; $R_{lw\uparrow}$; ו- $R_{n_mulch_lw}$) לתיאור מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המחופה ביריעת חיפוי קרקע כלשהי במבנה גידול.

לצורך הצגת חישוב משוואות מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני החיפוי (משוואה 47) נשתמש בחמישה

משתני עזר (A, B, C, D, 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, 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, משוואות מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני חיפוי קרקע כלשהו (משוואה 47) קבלו 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 בפוליאיתילן שקוף (T_{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 בפוליאיתילן שקוף ($R_{n_TRM_lw}$) מתואר

במשוואה 51. בתיאור מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני הקרקע המחופה ביריעת פוליאיתילן שקוף יש לקחת בחשבון שהחיפוי אטום לקרינה ארוכת גל.

משוואה 51:

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

$$/(1-\rho_{cover_lw} \rho_{TRM_lw})-\varepsilon_{TRM} \sigma T_{soil_TRM}^4$$

במשוואות זו: R_{nTRM_lw} הוא מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המוחפים בפוליאתילן 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 (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 (K).

מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני הקרקע המחופה בפוליאתילן כסוף מתואר במשוואה 52. בתיאור מאזן הקרינה ארוכת הגל נטו בפני הקרקע המחופה ביריעת פוליאתילן כסוף יש לקחת בחשבון שהחיפוי אטום לקרינה ארוכת גל.

משוואה 52:

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

במשוואות זו: R_{nBIM_lw} הוא מאזן הקרינה ארוכת הגל בפני הקרקע המוחפים בפוליאתילן 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 (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 (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. 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 (K); ε_{BS} הוא מקדם האמסיביות של הקרקע החשופה; T_{sBS} היא טמפרטורת פני הקרקע החשופה (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 ($R_{lw\downarrow}$; $R_{lw\uparrow}$; ו- $R_{n_BS_lw}$) 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):

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

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

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 החזרה 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 החזרה של הקרקע החשופה לקרינה ארוכת גל.

6.3.2. 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 בפוליאיתילן 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 בפוליאיתילן שקוף ($W m^{-2}$); ρ_{air} היא צפיפות האוויר ($kg m^{-3}$), $C_{p_{air}}$ הוא קיבול החום הסגולי של האוויר בלחץ קבוע ($J m^{-3} K^{-1}$); T_{aTRM} היא טמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע מחופה בפוליאיתילן 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 בפוליאיתילן כסוף ($W m^{-2}$); ו- T_{aBIM} היא טמפרטורת האוויר במבנה עם קרקע מחופה בפוליאיתילן 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 ($Pa K^{-1}$); 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 (z) 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.

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

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

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

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

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.

6.3.3. פתרון מאזן האנרגיה של הקרקע לחיזוי טמפרטורת הקרקע

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

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

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