

חיטוי סולרי ותוספים אורגניים לקרקע: השפעה על קטילת פגעי

קרקע ועל אוכלוסיית המיקרואורגניזמים בה

עבודת גמר

מוגשת לפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה

של האוניברסיטה העברית בירושלים

לשם קבלת תואר "מוסמך למדעי החקלאות"

על ידי

איל קליין

יולי 2004

רחובות

אב תשס"ד

עבודה זו נעשתה בהדרכתם של

ד"ר אברהם גמליאל, המעבדה לחקר היישום של שיטות
הדברה, המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי,
מרכז וולקני, בית דגן.

פרופ' יעקב קטן, המחלקה למחלות צמחים
ומיקרוביולוגיה, הפקולטה למדעי החקלאות, המזון
ואיכות הסביבה ברחובות.

עבודה זו מוקדשת לזכרם של

בתיה ואריה קליין

מזל ואליהו קריספין

**Soil solarization and organic amendments: effects on
control of soilborne plant pathogens and soil
microorganismes**

M.Sc. Thesis

**Submitted to the Faculty of Agricultural, Food and Environmental
Quality Sciences of The Hebrew University of Jerusalem**

by

Eyal Klein

Rehovot

July 2004

This work was carried out under the supervision of:

Dr. Abraham Gamliel,

**Laboratory for Research on Pest Management Application,
Institute for Agricultural Engineering, Agricultural Research
Organization, The Volcani Center, Bet Dagan.**

Prof. Jaacov Katan,

**Department of Plant Pathology and Microbiology, The Hebrew
University of Jerusalem, Faculty of Agricultural, Food and
Environmental Quality Sciences, Rehovot.**

הבעת תודה

עבודה זו יצאה לאור בסיועם של אנשים רבים, שתרמו מחשבה, ידע, יזע, מרץ, זמן, תשומת לב ומילה טובה, שאיפשרו לי לסיים בהצלחה מחקר זה.

ראשית, תודה למנחי העבודה :

לפרופ' יעקב קטן - על הזכות להימנות עם תלמידיך, על הדרכה מקצועית, שופעת ידע, מלווה בהתלהבות ורעיונות חדשים ובצידם דאגה ואיכפתיות.

לד"ר אברהם גמליאל - על הוראה יוצאת דופן בכל תחום, הקניית כלים לניתוח אובייקטיבי והתמקדות בעיקר ודאגה בסדר גודל אבהי. תודה על דוגמה אישית והשקעה שיוצרת סביבת עבודה איכותית וייחודית.

תודה למשפחת "המעבדה לחקר היישום של שיטות הדברה" :

למרים אוסטרוייל - על הדרכתך המסורה בנושאים נדיפים, השותפות בניסויים, העידוד והידידות.

ליהודית ריבן ולברכה שטיינר - על הסיוע שאיפשר הצבת ניסויים מורכבים, על עצה ועזרה בכל זמן.

לויקטור זילברג - המהנדס שחושב עם פטיש, שהרכיב, פירק, בנה וחפר בהתאם לכל רעיון ושגיון.

למרינה בניחיס - על השעות הרבות בממלכת המיקרובים, בישול, מיהול ודירגול, באווירה טובה וחברית.

לד"ר פייטרו די-פרימו - על עצות בתחום המיקרוביאל.

למורן סיטי - על חברות, שיתוף פעולה ועל הסיוע בשדה ובמעבדה.

לשחף טריקי - על הנכונות לעזור בכל עת, על תרומתך הרבה לעבודה זו ועל חברות אמת.

תודה לרבים וטובים שסייעו בניסויי השדה והמעבדה :

לחקלאים ממחולה: השותפות יע"ף- יהודה, עמוס ופורי ולמשה אלפרט - על היותכם דוגמה לחקלאות מזן מיוחד ועל תרומתכם למחקר זה מכל הלב.

ליוסף גרינשפון - על הסיוע בהקמה ובתחזוקה האלקטרונית של המערכת במעבדה.

למוטי ברק - על ייעוץ בתחום ה"מיקרו איורור".

ליוסק'ה גוטליב ולצוות חוות הפקולטה ברחובות, **לעמי מדואל** ולצוות מו"פ ערבה צפונית בכיכר סדום.

לעופר היימן, איציק פרץ ואורנה אוקו, החברים בנוף החקלאי.

למשתלת "שורשים" ולמשתלת "חישתיל" - על אספקת שתילי העגבניות בכל עת.

לד"ר אלי פוטויבסקי - על אספקת דוגמאות התבלינים לניסויים הראשוניים.

לד"ר הילארי פוט - על הייעוץ הסטטיסטי.

תודה מיוחדת לכל משפחתי, על התמיכה, העידוד והעזרה :

ראשית להוריי- **שוש ואיציק קליין**, על הכל ומעבר לכך ; **לליאת, לאורן ולילך קליין, לאני וד"ר שלמה פסיק, לברטה איצקוביץ, לדפנה וגיל גלאובך** ואחרונים- אוהבים וסבלניים, **לסיגל, רעיית, ליונתן ודניאלה**, ילדיי.

עבודה זו מומנה בחלקה ע"י מלגות מטעם הקרן ע"ש ד"ר **אבי גרינשטיין** ז"ל, הקרן ע"ש ד"ר **נאוה אשד** ז"ל וקרן **מנהל המחקר החקלאי**, מרכז וולקני.

רשימת קיצורים

ג'- גרם
טמפ'- טמפרטורה
לי- ליטר
מ"ג- מיליגרם
מ"ל- מיליליטר
מ"מ- מילימטר
מס'- מספר
מ"צ- מעלות צלזיוס
מ"ר- מטר רבוע
סל"ד- סיבובים לדקה
ס"מ- סנטימטר
סמ"ק- סנטימטר מעוקב
ק"ג- קילוגרם

Amend- Amended Soil
AUVC- Area Under Viability Curve
CFU- Colony Forming Units
cm- Centimeter
DGR- Decreased Growth Response
FDA- Fluorescein diacetate
FORL- *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*
g- Gram
Heated- Heated Soil
IGR- Increased Growth Response
M- Molar
min- Minute
ml- Mililiter
µg- Microgram
µm- Micrometer
nm- Nanometer
Nt- Not tested
PCNB- Pentachloronitrobenzene
PDA- Potato Dextrose Agar
PDMS- Polydimethylsiloxane
ppm- Parts per million
PVC- Polyvinilchloride
RAUVC- Relative Area Under Viability Curve
Rt- Retention time
SD- Standard Deviation
SDmax- Maximal Standard Deviation
Solarized- Soil Solarization
SPME- Solid Phase Micro Extraction

תוכן עיניינים

עמוד מס'

1.....	מבוא	1
2.....	סקירת ספרות	2
11.....	חומרים ושיטות	11
23.....	תוצאות	23
23.....	1. חיטוי סולרי בשילוב תוספים אורגניים, בשדה	23
23.....	1.1 ניסויי שדה 2002	23
23.....	1.1.1 התחממות הקרקע במהלך החיטוי הסולרי	23
25.....	1.1.2 ריכוז החמצן באווירת הקרקע	25
27.....	1.1.3 pH תמיסת הקרקע	27
27.....	1.1.4 פעילות מיקרוביאלית כללית	27
29.....	1.1.5 השפעת חיטוי סולרי משולב עם תוספים אורגניים על חיות פגעי קרקע	29
29.....	1.1.5.1 קטילת <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>radicis-lycopersici</i>	29
32.....	1.1.5.2 קטילת <i>Macrophomina phaseolna</i>	32
32.....	1.1.5.3 קטילת <i>Rhizoctonia solani</i>	32
33.....	1.1.5.4 קטילת <i>Verticillium dahliae</i>	33
33.....	1.1.5.5 קטילת נמטודה יוצרת עפצים <i>Meloidogyne javanica</i>	33
36.....	1.1.6 הערכת אוכלוסיות המיקרואורגניזמים בקרקע	36
36.....	1.1.6.1 הערכת אוכלוסיית הפטריות בקרקע	36
36.....	1.1.6.2 הערכת אוכלוסיית החיידקים בקרקע	36
36.....	1.1.7 תרכובות נדיפות בפאזה הגזית בקרקע	36
36.....	1.1.8 תרכובות פיטוטוקסיות בקרקע עם תוסף אורגני לאחר חיטוי	36
39.....	2. מערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים	39
39.....	2.1 משתנים מבוקרים במערכת המעבדתית	39
39.....	2.1.1 משטר חימום הקרקע והאווירה שמעליה במיכל הקרקע	39
39.....	2.1.2 תכולת הרטיבות בקרקע	39
40.....	2.1.3 תנאי איורור הקרקע	40
41.....	3. ניסויים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים	41
41.....	3.1 חימום קרקע ותוסף אורגני בתנאי איורור שונים	41
42.....	3.1.1 תרכובות נדיפות בתנאי איורור שונים	42
47.....	3.1.2 קטילת פגעי קרקע	47
47.....	3.1.2.1 קטילת <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>radicis-lycopersici</i>	47
50.....	3.1.2.2 קטילת <i>Rhizoctonia solani</i>	50
53.....	3.1.2.3 קטילת נמטודה יוצרת עפצים <i>Meloidogyne javanica</i>	53
54.....	3.1.3 פעילות מיקרוביאלית כללית בקרקע	54

55.....	3.1.4 השתנות אוכלוסיות המיקרואורגניזמים בקרקע
55.....	3.1.4.1 השתנות אוכלוסיית הפטריות בקרקע
56.....	3.1.4.2 השתנות אוכלוסיית החיידקים בקרקע
57.....	3.1.5 השתנות pH תמיסת הקרקע
58.....	3.1.6 תרכובות פיטוטוקסיות בקרקע עם רוקולה לאחר הטיפול במערכת המעבדתית...
	3.1.7 דיכוי (Suppressiveness) נמטודות יוצרות עפצים בקרקע לאחר שטופלה
58.....	במערכת המעבדתית
	3.2 סריקת תוספים אורגניים לקרקע במערכת המעבדתית לחימום קרקע
60.....	בתנאי איוורור מבוקרים והשפעתם על חיות פגעי קרקע
61.....	4. תצפיות
63.....	דיון
76.....	סיכום
78.....	רשימת ספרות
86.....	נספח 1: ניתוח סטטיסטי- ניסויי שדה יולי 2002.
	נספח 2: ניתוח סטטיסטי- ניסויים במערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איוורור
91.....	מבוקרים
	תקציר באנגלית

מבוא

גורמי פגעים שוכני קרקע פוגעים בגידולים חקלאיים בשלבים שונים וגורמים לפחיתה ביבול עד השמדתו. פגעים אלה מאופיינים בכושר הישרדות גבוה, הנובע מייצור גופי קיימא רבים, עמידים לעקות, בעלי מנגנוני נביטה מתוחכמים ומופצים באמצעים מגוונים בעומק הקרקע ובמרחב. הדברתם קשה ומושגת לרוב באמצעות קיטור, או איוד תכשירי הדברה רעילים מאד, החודרים לעומק הקרקע. במקביל לפעולת ההדברה, נפגעות גם אוכלוסיות מיקרוביאליות חיוביות ולעיתים נותרים בקרקע חומרים רעילים שעלולים לפגוע בגידול. הדאגה הגוברת בעולם בנושאי איכות הסביבה גוררת דרישה להפחתת השימוש בתכשירים בעלי השפעות סביבתיות מזיקות. כל אלה יוצרים צורך גובר בפיתוח אמצעי הדברה שיהיו רעילים פחות לסביבה ולמיישם מחד, ומאידך יתנו מענה למגוון רחב של פגעים. חיטוי סולרי של הקרקע הוא אמצעי חיטוי מתון להשגת הפחתה יעילה באוכלוסיות הפגעים ובמקביל השגת שיווי משקל ביולוגי חדש בקרקע ועידוד הגידול. ניתן לשלב את החיטוי הסולרי באמצעי הדברה נוספים, על מנת להגדיל את טווח הפגעים המודברים ולשפר את יעילותו בתנאים תת אופטימליים. שילוב אמצעי הדברה להפחתת אוכלוסיות הפגעים (Integrated Pest Management) חיוני להתמודדות עם מגוון פגעים לאורך זמן. אחד האמצעים שנמצאו יעילים בשילוב עם חיטוי סולרי הוא הצנעת תוספים אורגניים לקרקע לפני החיטוי. תוספים אלה (פסולת אורגנית, שיירי צמחים ועוד), מתפרקים בקרקע במהלך החיטוי ומשחררים תרכובות קטלניות לפגעים. אולם, ההדברה המושגת באמצעות רבים מהתוספים המקובלים אינה הדירה ובמקרים מסויימים אף מתקבלת הגברת אוכלוסיות הפגעים. בחינת יעילות התוספים האורגניים במעבדה, נעשית באמצעים אשר אינם משקפים את התנאים בשדה ולכן לא תמיד נכון להקיש על יעילות ההדברה בשדה. לפיכך, מתחייב פיתוח אמצעי יעיל לבחינת התוסף האורגני, לפני שניתן ליישמו באופן מסחרי. בארץ מתפתח ענף גידול התבלינים, המאופיין במגוון רחב של מוצרים, שניתן לגדלם במחזור גידולים. גידול תבלינים מאופיין בשיירי צמחים רבים שאינם מטופלים, או שנשרפים בתום הגידול. שיירים אלה עשויים לשמש תוספים לקרקע, לפני חיטוי סולרי שמבוצע לקראת הגידול הבא. שימוש זה, המאפשר מיחזור פסולת חקלאית כמו גם פסולת אורגנית ממקורות נוספים, עשוי להוות אמצעי הדברה יעיל בחקלאות האורגנית ולתרום להפחתת השימוש בתכשירי הדברה מסוכנים.

מטרות העבודה:

1. בחינת יעילות הצנעת שיירי גידול תבלינים, המכילים תרכובות ביוצידיות שונות, בשילוב חיטוי סולרי, לקטילת פגעי קרקע שונים.
2. לימוד הגורמים המעורבים בקטילה והתנאים לשיפורם, במערכת מבוקרת, במטרה לספק אמצעי הדברה המשלב מחזור גידולים יעיל להדברת פגעים, הדברה פיזיקלית והדברה ביולוגית לעידוד חקלאות בת קיימא.

סקירת ספרות

1. פגעים שוכני קרקע והדברתם

פגעים שוכני קרקע הם גורמים ביוטיים, שמחזור חייהם כולל נוכחות פעילה בקרקע, או כגופי השתמרות (Resting structures), המאפשרים קיום בתנאי סביבה עוינים (קטן וחבריו, 1996). אורגניזמים אלה עלולים לגרום לפגיעה ביבול חקלאי באופן ישיר- ע"י גרימת מחלות בגידול, או באופן עקיף- ע"י תחרות על משאבים שונים או מניעתם מהגידול החקלאי. פגעים שוכני קרקע כוללים מחוללי מחלות שורש- פתוגנים, החודרים לצמח דרך חלקיו התת קרקעיים וגורמים פגיעה ביבול (לעיתים עד כדי השמדתו) ובאיכותו. מחלות שורש כוללות מחלות נבילה, מחלות נבטים ורקבונות שורשים. גורמים נוספים עלולים להוות פגעי קרקע- דוגמת עשבים רעים, חרקים ואחרים.

ארבע גישות להדברת פגעי קרקע ולהפחתת נזקיהם, מוכרות בחקלאות:

א. הדברה באמצעים אגרוטכניים- פעולות הכוללות תברואה, בחירת סדר גידולים ומועדי זריעה, תכנון השטח תוך התחשבות בגידולים שכנים, בחירת שיטות עיבוד, השקייה והזנה מינרלית, שיש בהן כדי לפגוע בפגעים, בתפוצתם, או לחזק את כושר עמידות הגידול כנגדם (פלטי וחבריו, 1998; Baker & Cook, 1974).

ב. חיטוי כימי- גישה המבוססת על החדרת תכשירי הדברה רעילים מאד לקרקע. יישום מגוון וכולל החדרה לקרקע כגז, נוזל, מוצק, או כתכשירים לציפוי זרעים. התכשירים הנפוצים ביותר לחיטוי קרקע הם חומרי האיוד- חומרים כימיים בעלי לחץ אדים גבוה, המקנה כושר חדירה רב לקרקע ומאפשר יישום בתנאי טמפ' מגוונים. מתיל ברומיד, כלורופיקרין, פורמלין ומתאם סודיום הם חלק מהתכשירים המיושמים כיום. השפעותיהם הסביבתיות השליליות גורמות להגבלת השימוש בהם (קטן, 1998).

ג. חיטוי פיזיקלי- גישה זו מבוססת על חימום הקרקע לטמפרטורות קטלניות לפגעים באמצעות השקייה במים רותחים (Stapleton & Heald, 1991), או יישום קיטור בטמפ' 100 מ"צ לקרקע יבשה (Runia, 2000). שיטה זו אינה ברינית, פוגעת בכל אוכלוסיות המיקרואורגניזמים וגורמת שיחרור חומרים פיטוטוקסיים. כמו כן עלול להיווצר ואקום ביולוגי, שבו, בהעדר מיקרואורגניזמים מתחרים או אנטגוניסטים, ישנה התבססות מהירה של פגעי קרקע. עירבוב קיטור עם אוויר מקטין סכנות אלה היות והחימום המתקבל הוא ל- 70 מ"צ (Runia, 2000). קרינת השמש, או קרינה ממקורות אחרים, מהוות אמצעי פיזיקלי נוסף לחיטוי קרקע (קטן, 1998; Katan, 1981; Katan, 1998; Gamliel et al., 1997; Ruben & Benjamin, 1983).

ד. הדברה ביולוגית- כוללת שימוש באורגניזמים אנטגוניסטים לפגעים. האנטגוניזם נובע בד"כ מהגורמים הבאים: תחרות על מזון או על מרחב, טפילות, הפרשת חומרים מעכבים, השראת עמידות בצמח הפונדקאי, היפויורולנטיות, או שינוי בדפוסי פתוגניות. הדברה ביולוגית מתבטאת בהפחתת רמת המידבק הקיים בקרקע, או דיכוי של אילוח הקרקע בפגעים (אלעד, 1998). אחד האמצעים להשגת הדברה ביולוגית הוא שינוי תנאי הסביבה, לתנאים המעודדים התבססות מדבירים ביולוגיים, למשל ע"י הצנעת שיירי צמחים מתאימים בקרקע, או באמצעות חיטוי קרקע (Garrett, 1965).

2. חיטוי סולרי

חיטוי סולרי של הקרקע היא שיטת הדברה באמצעים פיזיקליים, במהלכה מתחממת הקרקע במחזור יומי כתוצאה מקרינת השמש. השיטה תוארה לראשונה ב-1976 (Katan *et al.*, 1976) וכוללת חיפוי של קרקע רטובה ומעובדת ביריעות פוליאתילן שקוף, במהלך חודשי השנה החמים. הקרקע מתחממת ישירות מקרינה גלובלית (0.3-4 מיקרומטר); החום מולך לעומק הקרקע ע"י המים, כך שבפני השטח מתקבלות טמפ' מירביות, ברמות קטלניות לפגעי קרקע (כ- 50 מ"צ בעומק 5 ס"מ) וככל שמעמיקים יש ירידה בטמפ' מקסימליות, הן מושגות מאוחר יותר ביממה ונותרות זמן ממושך יותר (Mahrer, 1991). קרקע בקיבול שדה אופטימלית לתהליך, היות ורטיבות דרושה להולכת החום, להגברת רגישות הפגעים ומאפשרת פעילות ביולוגית (Katan *et al.*, 1976). במהלך החיטוי הסולרי מתרחשים בקרקע שינויים פיזיקליים, כימיים וביולוגיים, שגורמים לקטילה יעילה של פגעים (Davis, 1991), או החלשתם (Lifshitz *et al.*, 1983), שיפור תנאי הגידול ודיכוי התבססות מחודשת של הפגעים בקרקע (Katan & DeVay, 1991).

חיטוי סולרי נמצא יעיל כנגד טווח רחב של פגעים, ביניהם פטריות, חיידקים, נמטודות ועשבים (Katan, 1987; Porter & Merriman, 1983; Stapleton & DeVay, 1983; Rubin & Benjamin, 1984). פגעים אלו נקטלים בשכבות הקרקע העליונות, בהן מתקבלות טמפ' קטלניות; בשכבות עמוקות יותר מתקבלות טמפ' תת-קטלניות, שגורמות להחלשת הפגעים או כושרם הפתוגני, במקביל להגברת אוכלוסיות מיקרוביאליות אנטגוניסטיות לפגעים. אוכלוסיות אלו עשויות, בנוסף להיותן גורמי הדברה ביולוגיים, גם לדכא התבססות מחודשת של הפגעים בקרקע המחוטאת (Arora *et al.*, 1996; Greenberger *et al.* 1987; Katan, 1981; Katan *et al.*, 1983; Lifshitz *et al.*, 1983; Martyn & Hartz, 1981; Pullman *et al.*, 1986). כמו כן, חיטוי סולרי עשוי לגרום ל- Increased growth response (IGR), בעקבות שיפור מבנה הקרקע, הגדלת זמינותם של גורמי הזנה ועידוד התבססות מיקרואורגניזמים חיוביים להתפתחות הצמח (Chen & Katan, 1980; Davis & Sorensen, 1986). כיום שיטה זו משמשת לחיטוי שטחים פתוחים, בתי צמיחה ומצעים מנותקים, בארצות רבות בעולם (Katan & DeVay, 1991).

3. תוספים אורגניים

רקמות צמחיות במצבים שונים- חיות, מתות או מתפרקות, מהוות מרכיב פיזיקלי, כימי וביולוגי חשוב בקרקע (Linderman & Gilbert, 1975). שיירי צמחים, כמו גם חומרים אורגניים אחרים בקרקע כגון זבל בע"ח, קומפוסט וכיו"ב, עשויים לגרום לשינוי בתנאי הסביבה (תאחיזת מים, טמפ', pH ואיזור) ולהשפעות נרחבות על האוכלוסייה המיקרוביאלית בקרקע; הפעילות המיקרוביאלית מוגברת, ישנה תחרות על מקורות מזון, חמצן ובית גידול ותנאים אלו עשויים להיות אנטגוניסטים לפגעים (Baker & Cook, 1974). למרכיבים כימיים שנוצרים מהתפרקות החומר האורגני, השפעות שונות על האורגניזמים בקרקע, ביניהם פגעי קרקע (Linderman & Gilbert, 1975). התרכובות הנדיפות המשתחררות מהחומר האורגני, או נוצרות במהלך פירוקו, מתאפיינות בלחץ אדים גבוה יחסית בטמפ' פיזיולוגיות, בכושר תנועה גבוה בקרקע, עשויות להשרות תהליכים ביולוגיים ולווסת תהליכים מטבוליים, למשל פונגיסטזיס, גם בריכוזים נמוכים ביותר, דרך הפאזה הגזית או תמיסת הקרקע, הרחק ממקום היווצרותן (Linderman & Gilbert, 1975).

חשיפת מיקרואורגניזמים בקרקע לתרכובות נדיפות מאספסת גרמו להגברת נשימה, לעלייה בצריכת חמצן ולגידול במספר החיידקים. במקביל התקבלה קטילה של פטריות פתוגניות, דוגמת *Verticillium dahliae* ו-*Sclerotium rolfsii* (Linderman & Gilbert, 1975). הפחתת ריכוז התרכובות או הקטנת משך החשיפה, גרמו לנביטת הפתוגנים ובהמשך לפחיתה באוכלוסייה שנבטה (Gilbert & Griebel, 1975; Linderman & Gilbert, 1975). זוהו תרכובות נדיפות נייטרליות, ביניהן אלדהידים ואלכוהולים שונים. אצטאלדהידים הגבירו אוכלוסיות של פטריות בקרקע ומתאנול- אוכלוסיות של חיידקים. שילובם הגביר באופן סינרגיסטי בקטריות ואקטינומיצטים. אתאנול ואצטאלדהיד גרמו להגברת זמנית בנשימת מיקרואורגניזמים ולניצול תרכובות אלו, ללא שינוי בגודל האוכלוסייה (Griebel & Owens, 1972). ספונינים שונים שמצויים באספסת עיכבו נביטה וצימוח תפטיר של פטריות שונות (Zentmyer & Thompson, 1967). נביטת קשיונות של *Sclerotinia minor* גברה כאשר נחשפו לתרכובות נדיפות מעלי בוטנים שיובשו, נטחנו והורטבו במים (Hau et al., 1982). בדומה, נביטת קשיונות של *S. rolfsii* גברה בנוכחות תרכובות נדיפות מרקמות צמחים שיובשו והורטבו מחדש, ביניהם אספסת, תירס, בוטנים ואחרים, אך לא מרקמות טריות של בוטנים שלא עברו ייבוש (Beute & Rodriguez-Kabana, 1979).

מרכיב נדיף אחר באווירת הקרקע, שנוכחות חומר אורגני וחנקן כללי בקרקע מעודדים את ייצורו, הוא אתילן. אתילן נוצר ע"י צמחים וכן כתוצאה מפעילות מיקרוביאלית בתנאים אארוביים או אנארוביים (Linderman & Gilbert, 1975; Smith, 1973). פונגיסטיזיס ב-*S. rolfsii* מושפע מאיזון שבין הנוטריאנטים בקרקע שמהווים סטימולטורים, לבין האתילן שמהווה גורם מדכא (Smith, 1973). אתילן בכמויות נמוכות, שעשוי להגביר נביטת זרעי עשבים שונים, נמצא באווירת הקרקע במהלך החיטוי הסולרי (Rubin & Benjamin, 1984). תוספת פפטון לקרקע גרמה לעלייה ניכרת בכמות האתילן ומגמה זו הוגברה באמצעות חימום הקרקע (גרינברגר, 1984).

3.1 תוספים משחררי אמוניה

תוספים אורגניים עתירי חלבונים מפורקים בקרקע ע"י מיקרואורגניזמים וגורמים לשחרור אמוניה (NH_3), Nitrous Acid (HNO_2) ותרכובות נוספות, בהתאם ל-pH שבו מתרחש הפירוק (Chang & Chang, 1999; Gilpatrick, 1969; Henis & Chet, 1968; Punja & Grogan, 1982; Tenuta & Lazarovits, 1999; Tsao & Oster, 1981). ליחס C/N בתוסף האורגני יש השפעה על כמות התרכובות החנקניות שיתקבלו בתהליך הפירוק (Kirchmann & Witter, 1989; Zakaria et al., 1980) ועל הדברה ביולוגית של פגעים (Garret, 1965; Henis & Chet, 1968), אולם הוא לא הגורם היחיד שמשפיע (Lewis & Papavizas, 1974). תוצרי הפירוק במצב לא-יוני, דוגמת NH_3 , חודרים בקלות דרך ממברנות ביולוגיות ופוגעים באוכלוסיות מיקרוביאליות שונות, ביניהן פתוגנים שוכני קרקע. אמוניה זוהתה כגורם פונגיסטי בקרקע טבעית בתנאים בסיסיים (Ko et al. 1974) וכאשר הוספה לקרקע נמצאה פונגיצידיה (Henis & Chet, 1967; Setua & Samaddar, 1980). במצב יוני, אמוניום- NH_4^+ או ניטריט- NO_2^- , משבשים את חדירות הממברנות, אם כי אמוניום עודד אוכלוסיות מיקרוביאליות בקרקע בתנאים מסויימים (Chang & Chang, 1999; Lazarovits, 2001). לניטרט לא נמצאה השפעה מעכבת על נביטת קשיונות של *S. rolfsii* (Punja & Grogan, 1982; Tenuta & Lazarovits, 1999). Tenuta & Lazarovits (1999) תארו תהליך שבו הפרשת אמוניה לתמיסת

הקרקע, במהלך פירוק מיקרוביאלי של תרכובות עתירות חנקן, גוררת עליה בריכוז יוני אמוניום שאינם רעילים ועלייה ב- pH התמיסה. כאשר pH התמיסה עולה מעל 8.5, חלק מיוני האמוניום הופכים חזרה לאמוניה רעילה, אולם תהליך זה מתרחש בעיקר בקרקעות עם תכולת חומר אורגני קטנה מ- 1.7%. לעומת זאת, הפיכת האמוניום לניטריט ולאחר מכן לניטרט בתהליך ניטריפיקציה בקטריאלי, גורם ל- pH הקרקע לרדת. ב- $pH < 5.5$ הופך הניטריט ל- HNO_2 , תרכובת רעילה לפתוגנים רבים וכן לזרעים של עשבים ושל גידולים שונים (Tenuta & Lazarovits, 1999).

דוגמאות לתוספים אורגניים משחררי אמוניה הן קמח בשר ועצמות, קמח דם, קמח נוצות, קמח דגים, קמח גידולי האבסה (אספסת, ומיני דגן) וקמח גידולי תעשייה, לאחר שהופק מהם השמן (סויה, קנולה, פישתה וכותנה). יעילותם של תוספים אלה ואחרים בהדברת פגעי קרקע הוכחה במספר רב של עבודות (Huang et al., 2002; Lazarovits et al., 1999; Lewis & Papavizas, 1977; Singh et al., 1983; Tenuta et al., 1997; Tenuta & Lazarovits, 1999; Zakaria et al., 1980; Zentmyer & Thompson, 1967), אם כי נמצאו מקרים בהם הצנעת תוסף אורגני בקרקע גרמה להגברת אוכלוסיית הפגע ו/או שיעור המחלה (Keinath et al., 2003; Lumsden et al., 1983; Martin & Hancock, 1986).

3.1.1 זבל בעלי חיים

Tsao & Oster (1981) מצאו שהצנעה של זבל עופות או אוראה בקרקע טבעית, גרמה ל- pH תמיסת הקרקע לעלות מרמה נייטראלית, למעל 8.6 ולאחר מכן לרדת לתחום החומצי. באנליזה של החנקן בקרקע, נמצאה התאמה של מגמת ה- pH לתהליכים של אמוניפיקציה וניטריפיקציה. ניסויים *In vitro* באמוניום ומלחי ניטריט הראו שעיכוב נביטת *Phytophthora* קשורה ביונים NH_4^+ או NO_2^- , בריכוזם בתמיסה ושרעילותם של יונים אלו מוגברת ב- pH בסיסי ($pH > 8$) או חומצי ($pH < 6$), בהתאמה. מנגנון העיכוב של יונים אלו קשור בשיבוש חדירות הממברנות של הפטרייה. בתנאי pH אלו, בהם נפוצות יותר הצורות הלא יוניות של תרכובות אלו, NH_3 ו- HNO_2 , נמצא ריכוז יונים שעיכב נביטה (Tsao & Oster, 1981). פליטת אמוניה מזבל עופות הגברה במקביל לירידה ביחס C/N ולעלייה ב- pH (Kirchmann & Witter, 1989).

זבל חזירים עשוי לגרום לפחיתה באוכלוסיות פתוגנים בקרקע באופן דומה לזבל עופות; נמצא שהמרכיב הקטלני העיקרי בזבל חזירים נזלי הוא חומצה אצטית (Lazarovits, 2001). זבל חזירים נזלי נמצא יעיל בהדברת *V. dahliae* ו- *Streptomyces scabies*, ב- $pH < 6$ שבו נוצרו חומצות שומן נדיפות ו- HNO_2 , או ב- $pH > 8$, שבו האמוניה הייתה הגורם הטוקסי העיקרי שנוצר בקרקע. כמו כן תוסף זה עודד את אוכלוסיית המדביר הביולוגי טריכודרמה.

3.2 קומפוסט

קומפוסט הוא תוצר פירוק ביולוגי של חומר אורגני ומשמש זה שנים בחקלאות לטיוב הקרקע (אבנימלך וכהן, 1988), להזנת צמחים, לדיכוי מחלות המועברות בקרקע וכמרכיב אורגני במצעים מנותקים (הדר וכהן, 1996; 1983; Lumsden et al., 1980; Hoitink, 1980). בספרות קיימים ממצאים רבים המצביעים על כושרו של הקומפוסט לדכא גורמי מחלות שונות המועברים בקרקע כגון: *Rhizoctonia solani*, *Pythium aphanidermatum*, ו- *S. rolfisii* (Hoitink & Grebus, 1994). מנגנוני הדיכוי כוללים פגיעה בפוטנציאל האילוח של הפגע (Hoitink, 1980) וגורמי הדברה ביולוגיים (kuter et al., 1983);

אלו תלויים בחומר הגלם לקומפוסטציה, תכולת רטיבותו, מגוון המיקרואורגניזמים המזופיליים המאכלסים אותו, מליחותו, זמינות המזון שבו ובתהליך הבשלתו (Dissanayake & Hoy, 1999; Hoitink & Fahy, 1986).

3.3 זבל ירוק

שיירי גידולים שונים כוללים מגוון רחב של תרכובות המשפיעות על פעילות ביולוגית; הצנעתם בקרקע כזבל ירוק, גורמת לשחרור תרכובות אלה מרקמות הצמח במהלך פירוקו ע"י מיקרואורגניזמים. דוגמאות לכך הן שיירי צמחים מסוג *Chrysanthemum*, שמייצרים פירתרינים קוטלי חרקים ושיירי צמחים מסוג *Artemisia*, הכוללים טרפנואידים טוקסיים לאורגניזמים שונים (Gamliel et al., 2000). זבלים ירוקים שונים, ביניהם סורגום ותירס, גרמו להפחתת *Verticillium wilt* בתפוחי אדמה ולהגדלת היבול (Davis et al., 1996). (Blok et al., 2000) מצאו, שהצנעת ברוקולי טרי לעומק של עד 25 ס"מ בקרקע גרמה לצריכה מוגברת של חמצן בקרקע; הצנעת ברוקולי או שיפון טריים בקרקע וחיפוייה בפוליאיתילן שחור, גרמו להתחממותה לטמפ' של עד 32 מ"צ ולהיווצרות תנאים אנאירוביים. בעקבות זאת פחת משמעותית פוטנציאל הרדוקס בקרקע. קטילת גופי קיימא של *F. oxysporum* f. sp. *R. solani*, *V. dahliae*, והוגברה באופן מובהק; הצנעת ברוקולי או עשב-שיפון ללא חיפוי, או חיפוי בלבד, לא גרמו קטילה יעילה של הפתוגנים (Blok et al., 2000). טיפול דומה, שכלל הצנעת שיפון טרי וחיפוי בפלסטיק כדי ליצור תנאים אנאירוביים, גרם לדיכוי של *V. dahliae* ונמטודות פתוגניות שונות ולהפחתת הנגיעות בפגעים עד 4 שנים מיישום, במטעים שנשתלו בחלקות המטופלות (Goud et al., 2004). העובדה שתוספים שונים הביאו לתוצאות דומות, מרמזת על כך שבתהליך הקטילה של הפתוגנים מעורבים תוצרי פרמנטציה כלליים, שמקורם פירוק החומר האורגני בתנאים אנאירוביים, כגון CO₂, אתילן, אלכוהולים, אלדהידים, מרקפטנים וחומצות אורגניות שונות, ביניהן חומצה אצטית (Lynch, 1978; Ponnampereuma, 1972). לתנאים האנאירוביים עצמם לא נמצאה השפעה מהותית על הישרדות פגעי קרקע שונים (Blok et al., 2000; Ioannou et al., 1977a), אם כי במקרה שבו חיטוי קרקע בתנאים אנאירוביים בוצע באמצעות הצפה, התרחש איכוס מהיר מחדש ע"י *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Stover, 1979).

3.4 חיפוי קרקע

תוספים אורגניים שונים משמשים לחיפוי הקרקע בזמן הגידול ומשפיעים על משק המים בקרקע, על הטמפ', משפרים את מבנה הקרקע ומעודדים פעילות מיקרוביאלית. גורמים אלו עשויים לעודד את הגידול ו/או לדכא פתוגנים ועשבים. עם חיפוי הקרקע הנפוצים נמנים שיירים וקש של גידולים שונים, תבן, עלווה, שבבי עץ, נסורת, זבל עופות, זבל בקר, בוצת שפכים וקומפוסט (Bulluck & Ristaino, 2002; Downer et al. 2002; Johnson, 1972; Konam & Guest, 2002; Yih, 1989). (2002) מצאו שחיפוי הקרקע במטעי אבוקדו באמצעות שבבי עץ הגביר את לחות הקרקע, זמינות גורמי הזנה מינרליים, אגרגציה וניקוז וצמצם תנודות בטמפ' הקרקע. פעילות מיקרוביאלית של אוכלוסיות ספרופיטים הוגברה, ביניהן פטריות רקבון עץ המפרישות אנזימי צלולאז שגרמו לדיכוי *Phytophthora cinnamomi* עד עומק 15 ס"מ. חיפוי קרקע בשיירי תירס, סויה או חמנייה, נמצא יעיל

כנגד עשבייה קייצית בגידול עגבנייה או קישוא; הפחתת כמות החומר האורגני והצנעתו בקרקע גרמו להדברה דומה לזו שהתקבלה באמצעות החיפוי (Barker & Bhowmik, 2001).

3.5 שיירי צמחים מכילי גלוקוזינולטים

פירוק שיירי צמחים מכילי גלוקוזינולטים בקרקע מעודד הפרשה וגורם להיווצרות של מגוון אלולוכמיקלים- תרכובות ביוטוקסיות, תוצרי הפירוק האנזימטי של גלוקוזינולטים וחומצות פנוליות, חלקן מכילות גופרית ונדיפות. חומרים אלו עוברים בנוכחות מים הידרוליזה אנזימטית ע"י myrosinase (b-thioglucoside glucohydrolase) שמקורו ברקמה הצמחית ונוצרות תרכובות נדיפות ומסילות במים, ביניהן ציאנידים אורגניים, איזוטיוציאנידים, אוקסזולידיניטיונים טיוציאנידים יוניים וניטרילים, שגורמים גם אללופתיה (Brown & Morra, 1995; Cerny et al., 1996; Jirovets et al., 2002; Miyazawa et al., 2002). מנגנוני הפעולה הביולוגיים של תרכובות אלו כוללים אינטראקציות לא ספציפיות, חלקן לא הפיכות, עם חלבונים וחומצות אמינו וכן השפעות אנטיקריציוניות (Brown & Morra, 1997; Fahey et al., 2001). משפחה בוטאנית שמאופיינת בתרכובות אלו היא המצליבים; הצנעתם בקרקע גורמת, בתנאים מתאימים, פגיעה בפגעי קרקע שונים (Gamliel & Stapleton, 2000; Smolinska, 1970; Lewis & Papavizas, 1993a; Lewis & Papavizas, 1971) מצאו דיכוי של גידול תפטיר של הפטריה *Aphanomyces euteiches* וכן דיכוי יצירה או נביטה של זואוספורות הפטריה, בעקבות חשיפה לסולפידיים המשתחררים במהלך התפרקות שיירי כרוב בקרקע. Smolinska (2000) מצא שהצנעת שיירי מצליבים יבשים וקצוצים בקרקע, 1% משקלי, במיכלים סגורים למשך חודש, גרמה להפחתה משמעותית באוכלוסיות *Sclerotium cepivorum*, מחולל רקבון לבן בבצל ובאוכלוסיות *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, מחולל נבילה בעגבניה. שיירי חרדל נמצאו יעילים יותר משיירי ליפתית בהדברת הפוזריום; הצנעת זני ליפתית שונים, גרמה גם כן להבדלים בקטילת הפוזריום, דבר המעיד על הבדלים בשחרור תרכובות טוקסיות שמחלישות או קוטלות את הפתוגן. הצנעת שיירי מצליבים שונים בקרקע גרמה להגברה משמעותית בכמות כלל החיידקים בחודש הראשון לאחר הטיפול, ביניהם Fluorescent pseudomonads ובקטריות יוצרות ספורות שאוכלוסיותיהן נותרו גבוהות למשך שנה מתום הטיפול; אוכלוסיית כלל הפטריות הגברה אף היא וכללה פטריות אנטגוניסטיות לפגעים.

3.6 שיירי צמחי תבלין

צמחי תבלין כוללים שמנים (Essential Oils) המכילים מרכיבים שונים כגון טרפנים, אלכוהולים, פנולים וחומצות אורגניות, שידועים כבעלי כושר ביוצידי ותרפאוטי (Wilson et al., 2001; Arras & Usai, 1998; Yaniv et al., 1997). הפעילות הביוצידיית תלויה במקרים מסויימים באופן היישום: המסת החומר במצע המזון, או יישום בפאזה גזית כחומר נדיף (Suhr & Nielsen, 2003). עם צמחי התבלין שלמיצויים פעילות ביוצידיית, נמנים הדפנה, הציפורן והקינמון שמכילים אאוגנול (Suhr & Nielsen, 2003), הקורנית מכילה קרבקרול, האורגנו מכיל תימול (Paster et al., 1995), המרווה והרוזמרין מכילים אקליפטול (Daferera et al., 2003) והטרגון מכיל טרפנואידים (Gamliel et al., 2000). רוקולה מכילה מגוון רחב של תרכובות נדיפות וכן גלוקוזינולטים האופייניים לכלל המצליבים (Jirovetz et al., 2002; Miyazawa et al., 2002). שמן הרוקולה מהווה כ- 0.01% מביומסת העלווה ומכיל תרכובות

חנקניות וגופרתיות רבות, כשהמרכיב העיקרי הוא 4-Methylthiobutylisothiocyanate. סביר שמנגנוני הפעילות הביוצידי של שמנים ארומטיים כוללים אינטראקציה בין מספר חומרים היות ושמן שהופק מצמחים מסוימים נמצא יעיל יותר לעומת יישום של המרכיב הפעיל שהופרד מהשמן (Paster *et al.*, 1995). צמחי תבלין עשויים להוות תוספים אורגניים יעילים להדברת פגעי קרקע (Gamliel *et al.*, 2000).

4. שילוב חיטוי סולרי של הקרקע בשיטות הדברה אחרות

חיטוי סולרי של הקרקע ניתן ליישום משולב עם מגוון שיטות חיטוי כימיות (Ben-Yephet *et al.*, 1988; Katan, 1987; Katan *et al.*, 1983; Stevens *et al.*, 2000), ביולוגיות וקולטורליות (Eshel *et al.*, 2000). הטיפול המשולב עשוי להגדיל את טווח הפגעים המדוכאים ע"י כל שיטה בנפרד (Stapleton & DeVay, 1983), לשפר את יעילות החיטוי בעומק הקרקע, לקצר את משך החיטוי ולהגדיל את יעילותו לאורך זמן. יתרון חשוב לשילוב של החיטוי הסולרי בשיטות נוספות הוא שיפור החיטוי באזורי השוליים- אזורים קרים שבהם יעילות החיטוי הסולרי גבולית ועונות השוליים, בהן החימום נמוך (Davis, 1991). שילוב של שיטות חיטוי עשוי לאפשר הפחתת מינונים של תכשירי הדברה כימיים ולהאריך את משך יעילות החיטוי; אלה מושגים בין היתר כתוצאה מאינטראקציות סינרגיסטיות בין גורמי ההדברה.

4.1 הצנעת תוספים אורגניים וחיטוי סולרי

Katan (1981) שיער שהוספת שיירי צמחים מתאימים לקרקע עשויה להגביר את יעילות החיטוי הסולרי. עבודתם של Ramirez-Villapudua & Munnecke (1987) תמכה בהשערה זו. הם מצאו שחיטוי סולרי של קרקע שהוצנעו בה שיירי כרוב יבשים וקוצים, 1% משקלי, הפחית משמעותית אוכלוסיית *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans* בקרקע והמחלה לא התפתחה בחלקות שנזרע בהן כרוב. חיטוי סולרי בלבד, או הצנעת שיירי כרוב ולאחר מכן חיפוי הקרקע בפוליאיתילן והצללה מלאה, גרמו להדברה חלקית בלבד של הפתוגן ולהתפתחות מחלה בחלקות שנזרעו. הצנעת שיירי כרוב בקרקע ללא חיפוי, לא השפיעו על אוכלוסיית הפתוגן בקרקע ושיעור המחלה נמצא דומה לזה שבחלקות הביקורת. בדרך זו הראו שלחיפוי הקרקע תפקיד כפול: הגברת טמפ' הקרקע במהלך החיטוי, ובמקביל, לכידת תרכובות נדיפות פונגוטיקסיות המשתחררות משיירי הכרוב, או נוצרות במהלך פירוקו בקרקע. תוספים אורגניים יבשים נוספים ש-Ramirez-Villapudua & Munnecke (1988) בחנו, בנפרד או בשילוב חיטוי סולרי, היו חרדל, כרובית, כרוב ניצנים, לפת, צנון, אספסת, קש חיטה, זבל עופות וזבל בקר. שילובים של חיטוי סולרי מתון (עד 40 מ"צ בעומק 5 ס"מ) עם הצנעת שיירי צמחים יבשים ממשפחת המצליבים, גרמו הדברה יעילה של *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans* בקרקע, כבר כעבור 15 יום; הדברה חלקית הושגה בעקבות שילוב חיטוי סולרי והצנעת אספסת ואילו הצנעת קש חיטה, זבל עופות יבש, או זבל בקר יבש גרמו להגברת אוכלוסיית הפתוגן. הצנעת שיירי כרוב יבשים גרמה הפחתה מהירה יותר של אוכלוסיית הפתוגן בקרקע, לעומת שיירי כרוב טרי, ביחס משקל יבש זהה, כנראה בגלל התפרקות מהירה יותר של החומר היבש. Gamliel & Stapleton (1993a) מצאו קשר בין רמת החימום, התוסף האורגני וקטילת הפתוגן. הצנעת כרוב יבש וקוצץ, 1% משקלי בקרקע וחימומה בתנאי מעבדה לטמפ' תת קטלניות- 38 מ"צ מקסימום, גרמו

קטילה מלאה של *P. ultimum* ושל *S. rolfsii* כבר כעבור ארבעה ימים, לעומת חימום קרקע ללא תוסף, שגרם לקטילה בשיעור של כ- 30% בלבד. תרכובות נדיפות שזוהו בקרקע שהוצנע בה כרוב היו בעיקר אלדהידים, אלקוהולים ותרכובות מכילות גופרית. חימום גרם להגברת היווצרותן של תרכובות אלו בשבוע הראשון לניסוי ומגמה זו התגברה עד השבוע השלישי לניסוי. במערכת המחוממת זוהו אלדהידים (פורמאלדהיד ואצטאלדהיד) ואיזוטיוציאנטים, כגון אליל איזוטיוציאנט ופניל איזוטיוציאנט שהופיעו רק במערכת המחוממת ולא בטמפ' החדר. במערכת הלא מחוממת נוצרו יותר אתאנול וחומצה אצטית, לעומת המערכת המחוממת. בטיפולים ללא כרוב המרכיב העיקרי שנמצא היה CO₂. במהלך חיטוי סולרי בשדה, התקבלה קטילת הפגעים כעבור שבוע והוגבר ייצור תרכובות נדיפות, במקביל להתחממות הקרקע שהוצנע בה החומר האורגני, בשבועיים הראשונים בלבד. לא נמצאו תרכובות נדיפות בחלקות שהוצנע בהן כרוב ללא חיפוי, או בחלקות שלא הוצנע בהן כרוב. חשיפה של הפתוגנים בקרקע בטמפ' החדר לתרכובות הנדיפות שנוצרו בקרקע שהוצנע בה כרוב, גרמה לפגיעה של עד 93% בחיותם כאשר נחשפו לתרכובות שנוצרו במהלך החימום, ופגיעה של עד 15% מתרכובות שנוצרו ללא חימום. נמצא מתאם בין היווצרות איזוטיוציאנטים ואלדהידים לבין פגיעה בהישרדות גופי הקיימא של הפתוגנים. Lodha et al. (1997) בחנו השפעת הצנעת שיירי מצליבים בקרקע וחימום טבעי שלה, או בשילוב עם חיטוי סולרי באיזור מדברי, על קטילת *Macrophomina phaseolina*. פתוגן זה עמיד לחום (Bega & Smith, 1962) ולמרות שהשקיייה בקיץ, שבו טמפ' הקרקע מגיעה ל- 46 מ"צ בעומק 20 ס"מ, גורמת לפחיתה באוכלוסיית הפתוגן, הוא אינו מודבר בעילות. הצנעת שיירי חרדל או כרובית בקרקע שהורטבה לקיבול שדה, 0.4% ו- 0.5% משקלי בהתאמה, ללא חיפוי, גרמו לקטילה של עד 90% מאוכלוסיית הפתוגן עד עומק 30 ס"מ, תוך 15 ימים, בדומה לקטילה שהתקבלה באמצעות חיטוי סולרי עד עומק 15 ס"מ. קטילה מלאה התקבלה כעבור 15 ימים, כאשר שילבו הצנעת שיירי הצמחים עם חיטוי סולרי. בתנאים אלה הוגבר גם האיכלוס של קשיונות הפתוגן בבקטריות ליטיות. Gamliel & Stapleton (1993b) מצאו שהצנעת קומפוסט מזבל עופות, 1% משקלי, בקרקע בשילוב עם חיטוי סולרי למשך ארבעה שבועות, גרמו לקטילה יעילה של *Meloidogyne incognita* ושל *P. ultimum*, כאשר חיטוי סולרי בלבד או הצנעת קומפוסט ללא חיטוי סולרי, גרמו לקטילה חלקית בלבד של הנמטודות. הצנעת הקומפוסט לאחר חיטוי סולרי גרמה לפחיתה ביבול החסה שגודלה לאחר מכן; לעומת זאת, בחלקות בהן בוצעה הצנעת קומפוסט לפני החיטוי הסולרי, התקבלה עלייה ביבול והוגברו אוכלוסיות מיקרוביאליות חיוביות בריזוספרה של החסה, כגון *Bacillus spp.* ו-Fluorescent pseudomonads, למשך שתי עונות רצופות (Gamliel & Stapleton, 1993b). תוצאות דומות וכן קטילה יעילה של *S. rolfsii* ושל *M. incognita* התקבלו כאשר שילוב זה יושם בעגבנייה ובבטטה (Stevens et al., 2003). לעומת זאת, חיטוי סולרי ששולב עם זבל עופות ותחמיץ, ושגרם לחימום הקרקע לטמפ' מקסימלית נמוכה של 34-37 מ"צ, לא היה יעיל כנגד *Pythium sp.*, *S. rolfsii* ו-*Phytophthora colocasiae*; הטיפול אמנם הביא לעלייה ביבול הקולקס (Taro- *Colocasia esculenta* cv. Bun-long) בעקבות הגברת לחות הקרקע, אך במקביל הוגברה מחלת ה- Corm rots, ונגרם הפסד כלכלי (Miyasaka et al., 2001). Ploeg & Stapleton (2001) מצאו שהצנעת עלי ברוקולי בקרקע, גרמה לקטילת נמטודות יוצרות עפצים (*M. incognita*, *M. javanica*). יעילות התוסף הייתה ביחס ישר לטמפ', כאשר בטמפ' גבוהה יותר נדרש משך זמן קצר יותר להשגת קטילה יעילה.

בעבודתנו בדקנו את האפשרות לשלב הצנעת שיירי תבלינים שונים בקרקע וחיטוי סולרי כאמצעי להגדלת טווח הפגעים המודברים באמצעות חיטוי סולרי ושיפור החיטוי בעומק הקרקע, שבו ההתחממות מתונה.

5. מערכות מבוקרות לבחינת התהליכים המתרחשים בקרקע עם תוספים אורגניים,

בתנאי חימום ואיורור שונים

גרינברגר (1984) עשה לראשונה שימוש במערכת סימולטיבית לחיטוי סולרי, המורכבת ממיכלי ויסקונסין ממולאים במים שחוממו במחזורי חימום הדרגתי, כפי שהתקבל בקרקע במהלך חיטוי סולרי בשדה; לתוך מיכלי המים הוכנסו מיכלים אטומים ובהם הקרקע. מיכלים אלה אפשרו צבירת תרכובות נדיפות; פתיחת המיכלים מנעה הצטברותן. דגמים נוספים של מיכלים שימשו לחשיפת קרקע ופתוגנים לתערובות גזים שונים ולתרכובות נדיפות שנוצרו בקרקע במהלך חימומה ובקרקע שהוספו לה חומרים אורגניים שונים. מיכלים אלה כללו צנרת זכוכית שקועה בקרקע, שבאמצעותה הוחלפה אווירת הקרקע באווירה שמקורה במיכלי גז, או מיכלי קרקע דומים, עם או ללא תוסף אורגני, שחוברו למשאבה שסיחררה את האווירה מעל הקרקע במיכל שבו נוצרה האווירה, דרך הקרקע במיכל החשיפה לאווירה, ובחזרה לגוף הקרקע שבו נוצרה האווירה, באופן מעגלי. Ramirez-Villapudua & Munnecke (1988) השתמשו במיכלי זכוכית אטומים, שלתוכם הכניסו את תערובת הקרקע והתוסף האורגני; מעל הקרקע נתלה סל רשת ובתוכו הקרקע המאולחת. Gamliel & Stapleton (1993a), בנו מערכת מבוקרת לניסויים בחימום קרקע עם תוספים אורגניים. מערכת זו כללה מיכלי מים מחוממים בצורה מבוקרת ומיכלי מייסון שמולאו בתערובת הקרקע והחומר האורגני והוכנסו למיכלי המים. האווירה במיכל, מעל הקרקע, נדגמה באמצעות מזרק; מזרק אחר חובר לכל מיכל באמצעות מחט, כך שהתאפשרה תנועת גזים בין המיכל לבין המזרק. באופן זה נחשפו קרקע וגופי קיימא לתרכובות הנדיפות שנוצרות במיכלי המייסון.

בכל המערכות המבוקרות, ששימשו ללימוד התנאים המתקיימים בקרקע מעורבת עם תוסף אורגני בתנאי חימום, אווירת הקרקע מוגבלת ע"י כלי הקיבול; התווך בלתי רווי מהווה בד"כ מקור חמצן סופי ומאפשר מיהול מוגבל של התרכובות הנדיפות שנוצרות. במערכות אלו נקבעה שרירותית מידת האירוביות של התהליך, ללא אפשרות לשינוי דינמי ומבוקר של גורם זה. לפיכך, בעבודה זו נמדד איורור הקרקע בתנאי שדה, ומדידות אלו, בנוסף למדידות החימום במהלך חיטוי סולרי, שימשו בסיס לפיתוח מערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים.

חומרים ושיטות

1. קרקעות

- א. נאספה קרקע מחוות הניסויים של הפקולטה לחקלאות ברחובות, מחלקה נקייה מעשבייה וללא גידול חקלאי, בשנתיים שקדמו לניסוי. לאחר הרחקת קרום הקרקע העליון, 0-3 ס"מ, נלקחו דגימות קרקע מעומק של עד 30 ס"מ. הקרקע אוחסנה יבשה בחביות, בסככה מוצלת.
- ב. תצפיות בוצעו בחלקות מסחריות של שותפות חקלאית יע"פ, במושב מחולה. מאפייני הקרקעות בחלקות אלה מוצגים בטבלה 1.

טבלה 1: תכונות פיזיקליות וכימיות של קרקע מחלקות הניסוי בחוות הפקולטה לחקלאות ברחובות ושל קרקע מחלקות מסחריות של שותפות חקלאית יע"פ במושב מחולה (האנליזה נעשתה במעבדת בדיקות קרקע שירות שדה בגילת).

מחולה	רחובות	
60.20	27.00	רוויה (%)
7.80	7.90	pH
28.00	0.10	גיר כללי (%)
11.00	94.00	חול (%)
58.00	2.00	סילט (%)
31.00	4.00	חרסית (%)
0.65	0.14	חומר אורגני (%)

2. תוספים אורגניים

שיירים יבשים של צמחי תבלין שונים שימשו כתוספים אורגניים לקרקע בניסויי המעבדה ובניסויי השדה. פירוט צמחי התבלין שבהם השתמשנו מופיע בטבלה 2.

טבלה 2: צמחי התבלין ששימשו בניסויים השונים.

שם בוטני	Common name	שם	משפחה
<i>Artemisia dracuncululus</i> L.	Tarragon	לענה דרקונית (טרגון)	COMPOSITAE
<i>Eruca sativa</i> Mill.	Rocolla/ Wild rocket	רוקולה (ארוגולה)	CRUCIFERAE
<i>Origanum vulgare</i> L.	Oregano	אזובית (אורגנו)	LABIATAE
<i>Thymus vulgaris</i> L.	Thyme	בת קורנית (תימין)	
<i>Mentha viridis</i>	Spearmint	מנטה ספרדית	
<i>Salvia officinalis</i> L.	Sage	מרווה רפואית	
<i>Rosemarinus officinalis</i> L.	Rosemary	רוזמרין רפואי	
<i>Laurus nobilis</i> L.	Bay	ער אציל (דפנה)	LAURACEAE

נוף הצמחים (עלווה וגבעולים) ניקצר מחלקות מסחריות, יובש באוויר או בתנור בטמפ' 60 מ"צ ונשמר יבש בקירור, בטמפ' של 4-5 מ"צ. לפני השימוש בניסויי המעבדה, החומר היבש נקצץ באמצעות מטחנה חשמלית למקטעים באורך של עד 2 מ"מ. הצמחים (חומר טרי באיכות ייצוא או שיירי גידול מסחרי) סופקו באדיבות שותפות חקלאית יע"פ, מושב מחולה.

3. מצעי מזון – כינויים והרכבם

המצעים הבאים שימשו לבידוד ולגידול מיקרואורגניזמים. להלן כינויים, הרכבם (גרם לליטר מים מרוכזים) ושימושם. כל הכימיקלים ששימשו להכנת המצעים היו מדרגת ניקיון גבוהה (Analytical grade).

3.1 מצע בריני לפוזריום – Peptone Pentachloronitrobenzene (PCNB) (Gamliel & Katan, 1991)

מצע זה שימש לבידוד ולגידול הפטריה *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*.

KH ₂ PO ₄	1.00
MgSO ₄ *7H ₂ O	0.50
PCNB	0.75
Pepton	15.00
Chloramphenicol	0.25
Agar	20.00

לפני מזיגת המצע הנוזלי לצלחות הפטרי, מקררים את הנוזל ל- 50 מ"צ ומוסיפים 1 מ"ל חומצה לקטית (90%) לליטר מצע נוזלי, לקבלת pH=4.5.

3.2 מצע אגר תפוז"א PDA - Potato Dextrose Agar

מצע זה שימש לבידוד ולגידול הפטריה *Macrophomina phaseolina*, בתוספת החומרים האנטיביוטיים המצויינים.

Potato Dextrose Agar	39.00
Chloramphenicol	0.25
Streptomycin sulfate	0.25

3.3 מצע מלחים - צ'אפק בסיסי (Dhingra and Sinclair, 1995) Czapek

מצע זה שימש לגידול פוזריום.

K ₂ HPO ₄	1.00
MgSO ₄ *7H ₂ O	0.50
FeSO ₄	0.01
NaNO ₃	2.00
KCl	0.50
Sucrose	30.00
Chloramphenicol	0.25
Bacto-Agar	20.00

3.4 מצע V - מצע ברירני לבידוד *Verticillium dahliae* (Ausher et al., 1975)

K ₂ HPO ₄	1.00
MgSO ₄ *7H ₂ O	0.50
FeSO ₄	0.01
NaNO ₃	2.00
KCl	0.50
Sucrose	7.50
PCNB	0.06
Chloramphenicol	0.25
Agar	20.00

לפני מזיגת המצע הנוזלי לצלחות הפטרי, מקררים את הנוזל ל- 45 מ"צ ומוסיפים:

Ethanol 99.8%	5.00 מ"ל
Streptomycin sulfate	1.00
Tergitol	1.00 מ"ל

3.5 מצע אגר 2%

מצע זה שימש לבידוד הפטריה *Rhizoctonia solani*.

Agar	20.00
------	-------

3.6 מצע King B (King et al., 1954)

מצע King B מיועד לגידול חיידקי Fluorescent pseudomonads. לבידודם מהקרקע יש להוסיף חומרים אנטיביוטיים שונים. בעבודה זו שימש המצע לבידוד כלל חיידקים מהקרקע ולכן לא הוספו לו חומרים אנטיביוטיים.

Proteose peptone	20.00
Glycerole	10.00 מ"ל
K ₂ HPO ₄	1.50
MgSO ₄ *7H ₂ O	1.50
Agar	20.00

לפני מזיגת המצע הנוזלי לצלחות הפטרי, מקררים את הנוזל ל- 45 מ"צ ומוסיפים 5 ppm מתאם סודיום (אדיגן 37, אגן כימיקלים, אשדוד, ישראל), למניעת התפתחות חרקים ואקריות.

3.7 מצע Martin – Rose Bengal (Dhingra & Sinclair, 1995)

מצע זה שימש לבידוד כלל פטריות מהקרקע.

Bacto peptone	5.00
D-Glucose	10.00
KH ₂ PO ₄	1.00
MgSO ₄ *7H ₂ O	0.50
Rose Bengal	0.003
Chloramphenicol	0.25

4. הפתוגנים והשימוש בהם

הפתוגנים המפורטים להלן נאספו ממדבק (אינוקולום) טבעי- גופי ריבוי או גופי השתמרות בקרקע, או על גבי גבעולי צמחים פונדקאים. הפתוגנים השונים הוכנסו לשקיות רשת לצורך חשיפתם לתנאי

ההדברה, בעומקים שונים בקרקע בשדה או במיקומים שונים במערכת המעבדתית. הפתוגנים בשקיות הרשת הודגרו בקרקע רחובות מורטבת לקיבול שדה, יממה לפני השימוש בהם, לקבלת תנאי רטיבות אחידים.

הפתוגנים הבאים נבחנו בעבודה זו להישרדותם, בהשפעת אמצעי הדברה שונים:

Fusarium oxysporum f. sp. *radicis-lycopersici* Jarvis & Shoemaker 4.1

פטריה זו (להלן **FORL**), שגורמת למחלת רקבון הכתר והשורשים (Crown and root rot) בעגבניות, בודדה מקרקע מאולחת באופן טבעי מכיכר סדום לאחר סיום גידול עגבניות. קרקע מאולחת בכלמידוספורות, סוננה בנפה 1 מ"מ (16 Mesh), הורטבה לקיבול שדה ונשמרה בחממה. מספר גופי הריבוי נבדק מדי שבוע, עד להתייצבותו. לאחר מכן יובשה הקרקע בחממה, חיוניות הכלמידוספורות נבדקה שוב והקרקע נשמרה יבשה בקירור בטמפ' של 4-5 מ"צ.

לצורך בחינת הישרדות הפטריה בניסויים השונים, הוכנסו 5 ג' קרקע מאולחת לשקית רשת ששימשה לטיפול. בסיומו הוצאה השקית וחיות גופי ההשתמרות (כלמידוספורות) בקרקע שבתוכה נבדקה באמצעות מיהולי קרקע (ראה סעיף 6.1, להלן). התוצאות חושבו כיחידות יוצרות מושבה, Colony Forming Units (CFU), לג' קרקע יבשה (105 מ"צ).

Macrophomina phaseolina 4.2

פטריה זו, שגורמת למחלת "רקבון הפחם" בשעועית ותוקפת גם מינים רבים נוספים של צמחים כגון דלועים, חמניות ומחטניים, בודדה מקש גבעולי אבטיח מזן "מלאלי" מכפר הנגיד. גבעולי אבטיח נגועים בקשיונות נשמרו יבשים בקירור בטמפ' של 4-5 מ"צ. הגבעולים נחתכו למקטעים באורך של כ- 1 ס"מ וכל מקטע הוכנס לשקית רשת. בדיקת חיות הקשיונות לאחר הטיפול כללה חיטוי חיצוני באופן הבא: טבילה באתאנול 70% למשך 2 שניות, טבילה בהיפוכלורית למשך 20 שניות, פעמיים טבילה במים מרוכזים למשך 10 שניות. מקטע הגבעול המחוטא נחתך ל-5 חלקים שווים שהונחו על גבי מצע PDA בצלחת פטרי. הצלחות הודגרו בחושך בטמפ' של 27 מ"צ למשך 4-5 ימים. חושב מספר החלקים, שמהם נראו נביטות הפטריה יוצרות קישיונות, מתוך 5.

Verticillium dahliae 4.3

פטריה זו, שגורמת לנבילה בצמחים רבים, ביניהם מיני סולניים, דלועים וגידולים רב שנתיים, בודדה מקש גבעולי תפוחי אדמה מזן "דזירה", מחלקה מקיבוץ צאלים שבחבל הבשור. גבעולי תפוחי אדמה נגועים בזעיר קשיונות (microsclerotia) נשמרו יבשים בקירור בטמפ' של 4-5 מ"צ. הגבעולים נחתכו למקטעים באורך של כ-1 ס"מ. כל מקטע הוכנס לשקית רשת. בדיקת חיות הקשיונות לאחר הטיפול נעשתה ע"י חיתוך המקטע ל-5 חלקים שווים שהונחו על גבי מצע V בצלחת פטרי. הצלחות הודגרו בחושך בטמפ' של 17 מ"צ למשך 21 ימים. חושב מספר החלקים, שמהם נראו נביטות הפטריה, מתוך 5.

Rhizoctonia solani 4.4

פטריה זו גורמת למחלות שורש ונבטים בגידולים רבים, לריקבון שורשים, בסיס גבעול, לנגעים בגבעולים על-אדמתיים ולריקבון פירות. קשיונות נלקחו מפקעות תפוחי אדמה מזן "מרבלי" שנאספו

בחלקות נגועות בחבל מעון. הקשיונות נשמרו על גבי קליפות הפקעות עד לשימוש. הקליפות, נגועות בקשיונות, הוכנסו לשקית רשת. בדיקת חיות המידבק לאחר הטיפול כללה חיטוי חיצוני של הקליפה ע"י טבילה בהיפוכלורית למשך 2 שניות ופעמיים טבילה במים מרוככים למשך 10 שניות. הקשיונות הוסרו מהקליפה והונחו על גבי מצע אגר 2% בצלחת פטרי. הצלחות הודגרו בחושך בטמפ' של 27 מ"צ לפרק זמן של עד 7 ימים, במהלכם נספרו הקשיונות הנובטים בכל צלחת מדי יום. כעבור שבוע חושב מספר הקשיונות שנבטו, מתוך 5.

4.5 נמטודה יוצרת עפצים - *Meloidogyne javanica*

שורשים נגועים של בזיל מזן "פרי", שנאספו מחלקות במושב מחולה שבבקעת הירדן ושל עגבניה, מזן 870, שנאספו מחממות בתחנת הנסיונות שבחבל הבשור, שימשו כמידבק. השורשים הנגועים בעפצים נשמרו טריים, עם האדמה הדבוקה אליהם, בתא לח, בקירור בטמפ' 4-5 מ"צ, לפרק זמן של עד שבוע, כדי למנוע ריקבון העפצים ופגיעה בחיות ביצי הנמטודות. לביצוע הניסויים, שורשים נגועים בעפצים נחתכו למקטעים המכילים עפצים שלמים. מקטעים אלה עורבבו בקרקע רחובות שהורטבה לקיבול שדה, לקבלת יחס משקלי של 1%. בניסויים במעבדה, העפצים עורבבו עם הקרקע המיועדת לטיפול, ואילו בניסויי השדה הוכנסה תערובת במשקל 300 ג' לשקית רשת, ששימשה לחשיפה לתנאי ההדברה בשדה. בדיקת חיות הנמטודות בדגימות הקרקע המאולחות, לאחר הטיפול, נעשתה ע"י העברת הקרקע לעציצים ושתילה של שתילי בזיל או עגבניה. העציצים הודגרו בחממה מבוקרת בטמפ' של 25 מ"צ למשך 30 יום. לאחר מכן נעקרו השתילים, נשטפו ונבדקה נגיעות שורשיהם בעפצים.

5. צמחים

שתילי עגבניה *Lycopersicon esculantum* Mill. מזן חממה 187 ושתילי בזיל *Ocimum basilicum* מזן "פרי", שימשו בניסויים שונים כצמחי בוחן לחיות נמטודות, למבחני פתוגניות של פטריות ובניסויים אחרים לנוכחות תרכובות פיטוטוקסיות בקרקע לאחר חיטוי. לכל הצרכים, השתמשנו בשתילים בני שבועיים, שסופקו באדיבות משתלת "שורשים" בע"מ, מושב עין הבשור.

6. מדדים ביולוגיים ופיזיקליים, בניסויים במעבדה ובשדה

6.1 הערכת אוכלוסיות המיקרואורגניזמים בקרקע

אוכלוסיית כלל החיידקים בקרקע ואוכלוסיית כלל הפטריות בקרקע, הוערכו כמותית בשיטת המיהולים. הערכים שנמדדו והמגמות שמוצגות, מתייחסים רק לכלל המיקרואורגניזמים שניתנים לגידול על גבי מצעי מזון, בתנאים אירוביים.

קרקע במשקל של 2.5 ג' נלקחה מכל חזרה והוכנסה ל- 22.5 מ"ל תמיסה מעוקרת של אגר מים (0.1%) בתוספת $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.1%). התרחיפים טולטלו בארלנמיירים במשך 45 דקות במטלטלת קווית במהירות של 200 תנודות לדקה ולאחר מכן נערכה לכל דגימה סדרת מיהולים עשרוניים בתמיסה דומה של אגר מים. מנות אחידות של 0.1 ו-0.2 סמ"ק מהמיהול הרצוי, לבדיקת חיידקים ופטריות בהתאמה, פוזרו על גבי מצע המזון המתאים, בארבע צלחות פטרי, באמצעות מקל

דרגלסקי. הצלחות הודגרו בחושך בטמפ' של 27 מ"צ למשך 4-5 ימים והמושבנות שצמחו על הצלחת נספרו. התוצאות חושבו כיחידות CFU חיידקים או פטריות, לג' קרקע יבשה (105 מ"צ).

6.2 בדיקת פעילות מיקרוביאלית כללית בשיטת FDA, בקרקעות שנחשפו לתנאי ההדברה (Schnurer & Rosswall, 1982)

הפעילות המיקרוביאלית הכללית בקרקע נקבעה על פי פרוק (FDA) Fluorescein diacetate. חומר זה מתפרק בקרקע ל-Fluorescein בצורה לא סגולית ע"י מגוון אנזימים, תוך תאיים וחוף תאיים ולכן יכול לשמש כמדד לפעילות מיקרוביאלית כללית בקרקע. קרקע במשקל 8 ג' נלקחה מכל חזרה, הורחפה ב-50 מ"ל בופר נתון זרחתי (0.06M, pH=7.6) בארלנמיירים והודגרה בטמפ' של 25 מ"צ או 45 מ"צ במשך 30 דקות, תוך טלטול במטלטלת קווית (150 תנודות לדקה). לאחר ההדגרה הראשונית הוספו לכל דוגמה 500 מיקרוגרם של FDA מומס באצטון (תמיסת האם: 0.1 ג' FDA מומס ב-50 מ"ל אצטון). הדוגמאות הודגרו באופן דומה בחושך למשך שעה נוספת. עם תום ההדגרה נלקחו 4 מ"ל מתרחיף כל דוגמה למבחנת צנטרפוגה ונפח זהה של אצטון הוסף למבחנות על מנת להפסיק את הראקציה. הדוגמאות סורכזו במשך 10 דקות ב-5000 סל"ד ולאחר מכן נקבעה הצפיפות האופטית של הנוזל באמצעות ספקטרופוטומטר (Spectronic 21, BAUSCH&LOMB, Rochester, NY, USA), באורך גל 490 nm. הפעילות המיקרוביאלית הסגולית חושבה לפי כמות ה-FDA שהתפרקה לג' קרקע יבשה (105 מ"צ) במשך שעה (Chen et al., 1988). חישוב כמות ה-FDA שהתפרק נעשה לפי עקום כיול של התפרקות FDA שהוכן באופן הבא: כמויות עולות של FDA מתמיסת האם הוספו (ב-2 חזרות) לארלנמיירים שהכילו 50 מ"ל בופר נתון זרחתי. הארלנמיירים נפקקו וחוממו במים רותחים במשך 20 דקות. בצורה זו התפרקה כל כמות ה-FDA ל-Fluorescein. לאחר ההתקררות לטמפ' החדר, הוספו לכל ארלנמייר 8 ג' קרקע רחובות בקיבול שדה; הארלנמיירים הודגרו בטיטול בטמפ' 25 מ"צ למשך שעה וחצי ונבדקה הצפיפות האופטית של התמיסה, כפי שפורט לעיל.

6.3 בדיקת pH של תמיסת הקרקע (Conn & Lazarovits, 1999)

בדיקה זו בוצעה על פי צרכי הניסויים, בתרחיף קרקע ביחס מים/קרקע של 5:1. 3 ג' קרקע מכל דגימה הוכנסו למבחנות שהכילו 15 מ"ל מים מרוככים. המבחנות טולטלו במרטט (Vortex-Genie, N.Y., USA) למשך חצי דקה בעוצמה מירבית ולאחר מכן הודגרו ב-25 מ"צ למשך 30 דקות. pH התמיסות נבדק באמצעות pH meter (Corning, Ma, USA) עם אלקטרודת pH (Thermo Russel,) (Auchtermuchty Fife, Scotland).

6.4 בדיקת טמפרטורת הקרקע

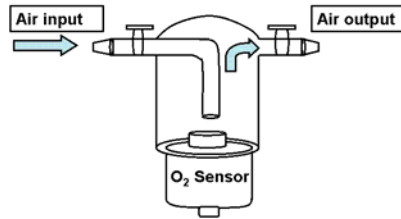
השתנות טמפ' האוויר והקרקע במיכלי הניסוי במעבדה ובעומקים שונים בשדה, נמדדה ע"י צמדים חומנים (Thermocouples), אשר חוברו לאוגר נתונים אלקטרוני (Data logger) (Campbell Scientific) (Inc., Logan, UT).

לצורך השוואה של חימום הקרקע בין ניסויים שונים ובין עומקים שונים, במערכת המעבדתית ובחיטוי סולרי בשדה, יתואר חימום הקרקע כמספר השעות שבהן הטמפ' בעומק הרלוונטי הייתה גבוהה

מערך מסויים, במשך 28 יום. (בניסויים שארכו פרק זמן שונה, שעות המעלה עברו נורמליזציה ל- 28 יום).

6.5 בדיקת ריכוז חמצן באווירת הקרקע או המיכלים

בדיקת ריכוז החמצן באווירת הקרקע (הפאזה הגזית) בשדה, או במיכלי הניסוי במעבדה (איורים 2-4), נעשתה באמצעות חיישני חמצן (Clark-ALMEMO, Hudson, MA, USA) שחוברו לאוגר נתונים. החיישנים הותקנו בתוך כלי זכוכית בעל שני פתחים המאפשרים הזרמת אוויר דרכם, באמצעות משאבת אוויר וחשיפתם לאווירת הקרקע כמתואר באיור 1.



איור 1: חיישן חמצן בתוך כלי זכוכית. בדיקת ריכוז החמצן באווירת הקרקע בשדה נעשתה ע"י שאיבת האווירה באמצעות משאבת אוויר והזרמתה דרך הכלי שבו נמצא החיישן. בדיקת ריכוז החמצן במיכלי הניסוי נעשתה ע"י חיבור טורי למיכל (ראה סעיף 7).

ריכוז החמצן נרשם באוגר הנתונים, לאחר הזרמת האווירה דרך חיישן החמצן במשך 6 דקות. חישוב ריכוז החמצן (באחוזים) נעשה על פי עקום כיול שבוצע באופן הבא:

חנקן (99.999%) וחמצן (99.99%) (גורדון גז, ישראל), הוזרמו בו זמנית דרך וסתי זרימה (Dwyer, Michigan, Indiana USA) בעלי ספיקות של 0-0.5 ל"דקה ו- 0-5 ל"דקה בהתאמה, לצילינדר מיהול ייעודי מנירוסטה וממנו לחיישן החמצן, דרך וסתי זרימה (Key Instruments, Trevoise, PA, USA), בעל ספיקה של 0-2.5 ל"דקה. ריכוזי חמצן עולים נוצרו ע"י הזרמת נפחים עולים של חמצן במקביל להזרמת נפחים יורדים של חנקן, תוך שמירה על מהירות זרימה ולחץ קבועים של התערובות השונות ונפח קבוע של התערובת במיכל המדידה.

6.6 בדיקת תרכובות נדיפות (Huie, 2002; Matich, 1999; Martos, 1999)

התרכובות הנדיפות שנוצרות בתערובת הקרקע הרטובה והתוסף האורגני, נדגמו בפאזה הגזית, מעל פני הקרקע (ראה סעיפים 7,9 להלן) בשיטת ה-Solid Phase Microextraction (SPME) והופרדו באמצעות גז כרומטוגרף. דוגם ה-SPME כולל סיב מצופה ב-Polydimethylsiloxane (PDMS) בעובי $100\mu\text{m}$ (Supelco Inc., Bellefonte, PA, USA). ציפוי זה נמצא המתאים ביותר לבדיקת התרכובות הנדיפות האופייניות לצמחי תבלין. הסיב נחשף לאווירת הקרקע למשך 45 דקות, שבמהלכן נספחות אליו התרכובות הנדיפות. מיד לאחר מכן מועבר הדוגם לנקודת ההזרקה של הכרומטוגרף למשך 2 דקות והתרכובות שספוחות אליו משתחררות לקולונה באמצעות חום. גז הכרומטוגרף, מסוג HP 5890 II, כלל קולונה קפילרית, (fused silica DB-5 ((5% phenil) methyl polysiloxane), באורך 30 מטר, קוטר פנימי 0.25 מ"מ, עובי פאזה נוזלית 0.25 מיקרומטר (J&W Scientific, USA) וגלאי מסוג Flame Ionization (FID). נקודת ההזרקה והגלאי הוחזקו בטמפ' 220 ו- 270 מ"צ, בהתאמה. תכנית החימום של הקולונה כללה טמפ' התחלתית 50 מ"צ למשך 5 דקות וחימום הדרגתי בקצב 4 מ"צ/דקה, לטמפ' סופית של 190 מ"צ לדגימות של טיפולים לא מחוממים, או ל- 220 מ"צ למשך 5 דקות, לדגימות של טיפולים מחוממים. הגז הנושא, חנקן (99.999%) (גורדון גז, ישראל), הוזרם בקצב של 1 מ"ל/דקה. התרכובות הנדיפות זוהו ע"י השוואת זמני ההשהיה (Retention time)

(להלן R_t) של התרכובות, לאלו שהתקבלו בהזרקת סטנדרטים ידועים (Jirovetz *et al.*, 2002; Miyazawa *et al.*, 2002).

7. מערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איוורור משתנים

ביצוע ניסויים שמדמים חיטוי סולרי בתנאי מעבדה מבוקרים, דורש מחד פיתוח מערכת המאפשרת את קיומם של תנאים השוררים במהלך חיטוי סולרי בשדה ומאידך, מחייבת מערכת כזו אפשרות לחשיפת פתוגנים לגורמים המעורבים בחיטוי סולרי, המשולב עם תוספים אורגניים, בתנאי איוורור משתנים. בנוסף מחייבת המערכת בקרה על משתנים רבים, כגון משטר הטמפרטורה, רטיבות ומאזן הגזים בקרקע. פיתוח מערכת לחימום קרקע בתנאי איוורור משתנים, שכוללת ארבעה רכיבים עיקריים: מערכת חימום, מיכלי קרקע, מיכלי חשיפה לאווירת הקרקע ומערכת הזרמת אוויר.

7.1 מערכת החימום

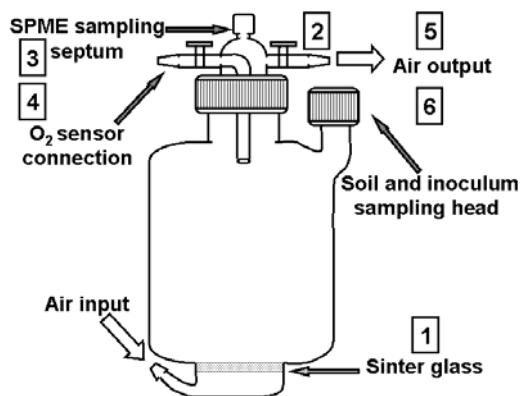
מערכת זו מבוססת על מערכת קיימת שבה מבוצע חימום הקרקע במחזור יומי, בדומה למתרחש בחיטוי סולרי בתנאי שדה (גרינברגר א., 1984), בעומק 20 ס"מ. מיכלי הקרקע מוצבים באמבטים מנירוסטה (35*35*150 ס"מ), מלאים מים, המחוממים באמצעות גופי חימום המצויידים במנגנון סיחרור להבטחת חימום אחיד בכל נפח האמבטים (Freed Electric, חיפה, ישראל). באמבט המשמש לחיקוי חיטוי סולרי, החימום מתבצע במחזור יומי, על פי עקום חימום סולרי בעומק קרקע מסויים, שמפוקח ע"י אוגר נתונים אלקטרוני Data logger (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA); דוגמה למחזור חימום- בפרק תוצאות, איור 16. אמבט נוסף משמש לטיפולים בטמפרטורה של 25 מ"צ. אוגר הנתונים משמש בקר להפעלה ולהפסקה של חימום (בקרה באמצעות צמידים חומנים), בקר לשמירה על כמות מים קבועה באמבטים וכן לרישום ולאגירת נתוני הטמפרטורה.

7.2 מיכלי הניסוי

7.2.1 מיכל הקרקע

תוכנו ובנו מיכלי זכוכית ייעודיים, בנפח 2 ליטר, שאליהם מוכנסת הקרקע, או תערובת של קרקע עם תוסף אורגני והם מוצבים בתוך מערכת החימום (איור 2). מיכלים אלו מאפשרים שליטה ובקרה על אווירת הקרקע באמצעות הזרמת אוויר בכיוון אחד, מתחתית המיכל כלפי מעלה, דרך הקרקע שבמיכל. כמו כן ניתן לבצע דיגומים שונים לצורך מדידת משתנים שונים בקרקע ובאוויר (איור 3).

איור 2: מיכל לאינקובציה של קרקע ותוספים אורגניים ולחשיפת אורגניזמים לתנאים מבוקרים.



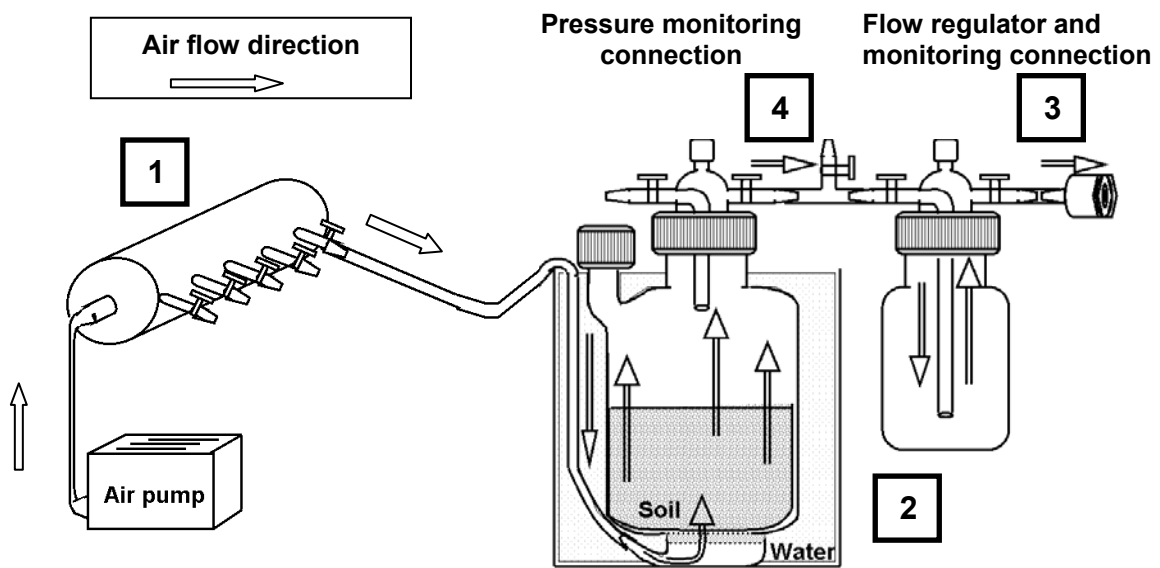
1. תחתית כפולה, עם מחיצת סינר (מסנן עשוי זכוכית נקבובית), אשר יוצרת חלל אוויר בקרקעית המיכל והמשמשת להזרמת אוויר למיכל. 2. פתח ראשי עם מכסה זכוכית המוחזק באמצעות טבעת מתברגת ואטם טפלון (Schott, Germany), שבראשו ספטום לדגימת גזים (3) ושני פתחים (4,5). 3. ספטום לדגימה של תרכובות נדיפות בשיטת Solid Phase Microextraction-ה. 4. פתח המשמש לחיבור חיישן חמצן. 5. פתח להזרמת האוויר ממיכל הקרקע למיכל חשיפה לאווירת הקרקע (מתואר בסעיף 7.2.2). 6. פתח מישני, המשמש לדיגום קרקע ושקיות רשת, סגור במכסה עם אטם טפלון (Schott, Germany).

7.2.2 מיכל חשיפה לאווירת הקרקע (Volatile Exposure)

מיכל זכוכית בנפח 0.5 לי (Schott, Germany) בעל מכסה זכוכית זהה לזה של מיכל הניסוי. המיכל נמצא בטמפ' החדר, מחוץ למערכת החימום, ומתחבר בפתח אחד של מכסה הזכוכית למיכל הניסוי, באמצעות צנרת Polyvinylchloride. לפתח שני מחובר וסת לזרימת האוויר (מתואר באיור 3).

7.3 מערכת האיורור

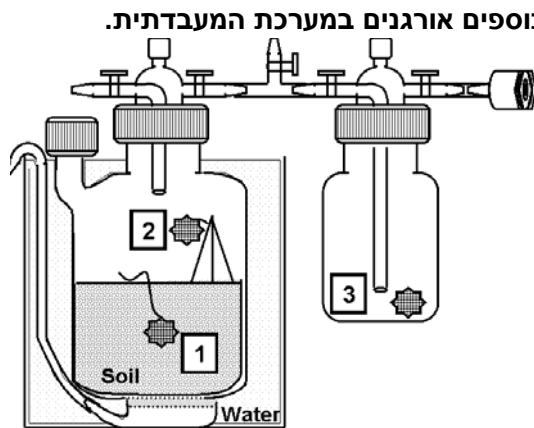
מערכת המשמשת לקביעת תנאי האיורור של הקרקע במיכל הקרקע ולהעברת אווירת הקרקע למיכל החשיפה, מתוארת באיור 3. המערכת מבוססת על איורור איטי של הקרקע, אשר מונע מחד היווצרות תנאים אנאירוביים לאורך זמן ומאיך שומר על נוכחות התרכובות הנדיפות במערכת לפרק זמן אשר מספיק להשפעתן.



איור 3: מערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור משתנים, הכוללת אמבט מים, מיכלי ניסוי ומערכת איורור. 1. אוויר נדחס ע"י משאבת דיאפרגמה לסעפת נירוסטה בנפח שני ליטר, המחלקת אותו באופן אחיד, דרך צינורות PVC, למיכלי הניסוי שבתוך האמבטים (עד 18 מיכלים לכל משטר חימום). 2. האוויר במיכלי הניסוי מוזרם בכיוון הבא: מתא הזכוכית שבתחתית מיכל הקרקע, דרך הקרקע, אל מיכל החשיפה. 3. לפתח שני במכסה מיכל החשיפה, מחובר וסת לזרימת אוויר שבו מותקנת דיסקית בעלת חריר בקוטר 8 אלפיות האינץ', המגבילה את כמות האוויר שיוצאת מהמיכל. הווסת גורם להמירות זרימת אוויר אחידה בכל המיכלים, שנשמרת באמצעות על-לחץ בשיעור של 60-70 Pascal. ניתן לחבר את הווסת למד זרימה (Key) KI (Mecatrone, Solna, Germany), שמאפשר את קביעת הלחץ במערכת.

8. חימום קרקע ותוספים אורגניים בתנאים מבוקרים

לקרקע רחובות יבשה ומסוננת בנפח 1 מ"מ (16 mesh), הוסף תוסף אורגני יבש וקצוץ 1% משקלי. תערובת הקרקע והתוסף הורטבה לקיבול שדה (10% תכולת רטיבות משקלית). לכל מיכל הוכנסו 1.7 ק"ג מהתערובת הרטובה והמיכלים הודגרו במשטר חימום בהתאם לטיפול, למשך שבועיים עד ארבעה שבועות. גופי הריבוי של האורגניזמים הוצבו במערכת המעבדתית, כשהם ארוזים בשקיות רשת, לצורך חשיפתם לגורמי הדברה שונים, במיקומים המתוארים באיור 4.



איור 4: חשיפת גופי ריבוי של פתוגנים לחימום ולתוספים אורגניים במערכת המעבדתית.

1. גופי הריבוי במיכל הניסוי, בתוך הקרקע-חשיפה לחום, לתוצרי פירוק החומר האורגני ולמיקרואורגניזמים שמקורם בתערובת הקרקע. 2. גופי הריבוי במיכל הניסוי, תלויים על חצובת נחושת מעל תערובת הקרקע, ללא מגע בה-חשיפה לחום ולאווירה שבמיכל הניסוי, הכוללת תרכובות נדיפות שמקורן פירוק החומר האורגני. 3. גופי הריבוי מונחים במיכל החשיפה לאווירת הקרקע-חשיפה לאווירה המוזרמת ממיכל הניסוי וכוללת תרכובות נדיפות שמקורן פירוק החומר האורגני.

במשך כל תקופת הניסוי במערכת המעבדתית נבדקו הלחץ וקצב זרימת האוויר במיכלי הניסוי; המיכלים נשקלו מדי שבוע, לקביעת אבדן מים והשלמה במי ברז לשם שמירה על רטיבות הקרקע במיכלים. חיות גופי הריבוי נבדקה מדי שבוע ו/או בתום הניסוי, כמתואר בסעיף 6. כמו כן נבדק ריכוז החמצן והרכב התרכובות הנדיפות באווירת המיכלים ונלקחו דגימות קרקע לבדיקות pH, FDA וכלל המיקרואורגניזמים בקרקע, כמתואר בסעיף 6.

9. ניסויי שדה ותצפיות

יעילות השילוב של חיטוי סולרי עם הצנעת תוספים אורגניים יבשים שונים בקרקע, נבדקה בחלקות ניסוי קטנות, בחוות הניסויים של הפקולטה לחקלאות ברחובות ובתצפיות בחלקות תבלינים מסחריות. החלקות הורטבו לקיבול שדה ותוסף אורגני הוצנע באמצעות תיחוח מכני לעומק של עד 25 ס"מ. חיטוי סולרי בוצע ע"י חיפוי של הקרקע הרטובה והמעובדת ביריעות פוליאתילן שקופות בעובי של 30-100 μm (גניגר, ישראל), בפרישה ידנית או במכונה, לתקופה של 4-8 שבועות. השתנות הטמפר' בעומקים השונים נמדדה ע"י צמדים חומנים (Thermocouples), אשר חוברו לאוגר נתונים אלקטרוני Data logger (Campbell Scientific Inc., Logan, UT). בחלקות השונות הוטמן מידבק FORL לפני החיפוי, במטרה להעריך את יעילות החיטוי. המידבק נשלף עם הסרת יריעות הפוליאתילן ונבדק כאמור בסעיף 6.

9.1 ניסויים בחוות הפקולטה לחקלאות ברחובות.

בוצעו שני ניסויים במקביל, בחלקות קטנות בגודל 4 מ"ר (2*2), במתכונת ניסוי דו גורמי בבלוקים באקראי.

נוף צמחי תבלין שנקצר מחלקות מסחריות של שותפות חקלאית יע"פ במושב מחולה, שימש כחומר אורגני בניסויים אלה. נוף הצמח הופרד מהשורשים, יובש בחממה ונטחן במטחנת תופים המשמשת לטחינת קש, למקטעים של כ-5 מ"מ.

הניסויים הוצבו בשלושה בלוקים, כשבכל אחד הטיפולים הבאים: חיטוי סולרי בשילוב קורנית; חיטוי סולרי בשילוב רוקולה; חיטוי סולרי ללא תוסף; קורנית בשילוב חיפוי קרקע והצללה 90%; רוקולה בשילוב חיפוי קרקע והצללה 90%; חיפוי והצללה 90% ללא תוסף; היקש חשוף (ללא חיפוי וללא הצללה). בטיפול משולב עם חומר אורגני, פוזר חומר במשקל 1 ק"ג/מ"ר ותוחח לעומק של עד 25 ס"מ, באמצעות מתחחת. לאחר מכן הוטמנו בכל חלקה האמצעים הבאים:

- א. צינורות פוליאתילן באורך 5 מטר ובקוטר 5 מ"מ הוטמנו לצורך מדידת חמצן, בעומקים 20 ס"מ ו-40 ס"מ, שני צינורות בכל עומק, כאשר הצמידים מרוחקים זה מזה.
- ב. צינור פלסטיק באורך 2.5 מ' ובקוטר 35 מ"מ, הוטמן במרכז החלקה, קצהו בעומק 20 ס"מ, לצורך דיגום קרקע (להלן שרוול).
- ג. צמידים חומנים למדידה רציפה של טמפ' הקרקע בעומקים 20, 30 ו-40 ס"מ, הוטמנו בכל טיפול וחוברו לאוגר נתונים.
- ד. מידבק מסוגים שונים, ששהה 24 שעות לפני ההטמנה בקרקע רחובות שהורטבה לקיבול שדה, הוטמן בעומקים שונים. שקיות הרשת נקשרו לחבלים מסומנים, ששימשו לשליפתם במועדים שונים לאורך הניסוי.
- ה. לאחר ההטמנה נפרשה בכל חלקה מערכת השקייה בטפטוף, פרט לחלקות ההיקש החשוף. מערכת זו שמשה להשקייה שבועית של החלקות כדי לשמור על תכולת רטיבות של קיבול שדה לאורך הניסוי.

כל חלקה חופתה ביריעת פוליאתילן בעובי $100 \mu\text{m}$ (גניגר, ישראל). שולי היריעה הוטמנו סביב החלקה בתעלות בעומק 40 ס"מ וכוסו בקרקע, כדי למנוע את שחרור התרכובות הנדיפות. הקצוות של ציוד הדיגום נותרו מחוץ לחיפוי על מנת לאפשר דיגום ללא פגיעה בחיפוי ובתהליך החיטוי הסולרי. חלקות ללא טיפול סולרי חופו ברשת צל, אלומינט 90% (פולישק, ברקאי, ישראל), שהוגבהה כאוהל, 0.5 מ' מעל החיפוי הפלסטי, כדי למנוע את חימום הקרקע. במהלך הניסויים בוצעו המדידות הבאות:

- א. מדידת ריכוז החמצן באווירת הקרקע- אווירת הקרקע סוחררה בכל עומק בנפרד, דרך הצינורות שהוטמנו, באמצעות משאבת דיאפרגמה, בקצב ממוצע של 3 ליטר/דקה, למשך 5 דקות. לאחר מכן, חוברו בטור למערכת הסיחור, מיכלים עם גבישי סיליקה (ליבוש האוויר) וחיטוי שדרכו הזרם האוויר. (ראה סעיף 10- בדיקת ריכוז חמצן). בניסוי יולי בוצעו מדידות ללא יבוש האוויר, בהתחלה מדי יום ובהמשך בתכיפות הולכת ופוחתת. בניסויי אוגוסט בוצעה מדידה אוטומטית רציפה ביומיים הראשונים לניסוי ובהמשך מדידות שבועיות.
- ב. דגימת קרקע- בוצעה מדי שבוע בניסוי יולי ופעמיים בשבוע בניסויי אוגוסט, לצורך בדיקות אווירת הקרקע, FDA, ספירות כלל מיקרואורגניזמים ובדיקות pH. דגימת קרקע נלקחה מכל חלקה, כולל היקשים לא מחופים, ע"י החדרת צינור דיגום פלסטי חלול, בעל קצה נירוסטה מחודד (להלן דוגם), לתוך הצינור שהוטמן בחלקה, השרוול. הדוגם ננעץ בקרקע והוצא מהשרוול. דגימת קרקע במשקל של 80-30 ג' נאספה מקצה הדוגם לשקיות פוליאתילן שהועברו בצידנית למעבדה.
- ב.1. בדיקת אווירת הקרקע- קרקע במשקל 1 ג', מכל דגימה, הוכנסה למבחנת זכוכית בנפח 4 מ"ל עם מכסה מתברג ואטם טפלון (Agilent Technologies, USA), הודגרה בהתאם לטיפול ממנו נלקחה- 45 מ"צ לטיפול סולרי ו-25 מ"צ לטיפול מוצל ונבדקה כמתואר בסעיף 6.6.
- ב.2. בדיקת FDA- בוצעה ב-8 ג' קרקע מכל דגימה, תוך חצי שעה מדגימה כאמור בסעיף 6.2
- ב.3. ספירת כלל המיקרואורגניזמים בקרקע- בוצעה ב-2.5 ג' מכל דגימה, תוך חצי שעה מדגימה, כאמור בסעיף 6.1.

4. בדיקת pH הקרקע- 5 ג' קרקע מכל דגימה הוקפאה למשך חודש. בתום שני ניסויי השדה הופשרו הדוגמאות ונבדקו במרכז בהתאם לאמור בסעיף 6.3.

ג. בדיקת חיות המידבק- בניסוי יולי נערכו בדיקות חיות מידבק כעבור 14 ו-28 יום מהצבת הניסוי. המידבק כלל *FORL*, *V. dahliae*, *M. phaseolina* ו-*R. solani*, שהוטמנו בעומקים 20, 30 ו-40 ס"מ וכן נמטודות שהוטמנו בעומקים 20 ס"מ ו-40 ס"מ ונבדקו רק ביום ה-28, מועד פירוק הניסוי. בניסוי אוגוסט נערכו בדיקות חיות מידבק כעבור 7, 14 ו-33 יום מהצבת הניסוי. המידבק כלל *FORL*, *V. dahliae* ו-*M. phaseolina*, שהוטמנו בעומקים 20, 30 ו-40 ס"מ. המידבק נבדק בהתאם לאמור בסעיף 4.

10. ניתוחים סטטיסטיים

מתכונת הצבת הניסויים מתוארת בכל ניסוי בנפרד. בניסויי השדה, חיות גופי הקיימא בכל חזרה של טיפול חושבה כאחוז מהערך בביקורת מושקית ומוצלת באותו בלוק, על מנת לנטרל את השפעת הבלוקים. משתנים בערכי אחוזים הועברו טרנספורמציה ל-*Arcsin* ולאחר מכן חושבו כאחוז מהערך בביקורת מושקית ומוצלת, באותו בלוק, או מערך ממוצע של ביקורת זו בשני בלוקים אחרים, אם באותו בלוק התקבל בביקורת ערך 0.

בניסויים במעבדה בוצע ניתוח סטטיסטי לחיות הפתוגנים בערכי CFU לגרם קרקע יבשה; משתנים בערכי אחוזים הועברו טרנספורמציה ל-*Arcsin* לפני הניתוח. בניסויים רב גורמיים בוצע ניתוח שונות לבחינת מובהקות השפעות הגומלין בין ההשפעות העיקריות ולאחר מכן ניתוח השפעות הגומלין, אם אלו נמצאו מובהקות. ניתוחי השונות כללו ANOVA ומבחן תחום מרובה. כל הניתוחים הסטטיסטיים בוצעו בתוכנת SAS גירסה 8.0 למחשבים אישיים.

תוצאות

1. חיטוי סולרי בשילוב תוספים אורגניים, בשדה

1.1 ניסויי שדה 2002

ארבעה ניסויי שדה נערכו בחוות הניסויים של הפקולטה לחקלאות ברחובות. שני ניסויים במקביל נערכו בין התאריכים 14 ביולי עד ה-12 באוגוסט (להלן **ניסויי יולי**) ובין התאריכים 18 באוגוסט עד ה-19 בספטמבר (להלן **ניסויי אוגוסט**). בכל מועד נבחנה השפעתם של שני תוספים שונים, שמקורם בצמחי התבלין רוקולה וקורנית, על חיות פגעי קרקע שונים, על אוכלוסיות מיקרוביאליות ועל פעילות אנזימטית. השפעת התוספים נבחנה בשילוב חיטוי סולרי, בהשוואה לקרקע ללא חימום. בנוסף, שימשו הניסויים לאיסוף נתוני החימום לצורך קביעת התנאים למערכת החימום המעבדתית, המפורטת בסעיף 2. הניסויים נערכו בחלקות קטנות, בגודל 4 מ"ר (2*2), במתכונת ניסוי דו גורמי בבלוקים באקראי, בשלוש חזרות. בניסוי הראשון נבחנה הצנעת שיירי רוקולה ובניסוי השני- שיירי קורנית. בכל ניסוי נכללו ארבעה טיפולים: שתי רמות חימום (סולרי ומוצל) ושתי רמות תוסף (הצנעת תוסף וללא תוסף). בטיפולים ללא חיטוי סולרי, נפרשה רשת צל (90%) מעל יריעת הפוליאתילן, על מנת למנוע התחממות הקרקע. בטיפולים שבהם הוצנע תוסף אורגני, פוזר חומר יבש במשקל 1 ק"ג/מ"ר והוצנע בתיחוח לעומק של עד 25 ס"מ באמצעות מתחחת. לאחר ההצנעה ולפני החיפוי, הוטמנו בכל חלקה גופי קיימא של פגעים שונים וכן אמצעי דיגום ומדידה ומערכת השקיה בטפטוף, כמפורט בפרק חומרים ושיטות.

1.1.1 התחממות הקרקע במהלך החיטוי הסולרי

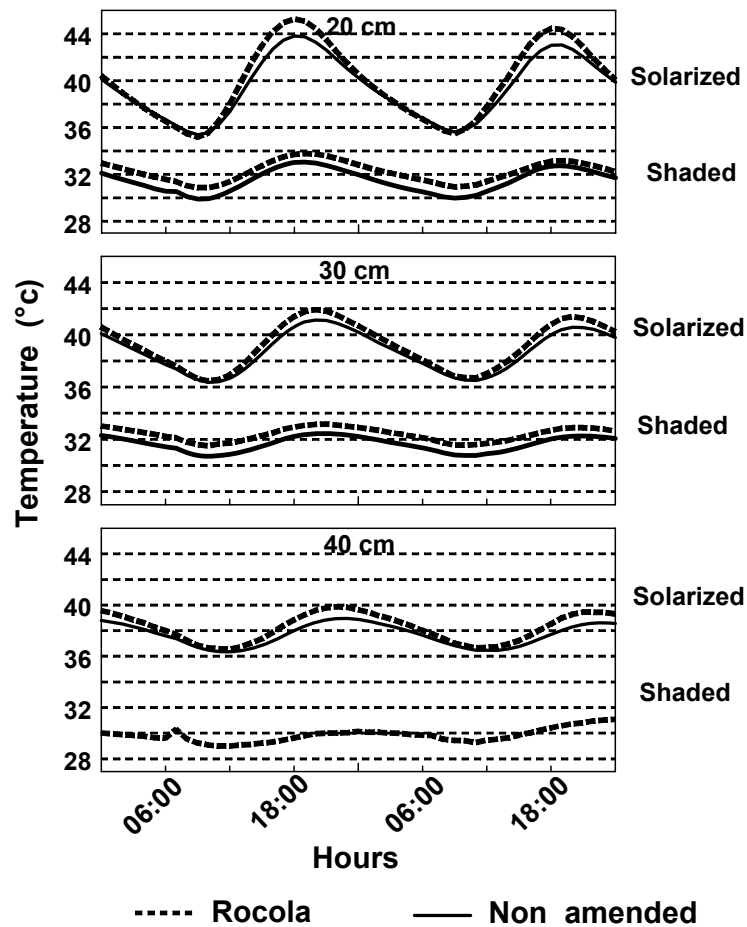
התחממות הקרקע במהלך החיטוי הסולרי בחודש יולי היתה רבה יותר (בשיעור 3-1 מ"צ) בכל העומקים, כאשר הוצנע תוסף אורגני, בהשוואה לחיטוי סולרי ללא תוסף אורגני (איור 6). תופעה זו מוכרת מעבודות קודמות עם תוספים אורגניים שונים; הסיבה לכך לא ידועה. יתכן כי תוספים אורגניים משפרים את מוליכות החום בקרקע.

הטמפ' המקסימליות בעומק 20 ס"מ, בקרקע עם תוסף היתה 45.7 מ"צ, לעומת 44.1 מ"צ בחיטוי סולרי ללא תוסף. הטמפרטורה המירבית שנמדדה בחלקות ללא חיטוי סולרי היתה 34 מ"צ בעומק 20 ס"מ וטמפ' האוויר המירבית היתה 36.7 מ"צ.

התקררות הקרקע בחיטוי סולרי עם תוסף אורגני הייתה מתונה יותר בהשוואה להתקררות של קרקע בחיטוי סולרי ללא תוסף. התחממות הקרקע בעומקים שנבדקו, בטיפולים שכללו שיירי קורנית, היתה דומה להתחממות בטיפולים שכללו שיירי רוקולה.

התחממות הקרקע במהלך ניסויי יולי מוצגת בטבלה 3 בערכים של שעות מעל סף טמפ' נתון; כמו כן מוצגות הטמפרטורות המירביות שנמדדו בכל טיפול.

במהלך ניסויי אוגוסט, התחממות הקרקע הייתה נמוכה יותר, ללא קשר להצנעת התוסף האורגני, לעומת ההתחממות בניסויי יולי (טבלה 4,3). הצנעת רוקולה בקרקע גרמה להתחממות רבה יותר של הקרקע, לעומת התחממות הקרקע במהלך חיטוי סולרי ללא תוסף, בחלק מהימים בלבד.



איור 6: השפעת חיטוי סולרי, ע"י חיפוי קרקע רטובה בפוליאיתילן, עם וללא הצנעת תוסף אורגני (Rocola), על טמפ' הקרקע בשלושה עומקים שונים, רחובות, יולי 2002.

טבלה 3: הצטברות השעות בהן הטמפ' גבוהה מערך מסויים, במשך 28 יום והטמפ' המירביות שנמדדו במהלך חיטוי סולרי ברחובות, יולי 2002.

טמפ' מירבית מ"צ	מספר השעות שבהן הטמפ' הייתה מעל הערך המצויין, במהלך חיטוי סולרי			תוסף	עומק בס"מ
	< 45 מ"צ	< 43 מ"צ	< 40 מ"צ		
45	24	149	296	רוקולה	20
45	11	139	284	קורנית	
44	0	46	245	ללא תוסף	
42	0	0	205	רוקולה	30
44	0	23	176	קורנית	
41	0	0	99	ללא תוסף	
39	0	0	0	רוקולה	40
39	0	0	0	קורנית	
38	0	0	0	ללא תוסף	

טבלה 4: הצטברות השעות בהן הטמפ' גבוהה מערך מסויים, במשך 28 יום והטמפ' המירביות שנמדדו במהלך חיטוי סולרי ברחובות, אוגוסט 2002.

מ"צ	מספר השעות שבהן הטמפ' הייתה מעל הערך המצויין, במהלך חיטוי סולרי			תוסף	עומק בס"מ
	< 45 מ"צ	< 43 מ"צ	< 40 מ"צ		
44	0	28	196	רוקולה	20
43	0	0	155	קורנית	
43	0	0	161	ללא תוסף	
39	0	0	0	רוקולה	30
39	0	0	0	קורנית	
40	0	0	0	ללא תוסף	
37	0	0	0	רוקולה	40
38	0	0	0	קורנית	
38	0	0	0	ללא תוסף	

1.1.2 ריכוז החמצן באווירת הקרקע

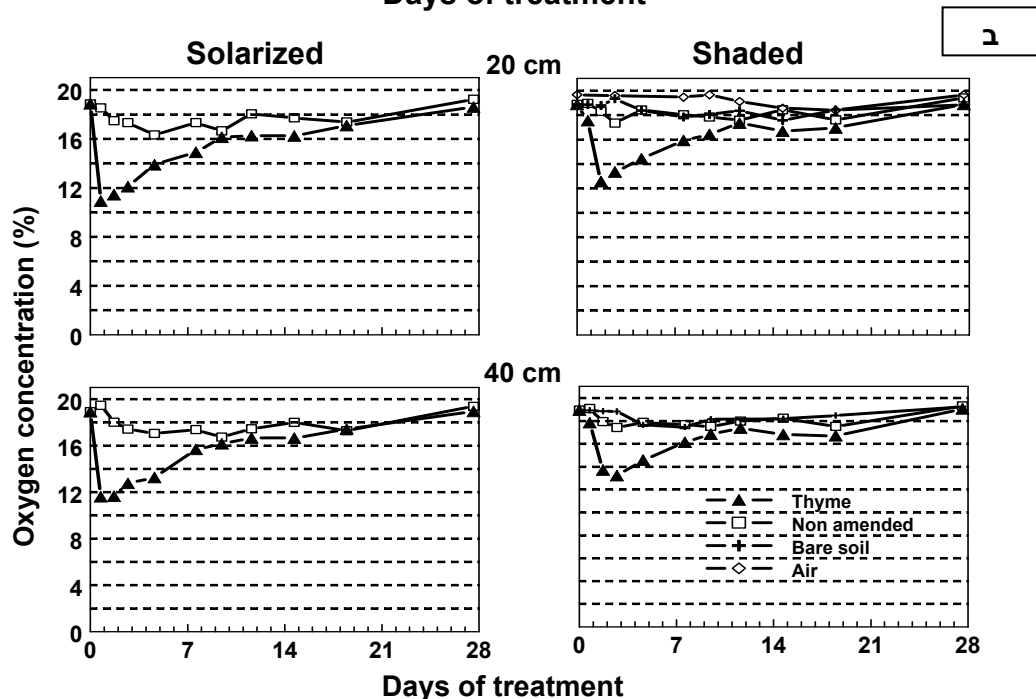
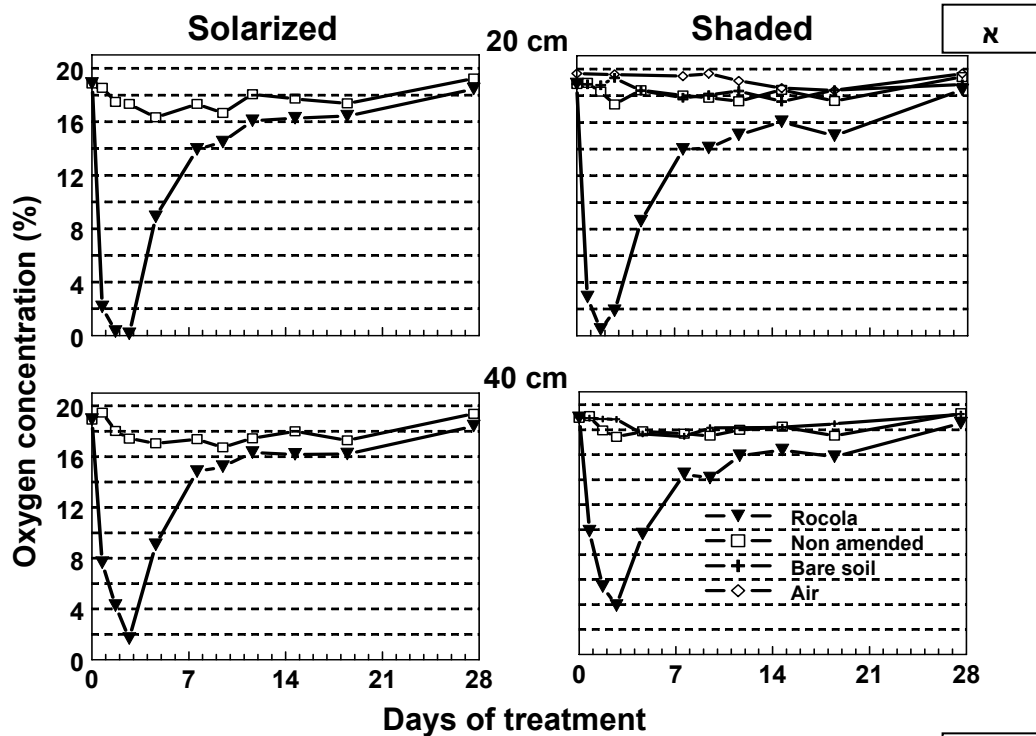
בניסוי יולי, ריכוז החמצן בקרקע פחת ביומיים הראשונים בחלקות שהוצנע בהן תוסף אורגני, ללא קשר לחיטוי הסולרי, בעומק 20 ס"מ ובעומק 40 ס"מ, באופן דומה (איור 7). הצנעת שיירי רוקולה בקרקע וחיטוי סולרי, גרמו לפחיתה חדה בריכוז החמצן, עד לשיעור של 0.14% בעומק 20 ס"מ ולשיעור של 1.7%, בעומק 40 ס"מ (איור 7א). הצנעת שיירי רוקולה בקרקע, ללא חיטוי סולרי, גרמה גם היא לפחיתה חדה בריכוז החמצן, עד לשיעור של 0.46% בעומק 20 ס"מ ועד 3.9% בעומק 40 ס"מ. חיטוי סולרי ללא הצנעת תוסף אורגני גרם לפחיתה מתונה בריכוז החמצן עד לשיעור של 16.3% בעומק 20 ס"מ, בדומה לקרקע מוצלת שבה פחת ריכוז החמצן עד לשיעור של 17.3% בעומק זה (איור 7א).

בניסוי יולי, הצנעת שיירי קורנית בקרקע וחיטוי סולרי, גרמו לפחיתה בריכוז החמצן, עד לשיעור של 10.9% בעומק 20 ס"מ ו-11.6% בעומק 40 ס"מ (איור 7ב). הצנעת שיירי קורנית בקרקע, ללא חיטוי סולרי, גרמה לפחיתה בריכוז החמצן, עד לשיעור של 12.5% בעומק 20 ס"מ ו-13.6% בעומק 40 ס"מ (איור 7ב).

בניסוי שבו הוצנעו בקרקע שיירי רוקולה, הריכוז הנמוך ביותר נרשם לאחר שלושה ימים מתחילת הניסוי ובניסוי שבו הוצנעו בקרקע שיירי קורנית נרשמה פחיתה מקסימלית בריכוז החמצן כבר ביום הראשון לניסוי. לאחר מכן גדל ריכוז החמצן עד לשיעור של 14% ביום השביעי ובהמשך עד לשיעור של 19%, ביום ה-28 לניסוי.

בניסוי אוגוסט, נבדק ריכוז החמצן בעומק 20 ס"מ בלבד. ביום הראשון, פחת ריכוז החמצן, בחלקות שהוצנע בהן תוסף אורגני, ללא קשר לחיטוי הסולרי (התוצאות אינן מוצגות). הצנעת שיירי רוקולה בקרקע וחיטוי סולרי, גרמו לפחיתה חדה בריכוז החמצן, עד לשיעור של 2.4%, בעומק 20 ס"מ. הצנעת שיירי רוקולה בקרקע, ללא חיטוי סולרי, גרמה לפחיתה מתונה יותר, עד לשיעור של 9%, בעומק 20 ס"מ. בקרקעות שהוצנעו בהן רוקולה, עם וללא חיטוי סולרי, גדל ריכוז החמצן ל-11% ול-

19%, כעבור יומיים ושבעיים, בהתאמה. חיטוי סולרי, ללא הצנעת תוסף אורגני, גרם לפחיתה מתונה בריכוז החמצן עד לשיעור של 18.4%, ביום השני לניסוי, בעומק 20 ס"מ; בקרקע מוצלת נמדד ריכוז חמצן בשיעור של 19.7% בעומק זה. בניסויי אוגוסט, הצנעת שיירי קורנית בקרקע, עם וללא חיטוי סולרי, גרמה לפחיתה בריכוז החמצן, עד לשיעור של 16% בעומק 20 ס"מ, כעבור יומיים. לאחר מכן גדל ריכוז החמצן עד לשיעור של 18% ביום השביעי, ובהמשך עד לשיעור של 19.7%, ביום ה-28 לניסוי (התוצאות אינן מוצגות).



איור 7: השתנות ריכוז החמצן בעומקים שונים, באווירת קרקע שהוצנעו בה שיירי רוקולה (א), או קורנית (ב) במהלך חיטוי סולרי בניסויי שדה, רחובות, יולי 2002. Non amended - חלקה מחופה ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה ללא תוסף; Air - ריכוז החמצן באוויר.

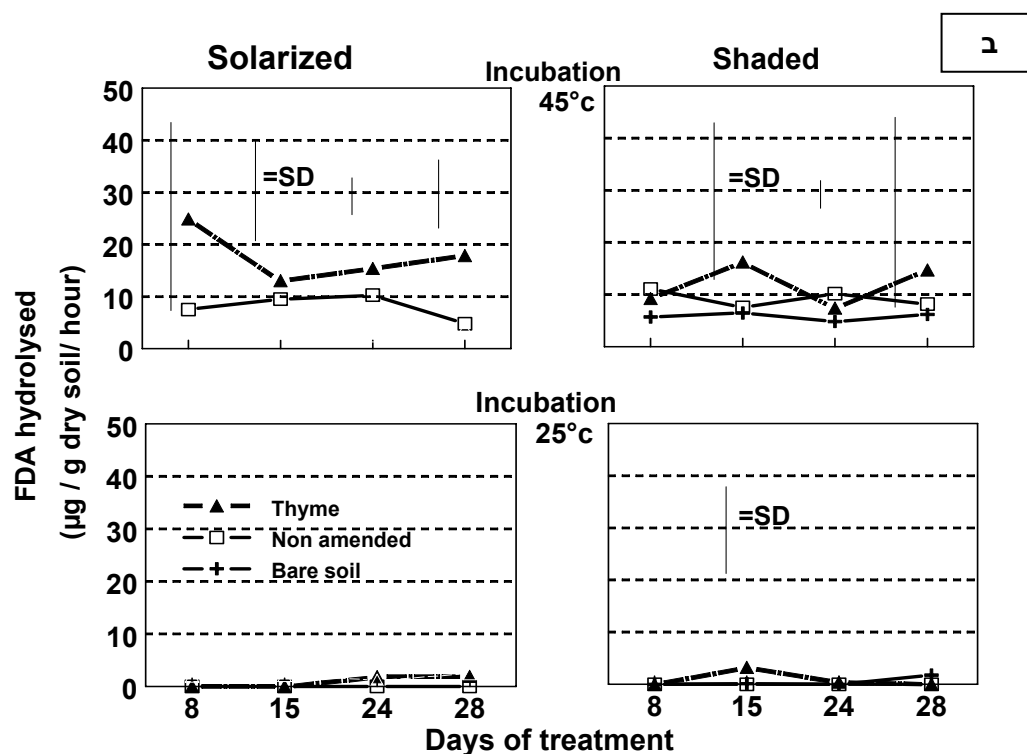
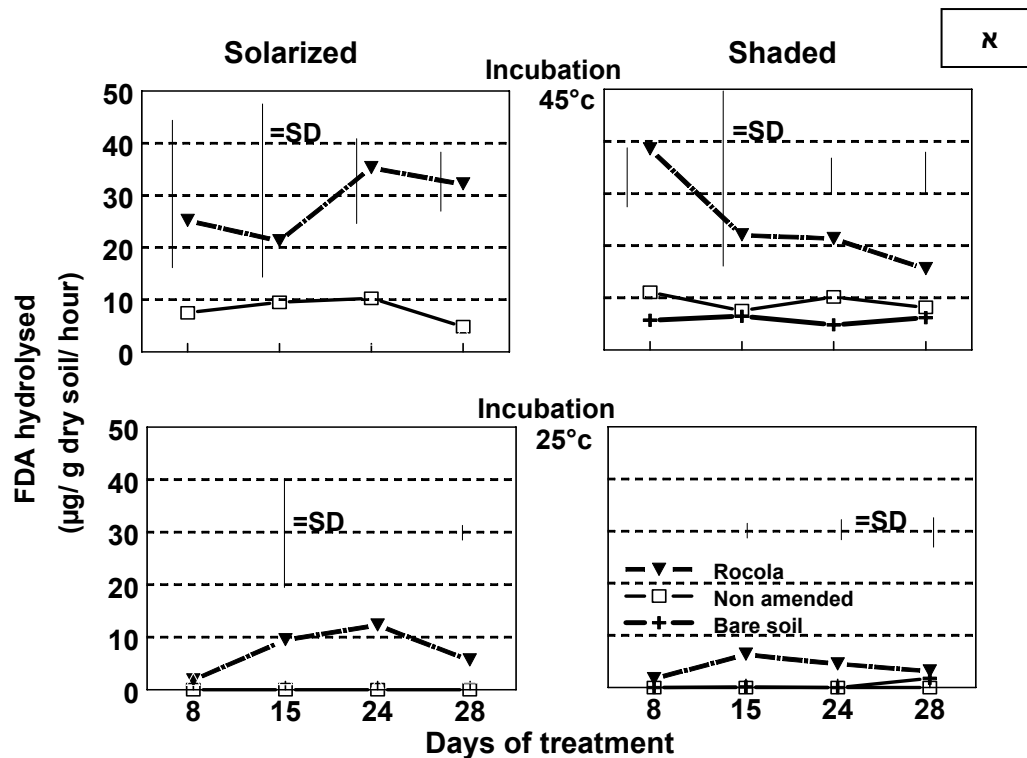
1.1.3 pH תמיסת הקרקע

pH תמיסת הקרקע נבדק בדגימות שבועיות, באמצעות אלקטרודת pH בניסוי יולי ובניסוי אוגוסט (התוצאות אינן מוצגות). ערכו ההתחלתי היה pH=8 וכעבור שבוע עלה ל- pH=8.5 בטיפולים השונים, פרט לטיפול מוצל ברוקולה, שבו ירד ל- pH=7.5, בניסוי יולי בלבד. באופן כללי ניתן לומר כי השפעת הטיפולים על pH תמיסת הקרקע היתה מזערית, הן בניסוי יולי והן בניסוי אוגוסט.

1.1.4 פעילות מיקרוביאלית כללית

מעקב אחר פעילות מיקרוביאלית כללית בקרקע, נעשה בשיטה קולורימטרית המבוססת על פירוק אנזימטי של Fluorescein diacetate. חומר זה מתפרק ע"י מגוון רחב של אנזימים הידרוליטיים, חלקם חפשיים בקרקע. הפעילות המיקרוביאלית נבדקה בשתי טמפרטורות- 25 מ"צ, טמפרטורה המייצגת את התנאים בקרקע ו-45 מ"צ, המייצגת תנאי חום, בדומה לטמפ' המתקבלות במהלך חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ. בניסוי יולי, הצנעת שיירי צמחים בקרקע הגבירה את הפעילות המיקרוביאלית, לעומת קרקעות ללא תוסף אורגני (איור 8). הדגרה בטמפ' 45 מ"צ הגבירה את הפעילות בהשוואה ל-25 מ"צ, ללא קשר להצנעת התוסף, דבר שיכול להצביע על נוכחות אוכלוסיות מיקרוביאליות תרמוטולרנטיות. חיטוי סולרי בשילוב תוסף אורגני, בהדגרה בטמפ' 45 מ"צ, גרמו להפחתת הפעילות הביולוגית במשך השבועיים הראשונים; לאחר מכן ניכרה מגמה של התגברות הפעילות הביולוגית בטמפ' הגבוהות. בהצנעת שיירי קורנית המגמה היתה מתונה יותר מזו שעם רוקולה. שינוי המגמה יכול להעיד על שינוי באוכלוסיות המיקרוביאליות - דעיכת אוכלוסיות שפעילותן נפגעת בהשפעת הרוקולה והתבססות הדרגתית של אוכלוסיות תרמוטולרנטיות, שאינן נפגעות, או אולי מעודדות בנוכחות התוסף והחיטוי הסולרי. בקרקע שהוצנעו בה שיירי רוקולה, ללא חיטוי סולרי, בהדגרה ב-45 מ"צ, הפעילות המיקרוביאלית גבוהה יחסית בתחילת הניסוי ויורדת עם הזמן (איור 8א). הירידה בפעילות עשויה להיות עקב התדלדלות התרכובות הזמינות לפירוק בקרקע, או עקב הופעת תרכובות שמעכבות את הפעילות.

בניסוי אוגוסט, אשר שררו בהם טמפ' נמוכות יותר (טבלה 4), התקבלו מגמות דומות, אולם רמת הפעילות הכללית היתה נמוכה יותר- בהדגרה ב-45 מ"צ וב-25 מ"צ, התפרקו 10-20 ו- 0-5 מיקרוגרם FDA לגרם קרקע יבשה לשעה, בהתאמה (התוצאות אינן מוצגות).



איור 8: השתנות הפעילות האנזימטית בקרקע (הידרוליזה של Fluorescein diacetate) בהשפעת הצנעת שיירי רוקולה (א) או קורנית (ב), וחיטוי סולרי, בעומק 20 ס"מ, בקרקע רחובות, יולי 2002. Non amended - חלקה מחופה ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה ללא תוסף. תוצר הפירוק, Fluorescein, נקבע לאחר שעה אחת של הדגרת דוגמת הקרקע בתמיסת FDA (10 מיקרוגרם למ"ל) בטמפ' 25 מ"צ או 45 מ"צ. קוים אנכיים מציינים סטיות תקן, SD, מירביות בכל מועד. קווי הסטייה הוסטו מנקודת המדידה, לצורך הצגה בהירה יותר של הנתונים.

1.1.5 השפעת חיטוי סולרי משולב עם תוספים אורגניים על חיות פגעי קרקע

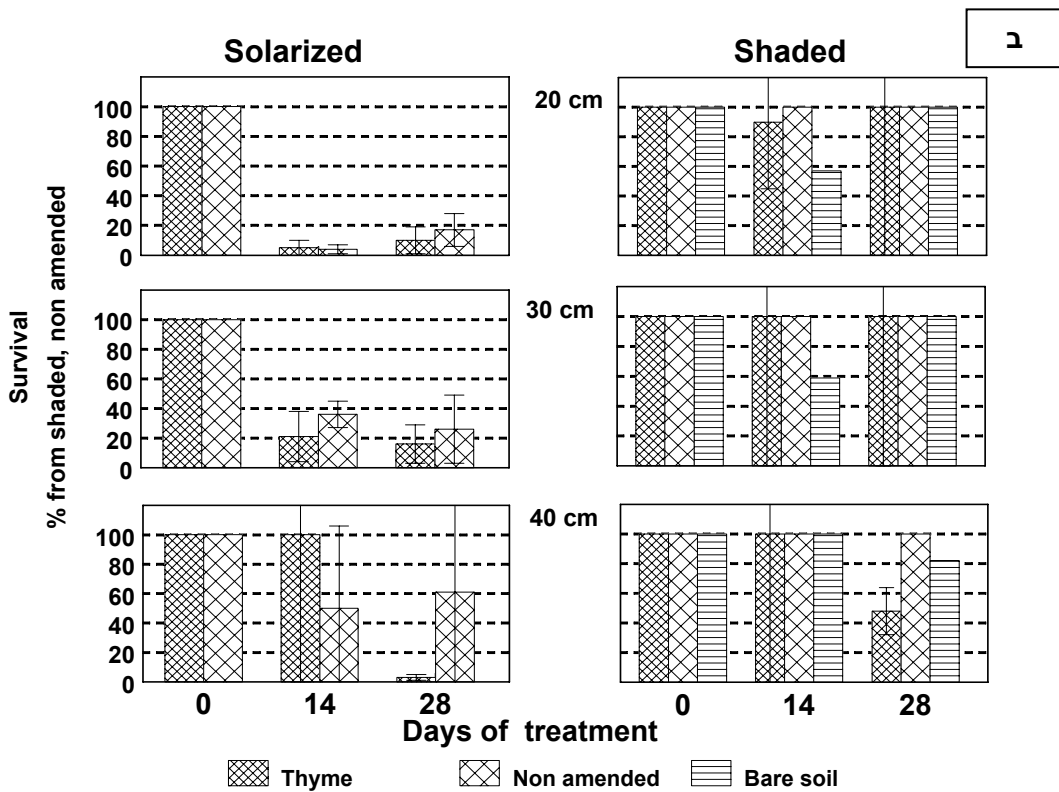
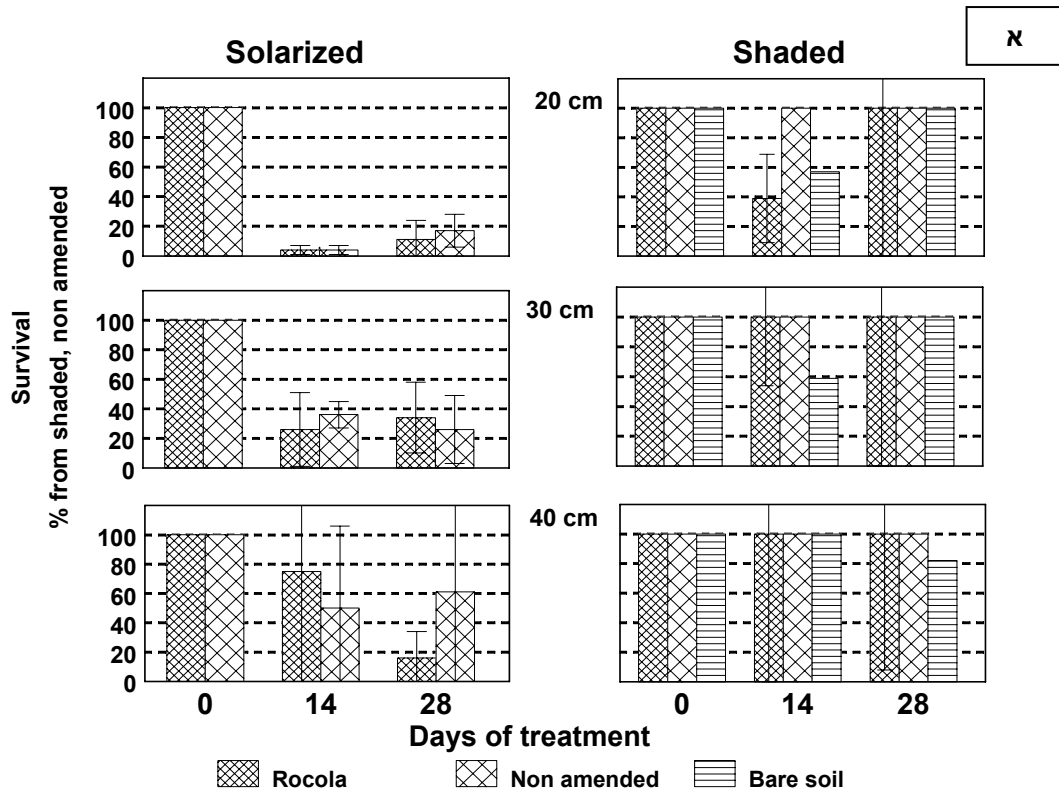
גופי קיימא של פגעי קרקע שונים, הוצנעו בקרקע טרם הטיפולם בשלושה עומקים שונים: עומק 20 ס"מ, שבו הוצנע התוסף האורגני; עומק 30 ס"מ, גבול שכבת הקרקע שאליה הוצנע התוסף ועומק 40 ס"מ, שבו הקרקע נקיייה מתוסף וחימומה היה המתון ביותר. גופי הקיימא הוצאו בשני מועדים מתחילת החיטוי ונבדקה חיותם. ניתוחים סטטיסטיים מפורטים בנספח מס' 1.

1.1.5.1 קטילת *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*

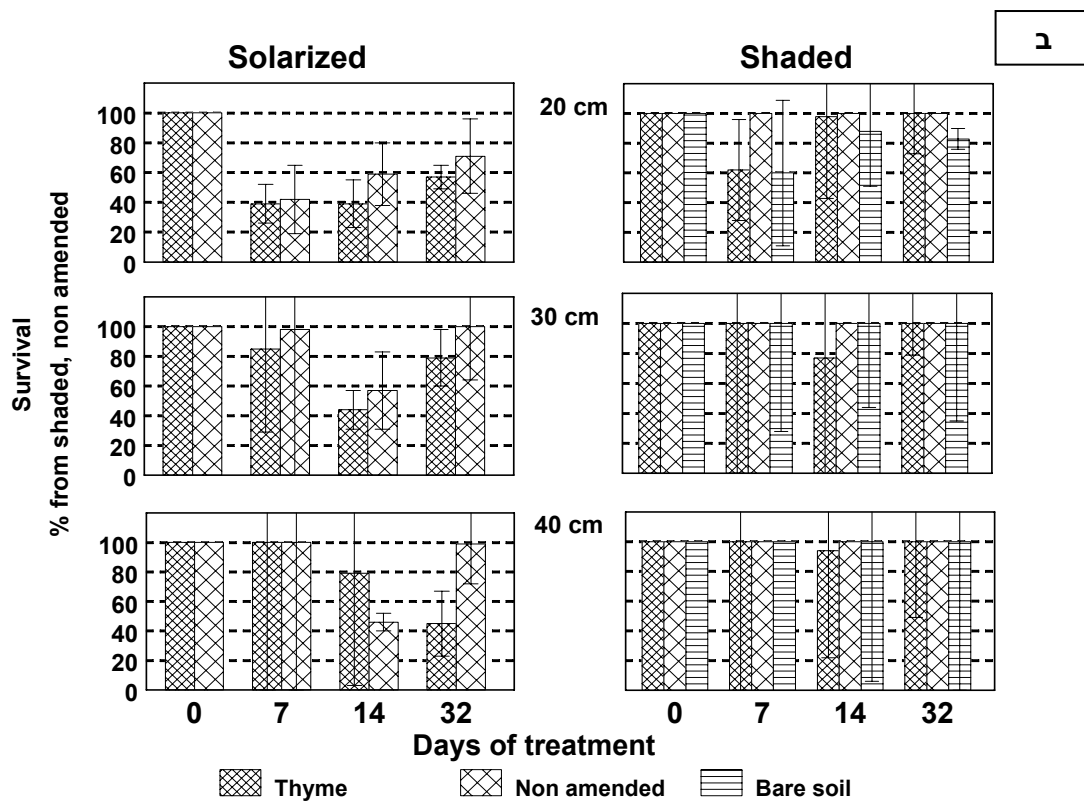
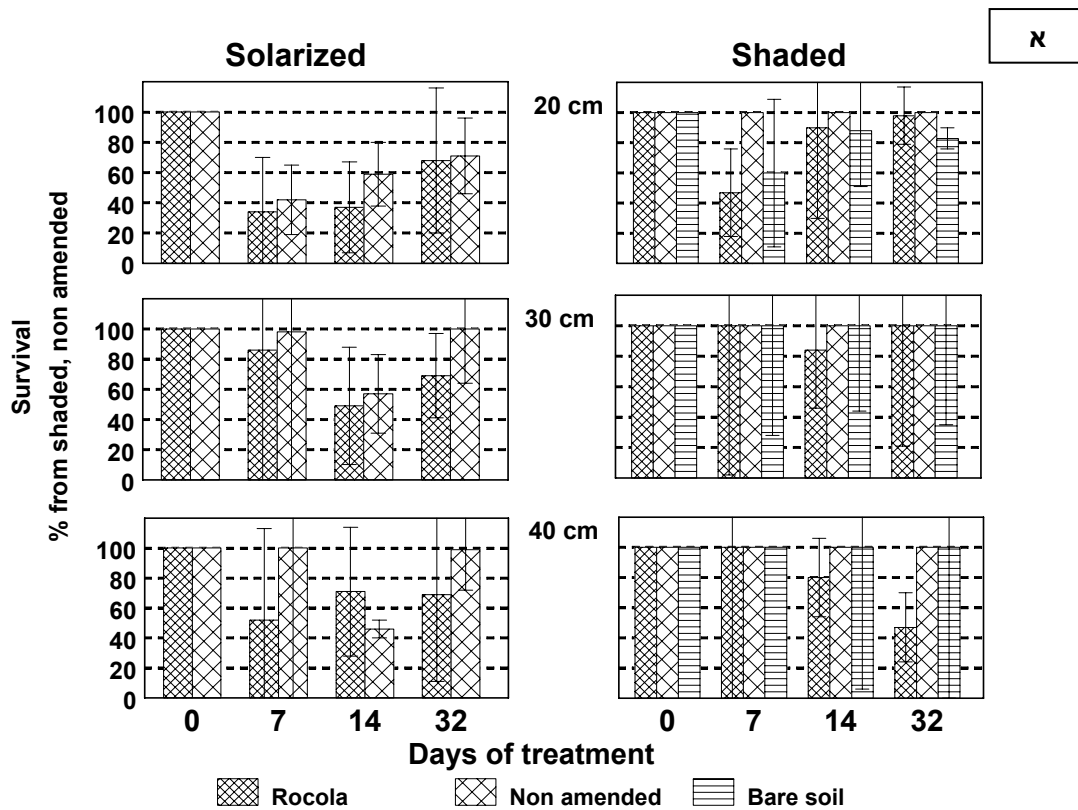
בניסוי יולי, הצנעת שיירי רקולה בקרקע בשילוב חיטוי סולרי קטלו את הכלמידוספורות של FORL בשיעור של 98% בעומק 20 ס"מ, 74% ב-30 ס"מ ובשיעור של 25% בעומק 40 ס"מ (בהשוואה לערכי CFU בטיפול מוצל ללא תוסף אורגני באותו עומק), כבר בשבועיים הראשונים לניסוי (איור 9א). בקרקע מוצלת ללא תוסף, דעכה אוכלוסיית ה-FORL בשיעור של 5%, 62% ו-46% (מערך CFU התחלתי 3100 CFU/g dry soil) בעומקים 20, 30 ו-40 ס"מ, בהתאמה, בשבועיים הראשונים (לא מוצג). לאחר ארבעה שבועות דעכה אוכלוסיית ה-FORL, בקרקע מוצלת ללא תוסף, בשיעורים של 90% מערך CFU התחלתי, 86% ו-67%, בעומקים 20, 30 ו-40 ס"מ, בהתאמה, לעומת קטילה מלאה (מתחת לסף הגילוי), בטיפול שכלל שיירי רוקולה בשילוב חיטוי סולרי, בעומקים 20 ו-30 ס"מ. שילוב שיירי רוקולה וחיטוי סולרי קטלו 90% מהאוכלוסייה ההתחלתית, בעומק 40 ס"מ, לאחר ארבעה שבועות (לא מוצג). הצנעת שיירי קורנית בקרקע וחיטוי סולרי, קטלו את גופי הפטרייה FORL בשיעורים של 95% (מערך CFU בטיפול מוצל ללא תוסף אורגני באותו עומק) ושל 80%, בעומקים 20 ו-30 ס"מ בהתאמה, כבר בשבועיים הראשונים לניסוי (איור 9ב). בעומק 40 ס"מ לא התקבלה קטילה גדולה מהדעיכה הטבעית, כעבור שבועיים. לאחר ארבעה שבועות פחתה חיות גופי הקיימא אל מתחת לסף הגילוי בכל העומקים שנבדקו. חיטוי סולרי, ללא תוסף אורגני, קטל את אוכלוסיית ה-FORL בשיעורים של 96% (מערך CFU בטיפול מוצל ללא תוסף אורגני באותו עומק), 64% ו-50% בעומקים 20, 30 ו-40 ס"מ, בהתאמה, בשבועיים הראשונים. לאחר ארבעה שבועות פחתה האוכלוסייה אל מתחת לסף הגילוי בעומק 20 ס"מ; בעומקים 30 ו-40 ס"מ, נקטלו 96% ו-80% מהאוכלוסייה ההתחלתית, בהתאמה (לא מוצג). הצנעת קורנית או רוקולה, ללא חיטוי סולרי, לא הביאה לקטילה יעילה של גופי קיימא של FORL.

הצנעת שיירי קורנית או רוקולה בקרקע לפני החיטוי הסולרי נמצאה יעילה יותר לעומת כל טיפול בנפרד והביאה לשיפור ההדברה בעומק 40 ס"מ. עקב שונות גדולה בתוצאות בכל טיפול, ברוב המקרים לא נמצאו הבדלים מובהקים בין הטיפולים.

בניסוי אוגוסט, חיטוי סולרי לא גרם לקטילה יעילה של גופי קיימא של FORL, ללא קשר להצנעת תוסף אורגני (איור 10). הצנעת רוקולה בקרקע, גרמה לאחר שבוע לפחיתה בשיעור 65% (מערך CFU בטיפול מוצל ללא תוסף אורגני באותו עומק) ו-53% בחיות הפתוגן, בשילוב עם חיטוי סולרי וללא חיטוי סולרי, בהתאמה, אולם מגמה זו לא נמשכה ובתום הניסוי חיות הפתוגנים בכל הטיפולים הייתה דומה. בעומק 40 ס"מ, הצנעת רוקולה בקרקע ללא חיטוי סולרי והצנעת קורנית בשילוב חיטוי סולרי, גרמו לקטילה של 55% מערך CFU בטיפול מוצל ללא תוסף אורגני בעומק 40 ס"מ בתום הניסוי, לעומת חיטוי סולרי שלא גרם לקטילת הפתוגן.



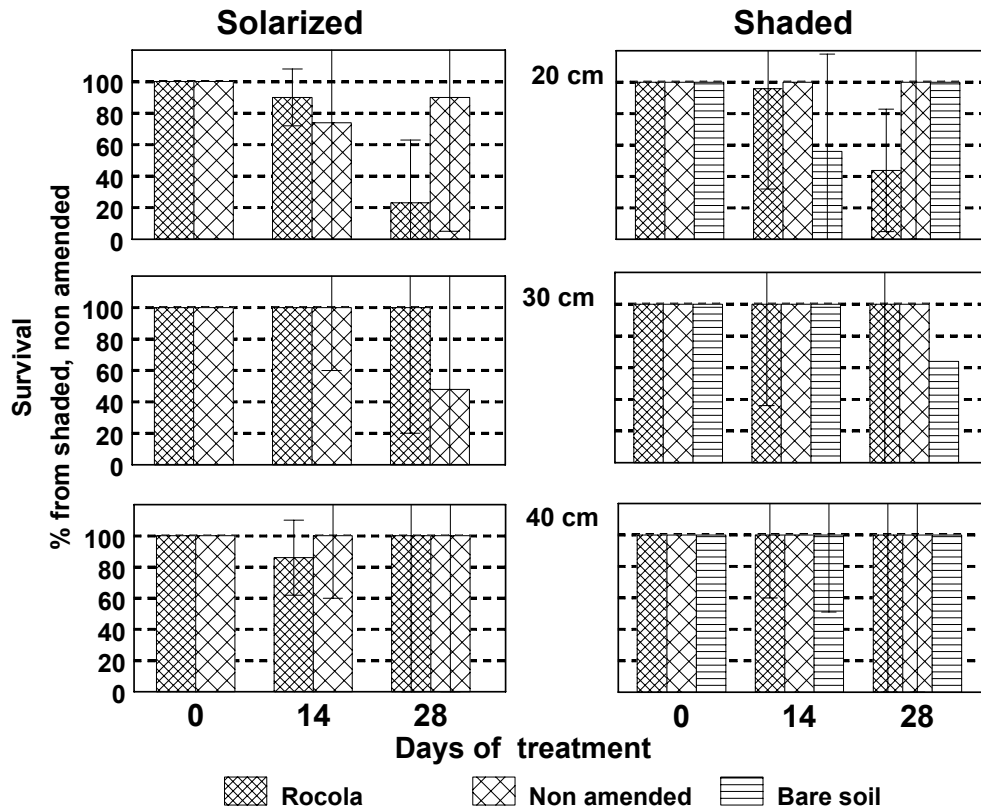
איור 9: השפעת חיטוי סולרי והצנעת רוקולה (א), או קורנית (ב), על חיית *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (FORL), בעומקים שונים בקרקע רחובות, יולי 2002. Non amended - חלקה מחופה ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה ללא תוסף. הנתונים מוצגים כממוצע של אחוז מהערך שהתקבל בקרקע מוצלת, ללא תוסף אורגני, בכל בלוק; ערך מקסימלי 100% ניתן גם במקרים גבוהים יותר, שרירותית. קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.



איור 10: השפעת חיטוי סולרי והצנעת רוקולה (א), או קורנית (ב), על חיות *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (FORL), בעומקים שונים בקרקע רחובות, אוגוסט 2002. Non amended - חלקה מחופה ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה ללא תוסף. הנתונים מוצגים כממוצע של אחוז מהערך שהתקבל בקרקע מוצלת, ללא תוסף אורגני, בכל בלוק; ערך מקסימלי 100% ניתן גם במקרים גבוהים יותר, שרירותית. קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

1.1.5.2 קטילת *Macrophomina phaseolina*

בניסוי יולי, הצנעת רוקולה בקרקע בשילוב חיטוי סולרי למשך ארבעה שבועות, גרמו לקטילת *M. phaseolina* ב-80% ממקטעי הגבעול שהוטמנו בעומק 20 ס"מ (איור 11). שאר הטיפולים, עם וללא תוסף אורגני, לא קטלו ביעילות את הפתוגן בעומקים שנבדקו, ללא קשר לתוסף. עקב שונות גדולה בתוצאות בכל טיפול, לא נמצאו הבדלים מובהקים בין הטיפולים. בניסוי אוגוסט לא נקטל הפתוגן כלל (התוצאות אינן מוצגות).



איור 11: השפעת חיטוי סולרי והצנעת רוקולה על חיות *Macrophomina phaseolina*, בעומקים שונים, בקרקע רחובות, יולי 2002. חלקה מחופה ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה ללא תוסף. הנתונים מוצגים כממוצע של אחוז מהערך שהתקבל בקרקע מוצלת, ללא תוסף אורגני, בכל בלוק; ערך מקסימלי, 100% ניתן גם במקרים גבוהים יותר, שרירותית; ערך 100% ניתן שרירותית לטיפולים מוצלים ללא תוסף אורגני. קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

1.1.5.3 קטילת *Rhizoctonia solani*

בניסוי יולי, חיטוי סולרי עם וללא תוסף אורגני לא נמצא יעיל לקטילת *R. solani* בעומקים שנבדקו. טיפול סולרי גרם לקטילה של 50% מגופי הקיימא של הפתוגן בממוצע, בכל העומקים; עקב שונות גדולה בתוצאות בכל טיפול, לא נמצאו הבדלים מובהקים בין הטיפולים (התוצאות אינן מוצגות). קטילת *R. solani* לא נבחנה בניסוי אוגוסט.

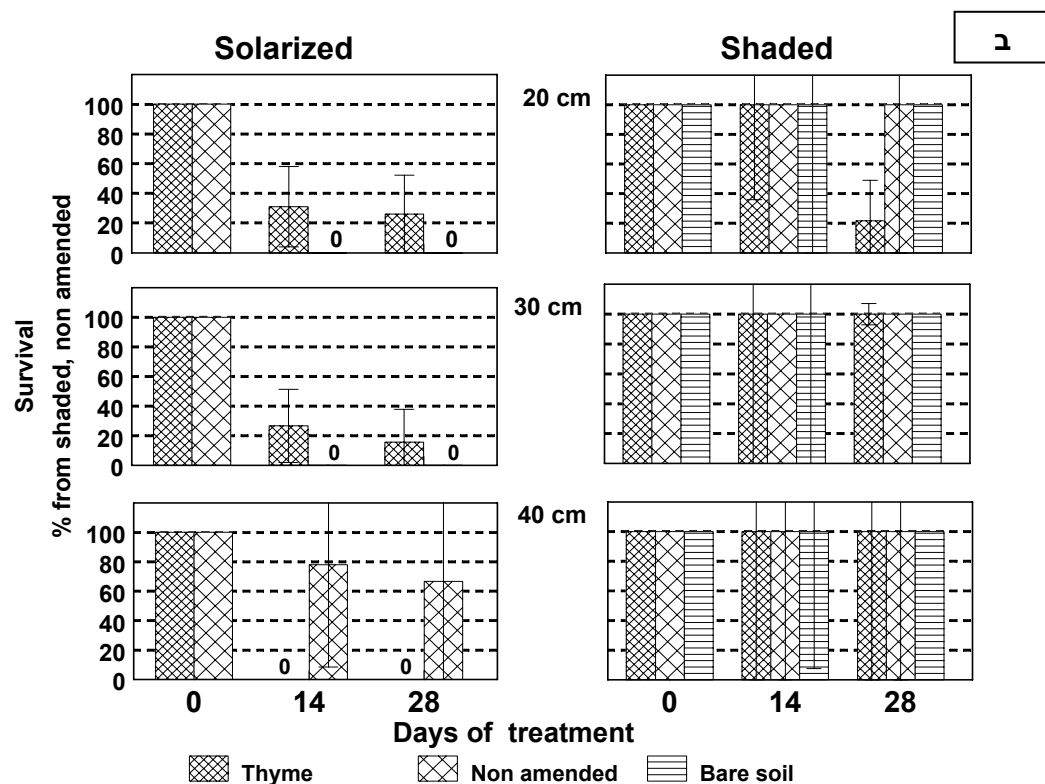
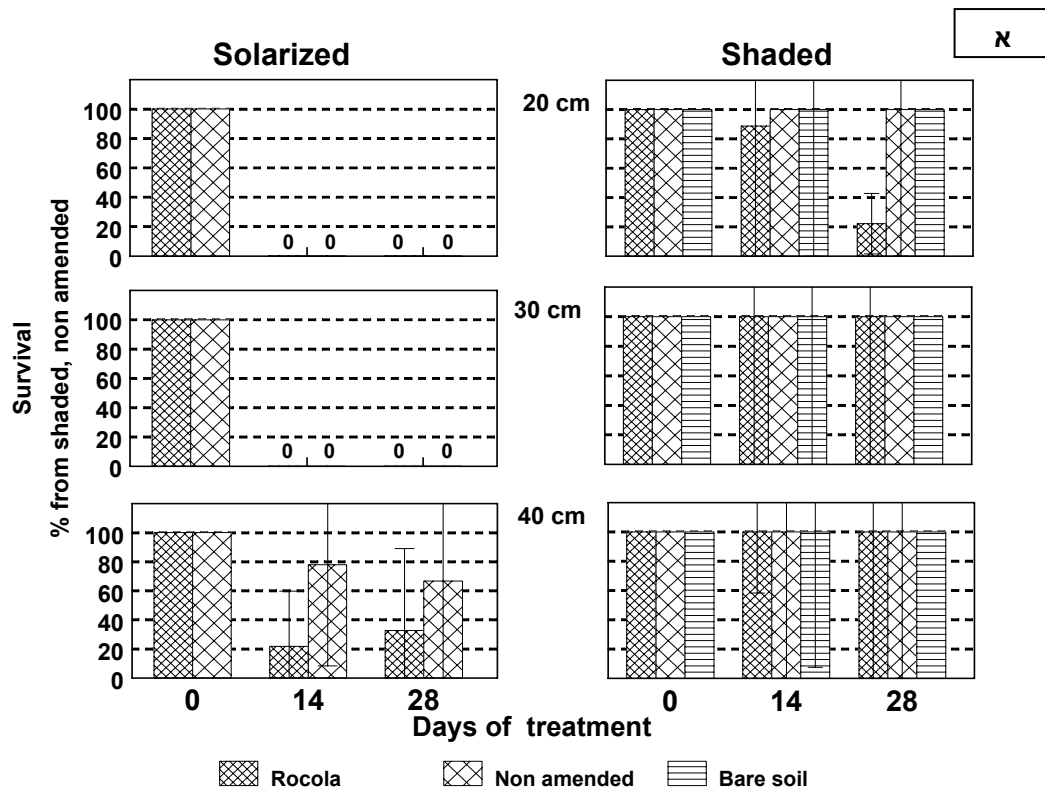
1.1.5.4 קטילת *Verticillium dahliae*

בניסוי יולי, הצנעת שיירי רוקולה בקרקע בשילוב חיטוי סולרי גרמו לקטילה מלאה של *V. dahliae* עד עומק 30 ס"מ כבר בשבועיים הראשונים לניסוי (איור 12א). בעומק 40 ס"מ התקבלה קטילה של הפתוגן ב-90% ממקטעי הגבעול שהוטמנו. הצנעת שיירי קורנית בקרקע בשילוב חיטוי סולרי קטלו *V. dahliae* בשיעור של עד 80% ממקטעי הגבעול שהוטמנו בעומק 20 ס"מ ו-90% בעומק 30 ס"מ. חיטוי סולרי של קרקע שהוצנעו בה שיירי קורנית גרם לקטילה מלאה של הפתוגן בעומק 40 ס"מ, כבר בשבועיים הראשונים לניסוי (איור 12ב), בניגוד לחיטוי סולרי או להצנעת תוסף אורגני בלבד. חיטוי סולרי ללא תוסף אורגני, גרם לקטילה מלאה של הפתוגן עד עומק 30 ס"מ; בעומק 40 ס"מ התקבלה קטילה ב-90% ממקטעי הגבעול שהוטמנו. הצנעת תוסף אורגני ללא חיטוי סולרי לא גרמה לקטילה יעילה של גופי קיימא של הפתוגן. הישרדות הפתוגן בקרקע מוצלת ללא תוסף אורגני פחתה בשבועיים הראשונים לשיעור של 70% ממקטעי הגבעול שהוטמנו עד עומק 30 ס"מ ולשיעור של 20% בעומק 40 ס"מ (מוצגת באיור 12 כ-100%, ביחס לטיפולים האחרים, בכל מועד בנפרד). כעבור שבועיים נוספים ירדה ההישרדות ל-30%, 50% ו-13% מהערך ההתחלתי, בעומקים 20, 30 ו-40 ס"מ, בהתאמה. עקב שונות גדולה בתוצאות בכל טיפול, ברוב המקרים לא נמצאו הבדלים מובהקים בין הטיפולים.

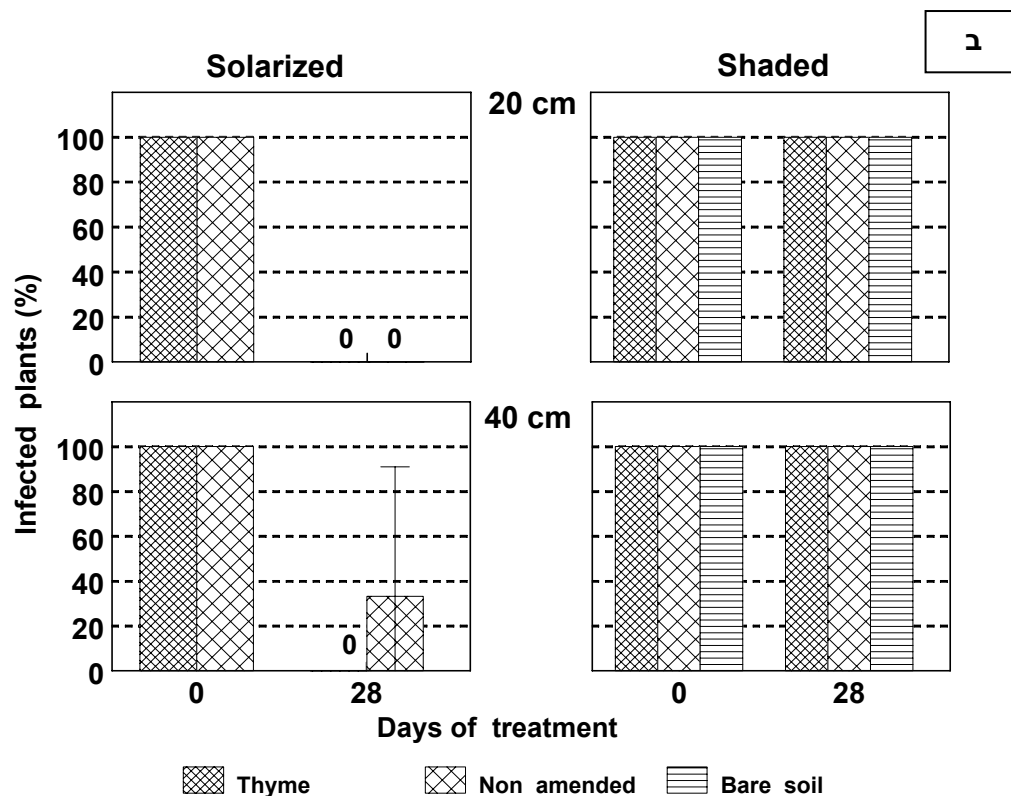
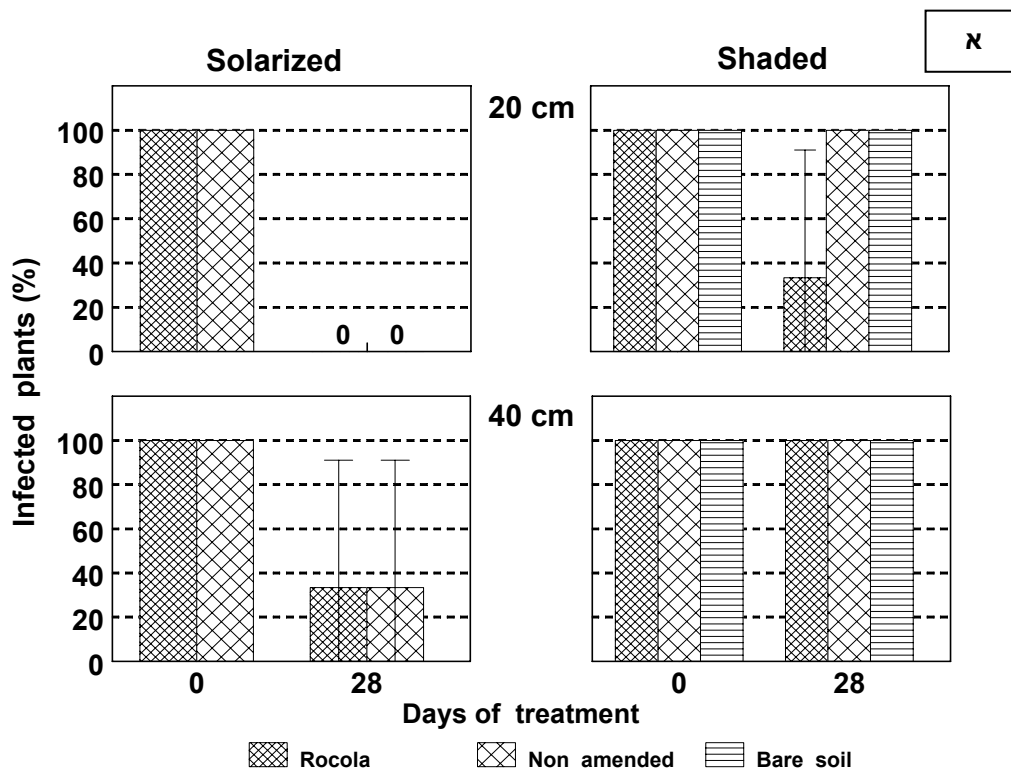
בניסוי אוגוסט, חיטוי סולרי גרם לקטילה מלאה של הפתוגן בכל העומקים, ללא קשר להצנעת התוסף האורגני כבר כעבור שבועיים. ללא חיטוי סולרי, הצנעת רוקולה או קורנית בקרקע לא גרמה לקטילת הפתוגן, בהשוואה לקרקע מוצלת ללא תוסף אורגני, שבה פחתה חיות הפתוגן לשיעור של 70%, 20% ו-80%, בעומקים 20, 30 ו-40 ס"מ, בהתאמה. לא נמצאו הבדלים מובהקים בין הטיפולים (התוצאות אינן מוצגות).

1.1.5.5 קטילת נמטודה יוצרת עפצים *Meloidogyne javanica*

בניסוי יולי, הצנעת שיירי רוקולה בקרקע בשילוב חיטוי סולרי גרמו לקטילה מלאה של נמטודות יוצרות עפצים עד עומק 20 ס"מ כעבור ארבעה שבועות מתחילת הניסוי; בעומק 40 ס"מ התקבלה קטילה חלקית בלבד (איור 13א). הצנעת שיירי קורנית בקרקע בשילוב חיטוי סולרי גרמו לקטילה מלאה של נמטודות יוצרות עפצים עד עומק 40 ס"מ (איור 13ב). חיטוי סולרי ללא תוסף אורגני, גרם לקטילה מלאה של הפתוגן עד עומק 20 ס"מ; בעומק 40 ס"מ התקבלה קטילה חלקית בלבד. הצנעת תוסף אורגני ללא חיטוי סולרי לא גרמה לקטילה יעילה של הפתוגן, אם כי רוקולה הפחיתה את אוכלוסיית הנמטודות בעומק 20 ס"מ. עקב שונות גדולה בתוצאות בכל טיפול, ברוב המקרים לא נמצאו הבדלים מובהקים בין הטיפולים; השפעותיהם העיקריות של הטיפולים הסולריים נבדלו באופן מובהק מהטיפולים המוצלים בשני העומקים. ההשפעה העיקרית של התוסף האורגני נבדלה באופן מובהק רק בעומק 20 ס"מ.



איור 12: השפעת חיטוי סולרי והצנעת רוקולה (א), או קורנית (ב), על חיות *Verticillium* בעומקים שונים, בקרקע רחובות, יולי 2002. Non amended - חלקה מחופה ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה ללא תוסף. הנתונים מוצגים כממוצע של אחוז מהערך שהתקבל בקרקע מוצלת, ללא תוסף אורגני, בכל בלוק; ערך מקסימלי, 100% ניתן גם במקרים גבוהים יותר, שרירותית; ערך 100% ניתן שרירותית לטיפולים מוצלים ללא תוסף אורגני. קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.



איור 13: השפעת חיטוי סולרי והצנעת רוקולה (א) או קורנית (ב), על חיות נמטודה יוצרת עפצים *Meloidogyne javanica*, בעומקים שונים בקרקע רחובות, יולי 2002. הנתונים מוצגים כממוצע של אחוז הנגיעות שנמצאה בצמחים שנשתלו בקרקע מאולחת לאחר הטיפול. Non amended - חלקה מחופה ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה ללא תוסף. קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

1.1.6 הערכת אוכלוסיות המיקרואורגניזמים בקרקע

1.1.6.1 הערכת אוכלוסיית הפטריות בקרקע

בניסוי יולי, בכל הטיפולים, פחת מספר כלל הפטריות בקרקע במשך השבועיים הראשונים; לאחר מכן ניכרה מגמה של עלייה באוכלוסיית הפטריות, עד למספרן המקורי ובקרקע מוצלת ללא תוסף אורגני, אף לערך גבוה ממנו (איור 14). הצנעת שיירי רוקולה בקרקע וחיטוי סולרי, גרמה לפחיתה באוכלוסיית כלל הפטריות, לאורך כל הניסוי, עד 85% ביום 28. חיטוי סולרי גרם לירידה בכלל הפטריות בשעור של 60% בשבועיים הראשונים, בהשוואה לקרקע מוצלת ללא תוסף אורגני. הצנעת שיירי רוקולה בקרקע, ללא חיטוי סולרי, גרמה לפחיתה באוכלוסיית כלל הפטריות בשבועיים הראשונים בלבד, ב-40% לעומת קרקע מוצלת ללא תוסף אורגני. לפחיתה דומה גרמה גם הצנעת שיירי קורנית בשילוב חיטוי סולרי; הצנעת שיירי קורנית ללא חיטוי סולרי, גרמה לפחיתה באוכלוסיית כלל הפטריות בשבועיים הראשונים בלבד, ב-60% לעומת קרקע מוצלת ללא תוסף אורגני; בהמשך גדלה אוכלוסיית כלל הפטריות לערכה ההתחלתי (איור 14ב).

בניסוי אוגוסט, חיטוי סולרי גרם לירידה בכלל הפטריות בשעור של עד 60% מערך CFU התחלתי (התוצאות אינן מוצגות). הצנעת שיירי רוקולה בקרקע, עם וללא חיטוי סולרי, גרמו לירידה באוכלוסיית כלל הפטריות, עד ליום 25. הצנעת שיירי קורנית בקרקע וחיטוי סולרי גרמה לירידה באוכלוסיית כלל הפטריות רק בשבועיים הראשונים לניסוי. יתר הטיפולים לא גרמו לשינויים משמעותיים באוכלוסיית כלל הפטריות ובתום הניסוי התקבלו מספרים דומים ($1-1.5 \cdot 10^4$ CFU) לגרם קרקע יבשה) בכל הטיפולים (התוצאות אינן מוצגות).

1.1.6.2 הערכת אוכלוסיית החיידקים בקרקע

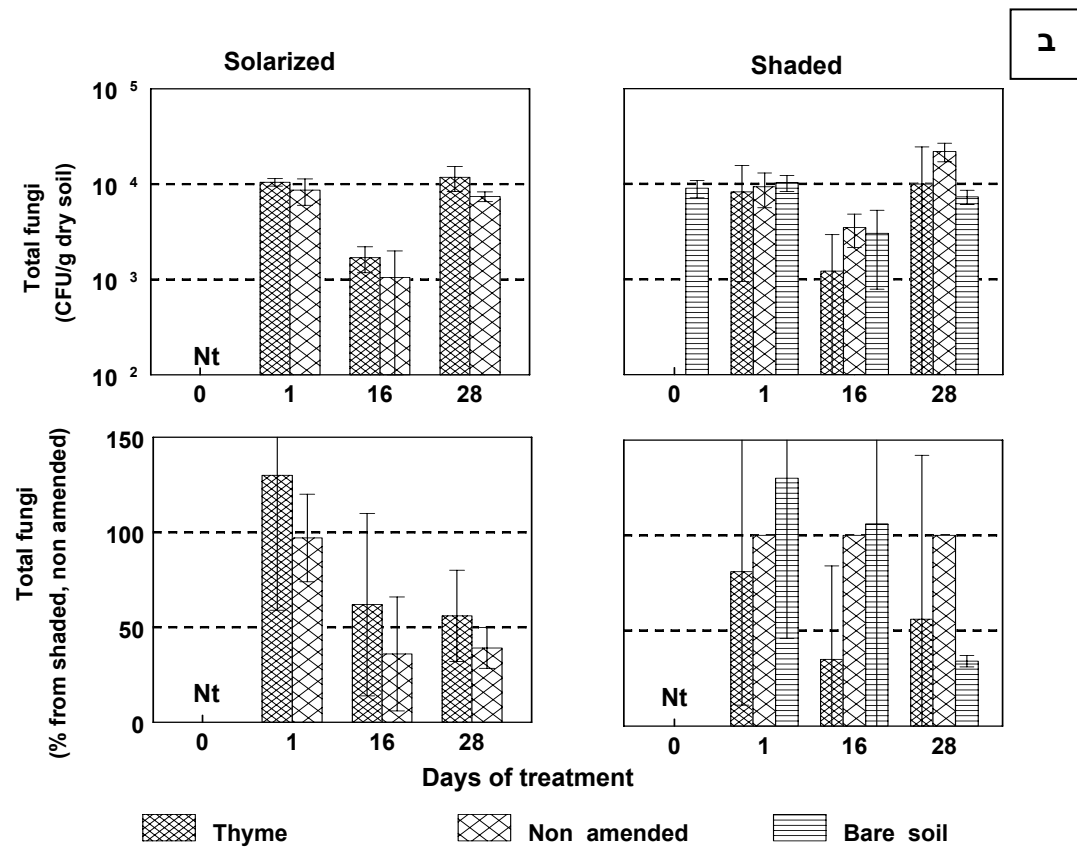
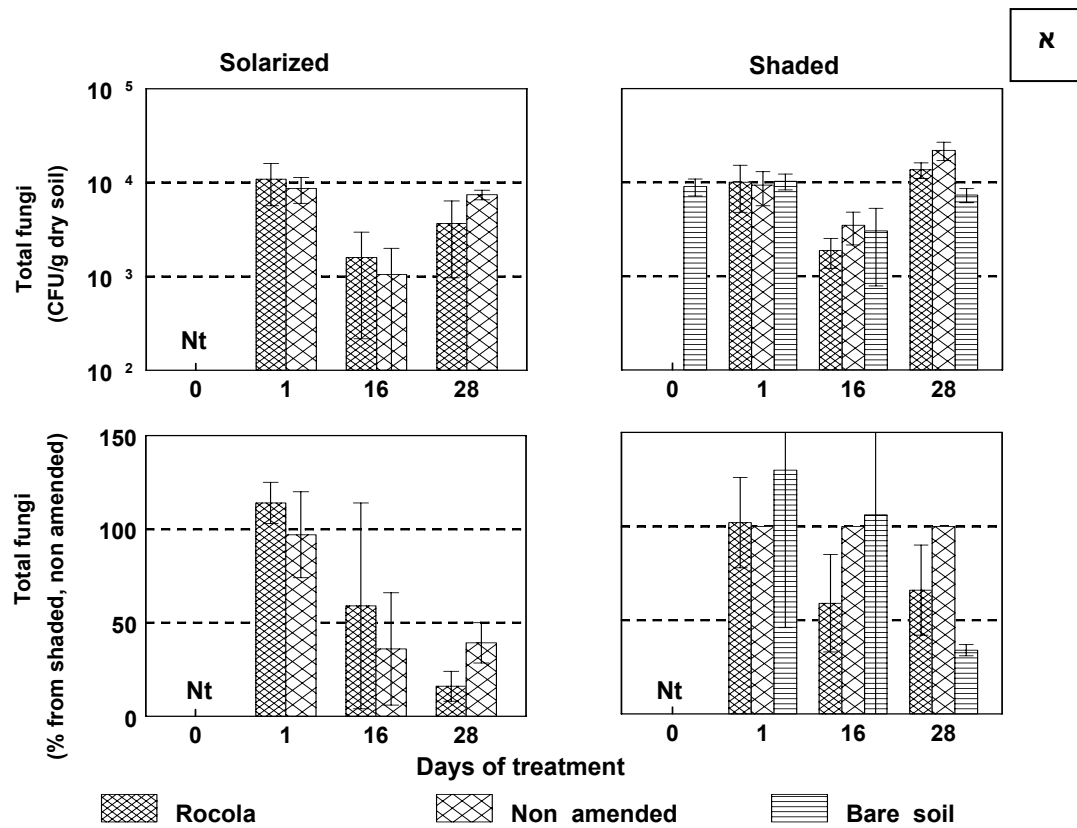
בניסוי יולי, הצנעת שיירי רוקולה בקרקע בשילוב חיטוי סולרי, גרמו לגידול באוכלוסיית כלל החיידקים במהלך כל הניסוי, עד פי 6, לעומת קרקע ללא תוסף (איור 15א). הצנעת שיירי רוקולה בקרקע, ללא חיטוי סולרי, גרמה לגידול באוכלוסיית כלל החיידקים בשבועיים הראשונים בלבד; בקרקעות שהוצנעו בהן שיירי קורנית נמדדו שינויים זניחים באוכלוסיית החיידקים ובתום הניסוי מספרם היה דומה לזה שבקרקע ללא תוסף (איור 15ב). בקרקעות ללא תוסף אורגני, אוכלוסיית כלל החיידקים נותרה ללא שינוי הן בקרקע שעברה חיטוי סולרי והן בקרקע מוצלת או חשופה. בניסוי אוגוסט, הטיפולים השונים לא גרמו לשינויים במספר כלל החיידקים והוא נותר כ- $1.5 \cdot 10^6$ CFU לג' קרקע יבשה, לאורך כל הניסוי (התוצאות אינן מוצגות).

1.1.7 תרכובות נדיפות בפאזה הגזית בקרקע

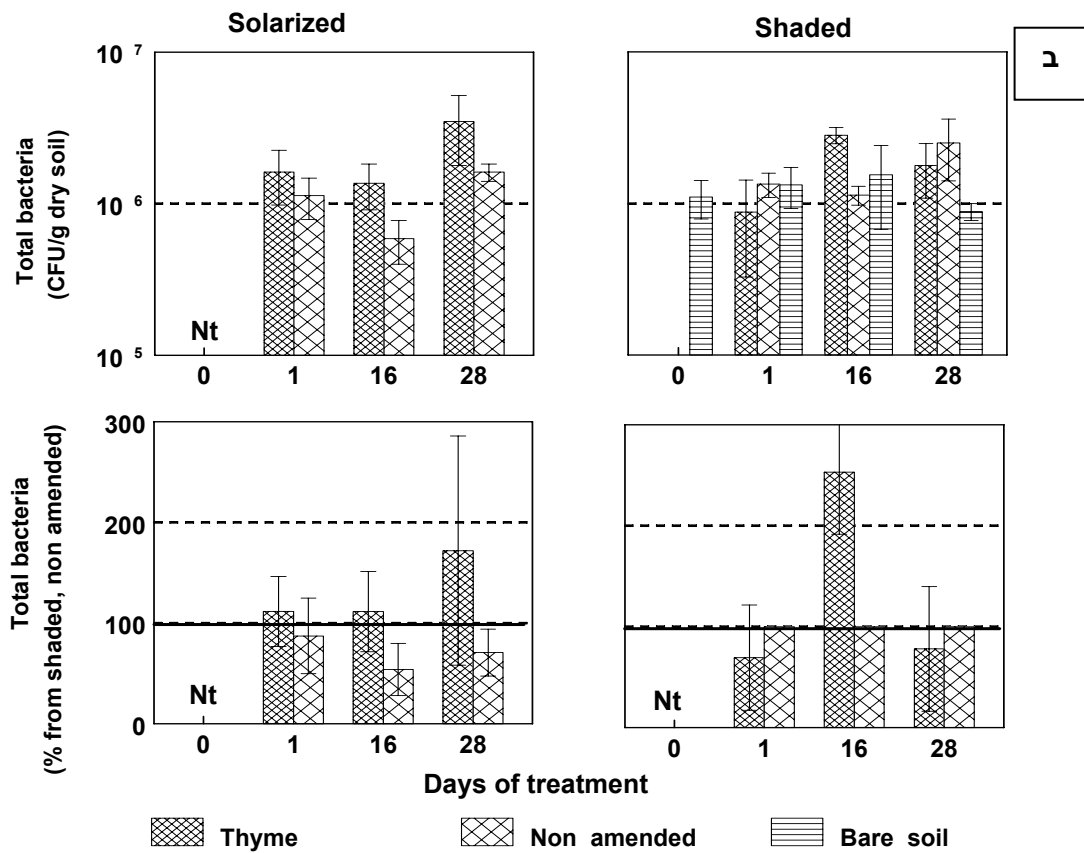
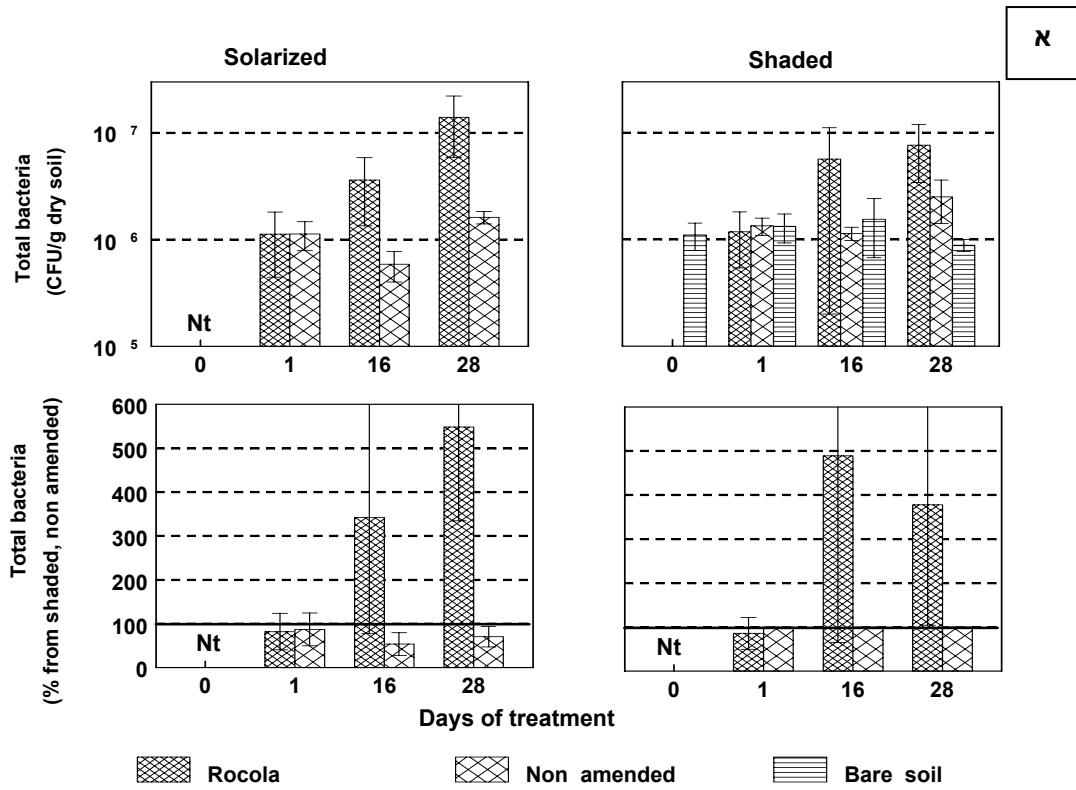
עקב ספיחה של חלק מהתרכובות הנדיפות שהתקבלו בטיפולים שכללו הצנעת תוסף אורגני לכלי הדיגום, לא ניתן היה להפריד את תוצאות הטיפולים השונים ולכן הן אינן מוצגות.

1.1.8 תרכובות פיטוטוקסיות בקרקע עם תוסף אורגני לאחר חיטוי

יממה לאחר סיום הניסוי, נאספו דגימות קרקע רחובות מהטיפולים השונים (3 דגימות מחלקה, 3 חלקות לטיפול), מעומק 0-20 ס"מ. בכל דגימה נשתלו שתילי עגבנייה, דושנו בדשן גרנולרי וגודלו בחממה למשך 21 יום. לא נראו סימני פיטוטוקסיות או האטת התפתחות של הנוף או השורש, בהשוואה לשתילי עגבניה שגודלו בקרקע רחובות שלא טופלה בניסוי.



איור 14: השפעת חיטוי סולרי והצנעת רוקולה (א), או קורנית (ב), על השתנות אוכלוסיית כלל הפטריות, בקרקע רחובות בעומק 20 ס"מ, יולי 2002. Non amended - חלקה מחופה ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה ללא תוסף; Nt - לא נבדק. קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.



איור 15: השפעת חיטוי סולרי והצנעת רוקולה (א), או קורנית (ב), על השתנות אוכלוסיית כלל החיידקים, בקרקע רחובות בעומק 20 ס"מ, יולי 2002. Non amended - חלקה מחופה ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה ללא תוסף; Nt - לא נבדק. קו אופקי רציף מציין ערך 100%. קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

2. מערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים

הצנעת תוספים אורגניים בקרקע בשילוב עם חיטוי סולרי, יוצרים מערכת הדברה שבה מעורבים מספר גורמים. הגורמים הפוטנציאליים הם קטילה בחום, תרכובות קטלניות שמקורן בתוסף האורגני או תוצרי הפירוק שלו והשתנות האוכלוסיות המיקרוביאליות, לטובת מאזן מיקרוביאלי חדש, עדיין לפגע. בעבודה זו פיתחנו מערכת מעבדתית מבוקרת לחימום של קרקע שהוצנעו בה תוספים אורגניים, בתנאי איורור משתנים, כדי ללמוד את מגוון התהליכים אשר מתרחשים בקרקע ולשם חיקוי תהליך החיטוי הסולרי משולב עם תוספים. זאת, כדי לאפיין את השפעת כל אחד מהגורמים בנפרד ואת האינטראקציות ביניהם, על חיות פגעי קרקע. המערכת המבוקרת נבנתה על בסיס תיעוד מוקדם של התהליכים שמתרחשים בקרקע במהלך חיטוי סולרי בשדה, כגון נתוני טמפ' אמפיריים, שהתקבלו בעומק 20 ס"מ, בחיטויים סולריים בחוות הפקולטה לחקלאות ברחובות. במערכת שבנינו, ניתן לשלוט על משתנים שונים, כגון חימום הקרקע, תכולת רטיבותה וכמות החמצן באווירת הקרקע. כמו כן, ניתן למדוד במערכת, במקביל, בצורה מהירה, משתנים רבים כמו קטילת גופי קיימא של פגעים שונים, שינויים באוכלוסיות מיקרוביאליות, אווירת הקרקע (לחץ, תכולת חמצן, תרכובות נדיפות וכיו"ב) ותכונות פיזיקליות וכימיות שלה.

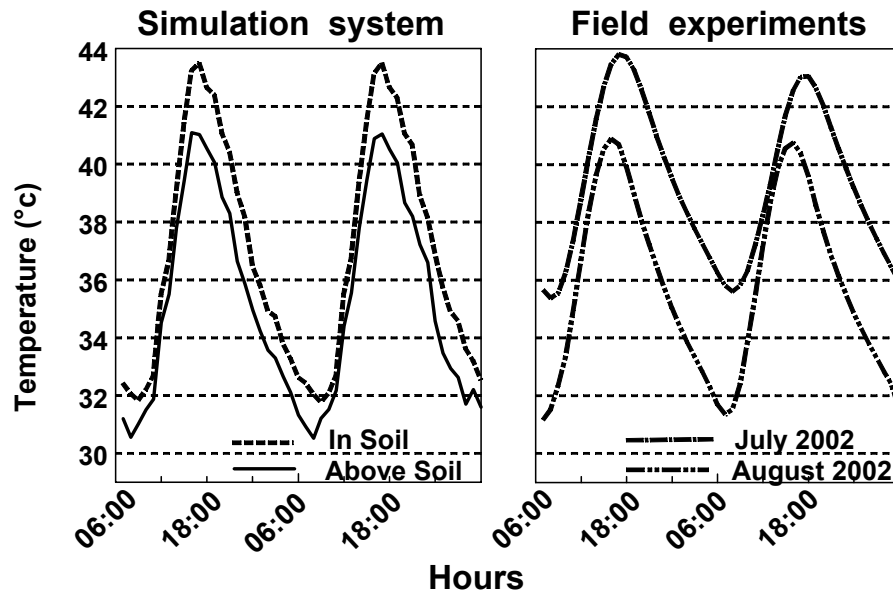
2.1 משתנים מבוקרים במערכת המעבדתית

2.1.1 משטר חימום הקרקע והאווירה שמעליה במיכל הקרקע

במערכת המעבדתית, הקרקע מוכנסת למיכלי זכוכית שמוצבים בתוך אמבטי מים בטמפ' מבוקרת; באופן זה מחוממים הקרקע והאווירה שמעליה, במשטר יומי המאפיין חיטוי סולרי בשדה בעומק של כ- 20 ס"מ (הצנעת חומר אורגני בקרקע היא עד לעומק כזה). הטמפ' שנמדדו בתוך הקרקע, או באווירה שמעליה, במיכל אשר טבול במים, מוצגות באיור 16 ובטבלה 6. המערכת המעבדתית כוללת, בנוסף לאמבט החימום, גם אמבט שבו נשמרת טמפ' קבועה של 25 מ"צ ובו מוצבים מיכלי ניסוי המשמשים ביקורות.

2.1.2 תכולת הרטיבות בקרקע

רטיבות הקרקע במהלך חיטוי סולרי בשדה משפיעה על אגירת החום והולכתו לעומק הקרקע ועל הפעילות המיקרוביאלית בקרקע, הן במישרין והן בעקיפין - ע"י השפעה על איורורה. השקיית החלקה המטופלת במהלך החיטוי הסולרי, מאפשרת שמירה על תכולת הרטיבות לאורך החיטוי. במהלך הניסויים במערכת המעבדתית, שמרנו על תכולת רטיבות אחידה וקבועה במיכלי הקרקע, ע"י שקילתם מדי שבוע והשלמת הפרש המשקל במי ברז. ההנחה היתה, שהירידה במשקל מיכל הקרקע נובעת מאיבוד מים בלבד. כמות המים המירבית שהוספה למיכל בודד הייתה 17 מ"ל לשבוע, המהווים 10% מתכולת הרטיבות בקרקע. המים שיצאו ממיכל הקרקע, התעבו בחלקם במיכל החשיפה לאווירת הקרקע וחלקם יצאו מהמערכת.



איור 16: חימום מחזורי של קרקע רחובות בקיבול שדה (In Soil) ושל האווירה במיכל הקרקע (Above Soil), במהלך טיפול במערכת המעבדתית (Simulation system) ובמהלך חיטויים סולריים בשדה (Field experiments) בעומק 20 ס"מ, רחובות, יולי 2002 ואוגוסט 2002.

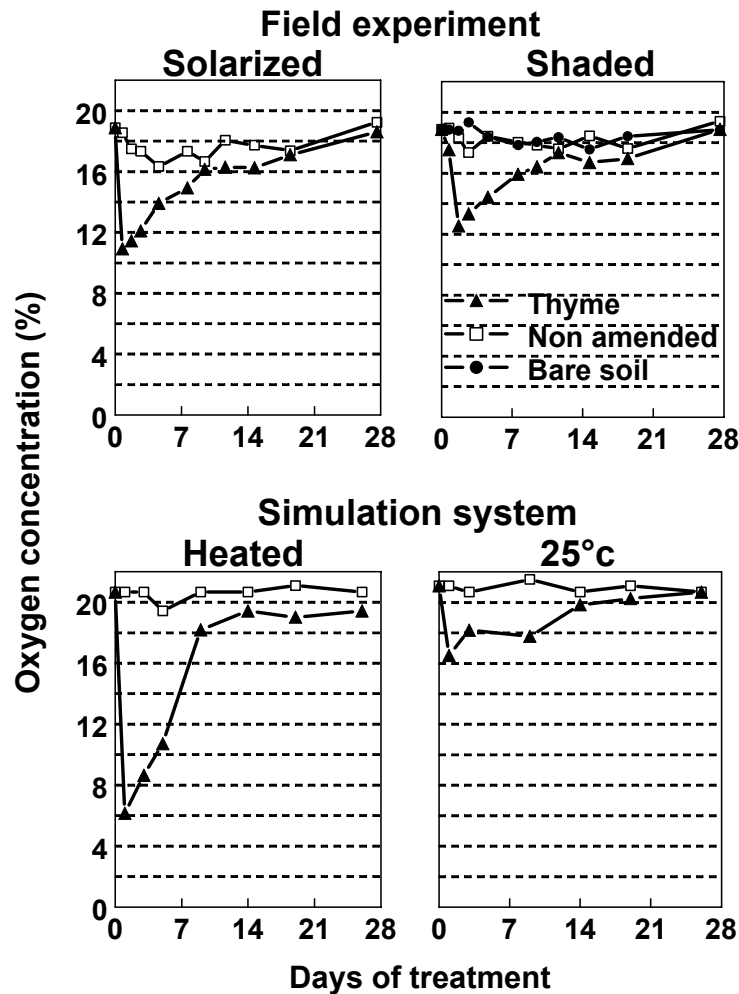
טבלה 6: הצטברות השעות בהן הטמפ' גבוהה מערך מסויים במשך 28 יום והטמפ' המירביות שנמדדו במהלך חימום של קרקע רחובות בקיבול שדה ושל האווירה במיכל הקרקע, במערכת המעבדתית ובמהלך חיטוי סולרי בשדה- ניסויי יולי 2002.

טמפ' מירבית מ"צ	מספר השעות שבהן הטמפ' הייתה מעל הערך המצויין, במהלך חימום קרקע במערכת המעבדתית			מיקום
	< 45 מ"צ	< 43 מ"צ	< 40 מ"צ	
43.75	0	56	196	מיכל קרקע - בתוך הקרקע
41.00	0	0	112	מיכל קרקע - האווירה מעל הקרקע
44.00	0	46	245	חיטוי סולרי בשדה, בעומק 20 ס"מ

2.1.3 תנאי איורור הקרקע

חיפוי הקרקע ביריעות פוליאיתילן במהלך חיטוי סולרי, מגביל את חילופי הגזים בין אווירת הקרקע לבין האטמוספירה ומאפשר כליאה זמנית של תרכובות נדיפות בחללי הקרקע. ביומיים הראשונים לאחר תחילת החיטוי פוחתת כמות החמצן בקרקע, אולם בכל מהלך החיטוי שוררים בקרקע תנאים אירוביים ונשמר ריכוז חמצן קבוע בחללי הקרקע (איור 17). לכן, בנינו את המערכת המעבדתית באופן שבו ישמר ריכוז חמצן במיכלי הקרקע, בדומה לריכוז החמצן בקרקע כפי שנמדד במהלך חיטוי סולרי בשדה. מיכלי הניסוי במערכת המעבדתית תוכננו לאפשר הזרמה רציפה ואיטית של אוויר דרך הקרקע שבמיכל ודרך מיכל החשיפה לאווירה, שמחובר מחוץ לאמבט וכך למנוע מצב שבו נוצרים תנאים אנארוביים במיכל אטום, שבו קרקע רטובה עם תוסף אורגני. מצאנו שהזרמת אוויר בלחץ נמוך ($60-70 \text{ Pascal} < 10^{-3} \text{ Atmosphere}$), תוך שימוש בסעפת אוויר מרכזית שמחלקת את האוויר

בין מיכלי הניסוי, מאפשרת זרימת אוויר אחידה בכל המיכלים, גם בקצב איורור נמוך של 2 מ"ל/דקה/מיכל. זרימה איטית זו מאפשרת באווירת המיכל ריכוז חמצן זהה לזה האטמוספרי ובמקביל מאטה את בריחת התרכובות הנדיפות אל מחוץ למערכת. איורור המערכת בתנאים אלה לא השפיע על חיות הפתוגנים שנבחנו. מצאנו, שקצב אוורור של 2.3-3.1 מ"ל/דקה/מיכל במערכת המעבדתית, גורם לשינוי בריכוז החמצן באווירת הקרקע, במגמה דומה לזו שהתקבלה בניסוי שדה, בעומק 20 ס"מ (איור 17). לכן, בהמשך העבודה בוצע איורור בשיעור זה כאמצעי להשגת ריכוז חמצן דומה לזה שמתקבל בשדה, בעקבות הצנעת חומר אורגני.



איור 17: השתנות ריכוז החמצן באווירת קרקע רחובות שהוצנעו בה שיירי קורנית, בשדה ובמערכת המעבדתית, שבה מחוממת הקרקע במשטר דומה לחיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ. הערכים התקבלו בעומק 20 ס"מ בניסוי שדה שנערך בחוות הפקולטה לחקלאות ברחובות ביולי 2002 ובאווירה שמעל הקרקע, במיכל הקרקע, בניסוי במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל. Non amended - בשדה: חלקה מחופה ללא תוסף, במעבדה: ללא תוסף; Bare soil - חלקה לא מחופה, ללא תוסף.

3. ניסויים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים

3.1 חימום קרקע עם תוסף אורגני בתנאי אוורור שונים

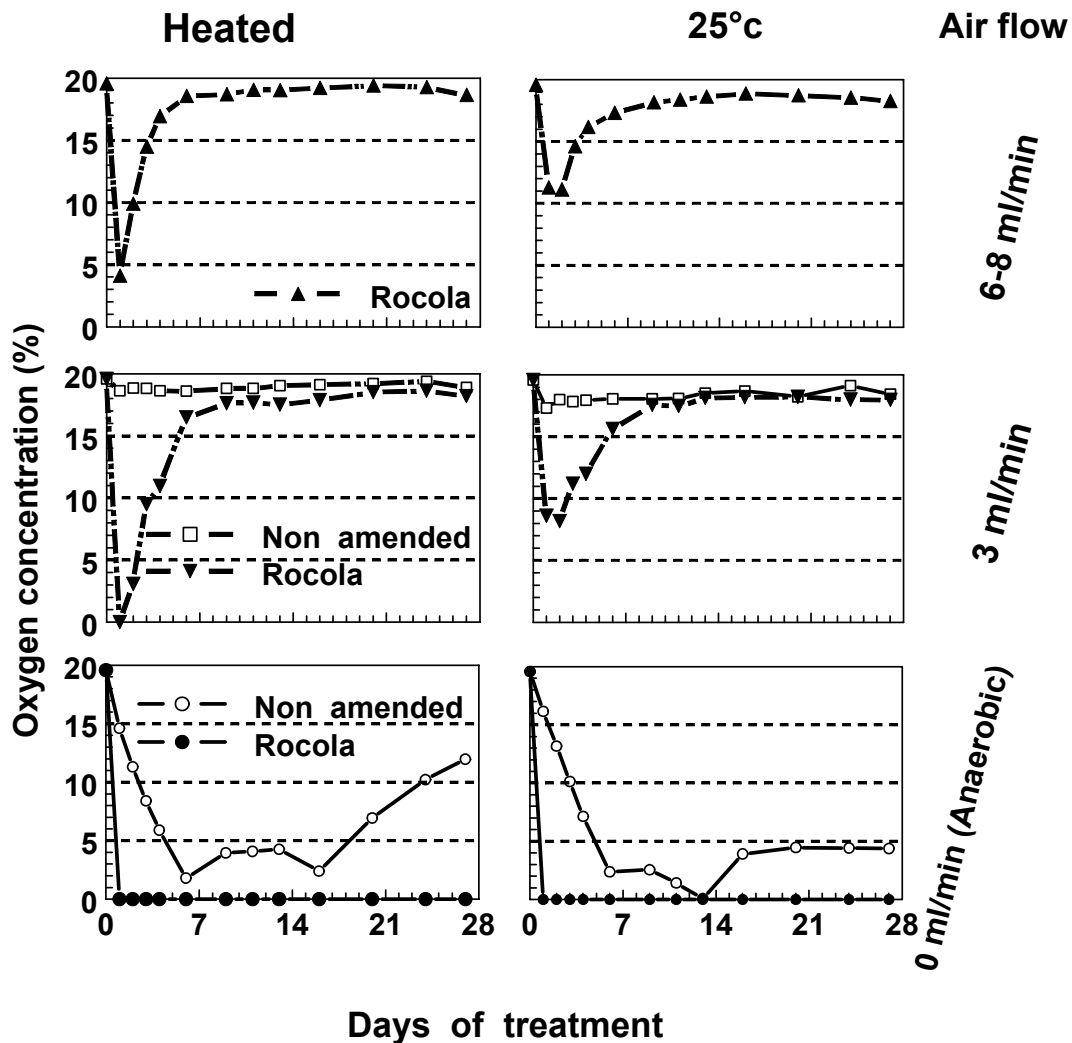
מטרת הניסוי הייתה לבחון השפעת חימום קרקע, תוסף אורגני ותנאי איורור שונים, על קטילת פגעים, שינויים כימיים ומיקרוביאליים בקרקע ויצירת תרכובות נדיפות. הצבנו ניסוי שבו בדקנו השפעת חימום של קרקע שהוצנעה בה רוקולה ושאוררה בשלוש רמות, על קטילת פטריות פתוגניות

ונמטודות יוצרות עפצים בקרקע. הניסוי בוצע בשלוש רמות איוורור שונות: אנאירובי (מיכלים סגורים ללא איוורור), איוורור איטי- בקצב של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל (קצב איוורור זה גורם לשינויים בריכוז החמצן כפי שנמדדו בתנאי שדה) ואיוורור מהיר- בקצב של 6-8 מ"ל/דקה/מיכל, במשך חודש. השפעת רמת האיוורור על ריכוז החמצן במיכל הקרקע, באווירה שמעל הקרקע מתוארת באיור 18. ריכוז החמצן באווירת המיכלים שהכילו קרקע מעורבת עם רוקולה פחת תוך שעות מהצבת הניסוי ובתנאי איוורור עלה בהדרגה במהלך השבוע הראשון לניסוי, בדומה למתרחש בשדה (איור 7א). במיכלי הניסוי המחוממים, שהכילו קרקע מעורבת עם רוקולה, ריכוז החמצן פחת לשיעורים מינימליים של 0%-4%, באיוורור איטי ובאיוורור מהיר, בהתאמה, לעומת מיכלים שלא חוממו (25 מ"צ), בהם השיעורים המינימליים היו 8%-11%, באיוורור איטי ומהיר, בהתאמה. מגמת עלייה בריכוז החמצן בטיפולים המאווררים החלה ביום השני והשלישי, בטיפולים המחוממים וללא חימום, בהתאמה, ונמשכה לאורך השבוע הראשון לניסוי, עד להתייבבות. בטיפולים האנאירוביים שכללו קרקע מעורבת עם רוקולה, חלה פחיתה בריכוז החמצן עד לערך 0%, שנשמר לאורך כל הניסוי. ריכוז החמצן במיכלים אטומים שהכילו קרקע ללא שיירי רוקולה, פחת לשיעור 0-2%, אולם ריכוזים אלו לא נשמרו באחידות לאורך כל הניסוי, עקב מספר פתיחות וסגירות של המיכלים לצורך דיגומים שונים, החל מהשבוע הראשון לניסוי.

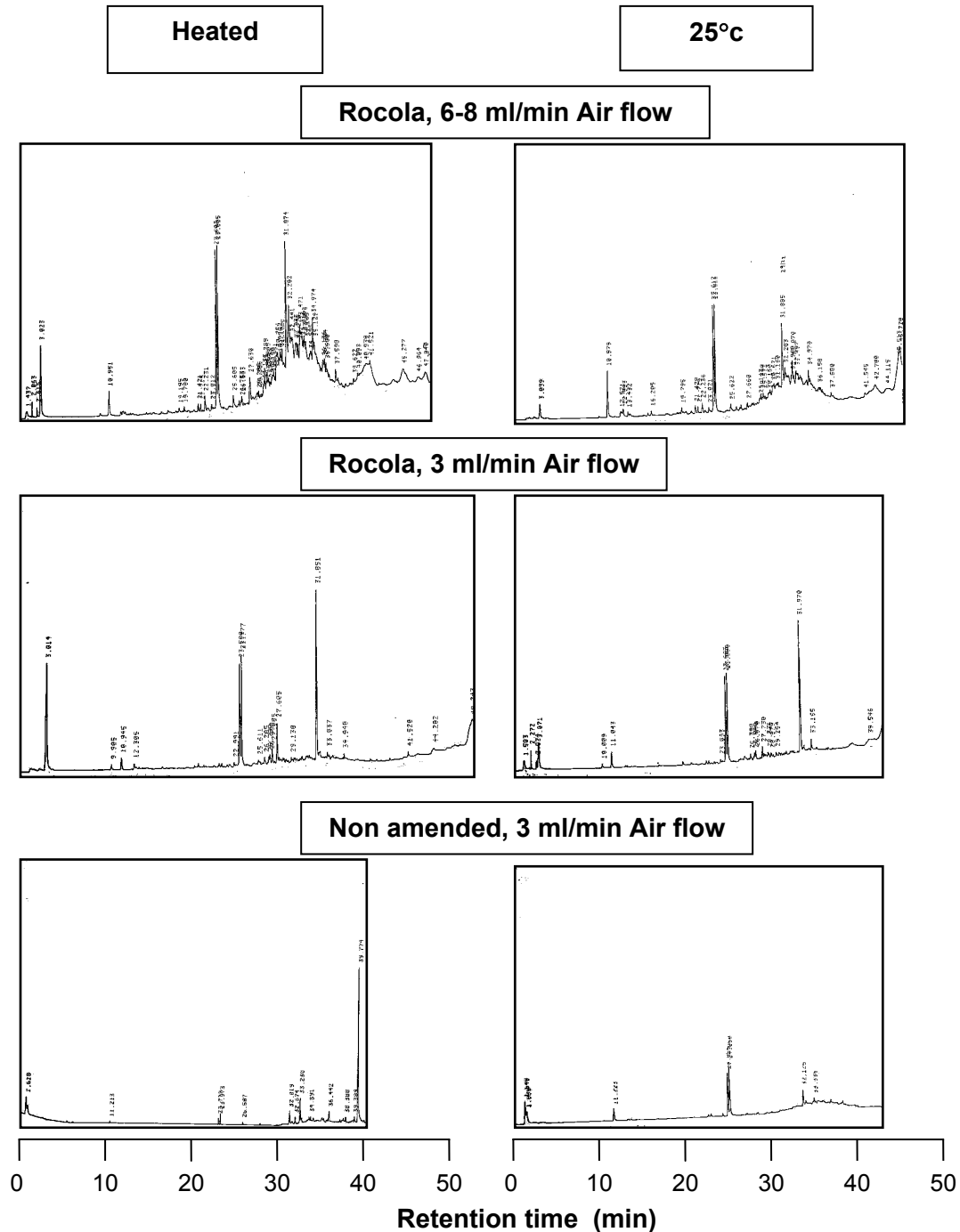
3.1.1 תרכובות נדיפות בתנאי איוורור שונים

דגימה של האווירה מעל הקרקע, במיכלי הקרקע בטיפולים השונים, בוצעה במועדים שונים לאורך הניסוי. נמצא הבדל איכותי בין כרומטוגרמות שהתקבלו בטיפולים השונים, דבר שמעיד על היווצרות תרכובות נדיפות שונות בתנאי איוורור שונים ובעקבות חימום ופירוק של תוסף אורגני בקרקע. ביום השני לניסוי, התקבל המספר המקסימלי של תרכובות נדיפות (איורים 19,20). חימום הקרקע גרם להיווצרות של יותר תרכובות נדיפות, כאשר הוצנע בה תוסף אורגני, לעומת קרקע ללא חימום. תרכובות נדיפות נוצרו גם בקרקע ללא תוסף, עקב נוכחות של מרכיבים אורגניים בקרקע (איור 19). תרכובות אלה, בעלות זמני שהייה (Rt) של 11 ו-23 דקות בקירוב, הופיעו גם בטיפולים שכללו תוסף אורגני. חימום קרקע שהוצנעה בה רוקולה, בתנאים אנאירוביים, גרם להיווצרות המספר הרב ביותר של תרכובות נדיפות, בעלות טווח פולריות רחב ומשקל מולקולרי גבוה, יחסית לאלו שהתקבלו באיוורור האיטי (עד 3 מ"ל/דקה); מבנה המערכת האנאירובית - מיכל אטום, גרם להצטברות לאורך כל הניסוי, בניגוד לטיפולים המאווררים (איורים 20,21). בתנאים אירוביים, רוב התרכובות הנדיפות שנוצרו היו בעלות Rt של 23-33 דקות. גם כאן, הצנעה של רוקולה בקרקע וחימום גרמו ליצירת יותר תרכובות נדיפות. בתנאי איוורור מוגבר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל) נוצרו יותר תרכובות נדיפות לעומת איוורור איטי של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל, דבר שיכול להעיד על פירוק מהיר יותר של החומר האורגני באיוורור מוגבר. בטיפולים האירוביים נמצאה היווצרות של תרכובות נדיפות שונות עד שלושה שבועות מתחילת הניסוי, בטיפולים שכללו הצנעת רוקולה בקרקע וחימום (איור 21). ללא חימום, התקבל מגוון צר יותר של תרכובות נדיפות בשבוע הראשון ולאחר מכן נמצאו רק עקבות של תרכובות אלו. מרבית התרכובות לא זוהו, היות ובספרות קיים ידע לגבי תרכובות נדיפות של הרוקולה, אך לא של תוצרי הפירוק בתנאי העבודה כפי שהתבצעו בניסוי זה. אחת התרכובות שזוהו היא L-Sulforaphane, בעלת Rt של 31.9 דקות, מוכרת בצמחים ממשפחת המצליבים, נוגדת חמצון ובעלת

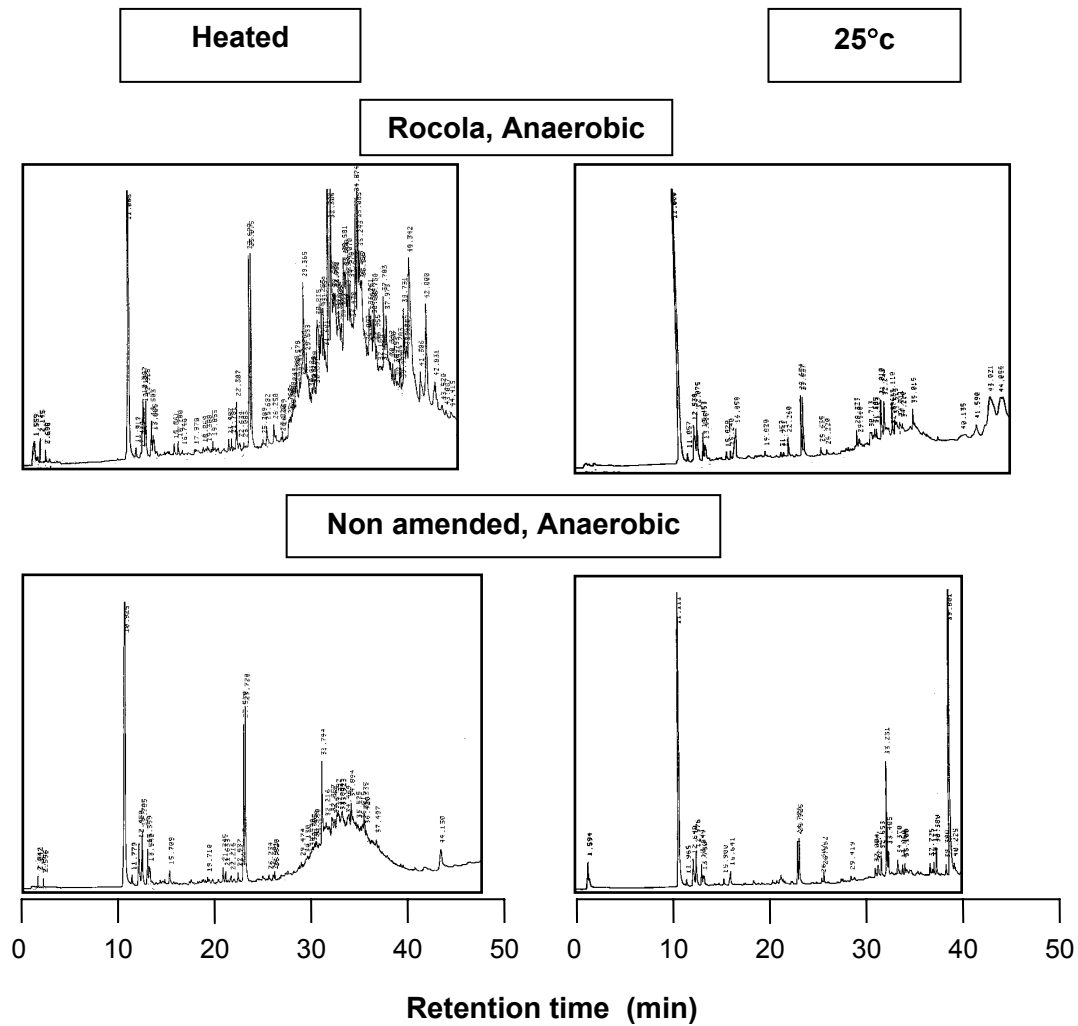
תכונות אנטיביוטיות (Fahey *et al.*, 2001; Fahey *et al.* 2002; Zhang *et al.*, 1992). תרכובת זו התקבלה בטיפולים שכללו הצנעת רוקולה ותנאים אירוביים, בריכוז מקסימלי (שטח Peak מקסימלי) ביום השני לניסוי ובתנאים אנאירוביים, ביום הראשון (איור 22). הכמות המירבית של L-Sulforaphane, בתנאים אנאירוביים וחימום, הייתה גבוהה יותר מזו שהתקבלה בתנאים אירוביים, או ללא חימום והתרכובת נמצאה לאורך כל הניסוי במיכלים האטומים. בתנאים אירוביים, התקבלה כמות מירבית רבה יותר בטיפולים המחוממים ובאווורור האיטי, אולם הדעיכה הייתה איטית יותר בטיפול בטמפ' 25 מ"צ, באווורור המוגבר. השטח היחסי של תרכובת זו, מכלל הכרומוטוגרמה, היה עד 30% - 20% בטיפולים האירוביים, באווורור איטי ומוגבר, בהתאמה ועד 10% בטיפולים האנאירוביים.



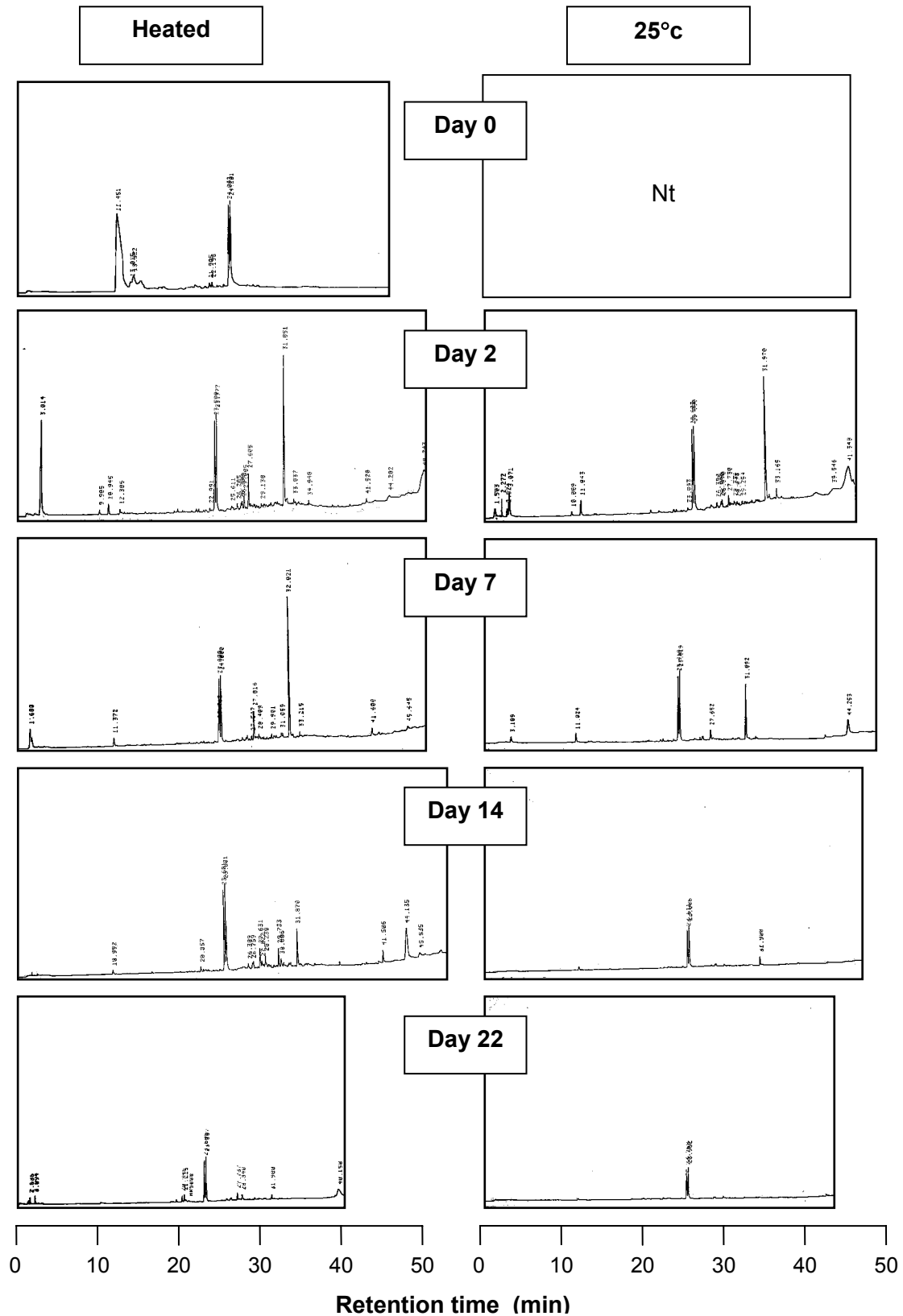
איור 18: השפעת הצנעת רוקולה בקרקע רחובות, חימום ורמת האווורור, על השתנות ריכוז החמצן באווירת הקרקע. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי אוורור מבוקרים, במשטר דומה לחיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. ריכוז החמצן נמדד באווירה שמעל הקרקע, במיכל הקרקע. רמות האווורור: 0 ml/min - תנאים אנאירוביים; 3 ml/min - תנאי אוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); 6-8 ml/min - תנאי אוורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל).



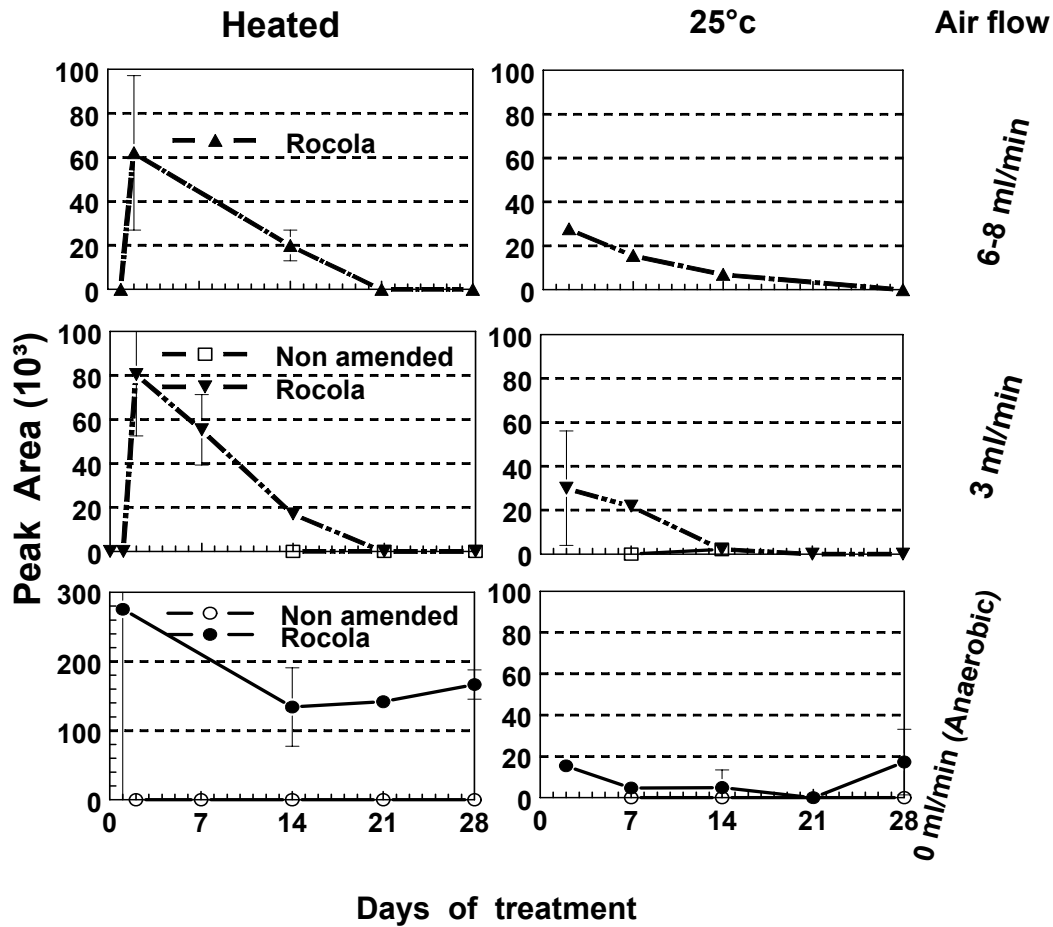
איור 19: כרומטוגרמות המתארות השפעות חימום קרקע רחבות, עם וללא הצנעת רוקולה ורמת האוויר, על היווצרות תרכובות נדיפות באווירת הקרקע, ביום השני לניסוי. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים, במשטר דומה לחיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. האווירה נידגמה מעל הקרקע, במיכל הקרקע. רמות האוויר: 3 ml/min - תנאי איורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); 6-8 ml/min - תנאי איורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל).



איור 20: כרומטוגרמות המתארות השפעות הצנעת רוקולה בקרקע רחובות וחימומה בתנאים אנאירוביים (0 מ"ל/דקה/מיכל), על היווצרות תרכובות נדיפות באווירת הקרקע, ביום השני לניסוי. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים, במשטר דומה לחיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. האווירה נידגמה מעל הקרקע, במיכל הקרקע. רמות התוסף: רוקולה; ללא תוסף.



איור 21: השפעת הצנעת רוקולה בקרקע רחובות וחימומה ברמת איורור של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל, על היווצרות תרכובות נדיפות באווירת הקרקע, במועדים שונים לאורך הניסוי. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים, במשטר דומה לחיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. האווירה נידגמה מעל הקרקע, במיכל הקרקע. זמן 0 ב-25 מ"צ לא נבדק.



איור 22: השפעת הצנעת רוקולה בקרקע רחובות, חימומה ורמת האוורור, על השתנות ריכוז L-Sulforaphane באווירת הקרקע, במועדים שונים לאורך הניסוי. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי אוורור מבוקרים, במשטר דומה לחיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. האווירה נידגמה מעל הקרקע, במיכל הקרקע. רמות האוורור: 0 ml/min ותנאים אנאירוביים; 3 ml/min תנאי אוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); 6-8 ml/min תנאי אוורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל). קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

3.1.2 קטילת פגעי קרקע

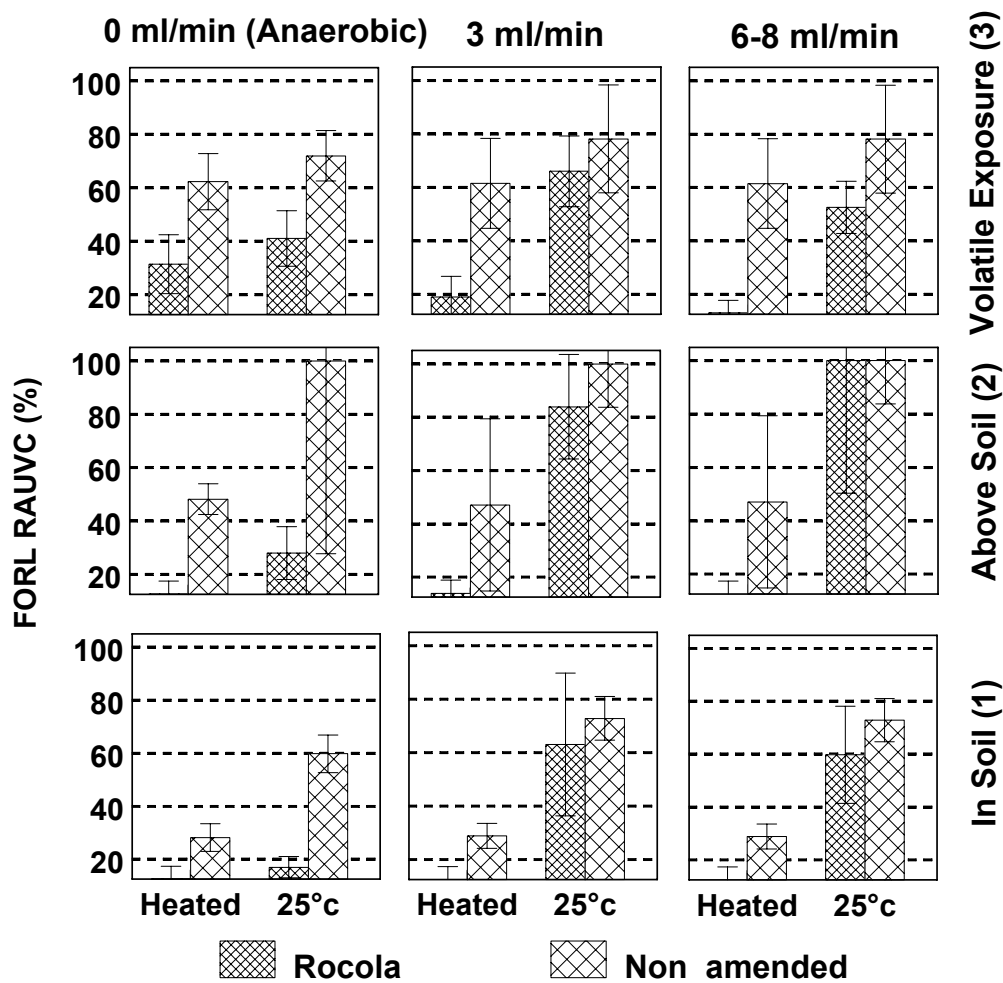
3.1.2.1 קטילת *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*

הצנעת רוקולה בקרקע בשילוב חימום במשטר חיטוי סולרי, גרמו לקטילה מלאה של גופי קיימא של FORL במיכל הקרקע המחומם- בתוך הקרקע כבר כעבור שבוע במיכלים המאווררים וכעבור שבועיים במיכלים ללא אוורור (איור 23); התוצאות לאורך זמן מוצגות רק לתנאי אוורור איטי, באיור 24); מעל הקרקע, התקבלה קטילה מלאה באוורור המהיר כעבור שבוע, באוורור האיטי- כעבור שלושה שבועות וכך גם בתנאים אנאירוביים; במיכל החשיפה לאווירת הקרקע, שמוצב מחוץ למערכת החימום, התקבלה קטילה מלאה של FORL, בטיפול המחומם שבו הוצנעה רוקולה, כעבור שבוע באוורור המהיר וכעבור שבועיים באוורור האיטי. במיקום זה, בתנאים אנאירוביים, התקבלה קטילה מקסימלית של 90% מאוכלוסיית הפתוגן ההתחלתית, כעבור שלושה שבועות. חימום הקרקע ללא הצנעת רוקולה, גרם לקטילה מקסימלית של 80% מאוכלוסיית ה-FORL ההתחלתית בתנאי אוורור איטי, בתוך הקרקע כעבור שבועיים ומעליה כעבור שלושה שבועות. בתנאים אנאירוביים, התקבלה

קטילה מקסימלית של 90% מאוכלוסיית הפתוגן ההתחלתית בתוך הקרקע ושל 80% מעל הקרקע, רק כעבור חודש. הצנעת רוקולה בקרקע ללא חימום, גרמה לקטילה של עד 80% מאוכלוסיית הפתוגן ההתחלתית בתוך הקרקע בטיפולים המאווררים ולקטילה מלאה בטיפול האנאירובי כעבור חודש; מעל הקרקע, התקבלה קטילה מלאה רק בתנאים אנאירוביים כעבור חודש. במיכל החשיפה לאווירת הקרקע התקבל שעור קטילה של 75%, דבר שעשוי ללמד ששיטת סיחרור האווירה בטיפולים האנאירוביים לא הייתה יעילה, היות והתנאים מעל הקרקע ובמיכל החשיפה לאווירת הקרקע אמורים להיות זהים בטיפול לא מחומם ובפועל התקבלה קטילה שונה של הפתוגן.

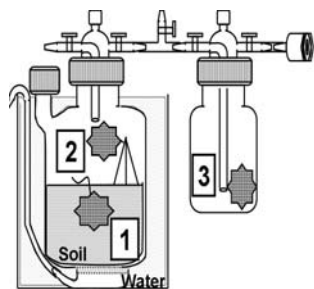
בכל רמות האיוורור והמיקום, שילוב של הצנעת רוקולה וחימום במשטר חיטוי סולרי גרם קטילה מהירה ויעילה יותר של FORL, לעומת חימום ללא תוסף. הצנעת רוקולה ללא חימום גרמה לקטילה המקסימלית בתנאים אנאירוביים.

בתנאים אנאירוביים נמצא שההשפעות העיקריות- חימום והצנעת רוקולה בקרקע, גרמו לקטילה מובהקת של FORL, בעוד שהשפעת המיקום במערכת המעבדתית, או השפעות גומלין בין גורמי ההדברה, לא נמצאו מובהקות (נספח 2). לעומת זאת, בתנאי איוורור, השפעות החימום, הצנעת הרוקולה בקרקע והמיקום במערכת המעבדתית, היו מובהקות וכך גם השפעת הגומלין של החימום והמיקום- בטיפולים המחוממים, עם וללא הצנעת רוקולה בקרקע, בתוך הקרקע ומעליה. באיוורור האיטי השפעת הגומלין של החימום והמיקום נמצאה מובהקת גם במיכל החשיפה לאווירת הקרקע והקטילה שהתקבלה בו הייתה טובה יותר באופן מובהק, לעומת הקטילה במיכלי הקרקע ללא חימום, עם וללא הצנעת רוקולה בקרקע.



Minimum RAUVC value=12.5

איור 23: השפעת חימום קרקע רחובות, הצנעת שיירי רוקולה, מידת האיוורור ומיקום גופי הקיימא, על חיות הפתוגן *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית שבה מחוממת הקרקע במשטר דומה לזה של חיסוי סולרי בעומק 20 ס"מ, ברמות איוורור שונות, למשך חודש. השטח שמתחת לעקומת החיות ביחס לשטח שמתחת לעקומת החיות המקסימלית, באחוזים. מיקום הפתוגנים במערכת:

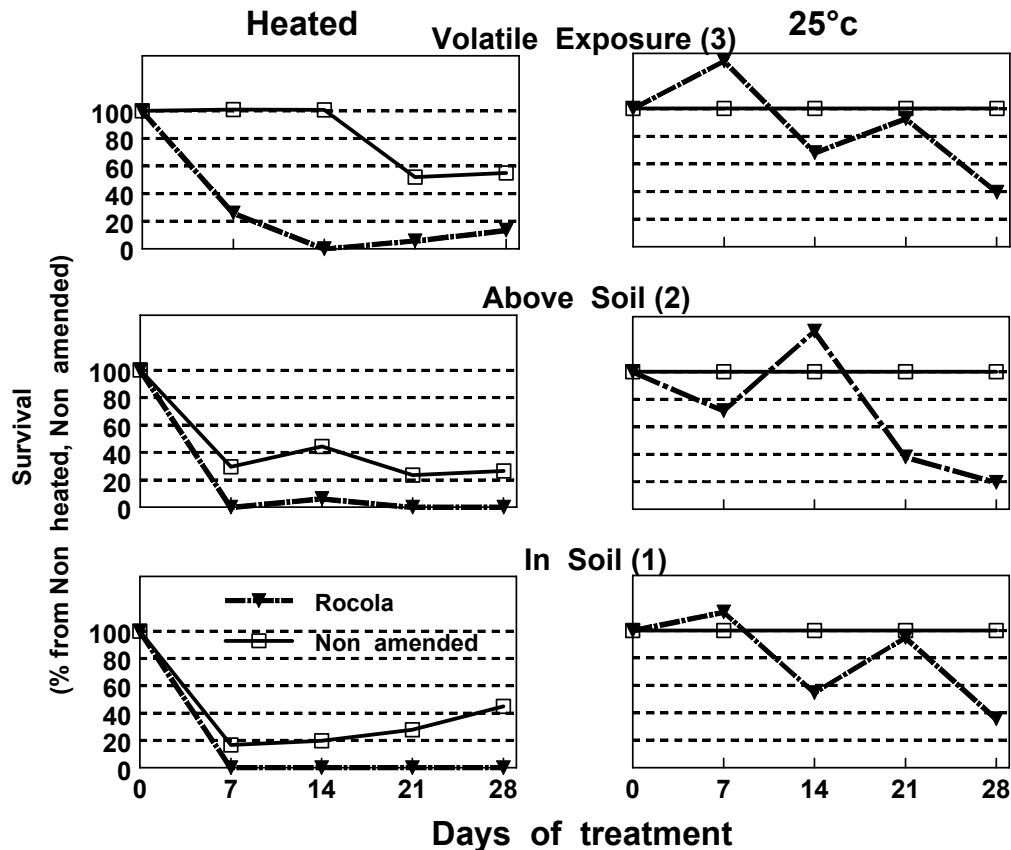


1. In Soil - גופי קיימא בתוך מיכל הקרקע, טמונים בקרקע.
 2. Above Soil - גופי קיימא בתוך מיכל הקרקע, תלויים מעל הקרקע.
 3. Volatile Exposure - גופי קיימא מונחים במיכל החשיפה לאוויר הקרקע. מיכל זה נמצא בטמפ' החדר.

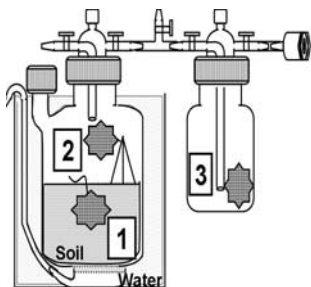
רמות האיוורור: 0 ml/min - תנאים אנאירוביים; 3 ml/min - תנאי איוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); 6-8 ml/min - תנאי איוורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל). קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

ניתוח סטטיסטי בוצע לערכי AUVc- Area Under Viability Curve (השטח שמתחת לעקומת חיות ה-CFU) ומוצג בנספח 2.

מגמת הקטילה לאורך זמן (איור 24) מוצגת רק לאיוורור האיטי, של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל, היות וטיפול זה מייצג את התנאים בשדה במהלך חיסוי סולרי.



איור 24: השפעת חימום קרקע רחובות, הצנעת שיירי רוקולה ומיקום גופי הקיימא על חיות הפתוגן *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicle-lycopersici*. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית שבה מחוממת הקרקע במשטר דומה לזה של חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, באיורור של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל, למשך חודש. התוצאות מוצגות כאחוז הישרדות ביחס להישרדות במיקום זה בטיפול ללא תוסף ובטמפ' 25 מ"צ. מיקום הפתוגנים במערכת:



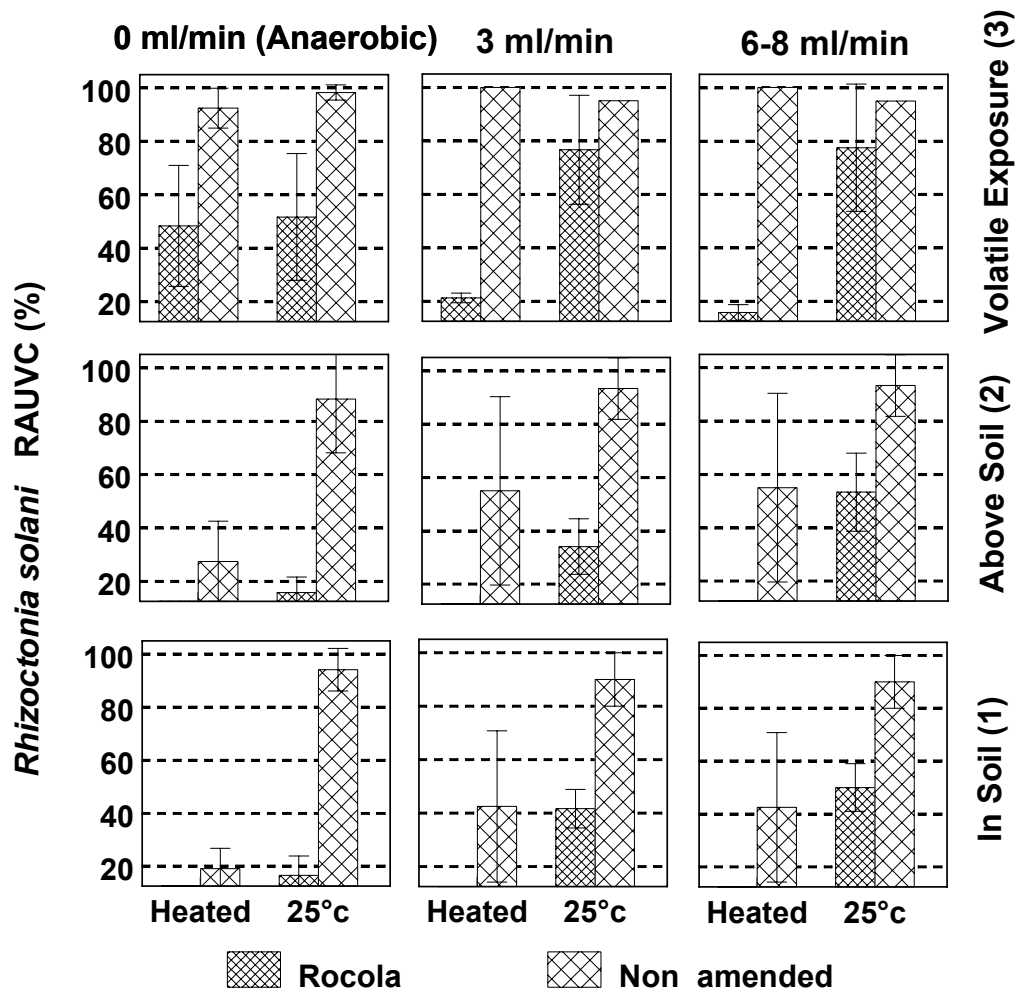
1. In Soil - גופי קיימא בתוך מיכל הקרקע, טמונים בקרקע.
2. Above Soil - גופי הקיימא בתוך מיכל הקרקע, תלויים מעל הקרקע.
3. Volatile Exposure - גופי הקיימא מונחים במיכל החשיפה לאווירת הקרקע. מיכל זה נמצא בטמפ' החדר.

3.1.2.2 קטילת *Rhizoctonia solani*

הצנעת רוקולה בקרקע וחימומה במשטר חיטוי סולרי גרמו לקטילה מלאה של גופי הקיימא של *R. solani* במיכל הקרקע המחומם- בתוך הקרקע ומעליה, כבר כעבור שבוע, בכל רמות האיורור (איור 25; תוצאות הקטילה לאורך זמן מוצגות לאיורור איטי בלבד, באיור 26). במיכל החשיפה לאווירת הקרקע, שמוצב מחוץ למערכת החימום, התקבלה קטילה מלאה של אוכלוסיית הפתוגן כעבור שבועיים באיורור המהיר; באיורור האיטי, התקבלה קטילה מקסימלית של 90% מהאוכלוסייה ההתחלתית, כעבור ארבעה שבועות. במיכל החשיפה לאווירת הקרקע, בתנאים אנאירוביים, התקבלה קטילה מקסימלית של 40% מאוכלוסיית הפתוגן ההתחלתית כעבור ארבעה שבועות. חימום הקרקע ללא הצנעה של רוקולה, גרם לקטילה מלאה של אוכלוסיית הפתוגן בתוך הקרקע ומעליה כעבור שלושה שבועות בתנאים אנאירוביים; בתנאי איורור איטי התקבלה קטילה מקסימלית

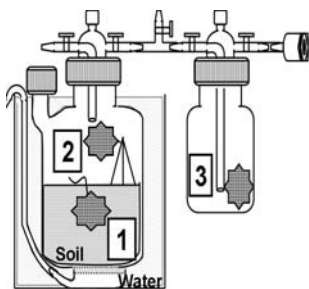
של 60% מאוכלוסיית הפתוגן ההתחלתית בתוך הקרקע ושל 20% מעל הקרקע; במיכל החשיפה לאווירת הקרקע לא התקבלה קטילה של הפתוגן. הצנעת רוקולה בקרקע ללא חימום, גרמה לקטילה מלאה של אוכלוסיית הפתוגן בתוך הקרקע, כעבור שבוע בטיפול האנאירובי וכעבור שבועיים באיורור האיטי; באיורור המהיר התקבלה קטילה מקסימלית של 80% מהאוכלוסייה ההתחלתית בתוך הקרקע, כעבור שלושה שבועות. הצנעת רוקולה בקרקע ללא חימום, גרמה לקטילה מלאה של אוכלוסיית הפתוגן מעל הקרקע, בתנאים אנאירוביים, כעבור שבועיים; באיורור האיטי התקבלה קטילה מקסימלית של 95% מהאוכלוסייה ההתחלתית כעבור שלושה שבועות. במיכל החשיפה לאווירת הקרקע בטיפול האנאירובי, שכלל הצנעת רוקולה בקרקע, התקבלה קטילה מקסימלית של 70%, שנובעת ככל הנראה מסיחור לא יעיל של האווירה במערכת זו, היות ובתנאים מקבילים לכאורה- מעל הקרקע במיכל הקרקע התקבלה קטילה מלאה של הפתוגן.

בכל רמות האיורור והמיקום, שילוב של הצנעת רוקולה וחימום במשטר חיטוי סולרי גרם לקטילה מהירה ויעילה יותר של *R. solani*, לעומת חימום ללא תוסף. בתנאי איורור מהיר, הצנעת רוקולה בקרקע ללא חימום גרמה לקטילה פחותה לעומת תנאי איורור איטי או תנאים אנאירוביים. בתנאים אנאירוביים נמצא שהשפעות העיקריות- חימום, הצנעת רוקולה בקרקע ומיקום במערכת המעבדתית, גרמו לקטילה מובהקת של *R. solani* וכך גם השפעת הגומלין ביניהם. הצנעת רוקולה בקרקע גרמה לקטילה טובה באופן מובהק, בתוך הקרקע ומעליה, עם וללא חימום, לעומת הקטילה במיכל החשיפה לאווירה והקטילה במיקומים השונים, ללא הצנעת רוקולה, עם וללא חימום (נספח 2). מובהקויות דומות התקבלו גם בתנאי איורור, אולם כאן, נמצאה קטילה טובה יותר כאשר הצנעת רוקולה בקרקע שולבה עם חימום במשטר חיטוי סולרי בכל המיקומים, לעומת חימום ללא הצנעת רוקולה בקרקע, או ללא חימום וללא הצנעת רוקולה.



Minimum RAUVC value=12.5

איור 25: השפעת חימום קרקע רחובות, הצנעת שיירי רוקולה, מידת האיוורור ומיקום גופי הקיימא, על חיות הפתוגן *Rhizoctonia solani*. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית שבה מחוממת הקרקע במשטר דומה לזה של חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, ברמות איוורור שונות, למשך חודש.



Relative Area Under Viability Curve (RAUVC) - השטח שמתחת לעקומת החיות ביחס לשטח שמתחת לעקומת החיות המקסימלית, באחוזים. מיקום הפתוגנים במערכת:

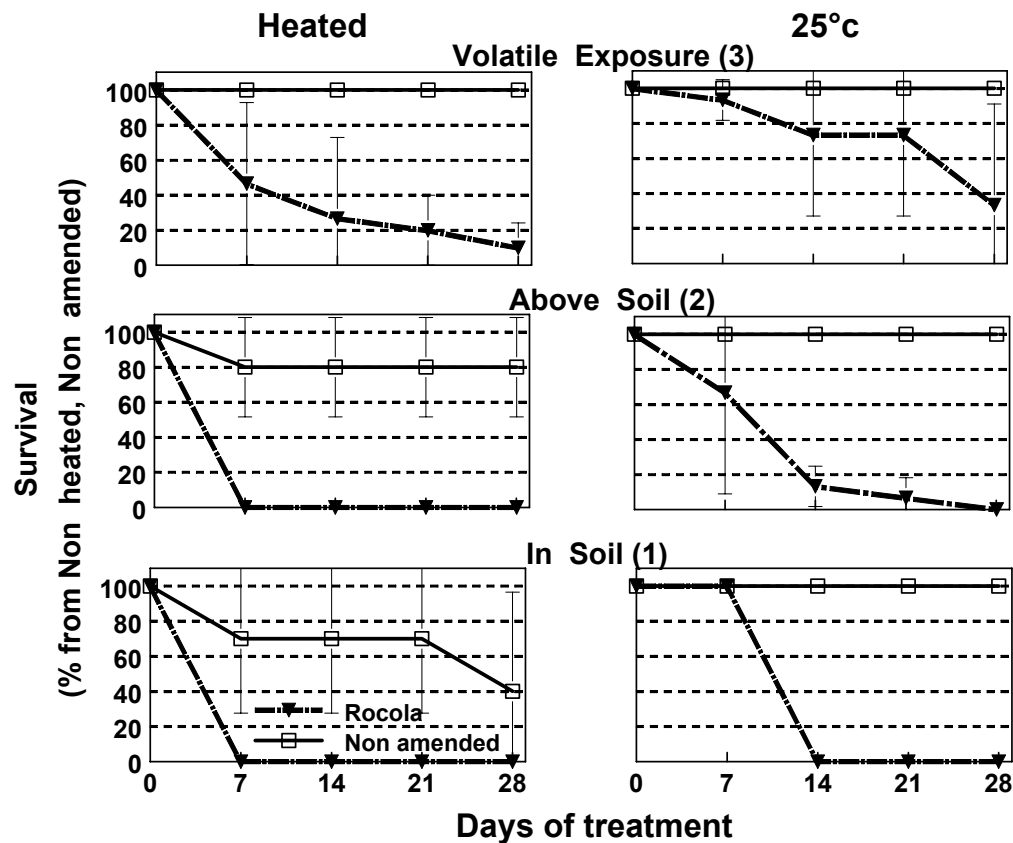
1. In Soil - גופי קיימא בתוך מיכל הקרקע, טמונים בקרקע.
2. Above Soil - גופי קיימא בתוך מיכל הקרקע, תלויים מעל הקרקע.

3. Volatile Exposure - גופי קיימא מונחים במיכל החשיפה לאווירת הקרקע. מיכל זה נמצא בטמפ' החדר.

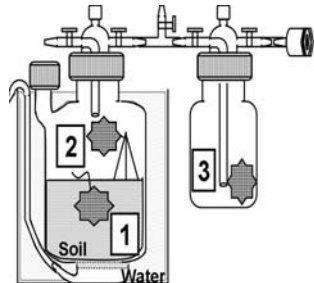
רמות האיוורור: 0 ml/min - תנאים אנאירוביים; 3 ml/min - תנאי אירוביים (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); 6-8 ml/min - תנאי איוורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל). קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

ניתוח סטטיסטי בוצע לערכי AUVC - Area Under Viability Curve (השטח שמתחת לעקומת חיות ה-CFU) ומוצג בנספח 2.

מגמת הקטילה לאורך זמן (איור 26) מוצגת רק לאיוורור האיטי, של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל, היות וטיפול זה מייצג את התנאים בשדה במהלך חיטוי סולרי.



איור 26: השפעת חימום קרקע רחובות, הצנעת שיירי רוקולה ומיקום גופי הקיימא, על חיות הפתוגן *Rhizoctonia solani*. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית שבה מחוממת הקרקע במשטר דומה לזה של חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, באיורור של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל, למשך חודש. התוצאות מוצגות כאחוז הישרדות ביחס להישרדות במיקום זה בטיפול ללא תוסף ובטמפ' 25 מ"צ.



מיקום הפתוגנים במערכת:

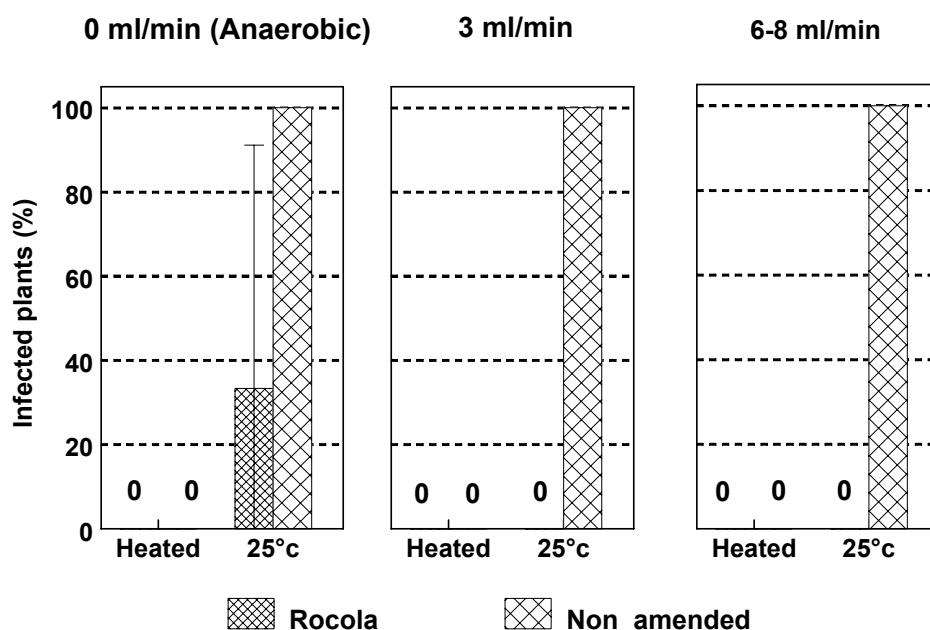
1. In Soil - גופי קיימא בתוך מיכל הקרקע, טמונים בקרקע.
2. Above Soil - גופי הקיימא בתוך מיכל הקרקע, תלויים מעל הקרקע.

3. Volatile Exposure - גופי הקיימא מונחים במיכל החשיפה לאווירת הקרקע. מיכל זה נמצא בטמפ' החדר.

קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

3.1.2.3 קטילת נמטודה יוצרת עפצים *Meloidogyne javanica*

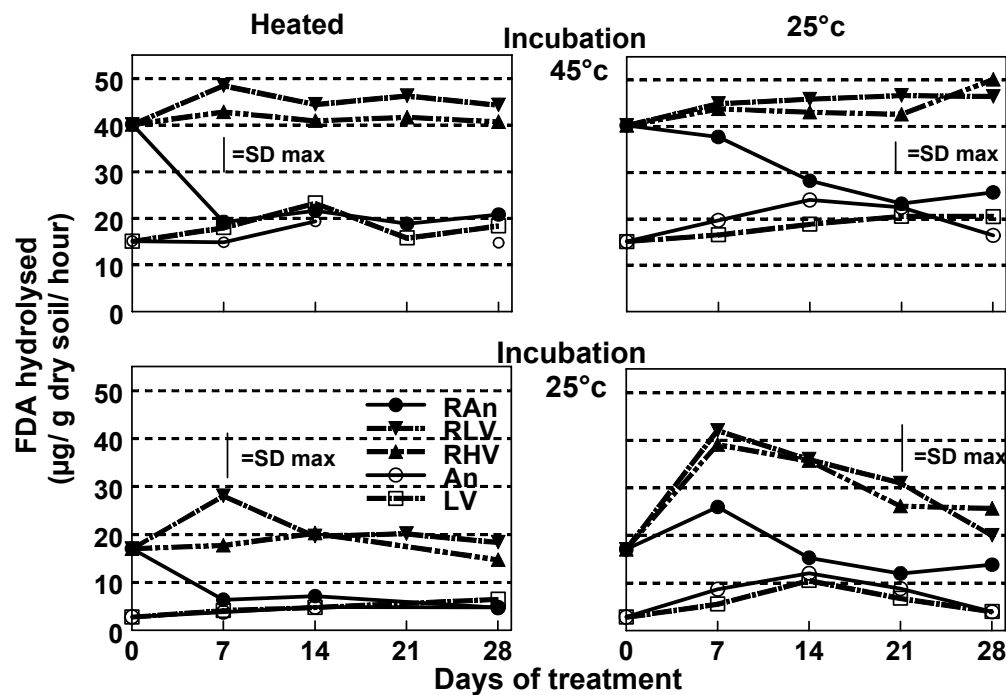
קטילת נמטודות יוצרות עפצים, נבחנה במערכת החימום ע"י הטמנת שקית רשת ובה שורשי עגבניה נגועים בעפצים בקרקע שבמיכלי הקרקע ובתום הניסוי- ערבוב של שורשים אלו בקרקע רחובות נקיייה ממחלות ושתילת צמחי עגבניה. חימום הקרקע במשטר חיטוי סולרי, גרמה לקטילה מלאה של נמטודות יוצרות עפצים במיכל הקרקע, בתוך הקרקע, ללא קשר להצנעת הרוקולה, או לרמת האיורור (איור 27). בקרקעות מאוררות, שהוצנעה בהן רוקולה ושלא חוממו, התקבלה קטילה מלאה של הפתוגן. בתנאים אנאירוביים, ללא חימום, התקבלה קטילה חלקית בלבד. השפעת הצנעת הרוקולה על הקטילה נמצאה מובהקת.



איור מס' 27: השפעת חימום קרקע רחובות, הצנעת שיירי רוקולה ורמת האיוורור, על חיות נמטודות יוצרות עפצים שהוספו לקרקע. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית שבה מחוממת הקרקע במשטר דומה לזה של חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. הנתונים מוצגים כמוצע של אחוז הנגיעות שנמצאה בצמחים שנשתלו בקרקע מאולחת, לאחר הטיפול. רמות האיוורור: 0 ml/min- תנאים אנאירוביים; 3 ml/min- תנאי איוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); 6-8 ml/min- תנאי איוורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל). קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

3.1.3 פעילות מיקרוביאלית כללית בקרקע

בקרקעות שהוצנעה בהן רוקולה בתנאים אירוביים, נמדדה פעילות מיקרוביאלית גבוהה יותר לעומת קרקעות ללא תוסף, כבר בתחילת הניסוי (איור 28). הדגרה בטמפ' 45 מ"צ הגבירה את הפעילות בהשוואה ל-25 מ"צ בכל הטיפולים, דבר שיכול להצביע על נוכחות אוכלוסיות מיקרוביאליות תרמוטולרנטיות. הצנעת רוקולה בקרקע בשילוב תנאים אנאירוביים, גרמו לירידה בפעילות המיקרוביאלית לרמות דומות לפעילות שהתקבלה ללא תוסף אורגני. בקרקע מחוממת, שהוצנעה בה רוקולה ושאווררה בקצב איטי, הדגרה ב-25 מ"צ גרמה להגברת הפעילות המיקרוביאלית בשבוע הראשון ולאחר מכן פחיתה והתייצבות על ערכים התחלתיים. ערכים דומים להתחלתיים התקבלו גם בקרקע שהוצנעה בה רוקולה ושאווררה בקצב מהיר. בקרקעות שהוצנעה בהן רוקולה ושאווררו, בהדגרה ב-45 מ"צ, נמדדה הפעילות המיקרוביאלית הגבוהה ביותר, לאורך כל הניסוי, ללא קשר לחימום הקרקע. בקרקעות מחוממות שהוצנעה בהן רוקולה, בתנאים אנאירוביים, נמדדה ירידה בפעילות המיקרוביאלית בשבוע הראשון, לערכים דומים לאלו שבקרקעות ללא תוסף, בשתי רמות ההדגרה. בקרקעות לא מחוממות שהוצנעה בהן רוקולה, בתנאים אירוביים, בהדגרה ב-25 מ"צ, נמדדה עלייה בפעילות המיקרוביאלית בשבוע הראשון ובהמשך מגמת ירידה בפעילות, עד לערכים התחלתיים, ביום 28. בקרקעות לא מחוממות שהוצנעה בהן רוקולה, בתנאים אנאירוביים, בהדגרה ב-25 מ"צ, נמדדה פעילות מיקרוביאלית נמוכה מזו שבתנאים אירוביים, אם כי במגמה דומה; בהדגרה ב-45 מ"צ, הייתה בקרקעות אלו ירידה בפעילות לאורך זמן, לרמות דומות לפעילות שהתקבלה ללא תוסף אורגני.

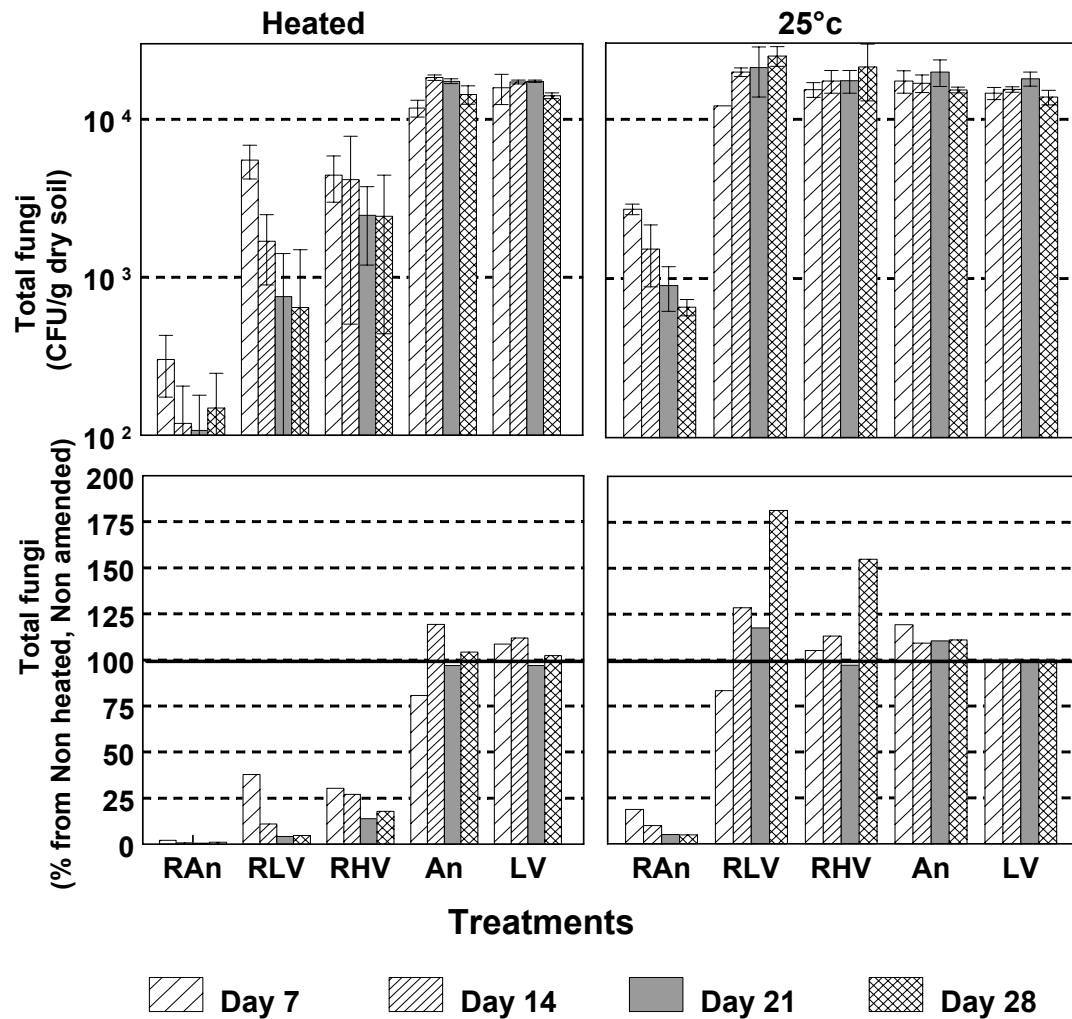


איור 28: השפעת חימום קרקע רחובות, הצנעת שיירי רוקולה, רמת האיוורור וטמפ' ההדגרה, על הפעילות האנזימטית בקרקע (הידרוליזה של Fluorescein diacetate). הניסוי בוצע במערכת מעבדתית שבה מחוממת הקרקע במשטר דומה לזה של חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. תוצר הפירוק, Fluorescein, נקבע לאחר שעה אחת של הדגרת דוגמת הקרקע בתמיסת FDA (10 מיקרוגרם למ"ל) בטמפ' 25 מ"צ או 45 מ"צ. קיום אנכיים מציינים סטיות תקן, SD, מירביות. רמות האוורור והתוסף: An- קרקע ללא תוסף בתנאים אנאירוביים; LV- קרקע ללא תוסף בתנאי איוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); RAn- קרקע בתוספת רוקולה בתנאים אנאירוביים; RLV- קרקע בתוספת רוקולה בתנאי איוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); RHV- קרקע בתוספת רוקולה בתנאי איוורור מהיר (8-6 מ"ל/דקה/מיכל).

3.1.4 השתנות אוכלוסיות המיקרואורגניזמים בקרקע

3.1.4.1 השתנות אוכלוסיית הפטריות בקרקע

הצנעת רוקולה בקרקע וחימומה גרמו לפחיתה במספר כלל הפטריות בקרקע, ביחס ישר לעוצמת האיוורור (איור 29). עירבוב הקרקע עם רוקולה וחימומה בתנאים אנאירוביים גרמו להפחתה החדה ביותר במספר הפטריות. חימום קרקע ללא הצנעת רוקולה, לא השפיע על אוכלוסיית כלל הפטריות בקרקע, ללא קשר לרמת האיוורור. בטיפולים שכללו רוקולה ואיוורור, ללא חימום, אוכלוסיית כלל הפטריות לא השתנתה. לעומת זאת, בקרקעות שהוצנעה בהן רוקולה ללא חימום, בתנאים אנאירוביים פחת מספר הפטריות באופן דומה לזה שבתנאי חימום ואיוורור איטי (איור 29).

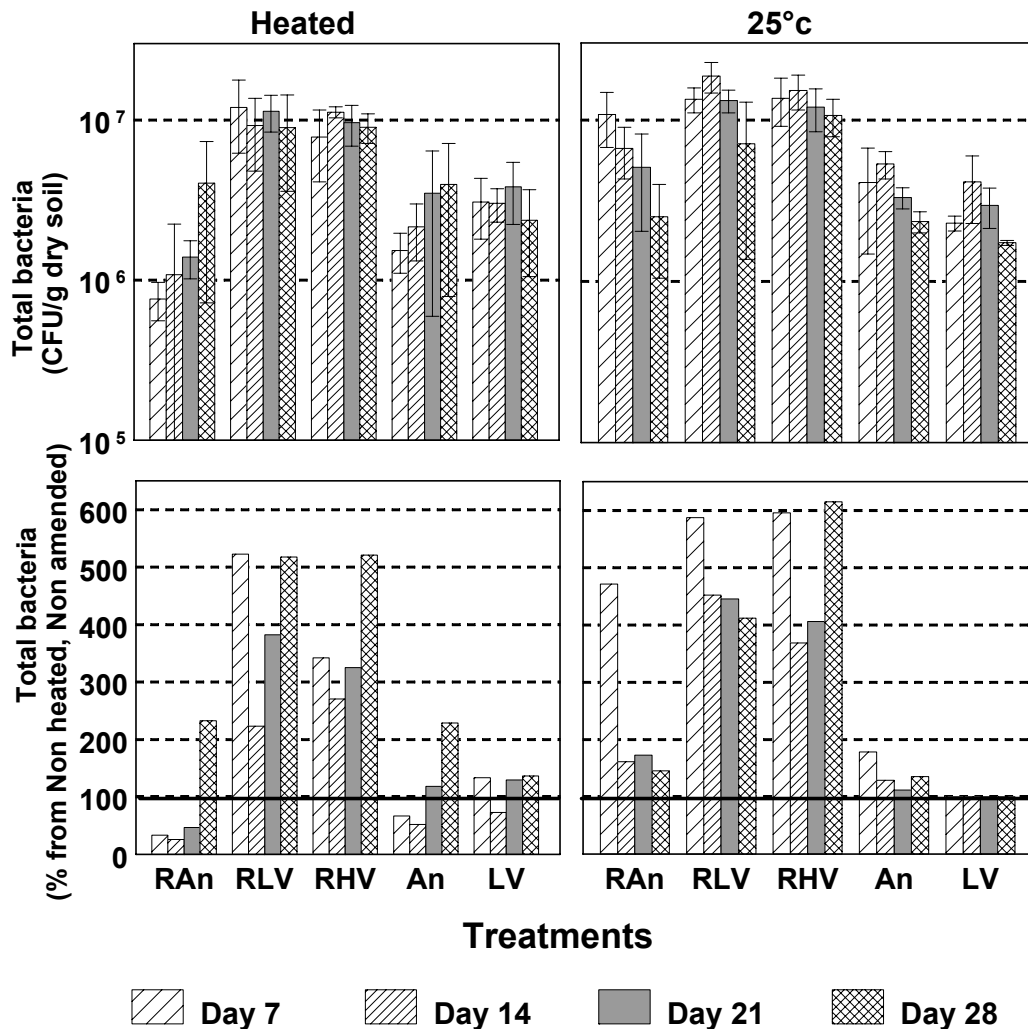


איור 29: השפעת חימום קרקע רחובות, הצנעת שיירי רוקולה ורמת האיוורור על אוכלוסיית הפטריות בקרקע. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית שבה מחוממת הקרקע במשטר דומה לזה של חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. רמות האיוורור והתוסף: An- קרקע ללא תוסף בתנאים אנאירוביים; LV- קרקע ללא תוסף בתנאי איוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); RAn- קרקע בתוספת רוקולה בתנאים אנאירוביים; RLV- קרקע בתוספת רוקולה בתנאי איוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); RHV- קרקע בתוספת רוקולה בתנאי איוורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל). קו אופקי רציף מציין ערך 100%. קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

3.1.4.2 השתנות אוכלוסיית החיידקים בקרקע

בקרקות שהוצנעה בהן רוקולה ושאווררו, הגברה אוכלוסיית כלל החיידקים, ללא קשר לחימום, עד פי 6, לעומת קרקע שלא הוצנעה בה רוקולה (איור 30). מספר החיידקים לאורך תקופת הניסוי בטיפולים אלה היה יציב. בקרקעות שהוצנעה בהן רוקולה, חוממו והוחזקו בתנאים אנאירוביים, מספר כלל החיידקים (האירוביים והאנאירוביים פקולטיביים) היה נמוך ב- 70% מזה שבטיפולים המאווררים, כבר בשבוע הראשון והוא נותר נמוך ממספר כלל החיידקים בטיפולים המאווררים. אוכלוסיית כלל החיידקים, בקרקע שהוצנעה בה רוקולה וחוממה בתנאים אנאירוביים, הייתה במגמת עלייה לאורך הניסוי, ייתכן שעקב הפרת התנאים האנאירוביים בזמן פתיחה וסגירה של המיכלים. בקרקעות שהוצנעה בהן רוקולה ושהוחזקו בתנאים אנאירוביים, ללא חימום, מספר כלל החיידקים

(האירוביים והאנאירוביים פקולטיביים) היה דומה לזה שבטיפולים המאווררים בשבוע הראשון, אך בשבוע השני ירד ונותר נמוך יותר, אם כי עלה לאורך כל תקופת הניסוי. חימום קרקע ללא תוסף אורגני לא השפיע על אוכלוסיית כלל החיידקים בקרקע. בתנאי חימום אנאירוביים נראתה מגמת עלייה קלה במספר החיידקים ובתנאים אנאירוביים ללא חימום- מגמה הפוכה.



איור 30: השפעת חימום קרקע רחובות, הצנעת שיירי רוקולה ורמת האיוורור על אוכלוסיית החיידקים בקרקע. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית שבה מחוממת הקרקע במשטר דומה לזה של חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. רמות האיוורור והתוסף: An- קרקע ללא תוסף בתנאים אנאירוביים; LV- קרקע ללא תוסף בתנאי איוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); RAn- קרקע בתוספת רוקולה בתנאים אנאירוביים; RLV- קרקע בתוספת רוקולה בתנאי איוורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); RHV- קרקע בתוספת רוקולה בתנאי איוורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל). קו אופקי רציף מצוין ערך 100%. קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

3.1.5 השתנות pH תמיסת הקרקע

לא נמצא הבדל ב-pH תמיסת הקרקע בין הטיפולים המחוממים ללא מחוממים. בטיפולים האנאירוביים, עם וללא רוקולה, התקבל pH=8.1-8.3, בדומה ל-pH בתמיסת הקרקע ללא תוסף באיוורור איטי. pH תמיסת הקרקע עם רוקולה בתנאים אירוביים (איוורור איטי או מהיר) עלה עד 8.7. באופן כללי ניתן לומר כי השפעת הטיפולים על pH תמיסת הקרקע הייתה מתונה.

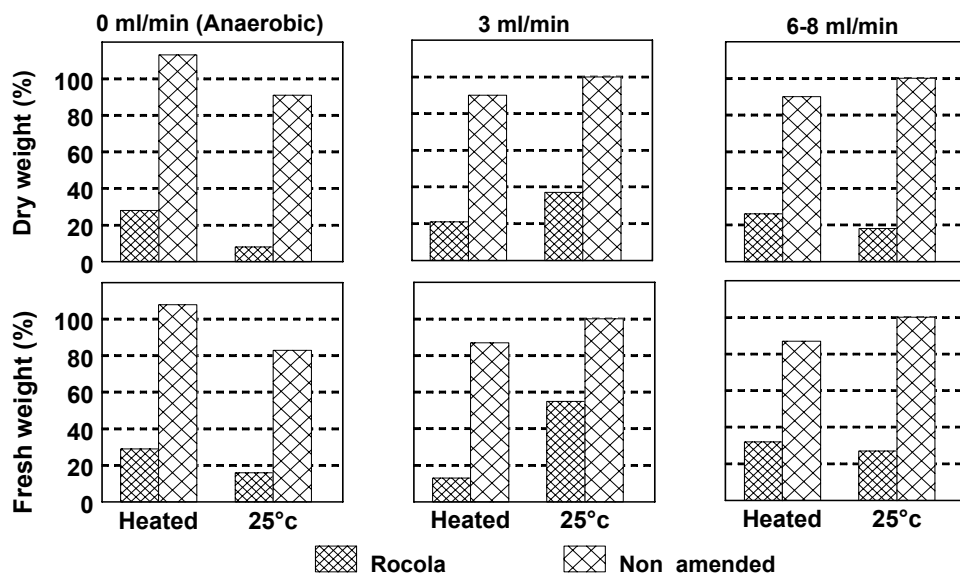
3.1.6 תרכובות פיטוטוקסיות בקרקע עם רוקולה לאחר הטיפול במערכת המעבדתית

לאחר הניסוי במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים, בוצע מבחן ביולוגי לנוכחות תרכובות פיטוטוקסיות בקרקעות מהטיפולים השונים. קרקע מכל טיפול הועברה לעציצים בחממה ונשתלו בה שתילי עגבנייה, שגודלו למשך חודש. לאחר מכן נבדק משקל הנוף הטרי והיבש וחושב כאחוז מזה של צמחים שגדלו בקרקע לא מחוממת, ללא הצנעת רוקולה ובאיורור איטי. להצנעת רוקולה בקרקע היתה השפעה פיטוטוקסית על גידול צמחי הבוחן. צמחים שנשתלו בקרקע שהוצנעה בה רוקולה ושהייתה בתנאים אנאירוביים, מתו תוך מספר ימים משתילה והוחלפו בשתילים חדשים. הצמחים שנשתלו בקרקע שהוצנעה בה רוקולה צברו פחות משקל, לעומת צמחים שנשתלו בקרקע ללא רוקולה (איור 31). הצנעת רוקולה בקרקע וחימומה תוך איורור איטי, גרמו לצבירת משקל נמוכה יותר לעומת הצנעת רוקולה ללא חימום באיורור איטי, בניגוד לצבירת המשקל בצמחים שגדלו בקרקעות שטופלו ברמות האיורור האחרות.

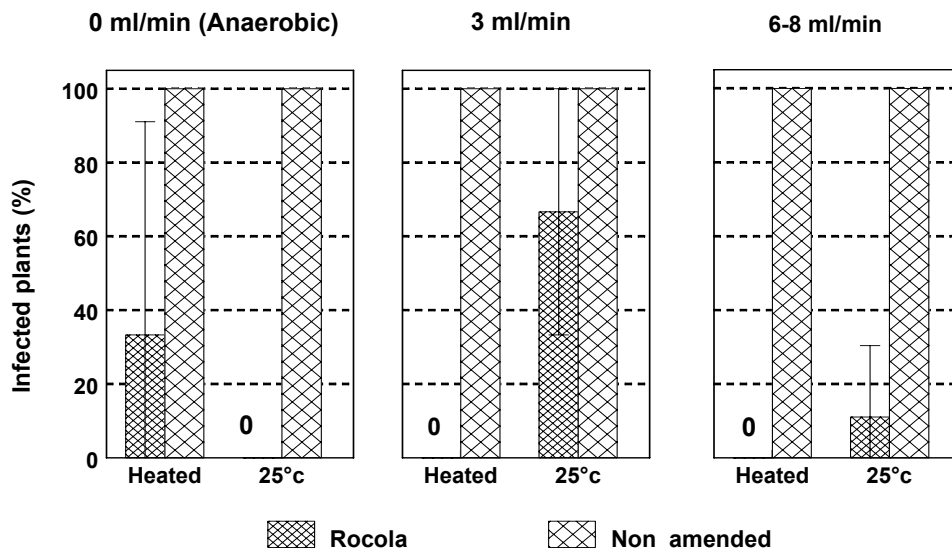
3.1.7 דיכוי (Suppressiveness) נמטודות יוצרות עפצים בקרקע לאחר שטופלה

במערכת המעבדתית

על מנת לבחון שינויים בקרקע מטופלת, שעשויים לדכא אילוח מאוחר בגורמי מחלה, בדקנו הישרדות נמטודות יוצרות עפצים שהוספנו לקרקע, יממה לאחר תום הטיפול במערכת המעבדתית. שורשי עגבנייה נגועים בנמטודות יוצרות עפצים, הוצנעו בקרקע שעברה טיפולים שונים במערכת המעבדתית- עם וללא הצנעת רוקולה, עם וללא חימום וברמות איורור שונות. הקרקעות הועברו לעציצים בחממה ונשתלו בהן שתילי עגבנייה, שגודלו למשך חודש. בקרקע שהוצנעה בה רוקולה ושחוממה במשטר של חיטוי סולרי, בתנאי איורור איטי או מהיר, התקבל דיכוי חזק של נמטודות יוצרות עפצים שהוטמנו בה לאחר הטיפול (איור 32). בקרקע שהוצנעה בה רוקולה ושחוממה במשטר של חיטוי סולרי בתנאים אנאירוביים, התקבל דיכוי חלקי בלבד של נמטודות יוצרות עפצים שהוטמנו בה לאחר הטיפול. בקרקע שהוצנעה בה רוקולה, ללא חימום ושהייתה בתנאים אנאירוביים התקבל דיכוי מוחלט של הנמטודות. בקרקע דומה, שאוררה במהלך הניסוי, התקבל דיכוי חלקי בלבד. בקרקע שלא הוצנעה בה רוקולה, לא הושפעה אוכלוסיית הנמטודות וכל צמחי העגבנייה שנשתלו בה נמצאו נגועים בעפצים, ללא קשר לרמת האיורור של הקרקע, או לחימומה, לפני האילוח. השפעת הצנעת הרוקולה על הקטילה נמצאה מובהקת בכל רמות האיורור. באיורור איטי נמצאה השפעת החימום מובהקת וכן השפעת גומלין מובהקת בין החימום והצנעת הרוקולה, באיורור האיטי.



איור 31: משקל טרי ויבש של נוף צמחי עגבנייה שגדלו בקרקע רחובות שטופלה במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים, למשך חודש. הנתונים מוצגים כאחוז ממשקל צמחים שגדלו בקרקע לא מחוממת, ללא הצנעת רוקולה ובתנאי איורור איטי (3 ml/min). הקרקע חוממה במשטר דומה לחיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ. רמות האיורור: 0 ml/min - תנאים אנאירוביים; 3 ml/min - איורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); 6-8 ml/min - איורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל).



איור 32: השפעת חימום קרקע והצנעת שיירי רוקולה, על חיות נמטודות יוצרות עפצים, שהוספו לקרקע, לאחר שהקרקע טופלה במערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים, למשך חודש. הקרקע חוממה במשטר דומה לחיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ. הנתונים מוצגים כממוצע של אחוז הנגיעות שנמצאה בצמחים שנשתלו בקרקע לאחר הטיפול. רמות האיורור: 0 ml/min - תנאים אנאירוביים; 3 ml/min - תנאי איורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); 6-8 ml/min - תנאי איורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל). קווים אנכיים מציינים סטיות תקן SD.

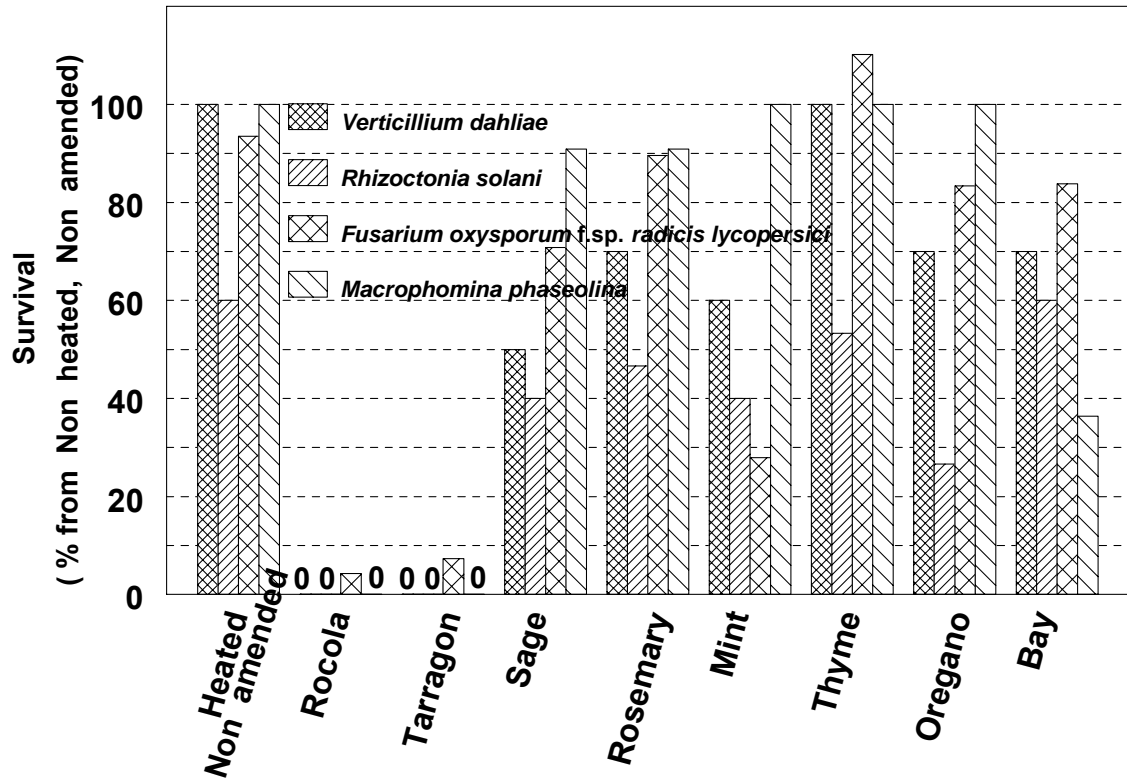
3.2 סריקת תוספים אורגניים לקרקע במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור

מבוקרים והשפעתם על חיות פגעי קרקע

במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים, מצאנו את התנאים המקבילים לחיטוי סולרי בשדה, לצורך בחינת השפעת תוספים אורגניים וחימום, על משתנים רבים בקרקע. לאחר שגובשו תנאי ההפעלה ואומתו, כפי שדווח בפרקים הקודמים, ניתן לבחון את השפעתם של תוספים שונים במערכת זו. בניסוי זה בדקנו את השפעתם של צמחי תבלין שונים שהוצנעו בקרקע וחימומה, על קטילת גופי קיימא של *R. solani*, *M. phaseolina* ו-*V. dahliae*, במיקומים שונים במערכת המעבדתית: במיכל הקרקע- בתוך הקרקע (חשיפה למשטר החימום, לאוכלוסיות מיקרוביאליות ולתרכובות נדיפות), במיכל הקרקע- מעל הקרקע (חשיפה למשטר החימום, לאוכלוסיות הנדיפות) ובמיכל החשיפה לאווירת הקרקע (חשיפה לתרכובות הנדיפות). הניסוי בוצע בתנאי איורור אחידים- הזרמת אוויר רציפה בקצב של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל. חשיפת האורגניזמים במערכת בוצעה למשך שבועיים בלבד, על מנת לבחון את פוטנציאל הקטילה של תוספים שהשפעתם חזקה במיוחד. הצנעת תוספים אורגניים שונים בקרקע וחימומה למשך שבועיים, גרמו לקטילה טובה יותר של פגעי קרקע שונים, לעומת חימום הקרקע ללא תוסף אורגני (איור 33). קטילת נמטודות יוצרות עפצים התקבלה רק בטיפולים המחוממים, ללא קשר להצנעת תוסף אורגני (התוצאות אינן מוצגות).

הצנעת **רוקולה** בקרקע וחימומה גרמו לקטילה יעילה של כל הפגעים בתוך הקרקע (לא מוצג) ומעליה (איור 33), למעט *R. solani*, שקטילתה בתוך הקרקע הייתה חלקית (לא מוצג); אווירת הקרקע בטיפול המחומם, גרמה לקטילה מלאה של *R. solani* ושל *M. phaseolina* גם במיכל החשיפה לאווירה, ללא חימום (לא מוצג). הצנעת רוקולה בקרקע והדגרתה ב-25 מ"צ, גרמה לקטילה יעילה של *R. solani* בתוך הקרקע ומעליה, אך לא במיכל החשיפה לאווירה (לא מוצג).

הצנעת **טרגון** בקרקע וחימומה גרמו לקטילה מלאה של כל הפגעים בתוך הקרקע (לא מוצג) ומעליה (איור 33); אווירת הקרקע בטיפול המחומם, גרמה לקטילה מלאה של *R. solani* ושל *V. dahliae* גם במיכל החשיפה לאווירה, ללא חימום (לא מוצג). הצנעת טרגון בקרקע והדגרתה ב-25 מ"צ, גרמה לקטילה יעילה של *R. solani* ושל *M. phaseolina* בתוך הקרקע ומעליה, אך לא במיכל החשיפה לאווירה (לא מוצג). הצנעת **מרווה** או **רוזמרין** בקרקע וחימומה, גרמו לקטילה יעילה של *V. dahliae* ושל *R. Solani* בתוך הקרקע בלבד (לא מוצג). הצנעת מרווה בקרקע והדגרתה ב-25 מ"צ, גרמה לקטילה יעילה של *V. dahliae* מעל הקרקע בלבד, אך לא במיכל החשיפה (לא מוצג). הצנעת **מנטה** בקרקע וחימומה, גרמו לקטילה מלאה של *V. dahliae* בתוך הקרקע בלבד; *R. solani* ו- FORL נקטלו באופן חלקי (לא מוצג). הצנעת **קורנית** בקרקע וחימומה, גרמו לקטילה מלאה של *R. solani*, בתוך הקרקע בלבד (לא מוצג). הצנעת **אורגנו** בקרקע וחימומה, גרמו לקטילה מלאה של *R. solani* בתוך הקרקע בלבד (לא מוצג); גופי קיימא של *V. dahliae* נקטלו באופן חלקי בלבד, וכך גם גופי קיימא של *R. solani* מעל הקרקע (איור 33). הצנעת **דפנה** בקרקע וחימומה, גרמו לקטילה חלקית של גופי קיימא של FORL בתוך הקרקע (לא מוצג) ושל *M. phaseolina* מעל הקרקע (איור 33). הצנעת עלי דפנה בקרקע והדגרתה ב-25 מ"צ, גרמה לקטילה מלאה של *V. dahliae* ולקטילה חלקית של *M. phaseolina*, מעל הקרקע בלבד (לא מוצג).



איור 33: השפעת תוספים אורגניים וחימום קרקע רחובות על חיות פגעי קרקע. התוצאות המוצגות מתייחסות לטיפולים המחוממים, במיקום מעל הקרקע בלבד- חשיפה למשטר החימום ולתרכובות הנדיפות שנוצרו בקרקע. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים. החימום בוצע במשטר דומה לחיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, באיורור של עד 3 מ"ל/דקה/מיכל, למשך שבועיים.

4. תצפיות

4.1 חיטוי קרקע ומצע בחלקות גידול מסחריות במושב מחולה

ביצענו חיטוי קרקע ומצע, ששילבו חיטוי סולרי ותוספים אורגניים בשדה פתוח ובחממות של שותפות חקלאית יע"ף ומשק אלפרט, בחודשים יולי- ספטמבר 2002. לפני החיטויים הוטמנו בקרקע גופי קיימא של FORL לצורך הערכת יעילות החיטוי, בעומקים 20 ו-40 ס"מ. כביקורת הוטמנו גופי קיימא גם בשולי החלקה שלא חוטאו. גופי הקיימא נשלפו בתום החיטוי וחיותם נבדקה. טבלה 7 מסכמת את התצפיות בחלקות צמחי תבלין במושב מחולה.

טבלה 7: תצפיות בחלקות צמחי תבלין במושב מחולה - חיטויי קרקע ומצע בחודשים יולי- ספטמבר 2002.

מיקום	חממה אורגנית (103) שותפות חקלאית יע"ף	חממת טרגון משק אלפרט	שדה פתוח- רוזמרין שותפות חקלאית יע"ף
שטח	3.5 דונם	1 דונם	10 דונם
מצע	קרקע מחולה	טוף שפוך בעומק 20 ס"מ	קרקע מחולה
פגעים	נמטודות יוצרות עפצים, קישיונה גדולה, בוטריטיס	קישיונה גדולה, עשבייה	עשבייה, חיטוי ביטוח
חיטוי	הצנעת שיירי גידול קורנית או מרווה וחיטוי סולרי	הנחת שיירי טרגון שגודל בטוף על גבי המצע וחיטוי סולרי	ריסוק והרטבה של נוף הרוזמרין במשך 3 שבועות, הצנעתו בקרקע וחיטוי סולרי ללא השקייה
משך החיטוי	סוף יולי עד אמצע ספטמבר, 55 ימים	יולי-אוגוסט, 66 ימים	במשך חודש אוגוסט
הישרדות FORL שהוצנע בתחילת החיטוי הסולרי	קטילה מלאה	קטילה מלאה	קטילה מלאה
גידול לאחר החיטוי	זריעת בזיל מזן "פרי", 5 ימים לאחר החיטוי	שתילת טרגון 5 ימים לאחר החיטוי	זריעת כוסברה
פיטוטוקסיות	לא נצפתה	לא נצפתה	לא נצפתה
הדברת הפגעים	0% נגיעות* בשלושה חודשי גידול	הדברה יעילה של קישיונה גדולה ושל עשבייה, פרט לרגלת גינה	הדברה יעילה של עשבייה, פרט לחלמית

* נמצאה קטילה מלאה של נמטודות יוצרות עפצים גם בדגימות קרקע שנלקחו לאחר החיטוי ולפני הגידול, ממיקומים שונים בחממה, בעומקים 20 ו-40 ס"מ (שיטת הבדיקה מפורטת בפרק חומרים ושיטות). בדגימות שנלקחו מהמרפסת שלא חוטאה נמצאה 100% נגיעות בעפצים.

דיון

לשילוב של הצנעת תוספים אורגניים מתאימים בקרקע וחיטוי סולרי, פוטנציאל ליצירת מערכת הדברה משולבת, שבה מעורבים קטילה או החלשה בחום, תרכובות רעילות, נדיפות ומסיסות, שמקורן בתוסף האורגני או תוצרי הפירוק שלו ושינויים באוכלוסיות המיקרוביאליות, לטובת מאזן מיקרוביאלי חדש, עדין לפגע.

בעבודה זו ניסינו לאפיין את המרכיבים המעורבים במערכת הקטילה של פתוגנים בקרקע. ניסינו ללמוד את התנאים בשדה, על מנת לשחזרם במעבדה בתנאים מבוקרים, כדי לאפיין כל מרכיב בנפרד.

1. חיטוי סולרי בשילוב תוספים אורגניים, בשדה

כדי להבין את מכלול הגורמים המתרחשים בקרקע, הצבנו ניסויי שדה בחלקות קטנות, שבהן נמדדו משתנים רבים, כימיים, פיזיקליים וביולוגיים. שילוב של הצנעת שיירי רוקולה או קורנית בקרקע וחיטוי סולרי, גורם לחימום קרקע לטמפ' גבוהה יותר ולצריכת חמצן מוגברת יותר בשלבים הראשונים של התהליך; הפעילות האנזימטית בקרקע מוגברת אף היא, ביחס לחיטוי סולרי של קרקע ללא תוסף אורגני. כמו כן, במהלך הטיפול פוחתת אוכלוסיית כלל הפטריות בקרקע ומוגברת אוכלוסיית כלל החיידקים. מכלול התהליכים גרם לקטילה יעילה יותר של פגעי קרקע סבילים לחום, ביניהם FORL ונמטודות יוצרות עפצים, ביחס לחיטוי סולרי בלבד.

1.1 השפעה על שינויים פיזיקליים בקרקע

התחממות הקרקע, במהלך חיטוי סולרי של קרקע שהוצנע בה חומר אורגני, היתה רבה יותר (בשיעור 1-3 מ"צ) בכל העומקים וההתקררות מתונה יותר, בהשוואה לחיטוי סולרי ללא תוסף אורגני (איור 6); תופעה זו מוכרת מעבודות קודמות עם תוספים אורגניים שונים. Gamliel & Stapleton (1993b), שיערו שהתוספים האורגניים משפרים את מוליכות החום בקרקע; אישוש להשערה זו טרם ניתן. הטמפ' המקסימליות בקרקע בעומק 20 ס"מ היו 45.7 מ"צ, 44.1 מ"צ ו-34 מ"צ, במהלך חיטוי סולרי עם תוסף אורגני, חיטוי סולרי ללא תוסף ובקרקע מחופה ומוצלת, בהתאמה.

הצנעת שיירי רוקולה או קורנית בקרקע, גרמו לפחיתה חדה בריכוז החמצן באווירת הקרקע; בהמשך עלה ריכוז החמצן עד לערכים התחלתיים בכל הטיפולים. פירוק חומר אורגני בקרקע רטובה, שמלווה בנשימה מוגברת וצריכת חמצן רבה, מתועד בספרות (Brich, 1959; Van Cleemput, 1983). הצנעת חומר אורגני בקרקע יצרה מבלע זמני חזק ופחיתה חדה בריכוז החמצן עד עומק 40 ס"מ, במשך היומיים הראשונים, ללא קשר לחיטוי הסולרי ואף נוצרו תנאים אנאירוביים למשך פרק זמן קצר (איור 7). חיטוי סולרי ללא הצנעת תוסף אורגני גרם לפחיתה קלה בריכוז החמצן, בדומה לקרקע מוצלת (איור 7א). השינויים בריכוז החמצן במהלך חיטוי סולרי של קרקע ללא תוסף אורגני והערכים שהתקבלו, דומים לאלו שנמדדו ע"י Rubin & Benjamin (1984). השינויים שמצאנו בריכוז החמצן בקרקע שהוצנע בה תוסף אורגני, במהלך חיטוי סולרי, עומדים בסתירה לכאורה עם התוצאות שהתקבלו ע"י Blok et al. (2000), שמצאו שתנאים אנאירוביים נשמרו למשך שמונים יום בקרקע מחופה שהוצנע בה תוסף אורגני; אולם בקרקעות אלו מלכתחילה בוצעה פעילות אגרוטכנית לשמירת תנאים אנאירוביים, כגון הצפה והידוק הקרקע. כמו כן, מי התהום בקרקעות אלו גבוהים, תכולת החומר האורגני בקרקע גבוהה ואלו עשויים להסביר את ההבדלים.

1.2 השפעה על פתוגנים ועל אוכלוסיית הפטריות בקרקע

הצנעת שיירי רוקולה או קורנית בקרקע וחיטוי סולרי, גרמו לקטילה יעילה של FORL כבר בשבועיים הראשונים לניסוי עד עומק 30 ס"מ (איור 9) וכעבור ארבעה שבועות- עד עומק 40 ס"מ. FORL הוא פתוגן סביל לחום, שחיטוי סולרי אינו מדבירו לגמרי (Sivan & Chet, 1993) ואכן, חיטוי סולרי ללא תוסף אורגני, גרם לקטילה יעילה של אוכלוסיית ה-FORL, רק כעבור ארבעה שבועות ועד עומק 30 ס"מ בלבד. בעבר הושגה הדברה יעילה של FORL באמצעות שילוב הצנעת כוספה של ליפתית שמן בקרקע וחיטוי סולרי (Gamliel et al., 2000).

יעילות הקטילה של הצנעת תוספים אורגניים מותנית בטמפ' הקרקע, כפי שהתבטא בהבדלי התוצאות בין ניסויי השדה ביולי ובאוגוסט. בניסויי אוגוסט שררו טמפ' נמוכות יחסית ליולי וחיטוי סולרי לאחר הצנעת תוסף אורגני, לא גרם לקטילה יעילה של FORL, בהשוואה לתוצאות הטובות שהושגו בניסויי יולי (איורים 9,10).

חיטוי סולרי של קרקע שהוצנעו בה שיירי קורנית, גרם קטילה מלאה של *Meloidogyne javanica* עד עומק 40 ס"מ. לעומת זאת, חיטוי סולרי לבדו קטל את הנמטודות עד עומק 20 ס"מ בלבד (איור 13). ידוע שיעילותו של החיטוי הסולרי בהדברת נמטודות תלויה במשך החיטוי ובטמפ' קריטית (40 מ"צ). במהלך חיטוי סולרי עוצמת החימום פוחתת עם העומק, דבר המגביל את יעילות ההדברה (Ploeg & Stapleton, 2001; Porter & Merriman, 1983; Stapleton & DeVay, 1983; Stapleton & Heald, 1991). התוצאות בעבודה זו מצביעות על תרומת התוסף האורגני לשיפור הקטילה בעומק באמצעות חיטוי סולרי, למרות שהחומר האורגני לא הוצנע לעומק כה רב. הצנעת תוסף אורגני ללא חיטוי סולרי, לא נמצאה יעילה בקטילת הנמטודות.

Macrophomina phaseolina, פטריה סבילה לחום (Bega & Smith, 1962), ניקטלה באופן חלקי עד עומק 20 ס"מ, בעקבות הצנעת רוקולה בקרקע וחיטוי סולרי למשך ארבעה שבועות בחודש יולי (איור 11). חיטוי סולרי לבדו אינו יעיל כלל כנגד פתוגן זה ויתכן שעלול לפגוע באוכלוסיות מיקרוביאליות אנטגוניסטיות לפגע (Mihail & Alcorn, 1984). לעומת זאת, הצנעת שיירי מצליבים בקרקע וחימומה לטמפ' גבוהות, באמצעות חיטוי סולרי באזורים מדבריים, גרמו קטילה מלאה של פתוגן זה (Lodha et al., 1997). בטמפ' נמוכות יותר, כפי שהתקבלו במהלך חיטוי סולרי ברחובות בניסויי אוגוסט, לא התקבלה קטילה יעילה של *M. phaseolina* או של FORL, עובדה המחזקת את חשיבותה של עוצמת חום קריטית בשילוב תוספים אורגניים להשגת הדברה יעילה של פגעים תרמוטולרנטיים.

קטילת *Rhizoctonia solani*, פתוגן בעל כושר ריבוי כספרופיט בקרקע (Garrett, 1965; Papavizas et al., 1975), נבדקה במהלך ניסויי יולי: חיטוי סולרי גרם לקטילה ממוצעת של 50% מאוכלוסיית הפתוגן בכל העומקים שנבדקו. הצנעת תוספים אורגניים בקרקע לא שיפרה את הקטילה, למרות שהגבירה תנאים המדכאים את הפתוגן- חימום וריכוז CO₂ באווירת הקרקע (Papavizas & Davey, 1962). בעבר נמצא, שחיטוי סולרי שהושגה בו טמפ' מירבית של 48 מ"צ בעומק 15 ס"מ, קטל את הפתוגן בעומק זה (Pullman et al., 1981). ניסיונות אחרים להדברת הפתוגן, כגון חיטוי סולרי שגרם לחימום מתון (טמפ' נמוכה מ-40 מ"צ בעומק 20 ס"מ) ושולב עם מדבירים ביולוגיים (McGovern et al., 2002), או חיפוי קרקע בשיירי קיטניות או הצנעתם (Keinath et al., 2003), גרמו דווקא להגברת אוכלוסיית הפתוגן.

חיטוי סולרי נמצא יעיל בקטילת *Verticillium dahliae*, פטריה רגישה לחום, עם וללא תוסף אורגני (איור 12); תוצאות דומות התקבלו בעבר (Davis & Sorensen, 1986; Katan et al., 1976; Porter & Merriman, 1983; Pullman et al., 1981). סביר להניח שההבדלים בקטילה בין ניסויי יולי לניסויי נובעים משיטת הבדיקה- קשיונות הפתוגן הם רב תאיים ורק קטילה מוחלטת של כל תא בכל הקשיונות תבטיח העדר נביטה על גבי מצע מזון (Pullman et al., 1981). במחקרים קודמים נמצא, שתוספים אורגניים בתנאים מסויימים גרמו לשבירת התרדמה ו/או לקטילה של אוכלוסיית הפתוגן בקרקע (Blok et al. 2000; Davis et al., 1996; Gilbert & Griebel, 1969; Lazarovits et al., 1999; Tenuta et al., 1997); ברם, בניסויי השדה שביצענו, הצנעת שיירי רוקולה או קורנית לא השפיעה על אוכלוסיית הפתוגן, אלא רק כאשר שולבה עם חיטוי סולרי.

שילוב של הצנעת תוספים אורגניים בקרקע וחיטוי סולרי, גרמו לפחיתה באוכלוסיית כלל הפטריות בקרקע, בדומה לקטילת הפתוגנים, בעיקר בניסויי יולי, בהם טמפ' הקרקע במהלך החיטוי הסולרי היו גבוהות יותר (איור 14). Ramirez-Villapudua & Munnecke (1988) מצאו שהצנעת שיירי כרוב בקרקע וחימומה במישטר חיטוי סולרי, גרמו לפחיתה חדה באוכלוסיות של פטריות פתוגניות ובמקביל פחיתה של 20% באוכלוסיית כלל הפטריות והגברת אוכלוסיות *Penicillium spp.* ו-*Aspergillus spp.* השינויים הכמותיים באוכלוסיית כלל הפטריות, בדומה לשינויים שנמדדו באוכלוסיית כלל החיידקים, עשויים להעיד על דעיכת אוכלוסיות שרגישות לחום ו/או נפגעו בתהליך הפירוק של החומר האורגני במהלך השבועיים הראשונים לניסוי ובהמשך התפתחות אוכלוסיות תרמוטולרנטיות ספרופיטיות, שחלקן אנטגוניסטיות לגורמי פגעים. שינויים אלה מוכרים בתהליך החיטוי הסולרי (Greenberger et al., 1987; Katan, 1981; Katan et al., 1983; Martyn et al., 1986; Lazarovits et al., 1999; Singh et al., 1983); ללא חיפוי, הצנעת תוספים אורגניים בקרקע עשויה לגרום להגברת אוכלוסיית כלל הפטריות (Smolinska, 2000); ממצאים אלה אומתו גם בעבודתנו- בקרקע מחופה ומוצלת, התגברה אוכלוסיית כלל הפטריות לאורך הניסוי.

1.3 השפעה על פעילות מיקרוביאלית כללית ועל אוכלוסיית כלל החיידקים

הצנעת שיירי צמחים בקרקע הגבירה את הפעילות המיקרוביאלית, לעומת קרקעות ללא תוסף אורגני (איור 8). ממצאים דומים התקבלו כאשר הוצנעו בקרקע תוספים שונים (Dissanayake & Hoy, 1999; Gamliel & Stapleton, 1993a; Gilpatrick, 1969; Lazarovits et al. 1999). הדגרה של הקרקע המטופלת, בטמפ' 45 מ"צ, הגבירה את הפעילות האנזימטית בקרקע, בהשוואה להדגרה ב-25 מ"צ, ללא קשר להצנעת התוסף, ככל הנראה עקב נוכחות של אוכלוסיות מיקרוביאליות תרמוטולרנטיות (חיידקים ופטריות). בדומה, Yarden et al. (1989) מצאו הגברה של הפעילות האנזימטית בקרקע, במהלך חיטוי סולרי ובלעדיו, במקביל להעלאת טמפ' ההדגרה עם FDA. במהלך חיטוי סולרי משולב עם תוסף אורגני, ניכרה פחיתה בפעילות הביולוגית של אוכלוסיות תרמוטולרנטיות במשך השבועיים הראשונים ולאחר מכן התגברות הפעילות. חיזוק לכך מתקבל בגידול אוכלוסיית כלל החיידקים לאורך כל תקופת החיטוי הסולרי של קרקע שהוצנעה בה רוקולה, לעומת גידול זמני באוכלוסייה בקרקע שהוצנעה בה רוקולה ולא חוטאה (איור 15). הגברת אוכלוסיית כלל החיידקים, בעקבות הצנעת תוספים אורגניים בקרקע, עם וללא חיטוי סולרי, אומתה במחקרים נוספים (Ramirez-Villapudua & Munnecke, 1988; Smolinska, 2000; Stevens et al., 2003). בניסויי אוגוסט, בהם שררו טמפ' נמוכות יחסית ליולי,

התקבלו מגמות דומות, אולם רמת הפעילות הכללית היתה נמוכה יותר והשינויים באוכלוסיית כלל החיידקים היו מיזעריים. בשני המועדים, הצנעת קורנית בקרקע גרמה שינויים מתונים בפעילות האנזימטית והשפעתה על אוכלוסיית כלל החיידקים הייתה זניחה. גורם אפשרי לכך הוא המבנה המעוצה יחסית, שקשה לפירוק (Hoitink, 1980), או גורמים מעכבים שמקורם בשמן האתרי (Suhr & Nielsen, 2003). הדגרה ב-25 מ"צ של קרקע שהוצנעה בה רוקולה ושטופלה במשטר חימום סולרי, גרמה להגברת הפעילות המיקרוביאלית, ובהמשך לפחיתה בה (איור 8א). תוצאות דומות התקבלו בטיפול בטמפ' קבועה של 25 מ"צ בקרקע שהוצנעה בה רוקולה ולאחר מכן הדגרתה בטמפ' של 25 או 45 מ"צ. תוצאות אלו מנוגדות למימצאים של Gamliel & Stapleton (1993a): בניסויים במערכת מבוקרת ואטומה, מצאו שחימום קרקע עם שיירי כרוב ולאחר מכן הדגרה ב-25 מ"צ, גרם לפחיתה בפעילות המיקרוביאלית, בדומה להדגרה ב-25 מ"צ לאחר חימום קרקע ללא תוסף. עם זאת, בבדיקת פעילות מיקרוביאלית בשדה, בקרקע שהוצנעו בה שיירי כרוב או קומפוסט, במהלך חיטוי סולרי, הם מצאו הגברה של הפעילות, לעומת חיטוי סולרי ללא תוסף (מידע בע"פ). השינויים במגמות הפעילות עשויים להעיד על שינוי באוכלוסיות המיקרוביאליות- דעיכת אוכלוסיות שפעילותן נפגעת בהשפעת התוסף והתבססות הדרגתית של אוכלוסיות תרמוטולרנטיות שאינן נפגעות, או אולי מעודדות בנוכחות התוסף והחיטוי הסולרי. הירידה בפעילות עשויה להיות עקב התדלדלות התרכובות הזמינות לפירוק בקרקע, או עקב הופעת תרכובות שמעכבות את הפעילות (Linderman & Gilbert, 1975). פעילות מיקרוביאלית מוגברת עשויה לעודד הדברת פגעים ישירה או עקיפה (Baker & Cook, 1974; Chen *et al.*, 1988). Schnurer & Rosswall (1982) מצאו מתאם חיובי בין הידרוליזה של FDA בקרקע לבין נשימה (צריכת חמצן). הגברת נשימה בקרקע מלווה בעלייה בריכוז ה- CO_2 (Rubin & Benjamin, 1984) והשינוי באווירה עשוי לפגוע בפגעים שונים (Papavizas & Davey, 1977b; Ioannou *et al.*, 1975). Papavizas *et al.* (1962; Hoy & Dissanayake, 1999) מצאו, שתוספים אורגניים שונים מתאפיינים בפעילות מיקרוביאלית ברמות שונות ושקיים מיתאם חיובי בין רמת ההידרוליזה של FDA שהודגר עם התוסף, לבין כושר ההדברה של התוסף המוצנע בקרקע.

2. פיתוח מערכת מעבדתית לחימום קרקע, ויצירת משטר של חיטוי סולרי בתנאי איורור

מבוקרים

בעבודה זו פיתחנו מערכת מעבדתית מבוקרת לחימום של קרקע שהוצנעו בה תוספים אורגניים. מערכת זו מאפשרת ללמוד את מגוון התהליכים אשר מתרחשים בקרקע, כפי שהם מתרחשים בשדה במהלך חיטוי סולרי של קרקע בשילוב עם תוספים אורגניים. במערכת המבוקרת ניתן לאפיין את השפעת כל אחד מהגורמים המעורבים בקטילת פגעים בקרקע, כגון חימום, איורור, רטיבות ופעילות מיקרוביאלית, בנפרד ובשילובים שונים. במערכת זו ניתן לבחון בזמן קצר יחסית, את כושרו של חומר אורגני להוות תוסף מתאים להצנעה בקרקע ואת השפעתו על חיות פגעי קרקע שונים. המערכת המבוקרת נבנתה על בסיס תיעוד מוקדם של התהליכים שמתרחשים בשדה בקרקע בעומק 20 ס"מ, במהלך חיטוי סולרי לאחר הצנעת תוספים אורגניים שונים; השינויים באוכלוסיות המיקרוביאליות הכלליות והפעילות האנזימטית הכללית, שנמדדו על בסיס הפעלת המערכת בתנאי חימום ואיורור בדומה למתרחש בשדה, אימתו את התאמתה כמדמה את המתרחש בשדה בעומק 20 ס"מ, במהלך חיטוי סולרי בעונת הקיץ.

במערכת המבוקרת, יצרנו משטר טמפ' זהה לזה שנימדד בשדה בעזרת מערכת חימום וקירור פיזיקלית (הולכת חום), ללא אלמנט של קרינה (איור 16; טבלה 6). הטמפ' במיכל הניסוי בתוך הקרקע, הייתה גבוהה ב-2-3 מ"צ מזו שבאווירה שמעליה, למרות שכל המיכל הוטבל באמבט החימום, ככל הנראה עקב יעילות הולכת חום פחותה בתווך הגזי.

הגורם העיקרי במערכת מבוקרת (בתוך מיכלים), שמדמה את המצב בשדה, הוא יצירת משטר איורור אשר דומה לזה שמתרחש בשדה. בשדה, לאחר הצנעת תוספים אורגניים בקרקע, נוצרים לפרק זמן מסויים תנאים של מחסור בחמצן בעקבות פעילות מיקרוביאלית מוגברת אשר יוצרת מבלע זמני חזק של חמצן (Blok *et al.*, 2000). בהמשך משתנים התנאים לאירוביים, בגלל קיום תנאי איורור בקרקע, על אף היותה מחופה. בבניית המערכת, בחרנו באיורור מבוקר המבוסס על הזרמה מווסתת של אוויר, כדי לאפשר תנאים אירוביים. העדפנו אוויר טבעי על העשרה בחמצן בדרכים כימיות או דחיסת גזים שונים (גרינברגר, 1984; Kirchmann & Witter, 1989; Beute & Rodriguez-Kabana, 1979), כדי לצמצם למינימום השפעות חיצוניות לא רצויות. השיקולים העיקריים בקביעת קצב האיורור היו מחד שמירה על ריכוז החמצן כפי שהוא בשדה ומאידך, לכידה של התרכובות הנדיפות שנוצרות בקרקע למשך פרק זמן מספק, על מנת לאפשר את פעילותן ואת האנליזה שלהן. המערכת שפיתחנו שונה מכל מערכות הכלים שנבחנו בעבר שעשו שימוש במיכלים סגורים ואשר סביר שנצרו בהם תנאים אנאירוביים (גרינברגר, 1984; Ramirez-Villapudua & Munnecke, 1988; Gamliel & Stapleton, 1993a; Smolinska, 2000). מצאנו שאיורור בקצב 2.3-3.1 מ"ל/דקה/מיכל, מתאים כדי לשמור על ריכוז החמצן בקרקע שבמיכלים, בדומה למתרחש בשדה בהשפעת חימום או תוספים אורגניים. הזרמת האוויר בוצעה בלחץ נמוך ביותר ($<10^{-3}$ Atmosphere) אשר כשלעצמו אינו משפיע על חיות פגעי קרקע ואוכלוסיות מיקרוביאליות כלליות. בדומה, גרינברגר (1984), הזרים תערובת גזים בלחץ גבוה יותר למיכלים ולא מצא השפעה של הלחץ על חיות פגעים בטיפולי הביקורת; רבינוביץ (1990) מצאה השפעה של על-לחץ, במערכת מחוממת ל-44 מ"צ ואטומה, על חיות מידבק, אולם השפעה זו הייתה נמוכה ובאה לידי ביטוי רק במשך השעתיים הראשונות של החשיפה. לתת לחץ נמצאה השפעה גדולה יותר על חיות פגעים; תת לחץ אף הגביר את הרעילות של שמנים אתריים מסויימים (Arras & Usai, 2001). במערכת שפיתחנו, חשיפת המידבק מתבצעת במשך ימים, בעל-לחץ נמוך שמתקיים גם בטיפולי הביקורת; בחינת תוצאות קטילת המידבק יחסית לביקורת עשויה לצמצם השפעת גורם זה על התוצאות.

השתנות ריכוזי החמצן במיכלים המאווררים במהלך הניסוי, תואמת את המתרחש בשדה במהלך חיטוי סולרי (איורים 7,17,18). בתנאי חוסר איורור פחת ריכוז החמצן בקרקע שהוצנעה בה רוקולה עד להיווצרות תנאים אנאירוביים, בדומה לירידה בריכוז החמצן במיכלים אטומים שנמדדה בעבודתם של Van Cleemput *et al.* (1983); פתיחות לזמנים קצרים של המערכת האטומה לצורך דיגומי קרקע לא השפיעו על התנאים האנאירוביים בקרקע שהוצנעה בה רוקולה, אם כי בקרקע שלא הוצנעה בה רוקולה הופרו התנאים האנאירוביים. בחינת התרכובות הנדיפות הנוצרות בקרקע שהוצנעה בה רוקולה, בתנאים אירוביים או אנאירוביים, עם חימום או בלעדיו, תומכת בהנחה שבתנאים אנאירוביים מעורבים מנגנונים שונים של פירוק חומר אורגני, שינויים באוכלוסיות המיקרוביאליות וקטילת פגעים. פירוק חומר אורגני בתנאים אנאירוביים איטי יותר לעומת תנאים אירוביים ותוצרי הפירוק שונים (Kirchmann & Witter, 1989; Ponnampereuma, 1972).

לא נמצא הבדל ב-pH תמיסת הקרקע בין הטיפולים המחוממים ללא מחוממים. pH תמיסת הקרקע עם רוקולה בתנאים אירוביים (איוורור איטי או מהיר) עלה עד 8.7, כ-0.5 יחידה לעומת טיפול אנאירובי, או טיפול ללא תוסף אורגני. באופן כללי ניתן לומר כי השפעת הטיפולים על pH תמיסת הקרקע הייתה מתונה, בדומה למתקבל בניסויי שדה. Kirchmann & Witter (1989) בחנו פירוק זבל עופות מעורב בקש ומצאו פחיתה ב-pH תמיסת הקרקע בעקבות תנאים אנאירוביים שהושגו ע"י הזרמת חנקן גזי, לעומת ה-pH בתנאים אירוביים שהושגו ע"י הזרמת אוויר מועשר בלחות וללא CO₂; שינוי זה נובע מהווצרות של תרכובות חנקן אנאורגניות שונות בתנאי איוורור שונים.

2.1 יצירת תרכובות נדיפות

חימום קרקע שהוצנעו בה שיירי רוקולה גרם ליצירת מגוון רחב של תרכובות נדיפות, בהשוואה לקרקע לא מחוממת. מרבית התרכובות שנתגלו לא זוהו, היות ובספרות קיים ידע לגבי התרכובות הנדיפות שקיימות בצמח חי (Jirovetz *et al.*, 2002; Miyazawa *et al.*, 2002), אך לא של תוצרי הפירוק בתנאי העבודה כפי שהתבצעו בניסוי זה. אחת התרכובות שזוהו היא L-Sulforaphane. תרכובת זו מוכרת בצמחים ממשפחת המצליבים כנוגדת חמצון ובעלת תכונות אנטיביוטיות ואנטיקרצינוגניות (Fahey *et al.*, 1992; Zhang *et al.*, 2002; Fahey *et al.*, 2001). ריכוז מקסימלי (שטח Peak מקסימלי) של L-Sulforaphane התקבל, בטיפולים שכללו הצנעת רוקולה ותנאים אירוביים, ביום השני לניסוי ובתנאים אנאירוביים- ביום הראשון (איור 22). בתנאים אירוביים, התקבלה כמות מירבית רבה יותר בטיפולים המחוממים ובאיוורור האיטי, לעומת טמפ' 25 מ"צ ו/או איוורור מוגבר. העובדה שהתרכובת נמצאה בכל משטרי האיוורור יכולה להעיד שהיא השתחררה מהרקמה הצמחית, או שנוצרה ע"י גורמים מיקרוביאליים במהלך פירוק הריקמה בתהליך שאינו תלוי בריכוז החמצן. תרכובת נוספת, 4-Methylthiobutylisothiocyanate, המהווה מרכיב עיקרי בשמן הרוקולה לא נבדקה בטיפולים השונים עקב העדר סטנדרט מתאים. בניסויים במערכת המעבדתית לא בדקנו את הפעילות הביולוגית של אווירת הקרקעות בטיפולים השונים, פרט לקטילתן את פגעי הקרקע; ע"פ הספרות, תרכובות נדיפות שמקורן בפירוק החומר האורגני, עשויות להגביר את אוכלוסיית כלל החיידקים בקרקע (Gamliel & Stapleton, 1993a; Lewis & Papavizas, 1974; Linderman & Gilbert, 1975; Pavlica *et al.*, 1978). Ramirez-Villapudua & Munnecke (1988) מצאו שחשיפת קרקע לא מטופלת לתרכובות נדיפות, שהשתחררו מקרקע שהוצנעו בה שיירי כרוב במיכלים אטומים, גרמה לפחיתה מתונה באוכלוסיית הפטריות ולהגברת באוכלוסיית החיידקים של עד פי 16. Gamliel & Stapleton (1993a) מצאו שתרכובות נדיפות, שהשתחררו מקרקע מחוממת שהוצנעו בה שיירי כרוב והוזרמו דרך קרקע נוספת ללא שיירי כרוב, גרמו לפחיתה אוכלוסיות מיקרוביאליות ופעילותן ובמקביל לקטילת פגעים בקרקע הנוספת, לעומת תרכובות נדיפות שהשתחררו מקרקע שהוצנעו בה כרוב ושלא חוממה. כמו כן מצאו התאמה איכותית בין התרכובות הנדיפות שנוצרו במערכת זו לבין אלו שהתקבלו בשדה.

בתנאים אנאירוביים נוצר מספר רב של תרכובות נדיפות, בעלות טווח פולריות רחב ומשקל מולקולרי גבוה, לעומת היווצרות מעט תרכובות בעלות פולריות הומוגנית ומשקל מולקולרי נמוך יחסית, באיוורור האיטי (עד 3 מ"ל/דקה) (איורים 19,20). מבנה המערכת האנאירובית - מיכל אטום ללא הזרמת אוויר, גרם להצטברות התרכובות הנדיפות לאורך כל הניסוי, בניגוד לטיפולים המאווררים, שבהם מורחק חלק מהתרכובות הנדיפות באופן מתמיד (איור 21). בתנאי איוורור מוגבר (8-6 מ"ל/דקה/מיכל), הצנעה של

רוקולה בקרקע וחימום, גרמו להיווצרות יותר תרכובות נדיפות, על אף שקצב ההרחקה שלהן מהמיכל בטיפול זה מוגבר, לעומת איורור איטי, ככל הנראה בגלל פירוק מהיר יותר של החומר האורגני באיורור מוגבר.

2.2 קטילת פגעי קרקע

יתרונה של המערכת המבוקרת הוא באפשרות לבחון בנפרד את הגורמים השונים המעורבים בקטילת פגעים, דהיינו משטר החימום, פעילות התרכובות הנדיפות שמשתחררות במהלך פירוק החומר האורגני ופעילות מיקרוביאלית. בחינת קטילתם של פגעי קרקע שונים בוצעה בשלושה מיקומים במערכת: גופי קיימא, שהוכנסו למיכל החשיפה החיצוני (איור 4), נחשפו אך ורק לתרכובות הנדיפות שהשתחררו ממיכל הקרקע; גופי קיימא שנתלו במיכל הקרקע מעל לקרקע, נחשפו למשטר החימום ולתרכובות הנדיפות; גופי הקיימא שהוטמנו בתוך הקרקע, במיכל הקרקע, נחשפו למשטר החימום, לתרכובות הנדיפות והמסיסות ולפעילות המיקרוביאלית. הפחתת אוכלוסיית הפתוגנים FORL (איורים 23,24) ו-*R. solani* (איורים 25,26) כבר בשבועיים הראשונים לניסוי או לפני כן, בכל המיקומים, כולל במיכל החשיפה לאווירת הקרקע, מלמדת אודות רעילותן של התרכובות הנדיפות שנוצרו בקרקעות שהוצנעה בהן רוקולה. משטר חימום סולרי הגביר את היווצרות התרכובות הנדיפות הרעילות והעדות לכך היא רעילות לגופי הקיימא שנחשפו לתרכובות אלה גם בטמפ' החדר (במיכל החשיפה). כושר הקטילה של התרכובות הנדיפות שנוצרו בטיפולים המחוממים, בתנאים מאווררים, בקרקע שהוצנעה בה רוקולה, היה רב יותר לעומת הטיפולים הלא מחוממים. בחימום קרקע שהוצנעה בה רוקולה בתנאים אנאירוביים, התקבלה קטילה פחותה במיכל החשיפה, לעומת הקטילה שהתקבלה במיכל הקרקע. במערכת אנאירובית בטמפ' 25 מ"צ, גורמי הקטילה במיכל הקרקע- מעל הקרקע ובמיכל החשיפה לאווירה זהים לכאורה. קטילה שונה של אותו פגע בשני המיקומים, עשויה לנבוע בעיקר מסיחור לא יעיל של אווירת הקרקע בשני המיכלים המחוממים. שיעורי קטילת FORL בטיפולים המחוממים ללא הצנעת רוקולה היו דומים לאלו שהתקבלו בחיטוי סולרי בשדה. לעומת זאת, במערכת המעבדתית התקבלו שעורי קטילה גדולים יותר בקרקע שהוצנעה בה רוקולה בכל משטרי האיורור, בתוך הקרקע ומעליה, לעומת קטילה בתנאי חימום מקבילים בשדה, בעומק 20 ס"מ; כלומר, במערכת המעבדתית קטילת הפגעים יעילה יותר, בהשוואה למתקבל בשדה. הסברים אפשריים לכך הם: הבדל באיכות החומר האורגני שהוצנע בשדה- שיירי גידול בדרגת ניקיון נמוכה, לעומת זה ששימש לניסויי המעבדה- עלווה צעירה באיכות ייצוא; השונות הגבוהה בשדה, לעומת שונות נמוכה יחסית במעבדה, שנובעת בין היתר מתנאים הומוגניים יותר של פיזור החומר האורגני והצנעתו; תרכובות נדיפות קטלניות שמסיסות במים עשויות להתנקז לעומק הקרקע בשדה, אך במערכת המבוקרת הן מתרכזות בתמיסת הקרקע ולא מנוקזות; ספיחת תרכובות רעילות לקרקע שבה מעורבים גופי הקיימא, בתוך שקית הרשת, ובעקבות זאת חשיפה טובה יותר של גופי הקיימא לתרכובות הרעילות. הצנעת רוקולה בקרקע וחימומה במשטר סולרי במערכת המבוקרת גרמו לקטילת פגעים יעילה בפרק זמן קצר יחסית. המנגנון הגורם לקטילה בפרק זמן קצר, הוא ככל הנראה שילוב של רעילות התרכובות שנוצרו בקרקע המחוממת והטמפ' הגבוהה ולא התבססות אוכלוסייה מיקרוביאלית אנטגוניסטית לפגע, תהליך שדורש זמן ממושך יותר. פעילות פונגיטוקסית של תרכובות נדיפות שנוצרו בעקבות פירוק חומר אורגני בקרקע בתנאי חימום התקבלה גם במערכות מעבדתיות אחרות (גרינברגר, 1984; Gmliel & Stapleton,

F. oxysporum f. sp. *conglutinans* (1993a). Ramirez-Villapudua & Munnecke (1988) מצאו, שאוכלוסית *F. oxysporum* פחתה בקרקע מעורבת עם שיירי כרוב במיכל אטום, אולם במיכל פתוח התקבלה הגברה בשבוע הראשון ולאחר מכן דעיכה לערכים קרובים להתחלתיים. הם שיערו שההבדלים בחיות הפתוגן נובעים מבריחת התרכובות הנדיפות הרעילות במיכלים הפתוחים.

בתנאי חימום, ללא הצנעת שיירי רוקולה בקרקע, מצאנו הבדלים בקטילת *R. solani* בתנאים אנאירוביים, לעומת תנאים אירוביים. בתנאים אנאירוביים התקבלה קטילה מלאה של הפתוגן, בעוד שבתנאי איורור- במערכת המעבדתית, וכן במהלך חיטוי סולרי בשדה, התקבלה קטילה חלקית בלבד של פתוגן זה. תנאים אנאירוביים לכשלעצמם אינם בעלי השפעה מהותית על פגעי קרקע (Ioannou et al., 1977a); Blok et al. (2000) מצאו, שחיפוי קרקע בתנאים אנאירוביים, ללא תוסף אורגני, גרם לפחיתה באוכלוסיית *R. solani* בחלקות מסוימות ובחלקות אחרות דווקא להגברתה. יתכן שיפור ההדברה באמצעות שילוב תנאים אנאירוביים וחימום של הקרקע, אולם השערה זו דורשת בחינה יסודית יותר.

2.3 תרכובות נדיפות רעילות במיקומים שונים במערכת המעבדתית

על אף התאמת התנאים במערכת המבוקרת, לאלו המתקיימים בשדה, מצאנו הבדלים בקטילת פגעים שונים בין המערכת המעבדתית למתרחש בשדה וכן בין מיקומים שונים במערכת, שלכאורה מתקיימים בהם גורמי קטילה זהים. הצנעת תוספים אורגניים שונים בקרקע, גרמה לקטילת פגעים שונים במיכלי הקרקע הלא מחוממים, מעל הקרקע, אך השפיעה מעט על שיעור הקטילה במיכל החשיפה לאוויר הקרקע, כאשר בפועל בשני המיקומים החשיפה היא לתרכובות נדיפות בלבד (איורים 25). ההבדלים באים לידי ביטוי בעיקר בחשיפה למשך שבועיים ופחות בחשיפה ממושכת למשך ארבעה שבועות. הבדלים אלה בקטילה יכולים לנבוע מהבדלים בהרכב התרכובות הנדיפות, שחלקן עלול לעבור תהליכי ספיחה או שינויים ביוכימיים (Baker & Cook, 1974; Garrett, 1965; Linderman & Gilbert, 1975). ספיחה במיכל הקרקע, לחלקים שונים של המערכת המעבדתית, או לקרקע שבתוכה נמצאים גופי הקיימא בשקיות הרשת לפני המעבר למיכל החשיפה לאוויר, מהווה הסבר אפשרי לתופעה זו וכן לעובדה שבמערכת המעבדתית מתקבלת קטילה טובה יותר לעומת הקטילה בשדה. הבדלים דומים בקטילה נמצאו גם במיכלים האנאירוביים. בניסוי למשך חודש או בתנאי חימום, נוצרות יותר תרכובות נדיפות לעומת ניסוי קצר למשך שבועיים, או ללא משטר חימום וזה מסביר מדוע תופעת הספיחה אינה מתבטאת במערכת המחוממת האירובית.

גורם נוסף שיכול לגרום להבדלים בין התרכובות הנדיפות בשדה ובמעבדה הוא השקיה- בשדה בוצעה השקיה שבועית, שסביר שדחקה תרכובות נדיפות מסיסות לעומק. בכלים המבוקרים במעבדה, התרכזו התוצרים המסיסים בתמיסת הקרקע ובמים שהתעבו במיקומים שונים וסביר שגם בגופי הקיימא שהורטבו. בתנאים אנאירוביים ישנו גורם הסיחרור הלקוי, שכנראה מהווה גורם נוסף להעדר קטילה במיכלי החשיפה לאוויר.

2.4 קטילת נמטודות יוצרות עפצים במהלך הטיפול ודיכויין בקרקע שטופלה במערכת המעבדתית

קטילת נמטודות יוצרות עפצים נבדקה רק בתוך הקרקע (חשיפה למשטר החימום, תרכובות נדיפות ופעילות מיקרוביאלית, בתנאי איורור שונים). חימום הקרקע במשטר חיטוי סולרי, גרם לקטילה מלאה

של הנמטודות ללא קשר להצנעת הרוקולה, או לרמת האיוורור (איור 27), בדומה לתוצאות ניסויי השדה בעומק 20 ס"מ. Ploeg & Stapleton (2001) מצאו שהדגרה של קרקע מאולחת ב- *M. javanica* או *M. incognita*, בטמפ' קבועה של 40 מ"צ במיכלים אטומים, גרמה לקטילה מלאה של הנמטודות כעבור 10 ימים; הצנעת שיירי ברוקולי בקרקע (2% משקלי, טרי) שיפרה את הקטילה בטמפ' 25 מ"צ. במחקרים נוספים נמצא שתוספים אורגניים משחררי אמוניה הדבירו ביעילות נמטודות פתוגניות (Lazarovits et al. 1999). מחזורי הצפה וייבוש של שטחים חקלאיים, בהם נוצרו תנאים אנאירוביים לסירוגין, גרמו להדברה יעילה של נמטודות יוצרות עפצים, אולם לא התקבלה הכחדה של האוכלוסייה (Stover, 1979). מצאנו שבקרקעות מאווררות, הצנעת רוקולה בטמפ' 25 מ"צ, גרמה לקטילה מלאה של הפתוגן; לעומת זאת בתנאים אנאירוביים התקבלה קטילה חלקית בלבד, בדומה למימצאיהם של Ploeg & Stapleton (2001), למרות שלכאורה ריכוז התרכובות הנדיפות הרעילות במיכלים האטומים גדול מזה שבמיכלים המאווררים, אולם הרכבן שונה. זהו חיזוק להנחה שבתנאים אנאירוביים מעורבים גורמי קטילה שונים לעומת תנאים אירוביים.

בנוסף לקטילת נמטודות שטפלו במערכת המעבדתית, נמצא גם דיכוי (Suppressiveness) בפתוגניות של נמטודות יוצרות עפצים שהוכנסו לקרקע לאחר שטופלה במערכת המבוקרת. בקרקע שהוצנעה בה רוקולה ושחוממה במשטר של חיטוי סולרי, בתנאי איוורור איטי או מהיר, התקבל דיכוי חזק של פתוגניות נמטודות יוצרות עפצים שהוטמנו בה לאחר הטיפול, לעומת קרקע שלא הוצנעה בה רוקולה (איור 32). בקרקע שהוצנעה בה רוקולה ושחוממה במשטר של חיטוי סולרי בתנאים אנאירוביים, התקבל דיכוי חלקי בלבד של נמטודות יוצרות עפצים שהוטמנו בה לאחר הטיפול. לעומת זאת ללא חימום, הצנעת רוקולה בקרקע גרמה דיכוי פתוגניות רק בתנאים אנאירוביים. השפעת הצנעת הרוקולה על דיכוי הפתוגניות נמצאה מובהקת בכל רמות האיוורור. באיוורור איטי נמצאה השפעת גומלין מובהקת בין החימום והצנעת הרוקולה. דיכוי התבססות פתוגנים בקרקע, היא תופעה ביולוגית מוכרת (קטן, 1989; Greenberger et al., 1987) ומתקבלת בין היתר בעקבות חיטוי סולרי של הקרקע או הצנעת קומפוסט מתאים בקרקע (Hoitink & Fahy, 1986). פגיעה ארוכת טווח בפתוגניות של נמטודות יוצרות עפצים ודיכוי מחלות נוספות התקבלה בהצנעת זבל עופות משולב עם חיטוי סולרי בשדה (Gamlieel & Stapleton, 1993b; Stevens et al., 2003). גורמים אפשריים לדיכוי האילוח מחדש הם התבססות מיקרואורגניזמים אנטגוניסטיים לפגעים, או תרכובות רעילות מסיסות שנותרות בקרקע בתום הטיפול.

2.5 השתנות אוכלוסיות מיקרוביאליות כלליות ופעילות אנזימטית בקרקע

במהלך חימום קרקע שהוצנעה בה רוקולה במשטר חיטוי סולרי בתנאי איוורור, פוחתת אוכלוסיית המיקרואורגניזמים בשלב הראשון של התהליך, בדומה למתרחש בשדה. תהליך זה בולט בעיקר באוכלוסיית הפטריות (איור 29); הפעילות האנזימטית הכללית בתנאי מעבדה, מוגברת בקרקע מחוממת שהוצנעה בה רוקולה לעומת קרקע לא מחוממת (איור 28) בדומה לתוצאות בשדה, במועד הראשון (איור 6). כעבור שבועיים מתחילת הניסוי חלה ירידה בפעילות המיקרוביאלית בתנאי חימום, שמתבטאת בצמצום הפרשים בפעילות בין קרקע שהוצנעה בה רוקולה לבין קרקע ללא תוסף (איור 28). בהמשך מתגברת הפעילות המיקרוביאלית, שמתבטאת במס' חיידקים (איור 30) ובפעילות האנזימטית בטמפ' של 45 מ"צ. לעומת זאת, במיכלים האטומים בתנאים אנאירוביים, הפעילות

המיקרוביאלית בקרקע שהוצנעה בה רוקולה דועכת לאורך כל הניסוי ואוכלוסיות כלל החיידקים וכלל הפטריות פוחתות לערכים דומים לאלו שהתקבלו בקרקעות מאווררות ללא תוסף אורגני. דעיכה דומה בפעילות מיקרוביאלית בעקבות הצנעת תוסף אורגני בקרקע שחוממה התקבלה גם בעבודתם של Gamliel & Stapleton (1993a) שעבדו במערכת אטומה. ללא חימום, הם מצאו הגברה בפעילות בשבוע הראשון, בדומה למימצאנו בתנאים אנאירוביים.

3. תרכובות פיטוטוקסיות בקרקע עם תוסף אורגני לאחר חיטוי

חיטוי קרקע עלולים לגרום לפחיתה בצימוח וביבול, כתוצאה מחיטוי הקרקע עצמו. תופעה זו מוגדרת Decreased Growth Response (DGR) (Chen *et al.*, 1991). להצנעת רוקולה בקרקע לפני הטיפול במערכת המעבדתית בתנאים אנאירוביים, היתה השפעה פיטוטוקסית על גידול צמחי עגבנייה. צמחים שנשתלו באותה קרקע לאחר תום הטיפול במערכת, מתו תוך מספר ימים משתילה והוחלפו. הצמחים המחליפים שרדו, אך התפתחותם נפגעה. צמחים שנשתלו בקרקע שהוצנעה בה רוקולה צברו פחות משקל, לעומת צמחים שנשתלו בקרקע ללא רוקולה (איור 31). בקרקע שהוצנעה בה רוקולה וטופלה בחימום תוך איזור איטי לפני הגידול, צבירת הביומסה היתה נמוכה יותר (פיטוטוקסיות רבה יותר) לעומת טיפול זהה אך ללא חימום. גידול בקרקע לאחר תום הטיפול שכלל הצנעת רוקולה וחימום בתנאים אנאירוביים או בתנאי איזור מוגבר, גרם פחות פיטוטוקסיות לעומת קרקעות שהוצנעה בהן רוקולה, ללא חימום. תוצאות אלו עומדות בניגוד להעדר הפיטוטוקסיות שנמצאה בניסויי השדה וייתכן שהגורם להבדל הוא השקייה- בשדה בוצעה השקייה שבועית שסביר שדחקה אלמנטים פיטוטוקסיים מסיסים לעומק. בכלים המבוקרים במעבדה, לא הועתקו התוצרים המסיסים מהמיכלים. הסבר אפשרי נוסף הוא ריכוז גדול יותר של חומר אורגני המכיל תרכובות פעילות בקרקע במיכל (הצנעת רוקולה בדרגת נקיון גבוהה בנפח ידוע של קרקע הומוגנית, לעומת הצנעת שיירי גידול בחלקות הטרוגניות יותר) והומוגניות גדולה יותר של פיזור בקרקע, לעומת הפיזור בשדה.

אחת הסיבות לתופעת הפיטוטוקסיות או ה-DGR, היא שינויים בהרכב הכימי של הקרקע ובזמינות של תרכובות ויונים שונים, במהלך חיטוי סולרי (Chen *et al.*, 1991). גורמים אפשריים אחרים לתופעה הם חומרים פיטוטוקסיים, ביניהם אמוניה ונגזרות של איזוטיאזיאנטים, שמקורם שיירי צמחים שמוצנעים בקרקע או המיקרופלורה בקרקע (McCalla & Haskins, 1964; Scott & Knudsen, 1999). השהיית הזריעה, איזור הקרקע והשקייה עשויים למנוע את התופעה בגידולים רגישים. חיטוי סולרי של קרקע שהוצנעה בה קומפוסט מנע פיטוטוקסיות ואף עודד צימוח חסה, לעומת קרקע שהוצנעה בה קומפוסט לאחר החיטוי הסולרי (Gamliel & Stapleton, 1993b); מנגד, גרם חיטוי סולרי של קרקע שהוצנעה בה שיירי כרוב לפיטוטוקסיות בגבנייה אך לא בגידול כרוב (Ramirez-Villapudua & Munnecke, 1988). בתום ניסויי השדה, קרקע מהחלקות השונות נבדקה לנוכחות תרכובות פיטוטוקסיות. לא נראו סימני פיטוטוקסיות או האטת התפתחות של הנוף או השורש, של צמחי עגבנייה, בהשוואה לצמחים שגודלו בחול רחובות לא מטופל. ממצאים אלו, בנוסף לשינויים שנמדדו באווירת הקרקע, יכולים להעיד על איזור ומיהול של תרכובות נדיפות רעילות. כמו כן בתצפיות שערכנו לא נראו סימני פיטוטוקסיות כאשר נזרעו בזיל וכוסברה או כאשר נשתל טרגון, כחמישה ימים לאחר תום החיטוי.

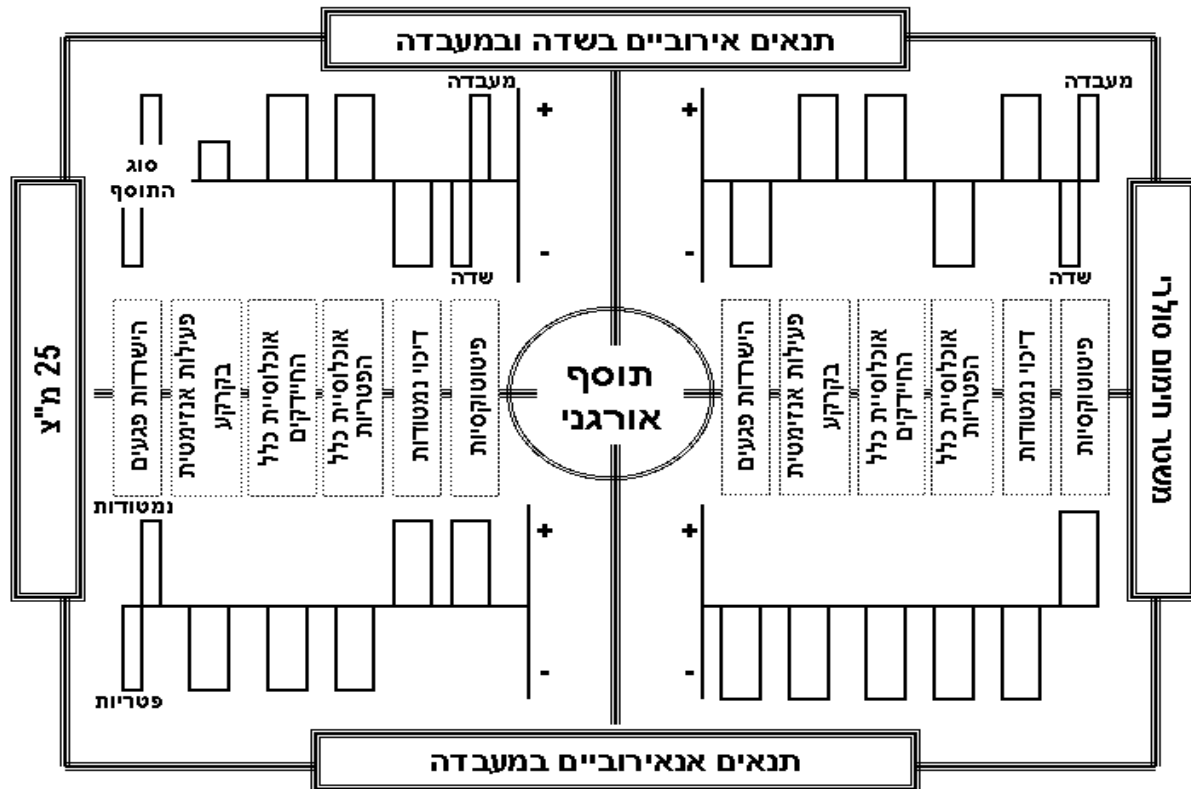
4. סריקת תוספים אורגניים לקרקע במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור

מבוקרים, והשפעתם על חיות פגעי קרקע.

המערכת המעבדתית שפיתחנו מאפשרת סריקה מהירה של תוספים אורגניים שונים והתאמתם למטרת קטילת פגעים בהצנעה בקרקע. בחנו את השפעתם של מספר צמחי תבלין יבשים שונים שהוצנעו בקרקע, בתנאי חימום ואיורור כפי שמתרחשים במהלך חיטוי סולרי בשדה בעומק 20 ס"מ, על קטילת גופי קיימא של *V. dahliae*, *M. phaseolina*, *R. solani*, FORL. הבחינה בוצעה במשך שבועיים על מנת לאתר תוספים בעלי השפעה חזקה במיוחד, שעשויים לשמש כמרכיבי הדברה ביישום בשדה. התוספים שנמצאו יעילים ביותר היו הרוקולה והטרגון, הן מבחינת טווח הפתוגנים המודברים והן מבחינת הדירות התוצאות, במעבדה ובשדה (איור 33). הצנעת שיירי דפנה, רוזמרין, אורגנו, קורנית, או מרווה גרמו קטילה יעילה של חלק מהפתוגנים שנבדקו ויש לבחון מהם התנאים המיטביים ליישום של כל אחד מהם (טמפ', משך החיטוי הסולרי, הצנעת חומר טרי או יבש וכיו"ב). אימות לבחינת יעילות התוספים השונים במערכת המעבדתית, התקבל בתצפיות שביצענו בחלקות מסחריות. בחלקות המשמשות לגידול תבלינים במושב מחולה, הוצנעו שיירי הגידולים קורנית, טרגון, מרווה, או רוזמרין בקרקע ולאחר מכן בוצע חיטוי סולרי למשך חודש עד חודשיים. התקבלה קטילה מלאה של כלמיידוספורות של FORL שהוטמנו עד עומק 40 ס"מ, כפתוגן מבחן ליעילות החיטוי. כן התקבלה במהלך הגידולים הדברה יעילה של קשיונה גדולה, מחלות נוף שלא שורדות בקרקע ושל נמטודות יוצרות עפצים. במהלך עונת הגידול פחתה הנגיעות בעשבייה, פרט לרגלת הגינה. תוצאות אלה מאמתות את אמינותה של המערכת המעבדתית המבוקרת כאמצעי מהיר לסריקת תוספים אורגניים בעלי פוטנציאל לשמש בהדברת פגעי קרקע, בשילוב חיטוי סולרי בשדה.

5. סיכום וכיווני מחקר עתידיים

מימצאנו העיקריים בניסויים בשדה ובמעבדה מסוכמים באיור 34.



איור 34: השתנות מדדים ביולוגיים שונים בשדה במהלך חיטוי סולרי של קרקע שהוצנע בה תוסף אורגני ובמהלך ניסויים במערכת מעבדתית לחימום קרקע ותוסף אורגני בתנאי איזור מבוקרים. המדדים: הישרדות פגעים, פעילות אנזימטית בקרקע, אוכלוסיית כלל החיידקים וכלל הפטריות, דיכוי נמטודות בקרקע שטופלה במערכת המעבדתית ופיטוטוקסיות בקרקע בתום הטיפול. משטרי החימום: בשדה- חיטוי סולרי, או רשת צל 90% מעל קרקע מחופה. במעבדה- חימום במשטר חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, או טמפ' קבועה של 25 מ"צ. תנאי האיזור במעבדה- חיקוי תנאים אירוביים כפי שנמדדו בשדה, או אנאירוביים- במיכלים אטומים. עמודות מייצגות הפרשים בין ערכים שנמדדו בסיום הניסויים לבין תחילתם, ואינן מבטאות את מגמות השינוי במהלך הטיפול. העמודות, בתנאים אירוביים, מתייחסות לתוצאות במעבדה ובשדה, אם לא צויין אחרת. תנאים אנאירוביים נבחנו במעבדה בלבד.

תוצאות העבודה מעלות שאלות וכיווני מחקר חדשים ונוספים:

1. מהו מרכיב ההחלשה (Weakning) בפתוגנים בהדברה המשלבת הצנעת שיירי תבלינים בקרקע וחיטוי סולרי וכיצד הוא פוגע בכושר פתוגני?
2. מהו ריכוז התוסף האורגני שהצנעתו בקרקע תגרום מחד קטילת פגעים מירבית ומאיך לא תגרום לפיטוטוקסיות?
3. כיצד ניתן לשפר את יעילותם של תוספים שונים (הצנעת חומר אורגני טרי או יבש, תנאי הייבוש, זרוז הפירוק)?
4. מהם גורמי ההדברה והמנגנונים המעורבים בקטילת פגעים שמצאנו בעומקים בהם התחממות הקרקע מתונה? האם תרכובות נדיפות אכן קשורות בתהליך ההדברה בעומקים אלו ואם כן, כיצד? (תנועה בפאזה הגזית בקרקע או בפאזה המסיסה; פעילות הדברה ישירה; עידוד פעילות מיקרוביאלית אנטגוניסטית וכיו"ב).

5. יעילות השילוב של הצנעת תוספים אורגניים בקרקע וחיטוי סולרי בקרקעות שונות: מהם גורמי ההדברה והמנגנונים המעורבים בקטילת פגעים בתנאי רטיבות ו-pH שונים.
6. בידוד התרכובות הנדיפות הרעילות שנוצרות בקרקע בעקבות הצנעת שיירי תבלינים וחיטוי סולרי והפרדתן מכלל התרכובות שנוצרו. בירור הפעילות של תרכובות נדיפות ספציפיות עשוי להוות מקור לתכשירים מסחריים.
7. מהו מירקם האוכלוסיות המיקרוביאליות שמתבססות בקרקע שהוצנע בה תוסף אורגני במהלך חיטוי סולרי ואחריו? כיצד ניתן לשפר את התבססות האוכלוסיות האנטגוניסטיות לפגעים במערכת ההדברה הייחודית שנוצרת?
8. בחינת השילוב של הצנעת תוספים אורגניים בקרקע, חיטוי סולרי ואמצעי הדברה נוספים, כגון מדברים ביולוגיים (טריכודרמה, "ביוסייף").

סיכום

בעבודה זו בחנו את השפעת השילוב של הצנעת שיירי צמחי תבלין בקרקע וחיטוי סולרי על קטילת פגעי קרקע ועל השתנות אוכלוסיות של מיקרואורגניזמים בקרקע. עקבנו אחר שינויים כימיים, פיזיקליים וביולוגיים המתרחשים בשדה במהלך החיטוי. להלן הממצאים העיקריים:

1. פיתחנו מערכת מעבדתית לחימום קרקע ותוספים אורגניים בתנאי איורור מבוקרים. מערכת זו מאפשרת לחקות את התנאים ששוררים בשדה, בקרקע שהוצנעו בה תוספים אורגניים במהלך חיטוי סולרי ולבחון את גורמי הקטילה: חום, תרכובות נדיפות קטלניות ואוכלוסיות מיקרוביאליות אנטגוניסטיות לפגעים, בשילובים שונים. כמו כן המערכת מאפשרת לסרוק בצורה יעילה ומהירה תוספים אורגניים שונים ולבחון את השפעתם על חיות פגעי קרקע שונים, בתנאים מבוקרים. במערכת המעבדתית, הצלחנו לחקות את תנאי החימום, ריכוז החמצן, הפעילות האנזימטית והשינויים באוכלוסיית כלל המיקרואורגניזמים כפי שמצאנו בשדה בעומק 20 ס"מ, במהלך חיטוי סולרי של קרקע שהוצנעו בה תוספים אורגניים.
2. קטילת פגעים עמידים לחום שופרה בשדה, באמצעות חיטוי סולרי של קרקע שהוצנעו בה שיירי קורנית או רוקולה. כלמידוספורות של *Fusarium oxysporum f. sp. radices-lycopersici* (FORL), נקטלו ביעילות עד עומק 40 ס"מ; הצנעת שיירי קורנית גרמה קטילה יעילה של נמטודות יוצרות עפצים ושל *Verticillium dahliae* עד עומק 40 ס"מ; הצנעת שיירי רוקולה גרמה קטילת *Macrophomina phaseolina* בעומק 20 ס"מ. חיטוי סולרי לבדו לא נמצא יעיל במקרים אלה, אם כי בחודש אוגוסט חיטוי סולרי קטל ביעילות *V. dahliae* עד עומק 40 ס"מ, גם ללא הצנעת תוסף אורגני.
3. הצנעת תוסף אורגני בקרקע רטובה בשדה וחיפוייה, גורמת לפחיתה חדה בריכוז החמצן בפאזה הגזית בקרקע בימים הראשונים ולהגברת הפעילות האנזימטית בקרקע, בהתאם לסוג התוסף. חיטוי סולרי מגביר מגמות אלה, ככל שגורם לחימום קרקע רב יותר. הצנעת תוסף אורגני בקרקע לפני חיטוי סולרי, מגבירה את התחממות הקרקע במהלך החיטוי.
4. הצנעת שיירי קורנית או רוקולה בקרקע בשדה, גרמה להגברת אוכלוסיות כלל החיידקים והפטירות; כאשר שולבה עם חיטוי סולרי, פחתה אוכלוסיית כלל הפטריות ב-85% והוגברה אוכלוסיית החיידקים בשיעור של עד סדר גודל.
5. משטרי איורור שונים במערכת המעבדתית, משפיעים על המדדים שצוינו לעיל ועל קטילת הפגעים; תנאים אנאירוביים הושגו ע"י אטימת מיכלי הניסוי, בדומה למערכות מעבדתיות אחרות וגרמו ליצירת תרכובות נדיפות בעלות טווח פולריות רחב ובריכוז גבוה, לעומת מיכלים שנשמרו בהם תנאים אירוביים. עם זאת, זוהתה תרכובת בעלת פעילות ביוצידית, L-Sulforaphane, בכל משטרי האיורור. הפעילות האנזימטית וכן אוכלוסיית כלל המיקרואורגניזמים פחתה משמעותית בתנאים אנאירוביים, לעומת תנאים אירוביים.
6. הצנעת שיירי רוקולה בקרקע גרמה לקטילה יעילה של פגעים שונים, במיקומים שונים במערכת המעבדתית, בהם גורמי ההדברה שונים. התקבלה קטילה מלאה של FORL בתוך הקרקע ומעליה בטיפולים המחוממים בלבד ופחיתה באוכלוסייה בחשיפה לאווירת הקרקע בכל

- הטיפולים. בדומה לכך, נקטלה גם *R. solani*, שקטילה יעילה שלה התקבלה גם ללא חימום, בתנאים אנאירוביים.
7. בניגוד לתוצאות בשדה, בהן לא נמצאה פיטוטוקסיות בצמחי עגבנייה שנשתלו בתום הניסויים בקרקעות מהטיפולים השונים, הצנעת שיירי רוקולה בקרקע וטיפול במערכת המבוקרת גרמה לפיטוטוקסיות, מיד בתום הטיפולים השונים.
8. נמטודות יוצרות עפצים נקטלו במעבדה בתוך הקרקע בתנאי חימום במשטר סולרי. ללא חימום, התקבלה קטילה מלאה רק כאשר הוצנעו בקרקע שיירי רוקולה, ושררו תנאים אירוביים. התקבל דיכוי (Suppressiveness) של נמטודות שעורבבו עם הקרקע לאחר טיפול, בטיפולים אירוביים שכללו חימום הקרקע והצנעת רוקולה, או הצנעת רוקולה בקרקע ללא חימום בתנאים אנאירוביים.
9. בסריקה של יעילות שיירי תבלינים שונים במערכת המעבדתית למשך שבועיים, נמצאו תבלינים בעלי פוטנציאל ליישום בשילוב חיטוי סולרי בשדה. בנוסף לרוקולה, טרגון קטל ביעילות את כל הפגעים שנבחנו; מרווה, רוזמרין, מנטה, קורנית ודפנה גרמו קטילה יעילה של חלק מהפגעים, או קטילה חלקית בלבד.
10. תוצאות הניסויים השונים אומתו גם בתצפיות שערכנו בחלקות מסחריות: הצנעת טרגון, רוזמרין, מרווה או קורנית בקרקע או במצע גידול ולאחר מכן חיטוי סולרי למשך 30-60 יום, נמצאו יעילים כנגד נמטודות יוצרות עפצים, קישיונה גדולה ועשבים שונים, פרט לרגלת הגינה. לא נמצאה פיטוטוקסיות כאשר נזרעו תבלינים שונים בקרקע חמישה ימים לאחר תום החיטוי.

רשימת ספרות

- אבנימלך, י. וא. כהן, 1988. יעילות הזבל האורגני מושפעת מאיורור הקרקע ומהיחס פחמן/חנקן בזבל. השדה ס"ח: 1175-1178, 1191.
- אלעד, י., 1998. הדברה ביולוגית. מתוך: מחלות צמחים בישראל (רותם, י., י. פלטי וי. בן יפת, עורכים). עמודים 157-166. הוצאת המחלקה לפרסומים מדעיים, מרכז וולקני, בית דגן.
- גרינברגר, א., 1984. מנגנון הפעולה של החיטוי הסולרי נגד מחלות שורש. עבודת דוקטור. מוגשת לפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה, רחובות, האוניברסיטה העברית בירושלים. 106 עמודים.
- הדר, י. ור. כהן, 1996. חיטוי-שמש להדברת פגעים שוכני-קרקע בלא כימיקלים. מחקר חקלאי בישראל ח: 101-126.
- פלטי, י., ח. שוהם וצ. בן אריה, 1998. הדברה באמצעים אגרוטכניים. מתוך: מחלות צמחים בישראל (רותם, י., י. פלטי וי. בן יפת, עורכים). עמודים 147-156. הוצאת המחלקה לפרסומים מדעיים, מרכז וולקני, בית דגן.
- קטן, י., 1989. קרקעות המדכאות מחלות שורש (Suppressive soils). מחקר חקלאי בישראל ג': 153-162.
- קטן, י., 1998. חיטוי קרקע. מתוך: מחלות צמחים בישראל (רותם, י., י. פלטי וי. בן יפת, עורכים). עמודים 177-183. הוצאת המחלקה לפרסומים מדעיים, מרכז וולקני, בית דגן.
- קטן, י., א. גרינשטיין וא. גמליאל, 1996. חיטוי-שמש להדברת פגעים שוכני-קרקע בלא כימיקלים. מחקר חקלאי בישראל ח': 83-100.
- רבינוביץ, ח., 1990. רגישות לחום של גופי קיימא של פטריות בתנאי יובש ולחות. עבודת גמר. מוגשת לפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה, רחובות, האוניברסיטה העברית בירושלים. 70 עמודים.
- Arora, D.K, A.K. Pandey and A.K. Srivastva, 1996. Effects of heat stress on loss of C, germination and pathogenicity from chlamydospores of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceri*. Soil. Biol. Biochem. 28: 399-407.
- Arras, G. and M. Usai, 2001. Fungitoxic activity of 12 essential oils against four postharvest citrus pathogens: chemical analysis of *Thymus capitatus* oil and its effect in subatmospheric pressure conditions. J. Food Prot. 64: 1025-1029.
- Ausher, R., J. Katan and S. Ovadia, 1975. An improved selective medium for the isolation of *Verticillium dahliae*. Phytoparasitica 3: 133-137.
- Baker, K.F and R.J. Cook, 1974. Role of the physical environment in biological control. In: Biological Control of Plant Pathogens (Freeman, W.H. and Company, Eds.). pp. 257-295. San Francisco.
- Barker, A.V. and P.C. Bhowmik, 2001. Weed control with crop residues in vegetable cropping systems. J. Crop Prod. 4: 163-183.
- Bega, R.V. and R.S. Smith, 1962. Time-temperature relationships in thermal inactivation of sclerotia of *Macrophomina phaseolina*. Phytopathology 52: 632-635.
- Ben-Yephet, Y., J.M. Melero-Vera and J.E. DeVay, 1988. Interaction of soil solarization and metham-sodium in the destruction of *Verticillium dahliae* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*. Crop Prot. 7: 327-331.

Beute, M.K. and R. Rodriguez-Kabana, 1979. Effect of volatile compounds from remoistened plant tissues on growth and germination of sclerotia of *Sclerotium rolfsii*. *Phytopathology* 69: 802-805.

Birch, H.F., 1959. Further observations on humus decomposition and nitrification. *Plant Soil*. 11: 262-286.

Blok, W.J., J.G. Lamers, A.J. Termorshuizen and G.J. Bollen, 2000. Control of soilborne plant pathogens by incorporating fresh organic amendments followed by tarping. *Phytopathology* 90: 253-259.

Brown, P.D. and M.J. Morra, 1995. Glucosinolate-containing plant tissues as bioherbicides. *J. Agric. Food Chem.* 43: 3070-3074.

Brown, P.D. and M.J. Morra, 1997. Control of soilborne plant pests using glucosinolate containing plants. *Adv. Agron.* 61: 167-231.

Bulluck, L.R. and J.B. Ristaino, 2002. Effect of synthetic and organic soil fertility amendments on southern blight, soil microbial communities and yield of processing tomatoes. *Phytopathology* 92: 181-189.

Cerny, M.S., E. Taube and R. Battaglia, 1996. Identification of bis(4-isothiocyanatobutyl) disulfide and its precursor from rocket salad (*Eruca sativa*). *J. Agric. Food Chem.* 44: 3835-3839.

Chang, T.T. and R.J. Chang, 1999. Generation of volatile ammonia from urea fungicidal to *Phellinus noxius* in infested wood in soil under controlled conditions. *Plant Pathol.* 48: 337-344.

Chen, W., H.A.J. Hoitink, A.F. Schmitthenner and O.L. Tuovinen, 1988. The role of microbial activity in suppression of damping-off caused by *Pythium ultimum*. *Phytopathology* 78: 314-322.

Chen, Y., A. Gamliel, J.J. Stapleton and T. Aviad, 1991. Chemical, physical, and microbial changes related to plant growth in disinfested soils. In: *Soil Solarization* (Katan, J. and J. E. DeVay, Eds.). pp. 103-130. CRC Press, Boca Raton.

Chen, Y. and J. Katan, 1980. Effect of solar heating of soils by transparent polyethylene mulching on their chemical properties. *Soil Sci.* 130: 271-277.

Conn, K.L. and G. Lazarovits, 1999. Impact of animal manures on verticillium wilt, potato scab and soil microbial populations. *Can. J. Plant Pathol.* 21: 81-92.

Daferera, D.J., B.N. Ziogas and M.G. Polissiou, 2003. The effect of plant essential oils on the growth of *Botrytis cinerea*, *Fusarium* sp. and *Clavibacter michiganensis* subsp. *Michiganensis*. *Crop Prot.* 22: 39-44.

Davis, J.R., 1991. Soil solarization: Pathogen and disease control and increases in crop yield and quality: short- and long-term effects and integrated control. In: *Soil Solarization* (Katan, J. and J. E. DeVay, Eds.). pp. 39-50. CRC Press, Boca Raton.

Davis, J.R. and L.H. Sorensen, 1986. Influence of soil solarization at moderate temperatures on potato genotypes with differing resistance to *Verticillium dahliae*. *Phytopathology* 76: 1021-1026.

Davis, J.R., O.C. Huisman, D.T. Westermann, S.L. Hafez, D.O. Everson, L.H. Sorensen and A.T. Schneider, 1996. Effects of green manures on Verticillium wilt of potato. *Phytopathology* 86: 444-452.

Dhingra, O.D. and J.B. Sinclair, 1995. Basic Plant Pathology Methods- second edition. CRC Press, Boca Raton. P.434.

Dissanayake, N. and J.W. Hoy, 1999. Organic material soil amendment effects on root rot and sugarcane growth and characterization of the materials. *Plant Dis.* 83: 1039-1046.

Downer, J., B. Faber and J. Menge, 2002. Factors affecting root rot control in mulched Avocado orchards. *HortTechnology* 12: 601-605.

Eshel, D., A. Gamliel, A. Grinstein, P. Di Primo and J. Katan, 2000. Combined soil treatments and sequence of application in improving the control of soilborne pathogens. *Phytopathology* 90: 751-757.

Fahey, J.W., X. Haristoy, P.M. Dolan, T.W. Kensler, I. Scholtus, K.K. Stephenson, P. Talalay and A. Lozniewski, 2002. Sulforaphane inhibits extracellular, intracellular and antibiotic-resistant strains of *Helicobacter pylori* and prevents benzo[a]pyrene-induced stomach tumors. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99: 7610-7615.

Fahey, J.W., A.T. Zalcmann and P. Talalay, 2001. The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry* 56: 5-51.

Gamliel, A., I. Peretz Alon, E. Becker and O. Heiman, 1997. Sprayable plastic polymers for soil solarization. *Phytoparasitica* 25: 251 (Abstract).

Gamliel, A. and J. Katan, 1991. Involvement of fluorescent pseudomonas and other microorganisms in increased growth response of plants in solarized soils. *Phytopathology* 81: 494-502.

Gamliel, A. and J.J. Stapleton, 1993a. Characterization of antifungal volatile compounds evolved from solarized soil amended with cabbage residues. *Phytopathology* 83: 899-905.

Gamliel, A. and J.J. Stapleton, 1993b. Effect of chicken compost or ammonium phosphate and solarization on pathogen control, rhizosphere microorganisms and lettuce growth. *Plant Dis.* 77: 886-891.

Gamliel, A., M. Austerweil and G. Kritzman, 2000. Non-chemical approach to soilborne pest management – organic amendments. *Crop Prot.* 19: 847-853.

Garrett, S.D., 1965. Toward biological control of soil-borne plant pathogens. In: *Ecology of Soil-borne Plant Pathogens.* (Baker, K.F. and W.C. Snyder, Eds.). pp. 4-17. Univ. Calif. Press, Berkeley and Los Angeles.

Gilbert, R.G. and G.E. Griebel, 1969. The influence of volatile substances from alfalfa on *Verticillium dahliae* in soil. *Phytopathology* 59: 1400-1403.

Gilpatrick, J.D., 1969. Role of ammonia in the control of avocado root rot with alfalfa meal soil amendment. *Phytopathology*. 59: 973-978.

Goud, J.K.C., A.J. Termorshuizen, W.J. Blok and A.H.C. Van-Bruggen, 2004. Long term effect of biological soil disinfestation on *Verticillium* wilt. *Plant dis.* 88:688-694.

Greenberger, A., A. Yogeve and J. Katan, 1987. Induced suppressiveness in solarized soils. *Phytopathology* 77: 1663-1667.

Griebel, G.E. and L.D. Owens, 1972. Nature of the transient activation of soil microorganisms by ethanol or acetaldehyde. *Soil Biol. Biochem.* 4: 1-8.

Hau, F.C., M.K. Beute and T. Smith, 1982. Effect of soil pH and volatile compounds from remoistened peanut leaves on germination of sclerotia of *Sclerotinia minor*. *Plant Dis.* 66: 223-224.

Henis, Y. and I. Chet, 1967. Mode of action of ammonia on *Sclerotium rolfsii*. *Phytopathology* 57: 425-427.

Henis, Y. and I. Chet. 1968. The effect of nitrogenous amendments on the germinability of sclerotia of *Sclerotium rolfsii* and on their accompanying microflora. *Phytopathology* 58: 209-211.

Hoitink, A. J., 1980. Composted bark, a lightweight growth medium with fungicidal properties. *Plant Dis.* 64: 142-147.

Hoitink, A. J. and M.E. Grebus, 1994. Status of biological control of plant diseases with composts. *Compost Sci. Util.* 2: 6-12.

Hoitink, A. J. and P.C. Fahy, 1986. Basis for the control of soilborne plant pathogens with composts. *Annu. Rev. Phytopathol.* 24: 93-114.

Huang, H.C., C. Chang and J.W. Huang, 2002. Organic soil amendments for control of apothecial production of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Plant Pathol. Bulletin* 11: 207-214.

Huie, C.W., 2002. A review of modern sample-preparation techniques for the extraction and analysis of medicinal plants. *Anal. Bioanal. Chem.* 373: 23-30.

Ioannou, N., R.W. Schneider and R.G. Goran, 1977a. Effect of oxygen, carbon dioxide, and ethylene on growth, sporulation and production of microsclerotia by *Verticillium dahliae*. *Phytopathology* 67: 645-650.

Ioannou, N., R.W. Schneider and R.G. Goran, 1977b. Effect of Flooding on the soil gas composition and the production of microsclerotia by *Verticillium dahliae* in the field. *Phytopathology* 67: 651-656.

Jirovets, L., D. Smith and G. Buchbauer, 2002. Aroma compound analysis of *Eruca sativa* (*Brassicaceae*) SPME headspace leaf samples using GC, GC-MS, and Olfactometry. *J. Agric. Food Chem.* 50: 4643-4646.

Johnson, L.F., 1972. Effects of organic mulches upon the incidence of root knot in potted tomato plants. *Phytopathology* 62: 767.

Katan, J., 1981. Solar heating (solarization) of soil for control of soilborne pests. *Annu. Rev. Phytopathol.* 19: 211-236.

Katan, J., 1987. Soil solarization. In: *Innovative Approaches to Plant Disease Control*. (Chet I., Ed.). pp. 77-105. John Wiley & Sons, New York.

Katan, J. and J. E. DeVay, 1991. Soil solarization: Historical perspectives, principles, and uses. In: *Soil Solarization* (Katan, J. and J. E. DeVay, Eds.). pp. 23-37. CRC Press, Boca Raton.

Katan, J., A. Greenberger, H. Alon and A. Grinstein, 1976. Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soilborne pathogens. *Phytopathology* 66: 683-688.

Katan, J., G. Fishler and A. Grinstein, 1983. Short- and long-term effects of soil solarization and crop sequence on Fusarium wilt and yield of cotton in Israel. *Phytopathology* 73: 1215-1219.

Keinath, A.P., H.F. Harrison, P.C. Marino, D.M. Jackson, and T.C. Pullaro, 2003. Increase in population of *Rhizoctonia solani* and wirestem of collard with velvet bean cover crop mulch. *Plant Dis.* 87: 719-725.

King, E.O., M.K. Ward and D.E. Raney, 1954. Two simple media for the demonstration of pyoacin and fluorescin. *J. Lab. Clin. Med.* 44: 301-307.

Kirchmann, H. and E. Witter, 1989. Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition. *Plant Soil* 115: 35-41.

Ko, W. H., F. K. Hora and E. Herlicska, 1974. Isolation and identification of a volatile fungistatic substance from alkaline soil. *Phytopathology* 64: 1398-1400.

Konam, J.K. and D.I. Guest, 2002. Leaf litter mulch reduces the survival of *Phytophthora palmivora* under cocoa trees in Papua New Guinea. *Australasian Plant Pathol.* 31: 381-383.

Kuter, G.A., E.B. Nelson, H.A.J. Hoitink and I.V. Madden, 1983. Fungal populations in container media amended with composted hardwood bark suppressive and conducive to *Rhizoctonia damping off*. *Phytopathology* 73: 1450-1456.

Kuter, G.A. and H.A.J. Hoitink, 1985. Use of combination of microbial antagonists to suppress *Rhizoctonia* and *Pythium* damping off in compost amended container media. *Phytopathology* 75: 1344 (abstract).

Lazarovits, G., 2001. Management of soil-borne plant pathogens with organic soil amendments: a disease control strategy salvaged from the past. *Can. J. Plant. Pathol.* 23: 1-7.

Lazarovits, G., K.L. Conn and J. Potter, 1999. Reduction of potato scab, *Verticillium* wilt, and nematodes by soymeal, and meat and bone meal in two Ontario potato fields. *Can. J. Plant Pathol.* 21: 345-353.

Lewis, J.A. and G.C. Papavizas, 1970. Evolution of sulfur containing volatiles from decomposition of crucifers in soil. *Soil Biol. Biochem.* 2: 239-246.

Lewis, J.A. and G.C. Papavizas, 1971. Effect of sulfur containing volatile compounds and vapors from cabbage decomposition on *Aphanomyces euteiches*. *Phytopathology* 61: 208-214.

Lewis, J.A. and G.C. Papavizas, 1974. Effect of volatiles from decomposing plant tissues on pigmentation, growth, and survival of *Rhizoctonia solani*. *Soil Sci.* 118: 156-163.

Lewis, J.A. and G.C. Papavizas, 1977. Effect of plant residues on chlamydospores germination of *Fusarium solani* f. sp. *phaseoly* and on *Fusarium* root rot of beans. *Phytopathology* 67: 925-929.

Lifshitz, R., M. Tabachnik, J. Katan and I. Chet, 1983. The effect of sublethal heating on sclerotia of *Sclerotium rolfsii*. *Can. J. Microbiol.* 29: 1607-1610.

Linderman, R.G. and R.G. Gilbert, 1975. Influence of volatiles of plant origin on soil-borne plant pathogens. In: *Biology and Control of Soil-borne Plant Pathogens* (Bruehl, G.W., Ed.). pp. 90-99. The American Phytopathological society. St. Paul, Minnesota.

Lodha, S., S.K. Sharma and R.K. Aggarwal, 1997. Solarization and natural heating of irrigated soil amended with cruciferous residues for improved control of *Macrophomina phaseolina*. *Plant Pathol.* 46: 186-190.

Lumsden, R.D., J.A. Lewis and P.D. Millner, 1983. Effect of composted sewage sludge on several soilborne pathogens and diseases. *Phytopathology* 73: 1543-1548.

Lynch, J.M., 1978. Production and phytotoxicity of acetic acid in anaerobic soils containing plant residues. *Soil Biol. Biochem.* 10: 131-135.

Mahrer, Y., 1991. Physical principles of solar heating of soils by plastic mulching in the field and in glasshouses and simulation models. In: Soil Solarization (Katan, J. and J. E. DeVay, Eds.). pp. 75-86. CRC Press, Boca Raton.

Martin, F.N. and J.G. Hancock, 1986. Association of chemical and biological factors in soils suppressive to *Pythium ultimum*. Phytopathology 76: 1221-1231.

Martos, P.A., 1999. Air sampling with SPME. In: Applications of Solid Phase Microextraction. (Pawliszyn, J., Ed.). pp. 159-168. Royal Society of Chemistry, Hertfordshire.

Martyn, R.D. and T.K. Hartz, 1986. Use of soil solarization to control Fusarium wilt of watermelon. Plant Dis. 70: 762-766.

Matich, A.J., 1999. Analysis of food and plant volatiles. In: Applications of Solid Phase Microextraction. (Pawliszyn, J., Ed.). pp. 349-363. Royal Society of Chemistry, Hertfordshire.

McCalla, T.M. and F.A. Haskins, 1964. Phytotoxic substances from soil microorganisms and crop residues. Bacteriol. Rev. 28: 181-207.

McGovern, R.J., R. McSorley and M.L. Bell, 2002. Reduction of landscape pathogens in florida by soil solarization. Plant Dis. 86: 1388-1395.

Mihail, J.D. and S.M. Alcorn, 1984. Effect of soil solarization on *Macrophomina phaseolina* and *Sclerotium rolfsii*. Plant Dis. 68: 156-159.

Miyazawa, M., T. Maehara and K. Kurose, 2002. Composition of the essential oil from the leaves of *Eruca sativa*. Flavour Fragr. J. 17: 187-190.

Miyasaka, S.C., J.R. Hollyer and L.S. Kodani, 2001. Mulch and compost effects on yield and corm rots of taro. Field Crops Res. 71: 101-112.

Nelson, E.B., G.A. Kuter and H.A.J. Hoitink, 1983. Effects of fungal antagonists and compost age on suppression of Rhizoctonia damping off in container media amended with composted hardwood bark. Phytopathology 73: 1457-1462.

Paster, N., M. Menasherov, U. Ravid and B. Juven. 1995. Antifungal activity of oregano and thyme essential oils applied as fumigants against fungi attacking stored grain. J. Food Prot. 58: 81-85.

Pavlica, D., T.S. Hora, J.J. Bradshaw, R.K. Skogerboe and R. Baker, 1978. Volatiles from soil influencing activities of soil fungi. Phytopathology 68: 758-765.

Papavizas, G.C. and C.B. Davey, 1962. Activity of *Rhizoctonia* in soil as affected by carbon dioxide. Phytopathology 52: 759-766.

Papavizas, G.C., P.B. Adams, R.D. Lumsden, J.A. Lewis, R.L. Dow, W.A. Ayers and J.G. Kantzes, 1975. Ecology and epidemiology of *Rhizoctonia solani* in field soil. Phytopathology 65: 871-877.

Ploeg, A. and J.J. Stapleton, 2001. Glasshouse studies on the effects of time, temperature and amendment of soil with broccoli plant residues on the infestation of melon plants by *Meloidogyne incognita* and *M. javanica*. Nematology 3: 855-861.

Ponnamperuma, F.N., 1972. The chemistry of submerged soils. Adv. Agron. 24: 29-96.

Porter, I.J. and P.R. Merriman, 1983. Effects of solarization of soil on nematode and fungal pathogens at two sites in Victoria. Soil Biol. Biochem. 15: 39-44.

- Pullman, G.S., J.E. DeVay, R.H. Graber and A.R. Weinhold, 1981. Soil solarization: effects on Verticillium wilt of cotton, and soilborne populations of *Verticillium dahliae*, *Pythium spp.*, *Rhizoctonia solani*, and *Thielaviopsis basicola*. *Phytopathology* 71: 954-959.
- Punja, Z.K. and R.G. Grogan, 1982. Effect of Inorganic salts, carbonate-bicarbonate anions, ammonia, and the modifying influence of pH on sclerotial germination of *Sclerotium rolfsii*. *Phytopathology* 72: 635-639.
- Ramirez-Villapudua, J. and D.E. Munnecke, 1987. Control of cabbage yellows (*Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans*) by solar heating of field soils amended with dry cabbage residues. *Plant Dis.* 71: 217-221.
- Ramirez-Villapudua, J. and D.E. Munnecke, 1988. Effect of solar heating and soil amendments of cruciferous residues on *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans* and other organisms. *Phytopathology* 78: 289-295.
- Rubin, B. and A. Benjamin, 1983. Solar heating of the soil: effect on weed control and on soil incorporated herbicides. *Weed Sci.* 31: 819-825.
- Rubin, B. and A. Benjamin. 1984. Solar heating of the soil: involvement of environmental factors in the weed control process. *Weed Sci.* 32: 138-142.
- Runia, W.T. 2000. Steaming methods for soils and substrates. *Acta Hort.* 532: 115-124.
- Schnurer, J. and T. Rosswall, 1982. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Appl. Environ. Microbiol.* 43: 1256-1261.
- Scott, J.S. and G.R. Knudsen, 1999. Soil amendment effects of rape (*Brassica Napus*) residues on pea rhizosphere bacteria. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1435-1441.
- Setua, G.C. and K.R. Samaddar, 1980. Evaluation of role of volatile ammonia in fungistasis of soils. *Phytopathology* 98: 310-319.
- Singh, S.P., V. Pant, A.M. Khan and S.K. Saxena, 1983. Effect of sawdust with different nitrogen sources on the growth of tomato and on rhizosphere population of nematodes and fungi. *Indian Phytopath.* 36: 417-421.
- Sivan, A. and I. Chet, 1993. Integrated control of Fusarium crown and root rot of tomato with *Trichoderma harzianum* in combination with methyl bromide or soil solarization. *Crop Prot.* 12: 380-386.
- Smith, A.M., 1973. Ethylene as a cause of soil fungistasis. *Nature.* 246: 311-313.
- Smolinska, U., 2000. Survival of *Sclerotium cepivorum* sclerotia and *Fusarium oxysporum* chlamydospores in soil amended with cruciferous residues. *Phytopathology* 148:343-349.
- Stapleton, J.J. and C.M. Heald, 1991. Management of phytoparasitic nematodes by soil solarization. In: *Soil Solarization* (Katan, J. and J. E. DeVay, Eds.). pp. 51-60. CRC Press, Boca Raton.
- Stapleton, J.J. and J.E. DeVay, 1983. Response of Phytoparasitic and free living nematodes to soil solarization and 1,3-dichloropropene in California. *Phytopathology* 73: 1429-1436.
- Stevens, C., V.A. Khan, R. Rodriguez Kabana, L.D. Ploper, P.A. Backman, D.J. Collins, J.E. Brown, M.A. Wilson and C.K. Igwegbe, 2003. Integration of soil solarization with chemical, biological, and cultural control for the management of soilborne diseases of vegetables. *Plant Soil* 253: 493-506.
- Stover, R.H., 1979. Flooding of soil for disease control. In: *Soil Disinfestation*. pp. 19-28 (Mulder, D., Ed.). Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Suhr, K.I. and P.V. Nielsen, 2003. Antifungal activity of essential oils evaluated by two different application techniques against rye bread spoilage fungi. *J. Appl. Microbiol.* 94: 665-674.

Tenuta, M. and G. Lazarovits, 1999. Nitrogen transformation products eliminate plant pathogens in soil. In: 1999 Annual International Research Conference On Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions 36: 1-5.

Tenuta, M., S. Hobbs and G. Lazarovits, 1997. Mechanisms associated with disease control by organic soil amendments.

<<http://www.epa.gov/Ozone/mbr/airc/1997/004lazarovits.pdf>>

Tsao, P.H. and J.J. Oster, 1981. Relation of ammonia and nitrus acid to suppression of *Phytophthora* in soils amended with nitrogenous organic substances. *Phytopathology* 71: 53-59.

Van Cleemput, O., A.S. El-Sebaay and L. Baert. 1983. Evolution of gaseous hydrocarbons from soil: effect of moisture content and nitrate level. *Soil Biol. Biochem.* 15: 519-524.

Wilson, C.L., J.M. Solar, A. El Ghaouth and M.E. Wisniewski, 1997. Rapid evaluation of plant extracts and essential oils for antifungal activity against *Botrytis cinerea*. *Plant Dis.* 81: 204-210.

Yaniv, Z., D. Schafferman and Z. Amar, 1998. Tradition, uses and biodiversity of rocket (*Eruca sativa*, Brassicaceae) in Israel. *Economic Botany* 52:394-400.

Yarden, O., A. Gamliel, N. Aharonson and J. Katan, 1989. Solarization enhances dissipation of carbendasim (MBC) in soil. *Soil Biol. Biochem.* 21: 857-861.

Yih, W.K., 1989. The effects of plant litter and inorganic fertilizer on crop-weed intereactions in a temperate rich soil site. *Biol. Agric. Hortic.* 6:59-72.

Zakaria, M.A., J.L. Lockwood and A.B. Filonow. 1980. Reduction in *Fusarium* population density in soil by volatile degradation products of oilseed meal amendments. *Phytopathology* 70: 495-499.

Zentmyer, G.A. and C.R. Thompson, 1967. The effect of saponins from alfalfa on *Phytophthora cinnamomi* in relation to control of root rot of avocado. *Phytopathology* 57: 1278-1279.

Zhang, Y., P. Talalay, C.G. Cho and G.H. Posner, 1992. A major inducer of anticarcinogenic protective enzymes from broccoli: isolation and elucidation of structure. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 89:2399-2403.

נספח 1: ניתוח סטטיסטי (SAS - Tukey lines)

ניסויי שדה יולי 2002

חיטוי סולרי בשילוב תוספים אורגניים, בשדה

השפעת חיטוי סולרי משולב עם תוספים אורגניים על חיות פגעי קרקע

ניתוח של השפעת הצנעת שיירי רוקולה או קורנית בקרקע, בשילוב חיטוי סולרי, על חיות גופי קיימא של פגעים שונים. הניסוי בוצע בחלקות קטנות, בעומקים שונים, למשך חודש. הטיפולים: Solar 0 - קרקע מחופה ומוצלת 90%; Solar 1 - חיטוי סולרי לקרקע; Amend 0 - ללא תוסף אורגני לקרקע; Amend 1 - קרקע שהוצנע בה תוסף אורגני (ראה פרק תוצאות, סעיפים 1.1.5.1-1.1.5.5).

חיות גופי קיימא בכל חזרה של טיפול חושבה כאחוז מהערך בביקורת מושקית ומוצלת, באותו בלוק, על מנת לנטרל את השפעת הבלוקים. כאשר חיות גופי קיימא הוערכה באחוזים, בוצעה טרנספורמציה ל-Arcsin ולאחר מכן חושבה כאחוז מהערך בביקורת מושקית ומוצלת, באותו בלוק, או מערך ממוצע של ביקורת זו בשני בלוקים אחרים, אם באותו הבלוק התקבל בביקורת ערך 0. מוצגים רק ניתוחים שבהם התקבלו הבדלים מובהקים בין טיפולים.

1. קטילת FORL

הערך המנותח – חיות כלמידוספורות בכל טיפול, כאחוז ממוצל, ללא תוסף, באותו עומק. התוצאות מוצגות בסעיף 1.1.5.1, איור 9.

1.1 תוסף רוקולה

1.1.1 יום 14, עומק 20 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	12805	57.1	<.0001	0	69.3	A
					1	4.0	B
Amend	1	2821	12.6	0.0075	0	52.0	A
					1	21.3	B
Solar*Amend	1	2821	12.6	0.0075			

השפעת גומלין:

Day 14, Depth 20 cm.	Solar 0	Solar 1
Amend 0	100 Aa	4 Ab
Amend 1	39 Ba	4 Aa

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

1.1.2 יום 14, עומק 30 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	37297	52.7	<.0001	0	142.3	A
					1	30.8	B
Amend	1	4144	5.9	0.0419	0	68.0	B
					1	105.2	A
Solar*Amend	1	6769	9.6	0.0148			

השפעת גומלין:

Day 14, Depth 30 cm.	Solar 0	Solar 1
Amend 0	100 Ba	36 Ab
Amend 1	185 Aa	26 Ab

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

1.1.3 יום 14, עומק 40 ס"מ: לא התקבלו הבדלים מובהקים.

1.1.4 יום 28: בכל העומקים שנבדקו, לא התקבלו הבדלים מובהקים.

1.2 תוסף קורנית

1.2.1 יום 14, עומק 20 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	24571	46.62	0.0001	0	95.0	A
					1	4.5	B
Amend	1	61	0.12	0.7430	0	52.0	
					1	47.5	
Solar*Amend	1	91	0.17	0.6891			

1.2.2 יום 14, עומק 30 ו-40 ס"מ: לא התקבלו הבדלים מובהקים.

1.2.3 יום 28, עומק 20 ו-30 ס"מ: לא התקבלו הבדלים מובהקים.

1.2.4 יום 28, עומק 40 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	4318	4.07	0.0901	0	74.2	
					1	31.8	
Amend	1	7282	6.87	0.0385	0	84.4	A
					1	30.0	B
Solar*Amend	1	28	0.03	0.8762			

2. קטילת *Verticillium dahliae*

הערך המנותח- חיות גופי הקיימא בכל טיפול, כאחוז מטיפול מוצל, ללא תוסף, באותו עומק. התוצאות מוצגות בסעיף 1.1.5.4, איור 12.

2.1 תוסף רוקולה

2.1.1 יום 14, עומק 20 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	50065	5.42	0.0421	0	131.0	A
					1	0	B
Amend	1	3805	0.41	0.5353	0	97.7	
					1	44.4	
Solar*Amend	1	3805	0.41	0.5353			

2.1.2 יום 14, עומק 30 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	95332	7.61	0.0197	0	165.9	A
					1	0	B
Amend	1	544	0.04	0.8384	0	97.7	
					1	90.9	
Solar*Amend	1	544	0.04	0.8384			

2.1.3 יום 14, עומק 40 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	171380	8.36	0.0161	0	262.2	A
					1	50.0	B
Amend	1	2958	0.14	0.7120	0	166.1	
					1	178.3	
Solar*Amend	1	24643	1.20	0.2987			

2.1.4 יום 28, עומק 20 ו-40 ס"מ: לא התקבלו הבדלים מובהקים.

2.1.5 יום 28, עומק 30 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	97881	6.62	0.0301	0	174.3	A
					1	0	B
Amend	1	64	0	0.9491	0	97.4	
					1	89.7	
Solar*Amend	1	64	0	0.9491			

2.2 תוסף קורנית

2.2.1 יום 14, עומק 20 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	43584	5.95	0.0349	0	136.5	A
					1	15.6	B
Amend	1	395	0.05	0.8209	0	97.7	
					1	67.3	
Solar*Amend	1	5879	0.80	0.3913			

2.2.2 יום 14, עומק 30 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	63825	7.47	0.0211	0	152.9	A
					1	13.4	B
Amend	1	257	0.03	0.8659	0	97.7	
					1	87.0	
Solar*Amend	1	1076	0.13	0.7301			

2.2.3 יום 14, עומק 40 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	324261	8.22	0.0168	0	317.9	A
					1	39.0	B
Amend	1	28851	0.73	0.4125	0	166.1	
					1	241.5	
Solar*Amend	1	97618	2.47	0.1468			

2.2.4 יום 28, עומק 20 ו-40 ס"מ: לא התקבלו הבדלים מובהקים.

2.2.5 יום 28, עומק 30 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	70078	10.37	0.0105	0	162.7	A
					1	13.4	B
Amend	1	59	0.01	0.9276	0	97.4	
					1	89.5	
Solar*Amend	1	1612	0.24	0.6370			

3. קטילת נמטודות יוצרות עפצים

הערך המנותח – נגיעות צמחי הבוחן בעפצים בכל טיפול, כאחוז מטיפול מוצל, ללא תוסף, באותו עומק. התוצאות מוצגות בסעיף 1.1.5.5, איורים מס' 16,17. Solar 0 – קרקע מחופה ומוצלת 90%; Solar 1 – חיטוי סולרי לקרקע; Amend 0 – ללא תוסף אורגני לקרקע; Amend 1 – קרקע שהוצנע בה תוסף אורגני. התוצאות מוצגות בסעיף 1.1.5.5, איור 13.

3.1 תוסף רוקולה

3.1.1 עומק 20 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	15238	25.14	0.0004	0	77.8	A
					1	0	B
Amend	1	3810	6.29	0.0291	0	66.7	A
					1	16.7	B
Solar*Amend	1	3810	6.29	0.0291			

השפעת גומלין:

Day 28, Depth 20 cm.	Solar 0	Solar 1
Amend 0	100 Aa	0 Ab
Amend 1	33 Ba	0 Aa

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

3.1.2 עומק 40 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	14815	11.11	0.0076	0	100.0	A
					1	33.3	B
Amend	1	0	0	1	0	75.0	
					1	66.7	
Solar*Amend	1	0	0	1			

3.2 תוסף קורנית

3.2.1 עומק 20 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	34285	infinity	<0.0001	0	100.0	A
					1	0	B
Amend	1	0	-	-	0	66.7	A
					1	50.0	B
Solar*Amend	1	0	-	-			

השפעת גומלין:

Day 28, Depth 20 cm.	Solar 0	Solar 1
Amend 0	100 Aa	0 Ab
Amend 1	100 Aa	0 Ab

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

3.2.2 עומק 40 ס"מ:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	23148	34.72	0.0002	0	100.0	A
					1	16.7	B
Amend	1	926	1.39	0.2659	0	75.0	
					1	50.0	
Solar*Amend	1	926	1.39	0.2659			

נספח 2: ניתוח סטטיסטי (SAS - Tukey lines)

ניסויים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים

חימום קרקע ותוסף אורגני בתנאי איורור שונים

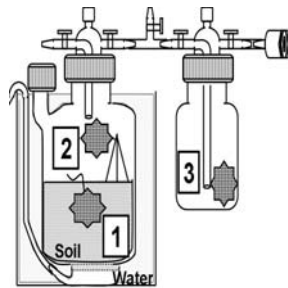
קטילת פגעי קרקע

(ראה פרק תוצאות, סעיפים 3.1.2.1-3.1.2.6)

ניתוח של השפעת חימום קרקע, הצנעת שיירי רוקולה, רמת האיורור ומיקום במערכת על חיות גופי קיימא של פגעים שונים. הניסוי בוצע במערכת מעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים, במשטר חימום של חיטוי סולרי בעומק 20 ס"מ, למשך חודש. הטיפולים: Solar 0- רמות החימום: Solar 0- מיכל הקרקע בטמפ' 25 מ"צ. Solar 1- חימום מיכל הקרקע במשטר חיטוי סולרי.

Amend 0- רמת התוסף האורגני: Amend 0- ללא הצנעת שיירי רוקולה. Amend 1- קרקע שהוצעו בה שיירי רוקולה.

Place- מיקומים במערכת:



1. In Soil - גופי קיימא בתוך מיכל הקרקע, טמונים בקרקע.

2. Above Soil - גופי הקיימא בתוך מיכל הקרקע, תלויים מעל הקרקע.

3. Volatile Exposure - גופי הקיימא מונחים במיכל החשיפה לאווירת הקרקע. מיכל זה נמצא בטמפ' החדר.

Air - רמות האיורור: 1. 0 ml/min - תנאים אנאירוביים; 2. 3 ml/min - תנאי איורור איטי (עד 3 מ"ל/דקה/מיכל); 3. 6-8 ml/min - תנאי איורור מהיר (6-8 מ"ל/דקה/מיכל).

1. קטילת FORL

הערך המנותח- AUVC (Area Under Viability Curve) - השטח שמתחת לעקומת החיות. התוצאות מוצגות בסעיף 3.1.2.1, איור 23.

1.1 ניתוח לפי רמות איורור

1.1.1 איורור 0 ml/min (תנאים אנאירוביים):

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	7533082711	7.3	0.0125	0	64528	A
					1	35597	B
Amend	1	20869654678	20.2	0.0001	0	74139	A
					1	25985	B
Solar*Amend	1	2973884444	2.9	0.1026			
Place	2	5908017549	2.9	0.0769	In Soil		
					Above Soil		
					Volatile Exposure		
Solar*Place	2	3531834841	1.7	0.2022			
Amend*Place	2	4171649120	2.0	0.1546			
Solar*Amend*Place	2	2402950616	1.2	0.3294			

1.1.2 איורור 3 ml/min:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	25128129300	75.55	<.0001	0	88361	A
					1	32340	B
Amend	1	6251710597	18.80	0.0003	0	78707	A
					1	47147	B
Solar*Amend	1	311340432	0.94	0.3438			
Place	2	3113412642	4.68	0.0202	In Soil	50028	B
					Above Soil	74538	A
					Volatile Exposure	61476	AB
Solar*Place	2	2708069293	4.07	0.0313			
Amend*Place	2	784690865	1.18	0.3261			
Solar*Amend*Place	2	514337851	0.77	0.4737			

השפעת גומלין, איורור 3 ml/min:

Solar*Place	Solar 0	Solar 1
In Soil	74361 Ab	20829 Ba
Above Soil	111837 Aa	29780 Ba
Volatile Exposure	78885 Aab	44067 Ba

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין מיקומים שונים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים.

1.1.3 איורור 6-8 ml/min:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	27011531952	51.13	<.0001	0	89024	A
					1	30809	B
Amend	1	6573825203	12.44	0.0019	0	78707	A
					1	46449	B
Solar*Amend	1	551223529	1.04	0.3181			
Place	2	5193945773	4.92	0.0172	In Soil	49044	B
					Above Soil	80178	A
					Volatile Exposure	56162	AB
Solar*Place	2	5149518297	4.87	0.0177			
Amend*Place	2	844540112	0.80	0.4623			
Solar*Amend*Place	2	176824614	0.17	0.8470			

השפעת גומלין, איורור 6-8 ml/min:

Solar*Place	Solar 0	Solar 1
In Soil	72557 Ab	20829 Ba
Above Soil	122962 Aa	28837 Ba
Volatile Exposure	71554 Ab	40770 Aa

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין מיקומים שונים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים.

1.2 ניתוח לפי רמות מיקום

1.2.1 מיקום In Soil:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping					
Solar	1	13613947135	91.24	<.0001	0	62990	A					
					1	21380	B					
Amend	1	3584320454	24.02	<.0001	0	55834	A					
					1	32364	B					
Solar*Amend	1	83106122	0.56	0.4634								
					Air	2	1936471081	6.49	0.0061	0	50028	A
									3 ml/min	49044	A	
					6-8 ml/min	32176	B					
Solar*Air	2	1860052300	6.23	0.0072								
Amend*Air	2	543912556	1.82	0.1852								
Solar*Amend*Air	2	594057278	1.99	0.1605								

השפעות גומלין, מיקום In Soil:

Solar*Air	Solar 0	Solar 1
0	42053 Ab	22298 Aa
3 ml/min	74361 Aa	20829 Ba
6-8 ml/min	72557 Aab	20829 Ba

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות איורור.

Amend*Air	Amend 0	Amend 1
0	23.7 Aa	6.0 Ba
3 ml/min	29.4 Aa	11.5 Ba
6-8 ml/min	29.4 Aa	12.0 Ba

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין רמות התוסף; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות איורור.

1.2.2 מיקום Above Soil:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping				
Solar	1	46816446927	29.21	<.0001	0	108173	A				
					1	30797	B				
Amend	1	19278478867	12.03	0.0022	0	100120	A				
					1	46553	B				
Solar*Amend	1	909566299	0.57	0.4593							
					Air	2	1585884450	0.49	0.6164	0	
									3 ml/min		
					6-8 ml/min						
Solar*Air	2	1687894632	0.53	0.5979							
Amend*Air	2	4136950903	1.29	0.2952							
Solar*Amend*Air	2	3868316444	1.21	0.3183							

1.2.3 מיקום Volatile Exposure :

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	5806160603	26.9	<.0001	0	70749	A
					1	45350	B
Amend	1	10882488534	50.5	<.0001	0	75436	A
					1	40663	B
Solar*Amend	1	849596188	3.9	0.0587			
Air	2	212029706	0.5	0.6178	0		
					3 ml/min		
					6-8 ml/min		
Solar*Air	2	1010615871	2.3	0.1177			
Amend*Air	2	172572672	0.4	0.6747			
Solar*Amend*Air	2	452735471	1.1	0.3657			

2. קטילת *Rhizoctonia solani*

הערך המנותח - AUVC (Area Under Viability Curve) - השטח שמתחת לעקומת החיות. התוצאות מוצגות בסעיף 3.1.2.2, איור 25.

2.1 ניתוח לפי רמות איורור

2.1.1 איורור 0 ml/min (תנאים אנאירוביים):

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	1145	32.99	<.0001	0	25.4	A
					1	14.2	B
Amend	1	3345	96.40	<.0001	0	29.4	A
					1	10.2	B
Solar*Amend	1	793	22.87	<.0001			
Place	2	1902	27.41	<.0001	In Soil	14.8	B
					Above Soil	14.5	B
					Volatile Exposure	30.1	A
Solar*Place	2	363	5.24	0.0130			
Amend*Place	2	38	0.54	0.5876			
Solar*Amend*Place	2	419	6.04	0.0075			

השפעות גומלין, איורור 0 ml/min:

Solar*Amend	Solar 0	Solar 1
Amend 0	39.8 Aa	19.1 Ba
Amend 1	11.1 Ab	9.2 Aa

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

Solar*Place	Solar 0	Solar 1
In Soil	23.5 Aa	6.2 Bb
Above Soil	21.5 Aa	7.5 Ab
Volatile Exposure	31.3 Aa	28.8 Aa

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין מיקומים שונים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים.

Amend*Place	Amend 0	Amend 1
In Soil	23.7 Aa	6.0 Bb
Above Soil	235. Aa	5.5 Bb
Volatile Exposure	41.2 Aa	19.0 Ba

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין רמות התוסף; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין מיקומים שונים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איוורור מבוקרים.

2.1.2 איוורור 3 ml/min:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	1488	40.88	<.0001	0	30.3	A
					1	17.0	B
Amend	1	3103	85.24	<.0001	0	35.2	A
					1	14.1	B
Solar*Amend	1	26	0.72	0.4069			
Place	2	852	11.70	0.0004	In Soil	19.6	B
					Above Soil	20.4	B
					Volatile Exposure	32.9	A
Solar*Place	2	85	11.70	0.3291			
Amend*Place	2	66	0.90	0.4211			
Solar*Amend*Place	2	662	9.09	0.0014			

השפעות גומלין, איוורור 3 ml/min:

Solar*Amend	Solar 0	Solar 1
Amend 0	39.3 Aa	29.9 Aa
Amend 1	21.4 Ab	5.8 Bb

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

Solar*Place	Solar 0	Solar 1
In Soil	28.2 Aa	9.4 Ba
Above Soil	27.3 Aa	12.0 Aa
Volatile Exposure	35.7 Aa	29.6 Aa

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין מיקומים שונים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איוורור מבוקרים.

Amend*Place	Amend 0	Amend 1
In Soil	29.4 Aa	4.5 Ba
Above Soil	33.4 Aa	9.5 Ba
Volatile Exposure	41.5 Aa	22.6 Ba

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין רמות התוסף; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין מיקומים שונים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איוורור מבוקרים.

2.1.3 איורור ml/min 6-8:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	1960	48.25	<.0001	0	31.8	A
					1	16.1	B
Amend	1	2852	70.19	<.0001	0	35.2	A
					1	14.9	B
Solar*Amend	1	103	2.54	0.1249			
Place	2	738	9.08	0.0013	In Soil	19.9	B
					Above Soil	22.4	B
					Volatile Exposure	30.5	A
Solar*Place	2	96	1.19	0.3244			
Amend*Place	2	66	0.81	0.4559			
Solar*Amend*Place	2	651	8.01	0.0024			

השפעות גומלין, איורור ml/min 6-8:

Solar*Amend	Solar 0	Solar 1
Amend 0	39.3 Aa	29.9 Aa
Amend 1	24.3 Ab	5.4 Bb

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

Solar*Place	Solar 0	Solar 1
In Soil	28.7 Aa	9.4 Ba
Above Soil	31.0 Aa	12.0 Ba
Volatile Exposure	35.8 Aa	25.2 Aa

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין מיקומים שונים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים.

Amend*Place	Amend 0	Amend 1
In Soil	29.4 Aa	12.0 Ba
Above Soil	33.4 Aa	13.2 Ba
Volatile Exposure	41.5 Aa	19.5 Ba

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין רמות התוסף; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין מיקומים שונים במערכת המעבדתית לחימום קרקע בתנאי איורור מבוקרים.

2.2 ניתוח לפי רמות מיקום

2.2.1 מיקום In Soil:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping					
Solar	1	2609	111.25	<.0001	0	26.8	A					
					1	8.2	B					
Amend	1	2171	92.58	<.0001	0	27.3	A					
					1	9.8	B					
Solar*Amend	1	539	22.98	<.0001								
					Air	2	165	3.51	0.0476	0	14.8	A
										3 ml/min	19.6	A
						6-8 ml/min	19.9	A				
Solar*Air	2	1	0.02	0.9792								
Amend*Air	2	10	0.21	0.8088								
Solar*Amend*Air	2	229	4.88	0.0176								

השפעות גומלין, מיקום In Soil:

Solar*Amend	Solar 0	Solar 1
Amend 0	38.9 Aa	12.3 Ba
Amend 1	14.7 Ab	5.0 Bb

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

Solar*Air	Solar 0	Solar 1
0	23.5 Aa	6.2 Ba
3 ml/min	28.2 Aa	9.4 Ba
6-8 ml/min	28.7 Aa	9.4 Ba

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות איוורור.

Amend*Air	Amend 0	Amend 1
0	23.7 Aa	6.0 Ba
3 ml/min	29.4 Aa	11.5 Ba
6-8 ml/min	29.4 Aa	12.0 Ba

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין רמות התוסף; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות איוורור.

2.2.2 מיקום Above Soil:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping					
Solar	1	1855	37.07	<.0001	0	26.6	A					
					1	10.3	B					
Amend	1	3159	63.12	<.0001	0	29.7	A					
					1	9.4	B					
Solar*Amend	1	316	6.31	0.0198								
					Air	2	390	3.89	0.0357	0	14.5	B
										3 ml/min	20.4	AB
						6-8 ml/min	22.4	A				
Solar*Air	2	22	0.22	0.8062								
Amend*Air	2	28	0.28	0.7612								
Solar*Amend*Air	2	220	2.19	0.1352								

השפעות גומלין, מיקום Above Soil:

Solar*Amend	Solar 0	Solar 1
Amend 0	39.4 Aa	17.1 Ba
Amend 1	13.8 Ab	5.0 Bb

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

2.2.3 מיקום Volatile Exposure:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	501	13.17	0.0014	0	34.3	A
					1	27.8	B
Amend	1	4119	108.39	<.0001	0	41.4	A
					1	20.2	B
Solar*Amend	1	893	23.5	<.0001			
Air	2	3	0.04	0.9587	0	30.1	
					3 ml/min	32.9	
					6-8 ml/min	30.5	
Solar*Air	2	118	1.55	0.2342			
Amend*Air	2	1	0.01	0.9859			
Solar*Amend*Air	2	444	5.85	0.0088			

השפעות גומלין, מיקום Volatile Exposure:

Solar*Amend	Solar 0	Solar 1
Amend 0	40.1 Ba	42.7 Aa
Amend 1	14.7 Ab	11.0 Bb

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

Solar*Air	Solar 0	Solar 1
0	31.3 Aa	28.8 Aa
3 ml/min	35.7 Aa	29.6 Aa
6-8 ml/min	35.8 Aa	25.2 Aa

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות איורור.

Amend*Air	Amend 0	Amend 1
0	41.2 Aa	19.0 Ba
3 ml/min	41.5 Aa	22.6 Ba
6-8 ml/min	41.5 Aa	19.5 Ba

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין רמות התוסף; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות איורור.

3. קטילת נמטודות יוצרות עפצים

הערך המנותח- Arcsin של היחס בין מס' הצמחים הנגועים בעפצים לבין מס' הצמחים שנשתלו בקרקע שאולחה בעפצים מטופלים. התוצאות מוצגות בסעיף 3.1.2.3, איור 27. קטילה מלאה של נמטודות התקבלה בכל הטיפולים המחוממים, ללא קשר להצנעת רוקולה ולכן הניתוח מתייחס רק לטיפולים בטמפ' קבועה של 25 מ"צ.

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Amend	1	7.52	45.71	<.0001	0	1.57	A
					1	0.17	B
Air	2	0.25	0.77	0.4889	0	1.05	
					3 ml/min	0.63	
					6-8 ml/min	0.63	
Amend*Air	2	0.25	0.77	0.4889			

4. דיכוי נמטודות יוצרות עפצים בקרקע שטופלה במערכת המעבדתית לחימום קרקע

בתנאי איוורור מבוקרים

הערך המנותח- Arcsin של היחס בין מס' הצמחים הנגועים בעפצים לבין מס' הצמחים שנשתלו בקרקע שטופלה במערכת המעבדתית ושאלחה בעפצים טריים בתום הטיפול. התוצאות מוצגות בסעיף 3.1.7, אזור מס' 32.

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	0.06	0.53	0.4750	0	0.95	
					1	0.87	
Amend	1	15.63	149.27	<.0001	0	1.57	A
					1	0.25	B
Solar*Amend	1	0.06	0.53	0.4750			
Air	2	0.22	1.05	0.3640	0	0.92	
					3 ml/min	1.01	
					6-8 ml/min	0.81	
Solar*Air	2	0.74	3.54	0.0450			
Amend*Air	2	0.22	1.05	0.3640			
Solar*Amend*Air	2	0.74	3.54	0.0450			

4.1 ניתוח לפי רמות איוורור

4.1.1 איוורור 0 ml/min (תנאים אנאירוביים):

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	0.21	1	0.3466	0	0.79	
					1	1.05	
Amend	1	5.14	25	0.0011	0	1.57	A
					1	0.26	B
Solar*Amend	1	0.21	1	0.3466			

4.1.2 איורור 3 ml/min:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	0.58	5.87	0.0417	0	1.23	A
					1	0.79	B
Amend	1	3.84	38.76	0.0003	0	1.57	A
					1	0.44	B
Solar*Amend	1	0.58	5.87	0.0417			

השפעות גומלין, איורור 3 ml/min:

Solar*Amend	Solar 0	Solar 1
Amend 0	1.57 Aa	1.57 Aa
Amend 1	0.88 Aa	0 Ab

אותיות גדולות מייצגות הבדל בין משטרי חימום; אותיות קטנות מייצגות הבדל בין רמות התוסף.

4.1.3 איורור 6-8 ml/min:

Source	DF	Type III SS	F Value	Pr > F	Treat level	Treat mean	Tukey grouping
Solar	1	0.01	1	0.3466	0	0.84	
					1	0.79	
Amend	1	6.88	715	<.0001	0	1.57	A
					1	0.057	B
Solar*Amend	1	0.01	1	0.3466			

Summary

In this research, we studied the effect of amending soil with herb residues and soil solarization on the viability of soilborne plant pathogens and microbial populations in the treated soil. We studied the changes in chemical and physical parameters that occur in the soil during the process. The main results are:

1. We developed a new controlled system for heating soil amended with organic materials under controlled environmental conditions. This system enables to simulate the conditions that occur in the field, in soil amended with organic material, during solarization and to separate the influence of various physical and biological parameters such as heat, volatile toxic compounds, enzymatic activity in soil and antagonistic microbial populations. This system enables a rapid and reliable screening of different organic amendments and their influence on the viability of different soilborne pathogens.
2. Control of heat-tolerant soilborne pathogens in the field was more effective by soil solarization in combination with the organic amendments *Eruca sativa* Mill. (Rocola) or *Thymus vulgaris* L. (Thyme), than by soil solarization alone. The pathogens, which were effectively controlled by solarization of organic amended soil, included *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, root knot nematodes, and *Verticillium dahliae*, to a depth of 40 cm.
3. Sealing an irrigated soil amended with organic matter, with a plastic mulch, resulted in temporary sharp reduction in oxygen concentration during the first days. Solarization of amended soil enhances the heating of the soil during the process.
4. Amending soil with Thyme or Rocola residues, increases populations of total fungi and bacteria; combination of organic amendment with soil solarization resulted the decline of fungal population and the increase of bacteria population.
5. L-Sulforaphane, a biocidic volatile compound, was identified as important compound in all experiments under controlled conditions, conducted in soil amended with Rocola. Anaerobic conditions, which were developed in the experimental containers, caused the generation of a wide spectrum of polar volatile compounds, unlike aerobic containers.
6. The enzymatic activity and total microbial population were significantly decreased in anaerobic conditions, unlike aerobic conditions.

7. We obtained an effective control of various soilborne pathogens, in the laboratory system, when heating Rocola amended soil. The controlled microorganisms included *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, and *Rhizoctonia solani*.
8. Unlike the field treatments, we did not observe phytotoxicity in tomato seedlings that were planted in soils after treatments, amending soil with Rocola and treating it in the controlled environment, caused phytotoxicity immediately after the treatments.
9. Root knot nematodes were controlled in the soil at all heating conditions. Without heating, effective control was achieved only when soil was amended with Rocola in aerobic conditions. Soil suppressiveness to nematode establishment, was observed when nematode eggs and larvae were mixed with treated soils, only when soils were amended with Rocola and heated under aerobic conditions, or amended with Rocola, without heating, under anaerobic conditions.
10. The controlled system enabled a rapid screening of various amendments, which can be potential material for soil disinfestation. We found that Rocola or Tarragon (*Artemisia dracunculus* L.) controlled all the tested pathogens, while Sage, Rosemary, Mint, Thyme and Bay controlled some of the pathogens, and decreased the viability of others.
11. The results of the laboratory experiments were verified in commercial plots. Amending growth substrate, or soil, with Tarragon, Rosemary, Sage or Thyme and solarization for 30-60 days, was effective in controlling root knot nematodes, *Sclerotinia sclerotiorum*, and some weeds, except *Perslane portulaca*. There was no evidence for phytotoxicity when herbs were seeded in treated soil 5 days from treatments.