



חיטוי שמש להדברת פגעים שוכני-קרקע

מאת י. קטן, המחלקה לחקר מחלות צמחים ומיקרוביולוגיה, הפקולטה לחקלאות
א. גרינשטיין, א. גמליאל, המעבדה לחקר ישום חמרי הדברה, מינהל המחקר החקלאי

מתחממות לטמפרטורות שהן קטלניות לאורגניזמים רבים. בשכבות קרקע עמוקות יותר, שבהן הטמפרטורות אינן קטלניות, מעורבים במנגנון ההדברה גם תהליכים מיקרוביאליים. לצורך הדמיה וחיזוי קצב ההתחממות של הקרקע במהלך חיטוי-השמש - פותחו מודלים, שבעזרתם אפשר לקבוע אם החימום שיתקבל בתנאים גיאוגרפיים נתונים יספיק לצורך החיטוי. תוצר נוסף של חיטוי-שמש הוא "תופעת הגדלה המואצת" (IGR); כלומר, כושר הצמיחה וההנבה של צמחים בקרקע שטופלה בחיטוי-שמש - משתפר במקרים רבים. בתופעה זו מעורבים מנגנונים כימיים, פיסיקליים וביולוגיים. שילוב של חיטוי-שמש עם שיטות הדברה אחרות משפר את הדברת מחוללי-המחלות, מרחיב את תחום ההדברה ומאריך את השפעתה.

לחיטוי-השמש יש כמה יתרונות: הוא אינו כרוך בשימוש בחומרי הדברה, הוא בטוח לעובד המיישם אותו ולסביבה, והוא קל ופשוט לביצוע. מגבלותיו נובעות מתלותו באקלים וממשך-חיטוי ארוך, המחייב להשאיר את הקרקע בלא גידול למשך חודש או יותר. בסקירה שלהלן מתוארים כיווני פיתוח עתידיים של

מחלות צמחים שגורמים אותן מחוללי-מחלות (pathogens) שוכני-קרקע, גורמות נזקים לגידולים רבים. חיטוי הקרקע לפני הגידול, באמצעים פיסיקליים או כימיים, הוא אחד הדרכים להדברת מחוללי-מחלות (ואורגניזמים מזיקים אחרים). שיטת חיטוי-שמש מבוססת על טכנולוגיה חדשנית: חימום מתון של הקרקע בפרק-זמן ארוך יחסית, על-ידי חיפוי ביריעות פוליאטילן שקופות למשך ארבעה עד ששה שבועות בעונת הקיץ. חיטוי-שמש מדביר מחוללי-מחלות, מיני עשבים וגורמי-פגע רבים אחרים, ומשפר במידה ניכרת את היבולים. במקרים רבים מתמשכת השפעת החיטוי יותר מעונת גידול אחת. ממצאים דומים דווחו מ-40 ארצות ויותר.

מנגנונים פיסיקליים (חימום), כימיים וביולוגיים מעורבים בהדברת האוכלוסיות של מחוללי-המחלות במהלך חיטוי-השמש ואחריו. שכבות הקרקע העליונות

* מתוך "מחקר חקלאי בישראל", ח' (2-1), 1996. המעוניין ברשימת ספרות יפנה אל המקור.

חיטוי-השמש, לשיפור תוצאות החיטוי ולהרחבת השימוש בו לתנאים ולאזורים שאינם מתאימים כיום לשיטה זו.

מבוא

מחלות צמחים שגורמים אותן אורגאניזמים חיים מידבקיים ("מחוללי-מחלות" - pathogens) גורמות נזקים רבים לגידולים. הן פוגעות ביבול (עד כדי השמדתו) ובאיכותו. מבין מחוללי-המחלות תופסים מקום חשוב שוכני-הקרקע (soil-borne pathogens), המכונים גם "גורמי מחלות שורש". אלה חודרים לצמח דרך חלקי התת-קרקעיים. פגיעתם מתבטאת בתמות נבטים, בהתייבשות הצמח, בנבילה, או ברקובן שורשים. מבין מחלות השורש הגורמות נזקים לגידולים החקלאיים ראוי להזכיר את המחלות האלה: מחלת הנבילה (wilt diseases) שמחוללות פטריות-קרקע, כגון מגלת (*Fusarium*) ודורת (*Verticillium*) והחידק (*Pseudomonas solanacearum*); מחלות ניווניות, שגורמות נמטודות חופשיות; מחלות השורש, שגורמות נמטודות יוצרות-עפצים (*Meloidogyne* sp.); מחלות נבטים, שמחוללות הפטריות ריזוקטוניה (*Rhizoctonia solani*) ופיתיום (*Pythium*); פגיעה בשורשים ודלדול הצמח, שגורמים צמחים טפיליים כגון עלקת; ועוד.

למחוללי-מחלות שוכני-קרקע משותפות תכונות ביולוגיות, הנובעות מהתקיימותם באותו בית-גידול. אורגאניזמים אלה מאכלסים אתרים זעירים בקרקע (רגבים, חלקיקי חומר אורגאני) ומפוזרים לעומק רב; שם הם נשמרים כגופי-קיימא (resting structures) המאפשרים למחוללי-המחלה להתקיים בתנאי-סביב עוינים זמן ארוך, בצורה לא-פעילה, ולפיכך קשה להדבירם בכל אתר ואתר בקרקע. פעילות מחוללי-המחלה מושפעת מהרכבה הכימי של הקרקע ומתכונותיה הפיסיקליות, והם מצויים בשיווי-משקל ביולוגי דינמי עם אוכלוסיות המיקרואורגאניזמים הסובבים אותם. שיווי-משקל זה מהווה מערכת-בלימה ביולוגית בפני התפרצות מחלות, והפרתו - למשל, עקב שימוש בחומרי הדברה רעילים מאוד, הצנעה חוזרת של צמחים חולים, או תנאים אחרים - עלולה לגרום התפרצות מוגברת של מחלות

השורש. באופן פרדוכסלי נגרמת התעצמות (build up) מהירה של המחלות והחמרת נזקיהן - דווקא בגידול שהוא רווחי, שכן, החקלאים מרבים לגדל אותו לעתים תכופות באותה חלקה. במקרים קשים מאוד חלה השמדה מוחלטת של הגידול. כושר ההישרדות הממושך של מחוללי-המחלות הללו בקרקע והתעצמות אוכלוסיותיהם לאורך הזמן עלולים לגרום, במקרים קשים, הוברת הקרקע או החלפת גידולים רווחיים רגילים - בגידולים פחות רווחיים.

השיעור והעוצמה של התחלואה במחלת-שורש מסוימת הם, כאמור, תוצאה היחסים בין שלושת הגורמים הביולוגיים המצויים בקרקע ומעורבים בתהליך המחלה, שהם: האורגאניזמים שבקרקע, הצמח הנתקף ומחוללי-המחלה (איור 1). הכנסת גורם חדש למערכת עשויה לשנות את יחסי-הגומלין בין רכיביה וליצור שיווי-משקל חדש, ובעקבותיו - הגברה, הפחתה, או אי-שינוי של עוצמת המחלה. בעבר היה מקובל להניח, שהדברה יעילה של מחלות תושג רק באמצעות השמדתם המוחלטת של מחולליה בקרקע, כדי שהצמח יגדל בקרקע נקייה מהם. בגישה זו ליקויים רבים הנובעים מהשפעות-לוואי שליליות אפשריות של אמצעי הדברה קיצוניים על אורגאניזמים מועילים. מיעוט שיטות הדברה יעילות של מחוללי-מחלות בקרקע מחייב שימוש חוזר בשיטת הדברה אחת ויחידה, ובכך טמונה סכנה של שיחלוף מחלות או התפרצות מחלות חדשות, שגורמיהן עמידים יחסית לשיטת ההדברה הנהוגה, עקב הפרת שיווי-המשקל הביולוגי (איור 1). כיום מקובלת גישה הדברה כוללת ומשולבת, השואפת לנצל מגוון רב של אפשרויות על-ידי התערבות מושכלת בכל אחד מרכיבי מערכת המחלה, אגב שימוש באמצעים שנוקם לסביבה מועט ככל האפשר, ומזעור תופעת הלוואי השלילית. על-כן, החיפוש אחר שיטות הדברה נוספות שתהיינה יעילות אך בלתי מזיקות לסביבה, לרבות לאורגאניזמים המועילים, הוא משימה מתמשכת.

במאה השנים האחרונות פותחו גישות ושיטות רבות, כימיות ואחרות, להדברת מחוללי-מחלות שוכני קרקע, כגון: חיטוי קרקע כלליים, או טיפולים יחודיים בחומרי הדברה, זנים עמידים, הרכבה על



(CS2). חומר זה הוחלף באמצע המאה ה-20 בחומרים יותר יעילים (ויותר רעילים) לחיטוי-קרקה, כגון כלורופיקרין, מתיל-ברומיד ומתאם-סודיום (ואפאם). האיזוי הכימי מדביר ביעילות פגעי קרקה, והשימוש בו נפוץ בבתי-צמיחה ובגידולים עתירי-הכנסה בשדה הגלוי. עם זאת, השימוש בחומרי איזוי כרוך בקשיים ובמגבלות הקשורים עם רעילותם המרובה, עלותם הגבוהה, ובדרישה לידע רב ולמיומנות-ביצוע מרובה. יתר על כן: קיים סיכון מתמיד כי תכשירים אלה, שהם רעילים מאוד ולא-ברירניים, יפגעו באויבים הטבעיים של מחוללי-המחלות (אנטאגוניסטים) בקרקה, ובכך יפרו את שיווי-המשקל הביולוגי בה וייצרו ריק ביולוגי. עקב כך צפויות תוצאות-לואי שליליות, כגון התפרצות מהירה של מחלות בשל התרבות יחידות הריבוי הבודדות של מחוללי-מחלות ששרדו בקרקה, או שהגיעו אליה לאחר גמר החיטוי.

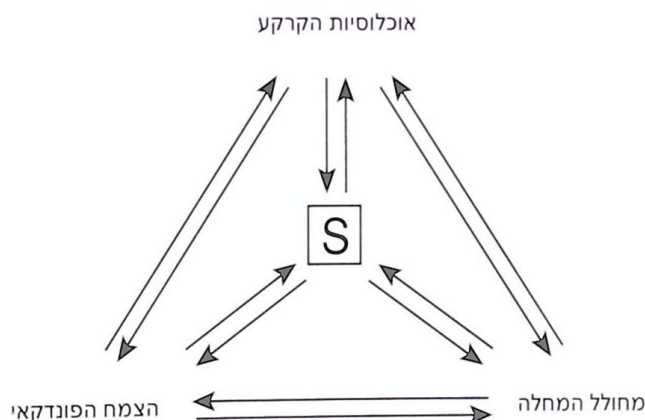
מכיון שהדברת מחוללי-המחלות בקרקה היא כורח-המציאות - נעשים מאמצים רבים לפיתוח שיטות חיטוי חלופיות, בלא שימוש בתכשירי הדברה. ברם, רק בשנת 1976 פותחה בראשונה, בישראל, שיטת חיטוי שלישית: חיטוי-שמי של הקרקה (soil solarization), המבוססת על עקרון הדברה חדש: חימום מתון ואורך זמן, על-ידי ניצול קרינת השמש להדברת מחלות. גישה זו פותחה כתוצאה מתצפיות שערכו חקלאים ומדריכים בבקעת-הירדן. מאז הפירסום הראשון בנידון, ב-1976, נוסה חיטוי-השמש ב-40 ארצות ויותר, בידי קבוצות מחקר וחוקרים רבים. התוצאות, רובן מוצלחות, פורסמו במאות פרסומים מדעיים. השיטה נמצאת בשימוש מעשי בארצות שונות, בכללן: ישראל, יוון, איטליה, יפן, ארצות-הברית, מלזיה, עיראק ואחרות.

פרק א': עקרונות חיטוי-השמש של הקרקה

חיטוי-השמש מבוסס על חימום הקרקה בקרני השמש. החימום מושג על-ידי כליאת אנרגיית הקרינה של השמש תחת חיפוי פוליאתילן (או חומר אחר, בתנאי שהוא שקוף ואטום לאדי מים) הפרוש על קרקה מעובדת ומוכנה לזריעה. יריעת החיפוי חייבת להיות שקופה, כדי לאפשר את חדירת קרני האור אל הקרקה.

כנות עמידות, הדברה ביולוגית ושימוש באמצעים פיסיקליים ואגרונמיים. ריבוי שיטות ההדברה נובע מכך, שאף אחת מהן אינה מתאימה לכל הגידולים והמחלות, או לכל המצבים. חיטוי קרקה הוא השיטה העיקרית להדברת מחלות-שורש בגידולים אינטנסיביים ועתירי הכנסה. החיטוי נועד להשמיד את מחוללי המחלות לפני הזריעה או השתילה, ובכך להבטיח את הצמח מפני תקיפתם. הקושי להגיע אליהם בכל אתר ואתר בקרקה ולקטול אותם - מחייב שימוש באמצעים יעילים ובעלי כושר חדירה לעומק הקרקה. אמצעים אלה יכולים להיות פיסיקליים, כגון חימום הקרקה בקיטור, או כימיים, כגון איזוי (fumigation) של חומרים נדיפים בעלי רעילות וחדירות מרובות.

איור 1. יחסי-הגומלין בין רכיבי המערכת המעורבים בתהליך המחלה.



$S =$ כל רכיב חיצוני המשפיע על כל אחד משלושת רכיבי המערכת העיקריים.

חיטוי הקרקה בקיטור פותח בסוף המאה הקודמת בידי חוקרים גרמנים, ועיקר שימושו - בחממות. התפרצות הפילוכסרה בגפנים באירופה בסוף המאה הקודמת גרמה את פיתוח טכנולוגיות החיטוי הכימי של הקרקה ושימוש בחומר הנדיף פחמן דו-גופריתי

הנמטודות חשוב לציין - *Ditylenchus* (התוקפת שום ובצל), *Pratylenchus* (התוקפת בין השאר תפוחי-אדמה וחיטה) ו-*Heterodera* (שמינים שלה תוקפים חיטה וציפורן). כמו כן דווח על הדברת הצמח הטפיל עלקת ואקרית הקרקע *Rhizoglyphus*. אכן, קיימים מחוללי-מחלות שאינם מודברים בתנאים רגילים על-ידי חיטוי שמש, כגון הפטרייה *Macrophomina*. לגבי הנמטודה יוצרת-העפצים *Meloidogyne* נתקבלו תוצאות שונות: הדברה מלאה, הדברה חלקית, ואף היו מקרים של הגברת המחלה.

הדברת עשבים היא אחת התוצאות החזותיות הבולטות של חיטוי-השמש. רוב העשבים החד-שנתיים מודברים ביעילות בשיטה זו, אך נמצאו גם יוצאים מן הכלל, כגון דבשה. מינים רבים של עשבים רב-שנתיים, כגון יבלית ודורת ארס-צובא, המתרבים מזרעים - מודברים אף הם על-ידי חיטוי-השמש. אחרים, כגון גומא הפקעים וקייצת, בדרך-כלל אינם מודברים באופן יעיל.

השפעתו החיובית של חיטוי-השמש בהדברת פגעים ובהגדלת יבולים נמשכת, לעתים, שתי עונות ויותר לאחר החיטוי. תופעה זו נמצאה בכותנה (בהדברת המחלות מגלת ודורת), בצל (מחלת השורש-הוורוד), בחיטה (פגיעת הנמטודה *Heterodera*), בפול (עלקת) ובמקרים רבים נוספים. רוב ההצלחות בחיטוי-שמש תועדו בארצות בעלות אקלים חם ויבש בקיץ עם שיעור קרינה רב (850 ואט או יותר למ"ר), כגון המזרח התיכון וקליפורניה. עם זאת דווח גם על מקרים של הצלחה חלקית או מלאה של חיטוי-שמש בארצות שבהן יורדים גשמי קיץ (כגון בפלורידה) או באזורים קרירים יותר.

לעומת זה, יש דיווחים מעטים על השפעות-לוואי שליליות של חיטוי-שמש, כגון מספר מקרים (מידע אישי) של פגיעה בחידיקי ריזוביום בצמחי פול ואגוזי-אדמה.

היריעה מונעת את קירור הקרקע, על-ידי מניעת הבריחה של אדי-המים, ובכך היא אוצרת את חום הנידוף. יריעות המונעות גם "בריחה" של קרינה ארוכת-גל גורמות התחממות נוספות, אמנם לא רבה, של הקרקע. הקרקע צריכה להיות מושקית היטב, כדי לאפשר את הולכת החום לעומק, להגדיל את רגישותם של גופי-הקיימא לחום ולהבטיח את הפעילות הביולוגית. משך החיפוי הדרוש הוא חודש אחד או יותר, בעיצומו של קיץ (בישראל - בין אמצע יוני לסוף אוגוסט). ביצוע נכון של הטיפול בתקופה זו גורם להתחממות שכבת הקרקע העליונה, עד לטמפרטורה של 40-45 מ"צ בעומק של 10 ס"מ. הטמפרטורות נמוכות יותר ככל שהעומק רב יותר, ובעומק 30-40 ס"מ מגיעות לרמות תת קטלניות (איור 2). אולם, כמה מחוללי מחלות נקטלים בכל עומקו של חתך-הקרקע הרטוב (בארץ נבדק הדבר עד לעומק של 70 ס"מ, ובקליפורניה - עד 120 ס"מ). חיטוי יעיל יתכן גם בחודשים קרירים יותר, אך ביצועו מחייב תנאים מיוחדים.

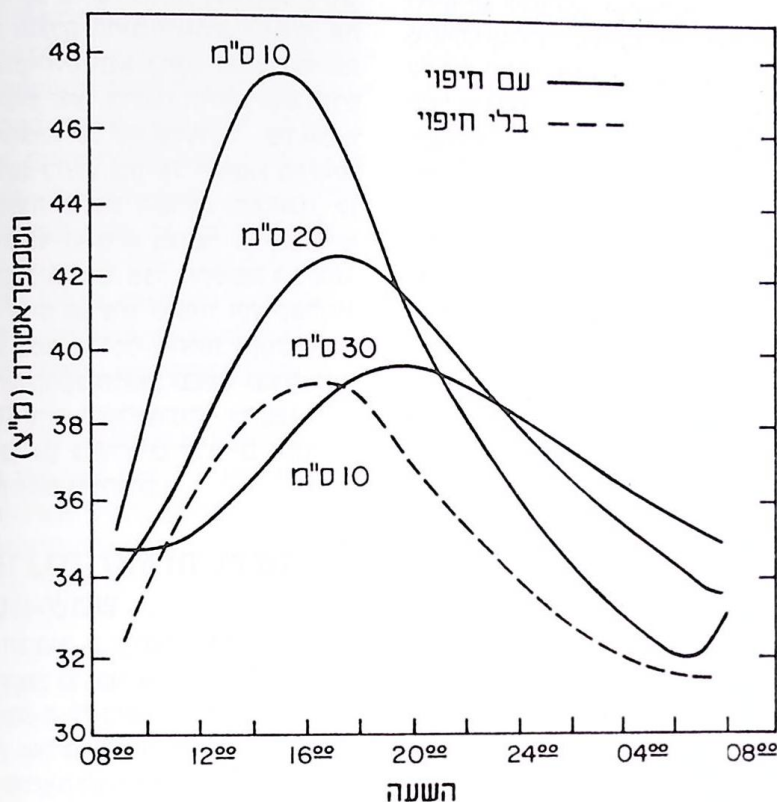
פרק ב': הדברת מחלות ועשבי בר על-ידי חיטוי-שמש

חיטוי-שמש הדביר ביעילות מספר רב של מחלות-שורש ועשבי בר, כפי שנמצא בניסויים רבים שנערכו מאז שנות ה-70 בישראל ובארצות-הברית, בטיפוסי קרקע שונים ובאזורים שונים. הפחיתה בשיעור מחלות-שורש היתה מרובה, בדרך-כלל, והגיעה בכמה מקרים ל-100%. כמו כן נתקבל יבול רב יותר, בעשרות ואף במאות אחוזים. בכמה מהמקרים נתקבל גם שיפור באיכות התוצרת. שיעור הגדלת היבול תלוי בגורמים רבים, כגון: יעילות ההדברה, רמת האילוח הראשונית של הקרקע, רגישות הגידול למחלה והשפעות-לוואי חיוביות או שליליות על הגידול, שאינן תוצאה של הדברת מחוללי-המחלות.

חיטוי-השמש יעיל בקטילת מחוללי-מחלות רבים בכללם: פטריות הקרקע דורת (*Verticillium*), ריזוקטוניה, פיתוים, מגלת (*Rosellinia*, *Fusarium*), *Pyrenochaeta* (מינים שלה מחוללים את מחלת השורש-הוורוד בצל ואת מחלת השעמט בעגבניות), פטוטורה, קשיונה (*Sclerotinia*) וקשיון רולפס. מבין



איור 2. הטמפרטורות שנמדדו במהלך חיטוי-שמש בעומקי הקרקע 10, 20 ו-30 ס"מ, לעומת הטמפרטורות בקרקע לא-מחופה בעומק של 10 ס"מ (קרקע חולית, רחובות).



מחולל-המחלה בשכבות קרקע עמוקות. למשל, נמצא שחיטוי-שמש מפחית בשיעור של 95%-100% את אוכלוסיית הפטרייה הפאתוגנית דוררת (*V. dahliae*) עד לעומק של 70 ס"מ, לפחות. ככל שמשך החיטוי ארוך יותר - נקטל מחולל-המחלה עד עומק רב יותר. הוכח כי במקרים רבים משתתפים בהדברת מחוללי-המחלות מנגנונים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים.

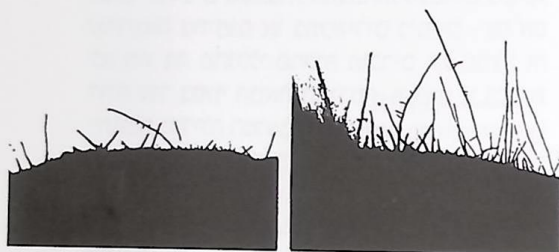
התחממות הקרקע היא האפקט הבולט ביותר של חיטוי-שמש. הטמפרטורות המושגות בשכבת הקרקע

פרק ג': המנגנונים האחראיים להדברת מחוללי-מחלות על-ידי חיטוי-שמש

שיעור התחלואה וחומרת המחלה בצמחים תלויים ישירות בכמות המידבק (אינוקולום = יחידות ההדבקה) של מחולל-המחלה ומושפעים, כאמור, מרמת הפעילות המיקרוביאלית הכללית בקרקע, מרגישות הצמח למחולל-המחלה ומתנאי-הסביבה. חיטוי-קרקע מוצלח גורם פחיתה חדה ברמת המידבק, ועקב כך - פחיתה בשיעור המחלה. בעבודות רבות הוכח כי הפחתת התחלואה תודות לחיטוי-השמש היתה מלווה בהפחתה משמעותית של אוכלוסיית

תופעה מעניינת מאוד, הקשורה עם חיטוי-שמש, היא "השריית תגודת" ביולוגית (induced suppressiveness) נגד פלישת מחוללי-מחלות לקרקעות שעברו חיטוי זה. נמצא, שהתבססות-מחדש של אורגאניזמים בקרקעות המחוטאות היא איטית לעומת התבססותם בקרקעות הלא-מחוטאות, ובייחוד לעומת קרקעות שחוטאו בקיצוניות. כתוצאה מכך, שיעור התחלואה פחות בקרקע שעברה חיטוי-שמש ואולחה לאחר מכן במחולל-המחלה (כפי שנמצא לגבי מגלת בעגבניות וקשיון רולפס בצמחי שעועית). בתמונה 1 נראה דיכוי גדילת תפטיר הפטריה *Rosellinia* בקרקע שעברה חיטוי-שמש.

תמונה 1. צמיחת תפטיר של הפטריה הפאתוגנית *Rosellinia necatrix* בקרקע שעברה חיטוי-שמש (משמאל) לעומת צמיחתו בקרקע בלא חיטוי-שמש (מימין). צילום מיקרוסקופי.



השפעת חיטוי-השמש על אוכלוסיות של חיידקים מועילים מקבוצות FP (fluorescent pseudomonads), בקרקע ובריוזופירה, נחקרה בישראל ובמקומות אחרים. לחידקים אלה יכולת הדברה ביולוגית של מחוללי-מחלות רבים והשפעה חיובית על גדילת צמחים, וחברות ביוטכנולוגיה בעולם עושות כיום מאמצים לייצר תכשירים מסחריים של חיידקים אלה לביקטור צמחים.

עקב חיטוי-השמש, חלק גדול מאוכלוסיות המיקרואורגניזמים בקרקע פוחת מאוד. אוכלוסיית חידיקי FP, שהיא רגישה מאוד לטמפרטורה גבוהה, מצטמצמת עוד יותר. אף על פי כן, מצליחים החיידקים לנצל ביעילות את הפרשות השורשים ולאכלס את הריוזופירה לפני שהאוכלוסיות האחרות מתאוששות.

העלייה (40-45 מ"צ עד לעומק של כ-20 ס"מ) הן קטלניות לרוב מחוללי-המחלות. מחקרים לבירור הקשר בין הטמפרטורה לבין שיעור הקטילה של מיקרואורגאניזמים שונים נערכו עוד בתחילת מאה זו. ונמצא כי שיעור הקטילה של מיקרואורגאניזמים גדל ככל שהטמפרטורה עולה ומשך החשיפה גדל. למשל, אפשר להשיג שיעור קטילה נתון של אורגאניזם מסוים - בחשיפה לטמפרטורה גבוהה לזמן קצר, או בחשיפה לטמפרטורה נמוכה יותר לזמן ממושך. עם זאת, המנגנון הפיסיקלי (קטילה בחום) לבדו אינו מסוגל להסביר את קטילת מחולל-המחלה שנמצאה גם בטמפרטורה נמוכה, למשל, בשכבות קרקע עמוקות מאוד או באזורים בעלי אקלים קריר. קטילה זו הצביעה על מעורבותם של תהליכים ביולוגיים בהדברת מחוללי-מחלות במהלך חיטוי-השמש. תהליכים אלה פוגעים במחוללי-המחלות ומפחיתים את שיעורי התחלואה.

אחד המנגנונים הביולוגיים הללו הוא "מנגנון ההחלשה" (weakening effect). כאשר מחולל-מחלה נחשף לטמפרטורות תת-קטלניות - הוא נפגע ונחלש, אף שהטמפרטורות אינן מספיקות לקטילתו המיידית. כתוצאה מהחלשתו הוא פגיע יותר לתקיפת מיקרואורגאניזמים המצויים בקרקע. ואכן, לאחר חשיפת אוכלוסיות של מחולל-המחלה לחום תת-קטלני - נמצאה דעיכה מתמשכת של אוכלוסייתו בקרקע. כמו כן נמצא כי אנטאגוניסטים מסוימים מתרבים בקרקע לאחר חיטוי-שמש, חלקם מפני שהם סובלניים יותר לטמפרטורות גבוהות וחלקם משום שהם מנצלים ביעילות או במהירות את "החלל הביולוגי" שנוצר בקרקע, כגון חומרי מזון שהשתחררו לאחר חיטוי-השמש.

במקרים אחרים נמצא, שחימים הקרקע גרם שבירה חלקית או מלאה של ה"פונגיסטאזיס" - מנגנון "תרדמה" טבעי של גופי-קיימא של פטריות, הקיים בכל הקרקעות ומאפשר להם להישדך בהעד פונדקאי מתאים ולהיות מוגנים מפני האויבים הטבעיים. בעקבות "שבירת" הפונגיסטאזיס נובטים גופי-הקיימא, ובכך הם נעשים רגישים יותר לתקיפת אנטאגוניסטים בקרקע.



אלה יש כושר לדכא מחוללי-מחלות עיקריים וזוטרים. חיידקי FP מאכלסים בהצלחה את הרקמה הפנימית של השורש, וככל הנראה הם מגינים עליו מפני מיקרואורגניזמים עוינים. תהליכים ביוטיים ואי-ביוטיים כאלה כנראה מתרחשים בקרקע בעת חיטוי-השמש, ובסופו-של-דבר תורמים במשולב לשיפור הצמיחה מעבר לשיעור הניתן להסבר בקטילת מחוללי-המחלות. לתופעת ה-IGR יש השלכות כלכליות פוטנציאליות חשובות, אך טרם פותחו שיטות לחיזור עוצמת התופעה ושיעור תוספת היבול הנובעת ממנה.

פרק ה': דגמים [מודלים] להדמיית חיטוי-שמש ולחיזוי יעילותו

מדידות של טמפרטורות הקרקע ורישומן (ראה איור 2) משמשים מכשיר עיקרי ללמידת קצב ההתחממות של הקרקע. בשנים האחרונות פותחו דגמים המאפשרים חיזוי של מידת ההתחממות בתנאים מטאורולוגיים וקרקעיים שונים. פרופ' יצחק מור (מהפקולטה לחקלאות ברחובות) וחובריו פיתחו דגמים ממוחשבים המאפשרים הדמיה וחיזוי של תהליכי התחממות הקרקע תחת חיפוי ביריעות פלסטיק. באיור 3 אפשר לראות התאמה טובה מאוד בין הטמפרטורות החזויות על-פי הדגם ובין אלה שנצפו במדידות ישירות, בשלושת עומקי הקרקע שנבדקו. לשם חיזוי ההתחממות יש להזין את המערכת בנתוני האקלים שבסביבה ובנתונים הפיזיים של הקרקע ושל החומר הפלסטי המשמש לחיפוי. הדגמים תרמו רבות למחקר בחיטוי-שמש ובחיזוי יעילותו, והם מאפשרים קבלת מידע על אודות המקום והמועד שבו יצליח החיטוי.

פרק ו': שילוב של חיטוי-שמש עם שיטות הדברה אחרות

לשילוב שיטות הדברה יש יתרונות פוטנציאליים רבים, כגון הגברת יעילות ההדברה, הרחבת תחום הפגעים המודברים, הדברת פגעים שאינם מודברים בשיטה אחת, וקבלת הדברה לטווח ארוך. כאשר השילוב הוא עם שיטות שאינן כימיות - נוסף גם המימד של צמצום מנות חומרי ההדברה.

איכלוס זה מתרחש עוד בשלבים הראשונים של נביטת הזרעים והצצת הנבטים, ויש לו השפעות חיוביות רבות בהשריית תגודת ביולוגית בקרקע.

תהליכים של הדברה ביולוגית המושרים בקרקע בעקבות חיטוי-שמש תועדו במגוון קרקעות רחב בארץ ובעולם - עובדה המצביעה על כלליות התופעה. למרות זאת, אסור להתעלם מהאפשרות שבמצבים מיוחדים יפגע חיטוי-השמש גם במיקרואורגניזמים מועילים. למשל, נמצאו מקרים שחיטוי-שמש פגע במיקוריה בגזר, ועקב כך חל עיכוב בהתפתחות הגזר הצעיר; אך מאוחר יותר נראתה התאוששות מלאה של הגידול.

פרק ד': גידול מואץ בקרקעות שטופלו בחיטוי-שמש

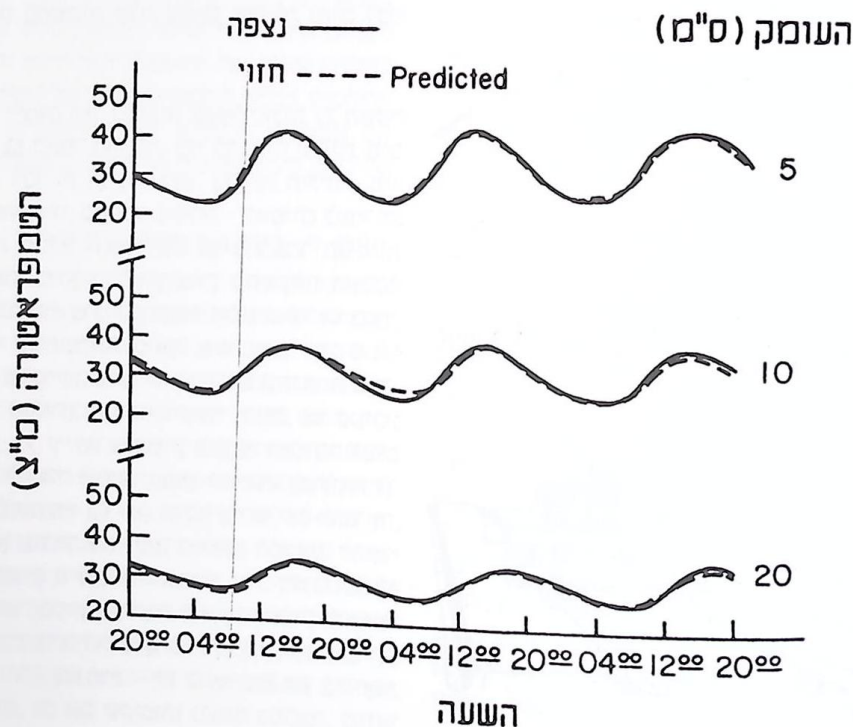
במקרים רבים משתפרת התפתחות הצמחים בקרקע שחוטאה בחימום או בתכשירים כימיים - גם אם לא היו בה מחוללי-מחלות מוכרים. על ממצא זה דווח עוד בסוף המאה הקודמת. תופעה זו נקראת "תגובת הגדילה המואצת" (increased growth response). בין המנגנונים (ביוטיים ואי-ביוטיים) העשויים להסביר תופעה זו אפשר לציין את אלה: (1) שיחרור מוגבר של חומרי-מזון מינראליים בקרקע המחוטאת. הוכח כי מיצויים מקרקע שנתגלה בה עידוד הצמיחה - מעודדים אף הם את גדילת הצמחים. (2) הדברת מחוללי-מחלות וזוטרים (minor pathogens). (3) עידוד מיקרואורגניזמים מועילים. (4) פירוק או ניטרול של חומרים אורגאניים רעילים המצטברים בדרך-כלל בקרקע עקב פירוק רקמות הצמחים שמתו.

כאמור, בשורשי צמחים הגדלים בקרקע שעברה חיטוי-שמש חל איכלוס מהיר בחיידקי FP, ואלה מעודדים את גדילת הצמחים. נמצא כי הפרשות השורשים של צמחים הגדלים בקרקע שעברה חיטוי-שמש מכילות יותר תרכובות אמינו ופחות סוכרים, מאשר אלה של צמחים שגדלו בקרקע רגילה. חיידקי FP נמשכים יותר להפרשות אלה, ועל כן יש להן תפקיד באיכלוס הנמרץ של השורשים בחידקים המועילים. יש להוסיף כי לתבדידים של חידקים

זבל-עופות או עם שיירי כרוב. במערכת זו מוצנע חומר אורגאני לפני החיטוי, ותהליך החיטוי והתחממות הקרקע מאיצים את פירוק החומר ואת שיחרורן של תרכובות נדיפות רעילות לאוויר הקרקע. עם תרכובות אלה נמנים: אמוניה, כהלם שונים, אלדהידים, תרכובות גופרית ועוד. שילוב בין החימום ובין התרכובות הנדיפות תורם לקטילה משופרת של מחוללי-מחלות. דוגמה: בחיטוי-שמש של קרקע שהוצנע בה זבל-עופות נמצאה קטילה יעילה מאוד של נמטודות עפצים, שחיטוי-שמש לבדו אינו יעיל די הצורך בקטילתן.

צמצום השימוש בכימיקלים מהווה גורם מרכזי בממשק ההדברה המשולבת (IPM). שילוב של חיטוי-שמש עם שיטות הדברה אחרות עשוי לצמצם את מגבלותיו ולקצר את משך החיטוי, או להרחיב את אפשרויות השימוש בו בעונות קרירות יותר. עקרון ההחלשה שתואר לעיל הוא רכיב חשוב בשילוב שיטות ההדברה. ניסויים רבים שנעשו בשילוב חיטוי-שמש עם שיטות שונות, כגון עם חומרי הדברה במנות מופחתות, עם זנים עמידים או עם מדבירים ביולוגיים - הצביעו על הדברה משופרת. אף דווח על תוצאות מבטיחות של שילוב חיטוי-שמש עם

איור 3. המהלך היומי של טמפרטורות חזויות ומדודות בקרקע בתנאי חיטוי-שמש, בעומקים של 5, 10 ו-15 ס"מ. (רחובות, יוני 1978. נמסר באדיבותו של פרופ' יצחק מר.)

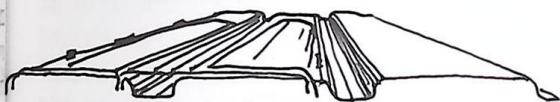




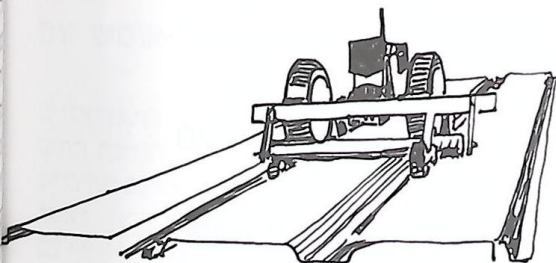
שחוזקן המכאני לא נפגם ואין בהן חורים. יש להבטיח את עיגון היריעות בשדה גם בתנאי רוח חזקה, על-ידי הטמנת שוליהן בקרקע, ורצוי ששולי היריעה ייצרו "כיס" שיתמלא עפר תוך כדי ההטמנה.

בחיטוי-שמש בולטת תופעת אפקט השוליים. טמפרטורות הקרקע בסמוך לשולי היריעה נמוכות מאלה המרוחקות מטר אחד ויותר מהשוליים; ולפיכך, גם הדברת הפגעים אינה שלמה בסמוך לשולי היריעה. על כן רצוי לבצע חיפוי רצוף על כל החלקה, על-ידי הדבקת יריעה ליריעה. אין לבצע זאת ביריעה רחבה מאוד, מכיון שיריעה כזאת נשלפת מהקרקע אפילו ברוח קלה. בחיפוי ידני אפשר להצניע את שוליהן של שתי יריעות באותו תלם, ולפרוש אותן אחר-כך לצדדים מנוגדים, ויש לחזור על פעולה זו לקבלת הרוחב הרצוי (איור 4).

איור 4. ציור סכמאטי של חיפוי רצוף בביצוע ידני.



איור 5. ציור סכמאטי של חיפוי רצוף ממוכן.



פרק ז': יסודות חיטוי-השמש

חיטוי-שמש מחייב, כמו בכל שיטת חיטוי אחרת, הכנת קרקע מדוקדקת. קודם כל יש לדאוג להרחקת שרידי הצמחים החולים מהשטח. שנית, השטח חייב להיות מעובד לעומק בית-השורשים הרצוי, באופן שתישאר קרקע מפוררת ותחווחה אך לא אוורירית מדי. קילטור עמוק, תיחוח או דיסוק, ולבסוף העגלה במעגילה בינונית - יבטיחו קרקע מתאימה לחיטוי. יש להקפיד שלא ישארו רגבים על-פני הקרקע. יש להשלים את כל פעולות העיבוד, לרבות זיבול אורגאני, לפני החיפוי. בתנאי רטיבות - מתגברת מאוד הולכת החום לעומק הקרקע, ולכן יש להשקות את השדה לעומק של 50-60 ס"מ כפעולה אחרונה לפני החיפוי בפלסטיק. במקרה שהקרקע מאולחת בעומק רב (כגון לאחר חריש עמוד מאוד), רצוי להרטיב לעומק של 70-80 סנטימטרים. כן רצוי להשקות בהמטרה ולא בטפטוף, כדי להבטיח הרטבה אחידה ככל האפשר. בקרקעות כבדות וחרסתיות מומלץ להשקות כשבוע לפני הטיפול, ולהשלים את הרטבת השכבה העליונה בהשקיה קלה נוספת שלושה ימים לפני החיפוי.

החיפוי ייעשה מיד כשהיה אפשר לעלות על השטח ולעבוד בו לאחר הרטבה, כדי להבטיח תכולת מים מרבית. דבר זה אפשר לבצע: בקרקע חולית - מיד בגמר ההשקיה; בקרקע בינונית - כיומיים לאחריה; ובקרקע כבדה - כשלושה ימים לאחר השקיית ההשלמה. בדרך-כלל אין צורך בהשקיות השלמה במשך החיטוי, פרט לקרקעות קלות מאוד או בטוף. נמצא כי שטח מכוסה כיאות אינו מאבד יותר מ-4% מהמים שבקרקע במשך חודש תמים (בתנאי אוגוסט, בקרקע חולית), החיפוי ייעשה ידנית, או במיכון מתאים. כל יריעת פלסטיק שקופה ואטומה למים תתאים למטרה זו. בארץ נפוץ השימוש בפוליאיתילן. אפשר להשתמש ביריעה הדקה ביותר של חומר זה, שכן היא נמצאה מתאימה בחוזקה המכאני. לחיפוי ידני תתאים יריעת פוליאיתילן רגיל בעובי 30-40 מיקרומטר. מכיון שיריעות החיפוי חייבות להישאר שלמות במשך כ-40 ימים בעונת הקיץ, המתאפיינת בקרינת UV מוגברת - יש להשתמש רק ביריעות משומשות, גם אם שקיפותן נפגמה במקצת, בתנאי

יש מכוונות לחיפוי בפסים, שאפשר להשתמש בהן להדברת מחלות בצמחים המאופיינים בשורשים קצרים והגדלים בערוגות במשך עונה אחת בלבד (איור 5). ברוב המקרים דרוש חיפוי רצוף לצורך השגת חיטוי יעיל. קיימות מכוונות הפורסות יריעות צרות (עד לרוחב כ-4 מ'), תוך עיגון צדן האחד בהטמנה בקרקע וחיבור צדן האחר ליריעה שנפרסה במהלך הקודם (איור 5). החיבור יכול להיעשות בהלחמה או בדבקים מיוחדים, המחזיקים מעמד בכל משך התקופה הנדרשת לחיטוי-השמש. בתום החיטוי, לאחר הסרת הפלסטיק, נותר שטח מחוטא. מכאן ואילך אין לבצע פעולות עיבוד (חוץ משבירת הקרום העליון של הקרקע, קלטור לעומק 20 ס"מ, או תיחוח לעומק 10 ס"מ). יש גם להקפיד, כמובן, שחומר הריבוי שהוכנס לשדה יהיה פטור ממחוללי-מחלות.

פרק ח': חיטוי-שמש לצורך תברואה [סניטאציה]

התברואה מתרכזת בהשמדת המידבק הראשוני, במניעת חדירתו לחלקות או בהרחקתו משטח חקלאי. שיירי צמחים חולים מכילים בדרך-כלל כמויות גדולות של גופי ריבוי של מחוללי-מחלות, והם משמשים מקור עיקרי של מידבק ראשוני. גבעולי עגבניות או תפוחי-אדמה נגועים בדוררת מכילים רבבות ואף מאות אלפי קשיונות בגרם רקמה של גבעול נגוע. חיטוי-שמש יכול לשמש מכשיר להכחדת מקורות המידבק ולתברואה. במרוקו נמצא, שעמודי ההדליה לצמחי עגבניות נושאים את הפטרייה דידימלה ומשמשים מקור להדבקה במחולל-מחלה זה, שהוא מפגע קשה בגידול העגבניה. חיטוי-שמש של עמודי ההדליה הדביר דידימלה ביעילות רבה ומנע את אילוח השטח בעונה העוקבת. אפשר לנקוט חיטוי-שמש להשמדת מידבק בחומר ריבוי נגוע, כגון פקעות. בייחוד קשה התברואה כשמצויים שרידי צמחים המכילים מידבק של מחוללי-מחלות ומזיקים שונים, הנישאים בחלל החממה על עמודים ועל חלקי מבנה אחרים. בעבודות שנעשו ביפן ובישראל נמצא, שסגירת החממה מעלה את טמפרטורת האוויר ל-60 מ"צ ואף ליותר. לפיכך, סגירת החממה למשך שבועות

מספר היא אמצעי תברואה יעיל ונוח. פעולת החיטוי העיקרית בחממה נעשית בחום יבש, ועל כן נדרש משך חימום ארוך יחסית לקטילה יעילה של הפגעים.

פרק ט': יתרונותיו ומגבלותיו של חיטוי-השמש
היתרונות של שיטת חיטוי-השמש הם אלה: זוהי השיטה היחידה לחיטוי-קרקע ולהדברת פגעים רבים מקבוצות שונות, שאינה כרוכה בשימוש בחומרי הדברה. זוהי גם שיטה בטוחה לעובד המיישם אותה ולסביבה, ויעילותה הוכחה במחקרים רבים, בתנאים שונים ובהיקפים נרחבים. היא פשוטה לביצוע, וניתנת ליישום בקלות יחסית. מגבלותיה של השיטה נובעות מתלותה באקלים, ובישראל היא ניתנת ליישום רק מאמצע יוני עד סוף אוגוסט. כמו כן, הטכנולוגיה הנוכחית מחייבת להשאיר את הקרקע מחופה, בלא גידול, לחודש אחד לפחות. בחישוב עלויות חיטוי-השמש יש להביא בחשבון, מלבד מחיר היריעות, גם את הערך החלופי של הקרקע בתקופה זו. השפעות-לוואי שליליות (כגון פגיעה במיקוריה) נמצאו רק במקרים בודדים. עם זאת, יש לערוך ניסויים ארוכי-טווח לגילוי השפעות לוואי אפשריות, במטרה למנוע את התופעות השליליות ולנצל את החיוביות. כללית, החלפה או שילוב של שיטות הדברה הם אמצעים היכולים למנוע הצטברות גורמים שליליים, והם מומלצים לאימוץ בכל ממשק הדברה.

פרק י': כיווני פיתוח עתידיים

המחקר על השינויים הפיסיקליים, הכימיים והביולוגיים המתחוללים בקרקע במהלך חיטוי-השמש ולאחריו - עשוי להניב מידע וכלים לשיפור תוצאותיו ולהרחבת השימוש בו לתנאים ולאזורים שכיום אינם מתאימים לשיטה זו. נושא המחקר שראוי להעמיק בהם או לפתחם בעתיד הם אלה:

1. ייצור חומר-ריבוי משופר. חומר-ריבוי עלול להפיץ מחוללי-מחלות לשטחים גדולים, וייצור חומר-ריבוי פטור ממחוללי-מחלה (ומפגעים אחרים) חשוב מאוד למניעת חדירתם של אלה לשטחים חדשים. ייצור פקעות, בצלים, שתילים ועוד בקרקע שעברה חיטוי-שמש - עשוי להיות כלי חשוב ביותר, בשל הותרת אוכלוסיות חיוביות של מיקרואורגניזמים



חיטוי-שמש של קרקעות אורגאניות בחולה הגדיל יבולים במידה בולטת, והיתה לו השפעה ארוכת-טווח למשך עונות מספר.
7. חיטוי-שמש להדברת מחלות-שורש במטע קיים. נמצא, שאפשר לחטא ולרפא עצים חולים במחלות-שורש, ביישום מתאים של השיטה.
8. הרחבת המחקר על השימוש בחיטוי-שמש - לצמצום נזקי דעיכת-יבולים במונוקולטורה.

פרק י"א: סיכום ומסקנות

הבנת מנגנוני הפעולה של חיטוי-השמש בתנאים שונים עשויה לספק מכשירים לשיפור השיטה ולהרחבת השימוש בה לעונות ולאזורים שאינם מיטיבם. שילוב עם שיטות הדברה אחרות הוא אמצעי נוסף להשגת המטרות הנ"ל. שיטת חיטוי-השמש אמנם פשוטה, אך אי-הקפדה על כל כללי הביצוע פוגעת ביעילותה. יתר על כן: המחקר הכרוך בפיתוח השיטה לגבי הגידולים למיניהם, ובדיקת התאמתה לאזורים חדשים - הוא מורכב, ולפעמים אף ממושך. ברם ההצלחות הרבות שהיו לשיטה זו עד כה מצביעות על הפוטנציאל הרב הטמון בה, פוטנציאל שרק חלק ממנו מומש עד כה.

יש לזכור כי שיטת חיטוי-השמש אינה פתרון-קסם לכל מדווי החקלאות, אלא אופציית הדברה נוספת. אם נשתמש בה כיאות - היא תוכל לסייע בהדברת פגעי קרקע ובהבטחת יבולים גדולים ויציבים. בעידן זה, שבו קיימת דרישה תקיפה לצמצום השימוש בחומרי הדברה, פיתוח שיטות הדברה לא-כימיות נחוץ יותר מאשר אי-פעם בעבר. ■

על-גבי השורשים.

2. הרחבת תחום ההדברה. שיפור ההדברה של פגעים עמידים יחסית לחום, והארכת התקופה שבה אפשר לבצע חיטוי-שמש על-ידי מציאת יריעות-חיפוי יעילות או טכנולוגיות משופרות שתאפשרנה חימום יעיל יותר של הקרקע, או על-ידי שילוב חיטוי-השמש בשיטות הדברה אחרות.
3. שכלול המיכשור לחיפוי רצוף של שדות שלמים. החיפוי הרצוף מונע בריחת חום לצדדים, ומאפשר קבלת טמפרטורות קרקע גבוהות יותר. יתרון נוסף: לאחר חיפוי רצוף לא נותרים מוקדי אילוח, וגדל מספר עונות הגידול שבהן אפשר ליהנות מתוצאות החיטוי.
4. פיתוח יריעות פלסטיק זולות, במטרה לצמצם את עלות הטיפול ולהתאימו גם לגידולים שאינם עתירי-הכנסה. בעבודות קודמות נמצא, שפלסטיק משומש (אם אינו קרוע) יעיל אף הוא בחיטוי-שמש. זוהי דרך להוזלה ניכרת של חיטוי-השמש, בתנאי שיש כוח-אדם זמין לטיפול ביריעות המשומשות.
5. אחד הממצאים המפתיעים הוא - הפחתת שיעורן של כמה מחלות נוף בצמחים שגדלו בקרקע לאחר חיטוי-שמש. תופעה זו נצפתה במחלת החלפת בגזר, במחלת הצרקוספורידיום באגוזי-אדמה ובמחלות נוף במלפפונים. הסברים אפשריים לתופעה זו הם אלה: הדברת מידבק ראשוני של מחולל-המחלה ששרד בשיירי צמחים שהוצנעו בקרקע; שיחרור חומרי-מזון מינראליים בקרקע, כגון אשלגן וסידן שלעתים יש להם השפעה מיטיבה על עמידות צמחים למחלות ועל עמידות מושרית. תופעה זו ראויה למחקר מעמיק לשם גילוי הפוטנציאל המלא שלה.
6. טיוב קרקעות שבהן גדילת הצמחים אטית. דוגמה:

