

חיטוי-שמש להדברת פגעים שוכני-קרקע בלא כימיקלים

י' קטן¹, א' גרינשטיין², א' גמליאל²

תקציר

מחלות צמחים הנגרמות על-ידי מחוללי-מחלות (pathogens) שוכני-קרקע גורמות נזקים לגידולים רבים. חיטוי הקרקע לפני הגידול, באמצעים פיסיקליים או כימיים, הוא אחת הדרכים להדברת מחוללי-מחלות (ואורגאניזמים מזיקים אחרים). שיטת חיטוי-שמש מבוססת על טכנולוגיה חדשנית - חימום מתון של הקרקע לפרק-זמן ארוך באופן יחסי, על-ידי חיפוי ביריעות פוליאטילן שקופות למשך ארבעה עד שישה 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 ב-40 ארצות ויותר. מנגנונים פיסיקליים (חימום), כימיים וביולוגיים מעורבים בהדברת האוכלוסיות של מחוללי המחלות במהלך חיטוי-שמש ואחריו. שכבות הקרקע העליונות מתחממות לטמפרטורות שהן קטלניות לאורגאניזמים רבים. בשכבות קרקע עמוקות יותר, שבהן הטמפרטורות אינן קטלניות, מעורבים במנגנון ההדברה גם תהליכים מיקרוביאליים. לצורך הדמיה וחיזוי קצב ההתחממות של הקרקע במהלך חיטוי-שמש פותחו מודלים שבעזרתם אפשר לקבוע אם החימום שיתקבל בתנאים גיאוגרפיים נתונים יספיק לצורך החיטוי. תוצר נוסף של חיטוי-שמש הוא "תופעת הגידול המואץ" (IGR) כלומר, כושר הצימוח והניבה של צמחים בקרקע שטופלה בחיטוי-שמש משתפר במקרים רבים. בתופעה זו מעורבים מנגנונים כימיים, פיסיקליים וביולוגיים. שילוב של חיטוי-שמש בשיטות הדברה אחרות משפר את הדברת מחוללי-מחלות, מרחיב את תחום ההדברה ומאריך את השפעתה.

לחיטוי-שמש 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 דלהלן תוארו כיווני פיתוח עתידיים של חיטוי-שמש לשיפור תוצאות החיטוי ולהרחבת השימוש בו לתנאים ולאזורים שאינם מתאימים כיום לשיטה זו.

מפרסומי מינהל המחקר החלאי, סדרה ע', 1996, מס' 74.

1 המחלקה למחלות צמחים ומיקרוביולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים, הפקולטה לחקלאות, רחובות 76100.

2 המעבדה לחקר היישום של שיטות הדברה, מינהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני בית-דגן 50250.

מבוא

מחלות צמחים הנגרמות על-ידי אורגאניזמים חיים מדבקים ("מחולל-מחלות" = pathogens) גורמות נזקים רבים לגידולים. הן פוגעות ביבול (עד כדי השמדתו) ובאיכותו. מבין מחולל-המחלות תופסים מקום חשוב שוכני-הקרע (*Pseudomonas solanacearum*; מחלות pathogens). אלה חודרים לצמח דרך חלקי התת-קרעיים ומכונים גם "גורמי מחלות-שורש". פגיעתם מתבטאת בתמותת נבטים, בהתייבשות הצמח, בנבילה, או ברקובן שורשים. מבין מחלות השורש הגורמות נזקים לגידולים החקלאיים ראוי להזכיר את המחלות האלה: מחלת הנבילה (*wilt diseases*) שגורמות פטריות-קרע, כגון מגלת (*Fusarium*) ודורת (*Verticillium*), והחיידק *Pseudomonas solanacearum*; מחלות ניוניות שגורמות נמטודות חופשיות; מחלות השורש שגורמות נמטודות יצרות-עפצים (*Meloidogyne sp.*); מחלות נבטים שגורמות הפטריות ריזוקטוניה (*Rhizoctonia solani*) ופיתיום (*Pythium*); פגיעה בשורשים ודלדול הצמח שגורמים צמחים טפיליים כגון עלקת; ועוד.

למחולל-מחלות שוכני-קרע משותפות תכונות ביולוגיות הנובעות מהתקיימותם באותו בית-גידול ואלה משמשות מפתח להדברתם. אורגאניזמים אלה מאכלסים אתרים זעירים בקרקע (רגבים, חלקיקי חומר אורגני) ומפוזרים לעומק רב; שם הם נשמרים כגופי-קיימא (*resting structures*) המאפשרים למחולל-המחלה להתקיים בתנאי סביבה עוינים (6) למשך זמן ארוך, בצורה לא-פעילה, ולפיכך קשה להדבירם בכל אתר ואתר בקרקע. פעילות מחולל-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 להתפרצות מוגברת של מחלות השורש. באופן פרדוכסלי נגרמת התעצמות (*build up*) מהירה של המחלות והחמרת נזקיהן דווקא בגידול שהוא רווחי במיוחד, מאחר שהחקלאים מרבים לגדל אותו לעתים תכופות באותה חלקה. במקרים קשים מאוד ישנה השמדה מוחלטת של הגידול. כושר ההישרדות הממושך של מחולל-המחלות הללו בקרקע והתעצמות אוכלוסיותיהם לאורך הזמן עלולים לגרום במקרים קשים להוברת הקרקע או להחלפת גידולים רווחיים רגישים בגידולים פחות רווחיים.

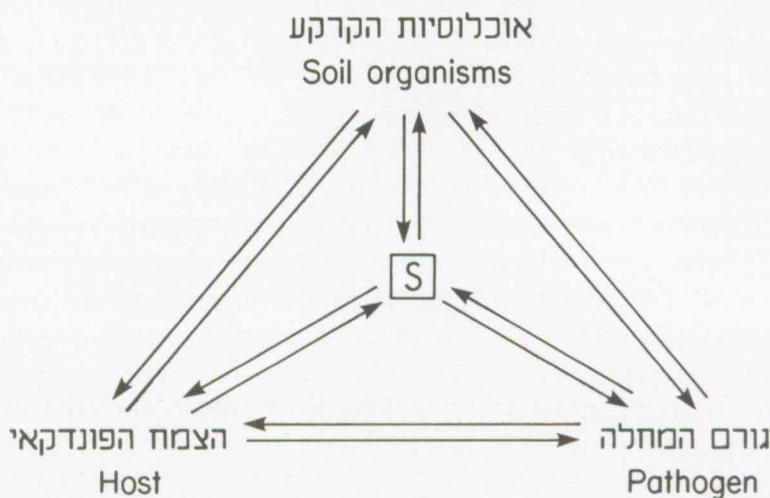
שיעור ועוצמת התחלואה במחלת-שורש כלשהי הם, כאמור, תוצאת היחסים בין שלושת הגורמים הביוטיים המצויים בקרקע ומעורבים בתהליך המחלה, שהם: האורגאניזמים שבקרקע, הצמח הנתקף וגורם-המחלה (איור 1). הכנסת גורם חדש למערכת עשויה לשנות את יחסיה-גומלין בין רכיבי המערכת וליצור שיווי-משקל חדש, ובעקבותיו - הגברה, הפחתה, או אי-שינוי עוצמת המחלה. בעבר היה מקובל להניח שהדברה יעילה של מחלות תושג רק באמצעות השמדתם המוחלטת של מחולל-המחלות בקרקע, כדי שהצמח יגדל בקרקע נקייה מהם. לגישה זו ישנם ליקויים רבים

הנובעים מהשפעות-לוואי שליליות אפשריות של אמצעי הדברה קיצוניים על אורגאניזמים מועילים. מיעוט שיטות הדברה יעילות של מחולל-מחלות בקרקע מחייב שימוש חוזר בשיטת הדברה אחת ויחידה ובכך טמונה סכנה של שחלוף מחלות או התפרצות מחלות חדשות, שגורמיהן עמידים באופן יחסי לשיטת ההדברה הנהוגה, עקב הפרת שיווי-המשקל הביולוגי (איור 1). כיום מקובלת גישת 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. החיפוש אחר שיטות הדברה נוספות שתהיינה יעילות אך בלתי מזיקות לסביבה, לרבות לאורגאניזמים המועילים, הוא על כן משימה מתמשכת.

במאה השנים האחרונות פותחו גישות ושיטות רבות, כימיות ואחרות, להדברת מחולל-מחלות שוכני-קרקע, כגון: חיטוי קרקע כלליים, או טיפולים ייחודיים בחומרי הדברה, זנים עמידים, הרכבה על כנות עמידות, הדברה ביולוגית ושימוש באמצעים פיסיקליים ואגרוטכניים. ריבוי שיטות ההדברה נובע מכך שאף אחת מהן אינה

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

Fig. 1: Relationship among factors involved in soilborne disease: pathogen, host and soil organisms.



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

S = Any external component which effects each of the three principal components of the system.

מתאימה לכל הגידולים והמחלות, או לכל המצבים. חיטוי קרקע הוא השיטה העיקרית להדברת מחלות-שורש בגידולים אינטנסיביים ועתירי הכנסה. החיטוי נועד להשמיד את גורמי המחלות לפני הזריעה או השתילה, ובכך להבטיח את הצמח מפני תקיפת מחוללי-המחלות. הקושי להגיע אל גורמי המחלות בכל אתר ואתר בקרקע ולקטול אותם מחייב שימוש באמצעים יעילים במיוחד ובעלי כושר חדירה לעומק הקרקע. אמצעים אלה יכולים להיות פיסיקליים, כמו חימום הקרקע בקיטור, או כימיים, כמו אידוי חומרים נדיפים בעלי רעילות וחדירות גבוהות (fumigation).

חיטוי הקרקע בקיטור פותח בסוף המאה הקודמת על-ידי חוקרים גרמניים ועיקר שימושו בחממות. התפרצות הפילוקסרה בגפנים באירופה בסוף המאה הקודמת גרמה לפיתוח טכנולוגיות החיטוי הכימי של הקרקע ולשימוש בחומר הנדיף פחמן דר גפריתי (CS_2). חומר זה הוחלף במחצית המאה ה-20 בחומרים יותר יעילים (ויותר רעילים) לחיטוי-קרקע, כגון כלורופיקרין, מתיל-ברומיד ומתאס-סודיום (ופאם). האידוי הכימי מדביר ביעילות פגעי קרקע והשימוש בו נפוץ בבת-צמיחה ובגידולים עתירי-הכנסה בשדה הפתוח. עם זאת, השימוש בחומרי איוד כרוך בקשיים ובמגבלות הקשורים ברעילותם הגבוהה, בעלותם הגבוהה ובדרישה לידע רב ולמיומנות-ביצוע גבוהה. יתר-על-כן, קיים סיכון מתמיד כי תכשירים אלה, שהם רעילים מאוד ולא-ברירניים, יפגעו באויבים הטבעיים של מחוללי-המחלות (אנטאגוניסטים) בקרקע, יפרו בכך את שיווי-המשקל הביולוגי בה וייצרו ריק ביולוגי. עקב כך צפויות תוצאות לוואי שליליות, כמו התפרצות מהירה של מחלות בשל התרבותן של יחידות הריבוי הבודדות של גורמי-מחלות ששרדו בקרקע, או שהגיעו אליה לאחר גמר החיטוי.

מאחר שהדברת מחוללי-המחלות בקרקע היא כורח-המציאות, נעשים מאמצים רבים לפיתוח שיטות חיטוי חלופיות, בלא שימוש בתכשירי הדברה. ברם, רק בשנת 1976 פותחה (18) בראשונה, בישראל, שיטת חיטוי שלישית - חיטוי-השמש של הקרקע (soil solarization), המבוססת על עקרון הדברה חדש - חימום מתון ולאורך זמן, ומתבצעת על-ידי ניצול קרינת השמש להדברת מחלות. גישה זו פותחה כתוצאה מתצפיות שערכו חקלאים ומדריכים בבקעת-הירדן. מאז הפרסום הראשון, ב-1976, נוסה חיטוי-השמש ב-40 ארצות ויותר על-ידי קבוצות מחקר וחוקרים רבים. התוצאות, רובן מוצלחות, פורסמו במאות פרסומים מדעיים. חיטוי-השמש כונה במאמרים הראשונים "חימום סולארי של הקרקע" (solar heating of the soil); הכינוי המקובל כיום באנגלית הוא "soil solarization". השיטה נמצאת בשימוש מעשי בארצות שונות ובהן: ישראל, יוון, איטליה, יפן, ארצות-הברית, מכסיקו, עירק ואחרות (17, 19).

פרק א': עקרונות חיטוי-השמש של הקרקע

חיטוי-השמש מבוסס על חימום הקרקע בקרני השמש. החימום מושג על-ידי

כליאת אנרגיית הקרינה של השמש תחת חיפוי פוליאיתילן (או חומר אחר, בתנאי שיהיה שקוף ואטום לאדי מים) הפרוש על קרקע מעובדת ומוכנה לזריעה. יריעת החיפוי חייבת להיות שקופה כדי לאפשר חדירת קרני האור אל הקרקע. היריעה מונעת את קירור הקרקע על-ידי מניעת הבריחה של אדיהמים, ובכך היא אוצרת את חום הנידוף. יריעות המונעות גם "בריחה" של קרינה ארוכת-גל גורמות להתחממות נוספת, אם-כי 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 וסוף 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 פוחתות לעומק הקרקע ומגיעות לרמות תת-קטלניות כבר בעומק של 30-40 ס"מ (איור 2). למרות זאת נקטלים כמה גורמי מחלות בכל עומקו של חתך הקרקע הרטוב. (בארץ נבדק הדבר עד לעומק של 70 ס"מ, ובקליפורניה - עד 120 ס"מ.) חיטוי יעיל ייתכן גם בחודשים יותר קרירים, אך ביצעו מחייב תנאים מיוחדים.

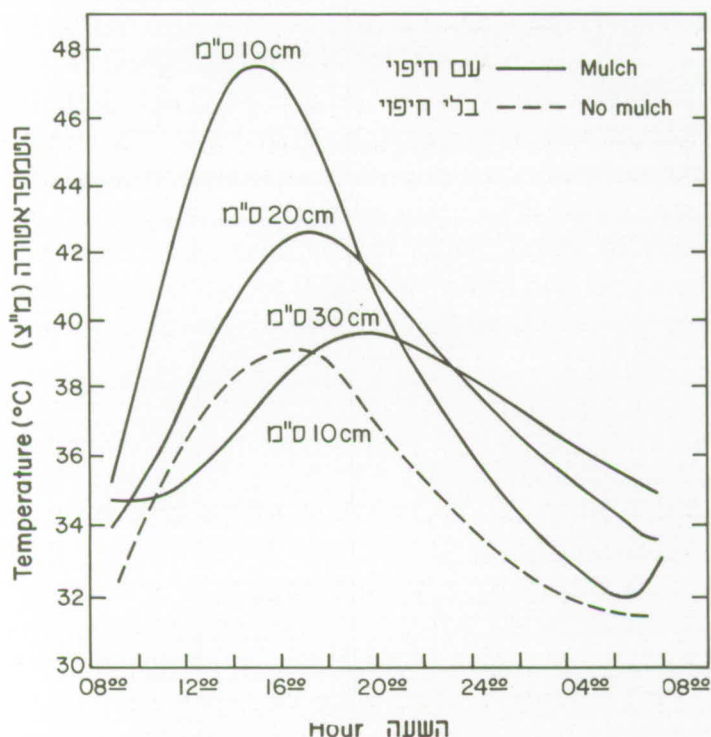
פרק ב': הדברת מחלות ועשבי בר-על-ידי חיטוי-שמש

חיטוי-השמש מדביר ביעילות מספר רב של מחלות-שורש ועשבי בר, כפי שנמצא בניסויים רבים שנערכו מאז שנות ה-70 בישראל ובארצות-הברית, בטיפוסי קרקע ובאזורים שונים. הפחיתה בשיעור מחלות-השורש היתה גבוהה 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 (ראה להלן):

חיטוי-השמש יעיל בקטילת מחוללי-מחלה רבים ובהם: פטריות הקרקע דוררת (*Verticillium*), ריזוקטוניה, פיתיום, מגלת (*Fusarium*), *Rosellinia*, *Pyrenochaeta* (שמינים שלה גורמים את מחלת השורש-הוורוד בבצל ואת מחלת השעמת בעגבניות), פיטופתורה, קשיונה (*Sclerotinia*) וקשיון רולפסיי. מבין הנמטודות חשוב לציין את *Ditylenchus* (התוקפת שום ובצל), *Pratylenchus* (התוקפת בין השאר תפוחי-אדמה וחיטה) *Heterodera* (שמינים שלה תוקפים חיטה וציפורן). כמו כן דווח על הדברת הצמח הטפיל עלקת ואקרית הקרקע *Rhizoglyphus*. מובן שקיימים מחוללי-מחלה שאינם מודברים בתנאים רגילים על-ידי חיטוי-שמש כגון הפטריה *Macrophomina* (21). במקרה של הנמטודה יוצרת-העפצים *Meloidogyne* נתקבלו תוצאות שונות: הדברה מלאה, הדברה חלקית ואף היו מקרים של הגברת המחלה.

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).

Fig. 2: Soil temperature during solarization (mulch) at depths of 10, 20, and 30 cm, compared with bare soil (no mulch) at a depth of 10 cm.



Figures 2-5 and plate 1 reprinted with permission of CRC Press, Boca Raton, FL., from *Soil Solarization*, J. Katan and J.E. DeVay (eds), pp 29, 79, 98, 164-165. Copyright 1991.

הדבר עשבים היא אחת התוצאות החזותיות הבולטות של חיטוי-שמש (8, 23). רוב העשבים החד-שנתיים מודברים ביעילות בשיטה זו אם כי נמצאו גם יוצאים מן הכלל כגון דיבשה. עשבים רב-שנתיים רבים, כמו יבלית ודורת ארס צובא המתרבים מזרעים, מודברים אף הם על-ידי חיטוי-שמש. אחרים, כמו גומא הפקעים וקייצת, אינם מודברים בדרך כלל באופן יעיל. השפעתו החיובית של חיטוי-שמש בהדברת פגעים ובהגדלת יבולים נמשכת

לעיתים שתי עונות ויותר לאחר החיטוי (7, 17, 24). תופעה זו נמצאה בכותנה (בהדברת המחלות מגלת ודורת), בבצל (מחלת השורש-הוורוד), בחיטה (במחלה הנגרמת על-ידי הנמטודה (*Heterodera*), בפול (עלקת) ובמקרים רבים נוספים. רוב הצלחות חיטוי-השמש תועדו בארצות בעלות אקלים חם ויבש בקיץ עם שיעור קרינה גבוה (850 ואט למ"ר או יותר), 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 (7).

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

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

שיעור התחלואה וחומרת המחלה בצמחים תלויים ישירות בכמות המידבק (אינוקולום = יחידות ההדבקה) של מחולל-המחלה ומושפעים, כאמור, מרמת הפעילות המיקרוביאלית הכללית בקרקע, מרגישות הצמח לגורם-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 הייתה מלווה בהפחתה משמעותית של אוכלוסיית מחולל-המחלה בשכבות קרקע עמוקות. למשל, נמצא שחיטוי-שמש מפחית בשיעור של 95%-100 את אוכלוסיית הפטריה הפאתוגנית דורת (*V. dahliae*), עד לעומק של 70 ס"מ לפחות. ככל שמשך החיטוי ארוך יותר - כך נקטל מחולל-המחלה לעומק רב יותר. הוכח כי במקרים רבים משתתפים בהדברת מחולל-המחלות מנגנונים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים.

התחממות הקרקע היא האפקט הבולט ביותר של חיטוי-שמש. הטמפרטורות המושגות בשכבת הקרקע העליונה (כ-40-45 מ"צ עד לעומק של כ-20 ס"מ) הן קטלניות לרוב מחולל-המחלות. מחקרים לבירור הקשר בין הטמפרטורה ובין שיעור הקטילה של מיקרואורגאניזמים שונים נערכו עוד בתחילת המאה 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 (22). 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 (7). קטילה זו הצביעה על מעורבותם של תהליכים ביולוגיים בהדברת גורמי-מחלות במהלך חיטוי-השמש. תהליכים אלה פוגעים במחולל-המחלות ומפחיתים את שיעורי התחלואה.

אחד מהמנגנונים הביולוגיים הללו הוא "מנגנון ההחלשה" (weakening effect) (9).

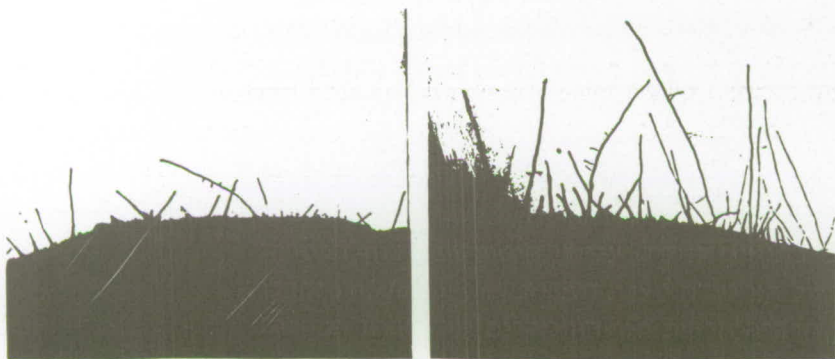
כאשר מחולל-מחלה נחשף לטמפראטורות תת-קטלניות הוא נפגע ונחלש, למרות שהטמפראטורות אינן מספיקות לקטילתו המיידית. כתוצאה מהחלשתו הוא פגיע יותר לתקיפת מיקרואורגאניזמים המצויים בקרקע. ואכן, לאחר חשיפת אוכלוסיות של מחולל-המחלה לחום תת-קטלני נמצאה דעיכה מתמשכת של אוכלוסייתו בקרקע. כמו כן נמצא כי אנטאגוניסטים מסוימים מתרבים בקרקע לאחר חיטוי-שמש, חלקם מפני שהם סבילים יותר לטמפראטורות גבוהות וחלקם משום שהם מנצלים ביעילות או במהירות את "החלל הביולוגי" שנוצר בקרקע, כמו חומרי מזון שהשתחררו לאחר חיטוי-השמש (10, 11).

במקרים אחרים נמצא שחימום-קרקע גרם לשבירה חלקית או מלאה של "הפונגיסטאזיס" - מנגנון "תרדמה" טבעי של גופיקיימא של פטריות, הקיים בכל הקרקעות ומאפשר להם להישרד בהעדר פונדקאי מתאים ולהיות מוגנים מפני האויבים הטבעיים. בעקבות "שבירת" הפונגיסטאזיס נובטים גופי-הקיימא ובכך הופכים לרגישים יותר לתקיפות אנטאגוניסטים בקרקע (15).

תופעה מעניינת מאוד הקשורה בחיטוי-שמש היא "השריית תנגודת" ביולוגית (induced suppressiveness) נגד פלישת מחולל-מחלות לקרקעות שעברו חיטוי זה. נמצא שהתבססות מחדש של אורגאניזמים בקרקעות המחוטות היא איטית לעומת התבססותם בקרקעות הלא-מחוטות, ובמיוחד לעומת קרקעות שחוטו בקיצוניות (12, 15). כתוצאה מכך שיעור התחלואה נמוך יותר בקרקע שעברה חיטוי-שמש ואולחה לאחר מכן בגורם-המחלה (כפי שנמצא לגבי מגלת בעגבניות וקשיון רולפסי בצמחי שעועית). בתמונה 1 נראה דיכוי הגידול של תפטיר הפטריה *Rosellinia* בקרקע שעברה חיטוי-שמש.

תמונה 1: דיכוי צמיחת תפטיר של הפטריה הפתוגנית *Rosellinia necatrix* בקרקע שעברה חיטוי-שמש (משמאל) לעומת קרקע בלא חיטוי-שמש (מימין) (צילום מיקרוסקופי).

Plate 1: Suppression of hyphal growth of the pathogenic fungus *Rosellinia necatrix* in solarized soil (left) compared with non-solarized soil (right) (microscope photo).



השפעת חיטוי-השמש על אוכלוסיותיהן של חיידקים מועילים מקבוצות FP (fluorescent pseudomonads), בקרקע ובריוספירה נחקרה בישראל ובמקומות אחרים (10). לחיידקים אלה יכולת הדברה ביולוגית של מחוללי-מחלות רבים והשפעה חיובית על גדילת צמחים, וחברות ביוטכנולוגיות בעולם עושות כיום מאמצים לייצר תכשירים מסחריים של חיידקים אלה לבקטור צמחים.

עקב חיטוי-השמש חלק גדול מאוכלוסיות המיקרואורגאניזמים בקרקע קטן לרמות נמוכות מאוד. אוכלוסיית חיידקי FP, שהיא רגישה מאוד לטמפרטורה גבוהה, מצטמצמת לרמות נמוכות עוד יותר ואף על פי כן מצליחים החיידקים לנצל את הפרשות השורשים ביעילות ולאכלס את הריוספירה לפני שהאוכלוסיות האחרות מתאוששות (11). אכלוס זה מתרחש כבר בשלבים הראשונים של נביטת הזרעים והצצת הנבטים (10), ויש לו השפעות חיוביות רבות בהשריית תגודת ביולוגית בקרקע (12).

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 במיקרואורגאניזמים מועילים. למשל, נמצאו מקרים שחיטוי-שמש פגע במיקורזיה בגזר, ועקב כך חל עיכוב בהתפתחות הגזר הצעיר, אך מאוחר יותר נראתה התאוששות מלאה של הגידול.

פרק ד': גידול מואץ בקרקעות שטופלו בחיטוי-שמש

לעתים קרובות משתפרת התפתחות הצמחים בקרקע שחוטאה על-ידי חימום או בתכשירים כימיים, גם אם לא היו בה מחוללי-מחלות מוכרים. ממצא זה דווח עוד בסוף המאה הקודמת. תופעה זו נקראת "תגובת הגידול המואץ" (increased growth response, IGR) (5, 10). בין המנגנונים (ביוטיים ואי-ביוטיים) העשויים להסביר תופעה זו אפשר לציין את אלה: 1. שחרור מוגבר של חומר-ימזון מינראליים בקרקע המחוטאת - הוכח כי מיצויים של קרקע שנתגלה בה עידוד צימוח, מעודדים אף הם את גידול הצמחים; 2. הדברת מחוללי-מחלות זוטרים (minor pathogens); 3. עידוד מיקרואורגאניזמים מועילים; 4. פירוק או נטרול 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 גדילת הצמחים. נמצא כי הפרשות השורשים של צמחים שגדלים בקרקע שעברה חיטוי-שמש מכילות יותר תרכובות אמינו ופחות סוכרים מאשר אלה של צמחים שגדלו בקרקע רגילה (11). חיידקי FP נמשכים יותר להפרשות אלה ועל כן יש להן תפקיד באיכלוס הנמרץ של השורשים בחיידקים המועילים. יש להוסיף כי לתבדידים של חיידקים אלה יש כושר לדכא מחוללי-מחלות עיקריים

וּזוּטְרִים (12). חִידָקֵי FP מֵאֲכֻלָּסִים בִּהְצִלְחָה אֶת הֶרְקֵמָה הַפְּנִימִית שֶׁל הַשּׁוֹרֶשׁ וְכָל הַנֶּרָאָה הֵם מְגִינִים עַל הַשּׁוֹרֶשׁ מִפְּנֵי מִיקְרוֹאֹרְגָּנִיזְמִים עֹוִינִים. תֵּהִלִּיכִים בִּיּוֹטִיִּים וְאִי-בִּיּוֹטִיִּים כָּאֵלֶּה מֵתֻרְחָשִׁים כִּנְרָאָה בִּקְרָקֶע בִּשְׁעַת חִטּוֹי־הַשֶּׁמֶשׁ וְתוֹרְמִים בְּסוֹפֶר-שֶׁל־דָּבָר בִּמְשׁוּלָב לְשִׁיפּוֹר הַצִּימוּחַ מֵעַל לְשִׁיעוֹר הַנִּיתָן לְהַסְבֵּר עַל-יְדֵי קְטִילַת מַחֹלֶל-הַמַּחְלוֹת. לְתוֹפַעַת ה־IGR יֵשׁ הַשְׁלָכוֹת כָּלִכְלִיּוֹת פּוֹטֶנְצִיָּאלִיּוֹת חֲשׁוּבוֹת, אֲךָ טֶרֶם פּוֹתְחוּ שִׁיטּוֹת לַחִיּוֹי עֹוצְמַת הַתּוֹפַעָה וְשִׁיעוֹר תּוֹסַפַּת הַיָּבּוּל הַנוֹבַעַת מִמֶּנָּה.

פֶּרֶק ה': דְּגָמִים (מוֹדֵלִים) לְהַדְמִיַּת חִטּוֹי-שֶׁמֶשׁ וְלַחִיּוֹי יַעִילוֹתוֹ

מִדִּידוֹת שֶׁל טֵמְפֵּרָטוּרוֹת הַקְּרָקֶע וְרִישוּמָן (רָאָה אִיּוֹר 2) מִשְׁמָשִׁים מְכַשִּׁיר עִיקָרִי לְלִימּוֹד קֶצֶב הַהִתְחַמְמוֹת שֶׁל הַקְּרָקֶע. בִּשְׁנֵים הָאֲחֵרוֹנוֹת פּוֹתְחוּ דְּגָמִים הַמֵּאֲפָשִׂים חִיּוֹי שֶׁל מִידַת הַהִתְחַמְמוֹת בְּתַנָּאִים מֵטֵאוֹרֹלוֹגִיִּים וְקְרָקֵעִים שׁוֹנִים. פְּרוֹפ' יִצְחָק מֵרֶר (מֵהַפְּקוּלָטָה לַחֻקְלָאוֹת בְּרַחוּבוֹת) וְחוּבְרִיו פִּיתְחוּ דְּגָמִים מִמוֹחֲשָׁבִים הַמֵּאֲפָשִׁים הַדְּמִיָּה וְחִיּוֹי שֶׁל תֵּהִלִּיכִי הַהִתְחַמְמוֹת הַקְּרָקֶע תַּחַת חִיפּוֹי בִּירֵעוֹת פְּלֶאֶסְטִיק (20). בְּאִיּוֹר 3 אֲפָשֶׁר לִרְאוֹת הַתֵּאֲמָה טוֹבָה מְאֹד בֵּין הַטֵּמְפֵּרָטוּרוֹת הַחֲזוֹיוֹת עַל-פִּי הַדָּגָם וּבֵין אֵלֶּה שֶׁנִּצְפּוּ בְּמִדִּידוֹת יִשְׁרִירוֹת, בְּשִׁלוּשַׁת עֹומְקֵי הַקְּרָקֶע שֶׁנִּבְדְּקוּ. לְשֵׁם חִיּוֹי הַהִתְחַמְמוֹת יֵשׁ לְהַזִּין אֶת הַמַּעֲרַכַּת בְּנִתּוֹנֵי הָאֻקְלִים שֶׁבִּסְבִּיבָהּ וּבִנְתּוֹנֵים הַפִּיּוֹיִים שֶׁל הַקְּרָקֶע וְשֶׁל הַחוֹמֵר הַפְּלֶאֶסְטִי הַמִּשְׁמָשׁ לַחִיפּוֹי. הַדְּגָמִים תִּרְמוּ רַבּוֹת לְמַחְקֵר בַּחִטּוֹי שֶׁמֶשׁ וּבַחִיּוֹי יַעִילוֹתוֹ, וְהֵם מֵאֲפָשִׁים קִבְּלַת מִידַע אֹודוֹת הַמָּקוֹם וְהַמוֹעֵד שֶׁבוּ יִצְלִיחַ הַחִיטּוֹי.

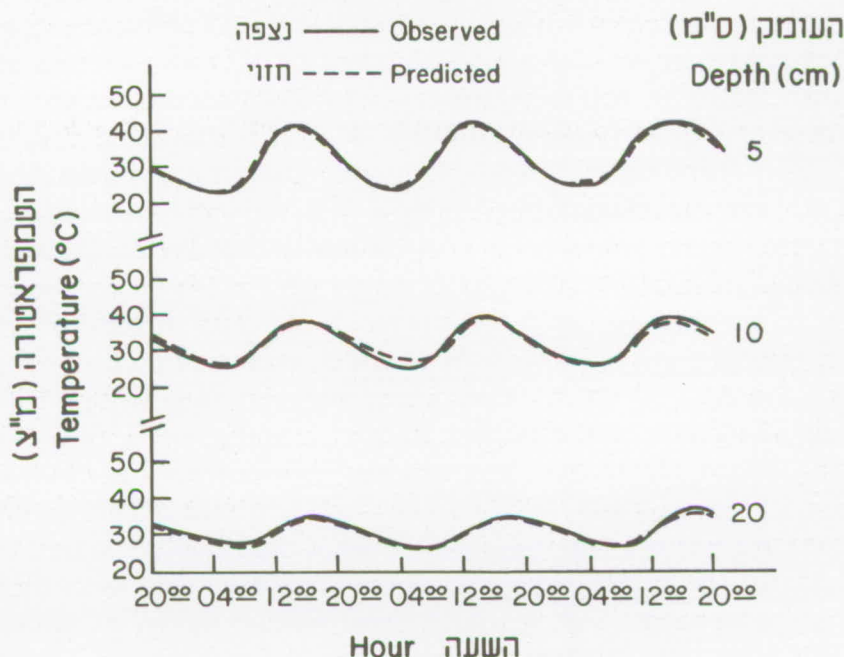
פֶּרֶק ו': שִׁילּוּב שֶׁל חִטּוֹי-שֶׁמֶשׁ בְּשִׁיטּוֹת הַדְּבָרָה אַחֲרוֹת

לְשִׁילּוּב שִׁיטּוֹת הַדְּבָרָה יֵשׁ יִתְרוֹנוֹת פּוֹטֶנְצִיָּאלִיִּים רַבִּים כִּגּוֹן: הַגְּבֵרַת יַעִילוֹת הַהַדְּבָרָה, הִרְחַבַּת תַּחוּם הַהַדְּבָרָה כִּנְגַד פְּגָעִים שׁוֹנִים, הַדְּבֵרַת פְּגָעִים שְׂאִינִם מוֹדְבִּירִים בְּשִׁיטָה אַחַת, וְקִבְּלַת הַדְּבָרָה לְטוּחַ אֶרֶץ. כֹּאשֶׁר הַשִּׁילּוּב הוּא בְּשִׁיטּוֹת שְׂאִינִן כִּימִיּוֹת, נוֹסֵף גַּם הַמִּימָד שֶׁל הַפְּחַתַּת הַמִּינוֹן שֶׁל חוֹמְרֵי הַהַדְּבָרָה. צִמְצוּם הַשִּׁימוּשׁ בְּכִימִיקָלִים מֵהוּוֶה גּוֹרֵם מֵרְכִזִּי בְּמִימֶשֶׁק הַהַדְּבָרָה הַמְשׁוּלָּבַת (IPM). שִׁילּוּב שֶׁל חִטּוֹי-שֶׁמֶשׁ בְּשִׁיטּוֹת הַדְּבָרָה אַחֲרוֹת עֲשׂוֹי לְצִמְצוּם אֶת מַגְבֻּלוֹתֵינוּ וְלִקְצֹר אֶת מִשְׁךְ הַחִיטּוֹי אֹו לְהַרְחִיב אֶת אֲפִשְׁרוּיּוֹת הַשִּׁימוּשׁ בּוּ בַּעֲנוֹת קִרְיֹוֹת יוֹתֵר. עֶקְרוֹן הַהַחלָשָׁה שֶׁתּוֹאֵר לַעִיל הוּא רִכִּיב חֲשׁוֹב בְּשִׁילּוּב שִׁיטּוֹת הַהַדְּבָרָה. נִיִּסוּיִים רַבִּים שֶׁנַּעֲשׂוּ בְּשִׁילּוּב חִטּוֹי-שֶׁמֶשׁ בְּשִׁיטּוֹת שׁוֹנוֹת, כִּגּוֹן: בַּחוֹמְרֵי הַדְּבָרָה בְּמִינוֹן מוֹפְחַת, בְּזִינִים עֲמִידִים, אֹו בְּמַדְבִּירִים בִּיּוֹלוֹגִיִּים, הַצְּבִיעוּ עַל הַדְּבָרָה מְשׁוּפֶּרֶת. בְּאַחֲרֹנָה דּוּחוֹ תּוֹצָאוֹת מִבְּטִיחוֹת שֶׁל שִׁילּוּב חִטּוֹי-שֶׁמֶשׁ בְּזִבְל־עוֹפּוֹת אֹו בְּשִׁירֵי כְּרוֹב (14). בְּמַעֲרַכַּת זוֹ מוֹצָנֵעַ חוֹמֵר אֹורְגָּנִי לִפְנֵי הַחִיטּוֹי, וְתֵהִלִּיךְ הַחִיטּוֹי וְהַהִתְחַמְמוֹת הַקְּרָקֶע מֵאִיצִים אֶת

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 מרר).

Fig. 3: Daily soil temperature variation, predicted and observed at depths of 5, 10 and 15 cm during solarization. Rehovot, June 1978 (20).



פירוק החומר ואת שיחרורן של תרכובות נדיפות רעילות לאוויר הקרקע. עם תרכובות אלה נמנים: אמוניה, כהלים שונים, אלדהידים, תרכובות גופרית ועוד (14). שילוב בין החימום ובין התרכובות הנדיפות תורם לקטילה משופרת של מחוללי מחלות. לדוגמה, בחיטוי-שמש של קרקע שהוצנע בה זבל-עופות נמצאה קטילה יעילה מאוד של נמטודות עפצים, שחיטוי-שמש לבדו אינו יעיל די הצורך בקטילתן.

פרק ז': יישום 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 ותחוחה אך לא אוורירית מדי. קלטור עמוק, תיחוח או דיסוק, ולבסוף מעגילה בינונית יבטיחו קרקע מתאימה לחיטוי. יש להקפיד לבל יישארו רגבים על פני הקרקע. יש להשלים את כל פעולות העיבוד, לרבות זיבול אורגאני, לפני החיפוי (16). בתנאי רטיבות מתגברת מאוד הולכת החום לעומק הקרקע, ועל כן יש להשקות את השדה לעומק של 50-60 ס"מ כפעולה אחרונה לפני החיפוי בפלאסטיק. במקרה שהקרקע מאולחת בעומק רב (כמו אחרי חריש עמוק במיוחד) רצוי להרטיב לעומק של 70-80 סנטימטרים. כמו כן רצוי להשקות בהמטרה ולא בטפטוף, כדי להבטיח הרטבה אחידה ככל האפשר. בקרקעות כבדות וחרסיתיות מומלץ להשקות כשבוע לפני הטיפול ולהשלים את הרטבת השכבה העליונה בהשקיה קלה נוספת, שלושה ימים לפני החיפוי.

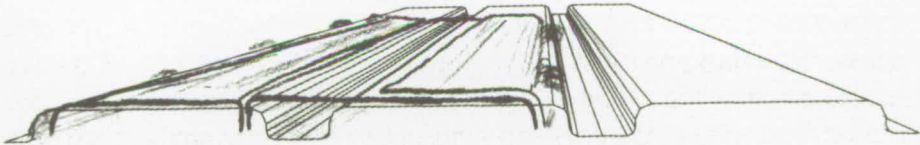
החיפוי ייעשה מיד כשיהיה אפשר לעלות על השטח ולעבוד בו לאחר ההרטבה, כדי להבטיח תכולת מים מרבית. דבר זה אפשר לבצע: בקרקע חולית - מיד בגמר ההשקיה; בקרקע בינונית - כיומיים אחריה; ובקרקע כבדה - כשלושה ימים לאחר השקיית ההשלמה. בדרך כלל אין צורך בהשקיות השלמה במשך החיטוי, פרט לקרקעות קלות מאוד או בטוף. נמצא כי שטח מכוסה כיאות אינו מאבד יותר מ-4% מהמים שבקרקע במשך חודש תמים (בתנאי אוגוסט, בקרקע חולית במיוחד). החיפוי ייעשה ידנית, או במיכון מתאים. כל יריעת פלאסטיק שקופה ואטומה למים תתאים למטרה זו. בארץ נפוץ במיוחד השימוש בפוליאתילן. אפשר להשתמש ביריעה הדקה ביותר של חומר זה הואיל והיא נמצאה מתאימה בחוזקה המכאני. לחיפוי ידני תתאים יריעת פוליאתילן רגיל בעובי 30-40 μm . מאחר שיריעות החיפוי חייבות להישאר שלמות במשך כ-40 ימים בעונת הקיץ, המתאפיינת בקרינת UV מוגברת, יש להשתמש רק ביריעות המכילות מרכיב להגנה בפני קרינה זו. בחיפוי ידני אפשר להשתמש ביריעות משומשות, גם אם שקיפותן נפגמה במקצת, בתנאי שחוזקן המכאני לא נפגם ואין בהן חורים. יש להבטיח את עיגון היריעות בשדה גם בתנאי רוח חזקה על-ידי הטמנת שולי היריעות בקרקע, ורצוי ששולי היריעה ייצרו "כיס" שיתמלא באדמה תוך כדי ההטמנה (16).

בחיטוי-שמש בולטת תופעת אפקט השוליים. טמפרטורות הקרקע בסמוך לשולי היריעה נמוכות מאלה המרוחקות 1 מ' ויותר מהשוליים, ולפיכך גם הדברת הפגעים אינה שלמה בסמוך לשולי היריעה. על כן רצוי לבצע חיפוי רציף על כל החלקה על-ידי הדבקת יריעה אחת לרעותה. אין לבצע זאת ביריעה רחבה מאוד, מכיוון שיריעות כאלה נשלפות 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).

ישנן מכוונות לחיפוי בפסים שאפשר להשתמש בהן להדברת מחלות בצמחים המאופיינים בשורשים קצרים והגדלים בערוגות במשך עונה אחת בלבד (איור 5). ברוב המקרים נדרש חיפוי רציף לצורך השגת חיטוי יעיל. קיימות מכוונות הפורשות יריעות צרות (עד לרוחב כ-4 מ'), תוך עיגון צידן האחד בהטמנה בקרקע, וחיבור צידן

איור 4: ציור סכמאטי של חיפוי רציף, בביצוע ידני.

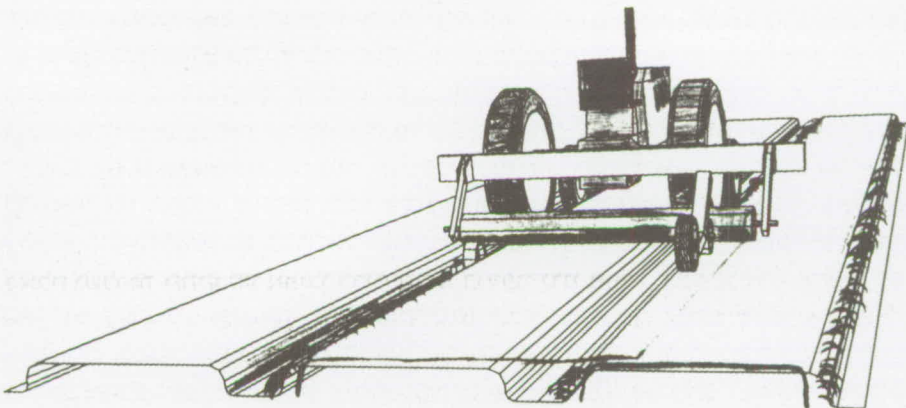
Fig. 4: Schematic diagram of continuous mulching (manual). Two sheets are buried together in the same trench, and then each sheet is pulled towards the opposite side.



השני ליריעה שנפרשה במהלך הקודם (איור 5). החיבור יכול להתבצע בהלחמה, או בדבקים מיוחדים, המחזיקים מעמד למשך התקופה הנדרשת לחיטוי-השמש. בתום החיטוי, לאחר הסרת הפלאסטיק, נותר שטח מחוטא. מרגע זה ואילך אין לבצע פעולות עיבוד (מחוץ לשבירת הקרום העליון, קלטור לעומק 20 ס"מ, או תיחוח לעומק 10 ס"מ). יש גם להקפיד, כמובן, שחומר הריבוי שהוכנס לשדה יהיה חופשי מגורמי מחלות.

איור 5: ציור סכמאטי של חיפוי רציף ממוכן.

Fig. 5: Schematic diagram of mechanical continuous mulching.



פרק ח': חיטוי-שמש לצורך תברואה (סאניטאציה)

התברואה מתרכזת בהשמדת המידבק הראשוני, במניעת חדירתו לחלקות או בהרחקתו משטח חקלאי. שיירי צמחים חולים מכילים בדרך כלל כמויות גדולות של גופי ריבוי של מחולל-מחלות והם משמשים מקור עיקרי של מידבק ראשוני. גבעולי עגבניות או תפוח-אדמה נגועים בדוררת מכילים עשרות ואף מאות אלפי קשיונות בגרם רקמה של גבעול נגוע. חיטוי-שמש יכול לשמש מכשיר להכחדת מקורות המידבק ולתברואה. במרוקו נמצא שעמודי ההדליה של עגבניות נושאים את פטריית הדידמלה ומשמשים מקור למידבק הראשוני של מחולל-מחלה זה, שהוא מפגע קשה בגידול העגבניה. חיטוי-שמש של עמודי ההדליה הדביר את הדידמלה ביעילות רבה ומנע את אילוח השטח בעונה הבאה (4). אפשר להשתמש בחיטוי-שמש להשמדת מידבק בחומר ריבוי נגוע כגון פקעות. במיוחד קשה התברואה של שרידי צמחים המכילים מידבק של מחולל-מחלות ומזיקים שונים הנישאים בחלל החממה על גבי עמודים וחלקי מבנה אחרים. בעבודות שנעשו ביפאן ובישראל נמצא שסגירת החממה מעלה את טמפרטורת האוויר ל-60 מ"צ ואף יותר. לפיכך, סגירת החממה למשך שבועות מספר היא אמצעי תברואה יעיל ונוח במיוחד. פעולת החיטוי העיקרית בחממה נעשית בחום יבש, ועל כן נדרש משך חימום ארוך באופן יחסי לצורך קטילה יעילה של גורמי 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 בצורה קלה באופן יחסי. 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, לתקופה של חודש 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 לטובתנו. כללית, החלפה או שילוב של שיטות הדברה הם אמצעים היכולים למנוע הצטברות גורמים שליליים, והם מומלצים לאימוץ בכל מימשק הדברה.

פרק י': כיווני פיתוח עתידיים

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

1. ייצור חומר ריבוי משופר. חומר ריבוי עלול להפיץ מחולל-מחלות לשטחים גדולים וייצור חומר ריבוי חופשי ממחולל-מחלה (ומפגעים אחרים) חשוב מאוד למניעת חדירתם של אלה לשטחים חדשים. ייצור פקעות, בצלים, שתילים וכו' בקרקע שעברה חיטוי-שמש עשוי להיות כלי חשוב במיוחד, בשל הותרת אוכלוסיות חיוביות של מיקרואורגניזמים על גבי השורשים.
2. הרחבת תחום ההדברה. שיפור ההדברה של גורמי-פגעים העמידים באופן יחסי לחום, והרחבת משך-התקופה שבה אפשר לבצע חיטוי-שמש, על-ידי מציאת יריעות-חיפוי יעילות במיוחד, או טכנולוגיות משופרות (3) שתאפשרנה חימום יעיל יותר של הקרקע, או על-ידי שילוב חיטוי-השמש בשיטות הדברה אחרות.
3. שיכלול המיכשור לחיפוי רציף של שדות שלמים. החיפוי הרציף מונע בריחת חום לצדדים ומאפשר קבלת טמפרטורות קרקע גבוהות יותר. יתרון נוסף: לאחר חיפוי רציף לא נותרים מוקדי אילוח, וגדל מספר עונות הגידול שבהן אפשר ליהנות מתוצאות החיטוי (16).
4. פיתוח יריעות פלאסטיק זולות במטרה להפחית את עלות הטיפול ולהתאימו גם לגידולים שאינם עתירי-הכנסה. בעבודות קודמות נמצא שפלאסטיק משמש (אם אינו קרוע) יעיל אף הוא בחיטוי-שמש (2). זוהי דרך להוזלה ניכרת של חיטוי-השמש בתנאי שיש כוח-אדם זמין לטיפול ביריעות המשומשות.
5. אחד המימצאים 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; שחרור חומרי-מזון מינראליים בקרקע, כגון אשלגן וסידן אשר יש להם לעתים השפעה מיטיבה על עמידות צמחים למחלות ועל עמידות מושרית. תופעה זו ראויה למחקר מעמיק לשם גילוי הפוטנציאל המלא שלה.
6. טיוב קרקעות שבהן גידול הצמחים הוא איטי: לדוגמה, חיטוי-שמש של קרקעות אורגאניות בחולה הגביר יבולים במידה בולטת והיתה לו השפעה ארוכת-טווח למשך עונות מספר.
7. חיטוי-שמש להדברת מחלות-שורש במטע קיים (1). נמצא שאפשר לחטא ולרפא עצים חולים במחלות-שורש ביישום מתאים.
8. הרחבת המחקר על השימוש בחיטוי-שמש לצמצום נזקי דעיכת-יבולים במונקולטורה (13).

פרק י"א: סיכום ומסקנות

הבנת מנגנוני הפעולה של חיטוי-השמש בתנאים שונים עשויה לספק מכשירים לשיפור השיטה ולהרחבת השימוש בה לעונות ולאזורים שאינם מיטביים. שילובו בשיטות הדברה אחרות מספק מכשיר מבטיח נוסף להשגת המטרות הנ"ל. שיטת חיטוי-השמש היא פשוטה, ולמרות זה, איהקפדה על כל כללי הביצוע פוגעת ביעילותו. יתר על כן, המחקר הכרוך בפיתוח השיטה בעבור כל גידול, ובדיקת התאמתה לאזורים חדשים הוא מורכב ולפעמים אף ממושך. ברם, ההצלחות הרבות שהיו עד כה לשיטה זו מצביעות על הפוטנציאל הרב הטמון בה, אשר רק חלק ממנו מומש עד כה.

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

רשימת הספרות

1. Ashworth, Jr., L.J. and Gaona, S.A. (1982) Evaluation of clear polyethylene mulch for controlling Verticillium wilt in established pistachio nut groves. *Phytopathology* 72: 243-246.
2. Avissar, R., Naot, O., Mahrer, Y. and Katan, J. (1986) Field aging of transparent polyethylene mulches: Influence on the effectiveness of soil heating. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 205-209.
3. Ben-Yephet, Y., Stapleton, J.J., Wakeman, R.J. and DeVay, J.E. (1987) Comparative effect of soil solarization with single and double layers of polyethylene film on survival of *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*. *Phytoparasitica* 15: 181-187.
4. Besri, M. and Diop, M. (1985) Control of *Didymella lycopersici* in tomato by storing the supports in plastic tunnels: new application of solar heating or solarization. *Rev. Hortic.* 58: 99-102
5. Chen, Y., Gamliel, A., Stapleton, J.J. and Aviad, T. (1991) Chemical, physical, and microbial changes related to plant growth in disinfested

- soils. *in*: Katan, J. and DeVay, J.E. [Eds.] Soil Solarization. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 103-129.
6. Cook, R.J. and Baker, K.F. (1983) The Nature and Practice of Biological Control of Plant Pathogens. American Phytopathological Society, St. Paul, MN.
 7. Davis, J.R. and Sorensen, L.H. (1986) Influence of soil solarization at moderate temperatures on potato genotypes with differing resistance to *Verticillium dahliae*. *Phytopathology* 78: 1956-1961.
 8. Elmore, C.E. (1991) Weed control by soil solarization. *in*: Katan, J. and DeVay, J.E. [Eds.] Soil Solarization. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 61-72.
 9. Freeman, S. and Katan, J. (1988) Weakening effect of propagules of *Fusarium* by sublethal heating. *Phytopathology* 87: 1656-1661.
 10. Gamliel, A. and Katan, J. (1991) Involvement of fluorescent pseudomonads and other microorganisms in increased growth response of plants in solarized soils. *Phytopathology* 81: 494-502.
 11. Gamliel, A. and Katan, J. (1992) Influence of seed and root exudates on fluorescent pseudomonads and fungi in solarized soils. *Phytopathology* 82: 320-327.
 12. Gamliel, A. and Katan, J. (1993) Suppression of major and minor pathogens by fluorescent pseudomonads in solarized and non- solarized soils. *Phytopathology* 83: 75-86.
 13. Gamliel, A., Hadar, E. and Katan, J. (1993) Improvement of growth and yield of *Gypsophila paniculata* by solarization and fumigation of soil or container medium in continuous cropping systems. *Plant Disease* 77: 938-993.
 14. Gamliel, A. and Stapleton, J.J. (1993) Characterization of antifungal volatile compounds evolved from solarized soils amended with cabbage residues. *Phytopathology* 83: 899-905.
 15. Greenberger, A., Yogev, A. and Katan, J. (1987) Induced suppressiveness in solarized soils. *Phytopathology* 77: 1663-1667.
 16. Grinstein, A. and Hetzroni, A. (1991) The technology of soil solarization. *in*: Katan, J. and DeVay, J.E. [Eds.] Soil Solarization. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 159-170.
 17. Katan, J. and DeVay, J.E. (1991) Soil Solarization. CRC Press, Boca Raton, FL. 267 p.

18. Katan, J., Greenberger, A., Alon, H. and Grinstein, A. (1976) Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soilborne pathogens. *Phytopathology* 76: 683-688.
19. Katan, J., Grinstein, A., Greenberger, A., Yarden, O. and DeVay, J.E. (1976) The first decade (1976-1986) of soil solarization (solar heating): a chronological bibliography. *Phytoparasitica* 15: 229-255.
20. Mahrer, I. (1979) Prediction of soil temperature of a soil mulched with transparent polyethylene. *J. Appl. Meteorol.* 18: 1263-1267.
21. Mihail, J.D. and Alcorn, S.M. (1984) Effects of soil solarization on *Macrophomina phaseolina* and *Sclerotium rolfsii*. *Plant Dis.* 68: 156-159.
22. Pullman, G.S., DeVay, J.E., Garber, R.H. and Weinhold, A.R. (1981) Soil solarization effects on *Verticillium dahliae*, *Pythium* spp., *Rhizoctonia solani* and *Thielaviopsis basicola*. *Phytopathology* 71: 954-959.
23. Rubin, B. and Benjamin, A.D. (1983) Solar heating of the soil: effect on weed control and on soil-incorporated herbicides. *Weed Sci.* 31: 819-825.
24. Tjamos, E.C. and Paplomatas, E.J. (1988) Long term effect of solarization in controlling verticillium wilt of globe artichokes in Greece. *Plant Pathol.* 37: 507-515.