

היעלמות מואצת של פעילות קוטלי עשבים מעכבי ALS (מקבוצת הסולפונילאוריאה) בקרקע.

Accelerated dissipation of sulfonylurea herbicides in the soil

מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות ע"י:

יעל לאור – המחלקה למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז מחקר נווה יער. חנן איזנברג – המחלקה למחלות צמחים וחקר עשבים, מנהל המחקר החקלאי, מרכז מחקר נווה יער.

ברוך רובין – המכון למדעי הצמח וגנטיקה בחקלאות ע"ש ר. ה. סמית, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש ר. ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות.

Yael Laor, Institute of Soil Water and Environmental Sciences, Agricultural Research Organization, Neve Ya'ar Research Center, P.O. Box, 1021, Ramat Yishay, 30095
;Email: Laor@volcani.agri.gov.il

Hanan Eizenberg, Phytopathology and Weed Research, ARO, Neve Ya'ar Research Center, P.O. Box, 1021, Ramat Yishay, 30095. Email: Eizenber@agri.gov.il

The R.H. Smith Institute of Plant Science & Genetics in Agriculture, Faculty of Agriculture, Food and Environment, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot 76100. Email: Rubin@mail.huji.ac.il

תקציר: קוטלי עשבים מקבוצת הסולפונילאוריאה נמצאים בשימוש במגוון גידולים בחקלאות. סולפוסולפורון, קוטל עשבים מקבוצה זו, משמש להדברה בררנית של עלקת מצרית ועשבים רעים אחרים ביישום קדם-שתילה מתוחח בגידול עגבניות לתעשייה, אך יעילות ההדברה בחלקות שונות אינה אחידה. מטרת מחקר זה היא זיהוי הגורמים המשפיעים על פעילות ופירוק סולפוסולפורון וקוטלי עשבים סולפונילאוריאה בקרקע. פירוק ונדידה של סולפוסולפורון נבחנה בתנאים מבוקרים בשלוש קרקעות, מחוות עדן, גד"ש כלנית ועין חרוד, המייצגות אזורי גידול שונים. קרקעות אלו נבדלו באופן מובהק בקצב פירוק סולפוסולפורון, תלות הפירוק בטמפרטורה ומשך הפעילות השאריתית, כאשר קצב הפירוק בחוות עדן היה מהיר עד פי 2 מזה שנמדד בעין חרוד. בחינת השפעת יישומים חוזרים של סולפוסולפורון וסולפונילאוריאה אחרים בניסויים בתנאים מבוקרים העלתה כי קיים פוטנציאל של הגברה של הפירוק, וירידה של עד 35% במשך הפעילות בקרקע, אך בניסויים בתנאי שדה פוטנציאל זה לא התממש. פוטנציאל הנדידה של סולפוסולפורון בחתך הקרקע לא נבדל במובהק בין שלושת הקרקעות, אך נמצא כי החומר נייד יחסית בקרקע. לאור פוטנציאל הנדידה הגבוה ותלות פירוק קוטל העשבים בטמפרטורה נבחנה ההשפעה של מזג האוויר על גורל החומר בקרקע באמצעות הדמיות ממוחשבות בתכנת Hydrus 1D. מההדמיות עולה כי לתנאי מזג האוויר השפעה מכרעת על פיזור קוטל העשבים בחתך הקרקע וכפועל יוצא על יעילות ההדברה, כאשר רק ב- 32% מהתרחישים שנבחנו צפויים ריכוזים אופטימליים להדברת עלקת. על מנת להבטיח יעילות הדברה מרבית של עלקת בעגבניות לתעשייה יש להצמיד את יישום קוטל העשבים סולפוסולפורון לשתילה ולשקול יישום נוסף לאחר השתילה, בעיקר במקרים של ריבוי משקעים ו/או טמפ' גבוהה לאחר היישום.

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים

תוכן עניינים

1.....	מבוא
2.....	מטרות המחקר
2.....	עיקרי הניסויים ותוצאות המחקר
2.....	פירוק סולפוסולפורון בקרקעות שונות
4.....	השפעת יישום חוזר של קוטלי עשבים סולפונילאוריאה על פירוק סולפוסולפורון בקרקע
6.....	נדידה של סולפוסולפורון בקרקעות שונות
8.....	ניטור גורל סולפוסולפורון בחלקות משקיות
9.....	הדמיה ממוחשבת של גורל סולפוסולפורון בחלקות משקיות בתנאי מזג אוויר משתנים
12.....	דיון
16.....	רשימת ספרות מצוטטת

מבוא:

קוטלי עשבים מהקבוצה הכימית סולפונילאוריאה מעכבים ביוסינתזה של חומצות אמינו מסועפות בצמח ע"י עיכוב האנזים Acetolactate synthase (ALS). הם נמצאים בשימוש נרחב בחקלאות ומשמשים להדברת עשבים רעים במגוון גידולים, ביניהם חיטה, תירס, עגבנייה, כותנה ותפוח אדמה. קבוצת קוטלי עשבים זו מאופיינת בהדברת עשבים יעילה במינונים נמוכים - גרמים בודדים לדונם לעומת עשרות ומאות גרמים לדונם בקבוצות קוטלי עשבים אחרות - ובנוסף בפעילות שאריתית ארוכת טווח. סולפונילאוריאה הינם חומצות חלשות ולכן לחומציות הקרקע השפעה רבה על האינטראקציה והשאריתיות של קוטלי עשבים אלו בקרקע: ככל ש-pH הקרקע גבוה יותר יש פחות ספיחה למרכיבי הקרקע, ובהתאמה נדידת סולפונילאוריאה לשכבות קרקע עמוקות מוגברת. בנוסף, בקרקעות חומציות שאריתיות חומרים אלו נמוכה, עקב הידרוליזה כימית מהירה, לעומת שאריתיות גבוהה יותר בקרקעות ניטרליות/בסיסיות בהן ההידרוליזה הכימית איטית ועיקר הפירוק הינו מיקרוביאלי^{1,2}.

הבדלים בגורל קוטל עשבים, בשל קצבי פירוק שונים או הבדלים בדפוס הנדידה בחתך הקרקע, עשויים להשפיע על יעילות ההדברה של עשבים רעים בקרקעות שונות. קצבי פירוק שונים של קוטלי עשבים עשויים להתפתח על רקע חשיפה קודמת לאותו החומר או חומרים אחרים מאותה קבוצה כימית (פירוק מואץ). תופעה זו תועדה בעשרות מקרים ייחודיים של חומרי הדברה מקבוצות כימיות שונות³, אך לגבי קוטלי עשבים מקבוצת הסולפונילאוריאה המידע על פירוק מואץ חסר והידע הקיים מתבסס על ניסויים שבוצעו בשיטות העשרה ובידוד מיקרואורגניזמים מפרקים⁴⁻⁷, אשר אינן מייצגות נאמנה את תנאי השדה. הבדלים בדפוס הנדידה בקרקעות שונות עשויים לנבוע מהבדלים במאפיינים ההידראולים של הקרקע וכן מהבדלים בתנאי מזג האוויר (משקעים, התאדות וטמפרטורה) המהווים את הכוח המניע לנדידת החומר בקרקע. תנאי מזג האוויר משפיעים גם על קצב הפירוק המיקרוביאלי של קוטל העשבים עקב השפעתם על רטיבות וטמפרטורת הקרקע.

לגורל החומר, והפעילות השאריתית הנגזרת ממנו, משמעות אגרונומית רבה: מחד, פעילות שאריתית ארוכת טווח מספקת הדברה במהלך העונה, ללא צורך ביישום חוזר. מאידך, שאריתיות עלולה להגביל את מחזור הגידולים עקב רגישות של חלק מהגידולים לקוטלי עשבים. דוגמה ספציפית להשלכות האגרונומיות של שאריתיות היא השימוש בקוטלי עשבים סולפוסולפורון בישראל: סולפוסולפורון (מוניטור, 75% גר, אדמה-אגן בע"מ) הינו קוטל עשבים מקבוצת הסולפונילאוריאה המורשה להדברה בררנית של עשבים רעים בגידול חיטה ולהדברת הצמח הטפיל עלקת בגידול עגבניות לתעשייה. משיקולים אגרוטכניים, החומר מיושם כטיפול קדם שתילה מתוחח, לעיתים קרובות מספר שבועות לפני השתילה לצורך הדברת העלקת הנובטת במהלך התבססות הגידול, תוך הנחה שהשאריתיות הגבוהה של סולפוסולפורון

בקרקה תאפשר הדברה יעילה של עלקת גם לאחר השתילה⁸. מאידך, השאריתיות הגבוהה של סולפוסולפורון מגבילה את מחזור הגידולים עקב רגישות גבוהה של גידולים רבים (דוגמת תירס וסורגום) לשאריות קוטל העשבים בקרקע, ועפ"י תווית התכשיר המסחרי מוניטור בעונה העוקבת ליישום ניתן לגדל עגבנייה וחיטה בלבד.

מטרות המחקר:

מטרת העל של מחקר זה היא זיהוי הגורמים המשפיעים על פעילות ופירוק סולפוסולפורון וקוטלי עשבים נוספים מקבוצת הסולפונילאוריאה בקרקע.

מטרות ספציפיות:

- א) לימוד תהליכי ספיחה וקצבי פירוק (הידרוליזה ופירוק מיקרוביאלי) של סולפוסולפורון בקרקעות מודל בתנאי מעבדה.
- ב) בחינת ההשפעה של שימוש חוזר בקוטלי עשבים סולפונילאוריאה על התפתחות תהליכי פירוק מואץ בקרקע.
- ג) מעקב אחר גורל (fate) החומר בקרקע (פירוק/נדידה) בחלקות שדה מרוססות, כתלות בתכונות הקרקע, אקלים והיסטוריית טיפולי קוטלי עשבים.
- ד) פיתוח יכולת חיזוי פירוק (דה-אקטיבציה) סולפוסולפורון בקרקע, אופטימיזציה של יישום התכשיר בממשק 'פקעית אביבי' והתאמתו לחלקות בהם קיים חשש לפירוק מואץ.

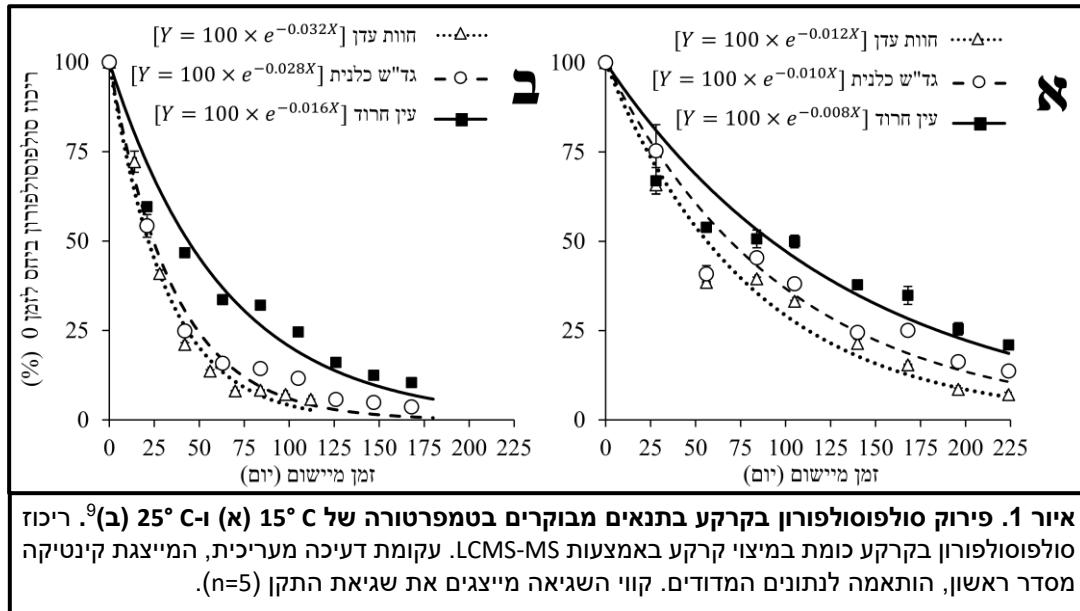
עיקרי הניסויים ותוצאות המחקר:

טבלה 1. מאפייני הקרקעות שנחקרו במסגרת ניסויים בתנאים מבוקרים.

גיר %	EC ds/m	חרסית %	סילט %	חול %	ח. אורגני %	pH	אזור	משק
41.3	1.4	49.5	31.8	18.8	1.9	7.8	עמק בית שאן	חוות עדן
9.7	1.9	49.9	31.6	18.6	1.0	7.8	עמק יזרעאל	עין חרוד
23.4	1.0	48.9	34.6	16.6	1.7	7.6	עמק החולה	גד"ש כלנית

פירוק סולפוסולפורון בקרקעות שונות: קצב הפירוק של סולפוסולפורון נבחן בשלוש קרקעות, אשר נבחרו על מנת לייצג אזורי גידול שונים בישראל בהם מגדלים עגבניות לתעשייה. הקרקעות אופיינו כקרקעות חרסיתיות, דומות מבחינת חומציות והרכב המכני, אך שונות מבחינת תכולת החומר האורגני והגיר (טבלה 1). לצורך בחינת קצב הפירוק, סולפוסולפורון יושם בריכוז 80 ng g^{-1} לדגימות קרקע, בנפח נזל המתאים לתנאי רטיבות של 70% מקיבול שדה, והקרקע הודגרה בחושך בטמפ' של 25°C או 15°C . הפירוק של סולפוסולפורון בקרקע בטמפרטורה קבועה נמצא מתאים לראקציה מסדר ראשון עם השפעה מובהקת של סוג הקרקע והטמפרטורה על קבוע קצב הפירוק (איור 1). בטמפרטורה של 15°C נמדד קבוע קצב

פירוק k של $0.010 (\pm 0.001)$, $0.008 (\pm 0.001)$, ו- $0.012 (\pm 0.001)$ days⁻¹ בקרקע מעין חרוד, גד"ש כלנית וחוות עדן, בהתאמה (איור 1א'). לעומת זאת, בטמפרטורה של 25° C קבוע קצב הפירוק עלה בשלושת הקרקעות, בעוד הסדר בין הקרקעות נותר בעינו- קרי קצב פירוק מהיר בקרקע חוות עדן, בינוני בכלנית ואיטי בעין חרוד (איור 1ב')⁹.



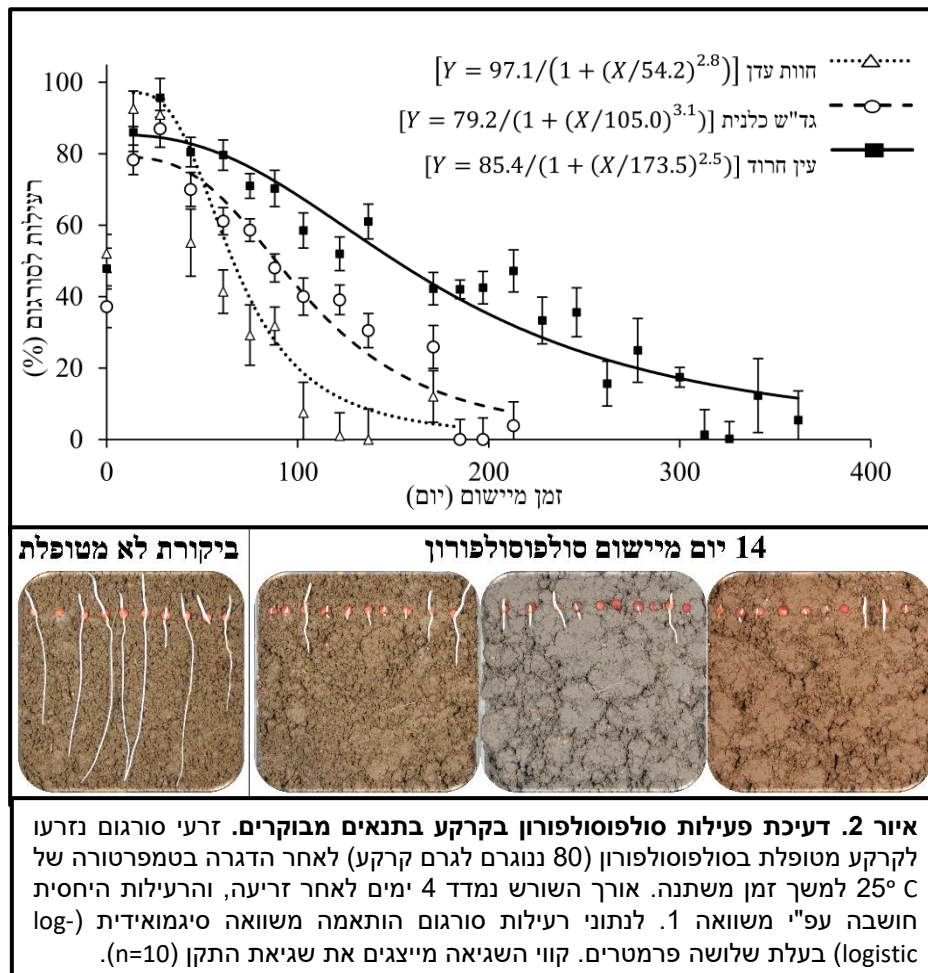
על מנת לקשור את קצב הפירוק לפעילות ביולוגית של סולפוסולפורון, נבחנה הדעיכה בפעילותו השאריתית בקרקע באמצעות מבחן ביולוגי. לצורך כך יושם קוטל העשבים בריכוז 80 ng g⁻¹ לדגימות הקרקע, ונערך מעקב אחר פעילות סולפוסולפורון ע"י זריעת סורגום אחת לשבועיים והשוואת התארכות השורשים בקרקע מטופלת להתארכות בקרקע לא מטופלת. ניסוי ראשוני העלה כי רעילות מרבית גררה פחיתה של 85% בהתארכות השורשים⁹. לכן, נתוני הרעילות בניסוי בו נבחן משך הפעילות השאריתית חושבו באמצעות המשוואה הבאה:

$$[1] \quad P = 100 \times \frac{I}{85}$$

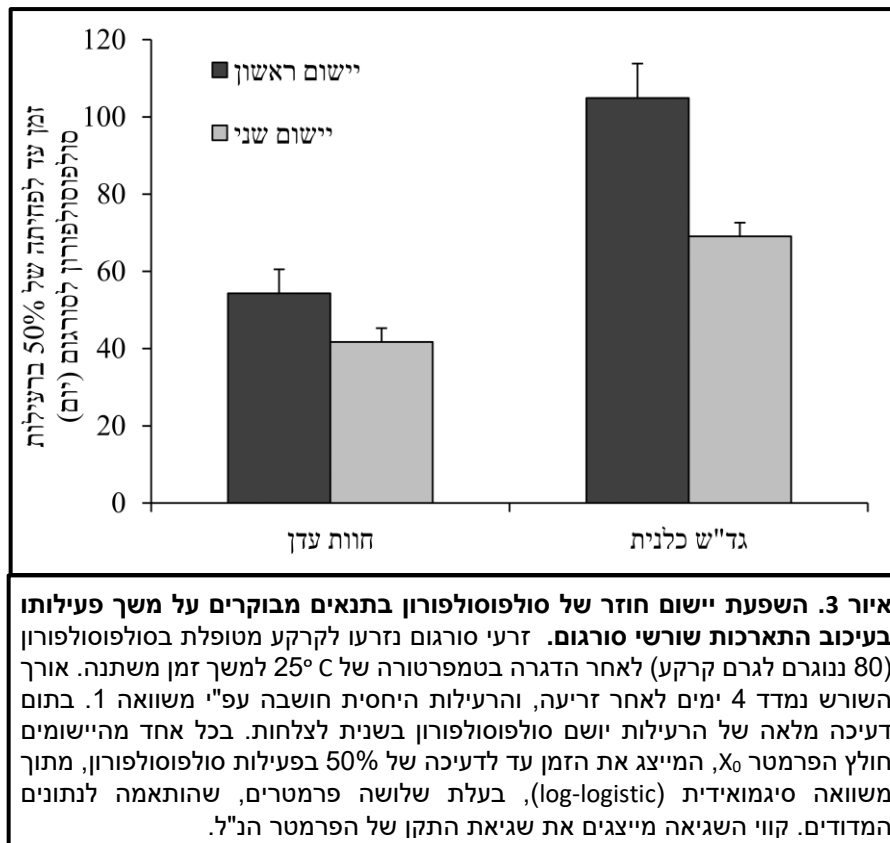
בה P מייצגת את הרעילות היחסית לשורשי סורגום (%) ו- I את מידת העיכוב הנמדדת ביחס לביקורת לא מטופלת (%).

בניסוי דעיכת הפעילות נמצאו הבדלים ניכרים במשך הפעילות הביולוגית של סולפוסולפורון בקרקע (איור 2) התואמים את ממצאי קצב הפירוק של החומר (איור 1)⁹. לנתוני הרעילות לשורשי סורגום הותאמה עקומה סיגמואידית בעלת שלושה פרמטרים (log-logistic), ונמצאו הבדלים ניכרים בפרמטר $X_0 (\pm SE)$ המייצג את הזמן עד לדעיכה של 50% ברעילות, עם ערכים של $173.5 (\pm 13.5)$, $105.0 (\pm 8.9)$ ו- $54.2 (\pm 6.2)$ יום בקרקע מעין חרוד, גד"ש כלנית וחוות עדן, בהתאמה. ניסוי זה כלל השוואה במשך הפעילות השאריתית בין קרקע עם וללא

היסטוריה של שימוש בסולפוסולפורון, במהלך חמש השנים שקדמו לדגימה, בכל אחד מהאתרים. להיסטוריה זו לא נמצאה השפעה מובהקת על משך הפעילות השאריתית⁹.



השפעת יישום חוזר של קוטלי עשבים סולפונילאוריא על פירוק סולפוסולפורון בקרקע: על מנת לבחון את ההשפעה הפוטנציאלית של שימוש חוזר בסולפוסולפורון על קצב פירוק בקרקע, ומשך הפעילות השאריתית הנובעת מכך, בוצע יישום חוזר של קוטל העשבים לדגימות הקרקע בהן נערך המעקב אחר הפעילות השאריתית המופיע באיור 2. ביישום חוזר לקרקע מעין חרוד נראה כי משך הפעילות השאריתית ביישום שני של סולפוסולפורון דומה לזו שנצפתה ביישום הראשון (מידע לא מוצג). עם זאת, בקרקע זו הייתה תנודתיות רבה ברעילות לסורגום עם הזמן ולכן לא ניתן היה להתאים עקום ולחלץ מדד כמותי להשוואה. בהשוואה בין יישום ראשון לשני בקרקע מגד"ש כלנית נמצאה ירידה מובהקת בזמן הדרוש לפחיתה של 50% ברעילות סולפוסולפורון לסורגום (-35%) המעידה על השפעה פוטנציאלית של יישום חוזר בהגברת קצב הפירוק בקרקע זו, מאידך בקרקע מחוות עדן השפעת היישום החוזר לא הייתה מובהקת (איור 3).



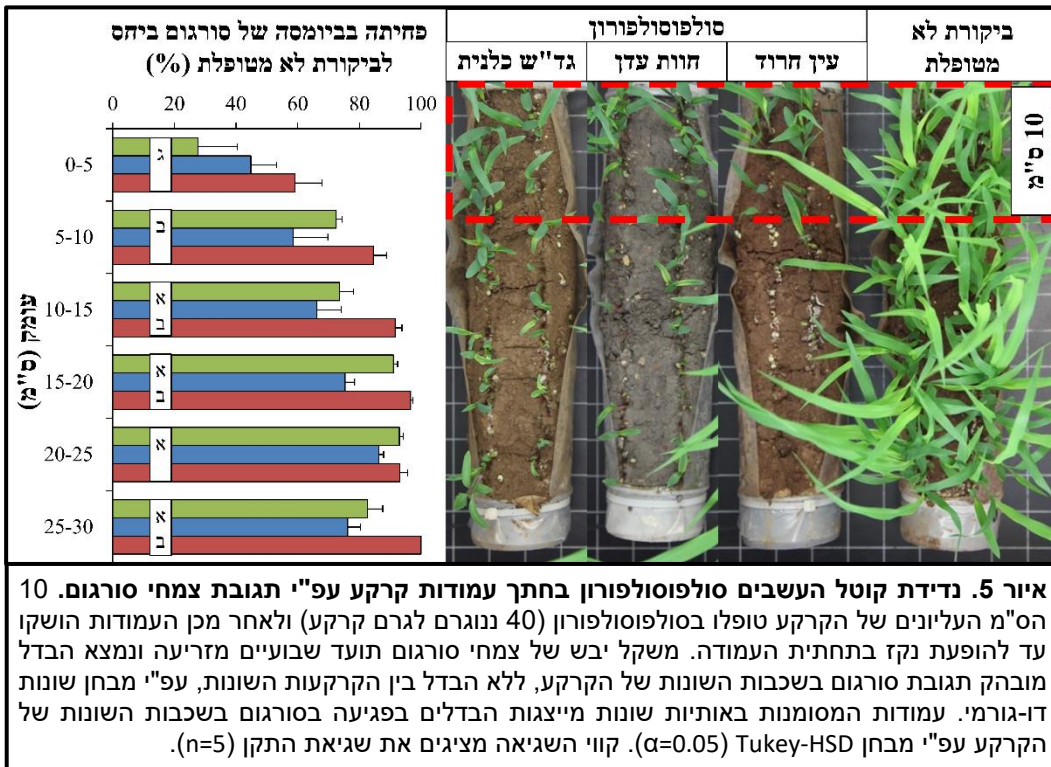
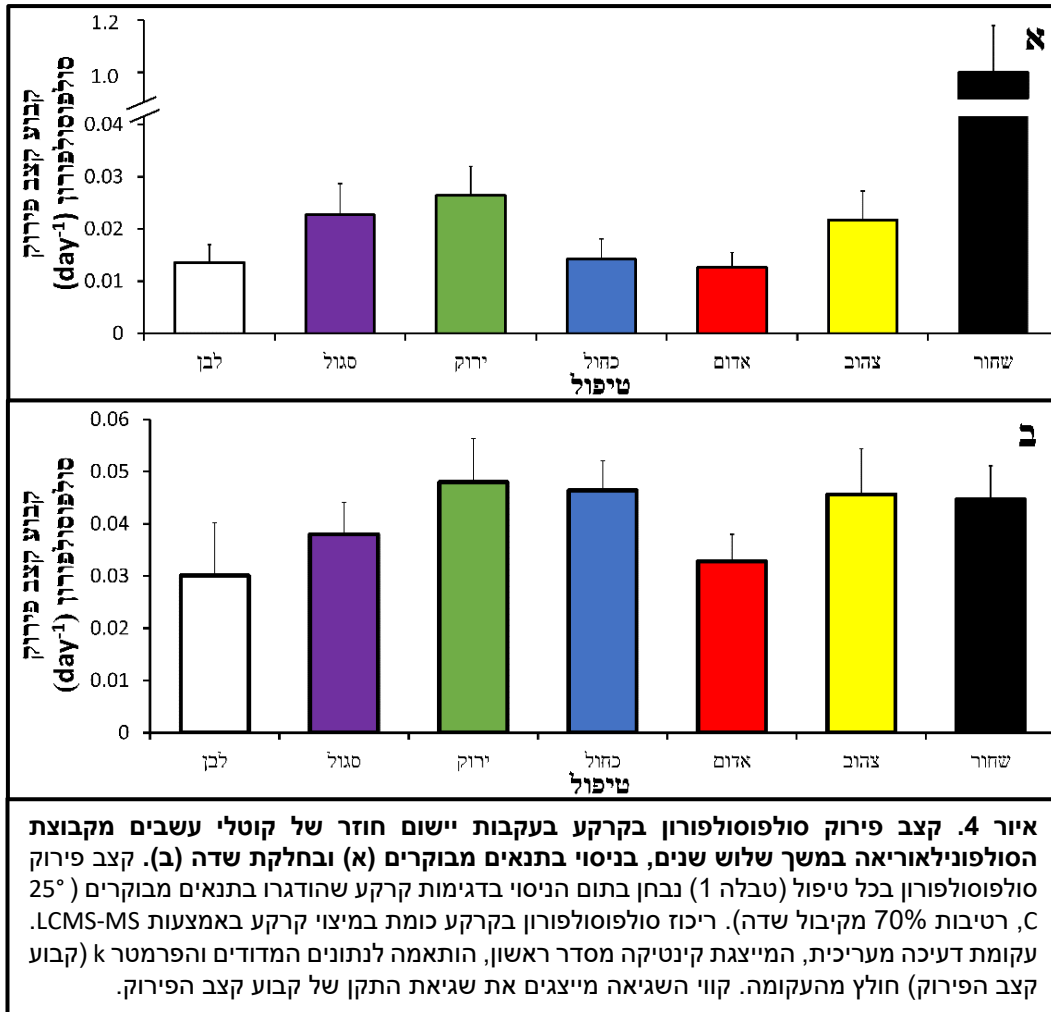
השפעת יישום חוזר של קוטלי עשבים שונים מקבוצת הסולפונילאוריאה על קצב פירוק סולפוסולפורון בקרקע נבחנה בניסוי רב שנתי, בו יושמו קוטלי עשבים שונים לקרקע שהודגרה בתנאים מבוקרים (ללא גידול) או לחלקת שדה בנווה יער (טבלה 2). בתום שלוש שנות הניסוי, נבחן קצב פירוק סולפוסולפורון בדגימות קרקע מהטיפולים השונים, ע"י יישום קוטל העשבים בריכוז 80 ng g^{-1} לדגימות הקרקע, בנפח נוזל המתאים לתנאי רטיבות של 70% מקיבול שדה, והדגרה בחושך בטמפ' של 25°C למשך 6 שבועות. ריכוז סולפוסולפורון בקרקע כומת במיצוי קרקע אחת לשבועיים באמצעות LCMS-MS. בכל טיפולי קוטלי העשבים, הן בתנאים מבוקרים והן בחלקת השדה, פירוק סולפוסולפורון בקרקע תאם לראקציה מסדר ראשון, וקבוע קצב הפירוק חושב עבור כל אחד מהטיפולים (איור 4). בתנאים מבוקרים, לא נמצאה השפעה מובהקת לטיפול קוטלי העשבים השונים על קבוע קצב הפירוק של סולפוסולפורון, להוציא הטיפול השחור שכלל טיפולים במינונים מופחתים של קוטלי העשבים פורמסולפורון, טריפלוקסיסולפורון וסולפוסולפורון, אשר קבוע קצב הפירוק בעקבותיו עלה פי 7.1 לעומת קצב הפירוק בטיפול הביקורת (איור 4א'). לעומת זאת, בחלקות השדה לטיפול השחור ולשאר טיפולי קוטלי העשבים לא הייתה השפעה מובהקת על קבוע קצב הפירוק (איור 4ב').

טבלה 2. מפתח טיפולים בניסוי יישום חוזר של קוטלי עשבים מקבוצת הסולפונילאוראה במשך שלוש שנים בניסוי בתנאים מבוקרים ובחלקת שדה.

סוג הטיפול	שם הטיפול	שנה א'				שנה ב'		שנה ג'
		גידול*	**טיפול קוטלי עשבים (חומר פעיל)	גידול*	טיפול קוטלי עשבים (חומר פעיל)	גידול*	טיפול קוטלי עשבים (חומר פעיל)	
טיפולים מוגברים	צהוב	תירס < כותנה	4.5 ג'/ד' פורמסולפורון + 1.25 ג'/ד' רימסולפורון < 2.25 ג'/ד' טריפלוקסיסולפורון	חיטה	3.75 ג'/ד' סולפוסולפורון	עגבניות תעשייה	+5.62 +3.75 3.75 ג'/ד' סולפוסולפורון	
	אדום	תירס < כותנה	4.5 ג'/ד' פורמסולפורון + 1.25 ג'/ד' רימסולפורון < 2.25 ג'/ד' טריפלוקסיסולפורון	חיטה	3.75 ג'/ד' סולפוסולפורון	עגבניות תעשייה	+2.5 2.5 ג'/ד' רימסולפורון	
	כחול	תירס < כותנה	4.5 ג'/ד' פורמסולפורון + 1.25 ג'/ד' רימסולפורון < 2.25 ג'/ד' טריפלוקסיסולפורון	חיטה	1.5 ג'/ד' כלורסולפורון	עגבניות תעשייה	+2.5 2.5 ג'/ד' רימסולפורון	
טיפולים מופחתים	שחור	תירס < כותנה	4.5 ג'/ד' פורמסולפורון < 1.12 ג'/ד' טריפלוקסיסולפורון	חיטה	2.25 ג'/ד' סולפוסולפורון	עגבניות תעשייה	+5.62 3.75 ג'/ד' סולפוסולפורון	
	ירוק	תירס < כותנה	4.5 ג'/ד' פורמסולפורון < 1.12 ג'/ד' טריפלוקסיסולפורון	חיטה	2.25 ג'/ד' סולפוסולפורון	עגבניות תעשייה	1.25 ג'/ד' רימסולפורון	
	סגול	תירס < כותנה	4.5 ג'/ד' פורמסולפורון < 1.12 ג'/ד' טריפלוקסיסולפורון	חיטה	0.75 ג'/ד' כלורסולפורון	עגבניות תעשייה	1.25 ג'/ד' רימסולפורון	
ביקורת	לבן	תירס < כותנה	קוטלי עשבים לא-בררניים (גלייפוסט/ גלופוסינאט) ועשויים ידניים	חיטה	קוטלי עשבים לא-בררניים (גלייפוסט/ גלופוסינאט) ועשויים ידניים	עגבניות תעשייה	קוטלי עשבים לא-בררניים (גלייפוסט/ גלופוסינאט) ועשויים ידניים	

* הניסוי בחלקת השדה כלל גידולים שונים (כמפורט בטבלה). הניסוי בתנאים מבוקרים נעשה בקרקע ללא גידול.
** טיפולי פורמסולפורון ורימסולפורון בשנה א' לא יושמו בחלקת השדה בלבד ולא יושמו בניסוי בתנאים מבוקרים.

נדידה של סולפוסולפורון בקרקעות שונות: בחינה השוואתית של נדידת סולפוסולפורון נערכה בעמודות קרקע בתנאים מבוקרים, תוך שימוש במבחן ביולוגי כמדד לריכוז החומר לאורך חתך העמודה. לצורך כך, שרוולי פוליאטילן בקוטר 8 ס"מ ובאורך של 30 ס"מ מולאו בקרקע מחוות עדן, עין חרוד או גד"ש כלנית, עשרת הס"מ העליונים של הקרקע עורבבו היטב עם קוטל העשבים סולפוסולפורון לקבלת ריכוז של 40 ng g^{-1} והעמודות הוצבו בחדר גידול בטמפ' של 25°C . העמודות הורטבו עד הופעת נקז בתחתית העמודה. לאחר 24 שעות הוצבו העמודות במאוזן וסורגום נזרע לאורך העמודה. שבועיים מזריעת סורגום, נקצרו הצמחים ותועד משקלם היבש. ההשפעה של סולפוסולפורון לאורך חתך הקרקע הייתה דומה בשלושת הקרקעות, ללא הבדל מובהק בין קרקעות בתגובת צמחי סורגום (איור 5). בחלק העליון של העמודות (0-5 ס"מ) תגובת צמחי סורגום הייתה נמוכה, בהשוואה לתגובה בשאר חלקי העמודה (5-30 ס"מ), עובדה המהווה עדות לנדידה של סולפוסולפורון מהחלק העליון של העמודה, דילול ריכוזו באזור המטופל והצטברותו ב-2/3 התחתונים של העמודות (איור 5).

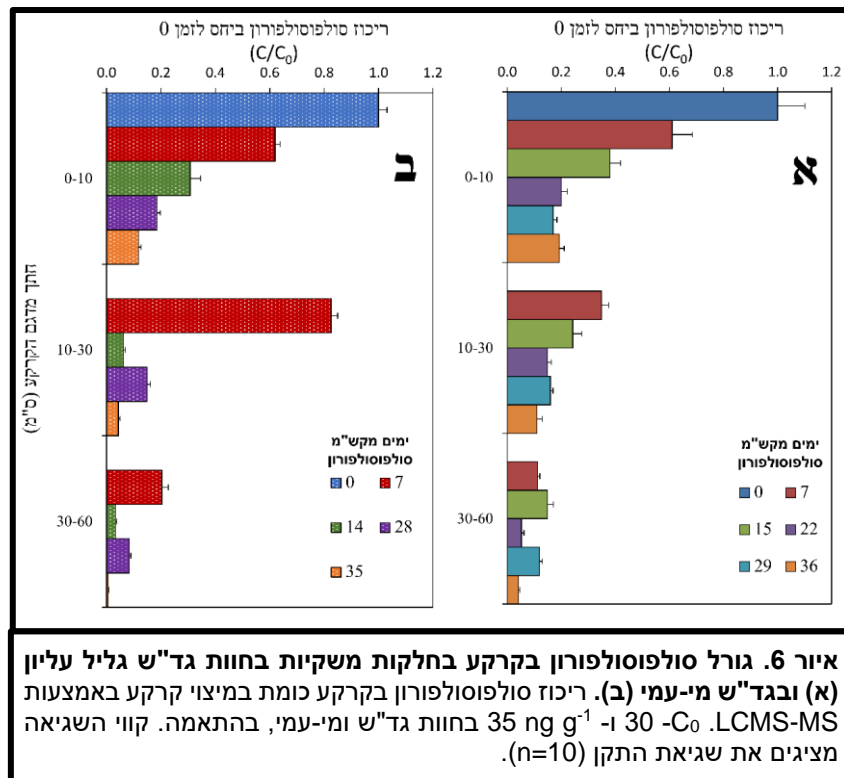


נדידה של סולפוסולפורון בחתך הקרקע נבחנה גם בניסוי באמצעים אנליטיים. לצורך כך הורטבו עמודות קרקע באורך 45 ס"מ ובקוטר 5 ס"מ בתמיסת קוטל העשבים בתוספת הנתב כלוריד (Cl) ונבחן ריכוז קוטל העשבים והנתב בתשטיף בזמנים משתנים, באמצעות LCMS-MS או מד EC, בהתאמה. ניסוי זה לא הושלם בקרקע מעין חרוד, עקב קצבי זרימה איטיים ואטימת העמודה שלא אפשרו איסוף של מי התשטיף. בקרקעות מחוות עדן וגד"ש כלנית עקומי הפריצה של סולפוסולפורון שהתקבלו לא נבדלו זה מזה מבחינה סטטיסטית, ונפח הנקבובים הדרוש לקבלת מחצית הריכוז ההתחלתי בתשטיף היה 1.5 ו-0.95 עבור סולפוסולפורון וכלוריד בהתאמה (מידע אינו מוצג).

ניטור גורל סולפוסולפורון בחלקות משקיות: במהלך המחקר נדגמו חמש חלקות משקיות של עגבניות לתעשייה, בחוות מטעים גליל עליון, גד"ש מי-עמי, חוות גד"ש גליל עליון, גד"ש עין חרוד איחוד וחוות עדן. בכל החלקות יושם ממשק 'פקעית אביבי' להדברת עלקת מצרית הכולל יישום קש"מ של סולפוסולפורון. לצורך ניטור גורל סולפוסולפורון בחלקות נדגמה קרקע משלושה חתכים (0-10, 10-30 ו-30-60 ס"מ) בזמנים משתנים החל מיום היישום. תוצאות ניטור החלקות השונות הובאו בדו"ח הביניים, במסגרת דו"ח זה נציג תוצאות משתי חלקות כדוגמה לתופעות שנצפו (איור 6). ככלל, נמצא כי בכל החלקות ישנה נדידה משמעותית של סולפוסולפורון מתחת לחתך אליו יושם (0-10 ס"מ), אם בעקבות השקיה טכנית (לצורך הצנעה ו'הפעלת' קוטל העשבים) ואם בעקבות משקעים, שמתבטאת בירידה משמעותית בריכוז קוטל העשבים בשכבה העליונה, כפי שניתן להתרשם בתוצאות מחלקת חוות גד"ש (איור 6א') וחלקת מי-עמי (איור 6ב'). בכל החלקות נמצאו ריכוזים מדידים של סולפוסולפורון גם בעומק חתך הקרקע (0-60 ס"מ), עד 20% מהריכוז הראשוני בשכבה אליו יושם קוטל העשבים (איור 6) עובדה המעידה על ניידות קוטל העשבים בקרקע וחשיבות תהליכי הספיחה והנדידה בקביעת גורל החומר בקרקע ויעילות ההדברה הנגזרת מכך.

יעלות ההדברה תלויה בריכוז קוטל העשבים בסביבת בית השורשים בתקופה הקריטית להדברה. במקרה של הדברת עלקת מצרית בעגבניות לתעשייה באמצעות סולפוסולפורון, תקופה זו הינה לאחר השתילה, עת נובטים זרעי העלקת, ועד 200 ימי-מעלה, מועד תחילת הטפילות¹⁰. להוציא חלקה אחת (עין חרוד איחוד) בה יושם מוניטור במינון גבוה (7 ג'ד') זמן קצר לפני שתילה (7 ימים), בשאר החלקות ריכוז סולפוסולפורון שנמדד בקרקע לאחר השתילה היה נמוך מהריכוז הגורם לפחיתה של 50% בביומסה של עלקת (23.6 ng g^{-1}). לדוגמה, בחלקת חוות גד"ש, בה יושם מוניטור במינון 5 ג'ד' וצמחי העגבנייה נשתלו 36 יום מקש"מ, נמדד ריכוז סולפוסולפורון בקרקע של 5.6 ng g^{-1} (איור 6א'). בחלקת מי-עמי, בה יושם מוניטור במינון 5 ג'ד' וצמחי העגבנייה נשתלו 14 יום מקש"מ, נמדד ריכוז סולפוסולפורון של 10.9 ng g^{-1} (איור 6ב'). תוצאות אלו מחזקות את הצורך בהבנה מעמיקה של הגורמים המשפיעים על גורל סולפוסולפורון בקרקע ובפיתוח כלים שיאפשרו קבלת החלטות מושכלת

לגבי מינון ומועד הקש"מ, ובמקרה הצורך יישומים חוזרים לשמירה על ריכוז מספק בקרקע בתקופה הקריטית להדברה.



הדמיה ממוחשבת של גורל סולפוסולפורון בחלקות משקיות בתנאי מזג אוויר משתנים:
 תוצאות הניסויים לגבי גורל סולפוסולפורון בקרקע, בפרט השפעת הטמ'פ על קצב הפירוק (איור 1) ופוטנציאל הנדידה הגבוה בחתך הקרקע (איור 5-6), מעידות כי לתנאי מזג האוויר בכל חלקה עשויה להיות השפעה מכרעת על גורל החומר בקרקע. השפעת תנאי מזג האוויר נבחנה באמצעות הדמיה ממוחשבת של גורל סולפוסולפורון בשתי חלקות: חוות עדן, כמייצגת קרקע בה קצב הפירוק מהיר, ועין חרוד, כמייצגת קרקע בה קצב הפירוק איטי. בכל חלקה, נבחנו תרחישי מזג אוויר שונים (בשנים 2008-2019; עפ"י נתוני השירות המטאורולוגי) מבחינת השפעתם על התנועה של סולפוסולפורון, וריכוזו בחתך קרקע של 0-60 ס"מ 30 יום מיישום, באמצעות הדמיות בתכנת Hydrus 1D¹¹. ההדמיות בוצעו תוך שימוש במודל van Genuchten – Mualem, single porosity ללא היסטרה, כאשר הפרמטרים ההידראוליים נקבעו עפ"י נתוני ההרכב המכני של הקרקע בחלקות (טבלה 3) בעזרת מודל Rosetta Lite (v1.1) הכלול בחבילת Hydrus 1D. קבוע הספיחה הוערך מנתוני ספרות, ואילו קצבי הפירוק ותלותם בטמ'פ נקבעו בניסוי מעבדה (איור 1). בכל אחת מהחלקות תנאי ההתחלה של ההדמיות היו זהים, מלבד רטיבות התחלתית שנקבעה בהדמיה מקדימה של תנאי מזג האוויר בחצי השנה שקדמה למועד היישום (7/2 ו-26/2 בחוות עדן ועין חרוד בהתאמה).

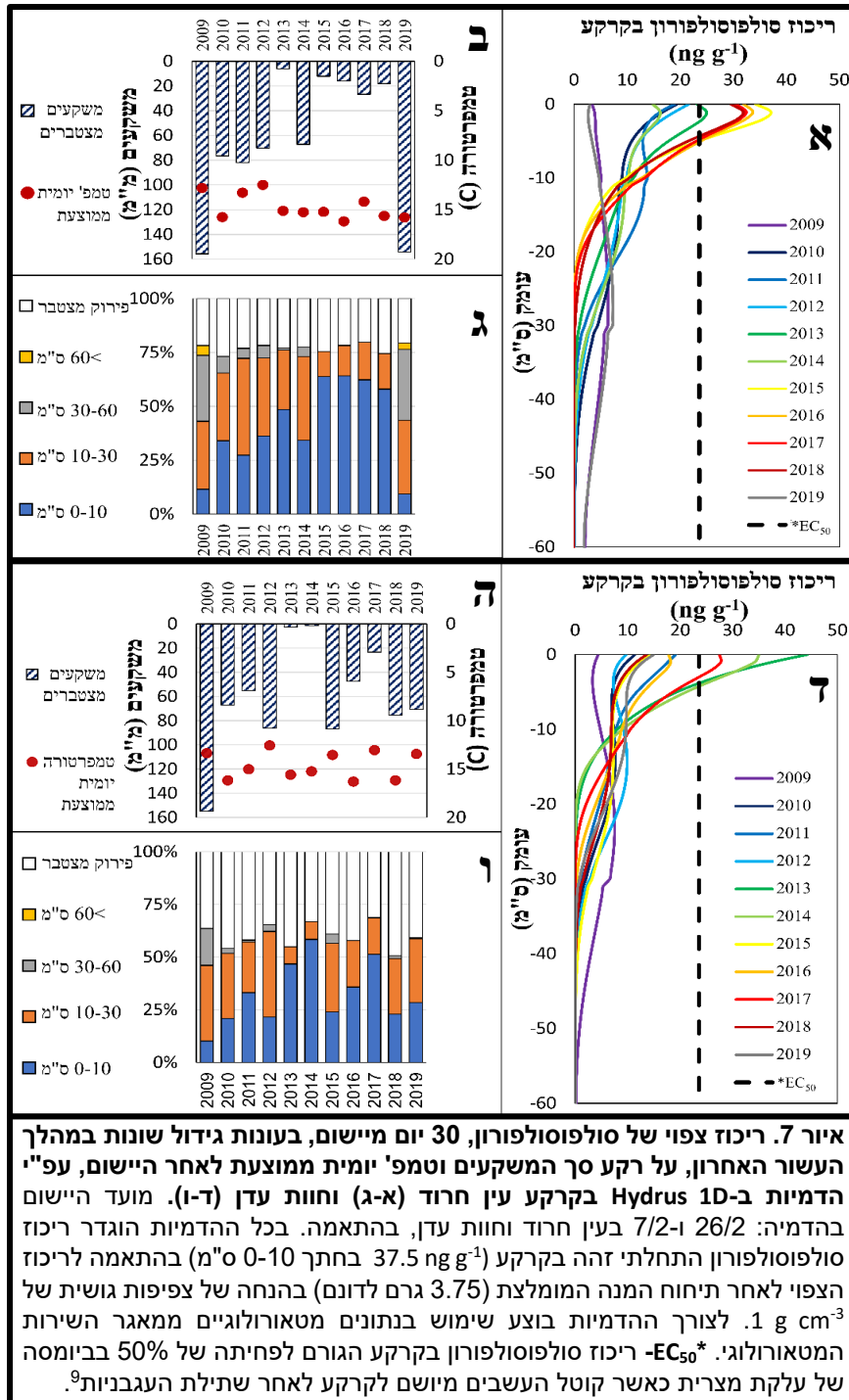
טבלה 3. מאפייני הקרקעות בהן נבחן גורל סולפוסולפורון בקרקע, בהדמיית תנאי מזג אויר שונים ב-Hydrus 1D.

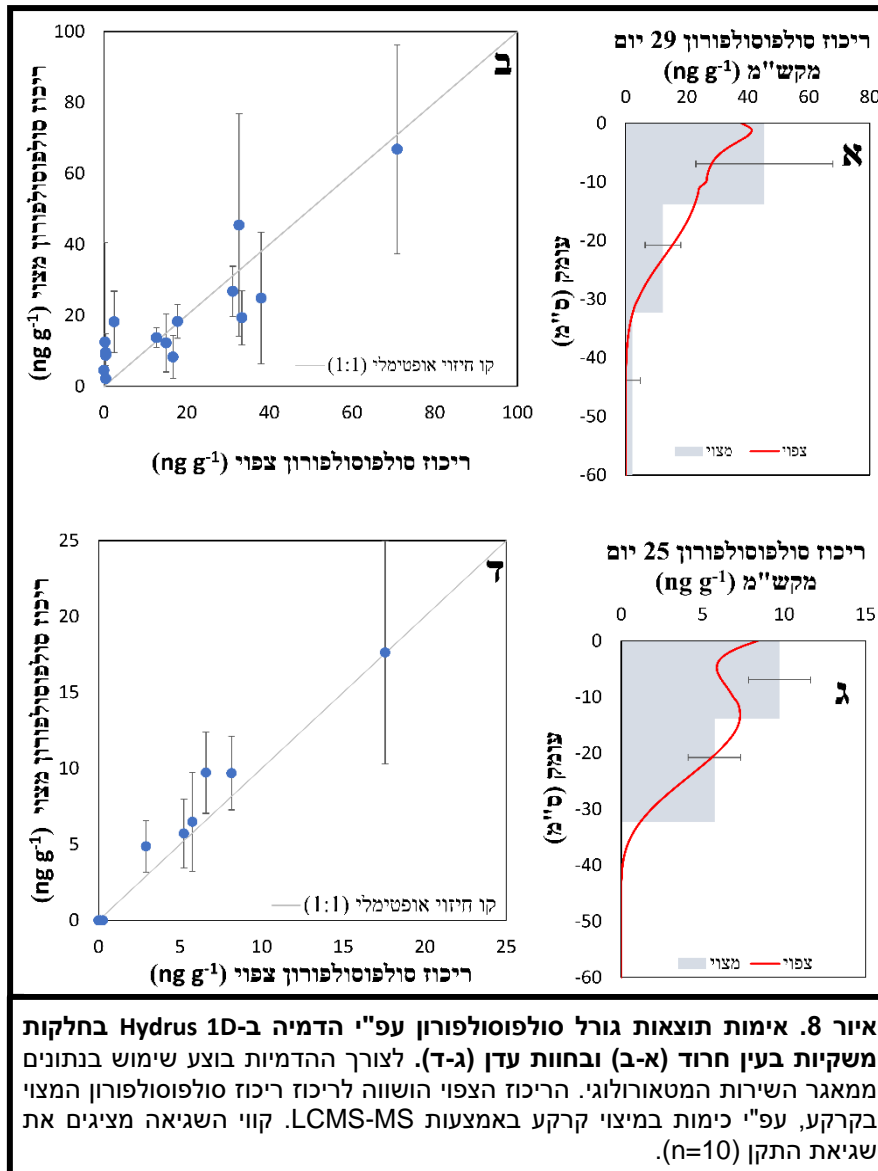
אנרגיית אקטיבציה (KJ/mol)	קבוע קצב פירוק סולפוסולפורון ב- 25° C SE± (day ⁻¹)	pH	.ח. אורגני	חרסית	סילט	חול	חלקה	אופק (ס"מ)
68.07	0.032 ± 0.002	7.75	1.9	45.1	38.9	16.0	חוות עדן	0-10
53.22	0.016 ± 0.002	7.80	1.0	58.3	34.6	7.1	עין חרוד	
-	-	-	-	48.5	31.5	20.1	חוות עדן	10-30
-	-	-	-	50.3	31.1	18.6	עין חרוד	
-	-	-	-	50.2	22.3	27.5	חוות עדן	30-60
-	-	-	-	54.0	31.3	14.7	עין חרוד	

מתוצאות ההדמיות עולה כי צפויה שונות ניכרת בריכוז סולפוסולפורון בחתך הקרקע, 30 יום מיישום, בשנים השונות (איור 7א' ו-7ד'). ב-7 ו-8 מתוך 11 התרחישים בעין חרוד (איור 7א') וחוות עדן (איור 7ד'), בהתאמה, הריכוז בחלק העליון של הקרקע, החשוב ביותר מבחינת הדברה בשלבים הראשונים של הגידול, נמוך מהריכוז הגורם לפחיתה של 50% בביומסה של עלקת. בשתי החלקות, בשנים גשומות במיוחד דוגמת 2009 ו-2019, כמות ניכרת של קוטל העשבים צפויה לנדוד מתחת לחתך הרלוונטי להדברה (0-30 ס"מ²) עד 36% בעין חרוד (איור 7ג') ועד 17% בחוות עדן (איור 7ד'). מאידך החלק היחסי של החומר שצפוי להתפרק הושפע פחות מתנאי מזג האויר והיה יציב יחסית בכל חלקה, 23% בממוצע בעין חרוד ו-40% בחוות עדן. על אף נדידה מוגברת לעומק בעין חרוד, בהשוואה לחוות עדן, סך החומר הנותר בחתך 30 יום מיישום היה גבוה יותר בכל התרחישים שנבחנו (מידע לא מוצג) וזאת על רקע קצב הפירוק האיטי יותר ואנרגיית האקטיבציה הנמוכה יותר (טבלה 3).

תוצאות ההדמיות אומתו מול תוצאות מדודות מניטור חלקות חוות עדן ועין חרוד בשנים 2018 ו-2017, בהתאמה. בבחינת ריכוז סולפוסולפורון לאורך חתך קרקע של 0-60, 25 יום מקש"מ (חוות עדן) ו-29 יום מקש"מ (עין חרוד), נמצא דמיון ניכר בין הריכוז הצפוי עפ"י ההדמיה לריכוז המצוי עפ"י דיגום וכימות ב-LCMS-MS, עם ריכוז גבוה יותר בחלק העליון של הקרקע (0-10 ס"מ) אשר הולך ויורד בחתכים עמוקים יותר (איור 8א' ו-8ג'). בהשוואה של הריכוז בממוצע

בכל אחד משלושת החתכים (0-10, 10-30 ו-30-60 ס"מ) נמצא מתאם גבוה בין הריכוז הצפוי לריכוז המצוי בשתי החלקות, עם מקדם מתאם של 0.97 ו-0.89, בהתאמה, כאשר הנקודות מתפזרות סביב הקו המייצג חיזוי אופטימלי (איור 8ב' ו-8ד'). בעוד בעין חרוד הנקודות התפזרו באופן אקראי סביב קו האופטימום (איור 8ב'), בחוות עדן הנקודות נמצאות מעל לקו (איור 8ד'), עובדה המעידה על מגמה של הערכת חסר, קרי ריכוזים מדודים נמוכים מהריכוזים הצפויים.





דין:

תכנית מחקר זו עסקה בבירור התהליכים הקובעים את גורל קוטל העשבים סולפוסולפורון בקרקע. בבסיסה עמדה ההשערה כי הבדלים בין חלקות ביעילות הדברת עלקת ועשבים רעים אחרים נובעת מהבדלים בקצב פירוק קוטל העשבים סולפוסולפורון וכי היעלמות מהירה של פעילות קוטל העשבים בקרקע נובעת מפירוק מואץ, תהליך בו מתפתחת אוכלוסיית מיקרואורגניזמים המפרקים במהירות את קוטל העשבים, בתגובה לשימוש חוזר בו או בקוטלי עשבים אחרים מאותה קבוצה כימית³ – במקרה דנן קבוצת הסולפונילאוריאה.

ניסויים בתנאים מבוקרים, ובקנה מידה קטן (צלחות פטרי), הוכיחו כי קיים פוטנציאל להתפתחות תנאי פירוק מואץ בקרקע בעקבות שימוש חוזר בסולפוסולפורון (איור 3). מאידך, בשימוש חוזר בתנאי שדה או בתנאים מבוקרים בקנה מידה גדול יותר (5 ליטר קרקע)

פוטנציאל זה לא התממש, ולא נצפתה הגברה של קצב הפירוק של סולפוסולפורון גם כאשר נעשה בו ו/או בסולפונילאוריאה אחרים שימוש חוזר של מספר שנים (איור 4). אף על פי כן, היות ונבחנו רק מספר מצומצם של קרקעות לא ניתן לשלול את האפשרות שתחת תנאים מתאימים מבחינת היסטוריה, מזג אוויר וקרקע, עלולים להתפתח תנאי פירוק מואץ של סולפונילאוריאה. מחקרים קודמים לגבי פירוק מואץ של קוטלי עשבים, בהן נערך סקר נרחב של קרקעות, הדגימו הבדלים ניכרים בין קרקעות שונות במידת האצת הפירוק, לדוגמה במקרה של מחקר על שימוש חוזר בקוטל העשבים אטרזין בארצות הברית בו נדגמו 16 קרקעות שונות ונמדדה הגברה של קצב הפירוק בפקטור של 43.4-130¹³⁰. בחינה של מספר גדול יותר של קרקעות עם היסטוריה של שימוש חוזר בסולפוסונילאוריאה עשויה לחשוף מקרים בהן פוטנציאל הגברת קצב הפירוק מתממש.

גם ללא התממשות מקרה של פירוק מואץ, בקרקעות שנדגמו במהלך המחקר נמדדו הבדלים ניכרים בקצבי הפירוק (איור 1) ותלותם בטמפרטורה (טבלה 3). התגובה השונה לשינוי של 10° C מעידה על כך שההבדלים בקצב הפירוק נובעים משוני בפירוק מיקרוביאלי, בעיקר על רקע העובדה שחומציות הקרקעות, שמכתיבה את קצב הפירוק הכימי, דומה (טבלה 1). ההבדלים בקצבי הפירוק הינם בעלי משמעות אגרונומית רבה הן מבחינת משך ההדברה השאריתית והן מבחינת השפעתם האפשרית על גידולים רגישים בעונה העוקבת, כפי שניתן ללמוד ממשך הרעילות לשורשי סורגום; רעילות זו נמשכה כ-100 יום במקרה של קרקע בה פירוק סולפוסולפורון מהיר לעומת מעל שנה בקרקע בה קצב הפירוק איטי (איור 2 ואיור 1). הגורם להבדלים בין הקרקעות בקצבי הפירוק המיקרוביאלי אינו ידוע, ונדרש מחקר נוסף על מנת לבררו. עם זאת, להבדלים הללו בין הקרקעות השפעה ניכרת על יעילות הדברת עלקת. בבחינת נתוני עבר מניסויי הדברת עלקת בעגבניות לתעשייה (בין השנים 2013 ו-2015) בחוות עדן, עין חרוד וגד"ש כלנית מצאנו מתאם גבוה בין יעילות ההדברה המדודה לריכוז החומר שצפוי היה להיות זמין בקרקע, עפ"י חישוב השאריתיות על בסיס קצבי הפירוק שנמדדו במעבדה⁹. במסגרת חישובים אלו הוזנחה הנדידה בחתך הקרקע, הן בשל מיעוט הגשמים בעונות הנ"ל והן עקב העובדה שפוטנציאל הנדידה שנמדד בקרקעות אלו דומה (איור 6). עם זאת, היות שהשונות בתנאי מזג האוויר בעונת גידול העגבניות גבוהה (איור 7ב' ו-7ה') וכיוון שפוטנציאל הנדידה שנמדד בקרקע גבוה, נדרשה הערכה של גורל החומר תחת תרחישי מזג אוויר משתנים.

בחינת השפעת מזג האוויר על גורל סולפוסולפורון נבחנה באמצעות הדמיות ממוחשבות בתכנת Hydrus 1D. גישה זו נבחרה מתוך הבנה שניטור חלקות שדה, כפי שבוצע לאורך המחקר (איור 6), מייצג תרחישים נקודתיים אשר על רקע השונות במשקעים וטמפרטורה מקשה על קבלת תמונה מהימנה של השפעת מזג האוויר על גורל החומר. מאידך, שימוש בהדמיות ממוחשבות מאפשר בחינה מקיפה של מגוון תרחישים בעלי משמעות לאזורי הגידול,

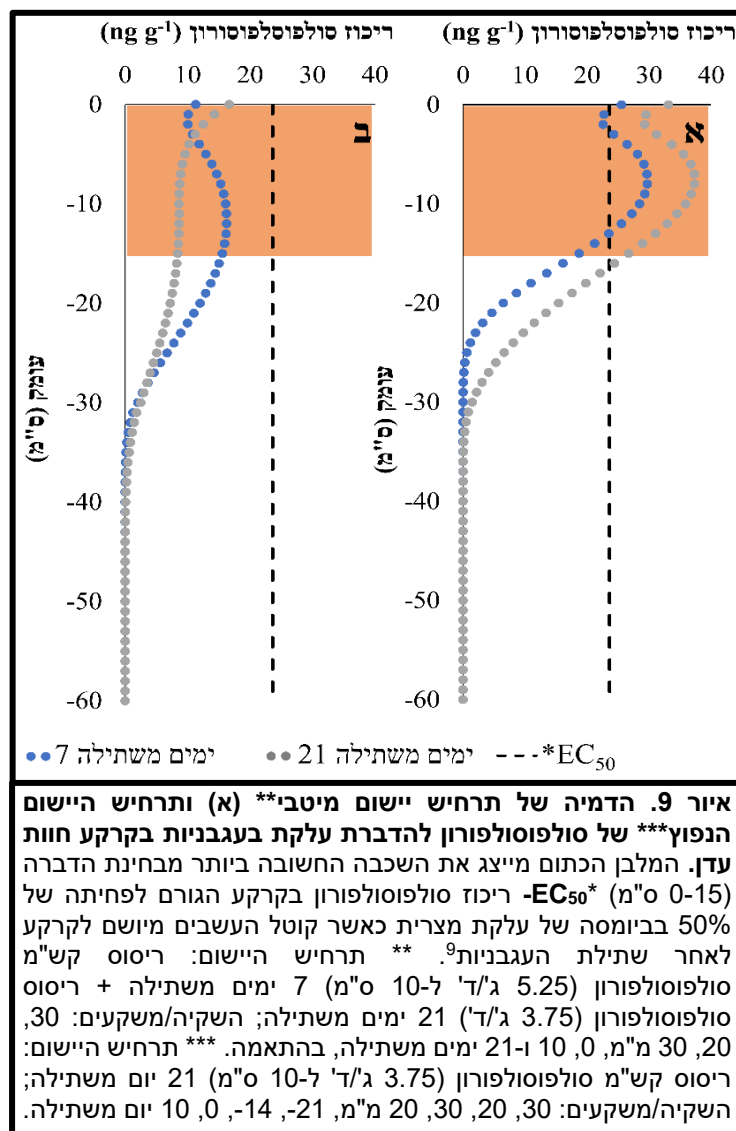
כולל תרחישי קיצון, ובידוד משתנים אחרים. מאימות ההדמיות אל מול תוצאות אמת בשתי חלקות משקיות (איור 8) עולה כי רמת הדיוק של ההדמיות הממוחשבות, מבחינת חיזוי המגמה הכללית, מספקת.

ניתוח תרחישי מזג האוויר שנבחנו חושף בעיה מהותית באופן יישום קוטל העשבים סולפוסולפורון, כפי שמומלץ לביצוע כיום: טיפול קש"מ סולפוסולפורון (3.75 ג'ד') מספר שבועות לפני השתילה. במרבית התרחישים ריכוז קוטל העשבים 30 יום מיישום בשכבת הקרקע העליונה (0-10 ס"מ) נמוך ונמצא מתחת לריכוז הגורם לפחיתה של 50% בביומסה של עלקת (איורים 7א' ו-7ד'), עקב שילוב של פירוק ונדידה בחתך הקרקע. יתר על כן, בתרחישי קיצון, מבחינת כמות משקעים, 75% מהחומר שיושם ויותר התפרק או נדד מתחת לעומק של 30 ס"מ (איורים 7ג' ו-7ו'). תופעות אלו ניכרות ביתר שאת בהדמיית התנאים בחוות עדן, תחת קצב פירוק סולפוסולפורון מהיר, אך גם בקרקע עין חרוד בה קצב הפירוק איטי ניתן להבחין באותן מגמות. איזנברג וחבריו¹² מצאו שזרעי עלקת מסוגלים לנבוט, להיטפל לעגבנייה ולהשלים מחזור חיים גם כאשר הם קבורים בעומק 30 ס"מ בקרקע, אך מתחת לעומק של כ-15 ס"מ הייתה ירידה דרסטית בפוטנציאל ההיטפלות. במרבית תרחישי מזג האוויר שנבחנו בהדמיות ממוחשבות הריכוז בשכבת הקרקע החשובה ביותר מבחינת הדברה (0-15 ס"מ), בתקופה הקריטית להדברה (משתילה עד 200 ימי-מעלה), נמוך במידה ניכרת מהריכוז המיטבי.

על מנת להבטיח יעילות הדברה מרבית של עלקת יש לבצע שינוי באופן יישום קוטל העשבים סולפוסולפורון בממשק 'פקעית אביבי'. תוצאות מחקר זה מעידות כי אף שמדובר בקוטל עשבים שאריתי, במקרים רבים השאריתיות אינה מספקת לצורך הדברה מיטבית, עקב שילוב של פירוק ונדידה לעומק הקרקע. הפתרון המתאים ביותר הינו שילוב של הגדלת המינון, יישום קש"מ ימים ספורים לפני השתילה, והצנעת החומר בהשקיה עילית במהלך ההנבטה. בנוסף, ניתן לשלב יישום נוסף של סולפוסולפורון, במינון קטן יותר, לקראת תום התקופה הקריטית להדברה (200 ימי-מעלה, 3-4 שבועות משתילה). הדמיית תנאים כנ"ל בקרקע מחוות עדן מראה כי גישה זו מאפשרת שמירה על ריכוז גבוה של סולפוסולפורון, המתאים להדברת עלקת, בשכבת הקרקע החשובה ביותר להדברה לאורך התקופה הקריטית (איור 9א'), זאת בהשוואה לריכוזים נמוכים הצפויים בהדמיית היישום כפי שבוצע עד כה (איור 9ב'). לגישה זו שני קשיים מרכזיים מבחינה אגרוטכנית: ראשית, לעיתים תיחוח הקרקע אינו אפשרי בשל רטיבות גבוהה (בעיקר במקרה של שתילות מוקדמות); כיום מגדלים מנצלים חלון זמן מתאים לתיחוח בשבועות שלפני השתילה, אך במקרה של יישום קרוב לשתילה חלון זמן זה מצטמצם. שנית, גישה זו מחייבת שימוש באמצעים להשקיה עילית (קו-נוע או המטרה), כאשר כיום גידול עגבניות לתעשייה מושקה בטפטוף בלבד. על מנת לפתור בעיות אלו יש לבחון אפשרות של יישום קוטל העשבים ללא תיחוח והצנעתו בהשקיה בטפטוף במקום בהמטרה. גם בהינתן

הקשיים הנ"ל, מספר מגדלים כבר מבצעים חלק מהשינויים באופן יישום סולפוסולפורון במסגרת ממשק 'פקעית אביבי', בעקבות שיתוף תוצאות המחקר לאורך השנים עם מגדלים, מדריכים ואנשי חברות העוסקים בתחום וניסיונם המצטבר משימוש בממשק זה בשטח.

תוצאות מחקר זה מלמדות כי לתנאי מזג האוויר לאחר יישום סולפוסולפורון, יחד עם קצב הפירוק המאפיין כל קרקע, השפעה מהותית על גורל החומר בקרקע וזמינותו להדברת עלקת בפרט ועשבים רעים בכלל. מידע זה יכול לאפשר קבלת החלטות מושכלת, על רקע תנאי מזג האוויר הצפויים בכל חלקה, בין השאר במקרה של הבדלים בין יישום בשתילות חורף לשתילות אביב מאוחר, על רקע ההבדלים בטמפרטורה ובפוטנציאל המשקעים, או בתגובה לאירועי מזג אוויר קיצוניים, דוגמת ריבוי גשמים לאחר היישום. בשלב זה, המידע לגבי הגורמים להבדלים בקצב הפירוק חסר, לכן לא ניתן לקבוע המלצות יישום פרטניות לכל קרקע. היות שעלוקת הינה עשב בעל פוטנציאל נזק גבוה, במידה ואין ניסיון עבר לגבי משך הפעילות השאריתית בקרקע, ישנה חשיבות ליישום קוטל העשבים קרוב ככל האפשר למועד השתילה וכך להבטיח יעילות מרבית גם במקרה שיתברר שקצב הפירוק בקרקע מהיר.



- 1 Beyer EM, Duffy MJ, Hay J V, and Schlueter DD, Sulfonylureas, ed. by Kearney PC and Kaufman DD, *Herbicides Chemistry, Degradation, and Mode of Action*, Marcel Dekker, New York, pp. 117–189 (1988).
- 2 Sarmah AK and Sabadie J, Hydrolysis of sulfonylurea herbicides in soils and aqueous solutions : a review, *J Agric Food Chem* **50**:6253–6265 (2002).
- 3 Arbeli Z and Fuentes CL, Accelerated biodegradation of pesticides: An overview of the phenomenon, its basis and possible solutions; and a discussion on the tropical dimension, *Crop Prot* **26**:1733–1746 (2007).
- 4 Zhao W, Xu L, Li D, Li X, Wang C, Zheng M, *et al.*, Biodegradation of thifensulfuron-methyl by *Ochrobactrum* sp. in liquid medium and soil, *Biotechnol Lett* **37**:1385–1392 (2015).
- 5 Yu YL, Wang X, Luo YM, Yang JF, Yu JQ, and Fan DF, Fungal degradation of metsulfuron-methyl in pure cultures and soil, *Chemosphere* **60**:460–466 (2005).
- 6 Hang BJ, Hong Q, Xie XT, Huang X, Wang CH, He J, *et al.*, SulE, a sulfonylurea herbicide de-esterification esterase from *Hansschlegelia zhihuaiae* S113, *Appl Environ Microbiol* **78**:1962–1968 (2012).
- 7 He YH, Shen DS, Fang CR, and Zhu YM, Rapid biodegradation of metsulfuron-methyl by a soil fungus in pure cultures and soil, *World J Microbiol Biotechnol* **22**:1095–1104 (2006).
- 8 Eizenberg H and Goldwasser Y, Control of Egyptian broomrape in processing tomato: a summary of years of research and successful implementation, *Plant Dis* **102**:1477–1488 (2018).
- 9 Paporisch A, Laor Y, Rubin B, Achdari G, and Eizenberg H, Application timing and degradation rate of sulfosulfuron in soil co-affect control efficacy of Egyptian broomrape (*Phelipanche aegyptiaca*) in tomato, *Weed Sci* **66**:780–788 (2018).
- 10 Ephrath JE, Hershenhorn J, Achdari G, Bringer S, and Eizenberg H,

- Use of logistic equation for detection of the initial parasitism phase of egyptian broomrape (*Phelipanche aegyptiaca*) in tomato, *Weed Sci* **60**:57–63 (2012).
- 11 Simunek J, Sejna M, Saito H, Sakai M, and van Genuchten MT, “The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 4.08. HYDRUS Softw. Ser. 3., *Dep Environ Sci, Univ Calif, Riverside*:332 (2009).
 - 12 Eizenberg H, Lande T, Achdari G, Roichman A, and Hershenhorn J, Effect of Egyptian broomrape (*Orobancha aegyptiaca*) seed-burial depth on parasitism dynamics and chemical control in tomato, *Weed Sci* **55**:152–156 (2007).
 - 13 Mueller TC, Parker ET, Steckel L, Clay SA, Owen MDK, Curran WS, *et al.*, Enhanced atrazine degradation is widespread across the United States, *Pest Manag Sci* (2017).