



בחינת יעילות מתקן ביובד לטיפול בתשטיפים של חומרי הדברה

קרן מחקרי שה"מ, מחקר מס' 12862-23

אברים ג'ונסון - שירות ההדרכה והמקצוע, משרד החקלאות וביטחון המזון;
אלה כהן שוורץ - שימור קרקע ניקוז ומים, מחוז צפון, משרד החקלאות וביטחון המזון;
שי גלעד - אגמא: המרכז לאגני היקוות, נגר ונחלים;
עמית פאפריש - המחלקה לפתולוגיה של צמחים וחקר עשבים, מרכז מחקר נווה יער, המכון להגנת
צומח, מנהל המחקר החקלאי - מכון וולקני (paporisch@volcani.agri.gov.il);
זהר בן שמחון - מנהל היחידה החקלאית, מרכז מחקר נווה יער, מנהל המחקר החקלאי - מכון וולקני.

תקציר

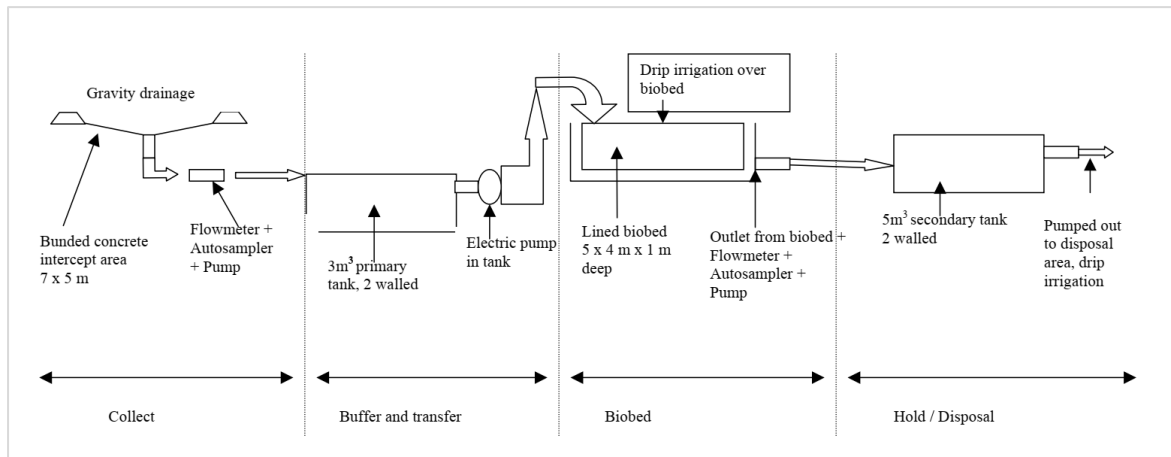
שימוש בחומרי הדברה סינתטיים בחקלאות חיוני למקסום פוטנציאל היבול של הגידול החקלאי, אך מהווה מקור משמעותי לזיהום סביבתי, ובפרט לזיהום מוקדי, הנובע מפעולות מילוי ושטיפה של מרססים. בישראל מוביל היעדר פתרון ישים לניהול תשטיפי המרססים ליישום חלקי של התקנות הקיימות ולהגברת הסיכון הסביבתי. בעולם מקובלים מתקני Biobed כפתרון מקומי ובר-קיימא לטיפול בתשטיפים אלו. במחקר זה נבחנה לראשונה בישראל יעילות מתקן Biobed משקי, שהוקם בנווה יער בשנת 2024, על בסיס המפרט האנגלי, לטיפול בתשטיפים של קוטלי עשבים. במהלך שנת 2025 הוזן המתקן באופן מבוקר בתמיסות של שישה קוטלי עשבים בעלי תכונות כימיות-פיזיקליות מגוונות. יעילות הטיפול הוערכה באמצעות מבחנים ביולוגיים (התארכות שורשים וצבירת ביומסה של תירס) וכן באמצעות כימות ריכוז החומרים הפעילים glufosinate-ammonium-isulfosulfuron על ידי LCMS-MS. התוצאות מצביעות על הפחתה חלקית בפיטוטוקסיות ובריכוז קוטלי העשבים לאחר מעברם ב-Biobed, כשנראתה בחלק מהחומרים ירידה של עד שני סדרי גודל בריכוז, אך עם זאת, נמצאו שאריות משמעותיות בנקז. יעילות הטיפול הושפעה במידה ניכרת ממשטר המים, כאשר אירועי גשם עוצמתיים קיצרו, ככל הנראה, את משך הישארות החומרים במצע והפחיתו את יעילות הספיחה והפירוק. הממצאים מעידים על כך שמתקן Biobed עשוי להפחית סיכון לזיהום מוקדי מחומרי הדברה, אך נדרש מחקר נוסף לאופטימיזציה של תכנון וניהול המתקן בתנאי ישראל, ולפיתוח פרוטוקול יישומי ובר-ביצוע לחקלאים.

מבוא

השימוש בחומרי הדברה סינתטיים בחקלאות חיוני להדברת מזיקים, מחלות ועשבים ולמקסום פוטנציאל היבול של הגידול החקלאי. עם זאת, לשימוש בחומרי הדברה עשויות להיות השלכות שליליות על הסביבה, כגון: פגיעה בבריאות הקרקע (Mandl et al., 2018), זיהום מקורות מים (Borggaard and Gimsing, 2008); משה (et al., 2021), פגיעה באורגניזמים מימיים (Relyea, 2005), פגיעה בצומח בסביבת נחלים וביכולת הייצוב הצמחי של גדות נחלים, אשר מביאה ליצירת שינויים גיאומורפולוגיים ולהינזקות שטחים חקלאיים הנמצאים בשטחי ההצפה של הנחל. מקור הזיהום הסביבתי הנובע משימוש בחומרי הדברה עשוי להיות

מוקדי, הווה אומר שזיהום הנובע מזליגה של חומרי הדברה כתוצאה מפעילות אינטנסיבית באזור מוגבל ומוגדר, דוגמת מחסן חומרי ההדברה ואזורי המילוי והשטיפה של המרססים, או באזור מפוזר, כלומר זיהום הנובע מזליגה של חומרי הדברה לאחר יישום לא מדויק בשטח נרחב או כתוצאה מרחף, מסחף מים או מקרקע מטופלת. זיהום מוקדי מהווה גורם משמעותי מסך עומס הזיהום הפוטנציאלי ומוערך ב-20% עד 70% מעומס הזיהום (Rose et al., 2004). בנוסף, לזיהום מוקדי תרומה ניכרת לזיהום בריכוז גבוה של חומרי ההדברה. בשנים האחרונות ממצאים שהתקבלו מניטור של ריכוזי חומרי הדברה במקורות מים באגני ניקוז בישראל מעידים על זיהום משמעותי בחומרי הדברה הנפוצים בשימוש בחקלאות, דוגמת Diuron, החומר הפעיל בקוטל עשבים דירקס, ו-Imidacloprid, החומר הפעיל בקוטל החרקים קונפידור (דובובסקי וחוב', 2013; בן דוד ושפייר, 2020; מנדלב וחוב', 2021; משה וחוב', 2021). ממצאים אלו מעידים על עומק הסיכון הסביבתי הכרוך בשימוש בחומרי הדברה ועל הצורך במציאת פתרונות מתאימים לטיפול במקורות הזיהום השונים (מוקדיים או פזורים).

בישראל אין כיום פתרון המגדיר לחקלאי מהו ניהול מיטבי (BEST MANAGEMENT PRACTICE) לטיפול בתשטיפי חומרי ההדברה באזורי המילוי והשטיפה של המרססים. על פי תקנות המים (מניעת זיהום; שטיפת מתקני ריסוס), תשנ"א 1991 (חוק המים התשי"ט-1959), פעילות המילוי והשטיפה של המרססים תבוצע על משטח בטון ייעודי המנוקז למכל איסוף, והתמיסה המצטברת בו תפונה באופן מבוקר אחת לשנה למתקן טיפול בשפכים כימיים תעשייתיים בנאות חובב. לאור האינטנסיביות הגוברת של הפעילות החקלאית בשנים האחרונות, התלות בחומרי הדברה בחקלאות והעלות הגבוהה הכרוכה בפינוי התשטיפים, התקנות שצוינו אינן ניתנות לביצוע, ולכן במקרים רבים אינן מיושמות, דבר המגביר את פוטנציאל הזיהום המוקדי משטיפת מרססים. בעולם נמצאים בשימוש פתרונות חלופיים, בני-קיימא, לטיפול בתשטיפים הנובעים משטיפת מרססים, דוגמת טיפול מקומי בתשטיפי בחצר המשק באמצעות שימוש ב-Biobed (Castillo et al., 2008). השימוש ב-Biobed כאמצעי לטיפול מקומי בתשטיפי המרסס בנקודת המילוי והשטיפה פותח בשנות ה-90 בשוודיה (Castillo et al., 2008). במקורו הורכב ה-Biobed מבור בעומק של 60 ס"מ, אשר תחתיתו (10 ס"מ) מלאה בחרסית, מעליה שכבה (50 ס"מ) של ביומיקס (תערובת קרקע, קש וקומפוסט) ובחלקו העליון שכבת דשא. מעל בור זה מבוצעות פעולות המילוי והשטיפה של המרסס, כאשר שכבת הביומיקס מהווה מעין מסנן ביולוגי שאליו נספחים חומרי ההדברה ומפורקים. שכבת החרסית בתחתית נועדה למנוע חלחול של מי התשטיפי אל מחוץ לתחומי הבור. גישה זו אומצה בכמה מדינות בעולם, דוגמת צרפת, איטליה, בריטניה, דנמרק, גאוטמלה ופרו, תוך פיתוח מבנה המערכת והתאמתו לתנאי האקלים ולחומרי המוצא הזמינים לביומיקס בכל מדינה ומדינה (Castillo et al., 2008). בשנות ה-2000 בוצע מחקר מקיף באנגליה שהדגים את הצלחת הטיפול בתשטיפי חומרי הדברה באמצעות שימוש ב-Biobed, כך שהפחית עד 99% מריכוז חומרי ההדברה בתמיסת המקור כעבור שנה מהיישום בעקבות הישגותם או פירוקם ב-Biobed (Fogg et al., 2000, P Fogg et al., 2003; Paul Fogg et al., 2003; 2001). משרד הסביבה האנגלי פרסם מדריך מפורט להקמת מתקן Biobed כנ"ל (איור 1), והפרקטיקה יושמה בצורה נרחבת על ידי חקלאים באנגליה בתמיכתה ובהנחייתה של הממשלה (Rose et al., 2004).



איור 1. תיאור סכמתי של מתקן Biobed עפ"י מפרט משרד הסביבה האנגלי (Rose et al., 2004)

במחקר הנוכחי נבחנה יעילות השימוש במתקן Biobed לטיפול בתשטיפים הנובעים משטיפת מרססים חקלאיים בישראל, תוך שימוש במתקן שהוקם בחורף 2024 בנווה יער על בסיס המפרט של המתקן האנגלי. מטרת המחקר הייתה לבצע בחינה ראשונית של יעילות המתקן בהפחתת הריכוז של קוטלי עשבים נבחרים, כדי לבחון אפשרות לפתרון פשוט וישים להפחתת הסיכון לזיהום מוקדי בחומרי הדברה, הנובע מפעילות המילוי והשטיפה של המרססים בחקלאות ישראל.



איור 2. מתקן Biobed בנווה יער, שבו נעשה שימוש במהלך המחקר.

המתקן כולל: משטח שטיפה רחב לשטיפה ולאיוגום התשטיפ ממרסס משקי (א); בור שיקוע לצורך השקעת שאריות קרקע ומוצקים אחרים הנובעים מהשטיפה, לפני זרימת התמיסה בגרביטציה למכל איגום, כשלצורך המחקר נאטם המעבר מהבור למכל האיגום כדי לבקר את התמיסה המועברת למתקן (ב); מכל איגום התשטיפי שאליו יושמו קוטלי עשבים בנפח ובריכוז ידועים, במהלך שנת המחקר (ג) - מכל האיגום כולל משאבה טובולה לשאיבת תמיסת הריסוס ופיזור באמצעות מערכת טפטוף על גבי ה-Biobed, והתמיסה הנשאבת נדגמה לצורך הערכת פיטוטוקסיות/ריכוז קוטלי עשבים בכניסה למתקן (ד); מכל איסוף התשטיפי לאחר חלחול דרך ה-Biobed: התמיסה במכל נדגמה לצורך הערכת הפיטוטוקסיות/ריכוז קוטלי העשבים לאחר הטיפול ב-Biobed (ה).

שיטות

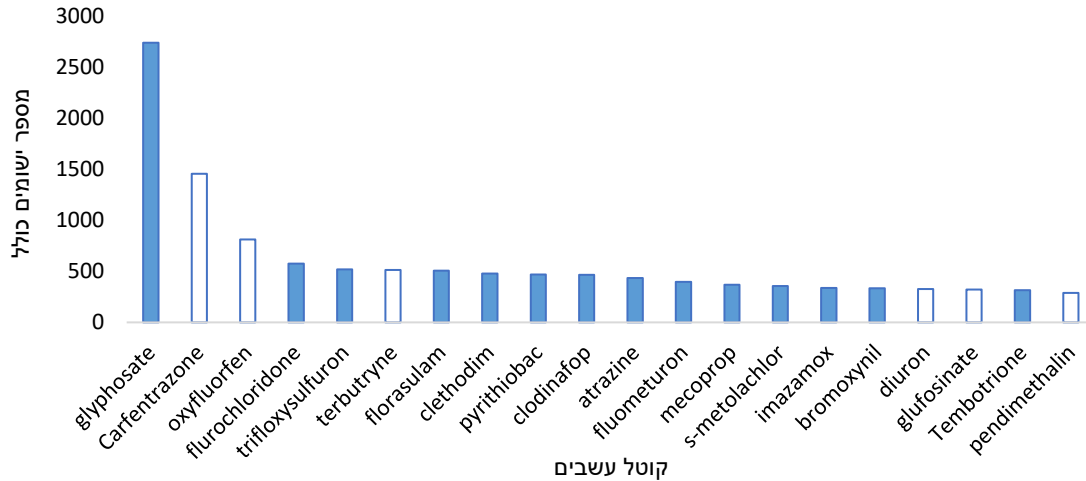
Biobed

במהלך המחקר נעשה שימוש במתקן Biobed אשר הוקם במשק החקלאי של מרכז מחקר נווה יער, מנהל המחקר החקלאי - מכון וולקני (איור 2). המתקן הוקם על פי מדריך של משרד הסביבה, המזון והמרחב הכפרי של ממשלת בריטניה (EA DEFRA Department for Environment, Food & Rural Affairs) - (Rose et al., 2004) וכולל משטח שטיפה תקני מבטון מזוין המנקז את התשטיפים לבור שיקוע, וממנו למכל איגום בגרביטציה (איור 2-ג). משטח השטיפה ברוחב של טרקטור ובאורך המתאים למרסס חקלאי עם מוטות ריסוס באורך 18 מטר. בנוסף לכך, מסביב לכל משטח השטיפה יצרו חגורה של 20 ס"מ על 20 ס"מ, למניעת זליגת המים עם התשטיפים אל מעבר למתקן. ממכל האיגום תמיסת התשטיפ נשאבת ומטופטפת על בור טרפזי, המלא בתערובת קרקע מקומית, קומפוסט וקש חיטה, ביחס נפחי של 1:1:2 (עומק כ-1 מטר, נפח כ-30 מ"ק) (איור 2ד). גודל הבור חושב לפי כמויות התשטיפים הצפויות במשק החקלאי של נווה יער. בור ה-Biobed מרופד בתחתיתו ביריעה אטומה למים, כדי למנוע את חלחול התמיסה אל מחוץ לבור, ומנוקז על ידי צינור שרשורי למכל איסוף (איור 2ה). במסגרת המחקר הנוכחי יושמו קוטלי עשבים בריכוז ובנפח ידועים, כאשר תמיסת קוטלי העשבים נדגמה בכניסה (איור 2ג) אל מתקן הטיפול וביציאה (איור 2ד) ממנו, כמפורט להלן.

קוטלי עשבים ויישומם

לצורך בחינת יעילות המתקן בטיפול בתשטיפי חומרי הדברה, במהלך שנת 2025 יושמו בו שישה קוטלי עשבים שונים באופן מבוקר. מרבית קוטלי העשבים שנבחרו היו קוטלי עשבים נפוצים בשימוש בחקלאות ישראל, לפי סקר שנערך במעבדה של ד"ר רן לאטי במרכז המחקר של נווה יער (איור 3), המייצגים טווח רחב של תכונות כימיות ופיזיקליות (דוגמת קיבוע ספיחה, מסיסות, זמן מחצית חיים ועוד), הצפויות להשפיע על מידת היעילות בטיפול בחומרים אלה (טבלה 1). בבחירת קוטלי העשבים נשקלה גם האפשרות למדוד את ריכוזם בתמיסה באמצעים זמינים. לאור זאת, נבחרו שני קוטלי עשבים שעבורם קיימות שיטות זמינות והדירות למדידת ריכוזם בתמיסה: *glufosinate-I*, *sulfosulfuron*. אף שקוטלי עשבים אלו פחות נפוצים בשימוש, תכונותיהם הכימיות-פיזיקליות דומות לאלו של קוטלי העשבים הנפוצים יותר *glyphosate-I* ו-*trifloxysulfuron*, בהתאמה. ששת קוטלי העשבים יושמו ל-Biobed בנפח תמיסה של 300 ליטר, לאחר מיהול פי 6 מהריכוז הצפוי ביישום על פי מינון המטרה (טבלה 1). אופן היישום תוכנן על בסיס תרחיש ייחוס, הלוקח בחשבון את אופי המשק בנווה יער ואת גודל מתקן ה-Biobed שהוקם במשק. להלן תרחיש הייחוס:

- א.** מתקן ה-Biobed שהוקם בנווה יער בגודל של 18 מ"ר ובעומק של כ-1 מטר (סה"כ כ-18 מ"ק ביומיקס. על פי Fogg et al. (2003), מתקן כנ"ל צפוי להיות מסוגל לקלוט ולטפל בעד 20,000 ליטר תשטיפ בשנה.
- ב.** לאחר ריסוס של קוטל העשבים במרסס משקי טיפופי (בנפח 3 מ"ק) נותרים כ-50 ליטר של תמיסה בצנרת המרסס, הנשטפים בעמדת השטיפה (לפי ריאיון עם קבלן ריסוס).
- ג.** שטיפה טיפופית של המרסס תתבצע ב-300 עד 500 ליטר של מים (לפי שיחה עם קבלן ריסוס ומנהל היחידה החקלאית בנווה יער), קרי, תמיסת המקור נמהלת פי 6 עד 10.
- ד.** חלקת גד"ש בגודל ממוצע (כ-150 דונם) מרוססת בקוטלי עשבים בממוצע 6 פעמים בשנה (על פי סקר שנערך במעבדה של ד"ר רן לאטי במרכז המחקר נווה יער; מידע שטרם פורסם). הווה אומר כי במשק בגודל של נווה יער (כ-1500 דונם) מדובר ב-30 עד 50 שטיפות בשנה ממוצעת, בנפח כולל של 15,000 עד 30,000 ליטר.



איור 3. עשרים קוטלי העשבים הנפוצים ביותר בשימוש בישראל במהלך 2014-2023.

הנתונים מבוססים על סקר שכלל 414 חלקות גד"ש בישראל, אשר נערך בקבוצה של ד"ר רן לאטי במרכז המחקר נווה יער (המידע לא פורסם). עמודות ריקות מסמנות קוטלי עשבים, שבהם נעשה שימוש במסגרת המחקר הנוכחי, ופירוט לגבי תכונות קוטלי עשבים אלו מופיע בטבלה מספר 1 להלן.

טבלה 1. תכונות קוטלי העשבים שבהם נעשה שימוש במהלך המחקר

קוטל עשבים	חומר פעיל	*מסיסות במים 20 מ"צ	*קיבוע החלוקה באוקטנול/מים - 20 מ"צ, pH 7	*מקדם ספיחה K_{foc}/K_{oc}	* DT_{50} Soil	מינון מטרה	ריכוז תמיסת המקור
		mg L ⁻¹	log	ml g ⁻¹	day	g ai du ⁻¹	mg ai L ⁻¹
מוניטור	Sulfosulfuron	1627	0.77	33.0	63.8	3.75	31.25
דיאורקס	Diuron	35.6	2.87	757	146.6	240	200
סטופר	Pendimethalin	0.33	5.4	13792	182.3	181.5	1512.5
בסטה	Glufosinate-ammonium	500000	-4.01	600	7.4	60	500
גליגן	Oxyfluorfen	0.116	4.86	7566	35	60	500
אורורה	Carfentrazone-ethyl	29.3	3.7	486.04	1	48	400

Lewis, K.A., Tzilivakis, J., Warner, D. and Green, A. (2016) An international database for pesticide risk * assessments and management. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 22(4), 1050-1064. DOI: 10.1080/10807039.2015.1133242

ניטור יעילות מתקן Biobed בטיפול בתשטיפים של קוטלי עשבים

במהלך המחקר נדגם ליטר אחד של תמיסת תשטיפ בכניסה וביציאה ממתקן ה-Biobed (איור ג2 ו-ג1, בהתאמה). דגימת התמיסה בכניסה למתקן בוצעה מיד לאחר מילוי מכל האיגום בתמיסת קוטל העשבים. ביציאה מהמתקן הייתה תדירות דגימת התמיסה תלויה בכך שנצברה תמיסה שחלחלה והתנקזה אל מכל האיסוף. מכל האיסוף נבדק לפחות אחת לשבוע לנוכחות תמיסה בו, ואם הייתה תמיסה, נפחה כומת ותועד, כליטר אחד ממנה נדגם, ומכל האיסוף רוקן מיתרת התמיסה. דגימות התמיסה אוחסנו במקרר בטמפרטורה של 5 מ"צ, עד לכימות ריכוז קוטלי העשבים בתמיסה ו/או בחינת הפיטוטקסיות של התמיסה.

בחינת פיטוטוקסיות (מבחן ביולוגי)

בחינת הפיטוטוקסיות של תמיסות קוטלי עשבים שנדגמו ממתקן ה-Biobed בוצעה בשתי שיטות: התארכות שורשים וביומסה של הנוף, תוך שימוש בתירס מספוא מזן לאורקה כצמח בוחן. עבור שתי השיטות נבחנה התגובה של צמח הבוחן לטווח רחב של ריכוזי תמיסת קוטל העשבים – החל מריכוז תמיסת המקור הצפוי (טבלה 1) ועד מיהול של שישה סדרי גודל מתחת למינן המטרה. כמו כן, נעשה שימוש בשיטות השונות לכימות מידת הפיטוטוקסיות של תמיסות השטיפה של קוטלי העשבים בכניסה וביציאה מה-Biobed. מבחן התארכות שורשים הוא שיטה נפוצה לניטור פעילות קוטלי עשבים בקרקע, כאשר מידת עיכוב התארכות השורש בקרקע המזוהמת בקוטל עשבים בהשוואה לקרקע ביקורת, ללא קוטל עשבים, מהווה מדד לפיטוטוקסיות של החומר (Weiss et al., 2006; Paporisch et al., 2018). לצורך מבחן זה נארזה קרקע חול חום מרחובות בצלחות פטרי מרובעות (10×10×1.5 ס"מ), ואליהן הוספה תמיסת הדיגום (או מים - לצלחות הביקורת) בנפח הנדרש לקבלת תכולת רטיבות (נפחית) של 33%. בחלק העליון של כל צלחת נזרעו 6 גרגרי תירס. לאחר מכן, הצלחות כוסו במכסה והוצבו בחושך בטמפרטורה של 25 מ"צ למשך 7 ימים. בתום תקופת האחסון נמדד אורך השורשים בכל צלחת. צבירת הביומסה של נוף הצמח מהווה אף היא מדד לפיטוטוקסיות של קוטל העשבים לצמחים הגדלים בקרקע המזוהמת בו. לצורך בחינה זו, עציצים בנפח של 0.5 ליטר מולאו בקרקע חרסיתית מחלקה אורגנית בנווה יער, ובכל עציץ נזרעו 3 גרגרי תירס. העציצים רוססו לפני הנביטה בתמיסת הדיגום (או במים בעציצי הביקורת), באמצעות מרסס מסוע המספק 20 ליטר לדונם, ולאחר מכן הוצבו בבית רשת תחת השקיה עילית למשך 14 עד 28 ימים. בתום תקופת הגידול נקצר נוף הצמחים ומשקלו תועד.

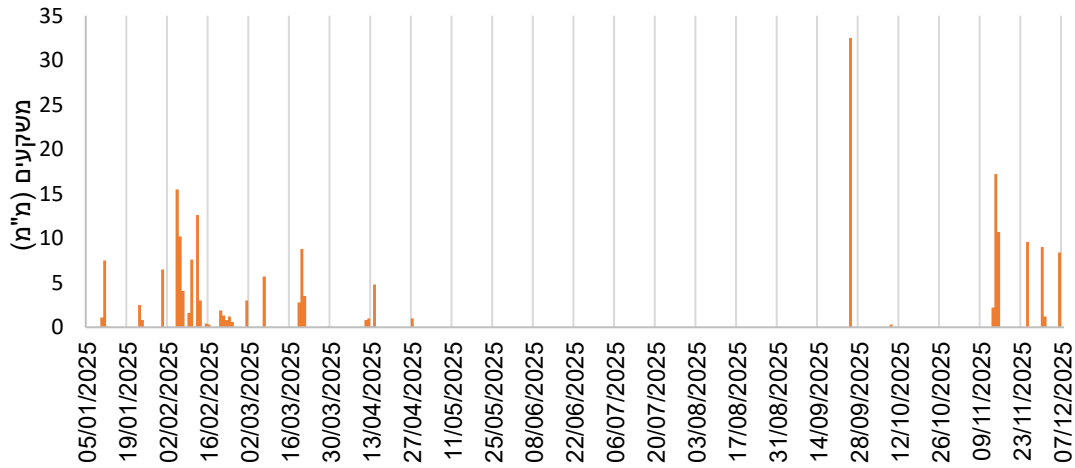
כימות ריכוז קוטלי העשבים *glufosinate*-I *sulfosulfuron*

הריכוז של שניים מקוטלי העשבים שיושמו ל-Biobed (*glufosinate*- ammonium-I *sulfosulfuron*) כומת בתמיסות השונות באמצעות *Liquid Chromatography Mass Spectrometry*-*Mass Spectrometry* (LCMS-MS). לצורך כך סוננה תת-דגימה של כ-10 מ"ל מתמיסת הדיגום באמצעות מסנן *Polytetrafluoroethylene* (0.45 μ), ומתמיסה זו נאספה תת-דגימה להזרקה ל-LCMS-MS, שהשוותה לעקום כיול תמיסות עם ריכוזים ידועים של כל אחד מקוטלי העשבים.

תוצאות ודין

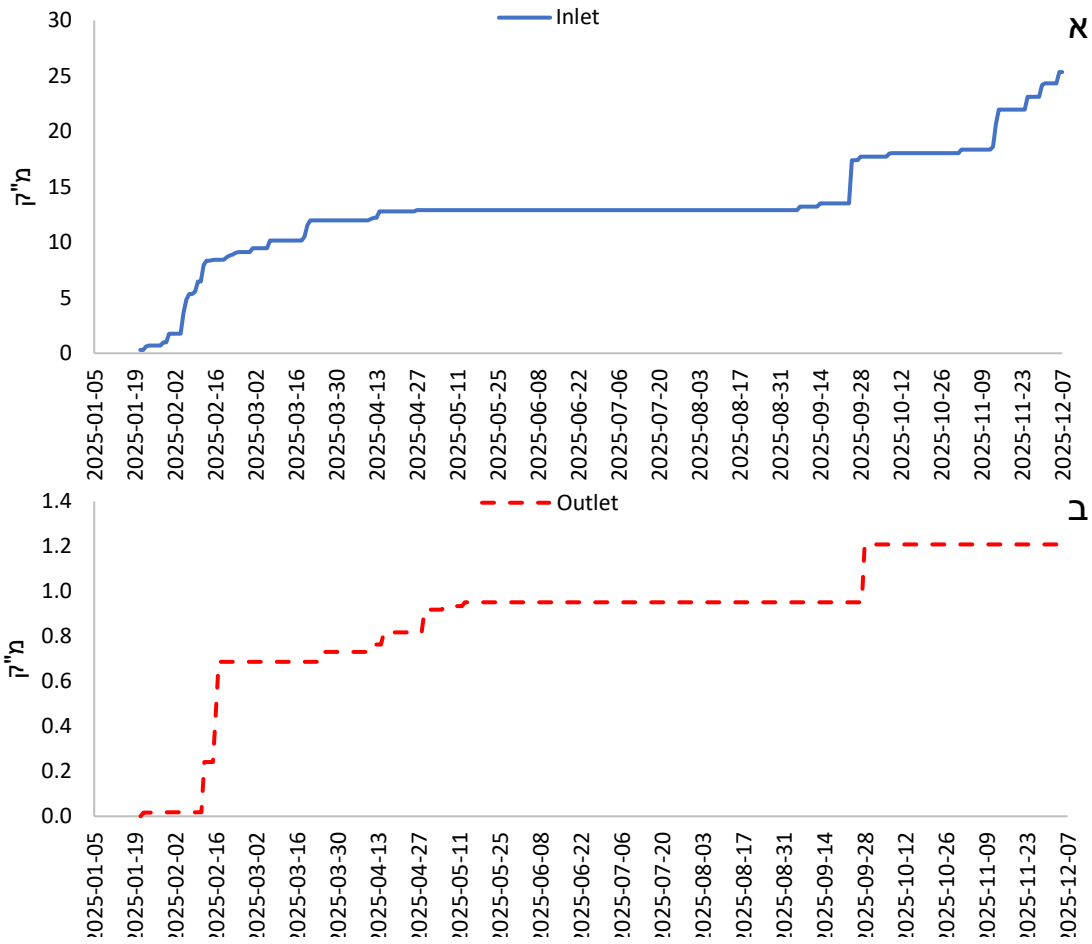
מזג אוויר ומאזן מים במתקן

שנת המחקר (2025) התאפיינה בחורף חם ויבש במיוחד והוגדרה כשנת בצורת שבה ירדו משקעים המהווים 40% עד 60% מהממוצע הרב-שנתי (פורת, 2025). כמות המשקעים שנמדדה בחורף 2024/25 בנווה יער הייתה 367.5 מ"מ בלבד, לעומת ממוצע רב-שנתי (± סטיית תקן) של 560.0 מ"מ (± 178 מ"מ), עפ"י נתוני השירות המטאורולוגי ('תחנת נווה יער מאוישת'; https://ims.gov.il/he/data_gov; גישה: ספטמבר 2025). מרבית המשקעים בעונה זו ירדו טרום הזרמת תמיסות חומרי ההדברה ל-Biobed, אשר החלה בחודש ינואר, ורק 111 מ"מ ירדו החל מתחילת ההזרמה ועד תום עונת הגשמים, כאשר עיקרם (70 מ"מ) ירד בחודש פברואר (איור 4). בהמשך, בתחילת עונת הגשמים 2025/26, ירדו 91.1 מ"מ, כולל אירוע גשם חריג בעוצמתו בתחילת ספטמבר (32 מ"מ ביממה). לנתוני מזג האוויר, והמשקעים בפרט, השפעה משמעותית על יעילות הטיפול בתשטיפי חומרי הדברה במתקן ה-Biobed. אלו משפיעים באופן ישיר על מאזן המים בבור הביומיקס; זמן ההישארות (retention) של התמיסה בבור משפיע על כושר הספיחה ועל יעילות הפירוק של המזהמים על ידי המתקן (Fogg et al., 2001; Castillo et al., 2008).



איור 4. משקעים מזודים במהלך שנת 2025.

על פי נתוני גשם מדי עשר דקות, במאגר נתוני השירות המטאורולוגי של תחנת נווה יער (https://ims.gov.il/he/data_gov, גישה: ספטמבר 2025).



איור 5. משטר מים ב-Biobed: נפח מצטבר של מים + תמיסה בכניסה (א) וביציאה (ב) מהמתקן.

נפח המים בכניסה למתקן חושב באמצעות נתוני מדידות משקעים בנווה יער במהלך המחקר (איור 3), תוך התחשבות בשטח הניקוז של בור ה-Biobed.

במהלך המחקר כומתו נפח התמיסה הנכנסת לבור ונפח התמיסה ביציאה. הנפח הנכנס למתקן (Inlet) כומת ע"י סכמת נפח התמיסה המטופטפת ונפח המים הנובע מהמשקעים, תוך התחשבות בכמות המשקעים המדודה (איור 4) והשטח המנוקז אל בור הביומיקס, כולל שוליו (איור 2). שטח הבור הוא 120 מ"ר, כך שמילימטר אחד של גשם שווה ערך לכניסה של 0.12 מ"ק מים (כלומר, 120 ליטר). במהלך תקופת המחקר היה נפח המים המצטבר בכניסה לבור גבוה פי 14 בממוצע מנפחו ביציאה (איור 4), כלומר מרבית המים הנכנסים נשמרו בבור ובהמשך התאדו לסביבה, עובדה העשויה להשפיע בצורה חיובית על יעילות הטיפול בתשטיף בשל זמן הישארות פוטנציאלי גבוה של חומר ההדברה בביומיקס. מאידך, מרבית נפח הנקז ביציאה, שהסתכם בכ-1.2 מ"ק, התקבל בעקבות כמה אירועים בודדים של גשם. לדוגמה, ניתן להבחין באירוע גשם משמעותי אחד בין 11/2/25 עד 17/2/25 שבמהלכו נאספו כ-70% מנפח התשטיף הכולל שנמדד בתקופת חורף 2024/25 (איור 4 ואיור 5), נתון המהווה הערכת חסר, כיוון שגודל מכל האיסוף (250 ליטר) לא היה מספיק כדי לאגום את התשטיף שזרם ביממה אחת בתקופה זו, כך שהמכל עלה על גדותיו לפני שבוצעה מדידת הנפח. דוגמה נוספת היא אירוע הגשם החריג שפקד את צפון הארץ ב-25/9/2025 ובמהלכו נמדדו 32.5 מ"מ גשם בנווה יער (איור 4), מה שהוביל ליציאה של כ-0.25 מ"ק נוספים של תשטיף בנקז, המהווים 35% מסך התשטיף הכולל שנמדד בחודשים ספטמבר עד דצמבר 2025 (איור 5). אירועי גשם עוצמתיים כפי שצוינו, אשר על פי מגמות שינויי האקלים בישראל, צפויים להתגבר בעתיד (יוסף et al., 2025), עשויים להוביל לירידה ביעילות הטיפול בחומרי הדברה באמצעות מתקן ה-Biobed, בשל הפחתת זמן הישארות של התמיסה בביומיקס ושטיפה מהירה של חומרי הדברה בעלי כושר ספיחה נמוך לפאזות המוצקות במצע זה.

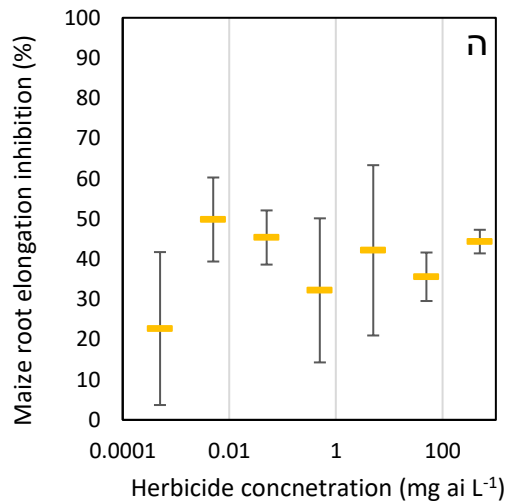
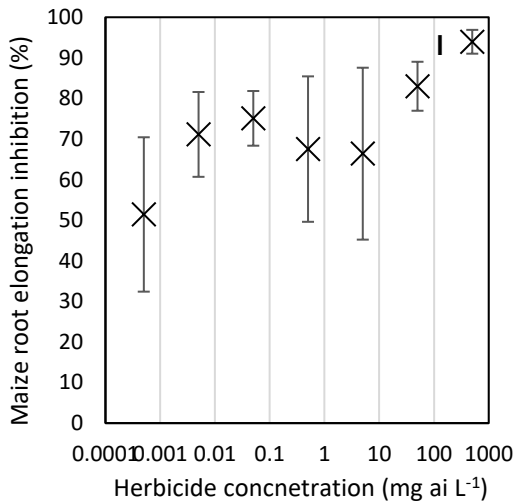
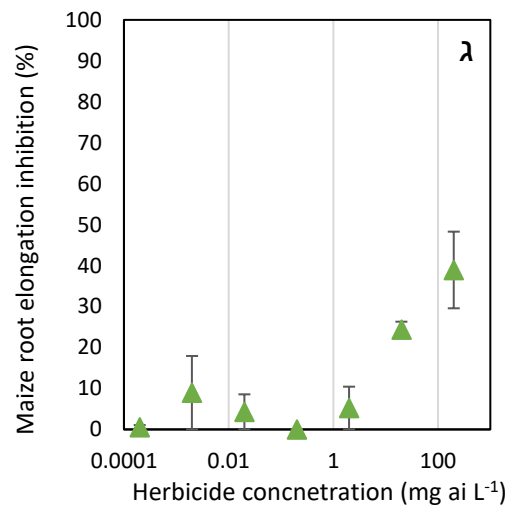
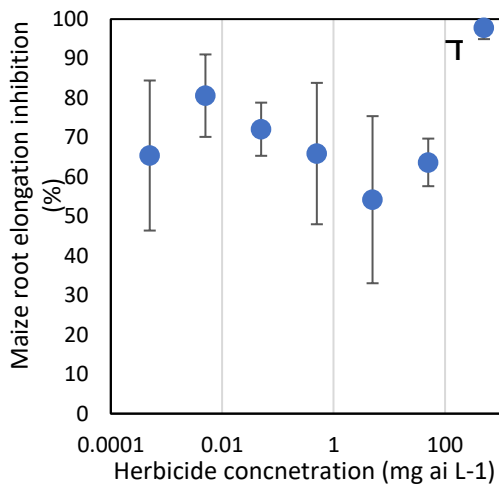
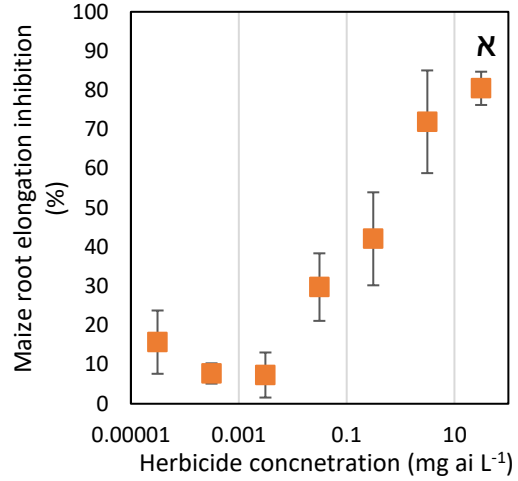
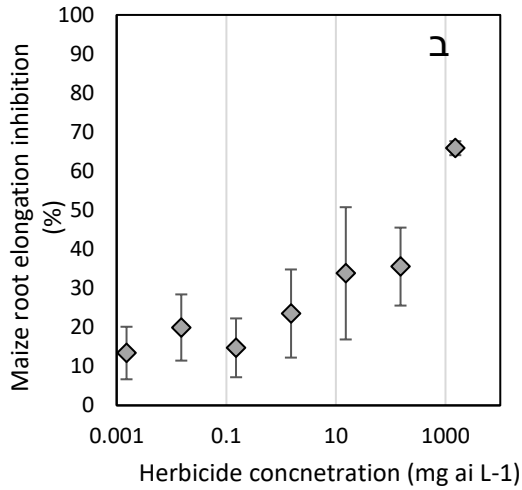
מבחן ביולוגי

עקומי תגובה

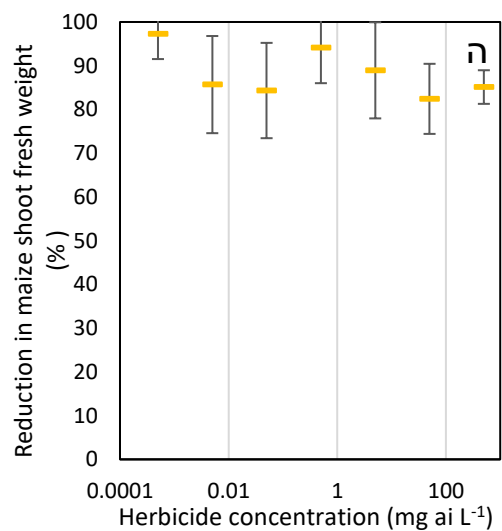
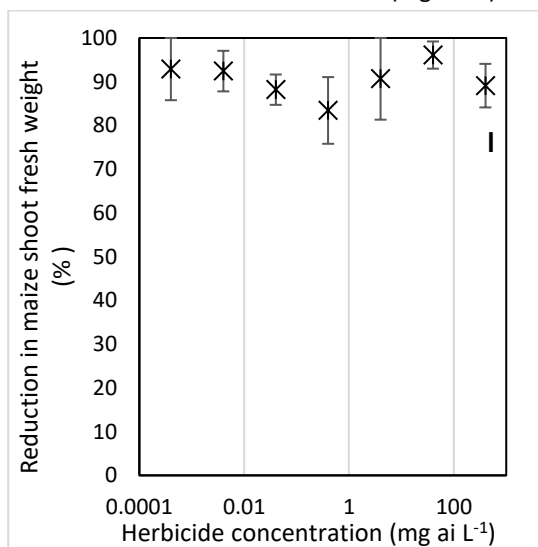
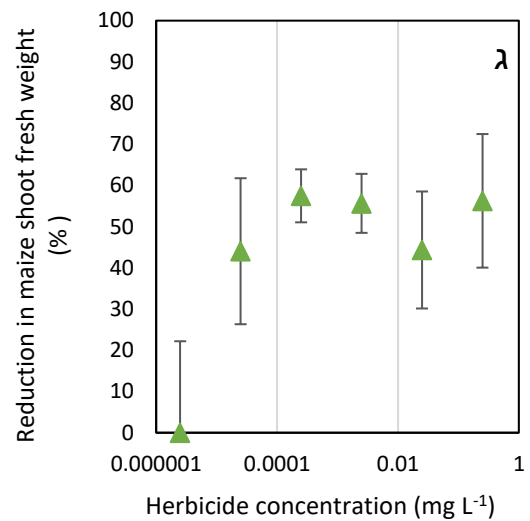
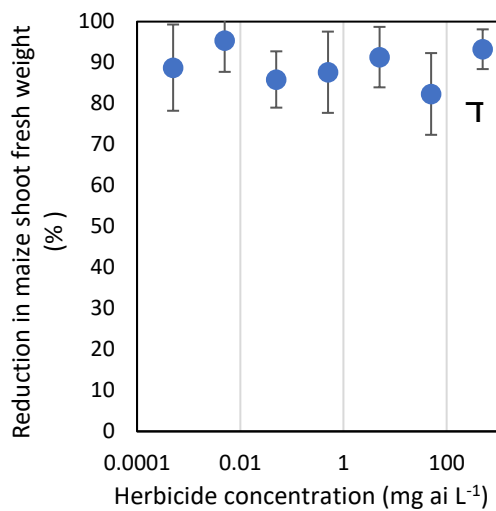
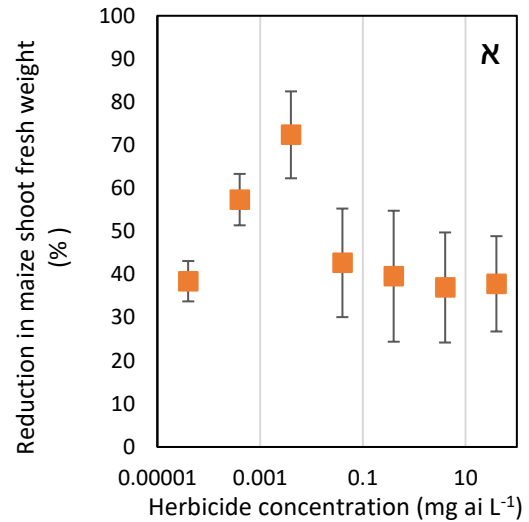
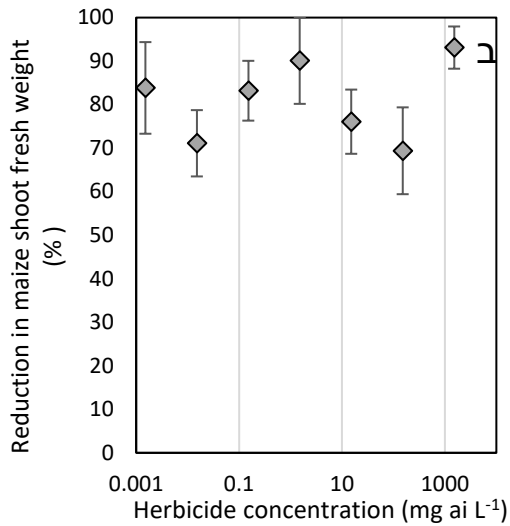
תגובת תירס לטווח ריכוזים רלוונטי של קוטלי העשבים שנבחנו במחקר הייתה שונה בין מבחן ביולוגי, שבו התארכות השורש היוותה מדד לפיטוטוקסיות (איור 6), לבין מבחן שבו התפתחות הנוף הייתה מדד לפיטוטוקסיות (איור 7). רגישות גבוהה של צמח הבוחן נרשמה במבחן התפתחות הנוף בטיפול בקוטלי העשבים מוניטור, סטופר ודירקס, ונמדדה פגיעה משמעותית בצמחים גם בריכוזים נמוכים ביותר – עד פי 10⁶ פחות מריכוז תמיסת המקור. לעומת זאת, במבחן התארכות השורשים ניתן היה להבחין בשינוי הדרגתי יותר בתגובת הצמחים, כתלות בריכוז קוטל העשבים שיושם (איור 6-א ואיור 7-א). בדומה, התגובה של צמח הבוחן לקוטלי העשבים גליגן, בסטה ואורורה הייתה משמעותית יותר במבחן התפתחות הנוף (איור 6-ו), עם פגיעה חריפה ואחידה בכל המיננים שנבחנו, לעומת התארכות השורשים אשר נפגעה במידה פחותה מעיכוב התפתחות הנוף, כשנראתה מגמה של שינוי הדרגתי בתגובה כתלות בריכוז תמיסת קוטל העשבים (איור 6-ו). התארכות השורשים, אם כן, מהווה מבחן ביולוגי רגיש יותר להבדלים בריכוז של קוטלי העשבים בקרקע, אך עבור חלק מקוטלי העשבים הרגישות לריכוזים מזעריים הייתה נמוכה. בנוסף, ניתן להבחין במידת רגישות שונה של צמח הבוחן לקוטלי העשבים השונים במבחנים השונים, הבדלים אשר עשויים לסייע בהערכת מקור הפיטוטוקסיות של התמיסה ביציאה מה-Biobed בניטור התמיסה במשך שנת המחקר.

פיטוטוקסיות תמיסת השטיפה בכניסה וביציאה מה-Biobed

ככלל, נמצאה הפחתה חלקית בפיטוטוקסיות של תמיסת השטיפה לאחר מעבר ב-Biobed. כצפוי, רמות הפיטוטוקסיות של התמיסה בכניסה למתקן היו גבוהות ובהתאם לרמות הפיטוטוקסיות המקסימליות שנמדדו באמצעות עקומי התגובה (איור 6 ואיור 7), הן מבחינת ההשפעה על התארכות שורשים (איור 8א) והן מבחינת ההשפעה על התפתחות הנוף (איור 8ב).



איור 6. עקומי תגובה של תירס לטווח ריכוזים של קוטלי העשבים: מוניטור (א), סטופר (ב), דיורקס (ג), בסטת (ד), גליגן (ה) ואורורה (ו), מבחינת התארכות השורשים.
 הריכוז המקסימלי בכל אחד מהטיפולים היה הריכוז הצפוי בכניסה ל-Biobed (טבלה 1); קווי השגיאה מייצגים את שגיאת התקן.

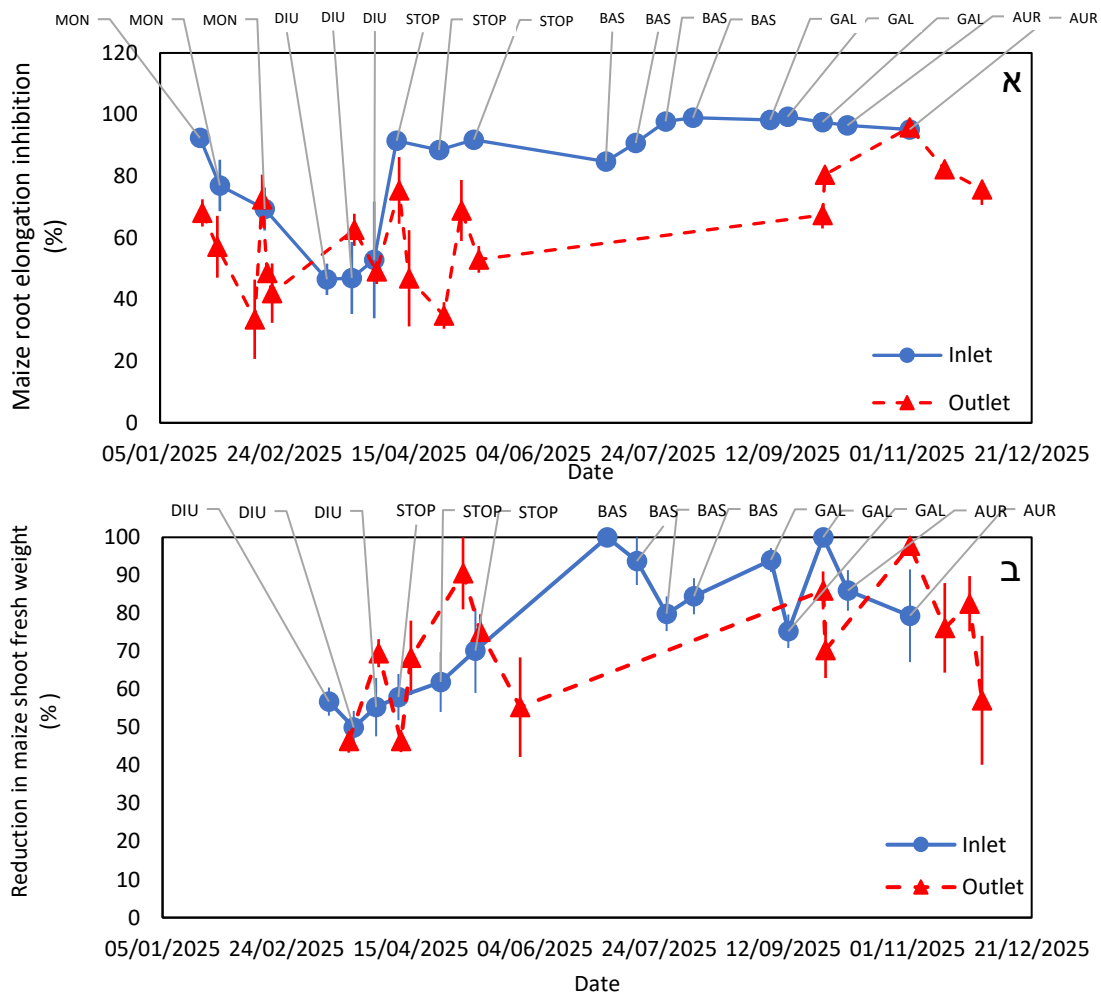


איור 7. עקומי תגובה של תירס לטווח ריכוזים של קוטלי העשבים: מוניטור (א), סטופר (ב), דיורקס (ג), בסטה (ד), גליגן (ה) ואורורה (ו), מבחינת התפתחות הנוף.

הריכוז המקסימלי בכל אחד מהטיפולים היה הריכוז הצפוי בכניסה ל-Biobed (טבלה 1); קווי השגיאה מציגים את שגיאת התקן.

בין ינואר למאי 2025, התקופה העיקרית שבה הופיע נקז באופן תדיר ביציאה מהמתקן, הפיטוטוקסיות של תמיסת הנקז, שנמדדה באמצעות מבחן התארכות השורשים, הייתה פחותה בכ-30% מפיטוטוקסיות התמיסה בכניסה (איור 8א), אך הפגיעה בהתפתחות הנוף נשארה גבוהה, עם פחיתה ממוצעת של כ-5% בלבד בפיטוטוקסיות. הבדל זה נובע ככל הנראה, מרגישות המבחנים הביולוגיים השונים, והוא מעיד על הפחתה חלקית של ריכוז קוטלי העשבים בתמיסה לאחר חלחולה דרך הביומיקס. כפי שהוזכר במבחן צבירת הנוף של תירס, תגובת התירס לריכוזים נמוכים של קוטלי עשבים חריפה יותר, ואין הבדל ניכר בתגובה לטווח רחב של ריכוזים (איור 7). לעומת זאת, הרגישות לריכוזים שונים של קוטלי העשבים במבחן התארכות שורשים גבוהה יותר, ופחיתה של 30% בפיטוטוקסיות נמצאה בהתאמה לפחיתה של עד שני סדרי גודל בריכוז קוטלי העשבים לאחר מעברם ב-Biobed (איור 6). בעקבות גשמי תחילת חורף 2025, נצפתה שוב תמיסה באופן תדיר ביציאה מהמתקן. לאחר הגשם הראשון נצפתה עליה בפיטוטוקסיות של התמיסה ביציאה, הן במבחן התארכות שורשים והן בצבירת הביומסה של הנוף, עדות לריכוז גבוה יחסית של קוטלי עשבים בתמיסה. עם זאת, המשך הגשמים הוביל לפחיתה בפיטוטוקסיות התמיסה ביציאה מהמתקן עד לרמות הפיטוטוקסיות אשר נמדדו בשלבים הראשונים של הניסוי: כ-75% במבחן השורשים, וכ-50% במבחן הפגיעה בביומסה של הנוף (איור 6).

עבור חלק מקוטלי העשבים הפיטוטוקסיות של תמיסת הנקז לא פחתה באופן ניכר לעומת הפיטוטוקסיות של תמיסת המקור. עובדה זו מקשה על קביעה של מידת יעילות המערכת בטיפול בקוטלי עשבים, לאור שאריות שנובעות גם מיישום קוטלי עשבים נוספים למתקן. לדוגמה, במבחן התארכות השורשים הפגיעה הממוצעת של תמיסת המקור של דיורקס הייתה 49% לעומת פגיעה בהתארכות של 55% מתמיסת הנקז, עלייה זו עשויה לנבוע מהשפעת התוספת של שאריות מוניטור מיישומים קודמים ושל תוספת שאריות דיורקס לאחר יישומו ל-Biobed (איור 8א). רעילות הנקז הממוצעת נותרה ללא שינוי גם לאחר הזרמה של קוטל עשבים שלישי (סטופר) ל-Biobed, על אף שרעילות תמיסת המקור עלתה. מכאן ניתן להעריך כי חלחול סטופר דרך המתקן הפחית את ריכוז החומר הפעיל בתמיסה, אך לא ניתן להעריך אם הייתה הפחתה גם בריכוז של קוטל העשבים דיורקס. הפחתה בריכוז קוטל העשבים סטופר לאחר חלחולו דרך הביומיקס תואמת למידע על תכונות החומר הפעיל שלו (Pendimethalin), אשר ידוע כבעל נייזות מוגבלת בקרקע, עם מסיסות נמוכה במים, ליפופיליות גבוהה וספיחה מועדפת לחלקיקי הקרקע ולפאזה האורגנית בקרקע, כפי שמשתקף מתכונותיו הכימיות-פיזיקליות (טבלה 1). לעומת זאת, החומר הפעיל בקוטל העשבים מוניטור (Sulfosulfuron) בעל תכונות המקטינות את הסבירות לטיפול יעיל באמצעות המתקן (מסיסות גבוהה במים, הידרופיליות ומקדם ספיחה נמוך). אף על פי כן, נמדדה הפחתה משמעותית ברעילות תמיסת השטיפה לאחר הכנסת קוטל עשבים זה למתקן, המעידה על ירידה בריכוזו בתמיסת הנקז, בהשוואה לתמיסת המקור (איור 8א). לקביעה כמותית של מידת הפחתה בריכוז, נדרש זיהוי ספציפי של החומר הפעיל וקביעת ריכוזו בתמיסה, אשר בוצעה עבור קוטל עשבים זה ועבור החומר הפעיל בקוטל העשבים בסטה (Glufosinate-ammonium) באמצעות LCMS-MS.



איור 8. פיטוטוקסיות של תמיסת קוטלי העשבים בכניסה (Inlet) וביציאה (Outlet) ממתקן ה-Biobed, כפי שנמדדה במבחן התארכות שורשי תירס (א) ובמבחן פגיעה בצבירת הביומסה של צמחי תירס (ב). קווי השגיאה מייצגים את שגיאת התקן; קוטלי עשבים שיושמו למתקן בכניסה, כמפורט בטבלה 1, מסומנים באמצעות קיצורים: MON=מוניטור, DIU=דיוורקס, STOP=סטופר ו-BAS=בסטה. תוצאות הניטור מספטמבר 2025 ועד דצמבר 2025 יוצגו בדו"ח הסופי.

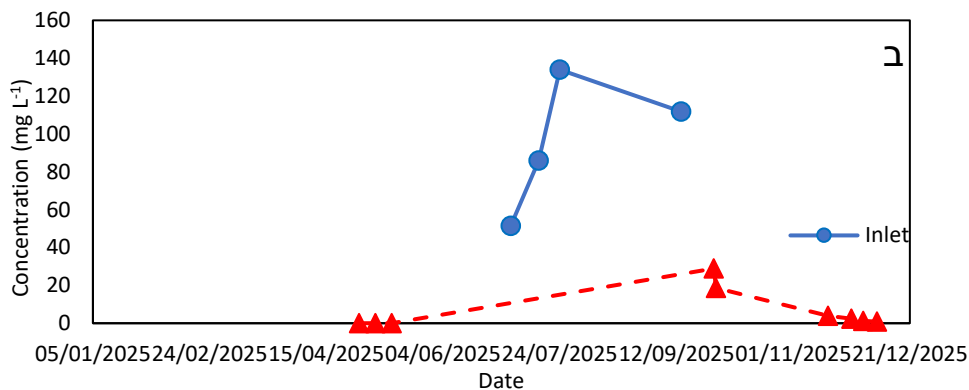
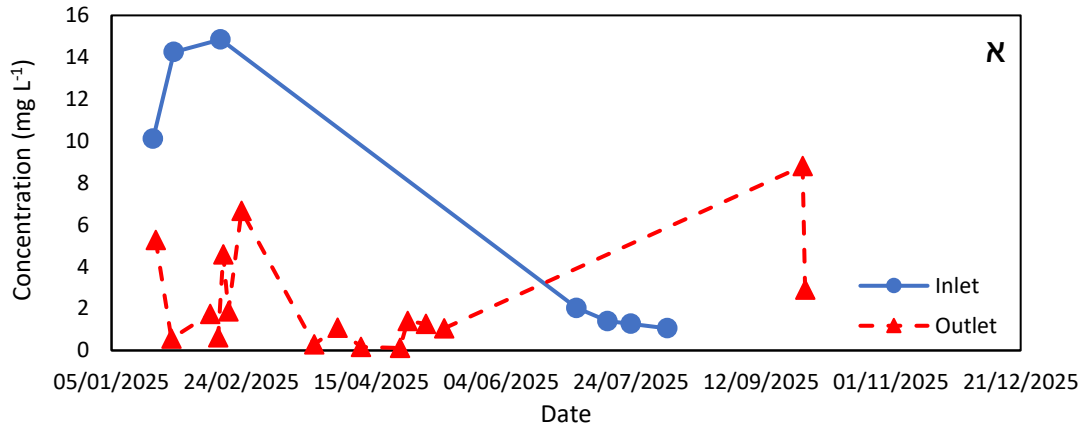
כימות ריכוז קוטלי העשבים Sulfosulfuron ו-glufosinate-ammonium

ריכוזם בתמיסה של החומרים הפעילים בקוטלי העשבים מוניטור ובסטה (Sulfosulfuron ו-glufosinate-ammonium, בהתאמה) כומת באמצעות מכשיר LCMS-MS. ריכוז קוטל העשבים Sulfosulfuron בתמיסת הנקז, מיד לאחר יישומו למתקן בינואר 2025, פחת בכ-50% לעומת ריכוזו בכניסה למתקן (5.3 לעומת 11.2 mg L⁻¹, בהתאמה) כאשר בהמשך חורף 2025 הריכוז בנקז המשיך לרדת והיה נמוך בשני סדרי גודל לכל היותר מהריכוז בתמיסת המקור (איור 9א). הפחתה זו מאששת את תוצאות הניטור של רעילות תמיסות קוטל העשבים, המעידות על הפחתה של עד 30% ברעילות התמיסה בנקז (איור 8א) התואמת פחיתה של כשני סדרי גודל בריכוז קוטל העשבים בתמיסה (איור 6א). קוטל העשבים Sulfosulfuron הינו חומר מסיס, בעל ניידות גבוהה וקצב פירוק איטי בקרקע (טבלה 1), ולכן סביר כי יימצאו שאריות שלו בנקז ה-Biobed גם זמן רב לאחר היישום. ואכן, במשך כל תקופת הגשמים של חורף 2025, אשר במהלכה הופיע נקז ביציאה מהמתקן, נמצאו כמויות משמעותיות של מוניטור בתמיסת הנקז, אף שריכוז התמיסה הממוצע בתום הזרמת קוטל העשבים למתקן (1.8 mg L⁻¹) היה נמוך בסדר גודל, לעומת ריכוז תמיסות המקור (13.1 mg L⁻¹) (איור

9א). גשמי סתיו 2025 (דיגום נקז בספטמבר 2025) הביאו לעלייה משמעותית בריכוז קוטל העשבים Sulfosulfuron בנקז (8.8 mg L⁻¹), לרמה גבוהה מזו שנמדדה מיד לאחר היישום למתקן, אך עדיין נמוכה מריכוז תמיסת המקור (איור 8א). בהמשך חלה ירידה בריכוז קוטל העשבים בנקז לרמות שנמדדו במהלך החורף. תוצאות אלו מעידות כי על אף ההפחתה הראשונית בריכוז קוטל העשבים בנקז, כמות משמעותית של שאריות החומר הפעיל נותרו במתקן במשך השנה, אישוש נוסף לכך שיעילות הטיפול בקוטל עשבים זה חלקית בלבד.

ריכוז קוטל העשבים Glufosinate-ammonium בתמיסת הנקז נמדד לפני ואחרי הגעתו למתקן. עבור קוטל עשבים זה נמדד גם ריכוזו בתמיסת הנקז לפני שהועבר למתקן, במטרה לבחון אם קיימים גורמים בתמיסת הרקע, העשויים למסך על הזיהוי הספציפי שלו ב-LCMS-MS. ריכוז קוטל העשבים בנקז לפני הגעתו למתקן ביולי 2025, היה נמוך מאוד (0.009 mg L⁻¹ בממוצע), לעומת ריכוז מדוד הגבוה בארבעה עד חמישה סדרי גודל בתמיסות שיושמו למתקן (איור 9ב). תמיסת קוטל העשבים יושמה ארבע פעמים למתקן, שלוש פעמים במהלך יולי 2025 ופעם אחת בספטמבר 2025, כאשר בשלושת היישומים הראשונים ריכוז התמיסה בכניסה למתקן עלה בהדרגתיות, וביישום הרביעי פחת מעט, אך נותר ברמתו הגבוהה (איור 9ב), תוצאות המעידות על כך שככל הנראה לאחר כל יישום נותרה כמות משמעותית של קוטל העשבים במכל האיגום. בסוף ספטמבר 2025, כשבועיים לאחר היישום האחרון של קוטל העשבים למתקן, בעקבות אירוע הגשם המשמעותי ב- 25/09/2025 (איור 4) הופיעה לראשונה לאחר תקופה ארוכה תמיסה בנקז (איור 5ב). ריכוז Glufosinate בנקז במועד זה היה נמוך בכ-80%, לעומת ריכוז השיא של התמיסה שהועברה למתקן (איור 9ב), וזוהי עדות לכושר טיפול גבוה יחסית בתמיסות קוטל עשבים זה. ריכוז קוטל העשבים בתמיסות הנקז אשר הופיעו לאחר גשמי החורף הראשונים (בנובמבר-דצמבר 2025; איור 4) היה נמוך מאוד וירד בהדרגתיות לריכוז של 0.86 mg L⁻¹ - ריכוז הנמוך בשלושה סדרי גודל מריכוז השיא של תמיסת המקור (איור 9ב), עדות ליעילות הגבוהה יחסית בטיפול בקוטל עשבים זה.

יש לציין כי פיטוטוקסיות גבוהה של תמיסת הנקז שנמדדה במהלך תקופה זו (איור 8) עשויה לנבוע הן מהריכוז השאריתי של בסטה בתמיסה, לאור רמת הפיטוטוקסיות הגבוהה שנמדדה במבחן הביולוגי (איור 6 ד ואיור 7ד), אך יכולה להתהוות גם משאריות של קוטלי עשבים אחרים שיושמו למתקן במהלך שנת המחקר. Glufosinate-ammonium הוא קוטל עשבים הידרופילי, מסיס מאוד במים ובעל שאריות נמוכה (טבלה 1) כאשר מחד, תכונות אלו מקשות על הטיפול בו באמצעות מתקן ה-Biobed בשל תנועתו עם המים וכושר ספיחה נמוך על גבי הפאזה האורגנית, ומאידך, השאריות הנמוכה מאפשרת יעילות גבוהה של הטיפול בשאריות הנותרות בתוך בור הביומיקס בעקבות פירוק של החומר. לפיכך, סביר כי יעילות הטיפול הגבוהה במקרה זה קשורה גם למועד הספציפי שבו יושמו תמיסות קוטל עשבים זה למתקן - קרי בתקופת הקיץ, כאשר אין גשמים זרם התמיסה במתקן נמוך, וכן למועד הופעת הנקז, שהיה שבועיים לאחר היישום האחרון, תקופת זמן שבמהלכה מרבית החומר הפעיל הנותר בביומיקס צפוי להתפרק.



איור 9. ריכוז Sulfosulfuron (א) ו-Glufosinate-ammonium (ב) - החומרים הפעילים בקוטלי העשבים מוניטור ובסטה, בהתאמה - (Inlet) וביציאה (Outlet) ממתקן ה-Biobed תוצאות הניטור מספטמבר 2025 ועד דצמבר 2025 יוצגו בדו"ח הסופי.

סיכום ומסקנות

במסגרת המחקר הנוכחי, נעשה שימוש במתקן Biobed משקי, אשר הוקם בתחילת שנת 2024 בנווה יער, לצורך בחינה ראשונית של יעילות המתקן בטיפול בתשטיפים הנובעים משטיפת מרססים. לשם כך, בשנת 2025 הועברו למתקן באופן מבוקר תמיסות של שישה קוטלי עשבים שונים. מניתוח הנתונים עולה כי יעילות המתקן בטיפול בתשטיפי קוטלי העשבים היא חלקית. במהלך שנת המחקר נמדדה הפחתה ברעילות תמיסת קוטלי העשבים לאחר החלחול דרך בור הביומיקס, אך ההפחתה הייתה חלקית (עד מקסימום 50%) ועדיין נותרה רעילות ניכרת לצמח הבוחן, המעידה על כמות משמעותית של קוטלי עשבים בנקז. בתום תקופת הניסוי ניכר כי הבור נקי כמעט לחלוטין מעשבים הצומחים על גביו, לעומת כיסוי מלא בעשבייה בתקופה המקבילה טרום הזרמת קוטל העשבים (איור 10), עדות נוספת לשאריות משמעותיות של קוטלי עשבים הזמינים בתמיסת מצע הבור.

כימות ישיר של ריכוז החומר הפעיל בקוטל העשבים מוניטור מעיד על ירידה של עד שני סדרי גודל בריכוז, אך לאור הריכוז הגבוה של תמיסת המקור (רק פי 6 עד 10 פחות מריכוז תמיסת קוטלי העשבים המיושמת לשדה), גם לאחר חלחול דרך ה-Biobed ריכוז קוטל העשבים הנותר בתמיסה המטופלת גבוה (0.1 עד 6 mg L⁻¹). בנוסף, גם חודשים רבים לאחר יישומו נמדדו ריכוזים משמעותיים של קוטל עשבים זה בתמיסת הנקז, עדות לשאריות משמעותיות שלא התפרקו במצע הביומיקס. חשוב לציין כי החומר הפעיל בקוטל העשבים Sulfosulfuron בעל תכונות כימיות-פיזיקליות שמהוות מקרה קיצון בהקשר של יעילות טיפול צפויה במתקן כ-Biobed - שאריות גבוהה בקרקע בתוספת כושר ספיחה נמוך מאוד, אשר מגדילות את הסבירות לכך

שריכוזים גבוהים של החומר ימדדו בתמיסת הנקז, ולכן יעילות הטיפול בחומרים עם תכונות אחרות עשויה להיות גבוהה יותר. נראה כי יעילות הטיפול בחומר הפעיל בקוטל העשבים בסטה (Glufosinate-ammonium) היה יעיל יותר, ככל הנראה, על רקע העובדה שמדובר בחומר שאינו שאריתי אשר יושם בתקופת הקיץ, שבה לא היו גשמים שינקזו תמיסה מהמתקן.

יעילות הטיפול מושפעת באופן ישיר ממשטר המים ב-Biobed, המשפיע על מידת ההישארות של קוטלי העשבים בבור הביומיקס. בהקשר זה ניתן לומר כי שנת 2025 היוותה אתגר מבחינת יעילות הטיפול, לפחות במהלך עונת הגשמים שהתאפיינה במספר אירועי גשם בודדים, אך עוצמתיים בחלקם. לאחר אירועי גשם עוצמתיים צפויה להיות שטיפה מהירה של חומרי הדברה מהמתקן, אשר בשילוב עם תקופות יובש עשויה להתגבר כתוצאה מזרימה מועדפת של מים ומומסים דרך סדקים הנוצרים בביומיקס, תופעה המפחיתה את כושר הספיחה והפירוק על גבי הפאזה המוצקה. בנוסף, תקופות יובש מקטנות את קצב הפירוק של חומרי הדברה במתקן. שיפור יעילות מתקן כמו שנבחן תלוי בניהול מאזן המים, המבוצע לעיתים באמצעות תוספת השקיה, לשמירה על רטיבות בתקופות יבשות, וכן באמצעות כיסוי המתקן להקטנת ההשפעה של אירועי גשם קיצוניים (Castillo et al., 2008). בנוסף, ניתן להתאים את חומר המוצא של הביומיקס כך שתאחיזת המים שלו תהיה גבוהה יותר, באמצעות שינוי היחס בין הגורמים השונים המרכיבים את הפאזה המוצקה שלו, ו/או בהגדלת נפח המתקן (ובעיקר עומק הביומיקס), כך שיאפשר כושר אחיזה של נפחים גבוהים יותר של התמיסה וזמן הישארות ארוך יותר בפאזה הסופחת. לצורך אופטימיזציה של הרכב המתקן, דרוש מחקר נוסף ומקיף בתנאים מבוקרים עם חזרות, כך שיבחן הרכבים שונים של חומר מוצא, עומקים שונים ועוד. מחקר כנ"ל צריך להתבצע בהקשר לתנאי מזג האוויר הצפויים ובהתחשב בעלייה הצפויה בשכיחות של אירועי קיצון אקלימיים ובהשפעתם על יעילות הטיפול.

יש לקחת בחשבון כי המחקר הנוכחי במתקן שהוקם בנווה יער הוא מטבעו ברמה של תצפית. במהלך המחקר אומנם יושמו קוטלי העשבים בכמה חזרות למתקן, אך יישומים אלו אינם מהווים חזרות בלתי תלויות, ולכן מסקנות המחקר על מידת יעילות הטיפול צריכות להילקח בערבון מוגבל ולא ניתן להשליך מהן על מידת היעילות בתנאים דומים במתקנים אחרים. כאמור, יש צורך במחקר בסיסי לפיתוח הידע הדרוש לאופטימיזציה של מתקן Biobed בתנאי ישראל - הן מבחינת חומרי הדברה נפוצים בשימוש והן מבחינת תנאי סביבה - וכן צורך בהמשך ניטור יעילות הטיפול בקוטלי עשבים וחומרי הדברה אחרים באמצעות המתקן הקיים ומתקנים נוספים שהוקמו בארץ, כדי לאסוף מידע מספק לפיתוח פרוטוקול שטיפת מרססים אשר מחד, יקטין את הסיכון הסביבתי לזיהום הנובע מפעולה שגרתית זו; ומאידך, יהיה בר ביצוע על ידי המגדלים, בניגוד לתקנות הטיפול בתשטיפים הנהוגות כיום.



איור 10. מתקן ה-Biobed בינואר 2025, לפני הזרמת תמיסות קוטלי עשבים (א), ובדצמבר 2025 לאחר השלמת הזרמת כל תמיסות קוטלי העשבים (ב)

תודות:

לקרן מחקרי שה"מ על מימון המחקר.

האמור לעיל הינו בגדר עצה מקצועית בלבד ואינו מהווה חוות דעת מומחה לצורך הצגה כראיה בהליך משפטי. על מקבל העצה לנהוג מנהג זהירות, ושימוש או הסתמכות על המידע המופיע לעיל הינו באחריות מקבל העצה בלבד. אין להעתיק, להפיץ או להשתמש במסמך זה או בחלקים ממנו לצורך הליך משפטי כלשהו, ללא אישור מראש ובכתב של החתומים.

© שה"מ - הוצאה לאור, 2026, עריכה לשונית: עדי סלוניקו; גרפיקה: לובה קמינצקי

רשימת ספרות מצוטטת

- Borggaard, O.K., Gimsing, A.L., 2008. Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Management Science* 64, 441–456. doi:10.1002/PS.1512
- Castillo, M.D.P., Torstensson, L., Stenström, J., 2008. Biobeds for environmental protection from pesticide use - A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. doi:10.1021/jf800844x
- Fogg, Paul, Boxall, A.B.A., Walker, A., 2003. Degradation of pesticides in biobeds: The effect of concentration and pesticide mixtures. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51, 5344–5349. doi:10.1021/jf030060z
- Fogg, P, Boxall, A., Jukes, A., Walker, A., 2003. Biobeds phase 3: the development and evaluation of a biological system for the disposal of pesticide waste and washings. Derby.
- Fogg, P., Boxall, A., Walker, A., 2001. Biobeds: the development and evaluation of a biological system for the disposal of pesticide waste and washings. Derby.
- Fogg, P., Boxall, B.A., Walker, A., 2000. Biobeds: the development and evaluation of a biological system for the disposal of pesticide waste and washings. Derby.
- Mandl, K., Cantelmo, C., Gruber, E., Faber, F., Friedrich, B., Zaller, J.G., 2018. Effects of Glyphosate-, Glufosinate- and Flazasulfuron-Based Herbicides on Soil Microorganisms in a Vineyard. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 101, 562–569. doi:10.1007/S00128-018-2438-X/TABLES/3
- Paporisch, A., Laor, Y., Rubin, B., Achdari, G., Eizenberg, H., 2018. Application timing and degradation rate of sulfosulfuron in soil co-affect control efficacy of Egyptian broomrape (*Phelipanche aegyptiaca*) in tomato. *Weed Science* 66, 780–788. doi:10.1017/wsc.2018.49
- Relyea, R.A., 2005. The impact of insecticides and herbicides on the biodiversity and productivity of aquatic communities. *Ecological Applications* 15, 618–627. doi:10.1890/03-5342;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Rose, S., Basford, B., Carter, A., Great Britain. Environment Agency., 2004. Development of a design manual for agricultural pesticide handling and washdown areas. Environment Agency, Bristol.
- Weiss, Y., Rubin, B., Shulman, A., Ben Shir, I., Keinan, E., Wolf, S., 2006. Determination of plant resistance to carbamate herbicidal compounds inhibiting cell division and early growth by seed and plantlets bioassays. *Nature Protocols* 1, 2282–2287.
- בן דוד, ק., שפייר, א., 2020. ניטור זהמים אורגניים באגן היקוות הכנרת - 2019 - דו"ח שנתי. דובובסקי, י., חודורקובסקי, מ., אולסן, א., גסמן, מ., פרידלר, ע., 2013. חומרי הדברה ותוצרי פירוקן - שטיפה באירועי גשם ראשונים לנחלי אגן החולה. אקולוגיה וסביבה 4, 24–26.
- יוסף, י., צפורי, א., אילוטוביץ, א., כרמונה, י., חלפון, נ., אוזן, ל., בהר"ד, ע., פורשפן, א., לוי, י., גבעתי, ע., 2025. ניתוח מגמות אקלימיות ואירועי קיצון בישראל לאורך המאה ה-21 - השירות המטאורולוגי. מנדלב, א., טופז, ת., בן-ארי, י., חפץ, ב., 2021. חומרי הדברה, חומרים רפואיים ומוצרי טיפוח בנחלי החוף בישראל בגל השיטפון הראשון - נוכחות וריכוזים. אקולוגיה וסביבה 12, 13–20.
- משה, א., ישראלי, ל., דיין, ת., 2021. אסטרטגיות לשיפור ניהול נחלים ברמה אגנית. אקולוגיה וסביבה 12, 59–66.
- פורת, ע., 2025. עונת הגשמים תשפ"ה. 2025/2024.