

## השפעת השקיה בקולחים על תנועה עלית ואנכית של חומרי הדברה בקרקע

Effect of effluent irrigation on surface and vertical movement of pesticides in soil

מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות

ע"י:

**מני בן-חור** – המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, בית דגן

**אורי מינגלגרין** – המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, בית דגן

**M. Ben-Hur** – Institute of Soils, Water, and Environmental Sciences, A.R.O.

**U. Mingelgrin** – Institute of Soils, Water, and Environmental Sciences, A.R.O.

### טכנאים:

חיים טנאו – המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, בית דגן

לאה לייב - המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, בית דגן

### סטודנטים:

גיא גסר - המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, בית דגן

ניסים חזן - המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, בית דגן

### תקציר

מטרת המחקר הייתה ללמוד את השפעת השקיה בקולחים שניוניים ויישום בוצות שפכים לאחר טיפולים שונים על תנועה עילית עם מי הנגר ותנועה אנכית עם מי הנקז של אטרזין בקרקעות שונות. המחקר כלל: (i) ניסוי מעבדה שכללו קביעת עקומי ספיחה ושחרור של אטרזין בניסויי batch ותנועה אנכית של אטרזין בעמודות קרקע מופרות; (ii) תנועה עילית עם מי הנגר ותנועה אנכית עם מי הנקז בניסויי מדמה גשם; (iii) תנועה עילית של אטרזין בתנאי גשם טבעיים בשדה. השפעת השקיה בקולחים על ספיחה/שחרור של אטרזין על הקומפלקס הסופח בקרקע נמצאה מורכבת ותלויה בתכולת החומר האורגני הכללי בקרקע, מרקם הקרקע וריכוז החומר האורגני המסיס (DOM) בתמיסת הקרקע, כאשר השקיה בקולחים, הגדילה באופן כללי, את ריכוז ה-DOM בקרקע. בניסויי מדמה גשם נמצא שריכוזי האטרזין במי הנגר בקרקע חולית היו גבוהים יותר בקרקע שהושקתה בקולחים מאשר בקרקע שהושקתה במים שפירים, כאשר בקרקע חרסיתית לא נמצאו הבדלים מובהקים בריכוזי האטרזין במי הנגר בין שני טיפולי ההשקיה. לעומת זאת, רק בקרקע החרסיתית ריכוזי האטרזין במי הנקז בקרקע החרסיתית היו גבוהים יותר בקרקע שהושקתה בקולחים מאשר בקרקע שהושקתה במים שפירים. בניסוי השדה בגשמים טבעיים נמצא שכמויות האטרזין הכלליות שהוסעו עם מי הנגר היו נמוכות יותר בטיפולי הבוצה השונים לעומת הביקורת בקרקע עם מרקם קל ובינוני, כאשר כמויות האטרזין הכלליות הנמוכות ביותר היו בטיפולים של בוצה סוג ב' ובוצת קומפוסט. טיפולי הבוצה השונים ייצבו את מבנה הקרקע, הקטינו את רגישות הקרקעות להיווצרות נגר עילי, וע"י כך הקטינו את כמויות האטרזין שהוסעו עם מי הנגר.

**הצהרת החוקר הראשי:** הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

**הניסויים מהווים המלצות לחקלאיים:** לא

**תאריך:** 8.9.2011

**חתימת החוקר:**

## השפעת השקיה בקולחים על תנועה עלית ואנכית של חומרי הדברה בקרקע

### מקרא

- 3 מבוא 1.0
- 3 פירוט עיקרי הניסויים----- 2.0
- 3 ניסוי מעבדה----- 2.1
- 3 השקיית הקרקע בקולחים----- 2.1.1
- 4 איזותרמות ספיחה ושחרור של אטרזין----- 2.1.2
- 5 תנועה של אטרזין בעמודות קרקע מופרות----- 2.1.3
- 5 ניסוי במדמה גשם----- 2.2
- 6 חלקות נגר בתנאי גשם טבעיים----- 2.3
- 7 אנליזות כימיות----- 2.4
- 7 דיון----- 3.0
- 8 איזותרמות ספיחה ושחרור של אטרזין----- 3.1
- 10 תנועת אטרזין בעמודות קרקע מופרות----- 3.2
- 10 תנועת אטרזין אנכית ועילית בסופות גשם עוקבות במדמה גשם----- 3.3
- 12 תנועה עילית של אטרזין בגשמים טבעיים בשדה----- 3.4

**1.0. מבוא**

השדות החקלאיים מהווים מקור לא נקודתי של זיהום, בעיקר של חומרי הדברה. פוטנציאל הזיהום של חומר נתון מושפע מכושרו לנוע לעבר מקורות המים, כאשר ככל שהחומר מסיס יותר בתמיסה מימית, תנועתו עם מי הקרקע או עם מי הנגר העילי היא מהירה יותר, וסבירות הגעתו למקורות המים עוד בטרם יתפרק היא רבה יותר. גורם חשוב המשפיע על מסיסותם של מזהמים אורגנים בקרקע הוא יחסי הגומלין בינים לבין מרכיבי הקרקע השונים ובין מולקולות המזהמים לבין מולקולות אורגניות מסיסות (DOM).

מולקולות DOM יכולות להשפיע על הריכוז והתנועה של חומרי הדברה בקרקע בשלושה אופנים עיקריים: (1) יצירת קומפלקסים בין מולקולות ה-DOM ומולקולות חומרי ההדברה, וע"י כך מסיסותם של חומרי ההדברה בפאזה המימית ופוטנציאל התנועה שלהם בקרקע גדלים. (2) תחרות בין מולקולות ה-DOM ומולקולות חומרי ההדברה על אתרי הספיחה בפאזה הנייחת בקרקע, כאשר עלייה בריכוז ה-DOM בתמיסת הקרקע יכולה להקטין את הספיחה של חומרי ההדברה, ועל ידי כך להגדיל את ריכוזם בתמיסת הקרקע. (3) מולקולות של DOM יכולות להספח על שטחי הפנים בקרקע, כאשר ספיחה של קומפלקסים DOM – חומרי הדברה בקרקע מקטינה את ריכוז חומרי ההדברה בתמיסת הקרקע.

בשנים האחרונות חלה עלייה בשטחי החקלאות המושקים בקולחים (מי שפכים לאחר טיפול) (6), כאשר במהלך טיפול בשפכים במכוני הטיפול (מט"שים) נוצרים כמיות גדולות של בוצת שפכים. בוצות אלו לאחר טיפול וייצוב מתאימם מוספים לקרקע בשדות החקלאיים (3). מי קולחים ובוצות שפכים מכילים ריכוזים גבוהים של DOM וחומר אורגני מוצק ומרחף (6 ו-3). בעתיד, יש מגמה לשדרג את איכות הקולחים לרמת "ענבר", כך שאיכותם תשתפר. אולם, ריכוז החומר האורגני בקולחים המשודרגים יהיה עדיין גבוה מאשר במים שפירים. במספר ניסויי מעבדה ושדה שנעשו לאחרונה נמצא שהשקיה בקולחים ויישום בוצות שפכים בשדה גרמה לשינויים בתכונות הכימיות והפיסיקאליות של הקרקע (10), שיכולים לשנות את המסיסות וכושר הניידות של מזהמים אורגניים בקרקע.

חומרי הדברה בקרקע יכולים לנוע בתנועה עילית עם מי הנגר ולהגיע למקורות מים עיליים, ובתנועה אנכית עם מי הנקז ולהגיע למי תהום. מכאן, שהתנועה העלית והאנכית של חומרי ההדברה יכולה להתרחש בעיקר בחורף עם מי הגשם. מטרת המחקר הייתה ללמוד את השפעת השקיה בקולחים שניוניים ויישום בוצות שפכים לאחר טיפולים שונים על תנועה עילית עם מי הנגר ותנועה אנכית עם מי הנקז של אטרזין בקרקעות שונות.

**2.0. פירוט עיקרי הניסויים**

המחקר כלל ניסויים עם קרקעות מופרות במעבדה ובמדמה גשם מעבדתי וניסויי שדה בחלקות נגר בתנאי גשם טבעיים.

**2.1. ניסוי מעבדה****2.1.1. השקיית הקרקע בקולחים**

שלושה טיפוסים קרקע, חמרה חולית מאזור השרון (קיבוץ רמת הכובש), לס עם מרקם בנוני מבקעת ערד (גדי"ש הר חברון) וגרומוסול עם מרקם חרסיתי מעמק יזרעאל (מרכז המחקר נווה יער) שימשו בניסויי המעבדה בעבודה הנוכחית. תכונות כלליות של הקרקעות הללו מובאים

1. על מנת לטפל בשלושת טיפוסים הקרקע הללו באתם קולחים, גידולים, ממשקי השקיה וגידול ותנאי אקלים, השקיית הקרקעות בקולחים שניוניים נעשתה באותו שדה בבקעת ערד בחוות גד"ש הר חברון הממוקמת כ- 500 מ' מעל פני הים. איזור זה מאופיין באקלים מדברי; הטמפרטורה הממוצעת בקיץ משתנה מ- 18 מ"צ בלילה ל- 35 מ"צ ביום ובחורף מ- 5 מ"צ בלילה ל- 17 מ"צ ביום; כמות המשקעים הממוצעת השנתית היא 160 מ"מ וההתאדות השנתית הממוצעת מגיגית סוג A היא 2,300 מ"מ. מכלי פלסטיק ריקים ומחוררים בתחתיתם ובנפח של 50 לי' למיכל הוצנעו בקרקע בסתיו בשדה הניסוי בחוות גד"ש הר חברון. הקרקעות, חמרה, לס וורטיסול נארזו במכלי הפלסטיק, בצפיפות של 1.5, 1.3 ו- 1.3 ג'סמ"ק, בהתאמה, כאשר נשמר מגע ישיר בין הקרקע במכלים לבין הקרקע בשדה מתחת למכלים, וגובה פני הקרקע במכלים וגובה פני הקרקע בשדה היו דומים. הקרקעות במכלים נזרעו ידנית לעומק של 5 ס"מ בתירס בקיץ ובחיטה בחורף, כמחזור זרעים, למשך ארבע עונות גידול. הקרקעות במכלים הושקו בטפטוף במנה שבועית של 70 מ"מ במשך כל השנה ללא התחשבות בגשם, כאשר מנת השקיה זו אפשרה שטיפה של עודף המלחים מהקרקע. הקולחים ששימשו להשקיית הקרקעות במכלים היו ממכון טיפול בשפכים (מט"ש) של העיר ערד המבוסס על ברכות חמצון מאווררות (קולחים שניוניים) (טבלה 2). מדדים פיסיקאליים וכימיים ממוצעים של מי קולחים אלו, כפי שנקבעו מדגימות מים שנלקחו בצינור היציאה של המט"ש ב- 29 מועדים שונים במהלך המחקר מובאים בטבלה 2.

השקיה זו של הקרקעות בקולחים השניוניים הייתה שלב מקדים למחקר הנוכחי. דגימות קרקע נלקחו מכל טיפוס קרקע שנדגם מהשדה אבל לא הושקה (תקרא קרקע לא מושקת), ומאותו טיפוס קרקע לאחר גמר ארבע עונות השקיה (תיקרא קרקע שהושקתה בקולחים). דגימות הקרקע יובש ליובש אויר, נכתשו ידנית, נופו לגודל תלכידים > 2 מ"מ ונשמרו במכלי פלסטיק סגורים במעבדה להמשך עבודה. תכולת חומר אורגני כללי בקרקעות השונות הלא מושקות ואלו שהושקו בקולחים וערכי pH ו- EC וריכוז פחמן מסיס (DOC) במיצוי מימי יחס משקלי קרקעונים של 5:1 שלהם מובאים בטבלה 1.

### 2.1.2. איזותרמות ספיחה ושחרור של אטרזין

איזותרמות ספיחה (adsorption) ושחרור (desorption) של אטרזין בקרקעות השונות שנדגמו מהשדות הלא מושקים לפני אריזתם במכלים (קרקעות לא מושקות) ובקרקעות שנדגמו מהמיכלים לאחר ההשקיה בקולחים שניוניים (קרקעות שהושקו בקולחים) (טבלה 1) נקבעו בניסויי Batch בשני שלבים:

שלב א' – תמיסות עם חמישה ריכוזים שונים של אטרזין נקי מ- 10 עד 50 מ"ג/לי הוכנו בממיס Acetonitrile. שלושים גרם של כל אחת מהקרקעות הלא מושקות ואלו שהושקו בקולחים פוזרו על פני צלחת אלומיניום בשכבה בעובי > 0.5 ס"מ, ועל כל קרקע הוספו בעדינות 3 מ"ל של תמיסת אטרזין, כאשר הוספת התמיסה נעשתה תוך ערבוב הקרקע לקבלת ספיחה אחידה של אטרזין בכל דגימות הקרקע. לכל קרקע מושקת ולא מושקת הוספו חמשת התמיסות עם ריכוזי האטרזין השונים בנפרד. דוגמאות הקרקע לאחר הוספת האטרזין הונחו במנדף למשך 24 שעות לנידוף כל ה- Acetonitrile מהקרקע. לאחר גמר הנידוף, 15 גרם מכל קרקע הוספו למבחנות טפלון בנפח 50 מ"ל, שלהן הוסף 30 מ"ל קולחים שניוני ממת"ש ערד (יקרא קולחים) (טבלה 2) או תמיסה מימית מסוננת ע"י מלחי CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub> ו- NaCl לקבלת תמיסה עם pH, EC ו- SAR הדומים לערכים

שבקולחים, אך ללא חומר אורגני מסיס (תיקרא תמיסת מלח). המבחנות עם הקרקעות השונות המטופלים עם אתרזין והקולחים או תמיסת המלח טולטלו למשך שעתיים בטמפרטורת חדר מבוקרת, כאשר בעבודה מקדימה נמצא שטלטול למשך שעתיים הינו הספיק להגעה לתנאי שיווי משקל. עם גמר הטילטול, תמיסת שיווי המשקל מכל טיפול הופרדה מהקרקע ע"י סרכוז המבחנות למשך 15 דקות בצנטריפוגה בעוצמה של 11,200 גרם, וסינון התמיסה דרך מסנן טפלון 0.45 מיקרון. בתמיסות שיווי המשקל של הקרקעות והטיפולים השונים נקבעו ריכוזי אתרזין ו-DOC וערכי pH ו-EC. יתרת תמיסות שיווי המשקל שימשו לניסוי שלב ב' שמתואר למטה. כמות האטרזין שהייתה ספוחה ליחידת קרקע חושבה ע"י חיסור כמות האטרזין שנמדדה בתמיסת שיווי המשקל במבחנות מכמות האטרזין שהוספה לקרקע במבחנות.

שלב ב' – דגימת קרקע במשקל 7.5 ג', שנדגמו משלושת הקרקעות הלא מושקות ושהושקו בקולחים אבל לא טופלו באטרזין, הוספו למבחנות טפלון בנפח 50 מ"ל. לכל מבחנה עם הקרקע הוספו 15 מ"ל מאחת התמיסות של שיווי המשקל שהופרדו מהקרקע בשלב א', כאשר תמיסה תואמת מבחינת טיפוס קרקע וטיפול השקיה (קרקע לא מושקת או שהושקתה בקולחים) משלב א' הוספה לטיפוס קרקע עם טיפול השקיה תואם. מבחנות הקרקע עם תמיסות שיווי המשקל השונות, טולטלו למשך שעתיים ועברו תהליך הפרדה של תמיסת שיווי המשקל מהקרקע וקביעת המדדים הכימיים של תמיסה זו כפי שנעשה בשלב א'.

### 2.1.3. תנועה של אתרזין בעמודות קרקע מופרות

תנועת אתרזין ו-DOM בקרקע נלמדה בניסוי עמודות עם קרקעות מופרות במעבדה. בניסויים אלה, שלושת הקרקעות הלא מושקות ושהשקו בקולחים (טבלה 1) (סה"כ 6 דגימות קרקע) נארזו בעמודות זכוכית באורך 10 ס"מ ובקוטר 5 ס"מ, כל טיפוס קרקע בעמודות זכוכית נפרדת. בתחתית עמודות הזכוכית חובר מסנן זכוכית שעליו נארזה שכבת חול קוורץ בעובי 1 ס"מ, שנשטף לפני כן בחומצה ומים מזוקקים, ומעליו נארזה שכבת קרקע בעובי של 7 ס"מ ועם גודל תלכידים  $> 2$  מ"מ. הצפיפות הגושית של החמרה, הלס והורטיסול בעמודות הקרקע הייתה, 1.5, 1.3 ו-1.3 ג"סמ"ק, בהתאמה. בראש כל עמודת קרקע הוסף 0.42 מ"ג אתרזין השווה לערך של 50 ג' אתרזין נקי לדונם. הוספת האטרזין בראש העמודה נעשתה בצורה הבאה: עשרה גרם של כל קרקע פוזרו על צלחת אלומיניום, שהוספו להם 1.25 מ"ל של תמיסת אתרזין נקי ב-Acetonitrile בריכוז 333 מ"ג/ל', שעברו לאחר מכן יבוש כפי שתואר למעלה בניסוי ה-batch (סעיף 2.1.2). לאחר גמר שלב נידוף ה-Acetonitrile, 10 ג' מכל קרקע מטופלת הוספו בראש עמודת הקרקע התואמת. כל עמודות הקרקע עם הטיפולים השונים נשטפו ע"י טיפוס תמיסת מלח או קולחים מראש העמודה בשטף קבוע של 0.55 מ"ל/דקה, כאשר מים לא נערמו על פני הקרקע. במהלך שטיפת העמודות נאספו חמישה מקטעים של מי התשטף בנפח נקבובים אחד לכל מקטע מתחתית כל עמודת קרקע ע"י אוסף מקטעים. במקטעים השונים של מי התשטף נקבעו ריכוזי האטרזין וה-DOM וערכי pH ו-EC.

### 2.2. ניסוי במדמה גשם

דגימות של קרקע חולית (חמרה) וקרקע חרסיתית (ורטיסול) (טבלה 1) נדגמו מהשכבה העליונה (15-2 ס"מ) מחלקות ניסוי בשדה בסתיו לאחר גמר עונת ההשקיה. חלקות אלו הושקו במים שפירים או בקולחים שניוניים מברכות חמצון במט"ש רמת הכובש (טבלה 2), כאשר הקרקע החולית נדגמה משדה תירס לאחר שלוש שנים של השקיה בקולחים או במים שפירים,

והקרקע החרסיתית נדגמה מפרדס לאחר 12 שנות השקיה בקולחים או במים שפירים. הקרקעות לאחר הדיגום יובשו ליובש אור, נכתשו ונופו דרך נפה בגודל > 4 מ"מ ונשמרו במחסן למשך 3 חודשים או יותר להמשך עבודה במדמה גשם. תכונות פיסיקאליות וכימיות כלליות של הקרקעות הללו מובאים בטבלה 1.

הקרקעות המנופות נארזו בשכבה בעובי של 2 ס"מ ובצפיפות גושית של 1.4 ג'סמ"ק במגשים באורך של 50 ס"מ ורוחב של 30 ס"מ המחוררים בתחתיתם. כל מגש קרקע הונח בשיפוע של 9% על שכבת צדפים שבורים בעובי של 8 ס"מ בארגו הממוקם על קרוסלה במדמה גשם (11) הנמצא בקמפוס של וולקני. שכבת הצדפים בתחתית המגש נועדה לאפשר ניקוז חופשי של מים משכבת הקרקע המומטרט. בשני טיפוסים הקרקע (החולית והחרסיתית) ובשני טיפולי ההשקיה (קרקעות שהושקו בקולחים או במים שפירים) נבחנו שני טיפולים: (1) ביקורת – ללא הוספת חומר הדברה על פני הקרקע ו- (2) ריסוס אטרזין. בטיפול האטרזין, תמיסת אטרזין מסחרית (אטרנקס 50 תוצרת חברת אגן יצרני כימיקלים בע"מ ומכיל 50% w/v, אטרזין) בריכוז של 1000 מ"ג/לי רוססה על פני הקרקע במרסס ידני לקבלת כמות של 0.67 ג' אטרזין למ"ר. לעומת זאת בטיפול הביקורת, מים שפירים, בנפח דומה לנפח תמיסת האטרזין שרוססה בטיפול האטרזין, רוססו על פני הקרקע כתמיסת בלאנק. לאחר גמר הריסוסים הקרקעות הושארו למשך 25 שעות בחדר מדמה הגשם להתייבשות. לאחר ההתייבשות, הקרקעות עם הטיפולים השונים הומטרו בשלוש סופות גשם עוקבות של 85 מ"מ מים מזוקקים (חיקוי לאיכות מי גשם) לסופה, כאשר עצמת הגשם הייתה 45 מ"מ/ש', קוטר חיצוני של טיפת הגשם היה 1.9 מ"מ, מהירות סופית ממוצעת של הטיפה הייתה 6.02 מ"שנייה ואנרגיה קינטית של הגשם הייתה 18.1 ג'אול/מ"מ/מ"ר. בין סופות הגשם העוקבות, הקרקעות יובשו בטמפ' של ~40 מ"צ למשך שמונה ימים, כאשר לפני המטרת סופת הגשם השנייה והשלישית לא הוסף שוב אטרזין לקרקעות שטופלו באטרזין לפני סופת הגשם הראשונה. כל הטיפולים (שני טיפוסים הקרקע, שני סוגי מי ההשקיה וטיפול האטרזין) נבחנו בשלוש חזרות באופן פקטוראלי.

במהלך סופות הגשם, נפח התשטיפ שחלחל דרך שכבת הקרקע נאסף כל 2.7 ד', ונפחו נמדד לקביעת ערכי החידור של הקרקע. בנוסף, מי הנקז נדגמו כל 20~ ד' ומי הנגר העילי נאספו במקטעים של 1 לי במכלי פלסטיק במהלך סופת הגשם, ובהם נקבעו ערכי ה-pH וה-EC וריכוז DOC. לגבי אטרזין, מי הנגר העילי ומי הנקז נדגמו בזמנים שונים בכלי זכוכית במהלך סופת הגשם, ובהם נקבע ריכוז האטרזין.

### 2.3. חלקות נגר בתנאי גשם טבעיים

ניסויי שדה נערכו בשני אתרים: (1) בשדה בעל בקמפוס של מכוון וולקני באזור בית דגן בעל במדרון אחיד עם מפנה מערבי ושיפוע של 4%~. (2) מטע זיתים לא מושקה עם עומד עצים דליל מאוד בבית הספר התיכון כדורי בגליל התחתון בעל מדרון דרומי ושיפוע של 4%. הקרקעות באתרי הניסוי בבית דגן ובבית ספר כדורי הם חמרה חולית ורנדזינה חומה סיין חרסיתית חולית, בהתאמה. תכונות פיסיקאליות וכימיות של הקרקעות בשני אתרי הניסוי מובאים בטבלה 1.

הטיפולים שנבחנו באתר בית דגן היו: ביקורת (קרקע ללא תוספת בוצה) ושלושה סוגי בוצות שפכים שהוספו בנפרד לקרקע בכמות של 1.5 טון חומר יבש לדונם. הבוצות שנבחנו היו: (1) בוצה מעוכלת איירובית ממט"ש רעננה (תקרא בוצה סוג ב'), (2) קומפוסט מבוצה שעברה ייצוב מוקדם בעיכול אל-אווירני מאתר "דלילה" ליד קיבוץ כפר מנחם (תקרא קומפוסט בוצה), (3)

בוצה ממט"ש בית שמש שפוסטרה בסיד שמקורו באפר פצלי שמן (תקרא בוצת במ"ס). הבוצה ממט"ש רעננה מוגדרת כבוצה סוג ב' ושתי הבוצות האחרות מוגדרות כבוצה סוג א'. תכונות כלליות של בוצות אלה מוצגות בטבלה 3. באתר זה, שדה הניסוי עובד ע"י דיסק ומעגלה באוקטובר 2009, וב- 11.11.2009 הוקמו בו 12 חלקות טיפול בגודל של 16 מ"ר לחלקה. במרכז כל חלקת טיפול הוקמה חלקת נגר באורך 2.5 מ', רוחב 2 מ' ושטח כולל של 5 מ"ר. הוספת הבוצות השונות בחלקות הטיפול נעשתה מיד לאחר הקמת חלקות הנגר, והם הוצנעו בקרקע באופן ידני ע"י עיבוד הקרקע העליונה (0-15 ס"מ) בקלשון. בטיפול הביקורת החלקות עובדו בקלשון באופן דומה לחלקות עם הבוצות, אבל ללא תוספת בוצה. בכל החלקות פני הקרקע נשמרו חשופים מצמחיה. הטיפולים נעשו באופן אקראי עם שלוש חזרות (שלוש חלקות נגר) בכל טיפול. בסתיו 2010 הוקמו חלקות נגר באותם גדלים, מקומות ובאותן טיפולי בוצה (כמויות וסוגי בוצה) כפי שנעשה בשנת המחקר הראשונה בחורף 2009-2010. אטרזין נקי בכמות של 0.67 ג'/מ"ר לכל יישום כתמיסת אטרזין מסחרית ("אטרנקס 50") בנפח של 150 מ"ל לחלקת נגר רוסס על פני הקרקע החשופים בכל חלקות הנגר בשלושה מועדים שונים, 10.11.2010, 3.1.2011 ו- 1.3.2011.

באתר הניסוי בבית ספר כדורי, חלקות הטיפול מוקמו באזורים החשופים בין עצי הזית. הטיפולים שנבחנו באתר זה היו בקורת (קרקע ללא תוספת בוצה) ותוספת של קומפוסט בוצה (טבלה 3) שנעשתה ב- 27.10.2010. מייד לאחר יישום הבוצות בחלקות הנגר, הקרקע בחלקות הטיפול קלטרה ידנית לעומק 15 ס"מ בקלשון. בשני טיפולים אלו (בקורת ויישום בוצה) רוסס על פני הקרקע אטרזין בתאריכים, 8.11.2010, 6.1.2011 ו- 17.3.2011. גודל ואופן הכנת חלקות הטיפול וחלקות הנגר, יישום הבוצה, ריסוס האטרזין, מספר החזרות והמבנה הסטטיסטי שלהם באתר הניסוי בבית ספר כדורי נעשו באופן דומה כפי שתואר באתר הניסוי בית דגן.

בשני אתרי הניסוי, פני הקרקע בחלקות הטיפול נשמרו חשופים מצמחיה ע"י שימוש בקוטלי עשביים. כמויות הגשם שירדו באזורי הניסוי נמדדו לאחר כל סופת גשם ע"י מדי גשם זעיר, שמוקמו בהצבה אופקית במרכז אתרי הניסוי. כמויות הנגר נמדדו מכל חלקות הטיפול לאחר כל סופת גשם, ומהם נלקחו דגימות מים למעבדה לקביעת ערכי ה- pH והמוליכות החשמלית (EC) וריכוז פחמן אורגני מסיס (DOC) ואטרזין במי הנגר.

#### 2.4. אנליזות כימיות

האנליזה המכאנית של הקרקעות נעשתה בשיטת ההידרומטר (8), תכולת החומר האורגני הכללי בקרקע נקבעה בשיטה הרטובה של Walkley-Black (4) ותכולת הגיר נקבעה ע"י המסת הגיר בחומצה HCl ומדידת שחרור ה- CO<sub>2</sub> בקלצימטר (5). בתמיסות המימיות, ערכי ה- pH נקבעו ע"י pH meter מודל 320 של חברת Corning ערכי ה- EC נקבעו ע"י EC meter מודל TH-2400 של חברת El-Hamma. ריכוז ה- Na נמדד ע"י Flame Photometer 243, כאשר בבדיקות אלו הוסף לתמיסות הנבדקות 1.15 מ"ג/ל' ליתיום כדי למנוע הפרעת מיסודות אחרים בתמיסה; ריכוזי ה- Ca + Mg נקבעו בשיטה רטובה ע"י טיטרציה; ריכוז ה- Cl<sup>-</sup> נקבע כלורידומטר דיגיטאלי של חברת Labconco; ריכוז ה- DOC ע"י TOC analyzer של חברת Skalar; האטרזין ע"י HPLC מתוצרת Shimdzu עם גלאי UV-Vis ועמודות הידרופוביות Apollo C18 5μ.

### 3.1. עקומי ספיחה ושחרור של אטרזין

עקומות איזותרמות השחרור והספיחה חושבו על פי נוסחת Freundlich המתוארת בנוסחה [1]

$$C_s = K_f (C_w)^n \quad [1]$$

כאשר,  $C_s =$  כמות האטרזין הספוחה ליחידת משקל יבש של קרקע;  $C_w$  - ריכוז האטרזין בתמיסת שווי המשקל;  $K_f$  - מקדם הספיחה של Freundlich;  $n$  הוא ערך אי-הליניאריות של עקומת הספיחה, כאשר  $n = 1$ , עקומת הספיחה היא ליניארית ו- $K_d = K_f$ , כאשר  $K_d$  מוגדר כקבוע החלוקה וניתן לחישוב משיפוע קו הרגרסיה הליניארי בין כמות האטרזין הספוחה ליחידת משקל קרקע לריכוז האטרזין בתמיסת שיווי המשקל. האיזותרמות שחושבו משלב אי של ניסוי ה-batch (איזותרמות שחרור) מייצגות את איזותרמות שיווי המשקל בין המקטע הספוח והמסיס בתמיסת שיווי המשקל של האטרזין לאחר היישום שלו בפני הקרקע, התייבשותו ושחרורו מחדש (desorption) לתמיסת הקרקע כתוצאה מהשקיה או גשם. לעומת זאת, האיזותרמות שחושבו משלב ב' של ניסוי ה-batch מייצגות את איזותרמות שיווי המשקל בין המקטע הספוח והמסיס בתמיסת שיווי המשקל של האטרזין בשכבת הקרקע מתחת לפני השטח, כאשר תמיסה עם ריכוז אטרזין ו-DOC נתון נעה מפני השטח כלפי מטה ונחשפת לקרקע לא מטופלת באטרזין.

בהצגת איזותרמות השחרור (שלב א') או הספיחה (שלב ב') של האטרזין בשלושת טיפוסים הקרקע כתלות בריכוז האטרזין בתמיסת שיווי המשקל נמצא מתאם חיובי מובהק של קווי רגרסיה ליניארית בתחומי ריכוזי האטרזין שנבחנו בשלושת טיפוסים הקרקע, טיפולי ההשקיה וסוגי התמיסות (תמיסת מלח וקולחים), מלבד בקרקע חמרה לא מושקת בשלב הספיחה, שבה לא נמצאה התאמה מובהקת (תוצאות לא מוצגות). תכולות החרסית והחומר האורגני הנמוכות בקרקע חמרה לא מושקת (טבלה 1) הגבילה מאוד כנראה את הספיחה של מולקולת האטרזין, ולכן כנראה לא נמצאה ההתאמה בין ריכוז האטרזין הספוח וריכוזו בתמיסת שיווי המשקל בשלב ב' בניסוי ה-Batch. ערכי ה- $K_d$  של איזותרמות השחרור והספיחה, תכולת החומר האורגני הכללי בקרקע וריכוזי ה-DOC בתמיסות שיווי המשקל בשלושת סוגי הקרקע הלא מושקות ושהושקו בקולחים וטולטלו בתמיסת מלח או בקולחים מובאים בטבלה 4. לכל טיפוס קרקע, טיפול השקיה ותמיסת טלטול, ערכי ה- $K_d$  של איזותרמות השחרור היו גבוהים מערכי ה- $K_d$  של איזותרמת הספיחה, מלבד קרקע חמרה לא מושקת שטולטלה עם תמיסת מלח שבה לא ניתן היה לקבוע את ערכי ה- $K_d$  (טבלה 4). הבדלים אלו בערכי ה- $K_d$  בין איזותרמת השחרור והספיחה התקבלו למרות שתחום הריכוזים של האטרזין בתמיסות שיווי המשקל באיזותרמות השחרור והספיחה היו דומים (תוצאות לא מוצגות). ערכי  $K_d$  גבוהים מורים על אפניות גבוהה של מולקולות האטרזין למקטע הסופח בקרקע. האפניות הגבוהה יותר של האטרזין למקטע הסופח בשלב השחרור מאשר בשלב הספיחה נבעה כנראה משני גורמים עיקריים: (i) סוג הספיחה – התייבשות הקרקע לאחר הוספת האטרזין גרמה כנראה למגע קרוב בין מולקולות האטרזין והמקטע הסופח, כאשר מגע זה הגדיל את חוזק הספיחה הספציפית של האטרזין בקרקע (Quazi-Equilibrium). במקרה זה, שחרור מולקולות אטרזין, שהיו ספוחים בקשרים ספציפיים למקטע הסופח, לתמיסת שיווי המשקל היה מועט יחסית בזמן טלטול הקרקע עם תמיסת המלח או



הקולחים בשלב א' בניסוי ה- batch, ולכן ערכי ה-  $K_d$  באיזותרמות השחרור היו גבוהים (טבלה 4). לעומת זאת, בשלב הספיחה בניסוי ה- batch לא התקיים שלב יבוש לאחר הוספת האטרזין לקרקע עם תמיסות הטלטול. כתוצאה מכך, הספיחה הספציפית של מולקולות האטרזין למקטע הסופח בקרקע הייתה מועטה, וערכי ה-  $K_d$  באיזותרמות הספיחה היו נמוכים יחסית (טבלה 4).

(ii) הבדלים בריכוז של מולקולות אורגניות מסיסות בתמיסת שיווי המשקל – ריכוז ה- DOC בתמיסת שיווי המשקל בשלב הספיחה היו גבוהים מאשר בשלב השחרור, לכל טיפוס קרקע, טיפול השקיה ותמיסת טלטול (טבלה 4). באיזותרמות השחרור (שלב א') הוספו לקרקעות תמיסת מלח ללא DOM או קולחים. לעומת זאת, באיזותרמות הספיחה (שלב ב') הוספו לקרקעות תמיסות שווי המשקל משלב א' שהכילו מלכתחילה ריכוזי DOC גבוהים יחסית, שאליהם נוסף עוד DOC שהשתחרר מהקרקעות במהלך הטלטול בשלב ב'. כתוצאה מכך, ריכוז ה- DOC בתמיסות שיווי המשקל באיזותרמות הספיחה היו גבוהים יותר מאשר באיזותרמות השחרור (טבלה 4). עלייה זו בריכוז ה- DOC בתמיסת שווי המשקל בשלב איזותרמות הספיחה הגדילה כנראה את הקומפלכסציה בין מולקולות המסיסות של החומר אורגני לבין האטרזין בשלב זה, וע"י כך ספיחת האטרזין לקרקע וערכי ה-  $K_d$  קטנו בשלב הספיחה לעומת שלב השחרור. תוצאות אלו (טבלה 4) תואמות לתוצאות שהתקבלו ע"י (7), שציינו שהמסיסות הנדמית של האטרזין בקרקע גדלה עם עלייה בריכוז ה- DOC ליחידת כמות חומר אורגני מוצק נתון, שנובעת מקומפלכסציה של האטרזין עם מולקולות המסיסות של החומר האורגני.

בשלב השחרור (desorption) בשלושת טיפוסים הקרקע הלא מושקים והמושקים בקולחים, ערכי ה-  $K_d$  בטלטול קרקע עם קולחים היו גבוהים יותר מאשר בטלטול אותה קרקע בתמיסת מלח (טבלה 3). תוצאות אלו נוגדות את התוצאות שהתקבלו בעבודתם של (9 ו-12), שבהן נמצא שמולקולות ה- DOM מקולחים יצרו קומפלכסים עם אטרזין, וע"י כך הגדילו את מסיסות הנדמית של האטרזין בתמיסה. מתוצאות העבודה הנוכחית נמצא שמולקולות ה- DOM מהקולחים נספחות לקרקע (תוצאות לא מוצגות). מכאן, שגם קומפלכסים של מולקולות DOM עם אטרזין יכולות להספח לקרקע, וע"י כך להגדיל את כמות האטרזין הנספחת. כנראה שמולקולות DOM ממקור קרקעי נוטות פחות להיספח לקרקע מאשר מולקולות DOM שמקורם מקולחים, וכתוצאה מכך יותר קומפלכסים של DOM ממקור קרקעי עם אטרזין נשארו בתמיסת שווי המשקל מאשר קומפלכסים של DOM ממקור קולחים עם אטרזין. מנגנון זה יכול להסביר את ערכי ה-  $K_d$  הגבוהים יותר בטלטול הקרקעות עם קולחים מאשר בטלטול בתמיסת מלח (טבלה 4).

בשלב הספיחה בקרקעות לס וורטיסול בטלטול עם תמיסת מלח, ערכי ה-  $K_d$  של הקרקעות הלא מושקות ואשר הושקו בקולחים היו דומים (טבלה 4). לעומת זאת, בטלטול אותן קרקעות עם קולחים, ערכי ה-  $K_d$  של הקרקעות הלא מושקות היו גבוהים יותר מאשר קרקעות שהושקו (טבלה 4). הסבר אפשרי לכך הוא: כאמור DOM יוצר קומפלכסים עם אטרזין. בטיפול עם תמיסת מלח כל ה- DOM המשתחרר הוא ממקור קרקעי שאינו נוטה להיספח לקרקע, ולכן לא רואים הבדל בין קרקע שהושקתה בקולחים לקרקע של הושקתה. לעומת זאת, טלטול בטיפול

הקרקעות עם קולחים, חלק מה- DOM הוא מהקולחים שנוטה להיספח לקרקע. בעבודה הנוכחית נצפתה ספיחה רבה יותר של DOM מקולחים שניוניים לקרקע לא מושקת מאשר לקרקע שהושקתה בקולחים שניוניים (תוצאות לא מוצגות) מפני שאתרי הספיחה שאליהם נקשר ה- DOM מהקולחים תפוסים בחלקם. דבר המוביל לערכי  $K_d$  גבוהים יותר בקרקעות לא מושקות מאשר בקרקעות שהושקו בקולחים שטולטלו עם קולחים (טבלה 4).

### 3.2. תנועת אטרזין בעמודות קרקע מופרות

ריכוז האטרזין הממוצע במי התשטף מהעמודות עם הקרקעות, חמרה, לס וורטיסול, שנשטפו בתמיסת מלח או קולחים כתלות בנפח התשטף (מספר נפחי נקבובים) מובאים באיור 1, כאשר ריכוז האטרזין מוצג כריכוז ממוצע במקטע נפח תשטף נתון. בחמרה, ריכוז האטרזין בתשטף של נפח הנקבובים הראשון היה הגבוה ביותר, כאשר המשך שטיפת הקרקע גרמה לירידה הדרגתית בריכוז האטרזין בתשטף עד לנפח הנקבובים השלישי, שלאחריו ריכוז האטרזין במי התשטף היה נמוך (0.1 מ"ג/ל') וקבוע בקירוב. במקרה זה, שטיפת האטרזין הייתה דומה לשטיפה של מלח קל תמס שעובר אינטראקציה מועטה עם הקרקע. בקרקעות ורטיסול ולס, לעומת זאת, היה עיכוב בשטיפת האטרזין מהעמודות, כאשר הריכוז המקסימאלי של האטרזין היה בתשטף של נפח הנקבובים השני, וריכוזו בתשטיפים של נפחי הנקבובים השלישי, הרביעי והחמישי היה 0.2 מ"ג/ל' בלס ו- 0.5 מ"ג/ל' בורטיסול. עיכוב בשטיפה של האטרזין מהעמודות עם הלס והורטיסול (איור 1) מצביע על אינטראקציה רבה יותר בין האטרזין והמקטע המוצק בקרקעות אלו.

לא נמצאה התאמה סטטיסטית בין ריכוז ה- DOC לריכוז האטרזין בתשטף של אותן עמודות קרקע שנשטפו באותה תמיסת מלח או קולחים (תוצאות לא מוצגות). שטיפת עמודות קרקע מהווה מפריד מקטעים של DOC, כאשר בכל שלב בשטיפה יוצא מקטע אחר. ה- DOC כולל הרבה מקטעים ולא צפוי לקבל התאמה עם כל המקטעים. ריכוז הגבוה ביותר של ה- DOC שנשטף מהעמודות עם שלושת סוגי הקרקע היה בשטיפה של נפח הנקבובים הראשון. כאמור היחס DOC/OM צוין כגורם עיקרי המשפיע על ספיחה ותנועה של אטרזין בקרקע. איורים 2 ו- 3 מציגים את ריכוז האטרזין בתשטף בנפח הנקבובים הראשון והחמישי כתלות ביחס DOC/OM בכל הקרקעות, בהתאמה. בנפח הנקבובים הראשון התלות בין ריכוז האטרזין לבין היחס DOC/OM בקרקע נמצאה חיובית ואילו בנפח הנקבובים החמישי נמצאה שלילית. הסבר אפשרי לתופעה זו הוא שבנפח הנקבובים הראשון נשטף חומר אורגני קל תמס אשר יוצר קומפלכסים עם האטרזין, והוא בעל אפיניות נמוכה לספיחה לקרקע. ככול שהיחס DOC/OM בקרקע גבוה יותר, נוצרים יותר קומפלכסים של אטרזין-DOC ליחידת תכולת חומר אורגני בקרקע וריכוז האטרזין בתשטף גדל. לעומת זאת, החומר האורגני שנשטף בנפח הנקבובים החמישי הוא מובילי פחות ובעל אפיניות גבוהה יותר לקרקע מחומר האורגני שנשטף בנפח הנקבובי הראשון. ככול שהיחס DOC/OM בקרקע גבוה יותר, נוצרים יותר קומפלכסים של אטרזין DOC, אך במקרה זה עקב האפיניות גבוהה של החומר האורגני בנפח הנקבובים החמישי חלקו נספח חזרה לקרקע כולל קומפלכסים של אטרזין-DOC, ונגרמת ירידה בריכוז האטרזין בתשטף.

### 3.3. תנועת אטרזין אנכית ועילית בסופות גשם עוקבות במדמה גשם

ריכוזי אטרזין במי הנגר והנקז במהלך שלוש סופות גשם עוקבות במדמה הגשם בקרקע החולית והחרסיתית שהושקו בשדה במים שפירים או בקולחים שניוניים כתלות בכמות הנגר והנקז המצטברים, בהתאמה, מובאים באיור 4. ריכוזי האטרזין במי הנגר והנקז בשתי הקרקעות ובשני טיפולי ההשקיה היו גבוהים יחסית בסופת הגשם הראשונה וירדו במהלך הגשם, במיוחד במעבר מסופת הגשם הראשונה לשנייה (איור 4). ירידה זו בריכוז האטרזין במי הנגר במהלך סופות הגשם נבעה כנראה משטיפה מתמשכת של האטרזין עם מי הנקז והנגר ומתהליכי פירוק של האטרזין שהתרחשו בעיקר במהלך הייבוש בין סופת הגשם הראשונה והשנייה. בסופת הגשם הראשונה, ריכוזי האטרזין במי הנגר בקרקע החולית היו גבוהים יותר בקרקע שהושקתה בקולחים מאשר בקרקע שהושקתה במים שפירים, ובקרקע החרסיתית לא נמצאו הבדלים מובהקים בריכוזי האטרזין במי הנגר בין שני טיפולי ההשקיה (איור 4). לעומת זאת, ריכוזי האטרזין במי הנקז בסופת הגשם הראשונה בקרקע החרסיתית היו גבוהים יותר בקרקע שהושקתה בקולחים מאשר בקרקע שהושקתה במים שפירים, כאשר בקרקע החולית לא נמצאו הבדלים מובהקים בריכוזי האטרזין בין שני טיפולי ההשקיה אלו. בסופת הגשם השנייה והשלישית, לא נמצאו הבדלים מובהקים בריכוזי האטרזין במי הנגר והנקז בין שני טיפולי ההשקיה בקרקע החולית והחרסיתית.

על מנת לקבוע את מידת השטיפה של האטרזין עם מי הנגר והנקז בטיפולי ההשקיה השונים ובקרקעות השונות, האחוזה של כמות האטרזין שהוסעה במי הנגר או הנקז מכמות האטרזין הכללית שהוספה לקרקע (אחוזה השטיפה) בשלושת סופות הגשם העוקבות בניסוי מדמה הגשם בשני טיפולי ההשקיה בקרקע החולית והחרסיתית מובאים באיור 5. אחוז השטיפה של האטרזין היה גבוה יותר בקרקע החולית, כ- 80%, מאשר בקרקע החרסיתית, שבה אחוז השטיפה היה כ- 40% (איור 5). בנוסף, בקרקע החולית מרבית שטיפת האטרזין (כ- 70%) נעשתה עם מי הנקז, ואילו בקרקע החרסיתית אחוז שטיפת האטרזין עם מי הנגר או הנקז היו דומים. השטיפה הרבה של האטרזין בקרקע החולית נבעה, כנראה, מתכולה נמוכה של חומר אורגני כללי 0.8% בקרקע זו (טבלה 1) שהקטינה את יכולת הספיחה/קשירה של האטרזין לקרקע. במקרה זה, מרבית האטרזין נשטף לתוך הקרקע עם מי הגשמים והכמות שנשארה בפני הקרקע ויכלה להישטף עם מי הנגר הייתה קטנה. גורם נוסף שיכול להסביר את השטיפה הרבה של האטרזין עם מי הנקז בקרקע החולית הוא החידור הגבוה יחסית של קרקע זו (2) שאפשר את חדירת מרבית הגשמים לקרקע ואת שטיפת האטרזין. לעומת זאת בקרקע החרסיתית, תכולת החומר האורגני הגבוהה 4.1% (טבלה 1) בקרקע זו גרמה לספיחה/קשירה רבה יחסית של האטרזין לקרקע והקטינה את שטיפתו עם מי הנקז והנגר. במקרה זה, כמות האטרזין הספוחה/קשורה בפני הקרקע החרסיתית הייתה גבוהה יחסית, ולכן שטיפתה לפנים הקרקע הייתה מוגבלת ואפשרה שטיפה דומה של אטרזין עם מי הנגר כתנועה עילית. שטיפת האטרזין עם מי הנקז בקרקע החרסיתית הייתה גבוהה באופן מובהק בקרקע שהושקתה בקולחים מאשר בקרקע שהושקתה במים שפירים, כאשר בקרקע החולית לא נמצאו הבדלים מובהקים בשטיפת האטרזין בין שני טיפולי ההשקיה (איור 5). בקרקע החרסיתית, שבה הספיחה של האטרזין הייתה רבה יותר, ריכוז ה-DOM הגבוה יחסית במי הקולחים, שהגדיל את ריכוזם בקרקע (תוצאות לא מוצגות), יצר כנראה קומפלקסים עם האטרזין בקרקע, וע"י כך הגדיל את מסיסותו ואת תנועתו בקרקע עם מי הנקז. בקרקע החולית, לעומת זאת, עקב הספיחה הנמוכה יחסית של האטרזין לקרקע ויכולת

התנועה הגבוהה שלו בקרקע, למולקולות ה-DOM שבקולחים הייתה השפעה זניחה על תנועת האטרזין בקרקע עם מי הנקז.

### 3.4. תנועה עילית של אטרזין בגשמים טבעיים בטדה

ממוצעי ריכוזי האטרזין במי הנגר מחלקות הנגר בטיפולי הבוצות השונות ובמועדים שונים באתרי הניסוי בבית דגן ובבית ספר כדורי מובאים באיור 6. ריכוזי האטרזין בנגר בטיפולי הבוצה השונים בסופות הגשם לאחר היישום הראשון של האטרזין באתר הניסוי בבית דגן ובבית ספר כדורי היו נמוכים מאוד בשני אתרי הניסוי (איור 6). לעומת זאת, ריכוזי האטרזין בנגר לאחר היישום השני של האטרזין בשני אתרי הניסוי וגם לאחר היישום השלישי באתר הניסוי בבית הספר כדורי היו גבוהים יחסית, ואילו לאחר היישום השלישי של האטרזין באתר הניסוי בבית דגן ריכוזי האטרזין בנגר היו בערכי ביניים (איור 6). ניתן להסיק מתוצאות אלו (איור 6) שלאורך תקופת הזמן בין מועד יישום האטרזין לבין מועד סופות הגשם העוקבות יש השפעה משמעותית על ריכוז האטרזין במי הנגר; ככל שתקופת זמן זו ארוכה יותר התפרקות האטרזין בקרקע ע"י תהליכים פיסקאליים, כימיים וביולוגיים היא רבה יותר, וריכוזו במי הנגר היא נמוכה יותר.

ריכוז אטרזין ממוצע וכמויות הנגר והאטרזין הכלליות שניגרו מחוץ לחלקות הנגר בטיפולי הבוצה השונים באתרי הניסוי בבית דגן ובבית הספר כדורי מובאים בטבלה 5. לא נמצאו הבדלים מובהקים בריכוזי האטרזין הממוצעים בין טיפולי הבוצה השונים באתר הניסוי בבית דגן (טבלה 5). מכאן, שטיפולי הבוצה באתר ניסוי זה לא השפיעו באופן מובהק על תהליכי ספיחה/שיחרור והסעה של האטרזין. לעומת זאת, באתר הניסוי בבית הספר כדורי, ריכוזי האטרזין הממוצעים במי הנגר בטיפולים בקורת וקומפוסט בוצה היו נמוכים באופן מובהק מאשר באותם טיפולים באתר בבית דגן (איור 5). בנוסף, באתר הניסוי בבית הספר כדורי, ריכוז האטרזין הממוצע היה נמוך באופן מובהק בטיפול קומפוסט בוצה מאשר בטיפול הביקורת (איור 5). כנראה תכולת החומר האורגני הגבוהה יותר (2.7%) בקרקע באתר הניסוי בבית הספר כדורי מאשר בקרקע באתר הניסוי בבית דגן (טבלה 1) גרמה לספיחה רבה יותר של האטרזין לקרקע ולשיחרור מועט שלו למי הנגר, כאשר השילוב של תכולת חומר אורגני גבוהה בקרקע ותוספת קומפוסט בוצה באתר הניסוי בבית הספר כדורי הגדילה את ספיחת האטרזין לקרקע והקטינה את ריכוזו במי הנגר בהשוואה לטיפול הביקורת.

כמויות האטרזין הכלליות שניגרו עם הנגר מחוץ לחלקות היו נמוכות יותר בטיפולי הבוצה השונים לעומת הביקורת בשני אתרי הניסוי (טבלה 5), כאשר באתר הניסוי בבית דגן, כמויות האטרזין הכלליות הנמוכות ביותר היו בטיפולים בוצה סוג ב' וקומפוסט, ובאתר הניסוי בבית הספר כדורי בטיפול קומפוסט בוצה, כמות האטרזין הכללית הייתה קטנה בסדר גודל מאשר בביקורת. הקטנה זו בכמויות הכלליות של האטרזין בטיפולי הבוצות השונות לעומת הביקורת בשני אתרי הניסוי נבעו בעיקר מהפחיתה בכמויות הנגר הכלליות שהתקבלו בטיפולי הבוצה (טבלה 5). טיפולי הבוצה השונים ייצבו את מבנה הקרקע, הקטינו את רגישות הקרקע להיווצרות קרום ולירידה בערכי החידור של הקרקע וע"י כך הקטינו את כמויות הנגר במהלך סופות הגשם כפי שנמצא ע"י (1).

**טבלה 1: תכונות פיסיקאליות וכימיות של הקרקעות שנלמדו בניסויים השונים**

מיצוי מימי **						תכולת חומר אורגני		תכולת גיר	אנליזה מכנית			מרקם	קרקע
DOC		EC		pH		קולחים	שפירים		חול	סילט	חרסית		
קולחים	שפירים	קולחים	שפירים	קולחים	שפירים*			%					
-----מ"ג/לי-----		-----dS/m-----											
-----ניסויי מעבדה-----													
47	42	0.19	0.3	7.7	7.7	0.71	0.13	*Tr	84	3	13	חול סיין	חמרה
78	62	0.35	2.2	8.5	8.2	1.7	0.84	26	50	20	30	סיין חרסיתי חולי	לס
63	86	0.35	0.8	8.2	7.9	3.3	3.1	21	20	12	68	חרסיתי	ורטיסול
-----ניסויי מדמה גשם-----													
80	87	1.6	1.0	7.8	7.4	0.72	0.78	Tr	88	2	10	קרקע חולית	חמרה
135	150	2.5	2.2	7.2	7.6	4.1	4.2	12	21	18	61	חרסיתי	ורטיסול
-----ניסויי שדה-----													
ל.ג.	44.6	ל.ג.	0.5	ל.ג.	7.2	ל.ג.***	0.5	Tr	86	3	11	קרקע חולית	חמרה
ל.ג.	ל.ג.	ל.ג.	ל.ג.	ל.ג.	ל.ג.	ל.ג.	2.7	ל.ג.	55	19	26	סיין חרסיתית חולית	רנדזינה חומה

Tr\* – עקבות

\*\* בניסוי המעבדה המיצוי המימי כלל batch עם יחס משקלי קרקעאמים של 5:1 ובניסוי מדמה גשם ובניסויי השדה המיצוי המימי נעשה מעיסה רוויה.

\*\*\* ל.ג. – לא נבדק

**טבלה 2: מדדים כימיים ופיסיקליים של הקולחים ממתקני טיפול בשפכים שונים**

TSS	חומר אורגני מסיס	SAR	HCO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	EC	pH	מכון טיפול בקולחים
מ"ג/ל'			מא"ק/ל'		dS/m		
71.3	266.9	6.0	12.3	7.4	2.0	7.7	ערד
ל.נ.	138.2	3.8	13	6.6	1.8	7.5	רמת הכובש
ל.נ.	182.5	4.3	9.2	9.1	2	7.8	מזרע

**טבלה 3: תכונות כלליות של הנוצות שנלמדו (בעקבות 1)**

*מוליכות חשמלית	pH*	תכולת גיר	תכולת חומר אורגני	תכולת רטיבות	סוג בוצה
dS/m		----- % -----			
1.8	6.85	3.6	78.2	85.3	בוצה סוג ב'
4.8	8.11	11.1	44.7	36.2	קומפוסט בוצה
9.7	12.48	23.9	11.3	29.1	בוצה מטופלת בסיד

\*במיצוי מימי עם יחס מוצק/נוזל של 5/1, בהתאמה.

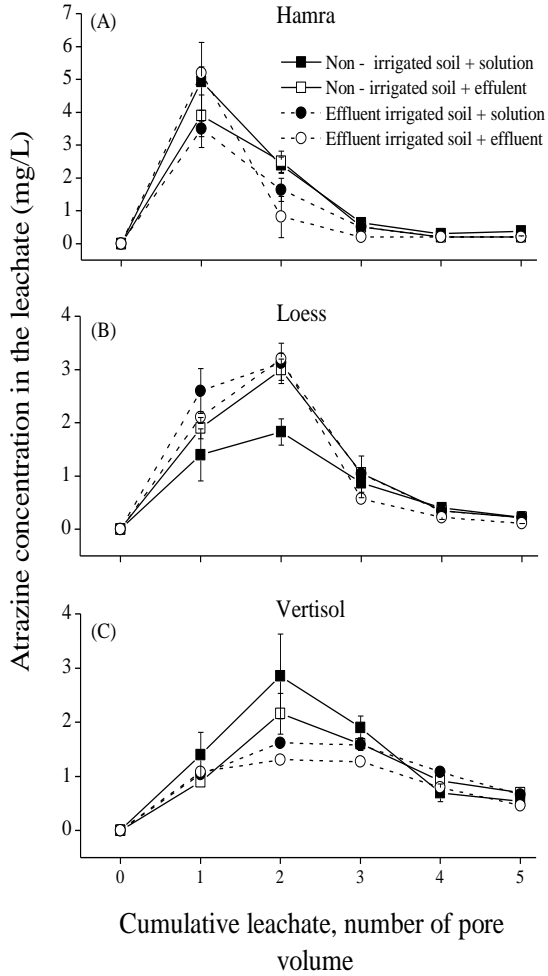
טבלה 3: תכולת חומר אורגני כללית (OM), ריכוז פחמן מסיס (DOC) בתמיסת שיווי המשקל וערכי ה- $K_d$  של איזותרמות השחרור והספיחה בקרקעות ובטיפולים השונים.

איזותרמות ספיחה		איזותרמות שחרור		OM	טיפול	קרקע
$K_d$	DOC	$K_d$	DOC			
	מ"ג/לי		מ"ג/לי	%		
N.D*	41±6	0.31	33±6	0.13	לא מושקת + תמיסת מלח	חמרה
N.D	39±3	1.38	48±10	0.13	לא מושקת + קולחים	
0.86	166±18	1.59	116±21	0.71	הושקתה בקולחים + תמיסת מלח	
0.82	191±21	1.75	172±41	0.71	הושקתה בקולחים + קולחים	
0.48	132±10	1.88	90±25	0.84	לא מושקת + תמיסת מלח	לס
0.91	125±5	2.36	105±17	0.84	לא מושקת + קולחים	
0.5	149±7	1.12	136±11	1.77	הושקתה בקולחים + תמיסת מלח	
0.46	176±23	1.41	151±31	1.77	הושקתה בקולחים + קולחים	
1.21	268±22	1.37	215±32	3.1	לא מושקת + תמיסת מלח	ורטיסול
1.35	226±2	3.08	140±44	3.1	לא מושקת + קולחים	
1.25	153±19	1.5	128±19	3.3	הושקתה בקולחים + תמיסת מלח	
0.9	188±38	1.97	152±31	3.3	הושקתה בקולחים + קולחים	

N.D\* – לא נקבע

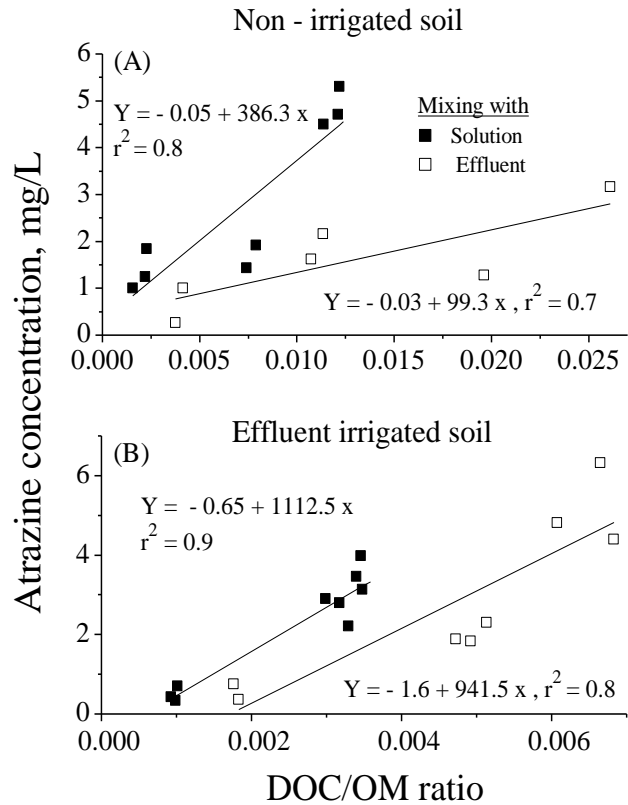
טבלה 5: ריכוז אטרזין במי הנגר וכמויות כלליות של מי נגר ואטרזין שהוסעו מחלקות הנגר בשני אתרי הניסוי בחורף 2010-2011

טיפול	ריכוז אטרזין		כמות נגר כללית
	בנגר	לעונת החורף	
	מ"ג/מ"ר	מ"מ	מ"ג/מ"ר
אתר ניסוי בבית דגן			
בקורת	0.96	97.8	57.4
בוצה סוג ב'	0.89	43.5	19.1
קומפוסט בוצה	1.29	33.1	26.1
בלמ"ס	1.1	87.3	47.2
אתר ניסוי בבית ספר כדורי			
בקורת	0.7	95.6	45.9
קומפוסט בוצה	0.31	12.2	2.6

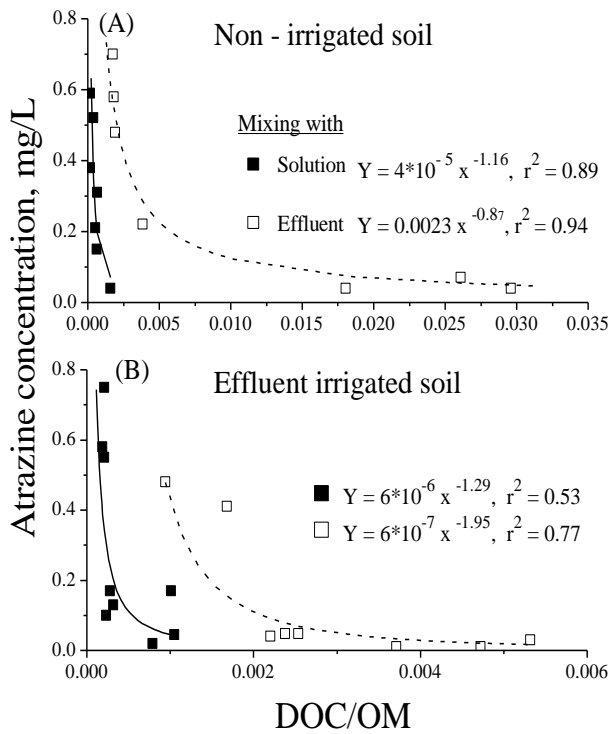


**איור 1:** ריכוז אטרזין במי התשטיף כתלות בנפח התשטיף המצטבר בקרקעות שלא הושקו ושהושקו בקולחים שנשטפו בתמיסת מלח (תמיסה) או בקולחים. הקווים האנכיים ליד הסימנים מציינים שגיאות תקן.

**איור 2:** ריכוז אטרזין במי התשטיף לאחר שטיפת עמודות הקרקע בנפח נקבובים אחד בתמיסת מלח (solution) או קולחים (effluent) כתלות ביחס DOC/OM בקרקעות השונות הלא מושקות ואלו שהושקו בקולחים.

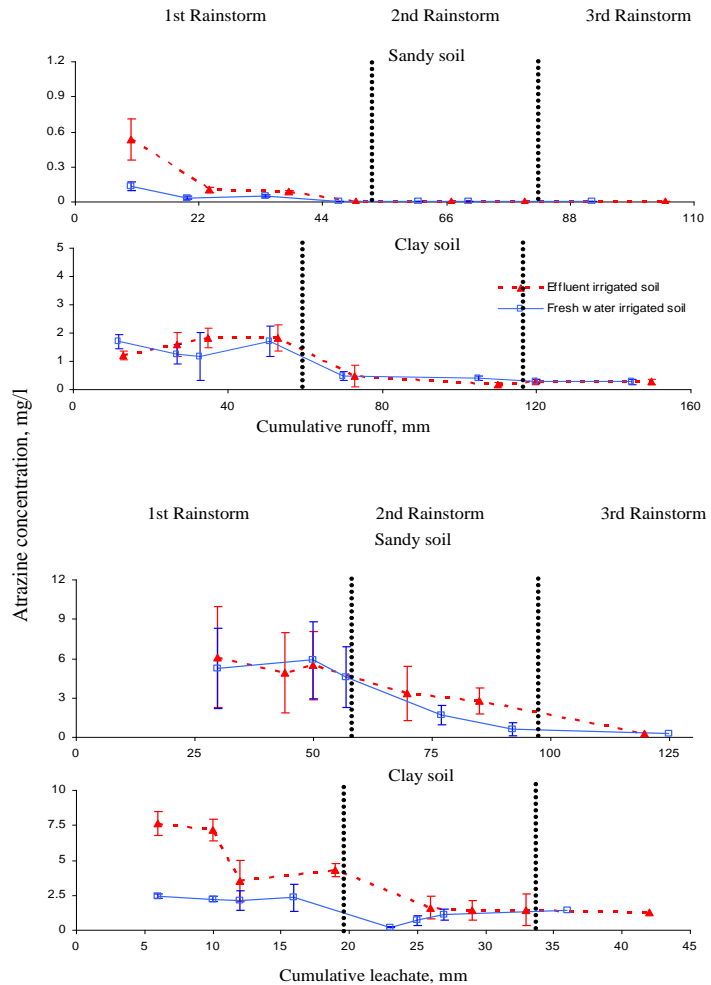


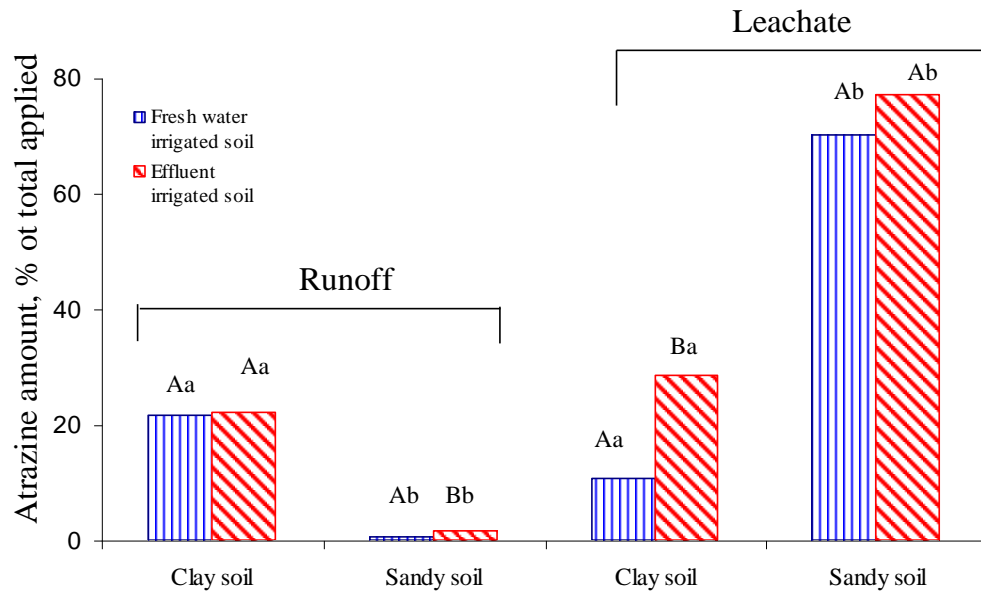




**איור 3:** ריכוז אטרזין במי התשטיפ של נפח נקבובים התמישי של לאחר שטיפת עמודות הקרקע בתמיסת מלח (solution) או קולחים (effluent) כתלות ביחס DOC/OM בקרקעות השונות הלא מושקות ואלו שהושקו בקולחים

**איור 4:** ריכוזי אטרזין במי הנגר (איור עליון) והנקז (איור תחתון) כתלות בכמות הגשם המומטרת בשלוש סופות גשם עוקבות בניסוי במדמה הגשם עבור קרקע חולית וחרסיתית שהושקו במים שפירים או בקולחים בשדה. הקווים האנכיים ליד הסימנים מציינים שתי ערכי סטיית תקן.





**איור 5:** אחוז של כמות האטרזין שנשטפה במי הנגר או הנקז בשלושת סופות גשם עוקבות מכלל כמות האטרזין שהוספה לקרקע בניסוי במדמה הגשם בקרקע חולית וחרסיתית שהושקו בשדה במים שפירים או בקולחים שניוניים. אותיות גדולות שונות בראשי העמודות מורות על הבדלים מובהקים בין טיפולי ההשקיה (קולחים או שפירים) לכל סוג קרקע. אותיות קטנות שונות בראשי העמודות מורות על הבדלים מובהקים בין הקרקעות לכל טיפול השקיה.

### **סיכום עם שאלות מנחות**

נא להתייחס לכל השאלות בקצרה ולעניין, ב-3 עד 4 שורות לכל שאלה (לא תובא בחשבון חריגה מגבולות המסגרת המודפסת).

שיתוף הפעולה שלך יסייע לתהליך ההערכה של תוצאות המחקר.

**הערה:** נא לציין הפנייה לדו"ח אם נכללו בו נקודות נוספות לאלה שבסיכום.

<b>מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.</b>
מטרת המחקר הייתה ללמוד את השפעת השקיה בקולחים שניוניים ויישום בוצות שפכים לאחר טיפולים שונים על תנועה עילית עם מי הנגר ותנועה אנכית עם מי הנקז של אטרזין בקרקעות שונות.
<b>עיקרי הניסויים והתוצאות.</b>
(1) ניסויי batch לקביעת איזותרמות ספיחה ושחרור של אטרזין בחמרה, לס וורטיסול שלא הושקו ושהושקו בקולחים שניוניים. נמצא שאיזותרמות השחרור של האטרזין הן בעלות משמעות רבה יותר על המסיסות והתנועה של האטרזין. השפעת ההשקיה בקולחים נמצאה מורכבת ומושפעת מגורמים רבים.
(2) ניסוי תנועה אנכית של אטרזין בעמודות קרקע. נמצא שתנועת האטרזין מושפעת בעיקר מייחס DOM/OM, כאשר עלייה ביחס זה הגדילה את המסיסות והתנועה האנכית של האטרזין.
(3) תנועה עילית ואנכית של אטרזין בניסויי מדמה גשם. קרקעות חמרה וורטיסול שנדגמו מחלקות שדה שהושקו בקולחים או במים שפירים טופלו באטרזין והורצו ב-3 סופות גשם עוקבות. תנועת האנכית והעילית נמצאה שונה בין הקרקעות וטיפולי ההשקיה השונים.
(4) ניסויי בחלקות נגר בשדה שהוסף להן בוצות שפכים שונות בתנאי גשם טבעיים בחורף 2010-2011. טיפולי הבוצות השונות הקטינו באופן משמעותי את התנועה העילית עם מי הנגר של האטרזין.
<b>מסקנות מדעיות והשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?</b>
מטרות המחקר הושגו באופן כללי. במחקר נמצא שתנועה עילית ואנכית של אטרזין מושפעת בעיקר: (i) מהתכונות ההידראוליות של הקרקעות המשפיעות על יחס נגר/אינפילטרציה, (ii) השפעת השקיה בקולחים ותוספת בוצות על יחס DOM/OM שהשפיעו על ספיחה/שחרור של האטרזין, כאשר השפעה זו הייתה קטנה יחסית, (iii) השפעת השקיה בקולחים ותוספת בוצה על התכונות ההידראוליות של הקרקעות, כאשר ההשפעה של השקיה בקולחים הייתה קטנה ושל תוספת בוצה הייתה משמעותית והקטינה את שיעורי הנגר ואת כמות האטרזין שהוסעה איתו.
<b>בעיות שנתרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר</b>
יש קושי למצוא שדות חקלאיים שניתן בהם להשקות בקולחים ובמים שפירים באותו שדה, ולכן בחינת השפעת ההשקיה בקולחים על תנועה עילית של אטרזין בשדה במהלך השקיה או הגשמים בחורף היא בעייתית. יש להמשיך ולמקד את המחקר בהשפעת השקיה בקולחים ותוספת בוצות שפכים על החומר האורגני הכללי והמסיס בקרקע המהווה מפתח להבנת המנגנונים המשפיעים על האינטראקציה בין האטרזין והקומפלקס הסופח בקרקע.
<b>הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב - ציטט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי;</b>

<p><b>פטנטים - יש לציין שם ומס' פטנט; הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.</b></p>
<p>1. פורסמו עבודת מוסמך של הסטודנט גיא גסר ועובדת דוקטורט של הסטודנט ניסים חזן שהוגשה לסנט האוניברסיטה לאישור. 2. שלושה מאמרים מדעיים נמצאים בעת בהכנה.</p>
<p><b>פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: (סמן אחת מהאופציות)</b></p>
<p>← ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)</p>
<p><b>האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחי?</b></p>
<p>כן</p>

## ביבליוגרפיה

1. בן-חור, מ', פיין, פ', לייב, ל' וטנאו, ל'. 2011. השפעת תוספת בוצות שפכים בשטחים חקלאיים על מבנה קרקע, נגר עילי וסחף קרקע. אופקים בגיאוגרפיה (בדפוס).
2. גסר, ג'. 2008. תנועה עילית של מזהמים בקרקעות מושקות בקולחים. עבודת מוסמך למדעי החקלאות, הפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה ע"ש ה.ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים
3. פיין, פ' 1999. בוצת שפכים – הרכבה הכימי וניצולה החקלאי. קרקע ואיכות הסביבה, מחקר חקלאי בישראל, כרך י', 3-30.
4. Allison, L.E. 1965. Organic carbon. p. 1367–1378. In C.A. Black et al. (ed.) Methods of soil analysis. Part 2. 1st ed. Agron. Monogr. 9. ASA, Madison, WI.
5. Allison, L.E., and C.D. Moodie. 1965. Carbonate. p. 1379–1396. In C.A. Black (ed.) Methods of soil analysis. Part 2. 1st ed. Agron. Monogr. 9. ASA, Madison, WI.
6. Ben-Hur, M. 2004. Sewage water treatments and reuse in Israel. In: Zereini, F., Jaeschke, W. (Eds.). Water in the Middle East and in North Africa. Springer, Berlin. pp. 167-180.
7. Ben-Hur, M., J. Letey, J. W. Farmer, C.f. Williams, and S. D. Nelson 2003. Soluble and solid organic matter effects on atrazine adsorption in cultivated soils. Published in Soil Sci. Soc. Am. J. 67:1140-1146.
8. Day, P.R. 1956. Report of the committee on physical analyses, 1954–1955. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 20:167–169.
9. Graber, E.R., Z. Gerstl, E. Fischer, and U. Mingelgrin. 1995. Enhanced transport of atrazine under irrigation with effluent. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:1513–1519.
10. Lado, M., and M. Ben Hur. 2009. Treated domestic sewage irrigation effects on soil hydraulic properties in arid and semiarid zones: A review. Soil & Tillage Research 106:152-163.
11. Morin, J., S. Goldberg, and I. Seginer. 1967. Arainfall simulator with a rotating disk. Trans. ASAE 10:74-79.
12. Nelson, S.D., J. Letey., W.J. Farmer., C.F. Williams, and M. Ben-Hur. 1998. Facilitated transport of napropamide by dissolved organic matter in sewage sludge-amended soil. J. Environ. Qual. 27:1194-1200.

