

## תוכן עניינים :

תקציר ----- עמוד 2

מבוא ----- עמוד 3

מטרות המחקר ----- עמוד 3

פירוט עיקרי הניסויים ----- עמוד 3

ניסויי מעבדה ----- עמוד 3

ניסוי מכלים ושדה ----- עמוד 7

דיון ----- עמוד 8

טבלאות ----- עמוד 13

איורים ----- עמוד 14

סיכום עם שאלות מנחות ----- עמוד 20

דו"ח סופי לתכנית מחקר מספר 11-0685-301

**שיפור המבנה והמוליכות ההידראולית של קרקעות כבדות בחתך בית השורשים במטעים מושקים בקולחים  
ע"י שימוש בפולימרים סינטטיים**

Preventing reduction of hydraulic conductivity of clay soils in plantation irrigated with effluent  
by using synthetic polymers

מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות, מו"פ קולחים

ע"י:

**מני בן-חור - המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, בית דגן  
ענת לוינגרט אייזנצ'יי - שירות הדרכה, משרד החקלאות**

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

[meni@volcani.agri.gov.il](mailto:meni@volcani.agri.gov.il)

**תקציר**

פחיתה ביבול מטעים שהושקו בקולחים שניוניים נובעת כנראה מהרס מבנה הקרקע שגורם למוליכות הידראולית נמוכה ולבעיות ניקוז של הקרקע. המטרה העיקרית של המחקר הייתה לבחון שימוש בפולימרים סינטטיים במניעת הרס מבנה הקרקע ואת הפחיתה במוליכות ההידראולית בקרקעות המושקות בקולחים. המחקר כלל ניסויי מעבדה וניסויים במכלים ובשדה פתוח. בשלב ראשון בניסויי המעבדה נמצא, שהמוליכות הידראולית ברוויה, שנמדדה בעמודות מופרות של קרקע לס וורטיסול שנדגמו מחלקות שהושקו במים שפירים או בקולחים שניוניים, ירדה באופן חד עם שטיפתם במים מזוקקים, כאשר ירידה זו הייתה רבה יותר בקרקע שהושקתה בקולחים מאשר בקרקע שהושקתה במים שפירים. מכאן, שהשפעת השקיה בקולחים על היאטמות וירידה במוליכות ההידראולית של קרקע אופיינית לקרקעות בעלות מרקם בינוני וכבד, ובהם יש לטפל. בניסויי המכלים ובשדה פתוח נמצא שימוש בתמיסת PAM בריכוזים גבוהים (500 ו-1,000 מ"ג/ל') הוא לא ישים בתנאי שדה עקב צמיגות גבוהה (צמיגות של 3.07 ו-16 ביחס למים). לכן המשך המחקר במעבדה התמקד בתנועה ובאפקטיביות של פולימר P-101, שהצמיגות שלו נמוכה גם בריכוזים גבוהים (>1.87), בייצוב מבנה הקרקע. מהניסויים השונים שנערכו במחקר זה נמצא: (i) שטיפת קרקע בתמיסות פולימרים ללא ייבושה לפני בו הגשמים היא לא יעילה בשמירת המוליכות ההידראולית של הקרקע; (ii) שטיפת קרקע בתמיסות PAM בריכוזים <100 מ"ג/ל' עם מי השקיה בטיפטוף אינה יישמה עקב הצמיגות הגבוהה של תמיסת הפולימר; (iii) הוספת תמיסת P-101 בריכוזים >5,000 מ"ג/ל' לקרקע עם מי השקיה היא יישמה עקב הצמיגות הנמוכה של תמיסת הפולימר; (iv) השפעת כוחות המיגוג בהרס התלכידים בקרקע לא מטופלת הייתה רבה. לעומת זאת, שטיפת הקרקע בתמיסת P-101 בריכוזים >5,000 מ"ג/ל' פולימר בשני נפחי נקובים וייבושה ייצבה באופן משמעותי את מבנה הקרקע עד עומק של 21 ס"מ לפחות.

**הצהרת החוקר הראשי:**

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאיים: לא

תאריך: 8.1.2014.

חתימת החוקר

## מבוא

בשנים האחרונות הובחנה במספר פרדסים ומטעי אבוקדו, שהושקו זמן רב בקולחים, ירידה ביבול ופגיעה בהתפתחות העצים עד כדי ניוונום ועקירת המטע. תופעות אלו הובחנו בעיקר במטעים שגודלו בקרקעות כבדות, כגון - בפרדס מזרע, בפרדס שריד ובמטע אבוקדו סמוך לעכו. לעומת זאת, במטעים ובפרדסים שגדלים בקרקעות קלות והושקו בקולחים, תופעות אלו לא הובחנו או שהובחנו בצורה קלה מאוד. גרומים כימיים, כגון מליחות, דישון או יוניים רעילים, לא יכלו להסביר את הירידה ביבולים ובפגיעה בהתפתחות העצים הגדלים בקרקעות כבדות. אחת ההשערות לירידה זו ביבול המטעים היא, שהרס המבנה של קרקעות כבדות כתוצאה מהשקיה ממושכת בקולחים הגורמת לירידה במוליכות ההידראולית ובניקוז שלה, גורמת לנזק עקיף בהתפתחות העצים וביבולם. הוצע ששימוש בפולימרים סינטטיים, שיישמו עם מי השקיה, יחדרו לגוף הקרקע יספחו על חלקיקי הקרקע וייצבו את המבנה שלה. כתוצאה מכך, ערכי מוליכות ההידראולית גבוהים של הקרקע יישמרו במהלך שטיפתה במי גשמים החסרים באלקטרוליטים.

## מטרות המחקר

המטרה העיקרית של הצעת המחקר הנוכחית היא לבחון את השימוש בפולימרים סינטטיים, שנמצאו יעילים בייצוב מבנה קרקע, במניעת הרס מבנה הקרקע ואת הפחיתה במוליכות ההידראולית בקרקעות כבדות המושקות בקולחים או לטייב קרקעות כבדות עם מבנה הרוס.

## פירוט עיקרי הניסויים

המחקר כלל שני חלקים עיקריים: (1) ניסוי מעבדה ו- (2) ניסויים במכלים עם קרקע ובשדה פתוח.

## ניסוי מעבדה

ניסויי המעבדה כללו חלק א' - בחינת השפעת השקיה בקולחים שניוניים על המוליכות ההידראולית ברוויה של קרקעות עם מרקם שונה; חלק ב' - השפעת סוגי פולימרים וריכוזים שונים על מוליכות ההידראולית ומבנה של קרקע כבדה שהושקתה זמן רב בקולחים. הקרקעות שנלמדו במעבדה נדגמו מהשדה, יובשו ליובש אוויר, נכתשו במכונת כתישה ונופו לקבלת התפלגות תלכידים רצויה על פי צרכי הניסויים הספציפיים כפי שמוצג בהמשך.

חלק א' - בחלק זה נדגמו שלושה טיפוסים קרקע שונים, חמרה שנדגמה מפרדס בקיבוץ רמת הכובש במישור החוף, קרקע ורטיסול מפרדס בקיבוץ מזרע בעמק יזרעאל וקרקע לס משדה שגודלו בו גידולים עונתיים בבקעת ערד. תכונות כלליות של הקרקעות שנלמדו מובאים בטבלה 1. הקרקעות נדגמו מהשכבה העליונה (2-15 ס"מ) מחלקות ניסוי שהושקו במים שפירים או קולחים שניוניים לאחר טיפול בברכות חמצון למשך <10 שנים בפרדס ברמת הכובש ובמזרע ו-3 שנים בשדה בבקעת ערד. תכונות כלליות של הקרקעות שנלמדו מובאים בטבלה 1, וערכים ממוצעים של ערכי pH, EC ו-SAR וריכוז חומר אורגני מסיס במי הקולחים השונים ששימשו להשקיית הקרקעות שנלמדו מובאים בטבלה 2.

מדידת המוליכות ההידראולית של הקרקעות השונות נעשתה כדלקמן: 120 גר' (יבש תנור) מכל דגימת קרקע נארזו בעמודה פלסטיק בקוטר 5 ס"מ על שכבת חול גס חסר מלחים עם עובי שכבה של 2 ס"מ, כאשר עובי שכבת הקרקע בעמודה היה 5 ס"מ וצפיפות הגושית שלה הייתה 1.22 גר'/סמ"ק. על מנת ליצור אחידות באריזות העמודות השונות, תערובת קרקע מכל דגימה שכללה, 25%, 31%, 25%, 13% ו-6% של תלכידים בתחומי גודל של 1.0-2.0, 0.5-1.0, 0.25-0.5, 0.1-0.25 ו- >0.1 מ"מ, בהתאמה, נארזה בעמודה. עמודות הקרקע השונות הורטבו מלמטה עד מצב רוויה בתמיסת מלח (CaCl<sub>2</sub>, NaCl) בריכוז 50 מא"ק/לי ובערך

SAR התואם את ESP הקרקע (תקרא תמיסת מלח). הרטבה זו של הקרקע בעמודות נעשתה בשיעור הרטבה של 35 מ"מ/שעה. לאחר הרווית הקרקע, כיוון שטיפת הקרקע הוחלף מלמעלה למטה והקרקע נשטפה בעמוד הידראולי קבוע בארבעה נפחי נקבובים בתמיסת המלח ומיד לאחר מכן במים מזוקקים. במהלך שטיפת הקרקע מלמעלה למטה בתמיסת המלח ובמים מזוקקים, מקטעים של התשטיף שיצא מתחתית עמודת הקרקע נאסף במשך פרקי זמן שונים בעזרת אוסף מקטעים. נפחי המקטעים של התשטיף נמדדו והמוליכות הידראולית חושבה על פי נוסחת דארסי. בנוסף נמדדו במקטעי התשטיף השונים ערכי ה-EC וה- pH וריכוז החרסית. ריכוז החרסית בתשטיפים נקבע ע"י מדידת בליעת אור באורך גל של 420 ננומטר של התשטיף וחושב מעקומת כיוול של הקרקע הנבדקת. שטיפת עמודות הקרקע במים מזוקקים נעשתה עד להגעה לערך תמידי (steady state) מבחינת המוליכות ההידראולית וה- EC במי התשטיף. כל הטיפולים בכל סוגי הקרקע בחלק זה של העבודה נעשו בשלוש חזרות.

**חלק ב' - חלק זה נעשה בקרקע ורטיסול** מקיבוץ שריד שהושקתה בקולחים שניוניים לאחר טיפול בבריכות חמצון ממאגר גניגר במשך <10 שנים. הקרקע נדגמה מעומק 80-100 ס"מ מכיוון שהבעיה העיקרית של ירידה במוליכות ההידראולית של קרקעות תופחות, כגון ורטיסול, היא בשכבות העמוקות. שני סוגי פולימרים, PAM ו- P-101, שמהם הוכנו תמיסות עם ריכוזים שונים במי ברז, שימשו כטיפולים לטיוב מבנה הקרקע. תכונות כלליות של שני סוגי הפולימר מובאים בטבלה 3. השפעת הפולימרים השונים על המוליכות ההידראולית נבחנה בשני סוגי עמודות, עמודות קרקע בודדות ועמודות קרקע עוקבות ובשני אופני יישם של הפולימרים, עם ייבוש וללא ייבוש של הקרקע לאחר שטיפתה בתמיסת הפולימרים.

**עמודות קרקע בודדות** – ביישום הפולימרים עם ייבוש וללא ייבוש, קרקע יבשה (יובש אוויר) נארזה בעמודת פלסטיק בקוטר 5 ס"מ באופן דומה למתואר בחלק א' למעלה ובצפיפות גושית של 1.1 גר/סמ"ק. ביישום הפולימר ללא ייבוש, עובי שכבת הקרקע בעמודה היה 5 ס"מ, ולאחר אריזתה בעמודה היא הורטבה מלמעלה בתמיסת מלח בשיעור הרטבה של 35 מ"מ/שעה עד למצב רוויה. לאחר הרווית הקרקע, כיוון השטיפה הוחלף מלמעלה למטה, והקרקע נשטפה בעמוד הידראולי קבוע באופן רציף בשני נפחי נקבובים של תמיסת המלח, לאחר מכן בתמיסת PAM בריכוזים 100, 300 או 500 מ"ג/ל' או תמיסת P-101 בריכוזים 100 ו- 1,000 מ"ג/ל' בנפח של כ- 5 נפחי נקבובים לכול סוג תמיסה ולאחר מכן במים מזוקקים. במהלך שטיפת הקרקע מלמעלה למטה, התשטיף שיצא מתחתית עמודת הקרקע נאסף במקטעים בפרקי זמן שונים, ואיכות התשטיף והמוליכות ההידראולית נקבעו באופן דומה למתואר למעלה בחלק א', מלבד מדידת אחוז החרסית בתשטיף. בנוסף, הצמיגות ביחס למי ברז (צמיגות יחסית) נמדדה במקטעים השונים של התשטיף על ידי Oswald viscometer.

ביישום הפולימר עם ייבוש, הקרקע נארזה בעמודה עם עובי שכבה של 7 ס"מ וטופלו בתמיסות הפולימרים PAM ו- P-101 בצורות שונות. טיפול הקרקע ב- PAM - לאחר אריזת הקרקע בעמודת הפלסטיק, מי ברז או תמיסת PAM בריכוז של 100 מ"ג/ל' ובנפחים של 2, 3 או 4 נפחי נקבובים או בתמיסת PAM בריכוז 500 מ"ג/ל' ובשני נפחי נקבובים טופטפו בשיעור 36 מ"ל/שעה על פני הקרקע בעמודה. לאחר גמר הטפטוף והתנקזות הקרקע במשך הלילה, הקרקע הוצאה בזהירות מהעמודה, יובשה למשך 24 שעות בתנור בטמפרטורה של 40 מ"צ (חיקוי לייבוש אוויר), נכתשה ידנית, נארזה שוב בעמודת הפלסטיק על פי

המתואר בחלק א' למעלה, כאשר עובי וצפיפות הגושית של שכבת הקרקע בעמודה היו 5 ס"מ ו- 1.1 גר"/סמ"ק, בהתאמה. לאחר האריזה, הקרקע הורטבה מלמטה במים מזוקקים בשיעור הרטבה של 35 מ"מ/שעה עד להרווייתה, ואז כיוון השטיפה הוחלף מלמעלה למטה, והקרקע נשטפה בעמוד הידראולי קבוע במים מזוקקים. התשטיף נאסף במקטעים בפרקי זמן שונים, ואיכותו והמוליכות ההידראולית נקבעו באופן דומה כמתואר למעלה לגבי יישום פולימר ללא ייבוש. טיפול הקרקע ב-P-101 - לאחר אריזת הקרקע, מי ברז או תמיסת P-101 בריכוזים 100, 1,000 או 5,000 מ"ג/ל' טופטפו בשיעור 36 מ"ל/שעה על פני הקרקע בעמודה. נפחי השטיפה במי ברז ובתמיסת ה-P-101 בריכוז 100 מ"ג/ל' היו 2, 3, ו-4, בתמיסה בריכוז 1,000 מ"ג/ל' היו 1 ו-2 ובתמיסה בריכוז 5,000 מ"ג/ל' היה 1 נפח נקבובים. לאחר גמר הטפטוף והתנקזות הקרקע במשך הלילה, הקרקע הוצאה בזהירות מהעמודה, יובשה למשך 24 שעות בתנור בטמפרטורה של 40 מ"צ, נכתשה ידנית, נארזה שוב בעמודת פלסטיק על פי המתואר בחלק א' למעלה, כאשר עובי וצפיפות הגושית של שכבת הקרקע בעמודה היו 5 ס"מ ו- 1.1 גר"/סמ"ק. לאחר האריזה, הקרקע הורטבה מלמטה בתמיסת המלח בשיעור הרטבה של 35 מ"מ/שעה עד להרווייתה, כיוון השטיפה הוחלף מלמעלה למטה, והקרקע נשטפה בעמוד הידראולי קבוע באופן רצוף בכ-3 נפחי נקבובים של תמיסת מלח ולאחר מכן במים מזוקקים. התשטיף נאסף במקטעים בפרקי זמן שונים, ואיכותו והמוליכות ההידראולית נקבעו באופן דומה למתואר למעלה לגבי יישום פולימר ללא ייבוש.

**עמודות קרקע עוקבות** – בניסוי זה בכל טיפול שטיפה נארזו שלוש עמודות באופן שנעשה באריזה בעמודות הבודדות, כאשר עובי וצפיפות הגושית של שכבת הקרקע בכל עמודה היו 7 ס"מ ו- 1.1 גר"/סמ"ק, בהתאמה. שלושת עמודות הקרקע בכל טיפול הונחו אחת מתחת לשנייה, כאשר מי ברז או תמיסת פולימר בריכוז של 5,000 מ"ג/ל' ובנפח של 1, 2, 3 או 4 נפחי נקבובים של סה"כ שלושת עמודות הקרקע טופטפו בשיעור 36 מ"ל/שעה בראש העמודה העליונה. במהלך שטיפת העמודות בתמיסות השונות, מי הנקז מהעמודה העליונה והאמצעית טפטף לעמודה העוקבת מתחת והנקז מהעמודה התחתונה נקז לכוסית כימית שמוקמה מתחת לעמודה התחתונה. עקב הצמיגות הגבוהה של תמיסת הפולימר בריכוז של 5,000 מ"ג/ל', תנועת תמיסת השטיפה הואטה לאחר הרטבת הקרקע בעמודה האמצעית. לכן, על מנת למנוע הערמות של תמיסת הפולימר בפני הקרקע בעמודה העליונה והאמצעית, קצב הטפטוף של תמיסת הפולימר בראש העמודה העליונה הופחת ל-15 מ"ל/שעה בשלב זה של ההרטבה. בסוף תהליך השטיפה של שלושת עמודות הקרקע העוקבות עם תמיסות הפולימר ומי הברז, הצמיגות היחסית נמדדה במי התשטיף שנאגרו בכוסית בתחתית העמודה התחתונה. לאחר גמר תהליך שטיפת הקרקע בעמודות השונות במי הברז או תמיסות הפולימר והתנקזותם, הקרקעות הוצאו מעמודות הפלסטיק, יובשו, נכתשו ונארזו שוב בעמודות, כאשר עובי וצפיפות הגושית של שכבת הקרקע בכל עמודה היו 5 ס"מ ו- 1.1 גר"/סמ"ק. בעמודות אלו נקבעו ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה, ה-EC ו-pH במי התשטיף כפי שמתואר לגבי עמודות קרקע בודדות בשטיפה עם תמיסת P-101. כל הטיפולים בעמודות הקרקע הבודדות והעוקבות נעשו בשלוש חזרות (שלוש עמודות קרקע לכל טיפול).

#### יציבות תלכידים

על מנת לבחון את השפעת טיפולי הפולימר השונים על יציבות מבנה הקרקע, יציבות תלכידים נקבעה בדגימות שנלקחו מהקרקעות השונות שהוצאו מהעמודות העוקבות לאחר שטיפתם במי ברז או בתמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/ל' ובשלושה נפחי נקבובים ולאחר ייבש הקרקע לייבוש אוויר. מדידת יציבות התלכידים

כללה מספר מבחנים לבחינת רגישות הקרקע לתהליכי מיגוג (soil slaking), תפיחה ודיספרסיה. פירוט מתומצת של מבחנים אלו מובא להלן:

**ערכי מיגוג:** מיגוג הקרקע הינו שבירת תלכידים למיקרו תלכידים כתוצאה מהרטבה מהירה שלהם. המיגוג מתרחש כאשר תלכיד הקרקע נחשפים תוך כדי הרטבתם לכוחות הנוצרים מתפיחה לא אחידה של החרסית בתלכיד, מלחץ אוויר כלוא בנקבובים, ושחרור חום כתוצאה מספיחת מולקולות מים בקרקע. כל הכוחות הללו מוגדרים ככוחות מיגוג. קביעת ערכי המיגוג של הקרקע נעשתה באופן הבא, 5 ג' של תלכידים יבשים בגודל 2-4 ס"מ הורטבו באופן מהיר ע"י הכנסתם למיכל עם מים מזוקקים. בנוסף, 5 ג' של תלכידים יבשים בגודל 2-4 ס"מ מאותה דגימה הורטבו באופן איטי בתנאי וקום. לאחר ההרטבה המהירה והאיטית של התלכידים, הם טולטלו בעדינות במיכל עם אתנול, ולאחר מכן נופו בעדינות דרך מערכת נפות בגדלים שונים. כל מקטע קרקע בנפות השונות יובש בתנור ב- 105 מ"צ ונשקל בנפרד. קוטר ממוצע משוקלל ( $MWD$ ) של התלכידים לאחר ההרטבה המהירה והאיטית והניפוי חושב לכל דגימת קרקע על פי נוסחה [1]

$$MWD = \sum_{i=1}^7 \bar{x}_i w_i \quad [1]$$

כאשר,  $w_i$  הוא משקל המקטע של התלכידים בקבוצת גודל  $i$  עם ממוצע קוטר  $X_i$ .

ערך המיגוג ( $SLV$ ) של כל דגימת קרקע חושב על פי נוסחה [2]

$$SLV = \frac{MWD_s}{MWD_f} \quad [2]$$

כאשר,  $MWD_s$  ו-  $MWD_f$  הם קוטר ממוצע משוקלל של התלכידים לאחר הרטבה איטית ומהירה, בהתאמה. ערך 1 של  $SLV$  מורה על חוסר השפעה של כוחות המיגוג בהרס התלכידים, וככל שערך ה-  $SLV$  גדול יותר מערך 1, השפעת כוחות המיגוג בהרס התלכידים היא רבה יותר.

**ערכי תפיחה:** ערכי התפיחה של דגימות הקרקע השונות נמדדו ע"י כך ש- 60 תלכידים יבשים בגודל 2-4 ס"מ מכל דגימת קרקע הונחו ב- 3 צלחות פטרי, 20 תלכידים לצלחת. התלכידים בצלחות הפטרי נסרקו בסורק לקביעת שטח הבבואה (image) שכל תלכיד יצר, ונפח התלכידים חושב ע"י תוכנת מחשב (UTHSCSA) (University of Texas Health Science Center, San Antonio, Texas) על פי שטח הבבואה שנמדד ובהנחה שהתלכידים הם כדוריים. לאחר סריקת התלכידים, הם הורטבו באופן איטי בתנאי וקום למשך 24 שעות, ולאחר מכן נסרקו שוב ונפחם חושב כפי שחושב נפח התלכידים היבשים. ערך התפיחה ( $SWV$ ) של כל דגימת קרקע חושב על פי נוסחה [3]

$$SWV = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{wi} - I_{di}) / I_{di}}{n} \quad [3]$$

כאשר,  $n$  הוא מספר התלכידים ו-  $I_{wi}$  ו-  $I_{di}$  הם נפח מחושב של התלכיד  $i$  לאחר ולפני הרטבתו, בהתאמה.

**ערכי דיספרסיה:** הדיספרסיה של דגימות הקרקע השונות נקבעה בשיטת (Gupta et al. (1984), וערך

הדיספרסיה ( $DV$ ) לכל דגימת קרקע חושב על פי נוסחה [4]

$$DV = \frac{M_d}{M_t} \times 100 \quad [4]$$

כאשר,  $M_d$  הוא משקל החרסית שעברה דיספרסיה מדגימה של 2 ג' קרקע שטולטל במים מזוקקים, ו- $M_t$  הוא משקל כולל של החרסית בדגימה של 2 ג' קרקע. כל המדידות של יציבות התלכידים נעשו בשלוש חזרות לכל טיפול.

#### ניסויי מכלים ושדה

בעקבות תוצאות ניסויי עמודות הקרקע שנערכו בשנה הראשונה של המחקר, שהראו יעילות רבה יותר בייצוב מבנה הקרקע לאחר שטיפתה בתמיסה של 100 מ"ג/ל' של PAM (איור 6) מאשר של P-101 (תוצאות לא מוצגות), התבצע בשנה השנייה ניסוי במכלים ובחלקת שדה ע"י טיפול הקרקע ב-PAM. על מנת שהשימוש ב-PAM יהיה יישם בתנאי שדה, יש צורך להשתמש בתמיסת פולימר מרוכזת על מנת למנוע הובלה ואחסון של נפחים גבוהים של תמיסת פולימר בשדה. לכן, בניסוי במכלים ובחלקת השדה נבחר יישום של תמיסות PAM בריכוזים 1,000 מ"ג/ל' (הריכוז המקסימאלי שניתן להמיס בתנאי שדה) ו-500 מ"ג/ל' שהוכנו במי ברז.

בניסוי במכלים שנערך בשדה פתוח בבית דגן, קרקע משריד (טבלה 1) נכתשה, נופתה לגודל תלכידים  $> 4$  מ"מ, נארזה בצפיפות גושית של 1.0 ג'סמ"ק בשישה מכלים בעלי קוטר של 0.2 מ' וגובה של 0.45 מ' המחוררים בתחתיתם תוך שמירת רצף בין הקרקע במיכל לקרקע בשדה. תמיסות PAM בריכוזים 1,000 ו-500 מ"ג/ל' בשיעור של 2 ל'שעה טופטפו על פני הקרקע במכלים ע"י צינור מריוט בשלוש חזרות (שלושה מכלים) לכל תמיסה. בשלב מוקדם לאחר תחילת הטפטוף, חידור תמיסות ה-PAM לקרקע פחת מאוד והחלה הצפה של פני הקרקע בתמיסות ה-PAM שלא אפשרה את המשך הניסוי. פחיתה זו בחידור תמיסות הפולימר נבעה מהצמיגות הגבוהה של תמיסות ה-PAM כפי שנמצא בניסויי המעבדה (טבלה 3).

על מנת לבחון את מידת היישום של תוספת תמיסות ה-PAM לקרקע דרך מערכת הטפטוף, התבצע ניסוי בחלקת שדה בנווה יער. הניסוי כלל שני טיפולים השקיה ללא תוספת פולימר (ביקורת) והשקיה עם תוספת תמיסת PAM. חלקת טיפול כללה שלוש ערוגות באורך של 15 מ' עם שלוחת טפטוף במרכז כל ערוגה, מרווח של 0.5 מ' בין הטפטפות בשלוחה וספיקת טפטפת של 2.4 ל'ש'. תמיסת PAM בריכוז של 1,000 מ"ג/ל' ממיכל דישון הוזרקה למערכת ההשקיה ע"י משאבת עמיעד ביחס 2:1 (תמיסת פולימר/מי השקיה), כך שהחלקות הושקו בתמיסת PAM של 500 מ"ג/ל'. במהלך ההשקיה עם תמיסת הפולימר, פעילות משאבת ההזרקה הייתה משובשת מאוד וטפטוף תמיסת הפולימר מהטפטפות הייתה בלתי סדירה, ולכן הניסוי הופסק. שיבושים אלו נבעו מהצמיגות הגבוהה של תמיסת ה-PAM. בעקבות הכישלונות של יישום תמיסות ה-PAM בריכוזים גבוהים בתנאי שדה הסקנו שיש להתייחס לצמיגות של הפולימרים, ולהתמקד בהמשך

המחקר בתנועה ובאפקטיביות של פולימר P-101, שהצמיגות שלו נמוכה גם בריכוזים גבוהים (טבלה 3), בייצוב מבנה הקרקע.

## דיון

### ניסויי מעבדה

**חלק א' - ערכי מוליכות הידראולית ברוויה של דגימות הקרקע, לס, ורטיסול וחמרה שנדגמו מחלקות שדה מושקים במים שפירים או בקולחים כתלות בנפח התשטיף המצטבר במהלך שטיפתם בתמיסת מלח ולאחר מכן במים מזוקקים בעמודות קרקע מובאים באיור 2. ערכי המוליכות ההידראולית של הקרקע החולית חמרה שהכילה 12% חרסית ו- 85% חול היו גבוהים ונעו בין 200 ל- 300 מ"מ/שעה, כאשר לא נמצאו הבדלים מובהקים בין הקרקע שהושקתה בעבר בקולחים לבין מים שפירים ובין ערכי המוליכות ההידראולית במהלך שטיפת הקרקע בתמיסת מלח או במים מזוקקים (איור 2A). לעומת זאת, בלס ובורטיסול (איורים 2A ו- 2C) בעלות מרקם בינוני וכבד, בהתאמה, שהושקו בעבר במים שפירים או בקולחים, ערכי המוליכות ההידראולית שלהן ירדו באופן חד עם שינוי מי השטיפה מתמיסת מלח למים מזוקקים. בשתי קרקעות אלו, ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה בקרקע שהושקתה בעבר בקולחים היו נמוכים מאשר בקרקע שהושקתה בעבר במים שפירים.**

ריכוז החרסית וערכי ה- EC במי התשטיף של קרקעות הלס שהושקו בעבר במים שפירים או בקולחים כתלות בנפח מי התשטיף עם שטיפתן בתמיסת מלח ולאחר מכן במים מזוקקים מובאים באיורים 3A ו- 3B, בהתאמה. עם שטיפת הקרקעות במים מזוקקים חלה ירידה חדה בערכי ה- EC בתשטיף מ-  $dS/m$  3A ו- 3B, בהתאמה. עם שטיפת הקרקעות במים מזוקקים חלה ירידה חדה בערכי ה- EC  $\sim 6$  לערכים נמוכים (איור 3B) שהם מתחת לערכי הפלוקולציה של החרסית בקרקע. ירידה זו בערכי ה- EC גרמה לדיספרסיה של החרסית ולתנועה ושטיפה שלה מהקרקע, כאשר ריכוזי החרסית במי התשטיף בקרקע שהושקתה בעבר בקולחים היו גבוהים יותר מאשר בקרקע שהושקתה בעבר במים שפירים (3A). הבדלים אלו בריכוזי החרסית בתשטיף נבעו מערכי ה- ESP הגבוהים יותר בקרקע שהושקתה בקולחים (ESP 16.2%) מאשר בקרקע שהושקתה במים שפירים (ESP 11%) (טבלה 1). הירידה החדה בערכי המוליכות ההידראולית עם שטיפת קרקעות אלו במים מזוקקים (איור 2A) נבעה בסבירות גבוהה מהדיספרסיה של החרסית והתפיחה של הקרקע שגרמו להקטנה בגודל הנקבובים המוליכים, כאשר תהליכי הדיספרסיה והתפיחה הדומיננטיים יותר בקרקע שהושקתה בעבר בקולחים מאשר בקרקע שהושקתה במים שפירים גרמה לערכי מוליכות הידראולית נמוכים יותר בקרקע שהושקתה בקולחים מאשר בקרקע שהושקתה במים שפירים.

בורטיסול ובחמרה לא נצפתה חרסית במי התשטיף עם שטיפתן במים מזוקקים (תוצאות לא מוצגות). ערכי ה- ESP בורטיסול שהושקתה בעבר במים שפירים או בקולחים היו 1.7% ו- 6%, בהתאמה (טבלה 1). בורטיסול שהושקתה בעבר במים שפירים לא חלה כנראה דיספרסיה משמעותית עם שטיפתה במים מזוקקים עקב ערך ה- ESP הנמוך בקרקע זו, ולכן הירידה במוליכות ההידראולית במקרה זה (איור 2B) נבעה בעיקר מתפיחת הקרקע. לעומת זאת, סביר להניח, שבורטיסול שהושקתה בעבר במי קולחים, שטיפתה במים מזוקקים בעמודות גרמה לדיספרסיה של החרסית עקב ה- ESP הגבוה יחסית (6%) בקרקע. במקרה זה, חלקיקי החרסית שעברו דיספרסיה נלכדו בנקבובים הקטנים בקרקע, ולכן לא נשטפו עם מי התשטיף. הירידה החדה של ערכי המוליכות ההידראולית בקרקע זו, נבעה מתפיחת הקרקע והדיספרסיה של החרסית, ולכן



ערכי המוליכות ההידראולית בקרקע זו היו נמוכים יותר מאשר הערכים בקרקע שהושקתה בעבר במים שפירים (איור 2B). לעומת זאת בקרקע החמרה, ערכי ה-ESP הנמוכים >2.2% (טבלה 1) מנעו את הדיספרסיה של החרסית, ואחוז החרסית הנמוך 12% (טבלה 1) מנע את תפיחת הקרקע. כתוצאה מכך, לא נמצאו הבדלים מובהקים בערכי המוליכות ההידראולית בין הקרקע שהושקתה בעבר בקולחים לעומת הקרקע שהושקתה במים שפירים ובין שטיפת הקרקע בתמיסת מלח לבין שטיפתה במים מזוקקים (איור 2C). מכאן ניתן להסיק, שהשפעת השקיה ממושכת בקולחים שניוניים על האיטמות וירידה במוליכות ההידראולית של הקרקע אופיינית לקרקעות בעלות מרקם בינוני וכבד, ובהם יש לטפל על מנת למנוע ירידה זו במוליכות ההידראולית.

חלק ב' - על מנת לבחון את השפעת שטיפת הקרקע בתמיסת פולימרים על מבנה הקרקע והמוליכות ההידראולית שלה, קרקע ורטיסול מקיבוץ שריד (טבלה 1), שהושקתה במשך <10 שנים בקולחים שניוניים ממאגר גניגר (טבלה 2), נארזה בעמודת פלסטיק ונשטפה בתמיסת מלח, לאחר מכן בתמיסות עם ריכוזים שונים של PAM ו-P-101 ולבסוף במים מזוקקים כחיקוי למי גשם. ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה וה-EC במי התשטיפ של הקרקע שנשטפה באופן רצוף בתמיסת מלח, בתמיסת PAM בריכוז של 100 או 500 מ"ג/ל' ולבסוף במים מזוקקים כתלות בנפח מצטבר של התשטיפ מובאים באיור 4. ערכי הצמיגות היחסית של תמיסות ה-PAM בריכוז 100 ו-500 מ"ג/ל' ששימשו לשטיפת הקרקעות היו 1.24 ו-3.07, בהתאמה (טבלה 3). ערכי המוליכות ההידראולית במהלך שטיפת הקרקע בתמיסת המלח היו גבוהים ומעל 150 מ"מ/שעה (איורים 4A ו-4C) עקב ערכי ה-EC הגבוהים מעל 5 dS/m בתמיסת הקרקע (איורים 4B ו-4D) שמנעו את הדיספרסיה של החרסית והקטינו את התפיחה של הקרקע. עם שטיפת הקרקע בתמיסת ה-PAM בריכוז 100 או 500 מ"ג/ל' חלה ירידה במוליכות ההידראולית ל-80~ ו-20~ מ"מ/ש', בהתאמה. שטיפת הקרקע במים מזוקקים לאחר שטיפתה בתמיסות ה-PAM גרמה לעליה מסוימת בערכי המוליכות ההידראולית, כאשר עליה זו הייתה מובהקת לאחר שטיפת הקרקע ב-500 מ"ג/ל' PAM (איורים 4A ו-4B). ירידה זו במוליכות ההידראולית עם שטיפת הקרקע בתמיסות ה-PAM נבעה ברובה מערכי הצמיגות הגבוהים של תמיסות ה-PAM שנעה בקרקע (איורים 5A ו-5B), כאשר הצמיגות הגבוהה יותר של תמיסת ה-PAM בריכוז 500 מאשר 100 מ"ג/ל' גרמה לירידה גדולה יותר במוליכות ההידראולית. שטיפת הקרקע במים מזוקקים לאחר שטיפתה בתמיסות ה-PAM גרמה לירידה בצמיגות היחסית בתשטיפ לערך 1 השווה לצמיגות מים מזוקקים (איורים 5A ו-5B). ירידה זו בערכי הצמיגות נבעה משטיפת מולקולות ה-PAM שלא נספחו לקרקע. אולם, שטיפת הקרקע במים מזוקקים לאחר שטיפתה בתמיסות PAM בריכוזים 100 ו-500 מ"ג/ל' לא העלתה את ערכי המוליכות ההידראולית של הקרקע לערכים שהתקבלו בשטיפתה בתמיסת מלח. העלייה המסוימת בערכי המוליכות ההידראולית של הקרקע עם שטיפתה במים מזוקקים לאחר השטיפה בתמיסות ה-PAM (איורים 4A ו-4B) נבעה מירידה בצמיגות תמיסת הקרקע (איורים 5A ו-5B) כתוצאה משטיפת מולקולות הפולימר מהקרקע. מכאן, שטיפת הקרקע בתמיסת PAM ללא יבושה אחרי שטיפה זו אינה מונעת את הירידה במוליכות ההידראולית של הקרקע עם שטיפתה במים מזוקקים המחקים מי גשם.

ניתן ללימוד על תנועת מולקולות ה-PAM בקרקע משינוי בערכי הצמיגות של התשטיף עם שטיפת הקרקע בתמיסה של 500 מ"ג/ל' PAM (איור 5B). העלייה בערכי הצמיגות של מי התשטיף לאחר שטיפת הקרקע בנפח נקבובים >1 מורה על כך שתנועת מולקולות ה-PAM נעשית לא על פי מודל הבוכנה, אלא חלק ממולקולות ה-PAM נעות במעברים מועדפים ונשטפים מהקרקע לפני שכל נקבובי הקרקע מתמלאים בתמיסת פולימר. העלייה בערכי הצמיגות של מי התשטיף עד לשטיפת הקרקע בשני נפחי נקבובים לערך, שבהם הצמיגות של מי התשטיף משתווה בקירוב לצמיגות תמיסת ה-PAM הזורמת מראש העמודה, נבעה מספיחת מולקולות ה-PAM לקרקע עד להרוויית כל אתרי הספיחה שבה בתנאי רטיבות, שקרתה לאחר שטיפת הקרקע בשני נפחי נקבובים של תמיסת הפולימר.

שטיפת הקרקע בתמיסות P-101 בריכוז 100 מ"ג/ל', באפן שנעשה בשטיפת הקרקע בתמיסת PAM (איור 4), לא גרמה לירידה מובהקת במוליכות ההידראולית של הקרקע, ואילו שטיפת הקרקע בתמיסת P-101 בריכוז 1,000 מ"ג/ל' גרמה לירידה מתונה יחסית אבל מובהקת במוליכות ההידראולית (תוצאות לא מוצגות). ערכי הצמיגות היחסית של תמיסות ה-P-101 בריכוזים 100 ו-1,000 מ"ג/ל' ששימשו לשטיפת הקרקעות היו 1.0 ו-1.19, בהתאמה (טבלה 3). השפעה קטנה זו על המוליכות ההידראולית של הקרקע במהלך שטיפתה בתמיסות הפולימר P-101 נבעה מגודל מולקולות קטן יחסית של פולימר שגרם לצמיגות נמוכה של התמיסות שלו (טבלה 3) ולהפרעה מרחבית קטנה בתנועת המים. ניתן להסיק מתוצאת אלו, שיישום פולימרים בקרקע ע"י שטיפתה בתמיסות פולימרים ללא ייבושה לפני בו הגשמים הוא לא יעיל בשמירת המוליכות ההידראולית של הקרקע עם שטיפתה במי הגשם.

ערכי מוליכות ההידראולית ברוויה של קרקע ורטיסול משריד כתלות בנפח התשטיף המצטבר במהלך שטיפתה במים מזוקקים (חיקוי למי גשם) לאחר שנשטפה במי ברז או בתמיסת PAM בריכוז 100 מ"ג/ליטר ובנפח של 2, 3 ו-4 נפחי נקבובים, יובשה ונארזה שוב בעומדות, מובאים באיור 6. ערכי המוליכות ההידראולית של הקרקע לאחר שטיפתה במי ברז ירדו עם שטיפתה במים מזוקקים (איור 6), כאשר ירידה זו נבעה מירידה בערכי ה-EC בתמיסת הקרקע (תוצאות לא מוצגות), שגרמה לתפיחת הקרקע ולדיספרסיה של החרסית ולהצרה ואטימה של חלק מנקבובי הקרקע המוליכים. ערכי המוליכות ההידראולית של הקרקע לאחר שטיפתה בתמיסת ה-PAM בנפחים שונים היו גבוהים יותר מאשר לאחר שטיפתה במי ברז (איור 6).

ערכי הצמיגות היחסית של התשטיף עם שטיפת הקרקע במים מזוקקים לאחר שטיפתה בתמיסות ה-PAM וייבושה היו 1. דבר המורה על כך, שייבוש הקרקע גרם לספיחה בלתי הפיכה של מולקולות ה-PAM לקרקע.

ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה של הקרקע משריד כתלות בנפח התשטיף המצטבר במהלך שטיפתה בתמיסת מלח ובמים מזוקקים לאחר שנשטפה במי ברז (control) או בתמיסת P-101 בריכוז 1,000 מ"ג/ל' ובנפח של 1 ו-2 נפחי נקבובים ובריכוז 5,000 מ"ג/ל' ובנפח של 1 נפחי נקבובים, יובשה ואריזתה בעומדות, מובאים באיור 7. השינויים בערכי ה-EC במי התשטיף במהלך שטיפת עמודות הקרקע כפי שתואר באיור 7 לא מוצגים. הערכים הממוצעים של המוליכות ההידראולית ברוויה של הקרקע בשטיפתה בתמיסת מלח לאחר שטיפתה מוקדמת שלה במי ברז (טיפול ביקרות) בנפח של 1 או 2 נפחי נקבובים היו 233 ו-320 מ"מ/ל', בהתאמה. ערכים אלו ירדו ל-181 ו-264 מ"מ/שעה, בהתאמה, בגמר שטיפת הקרקע במים מזוקקים

(איור 7). במהלך שטיפת הקרקע בטיפול הביקורת בתמיסת מלח, ריכוזי האלקטרוליטים במי התשטיפ (ריכוזים התאומים את ריכוזי האלקטרוליטים בתמיסת הקרקע) היו גבוהים ונעו בין 6.5 ל- 5.0 dS/m. ריכוזים גבוהים אלו של האלקטרוליטים מנעו את הדיספרסיה של החרסית והפחיתו את תפחת הקרקע. שטיפת הקרקע בטיפול הביקורת במים מזוקקים הקטינו את ריכוז האלקטרוליטים לערכים נמוכים ומתחת לערכי הפלוקולציה של הקרקע. במקרה זה, הפחיתה במוליכות ההידראולית של הקרקע נבעה בעיקר מהגברת התפחה והדיספרסיה של החרסית שאטמו חלק מנקבובי הקרקע המוליכים. שטיפת הקרקע בתמיסת P-101 בריכוז 1,000 מ"ג/ליטר ובנפח של 1 או 2 נפחי נקבובים לא שינו באופן מובהק את ערכי המוליכות ההידראולית בהשוואה לטיפול הביקורת (איורים 7a ו-7b). מכאן, שתוספת הפולימר P-101 לקרקע במקרה זה לא הספיקה לייצב את מבנה הקרקע עם שטיפתה במים מזוקקים. לעומת זאת, שטיפת הקרקע בתמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/ליטר ובנפח של 1 נפחי נקבובים הגדילה באופן מובהק את ערכי המוליכות ההידראולית ל- 650 מ"מ/שעה בשטיפת הקרקע בתמיסת מלח ול- 600 מ"מ/שעה בשטיפת הקרקע במים מזוקקים (איור 7c), כאשר שינוי בערכי ה- EC בתשטיפ במהלך שטיפת הקרקע בתמיסת מלח ומים מזוקקים בטיפול הבקורות וה- P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/ליטר היו דומים. תוספת הפולימר בריכוז 5,000 מ"ג/ליטר ובנפח של 1 נפחי נקבובים הספיקה כנראה לייצב את מבנה הקרקע ולשמור על ערכי מוליכות ההידראולית גבוהים. ערכי הצמיגות היחסית של התשטיפ עם שטיפת הקרקע במים מזוקקים לאחר שטיפתה בתמיסת ה- P-101 השונות וייבושה היו 1. דבר המורה על כך, שהייבוש גורם לספיחה בלתי הפיכה של מולקולות ה- P-101 לקרקע. מנגנון ההשפעה של תמיסת הפולימר P-101 לאחר תהליך ייבוש על ייצוב מבנה הקרקע, וע"י כך שמירה על ערכי מוליכות ההידראולית גבוהים, ידון בהמשך.

על מנת לבחון את השפעת שטיפת הקרקע בתמיסת P-101 לאחר ייבושה על המוליכות ההידראולית שלה בעומקים שונים, שלוש עמודות קרקע הונחו אחת מתחת לשנייה, כאשר מי ברז או תמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/ליטר ובנפחים שונים טופטפו בראש העמודה העליונה, כאשר התשטיפ מהעמודה העליונה טפטף לראש העמודה האמצעית ומעמודה זו לראש העמודה התחתונה. לאחר ייבוש הקרקע בשלושת העמודות השונות, הקרקע היבשה מכל עמודה נארזה שוב בעמודה נפרדת והמוליכות ההידראולית שלה נקבעה במהלך שטיפתה בתמיסת מלח ובאופן רציף במים מזוקקים. ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה בתשטיפ של הקרקע בעמודה העליונה, האמצעית והתחתונה בעמודות העוקבות כתלות בנפח התשטיפ המצטבר במהלך שטיפתם בתמיסת מלח (SW) ולאחר מכן במים מזוקקים (DW), עבור שטיפה מוקדמת של הקרקע במי ברז (Control) או תמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/ליטר (Polymer), מובאים עבור נפח שטיפה של 1 נפחי נקבובים באיור 8, עבור נפח שטיפה של 2 נפחי נקבובים באיור 9, עבור נפח שטיפה של 3 נפחי נקבובים באיור 10. בכל טיפולי השטיפה המתוארים באיורים 8, 9 ו- 10 ושטיפה ב- 4 נפחי נקבובים (תוצאות לא מוצגות), במהלך שטיפת הקרקע בתמיסת מלח, ערכי ה- EC במי התשטיפ היו גבוהים, כאשר שטיפת הקרקעות במים מזוקקים הורידו את ערכי ה- EC לערכים נמוכים ומתחת לערכי הפלוקולציה של הקרקע (תוצאות לא מוצגות). לא נמצאו הבדלים מובהקים בשינוי בערכי ה- EC עם שטיפת הקרקע בתמיסת מלח ולאחר מכן במים מזוקקים בין טיפולי הפולימרים השונים והביקורת (תוצאות לא מוצגות). שטיפת הקרקע

בתמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/ל' בנפח נקבובים אחד העלתה באופן מובהק את ערכי המוליכות ההידראולית לעומת הביקורת בעמודת הקרקע העליונה עם שטיפת בתמיסת מלח ומים מזוקקים (איור 8a). לעומת זאת, הבדלים אלו בערכי המוליכות ההידראולית בין טיפול הפולימר והביקורת בעמודה המרכזית והתחתונה היו קטנים ובמקרים מסוימים לא מובהקים (איורים 8b ו-8c). כנראה, בשטיפת קרקע כבדה בתמיסת פולימר בריכוז של 5,000 מ"ג/ל' ובנפח נקבובים אחד, מרבית מולקולות הפולימר נספחות בשכבת הקרקע העליונה (7-0 ס"מ), ורק חלק קטן מהן נעות לשכבות קרקע עמוקות יותר ומייצבות את מבנה הקרקע בשכבות אלו. שטיפת הקרקע בתמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/ל' ובנפח של 2, 3 או 4 נפחי נקבובים העלתה את ערכי המוליכות ההידראולית באופן מובהק בשלושת עמודות הקרקע העוקבות בהשוואה לטיפול הבקורות, כאשר לא נמצאו הבדלים משמעותיים בהשפעת השטיפה של תמיסת הפולימר בהעלאת המוליכות ההידראולית לעומת הביקורת בין נפחי השטיפה השונים (איורים 9, 10 ולגבי 4 נפחי נקבובים התוצאות לא מוצגות). מכאן, שטיפת קרקע חרסיתית בתמיסה של 5,000 מ"ג/ל' P-101 בנפח של 2 נפחי נקבובים מספיקה כדי לשמור על ערכי מוליכות הידראולית גבוהה בשכבת קרקע בעובי <math>21</math> ס"מ עם שטיפתה במים מזוקקים, כאשר הקרקע מייבשת לאחר שטיפתה בתמיסת הפולימר.

על מנת לקבוע את מנגנון השפעה של הפולימרים עם שטיפתם בקרקע ולאחר מכן ייבשם על יציבות מבנה הקרקע, נלקחו דגימות מהעמודה העליונה, האמצעית והתחתונה, שנשטפו במי ברוז ב- 5,000 מ"ג/ל' P-101 בנפח של שלושה נפחי נקבובים ולאחר מכן הקרקע בעמודות ייבשה ליובש אוויר (טיפול פולימר). בדגימות אלו ובדגימות קרקע שנשטפה במי ברוז בנפח של 3 נפחי נקבובים ולאחר מכן יובשה ליובש אוויר (טיפול ביקורת) נקבעו ערכי המיגוג והדיספרסיה, כאשר במדידת ערכי התפיחה הייתה בעיה טכנית, ולכן אינם מוצגים. ערכי ה- MWD בהרטבה מהירה ואיטית של דגימות קרקע בטיפול הביקורת ודגימות קרקע מהעמודה העליונה, המרכזית והתחתונה בטיפול הפולימר כפי שחושבו מנוסחה [1] וערכי המיגוג (SLV) שלהם כפי שחושבו מנוסחה [2] מובאים באיור 11. ככל שערך ה- SLV גדול יותר מערך 1, השפעת כוחות המיגוג בהרס תלכידים היא רבה יותר. ערך המיגוג הגבוה בטיפול הביקורת (14.9) מורה על רגישות רבה של הקרקע בטיפול הביקורת להרס תלכידים כתוצאה מהרטבה מהירה שלהם. לעומת זאת, ערכי המיגוג הנמוכים (>3.1) בקרקעות בטיפול הפולימר מורה על כך, ששטיפת הקרקעות בתמיסת הפולימר וייבושה גרמה לייצוב משמעותי של מבנה הקרקע בעמודה העליונה, האמצעית והתחתונה כנגד כוחות המיגוג. ערכי המיגוג בטיפול הפולימר בשלושת העמודות העוקבות היו בסדר יורד, עמודה עליונה > עמודה אמצעית > עמודה תחתונה. מכאן, ניתן להסיק שהשפעת שטיפת הקרקע בתמיסת הפולימר פוחתת עם עומק הקרקע. ייבוש הקרקע לאחר שטיפתה בתמיסת הפולימר P-101 גרמה כנראה להתקרבות בין חלקיקי הקרקע לבין עצמם ובין הקבוצות הפונקציונאליות במולקולות הפולימר וחלקיקי הקרקע. כתוצאה מכך יש עלייה בקשירה של מספר חלקיקי קרקע בתלכיד ע"י מולקולה אחת של פולימר, וע"י כך ייצוב המבנה של התלכיד כנגד כוחות המיגוג עם הרטבתו גדל.

ערכי הדיספרסיה של דגימות הקרקע בטיפול הביקורת ודגימות הקרקע מהעמודה העליונה, המרכזית והתחתונה בטיפול הפולימר כפי שחושבו מנוסחה [4] מובאים בטבלה 4. ערך הדיספרסיה הממוצע של הקרקע בטיפול הביקורת היה 2.3, כאשר ערך זה בטיפול הפולימר בעמודה העליונה היה 0.6 (טבלה 4). מכאן,

ששטיפת הקרקע בתמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/ל' ובנפח של 3 נפחי נקבובים מנע את הדיספרסיה של החרסית בקרקע. לעומת זאת, ערכי הדיספרסיה של דגימות הקרקע בטיפול הפולימר בעמודה המרכזית והתחתונה היו 2.8 ו- 3.3, בהתאמה; ערכים אלו דומים לערכי הדיספרסיה בטיפול הביקורת (טבלה 4). כנראה, הספיחה הקטנה יותר של מולקולות הפולימר בעמודה המרכזית והתחתונה לעומת ספיחתם בעמודה העליונה, לא הספיקה למנוע את הדיספרסיה של החרסית בקרקע בעמודות התחתונות יותר.

**טבלה 1: תכונות פיסיקאליות וכימיות של הקרקעות שנדגמו מחלקות שהושקו במים שפירים או בקולחים**

קרקע	אנליזה מכאנית			תכולת גיר	תכולת חומר אורגני		אחוז נתרן ספוח קולחים
	חרסית	סילט	חול		שפירים	קולחים	
----- % -----							
חמרה מרמת הכובש	12	5	83	3~	2.1a*	2.4a	1.5b
לס מבקעת ערד	30	28	42	25.8	1.4a	1.5a	11.0b
ורטיסול ממזרע	68	17	15	17.1	4.0a	4.2a	1.7b
ורטיסול משריד	62	30	8	6.6	†ל.ג	3.9	ל.ג

\*אותיות שונות בקרקע ובתכונה נתונה מורות על הבדלים מובהקים ברמת 5% בין קרקע שהשקתה במים שפירים לקרקע שהושקתה בקולחים. †ל.ג. – לא נקבע

**טבלה 2: תכונות כלליות של הקולחים ממכוני טיפול שונים ששימשו להשקיית הקרקעות שנלמדו**

מכון טיפול בקולחים	pH	מוליכות חשמלית	מנת ספיחת הנתרן	חומר אורגני מסיס
		----- dS/m -----	(meq/L) <sup>0.5</sup>	----- מ"ג/ליטר -----
קיבוץ רמת הכובש	7.5 (0.3)*	1.8 (0.4)	3.8 (0.4)	138.2 (67)
קיבוץ מזרע	7.8 (0.2)	2.0 (0.27)	4.3 (0.51)	182.5 (74)
העיר ערד	7.7 (0.2)	2.0 (0.2)	6.0 (1.2)	266.9 (121.4)
מאגר גניגר	8.5	2.0	5.3	39

\*המספרים בסוגריים מציינים סטיית תקן

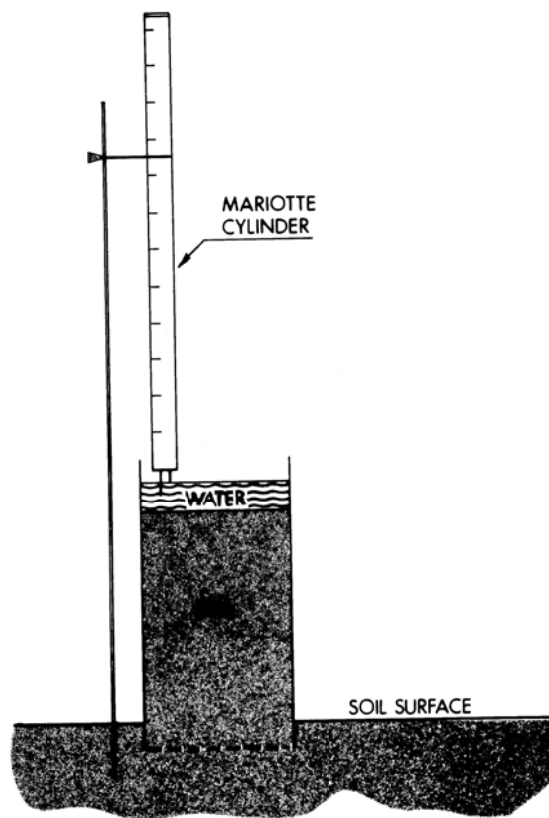
**טבלה 3: תכונות כלליות של הפולימרים שנבחנו בעבודה וערכי הצמיגות היחסית של תמיסות שלהם בריכוזים שונים**

פולימר	משקל מולקולרי	סוג מטען	צפיפות מטען	צמיגות יחסית של תמיסות בריכוזים שונים				
				5,000	1,000	500	300	100
מ"ג/ל'								
	דלטון		%					
פוליאקרילמאיד (PAM)	1x10 <sup>7</sup>	שלילי	15	1.24	2.2	3.07	ל.ג*	ל.ג
P-101	1x10 <sup>5</sup> -2x10 <sup>5</sup>	חסר מטען	<2	~1.0	~1.0	ל.ג	1.19	1.87

\* ל.ג. – לא נקבע

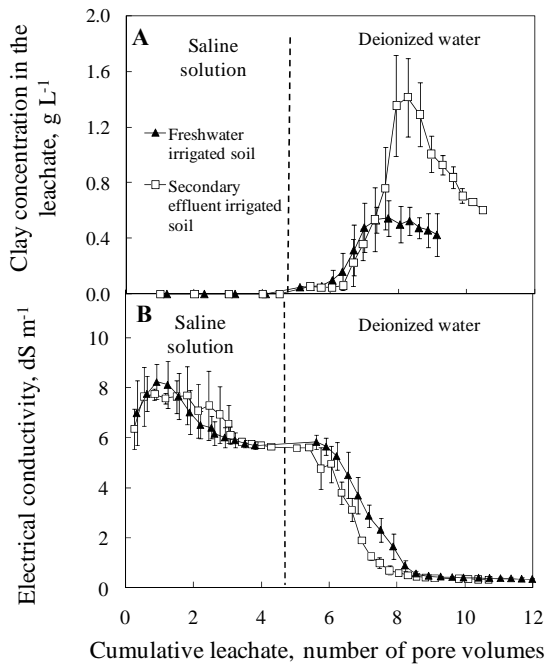
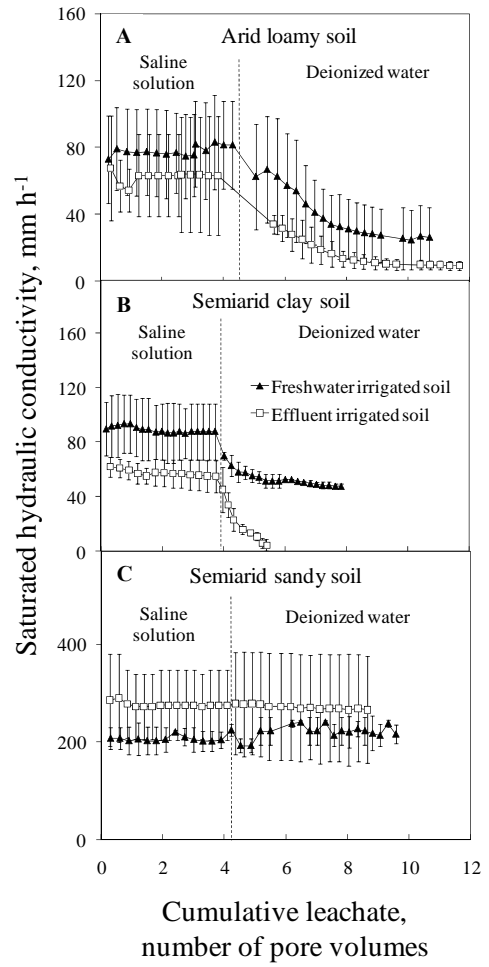
טבלה 4: ערכי הדיספרסיה (DV) והמוליכות החשמלית בתמיסת התרחיף של הקרקע לאחר טיפולים שונים

שגיאת תקן	מוליכות חשמלית	שגיאת תקן	DV	טיפול
	dS/m		%	
0.001	0.14	0.09	2.4	ביקורת
0.001	0.09	0.18	0.6	פולימר – עמודה עליונה
0.001	0.11	0.08	2.8	פולימר – עמודה אמצעית
0.001	0.11	0.08	3.3	פולימר – עמודה תחתונה

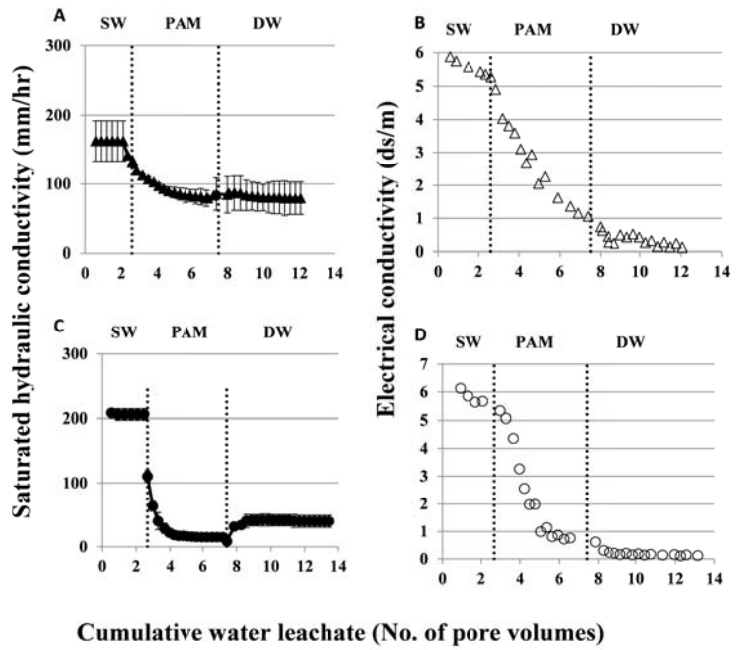


איור 1: תיאור סכמטי של המערכת הניסויית של הקרקע במכלים

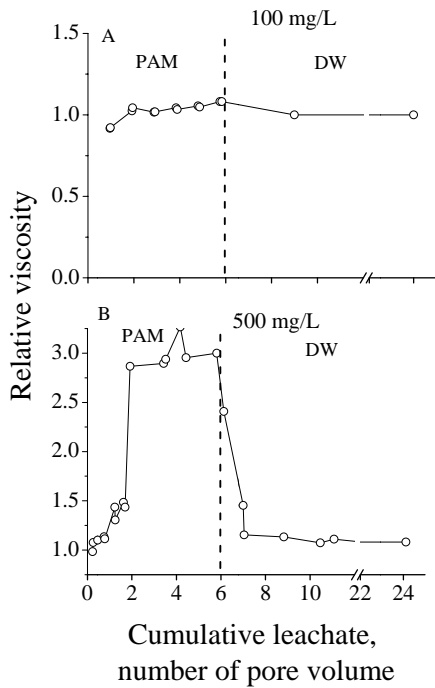
**איור 1:** ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה של הקרקעות, לס (sandy soil) וחמרה (clay soil) (loamy soil), ורטיסול (sandy soil) שהושקו בעבר במים שפירים (fresh water) או בקולחים (effluent) כתלות בנפח התשטוף המצטבר במהלך שטיפתם בתמיסת מלח (salin solution) ולאחר מכן במים מזוקקים (deionized water). הקווים האנכים מייצגים ערכים של שני סטיות תקן.



**איור 2:** ריכוז חרסית וערכי מוליכות חשמלית בתשטוף של קרקע לס שהושקתה בעבר במים שפירים או בקולחים שניוניים כתלות בנפח התשטוף המצטבר במהלך שטיפתה בתמיסת מלח (salin solution) ולאחר מכן במים מזוקקים (deionized water). הקווים האנכים מייצגים ערכים של שני סטיות תקן.



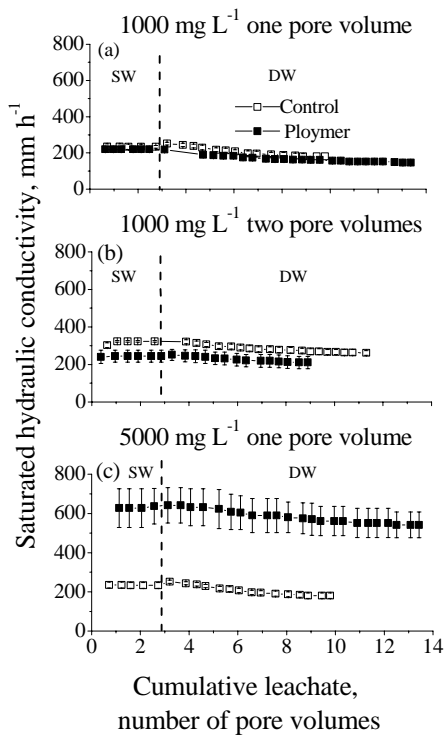
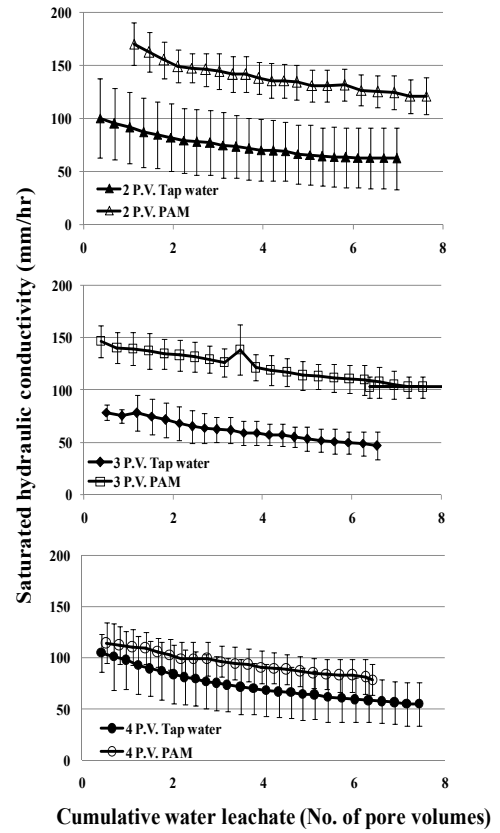
איור 3 : ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה והחשמלית בתשטוף של קרקע ורטיסול מקיבוץ שריד שהושקתה בעבר בקולחים במהלך שטיפתה בתמיסת מלח (SW), לאחר מכן בתמיסות עם ריכוזי PAM של 100 (A ו- B) או 500 מ"ג/לי (C ו- D) ולבסוף במים מזוקקים (SW) כתלות בנפח התשטוף המצטבר. הקווים האנכיים מייצגים ערכים של שני סטיות תקן



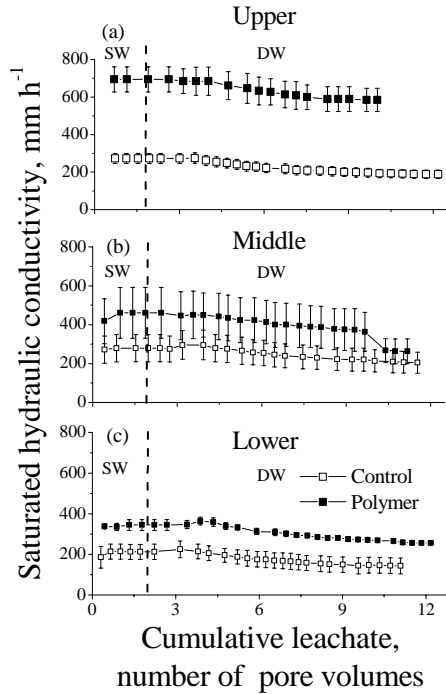
איור 4 : צמיגות יחסית של התשטוף בקרקע ורטיסול שנשטפה באופן רציף בתמיסת PAM בריכוז 100 או (A) ו- 500 מ"ג/לי (B) ולאחר מכן במים מזוקקים (DW) כתלות בנפח התשטוף.



**איור 5:** ערכי מוליכות ההידראולית ברוויה של קרקע ורטיסול משריד במהלך שטיפתה במים מזוקקים לאחר שנשטפה במי ברז (Tap water) או בתמיסת PAM בריכוז 100 מ"ג/ליטר בנפחי נקבובים (P.V.) של 2, 3 ו-4 יובשה, ונארזה מחדש בעומדות, כתלות בנפח התשטיף המצטבר. הקווים האנכים מייצגים ערכים של שני סטיות תקן.

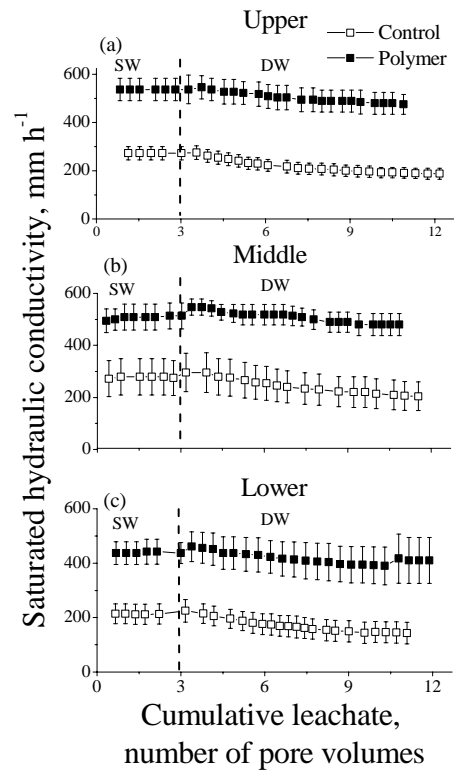


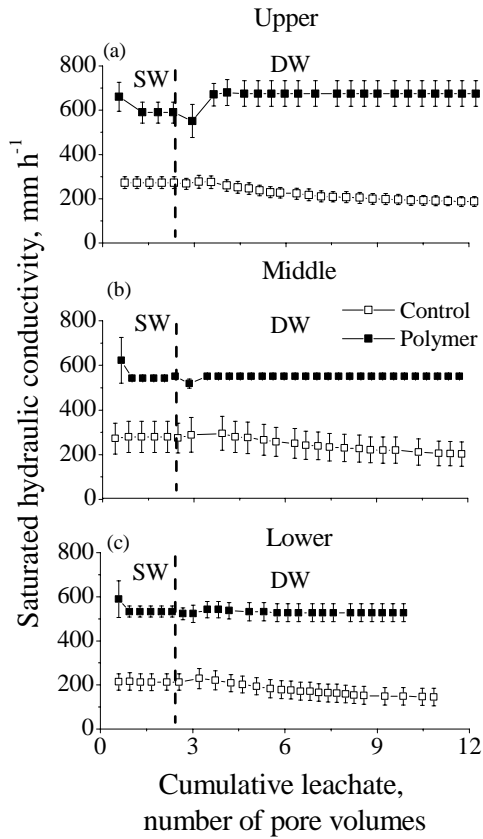
**איור 6:** ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה של ורטיסול משריד כתלות בנפח התשטיף המצטבר במהלך שטיפתה בתמיסת מלח ובמים מזוקקים לאחר שנשטפה במי ברז (control) או בתמיסות P-101 בריכוז 1,000 מ"ג/לי' ובנפח של 1 ו-2 נפחי נקבובים ובריכוז 5,000 מ"ג/לי' ובנפח של 1 נפחי נקבובים (polymer), יובשה ונארזה מחדש בעומדות.



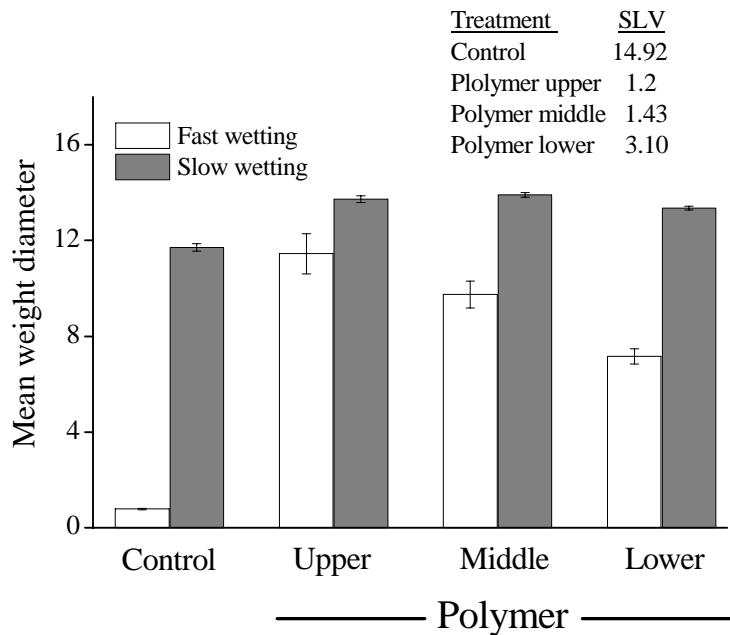
**איור 8:** ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה של ורטיסול משריד בעמודה העליונה (upper), האמצעית (middle) והתחתונה (lower) בעמודות העוקבות כתלות בנפח התשטיפ המצטבר במהלך שטיפתם בתמיסת מלח (SW) ולאחר מכן במים מזוקקים (DW), עבור שטיפה מוקדמת של הקרקע במי ברז (Control) או תמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/לי ונפח שטיפה של 1 נפחי נקבובים (Polymer).

**איור 9:** ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה של ורטיסול משריד בעמודה העליונה (upper), האמצעית (middle) והתחתונה (lower) בעמודות העוקבות כתלות בנפח התשטיפ המצטבר במהלך שטיפתם בתמיסת מלח (SW) ולאחר מכן במים מזוקקים (DW), עבור שטיפה מוקדמת של הקרקע במי ברז (Control) או תמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/לי ונפח שטיפה של 2 נפחי נקבובים (Polymer).





**איור 10:** ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה של ורטיסול משריד בעמודה העליונה (upper), האמצעית (middle) והתחתונה (lower) בעמודות העוקבות בתלות בנפח התשטוף המצטבר במהלך שטיפתם בתמיסת מלח (SW) ולאחר מכן במים מזוקקים (DW), עבור שטיפה מוקדמת של הקרקע במי ברו (Control) או תמיסת P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/לי ונפח שטיפה של 3 נפחי נקבובים (Polymer).



**איור 11:** ערכי ה-MWD בהרטבה מהירה ואיטית של דגימות קרקע בטיפול הביקורת (control) ודגימות מהעמודה העליונה (upper), המרכזית (middle) והתחתונה (lower) בטיפול הפולימר (polymer) וערכי המיגוג (SLV) שלהם.

**סיכום עם שאלות מנחות**

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

<b>מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.</b>
המטרה העיקרית של המחקר הייתה לבחון שימוש בפולימרים סינטטיים במניעת הרס מבנה הקרקע ואת הפחיתה במוליכות ההידראולית בקרקעות המושקות בקולחים.
<b>עיקרי התוצאות.</b>
המוליכות ההידראולית בקרקעות עם מרקם בינוני וכבד ירדה באופן חד עם שטיפתם במים מזוקקים, כאשר ירידה זו הייתה רבה יותר בקרקע שהושקתה בקולחים מאשר במים שפירים. תופעה זו לא הובחנה בחמרה טיפוסית של תמיסות פולימר P-101 בריכוז 5,000 מ"ג/ל' ובנפח של 2 נפחי נקבובים או יותר ולאחר מכן ייבוש הקרקע שמרה על מוליכות הידראולית גבוהה עם שטיפת הקרקע במים מזוקקים.
<b>מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדו"ח? לא כולם.</b>
1. ניסויי במכלים ובשדה נמצא שהוספת תמיסות פולימר PAM בריכוזים <100 מ"ג/ל' לקרקע עם מי ההשקיה. בטיפוסים אינה יישמה עקב הצמיגות הגבוהה של תמיסות הפולימר שגרמה לירידה חדה במוליכות ההידראולית של הקרקע ושיבוש בהזרקה הפולימר למערכת ההשקיה וליציאת מים מהטפטפות במהלך יישום הפולימר.
2. על פי ניסויי מעבדה נמצא שהוספת תמיסת P-101 בריכוז >5,000 מ"ג/ל' עם מי ההשקיה יישמה עקב הצמיגות הנמוכה יחסית של תמיסות שלו.
3. הפתרון של שימוש ב-P-101 כמייצב מבנה קרקע נמצא בניסויי מעבדה רק בשנה השלישית של המחקר, ולכן לא הספקנו לבחון את יישום פולימר זה בתנאי שדה.
<b>בעיות שנתרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר</b>
יישום הפולימרים בתנאי שדה הוא בעייתי ודורש פיתוח טכנולוגיות להזרקה תמיסות פולימר בצמיגות גבוהה יחסית למערכות ההשקיה בטפטוף. למרות שלבעיה זו נמצא פתרון בפולימר P-101 בניסויי מעבדה, נושא זה דורש ממחקר נוסף בתנאי שדה. לצערי לא הגשנו הצעת המשך למחקר עקב ביטול מו"פ קולחים, ולא מצאנו אכסניה אחרת להגשת המשך למחקר.
<b>הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב - ציטט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי; פטנטים - יש לציין שם ומס' פטנט; הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.</b>
Lado, M. and Ben-Hur, M. (2010). Effects of irrigation with different effluents on saturated hydraulic conductivity of arid and semiarid soils. <i>Soil Sci. Soc. Am. J.</i> 74:23-32.
פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)
<ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)