

דו"ח מסכם לתכנית מחקר מספר 304-0368-09

השפעת השימוש בקולחים על תכונות ההולכה של הקרקע

ועל תנועת מזהמים באזור הלא רווי

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י דוד רוסו ואשר לאופר

המכון למדעי הקרקע המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי

,

David Russo	Soil, Water and Environmental Sciences, A.R.O., P.O.B. 6, Bet Dagan 50250, E-mail: vwrosd@agri.gov.il
Asher Laufer	Soil, Water and Environmental Sciences, A.R.O., P.O.B. 6, Bet Dagan 50250, E-mail: vwashr@agri.gov.il

דצמבר 2010

תוצאות המחקר אינן מהוות המלצה לחקלאים

תקציר

בעיית המחקר – השקיה בקולחים משפיעה על ההרכב הכימי של תמיסת הקרקע ועל הרכב הקומפלקס הסופח של הקרקע. תופעות אלה עשויות להשפיע על תכונות ההולכה של הקרקע ועל ההסעה והפיזור של מומסים באזור הלא-רווי, וכתוצאה מכך על זיהום הקרקע ומקורות מים עיליים ותת-קרקעיים. על מנת להעריך את ההשפעה של השימוש ארוך הטווח בקולחים על כושר הקרקע להוליך מים ומומסים ועל סכנת הזיהום של הקרקע ומקורות מים, יש צורך לפתח מודל פיסיקלי של זרימת מים ותנועת מומסים המתחשב במנגנונים העיקריים המשפיעים על הזרימה והתנועה. באמצעות מודל מחשבתי זה ניתן יהיה לדמות את תגובת מערכת הזרימה לתרחישים מציאותיים.

מטרות המחקר – 1. לפתח מודל פיסיקלי של זרימת מים ותנועת מומסים בקרקע רווי/בלתי רווי המתחשב בתהליכים של חילוף יונים ושינויים בפירוס גודל נקבובי הקרקע; 2. לנתח תנועה של קולחים במערכת זרימה מציאותית (תלת-מימדית, הטרוגנית, רוויה/לא-רוויה) תוך התחשבות בהשפעה של האינטראקציה בין תמיסת הקרקע לבין מטריצת הקרקע על תנועת המים והמומסים; 3. להעריך את ההשפעה ארוכת הטווח של שימוש בקולחים על תכונות הקרקע ועל כושרה להוליך מים ומומסים באמצעות הדמיה של תגובת מערכת הזרימה לתרחישים מציאותיים.

חומרים ושיטות – הניתוח של תנועה ופיזור של מומסים בקרקע בסקלת השדה, בתנאים של השקיה בקולחים ו/או גשם, נעשה ע"י שילוב של מודל פיסיקלי (מחשבתי) של זרימת מים ותנועת מומסים עם גישות סטוכסטיות לתיאור כמותי של השונות המרחבית בתכונות הקרקע הפיסיקליות והכימיות. מודל הזרימה והתנועה התלת-מימדי התבסס על משוואת ריצ'רדס ועל משוואת הקונבקציה-דיספרסיה. המודל מתחשב בתהליכי חילוף יונים, ובשינויים בתכונות ההידראוליות של הקרקע כתוצאה משינויים בהרכב וריכוז תמיסת הקרקע. בנייתו נלקחו בחשבון התכונות הכימיות והפיסיקליות של הקרקע והשתנתן במרחב, שיטת ההשקיה (טפטוף), משטר ההשקיה, איכות הקולחים, נתונים מטאורולוגיים (גשם, התאדות), וקליטת מים ע"י שורשי צמחים.

תוצאות – תוצאות ההדמיה של זרימת מים ותנועת מומסים בהשקיה בטפטוף במשך חמש שנים עוקבות, מראות שבמהלך השנים תקופות ההשקיה מאופיינות ע"י ירידה מתונה יחסית של המוליכות ההידרולית של הקרקע הנובעת מהפיצוי (עקב העלייה בריכוז המלחים בתמיסת הקרקע) להשפעה השלילית של הגדלת מנת ספיחת הנתרן בקרקע על המוליכות ההידרולית של הקרקע. לעומת זאת, בתקופות הגשמים, הצירוף של חתך קרקע שטוף ביחד עם מנת ספיחת נתרן משמעותית גורם לירידה ניכרת במוליכות ההידרולית של הקרקע בשכבת קרקע שעובייה גדל עם השנים. ההשפעה המשולבת של עונות ההשקיה והגשם באה לידי ביטוי בהקטנה איטית אך מתמשכת של כושר הקרקע להוליך מים ומומסים.

מסקנות – הגברת האינטראקציה בין תמיסת הקרקע לבין מטריצת הקרקע עקב הגדלת מקטע הנתרן בתמיסת הקרקע כתוצאה מהשקיה בקולחים מקטינה את יכולת הקרקע להוליך מים ומומסים. עקב צורת איזותרמת החילוף נתרן/סידן וההשפעות המנוגדות של תקופות ההשקיה והגשמים, התהליך איטי אך עקבי.

מבוא

הקולחים, גם לאחר רמת הטיפול המאפשרת הפנייה לשימוש חקלאי, עדיין מכילים מומסים רבים היכולים להשפיע על תכונות הקרקע, ולהוות פוטנציאל לזיהום הקרקע ומקורות המים באזורי היישוב שלהם. פוטנציאל זיהום הקרקע ע"י קולחים עלול להתמש בשכבת העיבוד ובתווך הלא-רווי עד למי התהום. נזקים אפשריים לקרקע כתוצאה משימוש בקולחים כוללים העלאת אחוז הנתרן הנספח בקרקע, הרס מבנה הקרקע, שינוי בתכונות ההולכה והתאחיזה של הקרקע, הגדלת ההידרופוביות של הקרקע ושינוי מסלולי הזרימה. מקורות המים העלולים להזדהם כתוצאה משימוש בקולחים כוללים את מקורות המים העיליים הקולטים את הנגר העילי והניקוז משדות חקלאיים, ומקורות מים תת-קרקעיים (מי תהום) המושפעים מאיכות המים והקרקע באזורי ההעשרה הטבעיים.

שימוש בטוח לאורך זמן של קולחים מטופלים מחייב הערכה של השפעתם על תכונות הקרקע, ושל ההשפעות הסביבתיות כתוצאה מזיהום הקרקע ומקורות המים. מספר רב של עבודות מחקר בחנו היבטים שונים של השימוש בקולחים להשקיה. בעבודת המחקר הנוכחית, אנו מציעים להתמקד בשני נושאים עיקריים: (א) ההשפעה של השימוש בקולחים על תכונות ההולכה של הקרקע וזיהוי הגורמים הקובעים את מידת רגישותה של הקרקע לשימוש בקולחים; (ב) ההשלכות הסביבתיות של השימוש בקולחים להשקיה - זיהום הקרקע באזור הלא-רווי וזיהום מי התהום כתוצאה מחלחול וניקוז משדות חקלאיים המושקים בקולחים, וזיהום מקורות מים עיליים כתוצאה מנגר משדות חקלאיים המושקים בקולחים.

המטרה העיקרית של המחקר היתה לפתח מודל מחשבתי של זרימת מים ותנועת מומסים בקרקע הטרוגני רווי/בלתי רווי בסקלת השדה, המתחשב באינטראקציה בין הזורם לתווך הנקבובי, על מנת להעריך את ההשפעה ארוכת הטווח של שימוש בקולחים על כושרה של הקרקע להוליך מים ומומסים.

חומרים ושיטות

מודל הזרימה והתנועה התלת-מימדי שפותח בעבודה זו מתבסס על משוואת ריצ'רדס ועל משוואת הקונבקציה-דיספרסיה (בשילוב עם שני אתרי ספיחה, ספיחה בשווי-משקל וספיחה באי-שווי משקל), בהתאמה, בדומה ל-(5) ו-(6). בשלב הראשון של העבודה, בפיתוח המודל נלקחו בחשבון אך ורק תהליכי חילוף/שחרור ושינויים בתכונות ההידרוליות של הקרקע כתוצאה משינויים בהרכב וריכוז תמיסת הקרקע. הגישה שאומצה בעבודה הנוכחית מבוססת על העובדה שבניגוד לצימוד החזק של משוואות התנועה למשוואת הזרימה (עקב התלות במהירות הזרימה), הצימוד של משוואת הזרימה למשוואות התנועה מתון יחסית. כתוצאה מכך, ניתן לפתור את המשוואות באופן סדרתי בשילוב עם מודל לתיאור כמותי של האינטראקציה זורם-קרקע והשפעתה על תכונות ההולכה של הקרקע. בכל צעד זמן, עקב האינטראקציה זורם-קרקע, פתרון משוואות הזרימה והתנועה חייב להיות איטרטיבי.

פתרון משוואת הזרימה התבסס על קירוב של הפרשים סופיים תוך שימוש בסכימת אוילר, אימפליסיטית לחלוטין. התוצאה, מערכת משוואות אלגבריות לא-לינאריות ביחס לעומד הלחץ, נפתרה באופן איטרטיבי באמצעות שיטת פיקרד מתואמת. איטרציות פיקרד (חיצוניות) יושמו לאיבר הקפילרי ולאיבר הגרביטציוני של משוואת הזרימה, והתוצאה, מערכת משוואות אלגבריות לינאריות, נפתרה באמצעות שיטת ה-PPCG.

הסכימה הנומרית ששולבה עם פרוצדורה איטרטיבית לקביעת אזורי איגום בפני הקרקע (הנוצרים בסמוך לטפטפות, או במהלך גשם/המטרה בעוצמות יחסית גבוהות), מתכנסת ויציבה בלתי-מותנית עבור משואת הדיפוסיה הלינארית. מבחנים מוקדמים הראו שהסכימה שפותחה אינה מתנוונת בתנאי זרימה רוויה ומתאימה למקרים בהם עיקר שגיאות הקיטוע הן מרחביות, ולכן, מתאימה לקרקעות הטרוגניות בהם עשויים להתפתח גרדיינטים תלולים של העומד מחד, ואזורים רוויים, מאידך.

פתרון משוואת הקונבקציה-דיספרסיה, התבסס על קירוב של הפרשים סופיים הממוזער דיספרסיה נומרית ומונע תנודות של הפתרון באמצעות קירוב במעלה הזרימה, גמיש (ז.א.), מותאם לגרדיינטים של ריכוזי המומס) ומסדר גבוה של ריכוזי המומס בין שני תאי חישוב סמוכים המעורבים בחישוב של שטפי ההסעה.

פתרון משוואות הזרימה והתנועה, בשילוב עם המודל לתיאור כמותי של האינטראקציה זורם-קרקע והשפעתה על תכונות ההולכה של הקרקע, נעשה באופן סדרתי ובאמצעות איטרציות בכל צעד זמן. במהלך האיטרציות, הפרוס המרחבי של ריכוזי המומסים, הרטיבות ועומדי הלחץ המחושבים עבור צעד הזמן הקודם שימשו לקבלת אומדנים ראשוניים של פרמטרי הזרימה והתנועה עבור צעד הזמן החדש. אומדנים אלה שופרו באופן איטרטיבי עד להשגת הדיוק הנדרש (שנקבע מראש).

תוצאות ודין

בחינה של הסכימה הנומרית

בשלב הראשון של השנה הראשונה של עבודת המחקר, נבחנה יכולת הביצוע (דיוק, יציבות, יעילות) של הסכימה הנומרית התלת-מימדית שפותחה על מנת לפתור את משוואות הזרימה והתנועה עבור המקרה בו משוואת הזרימה מצומדת למשוואות התנועה. הבחינה בוצעה עבור תחום רחב של מספרי פקלה (2-10000) ומספרי קוראנט (0.1-1), תוך שימוש בפתרונות אנליטיים של מקרים מיצגים שפורסמו בספרות. תוצאות הבחינה מראות שהפתרונות שהתקבלו באמצעות הסכימה הנומרית התלת-מימדית שפותחה על ידינו נמצאות בהתאמה טובה מאוד עם פתרונות אנליטיים מדויקים עד למספר פקלה של 50. בנוסף, לא הובחנו תנודות בפתרון אפילו עבור מספר פקלה השואף לאין-סוף, ואילו דיספרסיה נומרית נצפתה אך ורק במספרי פקלה גדולים מאד. מבחנים נוספים שנערכו עבור תחום רחב יחסית של פרמטרי הקלט השונים, הראו שהסכימה הנומרית התלת-מימדית שפותחה על ידינו, מדויקת (במונחים של מאזני מסה) ויעילה (במונחים של מהירות ההתכנסות של הפתרון הנומרי).

השלב השני של עבודת המחקר נועד לבחון את יכולתה של הסכימה הנומרית שפותחה לדמות זרימת מים ותנועת מומסים עבור המקרה בו זרימת המים תלויה בהסעת המומסים באמצעות התלות של התכונות ההידרוליות של הקרקע בריכוזי המומס והרכבו, תוך התחשבות בתנאי התחלה ושפה הרלבנטיים להשקיה בטפטוף, גשם והתאדות, ולהבין את התנהגות המומסים בתנאי שדה ברמה העקרונית. שני שלבים אלה סוכמו בדו"ח המחקר לשנה הראשונה (דצמבר 2008). בשלב האחרון של עבודת המחקר הדגש הוסט להדמיה ארוכת-טווח של תנועת מומסים תוך התחשבות בתהליכי חילוף/שחרור ובשינויים בתכונות ההידרוליות של הקרקע כתוצאה משינויים בהרכב וריכוז תמיסת

הקרקה. תוצאות הדמיה זו יסייעו להעריך את ההשפעה ארוכת הטווח של שימוש בקולחים על כושרה של הקרקע להוליד מים ומומסים.

ההשפעה ארוכת הטווח של שימוש בקולחים על כושרה של הקרקע להוליד מים ומומסים:

ההשפעה ארוכת הטווח של שימוש בקולחים על כושרה של הקרקע להוליד מים ומומסים נבחנה ע"י הדמיה של זרימת מים ותנועת מומסים במהלך חמש שנים עוקבות תוך התחשבות בתנאי התחלה ושפה הרלבנטיים להשקיה (טפטוף עילי), גשם והתאדות. ההדמיה של זרימת מים, תנועה של תמיסת נתרן/סידן כלורי, ותנועת נותב בקרקע הטרוגנית לא-רוויה בוצעה עבור המקרה בו זרימת המים תלויה בהסעת המומסים באמצעות התלות של התכונות ההידרוליות של הקרקע בריכוזי המומס והרכבו. בהדמיה נלקחו בחשבון תרחישים מציאותיים של ממשקי השקיה, התאדות פוטנציאלית, גשם וקליטת מים ע"י שורשי צמחים.

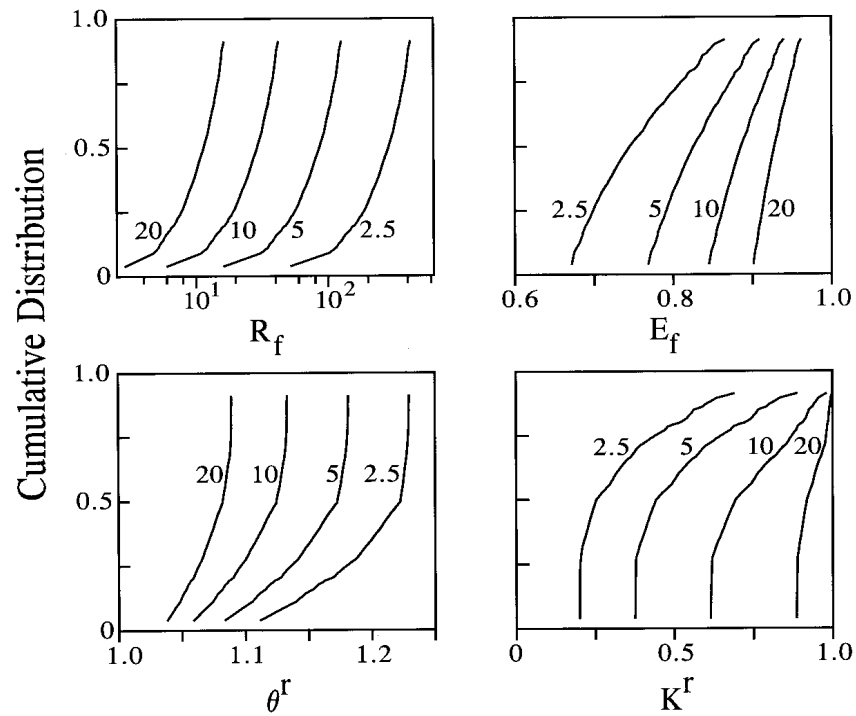
ההדמיה התמקדה בפרדס עם מרווח של 6 מ' בין שורות העצים (2 שלוחות טפטוף לכל שורת עצים במרווח של 0.60 מ') הנטוע בקרקע חרסיתית עם פרוס מרחבי זהה לזה שנמדד ע"י (3) ו-(4). נלקחו בחשבון תנאים אקלימיים השוררים במרכז הארץ. עקב העומס החישובי הכרוך בהדמיה תלת-מימדית במשך פרק זמן ארוך יחסית (5 שנים) בוצעה הדמיה דו-מימדית של זרימת המים ותנועת המומסים במישור האנכי (XZ). עבור מערכת צירים קרטזית (x,y,z), עם שורת עצים הממוקמת במקביל לציר y, שלוחות הטפטוף ניתנות לתיאור כרצועות אופקיות אין-סופיות הממוקמות במקביל לציר y שרוחבן תלוי בספיקת הטפטפת ובתכונות ההידרוליות של הקרקע. עבור מקרה זה זרימת המים (משואת ריצ'רדס) ותנועת המומסים (משואת ההסעה-דיספרסיה) ניתנות לתיאור דו-מימדי במישור האנכי XZ. הנחות מפשטות נוספות שאומצו במחקר הנוכחי הן: 1. התכונות ההידרוליות של הקרקע בסקלה המקומית ניתנות לתיאור ע"י הביטויים של (7), 2. פונקציית צפיפות השורשים ניתנת ע"י הביטוי של (1) ו-3. איבר מבלע-השורשים במשוואת ריצ'רדס ניתן ע"י הביטוי של (2) עם השפעה אדיטיבית של עקת המים ועקת המלח על קליטת המים.

בוצעה הדמיה של זרימת מים ותנועת מומסים במערכת זרימה דו-מימדית אנכית (רוחב 5 מ', עומק 3 מ'), הכוללת שורת עצים אחת ושתי שלוחות טפטוף במשך חמש שנים עוקבות. בכל אחת מהשנים, עונת ההשקיה החלה בראשון לאפריל ונמשכה 240 ימים. ספיקת הטפטפת ליחידת אורך הייתה $750 \text{ ס"מ}^2/\text{שעה}$, ההשקיה בוצעה כל יומיים, ומשך ההשקיה השתנה עם העונה בהתאמה לשינויים העונתיים בהתאדות הפוטנציאלית. סה"כ כמויות המים העונתיות שנלקחו בחשבון בהדמיות היו 900 מ"מ השקיה, 480 מ"מ גשם ו-980 מ"מ התאדות פוטנציאלית. ריכוזי היונים במי ההשקיה היו: 10, 7 ו-3 מא"ק/ל עבור כלוריד, נתרן וסידן בהתאמה. ריכוזי היונים במי הגשם היו: 1.5, 0.4 ו-1.1 מא"ק/ל עבור כלוריד, נתרן וסידן בהתאמה. פרמטרים קרקעיים שנלקחו בחשבון בהדמיה נתונים בטבלה 1.

מקדם השתנות	ממוצע	פרמטר
0.675	0.2606	K_s (md^{-1})
0.439	0.9807	α (m^{-1})
0.162	1.4885	n
0.138	0.4633	θ_s
0.233	0.0698	θ_r
0.109	0.251	מקטע חרסית

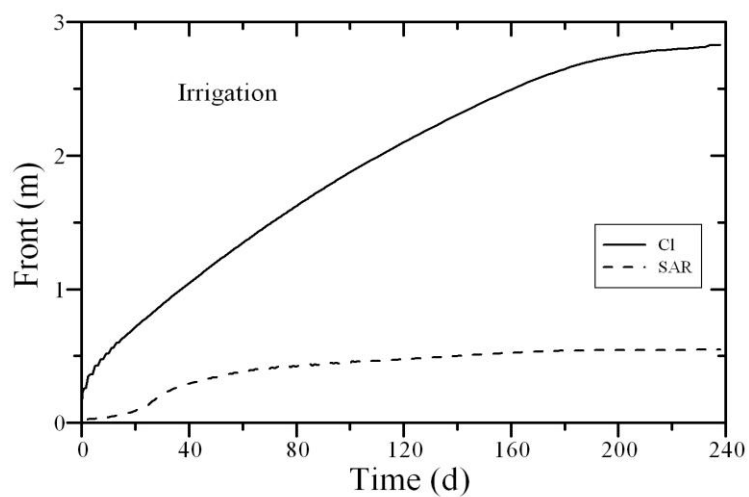
טבלה 1: פרמטרים קרקעיים של המודל של van Genuchten

איור 1 מדגים חלק מנתוני הקלט הדרושים למודל הזרימה והתנועה במונחים של הפרוס המרחבי המצטבר של פרמטרי האינטראקציה זורם-קרקע, ז.א., המוליכות ההידרולית היחסית, תכולת הרטיבות היחסית, ומקדמי ההאטה (עבור הנתרן) וההרחקה (עבור הכלוריד), עבור ערכים נתונים של ריכוז הכלוריד ויחס ספיחת נתרן בתמיסת הקרקע ועומד לחץ מי הקרקע, עבור קרקע מבית דגן שפרוס תכונותיה במצב "יציב" נאמד בעבר (Russo and Bouton, 1992, Russo et al, 1997). האיור מדגים בצורה ברורה את המורכבות הרבה מחד, ואת הכמות העצומה של נתוני הקלט מאידך, הדרושים על מנת לדמות ולנתח זרימת מים ותנועת מומסים בסקלת השדה, עבור המקרה בו קימת אינטראקציה בין הזורם לתווך הנקבובי.



איור 1: פירוס מצטבר של מקדם העיכוב עבור נתרן ומקדם ההרחקה עבור כלוריד, תכולת הרטיבות היחסית והמוליכות ההידרולית היחסית עבור ריכוזי כלוריד (המספרים המציינים את העקומים, במאק/ליטר), עבור יחס ספיחת נתרן 10 ועבור עומד לחץ של 2 מטר תוצאות ההדמיה הנומרית במונחים של התלות בזמן של מיקום חזית הכלוריד ומיקום חזית יחס ספיחת הנתרן (SAR) במהלך עונת ההשקיה (שנה הראשונה) מוצגות באיור 2.

zcl_zsam11

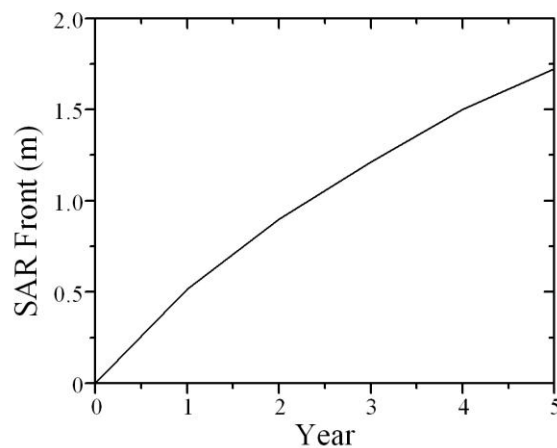


zcl.clay1.zsar.clay1

איור 2: התלות בזמן של המיקום של חזית הכלוריד ומנת ספיחת הנתרן (SAR), במהלך תקופת ההשקיה (שנה ראשונה).

תוצאות ההדמיה מראות באופן ברור את העובדה שתהליך החילוף נתרן/סידן (Na/Ca) הוא תהליך איטי ביחס לתנועת הכלוריד, עובדה הנובעת מחוסר הלינאריות של איזותרמת החילוף Na/Ca, שמצידה גדלה עם העלייה ביחס ספיחת הנתרן והירידה בריכוז הכלוריד בתמיסת הקרקע. איור 3 מראה שקצב ההתקדמות של חזית יחס ספיחת הנתרן קטן עם השנים. העובדה שעם השנים מקטע הולך וגדל של הקרקע נחשף ליחס ספיחת הנתרן גבוה מזה ששרר בקרקע לפני תחילת ההשקיות, עשויה להשפיע על התכונות ההידרוליות של הקרקע שעקב האינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע, תלויות בריכוז המומסים וב-SAR של תמיסת הקרקע.

zsart_clayr_11



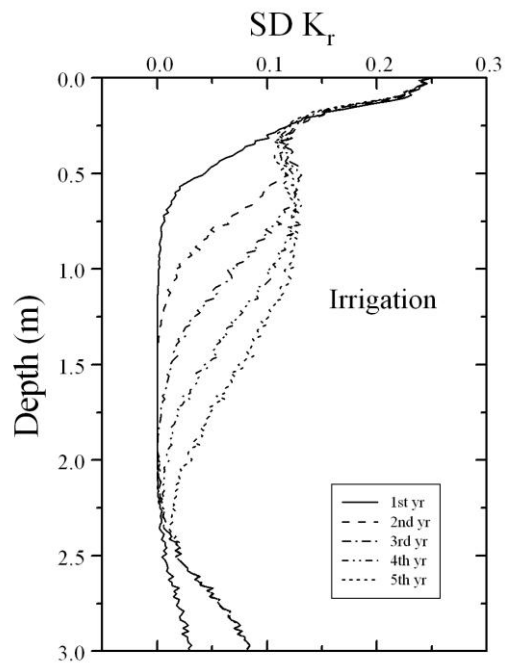
zsart.clayr

איור 3: השינוי במיקום חזית מנת ספיחת הנתרן (SAR) במהלך חמש שנים של השקיה וגשם.

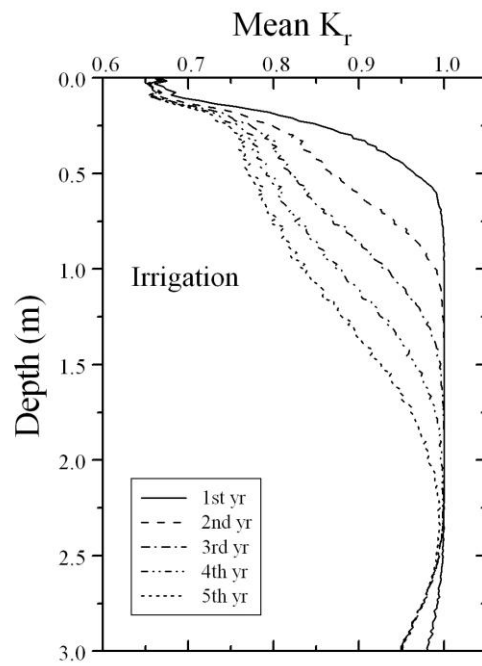
חתכים אנכים של הממוצעים וסטיית התקן (המחושבים ע"י מיצוע אופקי) של המוליכות ההידרולית היחסית, בסיום עונת ההשקיה ובסיום עונת הגשמים במהלך חמש שנים עוקבות מוצגים באיורים 4, ב, ו-5, בהתאמה. איורים אלה מדגימים באופן ברור את הירידה במוליכות ההידרולית של הקרקע במהלך השנים, בעיקר במהלך תקופות הגשמים המלוות במיהול תמיסת הקרקע אך פחות במהלך תקופות ההשקיה המלוות בריכוז תמיסת הקרקע. יש לשים לב שגם בתקופת הגשמים, המוליכות ההידרולית בפני הקרקע אינה קטנה באופן משמעותי. תופעה זו נובעת מכך שבמהלך תקופות הגשמים, עקב אופייה של איזותרמת החילוף Na/Ca, המתאפיינת בחוסר לינאריות משמעותית, מנת ספיחת הנתרן קטנה אך ורק בסמוך לפני הקרקע. איורים 4 ו-5 מראים שעקב השונות המרחבית בתכונות הקרקע, השונות במוליכות ההידרולית היחסית (הקטנה עם עומק הקרקע) גדלה במהלך השנים כתוצאה מהאינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע.

rkzy211

rkzy111

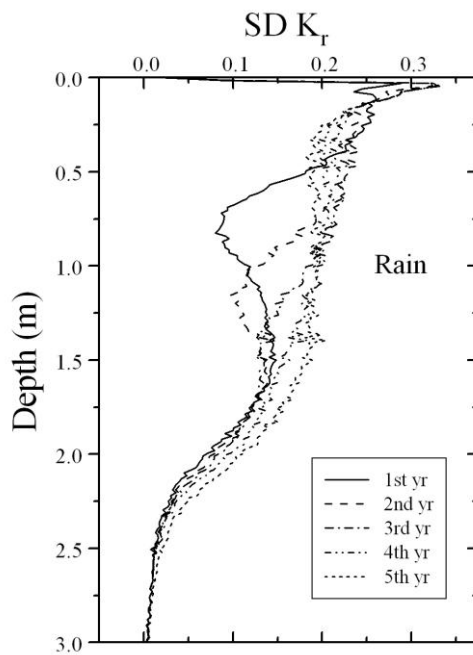


rkz.clayi1,clayi2,clayi3,clayi4,clayi5

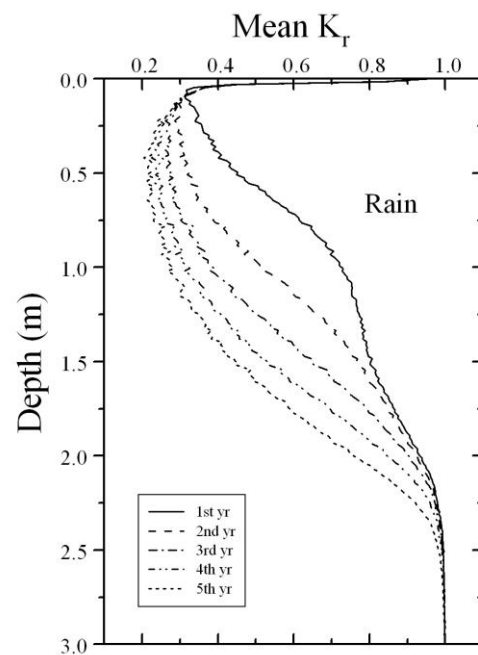


rkz.clayi1,clayi2,clayi3,clayi4,clayi5

איור 4: חתכים אנכים של הממוצעים וסטיית התקן (המחושבים ע"י מיצוע אופקי) של המוליכות ההידרולית היחסית, בסיום עונות ההשקיה במהלך חמש שנים עוקבות.



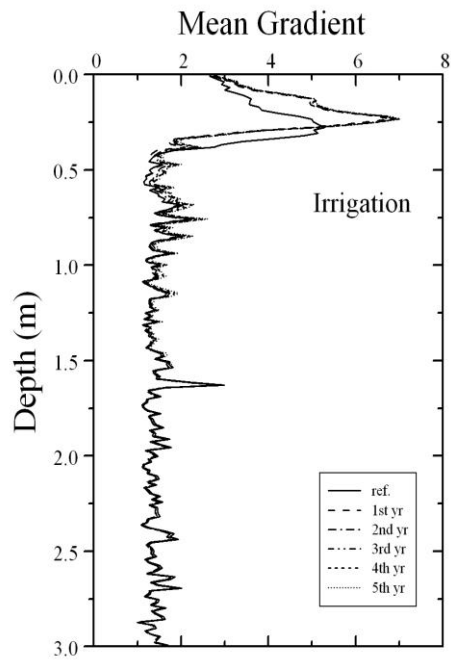
rkz.clayr1.clayr2.clayr3.clayr4.clayr5



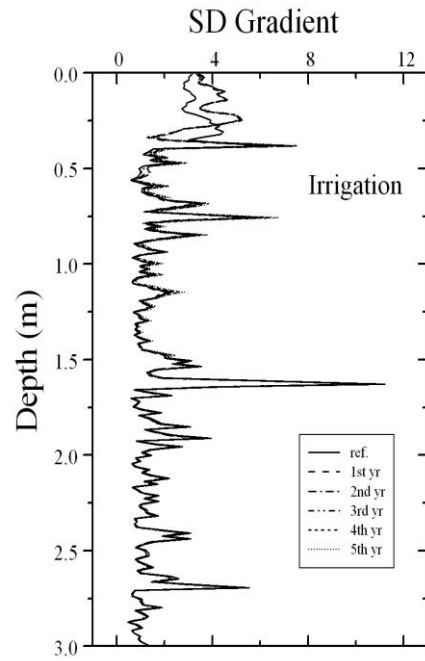
rkz.clayr1.clayr2.clayr3.clayr4.clayr5

איור 5: חתכים אנכים של הממוצעים וסטיית התקן (המחושבים ע"י מיצוע אופקי) של המוליכות ההידרולית היחסית, בסיום עונות הגשם במהלך חמש שנים עוקבות.

חתכים אנכים של הממוצעים וסטיית התקן (המחושבים ע"י מיצוע אופקי) של הגרדיינטים ההידרוליים (בהתאמה לחתכי המוליכות ההידרולית היחסית המוצגים באיורים 4 ו-5), מוצגים באיורים 6, א, ב, ו-7, א, ב. איורים אלה מראים שלקרקע יש יכולת מסוימת לפצות את הירידה במוליכות ההידרולית של הקרקע ע"י הגדלת הגרדיינט ההידרולי, בעיקר בתקופת הגשמים המלווה בירידה משמעותית במוליכות ההידרולית של הקרקע (איור 5). איורים 6 ב ו-7 ב מראים שעקב השונות המרחבית בתכונות הקרקע, השונות בגרדיינט ההידרולי (הקטנה עם עומק הקרקע), בעיקר בתקופות הגשמים, גדלה במהלך השנים כתוצאה מהאינטראקציה בין הזורם לקרקע.

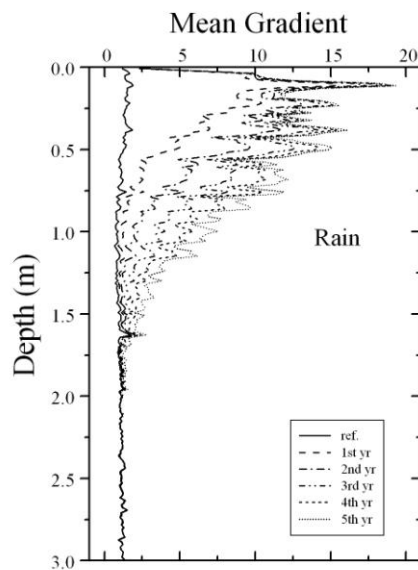


grad240.clayi0,clayi1,clayi2,clayi3,clayi4,clayi5

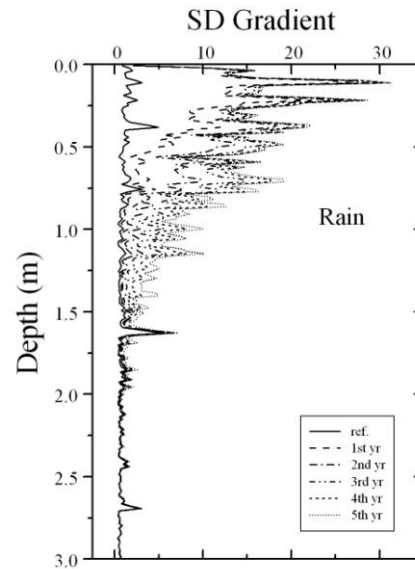


grad240.clayi0,clayi1,clayi2,clayi3,clayi4,clayi5

איור 6: חתכים אנכים של הממוצעים וסטיית התקן (המחושבים ע"י מיצוע אופקי) של הגרדינט ההידרולי, בסיום עונות ההשקיה במהלך חמש שנים עוקבות.



grad120.clayr0.clayr1.clayr2.clayr3.clayr4.clayr5

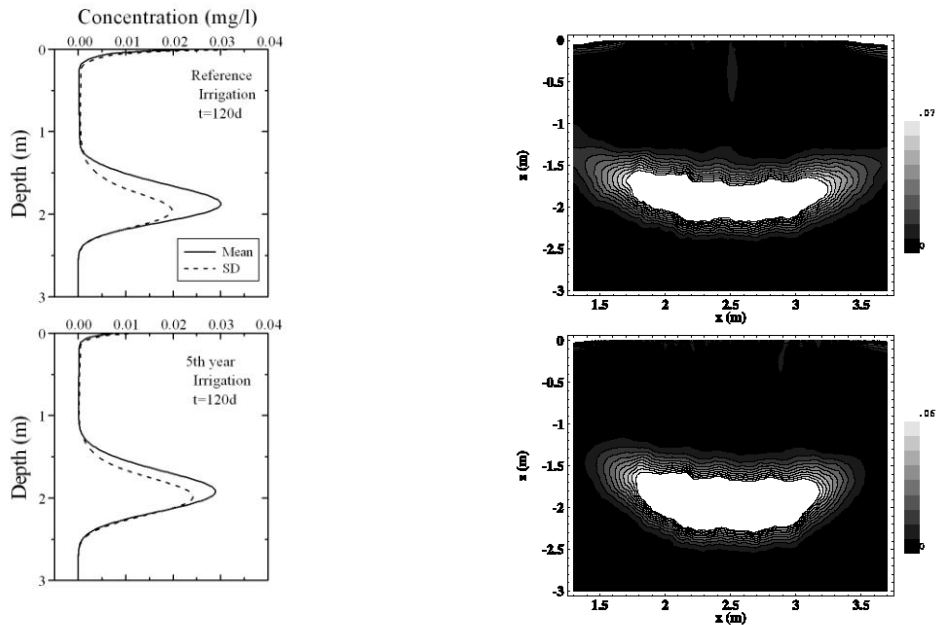


grad120.clayr0.clayr1.clayr2.clayr3.clayr4.clayr5

איור 7: חתכים אנכים של הממוצעים וסטיית התקן (המחושבים ע"י מיצוע אופקי) של הגרדינט ההידרולי, בסיום עונות הגשמים במהלך חמש שנים עוקבות.

ניתוח כמותי של כושר הקרקע להוליך מים ומומסים אפשרי באמצעות מעקב אחר נותב המוסף לפני הקרקע כפעמימה חד-פעמית בתחילת עונת ההשקיה או בתחילת עונת הגשמים. פירוס ריכוז הנותב (במ"ג/ליטר) במישור האנכי של הקרקע בסמוך לשורת העצים הממוקמת במיקום אופקי $x=2.5\text{m}$ (שלוחות הטפטוף ממוקמות ב- $x=2.2\text{m}$ ו- $x=2.8\text{m}$) לאחר 120 ימים במהלך עונת ההשקיה, במצב ייחוס ללא אינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע (איור עליון) ולאחר חמש שנים תוך התייחסות לאינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע (איור תחתון), מוצגים באיור 8. איור זה מדגים את השינויים בפרוס הנותב באזור המורטב במהלך תקופת ההשקיות עקב השינויים במוליכות ההידרולית של הקרקע (המפוצים במידה מסוימת ע"י השינויים בגרדיינט ההידרולי), ז.א., דחיקה מלאה של הנותב באזור בית השורשים כלפי מטה, והקטנת הפיזור האופקי והאנכי של הנותב סביב מרכז המאסה שלו. בנוסף מוצגים באיור 8 חתכים אנכים של הממוצע וסטיית התקן (המתקבלים ע"י מיצוע אופקי) של ריכוז הנותב במהלך תקופת ההשקיה בהתאמה לפרוסים המוצגים באיור 8. החתכים באיור 8 הם תוצאה של דחיקת הנותב כלפי מטה עקב זרימת מים אנכית המשולבת עם זרימת מים אופקית והתאדות, שמצידה, באה לידי ביטוי בתנועה אופקית והצטברות של הנותב באזורים בין שלוחות הטפטוף של שורות עצים סמוכות, בעיקר בסמוך לפני הקרקע. תופעה זו באה לידי ביטוי בחתך אנכי לא-סימטרי של הממוצעים האופקיים של ריכוז הנותב עם פיק משני בסמוך לפני הקרקע. איור 8 מראה שהשפעת האינטראקציה בין הזורם לקרקע על ריכוז הנותב בקרקע במהלך תקופת ההשקיות באה לידי ביטוי בהקטנה משמעותית של הצטברותו בפני הקרקע, ובהגדלה ניכרת של השונות שלו.

extr12021

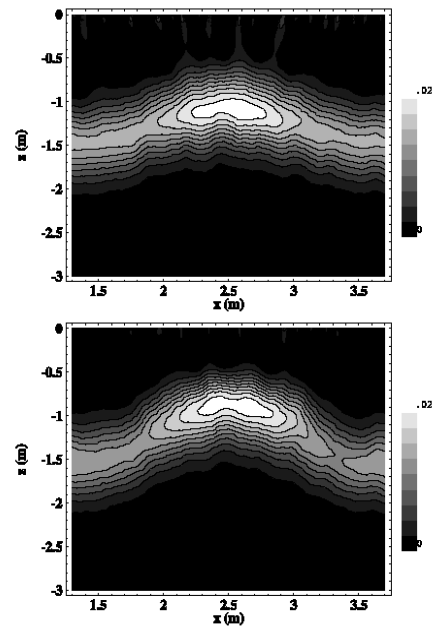
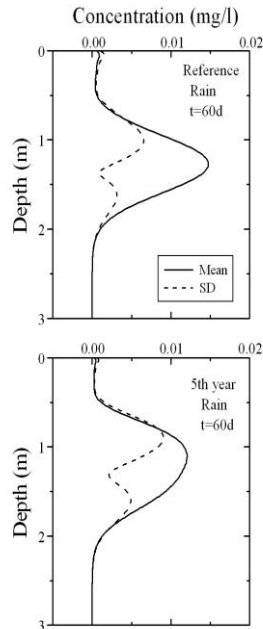


extr120-clay000.days5

איור 8: משמאל פירוס ריכוז הנותב (במ"ג/ליטר) במישור האנכי של הקרקע לאחר 120 יום של השקיות (כל יומיים), ללא אינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע (עליון) ולאחר חמש שנים עם אינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע (תחתון). מימין חתכים אנכים של הממוצע וסטית התקן (המתקבלים ע"י מיצוע אופקי) של ריכוז הנותב במהלך תקופת ההשקיה בהתאמה לפרוסים המוצגים בצידו השמאלי של האיור. שורת עצים ממוקמת ב- $x=2.5m$, שלוחות טפטוף מוצבות ב- $x=2.2m$ ו- $x=2.8m$.

פירוס ריכוז הנותב (במ"ג/ליטר) במישור האנכי של הקרקע בסמוך לשורת העצים הממוקמת במיקום אופקי $x=2.5m$, לאחר 60 ימים במהלך עונת הגשמים, במצב ייחוס ללא אינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע (איור עליון) ולאחר חמש שנים תוך התייחסות לאינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע (איור תחתון), מוצגים באיור 9. איור זה מדגים את השינויים בפרוס הנותב בחתך הקרקע במהלך תקופת הגשמים עקב השינויים הניכרים עם הזמן במוליכות ההידרולית של הקרקע (איור 5), המפוצים במידה מסוימת ע"י השינויים עם הזמן בגרדיינט ההידרולי. האינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע באה לידי ביטוי בעליה בריכוז הנותב באזור בית השורשים והקטנת הפיזור האופקי והאנכי של הנותב סביב מרכז המאסה שלו. בנוסף מוצגים באיור 9 חתכים אנכים של הממוצע וסטית התקן (המתקבלים ע"י מיצוע אופקי) של ריכוז הנותב במהלך תקופת הגשמים בהתאמה לפרוסים המוצגים באיור 9. החתכים באיור 9 מראים שהשפעת האינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע על ריכוז הנותב במהלך תקופת הגשמים באה לידי ביטוי בעיכוב, הקטנה ו-"מריחה" של הפיק שלו ובהגדלה משמעותית של השונות שלו.

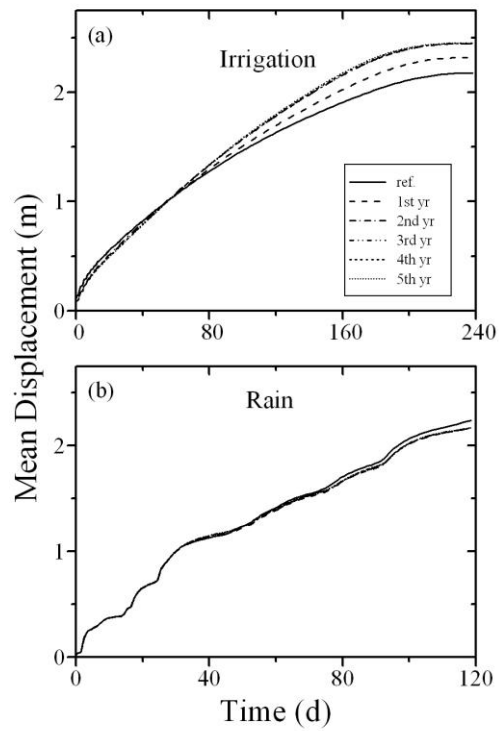
extr6021



extr60 clay0, clay5

איור 9: משמאל פירוט ריכוז הנוטב (במ"ג/ליטר) במישור האנכי של הקרקע לאחר 60 יום במהלך תקופת הגשמים, ללא אינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע (עליון) ולאחר חמש שנים עם אינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע (תחתון). מימין חתכים אנכים של הממוצע וסטית התקן (המתקבלים ע"י מיצוע אופקי) של ריכוז הנוטב במהלך תקופת הגשמים בהתאמה לפרוסים המוצגים בצידו השמאלי של האיור. שורת עצים ממוקמת ב- $x=2.5\text{m}$.

התלות בזמן של המיקום האנכי של מרכז המאסה של הנוטב והפיזור האנכי והאופקי סביב מרכז מאסת הנוטב, במשך חמש שנים עוקבות במהלך תקופת ההשקיה (איור עליון) ותקופת הגשמים (איור תחתון) מוצגים באיורים 10 ו-11, בהתאמה. לשם השוואה מוצגים באיורים אלה גם המקרים ללא אינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע.

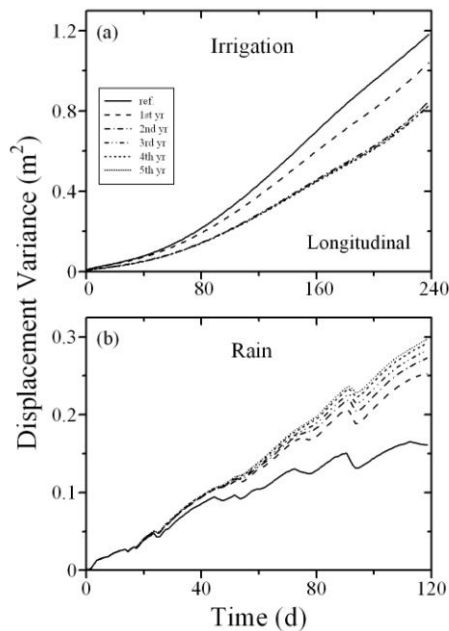


zctr.clayr0,clayr1,clayr2,clayr3,clayr4,clayr5
 zctr.clay00,clay11,clay12,clay13,clay14,clay15

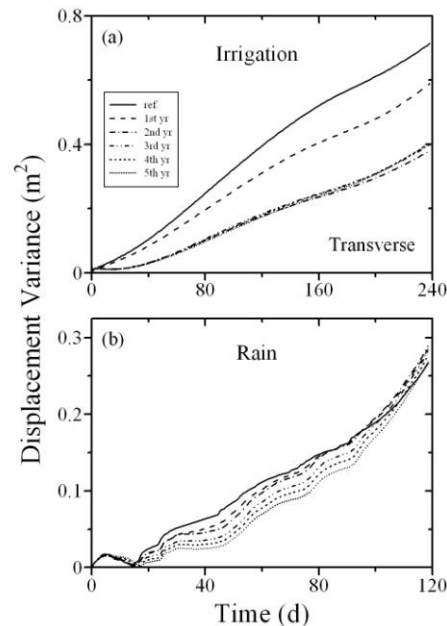
איור 10: התלות בזמן של המיקום האנכי של מרכז המאסה של הנותב, במשך חמש שנים עוקבות, במהלך תקופות ההשקיה (איור עליון) ותקופות הגשמים (איור תחתון). לשם השוואה מוצגים באיורים אלה גם המקרים ללא אינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע.

sigz21

sigx21



sigz.clay00,clay11,clay12,clay13,clay14,clay15
sigz.clay0,clay1,clay2,clay3,clay4,clay5



sigx.clay00,clay11,clay12,clay13,clay14,clay15
sigx.clay0,clay1,clay2,clay3,clay4,clay5

איור 11: התלות בזמן של פיזור סביב המיקום האנכי של מרכז המאסה של הנוטב בכיוון האנכי (שמאל) ובכיוון האופקי (ימין), במשך חמש שנים עוקבות, במהלך תקופת ההשקיה (איור עליון) ותקופת הגשמים (איור תחתון). לשם השוואה מוצגים באיורים אלה גם המקרים ללא אינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע.

איור 10 מראה שבמהלך ההשקיות הראשונות, מיד לאחר תקופת הגשמים, האינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע גורמת להקטנת קצב ההתקדמות של מרכז מאסת הנוטב יחסית למצב הייחוס בו האינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע אינה נלקחת בחשבון. עם הזמן, לאחר למעלה מ-20 השקיות, המגמה מתהפכת והאינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע גורמת להגדלת קצב ההתקדמות של מרכז מאסת הנוטב יחסית למצב הייחוס, מגמה הנשמרת במשך חמש שנים עוקבות. במהלך עונת הגשמים, לאחר מספר אירועי גשם, האינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע גורמת להקטנה של קצב ההתקדמות של מרכז המאסה ביחס למצב הייחוס, מגמה הממשיכה להתקיים במשך חמש השנים העוקבות. איור 11 מראה שבמהלך תקופת ההשקיה האינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע גורמת להקטנה משמעותית של פיזור הנוטב סביב מרכז המאסה שלו בכיוון האופקי והאנכי. השפעת האינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע על פיזור הנוטב קטנה עם השנים כך שהתלות של פיזור הנוטב בזמן מתייצבת למעשה לאחר כ-3 שנים עוקבות. לעומת זאת, במהלך תקופת הגשם, המגמה של הקטנת פיזור הנוטב סביב מרכז המאסה שלו בכיוון האופקי והגדלתו בכיוון האנכי עקב האינטראקציה בין הזורם לבין הקרקע ממשיכה להתקיים במשך חמש שנים עוקבות, בקצב הקטן עם השנים.

סיכום ומסקנות

מטרת המחקר הייתה לפתח מודל מחשבתי של זרימת מים ותנועת מומסים בקרקע הטרוגני רווי/בלתי רווי בסקלת השדה, המתחשב באינטראקציה בין הזורם לבין התווך הנקבובי, על מנת להעריך את ההשפעה ארוכת הטווח של שימוש בקולחים על כושרה של הקרקע להוליך מים ומומסים. במחקר הנוכחי הדגש הושם על השפעת ההרכב היוני של מי הקולחים (מבוטא במונחים של מנת ספיחת הנתרן, SAR) על התכונות הידרוליות של הקרקע. ההשפעה ארוכת הטווח של שימוש בקולחים על כושרה של הקרקע להוליך מים ומומסים נבחנה ע"י הדמיה של זרימת מים ותנועת מומסים במהלך חמש שנים עוקבות תוך התחשבות בתנאי התחלה ושפה הרלבנטיים להשקיה (טפטוף עילי), גשם והתאדות. ההדמיה של זרימת מים, תנועה של תמיסת נתרן/סידן כלורי, ותנועת נותב בקרקע הטרוגנית לא-רוויה בוצעה עבור המקרה בו זרימת המים תלויה בהסעת המומסים באמצעות התלות של התכונות ההידרוליות של הקרקע בריכוזי המומס והרכבו. בהדמיה נלקחו בחשבון תרחישים מציאותיים של ממשקי השקיה, התאדות פוטנציאלית, גשם וקליטת מים ע"י שורשי צמחים.

בכל אחת מהשנים העוקבות, מערכת הזרימה שנבחנה מתאפיינת בשתי תקופות הנבדלות במספר מרכיבים חשובים. הראשונה, תקופת ההשקיה, מתאפיינת בהתאדות פוטנציאלית, ולכן קליטת מים ע"י שורשי הצמחים, יחסית גבוהות, הרטבה חלקית של פני הקרקע (באזור שורת העצים) באמצעות השקיות סדירות (טפטוף עילי) בכמויות המותאמות לצריכת העצים. מכיוון שמי ההשקיה מכילים ריכוזים משמעותיים של כלוריד, נתרן וסידן, כמויות ניכרות של מלחים מוספות לקרקע כתוצאה מההשקיות. התקופה השנייה, תקופת הגשמים, מתאפיינת בהתאדות פוטנציאלית, ולכן קליטת מים ע"י שורשי הצמחים, יחסית נמוכות, הרטבה מלאה של פני הקרקע כתוצאה מאירועי גשם בכמויות ובמרווחים אקראיים שאינם מותאמים לצריכת העצים. מכיוון שמי הגשמים מכילים ריכוזים קטנים של כלוריד, נתרן וסידן, תוספת המלחים לקרקע כתוצאה מהגשמים קטנה מאוד.

כתוצאה מכך, תקופת ההשקיה מתאפיינת בעליה ניכרת של ריכוזי המלחים ומנת ספיחת הנתרן באזור בית השורשים המלווה בהקטנה של קליטת המים ע"י הצמחים (יחסית לפוטנציאל קליטת המים), וכתוצאה מכך הגדלה של שטפי המים והמלחים מתחת לבית השורשים, וירידה מתונה של המוליכות ההידרולית של הקרקע. האחרון נובע מהפיצוי עקב הגדלת ריכוז המלחים בתמיסת הקרקע להשפעה השלילית של הגדלת מנת ספיחת הנתרן בקרקע על המוליכות ההידרולית של הקרקע. לעומת זאת תקופת הגשמים מתאפיינת בירידה ניכרת של ריכוזי המלחים בבית השורשים המלווה בהגדלה של קליטת המים ע"י הצמחים עד לערכה הפוטנציאלי. עקב מאפייני איזותרמת החילוף Na/Ca (חוסר-לינאריות הגדלה עם העלייה ביחס ספיחת הנתרן והירידה בריכוז הכלוריד בתמיסת הקרקע), מנת ספיחת הנתרן קטנה אך ורק בסמוך לפני הקרקע. כתוצאה מכך המוליכות ההידרולית בפני הקרקע גם בתקופת הגשמים אינה קטנה באופן משמעותי. לעומת זאת, בשכבות הקרקע מתחת לפני הקרקע, הצירוף של חתך קרקע שטוף ביחד עם מנת ספיחת נתרן משמעותית גורם לירידה ניכרת במוליכות ההידרולית של הקרקע בשכבת קרקע הגדלה עם השנים.

המסקנה העיקרית של המחקר הנוכחי היא שהגברת האינטראקציה בין תמיסת הקרקע לבין מטריצת הקרקע עקב הגדלת מקטע הנתרן בתמיסת הקרקע כתוצאה מהשקיה בקולחים, מקטינה את יכולת הקרקע להוליך מומסים. עקב צורת איזוטרמת החילוף נתרן/סידן והשפעות המנוגדות של תקופות ההשקיה והגשמים, התהליך איטי אך עקבי.

סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
לפתח מודל מחשבתי של זרימת מים ותנועת מומסים בסקלת השדה, בקרקע הטרוגני רווי/בלתי רווי המתחשב באינטראקציה בין הזורם לבין תווך הנקבובי.
עיקרי הניסויים והתוצאות.
<p>הסכימה הנומרית שפותחה מסוגלת לדמות זרימת מים ותנועת מומסים בסקלת השדה עבור המקרה בו זרימת המים תלויה בהסעת המומסים באמצעות התלות של התכונות ההידרוליות של הקרקע בריכוזי המומס והרכבו, תוך התחשבות בתנאי התחלה ושפה הרלבנטיים להשקיה בטפטוף, גשם והתאדות.</p> <p>תוצאות ההדמיה של זרימת מים ותנועת מומסים בהשקיה בטפטוף במשך חמש שנים עוקבות, מראות שבמהלך השנים תקופות ההשקיה מאופיינות ע"י ירידה מתונה יחסית של המוליכות ההידרולית של הקרקע הנובעת מהפיצוי (עקב העלייה בריכוז המלחים בתמיסת הקרקע) להשפעה השלילית של הגדלת מנת ספיחת הנתרן בקרקע על המוליכות ההידרולית של הקרקע. לעומת זאת, בתקופות הגשמים, הצירוף של חתך קרקע שטוף ביחד עם מנת ספיחת נתרן משמעותית גורם לירידה ניכרת במוליכות ההידרולית של הקרקע בשכבת קרקע שעובייה גדל עם השנים. ההשפעה המשולבת של עונות ההשקיה והגשם באה לידי ביטוי בהקטנה איטית אך מתמשכת של כושר הקרקע להוליך מים ומומסים.</p>
מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?
הגברת האינטראקציה בין תמיסת הקרקע לבין מטריצת הקרקע עקב הגדלת מקטע הנתרן בתמיסת הקרקע כתוצאה מהשקיה בקולחים מקטינה את יכולת הקרקע להוליך מים ומומסים. עקב צורת איזוטרמת החילוף נתרן/סידן והשפעות המנוגדות של תקופות ההשקיה והגשמים, התהליך איטי אך עקבי.
בעיות שנתרו לפתרון
יש לבחון את ההשפעה ארוכת הטווח של היווצרות תנאים הידרופוביים על זרימת המים ותנועת המומסים בקרקע
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח : פרסומים בכתב - <u>ציטוט</u> ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי ;

<p>פטנטים - יש לציין שם ומס' פטנט; הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.</p>
<p>פירסום של המחקר: בהכנה.</p>
<p>פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח בסיום המחקר.</p>
<p>◀</p>
<p>◀</p>
<p>◀</p>
<p>האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחי? לא.</p>

*יש לענות על שאלה זו רק בדוח שנה ראשונה במחקר שאושר לשנתיים, או בדוח שנה שניה במחקר שאושר לשלוש שנים.

רשימת ספרות

1. Coelho, F. E. and D. Or, A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation, Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 1039-1049, 1996.
2. Nimah, M. N., and R. J. Hanks, Model for estimating soil water, plant and atmospheric relationships. 1. Description and sensitivity, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37, 522-527, 1973.
3. Russo, D., and M. Bouton, Statistical analysis of spatial variability in unsaturated flow parameters, Water Resour. Res., 28, 1911-1925, 1992.
4. Russo, D., I. Russo, and A. Laufer, On the spatial variability of parameters of the unsaturated hydraulic conductivity, Water Resour. Res., 33: 947-956, 1997.
5. Russo, D., J. Zaidel, and A. Laufer, Numerical analysis of flow and transport in a three-dimensional partially saturated heterogeneous soil, Water Resour. Res. 34: 1451-1468, 1998.
6. Russo, D., J. Zaidel and A. Laufer. 2004. Numerical analysis of transport of interacting solutes in a three-dimensional unsaturated heterogeneous soil. Vadose Zone Journal 3: 1286-1299.
7. van Genuchten, M. Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898, 1980.