

**משרד החקלאות - דו"ח לחוכניות מחקר
לקרן המדען הראשי**

קוד זיהוי	א. נושא המחקר (בעברית)
304-0508-14	פיתוח שיטה חדשה לאמידת מדדי הקרקע הדרושים לתכנון ותזמון השקיה בטפטוף

ג. כללי		
מוסד מחקר של החוקר הראשי		
מנהל המחקר החקלאי		
תאריכים		סוג הדו"ח
תאריך משלוח הדו"ח למקורות המימון	תקופת המחקר	
	עבודה מוגש הדו"ח	
	סיים	התחלה
שנה חודש	שנה חודש	שנה חודש
3/ 2015	9/ 2014	10/ 2013
	9/ 2014	10/ 2013
		שנת המחקר: שנת מחקר/ סהכ שנים

ב. צוות החוקרים		
שם פרטי	שם משפחה	
שמוליק	פרידמן	חוקר ראשי
חוקרים משניים		
חנה	אלון יחזקאל	1
	לופטהאוס מייקל	2
עידו	ניצן	3
דב	צהר	4
		5
		6
		7

ד. מקורות מימון עבורם מיועד הדו"ח		
שם מקור המימון	קוד מקור מימון	סכום שאושר למחקר בשנת תיקצוב הדו"ח בשקלים
קרן המדען הראשי – ייעול השימוש במים ופוריות הקרקע	020382	140000

ה. תקציר שים לב - על התקציר להיכתב בעברית לפי סעיף ה' שבהנחיות לכתובת דיווחים

שיטת ההשקיה המקובלת ביותר בישראל בגידולים חד-שנתיים ובמטעים היא טפטוף, בעיקר עילי. לטפטוף יתרונות רבים, בעיקר צמצום אובדני מים בהתאדות ובחלחול לעומק, אשר נגזרים ברובם מנפח ההרטבה הקטן. כדי להשקות בטפטוף בצורה מיטבית צריכים להתחשב בתכונות הולכת ותאחיזת המים של הקרקע. שני מדדי הקרקע העיקריים שקובעים את משטר הרטיבות שלה בהצבה של הטפטפות ובתזמון השקיה נתונים הם האורך הקפילרי של הקרקע, המאפיין את התרומה היחסית של הכבידה והכוחות הקפילריים בהסעת המים, וקצב השינוי של המוליכות ההידראולית עם השינוי בתכולת הרטיבות, שקובע את קצב התקדמות פולס ההשקיה בחתך הקרקע. במסגרת תוכנית מחקר קודמת פיתחנו גישה ותוכנה חדשה (DIDAS) שמשתמשת במדדי הקרקע הללו לתכנון מערכת ההשקיה, דהיינו לקביעת המרחקים בין הטפטפות ובין השלוחות, ולתזמון ההשקיות. במסגרת המחקר המוצע פיתחנו שיטה חדשה לאמוד את מדדי הקרקע הרלוונטיים להשקיה בטפטוף. השיטה מבוססת על מדידה של המשרעת של רטיבות הקרקע ושל הסת הזמן של גל הרטיבות בעומק נתון מתחת למקור נקודתי (טפטפת) עם ספיקה מחזורית (50% זרימה – 50% הפסקה) בפני הקרקע. מטרת המחקר (לאחר שוקצף לשנה אחת) היו: 1. פיתוח של פתרונות מתמטיים עבור חידור ממקור נקודתי מחזורי בודד ופיתוח ההליך ההופכי לקביעת מדדי הקרקע מתוך מדידות רטיבות בעומק אחד מתחת למקור; 2. מיסוד המתודולוגיה של השיטה בכמה

עומקים, תחומי רטיבות ואורכים של מחזורי השקיה; 3. הטמעה של ההליך ההופכי בתוכנת DIDAS. שלוש המטרות הושגו בתקופת המחקר. בגלל הקיצוץ לשנה אחת, ביצענו את המדידות רק בקרקע אחת, בחוות הבשור. השיטה שפותחה – המדידה של הרטבה מחזורית בעזרת טנסיומטר רושם וההליך ההופכי לקביעת מדדי הקרקע – נמצאה אמינה וישימה. נראה שהיא עדיפה על שיטות חלופיות שהוצעו בעבר, משום שהיא קובעת את המדדים הרלוונטיים להשקיה מחזורית תכופה בטפטוף בעומקים ובתחום רטיבות רלוונטיים ומשום שהיא פשוטה לביצוע ולא מצריכה ציוד מתוחכם. עם זאת, נראה שכדי למסד את השיטה, לשפר את השימוש בה ולאפיין את מגבלותיה דרושים ניסיונות נוספים בסוגי קרקע שונים, באורכי גל שונים ובספיקות טפטפת שונות.

1. אישורים

הנני מאשר שקראתי את ההנחיות להגשת דיווחים לקרן המדען הראשי והדו"ח המצי"ב מוגש לפיהן

Israel

תאריך (שנה) (חודש) (יום)	רשות המחקר	אמרכלות (רשות המחקר)	מנהל המכון (פקולטה)	מנהל המחלקה	חוקר ראשי
--------------------------------	---------------	----------------------------	---------------------------	----------------	-----------

פיתוח שיטה חדשה לאמידת מדדי הקרקע הדרושים לתכנון ותזמון השקיה בטפטוף
Development of a new method for evaluating the soil parameters required for the design and scheduling of drip irrigation

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר

ע"י

שמוליק פרידמן ועידו ניצן, המחלקה לפיסיקה סביבתית והשקיה, המכון למדעי הקרקע המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי

חנה אלון יחזקאל, מייקל לופטהאוס ודב צהר חוות הבשור, מ"פ דרום

Shmulik Friedman, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail: ywsfied@agri.gov.il

Ido Nitsan, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail: idon@agri.gov.il

Hana Alon Yechezkel, Besor Experimental Station, Israel. E- mail: hana@mopdarom.org.il

Michael Loffthouse, Besor Experimental Station, Israel. E-mail: michael@mopdarom.org.il

Dovi Tzohar, Besor Experimental Station, Israel. E- mail: dovitz@walla.com

הבעת תודה:

היו שותפים למחקר גם:

גרגורי קומונר, גמלאי מתנדב, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי
אלון גמליאל, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי

תקציר

שיטת ההשקיה המקובלת ביותר בישראל בגידולים חד-שנתיים ובמטעים היא טפטוף, בעיקר עילי. לטפטוף יתרונות רבים, בעיקר צמצום אובדני מים בהתאדות ובחלחול לעומק, אשר נגזרים ברובם מנפח ההרטבה הקטן. כדי להשקות בטפטוף בצורה מיטבית צריכים להתחשב בתכונות הולכת ותאחיזת המים של הקרקע. שני מדדי הקרקע העיקריים שקובעים את משטר הרטיבות שלה בהצבה של הטפטפות ובתזמון השקיה נתונים הם האורך הקפילרי של הקרקע, המאפיין את התרומה היחסית של הכבידה והכוחות הקפילריים בהסעת המים, וקצב השינוי של המוליכות ההידראולית עם השינוי בתכולת הרטיבות, שקובע את קצב התקדמות פולס ההשקיה בחתך הקרקע. במסגרת תוכנית מחקר קודמת פיתחנו גישה ותוכנה חדשה (DIDAS) שמשתמשת במדדי הקרקע הללו לתכנון מערכת ההשקיה, דהיינו לקביעת המרחקים בין הטפטפות ובין השלוחות, ולתזמון ההשקיות. במסגרת המחקר המוצע פיתחנו שיטה חדשה לאמוד את מדדי הקרקע הרלוונטיים להשקיה בטפטוף. השיטה מבוססת על מדידה של המשרעת של רטיבות הקרקע ושל הסת הזמן של גל הרטיבות בעומק נתון מתחת למקור נקודתי (טפטפת) עם ספיקה מחזורית (50% זרימה – 50% הפסקה) בפני הקרקע. מטרת המחקר (לאחר שקוצץ לשנה אחת) היו: 1. פיתוח של פתרונות מתמטיים עבור חידור ממקור נקודתי מחזורי בודד ופיתוח ההליך ההופכי לקביעת מדדי הקרקע מתוך מדידות רטיבות בעומק אחד מתחת למקור; 2. מיסוד המתודולוגיה של השיטה בכמה עומקים, תחומי רטיבות ואורכים של מחזורי השקיה; 3. הטמעה של ההליך ההופכי בתוכנת DIDAS. שלוש המטרות הושגו בתקופת המחקר. בגלל הקיצוץ לשנה אחת, ביצענו את המדידות רק בקרקע אחת, בחוות הבשור. השיטה שפותחה – המדידה של הרטבה מחזורית בעזרת טנסיומטר רושם וההליך ההופכי לקביעת מדדי הקרקע – נמצאה אמינה וישימה. נראה שהיא עדיפה על שיטות חלופיות שהוצעו בעבר, משום שהיא קובעת את המדדים הרלוונטיים להשקיה מחזורית תכופה בטפטוף בעומקים ובתחום רטיבות רלוונטיים ומשום שהיא פשוטה לביצוע ולא מצריכה ציוד מתוחכם. עם זאת, נראה שכדי למסד את השיטה, לשפר את השימוש בה ולאפיין את מגבלותיה דרושים ניסיונות נוספים בסוגי קרקע שונים, באורכי גל שונים ובספיקות טפטפת שונות.

מעריכים מומלצים לבדיקת הדוח המדעי

1. רוני וולך, הפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית
2. אלכס פורמן, הפקולטה להנדסה אזרחית, הטכניון
3. נפתלי לזרוביץ, המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן גוריון בנגב

הצהרת החוקר הראשי

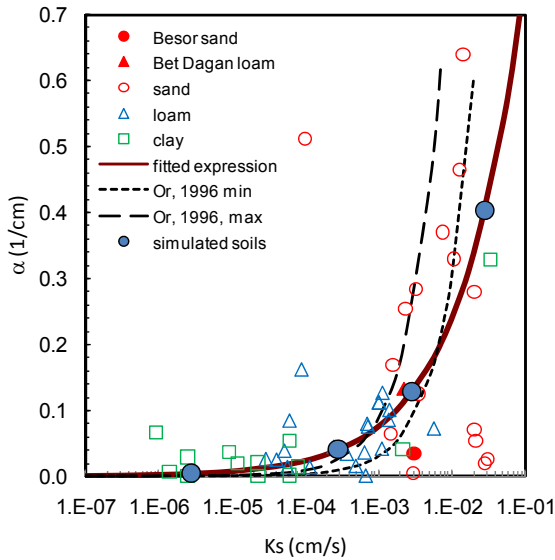
הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא.

1. מבוא ותאור הבעיה

שיטת ההשקיה המקובלת ביותר בישראל בגידולים חד-שנתיים ובמטעים היא טפטוף, בעיקר עילי. לטפטוף יתרונות רבים, בעיקר צמצום אובדני מים בהתאדות ובחלחול לעומק, אשר נגזרים בעיקר מנפח ההרטבה הקטן. כדי להשקות בטפטוף בצורה מיטבית צריכים להתחשב בתכונות הולכת ותאחיזת המים של הקרקע. שני מדדי הקרקע העיקריים הקובעים את משטר הרטיבות שלה בהצבה נתונה של הטפטפות ובממשק השקיה נתון (1: α - ההופכי של האורך הקפילרי של הקרקע, α^{-1} (שהמוליכות ההידראולית שלה, K , היא פונקציה מעריכית של העומד המטריצי, h , ושל המוליכות ההידראולית של הקרקע ברוויה, K_{sat}): $K = K_{sat}e^{\alpha h}$), המאפיין את התרומה היחסית של הכבידה והכוחות הקפילריים בהסעת המים; 2) $k - k$ קצב השינוי של המוליכות ההידראולית, K , עם תכולת הרטיבות הנפחית של הקרקע, θ , בתחום הרטיבות הרלוונטי: $k = dK/d\theta$), שקובע את קצב התקדמות פולס ההשקיה בחתך הקרקע. בתנאים של קרקע שכבתית חשוב גם מדד שלישי: 3) β - קצב הפחיתה (או העלייה במקרים נדירים) של המוליכות ההידראולית בקרקע רוויה עם העומק, z : $K_{sat}(z) = K_{sat}(z=0)e^{\beta \alpha z}$. בשנים האחרונות פיתחנו גישה חדשה ותוכנה (DIDAS-Drip Irrigation Design And Scheduling) לתכנון ותזמון השקיה בטפטוף (תוכנית מחקר 304-0655), שמשמשות במדדי הקרקע הללו. הגישה החדשה מבוססת על מודלים לזרימה וקליטת מים תמידיים (Communar and Friedman, 2010a,b, 2011) ועתיים (Communar and Friedman, 2012a,b) ועל קריטריונים של קצב קליטת המים היחסי (לקצב ההשקיה) לאמידת ההשפעה של הגיאומטריה של מערכת הטפטוף: מיקום השלוחות, הטפטפות ומערכות השורשים, ושל נפח קליטת המים היחסי (לנפח ההשקיה היומי) לקביעת תזמון ההשקיות. כמוכן ערכנו ניסויי השקיה במים מותפלים בתכיפויות שונות לבחינת יכולת החיזוי של המודל ופיתוח כלי עזר להכוונת תכיפות ותזמון ההשקיות (תוכנית מחקר 301-0691). במסגרת המחקר המוצע נפתח שיטה חדשה לאמוד את מדדי הקרקע הרלוונטיים להשקיה בטפטוף. השיטה מבוססת על מדידה של המשרעת של פוטנציאל המים בקרקע (ההפרש בין העומד המטריצי או תכולת הרטיבות הנפחית המקסימאלית והמינימאלית) ושל הסת הזמן (הפיגור של שיא הרטיבות אחרי הזמן של אמצע תקופת ההשקיה) של גל הרטיבות בעומק נתון מתחת למקור נקודתי (טפטפת) עם ספיקה מחזורית (סינוסואידלית או ריבועית) בפני הקרקע. השיטה המוצעת עדיפה על שיטות חלופיות שהוצעו בעבר לקבוע את α ואת K_{sat} (Shani et al., 1987; Smettem and Clothier, 1989; Coelho and Or, 1997; Lazarovitch et al., 2007), במיוחד כשמטרת האיפיון היא ניהול השקיה בטפטוף.

שיטה מקובלת לאמידת α ו- K_{sat} היא השיטה של Shani et al. (1987), על-פיה מודדים את רדיוס האיגום כתלות בספיקת הטפטפת ושיטה נוספת, משופרת על-פיה משתמשים במקורות בעלי רדיוס הרטבה מאולץ שונה הוצעה לפני שנים אחדות על ידי של Lazarovich et al., (2007). את K_{sat} ניתן לקבוע מתוך מדידה של קצב החידור הסופי "בטבעת כפולה". היתרונות העיקריים של השיטה החדשה המוצעת הם שהיא קובעת את המדדים הרלוונטיים להשקיה מחזורית תכופה בטפטוף בעומקים ובתחומי רטיבות רלוונטיים לבית השורשים, שהמדידות יכולות להתחיל בקרקע בכל מצב רטיבות ואינן תלויות במצבה ההתחלתי של הקרקע ושהיא פשוטה לביצוע ולא מצריכה ציוד מתוחכם.



ככלל, צפוי קשר בין α ל- K_{sat} , ואם מניחים מודל קפילרי פשוט מקבלים ש- K_{sat} תלויה בריבוע של קוטר נקבוב מייצג (r_p^2) וש- α תלויה בהופכי של קוטר הנקבוב (r_p^{-1}), כלומר שההופכי של האורך הקפילרי של הקרקע תלוי במוליכות ההידראולית של קרקע רוויה על-פי: $\alpha = 0.0435 \text{ h cm}^{-2} K_{sat}^{1/2}$ עם K_{sat} ביחידות של cm h^{-1} ו- α ביחידות של cm^{-1} (Communar and Friedman, 2010a).

2. מטרות המחקר

מטרות המחקר (לאחר שקוצץ לשנה אחת) היו: 1. פיתוח של פתרונות מתמטיים עבור חידור ממקור נקודתי מחזורי בודד ופיתוח ההליך ההופכי לקביעת מדדי הקרקע מתוך מדידות רטיבות בעומק אחד מתחת למקור; 2. מיסוד המתודולוגיה של השיטה בכמה עומקים, תחומי רטיבות ואורכים של מחזורי השקיה; 3. הטמעה של ההליך ההופכי בתוכנת DIDAS.

3. עיקרי הניסויים ותוצאות המחקר

3.1 פיתוח של פתרונות מתמטיים

גריגורי קומונר פיתח עבורנו פתרון אנליטי למשוואת הזרימה הליניארית:

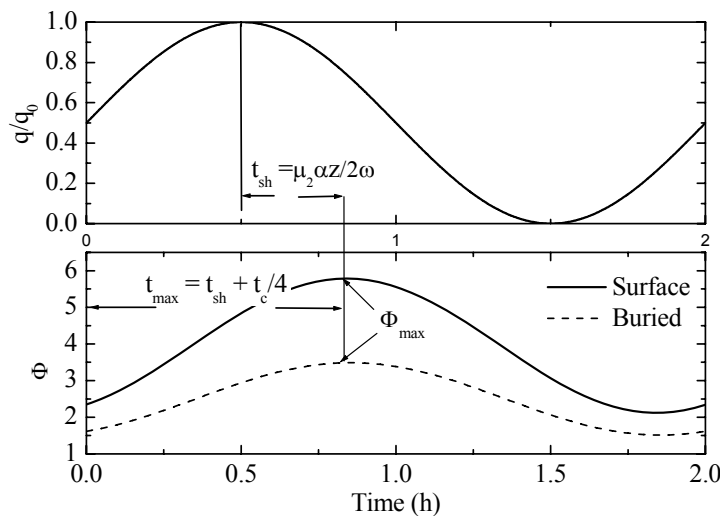
$$\nabla^2 \varphi - \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\alpha}{k} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

(במונחים של פוטנציאל השטף המטריצי, φ : האינטגרל של המוליכות ההידראולית על העומד המטריצי,

$$\varphi = \int_{-\infty}^h K dh = \frac{K_s \exp(\alpha h)}{\alpha}$$

עבור חידור ממקור נקודתי סינוסואידלי בודד טמון (בעומק גדול) ובפני

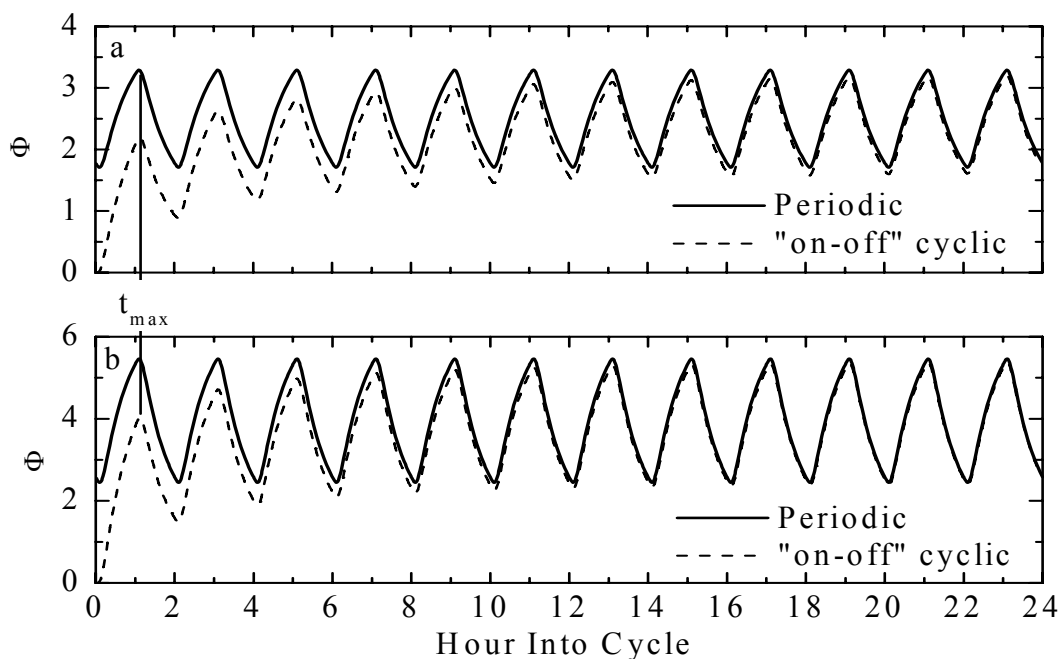
הקרקע (המאופיינים על ידי שטף מים מתאפס). פיתוח הפתרונות והפתרונות, הכוללים ביטויים מורכבים למדי, מתוארים ב-Communar, G and Friedman, S.P. 2014.



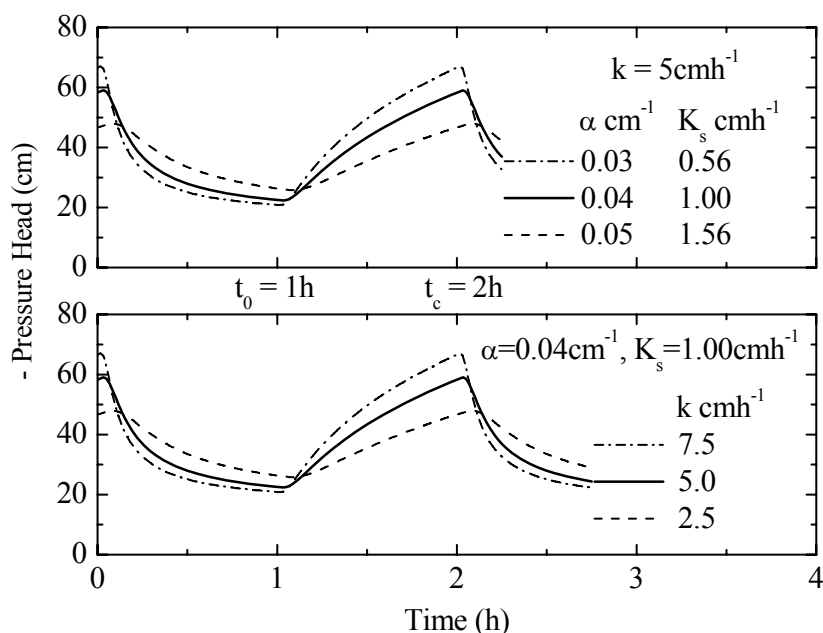
בחלק התחתון של התרשים משמאל ניתן לראות את השינוי המחזורי של פוטנציאל השטף המטריצי הלא מימדי $\Phi = 8\pi\varphi/\alpha q_0$ - ספיקת הטפטפת (בעומק של 10 ס"מ מתחת לטפטפת טמונה (בעומק אינסופי) ומתחת לטפטפת עילית בקרקע עם מרקם של חול דק להרטבה סינוסואידלית (החלק העליון) במחזורים של שעה הרטבה ($t_0 = 1 \text{ h}$) - שעה הפסקה. ניתן לראות שמשרעת הרטיבות המתקבל מטפטפת עילית גדולה יותר מאשר זו המתקבלת מטפטפת טמונה, ולעומת זאת, שהסת הזמן (של שיא הרטיבות אחרי שיא הספיקה) זהה עבור שני סוגי המקורות.

הפתרון הבסיסי למקור נקודתי סינוסואידלי יכול לשמש גם לתיאור החידור מממקורות נקודתיים מחזוריים, הפועלים במחזורים ריבועיים (זמן הטפטוף בספיקה קבועה (t_0) זהה לזמן ההפסקה) על ידי תיאור הגל המרובע כאוסף של גלים סינוסואידליים בדרגת הקירוב הרצויה. ככל שעומק הטנסיומטר גדול יותר גל הרטיבות כתוצאה מהרטבה מחזורית ריבועית הולך ונעשה גם הוא סינוסואידלי (לא מוצג), כך שלא ניתן להבחין אם ספיקת הטפטפת סינוסואידלית או ריבועית.

מתוך פתרונות לזרימה תמידית, למשל, עולה שכאשר מקור המים טמון בעומק גדול מ- $0.5/\alpha$ (למשל 12.5 ס"מ בחול הדק של חוות הבשור שמאופיין על ידי $\alpha = 0.04 \text{ cm}^{-1}$ לערך) השפעת פני הקרקע זניחה וניתן להשתמש בפתרון הפשוט יותר למקור טמון בעומק אינסופי. לא פותחו פתרונות כלליים לפוטנציאל בכל מיקום בהסת אופקי מהמקור ($r, r > 0$ - מרחק רדיאלי מהטפטפת), מאחר ורק הפתרון לפוטנציאל המים (עומד מטריצי) במיקום אנכי מתחת למקור ($z > 0; r = 0$) דרוש להפעלת השיטה המוצעת. הפתרונות שפותחו שונים מהפתרון העתי של הרטבה קבועה של קרקע יבשה (Warrick, 1974), שגם ממנו ניתן לגזור את הפתרון של הרטבה במחזורים של ספיקה קבועה-הפסקה על-ידי יישום עקרון הסופרפוזיציה בזמן, בכך שהם מתייחסים בצורה ישירה למקור מים מחזורי והפתרון אינו תלוי בהיסטוריה של התהליך - בפירוס הרטיבות בקרקע ב"תחילת התהליך. בבדיקה שעשינו ראינו שהפתרון של Warrick להרטבה של קרקע יבשה מתכנס לפתרון המחזורי לאחר כמה מחזורי הרטבה. בתרשים למטה ניתן לראות את פוטנציאל השטף המטריצי הלא מימדי ($\Phi = 8\pi\phi/\alpha q_0$, q_0 - ספיקת הטפטפת) בעומק של 10 ס"מ מתחת לטפטפת באותה הקרקע ($\alpha = 0.04 \text{ cm}^{-1}$; $k = 5 \text{ cmh}^{-1}$) כפונקציה של הזמן שחלף עבור הרטבה במחזורים של שעה הרטבה ($t_0 = 1 \text{ h}$) - שעה הפסקה, באיור העליון עבור טפטפת טמונה בעומק גדול ובאיור התחתון עבור טפטפת בפני הקרקע. ניתן לראות שהפוטנציאל (הרטיבות) גבוה יותר מתחת לטפטפת בפני הקרקע לעומת טפטפת טמונה בעומק גדול, שהסת הזמן של מקסימום הרטיבות אחרי אמצע זמני ההשקיה ($t_{sh} = t_{max} - t_0/2$) דומה מאד עבור מקור טמון ומקור בפני השטח, שכבר במחזור הראשון הסת הזמן הוא זה האופייני להרטבה המחזורית ושהפתרון של Warrick (on-off cyclic) מתכנס, כצפוי לפתרון המחזורי (periodic), קצת מהר יותר עבור טפטפת עלילית.



בתרשים למטה נראית ההשפעה הצפויה של מדדי הקרקע, α , k ו- K_{sat} (כאשר הקשר בין α ו- K_{sat} הוא על פי $\alpha = 0.0435 K_{sat}^{1/2}$) על תנודת העומד המטריצי בעומק 10 ס"מ הנמדדת בהרטבה מחזורית באורך גל של שעותיים. עבור ערכים קטנים של α המשרעת של העומד המטריצי גדולה יותר והסת הזמן קטן יותר, אם כי רגישותו של הסת הזמן לשינוי ב- α פחותה. כמוכן, המשרעת גדולה יותר והסת הזמן קצר יותר עבור ערכים גדולים יותר של k . יש לשים לב שהשינויים במשרעת של העומד המטריצי נובעים בעיקר משינויים בערכי המינימום (היותר שליליים) ופחות משינויים בערכי המקסימום. עבור עומקים גדולים יותר המשרעת קטנה יותר והסת הזמן ארוך יותר, ובעומק נתון המשרעת והסת הזמן גדלים עם אורך המחזור (לא מוצג).



3.2 פיתוח ההליך ההופכי לקביעת ערכי הפרמטרים

בנוסף לפתרונות המתמטיים המתארים את פוטנציאל הרטיבות העתי בעומקים שונים מתחת למקור נקודתי פיתחנו את ההליך ההופכי הדרוש לקביעת מדדי הקרקע מתוך מדידות העומד מטריצי (h), באמצעות טנסיומטר) בעומק ידוע מתחת למקור מחזורי בפני הקרקע. עקרונית, מתוך מדידה של משרעת העומד המטריצי (הפרש העומדים המקסימאלי והמינימאלי) והסת הזמן של הגל ביחס למקור בעומק יחיד ניתן לאמוד את α ו- k ($dK/d\theta$), שהם שני הפרמטרים היחידים הדרושים לתכנון ותזמון ההשקיה בטפטוף על-פי הגישה החדשה (DIDAS), ואת הפרמטר הנוסף של הקרקע - K_{sat} ניתן לקבוע מתוך המדידה האבסולוטית של העומד המטריצי (ערך המקסימום, h_{max} , או המינימום, h_{min} , למשל).

ההליך הופכי לאמידת ערכי הפרמטרים כולל שני שלבים:

1. שלב משרעת-הסת: בהתבסס על הפתרון האנליטי ל- $h(t)$ לחידור ממקור נקודתי טמון ומתוך הסת הזמן ($t_{sh} = t_{max} - t_0/2$) והמשרעת ($h_{min} - h_{max}$) המדודים, קובעים בצורה אנליטית, על-ידי פתרון של 2 משוואות סתומות (Communar and Friedman, 2014), את הערכים הראשוניים לפרמטרים α ו- k (תוך ניצול העובדה שהסת הזמן דומה מאד עבור טפטפת עילית וטמונה ושהפתרון האנליטי לטפטפת טמונה פשוט יותר), ואת הערך הראשוני של הפרמטר K_{sat} מתוך הערכים המדודים של h_{min} ו- h_{max} . מאחר ויש קושי

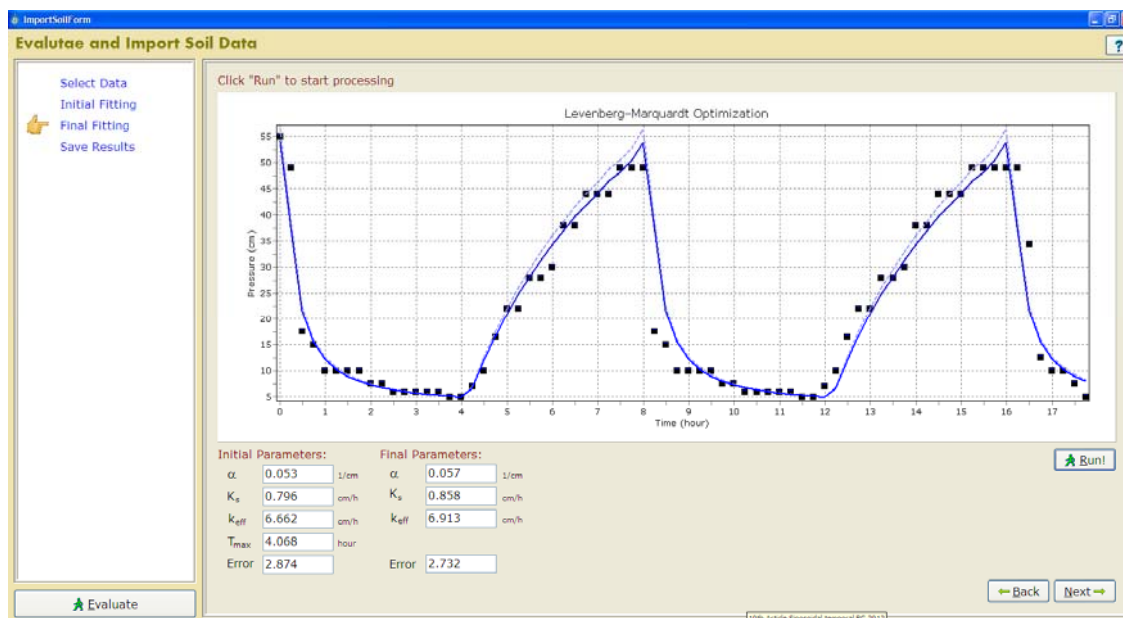
למדוד במדויק את הסת הזמן, גם בשלב זה משתמשים בהליך של מינימום סטיות ריבועיות (עם פונקציה משקל מוטה לסביבות ערכי הקיצון של העומד המטריצי) לקביעת ערך הסת הזמן המדוד.

2. שלב סטטיסטי של חיפוש מינימום סטיות ריבועיות: השלב השני משתמש באלגוריתם המבוסס על עיקרון של מינימיזציה סטטיסטית של סכום ריבועי הסטיות בין ערכים מדודים למחושבים (על-פי השיטה של Levenberg-Marquardt, 1963, Marquardt). הניחוש הראשוני של המדדים α , k ו- K_{sat} , המחושבים בשלב הראשון, מחזק את האמינות של השלב השני – הסטטיסטי, שהינו בעייתי בדרך-כלל ואינו מבטיח התכנסות חד-ערכית של הפרמטרים המותאמים למינימום הגלובלי של סכום הסטיות הריבועיות במקרה של קשרים לא ליניאריים – כמו התלות הנוכחית של הפתרון להרטבה מחזורית בערכי הפרמטרים.

בדרך-כלל שלב המשרעת-הסת הראשון מספק תוצאות משביעות רצון, והשיפור בשלב השני הינו זניח.

3.3 הטמעת ההליך ההופכי בתוכנת DIDAS

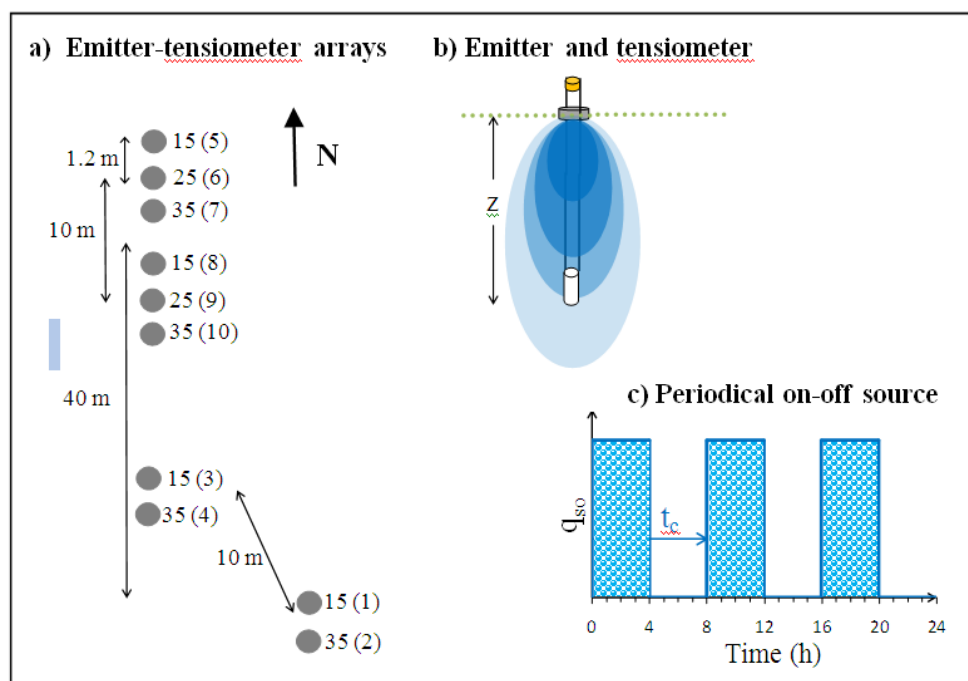
בעזרתו של אלון גמליאל, האחראי על פיתוח התוכנה של DIDAS, הטמענו את ההליך ההופכי בתוכנה, תוך כדי שימוש באלגוריתם מתוך הספרייה ALGLIB[®] (Sergey Bochkanov, 1999, <http://www.alglib.net>) לשלב השני. למטה נראה החלון ב-DIDAS בו נקלטים הנתונים (שנמדדו במקרה הזה על-ידי טנסיומטר רושם בעומק 15 ס"מ מתחת לטפטפת בספיקה של 1.6 ל/ש בהרטבה במחזורים של 8 שעות בקרקע של חוות הבשור), מעובדים לקביעת הערכים של α , k ו- K_{sat} , ואם רוצים בכך, נשמרים תחת שם של קרקע חדשה בקטלוג הקרקעות של התוכנה. ניתן לראות שאין הבדלים גדולים בין ערכי הפרמטרים שנבקעו בשלב המשרעת-הסת זמן (הקו השבור) והסטטיסטי (הקו הרציף).



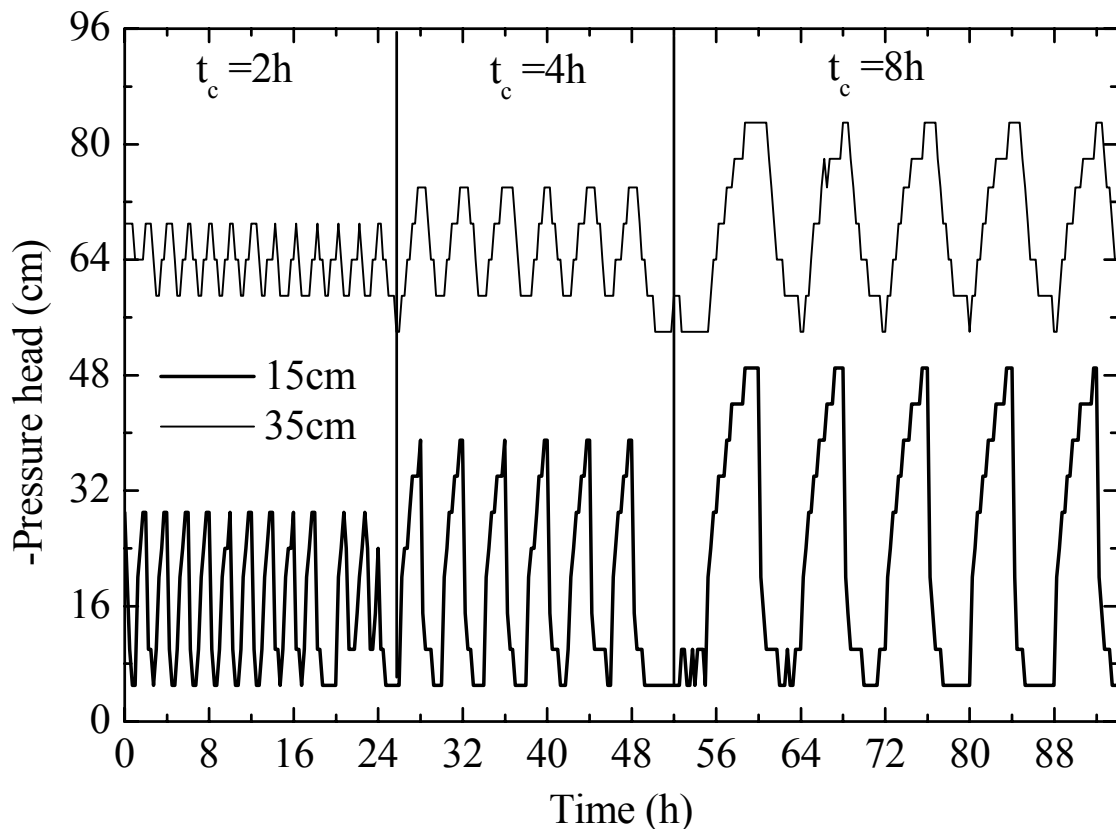
3.4 מדידות בהרטבה מחזורית בחוות הבשור

השיטה נוסתה בחוות הבשור בתם ניסוי השקיה של פלפל, ובשימוש בטנסיומטרים שהוטמנו בתחילת עונת ההשקיה, כ-8 חודשים לפני ניסויי ההרטבה המחזורית. הקרקע של חוות הבשור (90% חול, 1% טין, 9% חרסית) כללה עדיין את שורשי הצמחים שנקטמו כדי למנוע קליטת מים מפני הקרקע כוסו בניילון כדי למנוע התאדות מפני הקרקע. היה שימוש בטפטפות מווסתות (יונירעם, נטפים, ישראל) בספיקות של 1 ושל 1.6 ל/ש (נמצאו מדויקיות בסטיות קטנות מ-2%), שקובעו בצמוד לצינורות של טנסיומטרים "מסחריים" (של

מוטס, ישראל) שמודדים את העומד המטריצי ברזולוציה של 4 או 5 ס"מ ושמרכז החרס שלהם היה בעומקים של 15, 25 ו-35 ס"מ מתחת לפני הקרקע. הטנסיומטרים חוברו למרבבים ולמשדרים ששידרו לשרת של חברת מוטס, והנתונים, שנמדדו בתדירות "מסחרית" רגילה של אחת ל-15 דקות הורדו דרך המרשתת. ההשקיה המחזורית ה"ריבועית" (50% מהזמן הרטבה, 50% הפסקה) במחזורים של 1, 2, 4, ו-8 שעות הייתה מבוקרת על ידי מחשב השקיה. ההרטבה המחזורית נמשכה עד לקבלת התנהגות מחזורית, מה שקורה בדרך-כלל אחרי 2 או 3 מחזורי הרטבה. ליד אחד הטנסיומטרים גם ערכנו מדידות ידניות מלוות של פירוס תכולת הרטיבות הנפחית בעזרת מערך דו-מימדי של 16 מחושי TDR. בתרשים למטה ניתן לראות את המיקום של 10 הטנסיומטרים ששימשו לניסויים בבית רשת 39 בחווה ותיאור סכימטי של העיקרון של שיטת המדידה. המרחק המינימאלי בין הטפטפות היה 1.2 מ' כדי להבטיח השפעה הדדית מינימאלית של טפטפות סמוכות.

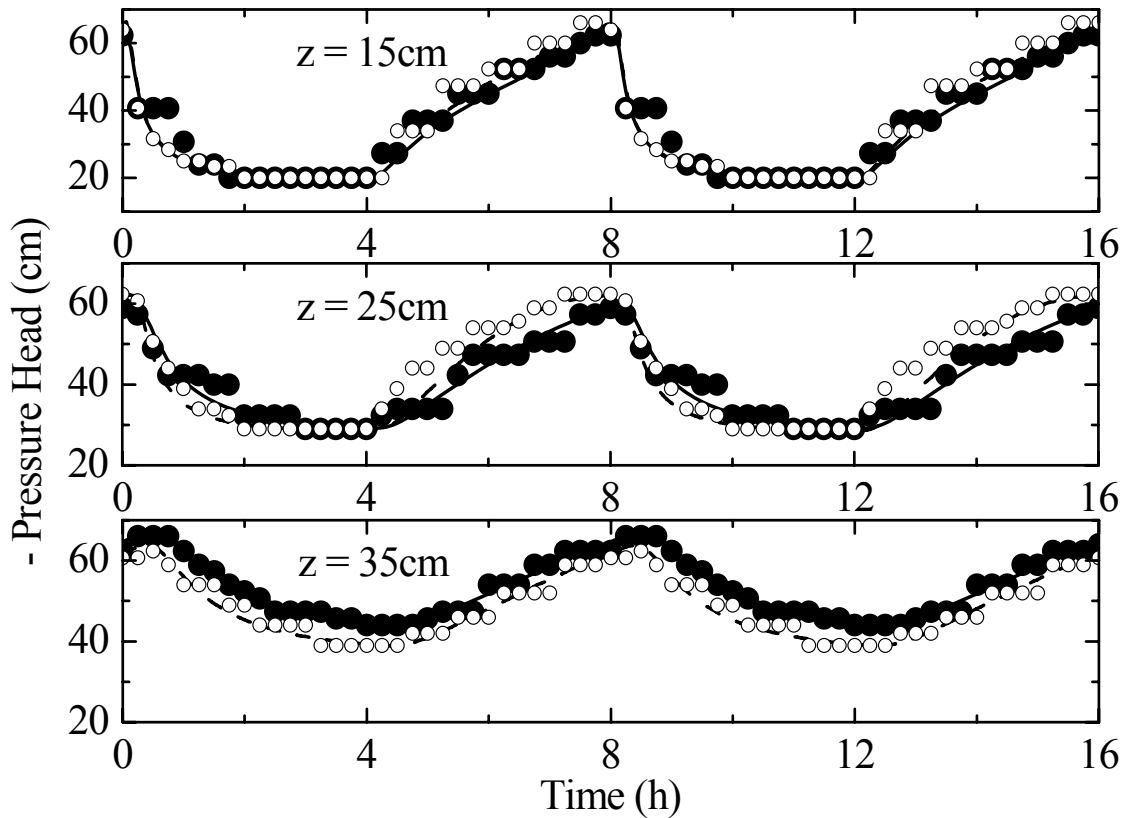
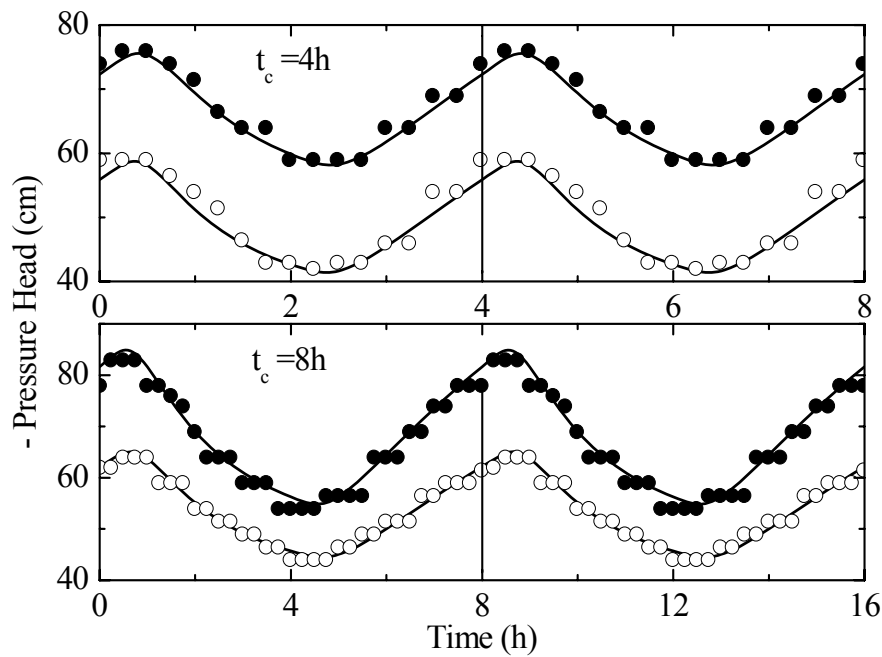


בתרשים שבעמוד הבא נראות קריאות של טנסיומטרים בעומקים של 15 (קווים עבים) ו-35 ס"מ (קווים דקים) שהתקבלו ממחזורי הרטבה של 2, 4 ו-8 שעות עם טפטפות של 1.6 ל/ש. ניתן לראות שעבור הטנסיומטר הרדוד, בעומק 15 ס"מ – היכן שהרטיבות גבוהה יותר, התקבלה תגובה גדולה מרזולוציית הקריאה כבר במחזור הרטבה של שעתיים (שעה הרטבה, שעה הפסקה). כמוכן ניתן לראות שהעומד המקסימאלי (5- ס"מ, לערך) לא היה תלוי באורך המחזור ושהערכים המינימאליים היו נמוכים (שליליים) יותר ככל שאורך המחזור התארך. אי-התלות של העומדים המקסימאליים באורך המחזור הינה שילוב של ההתנהגות הצפויה בעומק בו הקרקע קרובה לרוויה במים ושל הארטיפקט של הרזולוציה הנמוכה של הטנסיומטרים המסחריים. לעומת זאת, עבור הטנסיומטר בעומק 35 ס"מ, שממוקם באזור יבש יותר, נראה שמחזור הרטבה של שעתיים הינו קצר מדי במובן זה שהאמפליטודה של העומד המטריצי גדולה רק פי 2 מרזולוציית הקריאה. כמוכן נראה שעבור עומק זה יש גם עליה בעומדים המקסימאליים וגם ירידה בעומדים מינימאליים עם התארכות המחזור.



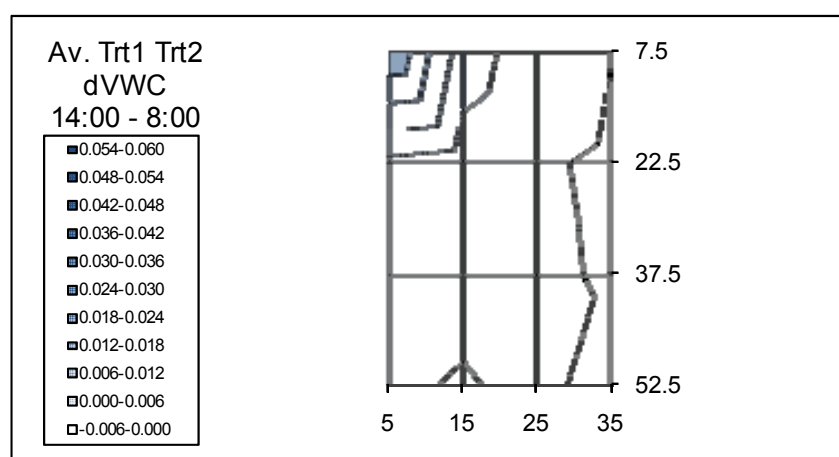
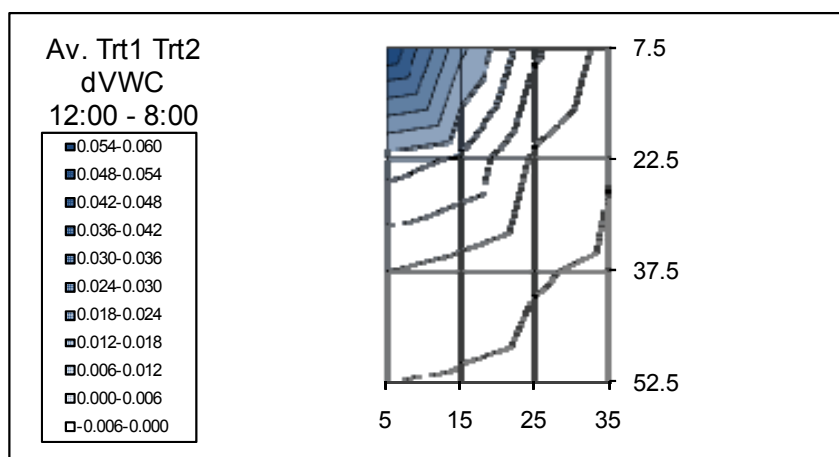
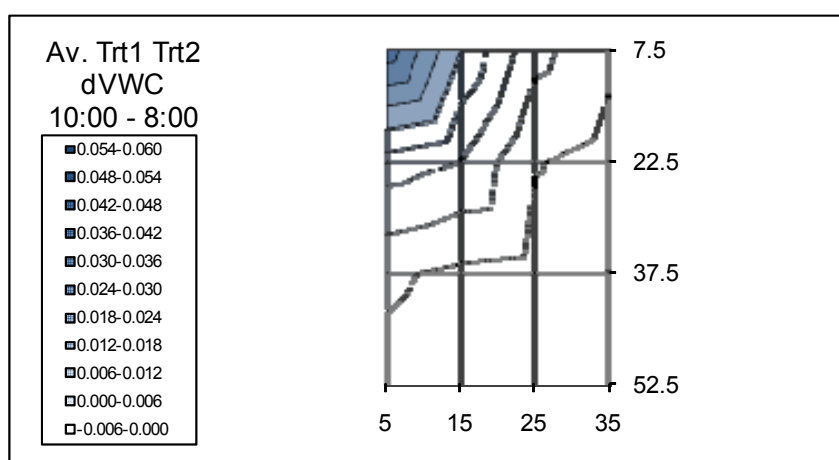
בתרשים העליון בעמוד הבא נראית דוגמא לקריאות של טנסיומטרים (טנסיומטר מספר 2 עם סמנים מלאים וטנסיומטר מספר 4 עם סמנים ריקים) בעומק של 35 ס"מ והפתרון האנליטי שהותאם להם לצורך קביעת הערכים של הפרמטרים. ספיקת הטפטפת הייתה 1.6 ל/ש והמחזוריים היו של 4 (למעלה) ו-8 (למטה) שעות (תכיפות הקריאה הייתה תמיד כל 15 דקות, סקאלות הזמן שונות). ניתן לראות את ההתאמה הטובה בין הפתרון האנליטי לבין המדידות ואת הגלים השונים שהתקבלו בשני הטנסיומטרים, שהיו ממוקמים במרחק של כ-10 מ' אחד מהשני בחלד הדרומי של בית הרשת. הערכים הנאמדים של α ו- K_{sat} גבוהים בצורה משמעותית בטנסיומטר 4 לעומת 2 (טנסיומטרים מספר 2 ו-4 בטבלה שבהמשך).

בתרשים שמתחתיו נראות קריאות של טנסיומטרים: מספר 5 ו-8 בסמנים מלאים וריקים, בהתאמה, בעומק של 15 ס"מ, למעלה; מספר 6 ו-9 בסמנים מלאים וריקים, בהתאמה, בעומק של 25 ס"מ, באמצע; מספר 7 ו-10 בסמנים מלאים וריקים, בהתאמה, בעומק של 35 ס"מ, למטה, והפתרון האנליטי שהותאם להם לצורך קביעת הערכים של הפרמטרים. ספיקת הטפטפת הייתה 1.6 ל/ש ואורך המחזור הוא של 8 שעות. ניתן לראות שוב את ההתאמה הטובה בין הפתרון האנליטי לבין המדידות ואת הגלים השונים שהתקבלו בששת הטנסיומטרים. המרחק בין זוגות הטנסיומטרים היה שוב כ-10 מ' אחד מהשני, בצד הצפוני של בית הרשת, אבל גלי הרטיבות דומים יותר, וכתוצאה מכך גם מדדי הקרקע שהותאמו (טנסיומטרים מספר 5 עד 10 בטבלה שבהמשך). נראה ששונות הקרקע בחלק זה של בית הרשת קטנה יותר. כמוכן לא נראה שיש שינוי סיסטמטי במדדי הקרקע עם עומק הקרקע.



בתרשים שבעמוד הבא נראים פרוסי הרטיבות שנמדדו עם מערך מחושי TDR (מרחקים של 5, 15, 25 ו-35 ס"מ מהטפטפת, עומקים של 7.5, 22.5, 37.5 ו-52.5 ס"מ מתחת לפני הקרקע) ליד אחד הטנסיומטרים. ספיקת הטפטפת היתה 1.6 ל/ש והמחזור היה באורך של 8 שעות (הרטבה בשעות 00:00-04:00, 08:00-12:00, 16:00-20:00, והפסקות באורך 4 שעות בין השעות הללו). באיור לא מובאים פירוסי הרטיבות שנמדדו אלא הפרשים בפירוסי תכולת הרטיבות הנפחית: 1. למעלה: הרטיבות בשעה 10:00 (אמצע פרק ההרטבה) פחות הרטיבות בשעה 8:00 (תחילת פרק ההרטבה); 2. במרכז: הרטיבות בשעה 12:00 (סוף פרק ההרטבה) פחות הרטיבות בשעה 8:00 (תחילת פרק ההרטבה); 3. למטה:

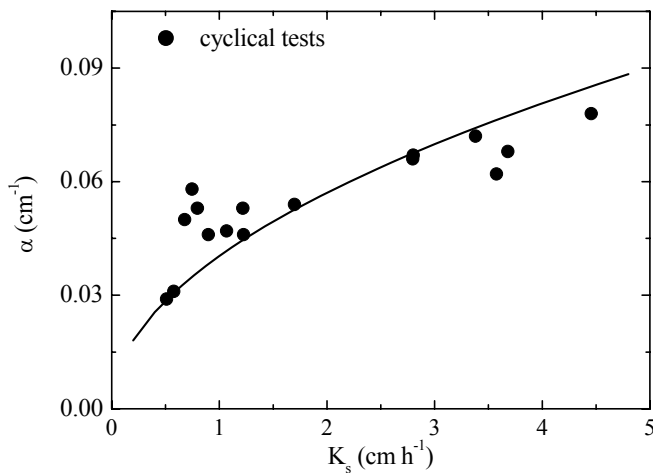
הרטיבות בשעה 14:00 (אמצע פרק ההפסקה) פחות הרטיבות בשעה 8:00 (תחילת פרק ההרטבה). הפרשי הרטיבות בין השעה 16:00 (סוף פרק ההפסקה) לשעה 8:00 (אותו זמן במחזור). היו קטנים מאד, כצפוי, ונובעים רק מטעויות מדידה (לא מוצג). בהצגה הפרשית זאת (שגם מנקה חלק מה"רעשים") ניתן לראות את התקדמות גל ההרטבה באמצע פרק ההרטבה (התרשים העליון) ובסוף פרק ההרטבה (בתרשים האמצעי), וגם את התקדמות "גל ההתנקזות הפנימית" (בתרשים התחתון). רואים את ההעדפה הקלה בזרימה למטה (סקאלות המרחק האנכי והאופקי שונות). ניתן לראות גם את הפירוסים (ההפרשיים) השונים באמצע פרק ההרטבה (למעלה) ובאמצע פרק ההתנקזות (למטה), עם תכולות רטיבות מעט גבוהות יותר ליד הטפטפת בפרק ההרטבה ותכולות רטיבות מעט גבוהות יותר רחוק מהטפטפת בפרק ההתנקזות. זאת היא ההתנהגות הצפויה על-פי הפתרון האנליטי למשוואת הזרימה הליניארית.



בטבלה למטה מרכזים מדדי הקרקע שאופיינו בבית הרשת 39 בחוות הבשור באמצעות 10 הטנסיומטרים שהיו טמונים בשלושה עומקים במיקומים המצויינים בתרשים הסכימטי ושהורטבו על-ידי טפטפות בספיקה של 1.6 ל/ש במחזורים של 4,2 ו-8 שעות. בטבלה מופיעים המדדים שנקבעו בשלב המשרעת – הסת הזמן, הראשון (AS) ואחרי שלב האופטימיזציה הנוסף (LM), וניתן לראות שערכי הפרמטרים לא השתנו בהרבה בשלב השני ושכחם ריבועי הסטיות (SSD) לא קטן בצורה משמעותית. השונות בערכים של מדדי הקרקע שנאמדו מצביעה כנראה על שונות מרחבית אופקית בתכונות הקרקע בבית הרשת ללא השתנות סיסטמטית בחתך בעומקים של 0 עד 35 ס"מ. השינוי הסיסטמטי היחידי שנראה הוא ירידה בערך של k עם התארכות מחזור ההרטבה (טנסיומטרים 1 עד 4, בכל טנסיומטר 2 או 3 אורכי מחזור).

Table 1. Experimental conditions and results of the cyclic irrigation tests (t_c is the cycle period and t_{max} is the point at which the maximum water potential appear for the first time). Soil parameters (coefficient α , hydraulic conductivity at saturation K_s , and coefficient k) were determined from the measured pressure-head variations by using the periodic solution for cyclic-step inputs as estimated by the amplitude-shift procedure (AS) and refined with the Levenberg-Marquardt algorithm (LM) and the respective sum of squared deviations (SSD).

Tensiometer no.	Depth	t_c	t_{max}	α		K_s		k		SSD	
				AS	LM	AS	LM	AS	LM	AS	LM
		cm	h	cm ⁻¹		cm h ⁻¹					
Southern part of screen house											
1	15	2	1.072	0.058	0.052	0.748	0.655	10.020	9.001	0.723	0.614
		4	2.082	0.050	0.046	0.679	0.600	6.576	6.265	1.810	1.629
		8	4.068	0.053	0.057	0.796	0.858	6.662	6.913	2.874	2.732
2	35	4	2.560	0.031	0.031	0.577	0.620	5.558	5.659	0.662	0.644
		8	4.696	0.029	0.029	0.511	0.491	3.703	3.651	1.119	1.117
3	15	2	1.079	0.046	0.044	0.898	0.830	7.643	7.437	1.101	0.782
		4	2.082	0.053	0.051	1.218	1.135	6.881	6.621	1.245	1.229
		8	4.010	0.047	0.042	1.069	0.839	4.473	4.123	2.079	1.701
4	35	4	2.466	0.054	0.047	1.698	1.142	10.290	9.504	1.128	0.964
		8	4.828	0.046	0.049	1.226	1.520	5.255	4.950	0.798	0.748
Northern part of screen house											
5	15	8	4.072	0.072	0.063	3.380	2.490	8.274	7.404	1.773	1.691
6	25	8	4.248	0.067	0.074	2.801	3.903	8.298	9.061	1.451	1.403
7	35	8	4.612	0.062	0.061	3.575	3.327	7.719	7.684	0.787	0.769
8	15	8	4.064	0.066	0.062	2.797	2.424	8.401	8.192	1.894	1.789
9	25	8	4.132	0.078	0.076	4.456	4.464	14.180	13.880	1.619	1.515
10	35	8	4.532	0.068	0.068	3.681	3.777	9.048	9.125	1.062	1.050



בתרשים משמאל יש ריכוז של הערכים של α ו- K_{sat} (שהם תכונות קבועות של הקרקע, לעומת k , שתלוי גם בתנאי השפה שקובעים את משטר רטיבותה) שנאמדו, מוצגים כ- $\alpha = f(K_{sat})$ (כמו בתרשים הראשון של הדו"ח, אבל הפעם בשתי סקלות לינאריות). הקו הוא הקשר: $\alpha = 0.0435 \text{ h cm}^{-2} K_{sat}^{1/2}$ עם K_{sat} ביחידות של cm h^{-1} ו- α ביחידות של cm^{-1} (Communar and Friedman, 2010a). ניתן לכתוב אותו גם

בצורה לא-מימדית: $\alpha/k_s^{1/2} (\sigma/\rho g) = 59.1$ כאשר $k_s (= K_s \mu/\rho g)$ היא חדירות הקרקע (σ - מתח פנים, ρ - צפיפות הנוזל, g - קבוע הגרביטציה), $(\sigma/\rho g)^{1/2}$ הוא האורך הקפילרי של הנוזל (כ-3 מ"מ עבור מים-אוויר) והקבוע 59.1 מתאים לתכונות המים ב- 25°C . נראה שהקשר שהותאם לנתונים מהספרות מתאים בצורה סבירה למדידות שבוצעו בבית הרשת. תחום ההשתנות של סדר גודל אחד של הערכים של המוליכות ההידראולית ברוויה, K_{sat} , בין 0.5 ל-5 ס"מ לשעה מצביע על שונות אופקית גדולה של הקרקע בבית הרשת.

במקביל למדידות ההרטבה המחזורית הערכנו את מדדי הקרקע בשתי שיטות נוספות:

1. עשינו ניסוי החדרה בטבעת כפולה בשתי חזרות בשוליים המערביים של בית הרשת ועל-פי קצב החידור הסופי נקבעו ערכי K_{sat} של 10.3 ו-11.5 ס"מ לשעה (ממוצע של 10.9 ס"מ לשעה).
2. השתמשנו בשיטת רדיוס האיגום של Shani et al. (1987) עם טפטפות ב-8 ספיקות של 3 עד 60 ל/ש בשתי חזרות בשוליים המערביים של בית הרשת. ניתוח של התוצאות של רדיוס האיגום כתלות בספיקת הטפטפת עם הפתרון של Wooding's (1968) לזרימה מדיסקה רוויה בפני הקרקע נתן את הערכים: $K_{sat} = 10.9 \text{ cm/h}$, $\alpha = 0.035 \text{ cm}^{-1}$ ועם שימוש בפיתרון של Raat's (1971) התקבלו הערכים: $K_{sat} = 5.4 \text{ cm/h}$, $\alpha = 0.037 \text{ cm}^{-1}$.

4. דיון

ככלל נראה שהשיטה המוצעת אמינה וישימה ושניתן להסתפק בטנסיומטרים "מסחריים" שקוראים את העומד המטריצי ברזולוציה של כ-5 ס"מ אחת לכ-15 דקות.

הקביעה האנליטית של α ו- k מתוך מדידת הסת הזמן ומשרעת העומד המטריצי, בשלב ההופכי הראשון, הוכיחה את עצמה כיעילה במדידות שנעשו בקרקע של חוות הבשור, והשלב השני לא שיפר את אמידת מדדי הקרקע בצורה משמעותית.

היתרון העיקרי של שיטת רדיוס האיגום הוא פשטות הביצוע שלה, והחסרונות העיקריים שלה הם: אמידת K_{sat} של הקרקע שמאפיינת את הקרקע במצב רוויה אבל לא של k שמאפיינת את הקרקע בתכולות רטיבות רלוונטיות לשדות מושקים, אשר בקרקעות חוליות הן נמוכות בהרבה מתכולת הרטיבות ברוויה, והרגישות הגבוהה לתכונות הקרקע בפני הקרקע ולא בנפח הרלוונטי שבין הטפטפת לתחתית בית השורשים. השיטה המוצעת עדיפה בשני היבטים הללו והיא עדיין מספיק פשוטה ומעשית לביצוע בעזרת טנסיומטרים

מסחריים עם רישום רציף. בשיטה המוצעת נתקבלו ערכים נמוכים בצורה משמעותית של K_{sat} לעומת הערכים שנתקבלו בשיטת האיגום, והסיבה העיקרית לכך היא כנראה הרגישות הגבוהה של שיטת האיגום לתכונות הקרקע קרוב לפני השטח לעומת השיטה המוצעת שאומדת את מדדי הקרקע שבין הטפטפת לטנסיומטר – מה שמהווה יתרון. הערכים הנמוכים שהתקבלו בשיטה המוצעת מסבירים טוב יותר את התנועה האיטית יחסית של המים בקרקע הבשור ואת תגובת הצמחים הדומה בטיפולים של השקיה יומית והשקיה אחת ליומיים, למשל, שהתקבלה בניסויי ההשקיה (קומונר וחובריו, 2010).

שיטת אמידת מדדי הקרקע המוצעת (ותוכנת DIDAS) מתעלמים מערך פריצת האוויר של הקרקע, h_e . בהתחשב בערך פריצת האוויר, פונקציית המוליכות הידראולית היא $K = K_{sat}e^{\alpha(h-h_e)}$ (ולא $K = K_{sat}e^{\alpha h}$) ששמשה לפיתוח הפתרון המתמטי). כלומר, המוליכות ההידראולית ברוויה שנאמדת בהליך ההופכי (בהנחה ש- $h_e = 0$) היא למעשה לא הערך האמיתי, K_{sat} , אלא ערך גבוה יותר, $K_{sat}e^{-\alpha h_e}$, שגבוה בפקטור $e^{-\alpha h_e}$ מ- K_{sat} האמיתי של הקרקע (אם נניח, למשל, $h_e = -15\text{cm}$ ו- $\alpha = 0.05\text{ cm}^{-1}$ עבור קרקע הבשור, הפקטור הוא 2.1). עקרונית, יכולנו לאמוד גם את h_e בהליך ההופכי, אבל העדפנו לא לעשות זאת, מפני שלא הערך של h_e ואפילו לא של K_{sat} דרושים כאשר משתמשים ב-DIDAS לתכנון ולתזמון השקיה בטפטוף. ערכי הפרמטרים היחידים שדרושים הם α ו- k . בדומה לטיעון על חוסר החשיבות של h_e , גם הקריאה (הכילול) האבסולוטית של הטנסיומטר היא משנית, וניתן להסתפק במדידה מדויקת של משרעת העומד המטריצי ($h_{min} - h_{max}$), שכן α ו- k נקבעים רק מתוך המשרעת והסת הזמן הנמדדים. ככלל, המשרעת של העומד המטריצי הנמדדת בשיטה המוצעת גדלה עם ספיקת הטפטפת ועם משך המחזור ויורדת עם העומק של הטנסיומטר, כשהשינוי בעומד המטריצי הנמוך (היבש) גדול יותר לעומת השינוי בעומד המטריצי הגבוה (הרטוב). הסת הזמן של מקסימום (/מינימום) העומד המטריצי גדל עם עומק הטנסיומטר. מכאן שצריך לבחור שילוב של ספיקת טפטפת, אורך מחזור ועומק טנסיומטר שיניבו משרעת והסת זמן מהימנים בהתאם לרזולוצייה של קריאת העומד ולתדירות הקריאות. שיקול נוסף בבחירת עומק הטנסיומטר הוא עומק רלוונטי למערכת השורשים של הגידול. מזכיר כאן גם את המגמה שנצפתה של ירידה בערך של k עם התארכות מחזור ההרטבה. אי לכך כדאי לבצע ניסויי הרטבה מחזורית דומים בקרקעות נוספות כדי לאפיין שילובים מיטביים שיוצרים תגובות $h(t)$ מדידות בטנסיומטרים ומשטרי רטיבות דומים לאלו שבשדות מושקים, כתלות בתכונות הקרקע. יתכן שכדאי יהיה לנסות גם מתודולוגיה של שימוש בספיקות בטפטפות שונות ולראות את השפעת הספיקה על הערך של k כדי שיהיה אפשר להשליך על ערך ה- k שמתאים לאפיין את הקרקע במשטר הרטיבות של ההשקיה בטפטוף, כשבדרך-כלל משך ההשקיה פחות בהרבה מ-50% מאורך מחזור ההשקיה.

5. פרסום מדעי

Communar, G and Friedman, S.P. 2014. Determination of soil hydraulic parameters with cyclic irrigation tests. *Vadose Zone J.*, doi: 10.2136/vzj2013.09.168.

6. רשימת ספרות

קומונר, ג., נפתליב, ב. ו.ש. פרידמן (2009). "פיתוח גישה חדשה ותוכנה לתכנון מערכות השקיה בטפטוף" - הצעת מחקר מוגשת למדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר (301-0655).

- קומונר, ג., פרידמן, ש., יחזקאל, ח. וד. צהר (2010). "פיתוח גישה חדשה לקביעת ממשק מיטבי בהשקיה בטפטוף במים שפירים" - הצעת מחקר מוגשת למדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר (301-0691).
- פרידמן, ש., וג. קומונר (2012). "הרחבה של מודל זרימה וקליטת מים לצבירת והדחת מלחים, ויישומו לתכנון ממשק השקיה בטפטוף" - הצעת מחקר מוגשת למדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר (304-0508).
- Bochkanov, S. 1999. ALGLIB library (<http://www.alglib.net>).
- Coelho, F.E., and D. Or. 1997. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1331-1341.
- Communar, G. and Friedman, S.P. 2010a. Relative water uptake rate as a criterion of trickle irrigation systems design: 1. Coupled source-sink steady water flow model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:1493-1508.
- Communar, G. and Friedman, S.P. 2010b. Relative water uptake rate as a criterion of trickle irrigation systems design: 2. Surface trickle irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:1509-1517.
- Communar, G. and Friedman, S.P. 2011. General solution for steady infiltration and water uptake in strip-shaped, rectangular and cylindrical domains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:2085–2094.
- Communar, G. and Friedman, S.P. 2012a. Generalized coupled source-sink model for evaluating transient water uptake in trickle irrigation: I. Model formulation for soils with vertical heterogeneity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76:779-790.
- Communar, G. and Friedman, S.P. 2012b. Generalized coupled source-sink model for evaluating transient water uptake in trickle irrigation: II. Illustrative irrigation scheduling scenarios. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76:791-805.
- Communar, G. and Friedman, S.P. 2013. Unsteady infiltration from point and line sources in laterally confined domains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 77:1529-1541.
- Communar, G. and Friedman, S.P. 2014. Determination of soil hydraulic parameters with cyclic irrigation tests. *Vadose Zone J.*, doi: 10.2136/vzj2013.09.168.
- Communar, G., S.P. Friedman, and A. Gamliel. DIDAS – A software package for drip irrigation design and scheduling. (<http://app.agri.gov.il/didas>).
- Lazarovitch, N., Ben-Gal, A., Simunek, J., and Shani, U. 2007. Uniqueness of soil hydraulic parameters determined by a combined Wooding inverse approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 860-865.
- Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Ind. Appl. Math.* 11:431–441.
- Raats, P.A.C. 1971. Steady infiltration from point sources, cavities and basins. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35:689-694.
- Shani U, Hanks R. J., Bresler E. and D.A. Oliveira, 1987. Field method for estimating hydraulic conductivity and matric potential-water content relations. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 51:298-302.
- Smettem, K.R.J., and Clothier, B.E. 1989. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disk permeameters. *J. Soi. Sci.* 40:563-568.
- Warrick, A.W. 1974. Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38:383–386.

7. סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה

מטרות המחקר (לאחר שקוצץ לשנה אחת) היו: 1. פיתוח של פתרונות מתמטיים עבור חידור ממקור נקודתי מחזורי בודד ופיתוח ההליך ההופכי לקביעת מדדי הקרקע מתוך מדידות רטיבות בעומק אחד מתחת למקור; 2. מיסוד המתודולוגיה של השיטה בכמה עומקים, תחומי רטיבות ואורכים של מחזורי השקיה; 3. הטמעה של ההליך ההופכי בתוכנת DIDAS.

אלו ממטרות המחקר הושגו בעבודת המחקר בנוכחית?

כל המטרות הושגו במלואן.

עיקרי התוצאות

הפעילות בשנת המחקר היחידה כללה את פיתוח הפתרונות המתמטיים, פיתוח ההליך ההופכי והטמעתו ב-DIDAS וניסויי הרטבה מחזרות בחוות הבשור. ניסויי הרטבה המחזרות הראו, כצפוי, שהמשרעת של העומד המטריצי הנמדד בשיטה המוצעת גדלה עם ספיקת הטפטפת ועם משך המחזור ויורדת עם העומק של הטנסיומטר, כשהשינוי בעומד המטריצי הנמוך (היבש) גדול יותר לעומת השינוי בעומד המטריצי הגבוה (הרטוב), ושהסת הזמן של מקסימום (/מינימום) העומד המטריצי גדל עם עומק הטנסיומטר. נתקבלה התאמה טובה בין התוצאות המדודות לפתרון האנליטי של משוואת הזרימה הליניארית.

מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?

ככלל נראה שהשיטה המוצעת אמינה וישימה ושניתן להסתפק בטנסיומטרים "מסחריים" שקוראים את העומד המטריצי ברזולוציה של כ-5 ס"מ אחת לכ-15 דקות. השיטה המוצעת עדיפה על שיטת רדיוס האיגום. מטרות המחקר לתקופת הדו"ח הושגו במלואן.

בעיות שנתרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך

המחקר לגביהן, האם יושגו מטרות המחקר בתקופה שנתרה לביצוע תוכנית המחקר?

כדי להשתמש בשיטה המוצעת צריך לבחור שילוב של ספיקת טפטפת, אורך מחזור ועומק טנסיומטר שיניבו משרעת והסת זמן מהימנים בהתאם לרזולוציה של קריאת העומד ולתדירות הקריאות. שיקול נוסף בבחירת עומק הטנסיומטר הוא עומק רלוונטי למערכת השורשים של הגידול. כדאי לבצע ניסויי הרטבה מחזורית נוספים בקרקעות שונות כדי לאפיין שילובים מיטביים שיוצרים תגובות $h(t)$ מדידות בטנסיומטרים ומשטרי רטיבות דומים לאלו שבשדות מושקים, כתלות בתכונות הקרקע. יתכן שכדאי יהיה לנסות גם מתודולוגיה של שימוש בספיקות בטפטפות שונות ולראות את השפעת הספיקה על הערך של k כדי שיהיה אפשר להשליך על ערך ה- k שמתאים לאפיין את הקרקע במשטר הרטיבות של ההשקיה בטפטוף, כשבדרך-כלל משך ההשקיה פחות בהרבה מ-50% מאורך מחזור ההשקיה. כדאי גם לברר מהי הסיבה לירידה בערך של k שנאמד עם התארכות מחזור ההרטבה.

הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב - ציטוט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי;

Communar, G and Friedman, S.P. 2014. Determination of soil hydraulic parameters with cyclic irrigation tests. *Vadose Zone J.*, doi: 10.2136/vzj2013.09.168.

פטנטים - יש לציין שם ומס' פטנט; **הרצאות ימי עיון** - יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.

פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: (סמן אחת מהאופציות)

רק בספריות

ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)

חסוי - לא לפרסם

האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחית? כן* - לא -

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