

פיתוח גישה חדשה ותוכנה לתכנון מערכות השקיה בטפטוף

Development of new approach and software for design of drip irrigation

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

גריגורי קומונר המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250

שמוליק פרידמן המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250

בוריס נפתלייב המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250

Gregory Communar, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail:

communar@agri.gov.il

Shmulik Friedman, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail:

vwsfried@agri.gov.il

Boris Naftaliev, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250.

יולי 2013

אב תשע"ג

הבעת תודה:

היה שותף למחקר גם:

אלון גמליאל, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא



חתימת החוקר

תוכן עניינים

1	תקציר.....	2
2	תמצית הרקע המדעי.....	3
3	מטרות המחקר.....	4
4	שיטות ומהלך העבודה.....	4
4.1	עקרונות המודל לתיאור זרימת מים תמידית עם מקור-מבלע מצומדים.....	4
5	תוצאות ודין.....	5
5.1	מקור מבלע מצומדים (צמח וטפטפת בודדים):.....	5
5.2	סופרפוזיציה של צמחים, טפטפות ושלוחות.....	6
5.3	טפטוף טמון.....	9
5.4	זרימה וקליטה תמידיים בגליל כלוא.....	11
5.5	זרימה וקליטה תמידיים במנסרות כלואות.....	14
5.6	תוכנת DIDAS (Drip Irrigation Design and Scheduling).....	15
6	מסקנות.....	17
7	רשימת ספרות.....	17
8	סיכום עם שאלות מנחות.....	19

1. תקציר

1. הצגת הבעיה

התכנון של השקיה בטפטוף כולל את משתני מערכת ההשקיה: המרחק בין שלוחות ובין הטפטפות לאורך השלוחה וספיקת הטפטפת, ואת ממשק ההשקיה, הכולל את כמויות המים, תזמון ותכיפות ההשקיות שקובעת את משך ההשקיה. הוא צריך לקחת בחשבון את דגם ההרטבה של המים בקרקע והגיאומטריה של בית השורשים, שקובעים את יעילות קליטת המים על ידי הצמח, ושיקולים נוספים הקשורים למליחות, הזנה, אוורור, מחלות קרקע והיבטים אגרוטכניים אחרים. במחקר הנוכחי פיתחנו כלי עזר לתכנון מערכת ההשקיה, דהיינו לקביעת המרחקים בין השלוחות והטפטפות ובין הצמחים.

2. מטרת המחקר

1. פיתוח גישה חדשה לתכנון מערכת השקיה בטפטוף המתבססת על עיקרון חדש של קליטת מים יחסית (יעילות ניצול המים) גבוהה מערך סף; 2. פיתוח תכנה ידידותית למשתמש שתחשב את יעילות ניצול המים ופירוס הרטיבות עבור תרחישים שונים של הרטבה ממקור נקודתי וקווי וגיאומטריות שונות של נפח השורשים הפעילים; 3. איסוף מסד נתונים לפרמטרים הדרושים עבור מגוון של גידולים וקרקעות חקלאיות ברחבי הארץ.

3. שיטות העבודה

הפעילות בשנת המחקר הראשונה כללה את פיתוח מודל הזרימה התמידי ויישומו עבור תרחישים עם גיאומטריה שונה של מערכי הטפטפות והצמחים בשדה תוך ניצול עיקרון הסופרפוזיציה לתיאור הפעולה המשולבת של המקורות (טפטפות) והמבלעים (מערכות השורשים). בשנת המחקר השנייה: (1) פיתחנו פתרונות למודל הזרימה התמידי עבור תרחישים של מקורות נקודתיים או קוויים בתחום זרימה כלוא (גליל אנכי או מנסרה עם דפנות אנכיים), המייצג תא זרימה של מערך הצמחים והטפטפות בשדה; (2) הרחבנו את המודל התמידי למודל זרימה תמידי לכאורה המתייחס למקורות מים תמידיים, למבלעים בעוצמה שתלויה בזמן על-פי מהלך יומי של התנגדות (פיוניות) לקליטת מים ולהתאדות מפני הקרקע שתלויה בזמן על-פי מהלך אטמוספרי יומי; (3) כתבנו תוכנית "ידידותית למשתמש" בשפת Delphi שכללה את פתרונות הזרימה התמידיים והתמידיים לכאורה. במהלך השנה השלישית גייסנו מתכנת מקצועי במשרה חלקית (אלון גמליאל) וכתבנו מחדש את התוכנה בצורה יותר מקצועית ועם תוספות שנוגעות לתזמון ההשקיה על בסיס מודל זרימה וקליטה עתיים. פעילות זאת עדיין נמשכת.

4. תוצאות עיקריות

התוכנה, (Drip Irrigation Design and Scheduling) DIDAS, מתפקדת בצורה טובה, מציגה את תוצאות החישובים בצורה גרפית ומייצאת ל-Excel טבלאות עם התוצאות המחושבות. בעזרת התוכנה הודגם כיצד גדל קצב קליטת המים היחסי עם הגידול ברדיוס של מערכת השורשים ועם המעבר מקרקע גסת מרקם לקרקע דקת מרקם, וכיצד הוא יורד עם הגדלת המרחק בין הטפטפות ובין השלוחות. התוכנה מטפלת בהצבות שונות של טפטפות צמודות לכל צמח וטפטפות או צמחים נוספים בין צמחים/טפטפות. כאשר יש טפטפות נוספות בין צמחים קליטת המים נמוכה עבור מערכות שורשים קטנות, אבל כאשר מערכות השורשים גדלות מתקבלים ערכים דומים לאלו שבתרחיש של צמח ליד טפטפת. בתרחיש של צמח נוסף בין טפטפות קליטת המים של הצמחים הקרובים לטפטפת תמיד גבוהה יותר מאלו הרחוקים מהטפטפת, כשההבדל הולך וקטן כאשר מערכות השורשים גדלות. התוכנה מדגימה את ההשפעה של ההתאדות מפני הקרקע להורדת קצב קליטת המים היחסי ובמקרה של טפטוף טמון הודגמה האינטראקציה בין עומק ההטמנה לבין עצמת ההתאדות הפוטנציאלית בקביעת קצב קליטת המים היחסי.

5. מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות

בעוד חודשים ספורים נעלה לאתר המכון למדעי הקרקע המים וסביבה של מנהל המחקר החקלאי

גרסה להורדה של DIDAS (<http://www.agri.gov.il/en/units/institutes/6.aspx>)

2. תמצית הרקע המדעי

שיטת ההשקיה המקובלת ביותר בישראל בגידולים חד-שנתיים ובמטעים היא טפטוף, בעיקר עילי. ההשקיה בטפטוף צפויה להמשיך ולהתרחב כשמחיר המים יעלה וכשיותר מים שפירים להשקיה יומרו בקולחין שמתורים להשקיה רק בטפטוף. ההשקיה בטפטוף מאפשרת הספקה מתוזמנת של כמויות מים דרושות לנפח קרקע מצומצם ועל ידי כך צמצום אובדני מים על ידי התאדות וחלחול עמוק (Nakayama and Bucks, 1986; Dasberg and Or, 1999).

התכנון של השקיה בטפטוף כולל את משתני מערכת ההשקיה: מרחק בין שלוחות ובין הטפטפות לאורך השלוחה וספיקת הטפטפת ואת ממשק ההשקיה, הכולל את כמויות המים (מ"מ ליום), תזמון ותכיפות ההשקיות שקובעת את משך ההשקיה. הוא צריך לקחת בחשבון את דגם ההרטבה של המים בקרקע והגיאומטריה של בית השורשים, שקובעים את יעילות קליטת המים על ידי הצמח, ושיקולים נוספים הקשורים למליחות, הזנה, אוורור, מחלות קרקע והיבטים אגרוטכניים אחרים. עיקרו של המחקר המוצע הוא פיתוח כלי עזר לתכנון הגיאומטריה של מערכות השקיה בטפטוף, דהיינו לקביעת המרחקים המיטביים בין השלוחות ובין הטפטפות לאורך השלוחה.

מחקרים רבים, ניסויים וחישוביים, עסקו בפיזור המים ממקורות נקודתיים וקוויים ובקליטת המים על ידי הצמח. לעומת זאת, הועלו הצעות ספורות לתכנון מערכת ההשקיה על-פי התהליכים הללו. גישות קודמות לקביעת המרחקים המיטביים בין הטפטפות, בין שהתייחסו לבעיית התכנון באופן ישיר ובין שבאופן עקיף, הגן אמפיריות – כלומר מבוססות על מבחנים פרלימינאריים או ניסיון נצבר (Goldberg and Shmuelli, 1971; Tsipori and Shimshi, 1979; Shani, 1991;) (Colombo and Or, 2006; Ben-Asher et al., 1986; Schwartzman and Zur, 1986; Zur, 1996; Coelho and Or, 1997; Thorburn et al., 2003; Cook et al., 2003; Lazarovitch et al., 2007a), או בפתרונות מדויקים (Bresler, 1978; Amoozegar-Fard et al., 1984) לבעיית זרימת המים ממקורות נקודתיים או קוויים.

Brelser (1978) הציע להשתמש בפתרון של Wooding (1968) לזרימה תמידית מדיסקה דקה בפני השטח, המדמה את איזור האיגום מסביב לטפטפת, ולקבוע את השילוב של ספיקת הטפטפת והמרחק בין הטפטפות לאורך השורה עבור קרקע נתונה על-פי קריטריון של **ערך סף התלוי בגידול לעומד הקפילרי (/מצב הרטיבות) במחצית המרחק בין הטפטפות בפני השטח**. מגבלות השיטה העיקריות הן שהיא לא לוקחת בחשבון קליטת מים ומתייחסת לערך סף שרירותי ולמיקום לא רלוונטי באמצע המרחק בין הטפטפות. על-פי גישה אחרת, מציאותית יותר, של Amoozegar-Fard et al. (1984) פותרים את בעיית הזרימה התמידית ממקור המים ומניחים קליטה של מים בקצב קבוע וידוע מראש בתוך נפח שורשים עם גיאומטריה פשוטה כמו גליל אנכי או השתנות חד-מימדית עם העומק, כשהקריטריון הוא שוב עומד קפילרי גבוה מערך סף במקום כלשהו בבית השורשים. עבור קרקע בה יורדת המוליכות ההידראולית עם העומד הקפילרי בצורה מעריכית (Gardner, 1958) מתקבל פתרון אנליטי ו-Amoozegar-Fard et al. (1984) שרטטו נומוגרמות של הפתרון כבסיס לקביעת משתני התכנון.

במסגרת המחקר הנוכחי הוצעה גישה חדשה לתכנון מערכת ההשקיה המתבססת על עיקרון שונה של חישוב קצב קליטת המים היחסי (יעילות ניצול המים) במערכת של מקורות (טפטפות) ומבלעים (מערכות שורשים), כשקליטת המים הפוטנציאלית אינה נתונה אלא מחושבת (Communar and Friedman, 2010a). ההבדל העיקרי בין הגישה שלנו לגישה של Amoozegar-Fard et al. (1984) הוא שבעוד שהם מניחים קצב קליטת מים ידוע מראש ומחשבים את מצב הרטיבות (/פוטנציאל המים, העומד הקפילרי) בבית השורשים, אנחנו מציעים מהלך הפוך: להניח מצב רטיבות (/פוטנציאל מים) נתון בבית השורשים ולחשב את קצב קליטת המים. לצרכים של תכנון מערכת ההשקיה אנחנו מציעים להתייחס למצב

של יניקה מקסימאלית על ידי צמח – כלומר לחשב את קליטת המים הפוטנציאלית המקסימאלית על ידי צמח ששרוי בתנאים אידאליים וקולט מים בקצב שנקבע רק על ידי היכולת של הקרקע להוליך מים מהמקורות (טפטפות) אל המבלעים (מערכות השורשים). אנחנו טוענים שקליטת מים עדיפה על מצב רטיבות הקרקע כקריטריון לתכנון מערכת ההשקיה. במילים אחרות אנחנו טוענים שתפקידה של הקרקע, בתנאים של מגבלות גיאומטריות ותחרות בין קליטת מים וכוחות כבידה וקפילריות, הוא לא להירטב אלא להוליך מים מהטפטפות אל השורשים.

בשלב המחקר הראשוניים הדגמנו כיצד ניתן להשתמש בעיקרון החדש הזה כדי לאמוד את קצב קליטת המים היחסי בתרחישים שונים המתארים השקיה בטפטוף עילי (Communar and Friedman, 2010b) ובטפטוף טמון (Communar and Friedman, 2010c).

3. מטרת המחקר

1. פיתוח גישה חדשה לתכנון מערכת השקיה בטפטוף המתבססת על עיקרון חדש של קצב קליטת מים יחסי (יעילות ניצול המים) גבוה מערך סף.
2. פיתוח תכנה ידידותית למשתמש שתחשב את יעילות ניצול המים ופירוס הרטיבות עבור תרחישים שונים של הרטבה ממקורות נקודתיים וקווים וגיאומטריות שונות של נפחי השורשים הפעילים.
3. איסוף מסד נתונים של הפרמטרים הדרושים עבור מגוון של קרקעות חקלאיות וגידולים ברחבי הארץ.

4. שיטות ומהלך העבודה

הפעילות בשנת המחקר הראשונה כללה את פיתוח מודל הזרימה התמידי ויישומו עבור תרחישים עם גיאומטריה שונה של מערכי הטפטפות והצמחים בשדה תוך ניצול עיקרון הסופרפוזיציה לתיאור הפעולה המשולבת של המקורות (טפטפות) והמבלעים (מערכות השורשים).

הפעילות בשנת המחקר השנייה כללה את: (1) פיתוח פתרונות למודל הזרימה התמידי עבור תרחישים של מקורות נקודתיים או קווים בתחום זרימה כלוא (גליל אנכי או מנסרה עם דפנות אנכיים ללא זרימה אופקית), המייצג תא זרימה מייצג של מערך הצמחים והטפטפות בשדה; (2) הרחבת המודל התמידי למודל זרימה תמידי לכאורה (quasi steady) המתייחס למקורות (טפטפות) מים תמידיים, למבלעים (שורשי הצמחים) בעוצמה שתלויה בזמן על-פי מהלך יומי של התנגדות (פיוניות) לקליטת מים ולהתאדות מפני הקרקע שתלויה בזמן על-פי מהלך אטמוספרי יומי; (3) כתיבת תוכנית "ידידותית למשתמש" בשפת Delphi הכוללת (בינתיים) את פתרונות הזרימה התמידיים והתמידיים לכאורה.

במהלך השנה השלישית גייסנו מתכנת מקצועי במשרה חלקית (אלון גמליאל) וכתבנו מחדש את התוכנה בצורה יותר מקצועית ועם תוספות שנוגעות לתזמון ההשקיה על בסיס מודל זרימה וקליטה עתיים. פעילות זאת עדיין נמשכת.

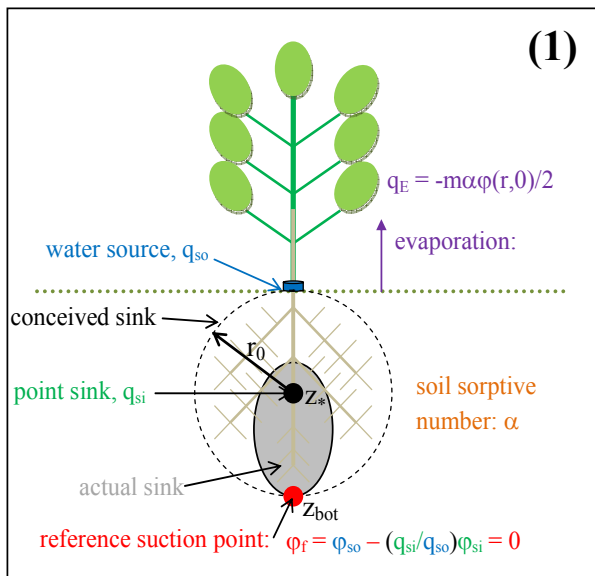
4.1 עקרונות המודל לתיאור זרימת מים תמידית עם מקור-מבלע מצומדים

קליטת המים היחסית המקסימאלית האפשרית תחושב בעזרת פתרון אנליטי תחת ההנחות הבאות:

1. זרימה תמידית

2. קרקע אחידה, איזותרופית ו"מעריכית": $K = K_{sat} e^{-\alpha\psi}$

3. ליניארזיציה של בעיית הזרימה בעזרת ההתמרה של קירכהוף: $\phi = \int_{\psi_d}^{\psi} K(\psi) d\psi = \frac{K(\psi) - K(\psi_d)}{\alpha}$



4. הפתרון לפרוס הרטיבות במרחב ולקליטת המים היחסית הינו סופר-פוזיציה של הפתרון היסודי לפיזור מים ממקורות נקודתיים או קווים: מקורות חיוביים המייצגים את הטפטפות בפני הקרקע ומבלעים שליליים המייצגים את נפחי מערכות השורשים.

5. קליטת המים המקסימאלית האפשרית תחושב בהנחה של יניקה מקסימאלית בתחתית נפח קרקע עם שורשים בעל צורה גיאומטרית פשוטה (כדור, גליל אופקי) שגודלו ועומקו נתונים ומרכזו מתלכד עם מיקום המבלע הנקודתי/קווי (תרשים 1 משמאל).

6. ההתאדות מפני השטח מתכונתית למוליכות ההידראולית, כלומר מקסימאלית ליד הטפטפת ופוחתת עם המחק ממנה.

5. תוצאות ודין

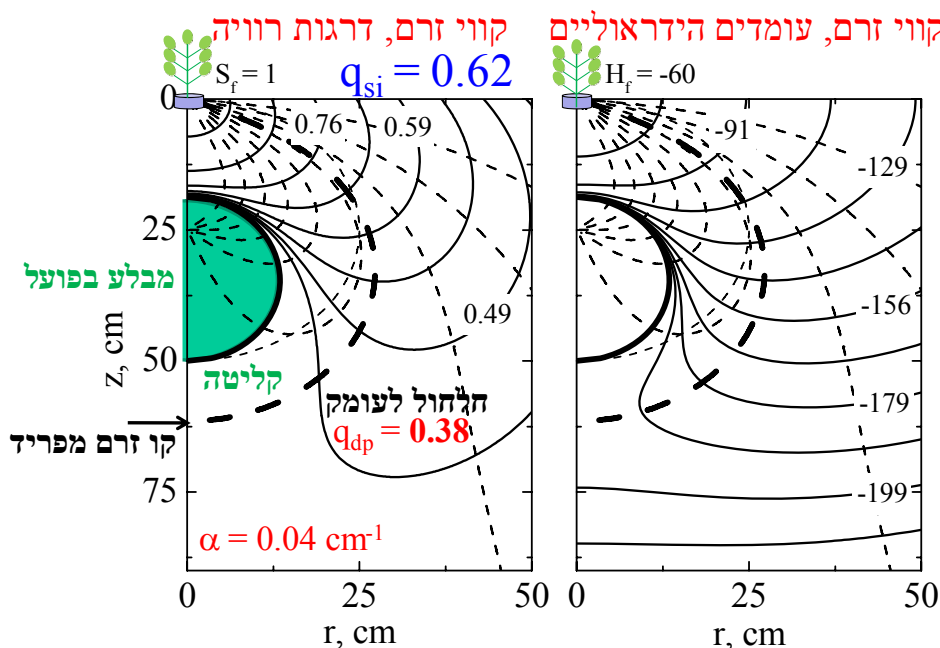
5.1 מקור מבלע מצומדים (צמח וטפטפת בודדים):

בתרשים 2 למטה רואים את דגם ההרטבה כתוצאה מפעולה של טפטפת בספיקה תמידית של 2 ל/ש בפני השטח של קרקע ממרקם סייני (בינוני) ומערכת שורשים כדורית ברדיוס של 25 ס"מ עם מבלע נקודתי במרכזה. באיור השמאלי רואים את דרגות הרוויה (קווים רציפים) ואת קווי הזרם (קווים מקוטעים) ובתרשים הימני גם את הקווים של העומד ההידראולי הכולל (קווים רציפים). בהדמיה הנוכחית 62% ממי ההשקיה נקלטים על ידי מערכת השורשים בעוד 38% מחלחלים לעומק, כאשר נפח הקרקע ממנו נקלטים המים, הנפח החשוב לצרכי תכנון, תחום על ידי קו הזרם המסומן בקו מקוטע עבה. נפח הקרקע הצבוע בירוק מתאר את המבלע בפועל בו מתקיים "יובש אינסופי" ואשר אין בו פתרון פסיקלי לבעיית הזרימה.

בתרשים הבא (3) מודגמת ההשפעה של סוג הקרקע על דגם הזרימה. מימין הקרקע עם מרקם בינוני (מהתרשים הקודם) ומשמאל קרקע גסת-מרקם, בה דגם ההרטבה יותר אנכי, בשל ההשפעה הגדולה יותר של הכבידה, ודרגות הרוויה נמוכות יותר. הקליטה היחסית בקרקע זאת היא רק 52%.

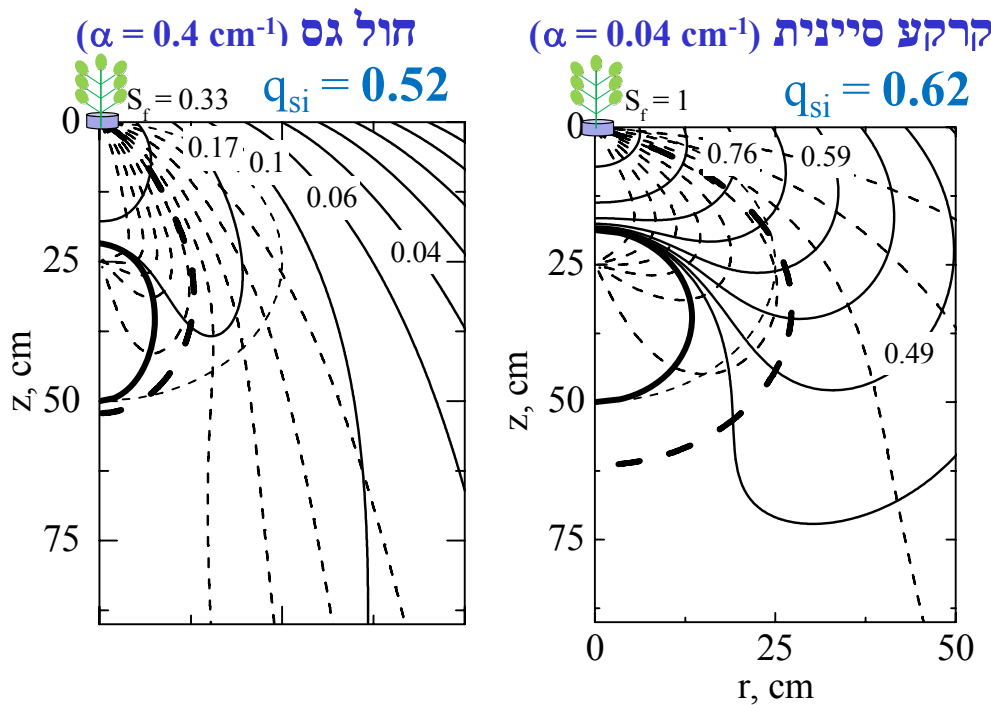
דגם זרימה: קרקע סיינית ($\alpha^{-1} = 25\text{cm}$), טפטוף 2 ל/ש

(2)



השפעת סוג הקרקע

(3)



השפעת ההתאדות על דגם הזרימה בקרקע סיינית עבור תרחיש של התאדות פוטנציאלית גבוהה ($m = 2$, מתאים למצב בו מחצית מהמים המיושמים מתאדים מטפטפת בפני הקרקע, ללא צמח) מודגמת באיור מספר 4. במצב זה (התרשים השמאלי) 43% מהמים מתאדים מפני הקרקע ושיעור קליטת המים היחסי פוחת מ-62% (ללא התאדות, תרשים ימני) ל-40%, כש-17% מהמים מחלחלים לעומק. כשיש התאדות נפח הקרקע מחולק לשלושה אזורים: הנפח הקרוב לפני הקרקע ממנו מתאדים המים לאטמוספירה, נפח הקרקע ממנו נקלטים המים לצמח ונפח הקרקע ממנו מחלחלים המים לעומק.

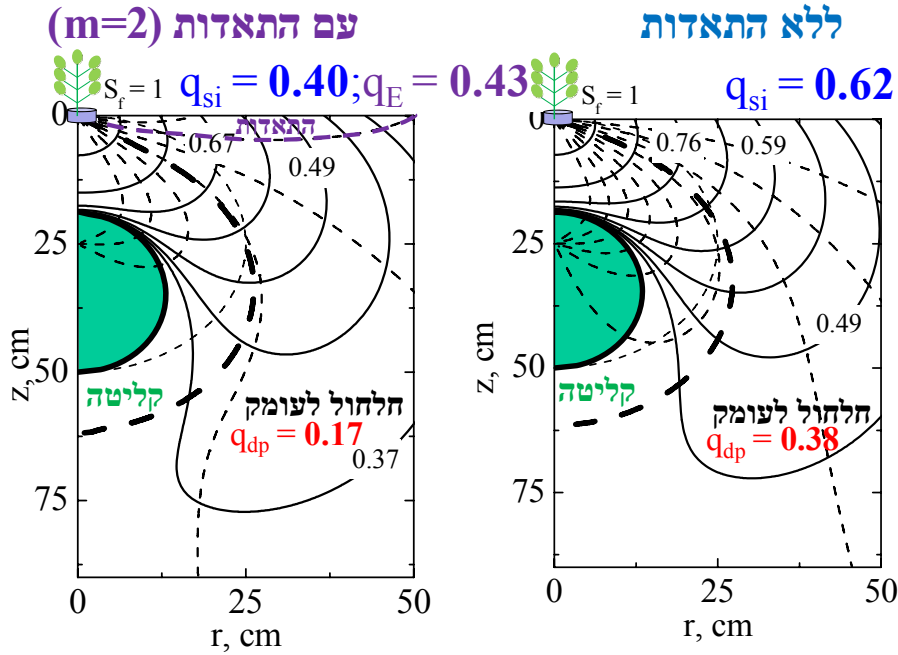
5.2 סופרפוזיציה של צמחים, טפטפות ושלוחות

תרשים 5 מתאר את קצב קליטת המים היחסי עבור מערך של צמחים וטפטפות לאורך שלווחה כפונקציה של הרדיוס של מערכת השורשים (ציר ה-x) ועבור מרחקים שונים בין הצמחים והטפטפות לאורך השלווחה. העקומים הם לא-מימדיים ומתארים את כל סוגי הקרקע, כך שכיוון הגידול של ציר ה-x מייצג גידול של הרדיוס של מערכת השורשים או מעבר מקרקע גסת מרקם לקרקע גסת מרקם. ניתן לראות את הגידול של קצב קליטת המים היחסי עם הגידול ברדיוס מערכת השורשים ועם הקטנת המרחק בין הטפטפות (/הצמחים).

התרשימים הבאים מציגים עקומים דומים עבור תרחישים של טפטפת נוספת באמצע המרחק בין שני צמחים סמוכים (תרשים 6) וצמח נוסף בין 2 צמחים (וטפטפות) סמוכים (תרשים 7). כאשר יש טפטפות נוספות (6) קליטת המים נמוכה עבור מערכות שורשים קטנות, אבל כאשר מערכות השורשים גדולות מתקבלים ערכים דומים לאלו שבתרחיש של צמח ליד טפטפת (תרשים 5). בתרחיש של תרשים 7 צריך להבדיל בין שני סוגי צמחים: כאלו שמערכות השורשים שלהם נמצאות מתחת לטפטפת וכאלה שמעל מערכות השורשים שלהם אין טפטפת. קליטת המים של הצמחים הקרובים לטפטפת תמיד גבוהה יותר, כשההבדל הולך וקטן כאשר מערכות השורשים גדלות.

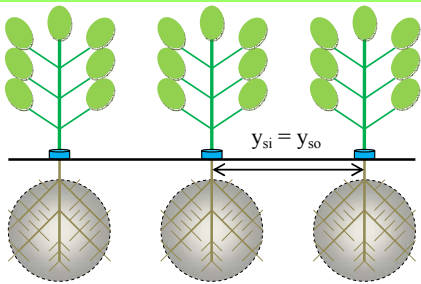
השפעת התאדות מפני הקרקע

(4)



צמחים-טפטפות לאורך שלוחה: טפטפת ליד כל צמח

(5)



דוגמת חישוב:

פלפל: $r_0 = 15 \text{ cm}$

חול: $\alpha = 0.1 \text{ cm}^{-1}$

מרחק בין טפטפות:

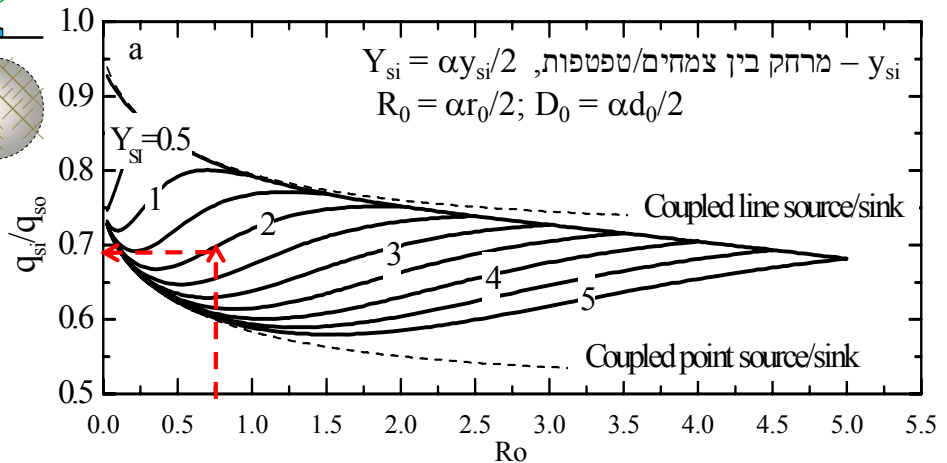
$y_{si} = 40 \text{ cm}$

$R_0 = \alpha r_0 / 2 = 0.75$

$Y_{si} = \alpha y_{si} / 2 = 2$

קליטת מים יחסית:

$\Rightarrow q_{si}/q_{so} = 0.69$



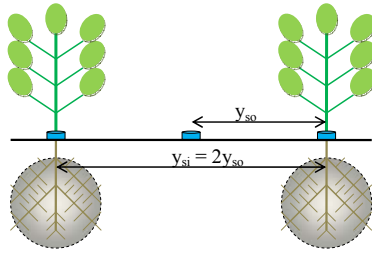
קרקע: חול \rightarrow חרסית
 מערכת שורשים: גדולה \rightarrow קטנה

$Y_{so}/Y_{si} = \beta = 1$

$$\bar{q}_{si} = \frac{\Phi_{so}[0,0,Z_{bot}] + 2 \sum_{j=1}^{\beta^{-1}N_{si}} \Phi_{so}[0,j\beta Y_{si},Z_{bot}]}{\Phi_{si}[0,0,R_0] + 2 \sum_{j=1}^{N_{si}} \Phi_{si}[0,jY_{si},R_0]}$$

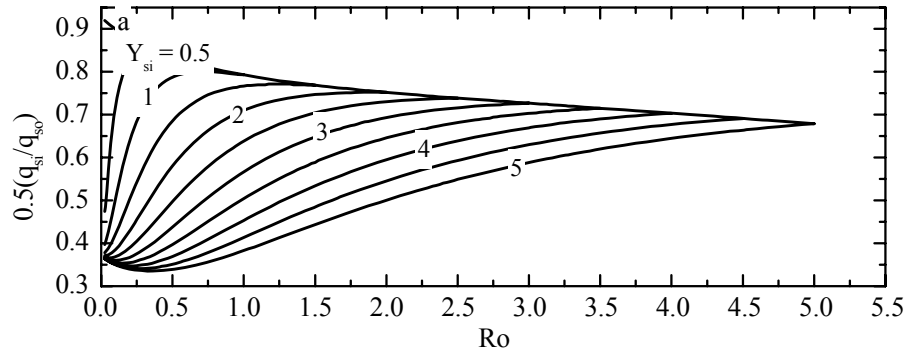
(6)

צמחים-טפטפות לאורך שלוחה: טפטפת נוספת בין צמחים



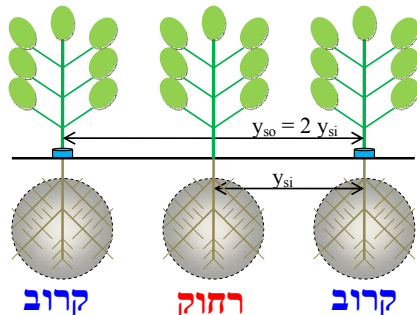
$$\bar{q}_{si} = \frac{\Phi_{so}[0,0,Z_{bot}] + 2 \sum_{j=1}^{\beta^{-1}N_{si}} \Phi_{so}[0,j\beta Y_{si},Z_{bot}]}{\Phi_{si}[0,0,R_0] + 2 \sum_{j=1}^{N_{si}} \Phi_{si}[0,jY_{si},R_0]}$$

$$Y_{so}/Y_{si} = \beta = 0.5$$



(7)

צמחים-טפטפות לאורך שלוחה: צמח נוסף בין טפטפות



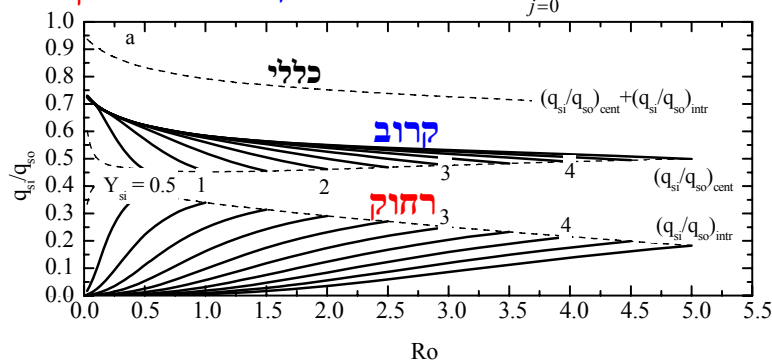
$$\begin{cases} a\bar{q}_{si} + b\bar{q}_{si} = d_1 & Y_{so}/Y_{si} = \beta = 2 \\ b\bar{q}_{si} + a\bar{q}_{si} = d_2 \end{cases}$$

$$a = \Phi_{si}(0,0,R_0) + 2 \sum_{j=1}^{N_{si}} \Phi_{si}[0,2jY_{si},R_0]$$

$$b = 2 \sum_{j=0}^{N_{si}} \Phi_{si}[0,(2j+1)Y_{si},R_0]$$

$$d_1 = \Phi_{so}(0,0,Z_{bot}) + 2 \sum_{j=1}^{N_{si}\beta^{-1}} \Phi_{so}(0,j\beta Y_{si},Z_{bot})$$

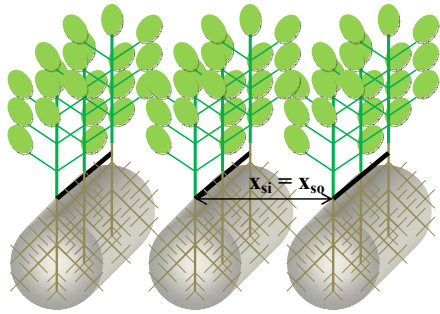
$$d_2 = 2 \sum_{j=0}^{N_{si}\beta^{-1}} \Phi_{so}(0,(2j+1)Y_{si},Z_{bot})$$



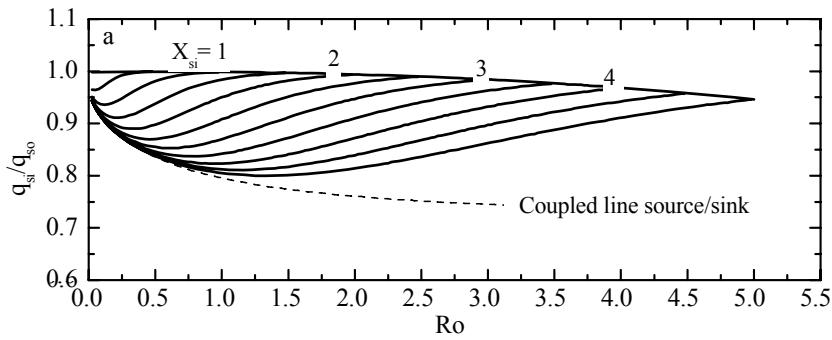
כאשר המרחק בין הטפטפות (והצמחים) לאורך שלוחת הטפטוף קטן יחסית ניתן לתאר את השדה על ידי מערך של מקורות (שלוחות טפטוף) ומבלעים (מערכות שורשים) קוויים (דו-מימדים), כשבעיית התכנון הפעם היא קביעת המרחק בין שלוחות הטפטוף (ושורות הצמחים) המקבילות. תרשים 8 מציג את קצב קליטת המים היחסית עבור תרחיש זה. המגמה של תלות קצב קליטת המים בגודל מערכת השורשים והמרחק בין שלוחות הטפטוף דומה לזאת של התרחיש של צמחים וטפטפות לאורך שלוחת טפטוף (תרשים 5), אבל הערכים גבוהים יותר.

מערך מקביל של שלווחות: מקורות ומבלעים קוויים

(8)



$$X_i = \alpha x_{si}/2, \text{ מרחק בין שלווחות, } x_{si}$$



5.3 טפטוף טמון

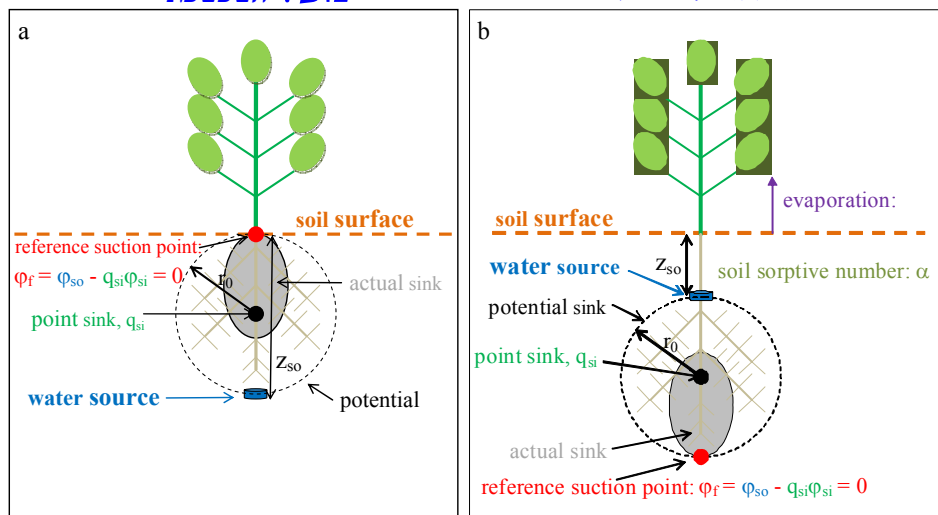
עבור טפטוף טמון אנחנו מתייחסים לשני המצבים קיצוניים (תרשים 9): ראשית הגידול בה נמצאת מערכת השורשים מעל הטפטפת הטמונה (a בתרשים משמאל) – מצב קריטי מבחינת קליטת המים, והשליבים המאוחרים של הגידול בהם מרבית קליטת המים מתרחשת מתחת למקור הטפטפת (b).

טפטוף טמון: שני מצבים קיצוניים

(9)

תחילת עונת גידול:
מערכת השורשים
מעל הטפטפת

המשך עונת גידול:
מערכת השורשים
מתחת לטפטפת

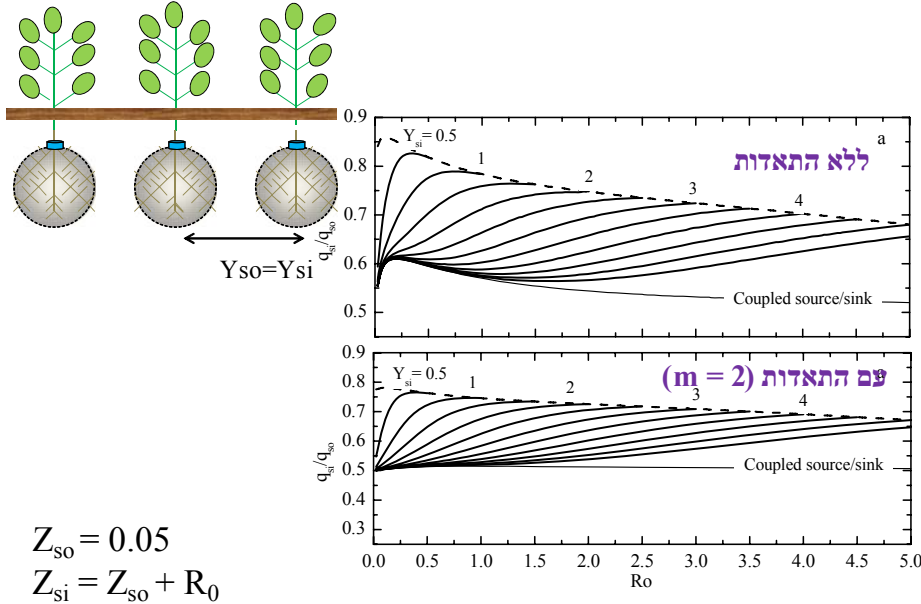


תרשים 10 מדגים את ההשפעה של ההתאדות הפוטנציאלית (הגרף התחתון) להורדת קצב קליטת המים היחסי בתרחיש של מערכת שורשים מתחת לטפטפת בשלבים המאוחרים של עונת הגידול. תרשים 11 מדגים את האינטראקציה בין עומק ההטמנה לבין עצמת ההתאדות הפוטנציאלית בקביעת קצב קליטת המים היחסי. עבור צמחים עם מערכת שורשים קטנה

(/קרקע חרסיתית) במרחקים קטנים לאורך שלוחת הטפטוף (תרשים שמאלי) בתנאים של התאדות פוטנציאלית חלשה קצב קליטת המים קטן כשגדל עומק ההטמנה בעוד שבתנאים של התאדות פוטנציאלית חזה גדל קצב קליטת המים עם העמקת הטפטפות. עבור צמחים עם מערכת שורשים גדולה (/קרקע חולית) במרחקים גדולים לאורך שלוחת הטפטוף (תרשים ימני) קצב קליטת המים גדל תמיד עם עומק ההטמנה.

טפטוף שמוך: טפטפת ליד כל צמח לאורך שלוחה

(10)

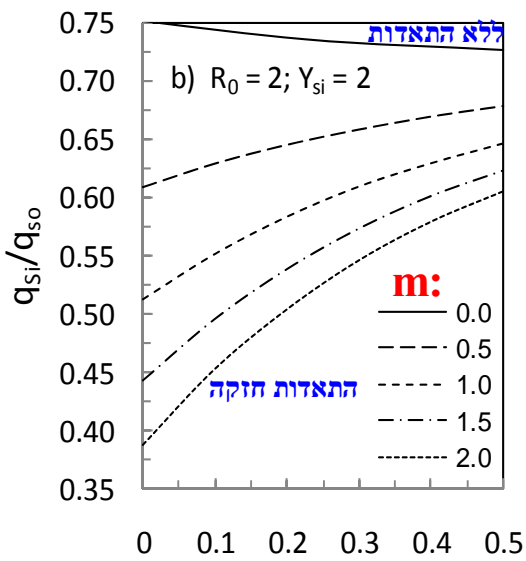
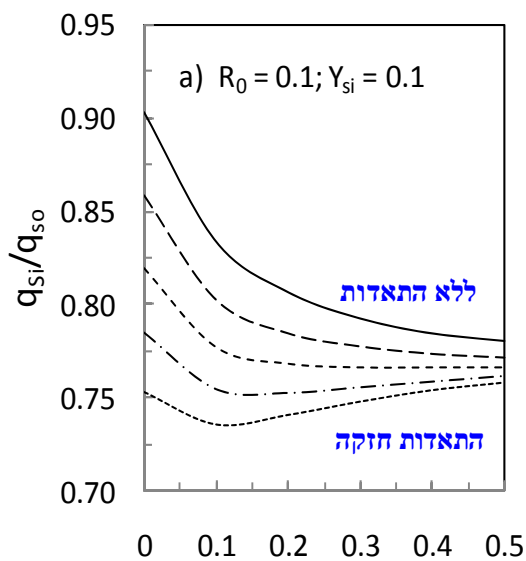


קליטת המים היחסית כתלות בעומק הטמנת השלוחות (Z_{so}) ובעצמת ההתאדות הפוטנציאלית (m)

(11)

צמחים עם מערכת שורשים קטנה (/קרסיתית) במרחקים קטנים לאורך שלוחת הטפטוף

צמחים עם מערכת שורשים גדולה (/חול) במרחקים גדולים לאורך שלוחת הטפטוף



$Z_{si} = Z_{so} + R_0$

Z_{so}

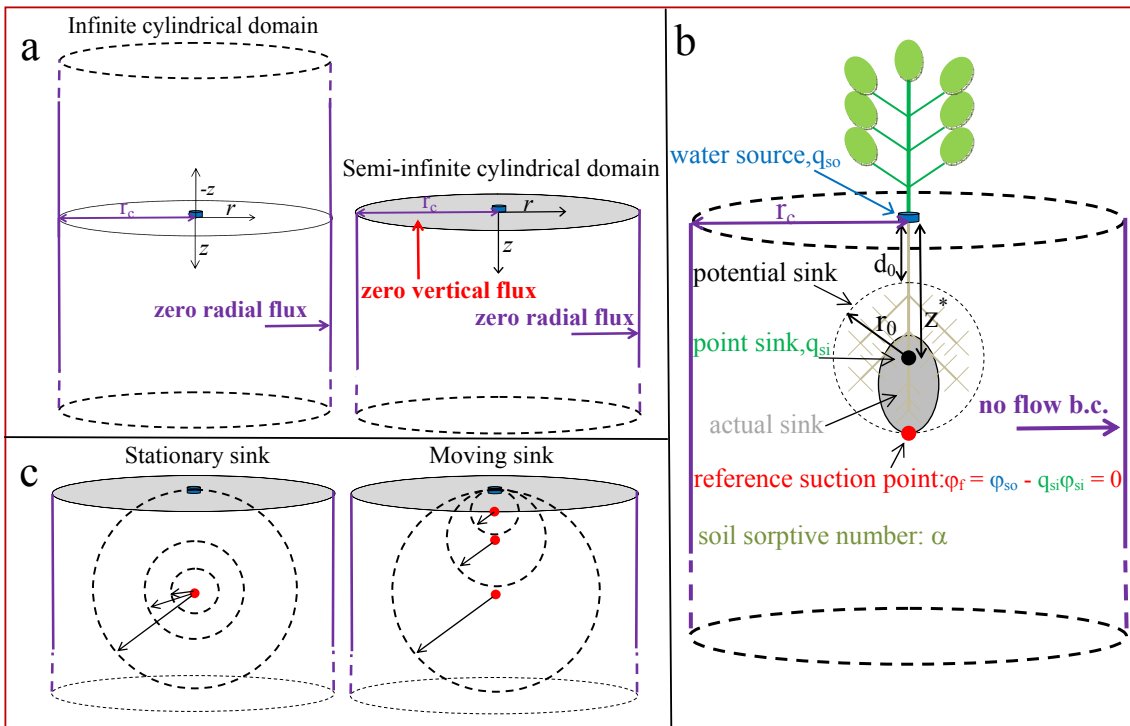
Z_{so}

5.4 זרימה וקליטה תמידיים בגליל כלוא:

בתרשים 12 מוגדרת בעיית הזרימה התמידית עבור מערכת של מקור נקודתי (טפטפת בודדת) בתוך תחום גלילי עם דפנות אנכיות אטומות לזרימה. הבעיה הזאת מייצגת טפטפת וצמח בליזימטר ניסויי או תא מייצג בתוך שדה עם מערך של טפטפות וצמחים. מימין רואים את הליזימטר עם הצמח והטפטפת בפני הקרקע. מצד שמאל למטה רואים את שני סוגי המבלעים שמתארים את קליטת המים על ידי השורשים: מבלע נקודתי בעומק נתון ורדיוס שגדל (משמאל), ומבלע נקודתי בעומק ורדיוס שגדלים בהתאמה.

(12)

זרימה תמידית וקליטה בליזימטר גלילי
קירוב להשפעה גנרית של צפיפות הצמחים (והטפטפות) בשדה פתוח



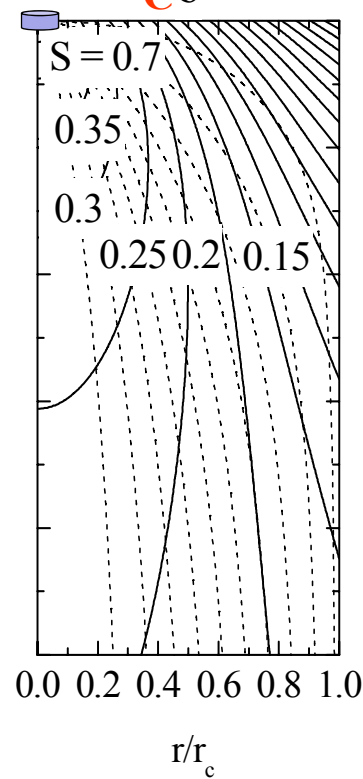
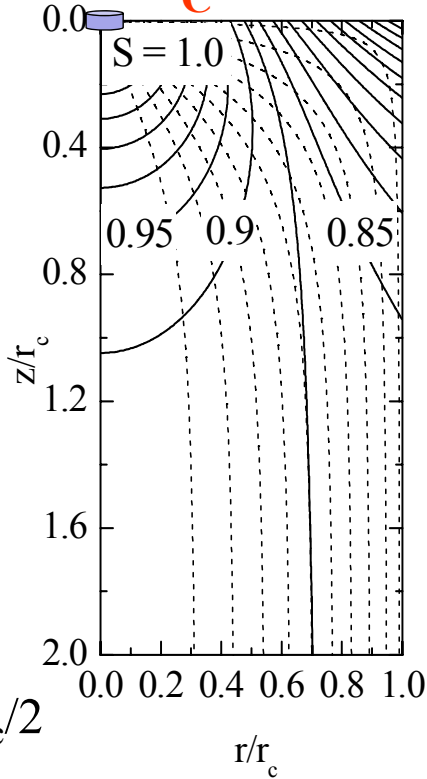
בתרשים 13 בעמוד הבא רואים את דגם ההרטבה התמידי כתוצאה מפעולה של טפטפת ללא מבלע של קליטת מים. הפתרון מוצג בצורה לא מימדית המתאימה לכל סוגי הקרקע ולכל ספיקת טפטפת. α מייצגת את ההופכי של האורך הקפילרי של הקרקע, מקבלת ערך גבוה בקרקעות חוליות עם השפעה גדולה של הכבידה על הזרימה וערך נמוך בקרקעות חרסיות עם השפעה דומיננטית של הכוחות הקפילאריים, r_c הוא רדיוס הגליל הכלוא). הקווים הרציפים מציינים את זרמת הרוויה במים והקווים השבורים את קווי הזרם. מצד ימין רואים את דגם ההרטבה בליזימטר רחב, המדמה את דגם ההרטבה של טפטפת בודדת בשדה אינסופי ומצד שמאל בליזימטר צר המדמה מערך צפוף של טפטפות בשדה. רואים את העלייה בתכולת הרטיבות הנגרמת על ידי הליזימטר ואת הפיכת הזרימה לחד-מימדית אנכית בעומק רדוד יותר מתחת למקור המים.

צר (קרקע חרסיתית)

טפטוף עילי בליזימטר: רחב (חול)

גבוהה

צפיפות טפטפות: נמוכה

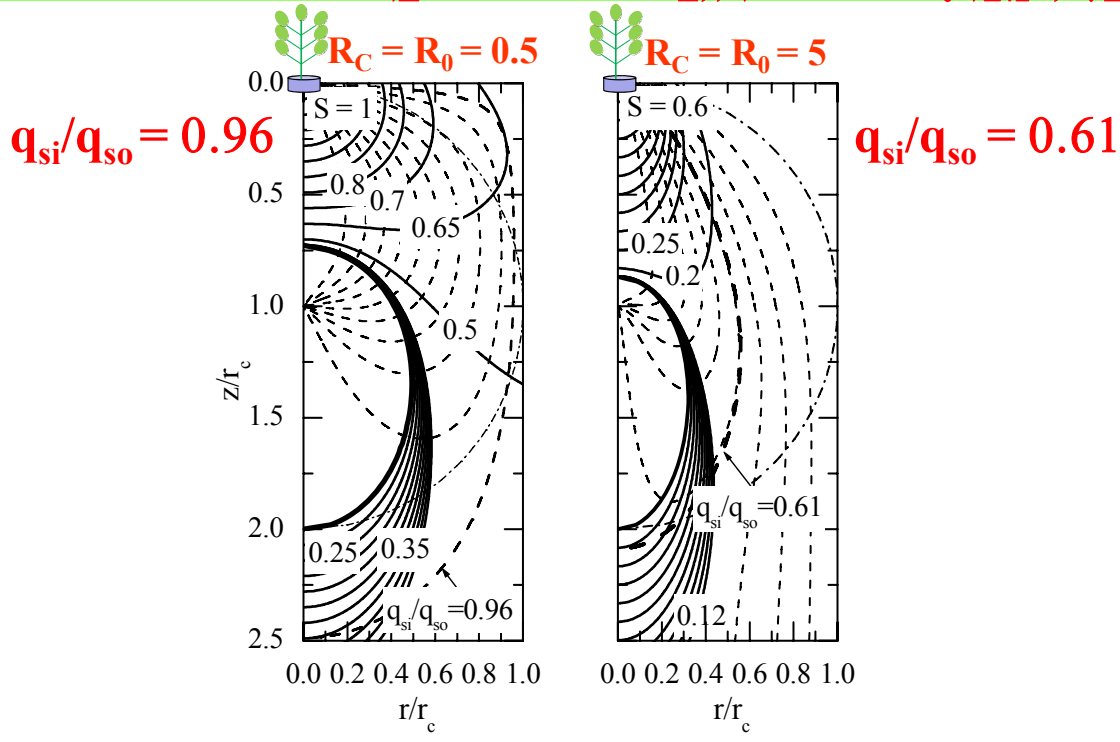
 $R_C = 0.5$ $R_C = 5$ 

$$R_C = \alpha r_c / 2$$

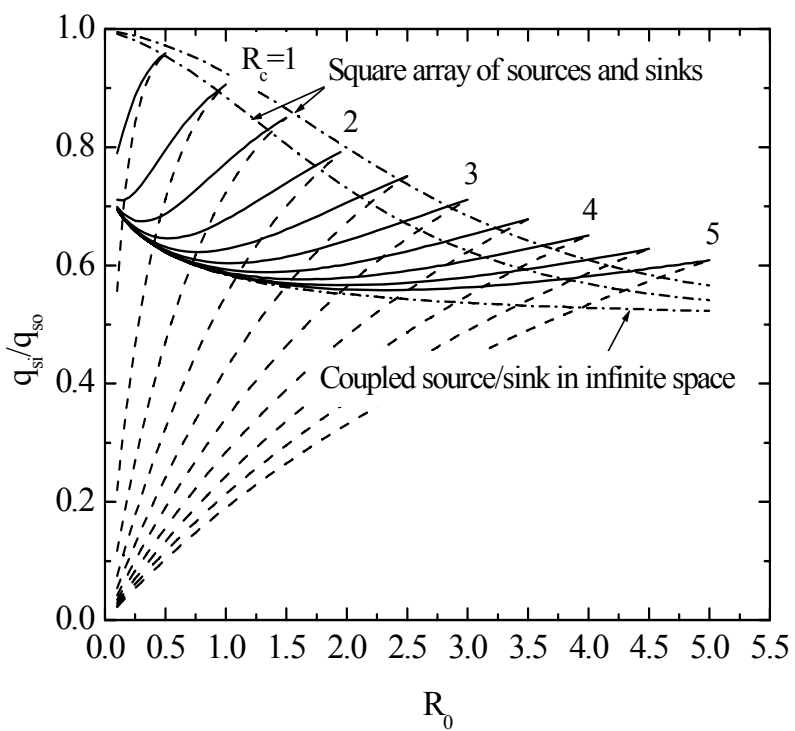
העלייה בתכולת הרטיבות כתוצאה מהשפעת דפנות הגליל (המייצגת את השפעת הטפטפות השכנות) גורמת לעליה בשיעור קליטת המים היחסית (q_{si}/q_{so} - קצב קליטת המים מחולק בקצב מתן המים על ידי הטפטפת) כפי שרואים בתרשים (14) בעמוד הבא. המבלע הנקודתי המייצג את פעילות מערכת השורשים נמצא בעומק לא-מימדי של 1 (בהתאמה לרדיוס לא-מימדי של 2 המייצג את המערכת השורשים, $R_0 = 2$), ורואים כיצד הגליל הצר מכנס אליו יותר קווי זרם היוצאים מהטפטפת. במעבר מרדיוס לא-מימדי של 5 (מרחק גדול בין הטפטפות וצמחים - תיאור מקורב למצב של טפטפת וצמח בודדים) לרדיוס של 0.5 (מערך צפוף של טפטפות וצמחים) מתקבלת עלייה של שיעור קליטת המים היחסית מ-0.61 ל-0.96. החישובים הללו נערכו בהנחה שאין התאדות מפני הקרקע. כלומר, שארית המים שיוצאים מהטפטפות (29%-4% בהתאמה) מחלחלים לעומק.

תרשים (15) בעמוד הבא מתאר את הגידול בשיעור קליטת המים היחסית (q_{si}/q_{so}) כתוצאה מהגידול ברדיוס של מערכת השורשים (R_0) עבור מערכת שורשים המיוצגת על ידי עומק קבוע של המבלע הנקודתי ורדיוס גדל (קווים שבורים) ועומק ורדיוס שדגלים בהתאמה (קווים רציפים). הקווים העליונים (בסגנון של קו-נקודה) מייצגים את שיעור קליטת המים היחסית במערך מרובע של צמחים וטפטפות עם צלע ריבוע זהה לרדיוס הגליל (הקו העליון) ועם ריבוע גדול יותר בעל שטח זהה לשטח פני הגליל. מודגם הקירוב הטוב של בעיית הזרימה בגליל לייצוג הבעיה של מערך ריבועי של טפטפות וצמחים.

עם קליטת מים בליזימטר: צר רחב



קליטת מים יחסית כתלות ברדיוס של מערכת השורשים (R_0) ושל הליזימטר (R_c)



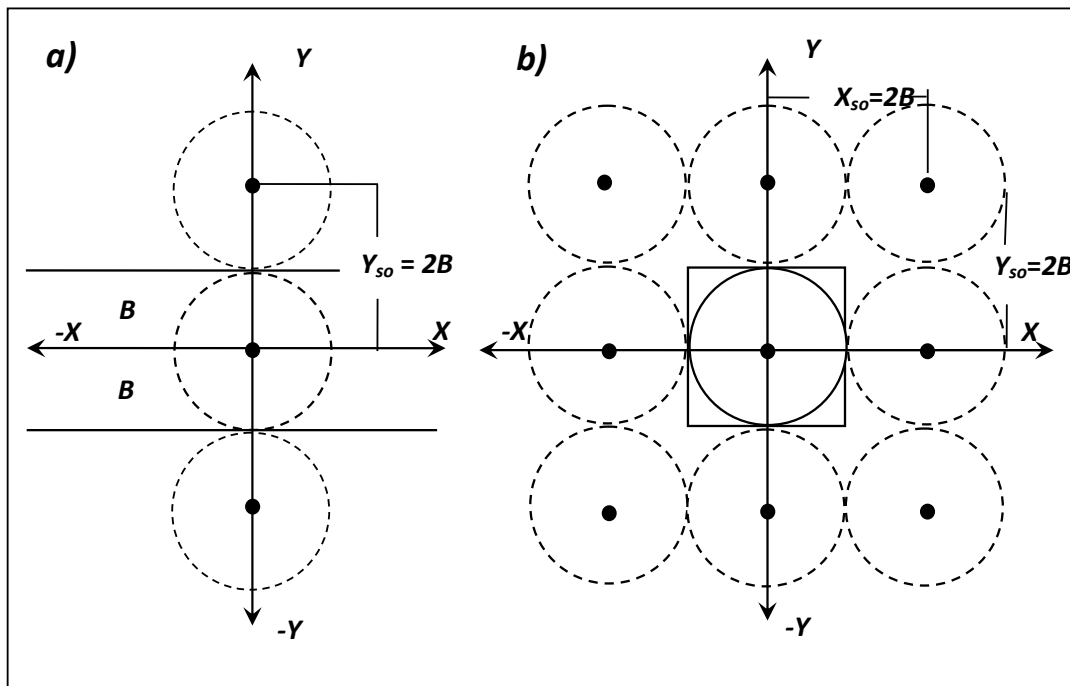
Solid lines ("moving" sinks). Dashed lines ("stationary" sinks).
 Lower dashed-dotted line is for coupled, "moving" source-sink pairs (without cylindrical confinement).
 The upper dashed-dotted line is for a square grid that encloses the cylinder's circular cross-section ($Y_{si} = 2R_0$)
 The top dashed-dotted line is for a square grid of equal area ($Y_{si} = \pi^{1/2} R_0$).

5.5 זרימה וקליטה תמידיים במנסרות כלואות:

בתרשים 16 מוגדרת בעיית הזרימה התמידית עבור מערכת של מקור נקודתי (טפטפת בודדת) בתוך תחום של מנסרה ריבועית עם דפנות אנכיות אטומות לזרימה המייצגת מערך ריבועי אינסופי של טפטפות (מימין), ומערכת של מקור נקודתי (טפטפת בודדת) בתוך תחום של רצועה עם דפנות אנכיות אטומות לזרימה המייצגת מערך אינסופי של טפטפות לאורך שלוחת בודדת (משמאל).

זרימה תמידית וקליטה במנסרה ריבועית וברצועה תחומים
חלופה לשימוש בסופרפוזיציה לייצוג ההצבה של הטפטפות והצמחים בשדה פתוח

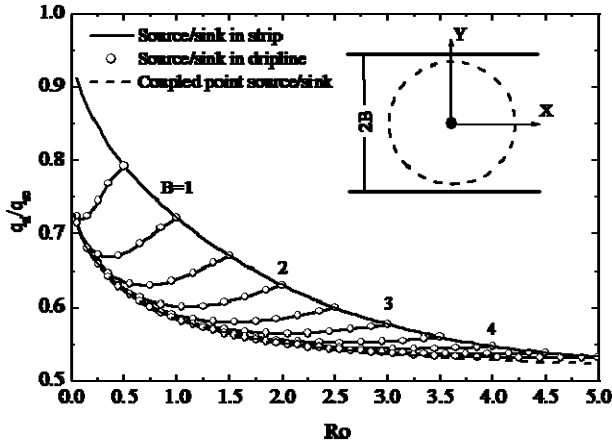
(16)



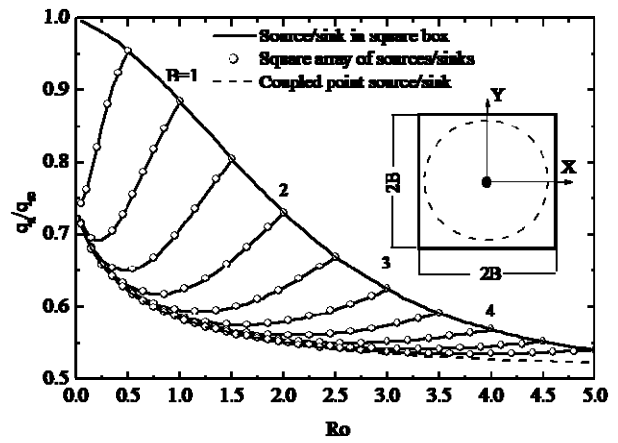
תרשים (17) בעמוד הבא מתאר (הקווים הרציפים) את הגידול בשיעור קליטת המים היחסית (q_{si}/q_{so}) כתוצאה מהגידול ברדיוס של מערכת השורשים (R_0) עבור מערכת של מקור נקודתי (טפטפת בודדת) בתוך תחום של מנסרה ריבועית עם דפנות אנכיות אטומות לזרימה המייצגת מערך ריבועי אינסופי של טפטפות (מימין), ומערכת של מקור נקודתי (טפטפת בודדת) בתוך תחום של רצועה עם דפנות אנכיות אטומות לזרימה המייצגת מערך אינסופי של טפטפות לאורך שלוחת בודדת (משמאל). הסמנים העגולים מייצגים את הפתרונות של הבעיות השקולות המיוצגות על ידי סופר-פוזיציה מתאימה של מקורות ומבלעים. ההתאמה הטובה מדגימה את הדיוק של שני הפתרונות.

השוואה בין סופרפוזיציה של מקורות ומבלעים (עיגולים ריקים) לבין פתרון ישיר בנפח תחום (קוים רציפים)

טפטפות וצמחים לאורך שלוחת טפטוף



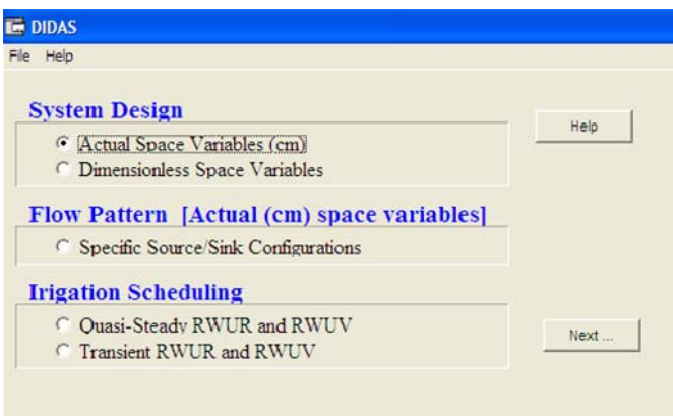
מערך ריבועי של טפטפות וצמחים



5.6 תוכנת (Drip Irrigation Design And Scheduling) DIDAS:

תוכנת המחשב (Drip Irrigation Design and Scheduling) DIDAS. כתובה בשפת Delphi. הגרסה הנוכחית של התוכנה כוללת: 1. מודל לזרימה וקליטת מים תמידיים (קבועים בזמן) באמצעותו ניתן להעריך את השפעת הגיאומטריה של מערכת הטפטוף על קליטת המים היחסית והשתמשו במודל לכימות ההשפעה של משתני המערכת על קליטת המים היחסית ועל דגם זרימת המים. משתני המערכת כוללים את ההצבה של הטפטפות והצמחים (עומק ההטמנה במקרה של טפטוף טמון), גודל מערכת השורשים של הצמח וההתאדות הפוטנציאלית מפני הקרקע. מקורות מים נקודתיים ייצגו טפטפות בודדות ומקורות קוויים ייצגו שלוחות עם טפטפות צפופות, ובהתאם נעשה שימוש במערכות שורשים כדוריות או בצורה של גליל אופקי (2 הבחירות

(18)



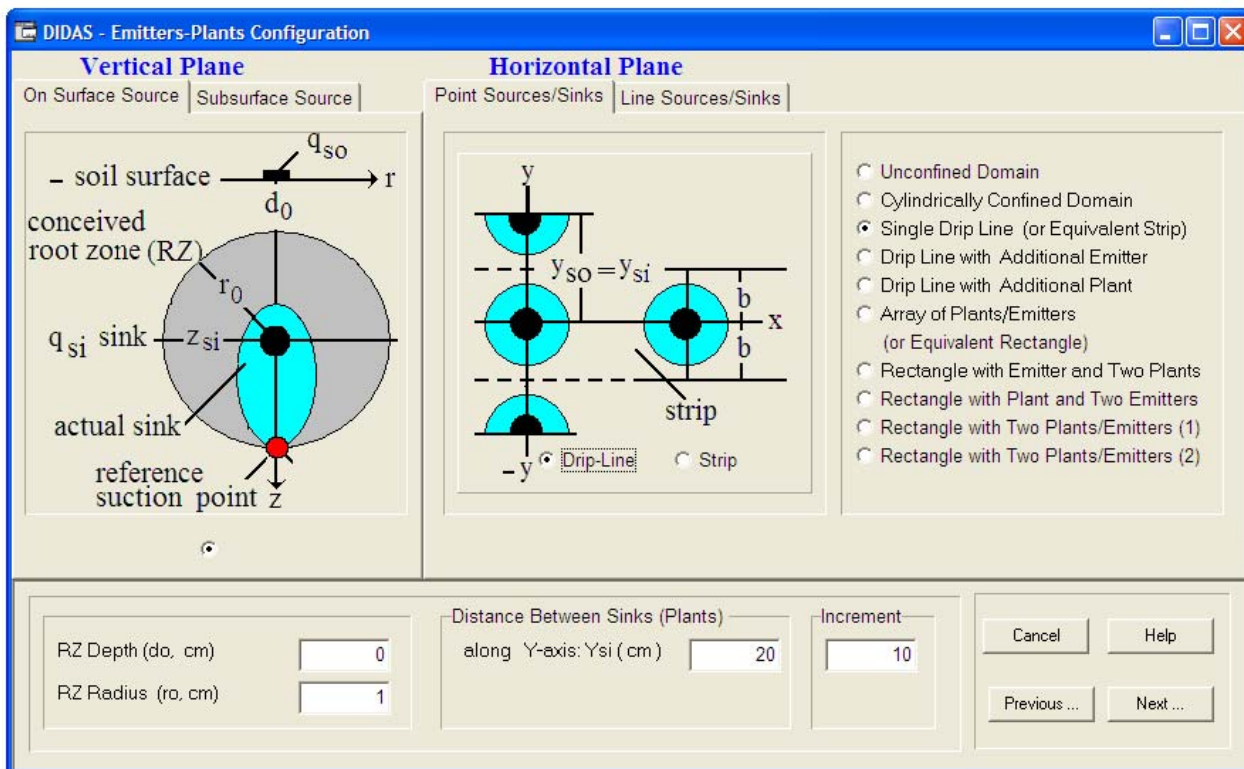
הראשונות בתרשים (18) משמאל המתאר את החלון הראשי של התוכנית; 2. מודל תמידי לכאורה (quasi steady) המתייחס למקורות (טפטפות) מים תמידיים, למבלעים (שורשי הצמחים) בעוצמה שתלויה בזמן על-פי מהלך יומי של התנגדות (פיוניות) לקליטת מים ולהתאדות מפני הקרקע שתלויה בזמן על-פי מהלך אטמוספרי יומי (הבחירה הרביעית בתרשים). בעתיד הקרוב אנחנו מתכוונים לתכנת את החלק המציג את דגמי הזרימה התמידית (האפשרות השלישית בתרשים) ואת החלק העוסק

במודל הזרימה וקליטת המים העתיים לצרכים של הכוונת תזמון ההשקיות (הבחירה החמישית). בתרשים (18) נראה החלון הראשון של התוכנית המציג את האפשרויות השונות לשימוש בתוכנה.

תרשים (19) מציג את החלון בו נקבעים: משמאל, הבחירה של החתך האנכי (טפטוף עילי – שנבחר כאן או טמון – שלא נראה בחלון, עומק הטפטפת (בתרחיש של טפטוף טמון), עומק מערכת השורשים (0 ס"מ) ורדיוס מערכת השורשים המינימאלי לחישוב (1 ס"מ)), ומימין, התרחיש האופקי של מערך הצמחים והטפטפות, הבחירה כאן היא צמחים וטפטפות מצומדים לאורך

שלוחה בודדת (שימוש בפתרון של סופר-פוזיציה של מקורות ומבלעים), המרחק המינימאלי של הטפטפות והצמחים לאורך השלוחה הינו 20 ס"מ, והחישובים יהיו עבור גידול של המרחק במרווחים של 20 ס"מ). ערך ה- α של הקרקע הוא 0.04 ס"מ⁻¹ (נקבע בחלון שלא הוצג כאן).

(19)



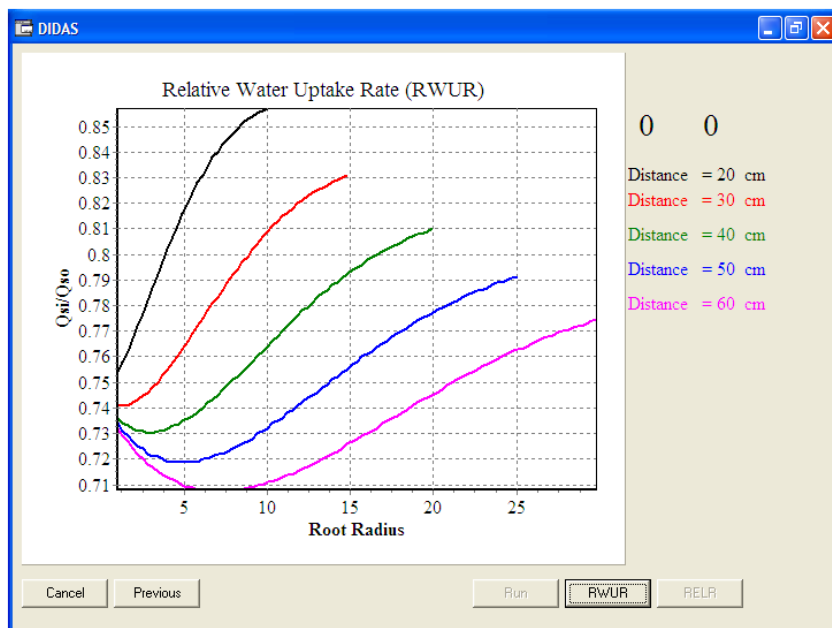
תוצאות החישובים נראות בתרשים (20) המתאר את הגידול בשיעור קליטת המים היחסית (q_{si}/q_{so}) כתוצאה מהגידול ברדיוס של מערכת השורשים (בס"מ) עבור המערכת שהוגדרה בחלון הקודם, עבור מרחקים שונים של בין 20 ל-60 ס"מ בין הטפטפות והצמחים לאורך השלוחה. החישוב הזה לא לוקח בחשבון את התנגדות הצמח לקליטת מים ואת ההתאדות מפני הקרקע. ככלל, שיעור קליטת המים היחסי עולה עם הגידול ברדיוס של מערכת השורשים ועם ירידת המרחק בין

הטפטפות והצמחים. יוצאי דופן

התרחישים עבור מערכות שורשים

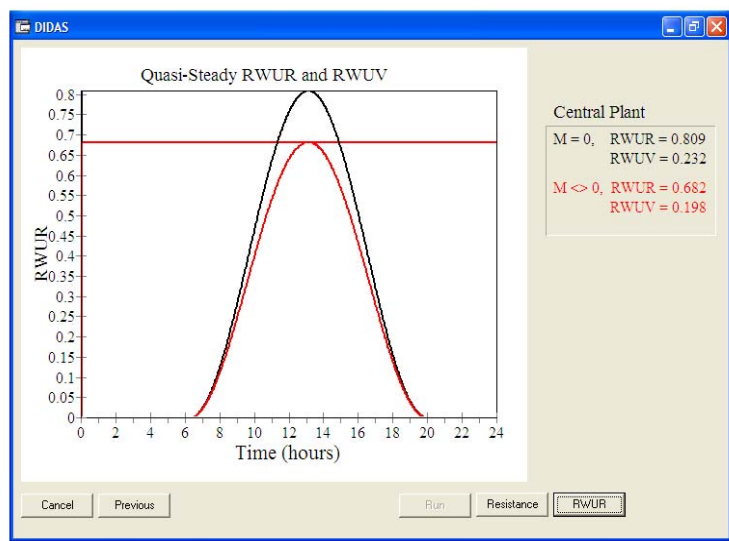
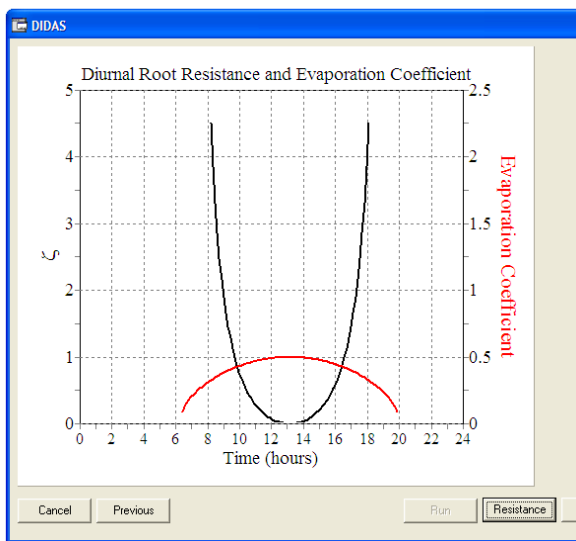
קטנות ומרחקים גדולים בין

הטפטפות בהם נראה מינימום מקומי.



(20)

תרשים (21) מציג דוגמא של חישוב של המודל התמידי לכאורה עבור צמחים עם רדיוס מערכת שורשים של 10 ס"מ במרחק של 30 ס"מ לאורך שלוחת טפטוף בודדת. מצד שמאל נראים המהלכים היומיים של התנגדות הצמח (הפיוניות) לקליטת מים – אינסופית בלילה ויורדת ל-0 בצוהרי היום, והמהלך ההפוך של ההתאדות הפוטנציאלית מפני הקרקע: 0 בלילה ומקסימאלית בצוהרי היום. מצד ימין נראה המהלך היומי של קצב קליטת המים היחסי על ידי הצמח (RWUR), שנקבע על ידי המהלך היומי (ההפוך) של התנגדות הצמח. הקו העליון מתאר את מהלך קליטת המים ללא התאדות מפני השטח והקו התחתון עם התאדות. סך כל נפח קליטת המים היחסי היומי (RUWV, נפח נקלט מחולק בנפח המושקה) מיוצג על ידי השטח מתחת לעקומי הקליטה.



6. מסקנות

התוכנה, DIDAS (Drip Irrigation Design and Scheduling), מתפקדת בצורה טובה, מציגה את תוצאות החישובים בצורה גרפית ומייצאת ל-Excel טבלאות עם התוצאות המחושבות. בעוד חודשים ספורים נעלה לאתר המכון למדעי הקרקע המים וסביבה של מנהל המחקר החקלאי (<http://www.agri.gov.il/en/units/institutes/6.aspx>) גרסה להורדה של DIDAS.

7. רשימת ספרות

- Amoozegar-Fard A., Warrick A.W., and Lomen, D.O. 1984. Design nomographs for trickle irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 110:107-120.
- Ben-Asher, J., C. Charach, and A. Zemel. 1986. Infiltration and water extraction from trickle irrigation source: the effective hemisphere model. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 50:882–887.
- Bresler, E., 1978. Trickle-drip irrigation, principles and application to soil–water management. *Adv. Agron.* 29, 343–393.
- 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.
- Colombo, A., and Or, D. 2006. Plant water accessibility function: A design and management tool for trickle irrigation. *Agric. Wat. Manag.* 82:45-62.

- Communar, G and S. P., Friedman. 2010a. Relative water uptake rate as a criterion for the design of trickle irrigation systems: 1. Formulation of a coupled source-sink steady water flow model. *To be submitted to Soil Sci. Soc. Am. J.*
- Communar, G and S. P., Friedman. 2010b. Relative water uptake rate as a criterion for the design of trickle irrigation systems: 2. Application for on-surface trickle irrigation. *To be submitted to Soil Sci. Soc. Am. J.*
- Communar, G and S. P., Friedman. 2010c. Relative water uptake rate as a criterion for the design of trickle irrigation systems: 3. Application for sub-surface trickle irrigation. *To be submitted to Soil Sci. Soc. Am. J.*
- Cook, F.J., P.J. Thorburn, P. Fitch, and K.L. Bristow. 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *Irrig. Sci.* 22:129–134.
- Dasberg, S., and D. Or. 1999. *Drip Irrigation*. Springer–Verlag, Berlin.
- Gardner, W. R. (1958), Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table, *Soil Sci.*, 85, 228–232.
- Goldberg, D., and M. Shmuelli. 1971. The effect of distance from the tricklers on soil salinity and growth and yield of sweet corn in an arid zone. *HortScience* 6:565–567.
- Lazarovitch, N., A.W. Warrick, A. Furman, and J. Simunek. 2007a. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *Vadose Zone J.* 6:116-123.
- Lazarovitch, N., Ben-Gal, A., Simunek, J., and Shani, U. 2007b. Uniqueness of soil hydraulic parameters determined by a combined Wooding inverse approach. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 71: 860-865.
- Lomen, D.O., and A.W. Warrick, 1978. Linearized moisture flow with loss at the soil surface. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:396-400.
- Nakayama, F.S., and D.A. Bucks. 1986. *Trickle irrigation for crop production: design, operation and management*. Elsevier, New York.
- Philip, J.R., 1971. General theorem on steady infiltration from surface sources, with application to point and line sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 867-871.
- Raats, P.A.C., 1971. Steady infiltration from point sources, cavities and basins. *Soil Sc. Soc. Amer. J.* 35:689-694.
- Schwartzman, M., and B. Zur. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *J. Irrig. Drain. Eng., ASCE* 112:242–253.
- 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.
- Shani, U. 1991. The design of field irrigation systems as related to crop type and soil properties. p. 195–210 *In* Shalhevet, J., Changming, L.Y. (eds.), *Water use efficiency. Proc., Binational China–Israel Workshop, 22–26 April 1991, Beijing, China.*
- Thorburn, P.J., F.J. Cook, and K.L. Bristow. 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for trickle design and management. *Irrig. Sci.* 22:121–127.
- Tsipori, Y., and D. Shimshi. 1979. The effect of trickler line spacing on yield of tomatoes (*Lycopersicum esculentum* Mill.) *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:1225–1228.
- Warrick, A.W., 1974. Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38:383–386.
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a circular pond. *Water Resour. Res.* 4:1159-1273.
- Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 16:101–105.

8. סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר היו: 1. פיתוח גישה חדשה לתכנון מערכת השקיה בטפטוף המתבססת על עיקרון חדש של קליטת מים יחסית (יעילות ניצול המים) גבוהה מערך סף; 2. פיתוח תכנה ידידותית למשתמש שתחשב את יעילות ניצול המים ופירוס הרטיבות עבור תרחישים שונים של הרטבה ממקור נקודתי וקווי וגיאומטריות שונות של נפח השורשים הפעילים; 3. איסוף מסד נתונים לפרמטרים הדרושים עבור מגוון של גידולים וקרקעות חקלאיות ברחבי הארץ.

עיקרי הניסויים והתוצאות

הפעילות בשנת המחקר הראשונה כללה את פיתוח מודל הזרימה התמידי ויישומו עבור תרחישים עם גיאומטריה שונה של מערכי הטפטפות והצמחים בשדה תוך ניצול עיקרון הסופרפוזיציה לתיאור הפעולה המשולבת של המקורות (טפטפות) והמבלעים (מערכות השורשים). בשנת המחקר השנייה: 1) פיתחנו פתרונות למודל הזרימה התמידי עבור תרחישים של מקורות נקודתיים או קוויים בתחום זרימה כלוא (גליל אנכי או מנסרה עם דפנות אנכיים), המייצג תא זרימה של מערך הצמחים והטפטפות בשדה; 2) הרחבנו את המודל התמידי למודל זרימה תמידי לכאורה המתייחס למקורות מים תמידיים, למבלעים בעוצמה שתלויה בזמן על-פי מהלך יומי של התנגדות (פיוניות) לקליטת מים ולהתאדות מפני הקרקע שתלויה בזמן על-פי מהלך אטמוספרי יומי; 3) כתבנו תוכנית "ידידותית למשתמש" בשפת Delphi שכללה את פתרונות הזרימה התמידיים והתמידיים לכאורה. במהלך השנה השלישית גייסנו מתכנת מקצועי במשרה חלקית (אלון גמליאל) וכתבנו מחדש את התוכנה בצורה יותר מקצועית ועם תוספות שנוגעות לתזמון ההשקיה על בסיס מודל זרימה וקליטה עתיים. פעילות זאת עדיין נמשכת.

התוכנה, (Drip Irrigation Design and Scheduling) DIDAS, מתפקדת בצורה טובה, מציגה את תוצאות החישובים בצורה גרפית ומייצאת ל-Excel טבלאות עם התוצאות המחושבות. בעזרת התוכנה הודגם כיצד גדל קצב קליטת המים היחסי עם הגידול ברדיוס של מערכת השורשים ועם המעבר מקרקע גסת מרקם לקרקע דקת מרקם, וכיצד הוא יורד עם הגדלת המרחק בין הטפטפות ובין השלוחות. התוכנה מטפלת בהצבות שונות של טפטפות צמודות לכל צמח וטפטפות או צמחים נוספים בין צמחים/טפטפות. כאשר יש טפטפות נוספות בין צמחים קליטת המים נמוכה עבור מערכות שורשים קטנות, אבל כאשר מערכות השורשים גדולות מתקבלים ערכים דומים לאלו שבתרחיש של צמח ליד טפטפת. בתרחיש של צמח נוסף בין טפטפות קליטת המים של הצמחים הקרובים לטפטפת תמיד גבוהה יותר מאלו הרחוקים מהטפטפת, כשההבדל הולך וקטן כאשר מערכות השורשים גדלות. התוכנה מדגימה את ההשפעה של ההתאדות מפני הקרקע להורדת קצב קליטת המים היחסי ובמקרה של טפטוף טמון הודגמה האינטראקציה בין עומק ההטמנה לבין עצמת ההתאדות הפוטנציאלית בקביעת קצב קליטת המים היחסי.

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

בעוד חודשים ספורים נעלה לאתר המכון למדעי הקרקע המים וסביבה של מנהל המחקר החקלאי

<http://www.agri.gov.il/en/units/institutes/6.aspx> גרסה להורדה של DIDAS.

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

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

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

שמוליק פרידמן תאר בקצרה את המודלים והתוכנה שפותחה בכמה הרצאות, סמינרים וימים פתוחים בחוות הבשור.

התוצאות המתמטיות של המחקר פורסמו במאמרים:

- Communar, G., and S.P. Friedman. 2010. 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 S.P. Friedman. 2010. 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 S.P. Friedman, S.P. 2010. Relative water uptake rate as a criterion of trickle irrigation systems design: 3. Subsurface trickle irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J., 74:1518-1525.
- Communar, G., and S.P., Friedman. 2010. Steady infiltration from point sources and water uptake in confined cylindrical domains. Soil Sci. Soc. Am. J. 74:1861–1870.
- Communar, G., and S.P., Friedman. 2011. General solution for steady infiltration and water uptake in strip-shaped, rectangular, and cylindrical domains. Soil Sci. Soc. Am. J. 75:2085–2094.

פנטנים - יש לציין שם ומס' פטנט; הרצאות וימי

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