

פיתוח גישה חדשה לקביעת ממשק מיטבי בהשקיה בטפטוף במים שפירים

A new approach for determining optimal management of drip irrigation with fresh water

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

גריגורי קומנור המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
שמוליק פרידמן המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
חנה יחזקאל חוות הבשור, מו"פ דרום
דובי צוהר חוות הבשור, מו"פ דרום

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

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

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

הבעת תודה:

היו שותפים למחקר גם:

שבתאי כהן המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
טיבור מרקוביץ המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
עידו ניצן המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
שני הרואה* המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
אברהם מאירי גמלאי מתנדב, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
יחזקאל כהן גמלאי מתנדב, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
*סטודנטית לתואר שני, האוניברסיטה העברית בירושלים

יוני 2013

סיון תשע"ג

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא



חתימת החוקר

תוכן עניינים

1	תקציר	2
2	תמצית הרקע המדעי	2
3	מטרות המחקר	4
4	שיטות ומהלך העבודה	4
4.1	ניסוי שדה מקדים (2010)	4
4.2	ניסוי תכיפות ההשקיה הראשון (2011)	5
4.3	ניסוי תכיפות ההשקיה השני (2012)	5
4.4	פיתוח מודל זרימה וקליטת מים עתיים	6
5	תוצאות ודיון	7
5.1	תמצית תוצאות של ניסוי השדה המקדים (2010)	7
5.2	תמצית התוצאות של ניסוי תכיפות ההשקיה הראשון (2011)	8
5.3	תמצית התוצאות של ניסוי תכיפות ההשקיה השני (2012)	12
5.5	הטמעת מודל הזרימה והקליטה העתיים בתוכנת DIDAS	14
6	מסקנות	16
6	רשימת ספרות	17
7	סיכום עם שאלות מנחות	18

1. תקציר

1. הצגת הבעיה

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, אורור, מחלות קרקע והיבטים אגרוטכניים אחרים. המחקר הנוכחי מציע פיתוח כלי עזר לתכנון תזמון ההשקיה במים שפירים.

2. מטרת המחקר

1. פיתוח גישה חדשה לתכנון תזמון השקיה בטפטוף (תכיפות, שעת תחילת ההשקיה ומשך ההשקיה) המתבססת על עיקרון חדש של נפח קליטת מים יחסי הגבוה מערך סף; 2. בחינה של הגישה חדשה בניסוי שדה. 3. איסוף מסד נתונים ראשוני לפרמטרים הדרושים עבור מגוון של גידולים וקרקעות חקלאיות באזורים בהם משקים במים שפירים.

3. שיטות העבודה

במהלך המחקר פיתחנו מודל לזרימה וקליטת מים עתיים באמצעותו ניתן להעריך את השפעת תזמון ההשקיה על קליטת המים היחסית. המודל הוטמע בתוכנת DIDAS לתכנון ותזמון השקיה בטפטוף. כמוכן ערכנו ניסויי שדה בחוות הבשור בהם בדקנו את תגובת צמחי פלפל למרווחי השקיה שונים, החל מהשקיה יומית ועד להשקיה אחת לשמונה ימים, למתן השקיה יחידה קצרה בבוקר לעומת השקיה ממושכת לאורך שעות היום ולשעת היממה של ההשקיה הקצרה. נמדדו הגובה, המשקל ויכול הפירות לאורך עונת הגידול ובפרקי זמן קצובים נמדדה קליטת המים בשיטת גל החם בחלק מהטיפולים. במקביל ערכנו ניסויים בהם נבחנו תגובת הצמחים למנות מים שונות.

4. תוצאות עיקריות

שימוש במודל הזרימה והקליטה העתי עבור תרחישים שונים של תכיפויות ומשכי השקיה בקרקעות עם מרקם שונה מניב תוצאות הגיוניות ומשחזר, איכותית, מהלכי קליטת מים יומיים ולאורך מחזורי השקיה שדומים לאלו שדווחו בספרות המדעית. המודל, שמניח שהתנגדות הצמח לקליטת מים תלויה רק בשעות היממה, מצליח לשחזר היטב מהלכים יומיים של קליטת מים של צמחי פלפל שנמדדו בחוות הבשור בטיפולים של השקיה יומית ולשחזר בקירוב סביר מדידות של קליטת מים בהשקיה אחת בשבוע. הגידול הווגטיבי וההנבה של צמחי הפלפל היו דומים בהשקיה של אחת ליום או אחת ליומיים. במרווחי השקיה גדולים יותר של אחת ל-4, 7 או 8 ימים הייתה ירידה בגודל הצמחים, פחיתה ביכול ואחוז גבוה יותר של פירות מעוותים. קליטת המים בהשקיה יומית הייתה כ-32% ממנת ההשקיה ובהשקיה אחת לשבוע כ-28% עם הבדלים זניחים בין הימים לאורך מחזור ההשקיה.

5. מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות

מוקדם מדי להסיק מסקנות סופיות ולגבש המלצות לחקלאים. ברם, כשבוחנים את הגישה המוצעת מול השיטות החליפיות הנהוגות, כדאי להשתמש בגישה החדשה המוצעת, שמבוססת על תכונות הרלוונטיות של הצמח, הקרקע והאטמוספירה, לתזמון השקיה בטפטוף.

2. תמצית הרקע המדעי

באזורים רבים בארץ משתמשים במים שפירים להשקיית גידולים חד-שנתיים ומטעים. מחירם של המים השפירים גבוה, ההיצע שלהם מוגבל, במיוחד בשנים הקרובות, מה שמחייב השקיה יעילה. שיטת ההשקיה העיקרית באזורים הללו

היא טפטוף, בעיקר עילי. ההשקיה בטפטוף מאפשרת הספקה מתוזמנת של כמויות מים דרושות לנפח קרקע מצומצם ועל ידי כך צמצום אובדני מים על ידי התאדות וחלחול עמוק (Dasberg and Or, 1999; Nakayama et al., 1986). 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, אורור, מחלות קרקע והיבטים אגרוטכניים אחרים. במסגרת מחקר מקביל שהסתיים (קומנר וחובריו, 2009) פותחה גישה חדשה ותוכנה (DIDAS) לתכנון מערכת ההשקיה בטפטוף המתבססת על עיקרון של חישוב קצב קליטת המים היחסי במערכת של מקורות (טפטפות) ומבלעים (מערכות שורשים), כשקצב קליטת המים היחסי אינו נתון אלא מחושב. עיקרו של המחקר המקביל הוא פיתוח כלי עזר לתכנון הגיאומטריה של מערכות השקיה בטפטוף, דהיינו לקביעת המרחקים המיטביים בין השלוחות ובין הטפטפות לאורך השלוחה. ההבדל העיקרי בין הגישה שלנו לגישה מוצעת קודמת (Amoozegar-Fard A. 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 הגיאומטריה של מערכת ההשקיה אנחנו מציעים להתייחס למצב של יניקה מקסימאלית על ידי צמח – כלומר לחשב את קליטת המים הפוטנציאלית המקסימאלית על ידי צמח ששרוי בתנאים אידיאליים 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.

במחקר המדווח כאן השתמשנו באותו העיקרון וגם לקחנו בחשבון את ההתנגדות המשתנה עם שעות היממה של הצמח לקליטת מים כדי לתכנן ממשק ההשקיה מיטבי במים שפירים בתנאים של רמת השקיה מספקת או בהשקיה גרעונית שמכוונת ליצירת יבולים מופחתים או לשרידות עצים ללא יבול חקלאי.

הנושא של השקיה לא תמידית והשפעת תכיפות ההשקיה נידון בהרבה פרסומים זרים (Coelho and Or, 1997; Rawlins and Raats, 1975; Shock et al., 2005), אך ניסיונות מדווחים בספרות, המכוונים ללימוד השפעת תכיפות ההשקיה על מוליכות פיוניות, דיות, צימוח ווגטיבי והנבה של צמחים שונים נערכו משום מה בעיקר בארץ (Assouline et al., 2006; Segal et al., 2006; Li et al., 2002; et al., 2002; 2006). (Assouline et al., 2002) למשל, הראו דיות גבוהה פי שניים לאורך כל שעות היממה של תירס שגודל בקרקע חמרה בבית דגן והושקה בהשקיה רציפה לעומת תירס שהושקה פעמיים בשבוע באותה רמת השקיה יומית. בתירס שגודל בקרקע חולית ליד רחובות והושקה בעודף של 25%, נמדדו ביום הראשון והשני לאחר הפסקת ההשקיה מהלכים יומיים דומים של הדיות ואילו ביום השלישי לאחר הפסקת ההשקיה חלה פחיתה של הדיות לרמה של בערך 1/3 מזאת שבשני הימים הראשונים לאחר ההשקיה (Li et al., 2002). בניסוי לייזמטרים עם קרקע חולית-סיינית מיוטבתה בו הושקתה חמנית בתחום גדול של תכיפויות: מהשקיה רציפה ועד השקיה אחת ל-8 ימים נתקבלה ירידה רציפה בצימוח וביבול הגרעינים עם הירידה בתכיפות ההשקיה (Segal et al., 2006). לעומת זאת, בניסוי בפלפל, שגודל בחול דק בחוות הבשור והושקה בצורה רציפה או בהשקיה יומית, לא נתקבלו הבדלים במהלך היומי של הדיות (Assouline et al., 2006). כמוכן, לא נמצאו הבדלים מובהקים ביבולים של פלפל שהושקה פעם ביום או פעם ביומיים בתנאים דומים (פרידמן וחובריו, 2008).

מתוצאות הניסויים המוזכרים למעלה ומאלה שנתקבלו במחקרים דומים להם ניתן ללמוד על ההשפעה של תכיפות ההשקיה על הדיות, הצימוח והניבה, אך בגלל אופיים האמפירי לא ניתן להכליל מהם ולהקיש לגבי ההשפעה הצפויה בתנאים אחרים. אין כיום כלי חישובי פשוט שניתן להיעזר בו לקביעת ממשק השקיה מיטבי, בתנאים של השקיה גרעונית בפרט, ובתנאים של השקיה מספקת, בכלל. במחקר המדווח כאן פיתנו גישה חדשה וכלי חישובי פשוט, שמתבסס על מספר קטן של פרמטרים זמינים המאפיינים את הצמח, הקרקע והאטמוספירה, ומאפשר לחשב את נפח קליטת המים היחסי (יעילות ניצול המים) בתרחישים שונים של תכיפות ושעת ההשקיה.

3. מטרת המחקר היו:

1. פיתוח גישה חדשה לתכנון ממשק השקיה בטפטוף (תכיפות ותזמון ההשקיות) המתבססת על עיקרון חדש של נפח קליטת מים יחסי הגבוה מערך סף.
2. בחינה של הגישה חדשה בניסוי שדה.
3. איסוף מסד נתונים ראשוני לפרמטרים הדרושים עבור מגוון של גידולים וקרקעות חקלאיות באזורים בהם משקים במים שפירים.

4. שיטות ומהלך העבודה

במהלך שלוש שנות המחקר פיתחנו מודל לזרימה וקליטת מים עתיים באמצעותו ניתן להעריך את השפעת תזמון ההשקיה על קליטת המים היחסית. המודל הוטמע בתוכנת DIDAS לתכנון ותזמון השקיה בטפטוף. כמוכן ערכנו ניסויי שדה בחוות הבשור בהם בדקנו את תגובת צמחי פלפל למרווחי השקיה שונים, החל מהשקיה יומית ועד להשקיה אחת לשמונה ימים, למתן השקיה יחידה קצרה בבוקר לעומת השקיה ממושכת לאורך שעות היום ולשעת ההשקיה הקצרה. נמדדו הגובה, המשקל ויבול הפירות לאורך עונת הגידול ובפרקי זמן קצובים נמדדה קליטת המים בשיטת גל החם בחלק מהטיפולים. במקביל ערכנו ניסויים (שמדווחים כאן בקיצור) בהם נבחנה תגובת הצמחים למנות מים שונות.

4.1. ניסוי שדה מקדים (2010)

בצענו ניסוי שדה מקדים עם פלפל (ורגסה) בחוות הבשור, שתילה ב-1 ביוני וקטיפים שבועיים עד סוף דצמבר.

הניסוי בחן תגובה לכמויות מים וכלל 6 טיפולים, בחלק הצפוני של בית הרשת:

- | | | | |
|----|------|---|--|
| 1. | 40% | השקיה מרחק | בין צמחים וטפטפות של 30 ס"מ לאורך השלוחה |
| 2. | 60% | השקיה | " |
| 3. | 80% | השקיה | " |
| 4. | 100% | השקיה | " |
| 5. | 120% | השקיה | * |
| 6. | 100% | מרחק בין צמחים וטפטפות של 100 ס"מ לאורך השלוחה. | |

שלוחות הטפטוף: יוני-רעם 1.6 ל"ש' כל 30 ס"מ (חוץ מטיפול 6), אל-נגר קוטר 17 מ"מ
 דשן: 1.6 ל"מ"ק, מור 4:2.5:6 + מיקרו + 1% Mg + 1% Ca (ריכוז אחד לכל הטיפולים).
 בכל הטיפולים מרתק 120 ס"מ בין השורות.

בכל הטיפולים נעשה שימוש במים שפירים (ללא המלחה)
 בכל הניסויים הייתה השקיה יומית, בסביבות השעה 6:00.

100% השקיה: על-פי התאדות ממוצעת משבוע שעבר $1/0.9 \times 0.62 \times$ (Allen et al.,) FAO של הגידול של ה-1998.

רשת 30% צל פנינה בתקרה ורשת 50 מש בצדדים.

7. בדיקות שנעשו (רק חלקן הוצג בדו"חות הקודמים):

צמח: גובה, משקל: עלים, פירות, חנטים וגבעול בסוף נובמבר, יכול שבועי: משקל כללי, מספר פירות, נגיעות בשחור פיטם, עיוותים ווירוס, אנליזות עלים ופרי בסוף נובמבר, חשיפה וצילום מערכות שורשים בסוף העונה.
קרקע: פירוסיס דו-מימדיים של רטיבות ומליחות עם מחושי TDR, מתח מים בעזרת טנסיומטרים בשני עומקים, פירוסיס דו-מימדיים של מליחות וכלורידים בסוף העונה.

4.2. ניסוי תכיפות השקיה ראשון (2011)

הניסוי כלל 6 טיפולים שקיבלו אותה מנת מים עונתית ליחידת שטח בהתאם למקדם גידול המשתנה בצורת טרפז במהלך עונת הגידול ולדרישות אידיי מחושבות מנתונים מטאורולוגיים. בכל הטיפולים היה עומד של 2778 צמחים לדונם במרחקים של 0.3 מ' בשורה ו- 1.2 מ' בין השורות, וטפטפת אל-נגר של 1.6 ל/ש ליד כל צמח. בעשרה הימים הראשונים אחרי השתילה ב-1 ביוני ניתנו השקיות אחידות בהשקיה אחת בבוקר לכל הטיפולים ואח"כ נבדקו 2 משתני השקיה ב- 5 בלוקים (באקראי: 1) 4 מרווחים השקיה של 1 עד 8 ימים –השקיה קצרה בבוקר; 2) במרווחי השקיה של יום אחד או 4 ימים, השקיה קצרה אחת בבוקר או השקיה ממושכת (מדומה על ידי 4 השקיות קצרות ביום):

1. השקיה קצרה בבוקר בכל יום (בשעה 3:30)

2. השקיה קצרה בבוקר אחת ליומיים (בשעה 7:00)

3. השקיה קצרה בבוקר אחת ל-4 ימים (בשעה 3:30)

4. השקיה קצרה בבוקר אחת ל-8 ימים (בשעה 3:30)

5. השקיה ארוכה בכל יום (4 פולסים משעה 7:00 עד שעה 16:00)

6. השקיה ארוכה אחת ל-4 ימים (4 פולסים משעה 7:00 עד שעה 16:00)

בכל הטיפולים נעשה שימוש במים שפירים ממתקן ההתפלה באשקלון (ללא המלחה) + דשן מור (4:2.5:6) 1% מגניון, 1% סידן) בריכוז אחיד (1.3 ליטר למ"ק).
זן פלפל: הרגסה, הדליה ספרדית.

רשת 30% צל פנינה בתקרה ורשת 50 מש בצדדים (הוחלפה בתחילת העונה שעברה).

הבדיקות שנעשו (תוצאות רק של חלקן יוצגו בדו"ח):

צמח: גובה, משקל: עלים, פירות, חנטים וגבעול, יכול ב-11 קטיפים (מ-80 DAP עד 205 DAP, DAP – ימים לאחר השתילה): משקל כללי, מספר פירות, נגיעות בשחור פיטם, עיוותים ווירוס, אנליזות עלים ופרי בסוף נובמבר, חשיפה וצילום מערכות שורשים בסוף העונה. קליטת מים בשיטת גל החם בחלק מהטיפולים.
קרקע: פירוסיס דו-מימדיים של רטיבות ומליחות עם מחושי TDR, מתח מים בעזרת טנסיומטרים בשני עומקים, פרוסי מליחות דו-מימדיים בדיגום בסוף העונה.

4.3. ניסוי תכיפות השקיה שני (2012)

ניסוי תכיפות ההשקיה השני כלל 6 טיפולים:

1. השקיה בכל יום (בשעה 6:30)

2. השקיה אחת ל-4 ימים (בשעה 6:30)

3. השקיה אחת ל-7 ימים (בשעה 6:30)

4. השקיה בכל יום ובכל 7 ימים במחזוריים דו-שבועיים (בשעה 6:30)

5. השקיה אחת ל-7 ימים שהוחלפה להשקיה בכל יום ב-5 בדצמבר (בשעה 6:30)

6. השקיה בכל יום שהוחלפה להשקיה אחת ל-7 ימים ב-23 בנובמבר (בשעה 6:30)

בכל הטיפולים: השקיה ברמה של 100%, שלוחה אחת, צמחים/טפטפות כל 30 ס"מ, 120 ס"מ בין השורות.
בכל הניסויים נעשה שימוש במים שפירים (ללא המלחה) + דשן מור (4:2.5:6) 1% מגניון, 1% סידן) בריכוז אחיד (1.3 ליטר למ"ק).
זן: הרגסה, הדליה ספרדית.

רשת 30% צל פנינה בתקרה ורשת 50 מש בצדדים (הוחלפה בתחילת עונת 2010).
ב-2012 מקדם הגידול נותר על ערכו המקסימלי, 1.15, ולא פחת ל-0.9 בסוף העונה.
 הבדיקות שנעשו דומות לאלו שבשנת 2011.

4.4. עקרונות הגישה המוצעת והמודלים התמידי והעתי לזרימה וקליטת מים

4.4.1 מודל זרימה וקליטת מים תמידיים לתכנון הגיאומטריה של מערכת הטפטוף

קצב קליטת המים היחסי המקסימאלי האפשרי ישמש לתכנון הגיאומטריה של מערכת ההשקיה ויחושב בעזרת פתרון אנליטי לבעיית זרימת המים והקליטה התמידית, תחת ההנחות הבאות (Communar and Friedman, 2010a,b,c):

1. קרקע אחידה, איזוטרופית ו"מעריכית": $K = K_{sat} e^{-\alpha\psi}$ (Gardner, 1958) (K – מוליכות הידראולית, ψ – עומד קפילרי)

$$2. \text{ ליניאריות של בעיית הזרימה בעזרת ההתמרה של קירכהוף: } \varphi = \int_{\psi_d}^{\psi} K(\psi) d\psi = \frac{K(\psi) - K(\psi_d)}{\alpha}$$

3. הפתרון לפרוס הרטיבות במרחב ולקליטת המים היחסית הינו סופר-פוזיציה של הפתרון היסודי לפיזור מים (תמידי) ממקורות נקודתיים (Raats, 1971) (או קוויים (Philip, 1971)): מקורות חיוביים המייצגים את הטפטפות בפני הקרקע ומבלעים שליליים המייצגים את נפחי מערכות השורשים.

4. קצב קליטת המים (q_{si}) המקסימאלי האפשרי יחושב בהנחה של יניקה מקסימאלית ($\varphi_f = 0, \zeta = 0$) בנפח שורשים בעל צורה גיאומטרית פשוטה (כדור עם רדיוס r_0 , גליל אופקי) שגודלו ועומקו נתונים ומרכזו מתלכד עם מיקום המבלע

$$\bar{q}_{si} = \frac{\varphi_{so}(0, z_{bot}, t)}{\varphi_{si}(0, z_{bot})}$$

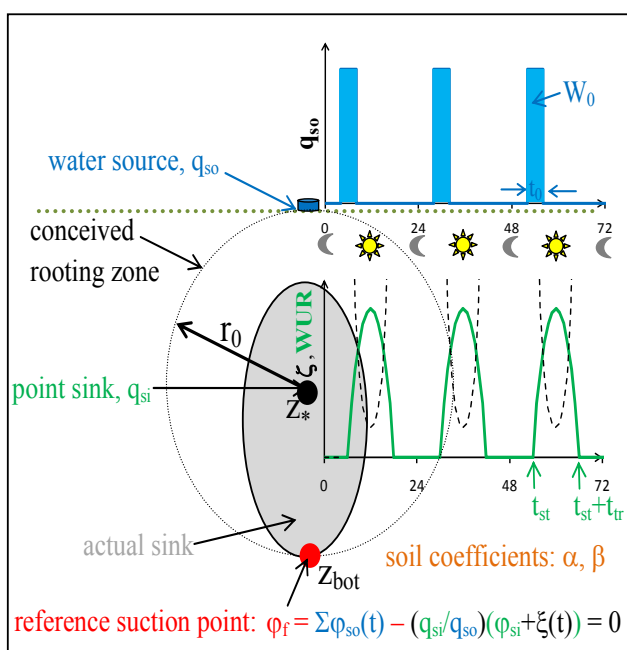
5. ההתאדות מפני הקרקע מתכונתית למוליכות ההידראולית ומחושבת על-פי הגישה של (Lomen and Warrick, 1978).

4.4.2 מודל זרימה וקליטת מים עתיים לתכנון התזמון של ההשקיה

נפח קליטת המים היחסי, שאנחנו מציעים לחשבו כדי לקבוע את תזמון ההשקיה המיטבי, מחושב בעזרת פתרון אנליטי לבעיית זרימת המים והקליטה הלא-תמידית.

1. הפיתרון האנליטי לבעיית הזרימה הלא תמידית יהיה על-פי הגישה של (Warrick, 1974), המחייבת הנחה נוספת של קשר ליניארי בין המוליכות ההידראולית של הקרקע (K) לתכולת הרטיבות הנפחית (θ). שיפור אחד שהוכנס הוא החלפת השיפוע הקבוע בכל תחום הרטיבות $dK/d\theta = K_{sat}/\theta_s$ בשיפוע התלוי בתכולת הרטיבות המאפיינת את נפח הקרקע הרלוונטי לקליטה לאורך מחזור ההשקיה.

2. על-פי הגישה המוצעת מתארים מחזורי השקיה שלמים הכוללים את ההשתנות העתית של חידור המים מהטפטפות והתפזרותם בקרקע תוך כדי קליטה משתנה בזמן בנפח בית השורשים הפעיל (משתנה גם הוא במרחב ובזמן) והתאדות מפני הקרקע. מכיוון ומשוואת הזרימה המותמרת (כתובה במונחים של משתנה הרטיבות של פוטנציאל השטף המטריצי, φ) היא לינארית גם בזמן וגם במרחב, ניתן לתאר בעזרתה את



ההשתנות העתית לאורך מחזור ההשקיה והקליטה על ידי סופר-פוזיציה של הפתרונות עבור התקופה בה יש הספקת מים קבועה מהטפטפת ועבור התקופה בה אין מקור מים (שמתוארת על ידי מקור מים שלילי בספיקה זהה). הליניאריות במרחב מאפשרת את תיאור זרימת וקליטת המים על ידי סופר-פוזיציה של המקורות (טפטפות) והמבלעים (שורשים) על-פי פיזורם בשדה.

3. בניגוד להנחה של התנגדות מקומית לקליטת מים זניחה לצרכי תכנון המרחק בין השלוחות והטפטפות (הנחה 4 ב-4.4.1), כאשר מתכננים את תזמון ההשקיה מתייחסים להתנגדות מקומית (ζ) שמייצגת התנגדות פיוניות, למשל, ומקטינה

$$\bar{q}_{si} = \frac{\varphi_{so}(0, z_{bot})}{\varphi_{si}(0, z_{bot})(1 + \zeta)} \quad \text{את קצב קליטת המים הרגעי על-פי:}$$

4. הנחנו שינוי עתי בהתנגדות המבלע על-פי מהלך יומי סינוסואידלי עם התנגדות גדולה בשעות הלילה (ζ_0) שמתחילה לרדת, למשל, בשעה 6:00, מקבלת ערך מינימאלי, בשעה 12:00 ($\zeta_{05} = 0$) ועולה שוב לערך גבוה (ζ_0) בשעה 18:00:

$$\zeta = \zeta_t \varphi_{si}(0, z_{bot}); \quad \zeta_t = \left\{ \zeta_{05} + (\zeta_0 - \zeta_{05}) \left[\csc^\lambda(\pi(t - t_{st})/t_{tr}) - 1 \right] \right\}$$

עבור מצב של זמינות מים גבוהה באזור מערכת השורשים צפויה התנגדות (פיוניות) זאת ליצור מהלך הפוך של דיות (שקולה לקליטת מים – אנחנו מזניחים את השפעת קיבול הצמח למים) שמתחילה בשעה 6:00, מקבלת ערך מקסימאלי בשעה 12:00 ומסתיימת בשעה 18:00. המהלך היומי של התנגדות הצמח מאופיין על ידי שני פרמטרים: ההתנגדות הגבוהה בלילה (ζ_0) והמעריך, λ , שמאפיין את קצב ההשתנות של ההתנגדות. במקרים בהם זה רלוונטי ניתן לשנות את אורך מחזור הדיות (מ-12 שעות) ואת שעת ההתחלה (משעה 6:00), ואם מצפים להתנגדות משמעותית בצוהרי היום, להשתמש בפרמטר נוסף של התנגדות פיוניות סופית בצהריים ($\zeta_{05} > 0$).

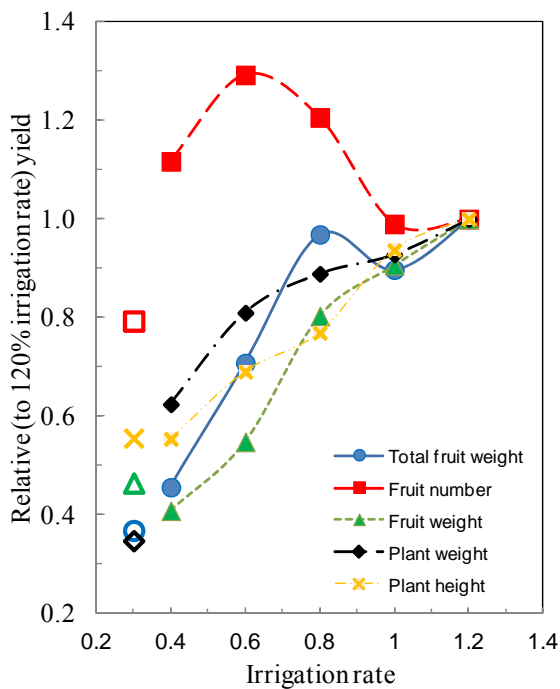
5. נפח קליטת המים היחסי (W_{si}/W_0) מחושב מתוך אינטגרציה של המהלך העתי של קצב קליטת המים הרגעי ($q_{si}(t)$)

$$\frac{W_{si}}{W_0} = \frac{1}{q_{so}t_0} \int_6^{18} q_{si}(t) dt \quad : (q_{so}t_0) \text{ בהשקיה המסופקת}$$

5. תוצאות ודיון

5.1 תמצית תוצאות של ניסוי השדה המקדים (2010, 4.1)

בדו"ח השנתי הראשון הוצגו בפירוט תוצאות הניסוי המקדים, שמטרתו הייתה לאפיין את תגובת צמחי הפלפל למנות השקיה שונות בהשקיה יומית קצרה. התוצאות העיקריות של הניסוי המקדים הראו שבמרחקי שתילה רגילים (30 ס"מ) קצב הצימוח (גובה הצמחים ומשקל כללי טרי), ומשקל הפרי הנקטף גדלו מונוטונית עם הגידול ברמת ההשקיה. מספר הפירות המקסימאלי התקבל בהשקיה של 60% עם פחיתה לכיוון רמות השקיה של 40%-120%. משקל היבול הכולל משתנה יחסית יותר ממספר הפירות, כיוון שמשקלי הפרי הבודד גדלים גם כן עם הגידול במנת ההשקיה. אחוז הנגיעות בשחור פיטם ובפרי מעוות גדלו עם הירידה ברמת ההשקיה. הטיפול של שתילה והשקיה כל 1 מ' ברמת השקיה של 100% (לצמח, כלומר 30% לדונם) הניב צמחים נמוכים ועם יבול כללי לדונם דומה לטיפול ההשקיה ברמה של 40%, כשמרבית הפרי היה מעוות או נגוע בשחור פיטם.

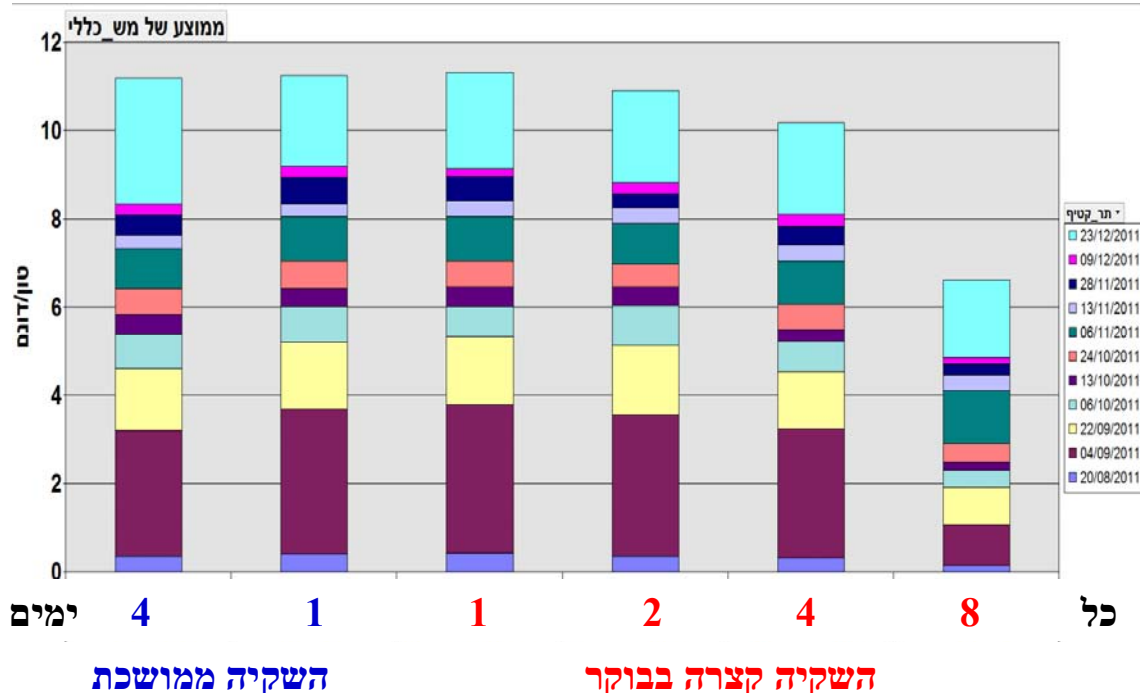


בתרשים משמאל מתוארים המשקל הכולל לדונם, מספר הפירות לדונם, משקל הפרי הבודד, משקל הצמחים הכולל וגובה הצמחים יחסית למדדים המתאימים ברמת השקיה של 1.2 כנגד רמת ההשקיה. הטיפולים של רמות ההשקיה של 0.4 עד 1.2 בסמנים מלאים והטיפול של 1m בסמנים ריקים. בעקומים המתארים את הטיפולים שנשתלו במרחק 0.3 m רואים שתי נקודות קיצון מקומית בתגובת מספר הפירות, שנראות אמיתיות למרות מספר הנקודות הקטן, עם שיא בולט במנת השקיה של 0.6 ושפל מתון במנת השקיה של 1.0, שאחריה המספר עולה במקצת עם הגדלת המנה. משקל הפרי הממוצע גדל מונוטונית עם עליה חדה יותר עד לרמת השקיה של 0.8 ומתונה יותר בתחום 0.8 – 1.2. משקל היבול הכולל שהוא מכפלת שני המדדים הקודמים עולה בצורה לינארית בתחום 0.4 – 0.8, יורד קצת במנה 1.0 ועולה למנה מרבית בטיפול 1.2. בתחום

0.8 – 1.2 חלק מההבדלים במספר הפירות ובמשקל פרי ממוצע מובהקים וההבדלים במשקל הכולל לא מובהקים. בהשוואה על בסיס של יחידת שטח הטיפול של מרווח שתילה של 1 מ' הניב מספר פירות קטן יותר, משקל פרי ממוצע קצת יותר גדול ומשקל היבול מצטרף לעקומי התגובה במרווח שתילה של 0.3 מ'. השוואה על בסיס מנת השקיה זהה לצמח (לטיפול 1.0 שקיבל אותה מנת מים לצמח ופי 3.33 מים ליחידת שטח, לא מוצגת) מראה יבול גדול פי 1.35 בגלל מספר גדול פי 2.7 של פירות קטנים פי 0.5. התגובה כזו הנה תוצאה של שילוב השפעות המרווח בין הצמחים והטפטפות על יכולת התפתחות הנוף והשורשים, על הספקת מי הטפטפות לנפח מאכלס השורשים ועל תלות יחסי צימוח ווגטטיבי יצירת פירות וגידול הפירות בזמינות המים לצמח ומצב המים בצמח. הצמחים שהושקו ברמה של 1.0 היו גבוהים יחסית ומשקלם הכולל היה נמוך יחסית, מה שהוביל אולי לפירות קטנים יחסית ולמשקל פירות כולל נמוך מהצפוי.

5.2 תמצית התוצאות של ניסוי תכיפות ההשקיה הראשון (2011)

בדו"ח השנתי השני הוצגו בפירוט תוצאות ניסוי תכיפות ההשקיה הראשון. הצמחים שהושקו אחת ל-8 ימים היו הנמוכים ביותר לאורך כל הניסוי בצורה מובהקת. קצב הצימוח במחצית הראשונה של הניסוי היה גבוה יותר בצורה מובהקת בתכיפויות ההשקיה הגבוהות, אבל לקראת סוף הניסוי היה קצב הצימוח דומה בכל תכיפויות ההשקיה עם יתרון קל למרווחי ההשקיה הגדולים. בטיפול ההשקיה היומית הארוכה היה קצב הצימוח גבוה יותר מזה של ההשקיה היומית הקצרה בתחילת הניסוי והמגמה התהפכה בסוף הניסוי. באיור שבעמוד הבא מוצג היבול הכולל (משקל בטון לדונם) שהתקבל בששת הטיפולים. ניתן לראות שבהשקיה קצרה בבוקר (4 העמודות הימניות) הייתה ירידה מונוטונית במשקל היבול הכללי מיבול מרבי בהשקיה יומית ליבול מינימאלי בהשקיה אחת ל-8 ימים. משקל היבול הכללי בהשקיה ממושכת יומית היה זהה לזה שהתקבל בהשקיה קצרה (העמודות השנייה והשלישי משמאל) ובהשקיה ממושכת אחת ל-4 ימים (העמודה השמאלית) התקבל יבול גבוה יותר לעומת השקיה קצרה אחת ל-4 ימים בחודש האחרון של הניסוי. אחוז הפרות המעוותים היה מקסימאלי בהשקיה אחת ל-8 ימים וירד כמעט מונוטונית עם העלייה בתכיפות השקיה (הפחיתה באחוז הפרי המעוות חזקה יותר בגלל העלייה במספר הפירות – לא מוצג). הנגיעות בשחור פיטם הייתה נמוכה בכל הטיפולים.

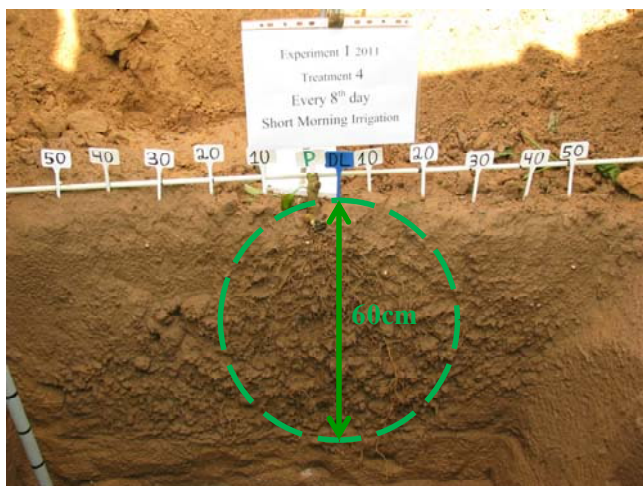


ההבדלים בערכים של מדדי היבול המצטברים במרווח בין ימי ההשקיה 1 עד 4 ימים עם השקיה אחת או 4 השקיות ליום היו קטנים ולא מובהקים. לעומת זאת התגובה להגדלת המרווח בימים מ-4 ל-8 ימים הייתה חזקה ומובהקת בכל המדדים למעט משקל פרי מתאים ליצוא. מספרי הפירות ומשקלי היבולים הכלליים והמתאימים ליצוא היו יותר נמוכים והאחוז המספרי והמשקלי של הפירות הלא מתאימים ליצוא היו יותר גדולים במרווח השקיה של 8 ימים. בשנת 2011 הנגיעות בשחור פיטם הייתה נמוכה וההבדלים במספרי הפירות ומשקלי היבול הנגועים בעיקר בגלל הגברה של עיוות הפרי. עידון ההבחנה של השפעות מרווחים עד 4 ימים והשקיה אחת לעומת 4 השקיות ביום בניחוח דו-גורמי של 4 טיפולים הראה הבדלים לא מובהקים עם יתרון להשקיה יומית לעומת אחת ל-4 ימים ולהשקיה ממושכת לעומת השקיה קצרה במדדים החיוביים, תגובה הפוכה של הפירות המעוותים, יותר פירות נגועים בשחור פיטם בהשקיה יומית ופחות בהשקיה ממושכת לעומת השקיה קצרה. אחוזי הפירות המעוותים היו גדולים בצורה מובהקת גם במרווח של 4 ימים לעומת השקיה יומית וגם בהשקיה קצרה לעומת השקיה ממושכת.

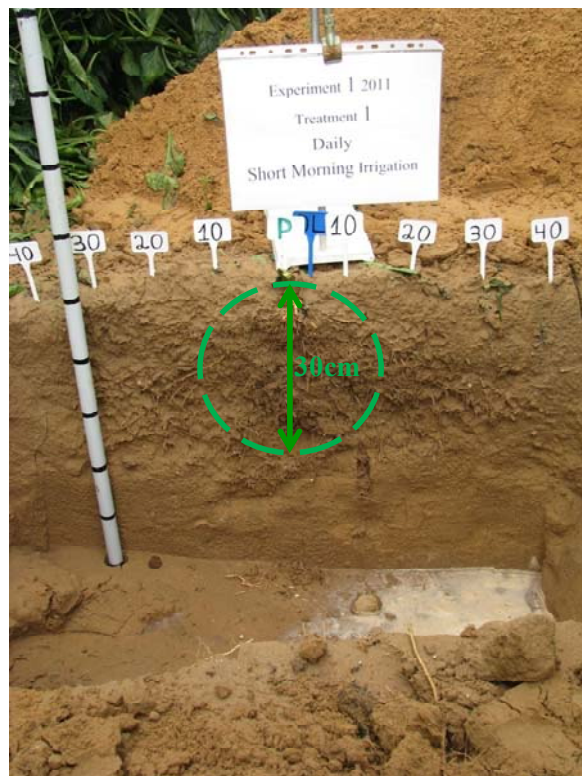
ככלל ההבדלים שנתקבלו בין מרווחי השקיה של 1 עד 4 ימים אינם גדולים. שתי הסיבות העיקריות לכך הן: יכולת תאחיזת המים הגבוהה של החול הדק שמוליכותו ההידראולית פוחתת עם העומק (לא מוצג) והתפתחות מערכת שורשים עמוקה יותר במרווחי השקיה גדולים. באיור עם הצילומים שבעמוד הבא מוצגות מערכות השורשים שהתפתחו בהשקיה יומית קצרה ובהשקיה אחת ל-8 ימים: בהשקיה אחת לשמונה ימים נתקבלה מערכת שורשים בקוטר כפול, 60 ס"מ לעומת 30 ס"מ בהשקיה יומית. בהתאמה לכך ניתן לראות בשני האיורים הבאים את פירוסי הרטיבות ומליחות שנמדדו בטיפולים של השקיה יומית וביום השלישי לאחר ההשקיה בטיפול של השקיה אחת לארבעה ימים. האיור הראשון מציג את הפרשי תכולת הרטיבות שנמדדו בבוקר, מיד לאחר ההשקיה (היומית) ואחר-הצהריים, בחלק העליון 2 חזרות להשקיה יומית ובחלק התחתון שתי חזרות ליום השלישי אחרי השקיה אחת ל-4 ימים. ניתן לראות שאובדני המים (הכוללים קליטה, התאדות וחלחול החוצה מהפח הנמדד) בהשקיה יומית גדולים יותר ושהם מרוכזים יותר קרוב לטפטפת לעומת הפירוסי בהשקיה אחת ל-4 ימים. באיור הבא מוצגים מקדמי ההתרכוזות של המוליכות החשמלית: המוליכות החשמלית של תמיסת

הקרקע אחה"צ מחולקת במוליכות החשמלית בבוקר, ושוב מתקבלת תמונה דומה של התרכזות גדולה יותר (המעידה על ויתר קליטת מים והתאדות) ליד הטפטפת בהשקיה יומית לעומת השקיה האחת ל-4 ימים.

השקיה קצרה בכל 8 ימים



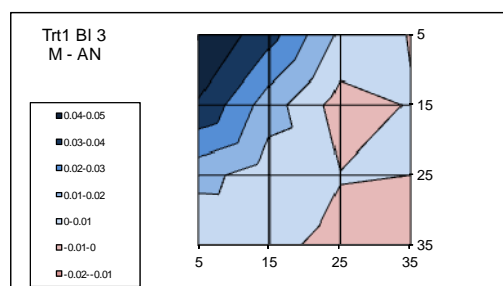
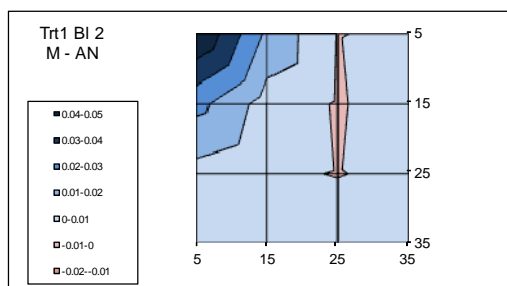
השקיה קצרה בכל יום



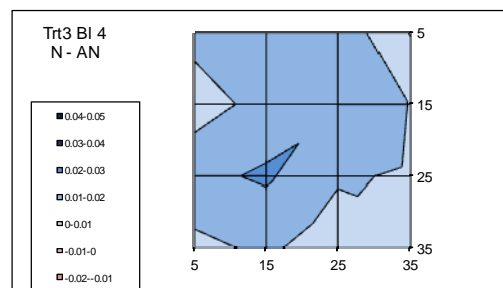
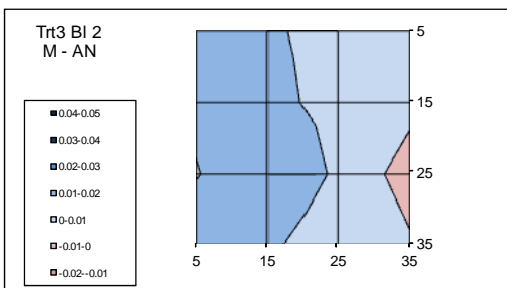
2011

מאזן מים בין שעות הבוקר לאחר-הצהרים ממדידות TDR (ניסוי 1, 24 אוגוסט 2011):
 הפרשי רטיבות בין הבוקר לאחר-הצהריים (2 חזרות)

טיפול 1
 השקיה
 יומית קצרה

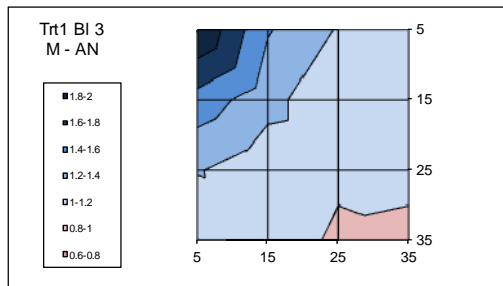
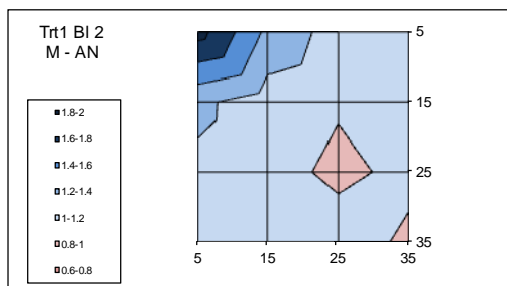


טיפול 3
 השקיה
 קצרה אחת
 ל-4 ימים
 (הושקה
 לפני 3 ימים:
 ב-21)

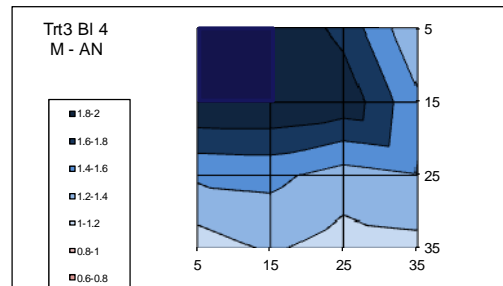
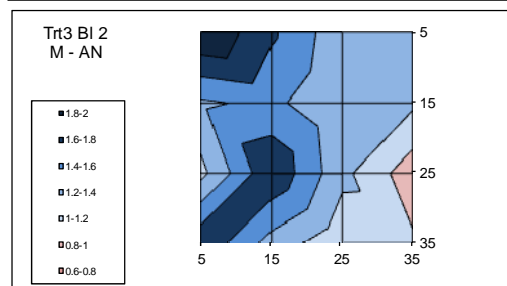


יחס מליחות בין אחר-הצהריים לבוקר (2 חזרות)

טיפול 1
השקיה
יומית קצרה



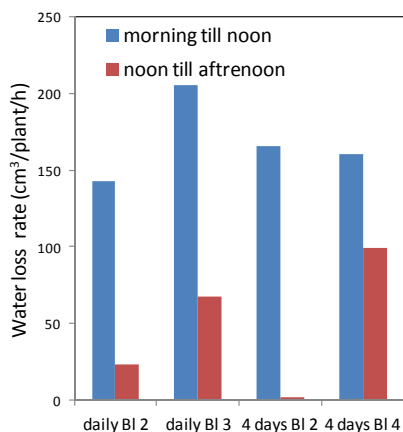
טיפול 3
השקיה
קצרה אחת
ל-4 ימים
(הושקה לפני 3
ימים: ב-21)



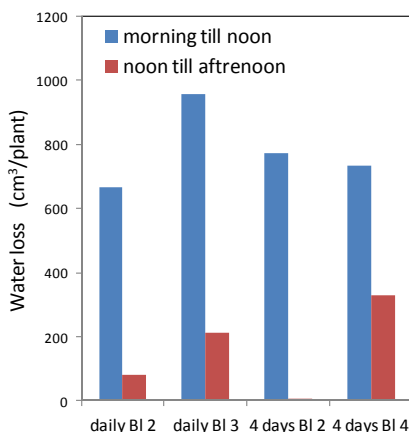
באיור למטה מוצעים מאזני המים בנפח הנמדד (למרחק ולעומק 40 ס"מ מהטפטפת) איבוד המים (קליטה, חלחול לעומק והתאדות מפני הקרקע) משעה 8:00 ועד שעה 16:00 היה בערך 45% ממנת ההשקיה היומית בשני הטיפולים. איבוד המים מנפח הקרקע הפעיל בקליטה (20 x 20 cm בהשקיה יומית ו-20 x 40 cm בהשקיה אחת ל-4 ימים) היה בערך 40% בהשקיה היומית ו-30% בהשקיה אחת ל-4 ימים (ביום השלישי לאחר ההשקיה). איבוד מים של 40% בטיפול ההשקיה היומית נמצא בהתאמה טובה למדידות קליטת מים בשיטת גל החם (לא מוצגות) שהראו קליטת מים של כ-30 עד 40% ממנת ההשקיה. איבודי המים גדולים בצורה משמעותית יותר בבוקר לעומת שעות אחר הצהריים.

מאזן מים בין שעות הבוקר לאחר-הצהריים ממדידות TDR (ניסוי 1, 24 אוגוסט 2011): מאזנים יומיים

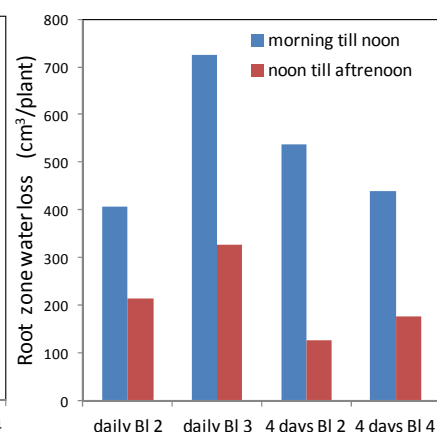
קצב איבוד מים



איבוד מים כללי



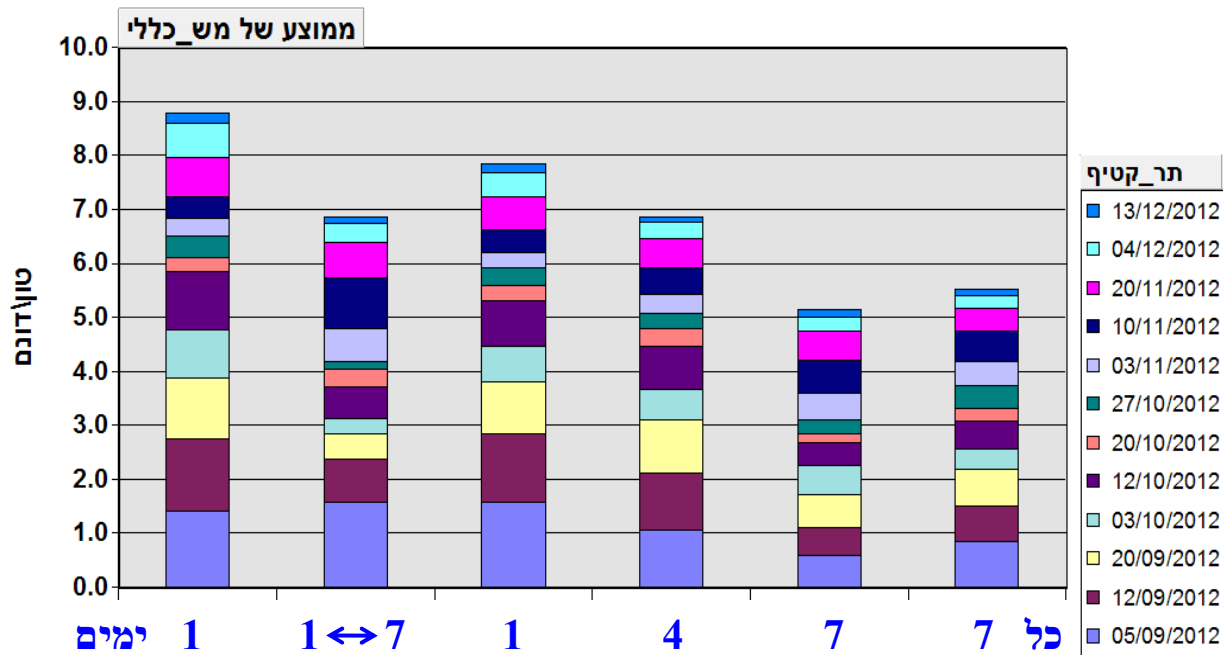
איבוד מים מאזור השורשים



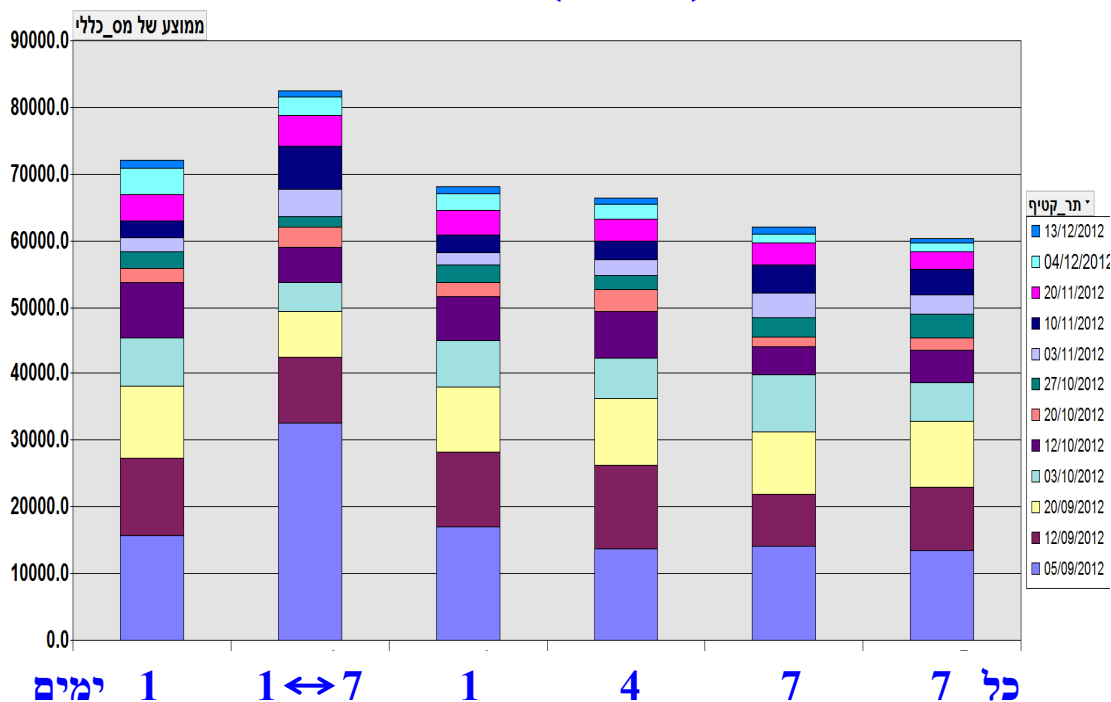
5.3 תמצית התוצאות של ניסוי תכיפות ההשקיה השני (2012)

טיפולי ההשקיה בשנת 2012 הניבו תוצאות דומות לאלו שהתקבלו בשנת 2011, ולכן נדווח רק על מקצתן. בשני האיורים הבאים מוצעים משקל היבול הכולל ומספר הפרות בטיפולים השונים. כמו בשנת 2011, משקל היבול פחת עם עליית מרווחי ההשקיה ומספר הפרות הכללי פחת, אם כי במידה מתונה יותר. הטיפול של השקיה מתחלפת: שבועיים בכל יום ואח"כ 2 השקיות שבועיות הקדים בפריחה ובהנבה והנתונים המצטברים שלו דומים לאלו של השקיה אחת ל-4 ימים.

משקל יבול כללי (טון לדונם) בניסוי הראשון 2012

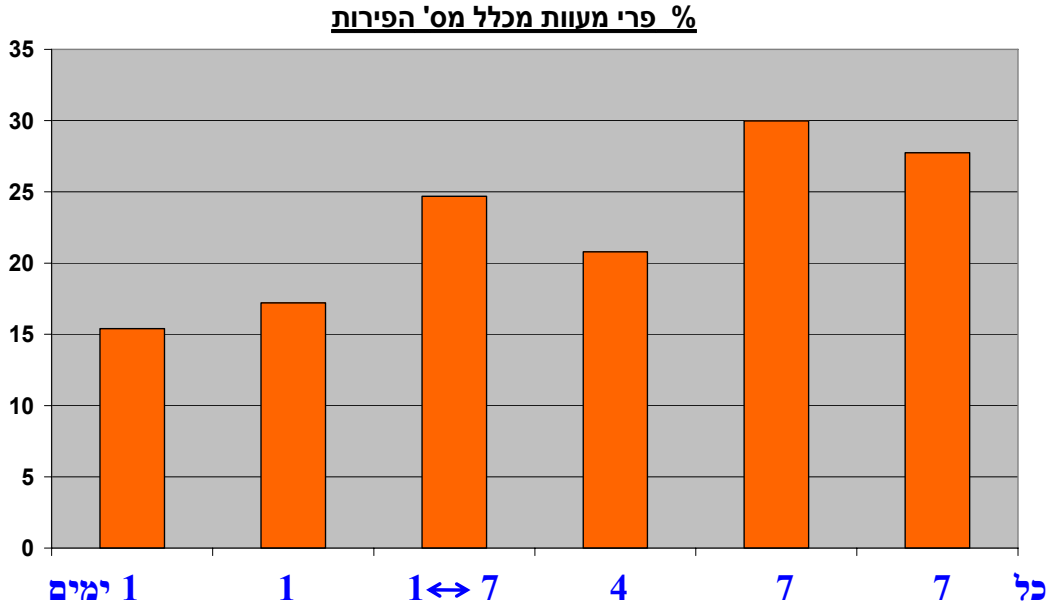


מספר פירות כללי (לדונם) בניסוי הראשון 2012



באיור הבא ניתן לראות את אחוזי הפרי המעוות, וכמו בשנת 2011 הוא גדל עם התארכות מרווחי ההשקיה. הנגיעות בשחור פיטם ובנזקי חם הייתה נמוכה (לא מוצגים), מלבד הטיפול המתחלף של שבועיים השקיה יומית – שבועיים השקיה שבועית של-10% מהפרות שלו היו נזקי חם.

% פרי מעוות בניסוי הראשון 2012



באיור בעמוד הבא מובאת השוואה של מהלכי קליטת המים היומיים לאורך שבוע (בסוף אוגוסט – תחילת ספטמבר) בטיפולים של השקיה יומית והשקיה אחת לשבוע. מנת ההשקיה היומית הייתה כתקופה זאת כ- 2 ליטר לצמח ליום (5.5 מ"מ ליום), כ-92% מההתאדות הפוטנציאלית המוערכת מחוץ לבית הרשת. קליטת המים היומית של הצמחים המושקים בכל יום, הגדולים יותר (0.94 ק"ג משקל טרי ב-15 באוגוסט), הייתה רק 32% ממנת ההשקיה היומית, לעומת 28% בלבד של הצמחים הקטנים יותר (0.52 ק"ג משקל טרי ב-15 באוגוסט), שהושקו אחת לשבוע. תוצאה מפתיעה לכאורה היא שקליטת המים היומית לאורך מחזור ההשקיה השבועית כמט ולא השתנתה, כשרק ביום שלפני ההשקיה (היום הנמדד הראשון, משמאל) נראית קליטה פחות בכמה אחוזים בודדים. ההסבר לכך הוא כנראה המוליכות ההידראולית האפקטיבית (לאורך מחזור ההשקיה) הנמוכה של קרקע הבשור שגורמת להתקדמות איטית מאד של פולס ההשקיה ומערכת השורשים העמוקה יותר של צמחי הפלפל שהושקו בתדירות של אחת לשבוע (בעמודים הבאים תובא הדמיה של קליטת המים בשני הטיפולים בעזרת DIDAS). הסבר אפשרי נוסף הוא שבימים העוקבים לאורך מחזור ההשקיה הצמח קולטת מים משורשים יותר ויותר עמוקים. תהליך זה הוכח במעבדה (Doussan et al., 2006), אבל לא ידוע לנו אם הוכח בשדה. בסוף אוקטובר, כשהצמחים היו גדולים יותר וההתאדות הפוטנציאלית נמוכה יותר (כ-4 ליטר לצמח ליום), צמחים שתולים במרווחים גדולים יותר של 100 x 120 ס"מ שהושקו בכל יום קלטו כ-40% (0.47 ליטר לצמח) ממנת ההשקיה היומית (1.18 ליטר). סביר להניח שצמחים שתולים במרווחים של הניסוי המדווח (120 x 30 ס"מ) קלטו חלק גדול יותר ממנת ההשקיה היומית.

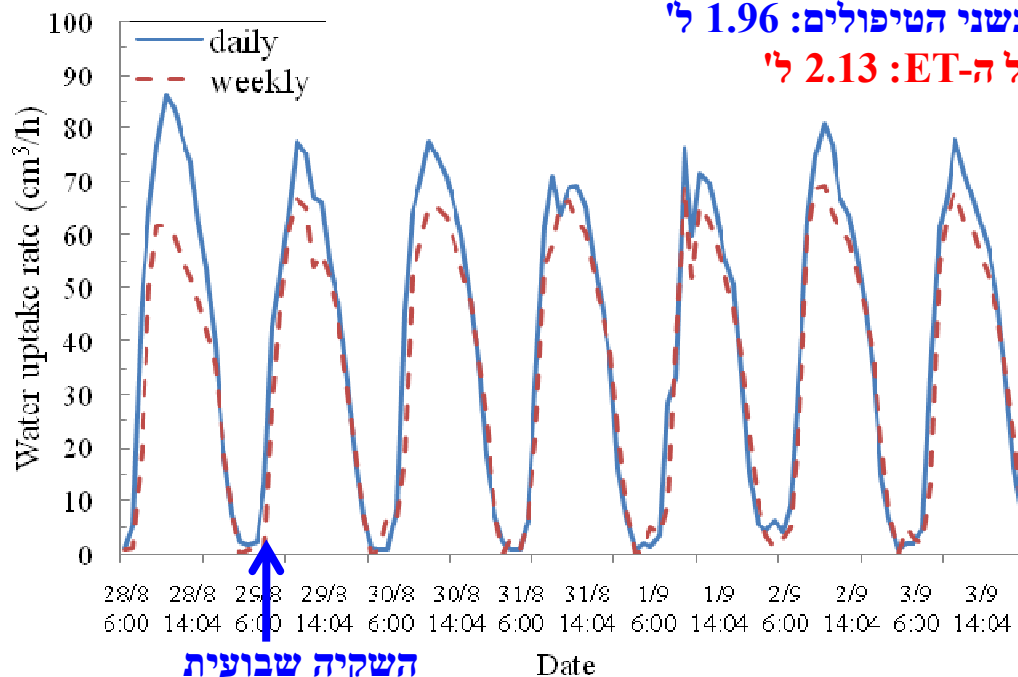
קליטת מים בשיטת גל החם בניסוי הראשון 2012

השקיה יומית מול שבועית

קליטת מים יומית בהשקיה יומית: 0.63 ל' (32% מההשקיה)
קליטת מים יומית בהשקיה שבועית: 0.55 ל' (28% מההשקיה)

השקיה יומית בשני הטיפולים: 1.96 ל'

הערכת PM של ה-ET: 2.13 ל'



5.4 הטמעה של המודל העתי לזרימה וקליטת מים בתוכנת DIDAS

תוכנת DIDAS (Drip Irrigation Design and Scheduling) החינמית ניתנת להורדה מאתר המכון למדעי המים

והקרקע של מנהל המחקר החקלאי (<http://www.agri.gov.il/en/units/institutes/6.aspx>). כפי שנכתב לעיל

התוכנה מתבססת על עיקרון חדש של חישוב יעילות ניצול המים (קליטת מים יחסית) במערכת של מקורות (טפטפות) –

ומבלעים (מערכות שורשים), כשקליטת המים הפוטנציאלית אינה נתונה אלא מחושבת. מוצע כי הצבת הטפטפות תקבע

על-פי העיקרון של יעילות ניצול מים פוטנציאלית גבוהה מערך סף עבור גודל מערכת שורשים, סוג קרקע והתאדות

פוטנציאלית נתונים, כשהגורם המגביל הינו היכולת של הקרקע להוליך את המים מהטפטפות אל מערכות השורשים,

כשהצמח צריך להתחרות עם כוחות הכבידה והקפילריות על המים הזמינים לקליטה. יעילות ניצול המים המקסימאלית

האפשרית מחושבת בעזרת פתרונות אנליטיים עבור מקרים פרטיים לבעיית ה'מקור-מבלע'. בנוסף לחישוב קליטת המים

היחסית מאפשר המודל לצייר את קווי הזרם התוחמים את נפחי הקרקע דרכם המים מתאדים לאטמוספירה, נקלטים לצמח

ומחלחים לעומק הקרקע. לצרכי תכנון של הגיאומטריה של מערכת הטפטוף העילי והטמון (המודול העליון בחלון הראשי

של התוכנה באיור בעמוד הבא) משמש פתרון כללי לקליטת המים היחסית שהינו סופר-פוזיציה של הפתרון היסודי

(פונקצית גרין) לפיזור מים ממקורות נקודתיים או קווים: מקורות חיוביים המייצגים את הטפטפות ומבלעים שליליים

המייצגים את מערכות השורשים. אחד היתרונות של המודל המוצע לצרכי תכנון הוא מספר הפרמטרים הקטן: פרמטר יחיד

לתיאור סוג הקרקע (ערך קטן עבור קרקע חרסיתית וגדול עבור קרקע חולית), הרדיוס של בית השורשים הפעיל ופרמטר

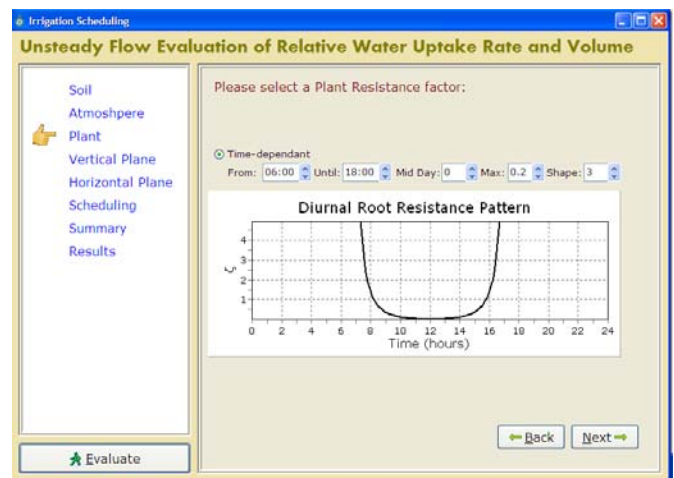
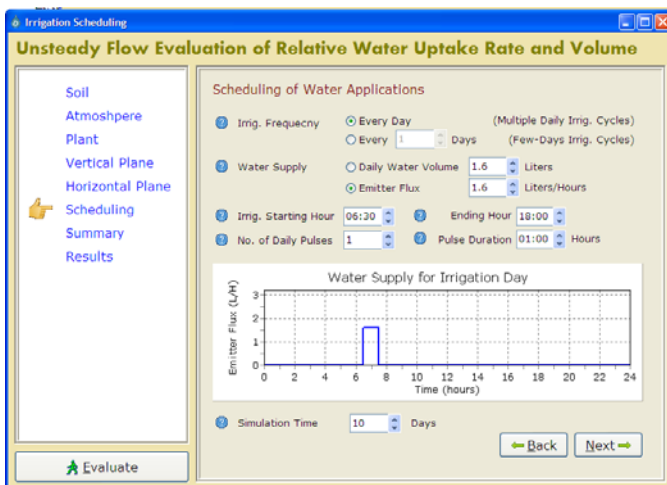
שלישי במקרה שההתאדות מפני הקרקע משמעותית.

לצרכי קביעת תזמון השקיה מיטבי הורחב (במסגרת המחקר המדווח כאן) מודל הזרימה לכלול השקיה וקליטת מים משתנות בזמן בתוספת ההנחות הבאות: קשר ליניארי בין המוליכות ההידראולית לתכולת הרטיבות, התנגדות מקומית, צמח-

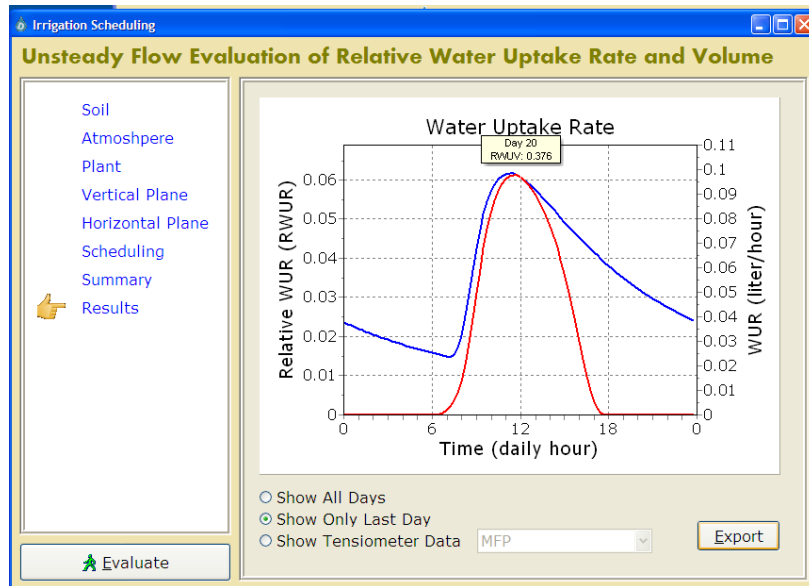


אטמוספירה לקליטת מים על-פי מהלך יומי עם מקסימום בבוקר ובערב ומינימום בשעות הצהריים, סופר-פוזיציה בזמן של מחזורי ההשקיה, חידור ממקור נקודתי לתוך נפח קרקע הסום אופקית על-פי הגיאומטריה של מערכת ההשקיה. בעזרת המודול הזה של התוכנה (המודול התחתון בחלון הראשי של התוכנה באיור משמאל) ניתן לדמות תרחישים שונים של הרטבה ממקורות נקודתיים (טפטפות) וקוויים ("צינורות מזיעים") עיליים וטמונים ולחשב מהלכים יומיים של קצב קליטת המים ונפחי קליטת המים היומיים בתרחישים שונים של מחזורי השקיה במשכים ותכיפויות שונים.

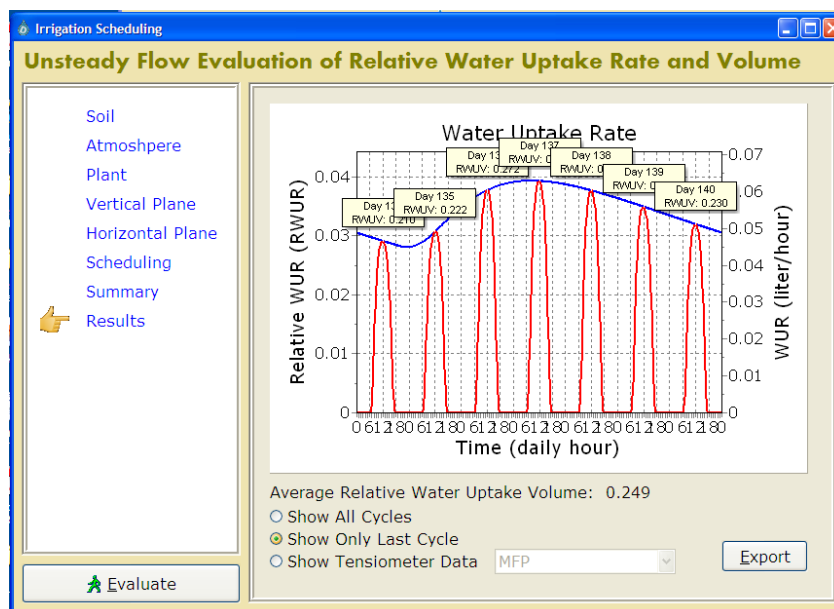
באיור למטה משמאל נראה החלון של הגדרת תזמון ההשקיה עם דוגמה של השקיה יומית יחידה בשעה 6:30 לאורך שעה עם טפטפת בספיקה של 1.6 ל/ש, בהתאם לטיפול ההשקיה היומית בשנת 2012 (ניתן גם ליישם השקיה אחת לכמה ימים או מספר השקיות ביום). באיור למטה מימין נראית הפונקציה שמתארת את התנגדות הצמח לקליטת מים לאורך שעות היממה. כאן נבחרה התנגדות 0 בשעה 12:00, וככלל, ניתן להשתמש בערך התנגדות מינימאלי סופי בצוהרי היום.



באיור שבעמוד הבא רואים את מהלך קליטת המים המחושב על ידי המודל עבור ההשקיה היומית (מוצג היום העשירי, שמייצג את ההתנהגות המחזורית-יציבה לאחר הדמיה שהחלה בקרקע יבשה) שמתוארת בחלון שלמעלה. הצבת הטפטפות הן כמו בניסוי (30 x 120 ס"מ), תכונות הקרקע של חוות הבשור שאופיינו בבית הרשת הן: $k = 2$; $\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ והרדיוס של מערכת השורשים (r_0) הוא 15 ס"מ. האיור מציג את קצב קליטת המים של הצמח ביחידות של ליטר לשעה (הסקלה הימנית) והקצב היחסי לקצב ההשקיה (הסקלה השמאלית). בקו אדום מתוארת קליטת המים על ידי צמח שהתנגדות שלו לקליטת מים היא זו שאיום למעלה ובקו כחול מתוארת קליטת המים על ידי צמח דמיוני ללא התנגדות לקליטת מים. השטח שמתחת לגרף היחסי של הקו האדום מתאר את נפח קליטת המים היומי היחסי להשקיה – 38% בהדמיה הנוכחית שלא לקחה בחשבון התאדות מפני הקרקע (אשר הייתה מקטינה את קליטת המים היחסית באחוזים בוודדים).



כדי לשחזר את מהלכי קליטת המים היומיים בהשקיה שבועית צריכים לאפיין את הקרקע של הבשור עם מוליכות הידראולית הרבה יותר נמוכה, "כדי למנוע" את התייבשות הקרקע בימים האחרונים של מחזור ההשקיה. הדמיה כזאת, של מחזור השקיה שבועי, עם ערך מוליכות הידראולית של $k = 0.1 \text{ cmh}^{-1}$ נראית באיור למטה. נפח קליטת המים היחסי של כל המחזור הוא 25%, כאשר בארבעת הימים הראשונים חלה עליה מתונה בקצב קליטת המים ובשלושת הימים העוקבים קצב קליטת המים פוחת. ההדמיה נעשתה עם רדיוס מערכת שורשים דומה לזו שבהדמיה הקודמת להשקיה יומית – 15 ס"מ. הגדלת הרדיוס עבור צמחים שמושקים אחת לשבוע הייתה מגדילה את קליטת המים היחסית בכמה אחוזים.



6. מסקנות

המודל, שמניח שהתנגדות הצמח לקליטת מים תלויה רק בשעות היממה, מצליח לשחזר היטב מהלכים יומיים של קליטת מים של צמחי פלפל שנמדדו בחוות הבשור בטיפולים של השקיה יומית, ולשחזר בקירוב סביר מדידות של קליטת מים בהשקיה אחת בשבוע. הגידול הווגטיבי וההנבה של צמחי הפלפל היו דומים בהשקיה של אחת ליום או אחת ליומיים. במרווחי השקיה גדולים יותר של אחת ל-4, 7 או 8 ימים הייתה ירידה בגודל הצמחים, פחיתה ביבול ואחוז גבוה יותר של

פירות מעוותים. קליטת המים בהשקיה יומית הייתה כ-32% ממנת ההשקיה ובהשקיה אחת לשבוע כ-28% עם הבדלים זניחים בין הימים לאורך מחזור ההשקיה.

מוקדם מדי להסיק מסקנות סופיות ולגבש המלצות לחקלאים. ברם, כשבוחנים את הגישה המוצעת מול השיטות החליפיות הנהוגות, כדאי להשתמש בגישה החדשה המוצעת, שמבוססת על תכונות הרלוונטיות של הצמח, הקרקע והאטמוספירה, לתזמון השקיה בטפטוף.

7. רשימת ספרות

- פרידמן, ש., מאירי, א., נפתלייב, ב., קומונר, ג., ד. שמואל וז. יחזקאל 2008. "התאמת משתני התכנון והממשק של השקיה בטפטוף עם מים שוליים לצמצום הנזקים לגידולים חד-שנתיים, לקרקע ולמי התהום", דו"ח שנתי לשנת 2008 לתכנית מחקר מספר 304-0362, מוגש למדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
- קומונר, ג., נפתלייב, ב. וש. פרידמן. 2009. "פיתוח גישה חדשה ותוכנה לתכנון מערכות השקיה בטפטוף" - הצעת מחקר מוגשת למדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
- Allen, G., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, UN-FAO, Rome, Italy.
- 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.
- Assouline, S., S. Cohen, D. Meerbach, T. Harodi and M. Rozner. 2002. Micro-drip irrigation of field crops: the effect on yield, water uptake and drainage in sweet corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66(1):228-235.
- Assouline, S., M. Muller, S. Cohen, M. Ben-Hur, A. Grava, K. Narkis and A. Silber. 2006. Soil-plant response to pulsed drip irrigation and salinity: Bell pepper case study. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70: 1556-1568.
- 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 S. P., Friedman. 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. doi:10.2136/sssaj2009.0338.
- Communar, G and S. P., Friedman. 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. doi:10.2136/sssaj2009.0339.
- Communar, G and S. P., Friedman. 2010c. Relative water uptake rate as a criterion of trickle irrigation systems design: 3. Subsurface trickle irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:1518-1525. doi:10.2136/sssaj2009.0340.
- Dasberg, S., and D. Or. 1999. Drip Irrigation. Springer-Verlag, Berlin.
- Doussan, C. A. Pierret and E. Garrigues. 2006. Water uptake by plant roots: II – Modelling of water transfer in the soil root-system with explicit account of flow within the root system – Comparison with experiments. *Plant and Soil* 283:99–117
- 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.
- Li, Y., Wallach, R. and Y. Cohen. 2002. The role of soil hydraulic conductivity on the spatial and temporal variation of root water uptake in drip-irrigated corn. *Plant and Soil* 243: 131–142.
- 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.
- Rawlins, S.L., and P.A.C. Raats, 1975. The prospects for high-frequency irrigation. *Science* 188:604-610.
- Segal, E. Ben-Gal, A. and U. Shani. 2006. Root water uptake efficiency under ultra-high irrigation frequency. *Plant and Soil* 282: 333–641.
- Shock, C.C., E.B.G. Feibert, and L.D. Saunders. 2005. Onion response to drip irrigation intensity and emitter flow rate. *Horttechnology* 15:652–659.
- Warrick, A.W., 1974. Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38:383–386.

8. סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר היו: 1. פיתוח גישה חדשה לתכנון תזמון השקיה בטפטוף (תכיפות, שעת תחילת ההשקיה ומשך ההשקיה) המתבססת על עיקרון חדש של נפח קליטת מים יחסי הגבוה מערך סף; 2. בחינה של הגישה חדשה בניסוי שדה. 3. איסוף מסד נתונים ראשוני לפרמטרים הדרושים עבור מגוון של גידולים וקרקעות חקלאיות באזורים בהם משקים במים שפירים.

עיקרי הניסויים והתוצאות

במהלך המחקר המדווח פיתחנו מודל לזרימה וקליטת מים עתיים באמצעותו ניתן להעריך את השפעת תזמון ההשקיה על קליטת המים היחסית. המודל הוטמע בתוכנת DIDAS לתכנון ותזמון השקיה בטפטוף. כמוכן ערכנו ניסויי שדה בחוות הבשור בהם בדקנו את תגובת צמחי פלפל למרווחי השקיה שונים, החל מהשקיה יומית ועד להשקיה אחת לשמונה ימים, למתן השקיה יחידה קצרה בבוקר לעומת השקיה ממושכת לאורך שעות היום ולשעת ההשקיה הקצרה. נמדדו הגובה, המשקל ויבול הפירות לאורך עונת הגידול ובפרקי זמן קצובים נמדדה קליטת המים בשיטת גל החם בחלק מהטיפולים. במקביל ערכנו ניסויים בהם נבחנו תגובת הצמחים למנות מים שונות. שימוש במודל הזרימה והקליטה העתי עבור תרחישים שונים של תכיפויות ומשכי השקיה בקרקעות עם מרקם שונה מניב תוצאות הגיוניות ומשחזר, איכותית, מהלכי קליטת מים יומיים ולאורך מחזורי השקיה דומים לאלו שדווחו בספרות המדעית. המודל, שמניח שהתנגדות הצמח לקליטת מים תלויה רק בשעות היממה, מצליח לשחזר היטב מהלכים יומיים של קליטת מים של צמחי פלפל שנמדדו בחוות הבשור בטיפולים של השקיה יומית, ולשחזר בקירוב סביר מדידות של קליטת מים בהשקיה אחת בשבוע. הגידול הווגטיבי וההנבה של צמחי הפלפל היו דומים בהשקיה של אחת ליום או אחת ליומיים. במרווחי השקיה גדולים יותר של אחת ל-4, 7 או 8 ימים הייתה ירידה בגודל הצמחים, פחיתה ביבול ואחוז גבוה יותר של פירות מעוותים. קליטת המים בהשקיה יומית הייתה כ-32% ממנת ההשקיה ובהשקיה אחת לשבוע כ-28% עם הבדלים זניחים בין הימים לאורך מחזור ההשקיה.

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

מוקדם מדי להסיק מסקנות סופיות ולגבש המלצות לחקלאים. ברם, כשבוחנים את הגישה המוצעת מול השיטות החליפיות הנהוגות, כדאי להשתמש בגישה החדשה המוצעת, שמבוססת על תכונות הרלוונטיות של הצמח, הקרקע והאטמוספירה, לתזמון השקיה בטפטוף.

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

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

הבחירה בחוות הבשור לא הייתה מוצלחת (מבחינת סוג הקרקע). היה עדיף לערוך את הניסויים בקרקע עם מרקם גס יותר בה היו מתקבלים הבדלים גדולים יותר בין תכיפויות ההשקיה השונות.

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

שמוליק פרידמן תאר בקצרה את המודל שפותח בכמה הרצאות וסמינרים.

החלק המתמטי של המחקר פורסם בשלושה מאמרים:

- Communar, G and Friedman, S.P. 2012. 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. 2012. 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, in press.

פטנטים - 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 הנוכחי?* כן - לא -

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