

**בחינה של גישה חדשה לתכנון תכיפות השקיה בטפטוף על-פי  
קריטריון של נפח קליטת מים יחסי**

עבודת גמר

מוגש לפקולטה לחקלאות, מזון ואיכות סביבה על שם רוברט ה. סמית של  
האוניברסיטה העברית בירושלים

לשם קבלת תואר "מוסמך למדעי החקלאות"

על-ידי

**שני שפרלינג**

**דצמבר 2013**

**רחובות**

העבודה נעשתה בהדרכת

ד"ר שמוליק פרידמן

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני, בית דגן

ד"ר שבתאי כהן

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני, בית דגן

## תקציר

באזורים רבים בארץ משתמשים במים שפירים להשקיית גידולים חד-שנתיים ומטעים. מחירם של המים השפירים גבוה וההיצע שלהם מוגבל, מה שמחייב השקיה יעילה. תכנון השקיה הינו הדרך לשמור על תנאים מיטביים לאספקת מים, ובשנים האחרונות עולה החשיבות לתכנון השקיה אופטימאלי. ככלל, השקיה בטפטוף מאפשרת שליטה באספקת כמויות מים הדרושות לנפח קרקע מצומצם וכך להקטין את איבודי המים הקשורים להתאדות וחלחול לעומק. כדי להשקות בטפטוף בצורה מיטבית צריכים להתחשב בתכונות הולכת ותאחיזת המים של הקרקע. ישנם שני מדדי קרקע הקובעים את משטר הרטיבות בהצבה נתונה של טפטפות ובממשק השקיה נתון- 1) הפרמטר  $\alpha$ , המאפיין את התרומה היחסית של הכבידה והכוחות הקפילריים בהסעת מים. 2)  $k_{eff}$ , קצב השינוי של המוליכות ההידראולית עם תכולת הרטיבות. תכנון השקיה בטפטוף כולל את משתני מערכת ההשקיה: הצבת הטפטפות, ספיקת הטפטפות, כמות ההשקיה, תכיפות ההשקיה ומשך ההשקיה. פרמטרים נוספים שצריך להתחשב בהם כאשר מתכננים ממשק השקיה: הצבת הצמחים, דגם ההרטבה של המים בקרקע, הגיאומטריה של בית השורשים שקובעת את יעילות קליטת המים על-ידי הצמח, ושקולים נוספים הקשורים למליחות, הזנה ואוורור. מסיבה זו פותחה גישה חדשה ופשוטה לתיאור זרימה עתית בקרקע. הגישה מצריכה מספר מצומצם של פרמטרים וזמינה לשימוש באמצעות תוכנת (Drip Irrigation Design) DIDAS (and Scheduling). הגישה החדשה מתבססת על עיקרון של חישוב קצב קליטת מים יחסי (RWUR) במערכת של מקורות (טפטפות) ומבלעים (מערכות שורשים), כאשר קצב קליטת המים היחסי אינו נתון אלא מחושב. בעוד שהגישות הקודמות מניחות קצב קליטת מים ידוע מראש ומחשבות את מצב הרטיבות (פוטנציאל המים) בבית השורשים, הגישה החדשה מציעה מהלך הפוך: הנחת מצב רטיבות נתון בבית השורשים וחישוב קצב קליטת המים. בעבודה זו נבחנה הגישה החדשה באמצעות ניסוי של תכיפויות השקיה של צמחי פלפל בקרקע סיינית, והיפותזות המחקר היו: 1) ירידה בתכיפות ההשקיה בקרקע עם מרקם סייני גורמת לפחיתה בקליטת המים, בצימוח ובהנבה, 2) כאשר משקים בתכיפות השקיה נמוכה (כל ארבעה ימים או השקיה שבועית) בקרקע עם מרקם סייני, קליטת המים לא משתנה הרבה לאורך מחזור ההשקיה, 3) ללא תלות בתכיפות ההשקיה, צמחים קולטים פחות מ- 50% מנפח המים שהושקו. מכאן, מטרת המחקר שלנו היו: 1) בחינה של השפעת השינוי בממשק ההשקיה (תכיפות ומשך) בקרקע סיינית על קליטת מים, צימוח והנבה, 2) השוואת תוצאות הניסוי עם המודל לזרימה וקליטת מים עתית.

במהלך השנים 2011 ו- 2012 ביצענו שני ניסויים בבית רשת הממוקם בחוות הבשור, מו"פ דרום. הטיפולים בניסויים היו שונים בין השנים: ב- 2011, השקיה יומית קצרה ומתמשכת, כל יומיים, כל ארבעה ימים וכל שמונה ימים; ב- 2012, השקיה יומית, השקיה כל ארבעה ימים, השקיה שבועית והשקיה מתחלפת (יומית-שבועית לסירוגין). בניסוי מקביל בחנו את תגובת הצמחים למנות מים שונות (100%, 150% ו- 333% ממנת ההשקיה). במהלך הניסויים בוצעו הבדיקות הבאות:

- צמח -
- צימוח והנבה בתכיפויות ההשקיה השונות
- קליטת מים באמצעות חיישני זרימה בגבעול

- השוואת תוצאות קליטת המים ל- DIDAS
- קרקע-
- תכולת רטיבות ומליחות בארבעה עומקים (5, 15, 25 ו-35 ס"מ) ובארבעה מרחקים (5, 15, 25 ו-35 ס"מ) מהטפטפת לקבלת פירוס דו-ממדי
- מתח מים בשלושה עומקים (15, 25, 35 ס"מ) סמוך לטפטפת ובעומק 35 ס"מ במרחק 20 מהטפטפת

מהתוצאות עולה שתכיפות ההשקיה משפיע על צימוח והנבה של צמחי פלפל, ושירידה בתכיפות ההשקיה גורמת לירידה בגובה הצמחים, בכמות היבול ולפגיעה באיכותו. למשל, המעבר מטיפול השקיה כל ארבעה ימים לטיפול השקיה כל שמונה ימים גרם לפחיתה של כ- 50% ביבול ולעליה של 50% בפרי המעוות. ההשקיה נעשתה במים מותפלים ולכן הטיפולים לא הושפעו ממליחות הקרקע. מתוך מאזני תכולת רטיבות ומיחסי מליחות בין הבוקר ואחר צהריים עולה שמרבית קליטת המים של הצמח נעשתה קרוב לטפטפת. כל הצמחים הנמדדים הציגו אופיין התנהגות דומה במהלכי קליטת המים היומיים: עלייה חדה בשעות הבוקר, התייצבות בשעות הצהריים וירידה חדה לקראת אחר הצהריים. הירידה בתכיפות ההשקיה גרמה לשינוי קטן מאוד בקליטת המים על-ידי הצמח. נמדדה אחידות בקליטת המים היומית במהלך כל הימים בתוך מחזור ההשקיה בתכיפות השקיה נמוכה (השקיה כל ארבעה ימים והשקיה שבועית), דבר שיכול לנבוע מתאחיזה של המים בקרקע או מפעילות של שורשים עמוקים יותר בקרקע. בנוסף, קליטת המים היומית הוערכה בטיפול היומי בכ- 30% ממנת ההשקיה; דבר המתיישב עם התוצאות של מדידות הפרשי תכולת רטיבות שאמדו 45% אובדנים הכוללים גם הלחול לעומק והתאדות. DIDAS מייצר מהלך יומי דומה בהדמיה של השקיה יומית קצרה בקרקע סיינית עם  $\alpha=0.038 \text{ cm}^{-1}$  ו-  $k_{\text{eff}} = 2 \text{ cm/hr}$  כאשר גודל בית השורשים והצבת הצמחים דומה לזו שבניסויי בבשור – נפח קליטת המים היחסי המתקבל הוא 33.7%. שימוש בערך של  $k_{\text{eff}}$  נמוך יותר ( $k_{\text{eff}} = 0.1, 1 \text{ cm/hr}$ ) והגדלה של התנגדות הצמח לקליטת מים מאפשרים לתאר בקירוב טוב את קצב קליטת המים הנמדד בהשקיה כל ארבעה ימים ובהשקיה שבועית. ממדידות קליטת מים בהצבה של 100\*120 ס"מ ב- 3 רמות השקיה (100%, 150%, 333% ממנת ההשקיה), עולה כי קליטת המים הממוצעת ביחס למנת ההשקיה הינה 38%, 24%, 15% בהתאמה.

לסיכום, שימוש בתוכנת DIDAS תומך במסקנה שבצמחים שהושקו בתכיפות השקיה גבוהה נפח קליטת המים היחסי שלהם גדול יותר, ושישנה חשיבות לתזמון ההשקיה ביחס לפעילות הצמח. חשיבות התזמון תלויה מאוד בהתנגדות הצמח לקליטת מים ובסוג הקרקע; בקרקע חולית תנועת המים מהירה יותר ולכן חשיבות התזמון רבה מזו של קרקע סיינית. לאחר אפיון הקרקע בבשור והערכה של התנגדות הצמח כתלות בתכיפות ההשקיה, המודל הצליח 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 לארבעה ימים ואחת לשבוע. עם זאת כדי לבחון את מהימנות המודל, יש לערוך עוד ניסויי שדה בקרקעות שונות, צמחים שונים וממשקי השקיה נוספים.

A- stem cross sectional area ( $\text{mm}^2$ )  
BER- Blossom End Root  
BERNfC(S/L)- BER fruit number fraction cumulative short irrigation/long irrigation  
 $C_f$ - calibration coefficient (assumed 1.1)  
DAP- Day After Planting  
DefNfC(S/L)- deformed fruit number fraction cumulative short irrigation/long irrigation  
DIDAS- Drip Irrigation Design and Scheduling  
 $E_{PM}$ - evaporation from PM (mm/day)  
 $E_{T0}$ - potential evaporation (mm/day)  
ExFwC(S/L)- export fruit weight cumulative short irrigation/long irrigation (gr/fr)  
ExNfC(S/L)- export fruits number fraction cumulative short irrigation/long irrigation  
FruitDWPL- fruit dry weight per plant (gr/plant)  
H.P.- heat pulse  
K- hydraulic conductivity (m/sec)  
k- thermal diffusivity coefficient ( $\text{mm}^2/\text{sec}$ ) (assumed 0.142)  
 $K_c$ - crop coefficient  
 $k_{eff}$ - effective hydraulic conductivity (m/sec)  
 $K_S$ - hydraulic conductivity in saturation (m/sec)  
LeafDWPL- leaf dry weight per plant (gr/plant)  
m- evaporation parameter  
PM- Penman-Monteith  
q- sap flux density ( $\text{mm}^3/\text{sec}$ )  
 $r_0$ - root zone radius (cm)  
RWUR- relative water uptake rate  
RWUV- relative water uptake volume  
S- soil porosity (assumed 0.365)  
StemDWPL- stem dry weight per plant (gr/plant)  
 $T_m$ - time of maximum temperature  
 $T_0$ .time of equal temperatures at  $x_1$  and  $x_2$   
TDR- time domain reflectometry  
TotDWPL- total dry weight per plant (gr/plant)

TotFwC(S/L)- total fruit weight cumulative short irrigation/long irrigation (g/fr)

TotNC(S/L)-total number cumulative short irrigation/long irrigation (n/m<sup>2</sup>)

TotWC(S/L)-total weight cumulative short irrigation/long irrigation (T/m<sup>2</sup>)

UnFwC(S/L)- all unfit fruit weight cumulative short irrigation/long irrigation (gr/fr)

v- sap velocity (mm/sec)

x- distance between x<sub>1</sub> and x<sub>2</sub> (13 mm)

x<sub>1</sub>-distance above heater (9 mm)

x<sub>2</sub>- distance below heater (4 mm)

ε- dielectric constant (dry soil= assumed 2.87, saturated soil 22)

θ- volumetric water content (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

θ<sub>s</sub>- volumetric saturated water content (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

ζ- local resistance to water absorption

Ψ- matric pressure (mbar)

φ- matrix flux potential (mm/hr)

100cm 100%- Geometry 100\*120cm 100%

100cm 150%- Geometry 100\*120cm 150%

100cm 333%- Geometry 100\*120cm 333%

1Dirr- daily irrigation

1Dirr-7Dirr- two weeks daily and two weeks every 7 days

1Dirrto-7Dirr- daily irrigation (change in Nov to every 7 days irrigation)

1DLirr- daily long irrigation

1DSirr- daily short irrigation

2DSirr- every 2 days short irrigation

4Dirr- every 4 days irrigation

4DLirr- every 4 days long irrigation

4DSirr- every 4 days short irrigation

7Dirr- every 7 days irrigation (weekly)

7Dirrto-1Dirr- every 7 days irrigation (changed in Dec to daily irrigation)

8DSirr- every 8 days short irrigation

9	סקירת ספרות.....	2
9	גישות שונות לבקרת השקיה.....	2.1
10	תנועת מים בגזע- שיטת פולס החום.....	2.1.2
11	השקיה בטפטוף.....	2.2
12	תכנון, תכיפות ותזמון השקיה.....	2.3
16	צמח הפלפל-.....	2.4
17	השערת מחקר.....	3
17	מטרות המחקר-.....	4
18	שיטות וחומרים.....	5
18	תנאים מטאורולוגיים, התאדות והשקיה.....	5.1
18	תכנית הניסוי: מרחקי שתילה, ובחירת הבלוקים.....	5.2
19	מי ההשקיה, הדישון ומקדמי השקיה.....	5.3
20	טיפולים:.....	5.4
20	חיישני קרקע: טנסיומטרים, מחושי TDR.....	5.5
20	טנסיומטרים.....	5.5.1
21	מחושי TDR.....	5.5.2
21	חיישני צמח- זרימת מים בגבעול: פולס חום.....	5.6
23	מדידות צימוח וניבה.....	5.7
23	גובה צמחים.....	5.7.1
23	קטיף ויבול.....	5.7.2
24	פירות מעוותים.....	5.7.3
24	שחור פיטם.....	5.7.4
24	פירוקי צמחים לאורך העונה.....	5.7.5
24	מערכת שורשים.....	5.7.6
24	ניתוח סטטיסטי.....	5.8

24	ניסוי מקדים 2010	5.9
25	תוכנת DIDAS	5.10
27	תוצאות	6
27	צימוח וניבה	6.1
27	צימוח	6.1.1
28	יבולים	6.1.2
32	פירוקי צמחים לאורך העונה	6.1.3
34	מערכת שורשים	6.1.4
34	רטיבות ומליחות: טנסיומטרים, חיישני TDR	6.2
34	טנסיומטרים	6.2.1
37	חיישני TDR	6.2.2
39	מדידת התאדות מתוך שקילת דליים-	6.2.3
40	קליטת מים- זרימת מים בגבעול: פולס חום	6.3
45	הדמיות בעזרת DIDAS	6.4
45	זרימה וקליטת מים עתית	6.4.1
54	השוואה בין הדמיות עם DIDAS למדידות בניסוי שדה	6.4.2
57	דיון ומסקנות	7
57	מדידה רציפה של צימוח וניבה	7.1
58	רטיבות ומליחות קרקע	7.2
59	מדידות קליטת מים באמצעות שיטת ה-Heat Pulse	7.3
60	הדמיות קליטת מים עם DIDAS	7.4
61	סיכום	8
62	רשימת ספרות	9
67	נספחים	10



## 2 סקירת ספרות

### 2.1 גישות שונות לבקרת השקיה

בקרת השקיה הינה הדרך לשמור על תנאים מיטביים לאספקת מים. בקרת ההשקיה עונה שתי שאלות: מתי וכמה להשקות? התשובה לשאלות אלו תלויה במכלול גורמים הקשורים לדרישות האקלימיות, הקרקע, הצמח ואיכות מי ההשקיה. בשנים האחרונות עולה חשיבותה של בקרת השקיה אופטימאלית, מכיוון שבאזורים רבים בארץ משתמשים במים שפירים להשקיה של גידולים חד-שנתיים ומטעים ומחירם של המים השפירים גבוה והיצעם מוגבל. ניהול נכון של מערכות השקיה ופיתוחים בתחום הם כלי חשוב המסייע לעליה בייצור המזון, אך עם זאת עלול להיות בעל השפעה שלילית על הקרקע והמים (COAG, 2012). בכדי לצמצם את נזקי החקלאות ישנה מגמה לעבור להשקיה בטפטוף כדי לשפר את יעילות ההשקיה (Phene et al., 1987; Sezen et al., 2006).

#### 2.1.1 משטר המים ברצף קרקע-צמח-אטמוספירה

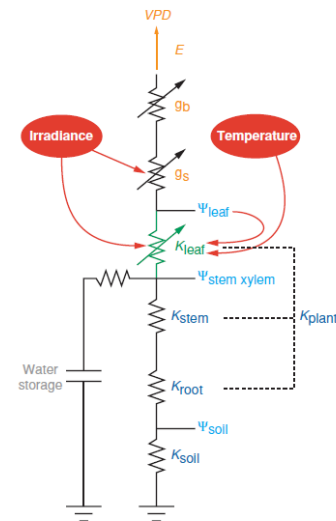
קיימות מספר גישות לתיאור משטר המים בקרקע, ברצף קרקע-צמח-אטמוספירה. במהלך השנים התפתחו מספר גישות המתיחסות לשיטות לבקרת השקיה כאשר כל גישה מנסה להגיע לבקרה אופטימלית. SPAC (soil plant atmosphere continuum) הוא מודל רעיוני המסייע לתיאור יחסים בין מרכיבי המערכת קרקע, צמח ואטמוספירה (Philip, 1966; Sack and Holbrook, 2006). נעשתה אנלוגיה בין מערכת קרקע-צמח-אטמוספירה למעגל חשמלי (תרשים 2.1.1), כאשר זרימת המים

בטרנספירציה מדומה לזרם חשמלי המונע על-ידי הפרש פוטנציאלים בין הקרקע והאטמוספירה. הזרימה בצמח מתרחשת דרך סדרה של רכיבים חשמליים. נגדים מייצגים את המוליכות ההידראולית (או את התנגדות ההופכית למוליכות) של הקרקע, השורש, הגזע, העלה ושכבת הגבול. חלק מהנגדים במודל הינם נגדים קבועים וחלק הינם נגדים משתנים המהווים נקודת בקרה במערכת. רכיב חשמלי נוסף הקיים במודל הינו הקבל, המתאר אפשרות לקיבול מים בצמח. השימוש במודל זה עוזר להבין תהליכים פיסיקאליים ופיסולוגיים במערכת הקרקע-צמח-אטמוספירה. שיטת האצבע-פופולרית בעולם החקלאי. מבוססת בעיקר על מגוון תחושות בטן ואינטואיציה טבעית.

השיטה לא מדעית. החקלאי משתמש בה בקביעת מועדי השקיה וכמויות מים (Jones, 2006). שיטה נוספת מתייחסת למדדי סביבה-

מבוססת על השקיה לפי דרישה אקלימית או התאדות פוטנציאלית

( $ET_0$ ) של משטח או צמח ייחוס, והכפלה במקדם גידול הנקבע אמפירית לסוג גידול, גיל, ומצבו הפסולוגי של הצמח. זו שיטת השקיה המיושמת בשדה. מנת ההשקיה שניתנת לצמח משלימה את המנה שעברה אידוי ודיות

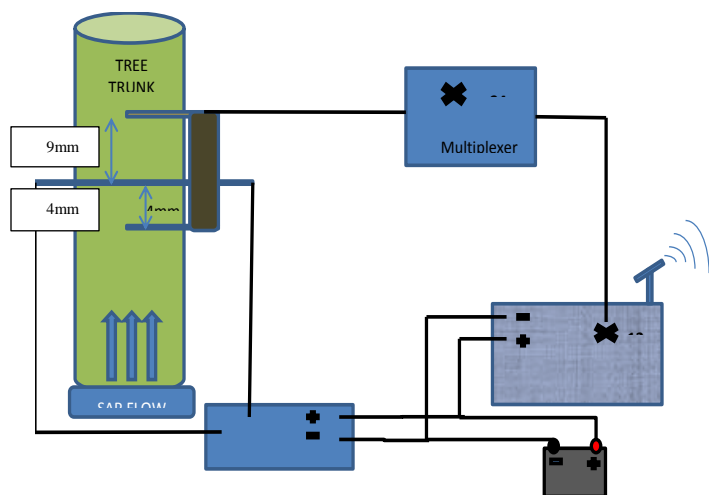


תרשים 2.1.1- אנלוגיה המעגל החשמלי למודל SPAC. K הן המוליכויות ההידראוליות של העלה, הצמח, הגזע, הקרקע והשורש, ו- $\Psi$  אילו הפוטנציאלים

לאטמוספירה בתוספת מספר תיקונים המפצים ליעילות מערכת ההשקיה (דוגמא מנת שטיפת מלחים) (Allen et al., 1998). גישת ההשקיה לפי מדדי קרקע- הגישה מבוססת על התמקדות בקרקע ובמצב המים. תחת גישה זו התפתחו מגוון רחב של שיטות המודדות את תכולת הרטיבות או פוטנציאל המים בבית השורשים, ולפי ערכים או שינויים בהם נקבעים ספי ההשקיה (Jones, 2006). יישום הגישות הוא לפי מאזן רטיבות בקרקע המנסה לשמר תנאים אופטימאליים תוף התייחסות למאזן הכניסות (משקעים + השקיה) והיציאות (אידי, דיות, נגר וחלחול) מאזור בית השורשים (Jones, 2004). גישה המתבססת על מדדי צמח- הגישה מבוססת על מדדי עקה צמחיים. המדדים נובעים ממדידות ישירות של מצב המים ברקמה הצמחית או של תהליכים המקיימים קשר ישיר עם מצב המים בצמח (Jones, 2004). דוגמא למדדים הם פוטנציאל המים בגזע בצהרי היום, התכווצות גזע יומית והאחרון, אותו גם יישמנו במחקר הנוכחי, הוא זרימת מים בגזע (SapFlow). שיטה זו מבוססת על מדידה ישירה של מצבי עקה בצמח שהם תוצר של אינטגרציה של מגוון גורמים סביבתיים כגון דרישות אקלימיות, מצב המים בצמח ובקרקע (Jones, 2004).

### 2.1.2 תנועת מים בגזע- שיטת פולס החום

שיטה יחסית אמינה וישירה למדידת זרימת מים בגזע לצורך בקרת השקיה (Jones, 2004). השיטה מבוססת על עקרונות תרמודינאמיים שהתפתחו במהלך השנים ועברה לשימוש מסחרי ויישומי. בעבודה זו נשתמש בשיטת פולס החום (H.P. – HEAT PULSE) (Marshall, 1958; Cohen et al., 1981; Green et al., 2003),



או בשמה השני זרימת מים בגזע (sap flow). שיטה זאת היא שיטה למדידת ספיקת המים בגזע/גבעול והתוצאה במדידות אילו הוא לרוב אינטגרציה של מספר גורמים המשפיעים על הצמח כמו מצב המים בקרקע, עקת מליחות בקרקע, דרישות אקלימיות, השלב הפנולוגי של הצמח. שיטת פולס החום (תרשים 2.1.2) מאפשרת להעריך את קצב קליטת המים

תרשים 2.1.2- תיאור סכמטי של מערכת ה- H.P. הכוללת מרבב (מולטיפלקסר), אוגר נתונים, מקור כוח (מצבר), יוצר פולסים, חיישן וגבעול של צמח

של הצמח מתוך הערכה של זרימת המים בגבעול, על-ידי שימוש בפולס חום כדי

לעקוב אחר זרימת המים. גוף חימום וחיישני טמפרטורה מוחדרים לתוך הגבעול כאשר גוף החימום משחרר פולס חום חזק לזמן קצר שנע לאורך הגבעול. מדידת קצב התפשטות החום בגבעול על-ידי זמן הגעת פולס החום לחיישני הטמפרטורה (HP), מכמתת את קצב זרימת המים בגבעול. מתוך שימוש בפתרון מתמטי על מנת לקבל את קצב זרימת המים מהמודל התיאורטי. הבסיס התיאורטי לשיטה מבוסס על מודל פיסיקאלי של התפשטות חום ממקור קווי בתווך אינסופי (Marshall, 1958), והמודל המתמטי כולל סידרה של קבועים ומקדמי כיוול ספציפיים על מנת לחשב את שטף המים. הכפלת השטף המתקבל בשטח החתך המוביל מים (הפעיל) נותנת את

ספיקת המים העוברת בגבעול. החיישן שפותח על-ידי (Cohen et al., 1981) מכיל שני חיישני טמפרטורה במרחק 13 מ"מ וביניהם מחט חימום (9 מ"מ מעל ו- 4 מ"מ מתחת למחט החימום). חישובי הזרימה נעשים מתוך המשוואות של Marshall, (1958). באמצעות שיטה זו ניתן למדוד באופן ישיר את הזרימה בגבעול, אך יש לשים לב שכאשר הזרימה בגבעול איטית המדידה אינה מדויקת עקב רגישות השיטה למרחקים. בנוסף יש להחדיר את החיישן במאונך לגבעול אחרת ייתכנו אי דיוקים בעת המדידה, ובעיה נוספת היא קביעת ערך קבוע הדיפוזיביות.

## 2.2 השקיה בטפטוף

השקיה בטפטוף מאפשרת שליטה באספקת כמויות מים מתוזמנת הדרושות לנפח קרקע מצומצם וכך הקטנת איבודי המים הקשורים לחלחול לעומק או להתאדות (Ratcliff et al., 1983; Green and Clothier, 1994; Howell and Meron, 2007). המעבר להשקיה בטפטוף התרחש כדי להגדיל את זמינות המים לצמח. בעבר נהגו להשקות במנות מים גדולות שמטרתן היה מילוי כל נפח בית השורשים, והשתמשו בקרקע כאוגר מים וחומרי הזנה (Phene and Beale, 1976). השקיה כזו היא בזבזנית מכיוון שככל שמנת המים בהשקיה גדולה יותר, עומק חזית ההרטבה גדול יותר (Dagan and Bresler, 1983), ומגיעים מים לנפחי קרקע בהם פעילות השורשים נמוכה יחסית. השקיה במנות מים קטנות תהיה השקיה היעילה ביותר כי היא מכוונת לאזור הפעיל של בית השורשים (Phene and Beale, 1976). בנוסף השקיה במנות מים קטנות בכל השקיה (הקטנת כמות ההשקיה) תוך שמירה על כמות מים כללית זהה, משמעותה העלאת תדירות ההשקיה (Green and Clothier, 1994). שינוי בתדירות ההשקיה משנה את היכולת של הקרקע לתפקד כאוגר מים, כאשר התדירות עולה היכולת לשמש כאוגר מים יורדת, ולהפך (Sezen et al., 2006). הכרת תכולת הרטיבות של הקרקע (אוגר המים של הקרקע) חשובה בקביעת ממשק ההשקיה ומשפיע על האידוי, החלחול של המים לעומק הקרקע ועל קליטת המים של הצמח (Black et al., 1969). משוואה 2.2.1:  $K = K_S e^{\alpha h}$  (Gardner, 1958) מתארת את התלות של המוליכות ההידראולית ( $K$ ) במוליכות ההידראולית ברוויה ( $K_S$ ),  $h$ , ו- $\alpha$ . תכולת הרטיבות ברוויה משתנה בהתאם למרקם הקרקע. ו- $\alpha$  הינו פרמטר הקשור למערכת קרקע מים (White and Perroux, 1987), ו- $\alpha$  מייצג את היחס בין התנועה הגרביטציונית לתנועה האופקית של המים.

### 2.3 תכנון, תכיפות ותזמון השקיה

תכנון מערכת השקיה בטפטוף צריך לכלול את המשתנים של מערכת ההשקיה ואת המשתנים הקשורים למערכת קרקע-צמח-אטמוספירה. משתני מערכת ההשקיה כוללים את תכנון הגיאומטריה של מערכת ההשקיה (המרחק בין השלוחות ובין הטפטפות לאורך השלוחה, מיקום הצמחים והטפטפות), ספיקת הטפטפות ואת ממשק ההשקיה הכולל את כמויות המים, תזמון ותכיפות ההשקיות שקובעות את משך ההשקיה. הגיאומטריה של מערכת ההשקיה צריכה להיות כזו המאפשרת הסעה יעילה של מים ומומסים. הגיאומטריה האופטימאלית למרחק בין שלוחות טפטוף ולמרחק בין טפטפות הוא נושא הנדון בהרבה מחקרים. בין הגישות הקודמת לתכנון הצבת צמחים וטפטפות המבוססת על פתרון אנליטי לבעיית זרימת המים היא של Bresler (1978) . (1978)

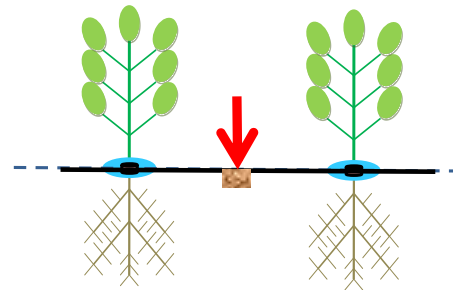
Bresler הציע להשתמש בפתרון של Wooding (1968) לזרימה תמידית מדסקה דקה בפני השטח. הדסקה הדקה מדמה את אזור האיגום מסביב לטפטפת (תרשים 2.3.1). באמצעות מודל זה ניתן לקבוע את השילוב של

ספיקת הטפטפת והמרחק בין הטפטפות לאורך השורה עבור קרקע נתונה וזאת לפי קריטריון של ערך סף לעומד הקפילארי במחצית המרחק בין הטפטפות בפני השטח, כתלות בגידול. שיטה זו בעייתית היות והיא לא לוקחת בחשבון את קליטת המים של הצמח ומתייחסת למיקום לא רלוונטי באמצע המרחק בין הטפטפות. הגישה הסתמכה על "מצב של זרימה תמידית/לינאריוזציה של בעיית הזרימה התמידית". לפי גישה זו המרחק האופטימאלי בין הטפטפות הינו פונקציה של ספיקת הטפטפת, התכונות ההידראוליות של הקרקע ועמידות הגידול לעקת מים. לפי גישה אחרת, מציאותית יותר, של (1984)

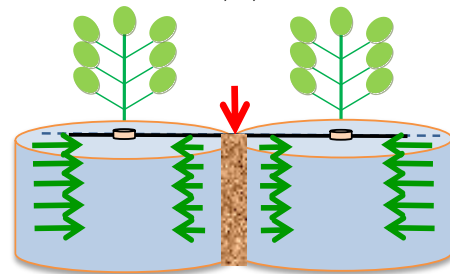
Amoozegar-fard et al. פותרים את בעיית הזרימה התמידית ממקור המים ומניחים שקליטת המים קבועה וידועה מראש בתוך נפח בית שורשים עם גיאומטריה פשוטה של גליל אנכי או כאשר הקריטריון גם כן הוא עומד קפילרי גבוה מערך סף במשטח הסימטריה באמצע המרחק בין הטפטפות (2.3.2).

במחקר מאוחר יותר, Colombo and Or (2006) מצעים לקבוע את הגיאומטריה בשיטה אמפירית: ניתן לקבוע מרחק טפטפות מיטבי אך חשוב להכיר את נתוני צריכת המים של

הגידול. דרך נוספת דומה לזו של Amoozegar-fard et al., (1984) היא על-ידי הכרת דגם ההרטבה (Thorburn et al., 2003) על-ידי מספר הנחות כדוגמא, קצב קליטת המים על-ידי השורשים זניח לעומת קצב החלחול, שינוי בתכולת רטיבות קבוע באזור המורטב וקרקע הומוגנית. נלקחו 29 דגמי הרטבה של קרקעות המייצגות טווח רחב של סוגי קרקעות ומרקמים שונים. הקרקעות התחלקו



תרשים 2.3.1- גישה לקביעת המרחק בין הטפטפות המבוססת על פתרון אנליטי לבעיית זרימת המים (Bresler, 1978) לפי קריטריון של ערך סף לעומד הקפילארי במחצית המרחק בין הטפטפות בפני השטח



תרשים 2.3.2- גישה קביעת המרחק בין הטפטפות תוך התייחסות לקליטת מים ( Amoozegar-fard et al., 1984), לפי קריטריון של עומד קפילרי גבוה מערך סף במשטח הסימטריה באמצע המרחק בין הטפטפות

לשתי קבוצות השונות באופן שבו התכונות ההידראוליות תלויות במרקם הקרקע. חושבו המרחקים האופקיים והאנכים של ההרטבה מטפטפות בפני השטח וטמונות. הקבוצה הראשונה שמרה על מבנה הקרקע שלה ודגם ההרטבה בה נהפך יותר כדורי עם העלייה בתכולת החרסית. הקבוצה השנייה לא שמרה על המבנה שלה ולא נמצא קשר בין המרקם לבין דגם ההרטבה. יש חשיבות רבה בידיעת התכונות ההידראוליות של הקרקע ואף יותר חשוב, הכרת דגם ההרטבה של הקרקע, שמושפע ממרקמה. בנוסף מוצעות תוכנות האמורות לסייע בתכנון הגיאומטריה של מערכת ההשקיה. ה- WetUp (Cook et al., 2003) מסיע בקביעת דגם הרטבה וכך מאפשר קביעת הגיאומטריה של הטפטפות. התוכנה משתמשת במאגר הנתונים של Thorburn et al (2003). התוכנה בעייתית מכיוון שהיא נותנת מענה לקרקעות הומוגניות בלבד ותוצאותיה לא תמיד מדויקות. מתקבלות תוצאות מדויקות במקרים בהן החלחול איטי ותוצאות לא מדויקות ובמקרים בהן החלחול מהיר ונפחי המים גדולים. כאשר בדקו את השפעת מרחקים שונים בין טפטפות וצמחים על צימוח נוף והתפתחות מערכת שורשים נמצא שגיאומטריית השורשים נקבעת לפי גיאומטריית הטפטפות. השורשים נעים לעבר הטפטפות ומתאימים את עצמם לגיאומטריית מערכת ההשקיה. ירידה משמעותית בגובה הצמחים עם ההתרחקות מהטפטפת ניתן לראות כחודש לאחר שתילה (Meiri et al., 2011).

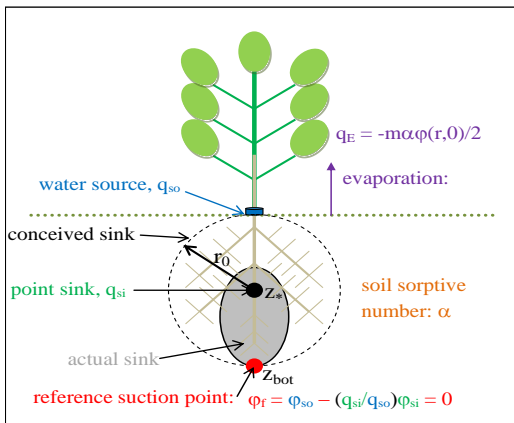
ממשק ההשקיה מכתוב כמה מ"מ ליום נשקה, מהי תכיפות ההשקיה ומהו תזמון ההשקיה. נערכים מחקרים רבים הבוחנים באופן ספציפי את השפעת תכיפות ותזמון ההשקיה על צמחים שונים בהיבטים של דיות, צימוח, הנבה, תחלואה, פיזור שורשים. קביעת תכיפות ותזמון ההשקיה הינו אחד הפרמטרים החשובים ביותר בעת תכנון ממשק ההשקיה. השקיה בתכיפות גבוהה מקטינה את נפח הקרקע המורטב ומאפשרת לשמור על תכולת מים קבועה באזור הרטוב. ישנו יתרון לשמירה על תכולת רטיבות גבוהה באזור בית השורשים שעיקרה עליה בזמינות המים לצמח כתוצאה מפוטנציאל מים גבוה, מוליכות הידראולית גבוהה בקרקע ועליית המוליכות ההידראולית של השורשים וצינורות ההובלה בצמח. באזור נחל סיני בו הקרקע מאוד חולית (97% חול, 1% חרסית), נבדקה קליטת מים בעגבניות בשני תזמוני השקיה; יום (6:00) ולילה (18:00) (Ben-Asher, 1979). עקב מוליכות הידראולית מאוד גדולה המנגנון העיקרי של תנועת המים בקרקע הוא חלחול לעומק (בגרביטציה). נמצא שהשקייית יום יעילה מהשקייית לילה, דבר שבא לידי ביטוי בפחות חלחול לעומק (66% לעומת 83%), וזאת למרות שבהשקייית יום יש יותר התאדות מפני השטח (400, 720 ס"מ<sup>3</sup> בהתאמה). מסקנת החוקר היתה שיעילות קליטת המים של צמח העגבנייה תהיה הגבוהה ביותר כאשר נשקה בזמן שפעילות השורשים מקסימאלית. ב- 2006 נבחנה השפעת שמונה תדירויות השקיה שונות (החל מיומית עד השקיה כל שמונה ימים) על פיזור המים בקרקע, פיזור השורשים, יכול וצריכת מים של תפוחי-אדמה (Wang et al, 2006). נמצא שככל שתדירות ההשקיה גבוהה יותר, מערכת השורשים צפופה יותר ומתקבל יותר יבול. פיזור השורשים בחתך הקרקע היה אחיד לעומת פיזור השורשים בהשקיה כל שמונה ימים בה נצפו הרבה שורשים בפני השטח והרבה שורשים בעומק החתך. בנוסף העלאת תדירות ההשקיה תרמה להעלאת יעילות ניצול המים של הגידול. מגמה דומה ניתן למצוא בניסוי אחר (Segal et al., 2006) שבדק זרעי חמניה שנזרעו בליזמטרים בערבה והושקו במספר תכיפויות השקיה החל מהשקיה יומית מתמשכת (מתמשכת לאורך כל היום), השקיה של 8 פולסים ביום,

השקיה דו יומית, השקיה כל שמונה ימים וכאשר לא הייתה השקיה כלל. ככל שתכיפות ההשקיה ירדה, פחתה הבימוסה וירדה כמות הזרעים והפרחים. הפער בין השקיה יומית מתמשכת להשקיה של שמונה פולסים ביום לא היה משמעותי אך ההבדל בין השקיה יומית לבין השקיה כל שמונה ימים היה משמעותי מאוד. בנוסף ניתן לראות שגם כאשר אין השקיה הצליחו לנבוט מספר צמחי חמנייה. השפעת תכיפות ההשקיה בפלפלים בקרקע סיין של חוות הבשור נבדקה על-ידי (Assouline et al., 2006). נערך ניסוי שדה עם צמחי פלפל בבית רשת בבשור ונבחנו שתי תכיפויות השקיה; יומית מתמשכת ויומית קצרה. מתוך מדידות קליטת מים על-ידי הצמח עולה שהבדלים בין הטיפולים קטנים מאוד ושקליטת המים בשני הטיפולים כמעט זהה. אך עם זאת ניתן היה להבחין שבהשקיה המתמשכת קליטת המים מעט מתאחרת לעומת ההשקיה הקצרה ושיא הקליטה שלה היה גבוה במעט מהשקיה קצרה. השפעה של הטיפולים על קליטת המים על-ידי הצמח זניחה ואינה משמעותית. (2012) Assouline et al. ערכו שוב ניסוי שדה בפלפלים בבית רשת בבשור עם תכיפויות השקיה; יומית מתמשכת, יומית קצרה ודו יומית. נמצאו תוצאות שונות. בהשוואת הטיפול של השקיה מתמשכת לקצרה נראה שהשקיה מתמשכת קלט באופן בולט יותר מים מהשקיה קצרה. בנוסף בטיפול של תכיפות ההשקיה הדו-יומית נצפתה ירידה בקליטת המים ביום השני וקצב הקליטה ביום הראשון היה זהה לזה של ההשקיה המתמשכת, וביום השני ירד לקצב של ההשקיה הקצרה. ב- 2003 (Assouline et al., 2012) התבצע ניסוי של השקיית פלפלים בליזימטרים בבית דגן הנבדלים ביניהם במצע הגידול; חול ופרלייט. המוליכות ההידראולית של מצע פרלייט גבוהה בהרבה מהמוליכות ההידראולית של החול. נבדקו ספיקות טפטפות שונות, שהשפיעו על משך ההשקיה של כל ליזימטר. ככל שהספיקה הייתה נמוכה יותר ההשקיה הייתה מתמשכת יותר. במצע חול נמצאו הבדלים בין קליטת המים בספיקות השונות. ככל שהספיקה הייתה גדולה יותר (משך ההשקיה היה קצר יותר) נקלטו יותר מים על-ידי הצמח. במצע פרלייט לא היה שינוי בקליטת המים בטיפולים השונים, ככל הנראה עקב המוליכות ההידראולית הגבוהה של מצע הפרלייט, וקצבי קליטת המים שנמדדו שם היו נמוכים כמעט פי 10 מאלו שבחול.

(Li et al., 2002) ניסו להעריך קליטת מים באמצעות H.P. תוך השוואה למאזנים של TDR. הם זרעו תירס וגידלו אותו בתכיפות השקיה יומית. במהלך עונת הגידול (DOY 174), כאשר הצמחים כבר לא היו צעירים הופסקה ההשקיה למשך שלושה ימים. הפסקה זו נעשתה במהלך שישה מחזורים. נמצאה התאמה בין קליטת המים שנמדדה במאזני TDR לקליטת המים שנמדדה באופן ישיר (H.P.). קליטת המים נמצאה אחידה ביומיים הראשונים וביום השלישי נצפתה ירידה בקליטת המים. תוצאה זו חזרה על עצמה בששת המחזורים הנבדקים. דרך נוספת לבקר, לקבוע ולנהל ממשק השקיה הוא הצבת טנסיומטרים בשדה. הטנסיומטר מנטר את מצב המים בקרקע (Marthaler et al., 1983; Wang et al., 1998), באמצעות קריאה רציפה של העומד המטריצי בקרקע, ההשקיה תינתן בעת ירידה מתחת לערך סף מסוים (Munoz-Carpena et al., 2005). להסתמכות על טנסיומטרים בניהול ובניטור בשדה יש מספר חסרונות הקשורים לקבלת החלטות שרירותיות; ישנה שונות מרחבית גדולה במערכת קרקע-צמח-אטמוספירה המגבילה את הטנסיומטר בקביעת ממשק ההשקיה, ישנה שונות בתכונות הקרקע הגורמת להבדלים בפיזור המים מהטפטפת דבר היוצר בעיות בבחירת מיקום הטנסיומטר

בשדה בכדי לקבל ממנו מידע מהימן על מצב המים בקרקע. כמו כן קביעת ערך הסף להשקיה קשור למספר רב של גורמים ביניהם מבנה הקרקע, סוג הצמח, שלב הפנולוגי ולכן קביעת ערך זה בעייתית (Or, 1996; Or and Coelho, 1996). עבודה שבוצעה על-ידי Dabach et al. (2011) מנסה לקשור בין ספי ההשקיה, כמות ההשקיה ומועד ההשקיה וזאת בכדי ליעל את ממשק ההשקיה. ההשקיה באמצעות ספי השקיה נפוצה מאוד בקרב חקלאים וישנן רבבות של מערכות השקיה אוטומטיות המבוססות על עקרון זה. על-ידי קביעת ספי השקיה שונים נקבעה תכיפות ההשקיה. כאשר סף ההשקיה היה גבוה אז תכיפות ההשקיה הייתה גבוהה ולהפך. (2011) Dabach et al. בניסוי שדה ובהדמיות ב-HYDRUS. נמצאה התאמה בין מדידות ניסוי שדה להערכות ה-HYDRUS. בעת שימוש בשיטה זו לרוב הפסקת ההשקיה גם היא משפיעה על התכיפות ונקבעת באופן שרירותי בשני אופנים: הראשון לפי סף הפסקת השקיה או לפי מנת מים קבועה. בעיתיות בגישה היא שיש לשים לב למספר דברים כמו מיקום הטנסיומטרים, הקשר בין מנת המים וסוג הקרקע. באופן כללי ישנם פרמטרים רבים שלא ידועים לחקלאי ונחוצים בעת שימוש במודלים נומריים כדוגמת HYDRUS כמו פיזור שורשים בקרקע, המקדמים הקובעים את תלות קצב קליטת המים ברטיבות הקרקע.

הגישה החדשה בניגוד לגישות הקודמות מתבססת על עיקרון של חישוב קצב קליטת המים היחסי במערכת של מקורות (טפטפות) ומבלעים (מערכת שורשים), כשקצב קליטת המים היחסי אינו נתון אלא מחושב (תרשים 2.3.3). ההבדל העיקרי בין הגישה החדשה לגישה מוצעת הקודמת של Amoozegar-Fard et al. (1984) היא



תרשים 2.3.3- הגישה החדשה לקביעת המרחק בין הטפטפות המבוססת על הנחת פוטנציאל מים נתון בבית השורשים (Communar and Friedman, 2010c)

שבעוד שהם מניחים קצב קליטת מים ידוע מראש ומחשבים את מצב הרטיבות (או פוטנציאל המים, העומד הקפילארי) בבית השורשים, הגישה החדשה (Communar and Friedman, 2010a; b; c) מציעה מהלך הפוך: הנחת מצב רטיבות (או פוטנציאל מים) נתון בבית השורשים וחישוב של קצב קליטת המים. לצורך תכנון הגיאומטריה של מערכת ההשקיה הגישה החדשה מציעה להתייחס למצב יניקה מקסימאלי על-ידי הצמח- כלומר לחשב את קליטת המים הפוטנציאלית המקסימאלית על-ידי הצמח ששרוי בתנאים אידיאליים וקולט מים בקצב שנקבע רק על-ידי היכולת של הקרקע להוליך מים מהמקורות (טפטפות) אל המבלעים

(מערכות שורשים). עוד נטען בגישה החדשה שקליטת מים על-ידי הצמח עדיפה על מצב רטיבות הקרקע כקריטריון לתכנון מערכות ההשקיה. כלומר, תפקיד הקרקע, בתנאים של מגבלות גיאומטריות ותחרות בין קליטת המים, כוח הכבידה והקפילאריות הוא לא להירטב אלא להוליך מים מהטפטפות אל השורשים. על-פי הגישה החדשה המוצעת מתוך הנחת מצב רטיבות (או פוטנציאל מים) נתון בבית השורשים ניתן לחשב את קצב קליטת המים היחסי וזאת מתוך הפתרון לבעיית זרימת המים והקליטה התמידית, והפתרון תלוי בשלושה גורמים:

1. האורך הקפילארי של הקרקע ( $\alpha^{-1}$ ) - המאפיין את התרומה היחסית של כוחות הכבידה והקפילאריות לזרימת המים.
  2. רדיוס מערכת השורשים ( $r_0$ ).
  3. תנאים אטמוספריים ( $m$ ) - פרמטר המאפיין את היחס בין ההתאדות בפועל לבין מצב הרטיבות בפני הקרקע, כלומר את הדרישה האטמוספרית להתאדות.
- בנוסף בקרקע עם פרופיל הטרוגני ישנה חשיבות לערך  $\beta$  המאפיין את השינוי האנכי ב-  $K_s$  (האם הקרקע הומוגנית  $\beta = 0$  או הטרוגנית  $\beta \neq 0$ ).

## 2.4 צמח הפלפל-

הפלפל (*Capsicum annum L.*) משתייך למשפחת הסולניים (*Solanaceae*) ומקורו במרכז ודרום אמריקה. הפלפל הינו צמח המאופיין בצמיחה מהירה, בעל פרחים בודדים, לבנים, תלויים ועומדים, פירות נפוחים קוטר של 3-12 ס"מ בצבעים שונים (ירוק, אדום, כתום, צהוב וכו'), בעל ארומה וטעם מתוקים. חשוב מאוד בשווקים עירוניים. נביטה מתחילה כ- 6-21 יום לאחר הזריעה. הפריחה מתמשכת ומתחילה 60-90 ימים לאחר הנביטה. לרוב ההפריה היא עצמית. הבשלת הפרי מתחילה כ- 4-5 שבועות לאחר הפריחה וניתן לקטוף כל 5-7 ימים. תקופת שיא הקטיף היא 4-7 חודשים לאחר הזריעה. גידול הפלפל נעשה לרוב באופן מבוקר (בחממות ובתי רשת), כאשר יכול גבוה הוא תנאי להצלחה כלכלית (Assouline et al., 2006). לכן יש להימנע מהכנסת הגידול לעקה, בין-אם עקת יובש או מליחות או טמפרטורה. הפלפל בעל מוליכות פיוניות גבוהה ושטח עלים גדול לביצוע טרנספירציה, לכן נחשב רגיש (Alvino et al., 1994). בעת גידול הפלפל יש להקפיד על בקרת השקיה מדויקת כדי להשיג יכול גבוה (Sezen et al., 2006; Steduto et al., 2012). תחת מחסור במים הפלפל מוריד את פוטנציאל המים בעלים ומקטין את שטחם (Alvino et al., 1994). כאשר נוצר מחסור במים תחל בפגיעה ביבול (Smittle, 1994). תנאי הטמפרטורה משפיעים מאוד על התפתחות פרחים ופירות בצמחי הפלפל. לטמפרטורות גבוהות פחות השפעה מאשר לטמפרטורות נמוכות (P.L. Polowick and V.K. Sawhney, 1985), והיא משפיעה בעיקר בשלב התפתחות מוקדם, בשלב התפתחות מאוחר של פרי אין השפעה של טמפרטורה גבוהה (Erickson and Markhart, 2002) וכאשר טמפרטורות הלילה גבוהות יש פגיעה בפריחה. באופן כללי בהיעדר כפור ומחלות הצמיחה ממשיכה וצמחים עשויים להיות רב שנתיים. מחלה נפוצה בצמחי הפלפל היא שחור פיטם (Blossom End Root-BER) הגורמת לפגיעה ביבול (Bar-Tal et al., 2001). זהו סימפטום של תופעה פיזיולוגית שנובעת ממחסור מקומי בסידן (Ca) שמתרחש בשלב ההתחלתי של התפתחות הפרי או מעקת מים (Marcelis and Ho, 1999; Bar-Tal et al., 2001). בפלפל הסימפטום של שחור פיטם מאופיין על-ידי התמוטטות רקמת הציפה של הפרי והופעת החמה (רקמה בתהליך ריקבון) המתפשטת לכל הפרי במהלך הגידול.



## 3 השערת מחקר

---

היפותזות המחקר העיקריות הן:

ירידה בתכיפות ההשקיה בטפטוף בקרקע עם מרקם של סוּיִן גורמת להפחתה בקליטת מים, בצימוח ובהנבה של צמחי פלפל.

כאשר משקים בתכיפות השקיה של אחת לשבוע בקרקע עם מרקם של סוּיִן, קליטת המים לא משתנה הרבה לאורך מחזור ההשקיה.

כאשר משקים פלפל בטפטוף בתכיפות השקיה יומית עד שבועית ברמות השקיה מקובלות, הצמחים קולטים פחות ממחצית מנפח המים שהושקו.

## 4 מטרות המחקר

---

מטרה 1: בחינה של השפעת תכיפות ההשקיה וכמויות ההשקיה בטפטוף בקרקע עם מרקם סוּיִן על קליטת מים, צימוח וניבה של צמחי פלפל.

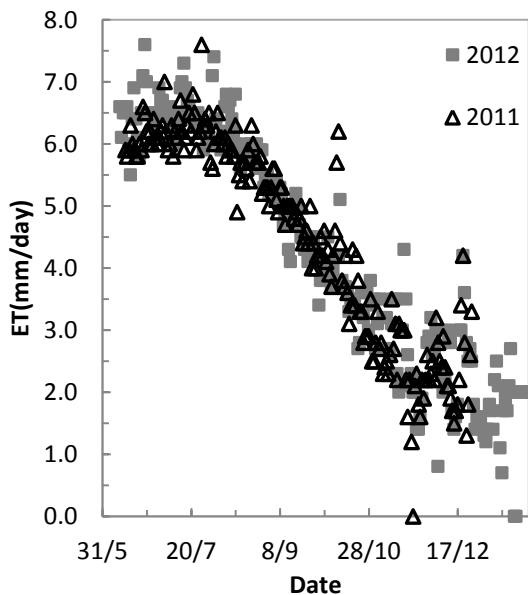
מטרה 2: בחינת השפעת תכיפויות ההשקיה בטפטוף על קליטת מים בתנאים שונים תוך שימוש בגישה חדשה המבוססת על מודל עתי לזרימה וקליטת מים.

מטרה 3: עימות ההערכות המודל העתי מול המדידות של קליטת המים של צמחי פלפל המושקים בתכיפויות שונות בקרקע עם מרקם סוּיִן.

## 5 שיטות וחומרים

הניסוי נערך בחווה הניסיונית של מ"פ דרום, בבשור (הנגב המערבי) במהלך עונות גידול 2011 ו-2012. בשנת 2010 נערך ניסוי מקדים של תגובת צמחי הפלפל לשיעורי השקיה.

### 5.1 תנאים מטאורולוגיים, התאדות והשקיה



תרשים 5.1.1 - התאדות המדודה לפי  $E_{PM}$  פנמן מונטיס) עונת 2011 (שחור ריק) ועונת 2012 (אפור מלא)

באזור הבשור ( $31^{\circ}16' N, 34^{\circ}24' E$ ) בתקופת הקיץ שורר אקלים מדברי וחם עם טמפרטורה מקסימאלית של  $36^{\circ}C$  ואידוי גבוה, מעל  $6$  מ"מ/יום (Assouline et al., 2006, 2012). בתרשים 5.1.1 מוצגת ההתאדות הפוטנציאלית המוערכת לפי המשוואה של PM (Allen et al., 1998) בעונות 2011, 2012. בשלושת החודשים הראשונים לניסוי חושבה התאדות גבוהה,  $6-7$  מ"מ/יום. לקראת סוף הניסוי, בחודשים אוקטובר עד דצמבר, ההתאדות ירדה באופן משמעותי ( $0.5-3$  מ"מ/יום). עונת 2012 התאפיינה בטמפרטורה ממוצעת גבוהה יחסית, ולכן האידוי היה גבוה מזה שב-2011. את ההבדלים המשמעותיים בין העונות ניתן לראות בעיקר בתחילת העונה (יוני-יולי). בנוסף בסוף

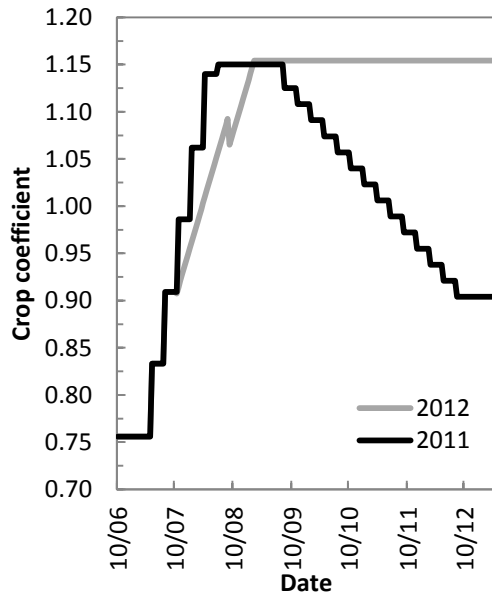
עונות הגידול נצפו שינויים קיצוניים בהתאדות היומית בין הימים (נספח 1). כמויות ההשקיה אינן זהות בין העונות מכיוון שהן נקבעות בהתאם להתאדות באותה שנה (נספח 2). כמות ההשקיה השנתית לטיפול אמורה להיות זהה בין הטיפולים השונים באותה עונה. לפני השתילה הקרקע נשטפה, כדי למנוע השפעת מלחים מהעונות הקודמות על הגידול. השתילה התרחשה בתחילת יוני (1/6/2011 ו-11/6/2012) ומשטרי ההשקיה של הטיפולים השונים החלו מהיום העשירי או התשיעי לשתילה (ב-2011, DAP10, וב-2012, DAP9) בעשרת הימים הראשונים תכיפות ההשקיה ומנת המים הניתנת לצמחים הייתה יומית וזהה בין הטיפולים.

### 5.2 תכנית הניסוי: מרחקי שתילה, ובחירת הבלוקים

ניסוי הראשון- צמחי הפלפל הנשתלים היו מין Vergasa. הצבת צמחי הפלפל הייתה מרחק של  $30$  ס"מ בין צמחי הפלפל לאורך השורה, ומרחק של  $120$  ס"מ בין שורות ( $120*30$  ס"מ). הצבת מערכת הטפטפות בחלקה הייתה בגיאומטריה של צמח צמוד לטפטפת (מרחק של  $30$  ס"מ בין הטפטפות לאורך השלוחה). ספיקת הטפטפת;  $1.6$  ליטר/שעה, ועומד הצמחים;  $2778$  צמחים/דונם. כל עונת גידול כללה  $6$  טיפולי השקיה (טבלה 5.4.1). הניסוי בוצע בחמישה חזרות המסודרות במבנה של בלוקים באקראי ( $6$  טיפולים\* $5$  חזרות= $30$  חלקות)

כאשר כיוון שורות הצמחים צפון-דרום וכיוון הבלוקים הוא מזרח-מערב. כל חלקת טיפול כללה 81 צמחים, בשלוש שורות צמחים מקבילות (שתי שורות שוליים ובמרכזן שורת יבול, שהיוו צמחי מזידה למניעת השפעות שוליים). בנספח 3 מוצג אופן חלוקת הבלוקים ופיזור הטיפולים בשטח בעונות 2011 ו-2012. ניסוי השני- הטיפולים בעונות 2011 ובעונת 2012 היו זהים. צמחי הפלפל הנשתלים היו מזן Vergasa. מרחקי הצבת צמחי הפלפל הוא 120\*100 ס"מ או 120\*30 ס"מ תלוי טיפול. החלקה מושקת על-ידי שלוחת טפטפות לשורה בעלות ספיקה של 1.6 ליטר/שעה בגיאומטריה של צמח לכל טפטפת (טפטפת כל 30 ס"מ, 100 ס"מ לפי הצבת שתילה). עומד הצמחים בכל טיפול נקבע בהתאם למרחק השתילה (2778 או 877). כל עונת ניסוי כללה 3 רמות השקיה (כמפורט בהמשך). הניסוי בוצע ב- 5 חזרות המסודרות במבנה של בלוקים באקראי (4 טיפולים\*5 חזרות=20 חלקות). כל חלקה בנויה משתי שורות שוליים אשר במרכזן שורת יבול. בנספח 3 מוצג אופן חלוקת הבלוקים ופיזור הטיפולים בעונות 2011 ו-2012.

### 5.3 מי ההשקיה, הדישון ומקדמי השקיה



תרשים 5.3.1- מקדמי ההשקיה (טרפז) בעונות 2011 ו-2012. בעונת 2012 לא הקטנו את מקדם ההשקיה (לא ירדנו בטרפז ההשקיה) מ 1.15

מי ההשקיה הינם מים שפירים ממתקן ההתפלה באשקלון + דשן מור (4:2.5:6 1% מגניון, 1% סידן) בריכוז אחיד (1.3 ליטר/מ"ק). ההשקיה בוצעה בהתאם לטיפולים ועל-פי הערכות של התאדות פוטנציאלית ומקדמי גידול משתנים לאורך העונה. תרשים 5.3.1 מציג את מקדמי ההשקיה לאורך עונת הגידול של הפלפל. ממקדמי ההשקיה חושבה מנת המים להשקיה בכל טיפול. בעונת 2012 ההשקיה בוצעה לפי מקדם הגידול שבתרשים 5.3.1, עד לשלב הירידה בתרשים. מנקודה זו, ערך מקדם הגידול לא השתנה בהתאם להמלצות, אלא נשאר בערך קבוע (1.15). הניסוי בוצע בבית רשת המכוסה ברשת 30% צל פנינה בתקרה, ורשת 50 מש בצדדים (אשר הוחלפה בתחילת העונה 2011 במקום רשת 30% צל). בית הרשת השפיעה על האקלים בתוכו, ולכן חישובי מנת ההשקיה הוכפלו במקדם 0.62 שנמצא מתאים לתאר את היחס בין ההתאדות בתוך ומחוץ בית הרשת בבשור.

דוגמא לחישוב מנת השקיה של 100%:

$$\text{daily irrigation} = \frac{0.62(\text{screen})KcE_{PM}\left(\frac{mm}{d}\right)}{0.9(\text{efficiency})0.77\left(\frac{PM}{pan}\right)} : 5.3.1$$

## 5.4 טיפולים:

ניסוי 1- בניסוי נבחן היבט תכיפיות ההשקיה על צמחי פלפל השתולים במרווח זהה. בדקנו את השפעת תכיפות ההשקיה על המדדים הנבדקים. השווינו ובדקנו צמחים שהושקו בתכיפיות השקיה שונות. בשנת 2011 הטיפולים היו אחת ל: יום (קצרה או מתמשכת), יומיים, ארבעה ימים (קצרה או מתמשכת), ושמונה ימים. בשנת 2012 הטיפולים היו: יומית, ארבעה-יומית, שבועית, מתחלפת. בטבלה 1 (טבלה 5.4.1) מופיעים הטיפולים בשנים 2011/12.

ניסוי 2- נבחן השפעת מרחק הצבת הצמחים עם כמויות השקיה שונות. טבלה 5.4.1 מתארת את הטיפולים בניסוי 2 בשנת 2011/12. טיפולים 1 ו-4 קיבלו את אותה מנת מים עונתית (כמות המים המוחלטת זהה בין הטיפולים) ליחידת שטח בהתאם למקדם גידול במהלך העונה ולדרישות אידוי מחושבות מנתונים מטאורולוגיים. טיפול 2 קיבל את אותה מנת השקיה לצמח שקיבל טיפול 1.

טבלה 5.4.1- טיפולי ההשקיה בניסוי 1 ובניסוי 2 בעונות 2011 ו-2012: מספר הטיפול, תכיפות ההשקיה ושעת תחילת השקיה

מספר טיפול	ניסוי 1- תכיפות השקיה 2011 (ושעת תחילת ההשקיה) (ימים)	ניסוי 1- תכיפות השקיה 2012 (ושעת תחילת ההשקיה) (ימים)	ניסוי 2- השקיה ומרחק שתילה (מטר)
1	יום 1DSirr (3:30)	יום 1Dirr (6:30)	100% 0.3*1.2 (7:00)
2	יומיים 2DSirr (7:00)	ארבעה 4Dirr (6:30)	100% 1*1.2 (7:00)
3	ארבעה 4DSirr (3:30)	שבעה 7Dirr (6:30)	150% 1*1.2 (7:00)
4	שמונה 8DSirr (3:30)	מתחלפת כל שבועיים 1D-7D (6:30)	333% 1*1.2 (7:00)
5	יום 1DLirr (7:00-16:00) (פולסים)	שבועית ליומית 7Dirrto1Dirr (תאריך היפוך 5/12/2012) (6:30)	
6	ארבעה 4DLirr (7:00-16:00) (פולסים)	יומית לשבועית 1Dirrto7Dirr (תאריך היפוך 16/11/2012) (6:30)	

## 5.5 חיישני קרקע: טנסיומטרים, מחושיי TDR

### 5.5.1 טנסיומטרים

באמצעות הטנסיומטרים מודדים את העומד המטריצי בנפחי קרקע קטנים. טנסיומטרים מורכבים משלושה מרכיבים: 1. ראש נקבובי הבא במגע עם הקרקע ודרכו מתבצעת זרימת המים לטנסיומטר, ולהיפך. הראש מונע פריצה של אוויר לגוף הטנסיומטר. 2. גוף הטנסיומטר- צינור מלא מים. 3. אביזר לקריאת הלחץ. בבית הרשת הותקנו טנסיומטרים של חברת Mottes אשר מדדו ברזולוציה של 4 או 5 ס"מ כל חצי שעה לאורך כל עונת הגידול.

ניסוי 1- בשנת 2011 הטנסיומטרים הותקנו בכל טיפול בצמוד לטפטפת בשני עומקים; 15 ו 35 ס"מ ובוצעו חזרות בטיפול 1 וטיפול 3. ב- 2012 הטנסיומטרים הותקנו בארבעה טיפולים באופנים שונים. בטיפול השקיה יומית (טיפול 1) ופעם בארבעה ימים (טיפול 2) הטנסיומטרים הותקנו במערך של ארבעה טנסיומטרים; שלושה צמודים לטפטפת (במרחק של 5 ס"מ ממנה) בשלושה עומקים שונים (15, 25, 35 ס"מ) ואחד במרחק 20 ס"מ

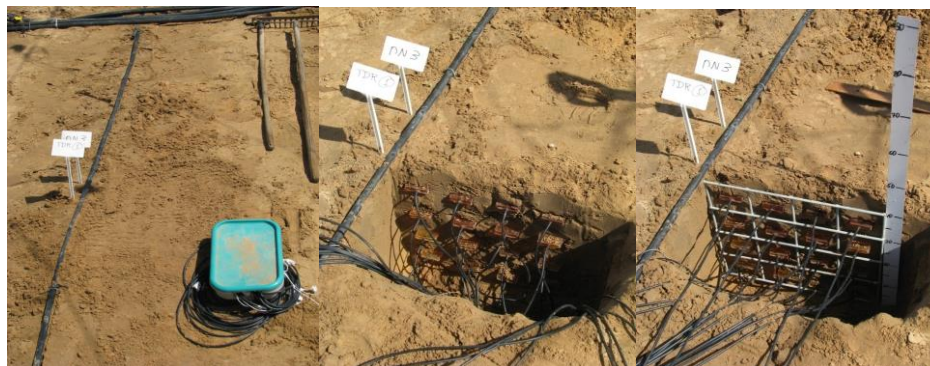
מהטפטפת בעומק 35 ס"מ. בטיפול של השקיה פעם בשבעה ימים (טיפול 3) וטיפול השקיה מתחלפת כל שבועיים (טיפול 4) הותקנו שני טנסיומטרים בשני עומקים בלבד (כמו בשנת 2011). ניסוי 2- הטנסיומטרים הותקנו בשנת 2011/12. ב- 2011 הם הוצבו בטיפולים 2,3, ו- 4 בעומקים 15 ו- 35 ס"מ. ב- 2012 הם הוצבו בטיפולים 2 ו- 4 בעומקים 15 ו- 35 ס"מ.

### 5.5.2 מחושי TDR

לפני שתילת הפלפלים הוטמנו מערכים של 16 חיישני TDR באורך 15 ס"מ בדופן תעלה, ניצב למקום בו ישתלו הצמחים (תמונה 5.5.1). סידור החיישנים היה זה ממדי. לאחר הכנסת החיישנים התעלה מולאה והודקה כך שהנפחים הנמדדים עברו הפרה מינימאלית. המדידות נעשו אחת לשבוע/שבועיים. הקריאות נעשו בעזרת מכשיר 1502B TDR של חברת Tektronix. מדדנו את המקדם הדיאלקטרי ( $\epsilon$ ) של הקרקע מההפרש בין הזמן הדרוש לגל אלקטרומגנטי לחזור מקצה החיישן לעומת הזמן הדרוש לו לחזור מתחילת החיישן. מכיוון שהמקדם הדיאלקטרי של הקרקע תלוי בצורה חזקה בתכולת הרטיבות קיים קשר טוב ביניהם שאינו מושפע ממליחות תמיסת הקרקע. משוואה 5.5.1 מאפשרת לחשב את תכולת הרטיבות ( $\theta$ ) מהמקדם הדיאלקטרי הנמדד;

$$VWC(\theta) = 0.365 \frac{\epsilon^{0.5} - 2.87^{0.5}}{22^{0.5} - 2.87^{0.5}}$$

(0.365- נקוביות הקרקע, 2.87- מקדם דיאלקטרי של קרקע יבשה, 22- מקדם דיאלקטרי של קרקע רוויה).



תמונה 5.5.1- תצלום של תהליך החדרת ה TDR לקרקע בבשור לפני שתילה

ניסוי 1- בעונת 2011 הוצב מערך TDR בשני טיפולים; השקיה יומית והשקיה כל ארבעה ימים (טיפול 1, 3), ובוצעו שתי חזרות. המערך היה 16 חיישנים במרחק 10 ס"מ לשני הכיוונים, החתך הנבדק היה של 40\*40 ס"מ בניצב לשלוחה. בעונת 2012 הוצב מערך TDR בכל הטיפולים והחזרות היו בטיפולים 2 ו- 4. המערך בעונה זו היה גם של 16 חיישנים אך החתך הנבדק היה עמוק יותר (40\*60), החיישנים הוצבו במרחקים 5,15,25,35 (כמו בשנת 2011) ובעומקים של 7, 22.5, 32.5, 52.5 ס"מ. ניסוי 2- בעונת 2011 הוצב מערך ה- TDR בטיפולים של טפטפת כל מטר 100%, 150%, 333% השקיה (טיפולים 2, 3, 4) במערך של 16 חיישנים 40\*40 ס"מ. ב- 2012 לא בוצעו מדידות חיישני TDR.

### 5.6 חיישני צמח- זרימת מים בגבעול: פולס חום



תמונה 5.6.1- חיישן ה- H.P. ומחטי החום המותקנים על שיה פלפל בבשור

במהלך החודשים אוגוסט עד דצמבר בשנת 2011 ו-2012 בניסוי 1 ו-2, הותקנו 12\*2 חיישני פולס חום בצמחי הפלפל. החיישנים (תרשים 2.2.1 ותמונה 5.6.1) הותקנו לפרק זמן של שבועיים עד שלושה שבועות על כל שני טיפולים נבחרים (נספח 4). בכל טיפול הותקנו 12 חיישנים על צמחים שונים המהווים חזרות. מערכת חיישנים לצמח כללה; חיישן המורכב ממחוש מדידה ומחוש ייחוס (שני תרמוקפלים (Cohen et al., 1981), וגוף חימום (heater). קוטר הגבעול נמדד עם קליבר דיגיטאלי בעת ההתקנה והפירוק של החיישנים.

ההתקנה בוצעה תוך הקפדה על שיטת העבודה כפי שמופיעה ב- (Cohen, Fuchs, & Green, 1981). החיישן מדד את מהירות זרימת המים בגבעול. פולס חום ניתן אחת לשעה לכל החיישנים המחוברים, והמערכת מדדה את הטמפרטורה של שני המחושים כל 0.8 שניות במשך 5 דקות. המידע נשמר באוגר נתונים (CR23X, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA). החיישנים חוברו למולטיפלקסר שנבנה במיוחד לצורך הניסוי (נספח 5). המולטיפלקסר חובר לאוגר הנתונים. בנוסף, לצורך הניסוי נבנו קופסאות פולס חום מתאימות (נספח 6) שחוברו אף הן לאוגר הנתונים. משך הפולס הניתן על-ידי הקופסאות הוא 0.8 שניות, וזה כדי למנוע המסה של מחט החימום ונזק גדול מידי לצמחים.

את הנתונים שנאספו עיבדנו באמצעות תוכנת matlab למציאת  $T_0$  ו- $T_{max}$  כאשר  $T_0$  הינו הזמן שלוקח לחיישן לחזור לטמפרטורה של לפני נתינת הפולס.  $T_{max}$  הוא הזמן שלוקח לחיישן להגיע לטמפרטורה המקסימאלית. מהירות הזרימה חושבה לפי המטדולוגיה של (Marshall, 1958);

כאשר  $11 > T_0$  שניות- מהירות הזרימה מהירה ולכן השתמשנו ב- $T_{max}$ , כלומר במשוואה 5.4.1

כאשר  $11 < T_0$  שניות- מהירות הזרימה איטית והשתמשנו ב- $T_0$ , כלומר במשוואה 5.4.2

$$v = \frac{\sqrt{x^2 - 4kT_m}}{T_m} \quad \text{משוואה 5.4.1}$$

$v$  - מהירות הזרימה (mm/sec)

$x$  - המרחק בין הטרמוקפל שבמורד הזרם למחט החום (mm)

$k$  - מקדם הדיפוסיה התרמלית (הערכנו שהוא 0.142 mm/sec)

$T_m$  - הזמן להגעה לטמפרטורה המקסימלית (sec)

$$v = (x_1 - x_2)2T_0 \quad \text{משוואה 5.4.2}$$

$x_1$  - המרחק מעל מחט החום (mm)

$x_2$  - המרחק מתחת למחט החום (mm)

$T_0$  - הזמן להגעה לטמפרטורה שווה ב-  $X_1$  וב-  $X_2$  (sec)

כדי לחשב כמות המים הכפלנו את מהירות הזרימה שחושבה לפי משוואת 1-5.4 או 2-5.4 בשטח החתך המדוד של הגבעול. התוצאה המתקבלת נקראת שטף זרימת המים. משוואה 5.4.3:  $q = C_F v A$

$q$  - שטף זרימת המים ( $mm^3/sec$ )

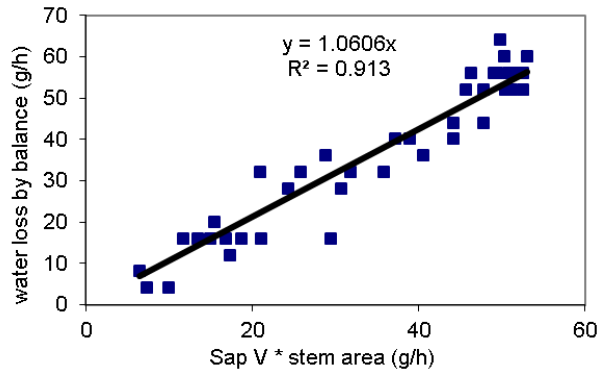
$C_F$  - מקדם כיוול

$A$  - שטח הגבעול המדוד ( $mm^2$ )

$v$  - מהירות הזרימה ( $mm/sec$ )

את התוצאות תיקנו באמצעות מקדם כיוול שנקבע על-ידי Möller et al (2004) שערכו 1.1. בעבודת המסטר של מרקוס מולר נעשה כיוול לחייוני ה-sap flow בצמח פלפל בשנת 2001 ב- 24 צמחים בודדים. באמצעות הקליבר הדיגיטאלי נמדד קוטר הגבעול וממנו

מסיקים שטח החתך המוליך, אך שטח זה לא בהכרח



תרשים 5.6.1 קצב איבוד משקל נמדד כנגד המכפלה של מהירות הזרימה בשטח החתך של הגבעול

מהווה את החתך המוליך. מקדם

הכיוול מתקן את שגיאת המדידה של

שטח החתך. תרשים 5.6.1 מתאר

את הקשר בין מדידות sapflow

המוכפלות בשטח החתך המדוד

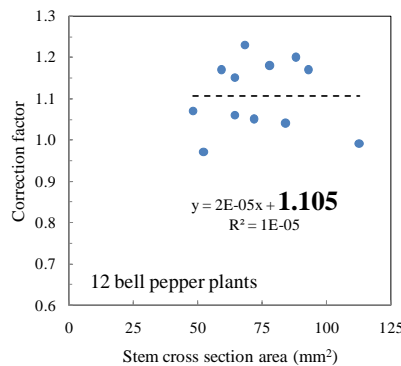
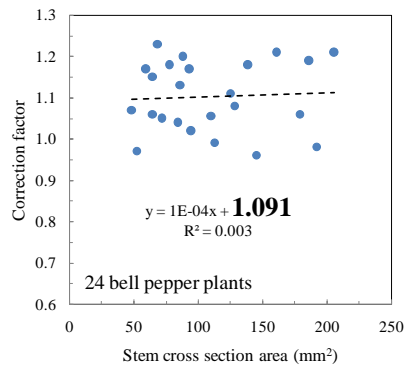
לאיבודי המים ממאזנים, אשר ממנו

קובעים את ערכו של מקדם הכיוול.

תרשים 5.6.2 מציג את שטח החתך

ואת ההתאמה למקדם הכיוול של

הצמחים הבודדים (פיזור התוצאות).



תרשים 5.6.2 - מקדם הכיוול כתלות בשטח החתך של הגבעול

## 5.7 מדידות צימוח וניבה

### 5.7.1 גובה צמחים

מועדי מדידת גובה צמחי הפלפל נקבעו על-ידי צוות המו"פ ולפי בקשתנו (כפעם בשבועיים). המדידה נעשתה לאורך כל עונת הגידול (יוני עד דצמבר) בשנים 2011/12 בניסויים 1 ו- 2. המדידה נעשתה משורת היבול בלבד.

### 5.7.2 קטיף ויבול

במהלך עונות הגידול היו קטיפים במרווחי זמן שונים שנקבעו על-ידי צוות המו"פ תוך התחשבות בדרישתנו (נספח 7). מועדי הקטיף השתנו בכל עונת גידול. הקטיף הראשון היה בחודש אוגוסט או ספטמבר (19/8/2011),

5/9/2012) עד סוף דצמבר ותחילת ינואר (22/12/2011, 6/1/2013). הקטיפה נעשה משורת היבול, ובכל הקטיפים נקטף רק הפרי האדום מלבד בקטיפ האחרון. היבול נשקל לאחר הקטיפה. לאור שיקולי שיווק פירות הפלפל, נעשה מיון בבית האריזה והוצאו פירות מעוותים או נגועים בשחור פיטם. היבול בכל קטיפה מיון בשני שלבים; שלב א'- נקבע מספר ומשקל כל הפירות ומספר ומשקל הפירות המתאימים ליצוא. שלב ב'- נקבע מספר הפירות לפי נגעים: מעוותים, שחור פיטם ופירות נגועים בוירוס. סכום מספרי הפירות הנגועים יכול להיות גדול ממספר הפירות הנגועים הכללי כאשר אותו פרי נגוע ביותר מנגע אחד, כמו למשל מעוות עם BER.

### **5.7.3 פירות מעוותים**

מאחר ואיכות הפרי נקבעת לרוב לפי מדדים אסטטיים של צורת הפרי, במהלך העונה נספרו הפירות המעוותים מתוך כלל הפירות הנקטים. כל הפירות המעוותים נאספו, נספרו ונשקלו על מנת לבדוק השפעה אפשרית של טיפולי ההשקיה על עיוות הפירות ומספר פירות כללי (כולל אלא שאינם מגיעים ליצוא).

### **5.7.4 שחור פיטם**

הפירות הנגועים בשחור פיטם הופרדו משאר הפירות ונשקלו בנפרד משאר הפירות, על מנת לבדוק השפעה אפשרית של עקה בגידול הגורמת שחור פיטם.

### **5.7.5 פירוקי צמחים לאורך העונה**

פירוק צמחים נעשה בתאריכים המוצגים בנספח 7, ומתואר לפי ימים לאחר השתילה (DAP). במהלך עונת הגידול (2011/12) בוצעו שני פירוקים: בתחילת העונה ובסוף העונה. נדגם צמח אחד לחלקה שנשקל וחולק לעלים, גבעולים ופירות וחנוטים. לכל קבוצה נקבע המשקל הטרי, הפירות הגדולים (מעל 4 ס"מ) נספרו, ולעלים ולגבעולים נקבע המשקל היבש לאחר ייבוש בתנור.

### **5.7.6 מערכת שורשים**

בסוף עונת הגידול נחפרו בורות בגודל 120\*150\*150 ס"מ במטרה לבחון את מערכת השורשים שהתפתחה בכל טיפול. מערכת השורשים צולמה.

## **5.8 ניתוח סטטיסטי**

הניתוח הסטטיסטי נעשה בתוכנת JMP 7.1 (SAS Institute Inc., Cary, N.C., U.S.). ההשוואה בין הטיפולים נעשתה באמצעות מבחן סטודנט עם רווח בר סמך של 0.05 (נספח 8).

## **5.9 ניסוי מקדים 2010**

במהלך קיץ 2010 בוצע בחוות הבשור ניסויי השקיה בממשקים שונים עם פלפל- ניסוי קדם. בוצע ניסוי ברמות השקיה שונות. בניסוי היו חמישה טיפולים: 40%, 60%, 80%, 100% ו 120%. כאשר ההשקיה של 100% מחושבת לפי ההתאדות הממוצעת כפי שתואר למעלה. ברוב הטיפולים ההשקיה בחסר בין 40%-80% מההשקיה המומלצת. הטיפולים הללו בוצעו מתוך רצון לקבל את תגובת הצמח לעקת מים ולא למליחות, לכן



בוצעו בכל הטיפולים שטיפה של 30 מ"מ אחת לחודש. בוצעו בדיקות במהלך עונת הגידול והרלוונטיות עבורנו: פירוקים ויבולים.

## 5.10 תוכנת DIDAS

תוכנת DIDAS (Drip Irrigation Design and Scheduling) מתבססת על עיקרון חדש של חישוב יעילות ניצול המים (קליטת מים יחסית) במערכת של מקורות (טפטפות) ומבלעים (מערכות שורשים), כשנפח קליטת המים היחסי אינו נתון אלא מחושב. התוכנה משתמשת בעקרונות הגישה החדשה המוצעת במודלים התמידי והעתי לזרימה וקליטת מים. המודל לזרימה וקליטת מים עתי (Communar and Friedman, 2012a; b) מסייע לקבוע את תזמון ההשקיה המיטבי באמצעות פתרון אנליטי ומבוסס על מספר עקרונות: הפתרון האנליטי לבעיית הזרימה העתית יהיה על-פי הגישה של (Warrick, 1974), המחייבת הנחה נוספת של קשר לינארי בין מוליכות הידראולית של הקרקע ( $K$ ) לתכולת הרטיבות הנפחית ( $\theta$ ), משוואה 5.10.1:  $k = Ks/\theta s$ , והחלפת השיפוע של הקבוע בכל תחום הרטיבות בשיפוע התלוי בתכולת הרטיבות המאפיינת את נפח הקרקע הרלוונטי לקליטה לאורך מחזור ההשקיה. על-פי הגישה המוצעת מתוארים מחזורי השקיה שלמים הכוללים את ההשתנות העתית של חידור המים מהטפטפות והתפזרותם בקרקע תוך כדי קליטה משתנה בזמן בנפח בית השורשים הפעיל

וההתאדות מפני הקרקע. משוואת הזרימה העתית (משוואה 5.10.2):  $\left(\frac{\alpha}{k_{eff}} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla^2 \varphi - \alpha(1 + \beta) \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)$ .

משוואה 5.10.3:  $\varphi = \int_{\psi_a}^{\psi} K(\psi) d\psi = \frac{K(\psi) - K(\psi_a)}{\alpha}$ , היא לינארית גם בזמן וגם במרחב. ניתן לתאר בעזרתה את ההשתנות העתית של פירוס הרטיבות לאורך מחזור ההשקיה על-ידי סופרפוזיציה של הפתרונות

עבור התקופה בה יש אספקת מים קבועה מהטפטפת ועבור תקופה בה אין מקור מים (שמתוארת על-ידי מקור מים שלילי בספיקה זהה). הלינאריות במרחב מאפשרת את תיאור זרימת וקליטת המים על-ידי סופרפוזיציה של המקורות והמבלעים על-פי פיזורם בשדה. ניתן להשתמש בפתרונות של הבעיה האנלוגית של זרימה העתית בתווך כלוא המייצג את תחום הזרימה בגיאומטריה הנתונה. כאשר מתכננים את תזמון ההשקיה מתייחסים להתנגדות מקומית ( $\zeta$ ) שמייצגת את התנגדות הצמח (בעיקר הפיוניות) לקליטת מים לפי משוואה 5.10.4

$\zeta = \zeta_{min} + (\zeta_{max} - \zeta_{min}) \left[ \csc^\lambda \left( \frac{\pi(t-t_{st})}{t_{sr}} \right) - 1 \right]$  (ולא

רק בתכולת הרטיבות של הקרקע למשל). הנחנו שינוי עתי בהתנגדות המבלע לפי מהלך יומי סינוסואדלי עם התנגדות גדולה בשעות הלילה ( $\zeta_{max}$ ) שמתחילה לרדת. למשל בשעה 6:00 ערך מקסימאלי שמתחיל לרדת לערך מינימאלי בשעה 12:00 וחוזר לערך גבוהה שוב בשעה 18:00. עבור מצב של זמינות מים גבוה באזור מערכת השורשים צפויה התנגדות הפיוניות ליצור מהלך הפוך של דיות (אשר שקולה לקליטת מים- אנחנו מזניחים את השפעת קיבול הצמח למים) שמתחילה בשעה 6:00 ומקבלת ערך מקסימאלי בשעה 12:00 וחוזרת לערך מינימאלי בשעה 18:00. המהלך היומי של התנגדות, הצמח מאופיין על-ידי שלושה פרמטרים: התנגדות הגבוהה בלילה,  $\zeta_{min}$  ההתנגדות המינימלית בשעות הצהריים, וערך ההגבה ( $\lambda$ ) שמאפיין את קצב השתנות ההתנגדות. ניתן להתאים ולשנות את משך מחזור הדיות ואת שעת ההתחלה והסיום של המחזור. קצב קליטת

המים הרגעי מחושב לפי משוואה 5.10.5:  $\bar{q}_{si} = \frac{\varphi_{so}(0,z_{bot})}{\varphi_{si}(0,z_{bot})(1+\zeta)}$  חישוב נפח קליטת המים היחסי ( $W_{si}/W_0$ )

נעשה מתוך אינטגרציה של המהלך היומי העתי של קצב קליטת המים הרגעי ( $q_{si}(t)$ ) וחלוקת נפח המים הנקלט

בכמות המים המסופקת בהשקיה ( $q_{so}t_0$ ), ומחושב לפי משוואה 5.10.6:  $\frac{W_{si}}{W_0} = \frac{1}{q_{so}t_0} \int_6^{18} q_{si}(t) dt$

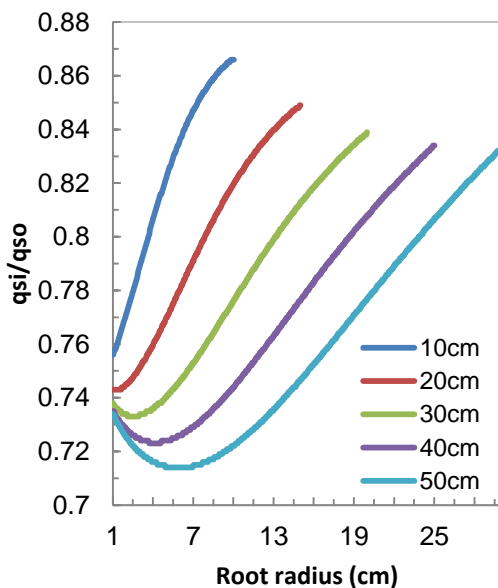
זרימת המים בקרקע תלויה באורך הקפילרי של הקרקע ( $\alpha^{-1}$ ) וערך  $k_{eff}$  מסייעים לחשב את זמן תנועת פולס

המים בקרקע לפי משוואה 5.10.7:  $t = \frac{4}{\alpha * k_{eff}}$ . כאשר  $k_{eff}$  הוא פונקציה של השינוי במוליכות ההידראולית

לשינוי בתכולת הרטיבות (משוואה 5.10.8:  $k_{eff} = \frac{K_{sat}}{\theta_s - \theta_r} = \frac{dK}{d\theta}$ ), וישנו קשר בין האורך הקפילרי למוליכות

ההידראולית ברוויה. משוואה 5.10.9 מתארת את הקשר של קרקע בשור:  $\alpha = 0.04035 K_{sat} (\frac{cm}{h})$ .

ב- DIDAS 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 הוא היכולת של הקרקע



**תרשים 5.10.1** - פלט של המודל לזרימה תמידית של DIDAS עם חישוב של קצב קליטת המים היחסי (RWUR) כתלות ברדיוס מערכת השורשים עבור מרחקים שונים של הטפטפות לאורך שלוחת טפטוף בודדת (10, 20, 30, 40 ו-50 ס"מ)

להוליך מים מהטפטפות אל מערכות השורשים, כשהצמח צריך להתחרות עם כוחות הכבידה והקפילריות של המים הזמינים לקליטה. יעילות ניצול המים המקסימאלית האפשרית מחושבת באמצעות פתרונות אנליטיים עבור מקרים פרטיים לבעיית ה'מקור-מבלע'. DIDAS מאפשר לתכנן את הגיאומטריה של מערכת הטפטוף העילי והטמון, על-ידי פתרון כללי לקליטת המים היחסית: מקורות חיוביים מייצגים את הטפטפות ומבלעים שליליים מייצגים 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 חול סייני), הרדיוס של בית השורשים הפעיל ופרמטר שלישי במקרה שההתאדות מפני הקרקע משמעותית. בתרשים 5.10.1 מתוארת התלות של רדיוס

בית השורשים על נפח קליטת מים היחסי ( $RWUR(\%) = q_{soi}/q_{so}$ ) בקונפיגורציות שונות (מרחק טפטפות 10, 20, 30, 40, 50 ס"מ). כאשר לכל רדיוס בית שורשים יעילות נפח קליטת מים המשתנה בהתאם לקונפיגורציה. כאשר ריווחנו את הצבת הטפטפות, באותו רדיוס בית שורשים נפח קליטת המים היחסי ירד.

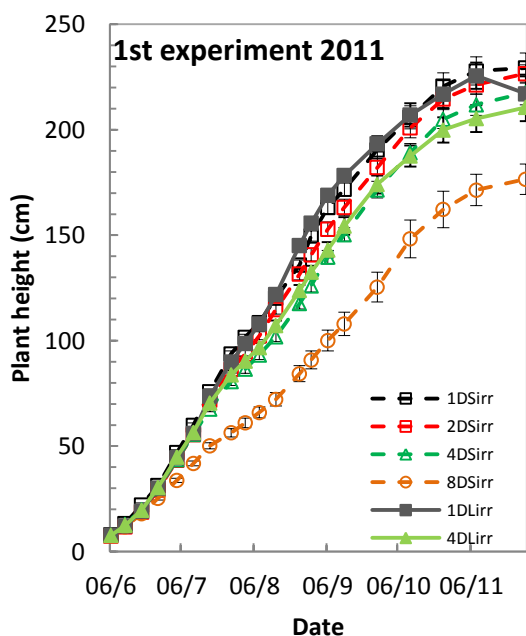
# 6 תוצאות

## 6.1 צימוח וניבה

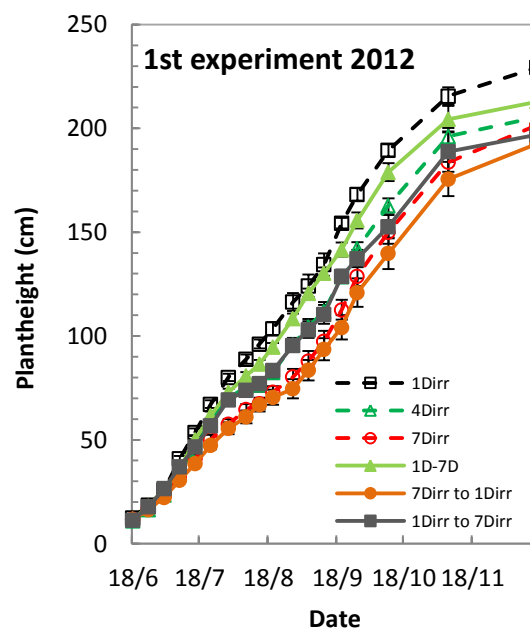
### 6.1.1 צימוח

השינוי בגובה הצמחים בטיפולים השונים מוצג בתרשימים 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3. בכל הטיפולים חלה עלייה בגובה הצמחים כתלות במנת המים.

ב- 2010 עיקר התוצאות (תרשים 6.1.4) הראו שבמרחקי שתילה רגילים (30 ס"מ) קצב הצימוח גדל מונוטונית עם הגדלת מנת ההשקיה. הטיפול של שתילה כל 1 מטר ו- 100% השקיה לצמח הניב צמחים נמוכים עם יכול כללי לדונם הדומה לטיפול ההשקיה ברמה של 40%, כשמרבית הפרי היה מעוות או נגוע בשחור פיטם. ניסוי 1- ב- 2011/12 בחודש הראשון נמדד קצב צימוח אחיד בכל הטיפולים ולאחר חודש מהשתילה קצב הצימוח משתנה לפי טיפול. קצב הצימוח במחצית הראשונה של הניסוי היה גבוה בצורה מובהקת בתכיפויות ההשקיה הגבוהות, אבל לקראת סוף הניסוי קצב הצימוח נמוך בכל תכיפויות ההשקיה. ב-2011 הצמחים

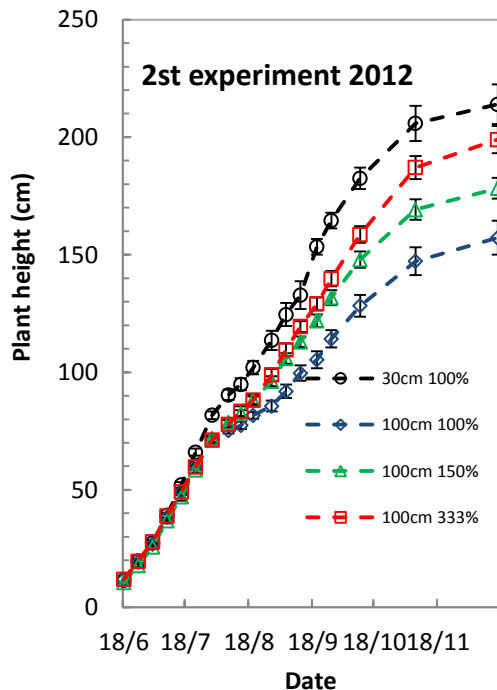


תרשים 6.1.1- השינוי בגובה הצמחים במהלך עונת הגידול בטיפולים השונים בניסוי 1, עונה 2011.



תרשים 6.1.2- השינוי בגובה הצמחים במהלך עונת הגידול בטיפולים השונים בניסוי 1, עונה 2012.

שהושקו אחת לשמונה ימים היו הנמוכים ביותר לאורך כל הניסוי בצורה מובהקת. השקיה קצרה לעומת מתמשכת לא הביאה להבדלים מובהקים בין הטיפולים, אך ניתן להבחין בקצב צימוח גבוה יותר של השקיה יומית קצרה בתחילת הניסוי ואז היפוך במגמה בסוף הניסוי (תרשים 6.1.1).



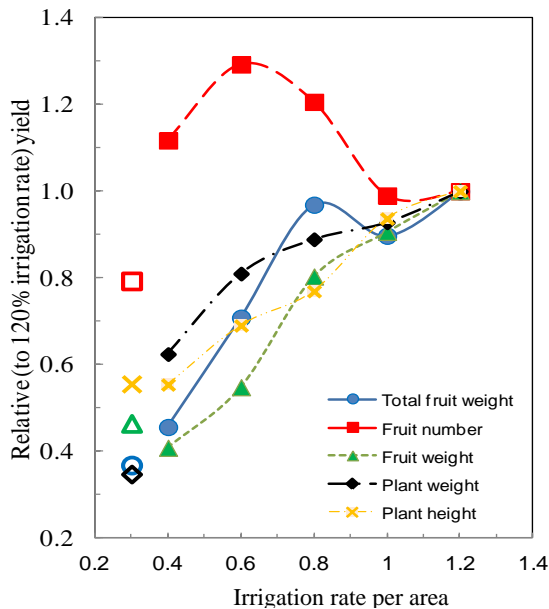
תרשים 6.1.3- השינוי בגובה הצמחים במהלך עונת הגידול בטיפולים השונים ניסוי 2, עונה 2012

ב-2012 קצב הצימוח של הצמחים המושקים כל ארבעה ימים וההשקיה המתחלפת היו זהים וגבוהים מהשקיה שבועית אך נמוכים מהשקיה יומית (תרשים 6.1.2). יש לשים לב שהחל מנובמבר 2011/12 יש עיקוב בקצב צימוח הנובע מאופי ההדליה של צמחי הפלפל, מגבלת הגובה של בית הרשת והנכונות של צוות המו"פ להדלות את צמחי פלפל.

ניסוי 2- בדומה לניסוי 1, בתחילת העונה אין הבדל בין הטיפולים ובהמשך העונה החל קצב הצימוח לעלות עם העלייה במנת המים הניתנת בכל טיפול עד התייצבות בסוף העונה עקב מגבלות ההדליה, בית הרשת ותנאי מזג האוויר שהאטו את ההתפתחות (תרשים 6.1.3).

### 6.1.2 יבולים

ב-2010 נערך ניסוי מקדים שמטרתו הייתה לאפיין את תגובת צמחי הפלפל למנות השקיה שונות בממשק השקיה יומית קצרה. מתוך מדידות של משקל הפרי הכולל הנקטף לאורך העונה נמצא שמשקל הפרי הנקטף גדל מונוטונית עם הגידול ברמת ההשקיה. מספר הפירות המקסימאלי התקבל בהשקיה של 40%-120%. עם פחיתה לכיוון רמות השקיה של 40%-120%. משקל הפרי הבודד גדל גם כן עם הגידול במנת ההשקיה, לכן משקל היבול הכולל משתנה יחסית יותר ממספר הפירות. אחוז הנגיעות בשחור פיטם ובפרי מעוות גדלו עם הירידה ברמת ההשקיה (לא מוצג).

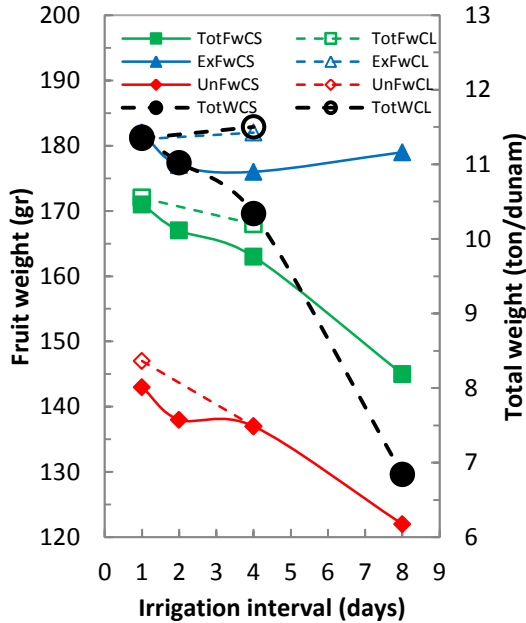


תרשים 6.1.4- מדידות יבולים וגובה הצמחים לניסוי המקדים ב-2010. מתואר: משקל כולל/דונם, מספר פירות/דונם, משקל פרי בודד, משקל הצמחים הכולל וגובה הצמחים יחסית למדדים המתאימים ברמת השקיה של 1.2 כנגד רמת ההשקיה. הטיפולים של רמות ההשקיה של 0.4 עד 1.2 בסמנים מלאים והטיפול של 1m בסמנים ריקים

הטיפול של שתילה והשקיה כל 1 מ' ברמת השקיה של 100% (לצמח, כלומר 30%) הניב צמחים נמוכים ועם יבול כללי דומה לטיפול ההשקיה ברמה של

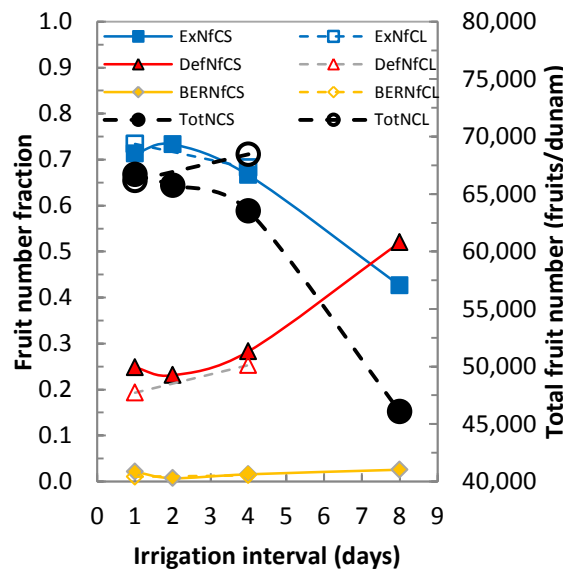
40%, כשמרבית הפרי היה מעוות או נגוע בשחור פיטם. בתרשים 6.1.4 מתוארים המשקל הכולל לדונם, מספר

הפירות לדונם, משקל הפרי הבודד, משקל הצמחים הכולל וגובה הצמחים יחסית למדדים המתאימים ברמת



תרשים 6.1.5- השפעת תכיפות (קצרה קו מלא וממושכת קו שבור) על משקל הפירות הכללי, ליצוא ומעוות ועל המשקל הכללי

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 לעומת מרחקי שתילה של 30 ס"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 יכול גדול



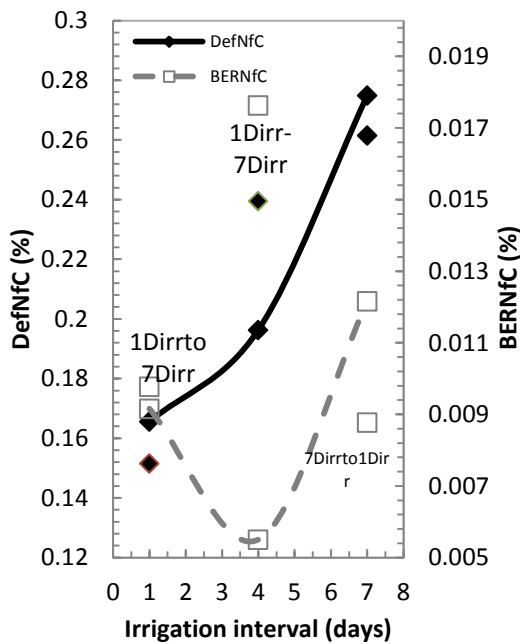
תרשים 6.1.6- השפעת תכיפות ההשקיה על אחוז הפירות ליצוא, המעוות והנגוע בשחור פיטם (BER) ועל מספר הפירות הכללי

השקיה של 1.2 כנגד רמת ההשקיה. הטיפולים של רמות ההשקיה של 0.4 עד 1.2 בסמנים מלאים והטיפול של שתילה כל 1 מטר בסמנים ריקים. בעקומים המתארים את הטיפולים שנשתלו במרחק 30 ס"מ 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

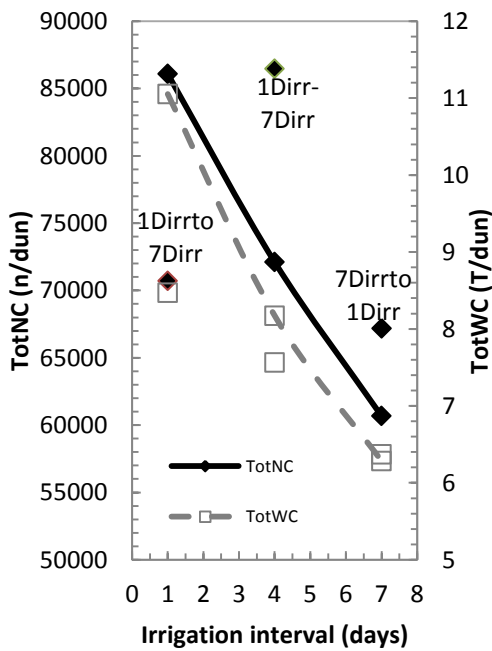
עולה בצורה לינארית בתחום 0.4 – 0.8, יורד קצת במנה 1.0 ועולה למנה מרבית בטיפול 1.2. בתחום 0.8 – 1.2 חלק מההבדלים במספר הפירות ובמשקל פרי

פי 1.35 בגלל מספר גדול פי 2.7 של פירות קטנים פי 0.5. תגובה כזו הנה תוצאה של שילוב השפעות המרווח בין הצמחים והטפטפות על יכולת התפתחות הנוף והשורשים, על הספקת המים מהטפטפות לנפח מאכלס השורשים ועל תלות יחסי צימוח ווגטיבי, 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, ומה שהכי בולט (לעומת טיפול 0.8) הוא הפחיתה במספר הפירות.

ניסוי 1- ב- 2011 היבול הכולל (טון/דונם) ירד עם הירידה בתכיפות ההשקיה (תרשים 6.1.5). בהשקיה אחת לשמונה ימים התקבל היבול המינימאלי ובהשקיה מתמשכת



תרשים 6.1.7 - פרקציית הפירות המעוותים (מלא) והנגועים בשחור פיטם (שבור) ביחס לכלל היבול בעונת 2012



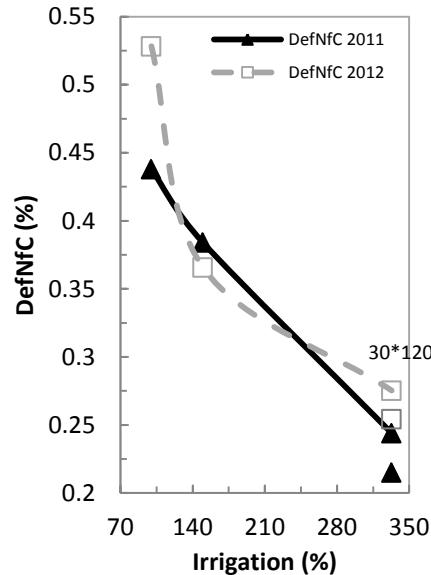
תרשים 6.1.8 - השפעת תכיפות ההשקיה על מספר הפירות במצטבר בעונת 2012 (קו מלא) ומשקל הפירות המצטבר בעונת 2012 (מקוקו)

אחת לארבעה ימים התקבל יבול המקסימאלי. משקל היבול הכללי בהשקיה יומית מתמשכת היה זהה לזה שהתקבל בהשקיה יומית קצרה. אחוז הפירות המעוותים (תרשים 6.1.6) היה מקסימאלי בהשקיה אחת לשמונה ימים וירד מונוטונית עם העלייה בתכיפות השקיה. בטיפול השקיה כל שמונה ימים נצפתה הכי הרבה נגיעות בשחור פיטם אך עם זאת הנגיעות הייתה נמוכה מאוד בכל הטיפולים. ההבדלים בערכים של מדדי היבול המצטברים במרווח בין השקיה יומית עד ארבעה ימים (קצרה או מתמשכת) היו קטנים ולא מובהקים. לעומת זאת התגובה להגדלת המרווח בימים מארבעה ימים לשמונה ימים הייתה חזקה ומובהקת בכל המדדים, למעט משקל פרי המתאים 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 כל שמונה ימים. עידון ההבחנה של השפעות מרווחים עד ארבעה ימים בהשקיה קצרה לעומת מתמשכת הראה הבדלים לא מובהקים עם יתרון להשקיה יומית לעומת אחת לארבעה ימים. בהשקיה מתמשכת לעומת קצרה נצפתה תגובה הפוכה של הפירות המעוותים, יותר פירות נגועים בשחור פיטם בהשקיה יומית ופחות בהשקיה מתמשכת לעומת קצרה. אחוז הפירות המעוותים היה גדול בצורה מובהקת גם במרווח השקיה של ארבעה ימים לעומת השקיה יומית וגם בהשקיה קצרה לעומת השקיה מתמשכת. ככלל ההבדלים שנתקבלו בין מרווחי השקיה של יום עד ארבעה ימים אינם גדולים. שתי הסיבות העיקריות לכך היא יכולת תאחיזת המים הגבוהה של קרקע סייך, שככל הנראה מוליכותו ההידראולית גם פוחתת עם העומק והתפתחות מערכת שורשים עמוקה יותר במרווחי השקיה גדולים. גם ב-2012, משקל היבול פחת עם עליית

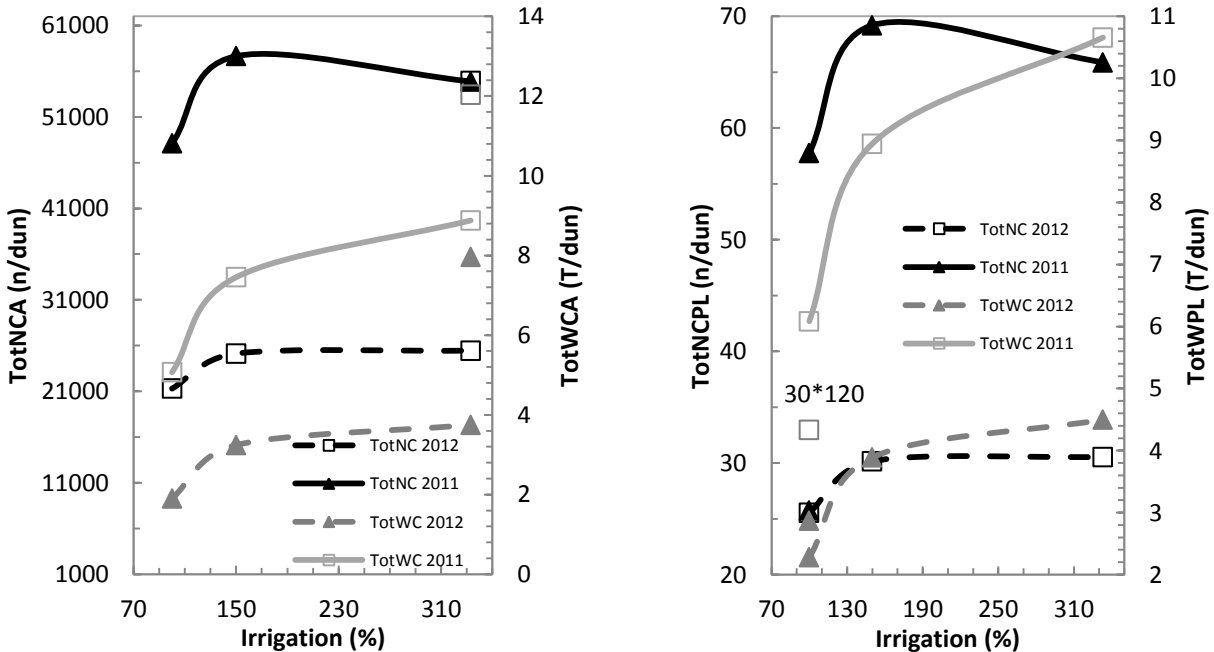
מרווחי ההשקיה ומספר הפירות הכללי פחת, אם כי במידה מתונה יותר. טיפול השקיה מתחלפת (1Dirr-7Dirr) הקדים בפריחה ובהנבה ונתוני המשקל המצטברים שלו דומים לאלו של השקיה אחת לארבעה ימים (תרשים 6.1.8). בתרשים 6.1.7 ניתן לראות את אחוז הפרי המעוות, ובדומה לשנת 2011 הוא גדל עם הגדלת מרווחי

ההשקיה. הנגיעות בשחור פיטם ובנזקי חם הייתה נמוכה מאוד, מלבד הטיפול המתחלף, 10% מהפירות שלו היו עם נזקי חם.



תרשים 6.1.9- השפעת מנת ההשקיה באחוזים על פרקציית הפירות המעוותים ב- 2011 (מלא שחור) וב- 2012 (שבור אפור)

ניסוי 2- הערכים המוחלטים של מספר הפירות ומשקל היבול מוצגים לפי מנת מים ליחידת שטח (טיפול הסטנדרט, הצבה 30\*100 ס"מ, זהה ל- 333%) ולפי מנת מים לצמח (הסטנדרט זהה ל- 100%). בתרשים 6.1.10 מוצגים הנתונים לפי מנת מים ליחידת שטח ורואים שעם העלייה בכמות המים מ- 1 ל- 1.5 ליחידת שטח ישנה עלייה במשקל היבול הכללי ובמספר הפירות הכללי, ואילו מ- 1.5 ל- 3.33 אין עלייה במספר הפירות



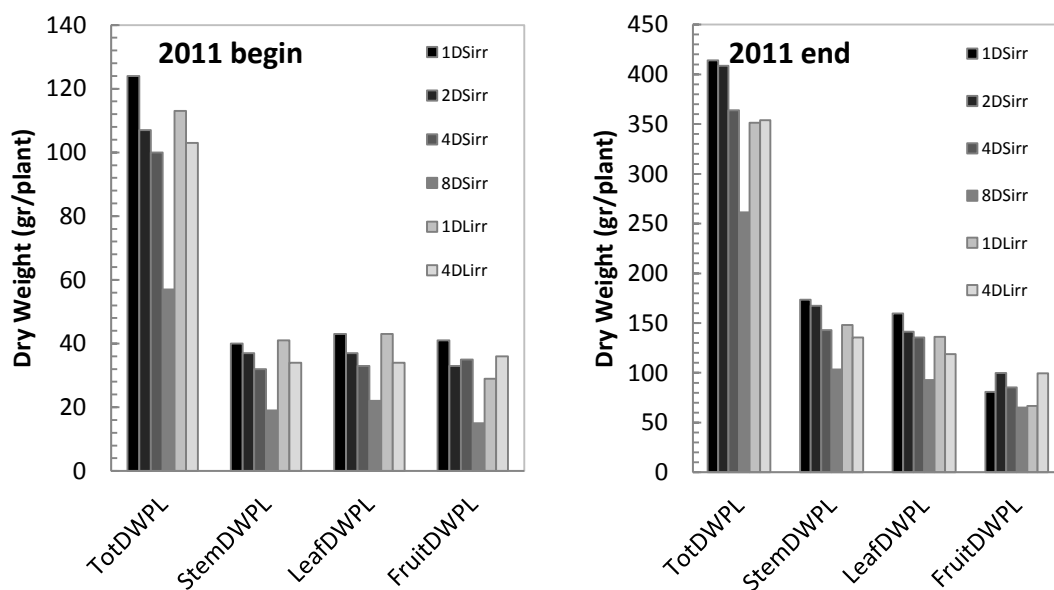
תרשים 6.1.10- הצגת הנתונים לפי מנת מים לשטח. השפעת מנת המים באחוזים על מספר (שחור) ומשקל (אפור) הפירות בשנים 2011 (מלא) ו-2012 (שבור)

תרשים 6.1.11- הצגת הנתונים לפי מנת מים לצמח. השפעת מנת המים באחוזים על מספר (שחור) ומשקל (אפור) הפירות בשנים 2011 (מלא) ו-2012 (שבור)

ליחידת שטח. ב-2011 ההבדלים בין הטיפולים מובהקים. מגמה זוהי נמצא גם ב-2012 במספר הפירות הכללי המצטבר ליחידת שטח. כאשר בודקים את משקל היבול הכללי המצטבר ליחידת שטח ניתן לראות שטיפול הסטנדרט הביא ליבול הגבוה באופן מובהק משלושת הטיפולים האחרים, שלא נבדלים סטטיסטית, כאשר טיפול 333% בעל היבול הכללי הגבוה ואחריו יש ירידה ביבול עם הירידה במנת המים, אך לא באופן מובהק. לעומת זאת, כאשר מציגים את הנתונים לפי מנת מים לצמח (תרשים 6.1.11) נמצא שההבדלים מובהקים בין כל הטיפולים. ב-2011 היבול הנמוך ביותר לצמח הושג בהצבה 100\*30 ס"מ, ועלה עם שינוי ההצבה למטר, ועם העלאת כמות המים. ב-2012 התוצאות לא מובהקות סטטיסטית עבור 333% בהשוואה ל-150%. אותה מגמה נראתה בחישוב משקל הפירות לדונם לפי מנת מים לצמח או לשטח. נגיעות בשחור פיטם (תרשים 6.1.9) הייתה נמוכה בשנתיים של הניסוי אך אחוז הפרי המעוות היה מאוד גבוה, אחוז הפרי המעוות גדל עם הקטנת כמות המים לשטח לכן הטיפול 0.3\*1 מ' ו-333% היו בנגיעות הנמוכה ביותר. בין השנים 2011 ו-2012 נמצא הבדל עצום בכמות היבול בכל הטיפולים הנבדקים.

### 6.1.3 פירווי צמחים לאורך העונה

בשני הניסויים במהלך השנים 2011 ו-2012 בשני הניסויים בוצעו 2 פירוויים בתחילת ובסוף עונת הגידול. מספר החזרות בפירוויים היה קטן, ולכן השונות גדולה וההבדלים פחות מובהקים מאשר נתוני היבול (נספח 8).

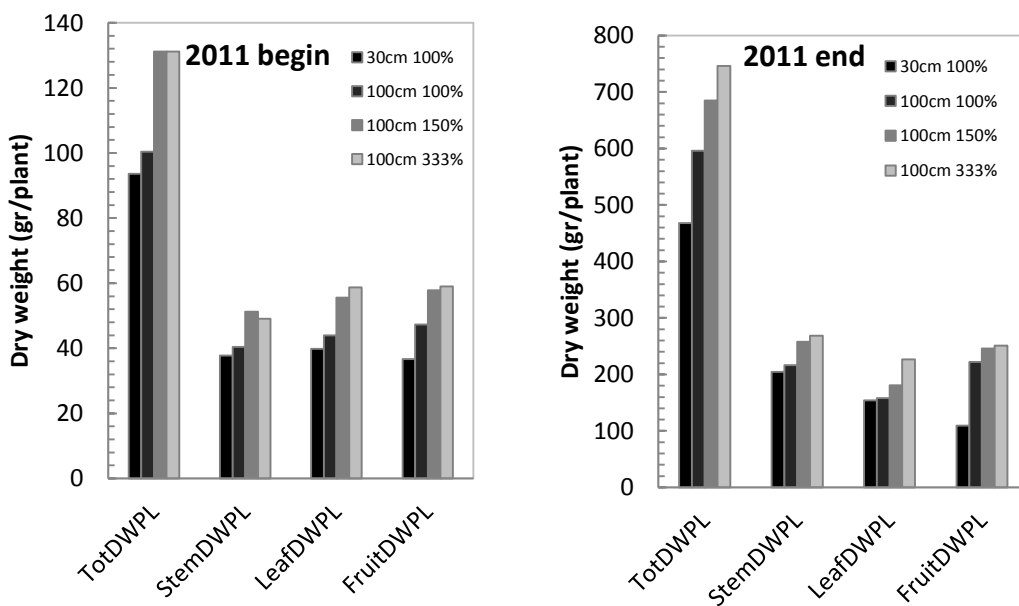


תרשים 6.1.12- המשקל היבש של הצמחים המפורקים (TotDWPL) בניסוי 1 ב-2011, והחלוקה לאיברים: גבעול (StemDWPL), עלים (LeafDWPL) ופירות (FruitDWPL) בתחילת העונה (שמאל) ובסוף העונה (ימין)

ניסוי 1- מפירווי הצמחים וייבושם בתחילת הניסוי (תרשים 6.1.12 שמאל) ובסוף הניסוי (תרשים 6.1.12 ימין) מבחינים במגמה של ירידה במשקל היבש בכל המדדים הנבדקים עם הירידה בתכיפות השקיה. בשנת 2011 מבחינת משקל הצמח הכללי היבש אין הבדלים מובהקים סטטיסטית בין הטיפולים השונים מלבד השקיה פעם בשמונה ימים, שהביא למשקל היבש הנמוך ביותר. אותה מגמה נצפתה במשקל הפירות. מבחינת המשקל היבש של הגבעולים והעלים ההבדלים בין כל הטיפולים מובהקות סטטיסטית מלבד השקיה יומית קצרה והשקיה יומית



מתמשכת שאין ביניהם הבדלים משמעותיים. בפירוק בסוף הניסוי ניתן להבחין באותה מגמה, מלבד משקל הפירות שלא היה שונה סטטיסטית ולא ניתן לראות השפעה של הטיפולים על משקל הפירות. משקל הצמח הכללי ומשקל הגבעול בעל אותה מגמה, כאשר השקיה קצרה כל יום וכל יומיים לא שונה סטטיסטית אך שונה מכל השאר. לא נצפו הבדלים בין השקיה קצרה כל ארבעה ימים להשקיות המתמשכות. כל הטיפולים היו שונים באופן מובהק מהשקיה כל שמונה ימים, בה התקבל המשקל הכי נמוך. אם נשווה את התוצאות בין תחילת הניסוי לסוף הניסוי נראה שככל שהפרש במשקל היבש קטן יותר אז ניתן להסיק שהקפיצה בגידול ובייצור הביומסה הייתה קטנה יותר. טיפול 1 מהווה סטנדרט (השקיה יומית קצרה), והבחינה של אופי הקפיצות נעשה לעומתו. לכן, ניתן לראות שהשקיה כל שמונה ימים הושפעה מאוד מהטיפול, מכיוון שהשינוי במשקל היבש היה הקטן ביותר מבחינת כל המדדים. כלומר ירידה בתכיפות ההשקיה השפיעה על המשקל של הצמח. מפירוק הצמחים וייבושם בתחילת הניסוי ב-2012 לא ניתן להבחין במגמה ברורה. באופן כללי כאשר בטיפול תכיפות ההשקיה הקצרה ירדה לפעם בשבוע ירד המשקל הכללי היבש. המשקל היבש של ההשקיה המתחלפת בהשוואה להשקיה פעם בארבעה ימים דומה.



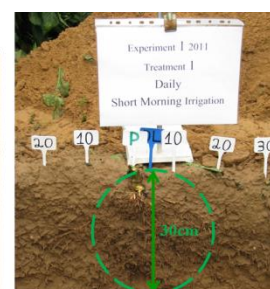
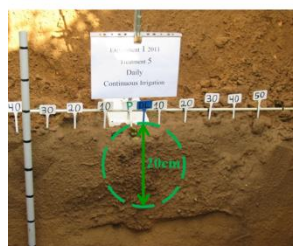
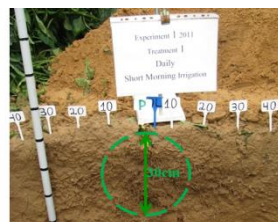
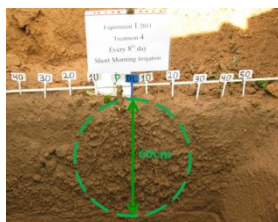
תרשים 6.1.13- המשקל היבש של הצמחים המפורקים (TotDWPL) בניסוי 2 ב-2011, והחלוקה לאיברים: גבעול (StemDWPL), עלים (LeafDWPL) ופירות (FruitDWPL) בתחילת העונה (שמאל) ובסוף העונה (ימין)

ניסוי 2- מגמה זהה התקבלה בשתי עונות הגידול (עונה 2011, תרשים 6.1.13). עם ההעלאה של מנת ההשקיה, המשקל היבש היה גדול יותר. בהשוואה לסטנדרט (השקיה יומית קצרה 30\*100 ס"מ) המשקל בכל הטיפולים האחרים היה גבוה יותר באופן מובהק. בתחילת העונה (2011) יש הבדל מובהק סטטיסטית בין המשקל היבש של כל הפרמטרים בין השקיה יומית קצרה (סטנדרט) והשקיה של 100% לבין השקיה 150% ו-333%. יש ירידה במשקל עם הירידה בכמות המים הכללית. בפירוק בסוף העונה יש הבדלים בין הטיפולים אך ב-2011

עדין נשמר הדמיון במשקל היבש הכללי בין טיפול 150% ו- 333% לעומת הפער שניפתח בין השקית סטנדרט ל- 100%.

#### 6.1.4 מערכת שורשים

ניסוי 1- בתרשים 6.1.14 מוצגת דוגמא למערכת שורשים שנחשפה בחפירה בעונת 2011 של טיפול השקיה יומית קצרה והשקיה אחת לשמונה ימים; בהשקיה אחת לשמונה ימים נתקבלה מערכת שורשים בקוטר כפול מזה של השקיה יומית (60, 30 ס"מ בהתאמה). בתרשים 6.1.15 ישנה השוואת של מערכת השורשים של טיפול השקיה יומית קצרה והשקיה יומית מתמשכת בעונת 2011, התקבל שמערכת השורשים של הטיפול המתמשך קטנה יותר מזו של ההשקיה הקצרה (20 ס"מ לעומת 30 ס"מ).

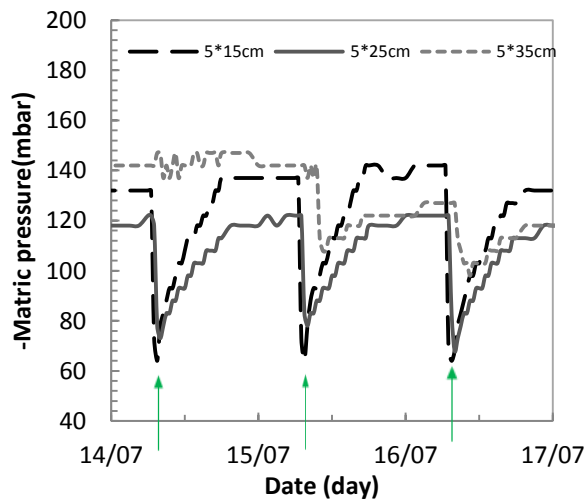


תרשים 6.1.14 מערכת השורשים שהתפתחה בסוף עונת הגידול 2011 בניסוי 1. ימין השקיה יומית קצרה ושמאל השקיה קצרה כל שמונה ימים

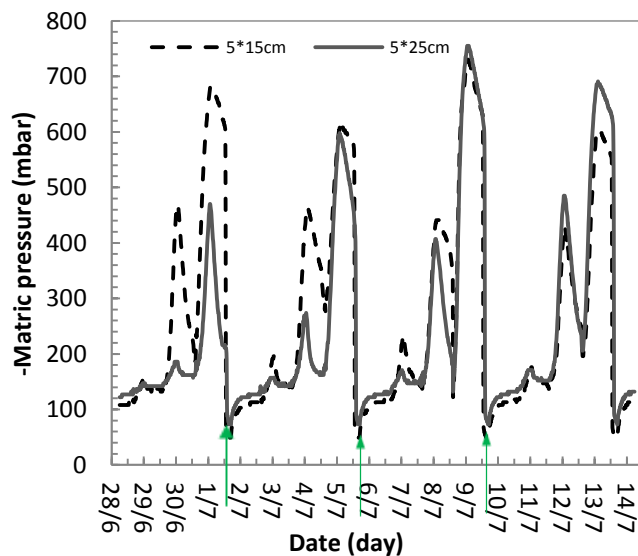
תרשים 6.1.15- מערכת השורשים שהתפתחה בסוף עונת הגידול 2011 בניסוי 1. ימין השקיה יומית קצרה ושמאל השקיה יומית מתמשכת

## 6.2 רטיבות ומליחות: טנסיומטרים, חיישני TDR

### 6.2.1 טנסיומטרים



תרשים 6.2.1- מהלכים יומיים של פוטנציאל המים בקרקע בשלושה עומקים: 15 ס"מ (קו שחור מקוקו), 25 ס"מ (קו אפור מלא) ו 35 ס"מ (קו אפור מקוקו), ואירועי ההשקיה (חצים ירוקים) של טיפול 1Dirr בחודש יולי ב 2012 (תאריך 13-16.7.2012)



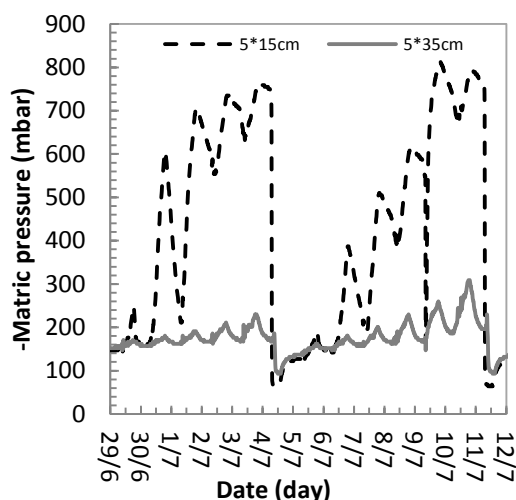
תרשים 6.2.2- מהלכים יומיים של פוטנציאל המים בקרקע בשני עומקים: 15 ס"מ (קו שחור מקוקו), 25 ס"מ (קו אפור מלא) ו 35 ס"מ, ואירועי ההשקיה (חצים ירוקים) בטיפול 4Dirr בחודש יוני-יולי ב 2012 (תאריך 28.6.12-14.7.12)

ניסוי 1- במהלך המדידות לאורך העונות ניתן להבחין בברור בשינויים החלים בפוטנציאל המים בעת מתן מנת המים או בעת התייבשות הקרקע. ניתן לעקוב אחר התקדמות חזית ההרטבה בקרקע. בתרשים 6.2.1 השקיה יומית מוצגים 3 עומקים בהם היו טמונים הטנסיומטרים, שכבת הקרקע הרדודה (15 ס"מ) מתחילה להגיב ראשונה ולאחריה שכבת הביניים (25 ס"מ) ובסוף השכבה הקרקע העמוקה, שכבת העומק (35 ס"מ). לאחר השקיה מתחיל תהליך של ייבוש הקרקע הנובע מקליטת מים על-ידי השורשים, התאדות מפני הקרקע וחלחול לעומק. עם ההעמקה משרעת

השינויים בפוטנציאל המים ורטיבות הקרקע קטנים; השכבה העליונה מאופיינת במשרעת הגדולה ביותר ואילו שכבת העומק מאופיינת במשרעת הערכים הקטנה ביותר. ישנה תלות בין מנת המים לתכיפות ההשקיה שמשפיע על פוטנציאל המים בקרקע, ומתקיימת התאמה בין היבול המתקבל לפוטנציאל המים בקרקע. ככל שתכיפות ההשקיה הייתה קטנה יותר, הקרקע הגיע לפוטנציאלים שליליים יותר, כלומר לתכולת רטיבות נמוכה יותר.

בתרשים 6.2.2 מוצג טיפול השקיה כל ארבעה ימים. בתאריך ה- 6 ליולי החל היפוך התייבשות של הטנסיומטרים בעומקים 15, 25 ס"מ. לפני תאריך זה עומק 15 ס"מ היה יבש

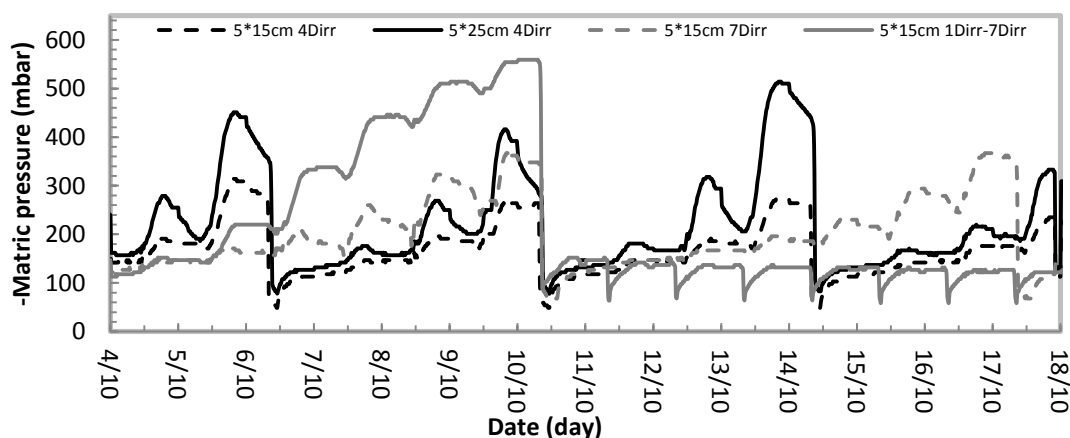
יותר מעומק 25 ס"מ ולאחר תאריך זה הטנסיומטר בעומק 25 יבש יותר מעומק 15 ס"מ. בתרשים 6.2.3 מוצג



תרשים 6.2.3- מהלכים יומיים של פוטנציאל המים בקרקע בשני עומקים: 15 ס"מ (קו שחור מקוקו), 35 ס"מ (קו אפור מלא), ואירועי ההשקיה (חצים ירוקים) בטיפול 7Dirr בחודש יוני-יולי ב 2012 (תאריך 29.6.12-12.7.12)

טיפול השקיה שבועית. בתאריך 4 ליולי עומק 35 ס"מ החל מתנהג לפי מחזורי ייבוש והרטבה של הקרקע, ועם הזמן יש עליות בתנודות הפרופיל. בהשוואה השקיה יומית להשקיה שבועית (תרשים 6.2.3 לעומת תרשים 6.2.1) ניתן לראות את השפעת תכיפות ההשקיה על קצב צימוח שורשים וקליטת מים בעומקים השונים. כאשר תכיפות ההשקיה הייתה נמוכה השורשים התפתחו לעומק מהר יותר ולכן הורגשה התייבשות בטנסיומטרים בשלב מוקדם יותר. הטיפול המתחלף ב- 2012, הושקה לסירוגין יומית

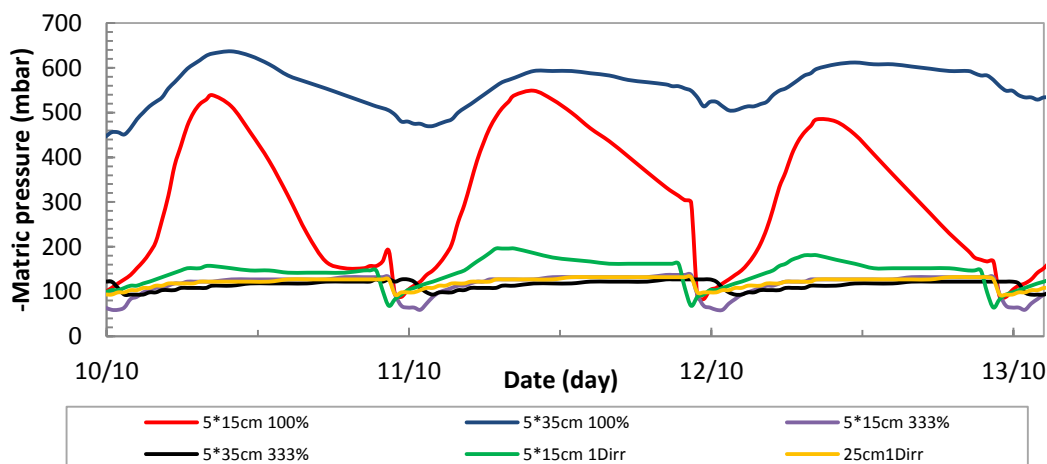
ושבועית במטרה להגיע לגובה צמחים זהה לטיפול השקיה כל ארבעה ימים. מבחינת מדדי יבול, משקל היבול הכללי היה זהה אך פרקציית הפירות המעוותים בהשקיה



תרשים 6.2.4- מהלכים יומיים של טיפול 1Dirr-7Dirr, 7Dirr, 4Dirr בחודש אוקטובר ב 2012 (תאריך 4.10.12-18.10.12) של פוטנציאל המים בקרקע בעומקים שונים לפי טיפול: 4Dirr (שחור) 15 ס"מ (קו מקוקו), 25 ס"מ (קו מלא), 7Dirr (אפור) 15 ס"מ (קו מקוקו) ו 1Dirr-7Dirr (אפור) 15 ס"מ (קו מלא)

המתחלפת היה גבוה יותר. כאשר נשווה את קריאות הטנסיומטרים של הטיפולים האלו בעומק 15 ס"מ נראה שהטיפול המתחלף בתקופה של השקיה שבועית (בין ה- 4 ל- 10 ביולי) הגיע לעומדים הנמוכים ביותר, הכי הרבה ייבוש (תרשים 6.2.4). הטיפול השבועי הגיע לעומדים גבוהים מהשקיה כל ארבעה ימים. בנוסף ניתן לראות שעומק 25 ס"מ בטיפול השקיה כל ארבעה ימים התייבש יותר מעומק 15 ס"מ והוא הגיע לעומדים דומים לטיפול השבועי. ניתן להסיק שהטיפול של ארבעה ימים לוקח את המים בעיקר מעומק 25 ס"מ וטיפול ההשקיה המתחלף לוקח את המים בעיקר מפני הקרקע (15 ס"מ) ולא מהעומק. ככל הנראה התפתחה שם מערכת שורשים רחבה ועמוקה יותר מאשר לטיפול המתחלף.

ניסוי 2- בתרשים 6.2.5 מוצגות המדידות משנת 2012 של טיפול 100% ו- 333% בעומקים 15, 35 ס"מ ושל

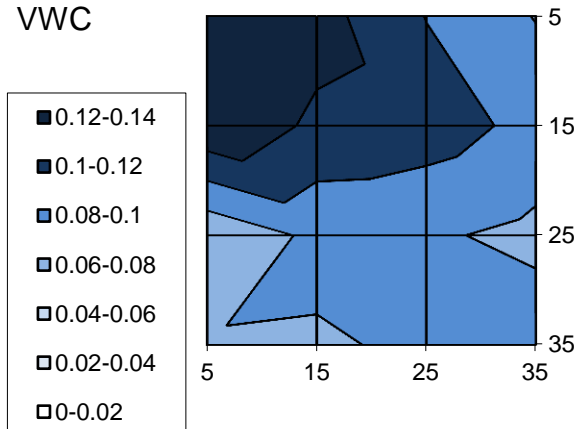


תרשים 6.2.5- מהלכים יומיים של טיפול 100% 333% בהצבה 120\*100 ושל טיפול הסטנדרט (1Dirr) בהצבה 120\*30 בחודש אוקטובר של פוטנציאל המים בקרקע בעומקים שונים לפי טיפול: 15 ס"מ (ירוק) 25 ס"מ (צהוב), 15 25100% 35 ס"מ (אדום) 35 ס"מ (כחול) 15 333% ס"מ (סגול) 35 ס"מ (שחור) 2012 (תאריך 10.10-13.10)

טיפול הביקורת (השקיה יומית בעומקים 15, 25 ס"מ). כאשר נשווה בין 100% ל- 333% נראה שכצפוי, טיפול 100% יבש יותר. בטיפול 100% השקיה ישנו הבדל בעומד המטריצי בין העומקים השונים. בעומק 15 ס"מ השינוי עקב תהליך ההרטבה והייבוש קיצוני מאוד לעומת עומק 35 ס"מ שנשאר גבוה ויחסית קבוע, כלומר הקרקע רוב הזמן יבשה. דבר זה נובע מכמות מים קטנה יותר עקב בריחה של מים לצדדים. לעומת זאת, עומד המטריצי בטיפול השקיה 333% בשני העומקים זהה, מה שנובע מכמות המים הגדולה הניתנת לקרקע. כאשר נשווה את שני הטיפולים הללו להשקיה יומית, נראה שישנו דמיון לטיפול 333%.

### 6.2.2 חיישי TDR

Trt1 BI 2  
VWC

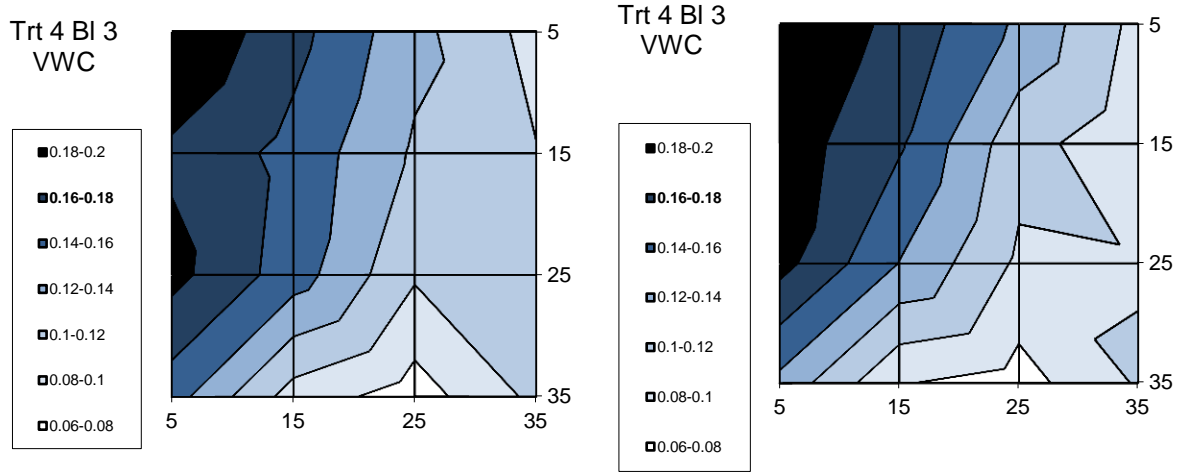


תרשים 6.2.6- מדידת TDR בשעות הבוקר לאחר ההשקיה של טיפול השקיה יומית 10 באוקטובר 2012. בשעה 9:50

ניסוי 1- בתרשימים הבאים מוצגים פירוט תכולת הרטיבות המחושבת מהמדידות ה-TDR לפי משוואה 5.5.1. תרשים 6.2.6 מציג מדידה שבוצעה בטיפול היומי בתאריך 10 באוקטובר 2012, בשעה 9:50 לאחר ההשקיה. במדידה רואים את פולס ההשקיה של יום המדידה והקרקע רטובה לאורך כל החתך הנמדד. בתרשים 6.2.7 מוצגות מדידות של פירוט תכולת הרטיבות בטיפול השקיה כל 8 ימים ב- 17/8/2011 בשעה 10:30 יום לאחר ההשקיה. בתרשים 6.2.8 מוצג פירוט תכולת הרטיבות בתקופה מאוחרת יותר של אותו טיפול משנת 2011, המדידות בוצעו מתאריך

7/9/2011 בשעה 9:40 בבוקר ארבעה ימים לאחר ההשקיה. ניתן לראות משני התרשימים האחרונים שהקרקע נשארת רטובה. רטיבות הקרקע יום לאחר ההשקיה וארבעה ימים לאחר ההשקיה כמעט זהה. ממאזנים בין שעות

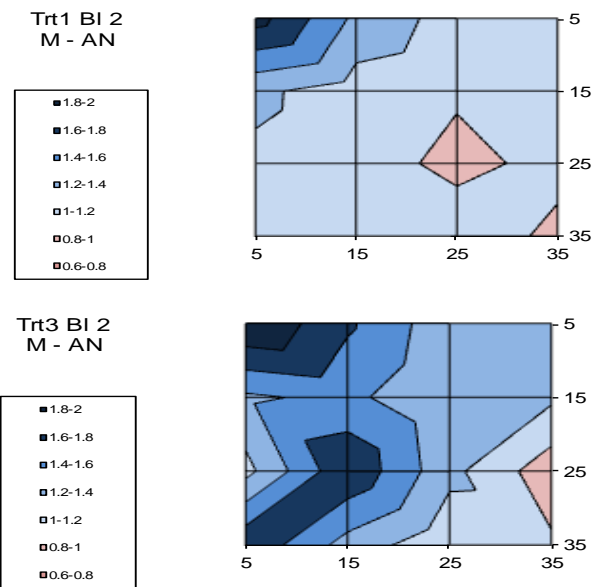
הבוקר, צהרים ואחר הצהרים לצורך הערכת איבודי מים הכוללים קליטה, חלחול והתאדות, נראה שישנם יותר איבודי מים בשעות הבוקר לעומת שעות אחר הצהרים ואיבודי המים בין השעה 8:00 ועד שעה 16:00 הוערכו בכ- 45% ממנת ההשקיה היומית.



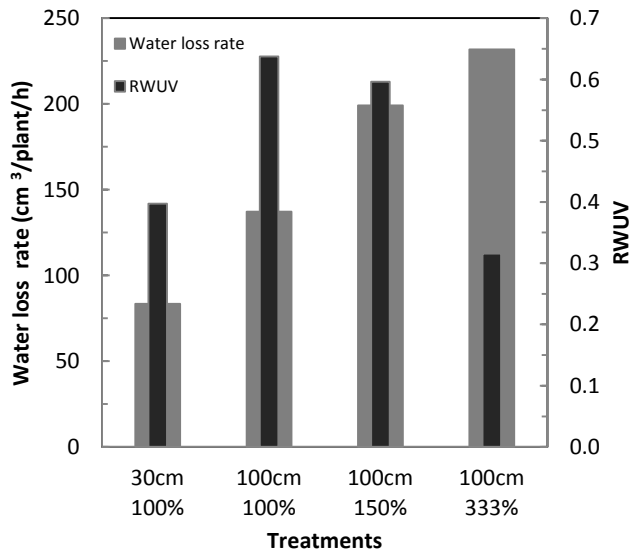
תרשים 6.2.7 - מדידת TDR בשעות הבוקר לאחר ההשקיה של טיפול השקיה כל 8 ימים, יום לאחר ההשקיה בתאריך 17.8.2011 בשעה 10:30

תרשים 6.2.8 - מדידת TDR בשעות הבוקר לאחר ההשקיה של טיפול השקיה כל 8 ימים, 4 יום לאחר ההשקיה בתאריך 7.9.2011 בשעה 9:40

בתרשים 6.2.9 מוצגים מקדמי ההתרכזות של המוליכות החשמלית (המוליכות החשמלית של תמיסת הקרקע אחה"צ מחולקת במוליכות החשמלית בבוקר) בטיפולים השקיה יומית וביום השלישי לאחר ההשקיה ובטיפול אחת לארבעה ימים. מתקבלת תמונה שמעידה על כך שאובדני המים (הכוללים קליטה, התאדות וחלחול החוצה מהנפח הנמדד) בהשקיה יומית גדולים יותר ומרוכזים קרוב לטפטפת לעומת הפירוסיים בהשקיה אחת לארבעה ימים. ישנה התרכזות מלחים גבוה יותר קרוב לטפטפת, כלומר יש יותר קליטת מים והתאדות.



תרשים 6.2.9 - מיפוי מרחבי של קליטת מים על-ידי יחסי המלחה מה - 24/8/2011 בטיפול השקיה יומית (עליון), והשקיה כל ארבעה ימים (תחתון)



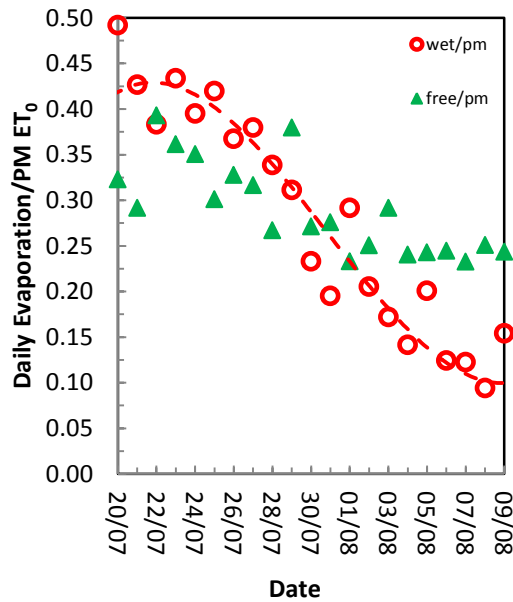
תרשים 6.2.10 - מאזן מים בין שעות הבוקר לאחר-הצהריים ממדידות TDR (ניסוי 2, 4 אוקטובר 2011 בניסוי 2).

ניסוי 2- בתרשים 6.2.10 מוצג מאזן מים בין שעות הבוקר לאחר-הצהריים ממדידות TDR (4) (אוקטובר 2011). הפרשי רטיבות בין הבוקר (M) לאחר-הצהריים (AN). על-פי מאזן זה איבוד המים בחתך הקרקע הנמדד (קליטה), הלחול לעומק והתאדות מפני הקרקע) בשעות המדידה (8:30 עד 15:30) היה בין 30% ל-60% ממנת ההשקיה היומית בשלוש הטיפולים. השקיה של 333% קלט הכי מעט (32%) והשקיה 100% ו 150% קלטו נפח מים דומה

ממנת ההשקיה (64% ו-60%). טיפול הסטנדרט קלט 40% ממנת ההשקיה.

### 6.2.3 מדידת התאדות מתוך שקילת דליים-

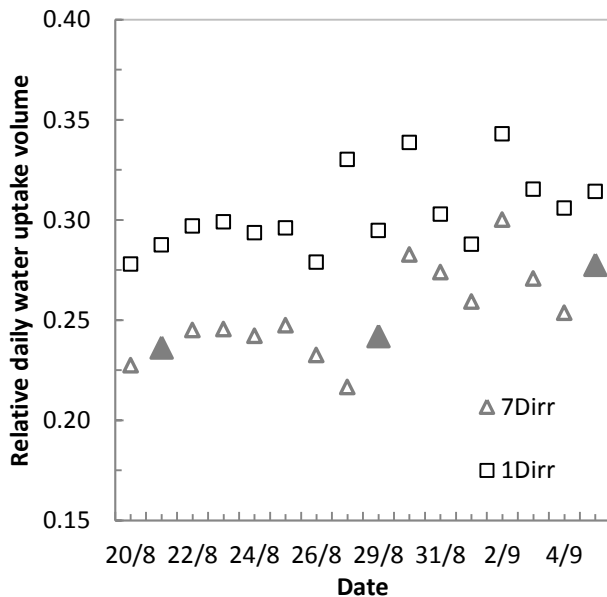
במהלך עונת 2012 חפרנו בורות במרכז בית הרשת בין שורת הגידול. לתוך הבורות הכנסנו דליים: שני דליים מלאים בקרקע מהבשור ודלי ביקורת מלא במים (free). את הדליים המלאים קרקע ארזנו באופנים שונים: את הראשון מלאנו קרקע ומים לסרוגין (wet) ואת השני מלאנו קרקע ולאחר מכן הוספנו את כמות מים זהה (dry) את הדליים "השקנו" בשני אירועים נפרדים כדי לראות את פרולפיל ההתיבשות של הדלי וממנו להניח התאדות. מדידה זו אמורה לתת מושג כללי למה שמתאדה מהקרקע בבשור כאשר היא רוויה (לאחר אירוע ההשקיה) וכאשר היא יבשה. המדידה אינה מדידה מדוייקת של ההתאדות בשדה, מכיוון שאין לחולל מים מהדלי, אין קליטת מים על-ידי צמח והרטיבות מאוד גבוהה בדלי. בתאריך ה- 20/7/2012 בוצע אירוע הרטבה המוצג בתרשים 6.2.11. אירוע ההרטבה יצר קרקע רוויה בדלי ואחריו התייבשות של הקרקע. ניתן לראות שאחוז המים שהתאדו מהדלי כאשר הקרקע היתה רוויה היה 40% מהכמות המדודה מ- PM ו-10% כאשר הקרקע יבשה. המדידות בוצעו בתקופת זהה לתקופה שבה מדדתי באמצעות חיישני הזרימה.



תרשים 6.2.11- מהלך התאדות היומית מתוך PM מהדליים החל מתאריך ההרטבה שלהם (20/7/2012)

### 6.3 קליטת מים- זרימת מים בגבעול: פולס חום

ניסוי 1- במהלך הניסוי נמדדה זרימה בגבעול בטיפול ההשקיה היומי ובטיפול השבועית/כל ארבעה



תרשים 6.3.1- נפח המים היחסי הנקלט (RWUV) שהיא היחס בין מדידות חיישני H.P. לכמות ההשקיה בעונת 2012. בטיפול השקיה יומי (שחור) והשבועי (אפור). ימי השקיה של הטיפול השבועי מסומנים במשולש מלא אפור

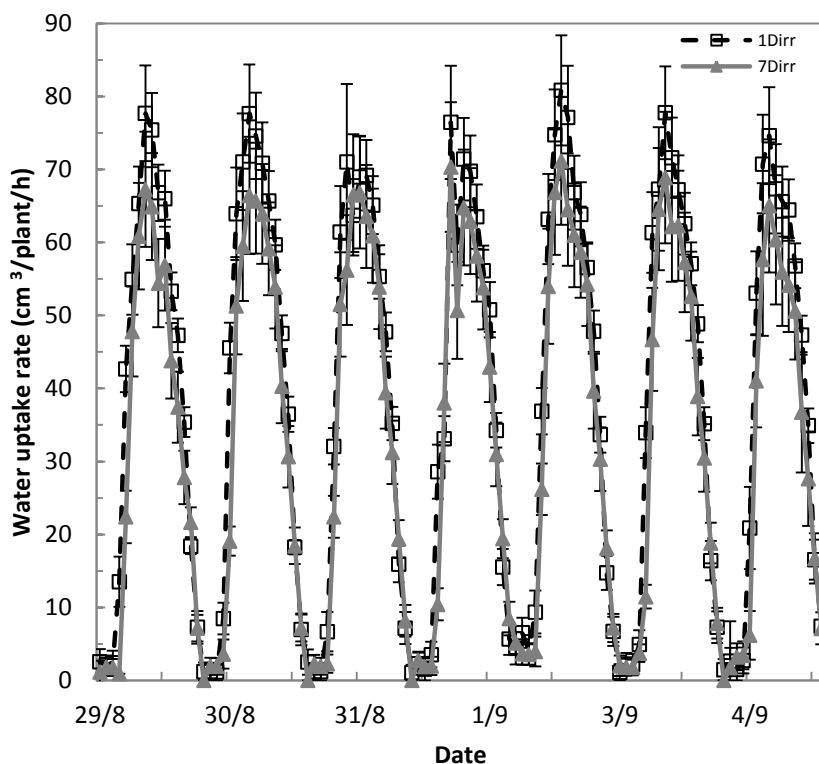
ימים במטרה להשוות בין הטיפולים. ברוב המהלכים היומיים שהתקבלו מגמת הקליטה דומה; הקליטה מתחילה בשעות הבוקר, מגיעה לשיא בשעות הצהריים ודועכת לקראת שעות אחר הצהריים. שיא קליטת המים, מהירות ואופן העלייה והדעיכה שונה מטיפול לטיפול. במהלך חודש אוגוסט עד תחילת ספטמבר נבחנו שלושה מחזורים (21 ימי מדידה) של השקיה יומית במקביל להשקיה שבועית. מנת ההשקיה היומית הייתה בתקופה זאת כ- 2 ליטר

לצמח ליום (5.5 מ"מ/יום), כ-92% מההתאדות הפוטנציאלית המוערכת מחוץ לבית הרשת. תרשים 6.3.1 מציג את סך

נפח קליטת המים היחסית הנמדדת ביחס להשקיה (RWUV), טיפול השקיה יומית קלט בין 27-33% במוצע כולות במחזור ההשקיה, ובטיפול השבועית קליטת המים עמדה על ערך של כ- 20-27% במוצע ממנת ההשקיה היומית. כלומר, הצמחים הגדולים יותר של טיפול ההשקיה יומית קלט יותר מאילו שבהשקיה

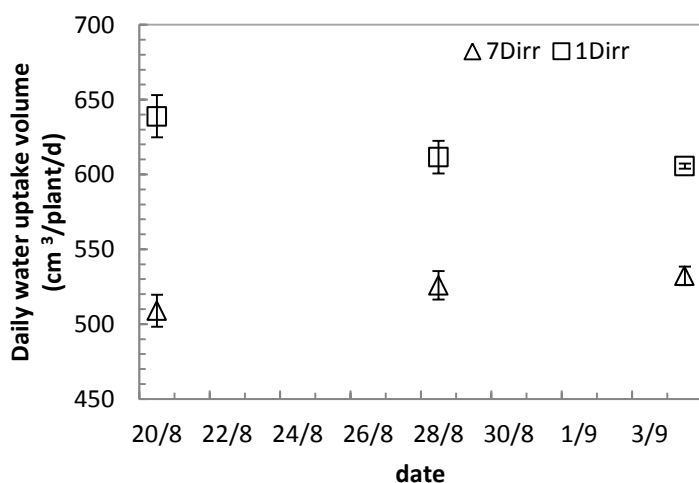


שבועית. בתרשים 6.3.2 מוצג מחזור ההשקיה השני שנמדד. מצפייה במהלכים היומיים נראה שטיפול השקיה שבועית קולט מים באופן כמעט זהה לאורך כל המחזור, ושהקליטה בטיפול ההשקיה השבועית עוקבת אחרי הקליטה בהשקיה היומית, בהתאם לתנאי האקלים כנראה, ולא תלויה ביום ההשקיה (תרשים 6.3.3 ותרשים



6.3.2). מסתמן שהדעיכה בשעות הצהריים מהירה יותר ביום ההשקיה והחל מהיום הרביעי, דבר המעיד על עקה של הצמח, תופעה זו נצפתה בכל המדידות. בנוסף, מהסתכלות על המהלכים היומיים של הטיפולים נראה שהמהלך היומי של טיפול השקיה יומית מעט יותר רחב וגבוה. שני הטיפולים בתחילת היום זהים בקליטת המים השעתית שלהם (עד

תרשים 6.3.2- מהלכים יומיים ממוצעים של קצב קליטת המים (מ- 6:00 עד 20:00) המדודה מחיישני H.P. (29.8-4.9.12) של שני טיפולים: 1Dirr (שחור מקוקו) ושל 7Dirr (אפור מלא) ושגיאת התקן שלהם, כאשר 29.8 הוא יום ההשקיה

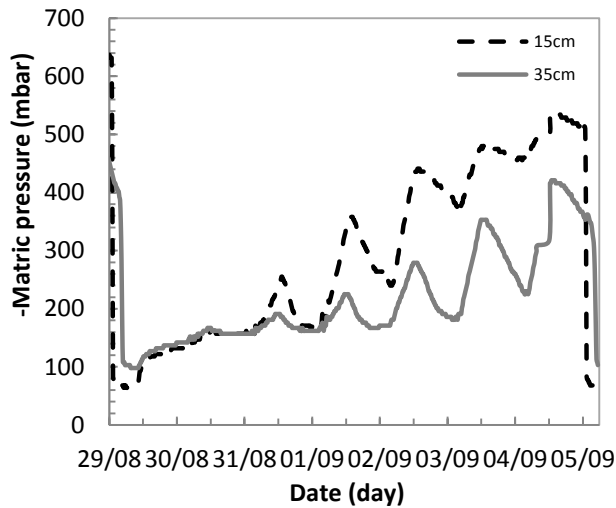


תרשים 6.3.3- ממוצע של קליטת מים יומית של ממוצע מחזור ההשקיה לטיפול 1Dirr (ריבוע) וטיפול 7Dirr (משולש). מוצגות שגיאות התקן של השונות בין הימים במחזור ההשקיה

השקיה יומית מגיע לערכי קליטת גבוהים יותר מהטיפול השבועי. דעיכת הטיפול השבועי מתחילה לפני דעיכת הטיפול היומי, דבר המצביע על עקה. משעה 16:00 אחר הצהריים בערך אין הבדל בנפח קליטת המים היחסי בין הטיפולים. תוצאות המדידות מפתיעות מכיוון שסך קליטת המים היומית לאורך מחזור ההשקיה השבועית כמעט ולא

השתנתה. נמצא שביום שאחר ההשקיה יש עליה בקליטת המים (ביחס ליום לפני), וירידה מונוטונית איטית וקטנה עד היום

הרביעי במחזור ההשקיה. ביום הרביעי יש מתחילה ירידה משמעותית יותר לאורך שאר המחזור (תרשים 6.3.1). הסבר לתופעה ניתן למצוא במדידות הטנסיומטרים באותה תקופה (תרשים 6.3.4). עומק 15 ס"מ

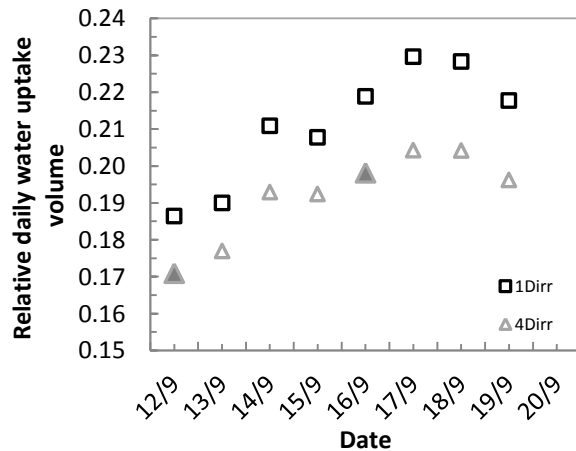


תרשים 6.3.4- מהלכים יומיים של פוטנציאל המים בקרקע בשני עומקים: 15 ס"מ (קו שחור מקוקו), 35 ס"מ (קו אפור מלא) של טיפול 7Dirr בחודש אוגוסט-ספטמבר ב 2012 (תאריך 5.9-29.8). ה 30.8 הינו יום ההשקיה של הטיפול

מתחיל להתייבש רק ביום השלישי, מה שמאפשר קליטת מים זהה בשלושת הימים הראשונים, לעומת זאת עומק ב- 35 ס"מ ההתייבשות מתחילה להיות משמעותית ביום הרביעי, מה שמאפשר לקליטה לא לרדת. נראה שבתחילת מחזור ההשקיה רוב הקליטה היא מעומק 15 ס"מ ומהיום הרביעי הקליטה היא משורשים עמוקים יותר (35 ס"מ ואילך). הצמח קולט מים משורשים יותר ויותר עמוקים ותהליך

זה הוכח בניסוי מעבדה ( Garrigues et al., 2006). סיבה נוספת לקליטה זהה לאורך מחזור ההשקיה היא המוליכות ההידראולית

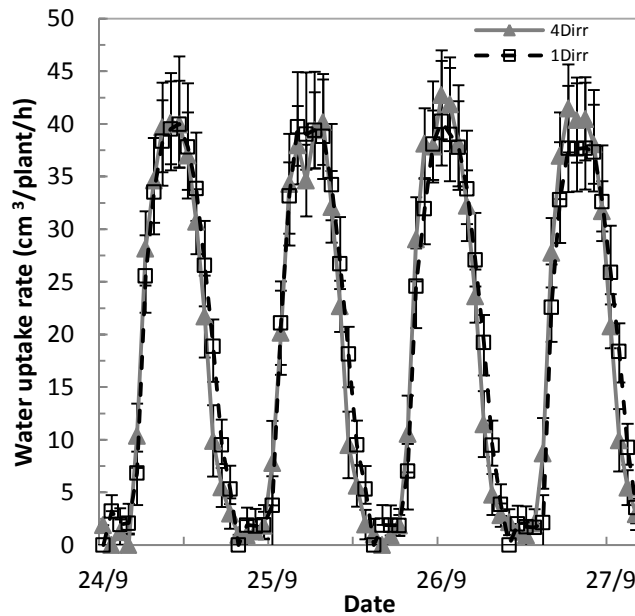
האפקטיבית הנמוכה של קרקע הבשור שגורמת להתקדמות איטית מאד של פולס ההשקיה. השוואה בין קליטת



תרשים 6.3.5- כמות המים היומית היחסית הנקלטת (RWUV) שהיא היחס בין מדידות חיישני H.P. לכמות ההשקיה בעונת 2012. בטיפול השקיה יומי (שחור) וארבעה ימים (אפור). ימי השקיה של הטיפול ארבעה ימים מסומנים במשולש מלא אפור

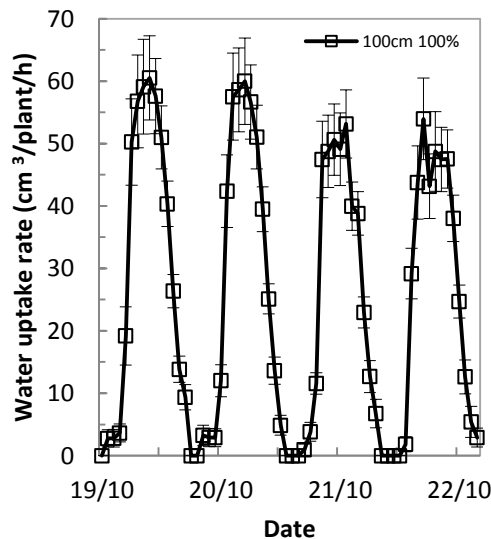
מים של טיפול היומי לטיפול השקיה כל ארבעה ימים- בתקופה זו של בטיפול היומי נמדדה קליטת מים יומית של 18-23% ממנת המים ובטיפול ההשקיה כל ארבעה ימים נמדדה קליטת מים יומית של 16-20% (תרשים 6.3.5). לא נצפתה דעיכה בקליטה במהלך המחזור וכמות המים שהצמח קלט לאורך ארבעת הימים הייתה כמעט זהה. צורת המהלכים היומיים של הטיפולים דומה מאוד; המהלך היומי של טיפול השקיה יומית מעט יותר גבוה והדעיכה שלו יותר איטית ולכן הוא מעט יותר רחב לעומת ההשקיה כל ארבעה ימים, תופעה הנצפת בשעות אחר הצהריים, 16:00 עד 18:00

(תרשים 6.3.6).



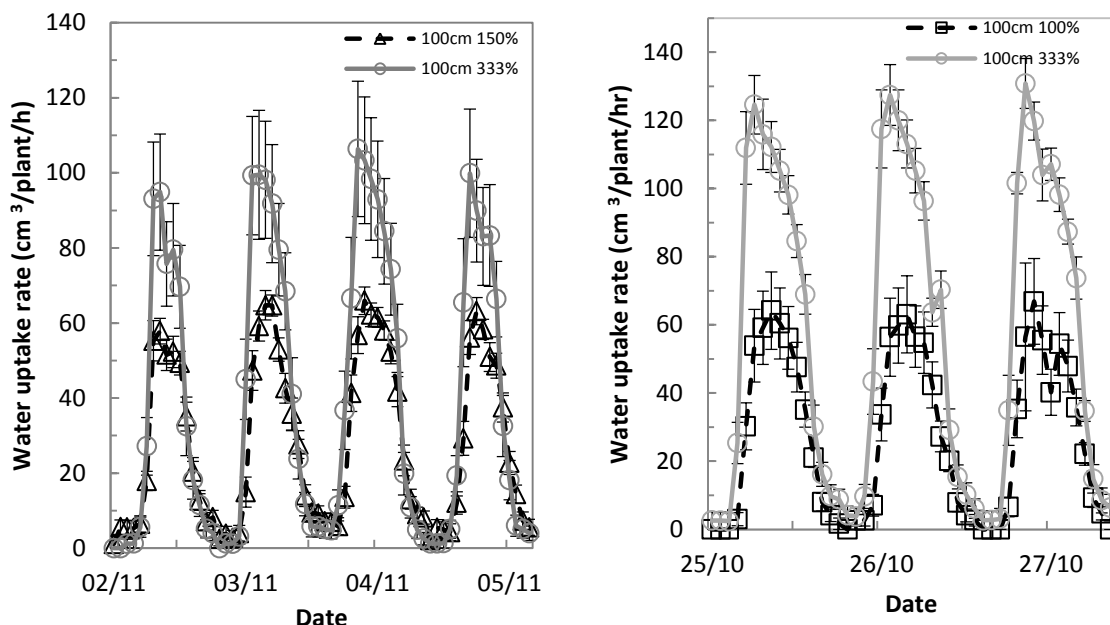
תרשים 6.3.6- מהלכים יומיים ממוצעים של קליטת המים (משעה 6:00 עד השעה 20:00) המדודה מחיישני ה H.P. (24.9-27.9.12) של שני טיפולים: 1Dirr (שחור מקוקו), 4Dirr (אפור מלא) ושגיאת התקן שלהם. יום ההשקיה 24.9

ניסוי 2- ב- 19 באוקטובר 2012 התקנו את מערכת החיישנים למדידת זרימה בגבעול על צמחים מטיפול 100%



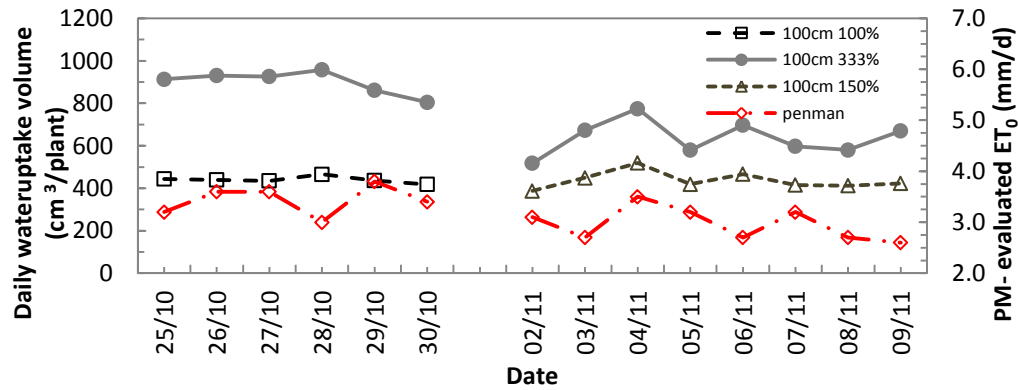
תרשים 6.3.7- מהלכים יומיים ממוצעים של קליטת המים (משעה 6:00 עד השעה 20:00) המדודה מחיישני ה- H.P. (19-22.10.12) של טיפול 100% השקיה בהצבה של 1\*1.2 מטר, ושגיאת התקן

השקיה בהצבה 100 ס"מ. הצמח קלט בממוצע 38% ממנת השקיה (תרשים 6.3.7), כאשר משווים בין צמחים המושקים ב- 100% וצמחים המושקים ב- 333% באותה הצבה (120\*100 ס"מ), סך המים הנעים בגבעול גבוה יותר בצמחים המושקים ביותר מים, אך אחוז המים הנלקטים ממנת ההשקיה נמוך יותר. צמחים המושקים ב- 333% קלטו בממוצע פי 2 מים מהצמחים המושקים ב- 100% (0.92 ליטר לעומת 0.44 ליטר), אך אחוז המים הנלקטים ממנת המים ב- 333% היה 24% וב- 100% היה 38% בתקופה זוהה. חשוב לציין שמנת המים לצמח שניתנה בטיפול 333% בהצבה כל 100 ס"מ זהה לכמות המים שניתנה בטיפול היומי בהצבה של 30



תרשים 6.3.8 - מהלכים יומיים ממוצעים של צריכת מים (משעה 6:00 עד השעה 20:00) המדודה מחיישני ה-H.P. (25-27.10) של שני טיפולים: 100% (שחור) ושל 333% (אפור) בהצבה של 1.2\*1 מטר, ושגיאת התקן בתאריך 25.10.12 - 27.10.12 (ימין) ושל שני הטיפולים 150% (שחור) ושל 333% (אפור) בהצבה של 1.2\*1 מטר, ושגיאת התקן בתאריך 2.11.12 - 5.11.12 (שמאל)

בטיפול 333% בהצבה כל 100 ס"מ זהה לכמות המים שניתנה בטיפול היומי בהצבה של 30 ס"מ, וגם אחוז קליטת המים ממנת השקיה גם כן נמוך ועומד על כ- 20% (לתקופה של ספטמבר 2012). בהמשך אותה תקופה העברנו את אחת ממערכות המדידה מטיפול 100% לטיפול 150% והשוויונו לטיפול 333%. נמצא שגם במקרה הזה 333% קלט יותר מים (0.66 ליטר שזה 15% ממנת ההשקיה) לעומת 150% (0.45 ליטר שזה 24%). ההשוואה בין הטיפולים הללו נערכה בסוף אוקטובר כשהצמחים היו גדולים יותר וההתאדות הפוטנציאלית נמוכה יותר. צמח גדול מהווה מבלע טוב יותר לקליטת מים היות וכמות העלווה שלו גדולה יותר והוא מקיים יותר פוטוסינתזה. תוצאות המדידה של החיישנים מעידות על מגמה דומה: טיפולים 100% ו-150% עם נפח קליטת מים דומה וטיפול 333% עם נפח קליטת מים גבוה יותר (בהתאמה לתוצאות היבולים).



תרשים 6.3.9- נפח המים היומי הנקלט (RWUV) בעונת 2012. בטיפול השקיה 100% (ריבוע שבור), 150% (משולש שבור) ו 333% (עיגול מלא) בהצבה של 1\*1.2 מטר, כאשר בציר ה y הימני מוצגת סקלת ההתאדות הפוטנציאלית לפי PM (אדום)

## 6.4 הדמיות בעזרת DIDAS

### 6.4.1 זרימה וקליטת מים עתית

לאחר קביעת הגיאומטריה של מערכת ההשקיה יש לקבוע את תזמון ההשקיה המיטבי. לצורך הרחבת המודל זרימה וקליטת מים תמידית למודל שיכלול השקיה וקליטת מים משתנות בזמן יש להניח את 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, סופרפוזיציה בזמן של מחזורי ההשקיה, חידור ממקור נקודתי או קווי לתוך נפח קרקע חסום אופקית על-פי משטחי הסימטריה שנקבעים על-ידי הגיאומטריה של מערכת ההשקיה. בעזרת מודל זה ניתן לדמות תרחישים שונים של הרטבה ממקורות נקודתיים (טפטפות) וקווים, עיליים וטמונים ולחשב מהלכים יומיים של קצב קליטת המים ונפחי קליטת המים היומיים בתרחישים שונים של מחזורי השקיה במשכים ותכיפיות שונים. הפרמטרים שקובעים את מהלכי קליטת המים היחסיים על-פי DIDAS הם:

$$k_{\text{eff}}, \alpha, r_0, d_0, m, \beta$$

לפני ההשוואה בין תוצאות מדידת קליטת המים בשדה לבין החישובים בעזרת DIDAS אציג מספר פרמטרים ואת השפעת השינויים שלהם על בשלוש סוגי קרקעות עיקריות כמתואר בטבלה 6.4.1.

טבלה 6.4 תכונות "שלושת הקרקעות" מהקטלוג של DIDAS-

קרקע	מספר	מרקם	$K_S$ (cm/h)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$K_{\text{eff}}$ (cm/h)
Coarse sand	1	חול גס	100	0.403	285
Loamy sand	2	חול סייני	10	0.128	25
Loam	3	סיין	1	0.04	2.22

טבלה 6.4.2- ברירת המחל של הפרמטרים השונים בהם השתמשנו בהרצות השונות בפק, בשני סוגי קרקעות: loam, loamy sand

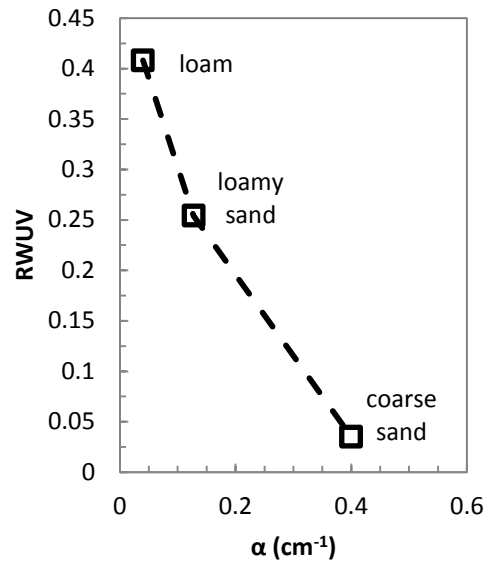
פרמטר	Loam	Loamy sand
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0.04035	0.1276
$K_{\text{eff}}$ (cm/h)	2.22	25

0.4	0.45	Θ
0	0	B
0	0	M
0	0	ζ - Mid Day Value
0.2	0.2	ζ -Max Day Value
3	3	Shape Factor
0	0	Root Zone Depth (cm)
15	15	Root Zone Radius (cm)
30	30	Emitter Spacing (Yso) (cm)
120	120	Dripline Spacing (Xso) (cm)
1.67	1.67	Emitter Flux(liter/hour)
6:00-18:00	6:00-18:00	Starting From xx:00/xx:00
1	1	Pulse Duration (hour)
1	1	pulses per day

טבלה 6.4.3 - מספר התרשים, סוג הקרקע הנבחנת והפרמטר שבחנות/שינתי

מה השתנה?	סוג קרקע	תרשים
קרקע: 1,2,3	1,2,3	6.4.1
$K_{eff}$ , משך ההשקיה (1h/5h)	1	6.4.2
$K_{eff}$ , ותכיפות (4Dirr, 7Dirr)	1	6.4.3
משך השקיה (1h,5h), m	1,2	4.6.4
$\beta$	1	6.4.5
הצבה $d_0$ , (120*120/100*30)	1,2	6.4.6
$d_0$ , $K_{eff}$ (2.22,1,0.1), (0,5,15)	1	6.4.7
מרחק בין הצבה	1	6.4.8
משך השקיה (1h,5h), זמן תחילת ההשקיה	1,2	6.4.9
זמן תחילת ההשקיה	1,2	6.4.10

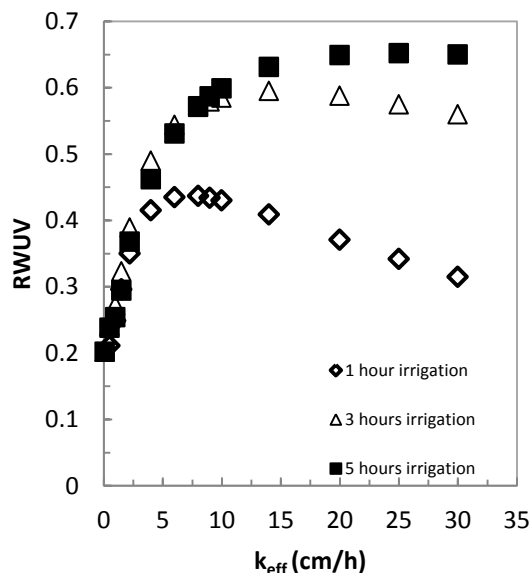
$\alpha$ - תכונת קרקע המשתנה בהתאם למרקם הקרקע. בזרימה תמידית ככל ש-  $\alpha$  גדול יותר (קרקע חולית) נפח קליטת המים היחסי יורד. בקרקעות סייך, הגדלת  $\alpha$  גורמת לבריחת מים לצדדים ולירידה בנפח קליטת המים היחסי. כאשר הכוח הגרביטציוני גדול מהקפילרי (קרקע חולית) מים בורחים לעומק הקרקע ולכן הצמח "מפספס" אותם ויש ירידה בנפח המים היחסי הנקלט על-ידי הצמח. כאשר הכוח הקפילרי (קרקע סייך) חזק המים בורחים לעומק הקרקע והצמח מפעיל יניקה חזקה יותר ותהיה עליה בנפח המים היחסי הנקלט (תרשים 6.4.1). יש לציין ולהדגיש שהמגמה שהתקבלה בגרף אינה כללית, ובתזמון אופטימלי קליטת המים היחסית גבוה יותר בקרקע חול גס או חול סייני לעומת קרקע סייך.



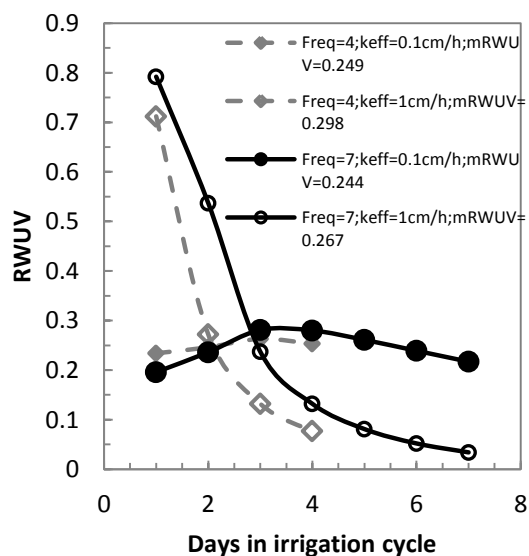
תרשים 6.4.1- השפעת השינוי ב-  $\alpha$  על RWUV כאשר  $k_{eff}$  משתנה לפי סוג הקרקע (loam, loamy sand, coarse sand): 2.22, 25, 285 בהתאמה

$k_{eff}$ - מתאר את השינוי במוליכות ההידראולית עם השינוי בתכולת הרטיבות. משתנה כתלות בתכולת הרטיבות בקרקע. עליה בערכו של  $k_{eff}$  גורם להעלאה של קליטת המים היחסית. נבחן את נפח קליטת המים היחסי בהצבת ערכי  $k_{eff}$  (בטווח של  $k_{eff} = 0 \rightarrow 30$  cm/hr) על קרקע כמו סייך בהשקיה קצרה של השקיה שעה אחת והשקיה מתמשכת של שלוש שעות וחמש שעות.  $\alpha$  נשאר קבוע ולא משתנה ( $\alpha=0.04$ cm<sup>-1</sup>). בהשקיה קצרה נמצא שיש מקסימום מקומי לנפח קליטת המים היחסי ( $k_{eff} = 6$ cm/h), וכאשר  $k_{eff} < 6$  cm/hr קליטת המים היחסית יורדת כי המים מגיעים למערכת השורשים מאוחר מידי. כאשר  $k_{eff} < 6$  cm/hr המים מגיעים מוקדם מידי וקליטת המים היחסית יורדת. בהשקיה מתמשכת הגדלת  $k_{eff}$  גרם לעליה בקצב קליטת המים היחסי. עד  $k_{eff}=2.22$ cm/h אין הבדל משמעותי בקליטת המים היחסית בין השקיה קצרה ומתמשכת (תרשים 6.4.2). התופעה נוספת שנבחנה (תרשים 6.4.3) היא הקשר בין  $k_{eff}$  לתכיפות ההשקיה. מוצגות שתי תכיפויות השקיה שונות (4,7 ימים) שלהן בחנו שני ערכי  $k_{eff}$  (1,0.1cm/h). בשני המקרים התקבלה אותה מגמה: כאשר  $k_{eff} = 1$  cm/h חלה ירידה חדה מהיום הראשון עד האחרון בשני תכיפויות ההשקיה (4,7). וכאשר הקטנו את  $k_{eff}$  ל- 0.1cm/h קיבלנו קליטה כמעט אחידה לאורך כל מחזור ההשקיה. בנוסף ניתן להבחין שנפח קליטת המים היחסי זהה בשתי תכיפויות ההשקיה עם אותו  $k_{eff} = 0.1$ cm/h. קצב תנועת פולס המים בקרקע

מוכתב על-ידי המכפלה של ה- $\alpha$  ב- $k_{eff}$ . ככל שהערך קטן יותר פולס המים יישאר יותר זמן בקרקע והמים יהיו יותר זמינים לצמח. בקרקע חול סייני ה- $\alpha$  גדול וגם ה- $k_{eff}$  לכן המכפלה המתקבלת גדולה, כלומר הפולס נע מהר. בתרחישים אחרים של תזמון השקיה בקרקע חול סייני תהיינה השפעות הפוכות שנובעות מההתאמה בין זמני ההשקיה לזמני צריכת המים המקסימאלית של הצמח.



תרשים 6.4.2- נפח קליטת מים היחסי (RWUV) כתלות ב- $k_{eff}$  (ערכים הנעים בין 0-30 ס"מ/שעה) בקרקע סייני בהשקיה קצרה של שעה אחת מ- 6:00 עד 7:00 בבוקר (מעוין) ומתמשכת של 3 שעות (משולש) מ- 6:00 עד 9:00, 5 שעות (ריבוע) מ- 6:00 עד 11:00 בבוקר.  $\alpha = 0.04 \text{ cm}^{-1}$ . קבוע ולא משתנה וערכו  $0.04 \text{ cm}^{-1}$ .

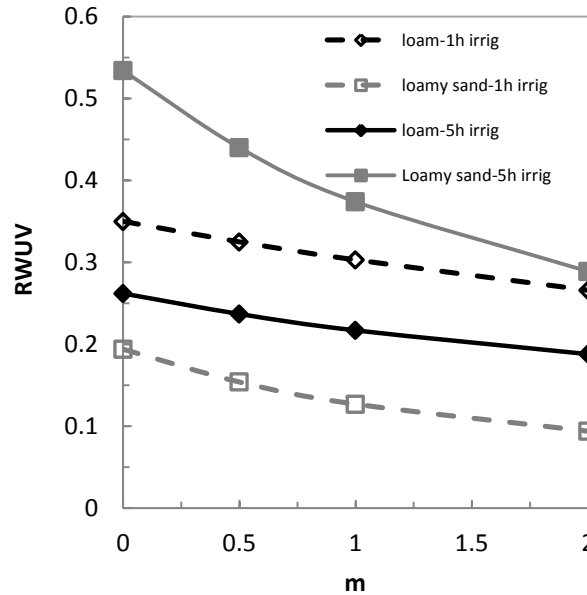


תרשים 6.4.3- השפעת תכיפות ההשקיה על RWUV בקרקע סייני וללא שינוי ב- $\alpha = 0.04 \text{ cm}^{-1}$ , כתלות בשני ערכי  $k_{eff}$ . השקיה על ארביע ימים (אפור) והשקיה פעם בשבוע (שחור). כאשר  $k_{eff}=1 \text{ cm/h}$  (ריק),  $k_{eff}=0.1 \text{ cm/h}$  (מלא)

$m$ - מייצג את האיידוי הפוטנציאלי לאטמוספירה ובהמשך ההצגה נזניה את ההתאדות ( $m = 0$ ). הגדלת  $m$  מגדילה את האיידוי מפני הקרקע, ולכן נפח קליטת המים היחסי קטן. בקרקע חול סייני (loamy sand) בעלת  $\alpha = 0.128 \text{ cm}^{-1}$ ;  $k_{eff} = 25 \text{ cm/h}$ , השפעת האיידוי על קליטת המים היחסית משמעותית יותר. הארכת משך

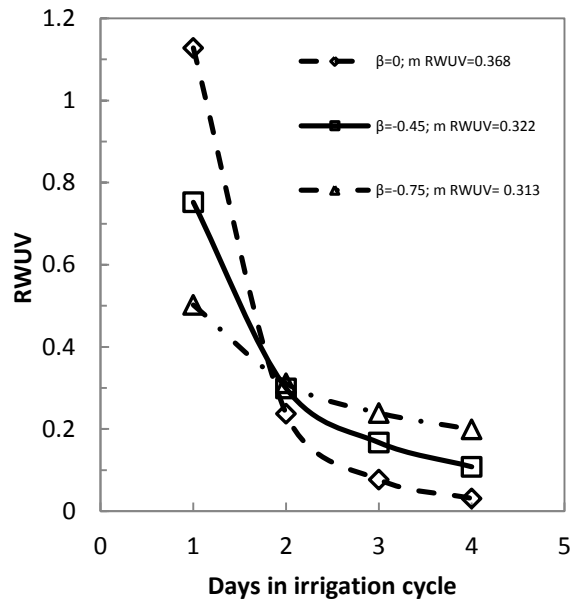


ההשקיה משעה לחמש שעות גרמה לעליה משמעותית בנפח קליטת המים היחסי. ולקרקע סייין (loam)  $\alpha=0.04$  , הארכת משך ההשקיה גרמה לירידה קלה בנפח קליטת המים היחסי. בקרקע בעלת אוגר מים גדול האפקט של הארכת משך ההשקיה פחות משמעותי לעומת קרקע בעלת אוגר מים קטן (חול סייני) שהארכת משך ההשקיה מדמה הגדלת אוגר המים בקרקע (תרשים 6.4.4).



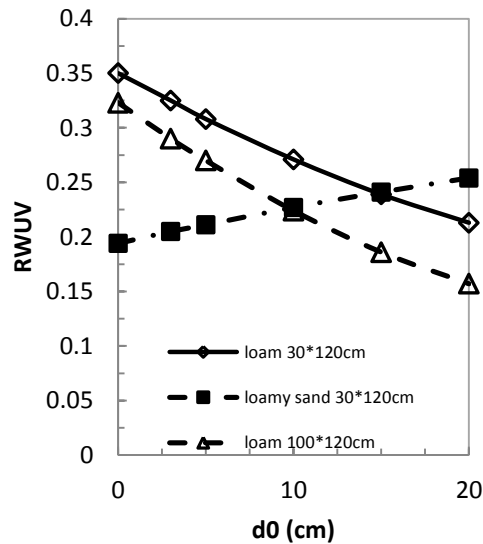
תרשים 6.4.4- השפעת השינוי ב- $m$  (התאדות מפני הקרקע) על  $RWUV$ , כתלות בסוג הקרקע ובמשך ההשקיה. בשני סוגי קרקעות: loam (שחור) ו-loamy sand (אפור) ושני תכיפות השקיה: שעה (שבור) וחמש שעות (מלא)

$\beta$ - פרמטר המתאר את ההשתנות האנכית של המוליכות ההידראולית של הקרקע. כאשר  $\beta = 0$  הקרקע הומוגנית וככל שהערך גדול יותר (בערכו המוחלט) הקרקע יותר הטרוגנית. נבדקו שלוש ערכי  $\beta = 0, -0.45, -0.75$  על קרקע סייין. כאשר תכיפות ההשקיה הייתה יומית, שינוי ב-  $\beta$  (מ- 0 ל- -0.45) גרם להקטנה של 5% בנפח קליטת המים היחסי (לא מוצג). כאשר תכיפות ההשקיה הייתה כל ארבעה ימים שינוי ב-  $\beta$  גרם לשינוי משמעותי יותר בנפח קליטת המים היחסי. ניתן לשים לב לשינוי דברים; השינוי שנגרם כתוצאה מהקטנת  $\beta$  לא היה משמעותי עבור נפח קליטת המים היחסי הממוצע לאורך מחזור ההשקיה. לעומת זאת, נפח קליטת המים היחסי עבור יום ההשקיה (היום הראשון המחזור) השתנה באופן ניכר. תופעה זו גרמה ליצירת קו מתון יותר לאורך מחזור ההשקיה, על-ידי הורדת קליטת המים ביום הראשון למחזור והעלה את קליטת המים בימים האחרים (תרשים 6.4.5).

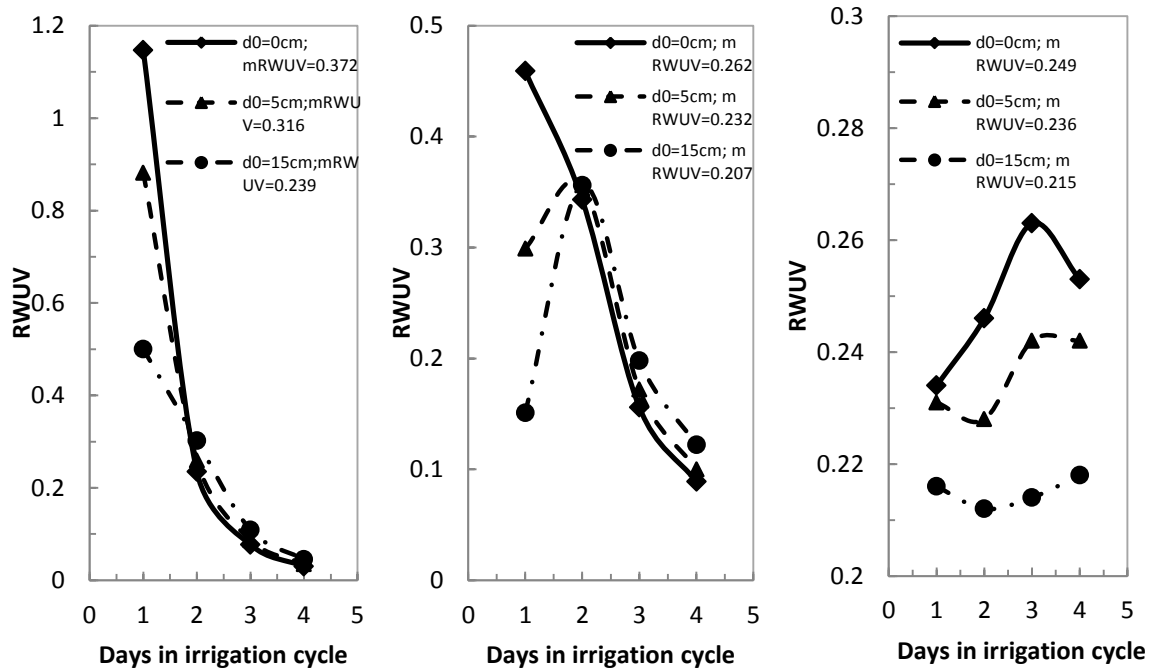


תרשים 6.4.5- השפעת השינוי ב-  $\beta$  על RWUV בתכיפות השקיה של פעם בארבעה ימים. נבחנו 3 ערכי  $\beta$ : 0 (מעוין), 0.45 (מלא), 0.75 (משולש)

$r_0, d_0$ - העמקת בית השורשים בקרקע סיין הורידה את נפח קליטת המים היחסי, ובקרקע חול סייני ההעמקה העלתה את נפח קליטת המים היחסי בתכיפות השקיה יומית. שינוי בגיאומטריה של הצמחים מ-  $120 \times 30$  ס"מ ל-  $120 \times 100$  ס"מ (קונפיגורציה של צמח-טפטפת) בקרקע חול סייני מביאה לאותה מגמה של הגיאומטריה הצפופה אך ערכי נפח קליטת המים היחסי יהיו נמוכים יותר מכיוון שהצבה זו גורמת לפיזור צדדי גדול יותר של המים ביחס לקרקע סיין (תרשים 6.4.6). כאשר משקים קרקע סיין בעלת  $k_{eff}=2.22$  cm/h אחת לארבעה ימים ישנה קליטת מים גבוהה מאוד ביום הראשון למחזור ההשקיה, ואז ירידה משמעותית בקליטת המים בימים הבאים במחזור ההשקיה, העמקת בית השורשים גרמה לקליטת המים לאורך מחזור ההשקיה להיות מתונה יותר ולהגיע לערכי קליטת המים היחסי נמוכים יותר (תרשים 6.4.7 שמאל). כאשר הקטנו את  $k_{eff}$  ( $k_{eff}= 1, 0.1$  cm/h) נפח קליטת המים היחסי יורד וכך גם הממוצע של נפח קליטת המים היומי ירד (למשל- מ- 37.2% כאשר  $k_{eff}=2.22$  cm/h ל- 26.2% כאשר ה-  $k_{eff}=1$  cm/h). ב- DIDAS המבלע הוא נקודה בעומק קבוע, אך בשדה קליטת המים משתנה עם הזמן ובמרחב. בנוסף ב- DIDAS ה-  $k_{eff}$  הוא ערך קבוע לכל מחזור ההשקיה. שילוב של שלושת הגרפים האילו עם ערכי  $k_{eff}$  שונים ( $k_{eff} = 0.1, 1, 2.22$  cm/hr) ושילוב של העמקת המבלע יכולים לתאר בקירוב טוב את קליטת המים היחסית כפי שהיא מתרחשת בשדה. בתחילת מחזור ההשקיה  $k_{eff}$  גבוה ויורד עם התייבשות הקרקע ונוסף המבלע קולט מים משכבות עמוקות יותר של הקרקע עם התקדמות מחזור ההשקיה.



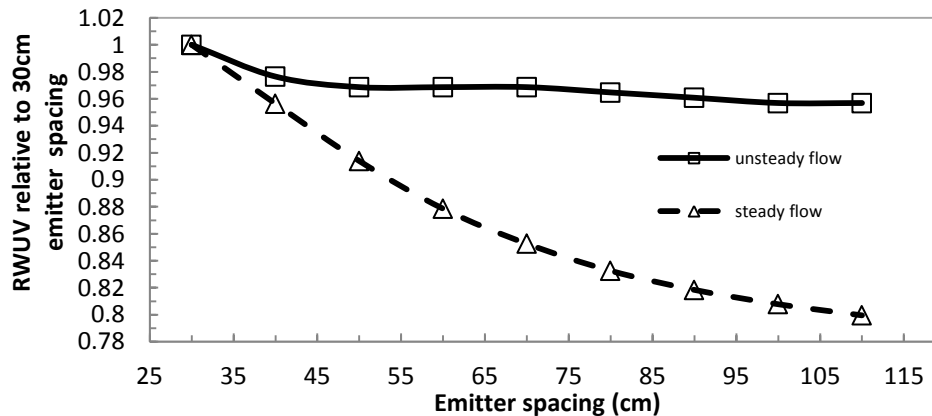
תרשים 6.6.4- השפעת עומק בית השורשים ( $d_0$ ) על RWUV בקרקע loam (מעוין) ו- loamy sand ריבוע), ובקרקע loam בהצבה של  $120 \times 100$  ס"מ



תרשים 6.4.7- השפעת השקיה בתכיפות של כל ארבעה ימים על RWUV בקרקע סוין, עבור עומק בית שורשים משנתה: 0 (מעוין), 5, (משולש) 15 (עיגול) ס"מ מתחת לפני הקרקע, כאשר  $\alpha=0.04 \text{ cm}^{-1}$ , עבור  $k_{\text{eff}}=2.22 \text{ cm/h}$  (שמאל),  $k_{\text{eff}}=1 \text{ cm/h}$  (אמצע),  $k_{\text{eff}}=0.1 \text{ cm/h}$  (ימין)

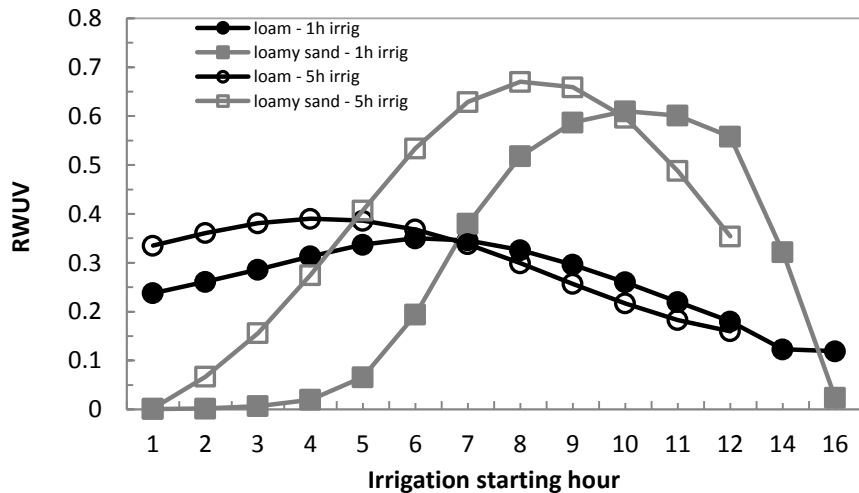
הצבת הטפטפות- בהרצות השונות השתמשנו בקונפיגורציה הצבת טפטפות  $30 \times 120$  ס"מ (כמו הטיפולים בניסוי 1 בבשור). בהרצה של המודל לזרימה וקליטת מים תמידית נמצא שעבור בית שורשים ברדיוס של 15 ס"מ (כמו שהנחנו לצמחי הפלפל בבשור) מרחק הטפטפות שמביא לנפח קליטת המים היחסי הגדול ביותר הוא 30 ס"מ. כאשר נבחן את השפעת השינוי בהצבת הטפטפות על השינוי בנפח קליטת המים היחסי בזרימה וקליטת מים תמידית לעומת זרימה וקליטת מים עתית נראה שהשינוי בזרימה העתית פחות משמעותי (עד 4% בעתי לעומת 20% בתמידית). השפעת מרחק הצבת הטפטפות משמעותית יותר בזרימה תמידית לעומת עתית, וככל

שהצבת הטפטפות נהייתה מרווחת יותר השינוי בנפח קליטת המים היחסי ניהיה קטן גם בזרימה תמידית וגם בעתית (תרשים 6.4.8).

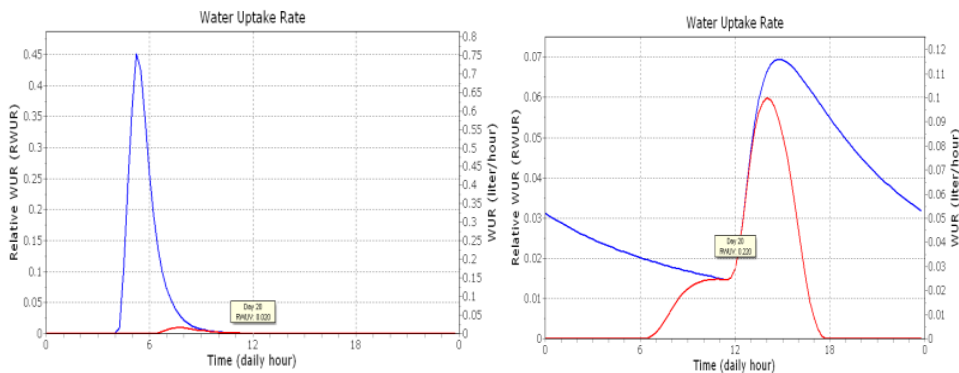


תרשים 6.4.8- השפעת המרחק בין הטפטפות על השינוי ב- RWUV בקרקע loam, בזרימה תמידית (שבור) ובזרימה עתית (מלא)

$q_{so}(t)$  - השפעת זמן תחילת השקיה ומשך ההשקיה על נפח קליטת המים היחסי. זמן תחילת השקיה - בחנו שני סוגי קרקעות בעלות מרקם שונה (סיין וחול סייני) ואת השפעת זמן תחילת ההשקיה (החל מ- 1:00 לפנות בוקר ועד 16:00 אחר הצהריים) על נפח קליטת המים היחסי כאשר ההשקיה יומית למשך שעה אחת (סמנים מלאים) או חמש שעות (סמנים ריקים). הגבלנו את פעילות הצמח ל- 12 שעות מ- 6:00 עד 18:00. שיא קליטת המים בקרקע סיין, כלומר נפח קליטת המים מקסימאלי מתקבל כאשר נשקה בשעה 6:00 בבוקר ומגיע ל- 35% ממנת ההשקיה היומית (תרשים 6.4.9). לעומתה בקרקע חול סייני שיא קליטת המים מתקבל אם משקים בשעות הבוקר המאוחרות (10:00) מגיע ל- 61% ממנת ההשקיה היומית. תוצאות אילו מתאימות לתוצאות ניסוי השדה של (Ben-Asher, 1979) בקרקע חולית בנחל סיני, שמצא שקליטת המים המקסימאלית כאשר פעילות בית השורשים מקסימאלית מתקיימת בהשקיית יום ולא בהשקיית ערב. הדיוק בתזמון ההשקיה בקרקע חולית חשוב היות ופולס המים בקרקע נע מהר, ואם לא נשקה באופן מדויק הצמח יכול ל"פספס" את פולס המים. בקרקע סיין שעת ההשקיה פחות חשובה כי פולס המים בקרקע נמצא לזמן ארוך יותר (אוגר המים של הקרקע גדול יותר).



תרשים 6.4.9- השפעת זמן תחילת ההשקיה ומשך ההשקיה על RWUV בקרקע loam (שחור) loamy sand (אפור), בשני משכי השקיה: שעה (מלא), 5 שעות (ריק)



תרשים 6.4.10- פלט של DIDAS, בזרימה וקליטה עתית. מהלך קליטת מים יחסי יומי של קרקע loam (ימין) וקרקע loamy sand (שמאל). עם התנגדות לקליטת מים (אדום) ובלי התנגדות (כחול), בעקבות השקיה אחת למשך שעה המתחילה ב- 6:00 11:00 בהתאמה

כאשר הארכנו את משך ההשקיה גרם להעלאת נפח קליטת המים היחסי המקסימאלי האפשרי ולהקדמת זמן תחילת ההשקיה כדי להגיע לשיא קליטת מים (תרשים 6.4.9). קרקע סיין כמעט ולא הושפעה מהארכת משך זמן ההשקיה ושיא נפח קליטת המים עלה בכ- 4% והוקדם משעה 6:00 לשעה 4:00. לעומת זאת בקרקע חול סייני כאשר השקנו במשך שעה אחת נפח קליטת המים היה 61% והארכת משך ההשקיה הגדיל את נפח קליטת המים היחסית ל- 67% (עליה של 6%). גם במקרה זה הייתה הקדמה של שעתיים בשעת ההשקיה לשיא הקליטה מ- 10:00 ל- 8:00. הסיבה העיקרית להגדלת ה- RWUV נעוצה בהתאמה טובה יותר לזמן הטרנספירציה, כלומר הגדלת פוטנציאל המים באזור בית השורשים למשך זמן ארוך יותר מתוך הזמן בו התנגדות הצמח היא סופית (ונמוכה). ישנה חשיבות לתזמון ההשקיה כתלות בסוג הקרקע. בתרשים 6.4.10 משמאל ניתן לראות דוגמא למתן השקיה מאוחרת (11:00) בקרקע סיין, כאשר הצמח התחיל לבצע טרנספירציה ("לעבוד") בשעה 6:00, כמות המים שהיו זמינים לו במשך 5 שעות הם אוגר המים של הקרקע. דוגמא נוספת לתזמון השקיה לקוי היא כאשר ההשקיה ניתנת מוקדם מידי ומתואר בתרשים 6.4.10 מימין. בתרשים תוארת השקיה הניתנת כשעתיים לפני תחילת פעילות הצמח (4:00 בבוקר) בקרקע חול סייני, בה

התזמון חשוב. קליטת המים מתחילה לאחר התנקזות הקרקע, לכן נפח קליטת המים היחסי נמוך מאוד (0.022%).

#### 6.4.2 השוואה בין הדמיות עם DIDAS למדידות בניסוי שדה

##### השקיה יומית בבשור

בניסוי השדה שעת תחילת ההשקיה של צמחי הפלפל בתכיפות השקיה יומית היא 6:30 ונמשכת כשעה ו-10 דקות כאשר ספיקת טפטפת 1.67 ליטר/שעה (סהכ' 1.948 ליטר/יום) בהשקיה יומית בחודש אוגוסט בשנת

2012. נבחר ערך של 0.2 להתנגדות צמח מקסימלית לקליטת מים

וערך של 0.02 לצהרי היום. נזניח את ההתאדות ( $m=0$ ), ונתייחס

לקרקע כהומוגנית ( $\beta=0$ ). הצבת הצמחים תהיה כמו בניסוי

בבשור (120\*30 ס"מ) בקונפיגורציה של טפטפת לצמח. בתרשים

6.4.11 מוצג היום ה-20 שמתאר התנהגות מחזורית יציבה

בהדמיה שהחלה בקרקע יבשה. תכונות הקרקע הותאמו לאלו של

חוות הבשור ואופיינו בבית הרשת:  $\alpha = 0.038 \text{ cm}^{-1}$ ,  $k_{eff} =$

2cm/h. רדיוס מערכת השורשים ( $r_0$ ) הוא 15 ס"מ. תרשים

6.4.11 מציג את קצב קליטת המים של הצמח ביחידות של

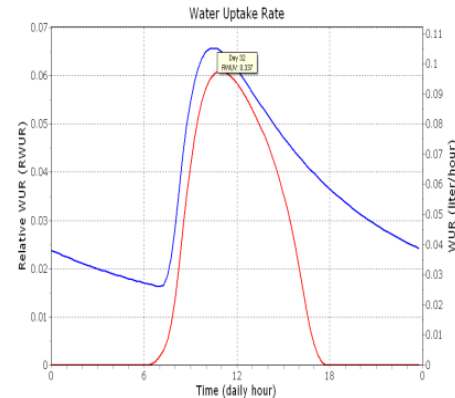
ליטר/שעה (הציר הימני) וקצב קליטת מים היחסי לשיעור

ההשקיה (הציר השמאלי). בקו אדום מתוארת קליטת המים על-ידי

צמח שהתנגדות שלו לקליטת מים היא כמו שתואר למעלה

ובכחול מתוארת קליטת המים על-ידי צמח דמיוני ללא התנגדות

**תרשים 6.4.11 - פלט של DIDAS בזרימה וקליטת מים עתית: מהלך יומי של קצב קליטת המים היחסי (RWUV) עם התנגדות (אדום) ובלי התנגדות (כחול) בעקבות השקיה אחת ביום לשעה אחת המתחילה ב-6:30 בקרקע loam בתנאים דומים להשקיה בבשור: הצבת הצמח והטפטפות 120\*30 ס"מ, פעילות הצמח מוגבלת ל-6:00-18:00**

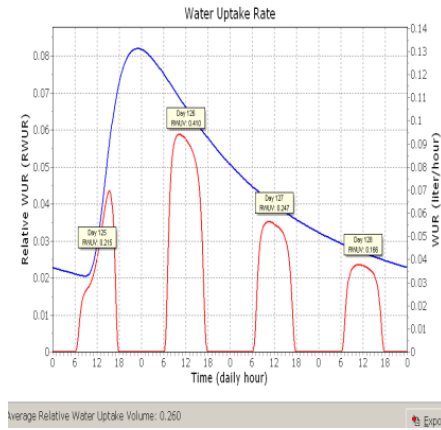


לקליטת מים. השטח שמתחת לקו האדום מתאר את נפח קליטת המים היומי ביחס להשקיה ועומד על 33.7%

בהדמיה הנוכחית שלא לקחה בחשבון התאדות מפני הקרקע אשר הייתה מקטינה את קליטת המים היחסית ב-

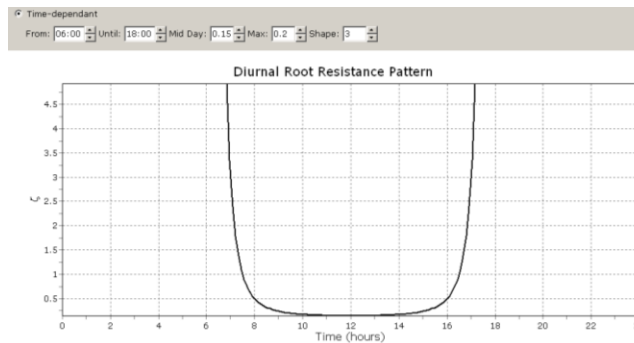
12% כאשר  $m=1$ .

**השקיה כל ארבעה ימים**

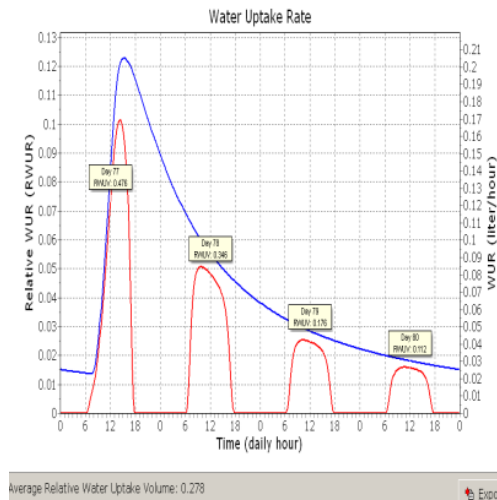


תרשים 6.4.12- פלט של DIDAS בזרימה וקליטת מים עתית: מהלך יומי של קצב קליטת המים היחסי (RWUR) עם התנגדות (אדום) ובלי התנגדות (כחול) בעקבות השקיה כל ארבעה ימים המתחילה ב- 6:30 בקרקע סייך בתנאים דומים להשקיה בבשור כאשר בית השורשים  $r_0=15\text{cm}$

כדי לשחזר את מהלכי קליטת המים היומיים בהשקיה כל ארבעה ימים צריך לאפיין את הקרקע של הבשור עם  $k_{\text{eff}}$  הרבה יותר נמוך מזה שאיפנו את ההשקיה היומית, "כדי למנוע" את התייבשות הקרקע בימים האחרונים של מחזור ההשקיה. עבור השקיה כל ארבעה ימים נבחר  $k_{\text{eff}}=0.5\text{cm/h}$ . בנוסף הגדלנו את התנגדות הצמח לקליטת מים בצהרי היום ל- 0.15 (תרשים 6.4.13). תרשים 6.4.12 מתאר את נפח קליטת המים היחסי של מחזור ההשקיה. בממוצע למחזור השקיה נפח קליטת המים היחסי היה 26% כאשר ביום השני נפח קליטת המים היחסי הוא המקסימאלי (41%). כמו שהוצג בפרק היבולים, טיפול ההשקיה כל ארבעה ימים התקבל יותר יכול לעומת השקיה קצרה כל ארבעה ימים. תופעה זו מוסברת כאשר נדגים את נפח קליטת המים היחסית בצמח עם מערכת שורשים קטנה יותר ( $r_0=10\text{cm}$ ) נפח קליטת המים היחסית עולה ל- 27.8% ומגמת הקליטה משתנה: מקסימום הקליטה נצפה ביום הראשון למחזור שהוא יום ההשקיה ומוערך ב- 47.6% וממנו יש ירידה בקליטה כמתואר בתרשים 6.4.14.



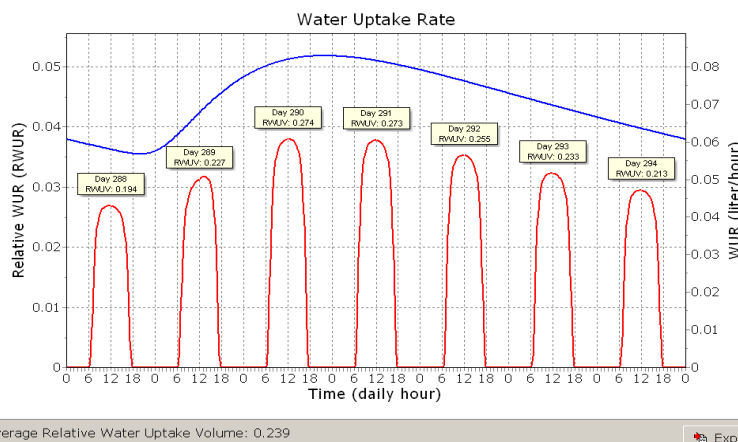
תרשים 6.4.13- מהלך יומי של התנגדות הצמח לקליטת מים.. הצמח פעיל מ- 6:00 בבוקר עד 18:00 בערב.. כאשר בהשקיה כל ארבעה ימים נבחר ערך מקסימאלי להתנגדות 0.35



תרשים 6.4.14- פלט של DIDAS בזרימה וקליטת מים עתית: מהלך יומי של קצב קליטת המים היחסי (RWUV) עם התנגדות (אדום) ובלי התנגדות (כחול) בעקבות השקיה כל ארבעה ימים המתחילה ב- 6:30 בקרקע loam בתנאים דומים להשקיה בבשור כאשר בית השורשים  $r_0=10\text{cm}$

### השקיה שבועית בבשור

במקרה זה איפיון  $k_{\text{eff}}$  בבשור יהיה הרבה נמוך מזה המאופיין להשקיה כל ארבעה ימים, שוב "כדי למנוע" את התייבשות הקרקע בימים האחרונים של מחזור ההשקיה. עבור השקיה שבועית נבחר  $k_{\text{eff}}=0.1\text{cm/h}$ . הצמחים בטיפול השבועי קטנים מאילו שבטיפול היומי או השקיה כל ארבעה ימים, ולכן מקיימים פחות פוטוסינתזה. לכן הנחנו שהתנגדות הצמח לקליטת מים בהשקיה שבועית גבוהה מזו של יומית ואף מזו של פעם בארבעה ימים, ובחרנו ערך להתנגדות הצמח לקליטת מים 0.35 וערך של 0.4 להתנגדות הצמח היומית המקסימאלית. תרשים 6.4.15 מתאר את נפח קליטת המים היחסי של מחזור ההשקיה השבועית. בממוצע למחזור השקיה נפח קליטת המים היחסי היה 23.9%, כאשר בהשקיה שבועית בשלושת הימים הראשונים חלה עליה מתונה בקצב קליטת המים ובארבעת הימים העוקבים קצב קליטת המים פוחת. אין הבדל משמעותי מאוד בנפח קליטת המים היחסי

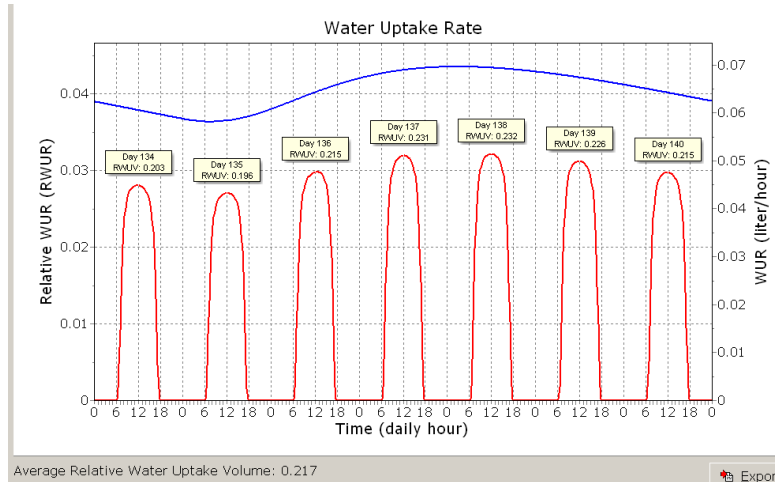


תרשים 6.4.15- פלט של DIDAS בזרימה וקליטת מים עתית: מהלך יומי של קצב קליטת המים היחסי (RWUV) עם התנגדות (אדום) ובלי התנגדות (כחול) בעקבות השקיה שבועית המתחילה ב- 6:30 בקרקע סייך בתנאים דומים להשקיה בבשור וכאשר עומק בית השורשים  $d_0=0\text{cm}$

בין הימים השונים (19.4% ל- 27.4%), ועם זאת ביום השלישי של מחזור ההשקיה הושג נפח המים היחסי הגדול ביותר ועמד על כ- 27.4%. העמקת מערכת השורשים (הגדלת  $d_0=10\text{cm}$ ) ושמירה על רדיוס מערכת שורשים  $(r_0=15\text{cm})$  זהה גורמת לירידה בקליטה הממוצעת, והגיע לערך של 21.7% ולאחידות גבוהה יותר בין הימים לאורך מחזור ההשקיה ונע בין



19.6% - 23.2% (תרשים 6.4.16).



תרשים 6.4.16 - פלט של DIDAS בזרימה וקליטת מים עתית: מהלך יומי של קצב קליטת המים היחסי (RWUR) עם התנגדות (אדום) ובלי התנגדות (כחול) בעקבות השקיה שבועית המתחילה ב- 6:30 בקרקע סייך בתנאים דומים להשקיה בבשור וכאשר עומק בית השורשים  $d_0=10\text{cm}$

## 7 דיון ומסקנות

מתוצאות הניסוי עולה שצמחי הפלפל מגיבים לשינוי בתכיפות ההשקיה. ההבדל מתבטא בכמות ואיכות היבול, גובה הצמחים, הביומסה הצמחית שנוצרת במהלך העונה ובקליטת המים על-ידי הצמח. התנהגות הקרקע בתכיפויות השקיה שונות יכולה להסביר את תגובת צמחי הפלפל לתכיפויות ההשקיה.

### 7.1 מדידה רציפה של צימוח וניבה

גובה הצמחים מסייע לאמוד את קצב התפתחות הצמחים בטיפולים השונים. ישנה התאמה בין מנת המים הניתנת בכל טיפול לגובה הצמח, כאשר בסוף עונת הגידול חלה האטה בצימוח. מספר מחקרים הראו שכאשר צמח נמצא בעקת מים ישנה הפסקה של הגדילה מתוך תהליך של התגוננות לשמירה על המשאבים, ולאחר מכן הפחתה של הפעילות הפוטוסינתטית (Wardlaw, 1969; Skirycz and Inzé, 2010).

תגובת צמחי הפלפל לתכיפויות השקיה שונות מתבטאת בכמות, איכות היבול והביומסה הצמחית שנוצרת. הקטנת תכיפות ההשקיה גרמה להקטנת כמות היבול הכללי, כמות היבול לייצוא והגדילה את כמות הפירות המעוותים או הנגועים בשחור פיטם. מגמות אילו מתאימות למגמות דומות שהודגמו בעבודתם של (2006) Assouline et al., אשר בחנו את השפעת עקת המים על כמות היבול בפלפל, ולעבודתו של (2002) Sezen et al., אשר בחן תכיפויות השקיה שונות בתירס מתוק. ההבדלים שהתקבלו בין מרווחי השקיה של יום עד ארבעה ימים אינם גדולים, כמעט ולא נמצא הבדל בין השקיה יומית (קצרה או מתמשכת) להשקיה עד ארבעה ימים (קצרה או מתמשכת). בניגוד לכך משך ההשקיה משפיע על מספר הפירות המעוותים או נגועים בשחור פיטם;

בהשקיה ממושכת היו פחות פירות מעוותים. נמצאה תגובה דרמטית של ירידה ביבול (50% פחות יבול) עם הירידה בתכיפות ההשקיה במעבר מארבעה ימים לשמונה ימים, דבר שבא לידי ביטוי גם בהבדל במספר הפירות המעוותים שגדל בכ- 50% בין השקיה כל ארבעה ימים לכל שמונה ימים (תרשימים 6.1.6, 6.1.7). שתי סיבות אפשריות: יכולת תאחיזת מים גבוהה של סיינ שמוליכותו ההידראולית פוחתת עם העומק והתפתחות מערכת שורשים עמוקה יותר במרווחי השקיה גדולים שהיוותה אמצעי חשוב בקליטת המים (Proffitt et al., 1985). בטיפולים בתכיפיות ההשקיה הנמוכות המשקל היבש של צמח מפורק נמוך מהטיפולים עם תכיפות ההשקיה הגבוהה. השפעת תכיפיות ההשקיה השונות נראות כבר מתחילת הניסוי (בשלב הראשונים של הגידול), פחות ביומסה צמחית נוצרה בטיפולים של תכיפות ההשקיה הנמוכה, על אף שגובה הצמחים היה זהה בתקופה זו. ניתן להבחין במגמה של ירידה במשקל היבש עם הירידה בתכיפות ההשקיה. מגמה זו נשמרת גם בסוף הניסוי. השקיה מתמשכת או קצרה לא משפיע על ייצור הביומסה, וגם אין הבדל בין השקיה בכל יום או בכל יומיים. הביומסה היא תוצאה של תהליך הפוטוסינתזה ויש כמה גישות בנוגע לייצור הביומסה, הראשונה גורסת שכאשר הצמח נתון לעקת מים הוא יינתב את הביומסה הנוצרת להצמחת שורשים ולכן פחות יצמיח עלים וגבעולים (Poorter and Nagel, 2000), על-פי הגישה תהיה פחיתה בתהליך הפוטוסינתזה (Delfine et al., 2001; Chaves et al., 2002; Skirycz and Inzé, 2010). ירידה בתכיפות ההשקיה השפיעה על המשקל הכללי בחלקים העל קרקעיים של הצמח. "התכיפות הממוצעת" הניתנת בהשקיה מתחלפת אמורה להיות זהה לזו של השקיה בכל ארבעה ימים, לכן נצפה שהמשקל היבש יהיה זהה בין הטיפולים הללו. הטיפול המתחלף מנסה לדמות השקיה פעם בארבעה ימים. העלאת כמות המים גרמה גם כן להגדלת המשקל היבש לצמח. השפעת הטיפולים מתחילה עוד בראשית הגידול. זמינות מים גבוהה חיונית בזמן פריחה וחנטה וחיונית להתפתחות תקינה של פירות וביומסה צמחית. תוצאה זו מודגשת לאור הממצאים האחרים של גובה הצמחים ומשקל היבש בפירוק הצמחים המתאים למגמה זו. הבדלים אילו נשתמרו לאורך כל עונת הגידול. כאשר תכיפות ההשקיה גבוהה (יום או יומיים) קצב ההתפתחות, היבול וקליטת המים זהים. אם נקטין את תכיפות ההשקיה לבינונית (ארבעה ימים) קצב קליטת המים ישמר כמעט זהה אך קצב ההתפתחות וכמות היבול ליצוא וקטן וישנם יותר פירות מעוותים. כאשר תכיפות ההשקיה נמוכה יש פגיעה בקצב התפתחות צמח הפלפל, ישנה הנבה של פחות פרי וכמות הפירות המעוותים עולה בהרבה. בנוסף נפח קליטת המים היחסי במחזור ההשקיה יורד. ככלל כאשר צמח נתון בעקה מירב הסוכרים מופנים ליצירת שורשים ולהתגוננות ולכן ישנה פחות השקעה באספקת מוטמעים ליצירת פירות טובים וצימוח לגובה.

## 7.2 רטיבות ומליחות קרקע

מתקיימת התאמה בין מנת המים שניתנה בכל טיפול לבין פוטנציאל המים בקרקע. תכיפיות השקיה נמוכות יוצרות פוטנציאל מים שלילי יותר בקרקע, כלומר תכולת רטיבות נמוכה יותר. כאשר תכולת הרטיבות נמוכה יותר יעילות ניצול המים של הצמח יורדת כי יש פחיתה במוליכות ההידראולית ופחיתה בקצב הקליטה, ולכן פחות מים יכולים להיקלט על-ידי השורשים (Or and Coelho, 1996) והיבול היחסי יורד בהתאמה. הפירוס של פוטנציאל המים בקרקע משפיע על פיזור וקצב צימוח השורשים. שורשים "יחפשו" מים, והצמח יעודד

צמיחת שורשים לעומק הקרקע כדי למצוא מים. לכן כאשר תכיפות ההשקיה נמוכה השורשים התפתחו לעומק ולרוחב הקרקע מהר יותר (תרשים 6.1.14) ולכן הורגשה התייבשות (קליטת מים) בטנסיומטרים בשלב מוקדם יותר. תוצאה זו גם כן מתאימה לתוצאות הפירוקים שמעידות על השפעה של הטיפולים עוד בראשית הגידול. כאשר נשווה בין השקיה ברמות של 100% ל- 333% נראה, שכצפוי, טיפול 100% יבש יותר. בטיפול 100% השקיה ישנו הבדל בעומד המטריצי בין העומקים השונים. בעומק 15 ס"מ השינוי עקב תהליך ההרטבה והייבוש קיצוני מאוד לעומת עומק 35 ס"מ שנשאר רוב הזמן יבש. דבר זה נובע מכמות מים קטנה יותר, שנובעת מבריחה של מים לצדדים (אין אפקט ה"גליל"), ולכן פחות מים מחלחלים מתחת למקור. בטיפול השקיה של 333% בשני העומקים הקרקע רטובה רוב הזמן מכיוון שניתנת כמות מים גדולה בכל השקיה. כאשר נשווה את שני הטיפולים (100\*120 ס"מ) הללו להשקיה יומית (100\*30 ס"מ), נראה שישינו דמיון לטיפול 333%. הבדלים במדידות הטנסיומטרים בין הטיפולים נצפו החל מחודש לאחר שתילה, וזה נובע ממערכת שורשים שטרם התפתחה כתלות בטיפול. למערכת השורשים השפעה מכרעת על קליטת המים מהקרקע והתפתחות השורשים מושפעת ממשטר ההשקיה. לצמח צעיר מערכת שורשים מוגבלת בנפח שהתפתחותה תלויה גם במשטר ההשקיה. כאשר נשמרת תכולת רטיבות גבוהה קיים מילוי מחדש של סביבת השורש, והצמח לא נחשף לעקה זמנית וייתכן שהוא חוסך במוטמעים המופנים לגידול שורשים, דבר שמתבטא בקצב התפתחות מהיר יותר, ולהפך. המיפוי המרחבי של קליטת המים על-ידי יחסי המלחה הצביעה על קליטת מים והתאדות משמעותית יותר באזור הטפטפת בהשקיה יומית לעומת השקיה כל ארבעה ימים. בנוסף נמצא שמליחות הקרקע שנמדדה במהלך העונות 2011 ו- 2012 לא היוותה גורם משמעותי, ולכן לא השפיעה על התפתחות מערכת השורשים וקליטת המים.

### 7.3 מדידות קליטת מים באמצעות שיטת ה- Heat Pulse

תוצאות חיישני זרימת המים בצמח הדגימו הבדלים, בחלקם מובהקים ובחלקם לא, של השפעת תכיפיות ההשקיה על צמחי הפלפל. החיישנים הדגימו את השפעת הקטנת תכיפות ההשקיה (ניסוי 1) או הגדלת כמות המים (ניסוי 2) על פעילות צמחי הפלפל הן במהלכים יומיים, השעתיים והן בקליטה היומית לאורך מחזור ההשקיה. זרימת המים בגבעול הנמדדת באמצעות חיישני פולס החום היוותה כלי מרכזי בעבודה זו באפיון אופי צריכת המים של צמחי הפלפל ותגובתם לטיפול השקיה השונים. שיטה זו נסקרה בעבר במספר סקירות ועבודות ומתוכם עלו מספר נקודות משמעותיות הנוגעות לרמת הדיוק מחד והאפשרויות הטמונות בהן (Cohen et al., 1988; Gerdes et al., 1994; Cohen and Li, 1996; Smith and Allen, 1996; Rana and Katerji, 2000; Fernández and Cuevas, 2010). נפח קליטת המים היחסי בעבודה זו לא תואם מדידות בעבודות קודמות שנעשו בחיישנים (Li et al., 2002; Möller et al., 2004; Assouline et al., 2006). בעבודה כל הטיפולים הציגו אופיין התנהגות דומה במהלכי צריכת המים היומיים, אשר אופיינו בעלייה חדה בשעות הבוקר, התייצבות במהלך שעות שיא קליטת המים (צהריים) וירידה חדה בסוף היום (לדוגמא תרשים 6.3.2). הודגמו השפעות מובהקות של מנות ההשקיה על מהלכי הצריכה היומיים (תרשים 6.3.8). ההבדלים התאפיינו בעיקר ברמת הפעילות בצהרי היום ובכמות המים היומית הנקלטת. השפעת הקטנת תכיפות ההשקיה

על נפח קליטת המים היחסי שנימדד על-ידי החיישנים פחות בולט ומופיעה בשעות הצהריים (שיא הקליטה) ובאופי הירידה בסוף היום. מתוך מדידות קליטת מים לאורך מחזור ההשקיה בטיפול כל ארבעה ימים וכל שבעה ימים מתקבלת קליטת מים כמעט אחידה בין הימים בתוך מחזור ההשקיה, דבר שיכול לנבוע מתאחיזת מים של הקרקע או מקליטת מים משורשים עמוקים יותר בקרקע. קליטת המים היחסית בטיפולים אילו מהווה גם כן פחות מ- 50% מגפח המים המושקה ועומדת על כ- 16-20% בטיפול השקיה כל ארבעה ימים לעומת 18-23% בטיפול היומי באותה תקופה, ו- 20-27% בטיפול השקיה שבועית לעומת 27-33% בטיפול היומי באותה תקופה. הערכות סך הקליטה היומית בעזרת החיישנים מאומתות עם מדידות של פיזור המים בקרקע ויחסי המלחה מחיישני ה-TDR, וממדידות הטנסיומטרים לאורך היום. ממדידות הטנסיומטרים ניתן לראות שהגענו לעומדים מטריצים שליליים מאוד בתכיפות ההשקיה הנמוכה. נשאלת השאלה מדוע לא נצפתה ירידה מתאימה בנפח קליטת המים לאורך מחזור השקיה. חיישני זרימת המים בגבעול הראו שכמעט ולא חלה ירידה בקליטת המים במהלך מחזור ההשקיה על אף שהעומדים המטריצים שנמדדו היו מאוד שליליים. צפינו שכאשר צמח נתון לעקת מים ייסגרו פיוניות ותתרחש פחות טרנספירציה, דבר שיוביל לירידה בקליטת המים במהלך מחזור ההשקיה. תופעה זו מוסברת בעבודה של (Garrigues et al., 2006) שמתארת קליטת מים שמשתנה בזמן ובמרחב ונעשית משורשים עמוקים יותר. בניסויים שלנו קליטת המים שהוערכה בטיפול היומי מתאימה לתוצאות מדידות ה-TDR (שמעריך 40% אובדנים הכוללים לחול לעומק והתאדות) ולתוצאות המשאבים שמדדו 20%. ממדידות קליטת מים בהצבה של 120\*100 ס"מ ב-3 רמות השקיה (100%, 150%, 333%) קליטת המים הממוצעת ביחס למנת ההשקיה הינה 38%, 24%, 15% בהתאמה. ההשקיה בבשור הייתה עם מים מותפלים + דשן ומתוך מדידות אחת לשבועיים של המשאבים לאורך עונה 2011 ו-2012 לא נמדדה המלחה לאורך העונה. אין הרבה עבודות התומכות בתוצאות אלו. רוב העבודות מציגות כ- 60-80% קליטת מים ממנת ההשקיה היומית. שימוש בשיטת פולס החום דורש כיוול לחיישנים (Cohen et al., 1988, 1990; Cohen and Li, 1996; Smith and Allen, 1996; Santos et al., 2000; Green et al., 2003; Möller et al., 2004). תוצאה נוספת התומכת במדידות קליטת המים שביצענו היא מדידות התאדות שביצענו בשטח ניתן לראות שההתאדות מהווה חלק משמעותי בקרקע בשור כאשר היא רטובה 40% וכאשר היא יבשה ההתאדות יורדת ל- 10%. לחיישני הזרימה לא ביצענו כיוול אלא השתמשנו בכיוול מעבודתו של מרקוס מולר שקבע מקדם כיוול של 1.1. גם אם היינו בוחרים מקדם כיוול אחר בטווח של 30% ממקדם הכיוול שנבחר (0.8-1.4), קליטת המים היחסית היומית תעמוד על ערכים של בין 17% ל- 38% כתלות במקדם כיוול. כלומר, קליטת המים היחסית תישאר נמוכה מזו המוצגת בספרות.

#### 7.4 הדמיות קליטת מים עם DIDAS

בניגוד למודלים אחרים DIDAS הינו כלי פשוט שבאמצעותו ניתן להגיע לקירוב טוב לתוצאות בשדה. מספר הפרמטרים שצריך להתאים נמוך והשימוש בו פשוט. מהרצות DIDAS עולה שישנה חשיבות רבה לתזמון ההשקיה, כלומר להתאמת זמן תחילת ההשקיה ומשך ההשקיה לסוג הקרקע. כדי לשחזר את המהלכים היומיים של קצב קליטת המים כפי שנאמד באמצעות חיישני הזרימה היה עלינו לאפיין את הקרקע ולהעריך את התנגדות

הצמח לקליטת מים. המודל, מניח שהתנגדות הצמח לקליטת המים תלוי רק בשעות היממה. למרות הנחה פשוטה זו, המודל 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 לארבעה ימים ואחת לשבוע. על-פי חיישני הזרימה קליטת המים בהשקיה יומית הייתה רק כ-27-33% ממנת ההשקיה ובהשקיה אחת לשבוע רק כ-20-27% עם הבדלים זניחים בין הימים לאורך מחזור ההשקיה על-ידי התאמת  $k_{eff}$  לאורך מחזור ההשקיה והגדלת התנגדות הצמח לקליטת מים עם הירידה בתכיפות השקיה הצלחנו להגיע לנפח קליטת מים ממוצע דומה לזה שמדדנו באמצעות חיישני הזרימה ולהתנהגות קליטת מים דומה כלומר אין שינוי משמעותי בקליטה המים היומית לאורך מחזור ההשקיה בתכיפויות השקיה נמוכות. אפיון תכונות הקרקע מובנה על-ידי שני פרמטרים:  $\alpha$  ו- $k_{eff}$ , כאשר הפרמטר השני משתנה בפועל (לא ב-DIDAS) עם הזמן וכתלות בתכולת הרטיבות. לכן, כאשר משתמשים ב-DIDAS כדי לאפיין את הקרקע עם  $k_{eff}$  הרבה יותר נמוך ולהתאים לה ערך ממוצע שישקף את מצב הרטיבות בקרקע לאורך מחזור ההשקיה.

## 8 סיכום

בעבודה זו בחנו את ההשפעה של תכיפויות השקיה שונות בקרקע סגור באזור חבל הבשור על התפתחות, ניבה, וקליטת מים של צמחי פלפל. הניסוי נערך בבית רשת בחוות הניסויים של מ"פ דרום, בקרקע טבעית בבולקים באקראי. היבט תכיפות ההשקיה נבחן בטווח שבין השקיה אחת (קצרה ומתמשכת) ועד לתכיפות השקיה של כל שמונה ימים. תוצאות אילו הושו להדמיות שנעשו באמצעות DIDAS. נמצאה תגובה מובהקת של צמחי הפלפל לתכיפות ההשקיה אשר התבטאה במדדי הצימוח והנבה. מספר הפירות המעוותים הושפע באופן ישיר מתכיפות ההשקיה וכך גם מספר הפירות לייצוא. עליה בתכיפות ההשקיה הובילה לעלייה ביבול הכולל. השפעת תכיפות ההשקיה על היבול החלה בשלבי התפתחות מוקדמים, והאינדיקציה לכך היא גובה הצמחים, פירוק הצמחים בתחילת העונה ובסופה ותגובת הטנסיומטרים לקליטת המים. במהלך העונה נצפו הבדלים שנבעו מתכיפויות ההשקיה השונות ובאו לידי ביטוי בקצב צימוח שונה, מספר פירות שונה ומספר פירות מעוותים ונגועים בשחור פיטם. כל אילו מצטרפים יחד ומסייגים שעד תכיפות השקיה כל ארבעה ימים לא נצפתה השפעה משמעותית של תכיפות ההשקיה על צמחי הפלפל. קליטת המים על-ידי הצמח ירדה מעט עם הקטנת תכיפות ההשקיה וההבדלים התאפיינו בעיקר בשעות הצהריים (שיא קליטת המים) ואחר הצהריים. בשעות הבוקר לא נמצא הבדל בין פעילות הצמחים בתכיפויות ההשקיה השונות. שימוש בתוכנת DIDAS תומך במסקנה שצמחים שהושקו בתכיפות גבוהה נפח קליטת המים היחסי שלהם גדול יותר תוך התחשבות בתזמון ההשקיה. קליטת המים של הצמח היא פונקציה של פעילות הצמח וזרימת המים בקרקע. לכן חשיבות התזמון תלויה בסוג הקרקע; חשיבות התזמון רבה בקרקע חול סייני בה תנועת המים מהירה לעומת תנועתם בקרקע סגור או קרקע חרסיתית. ממדידות קליטת מים עולה שקליטת המים היחסית ממנת ההשקיה עומדת על כ-30%

בהשקיה יומית, תוצאות אילו נתמכות על-ידי מאזני תכולת רטיבות. בנוסף, קליטת המים בטיפול השבועי לא השתנתה הרבה לאורך מחזור ההשקיה. מטרת המחקר הייתה לבחון את הגישה החדשה לתכנון תכיפות השקיה בטפטוף תוך בחינה של השפעת תכיפות ההשקיה על פרמטרים קרקעיים וצמחיים ועל קליטת המים על-ידי הצמח תוך עימות עם הערכת מודל לזרימה וקליטה עתית. באמצעות המודל לזרימה עתית ניתן לתאר בצורה משכנעת וברורה מהלכים יומיים של קצב קליטת המים היחסי ונפח קליטת המים היחסי. מבחינת תכיפויות ההשקיה התיאור הוא גם ברור ותואם את תוצאות השדה כמו השערותנו לא חלה ירידה בנפח קליטת המים היחסי היומי במהלך מחזור השקיה, וקליטת המים הייתה קבועה לאורך כל המחזור והצמחים קולטים פחות ממחצית מכמות המים שהושקו.

## 9 רשימת ספרות

- 
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *FAO, Rome* 56: 1–15.
- Alvino, A., M. Centritto, and F. DeLorenzi. 1994. Photosynthesis response of sunlit and shade pepper (*Capsicum annuum*) leaves at different positions in the canopy under two water regimes. *Plant physiology* 21: 377–391.
- Amoozegar-fard, A., A.W. Warrick, and D.O. Lomen. 1984. Design nomographs for trickle irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 110: 107–120
- Assouline, S., S. Cohen, D. Meerbach, T. Harodi, and M. Rosner. 2002. Microdrip irrigation of field crops: effect on yield, water uptake, and drainage in sweet corn. *Soil Science Society of America Journal* 66: 228–235.
- Assouline, S., M. Möller, S. Cohen, M. Ben-Hur, A. Grava, K. Narkis, and A. Silber. 2006. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: Bell pepper case study. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1556–1568.
- Assouline, S., M. Möller, A. Furman, K. Narkis, and A. Silber. 2012. Impact of water regime and growing conditions on soil-plant interactions: from single plant to field scale. *Vadose Zone Journal* 11(3): 1–11.
- Bar-Tal, A., M. Keinan, B. Aloni, L. Karni, Y. Oserovitz, S. Gantz, A. Hazan, M. Itach, N. Tratakovski, A. Avidan, and I. Posalski. 2001. Relationships between blossom end rot and water availability and Ca fertilization in bell pepper fruit production. *Acta Horticulturae* 554: 97–104.
- Ben-Asher, J. 1979. Trickle irrigation timing and its effect on plant and soil water status. *Agricultural Water Management* 2: 225–232.

- Black, T.A., W.R. Gardner, and G.W. Thurtell. 1969. The prediction of evaporation, drainage, and Soil water storage for a bare soil. *Soil Science Society of America Journal* 33: 655–660.
- Bresler, E. 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrigation Science* 1: 3–17.
- Chaves, M.M., J.S. Pereira, J. Maroco, M.L. Rodrigues, C.P.P. Ricardo, M.L. Osorio, I. Carvalho, T. Faria, and C. Pinheiro. 2002. How plants cope with water stress in the field. photosynthesis and growth. *Annals of Botany* 89: 907–916.
- COAG. 2012. Sustainable Crop Production Intesification. p. 1–10. In COMMITTEE ON AGRICULTURE. *www.fao.org*.
- Cohen, Y., M. Fuchs, V. Falkenflug, and S. Moreshet. 1988. Calibrated heat pulse method for determining water uptake in cotton. *Agronomy Journal* 80: 398–402.
- Cohen, Y., M. Fuchs, and G.C. Green. 1981. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment* 4: 391–397.
- Cohen, Y., and Y. Li. 1996. Validating sap flow measurement in field-grown sunflower and corn. *Journal of experimental botany* 47: 1699–1707.
- Cohen, Y., S. Takeuchi, J. Nozaka, and T. Yano. 1990. Accuracy of sap flow measurement using heat balance and heat pulse methods. *Agroclimatology* 85: 1080–1086.
- Colombo, A., and D. Or. 2006. Plant water accessibility function: A design and management tool for trickle irrigation. *Agricultural Water Management* 82: 45–62.
- Communar, G., and S.P. Friedman. 2010a. Relative water uptake rate as a criterion for trickle irrigation system design: II. surface trickle irrigation. *Soil Science Society of America Journal* 74(5): 1509–1517.
- Communar, G., and S.P. Friedman. 2010b. Relative water uptake rate as a criterion for trickle irrigation system design: III. subsurface trickle irrigation. *Soil Science Society of America Journal* 74(5): 1518–1525.
- Communar, G., and S.P. Friedman. 2010c. Relative water uptake rate as a criterion for trickle irrigation system design: I. Coupled source–sink steady water flow model. *Soil Science Society of America Journal* 74: 1493–1508.
- Communar, G., and S.P. Friedman. 2012a. Generalized coupled source–sink model for evaluating transient water uptake in trickle irrigation: I. Model formulation for soils with vertical heterogeneity. *Soil Science Society of America Journal* 76:779– 790.
- Communar, G., and S.P. Friedman. 2012b. Generalized coupled source–sink model for evaluating transient water uptake in trickle irrigation: II. irrigation scheduling scenarios. *Soil Science Society of America Journal* 76(3): 791.

- Cook, F.J., P.J. Thorburn, P. Fitch, and K.L. Bristow. 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *Irrigation Science* 22: 129–134.
- Dabach, S., N. Lazarovitch, J. Šimůnek, and U. Shani. 2013. Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. *Irrigation Science* 31: 27–36.
- Dagan, G., and E. Bresler. 1983. Unsaturated flow in spatially variable fields: 1. Derivation of models of infiltration and redistribution. *Water Resources Research* 19: 413–420.
- Delfine, S., F. Loreto, and A. Alvino. 2001. Drought-stress effects on physiology, growth and biomass production of rainfed and irrigated bell pepper plants in the Mediterranean region. *Journal of American Society for Horticultural Science* 126: 297–304.
- Erickson, A.N., and A.H. Markhart. 2002. Flower developmental stage and organ sensitivity of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to elevated temperature. *Plant, Cell & Environment* 25: 123–130.
- Fernández, J.E., and M.V. Cuevas. 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 135–151.
- Gardner, W.R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science* 85(4): 228–232.
- Garrigues, E., C. Doussan, and A. Pierret. 2006. Water uptake by plant roots: I- formation and propagation of a water extraction front in mature root systems as evidenced by 2D light transmission imaging. *Plant and Soil* 283: 83–98.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892–898.
- Gerdes, G., B.E. Allison, and L.S. Pereira. 1994. Overestimation of soybean crop transpiration by sap flow measurements under field conditions in Central Portugal. *Irrigation Science* 14: 135–139.
- Green, S.R., and B.E. Clothier. 1994. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water. *Agricultural Water Management* 25: 1–12.
- Green, S., B. Clothier, and B. Jardine. 2003. Theory and practical application of heat pulse to measure sap flow. *Agronomy Journal* 95: 1371–1379.
- Howell, T.A., and M. Meron. 2007. Irrigation scheduling. *Elsevier B.V.*
- Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of experimental botany* 55: 2427–2436.



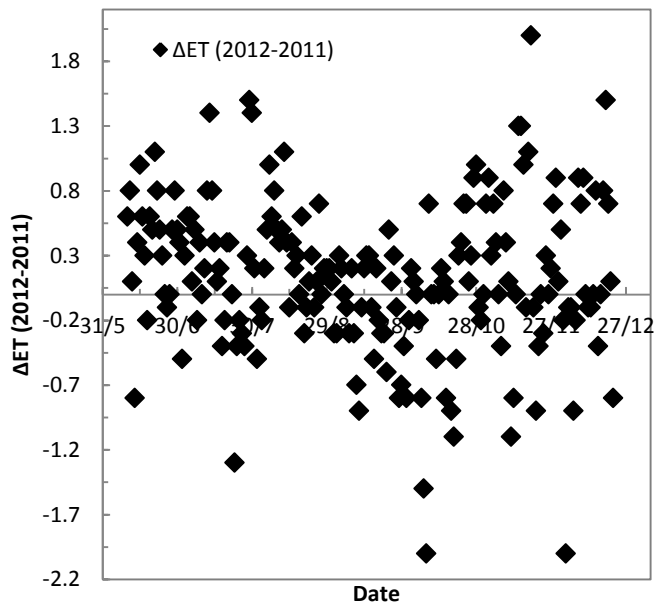
- Jones, H.G. 2006. Irrigation scheduling- Comparison of soil, plant and atmosphere monitoring approaches. *Acta Horticulturae* 792: 391–404.
- Li, Y., R. Wallach, and Y. Cohen. 2002. The role of soil hydraulic conductivity on the spatial and temporal variation of root water uptake in drip irrigated corn. *Plant and soil* 243: 131–142.
- Marcelis, L.F.M., and L.C. Ho. 1999. Blossom-end rot in relation to growth rate and calcium content in fruits of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Experimental Botany* 50: 357–363.
- Marshall, D.C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant physiology* 33: 385–396.
- Marthaler, H.P., W. Vogelsanger, F. Richard, and P.J. Wierenga. 1983. Pressure transducer for field tensiometers. *Soil Science Society of America Journal* 47: 624–627.
- Meiri, A., B. Naftaliev, D. Shmuel, H. Yechezkel, G. Communar, and S.P. Friedman. 2011. Short-term watering-distance and symmetry effects on root and shoot growth of bell pepper plantlets. *Agricultural Water Management* 98: 1557–1568.
- Möller, M., J. Tanny, Y. Li, and S. Cohen. 2004. Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 127: 35–51.
- Muñoz-carpena, R., M.D. Dukes, Y.C. Li, and W. Klassen. 2005. Field comparison of tensiometer and matrix sensor automatic drip irrigation on tomato. *HortTechnology* 15: 584–590.
- Or, D. 1996. Drip irrigation in heterogeneous soils: Steady-state field experiments for stochastic model evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 60: 1339–1349.
- Or, D., and F.E. Coelho. 1996. Soil water dynamics under drip irrigation: transient flow and uptake models. *Transactions of the ASAE* 39: 2017–2025.
- P.L. Polowick, and V.K. Sawhney. 1985. Temperature effect on male fertility and flower and fruit development in *Capsicum annuum* L. *Scientia Horticulturae* 25: 117–127.
- Phene, C.J., and O.W. Beale. 1976. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. *Soil Science Society of America Journal* 40: 430–436.
- Phene, C.J., K.R. Davis, R.B. Hutmacher, and R.L. McCromic. 1987. Advantages of subsurface irrigation for processing tomatoes. *Acta Horticulturae* 200: 101–114.

- Philip, J.R. 1966. Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology* 17: 245–268.
- Poorter, H., and O. Nagel. 2000. The role of biomass allocation in the growth response of plant to different levels of light, CO<sub>2</sub>, nutrients and water: a quantitative review. *Plant physiology* 27: 595–607.
- Proffitt, A.P.B., P.R. Berliner, and D.M. Oosterhuis. 1985. A comparative study of root distribution and water extraction efficiency by wheat grown under high- and low-frequency irrigation. *Agronomy Journal* 77: 655–662.
- Rana, G., and N. Katerji. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy* 13: 125–153.
- Ratliff, L.F., J.T. Ritchie, and D.K. Cassel. 1983. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Science Society of America Journal* 47: 770–775.
- Sack, L., and N.M. Holbrook. 2006. Leaf hydraulics. *Annual review of plant biology* 57: 361–81.
- Santos, A.O., H. Bergamaschi, L.M.G. Rosa, and J.I. Bergonci. 2000. Calibrated heat-pulse method for the assessment of maize water uptake. *Scientia Agricola* 57.
- Segal, E., A. Ben-Gal, and U. Shani. 2006. Root water uptake efficiency under ultra-high irrigation frequency. *Plant and Soil* 282(1-2): 333–341.
- Sezen, S.M., A. Yazar, and S. Eker. 2006. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown Bell pepper. *Agricultural Water Management* 81(1-2): 115–131.
- Skirycz, A., and D. Inzé. 2010. More from less: plant growth under limited water. *Current opinion in biotechnology* 21(2): 197–203.
- Smith, D.M., and S.J. Allen. 1996. Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany* 47(305): 1833–1844.
- Smittle, D. 1994. Irrigation regimes affect yield and water use by bell pepper. *Journal of American Society for Horticultural Science* 119(5): 936–939.
- Steduto, P., T. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres. 2012. Crop yield response to water.
- Thorburn, P.J., F.J. Cook, and K.L. Bristow. 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science* 22: 121–127.

- Wang, F.-X., Y. Kang, and S.-P. Liu. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China plain. *Agricultural Water Management* 79: 248–264.
- Wang, D., S. Yates, and F. f. Ernst. 1998. Determining soil hydraulic properties using tension infiltrometers, time domain reflectometry, and tensiometers. *Soil Science Society of America Journal* 62: 318–325.
- Wardlaw, I.F. 1969. The effect of water stress on translocation in relation to photosynthesis and growth. *Biology, Environmental Sciences, Biological* 22: 1–16.
- Warrick, A.W. 1974. Time-dependent linearized infiltration. I. point sources. *Soil Science Society of America Journal* 38: 383–386.
- White, I., and K.M. Perroux. 1987. Use of sorptivity to determine field soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal* 51: 1093–1101.

## נספחים 10

נספח 1- ההפרש בהתאדות היומית בין שנת 2011 לשנת 2012



נספח 2- כמויות ההשקיה לטיפול לפי עונה

כמויות ההשקיה אינן זהות בין העונות מכיוון שהן נקבעות בהתאם להתאדות לפי PM.

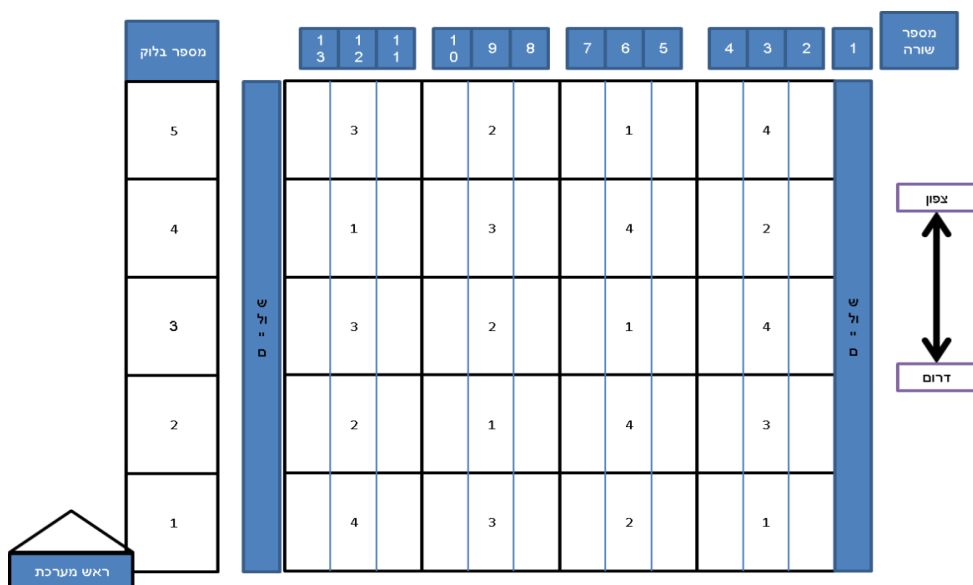
טיפול	2011 (מ"מ/עונה)	2012 (מ"מ/עונה)
יומי	810.09	916.24
דו יומי	793.93	-----
ארבעה יומי	796.92	913.24

שבועי	-----	908.87
8 יומי	794.29	-----
התאדות PM	877.90	984.10

נספח 3- אופן חלוקת הבלוקים ופיזור הטיפולים בשטח  
ניסוי 1 עונת 2011, 2012 וניסוי 2 עונות 2011/12, בהתאמה

מספר שורה	מספר בלוק							מספר שורה
	2	1	1	1	1	1	1	
5	1	4	2	6	3	5	צפון ↑ ↓ דרום ראש מערכת	
4	2	6	5	3	1	4		
3	4	1	6	2	5	3		
2	5	2	3	1	4	6		
1	4	3	6	5	2	1		

מספר שורה	מספר בלוק							מספר שורה
	2	1	1	1	1	1	1	
5	1	6	2	4	5	3	צפון ↑ ↓ דרום ראש מערכת	
4	2	4	3	5	1	6		
3	6	1	4	2	3	5		
2	3	2	5	1	6	4		
1	6	5	4	3	2	1		



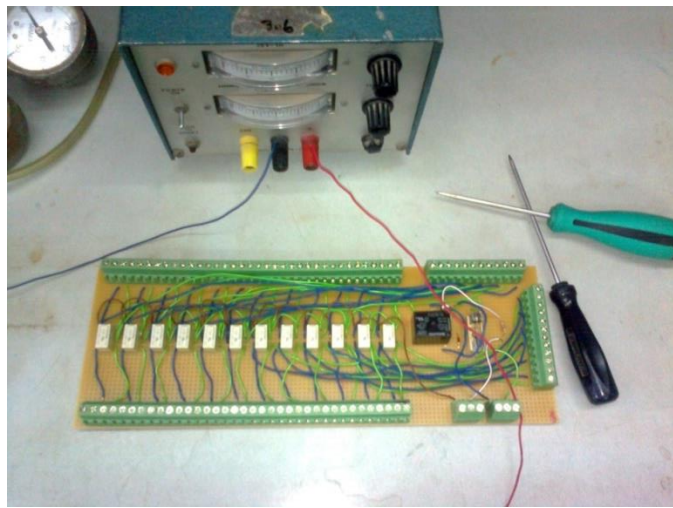
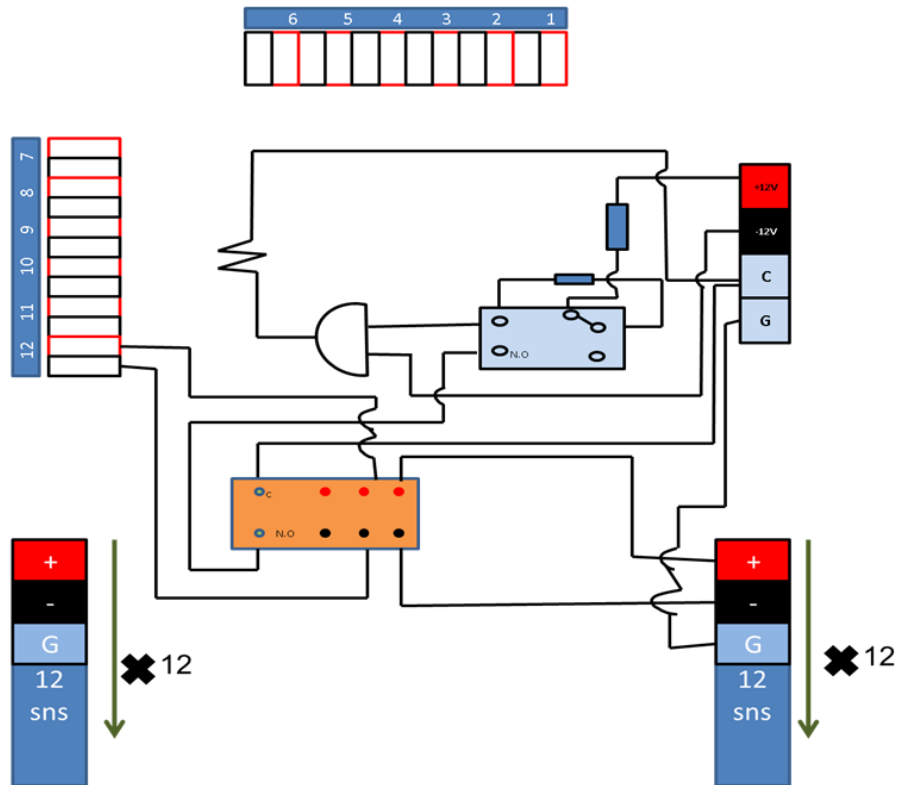
נספח 4- הטיפולים הנמדדים בשנת 2012 באמצעות חיישני ה- H.P.

תאריך	טיפולים נמדדים 2012
18.8-10.9	3,1
12.9-27.9	6,2
19.10-22.10	100%
25.10-30.10	333% , 100%
2.11-9.11	150% , 333%

נספח 5- מולטיפלקסר: שרטוט + תמונה

לאוגר הנתונים שבו השתמשנו היו 12 כניסות להן אפשר לחבר חיישנים, ומאחר שרצינו להשוות בין טיפולים שונים ולכל טיפול לחבר 12 חיישנים היינו צריכים להרחיב את הכניסות להן אפשר לחבר חיישנים. ההרחבה היא ל- 24 כניסות שעובדות לסירוגין.

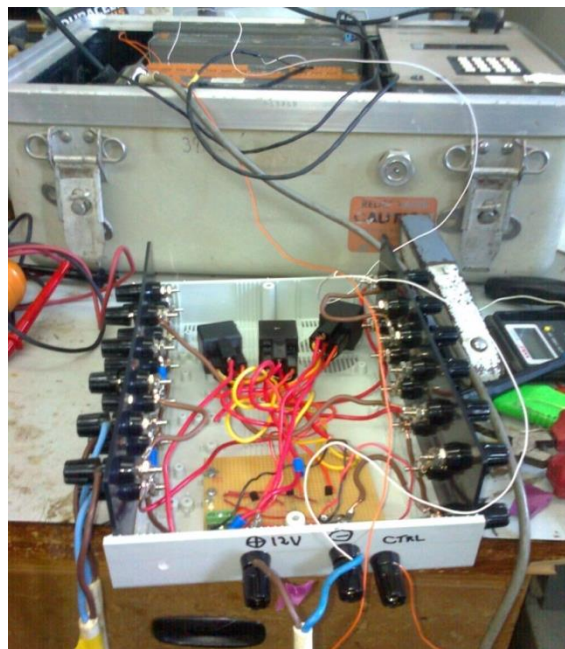
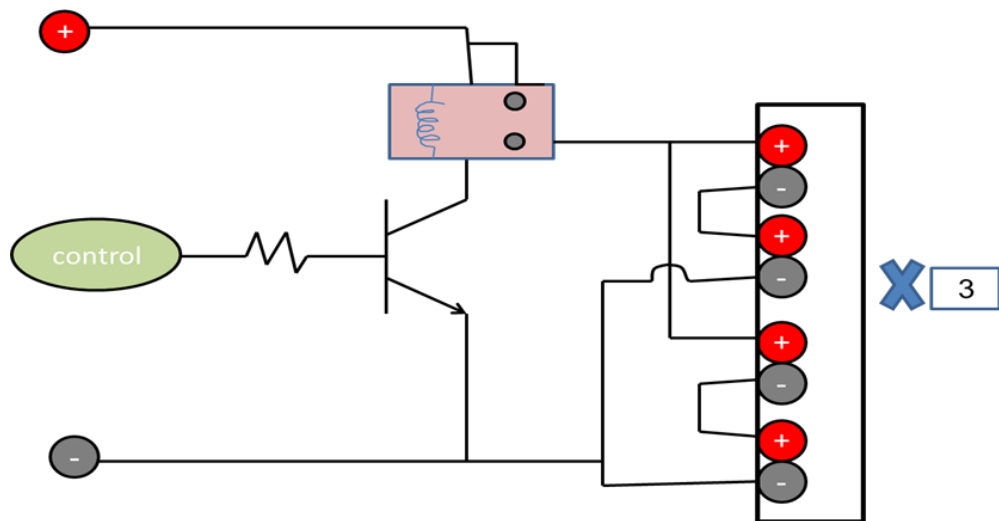
כניסה	הסבר
1-12	פורטים המחברים לאוגר הנתונים
+12/-12	חיבור לאוגר הנתונים
C	חיבור לבקרה (control) של אוגר הנתונים ואמור להפעיל כל 12 פורטים לסרוגין
G	אדמה- צריכה להיות משותפת בין החיישנים ואוגר הנתונים
-/+	חיבור החישן למולטיפלקסר



נספח 6: קופסאת פולס חום: שרטוט + תמונה

כדי למדוד הולכת מים בגבעול עלינו לייצר פולס זרם לכיוון מחטי החום בנינו את קופסאות פולס החום. הקופסא מחוברת בצד לאוגר הנתונים, ובצדדים ישנן 24 כניסות למחטי החום.

הסבר	כניסה
חיבור לאוגר הנתונים	+12/-12
חיבור לבקרה (control) של אוגר הנתונים ואמור להפעיל כל 12 פורטים לסרוגין	C (Control)
חיבור מחטי החום לקופסא	3* -/+



נספח 7 - מועדי קטיף ופירוק  
א. מועדי קטיף פירות

DAP 2012	תאריך 2012	DAP 2011	תאריך 2011	מספר קטיף
87	05/09	80	19/08	1
94	12/09	95	03/09	2
102	20/09	113	21/09	3
115	03/10	127	05/10	4
124	12/10	134	12/10	5
132	20/10	145	23/10	6
139	27/10	158	05/11	7

146	03/11	165	12/11	8
153	10/11	180	27/11	9
163	20/11	191	08/12	10
177	04/12	205	22/12	11
186	13/12			12
200	27/12			13
210	06/01			14

ב. מועדי פירוק הצמחים

תאריך	תאריך (DAP)	עונת גידול
29/7/2011	57	2011
13/12/2011	194	2011
2/8/2012	54	2012
13/1/2013	218	2012

נספח 8 - סטטיסטיקה באמצעות JMP

א. יבולים עונתיים מצטברים בששת הטיפולים בניסוי הראשון בשנת 2011. רמת המובהקות היא על-פי ניתוח ANOVA ומבחן student של 6 טיפולים ב-5 בלוקים.

Trt	TotNC n/dun	TotWC T/dun	TotFwC (gr/fr)	ExFwC (gr/fr)	ExNfC	ExWfC	DefNfC	BERNfC	UnFwC (gr/fr)
1DSirr	66697 a	11.367 a	171 a	182	0.713 a	0.759 a	0.248 bc	0.0210	143 a
2DSirr	65751 a	11.022 a	167 a	177	0.733 a	0.776 a	0.231 bc	0.0072	138 a
4DSirr	63522 a	10.343 a	163 a	176	0.666 a	0.719 a	0.283 b	0.0156	137 a
8DSirr	46090 b	6.845 b	145 b	179	0.426 b	0.508 b	0.520 a	0.0256	122 b
1DLirr	66164 a	11.350 a	172 a	181	0.734 a	0.772 a	0.193 c	0.0104	147 a
4DLirr	68462 a	11.502 a	168 a	182	0.682 a	0.737 a	0.253 bc	0.0132	137 a
Trt	0.0008	<.0001	0.0075	0.8869	<.0001	0.0004	<.0001	0.2585	0.0117
Blok	0.6153	0.0618	0.0130	0.1235	0.0146	0.0171	0.0103	0.0334	0.8698

ב. יבולים עונתיים מצטברים בששת הטיפולים בניסוי הראשון בשנת 2012. רמת המובהקות היא על-פי ניתוח ANOVA ומבחן student של 6 טיפולים ב-5 בלוקים.

Trt	TotNC n/dun	TotWC T/dun	TotFwC (gr/fr)	ExFwC (gr/fr)	ExNfC	ExWfC	DefNfC	BERNfC	UnFwC (gr/fr)
1Dirr	86078 ab	11.0524 a	110.185 b	0.855 a	0.309 a	85.457 a	0.151 c	0.0091 a	94.840 ab
4Dirr	72108 bc	8.172 bc	115.038 b	0.779 a	0.390 a	85.278 a	0.196 bc	0.0055 a	96.859 ab
7Dirr	66394 c	7.565 bc	165.110 a	0.669 b	0.188 a	233.58 a	0.274 a	0.01216 a	97.780 ab
1Dirr-7Dirr	86475 a	6.244 c	146.716 ab	0.632 b	0.2230 a	92.973 a	0.239 ab	0.0176 a	107.414 a
7Dirrto1Dirr	67187 c	6.368 c	133.878 ab	0.687 b	0.300 a	77.472 a	0.261 a	0.0087 a	94.700 ab
1Dirrto7Dirr	70719 c	8.469 b	113.638 b	0.810 a	0.056 a	92.463 a	0.165 c	0.0091 a	80.161 b



Trt	0.019	0.0009	0.0001	0.474	0.585	0.0004	0.532	0.431
Blok	0.343	0.7828	0.008	0.426	0.461	0.004	0.416	0.827

ג. יבולים עונתיים מצטברים בארבעת הטיפולים בניסוי 2 בשנת 2011. רמת המובהקות היא על-פי ניתוח ANOVA ומבחן

student של 4 טיפולים ב-5 בלוקים.

Treatment	TotNC n/dun	TotWC T/dun	TotFwC (gr/fr)	ExFwC (gr/fr)	ExNfC	ExWfC	DefNfC	BERNfC	UnFwC (gr/fr)
30*100%	71485 a	12.031 a	169 a	179 a	0.722 a	0.769 a	0.215 b	0.024 c	140 a
100*100%	48106 b	5.069 d	106 c	154 b	0.324 c	0.471 c	0.438 a	0.383 a	82 d
100*150%	57644 b	7.453 c	130 b	154 b	0.477 b	0.564 b	0.384 a	0.163 b	108 c
100*333%	54874 b	8.878 b	162 a	180 a	0.678 a	0.753 a	0.244 b	0.016 c	125 b
Trt	0.0030	<.0001	<.0001	0.0002	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Block	0.3485	0.1230	0.6789	0.7092	0.4366	0.1961	0.8411	0.5944	0.2957

ד. יבולים עונתיים מצטברים בארבעת הטיפולים בניסוי 2 בשנת 2012. רמת המובהקות היא על-פי ניתוח ANOVA ומבחן

student של 4 טיפולים ב-5 בלוקים.

Treatment	TotNC n/dun	TotWC T/dun	TotFwC (gr/fr)	ExFwC (gr/fr)	ExNfC	ExWfC	DefNfC	BERNfC	UnFwC (gr/fr)
30*100%	54925 a	7.963 c	0.144 a	6.248 ab	0.721 a	0.796 a	0.254 c	0.0029 b	9.394 b
100*100%	70997 a	6.339 d	0.088 c	6.686 a	0.276 c	0.465 c	0.528 a	0.345 a	15.381 a
100*150%	83776 a	10.806 b	0.129 b	6.632 ab	0.580 b	0.675 b	0.365 b	0.0455 b	10.089 b
100*333%	84848 a	12.494 a	0.147 a	6.156 b	0.695 a	0.767 a	0.275 c	0.000 b	8.894 b
Trt	0.0007	0.001	0.0001	0.073	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Block	0.8438	0.979	0.527	0.114	0.362	0.172	0.0472	0.653	0.669

## Abstract

Agriculture in Israel is mainly irrigation-dependent and as fresh water in the semi-arid climate is both expensive and scarce, water application should be highly efficient. The most common irrigation practice in Israel is drip irrigation and the initial design and setup of such systems govern the productivity of the irrigation. As a role, drip irrigation should supply controlled quantities of water to limited and effective soil volume and minimize water losses by evaporation and deep percolation. Furthermore, optimal irrigation application requires accounting for the conduction and retention traits of water in soil. There are two important parameters determining the water regimes in a specific geometry of drippers at a given irrigation scheduling: 1)  $\alpha$  – describing the relative role of capillary and gravitational forces in driving the water; and 2)  $k_{\text{eff}}$  - the variation in hydraulic conductivity with water content. Design of a drip system incorporates the geometry of emitters, emitter discharge rates, irrigation quantities, scheduling, and duration of watering events. The parameters to consider in the design of such irrigation system are plants distribution, soil hydraulic properties, root zone geometry, water salinity, required nutrients, and soil aeration. Towards this end a new approach for unsteady water flow in soil and plant water uptake which is simple and requires only a few inputs, was proposed. Moreover, this model was computerized and is now available as standalone software called DIDAS (Drip Irrigation Design and Scheduling). This approach integrates calculations of relative water uptake rate (RWUR) in a system of sources (emitters) and sinks (roots). While former models required previous knowledge of the relative water uptake rate (sink to source discharges ratio) and evaluated the water potential in the root zone, our method performs the inverse process. In this work we have validated the feasibility and accuracy of irrigation settings by DIDAS application in a specific case-study – bell pepper irrigation in a loam soil. Our working hypotheses were: 1) low irrigation frequencies will inhibit root water uptake, growth and yields, 2) low irrigation frequencies will result in uniform daily water uptake between two irrigation events, and 3) independent on irrigation frequencies plants will absorb less than 50% from the applied water. Thus, our objectives were: 1) to examine the effects of irrigation scheduling in a loam soil on plant water uptake, growth and yields, 2) to compare the field results with our model of unsteady water flow and uptake.

During the years of 2011 and 2012 we conducted an experiment in a screen house located in the Besor experimental farm, Southern R&D. The treatments in the experiments were different during the years: 2011 – short and long daily irrigations versus two, four (short & long), and eight days intervals between irrigations; 2012 – daily irrigations, four days intervals, seven days intervals, and alternate irrigation (i.e. switching between daily and weekly irrigation regimes). In addition, a preliminary experiment compared irrigations with different water amounts. The following measurements were made:

- Crop:
  - Height, weight, and yield at different timing through the growing season.
  - Water uptake as measured by sap flow.
  - Modeling water uptake by plants using DIDAS model.
- Soil;
  - Water content and salinity at four depths (5, 15, 25, 35 cm) and four distances from plant (5, 15, 25, 35 cm).
  - Water tension at three depths (15, 25, 35 cm) near the emitter (5 cm) and at a depth of 35 cm, 20cm from the emitter.

Our work demonstrated that irrigation frequencies effected the growth and yields of bell pepper; increasing the irrigation frequency resulted in an increase of plants height, yields quantity, and yields quality. For instance, transition between four days to eight days intervals (between irrigations) caused a 50% reduction in yields and 50% increase of unfit fruits. However, no treatment resulted in excesses salinity in the soil. The variations of water content and salinity between the morning and afternoon demonstrated that most of the water was absorbed by roots in the vicinity of emitters. The plants diurnal water uptake was characterized by sharp rise in the morning, stabilization through noon, and a drop in the afternoon. The reduction of the irrigation frequencies caused only a small reduction in water uptake. The reported uniformity of water uptake in the days between irrigations at lower irrigation frequencies was probably due to retention of water or activation of deeper root in the soil, as demonstrated by deeper roots zones. Moreover, water uptake in the daily treatments was 30% of irrigation amount; this meets the results of water balance in the soil which indicated 45% losses (including evaporation and deep percolation). Furthermore, the DIDAS model produced a similar scenario for a short daily irrigation with  $\alpha=0.038 \text{ cm}^{-1}$  and  $k_{\text{eff}}=2 \text{ cm/hr}$  - the relative water uptake volume was 33.7% (excluding evaporation and

deep percolation). Further adaptation of the model to lower irrigation frequency was attained by assigning the  $k_{\text{eff}}$  to a lower value (1, 0.1 cm/hr) and increasing the plant resistant factor.

To conclude, the DIDAS model supports the experimental findings that high irrigation frequencies lead to elevated plant water uptake. The model highlights the importance of irrigation scheduling in relation to soil type as water uptake by plants depends on good synchronization between plant activity and water application. Once soil and plant properties were sufficiently characterized, and irrigation frequency was set, the model produced a sound description of daily variations in water uptake, including the case of low frequency irrigation regimes. Thus, this work presents a successful case study of evaluating the effect of irrigation scheduling according to the DIDAS model and encourages future research and field applications of the model for different crops, irrigation requirements and soil characteristics.

*Examination of the new approach to design drip irrigation -  
according to the criterion of relative water uptake volume*

Thesis

Submitted to the Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food and  
Environment

The Hebrew University of Jerusalem

For the degree  
"Master of Science"

By

Shani Sperling

Rehovot, Israel

December 2013