

דו"ח לתכנית מחקר מספר 20-16-0010

דו"ח מסכם

שנת המחקר: 3 מתוך 3 שנים

## גישות להבנה, אפיון וניצול תהליכי פיצוי קליטת מים בצמחים

### Approaches to understanding, handling, and manipulating compensative uptake of water by plants

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ולהנהלת ענף פרחים

ע"י

אלון בן-גל	קרקע מים וסביבה, מינהל המחקר החקלאי, גילת
אהוד צאלים	קרקע ומים, מו"פ ערבה דרומית
אפי טריפטר	קרקע ומים, מו"פ ערבה תיכונה וצפונית
חגי יסעור	מדעי הצמח, מינהל המחקר החקלאי, גילת
אורי נחשון	קרקע מים וסביבה, מינהל המחקר החקלאי, וולקני

Alon Ben-Gal, Soil Water and Environmental Sciences, ARO, Gilat Research Center, mobile post Negev 85280.

E-mail: [bengal@volcani.agri.gov.il](mailto:bengal@volcani.agri.gov.il)

Ehud Zeelim, Southern Arava R&D, mobile post Eilat, [ehudzeelim@gmail.com](mailto:ehudzeelim@gmail.com)

Effi Tripler, Central and Northern Arava R&D, P.O.B.. E-mail: [effi@arava.co.il](mailto:effi@arava.co.il)

Hagai Yasuor, Plant Sciences, ARO, Gilat Research Center, mobile post Negev 85280. E-mail: [hagai@volcani.agri.gov.il](mailto:hagai@volcani.agri.gov.il)

Uri Nachshon, Soil Water and Environmental Sciences, ARO, Volcani Center, POB 6 Rishon L'Zion, E-mail: [urina@volcani.agri.gov.il](mailto:urina@volcani.agri.gov.il)

### תקציר

ההיפותזה העיקרית של העבודה הייתה ששורשים מפצים בצורה מוחלטת על תנאים שאינם אופטימליים כל עוד שיש תנאים טובים בחלק מבית השורשים. **מטרות המחקר** היו: א) לאפיין את תופעת פיצוי קליטת מים ע"י שורשים בתנאי מליחות ויובש. ב) לאפיין את השפעת השורשים על פיזור מרחבי של המים, יסודות ההזנה והמלחים בקרקע. ג) להבין את המנגנון/ים לתופעת הפיצוי. ד) לשלב את המסקנות שיתקבלו במודלים ספרתיים. עבדנו בשלושה שיטות מחקר חדשניות על מנת לכמת ולגלות תהליכי פיצוי על ידי שורשים: I) מערכות "טפטנסיומטרים" (IOD) השלבים טפטפות וחיישני פוטנציאל מים ומאפשרים כימות של תהליכי ייבוש על ידי שורשים כאשר תנאים בחלק של בית השורשים משתנים בתנאי שטח, II) ליזימטרים המאפשרים כימות ומיפוי מרחבי של צפיפות שורשים, ו-III) מערכות גידול של שורשים מפוצלים SPLIT ROOT המפרידות שורשים של צמח בודד לשני חלקים. פיצול השורשים התבצע הן בקולונות מתנאי בקרה מוחלטת והן בליזימטרים נשקלים בתנאי חממה מבוקרת. נמצא כי אכן יש פיצוי בקליטת מים על ידי שורשים ואכן כאשר שורשים מורידים את כמות וספיקת הקליטה כאשר נחשפים לתנאי עקה, שורשים אחרים באותו הצמח, הנמצאים בסביבה טובה יותר, מגבירים את הקליטה. בתנאים מבוקרים הפיצוי מתקרב למלא. זאת אומרת שעליה בקליטה בחלק של בית השורשים בתנאים טובים שווה לירידה בחלק המועק. בתנאי שטח הפיצוי שהתקבל היה חלקי, ומכך ניתן לשער כי בכל זאת הצמח מגיב לסיגנלים פיזיולוגיים של עקה ולא מתנהג לגמרי בצורה פיזיקאלית. לתוצאות משמעות למידול מערכות של קרקע-מים-צמח. הדגמנו שפתרונות מכאניסטיים אפשריים ומשפרים את חישוב וכימות הפיצוי בקליטת מים בשיטות נומריות.

### מעריכים מומלצים לבדיקת הדוח המדעי

1. פרופסור נפתלי לזרוביץ
2. ד"ר שמוליק פרידמן
3. פרופסור יוסי שלהבת

.....

**הצהרת החוקר הראשי:**

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: כן/לא ( מחק את המיותר )

**\*במידה וכן, על החוקר להמציא פרטים על הגוף שבאמצעותו מופץ הידע (כמו: שה"ם)**

\_\_\_\_ 25/04/19 \_\_\_\_

א. י. כ. א.

חתימת החוקר תאריך:

## תוכן עניינים

4	מבוא
4	מטרות המחקר
5	פירוט עיקרי הניסויים ותוצאות המחקר
5	תוצאות
5	ניסויי מדידת קליטת מים בתנאי שטח
9	ניסויי שורשים מפוצלים בתאי שורשים מבוקרים
11	ניסויי שורשים מפוצלים בליזימטרים נשקלים
15	ניסויי מיפוי שורשים
16	אימות ניסוח של מודל מאקרוסקופי לקליטת מים על ידי שורשים
19	דיון
21	ביבליוגרפיה

גישות להבנה, אפיון וניצול תהליכי פיצוי קליטת מים בצמחים

Approaches to understanding, handling, and manipulating compensative  
uptake of water by plants

תכנית: 20-16-0010

**מבוא.** ההתפלגות המרחבית של שורשי צמחים הינה פועל יוצא של התאמתם לתנאים משתנים בקרקע במרחב ובזמן. שורש בודד נחשף לשינויים בכמות/זמינות מים, כמות/זמינות חומרי הזנה וריכוזים של מלחים כאשר מים זורמים דרך הקרקע ומתקיימים תהליכים של חלחול, פיזור, קליטת מים ואידוי. התפלגות המרחבית של הרטיבות וריכוז היונים במערכות שורשים של צמחי תרבות אינו אחיד, בשל שונות מרחבית של תכונות הקרקע ושונות בפיזור המים על ידי מקור המים. לכן, שורש של צמח בודד נחשף לתנאים שונים של מים, חמצן, חומרי הזנה ומלחים לעומת שורשים אחרים של אותו הצמח. אין בספרות הרלוונטית מחקרים אשר מדדו פוטנציאל ו/או התנגדויות לזרימת מים בשורש ו/או בפן הבייני שבין הקרקע והשורש.

היפותזה. אנחנו השתמשנו בטכנולוגיות חדשניות לאפיון קליטת מים על ידי שורשים של צמחים בודדים החשופים לתנאים שונים במרחב או תנאים משתנים בזמן. ההיפותזה העיקרית של העבודה הייתה ששורשים מפצים בצורה מוחלטת על תנאים שאינם אופטימאליים. זאת אומרת שכל עוד ישנם מים, חומרי הזנה וחמצן מספקים בחלק מסוים של בית השורשים, הצמח לא יושפע בצורה שלילית מתנאים לא טובים (יבשים/דלים בחומרי הזנה/חמצן נמוך/מליחות גבוהה) באזורים אחרים של בית השורשים. הפיצוי מאפשר לצמחים להשוות את הדיות שלהם לזו הפוטנציאלית גם כאשר חלק מבית השורשים נמצא בתנאים לא טובים (יבשים/דלים בחומרי הזנה/חמצן נמוך/מליחות גבוהה).

הפיצוי יכול להיות מוסבר באחת או יותר מהדרכים (היפותזות משניות):

(א) קליטה דיפרנציאלית: סגירה או פתיחה של מנגנוני קליטת מים על פי תנאים יחסיים. (ב) רצף הידראולי: חיבור הידראולי בין שורשים מאפשר קליטה דיפרנציאלית כתלות במנגנון פיזיקאלי של חיפוש תנאי שיווי משקל. (ג) גידול שורשים יחסי: קצב גידול שורשים מוגבר אל ובתוך אזורים בעלי תנאים משופרים. צפיפות שורשים גדולה מאפשרת קליטת מים מוגברת. (ד) זרימת מים לפי מפלי פוטנציאליים אמיתיים המחושבים בקנה מידה נכון: חישוב של זרימת מים מהקרקע לשורש המבוסס על סה"כ סכום של הפוטנציאל המטריצי והפוטנציאל האוסמוטי בקרקע ומייצג באופן נכון בקנה מידה של השורש ולא של כל מערכת השורשים.

**מטרות המחקר:** (1) לאפיין את תופעת פיצוי קליטת מים ע"י שורשים בתנאי מליחות. (2) לאפיין את

השפעת השורשים על פיזור מרחבי של המים, יסודות ההזנה והמלחים בקרקע. (3) להבין את המנגנונים לתופעת הפיצוי. (4) לשלב את המסקנות שיתקבלו במודלים ספרתיים.

התוכנית היא מחקר בסיסי והקדמי בנושא עקרוני ומהותי חשוב בניהול מים בחקלאות. הצלחת התוכנית בשלב ראשון תלויה בהמשך מחקר ופיתוח השיטות, והצעות המשכיות.

## פירוט עיקרי הניסויים ותוצאות המחקר

מספר גישות הופעלו על מנת לאפיין קליטת המים על ידי מערכת שורשים בתנאים לא אחידים. נעשה שימוש במערכות "טפטנסיומטרים" (IOD) משלבות טפטפות וחיישני פוטנציאל מים, ליזימטרים המאפשרים כימות ומיפוי מרחבי של צפיפות שורשים, ומערכות גידול SPLIT ROOT המפרידות שורשים של צמח בודד לשני חלקים או יותר. הכלים שמשמשים למחקר:

**"טפטנסיומטרים" (IOD)** . פותח על ידי פרופסור אורי שני ושותפיו כחלק ממערכת השקיה אוטומטית (Dabach and Shani, 2010; Dabach et al., 2015) הנקראת IOD (השקיה לפי צריכת הצמח – irrigation on demand). החיישן משלב מקור מים ומדידה של פוטנציאל מטריצי בתווך מלאכותי אחיד (גאוטקסטיל) המעודד התפתחות שורשים סביבו. הפוטנציאל הנמדד על ידי החיישן מושפע משינויים בפוטנציאל השורש ללא השפעה של הקרקע מסביבו. אנחנו השתמשנו בחיישנים אלה ליצירה ומדידה של אזורי גידול מוגדרים ומופרדים של שורשים המאפשרים השראת תנאים שונים ומבוקרים, ולא לייעודם המקורי כחיישני בקרת השקיה.

**תאי גידול שורשים (ליזימטרים מאפשרים שטיפת קרקע ומדידת פיזור שורשים במרחב)**. גידול במיכלים (ליזימטרים) שקופים (או לא) בעלי תחתית מתפרקת. על ידי הורדה של תחתית הליזימטר ושטיפת הקרקע סביב השורשים בזמנים שונים אפשר למפות את פיזור השורשים וצפיפותם במרחב ובזמן. מבנה הליזימטר יוצר חלוקה של נפח בית השורשים לנפחי משנה. כאשר הקרקע נשטפת השורשים נשארים במקומם וניתן לכמת את צפיפותם בכל נפח משנה.

**מערכות SPLIT ROOT מבוקרות**. נבנו מערכות המאפשרת פיצול בית השורשים של צמח בודד לשני חלקים מופרדים. בכל חלק היה ניתן לספק תנאי גבול מוגדרים/מסוימים ולמדוד את השפעתם על קליטת המים.

מערכת ה-SPLIT ROOT 1, הוצבה בחממה בה תנאי אקלים מבוקרים במו"פ ערבה דרומית. בתא אפשרות בחירת גובה המשטח הפריאטי (מפלס המים). תמיסת ההזנה מבוססת על מים מותפלים או מים מליחים.

מערכת ה-SPLIT ROOT 2, הוצבה בחממה המחקרית בגילת. במערכת 16 סטים של זוג עציצים, כל עציץ מונח על משקל ומחובר למערכת השקיה ואיסוף נקז אוטומטיים. תמיסות ההשקיה מבוססות על מים שפירים (מותפלים) או מים מליחים שהוכנו מראש.

## תוצאות:

### ניסויי מדידת קליטת מים בתנאי שטח

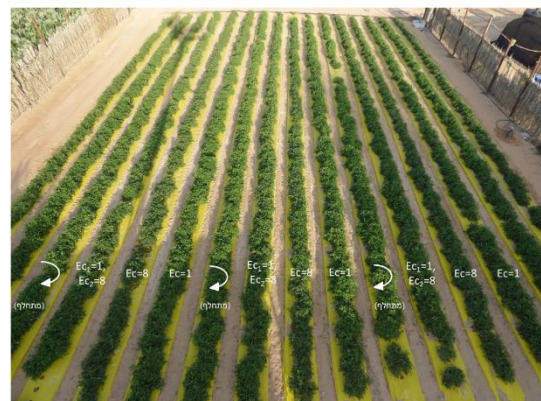
במערכת IOD נבחנה קליטת מים ופיצוי בקליטה מחלקי בית השורשים הנמצאים תחת השראת רמת מליחות שונה (איור 1). המערכת נמצאת במו"פ ערבה דרומית ומשמשת לניסויים בירקות/גידולי שדה בשטח של כ-0.5 דונם). המערכת הופעלה ב-2017 ו-2018 בגידול עגבניות ונבחנה בתנאי שדה השפעה של השראת מליחות משתנה באזור השורשים הנמדדים (על ידי IOD) לפרקי זמן קצרים, ומדידה של קליטת מים מכל אזור ואזור בבית השורשים במהלך בתקופות אלה.

בניסוי ההקדמי ב-2016 במערכת זו נצפתה תגובה מיידית ומשמעותית לשינוי איכות המים המיושם בחלק ממערכת השורשים על קצב קליטת המים מסביבת חלק זה.

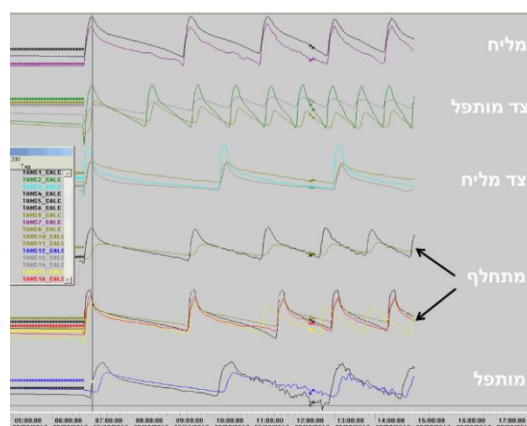
באיור 1 ניתן לראות את הצבת מערכת ההשקיה: אופן הצבת מערכת בקרת ההשקיה האוטונומית (IOD) היתה על כל שלוחה באופן עצמאי לחלוטין ללא תלות בשלוחה השנייה. חיישני ה- $IOD$  הם חיישנים תת קרקעיים, ולכן מקטע הטפטוף טמון וצמוד לחיישנים המיוחדים באזור הצבתם. מערכת ההשקיה בניסוי כללה הצבה של שלוחת טפטוף בודדת בכל צד של שורת הגידול ובמרחק אחיד (10 ס"מ) משורת השתילה, כלומר שתי שלוחות לכל שורת גידול. בתחילת הניסוי בעת התבססות הצמח ומערכת השורשים מתבצעת השקיה בכמות (מנה) זהה בשתי השלוחות. לאחר הגעה לבית שורשים משמעותי וסימטרי ככל הניתן מתבצע מעבר להשקיה על ידי בקרת  $IOD$ . בטיפול 1,2 חיישן אחד קובע את תזמון ההשקיה. בטיפולים 3,4 ההשקיה נקבעת עבור כל שלוחה מכל צד של שורת הגידול בנפרד (מערכות עצמאיות) על ידי שני חיישנים המודדים את ערך העומד המטריצי בחצי בית השורשים הרלוונטי. קביעת תזמון ההשקיה מתבצעת על פי אלגוריתם שפותח במו"פ. ערך הסף להשקיה הוא ערך העומד מטריצי ( $\Psi$ ) בהגעה לקיבול שדה (בבוקר שלאחר השקיית לילה טכנית). למעשה ההשקיה בפועל מתבצעת במנה שנקבעת ע"י המפעיל ( $0.75$  מ"מ עובי פולס השקיה בניסוי זה) כך שבטיפולים 1,2 ו-3 אין התערבות של המפעיל ולאורך עונת הגידול ההשקיה מתבצעת באופן אוטומטי לחלוטין. בטיפול 4, כאשר המערכת מגיעה לתדירות השקיה קבועה וזהה בין שני חצאי בית השורשים בתנאי השקיה באיכות מים טובה ( $EC=0.9$  ds/m) המיושמים משתילה ועד התבססות הצמחים, מוחלפת איכות המים באחת מהשלוחות לאיכות נמוכה ( $EC\sim 7$  ds/m). החל מרגע השינוי באיכות המים נמדדת ומתועדת תגובת מערכת ה- $IOD$  השולטות בשני חצאי בית השורשים, כאשר אנו מצפים לשינויים בתדירות ההשקיה בכל צד בהתאם לאיכות המים המיושמת בו. באופן זה, מערכת ה- $IOD$  משמשת למעשה ככלי למדידת עוצמת העקה מחד (בצד המועק) ועוצמת הפיצוי מאידך (בצד בו איכות המים טובה). ב-2018 הניסוי בוצע באופן דומה לניסוי ב-2017 אך הפעם נבחר הזן ניקוס במטרה להגדיל את רגישות הצמח הנבחן לעקת המלח (הזן 5656 שנבחן בשנת הניסוי הראשונה גילה עמידות גבוהה מאד למליחות).

באיור 2 ו-3 ניתן לראות כיצד משתנה קצב ההשקיה, הנתמך בבקרה אוטונומית של מערכת  $IOD$ , כאשר איכות המים בצדה האחד של שורת הגידול משתנה. הצמח הגיב לשינויים באיכות המים בשני הצדדים ובהתאם למידת העקה משתנה קצב הקליטה.

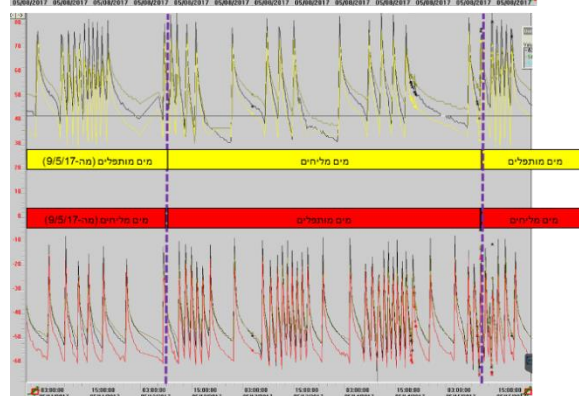
**איור 1:** מערכת ניסוי הנתמכת בבקרת מערכת  $IOD$  לבחינת קליטת המים ופיצוי בקליטה מאזורי בית השורשים הנמצאים תחת השראת רמת מליחות שונה.



איור 2: קצב ההשקיות משתנה בהתאם לסוג המים שמישום בכל שלוחה. השקיה בתדירות גבוהה מעידה על קצב קליטת מים גבוה של השורשים באותו אזור.



איור 3: מהלך של תגובה החיישנים המעידים על שינוי קצב ההשקיה (קליטה) כתלות בשינויים באיכות המים.



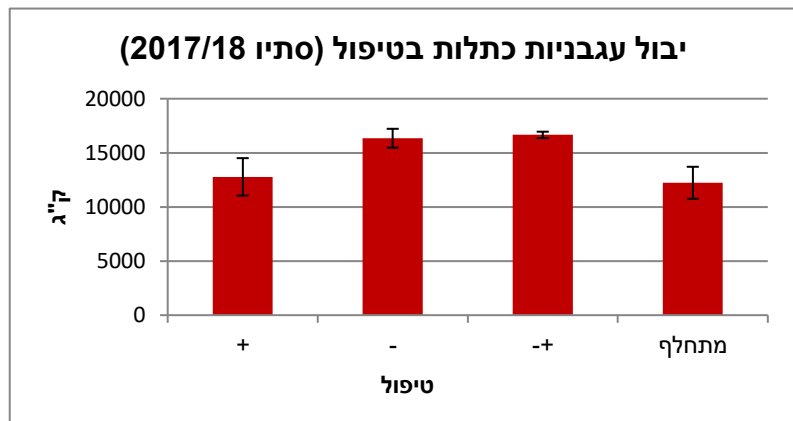
יבול: באיור 4 ניתן לראות שהתקבלו הבדלים גדולים ומובהקים ביבולים מארבעת הטיפולים, כאשר בטיפולים 2 ו-3 התקבלו יבולי הפרי הגדולים ביותר בניגוד לציפיות (טיפול 2 הוא טיפול איכות המים הנמוכה בשני צידי מערכת השורשים). היבול הכללי בחלקה היה גבוה באופן יחסי, כ-14 טון לדונם (כולל פחת של כ-20%). בבדיקות מעבדה לפרי שנקטף במהלך פברואר 2018 במהלך 4 קטיפים לבדיקת פרמטרים איכותיים וכמותיים שונים המשפיעים על איכות הפרי ומעידים על אורך חיי המדף נמצא שכ-50% מהיבול נמצא לא ראוי לשיווק/למאכל לאחר כ-10 ימים בטמפרטורה של  $12^{\circ}\text{C}$  מעלות ויומיים נוספים בטמפרטורה של  $20^{\circ}\text{C}$ . הסיבה לאחוז גבוה כל כך של נגיעות נובעת ממועד קטיף שהתאחר ובעיות הגנ"צ בחלקה.

בניסוי השנה ניסינו לבחון את כמויות המים המצטברות שנצרכו בטיפולים השונים, ואת יעילות השימוש במים אלה. נמצא, שכאשר איכות המים הייתה נמוכה יותר, נצפתה עלייה ביעילות השימוש במים. (איורים 5 ו-6)

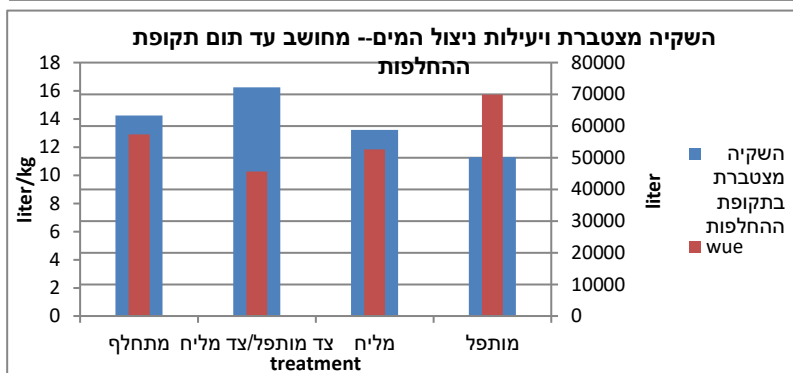
בטיפול 4 נבחנת תגובה קצרת טווח של הצמח לעקה על מחצית בית השורשים, המתבטאת בתדירות ההשקיה התלויה בקצב קליטת המים באזור חיישן ה- IOD בקרקע. בתחילת עונת הגידול ניתנת השקיה באיכות מים טובה ( $0.9 \text{ דצ"ס/ס"מ}$ ) ובכמות זהה (על פי דרישת מערכת IOD) בשתי שלוחות הגידול. כאשר מערכת השורשים היתה מבוססת דיה (לאחר כ-30 ימי גידול) הוחלפה איכות המים בשלוחה אחת ומערכת הבקרה האוטונומית המשיכה לקבוע את תדירות ההשקיה באופן עצמאי עבור כל אחת משתי השלוחות. ע"כ התקבלה תדירות השקיה שונה עבור כל שלוחה בהתאם לדרישה באותו צד של מערכת השורשים. החלפות איכות המים התבצעו כאמור לפרקי זמן

קצרים יחסית על מנת להפחית ככל הניתן את האפשרות לתגובה הנובעת מהשפעה ארוכת טווח על מערכת השורשים ומנגנוני פיצוי הנגזרים מתגובה זו. במהלך החלפות איכות מים בשני צידי בית השורשים, ניתן לראות כיצד משתנה קצב ההשקיה, הנתמך בבקרה אוטונומית של מערכת IOD, כאשר איכות המים בצדה האחד של שורת הגידול השתנתה. איכות המים המסופקת לשלוחה גרמה להקטנה (במקרה של מעבר למים באיכות נמוכה) או הגברה (במקרה של מעבר למים באיכות גבוהה) של תדירות ההשקיה. סכימה של מספר אירועי ההשקיה (איור 7) לפרק זמן נתון היא כמות המים שנצרכה על ידי המערכת (דיות, אידוי, וחלחול אל מתחת לבית השורשים) ומבטאת במידה ניכרת שינויים בקצב קליטת המים של שני חלקי בית השורשים. איור 8 מציג את תוצאות צריכת המים היומית בטיפול 4 במשך תקופת החלפות איכות המים בשתי שלוחות הטיפול. כמות המים היומית נגזרה מאיכותם, כך שירידה באיכות המים הובילה לירידה בכמות הנצרכת, ולהיפך. עם זאת, הצד שקיבל את איכות המים הטובה לא צרך כמות המהווה פיצוי מלא על הירידה בקליטה בצד המועק. תוצאות אלה דומות לתוצאות שהתקבלו בניסויים ב-2017.

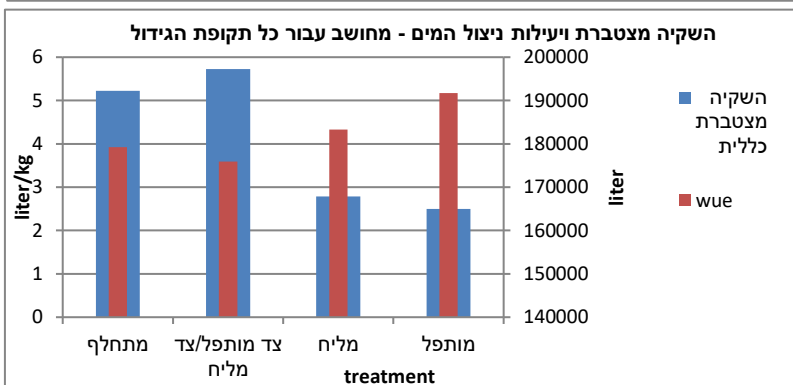
**איור 4:** יבול לדונם כתלות בטיפול באיכות המים. טיפולים 2 ו-3 השיאו יבולים מרביים, לא נצפתה תגובה שלילית לאיכות מים נמוכה.



**איור 5:** סכימת כמויות המים שנצרכו ע"י כל טיפול בחודשיים הראשונים של הגידול (עד סיום תקופת החלפות איכות המים בטיפול המתחלף) ויעילות ניצול המים המתאימה (ליטר/ק"ג). ככל שהערך (liter/kg) קטן יותר כך היעילות גבוהה יותר.

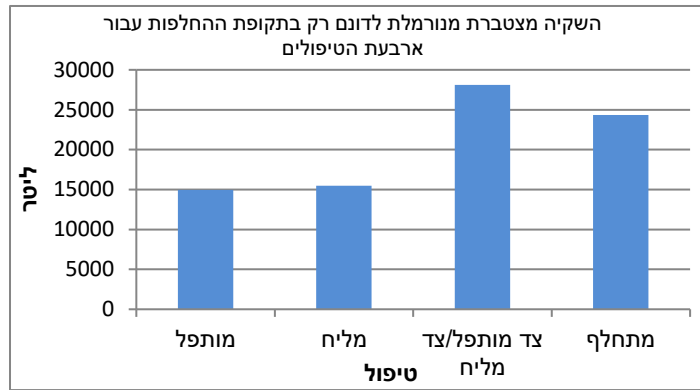


**איור 6:** סכימת כמויות המים שנצרכו ע"י כל טיפול במהלך כל עונת הגידול. ויעילות ניצול המים המתאימה. ככל שהערך (liter/kg) קטן יותר כך היעילות גבוהה יותר. לא נמצאו הבדלים מהותיים ביחסיות בין הטיפולים ביעילות ניצול המים בהשוואה בין כל תקופת הגידול לתקופה הראשונה שכללה את החלפות בטיפול 4 (תרשים 2).

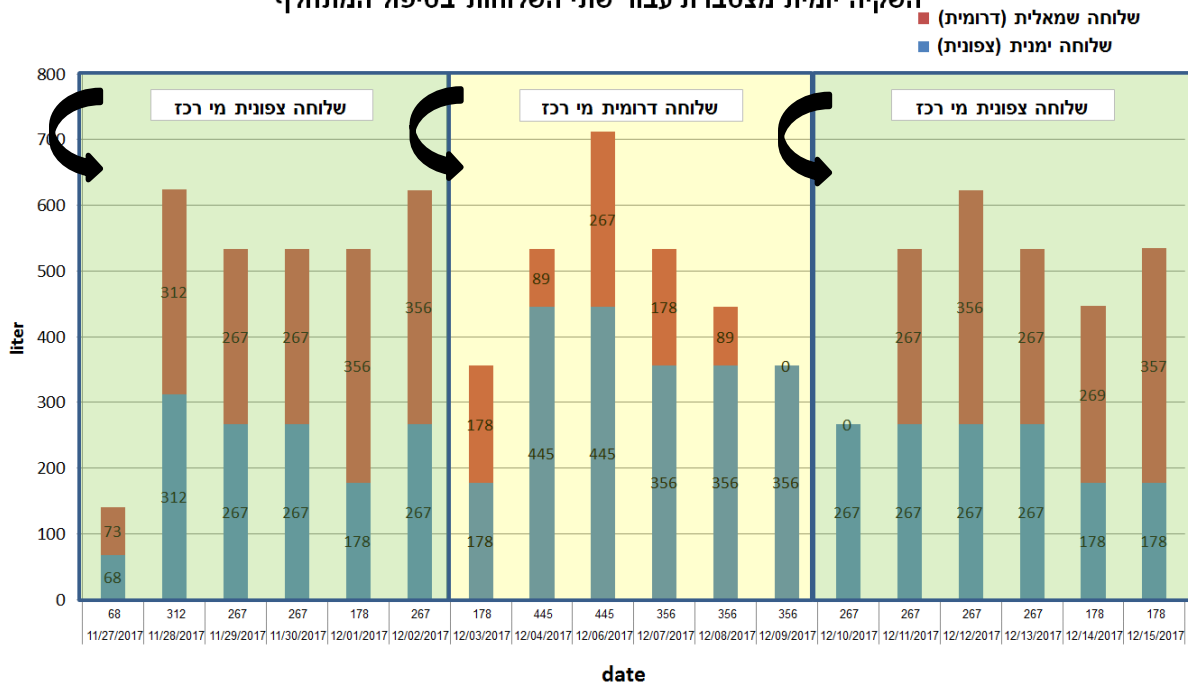




- איור 7: סכימת כמויות המים שנצרכו ע"י כל טיפול במהלך שלושת השבועות בהם התבצעו החלפות איכות המים בטיפול 4.



השקיה יומית מצטברת עבור שתי השלוחות בטיפול המתחלף



איור 8: סיכום תוצאות החלפת איכות המים בין שני חלקי בית השורשים בטיפול 4 במערכת 1. החלפת איכות המים בין שני הצדדים (מסומנת בחצים שחורים) גרמה לתגובה המתבטאת בתדירות הפעלת השקיה על ידי מערכת ה- IOD המלמדת על שינויים בקצב קליטת המים באזורים השונים בבית השורשים.

### ניסויי שורשים מפוצלים בתאי שורשים מבוקרים

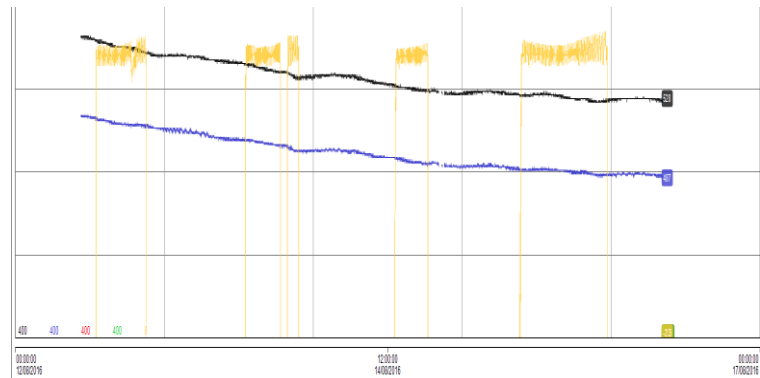
במו"פ ערבה דרומית בוצע שדרוג והפעלה של תאי גידול שורשים (איור 9), ובוצעו ניסויים על מנת לבחון משטרי המלחה ושטיפה המאפשרים מעקב אחר תפקודם של חלקים שונים במערכת שורשים של צמח בודד תחת תנאי רטיבות שונים בשני חלקי מערכת השורשים המפוצלת. מטרת הניסוי הייתה מדידת השינוי בקצב קליטת המים של חסה (ובהמשך ניסויים באבטיח ופלפל), כתלות בתכולת הרטיבות באזור בית השורשים. השוואה בין בית שורשים שלם בתנאים אחידים לבית שורשים מפוצל והשראת תנאי עקת מים על 50% מהשורשים. המערכת כוללת שני תאי גידול לא מפוצלים ותא גידול שורשים מפוצל. בכל תא נשתלו 5-6 שתילים (בהתאם לצמח הניסוי). תנאים בתחילת הניסוי היו: משטח פריאטי בעומק 25- ס"מ (מפני הקרקע) זהה בכל התאים (1-4). תאורה ייעודית (metal halide 800W) בכל מערכת (2 תאים בודדים, תא כפול, סה"כ 3 מערכות) מ-6:00:18:00. במהלך תקופת הגידול אפשר לציין מספר שלבים: א) שלב התאקלמות וביסוס מערכות

השורשים, ב) שלב השראת עקת מים בתא מפוצל ובתאים הלא מפוצלים, ג) שחזור תנאים הומוגניים לכל מערכות השורשים, על ידי טיוב התנאים באזור העקה, ושוב השראת עקת מים, הפעם על החלק השני של מערכת השורשים, ד) חזרה על שלב ב'. מדידות: קצב החזר מים לתאים (השלמת איבוד המים הנובע מאידוי, דיות, ומעבר מים בין תאים – בתאים 1,2 בלבד).

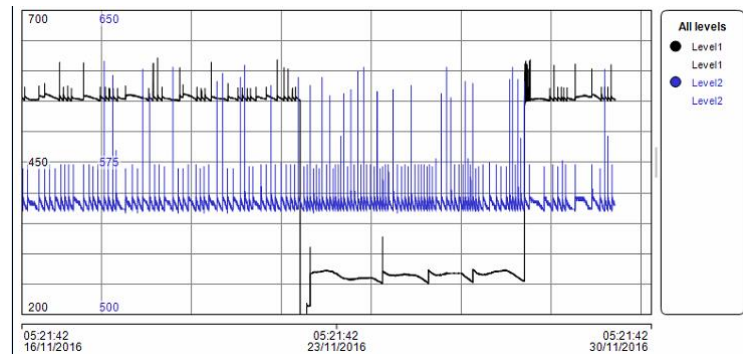
איור 9: תאי שורשים מפוצלים לבחינת קליטת המים ברזולוציה גבוהה. בצד שמאל מוצג תרשים סכמתי של התא. תא המפוצל במהלך גידול פלפל בתמונה האמצעית וניסוי הקדמי באבטיח בתמונה הימנית.



איור 10: מפלסי התא המפוצל לאחר שדרוג מערכת התאים למניעת תנודות הנובעות משינויי טמפרטורה. עקומים שחור וכחול הם המפלס בשני התאים 1-2 בהתאמה. ירידת המפלס הנצפית היא תוצאה של אידוי. עקום צהוב: טמפרטורה. ניתן לראות שהשפעת הטמפרטורה על המפלס נעלמה לאחר שדרוג המערכת.



איור 11 ניסוי גידול פלפל במערכת המשודרגת. בתרשים מוצגת תלות המפלסים בזמן. לאחר אקלום הצמחים בוצעה הנמכת מפלס (נקודה A) בתא 1 (שמפלסו מסומן בשחור). באופן מיידי נצפתה עלייה בתדירות ההשקיה בתא 2. לאורך כ-4 ימים הוששו המפלסים. תדירות ההשקיה בתא 2 חזרה לתדירות המקורית (נקודה B). יש לזכור שתדירות ההשקיה נקבעת על פי אוופוטנספירציה מתאי הגידול הנפרדים המאכלסים מחצית משורשי הצמח בעל מערכת השורשים המפוצלת.



בניסוי המשך במערכת הקולונות המפוצלות, חשפנו את צמחי חציל לתנאי גבול תחתון של מפלס פריאטי, בזמנים שונים, לפי הפירוט בטבלה 1. קליטת מים דומה נמדדה בתנאים בהם המשטח הפריאטי היה זהה בשני התאים של הקולונה המפוצלת (Col-1) וכן בשתי הקולונות הרגילות- 2 ו 3 ( $t_0 < t_1; t_2 > t_3$ ). ייבוש של אחד מתאי הקולונה המפוצלת, על ידי הורדת המפלס הפריאטי למרחק 60 ס"מ מפני הקרקע ( $t_0 < t_1; t_2 < t_3$ ) גרמה קליטת מים נמוכה מאד באותו תא, ולעומת זאת, לקליטה מוגברת בתא השני, בו המפלס נשאר בתנאי רטיבות אופטימאליים. זאת בעוד שבקולונות הלא מפוצלות נמדדה קליטת מים ששווה לקליטה הכוללת מהקולונה המפוצלת.

Time	Water level below soil surface (cm)				Water uptake per column (liter)			
	SRC		NSRC		SRC		NSRC	
	1-a	1-b	Col-2	Col-3	1-a	1-b	Col-2	Col-3
$t < t_0$	-30	-30	-30	-30	0.74	0.81	1.41	1.51
$t_0 < t \leq t_1$	-30	-60	-30	-60	0.45	0.12	0.48	0.49
$t_1 < t \leq t_2$	-30	-30	-30	-30	0.91	0.86	1.59	1.76
$t_2 < t \leq t_3$	-60	-30	-60	-30	0.02	0.62	0.48	0.42
$t_3 > t$	-30	-30	-30	-30	0.84	0.76	1.36	1.43

**טבלה 1:** מפלס המשטח הפריאטי מפני הקרקע בקולונות, בפרקי זמן (t) מוגדרים מראש. קולונה 1-SRC מפוצלת לשני מדורים (a ו-b), ושתי קולונות לא מפוצלות (NSRC), כ"א בנפח קרקע שווה לנפח הכולל של קולונה 1.

### ניסויי שורשים מפוצלים בליזימטרים נשקלים

נבנתה מערכת נוספת של פיצול שרשים. הפעם בליזימטרים נשקלים בחממה בגילת (איור 12, 13). סה"כ 16 זוגות של צמחים מפוצלי שורש. על מנת לבחון את תגובת הפיצוי נבחר צמח העגבנייה (M82) כצמח מודל. זרעי העגבנייה נזרעו במצע כבול במגשי שתילה בנפח פלג של 15 מ"ל עד להתפתחות מלאה של בית השורשים (כחודש ימים). לאחר מכן השורשים פוצלו לשני חלקים בשני שלבים: בשלב הראשון פוצל בית השורשים לשני חלקים נפרדים וכל חלק נשתל בכלי של 50 מ"ל למשך שבועיים בחדר גידול לצורך התבססות גוש שורשים בכל כלי. ולאחר מכן כל גוש שורשים נשתל בעציץ של 4000 מ"ל המכיל חול גס במערכת הליזימטרים בחממה (להלן פירוט המערכת). בכל עציץ נמדדה קליטת המים במשך כל הגידול. הצמחים הושקו בשלב הקליטה בתמיסת בזנה N:P:K ביחס 6:6:6 מעושרת במגנזיום ומקרו-אלמנטים בריכוז של 70 מ"ג לליטר חנקן. לאחר שבועיים הוחלפה לתמיסת ההזנה בה יחס N:P:K ביחס 2.5:6:4 מעושרת בסידן (1%) ומגנזיום (1%) ביסודות מיקרו (Fe PPM 300) בריכוז של 70 מ"ג לליטר חנקן. כל הצמחים הושקו בתמיסה ללא תוספת מלח במשך מספר שבועות נוספים עד להתבססותם בעציץ. ההשקיה התבצע באופן הבא: השקייה גדולה לפנות בוקר (500 מ"ל לצמח) ועוד 3-4 השקיות במשך היום (330 מ"ל). לאחר מכן החלו טיפולי הניסוי: פעם בשבוע הוסף לתמיסת השקיה של חלק אחד מתוך בית השורשים מלח למשך זמן מוגבל.

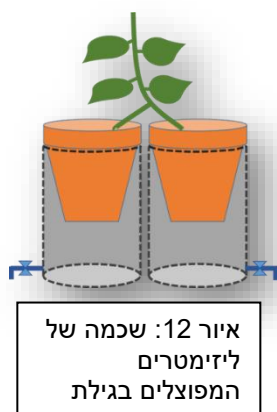
תהליך הוספת המלח התרחש באופן הבא: בשעות הבוקר המוקדמות לפני אור יום נתנו שלוש השקיות רצופות בהפרש של חצי שעה בתמיסת השקיה לפי טיפול (בתוספת מלח וללא תוספת) בנפח כולל של מעל לפי שתיים מנפח המים בעציץ במצב של קיבול שדה. במשך היום נתנו שלוש עד ארבע השקיות קצרות כדי למנוע עליה בריכוז המומסים בתמיסת הקרקע וכן כדי לשמור על כמות

מספקת של מים זמינים. בשעות הערב נעשתה שטיפה נוספת זזה בנפחה לשטיפת הבוקר. אך בשטיפה זו כל העציצים נשטפו בתמיסת הזנה ללא תוספת מלח. משקל המלח המוסף לתמיסת ההזנה גדל בהדרגה משבוע לשבוע.

טיפול הניסוי

1. חלק אחד מבית השורשים הושקה בתמיסה ללא תוספת מלח וחלק אחד בתמיסה עם תוספת מלח. התמיסה המלוחה נתנה בכל יום ניסוי לאותו חלק של בית שורשים.
2. חלק אחד מבית השורשים הושקה בתמיסה ללא תוספת מלח וחלק אחד בתמיסה עם תוספת מלח. התמיסה המלוחה ניתנה כל שבוע לחלק אחר של בית השורשי.
3. ביקורת שפירים- שני חלקי השורש הושקו בתמיסה ללא תוספת מלח בימי הניסוי.
4. ביקורת מלוחה- שני חלקי השורש הושקו בתמיסה עם תוספת מלח בימי הניסוי.

לשם כך נבנתה בחממה בחוות גילת מערכת ליזימטרים המורכבת מ 32 יחידות שקילה מדויקות



(load cell של חברת VISHAY. רמת דיוק של 1.5 גרם) המערכת סודרה לזוגות משקלים באופן המותאם למעקב משקלי רציף ל 16 צמחים מפוצלי שורש כך שכל חלק מבית השורשים נשקל באופן בנפרד. שולי כל עציץ הונחו על גבי מיכל גילי לאיסוף הנקז בנפח 10 ליטר כך שנפח העציץ ממוקם בתוך מיכל האיסוף אך יש חלל ריק בתחתית מיכל האיסוף לקליטה של עד 5 ליטר נקז. מיכל האיסוף מחובר לברז המפוקד מרחוק ומאפשר לתזמן את פריקת הנקז ממיכל האיסוף למיכל תחתי המונח על קרקע החממה. שחרור

מתוזמן ומבוקר של הנקז מאפשר לחשב מאזן מים היומי של כל עציץ. מערכת הליזימטרים מוקמה על גבי שני שולחנות גידול בגובה 60 ס"מ. בכל שולחן הונחו שמונה צמחים על מערכות שקילה ובנוסף הונחו בכל שולחן צמחי שוליים בשני הקצוות.

המערכת מוקמה בחוות גילת בחממה המצוננת באופן מבוקר על ידי מערכת צינון המורכבת ממזרן לח ומערכות אוורור מאולץ נשלטת על ידי חיישן לחות וטמפרטורה. בנוסף בתוך החממה ישנה מדידה רציפה של קרינה, טמפרטורה ולחות יחסית. מערכת ההשקיה מורכבת משני מכלי תמיסה סופית ומשאבות השקיה המפוקדות על ידי בקר השקיה (ס.א.ס מיכשור). ההשקיה מנתית על פי מד מים (דיוק של 0.1 ליטר). מערכת שולחות לכל מיכל. לכל חלק ממערכת השורשים (כל עציץ) מוזן מטפטפת כך שכל עציץ יכול להיות מוזן בתמיסת השקיה שונה. ספיקת הטפטפת 4 ליטר לשעה המתפצלת לארבע טפטפות זווית נעץ המפוזרות על פני העציץ על מנת ליצור פיזור מים מקסימלי בשטח העציץ. מצע הגידול חול מחצב גס המאפשר שטיפה בספיקה יחסית גבוהה וכך לשנות במהירות ובאופן אחיד את ריכוז המומסים בתמיסת המצע בחלקי בית השורשים השונים של הצמח. מדידה רציפה ומדויקת של מנת ההשקיה ואידי המים מכל חלק של בית השורשים מתועדת על ידי המשקל. המידע נאסף במערכת Data-logger של חברת Campbell Scientific (CR-1000).

תמיסת ההזנה הינה זהה בשני המיכלים בריכוז הנוטריינטים והשינוי היחיד היה הוספת מלח שולחן (NaCl) לתמיסת ההשקיה בטיפול המליחות לצורך העלאת ריכוז המומסים בתמיסת הקרקע. חישוב צריכת המים היומית ( $water_{daily}$ ) היא על פי הנתונים של מנת ההשקיה ( $IR_{daily}$ ), כמות הנקז ( $DR_{daily}$ ) והשינוי במשקל הצמח באותו יום ( $\Delta W_{daily}$ ) שחושב: ( $W_{end\ of\ the\ day} - W_{beginning\ of\ the\ day}$ ).

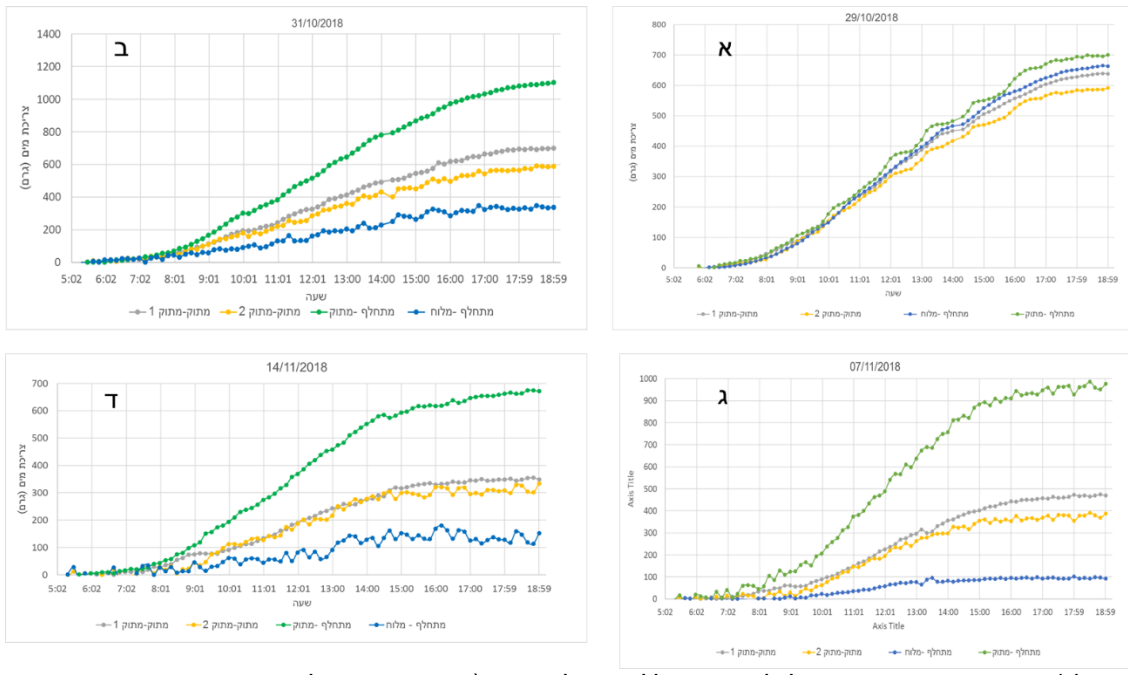
$$water_{daily} = IR_{daily} - DR_{daily} - \Delta W_{daily}$$

הנחת העבודה היא שהשינוי במשקל הצמח היומי הינו קטן מאוד ביחס לשינוי במשקל הנובע מהשינויים בתכולת המים הנובעים מהשקיה ואידוי ולכן אפשר ליחס את השינוי למצב המים בעציץ (גם שינוי זה חושב ונבחן).

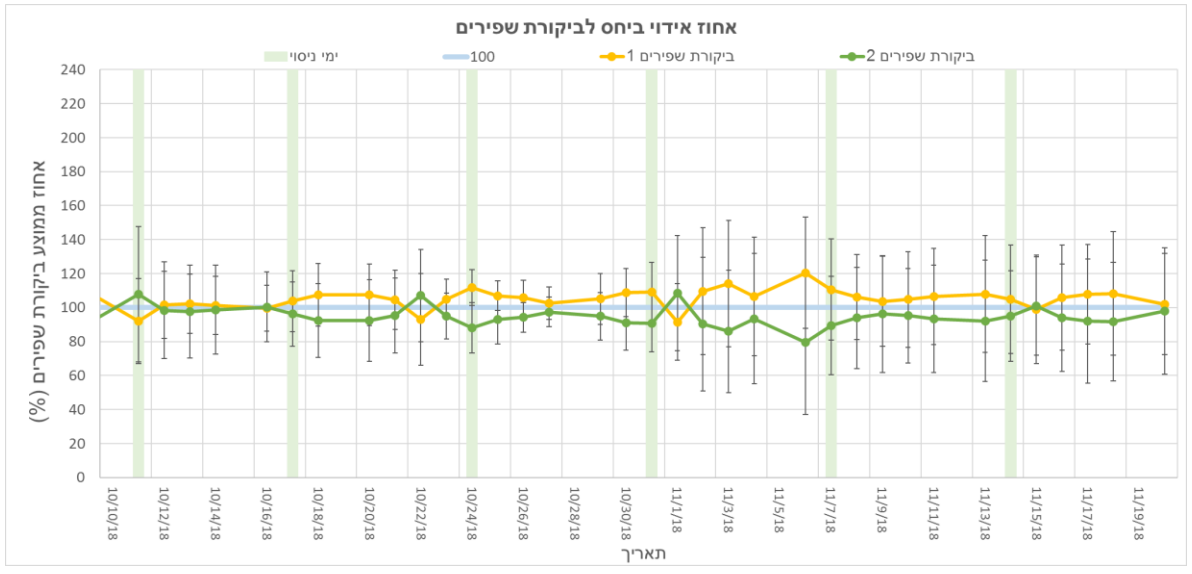


איור 13: תמונות של מערכת הליזימטרים המפוצלים בחממה בגילת.

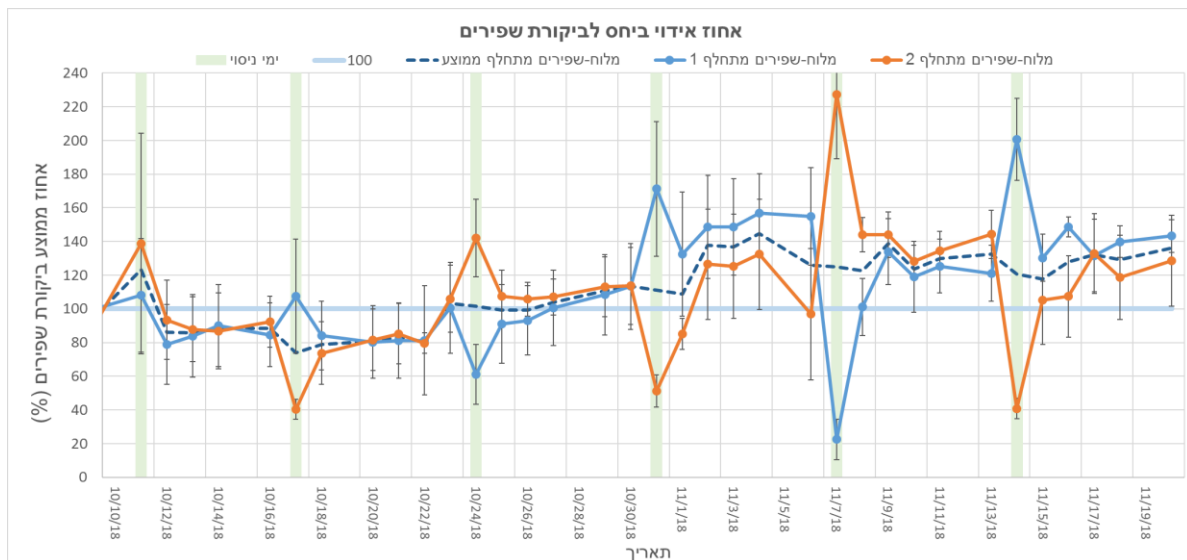
על פי הניסויים נמצא שכאשר זמינות המים זהה בחלקי השורש אין הבדל מובהק בקליטת המים היומית בין שני חלקי השורש (איור 14, 15). אך כאשר זמינות המים ירדה בחלק מבית השורשים נמצא שבאופן מובהק קליטת המים ירדה בחלק זה ובמקביל קליטת המים גדלה בחלק בית השורשים בו זמינות המים לא השתנתה כך שבאופן מובהק קליטת המים הייתה גדולה יותר בחלק בית השורשים זה (איור 14, 16). בנוסף נמצא שככל שמשקל המלח שהוסף לתמיסת ההשקיה גדל ירדה קליטת המים בחלק זה של בית השורשים וגדלה בחלק בו תמיסת ההשקיה הייתה ללא תוספת מלח (איור 16).



איור 14: יום בו ההשקיה אחידה לכל הצמחים ללא טיפולי הניסוי (השקיה בשני חלקי בית השורשים במים שפירים) (א) ושלושה ימי החלפה (ב-ד). ניסוי בחממה בגילת בעגבניות. צריכת מים מצטברת יומית. מתוק-מתוק = מים שפירים ללא המלחה. מתחלף - מתוק = הצד שמושקה במים שפירים ביום הניסוי. מתחלף-מלוח = הצד המושקה במים מליחים ביום הניסוי.



איור 15: השוואת קליטת המים בין שני חלקי השורש של טיפול הביקורת בו לאורך כל הגידול הושקה בתמיסת השקיה ללא תוספת מלח. ( 100% מבטא קליטת מים ממוצעת לעציץ בטיפול הביקורת בו שני חלקי השורש הושקו ללא תוספת מלח)



איור 16: השוואת קליטת המים בין שני חלקי השורש בטיפול הניסוי בו חלק אחד של בית השורשים הושקה יום אחד בשבוע (יום הניסוי מצוין בעמודה ירוקה) בתמיסת השקיה בתוספת מלח. בטיפול זה כל יום ניסוי חלק אחר של בית השורשים הושקה בתמיסה עם תוספת מלח. הקו המקווקו מבטא את הכמות הכוללת היומית שנקלטה על ידי צמחי הניסוי ביחס לקבוצת הביקורת שהושקתה לאורך כל הניסוי בתמיסת השקיה ללא תוספת מלח. 100% מבטא קליטת מים ממוצעת לעציץ בטיפול הביקורת בו שני חלקי השורש הושקו ללא תוספת מלח.

### **ניסויי מיפוי שורשים** (ליזימטרים מאפשרים שטיפת קרקע ומדידת פיזור שורשים במרחב)

פיתוח של ליזימטרים שקופים הנותנים אפשרות לאפיון מיקום שורשים (להלן מערכת 3) ממשיך במרכז מחקר גילת (איור 17, 18, 19). על מנת לאפשר לימוד על מספר גדול יותר של צמחים בו זמנית. מטרת הניסוי הייתה: תכנון ובנייה של ליזימטרים/עציצים בעלי יכולת הפרדה ומיפוי שורשים. בניסוי ראשון שישה ליזימטרים שקופים מתוך 24 ליזימטרים היושבים על מערכת מסתובבת בגילת (איור 17).



איור 17. ליזימטרים למיפוי צפופות שורשים. משמאל לימין: מערכת ליזימטרים מסתובבת בגילת. השקופים מכוסים בנייר אלומיניום. שטיפת קרקע בסוף גידול חצילים מתחתית הליזימטר אחרי פירוקו. העמדת ליזימטרים אחרי שטיפה עם השורשים במקומם.

תוצאות הניסוי העלו הצלחה חלקית בלבד. כן היה אפשר לגדל ולשטוף שורשים בסוף הגידול אך: א) הצמחים ומערכות השורשים שלהם היו מפותחים מדי בזמן הוצאתם (ו-ב) הגריד (מבנה המפריד בין אזורי גידול השורשים) היה גדול מדי ולא אפשר מספיק הפרדה. בניסוי אחר נבנתה מסגרת לשורשים הניתנת לשליפה מליזימטר קיים. במסגרת זו הותקנו מדפים מתפרקים (איור 18, 19). המאמץ בפיתוח והבחנה של השיטה התרכז בשנה האחרונה של הפרויקט. בשלב הזה הייתה התקדמות מסוימת אך עדיין ללא הצלחה מלאה. כן הצלחנו לתכנן ולבנות מסגרת נשלפת שמחזיקה את הקרקע והשורשים וניתן לשטוף ולחשוף בה את השורשים במקום גידולם. אך גם למדנו כי אנחנו



רגישים מאוד לגודל הפתחים בתוך המדפים (הגריד). אם הפתחים גדולים מדי, אין רזולוציה מספקת לכימות השורשים ופיזורם, ואם הם קטנים מדי הם מפריעים לגידול השורשים וגורמים לפיזור אנכי מוגזם. דרוש עוד זמן ומאמצים על מנת להגיע לאופטימיזציה עבור עגבניות ודרושים ניסיונות בגידולים שונים עם מערכות שורשים בעלי תכונות שונות על מנת לבחון גם אותם.

איור 18. אב טיפוס בשלבי הכנה וניסוי התכנות: מסגרת נשלפת לאיתור וכימות השורשים.



איור 19. ניסוי גידול עגבנייה באב טיפוס בו מסגרת ההפרדה עשויה מרשת פלסטיק.



### אימות ניסוח של מודל מאקרוסקופי לקליטת מים על ידי שורשים

ב- 2017 דיווחנו על פיתוח משוואות מכניסטיות לביטוי קליטת מים, המלווה באלמנט של קליטת מים וריאבילית בבית השורשים, כתלות בעומד הקפילרי והאוסמוטי. נבחר ניסוח מכאניסטי, המבוסס על המודל של המודל הנבחר לשימוש היה של (Nimah and Hanks 1973), אשר עבר ניסוח מחדש על ידי (Dudley and Shani 2003). קצב קליטת המים אל צמחים במודל זה הינו:

$$S(z,t) = \min \{ ET_p, T_w \cdot f_c \} \quad ; ET_p \geq T_w \cdot F_c, \quad 0 < F_c \leq 1 \quad [1]$$

כאשר  $Z$  הינו הקורדינטה האנכית והאופוטורנספירציה הפוטנציאלית מיוצגת ע"י  $T_p$ . קצב קליטת המים כתלות בעומד הקפילרי ( $T_w$ ) מוגדר ע"י:

$$T_w = \frac{RDF(z,t) \cdot K(\theta) [\psi_{root} + (RRES \cdot r - \psi(z,t))]}{\Delta r \cdot \Delta z} \quad ; \psi_{min} \leq \psi_{root} < \psi(z,t) \quad [2]$$

$RDF(z,t)$  הינו הפונקציה הדינאמית של התפלגות החד-מימדית של השורשים;  $K(\theta)$  הינו פונקציית המוליכות ההידראולית, כתלות בתכולת הרטיבות;  $\psi$  הינו העומד המטריצי;  $RRES$  הינו התנגדות השורשים ו- $\Delta r$  הינו המרחק מפני השורש אל הנקודה בה נמדד העומד הקפילרי.



פקטור המליחות ( $f_{EC}$ ) הינו פונקציה לוגיסטית המתארת את הפחיתה היחסית ביבול כתלות במליחות העיסה הרוויה של הקרקע שפותחה ע"י Hoffman and van Genuchten (1983):

$$f_{EC} = \frac{1}{1 + \left( \frac{EC_e}{EC_{e50}} \right)^b} \quad [3]$$

$EC_{e50}$  מייצג את מליחות העיסה הרוויה ( $EC_e$ ) הגורמת לפחיתה של 50% ביבול או בטרנספירציה,  $b$  הוא ערך הנגזרת בנקודה זו.

את הניסוח המתואר במשוואות 1-3 חיברנו לאחרונה למודל CoupModel V-6.0 (Jansson and Karlberg, 2004), לצורך הביטוי של פיצוי קליטה:

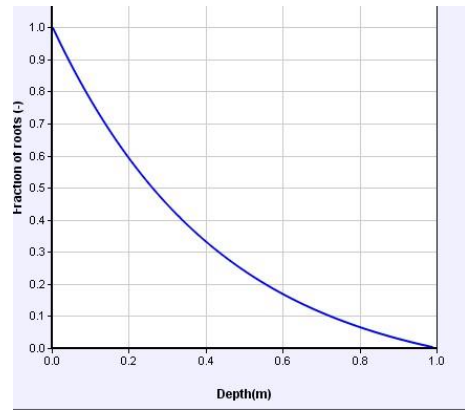
$$S = S^* + f_c(ET_p - S^*) \quad [3]$$

כאשר  $S^*$  מייצג את קליטת המים על ידי הצמח ללא קליטה ווריאבילית ו- $f_c$  היא שיעור הפיצוי, כשערך של 1 מייצג פיצוי מלא ו-0 מעיד על קליטה ללא פיצוי מרחבי. CoupModel הינו מודל חד-מימדי המתאר שטפים והתפלגות של מים, פחמן וחנקן במדון אקוסיסטמות. ביצענו הדמיות גידול חציל לאורך 3 חדשים בספטמבר-נובמבר. לצורך כך, קלטנו למודל את תנאי הגבול העיתיים הכוללים: טמפרטורה, לחות יחסית, קרינה סולרית, מהירות רוח ועובי השקיה. בנוסף, קלטנו למודל תנאי התחלה הכוללים עומד קפילרי, מליחות קרקע, פרמטרים פיזיולוגים של הצמח ופרמטרים פיזיקליים של הקרקע. מערכת ההדמיה כללה 15 שכבות אופקיות, בעלות עובי של 10 ס"מ. עומד המכסימלי לקליטה אופטימלית ( $\psi_{min}$ ) נקבע על 600 ס"מ (Shani et al. 2007). צמח המודל היה חציל, בעל התפלגות שורשים אשר נלקחה ממדידות בניסוי הקולונות והותאמה לה פונקציית דעיכה מעריכית, המתוארת באיור 20. המודל חישב את הדגם העיתי של התפלגות השורשים לכל מהלך ההדמיה, כשהתפלגות מנורמלת לעומק הולכת וגדלה עם הזמן.

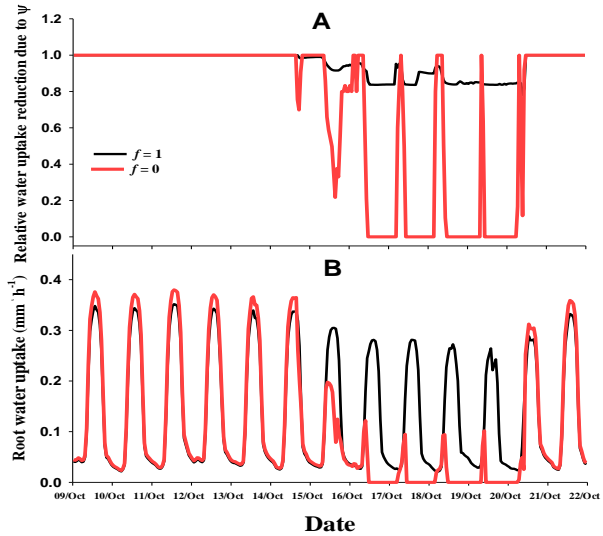
המודל חישב עומד קפילרי וקליטת מים בשכבות מוגדרות מראש. התרחיש אותו המודל חישב היה הפסקת השקיה למשך 10 ימים בחציל (10-19 באוקטובר). לאחר מכן, ההשקיה חודשה, ויושמה בעובי 15 מ"מ.

השפעת הפיצוי בבית השורשים על קליטת המים של צמחי חציל מופיעות באיור 21. כארבעה ימים מהפסקת ההשקיה החלה ירידה בקליטת המים, אולם ירידה חריפה ביותר חושבה עבור ערכי  $f=0$ , כלומר, ללא פיצוי קליטה. לעומת זאת, ירידה של 12% בלבד חושבה במקרה בו קיים פיצוי מלא. קצב קליטת המים (איור 21) מראה על ירידה מתונה בדגם היומי של קליטת המים, כאשר המודל מתחשב בתהליכי קליטה מפוצה. עובי המים שנקלטו בהתחשב בתהליכי פיצוי היה 42.1 מ"מ, ובתרחיש השני- 32.7 מ"מ.

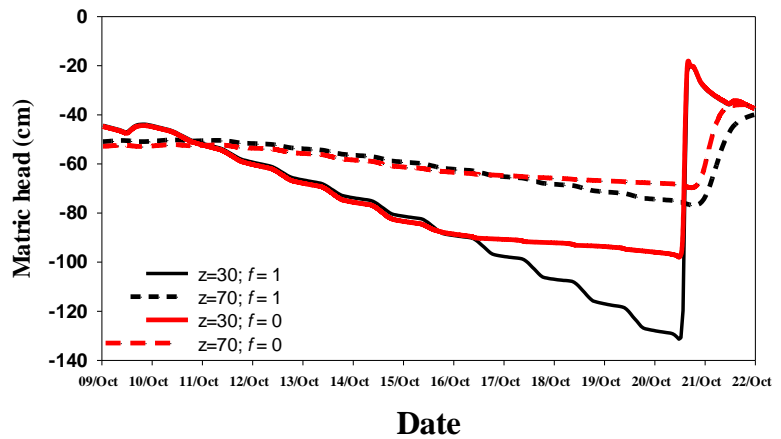
איור 20: פונקציית התפלגות השורשים המנורמלת לעומק של 150 ס"מ.



איור 21: ירידה יחסית בקליטת המים על ידי השורשים בהשפעת העומד הקפילרי (A) וקצב קליטת המים של הצמח (B). העקומים השחורים מייצגים פיצוי מלא ( $f=1$ ) והאדומים- ללא פיצוי קליטה ( $f=0$ ).



איור 22: עומד קפילרי בעומקים 30 ו-70 ס"מ. העקומים השחורים מייצגים פיצוי מלא ( $f=1$ ) והאדומים- ללא פיצוי קליטה ( $f=0$ ).



הקליטה מחושבת ממשוואה 2, הגורסת שהשורש יכול להוריד את  $\psi_{min}$  עד למינימום (600 ס"מ) בכדי לאפשר קליטה מרבית, קרי,  $ET=ET_p$ . הורדה של פוטנציאל השורש מגדילה את הגרדיינט, ולכן העומדים הקפילריים המופיעים באיור 22 המחושבים לגבי התרחיש בו יש פיצוי קליטה, נמוכים מאשר ללא פיצוי.

אחת ממטרות המחקר הייתה לנסח ולבצע ניסויים ספרתיים הבוחנים את השפעת פיצוי הקליטה התלויה בגרדיינט העומדים בין הקרקע לשורש. זאת בהקשר להיפותזת המחקר שגורסת כי תהליכי

הפיצוי מתרחשים מתהליך מכאניסטי לפיו הצמח יכול להוריד את עומד המים בתוכו על מנת לשמר קליטת מים אופטימלית בתנאי עקה עיתית. אנו השתמשנו במודל חד- מימדי בעל פונקציית קליטה מכאניסטית, שאינו מאפשר בחינה מרחבית של תהליכי קליטה ופיצוי בתנאי גידול המושקה בטפטוף. אולם, הדמיות המודל איששו בדרך שונה את ניסוי הקולונות בו צמחי חציל קלטו את כל המים רק מהאזור בעל תנאי רטיבות אופטימליים. ובניגוד לכך, בצמחים בהם כל בית השורשים נחשף ליובש, המשיכו לקלוט מים על ידי הורדה של  $\psi_{min}$  ובכך אפשרו קליטה הדומה לצמחים בעלי בית שורשים רטוב בחלקו. הדמיות המודל הראו שהדמיה של הפיצוי גורמת לעומדים קפילריים נמוכים, על מנת לאפשר קליטה מרבית של מים ושמירה על פוטנציאל מים אופטימלי בצמח.

## דין

בפרויקט התבצעו ניסויים במערכות להלן: במערכת מדידת פיצוי קליטת מים על ידי שורשים באמצעות IOD נלמד כי מליחות פתאומית זמנית בצד אחד בבית השורשים מורידה קליטה ויש הגברה של קליטה בחלק הלא מומלח אך אין פיצוי מלא וסה"כ קליטת המים נשאר קטן מצמחים שלא נחשפים למליחות. במערכת השורשים המפוצלת נמדדה קליטת שורשים וריאבילית, כתלות בתנאי הגבול התחתון ובדגם העומד הקפילרי בבית השורשים. במקרה שבו הקולונות הלא מפוצלות בניסויים בהם היו בתנאי רטיבות נמוכים (מפלס פריאטי נמוך), התאפשרה קליטת מים דומה לקולונה לא מפוצלת עם תנאי רטיבות טובים (מפלס פריאטי גבוה). כלומר, בתנאי הרטיבות הנמוכים, עדיין היו שכבות בהן העומד הקפילרי היה גבוה מהעומד הקריטי ולכן השורש הוריד את פוטנציאל השורש על מנת לקיים באותן שכבות קליטה מכסימלית בהתאם לפילוג השורשים החדש. לפיכך, אנו מסיקים כי מספיק וקיים נפח בית שורשים קטן, בו מצב המים אופטימלי ומליחות מינימלית, שיאפשר קליטה מיטבית של מים. בניסויים מבוקרים אחרים בליזימטרים נשקלים וצמחים מפוצלי שורש, תנאים פתאומיים וקצרי טווח של מליחות גרמו לירידה דרסטית בצד המלוח המועק ועליה כמעט שוות ערך בצד בו נשארו תנאים טובים ומים זמינים. תוצאות במערכות מבוקרות היטב, בקולונות ובליזימטרים, מצביעות על יכולת של צמחים לפיצוי מלא, כל עוד שתנאים זמניים מים טובים מספיק בלפחות חלק מבית השורשים. בתנאי שטח, נראה כי למרות שהפיצוי קיים, הוא לא תמיד מלא. מה שמרמז שכאשר התנאים פחות מבוקרים צפי היכולת לפיצוי יורד או שמגנונים פיזיולוגים וסיגנלים הנשלחים משורשים תחת תנאי עקה לשאר הצמח בכל זאת חשובים. יתכן כי המנגנונים לכך קשורים לסיגנל של ABA כאשר שורשים חשים עקה (Schachtman and Goodger, 2008; Sobeih et al., 2004).

עבודה על הדמיות קליטת מים ויסודות הזנה, תחת תנאים שונים של פיצוי, בוצע על ידי Simunek and Hopmans (2009), במודל HYDRUS 2-D. הם הניחו מספר תנאי פיצוי חלקיים ופיצוי מלא, אולם מודל הקליטה היה אמפירי, ולא מכאניסטי, כפי שנקטנו בעבודה הנוכחית. למרות זאת הם הסיקו, בדומה לממצאים שהובאו למעלה, כי קליטה עם פיצוי איננה דורשת ידיעה מקדימה של פונקציית פילוג השורשים, מכיוון שיש שכבות אחרות שמפצות על הפחיתה. מכאן נובעת סוגיה חשובה שצריך לתת עליה את הדעת והיא האם הערך של העומד הקפילרי הקריטי,  $\psi_{min}$ , הוא דינאמי

ונקבע לפי דגם העומדים הכללי בבית השורשים? העבודה שלנו ותוצאות הניסויים כאשר תנאי העקה נגרמו מירידה בפוטנציאל אוסמוטי על ידי המלחה, מהוות אתגר להמשך הטיפול בפיצוי. המודלים מקרוסקופיים של תנועת מים וקליטתם על ידי שורשים ביום, ותגובות צמחים למליחות מטופלות על ידי פונקציה שמוריד מהקליטה האפשרית ללא מליחות – פתרון אמפירי ולא מכאניסטי (Jarvis, 2002; Hopmans and Bristow, 2011). רק כימות טוב יותר של התרכזות המלחים בקרבת פני שורשים ושילוב של מנגנונים פיזיקאליים וביולוגיים כאשר מלחים פועלים הן בירידה פוטנציאל של המים והן בתגובות פיזיולוגיות בשורש עצמו, יאפשרו כימות וטיפול במנגנוני פיצוי טובים יותר (Jorda et al., 2018; Perelman et al., 2019). אם זאת, ממצאי הפרויקט הנוכחי חשובים ועלולים לעזור במידול משופר, גם כאשר חלק מהפתרונות הם אמפיריים.

ניסויים בפיתוח עציץ/ליזימטר שמאפשר פירוק ושטיפה ומיפוי שורשים במקומם פחות צלחו. כן הגענו לפתרונות של יכולת שליפה ושטיפת קרקע חולית משורשים אך נשאר האתגר לתכנן ולבנות מחיצות בתוך הקרקע שמאפשרות גידול לא מופרה של שורשים תוך שמירת השורשים בנפח מספק לרזולוציית מיפוי גבוה.

- Dabach, S., and U. Shani (2010). Developing an automated water emitting-sensing system, based on integral tensiometers placed in homogenous environment. In "EGU General Assembly Conference Abstracts", Vol. 12, pp. 1420.
- Dabach, S., U. Shani, and N. Lazarovitch (2015). Optimal tensiometer placement for high-frequency subsurface drip irrigation management in heterogeneous soils. *Agricultural Water Management* 152, 91-98.
- Dudley, L.M., and U. Shani. (2003). Modeling plant response to drought and salt stress: Reformulation of the root-sink term. *Vadose Zone J.* 2:751–758.
- Hoffman, G.J. and M.Th. van Genuchten (1983). Water management for salinity control. P. 73-85. In H. Taylor et al. (ed) *Limitations to efficient water use in crop production* ASA, Madison, WI.
- Hopmans, J. W., and Bristow, K. L. (2002). Current Capabilities and Future Needs of Root Water and Nutrient Uptake Modeling. In "Advances in Agronomy" (L. S. Donald, ed.), Vol. Volume 77, pp. 103-183. Academic Press.
- Jansson P.E. and L. Karlberg (2004). Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm, Sweden., Report 3087, p 435.
- Jarvis, N. J. (2011). Simple physics-based models of compensatory plant water uptake: concepts and eco-hydrological consequences. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*
- Jorda, H., A. Perelman, N. Lazarovitch, and J. Vanderborght. (2018) Exploring Osmotic Stress and Differences between Soil–Root Interface and Bulk Salinities. *Vadose Zone J.* 17:170029. doi:10.2136/vzj2017.01.0029
- Nimah, M.N. and R.J. Hanks. (1973). A model for estimating soil, water, plant and atmospheric interactions . 1. Description and sensitivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37:528-532.
- Perelman, A., H. Jorda, J. Vanderborght, N. Lazarovitch. *Plant Soil.* (2019) Tracing root-felt sodium concentrations under different transpiration rates and salinity levels <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03959-5>
- Schachtman, D. P. and J.Q. Goodger. (2008). Chemical root to shoot signaling under drought. *Trends in plant science*, 13(6), 281-287.
- Shani, U., A. Ben-Gal, E. Tripler, L.M. Dudley (2007). Plant response to the soil environment: an analytical model integrating yield, water, soil type and salinity. *Water Resources Res.* Vol. 43, No. 8, W08418 10.1029/2006WR005313.

- Šimůnek, J. and J.W. Hopmans. (2009) Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecol. Modell.* 220:505–521. doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.11.004  
15, 3431-3446.
- Sobeih, W. Y., I. C. Dodd, M. A. Bacon, D. Grierson, and W. J. Davies. (2004) Long-distance signals regulating stomatal conductance and leaf growth in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants subjected to partial root-zone drying. *Journal of Experimental Botany* 55: 2353-2363.