

תגובת שורשים וצמחים לממשקי השקיה ואיכות מים

לויה כץ, זהבה יהודה, אפי טריפלר, ערן סגל ואורי שני

שמירה על איכות משאבי המים וזמינותם, לצד מניעת נזקים סביבתיים כתוצאה מהדשיית גידולים, מחייבת את ייעול השימוש במים לחקלאות. המפתח לייעול מושג על ידי הבנת התהליכים הפיזיקאליים והביולוגיים המתרחשים במערכת הרצף קרקע- צמח- אטמוספירה (SPAC). שטף המים במערכת SPAC הינו פאסיבי ומצוי בהתאמה למפל הפוטנציאליים לאורך המערכת. המים נעים מהמדיה הנקבובית של הקרקע לעבר תוך רווי של דופן תאי השורש (המסלול האפופלסטי). מסלול מקביל הינו דרך תעלות מים המצויות על גבי ממברנות תאי השורש (המסלול הסימפלסטי). מסלול זה אינו יכול להיחשב פאסיבי לחלוטין.

פוטנציאל המים בשכבת הגבול שבין הקרקע ובין השורש הנו ערך קריטי וחשוב במודלים לתיאור קליטת מים על ידי צמחים. בספרות קיימים שני גישות לתיאור קליטת מים: [1] הגישה המקרוסקופית בה הקליטה מתרחשת לפי פונקצית התפלגות השורשים במרחב, ללא התייחסות למורפולוגיה של השורש; [2] הגישה המיקרוסקופית המתארת קליטת מים אל שורש בודד בעל גיאומטריה גלילית.

קליטת מים על ידי צמחים תלויה במפל עומד המים הכולל בשורש ועומד המים הכולל בקרקע (עומד הגובה, העומד המטריצי והעומד האוסמוטי). עבודות קודמות שבוצעו במו"פ ופורסמו בעיתונות המקצועית הרלבנטית הראו, כי פונקצית קליטת המים אל צמחים איננה פשוטה. כלומר, היא איננה סכימה של העומדים בקרקע, אלא הכפלה של שתי פונקציות התגובה הנפרדות של הצמח למליחות ולעקת מים.

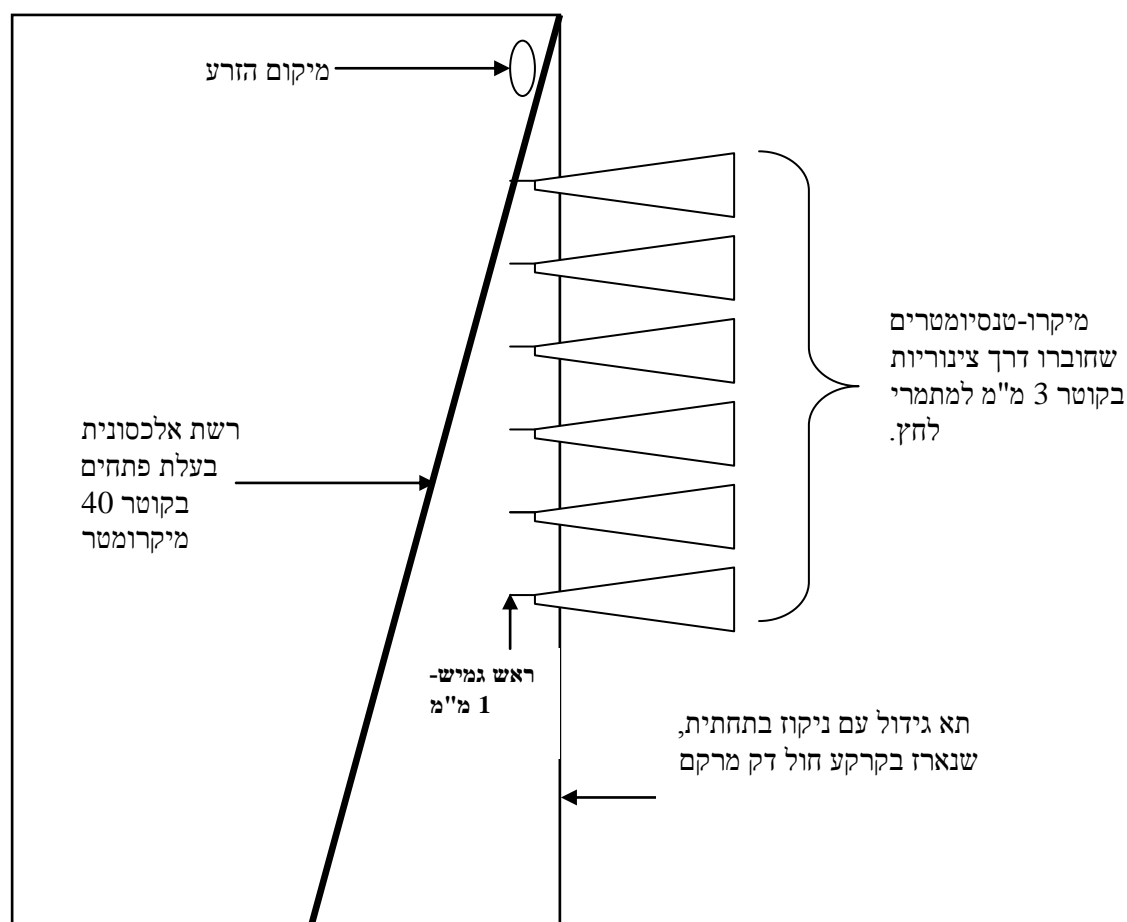
היפותזת המחקר היא, שפוטנציאל השורש נקבע על ידי שילוב של גורמי סביבה בקרקע (תכולת רטיבות, מוליכות הידראולית ופוטנציאל אוסמוטי) ובאוויר (לחץ אדי המים) עם משוב פיזיולוגי מתעלות המים המצויות בממברנות תאי השורש.

מטרות המחקר הינן: [1] ללמוד את הקשר שבין פוטנציאל השורש ובין שילובים של עקות מליחות ומים; [2] ללמוד ולאפיין את קליטת המים של גידולים חקלאיים שכיחים בערבה הדרומית במרחב בית השורשים. המחקר יבוצע ב"מרכז לייעול השימוש במים". הקרוסלה הקיימת שודרגה למערכת בה כל ליזימטר הונח על גבי משקל המודד בדיוק רב קצב קליטת מים ושטפים במערכת (השקיה ונקז). בכל ליזימטר נבנו 3 טנסיומטרים, אשר שניים מודדים את פוטנציאל השורש על גבי מקור השקיה כדורי עטוף בוד גאו-טקסטיל, והאחר מודד את הפוטנציאל המטריצי בקרקע.

שיטות

פיתוח מיקרו-טנסיומטרים עם ראש גמיש ותא גידול חצוי על ידי רשת

על מנת למדוד את התפלגות פוטנציאל המים בריזוספירה פותחה שיטה שהתבססה על ששה מיקרו-טנסיומטר, כל אחד עם ראש חיצוני של 1 מ"מ, שחוברו למתמרי לחץ (Motorola MPX-5050DP) והוצבו במרחקים שונים מפני השורש כדי למדוד את פוטנציאל המים. לשם כך נבנה תא גידול בעל ממדים של 1×10×20 ס"מ שנחצה על ידי רשת בעלת פתחים בגודל 40 מיקרומטר שמימדיה 0.005×1×20 ס"מ. הרשת הוצבה באופן אלכסוני כך שהשורשים יכלו לגדול לאורכה אך לא יכולים לחצות אותה. מים ויונקות לעומת זאת חצו את הרשת. את ששת המיקרו-טנסיומטר הוצבו בצד ללא השורשים (ראה איור 1). שתיל של זן הבר של השעורה גדל בתא הגידול ושורשיו התפתחו לאורך הרשת. המיקרו-טנסיומטר הראשון הוצב כך שהוא נמצא במגע עם הרשת בעוד האחרים הוצבו במרווחים של 2.5 מ"מ זה מזה. מדידות הטנסיומטרים החלו כ- 21 ימים לאחר הזריעה, עם הרווית הקרקע. קריאות נוספות במשך 8 הימים הבאים נלקחו במרווחים של 24 שעות בסוף כל יום. איור 2 מראה את הניסוי בסופו לאחר חשיפת השורשים.



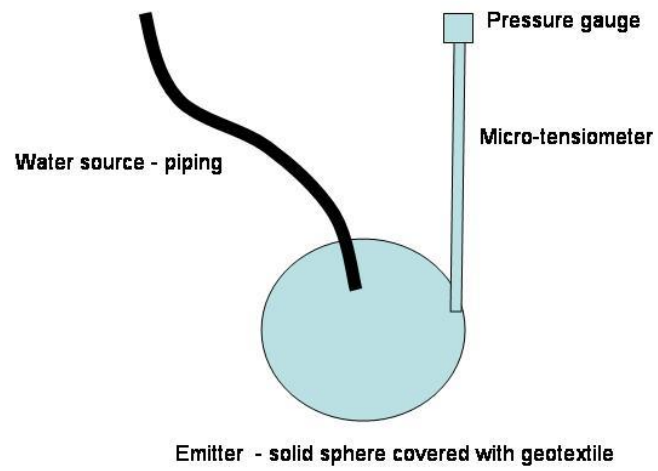
איור 1- שרטוט סכמטי של תא גידול עם רשת אלכסונית (40 מיקרומטר), המאפשרת מעבר מים ויונקות ומונעת

חדירת שורשים, ומערכת מדידה של מיקרו-טנסיומטרים למדידת פוטנציאל המים בקרקע כפונקציה של מרחק מפני השורש.



איור 2 – צילום תא הגידול בסוף ניסוי לאחר שטיפת הקרקע וחשיפת מערכת השורשים. בצילום נראים תא הגידול עם רשת אלכסונית וששה מיקרו-טנסיומטרים (מימין לרשת). מערכת השורשים נמצאת מעבר לרשת ועל פניה (מצדה השמאלי).

פיתוח טנסיודריפר למדידת פוטנציאל המים בפן הבייני שבין השורש ובין הקרקע
איור 3 מציג תיאור סכימטי של הטנסיודריפר, העשוי מכדור פוליאסטרין מוקצף העטוף ב בד גאו-טקסטיל, בעל קוטר 4 ס"מ. מוצא מי ההשקיה הוא במרכז המקור והמיקרוטנסיומטר מקושר אל המקור ברצף של גאוטקסטיל השומר על רציפות של מים.
במצב בו מקור השקיה טמון בקרקע, המים המצויים במעטפת המקור מגיעים לשיווי משקל עם מי הקרקע. השקיה בתדירות גבוהה של מנות מים קטנות ממרכז המקור, מעודדת התפתחותם של שורשים על גבי המקור (איור 4). לכן קיימת סבירות גבוהה שהפוטנציאל הנמדד על ידי המיקרוטנסיומטר המקושר למקור קרוב לפוטנציאל בשורש.



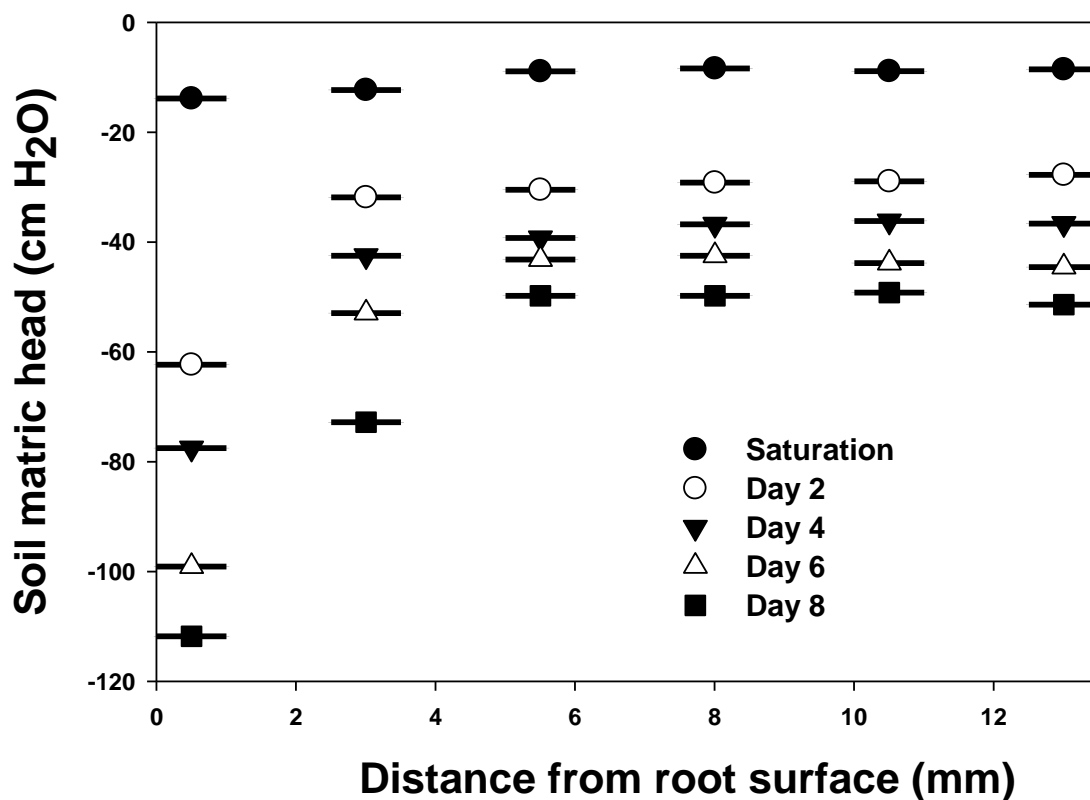
איור 3- הצגה סכימטית של גאו-דריפר.



איור 4- מבט קרוב על הטנסיו-דריפר (למעלה). הטנסיומטר מקושר מצד ימין וצינור ההשקיה משמאל. התפתחות השורשים על גבי הכדור נצפית בשני התמונות התחתונות.

תוצאות

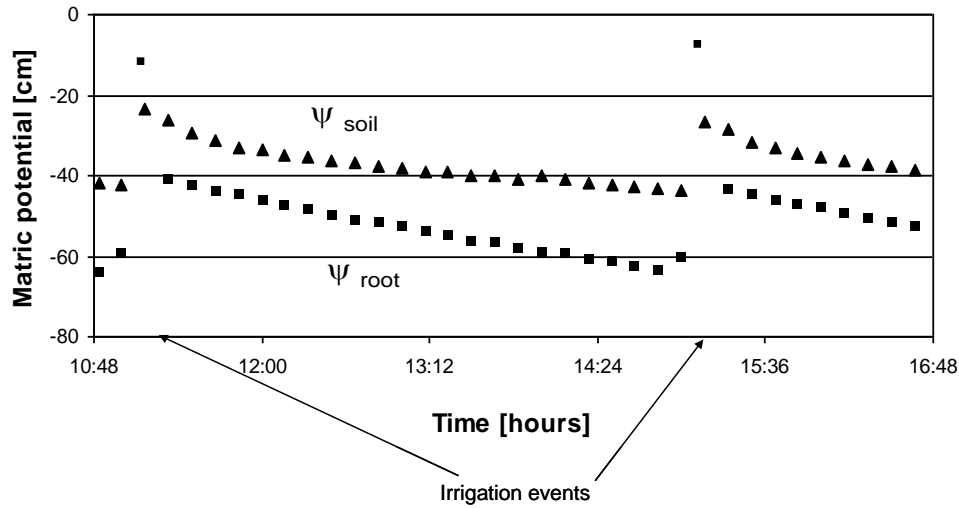
פוטנציאל המים בקרקע במהלך שמונה ימים לאחר רוויה כפונקציה של המרחק מפני השורש, מוצגות באיור 5. הסמנים האופקיים מציינים את טווח הדגימה. לאחר הרוויה הקרקע נמדד פוטנציאל מים גבוה במרחק גדול מפני השורש ($r > 3 \text{ mm}$, $\psi^{\text{soil}} \approx -10 \text{ cm}$). במהלך הימים העוקבים נמדדה ירידה הדרגתית ב- ψ^{soil} , כך שערכו עמד על 50 ס"מ בתום היום השמיני. לאחר יום החלה להתפתח שפילה שהתבטאה בירידה בערכי פוטנציאל המים בסמוך לפני השורש (ψ^{rhiz}), שפילה שנמשכה גם בימים הבאים. ערכי ψ^{rhiz} ירדו מ-60 ס"מ בסוף היום השני ל-110 ס"מ בסוף היום השמיני. מערכת מיקרו-טנסיומטרים למדידת פוטנציאל המים בריזוספירה ברזולוציה של 1 מילימטר הינה כלי המאפשר לעקוב אחר התפתחות דגם ההתייבשות בריזוספירה של שורש לאורך הזמן.



איור 5- עומד מטריצי בקרקע כפונקציה של המרחק מפני השורש בקרקע חול דק מרקם. Saturation מייצג בקרקע אחרי הרטבה, Day 2, 4, 6 & 8 מייצגים את המדידות בימים העוקבים, כל אחד באורך 8 שעות יום. הקווי הם האופקיים מייצגים את רזולוציית המדידה.

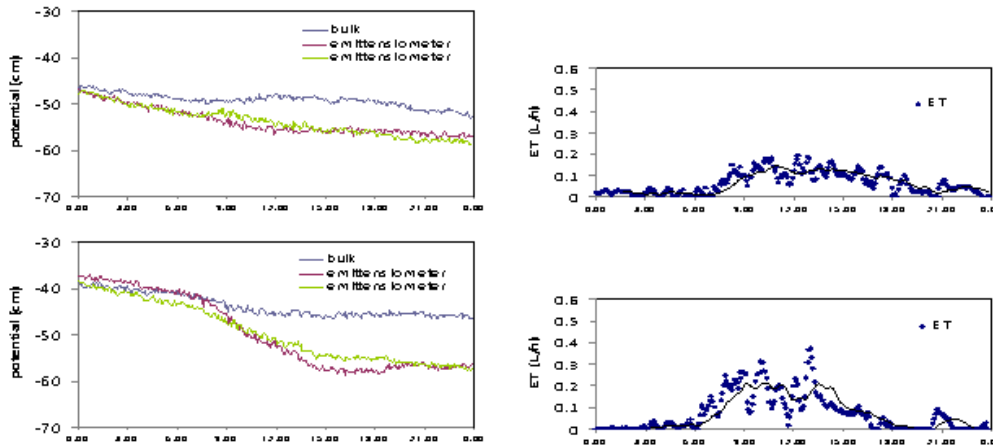
העומדים המטריציים בפן הבייני שבין השורש ובין הקרקע והעומד בקרקע מוצגים באיור 6. לאורך כל המדידה העומד בפן הבייני נמוך מהעומד הקפילרי בקרקע. העומד בקרקע יורד לאחר אירוע ההשקיה (בשעות

11:00 וב 15:00) ומגיע לערך הקרוב לקיבול השדה האופייני לקרקע. העומד הקפילרי בפן הבייני היה נמוך במשך חלון הזמן המוצג באיור מהעומד הקפילרי בקרקע.



איור 6- העומד המטריצי שנמדד בפן הבייני שבין הקרקע ובין השורש (ψ_{root}) והעומד בקרקע (ψ_{soil}), כפונקציה של הזמן.

הדגם היומי של האופוטורנספירציה והעומד הקפילרי, בצמחי עגבניה שגדלו בקרוסלה בליזימטרי שקילה, מוצג באיור 7. העומד הקפילרי על גבי מקור ההשקיה, בו קיימת צפיפות שורשים גבוהה (ראה איור 4), נמוך מהעומד הקפילרי הנמדד במרחק של 10 cm מהמקור. מפלי עומדים לכוון פני השורש נובעים מקליטת מים ע"י הצמח וייבוש סביבת השורש. באיור זה ניתן להבחין בקשר שבין שיעור הדיות ובין גודל מפל העומדים בין פני השורש ובין העומד הנמדד במרחק מההשורש. שיעור הדיות, בעקום הימני העליון באיור 7, נמוך מהדיות הנצפית בעקום התחתון. כתוצאה מכך, מפלי העומדים בעקום השמאלי התחתון גבוהים מאלו שנמדדו בעקום השמאלי העליון.



איור 7- מהלך יומי של האופטרנספירציה (צד ימין) ועומד קפילרי (משמאל), בצמחי עגבניה שגדלו בקרוסלה בליזמטרי שקילה.

מסקנות

שתי המערכות שנבנו לעקוב אחר הפרדיגמה של העומדים הקפילריים בפן הבייני שבין השורש ובין הקרקע ואחר פירוס העומדים כפונקציה של המרחק מפני השורש הינן ייחודיות וחדשניות מבחינת הבנת התהליכים המתרחשים בפן הבייני. השורש מייבש את הפן הבייני, בתהליך קליטת המים, ועל כן העומדים הקפילריים נמוכים מהעומד במרחקים גדולים מפני השורש. ערכי העומד הקפילרי בפן הבייני, שנמדדו בניסויים שנסקרו בדוח זה, [-40] - [-80] ס"מ, גבוהים בהרבה (פחות שליליים) מהערכות מקובלות בספרות שנעות בין -6000 - ס"מ ובין העומד בנקודת כמישה של צמחי תרבות (15000 - ס"מ).

ניתן לכייל מודלים לתיאור קליטת מים על ידי צמחים, באופן ייחודי בתנאי עקות על יד שימוש בערכי העומד בשורש אשר ימדדו בסדרת ניסויים אלו.