

תמר- פעילות מים בעצי תמר במהלך עונת ההשקיה

אפרים צפלביץ, רוני מיכאלובסקי, אבי סטרומזה - מו"פ בקעת הירדן, תחנת צבי
ד"ר שי דניאל, שה"מ, משרד החקלאות ובטחון המזון
ד"ר שבתאי כהן, ד"ר זיו מורנו, ד"ר שמוליק פרידמן, - מנהל המחקר החקלאי, משרד החקלאות ובטחון המזון.

תקציר

בניסוי לבחינת האפשרות להשקיה של תמרים מזן מגיהול לפי הדרישה של העץ נבחנו 3 טיפולים ב- 4 חזרות באקראיות גמורה. הטיפולים היו: 1. מסחרי- השקיה לפי ההמלצות להשקיית תמרים בבקעת הירדן. 2. IOD - פתיחת מים אוטומטית כשהממוצע של מתח המים ב- 2 תחנות של טנסיומטרים בעומק 60 ס"מ עולה ל 30 סנטיבר וסגירה של המים אוטומטית כשהממוצע של מתח המים בשתי תחנות של טנסיומטרים בעומק 120 ס"מ יורד ל 13 סנטיבר + 330 ליטר לעץ מנה קבועה. 3. IOD משופר - פתיחת מים אוטומטית כשממוצע של מתח המים ב 2 תחנות של טנסיומטרים בעומק 60 ס"מ עולה ל 20 סנטיבר וסגירת מים אוטומטית כשהממוצע של מתח המים בשתי תחנות של טנסיומטרים בעומק 120 ס"מ יורד ל 13 סנטיבר + 330 ליטר לעץ מנה קבועה. מתוצאות הניסוי עולה שניתן לנהל את ההשקיה ע"ס חיווי מטנסיומטרים, העבודה בשיטה הזו מלמדת שכנראה יהיה כדאי להגדיל את האינטרוול כדי לאפשר ירידה בכמויות המים ליום. יחד עם זה במעקב שאנחנו מבצעים באמצעות חיישני קרקע, ראינו שהירידה בכמות המים מביאה לעליית המליחות בקרקע בצורה מאוד משמעותית. הדבר בא לידי ביטוי בבדיקות הקרקע ולא ראינו אותה בבדיקה של העלים. בנוסף בבדיקות של ריכוז החמצן נראה שגם בטיפול המסחרי שמקבל כ 24-37% יותר מים אין בעיה של תנאים היפוקסיים באף אחד מהעונות של השנה.

מבוא ותאור הבעיה

תמרים הם ענף מטעים מרכזי בבקעת הירדן והיקפו בעונה הנוכחית מגיע ל- 30,000 דונם. לפי ההמלצות המקובלות כיום, כמות המים הממוצעת להשקיה של דונם תמרים בוגר (החל מגיל 8) הינה 1200-1300 מ³ לעונה. מים הינם משאב במחסור ועלותם יקרה. אי לכך יש מקום לחזור ולבדוק את צריכת המים הכללית של עץ תמר, לנסות לדייק את מרווח ההשקיה וע"י כך לאפשר צמצום הוצאות הגידול ללא פגיעה ביבול – כמות ואיכות.

השפעת רמת ההשקיה על היבול והאיכות של התמרים נבדקה בתנאי הבקעה במס' עבודות. בעקבות מחקר שהתבצע בשנים 2002-2004 נקבע מקדם השקיה ביחס להתאדות גיגית של 0.9. עיקר ההשפעה של מקדם זה ביחס למקדמים נמוכים יותר הייתה על גודל הפרי. בנוסף נמצא שהשקיה לפי מקדמים יותר נמוכים לא השפיע על מס' הידות שיצאו באפריל. מכאן הגענו לניסוח המלצות ההשקיה למטע תמרים בוגר: מחנטה ועד לשלב שכל הפרי הופך לצהוב השקיה לפי 0.9 מהתאדות גיגית. בהמשך, מעבר להשקיה לפי מקדם של 0.5 עד לחנטה בעונה הבאה. במחקר נוסף (2014-2017) שעסק במשטר ההשקיה לקראת גיד, נמצא שירידה במקדם ההשקיה עד למצב שבו לא משקים כלל החל מפרי צהוב ועד לסיום הגידוד עוזר לקבלת אחוז גבוה יותר של פרי יבש שמוכן לאריזה ללא צורך ביבוש נוסף באמצעות תנורים. ביישום ההמלצות בכל הבקעה צריך לקחת בחשבון את איכות המים שיכולים להיות שפירים (מוליכות חשמלית 0.8-1.0 דציסימנס למטר), קולחים (מוליכות חשמלית 1.5-1.8 דציסימנס למטר), מי ירדן (מוליכות חשמלית 6.0-8.0 דציסימנס למטר) או מיהול של מקורות המים האלה. כמו כן בבקעה ישנו מגוון גדול של קרקעות שחלקן מליחות ולא מנוקזות היטב. לאור זאת, הוכן והופץ למגדלי התמר דפון עם הנחיות השקיה מפורטות (צפלביץ וחב', 2022).

בשנים האחרונות מתרבה השימוש בשיטת השקיה לפי דרישה (I.O.D), כשאחת האפשרויות זה לקבל את הדרישה של הצמח מהעלייה של מתח המים בקרקע, בשיטה הזו כמות המים ומרווח ההשקיה נקבעים ע"י חיווי מטנסיומטרים המצביעים על מתח המים בקרקע. שיטה זו נבחנה מספר שנים בתצפית שהתבצעה בקיבוץ קלי"ה באחריות חוקרי מו"פ בקעת הירדן. בתצפית זו ההשקיה הופעלה ונסגרה ע"ס חיווי מטנסיומטרים. פתיחת מים התבצעה כשמתח המים בעומק 60 ס"מ עולה ל 30 סנטיבר וסגירת מים התבצעה כשמתח המים בעומק 120 ס"מ יורד ל 13 סנטיבר כשמתח המים המקסימלית לעץ נקבעה על 1.5 קוב. מסיכום המעקב במשך שנתיים עולה שבטיפול ההשקיה לפי דרישה כמויות המים השנתיות היו כ

50% מהכמויות בהשקיה המסחרית ומרווח ההשקיה היה פי 2-3 יותר ארוך, כל זה ללא פגיעה ביבול או באיכות. ע"ס תצפית זו הוחלט להפעיל ניסוי מסודר שיכלול 2 טיפולים (I.O.D לעומת מסחרי) ולבחון את השפעתה של שיטת ההשקיה לפי דרישה על היבול והאיכות ועל צריכת המים של התמרים. בניסוי בקלי"ה התקבל חיסכון של כ 40% בכמויות המים ללא פגיעה ביבול או באיכות (עדין לא פורסם). ע"ס תוצאות הניסוי בקלי"ה הוחלט להרחיב את הניסיון לחלקה נוספת במרכז הבקעה שבה הקרקעות מוגדרות כקרקעות כבדות והמים שמשמשים להשקיה הם מים מליחים.

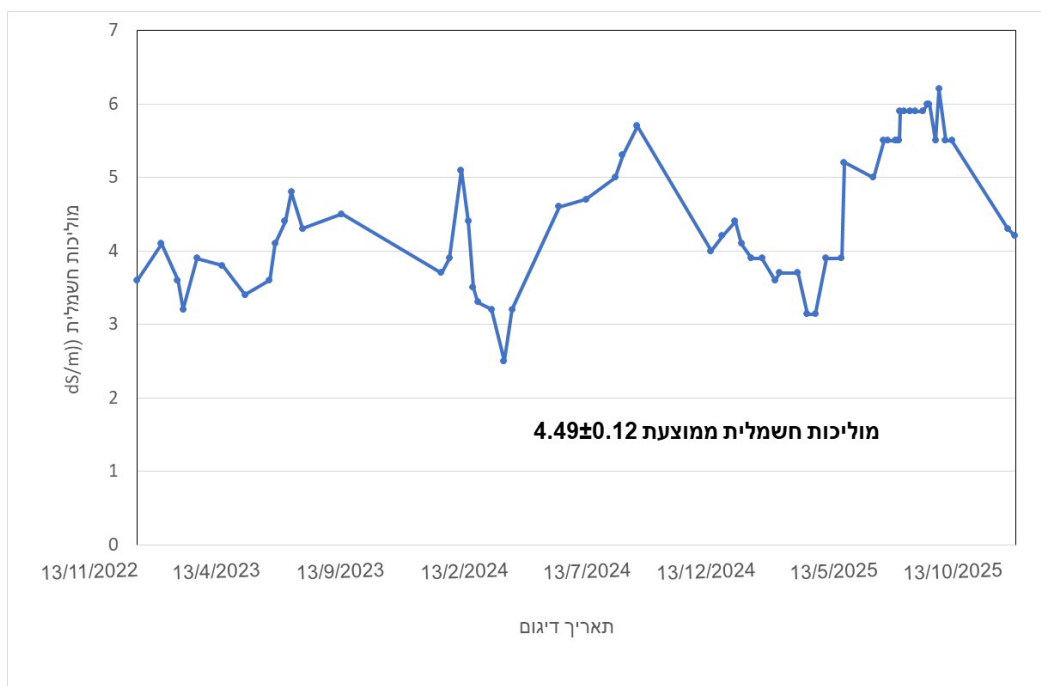
מטרת העבודה הנוכחית הינה לבחון את האפשרות להשקות את התמרים לפי הצריכה שלהם כפי שבאה לידי ביטוי במתח המים בקרקע וזאת בתנאי הגידול שקיימים במרכז הבקעה (קרקע בינונית כבדה, מים ממאגר תירצה (מים מהולים עם מוליכות חשמלית ממוצעת 4-5 דציסימנס למטר). המחקר הנוכחי התחיל בעונה 2023 והוא הסתיים 2025.

מטרות המחקר

מטרת העבודה הנוכחית הינה לבחון את האפשרות להשקות את התמרים לפי הצריכה שלהם כפי שבאה לידי ביטוי במתח המים בקרקע וזאת בתנאי הגידול שקיימים במרכז הבקעה: קרקע בינונית כבדה, מים ממאגר תירצה (מים מהולים עם מוליכות חשמלית ממוצעת 3-5 דציסימנס למטר)

מהלך המחקר ושיטות עבודה

הניסוי מתבצע במטע התמרים של מו"פ הבקעה בזן מג'הול שנת נטיעה 2007 והוא כולל 3 טיפולים ב 4 חזרות באקראיות גמורה. כל חזרה מכילה לפחות 3X3 עצים כך שלעצים הנמדדים יהיו עצי גבול מכל כיוון. השקיה מתבצעת באמצעות 2 מתזים של 55 ליטר לשעה. השתנות המוליכות החשמלית של מי ההשקיה במהלך שלשת השנים של הניסוי מופיעה באיור מס' 1.



איור 1- השתנות רמת המוליכות החשמלית של המים להשקיה במהלך השנים של הניסוי

הפיצול לטיפולים התבצע בתחילת אפריל 2023. הטיפולים בניסוי: **1.** השקיה מסחרית לפי ההמלצות המקובלות בבקעת הירדן. **2.** טיפול IOD- הפתיחה מתבצעת באופן אוטומטי כשהממוצע של מתח המים ב- 2 תחנות טנסיומטרים בעומק 60 ס"מ עולה ל 30 סנטיבר והסגירה מתבצעת כשהממוצע ב-2 תחנות של טנסיומטרים בעומק 120 ס"מ יורד ל 13 סנטיבר+ תוספת קבועה של 330 ליטר לעץ. **3.** טיפול IOD משופר- בטיפול זה הפתיחה של המים מתבצעת באופן אוטומטי כשהממוצע של 2 תחנות של טנסיומטרים בעומק 60 ס"מ עולה ל 20 סנטיבר והסגירה מתבצעת כשהממוצע של 2 תחנות של טנסיומטרים בעומק 120 ס"מ יורד ל 13 סנטיבר. גם בטיפול זה יש תוספת של 330 ליטר לעץ מנה קבועה. גם בטיפול המסחרי הותקנו 2

תחנות של טנסיומטרים לעומקים 60 ו-120 ס"מ. בטיפול זה הטנסיומטרים שימשו לתיעוד בלבד. בשנתיים הראשונות (2023 ו-2024) הטנסיומטרים היו תוצרת חברת וירידיקס ובשנה האחרונה (2025) הטנסיומטרים היו תוצרת חברת עמיטנס. בעונה 2025 עד אמצע מאי הטיפולים קיבלו השקיה זהה בגלל שחברת וירידיקס פשטה את הרגל. החל מסוף מאי בעונה 2025 הטיפולים עבדו עם טנסיומטרים של עמיטנס כשהפיקוד של חברת טלגיל, (ערכי פתיחה וסגירה של המים דומים לערכים שאיתם עבדנו עם הטנסיומטרים תוצרת חברת וירידיקס, בהתאם ל 2 הטיפולים שעבדו לפי הטנסיומטרים). בכל הטיפולים בוצעה סגירת מים לפני גדיד כשכל הפרי בחלקה היה צהוב והחזרה להשקיה לפי טיפולים הייתה באמצע אוקטובר. הדישון בחלקה התבצע באמצעות הדשן טוב ביחס יסודות 9-3-6 בריכוז 0.5 ליטר לקוב במסחרי ובריכוז 1.0 ליטר לקוב בטיפולי הIOD. מתנהל מעקב אחרי מרווחי ההשקיה וכמויות המים.

דילול הידות מתבצע לפי 24-26 ידות לעץ בהתאם לשנים בצורה זהה בכל החלקה. לפני הדילול מתבצעת ספירה לקביעת השפעת הטיפולים על מס' הידות, בתוך כל ידה 40 סנסנים. בכל סנסן 8 פירות. הגדיד התבצע בסבבים לפי ההבשלה בכל טיפול (מינימום נייעור מקסימום פרי שנמצא בתוך השק). בד"כ התבצעו 2-3 גדידים. בגדיד מתבצעת שקילה של כל הפרי, נלקח מדגם של 5 ק"ג מכל סבב של גדיד. על המדגם מתבצע מיון לפרי יבש ופרי רטוב. על הפרי היבש מתבצע מיון לפרי משולפח או לא משולפח לפרי צהוב או חצי צהוב ופרי פסול.

בשנים 2023 ו 2024 בדצמבר בוצעו בדיקות עלים בחלקה לפי המקובל בחלקות מסחריות. בדיקות קרקע בוצעו בסיום הגדיד הראשון לפני החזרה להשקיה לפי טיפולים. הבדיקות בוצעו במדגמי קרקע שנלקחו מדופן של בור שנחפרה במרחק של 0.5 מ' מהגזע עד לעומק 220 ס"מ. במדגמים נבדקה הרמה של יסודות מליחות לכל עומק החתך ויסודות הזנה ב 4 עומקים עליונים. בשנים 2024 ו- 2025 לא ביצענו בדיקות קרקע בשיטות הרגילות בגלל החסרונות של הבדיקה הזו (אין מעקב רציף, איזה נקודה מייצגת, עלות הבדיקות והעבודה). באפריל ולפני הגדיד בשנים 2024 ו- 2025 התבצעה ספירה של מס' הידות לעץ בכל חזרה (בעונה 2023 לא התבצעה ספירה של מס' הידות כי הניסוי התחיל באפריל ולכן הופעת הידות בשנה 2023 איננה קשורה לטיפולים בניסוי). הנתונים עובדו באמצעות ניתוח שונות (ANOVA). השוואת ממוצעים בוצעה באמצעות מבחן Tukey או t-test ברמת מובהקות של 5%.

ניטור של ריכוז החמצן באזור בית השורשים

על מנת לנסות לברר אם קיימים תנאים היפוקסיים וכדי לאפיין את מצב אוורור הקרקע, ריכוזי החמצן בחתך הקרקע בעומקים של 30, 60, ו-90 ס"מ, במיקום אופקי של הקצה הצפוני (לאורך שורת העצים) של התלולית נמדדו ליד 2 עצים (בצפון ובדרום החלקה) בכל טיפול לאורך עונות השנה. המדידות נעשו על-ידי הטמנה של בקבוקי פלסטיק מחוררים בנפח של כ-100 סמ"ק, שאיבה של כ-200 סמ"ק על-ידי מזרק ומדידת ריכוז החמצן במקום על-ידי מד-חמצן (איטי, עם ראש זרימה) של (Utah) apogee (Friedman and Naftaliev, 2012; Ben-Noah et al., 2021). זמינות החמצן בקרקע הוערכה על-ידי מספר Damkohler $Da = \frac{\rho_0 z^2}{2D_s C_{atm}}$, שמתאר את היחס בין קצב הנשימה לקצב אספקת החמצן בדיפוסיה מהאטמוספירה, D_s - מקדם הדיפוסיה האפקטיבי של החמצן בקרקע, z (מ' ליום) ונקבע מתוך התאמה של פירוס ריכוז החמצן הגזי (C), גרי חמצן למ"ק אויר) האנכי, (z) , בחתך הקרקע לפתרון של משוואת הדיפוסיה בהנחה של דיפוסיה תמידית ומבלע חמצן קבוע (ρ_0), גרי חמצן למ"ק ליום) עד לעומק z^* שמתחת לו דיפוסיות (וצריכת) החמצן זניחות (Ben-Noah and Friedman, 2018):

$$\frac{C}{C_{atm}} = 1 - 2D_a \frac{z}{z^*} + D_a \left(\frac{z}{z^*}\right)^2, 0 \leq z \leq z^*$$

(C_{atm} - ריכוז החמצן באטמוספירה, 270 גרי חמצן למ"ק) (תרשים 3). על-פי מדידות במטעים של עצים אחרים נראה שמספר Da גבוה (גדול מערך של 0.1 עד 0.2) מעיד על כך שריכוז החמצן מגביל את קצב נשימת הקרקע (שורשים + אוכלוסייה מיקרוביאלית) (Ben-Noah et al., 2021).

מדידות זרימה בגזע וקביעת צריכת מים של העצים

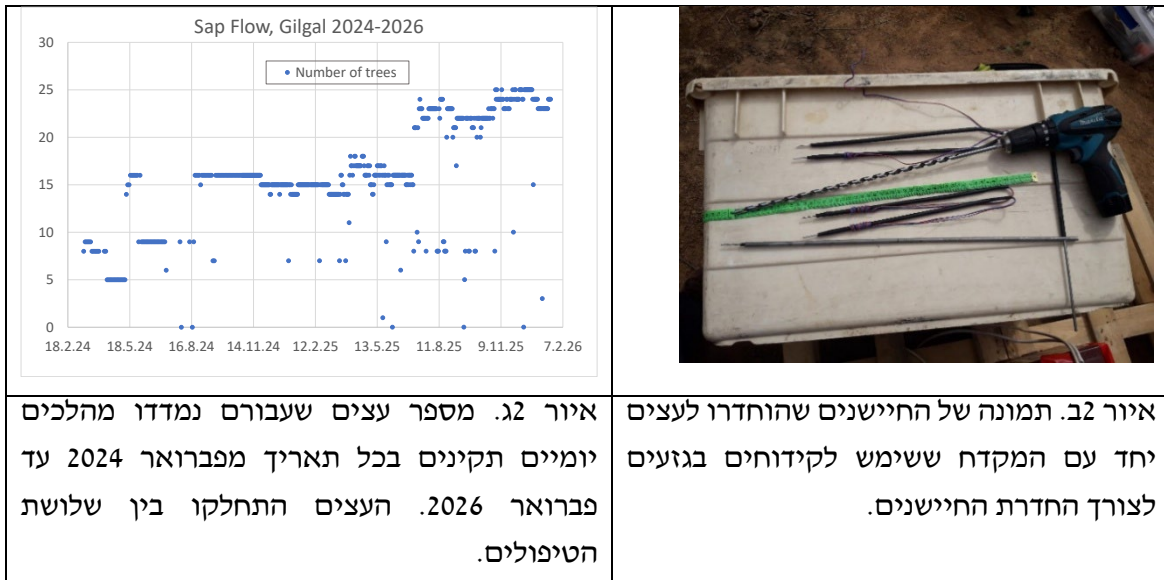
על מנת לקבוע אם, באיזה מידה ומתי יש הבדלים בצריכת מים של עצים בשלושת הטיפולים וגם לקבוע מה היא צריכת המים של העצים, הותקנו חיישני זרימה בגזע. שיטות למדידת זרימה בגזע בשיטות תרמיות וקביעת צריכת מים של עצים על בסיס מדידות אלו פותחו החל משנות ה-80 של המאה הקודמת. שיטה אחת, שיטת דיסיפצית חום (thermal dissipation method, TDM) נמצאה מתאימה למדידת עצי דקל במספר עבודות, כאשר כיוול של השיטה עבור דקלים נעשה בליזימטרים ביוטבתה ע"י אור ספרלינג וחובי (2012). מכיוון שהמדידות בתוך העץ הם עבור קטע קטן של הגזע יש צורך באקסטרופולציה כדי לקבל צריכת כללית של העץ, שגם נידון בעבודה הנ"ל.

לצורך מדידות בדקלים ב 2024 הותקנו חיישנים בשלושת הטיפולים בחזרות השונות. מפת הניסוי ומיקום העצים שנמדדו מובא באיור מספר 2א כאשר הטיפולים הם ביקורת (צהוב), IOD (שחור) ו-IOD משופר (אדום). החיישנים, שנבנו במיוחד עבור דקלים, הם באורך של כ-30 ס"מ כאשר בסוף החיישן נמצא החלק הפעיל, גליל בעובי 2 מ"מ ובתוכו סליל של חוט חימום ומד חום מסוג טרמוקפל. אלו הוחדרו למרכז הגזע. חיישן נוסף, המשמש לחישת טמפרטורת הגזע בלי חימום, הוחדר כ-20 ס"מ מתחת לחיישן המחומם לעומק הגזע. תמונה של החיישנים מובא באיור 2ב. בזמן המדידות, סליל חימום מחומם בעוצמה קבועה והפרש טמפרטורה בין החיישן ייחוס למחומם נמדד. ככל שהזרימה מתגברת ההפרש בין המחומם לייחוס פוחת. השתמשנו במקדם כיוול של ספרלינג וחובי שזהה לזה שנמדד בסוג דקל אחר ע"י Reninger et al. (2012). כדי לקבוע את הזרימה הכללית בעץ יש צורך לדעת מה העובי של הגזע שמוליך מים ומה פרופיל שטף הזרימה בו. גם כאן הסתמכנו על הממצאים של ספרלינג שכלל עבור דקל בעל גזע עם רדיוס של כ-30 ס"מ, בכל הגליל שבמרכז הגזע, שהוא ברדיוס של 6 ס"מ, צפיפות שטף המים ליחידת שטח חתך זהה, וה-7 ס"מ החיצוניים אינם מובילים כלל. באיזור בין שני אלה שטף המים הוא חצי מזה שבמרכז העץ. לפי זה יוצא שכדי לקבל את הצריכה של העץ יש צורך להכפיל את השטף שבמרכז העץ בשטח האפקטיבי המוליך מים, שהוא 890 ס"מ² או 0.089 מ². לשם השוואה בעבודה בעצים רגילים שבהם העצה הפעילה היא ב-5 ס"מ החיצוניים מתחת לקליפה ושהשטף יורד עם העומק באופן ליניארי, עבור גזע ברדיוס של 20 ס"מ אנחנו לוקחים אותו שטח פעיל (0.090 מ²) לפי חישוב שפירסמנו ב Paudel et al. (2013). מכיוון שמצאנו צריכה דומה בדקלים כמו במיני עצים אחרים המשמעות היא שהשטף ליחידת שטח חתך של הגזע הוא באותו סדר גודל אפילו שהאנטומיה של הגזע שונה לגמרי.

בניתוח התוצאות נבדקו הנתונים עבור תקלות במדידות וערכים חריגים, וכמו כן אם המהלכים היומיים סבירים, לדוגמא אם התקבלו ערכים גבוהים בצהרים ונמוכים בערב ובבוקר. ציינו את הימים ועצים שעבורם הנתונים תקינים עבור כל יום. מספר החיישנים/עצים עם נתונים תקינים מובא באיור 2ג. העדר נתונים או מעט נתונים נבעו מבעיות באספקת חשמל למערכות, ובמקרים אחרים בגלל תקלות בחיישנים. הבעיות טופלו ע"י הצוות למיטב יכולתנו ומאז אוגוסט 2024 המערכת עובדת באופן רצוף.

		X לא למדידה ** נמדד		עץ קטן עץ בינוני בקבוק אוויר		I Improved IOD (II) Control - C		IOD משופר IOD מסחרי		מטע תמרים בגילגל 2023		כ-50 מ' מהחלקה ביתן חשמל				
		14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	ראש מערכת
1	שורות - שלוחות	I3 (SFS7)	II-3b** (SFS2)	II-3a* (SFS1)					C-1* (SFM4)	X		I-1* (SFM1) EST (TOD)				
2																
3																
4																
5	צפון >>>	II4 (SFS8)	DL2 (S) CR3000	C-3b (SFS4)	C-3a* (SFS3)			נקודת חשמל	I-2b (SFM5)	X	DL1 (N) CR1000	II-1* (SFM2) EST (TOD)				
6																
7																
8																
9																

איור 2א. מפת הניסוי בגילגל 2024 עם סימון של עצים שבהם נמדד זרימה (ריבועים כחולים).
מרחק בין עצים 9 X 9 מ'.



ניול הפרמטרים ההידראוליים של הקרקע

על מנת לאפיין את מנגנוני זרימת המים והסעת המלחים בתת הקרקע נדרש לאפיין את הפרמטרים ההידראוליים של הקרקע. פרמטרים אלו כוללים את עקומי התאחזה של הקרקע ופונקציית המוליכות ההידראולית. הפרמטרים ההידראוליים כוילו למודל ואן גנוכטן-מועלם (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976) המתוארים במשוואות הבאות:

$$S_w = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^m \quad (1)$$

$$K = K_s \sqrt{S_w} \left\{ 1 - \left[1 - S_w^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \quad (2)$$

כאשר S_w הינה דרגת הרוויה האפקטיבית, K המוליכות ההידראולית, h העומד המטריצי, K_s המוליכות ההידראולית ברוויה, θ תכולת הרטיבות, θ_s ו θ_r הינם תכולת הרטיבות ברוויה ושאריתית (יובש אוויר), α ו m הם פרמטרים אמפיריים ו $m = 1 - 1/n$

הפרמטרים ההידראוליים כוילו על סמך מדידות ישירות. לצורך כך, נלקחו 5 דגימות קרקע לא מופרות מאזורים שונים במטע. המוליכות ההידראולית ברוויה של כל דגימה נמדדה על ידי שימוש במערכת $KSA\ T_h$ (UMS, Munich, Germany). בשיטה זו, דוגמת הקרקע מרוות במים ומחוברת בתחתיתה אל ביורטה מלאה במים המאפשרת זרימה לאורך דוגמת הקרקע. קצב זרימת המים מחושב על ידי שינויים בזמן במפלס המים בביורטה והמוליכות ההידראולית ברוויה מחושבת לפי חוק דרסי. עקומי התאחזה כוילו על ידי שימוש במערכת $HYPRO\ P_h$ (UMS, Munich, Germany). בתהליך זה, מוחדרים שני טנסיומטרים בעומקים שונים אל דגימת הקרקע הלא מופרת (בהפרש של 2.5 ס"מ בין שני הטנסיומטרים) המודדים את העומד המטריצי. הקרקע מונחת על גבי משקל דיגיטלי המחשב את תכולת הרטיבות תוך כדי תהליך ההתייבשות הקרקע (בשל התאדות).

סקרים גאו-חשמלים

עבור כל טיפול, הותקנו 72 אלקטרודות במקביל לשלוחות ההשקיה ובמרווחים הנעים מ 10 ס"מ בקרבת העץ המרכזי, ל-25 50 ס"מ במרכז השורה (בין שני עצים סמוכים) ומרווחים מקסימליים של מטר עבור אלקטרודות הקיצון. מרווחים אלו אפשרו לקבל עומק חדירה של 5 מטרים באות החשמלי ושמירה על רזולוציה גבוהה במוקד העניין (אזור בית השורשים). האלקטרודות עשויות מפלדת אל-חלד ובקוטר של 5 מ"מ ואורך של 15 ס"מ. לכל אלקטרודה חובר גיד העמיד במתחים גבוהים (עד 1,000 וולט) מסוג (LiYv type, Helukable, Germany). הגידים הולחנו יחדיו למחברים של 48 פינים לצורך חיבורם המהיר למכשיר מדידת התנגדות חשמלית רב צמתי מסוג Syscal Proswitch, IRIS instrument, France ולשם שמירה על מיקום האלקטרודות לצורך סקרים גאו-חשמליים עוקבים בזמן. על מנת לאפשר פעילות שוטפת של המטע,

האלקטרודות והגידים נקברו בעומק של 10 ס"מ. אחת לכ-3 חודשים בוצעו סקרים גאו-חשמליים שכללו 3 מערכי הזרקת זרם ומדידת פוטנציאל חשמלי. כל מערך ערך כחצי שעה, מכאן שכל סקר ערך כשעה וחצי וכלל 7,953 מדידות גולמיות כאשר כל מדידה מייצגת ערך ממוצע וסטיית תקן של 6 חזרות. לאחר איסוף הנתונים, בוצע סינון עבור ערכים חריגים (רעשי מדידה גבוהים, זרם הזרקה או פוטנציאל חשמלי נמוכים) והמדידות עברו תהליך היפוך (*Inversion*) על ידי שימוש בתוכנת *ResIPy* (Binley and Slater, 2020) על מנת לספק טומוגרמות דו ממדיות של המוליכות החשמלית הגושית של הקרקע. בנוסף למדידות השוטפות לאורך השנה, בוצעו שני קמפיינים בהם בוצעו מדידות עוקבות בזמן תוך כדי השקיה בטיפול המסחרי (בחודש מאי 2024) וייבוש בטיפולים המסחרי ו-*IOD* (במהלך אוגוסט 2024). בדו"ח זה נתמקד בקמפיין הייבוש שנערך באוגוסט 2024 מכיוון שתוצאות אלו ממחישות היטב את ההבדלים בין טיפולי ההשקיה בניצול המים על ידי השורשים והצטברות מלחים בבית השורשים.

כיוול קשרים פטרופיסיים

לצורך המרת המוליכות החשמלית הגושית (σ_b) של הקרקע לתכולת הרטיבות ומליחות תמיסת מי הקרקע (σ_w) יש לכייל קשרים פטרופיסיים. לצורך הכיול, בוצעו מדידות חשמליות בשטח במערך של 4 אלקטרודות במרווחים של 5 ס"מ בהן הוזרק זרם חשמלי בין 2 אלקטרודות הקיצון והפוטנציאל החשמלי נמדד בין שתי האלקטרודות המרכזיות. לאחר מכן, נאספה דוגמה לא מופרת ממרכז המערך כאשר הנקבוביות ותכולת הרטיבות נמדדו על ידי שקילת הדוגמה לפני ואחרי ייבוש בתנור, והמוליכות החשמלית של תמיסת מי הקרקע נמדדה בשיטת עיסה רוויה. סך הכל נאספו 20 דוגמאות וקשרים הפטרופיסיים כויילו למודל *Waxman and Smith (1968)* הכולל מוליכות פני שטח של מוצקים:

$$\sigma_b = \phi^{C_a} S_w^{S_a} [\sigma_w + \sigma_s / S_w] \quad (3)$$

כאשר S_a , C_a , σ_s הם פרמטרים אמפיריים לכיול.

חיישני קרקע

בנוסף לקווי האלקטרודות שהוטמנו באתר, הותקנו 3 חיישני קרקע מסוג *TDT – SDI-12, Acclima, USA* עבור כל טיפול וחוברו לאוגר נתונים מסוג *CR1000x, Campbell Scientific, USA*. החיישנים הוטמנו בעומקים ומרחקים שונים מבסיס גזע העץ. מיקומי החיישנים מפורטים בטבלה 1. החיישנים מדדו את תכולת הרטיבות הניפחית (θ), הטמפרטורה והמוליכות החשמלית הגושית (σ_b) אחת ל-15 דקות. החיישנים הותקנו בפברואר 2024, עם זאת, נפילות באספקת החשמל גרמו לאיבוד נתונים במהלך חודש אפריל (7.5-14.4) ויוני – יולי (28.7-3.6). בנוסף, חלק מהחיישנים היו תקולים ולא סיפקו מדידות או שסיפקו מדידות לא אמינות. החיישנים התקולים הינם חיישני *Medium* (ראו טבלה 1 למיקום) בקו האדום (*IOD+*) והצהוב (מסחרי).

טבלה 1: כינוי ומיקום חיישני TDT עבור כל טיפול

שם חיישן	מרחק אופקי מגזע העץ [מטר]	עומק [מטר]
<i>Deep</i>	0	0.8
<i>Medium</i>	0.5	0.5
<i>Shallow</i>	1.5	0.3

ניתוח נתונים - פיתוח אלגוריתמים ללימוד מכונה מונחה פיסיקה (PINN)

מכיוון שלא ניתן להפריד את המדידה החשמלית לשני מרכיביה העיקריים (תכולת רטיבות ומליחות תמיסת מי הקרקע) בצורה פשוטה, יש צורך לצמד את המשוואות הפיסיקליות המתארות את זרימת המים והסעת המומסים עם המדידות החשמליות. Moreno et al. (2015) הראו שניתן לבצע את ההפרדה הנ"ל על ידי מודל פיסיקלי המדמה את זרימת המים והסעת המומסים בתת הקרקע. עם זאת, מודל זה כרוך באי ודאות גבוהה הנובעת מאי ידיעת תנאי ההתחלה וחוסר גמישות במשוואות הפיסיקליות, הקשרים ההידראוליים ותנאי השפה. במסגרת מחקר זה, פותחו אלגוריתמים ללימוד מכונה חדשנית המשקלת סטייה מהמדידות ומהמשוואות הפיסיקליות לצורך אימונה, להלן Physics-informed neural network, PINNs (Raissi et al., 2019). מדובר בשיטה חדשנית שבניגוד למודלים פיסיקליים אינה רגישה לתנאי ההתחלה, תנאי השפה, שגיאות מדידה או אי ודאות נוספת שמקורה מהפיסיקה כגון פרמטרים הידראוליים לא מדויקים (Bandai and Ghezzehei, 2021; Haruzi and Moreno, 2023). שילובה של שיטה זו לתיאור זרימת מים והסעת מומסים עם מדידות גאו-חשמליות הוראה כיעיל ומדויק (Haruzi and Moreno, 2023; Sakar et al., 2024; 2026).

תוצאות

יבול ואיכות - בטבלה מס' 2 מרוכזים הנתונים של השפעת הטיפולים על הרמה של היבול והאיכות של התמרים בגיד של השנה הראשונה של הניסוי (2023).

טבלה 2- השפעת הטיפולים על היבול והאיכות בגיד 2023

הטיפול	יבול (ק"ג לעץ)	משקל פרי (גרם)	פרי מוכן לשיווק (%)	פרי משולפח (%)
מסחרי	153.1 א	28.1 אב	34.8	29.7
I.O.D	135.8 ב	28.7 א	28.7	29.3
I.O.D משופר	143.5 אב	26.6 ב	40.8	27.1

• אותיות שונות באותו טור מלמדות על הבדל מובהק ברמה של 5% במבחן t-test student.

מטבלה 2 ניתן ללמוד שבשנה הראשונה של הניסוי היבול בטיפול המסחרי היה גבוה באופן מובהק מהיבול בטיפול ה-IOD. לעומת זאת היבול בטיפול של IOD המשופר לא היה נמוך באופן מובהק מהיבול בטיפול המסחרי. לגבי גודל הפרי ניתן לראות שגודל הפרי הממוצע בטיפול של ה IOD היה גבוה באופן מובהק מגודל הפרי הממוצע בטיפול של ה IOD המשופר. לגבי הפרמטרים האחרים לא היה הבדל מובהק בין הטיפולים. בטבלה מס' 3 מרוכזים הנתונים של השפעת הטיפולים על היבול והאיכות בעונה 2024 (עונה שנייה של הניסוי).

טבלה 3- השפעת הטיפולים על היבול והאיכות הממוצעים בגיד 2024

הטיפול	יבול כללי (ק"ג לעץ)	משקל פרי יבש (גר"י)	שילפוח (%)	פרי מוכן לשיווק (%)
מסחרי	146.6±3.5	24.9±0.5	37.0±4.0	71.7±6.2
IOD	138.2±4.6	25.1±0.4	41.9±3.3	75.1±3.0
IOD משופר	136.8±6.6	24.1±0.4	39.3±7.4	78.0±5.6

מטבלה 3 ניתן ללמוד שבשנת 2024 אף אחד מהטיפולים לא השפיע באופן מובהק על היבול והאיכות של התמרים, בסה"כ היבול יחסית גבוה ומשקל הפרי הממוצע יחסית גדול, כמו כן הפרי נגדד בשלב שהוא היה יחסית יבש. בטבלה 4 מרוכזים הנתונים של השפעת הטיפולים על היבול והאיכות בעונה 2025 (עונה שלישית של הניסוי).

טבלה 4- השפעת הטיפולים על היבול והאיכות בגיד 2025

הטיפול	יבול (ק"ג לעץ)	משקל פרי ממוצע (גר')	פרי מוכן לשיווק (%)	פרי משולפח (%)
מסחרי	109.5	26.6	63.6	23.5 ב
IOD משופר	108.9	27.3	68.2	26.4 ב
IOD	114.9	27.6	58.7	36.9 א

• אותיות שונות באותו טור מלמדות על הבדל מובהק ברמה של 5% במבחן t-test student

מטבלה 4 ניתן ללמוד שגם בשנת 2025 אף אחד מהטיפולים לא השפיע באופן מובהק על היבול, על משקל הפרי הממוצע ועל % הפרי שמוכן לאריזה. לעומת זאת לגבי % הפרי המשולפח ניתן לראות ש % הפרי המשולפח בטיפול המסחרי היה הנמוך ביותר והוא נבדל באופן מובהק מ % הפרי המשולפח בטיפולי ה IOD.

מס' ידות- בטבלה מס' 5 מרוכזים הנתונים של השפעת הטיפולים על מס' הידות שהופיעו באפריל ועל מס' הידות שנשארו בגיד. בשנים 2024 ו-2025 (ב 2024 הורדנו את מס' הידות אחרי הספירה ל 24 ולעומת זאת ב 2025 החלטנו להשאיר 26 ידות לעץ).

טבלה 5- השפעת הטיפולים על הופעת ידות ב אפריל ועל מס' הידות שנשארו על העץ לקראת הגיד בעונות 2024 ו- 2025.

הטיפול	2024		2025	
	אפריל	לפני גיד	אפריל	לפני גיד
מסחרי	31.3	23.5	31.0	24.5 אב
IOD משופר	28.5	22.8	29.5	25.3 א
IOD	30.3	22.8	30.3	23.5 ב

• אותיות שונות באותו טור מלמדות על הבדל מובהק ברמה של 5% במבחן t-test student

מטבלה 5 ניתן ללמוד שבשנת 2024 הטיפולים לא השפיעו על מס' הידות שהופיעו באפריל ועל מס' הידות שנשארו לקראת הגיד. לעומת זאת ב 2025 מס' הידות לפני הגיד בטיפול ה IOD המשופר היה גבוה באופן מובהק ממס' הידות שהיה בטיפול ה IOD.

כמויות המים להשקיה

בטבלה מס' 6 מרוכזים הנתונים של סה"כ כמויות המים שניתנו לפי טיפולים במ"ק לדונם (בשנת 2023 הנתונים הם מתחילת הניסוי בתחילת אפריל ועד סגירת המים, בשנים 2024 ו- 2025 הנתונים הם מפתחת המים אחרי סיום הגיד ועד לסגירת המים לקראת גיד בעונה הבאה).

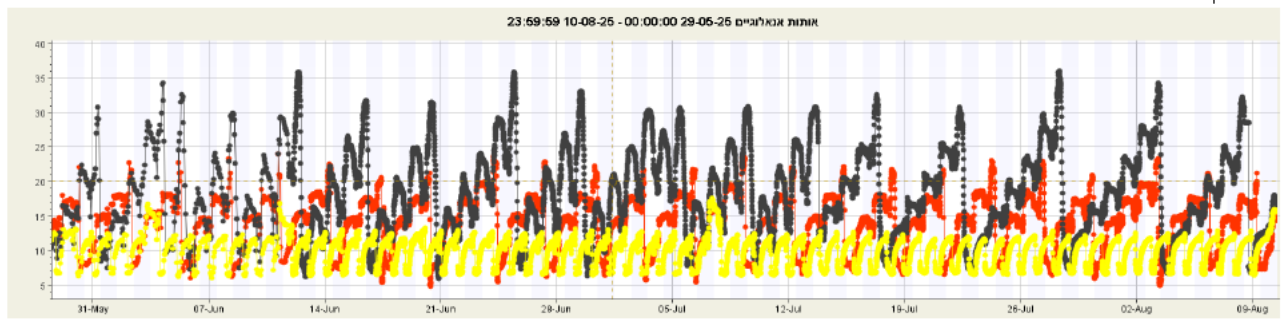
טבלה 6- השפעת הטיפולים על כמויות המים שניתנו במ"ק לד' לשנה וסה"כ כמויות המים לטיפול

הטיפול	2023	2024	2025	סה"כ ל 2024-2025	% חיסכון ממוצע
מסחרי	779	1131	1403	2534	-
IOD משופר	277	869	1063	1932	24
IOD	257	678	921	1599	37

כמויות המים ב 2023 יותר נמוכות בגלל שהחלוקה לטיפולים התבצעה רק בתחילת אפריל, כמו כן בעונה הזו לא הוספנו עוד מנת מים קבועה מעבר לפתיחה והסגירה של הטנסיומטרים. לכן בטבלה העונה הזו לא נכנסה לחשבון של הסה"כ ולא נכנסה גם לחשבון של החיסכון הממוצע. החל מתחילת העונה השנייה (2024) הוספנו מנה קבועה של 330 ליטר להשקיה ל 2 טיפולי ה IOD. בעונה 2025 סה"כ כמויות המים יותר גדולות ביחס ל 2024, כנראה בגלל שנה יותר חמה. בסה"כ ניתן לראות שבטיפול ה IOD המשופר החיסכון הוא 24% ובטיפול של ה IOD החיסכון 37%.

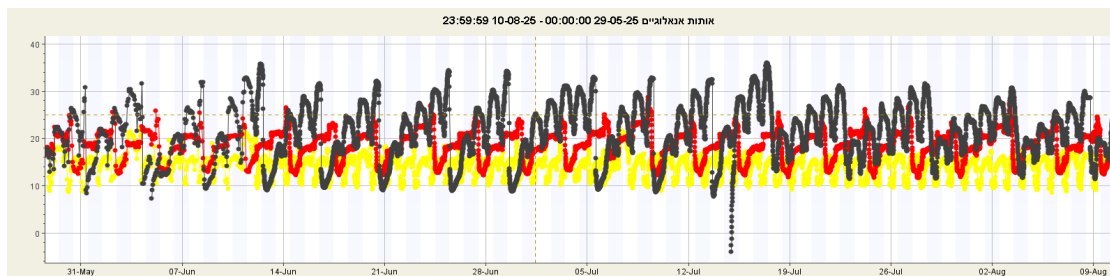
מתח המים בקרקע

באיור מס' 3 מרוכזים הנתונים של מתח המים בקרקע בעומק 60 ס"מ ב 2025 בטיפולים שהיו בניסוי (צהוב- מסחרי, אדום- IOD משופר, שחור- IOD) בדו"ח הנוכחי אנחנו מצגים נתוני טנסיומטרים כפי שהתקבלו ב 2025, יש לציין שהמגמות שהתקבלו בשנה זו היו דומות לנתונים בשנים הקודמות.



איור 3- השפעת הטיפולים על מתח המים בקרקע בעומק 60 ס"מ ב 2025

מאיור 3 ניתן ללמוד שהערכים המתוכננים בטיפול השחור (IOD) והאדום (IOD משופר) התקיימו באופן מעשי, בשחור (IOD) מתח המים הגיע ל 30 סנטיבר+ כ 2 סנטיבר נוספים של זמן תגובה ובאדום (IOD משופר) המתח הגיע ל 20 סנטיבר וגם בטיפול זה יש עוד כ 1-2 סנטיבר של זמן התגובה, כמו כן בטיפול המסחרי הערכים הגיעו בממוצע ל 15 סנטיבר, כך שהמסחרי היה יותר רטוב מ 2 טיפולי הטנסיומטרים. במסחרי רואים שהאינטרוול היה יומי לפי התכנון ולעומת זה בטיפול האדום (IOD משופר) האינטרוול הממוצע עומד על 2.9 ימים ובטיפול השחור (IOD) האינטרוול הממוצע היה פעם ב 4.1 ימים. באיור מס' 4 מרוכזים הנתונים של מתח המים בקרקע בעומק 120 ס"מ (צהוב- מסחרי, אדום- IOD משופר, שחור- IOD).



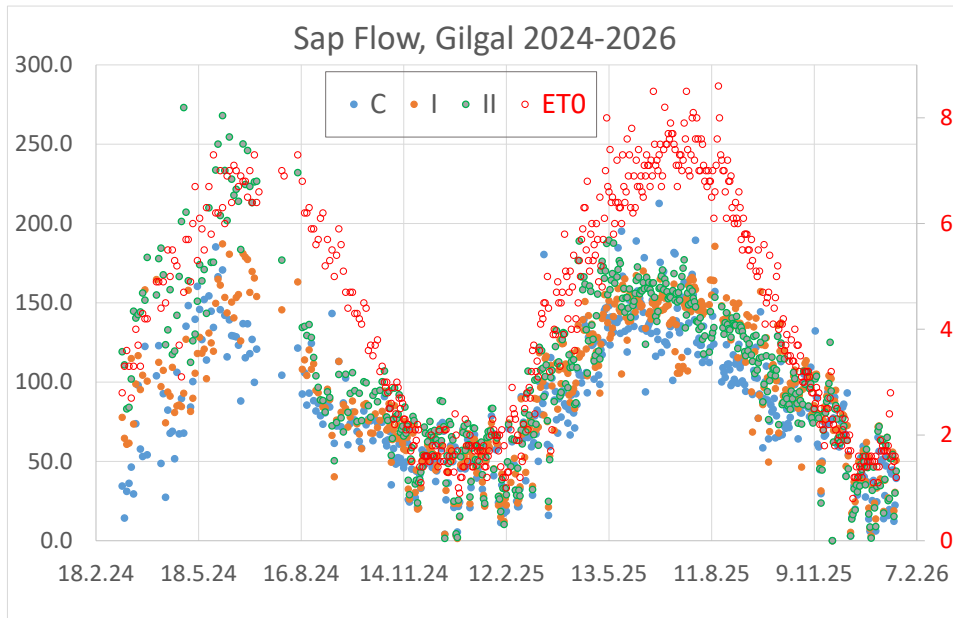
איור 4- השפעת הטיפולים על מתח המים בקרקע בעומק 120 ס"מ

מאיור 4 ניתן ללמוד שבתגובה להשקיה בטיפול המסחרי מתח המים בקרקע יורד ל 10 סנטיבר, לעומת זאת בטיפול של ה IOD המשופר הערכים יותר גבוהים (הערכים שהטנסיומטרים יורדים אליהם אחרי ההשקיה) הם 12-13 סנטיבר בלבד ובטיפול של ה IOD עד ה 12/7 מתח המים יורד כתוצאה מההשקיה ל 10 סנטיבר ורק בהמשך הירידה מגיעה ל 12-13 סנטיבר בלבד.

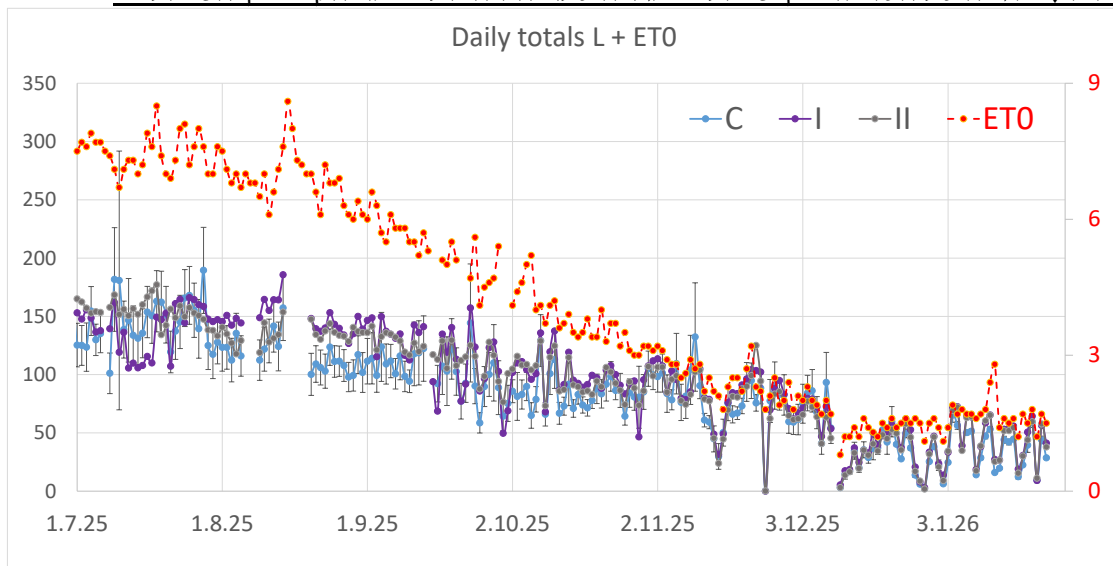
זרימת מים בגזע העצים

איור 5 מראה את הצריכה היומית שנמדדה בשלושת הטיפולים בניסוי ביחידות של ליטר לעץ. יש לציין שיש מגמה של צריכה יותר גדולה בטיפולי IOD בקיץ אפילו שהבדל זה אינו מובהק סטטיסטית. באיור 5 הוספנו נתוני התאדות ייחוס לפי פנמן מונטיס מהתחנה המטאורולוגית של השרות המטאורולוגי בגלגל, הנמצא במו"פ כק"מ מחלקת הניסוי.

איור 6 מראה את אותם נתונים עבור סוף הקיץ וסתיו 2025 עם קווי שגיאת התקן עבור טיפול הביקורת. בתחילת אוגוסט הופחתה השקיה כדי ליישב את הפרי. ניתן לראות באיור את הירידה בצריכת מים בטיפולים שהייתה מתונה השנה. בכל מקרה בתקופת הייבוש (אוגוסט-ספטמבר) צריכת מים בביקורת הייתה נמוכה מהטיפולים האחרים על סף המובהקות.



איור 5- מהלך צריכה יומית של העצים (ליטר לעץ, הסקאלה השמאלית) במשך שנתיים. ET0 מציין התאדות ייחוס במ"מ (הסקאלה הימנית). בחינה של השוניות בין טיפולים מראה שלא היו הבדלים מובהקים בין הטיפולים.



איור 6- מהלך צריכה יומית של העצים (ליטר ליום) בטיפולים והתאדות ייחוס ET0 (במ"מ) בסוף קיץ 2025 וחורף 2025-2026 עד סוף ינואר. בדיקות עלים

בטבלה מס' 7 מרוכזים הנתונים של רמת הכלוריד ורמת יסודות ההזנה בעלים בבדיקות שבוצעו ב 12/2024 (ב 2025 לא ביצענו בדיקות עלים)

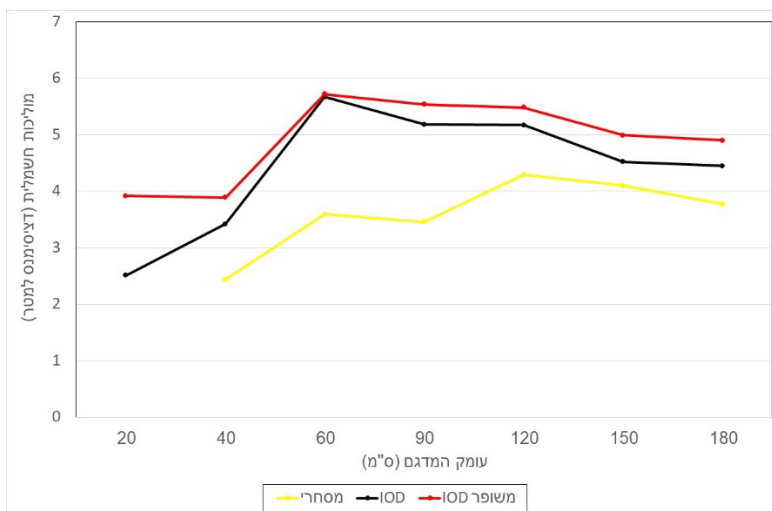
טבלה 7- השפעת הטיפולים על רמת יסודות הזנה בעלים (הבדיקות בוצעו ב 12/2024)

הטיפול	חנקן (%)	זרחן (%)	אשלגן (%)	כלוריד (%)	מגניום (%)	ברזל (מ"ג/ק"ג)	מנגן (מ"ג/ק"ג)	אבץ (מ"ג/ק"ג)
מסחרי	1.44	0.13	0.62	0.57	0.18 ב	274	34.3	16.9
IOD משופר	1.50	0.14	0.61	0.56	0.19 ב	315	35.3	15.3
IOD	1.44	0.14	0.72	0.58	0.22 א	271	39.6	18.3

• אותיות שונות באותו טור מלמדות על הבדל מובהק ברמה של 5%

מטבלה 7 ניתן ללמוד שלא היה הבדל מובהק בין הטיפולים ברמה של יסודות ההזנה, מלבד הרמה של המגניום שהייתה גבוהה באופן מובהק בטיפול של ה IOD ביחס לרמה בטיפול המסחרי. באופן כללי הרמה של החנקן, האשלגן והאבץ יחסית נמוכים לעומת זאת הזרחן והברזל נמצאים בעודף בכל הטיפולים שיש בניסוי. לגבי הכלוריד ניתן לראות שאין הבדל מובהק בין הטיפולים וזאת למרות שטיפול ה IOD ו- IOD משופר קיבלו הרבה פחות מים ממה שקיבל הטיפול המסחרי.

באיור מס' 7 מרוכזים הנתונים של השפעת הטיפולים על המוליכות החשמלית במיצוי העיסה הרוויה בחתך הקרקע לפני החזרה להשקיה אחרי הגידול ב-2023 (10/30).

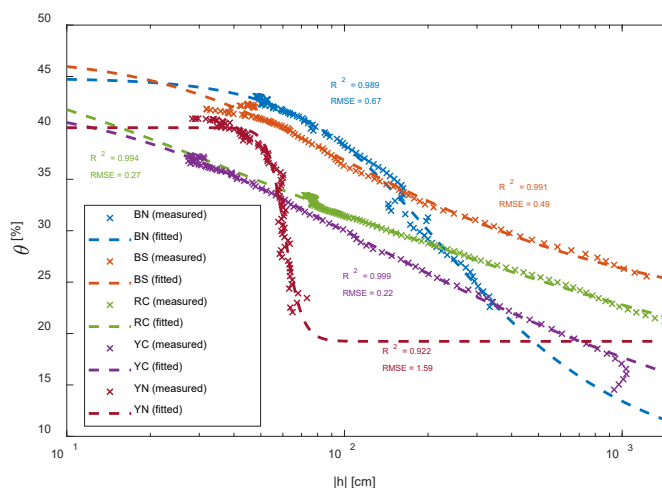


איור 7- השפעת הטיפולים על הרמה של המוליכות החשמלית בחתך הקרקע ב- 10/2023

מאיור 7 ניתן ללמוד שיש הבדל במוליכות החשמלית בין הטיפול המסחרי לטיפולי ה IOD, ההבדל הוא 1-2 יח' של מוליכות חשמלית, בנוסף ניתן לראות שאין הצטברות מיוחדת של מלחים בעומק הקרקע בטיפולים של ה IOD שקיבלו עד 50% פחות מים. בכל מקרה המוליכות החשמלית במיצוי העיסה הרוויה מגיע במקסימום למוליכות החשמלית של המים וזה בזמן שבו המוליכות החשמלית עשויה להיות הגבוהה ביותר בשנה (לפני החזרה להשקיה אחרי כחודשים שבה החלקה לא קיבלה מים).

כיול הפרמטרים ההידראוליים של הקרקע

איור 8 מציג את עקומי התאחיזה שכולו לפי מודל ואן-גנוכטן עבור הקרקעות השונות. טבלה 8 מסכמת את הפרמטרים ההידראוליים שכוילו על סמך המדידות הישירות. ניתן לראות שרוב הדוגמאות מראות עקומי תאחיזה דומים (להבדיל מדוגמא YN שמראה ערך חריג של n) וערכים דומים של המוליכות ההידראולית ברוויה (להבדיל מדוגמא RC). ההתאמה טובה עם ערכי $R^2 > 0.99$ עבור רוב הדוגמאות ושגיאה ממוצעת של $RMSE < 0.7\%$ בתכולת הרטיבות. בנוסף, הערכים הממוצעים (להוציא ערכים חריגים הצבועים באדום בטבלה 8) מסכימים אחד עם השני ועם ערכים חזויים לפי מרקם הקרקע (Schaap et al., 2001).



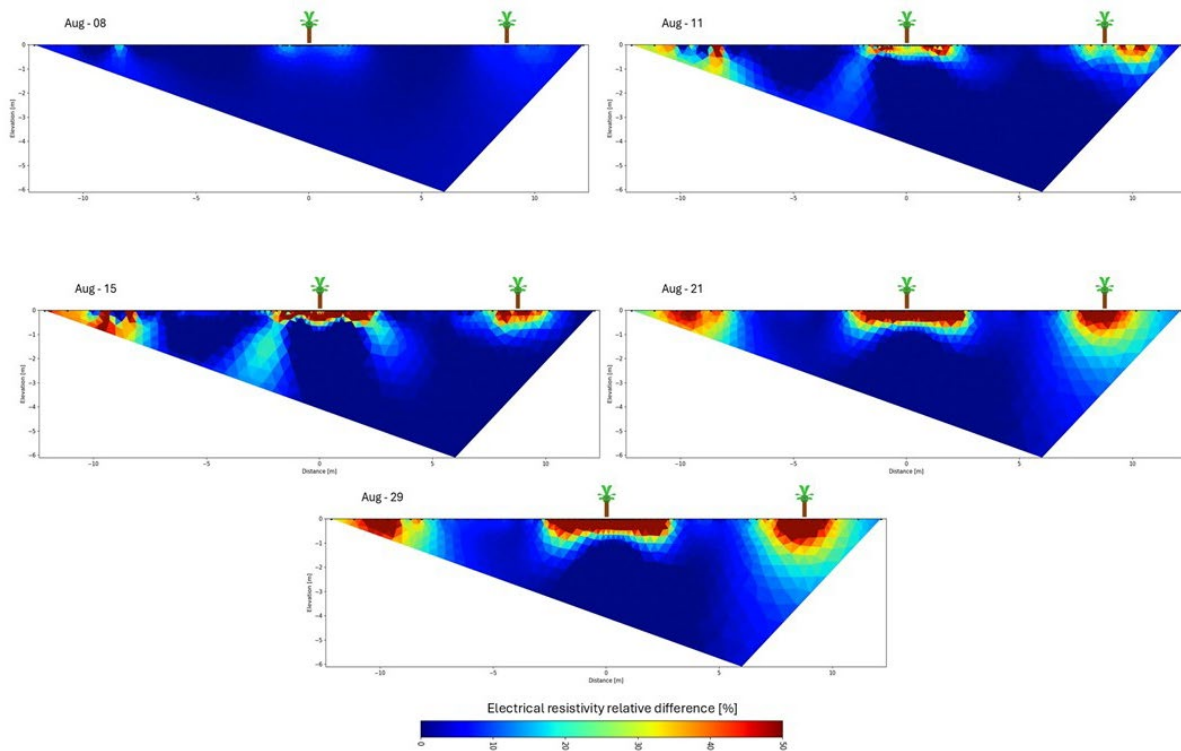
איור 8 : עקומי תאחיזה שנמדדו (איקסים) וכילו (קווים מקווקווים) עבור דגימות הקרקע השונות

טבלה 8 : פרמטרים הידראוליים מכוילים

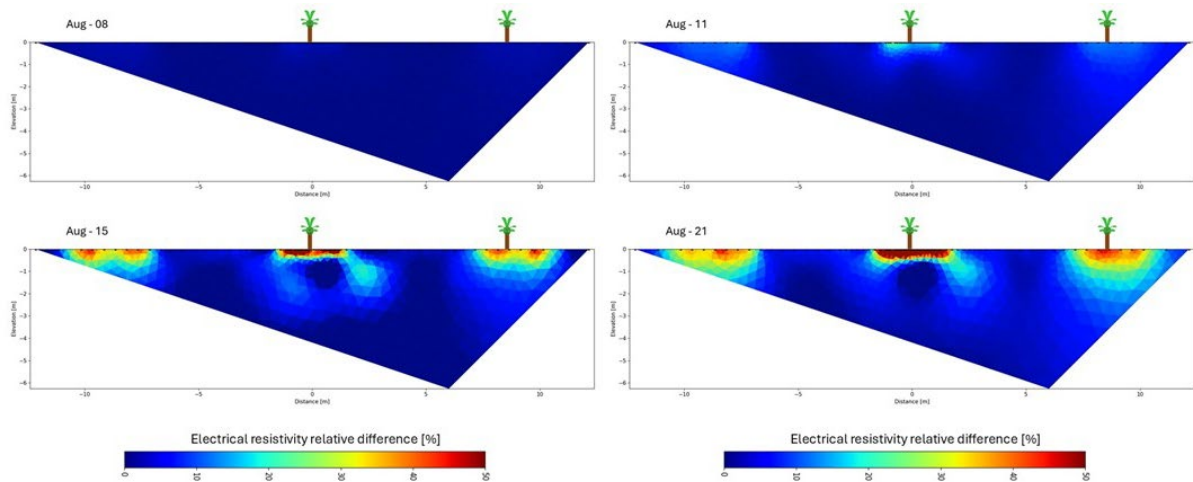
$K_s \left[\frac{cm}{day} \right]$	n	$\alpha \left[\frac{1}{cm} \right]$	θ_r	θ_s	דוגמא
11	1.888	0.0069	0.066	0.45	BN
15	1.721	0.0159	0.24	0.45	BS
2	1.145	0.149	0	0.47	RC
13.3	1.244	0.0363	0	0.43	YC
19.5	14.51	0.0165	0.19	0.40	YN
14.7	1.50	0.045	0.10	0.44	ממוצע

סקרים גאו-חשמלים

איור 9 מציג את ההפרשים היחסיים בהתנגדות החשמלית ביחס לטומוגרמת הייחוס שנמדדה בעת הפסקת ההשקיה 6) לאוגוסט 2024) עבור הטיפול המסחרי. איור 10 מציג את אותו הדבר עבור טיפול הIOD המשופר.



איור 9 : שינויים יחסיים בהתנגדות החשמלית בתקופת הייבוש (אוגוסט 2024) בטיפול המסחרי

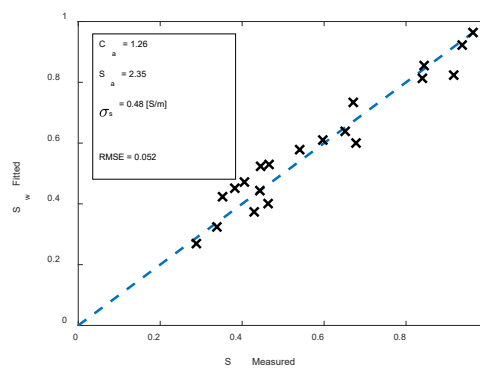


איור 10 : שינויים יחסיים בהתנגדות החשמלית בתקופת הייבוש (אוגוסט 2024) בטיפול הIOD המשופר

מהשינויים היחסיים בהתנגדות החשמלית הגושית לאורך עונת הייבוש ניתן לראות מאפיינים זהים בשני הטיפולים (איורים 9 ו-10). ההתנגדות החשמלית עולה בצורה עקבית לאורך עונת הייבוש בקרבת שורשי העצים שמעידה על ירידה בתכולת הרטיבות. העלייה מוגבלת למרחק אופקי של כ-3.5 מטרים מגזע העץ ועד לעומק של כ-0.8-1 מטרים מתחת לגזע. מכיוון שאין השקיה או משקעים לאורך אותה תקופה, העלייה בהתנגדות החשמלית קשורה ישירות לצריכת מים על ידי שורשים. תבניות השינויים בהתנגדות החשמלית מתאימה למה שהיינו מצפים מצריכת שורשים עם פירוש שחודר עד לעומק של כמטר ועד למרחק אופקי של כ-3 מטרים ממקור ההשקיה. ההבדל העיקרי בשינויים בהתנגדות החשמלית בין שני הטיפולים הוא שינויים משמעותיים יותר עבור הטיפול המסחרי (איור 9) לעומת טיפול הIOD המשופר (איור 10). הבדל זה יכול להצביע על: (1) צריכת מים גבוהה יותר עבור הטיפול המסחרי. (2) תנאי התחלה שונים – בגלל שהקשרים הפטרופיסיים אינם ליניאריים, רטיבות גבוהה יותר בתחילת עונת הייבוש תגרור עלייה משמעותית יותר בהתנגדות החשמלית גם עבור צריכת מים נמוכה. (3) הצטברות מלחים – למליחות תמיסת מי הקרקע השפעה הפוכה מתכולת הרטיבות על ההתנגדות החשמלית הגושית ולכן, ירידה בתכולת הרטיבות בעקבות צריכת שורשים תגרום לעלייה בריכוז המלחים ועל כן השינויים באות החשמלי יהיו קטנים יותר עבור תנאי מליחות גבוהים. ניתוח תוצאות כמותי מובא בהמשך הדו"ח.

כיוול קשרים פטרופיסיים

איור 11 מציג את ערכי דרגת הרוויה (S_w) המכויילים לאלו שנמדדו, הערכים שכוילו וטיב ההתאמה. סך הכל ניתן לראות התאמה טובה עם שגיאה ממוצעת של 4% בדרגת הרוויה. הערכים שכוילו אף מסכימים עם ערכים מקובלים בספרות (Friedman, 2005; Laloy et al., 2011).



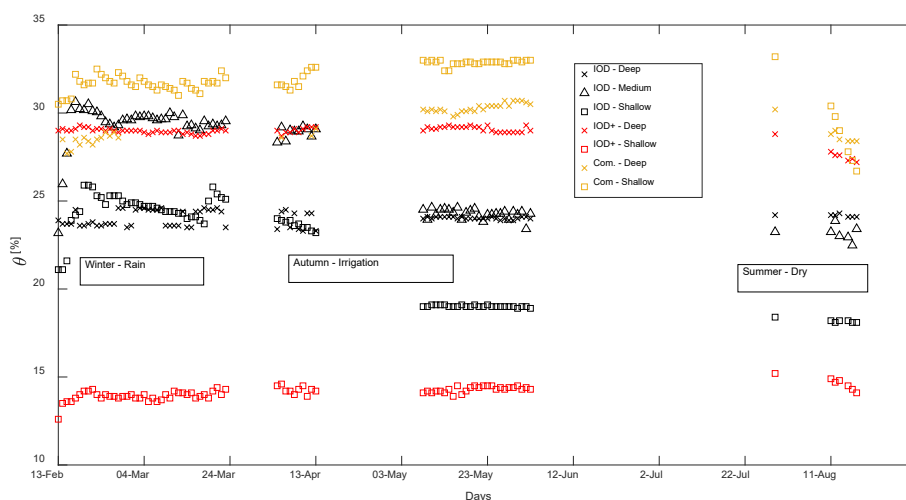
איור 11 : כיוול קשרים פטרופיסיים - דרגת רוויה מדודה מול זו המחושבת על ידי מודל Waxman & Smith המכויל

חיישני קרקע

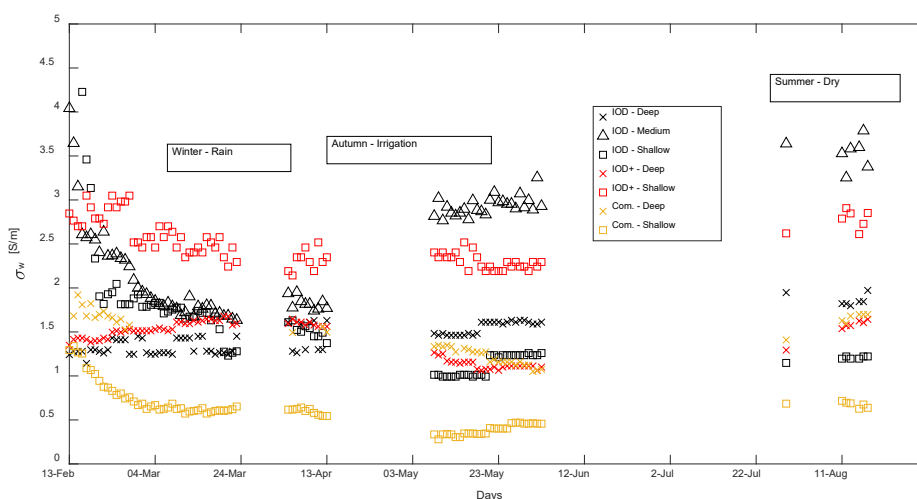
איור 12 מראה את תכולת הרטיבות שנמדדה עבור הקו השחור (IOD), האדום ($IOD+$) והצהוב (מסחרי) בעומקים השונים כפונקציה של מספר הימים שעברו מזמן ההתקנה. בנוסף, איור 13 מראה את המליחות שחושבה על סמך הקשרים הפטרופיסיים שכוילו עבור החיישנים השונים ואיור 14 מציג את הטמפרטורה שנמדדה לעורך העונה בעומקים השונים (ממוצע של 3 חיישנים עבור כל עומק). ערכי הטמפרטורה שימשו לצורך תיקון המוליכות החשמלית - 2% עלייה ב σ_b עבור כל מעלת צלזיוס (Rhodes et al., 1999). לצורך תיקון רציף עם העומק של הטמפרטורה, מדידות החיישנים (ופני השטח) הותאמו למודל המניח דעיכה אקספוננציאלית עם העומק:

$$T(z) = a \cdot \exp(-b \cdot z) + c \quad (4)$$

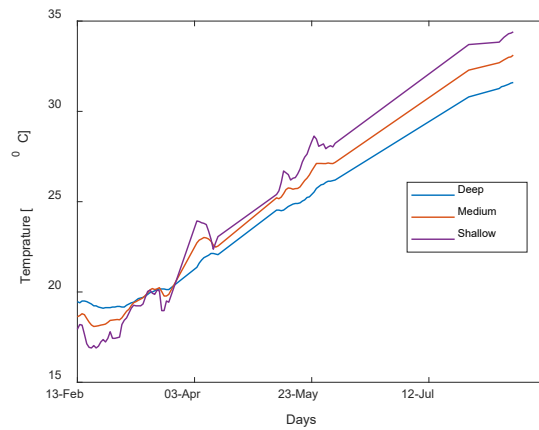
כאשר a, b, c הינם פרמטרים אמפיריים שכוילו עבור כל זמן בו בוצע סקר גאו-חשמלי. לצורך המחשה, איור 15 מראה את פרופיל הטמפרטורה שהותאם למדידות ב3 תאריכים שונים במשך תקופת הייבוש (אוגוסט 2024).



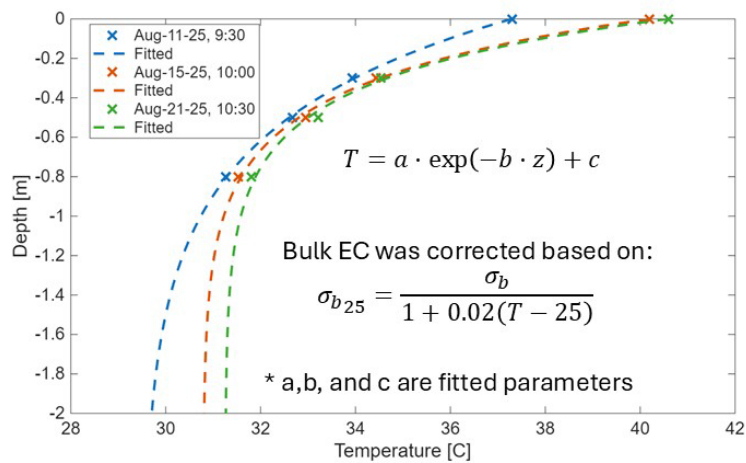
איור 12: תכולת רטיבות שנמדדה על ידי חיישנים מקומיים לאורך השנה (2024). הטיפולים השונים מסומנים בצבעים של שחור עבור IOD, אדום עבור IOD+ וצהוב עבור מסחרי. איקסים מציינים את החיישן העמוק, משולשים בינוני וריבועים רדוד



איור 13: ריכוז מלחים (מוליכות חשמלית של תמיסת מי הקרקע) שחושבה על סמך המרת המוליכות החשמלית הגושה שנמדדה על ידי חיישנים מקומיים ושימוש בערכי הרטיבות והקשרים הפטרופיסיים המכוליים (משוואה 3) לאורך השנה. הטיפולים השונים מסומנים בצבעים של שחור עבור IOD, אדום עבור IOD+ וצהוב עבור מסחרי. איקסים מציינים את החיישן העמוק, משולשים בינוני וריבועים רדוד



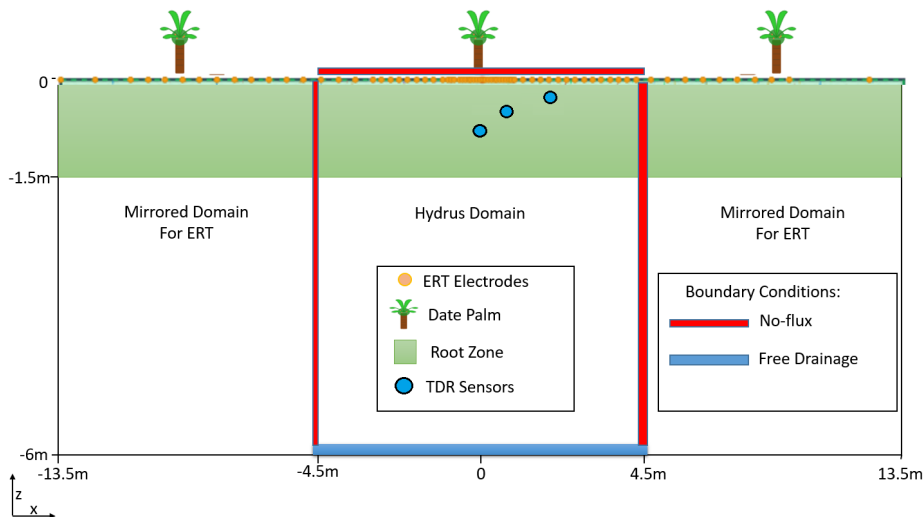
איור 14 : טמפרטורה לאורך שנת 2024 שנמדדה על ידי חיישני מקומיים



איור 15 : פרופיל טמפרטורה מכויל (קווים רציפים) לעומת מדידות מקומיות (איקסים) בתאריכים שונים לאורך תקופת הייבוש של אוגוסט 2024

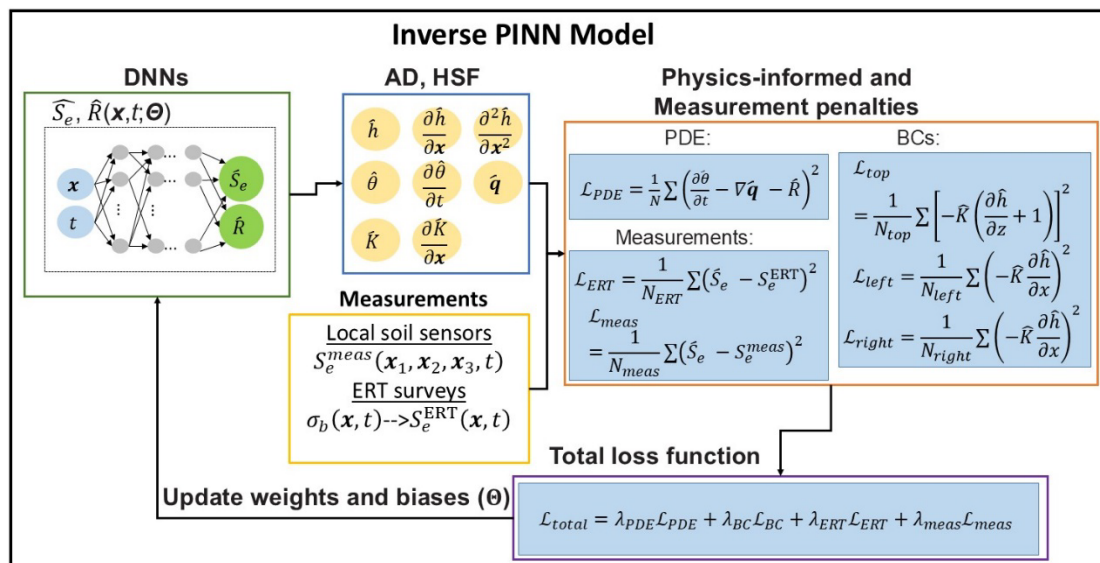
ניתוח נתונים על ידי לימוד מכונה מונחה פיסיקה (PINN)

לצורך בחינה ראשונית של המערכת לאפיין פעילות שורשים עם מדידות גאו-חשמליות, בוצע ניסוי סינטטי בעזרת סימולציות ממוחשבות המדמות את אתר הניסוי (עם הפרמטרים ההידראוליים והפטרופיסיים המכוילים). התוצאות הסינטטיות פורסמו בכתב עת מדעי (Sakar et al., 2026) ובדו"ח זה נסכם רק את עיקרי המאמר. הסימולציות בוצעו על ידי שימוש בתוכנת Hydrus 2D/3D (Šimůnek et al. 2012), ומידלו את דינמיקת המים בקרקע בעת תקופת הייבוש (ללא השקיה). לצורך קבלת תנאי התחלה מציאותיים, מודלו מחזורי השקיה וגשם במשך שנה. צריכת השורשים מודלה לפי מודל Feddes (Feddes et al., 1976). יש לציין שבשלב זה, הסימולציות הזניחו את תנועת המומסים בקרקע. איור 16 מציג את מרחב המודל.



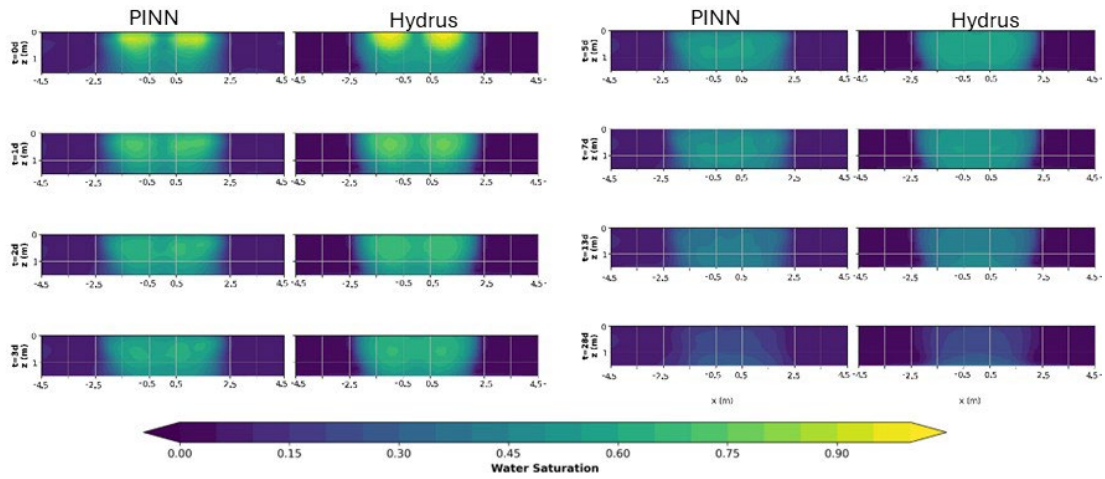
איור 16: איור סכמתי של מרחב המודל הנומרי לצורך בחינת מערכת PINN

אימון מערכת ה-PINN הסתמך על הטומוגרמות החשמליות (הסינטטיות) בזמנים שונים לאורך עונת הייבוש, ומדידות רטיבות מחיישנים בודדים והמשוואות הפיסיקליות (משוואת ריצ'רדס לזרימת מים בקרקע). אימון המערכת לא כלל מידע על צריכת השורשים (פירוש שורשים, פונקציית צריכה וקצבי דיות) וגם לא על תנאי ההתחלה. איור 17 מציג תרשים זרימה סכמטי של אימון מערכת ה-PINN.

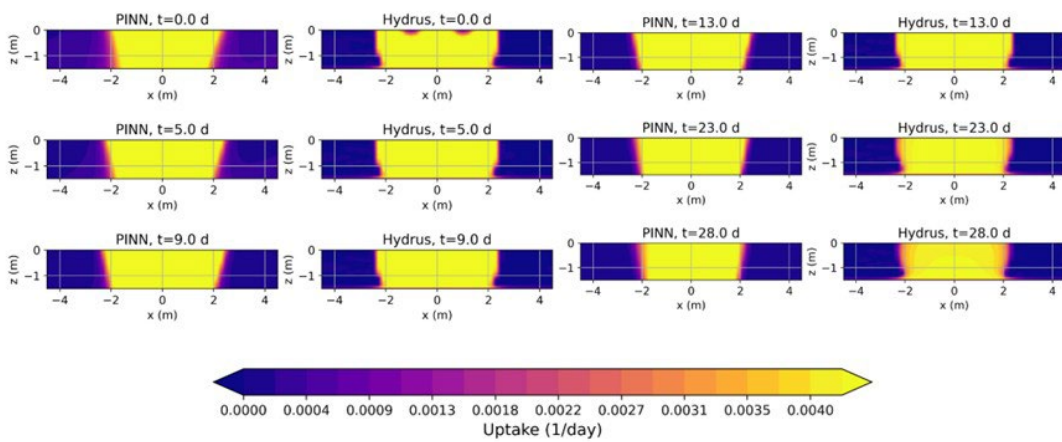


איור 17: תרשים זרימה סכמטי של אימון מערכת ה-PINNs. הנגזרות החלקיות מחושבות על ידי Automatic differentiation (Baydin et al., 2018). פונקציית המטרה נקבעת על סמך ההתאמה למשוואות הדיפרנציאליות החלקיות ובנקודות צפות הנבחרות בצורה אקראית במרחב ובזמן. סטייה מהמדידות מוכללת בפונקציית המטרה

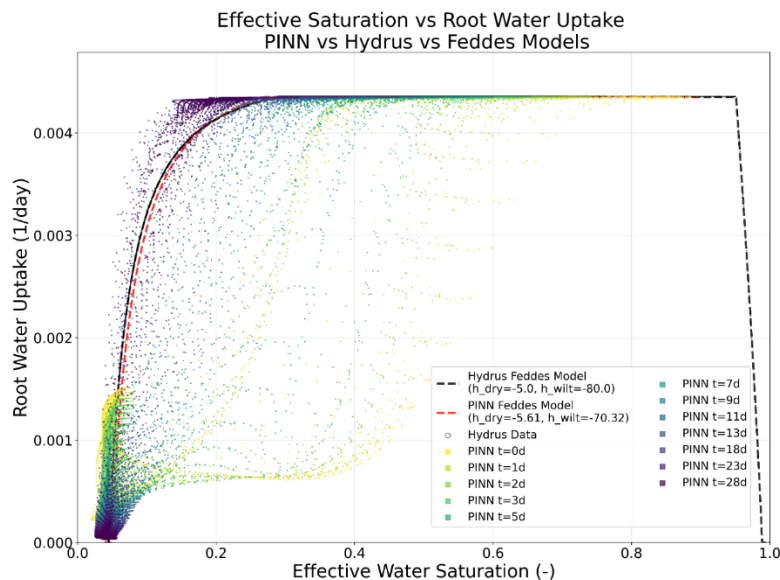
איור 18 מראה את התאמת תוצאות מערכת ה-PINN לדרגת הרוויה של המודל. איור 19 מראה את התאמת תוצאות המערכת למודל עבור קצבי צריכת המים על ידי שורשים. בנוסף, איור 20 מציג את מודל Feddes המשוחזר (קו אדום מקווקו) על ידי מערכת ה-PINN לעומת מודל Feddes שנלקח על ידי מודל זרימת המים (Hydrus). יש לציין שאף אחד מהערכים הנ"ל (רטיבות, צריכת שורשים ומודל צריכת מים על ידי שורשים) לא היה ידוע למערכת ה-PINN כלל.



איור 18: דרגת רוויה חזויה על ידי מערכת ה-PINN (משמאל) לעומת דרגת הרוויה של המודל ("האמיתית") בזמנים שונים לאורך תקופת הייבוש



איור 19: צריכת מים על ידי שורשים חזויה על ידי מערכת ה-PINN (משמאל) לעומת זו של המודל ("האמיתית") בזמנים שונים לאורך תקופת הייבוש



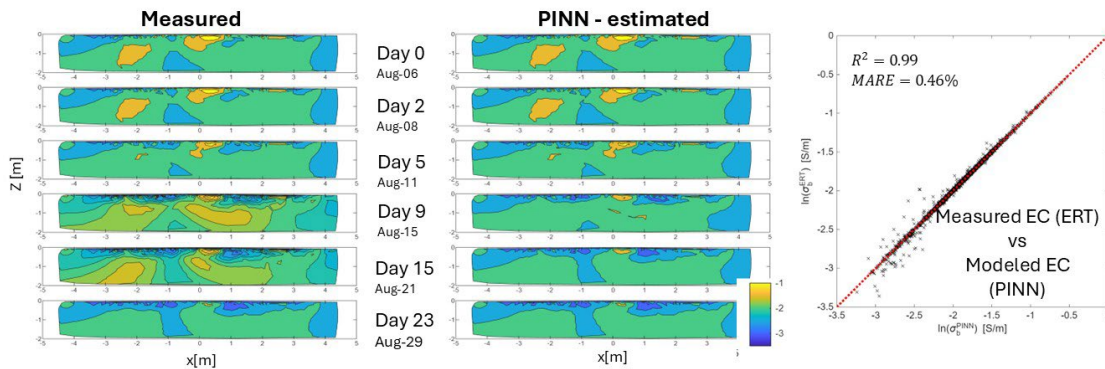
איור 20: מודל Feddes האמיתי (קו שחור רציף) ומודל Feddes מכוויל על ידי חיזוי של מערכת ה-PINN (קו אדום מקוקו)

לאחר שמערכת ה-PINN נבדקה והוכח שהינה מסוגלת לתאר בצורה מדויקת את דינמיקת המים וצריכת השורשים בתת הקרקע, המערכת יושמה עבור הנתונים האמיתיים שנאספו במהלך תקופת הייבוש באוגוסט 2024. לצורך כך, מערכת ה-PINN הורחבה על מנת לכלול גם תנועת מומסים (כפי שמוראה אצל Haruzi and Moreno, 2023). איורים 21-22 מציגים את התאמת מערכת ה-PINN לטומוגרמות החשמליות האמיתיות (לפי איורים 9-10; מוליכות חשמלית גושית \leq ההופכי

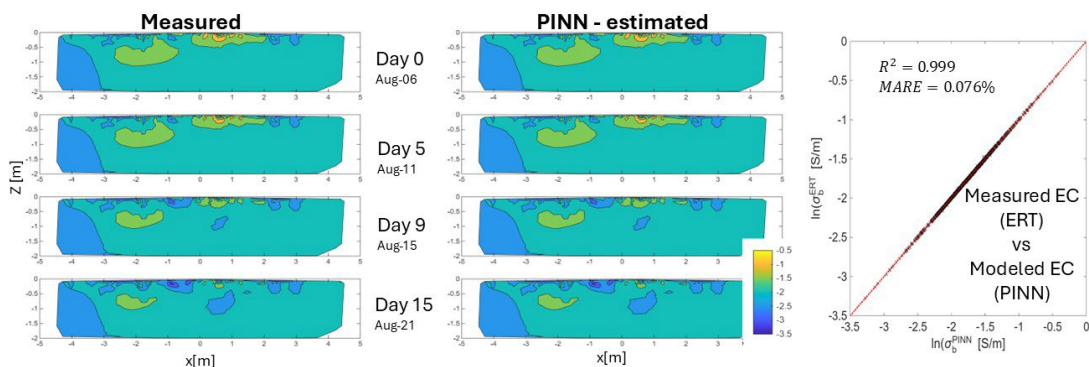
להתנגדות החשמלית) עבור הטיפול המסחרי (איור 21) ועבור טיפול ה- $IOD+$ (איור 22). שני האיורים מציגים את הטומוגרמות שממוקדות סביב העץ המרכזי ($-4.5 \leq x \leq 4.5$, $z \geq -2$ מטרים). הפאנל השמאלי מציג את הטומוגרמות החשמליות שנמדדו בתאריכים השונים, הפאנל המרכזי מציג את הטומוגרמות שמערכת ה- $PINN$ חזתה, והפאנל הימני מציג את ההתאמה של כל ערך במוליכות החשמלית (חזוי מול מדוד) ואת טיב ההתאמה (R^2) והשיאה המוחלטת היחסית -

גם כמותית ($R^2 > 0.99$, $MARE < 0.5\%$). משני האיורים ניתן לראות התאמה מעולה בטומוגרמות החשמליות החזויות, גם חזותית

אזורים ביום 9 (15 לאוגוסט) וה-15 (21 לאוגוסט) שמערכת ה- $PINN$ חזתה ערכי מוליכות חשמלית נמוכה יותר. מדובר בשגיאות אינברסיה של הטומוגרמות מכיוון שאותם גופים בעלי מוליכות חשמלית גבוהה מופיעים לפתע ביום 9 ונעלמים ביום 23 (29 לאוגוסט). בהעדר השקיה ומשקעים, אין סיבה הגיונית לאותה עליה במוליכות החשמלית מלבד שגיאות אינברסיה של הטומוגרמות. מערכת ה- $PINN$ ידעה לזהות את אותן שגיאות ולנטרל את השפעתן ומראה ירידה עקבית במוליכות החשמלית על אף אותן שגיאות. בטיפול ה- $IOD+$ לא נצפו ארטיפקטים שמשויכים לשגיאות אינברסיה ובמידה וקיימים, מערכת ה- $PINN$ לא זיהתה אותם וההתאמה למדידות מעולה (איור 21).

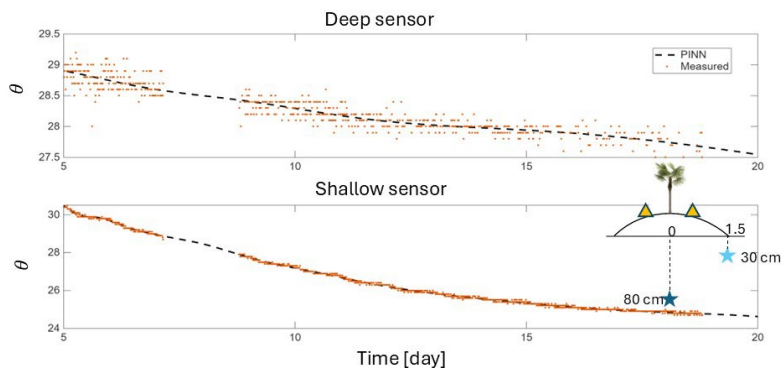


איור 21: התאמת הטומוגרמות החשמליות של מערכת ה- $PINN$ למדידות עבור הטיפול המסחרי. פאנל שמאלי – טומוגרמות מדודות, פאנל אמצעי – טומוגרמות חזויות על ידי מערכת ה- $PINN$, פאנל ימני – התאמה של 1:1 בערכי המוליכות החשמלית בין מערכת ה- $PINN$ למדידות

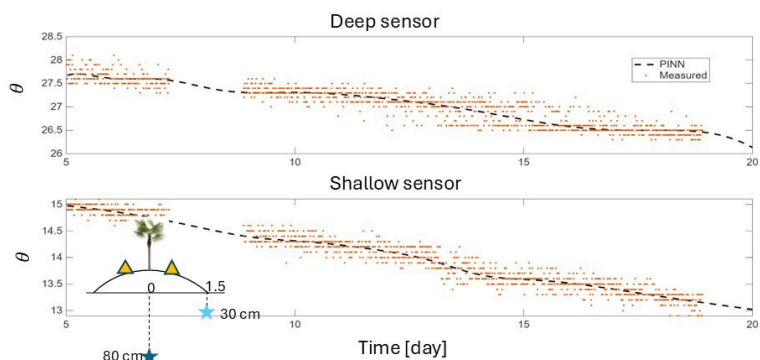


איור 22: התאמת הטומוגרמות החשמליות של מערכת ה- $PINN$ למדידות עבור טיפול ה- $IOD+$ המשופר. פאנל שמאלי – טומוגרמות מדודות, פאנל אמצעי – טומוגרמות חזויות על ידי מערכת ה- $PINN$, פאנל ימני – התאמה של 1:1 בערכי המוליכות החשמלית בין מערכת ה- $PINN$ למדידות

מערכת ה- $PINN$ אומתה מול מדידות תכולת הרטיבות של חיישני הקרקע. איורים 23-24 מציגים את תכולת הרטיבות הנפחית (θ) שנמדדה על ידי החיישנים המקומיים (נקודות כתומות) לעומת זו החזויה ע"י מערכת ה- $PINN$ (קווים שחורים רצופים) בשני עומקים (עמוק – 80 ס"מ ורדוד – 30 ס"מ) עבור שני הטיפולים השונים – מסחרי (איור 23) ו- $IOD+$ המשופר (איור 24). גם כאן ניתן לראות התאמה טובה בין מדידות החיישנים למערכת ה- $PINN$. ניתן לראות שמערכת ה- $PINN$ גם הצליחה להתמודד טוב עם מדידות רועשות במקרים של שינויים קטנים בתכולת הרטיבות (חיישן עמוק בטיפול המסחרי ועמוק ורדוד בטיפול ה- $IOD+$ המשופר).

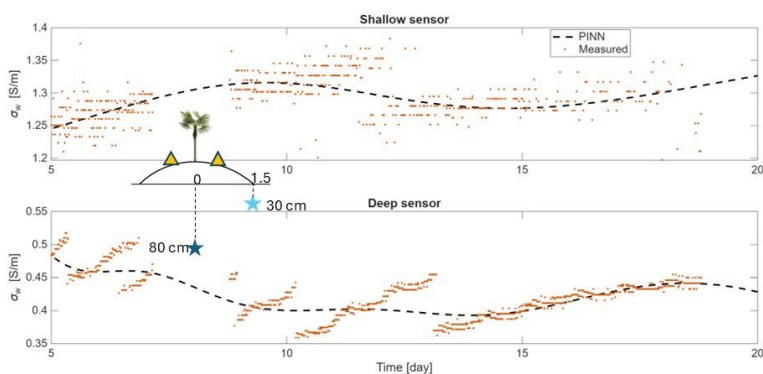


איור 23 : תכולת רטיבות מדודה מול חזויה (PINN) לאורך עונת הייבוש בשני חיישנים שונים עבור הטיפול המסחרי

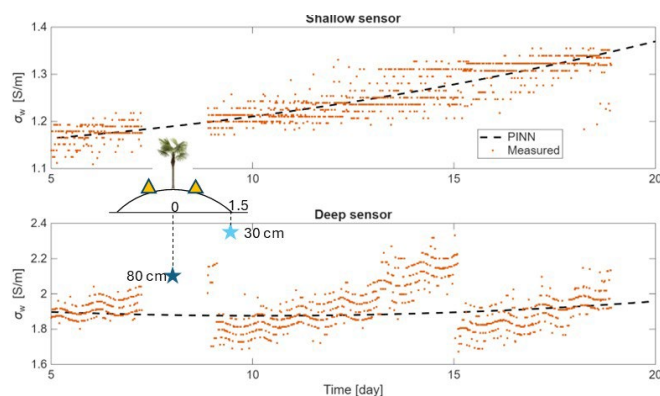


איור 24 : תכולת רטיבות מדודה מול חזויה (PINN) לאורך עונת הייבוש בשני חיישנים שונים עבור טיפול הIOD המשופר

לצורך ולידציה, בוצע אימות מול מדידות של מליחות תמיסת מי הקרקע. יש לציין שמדידות אלו לא הוזנו למערכת ה-PINN ומשמשים לצורך אימות בלבד. איורים 25-26 מראים את המוליכות החשמלית של תמיסת מי הקרקע (פרוקסי למליחות) עבור חיישני הקרקע השונים (מוערכת מול חזויה) עבור הטיפול המסחרי (איור 25) וה- IOD+ (איור 26). גם כאן ניתן לראות התאמה טובה בערכי המליחות גם כאשר אלו לא הוכללו באימון מערכת ה-PINN.



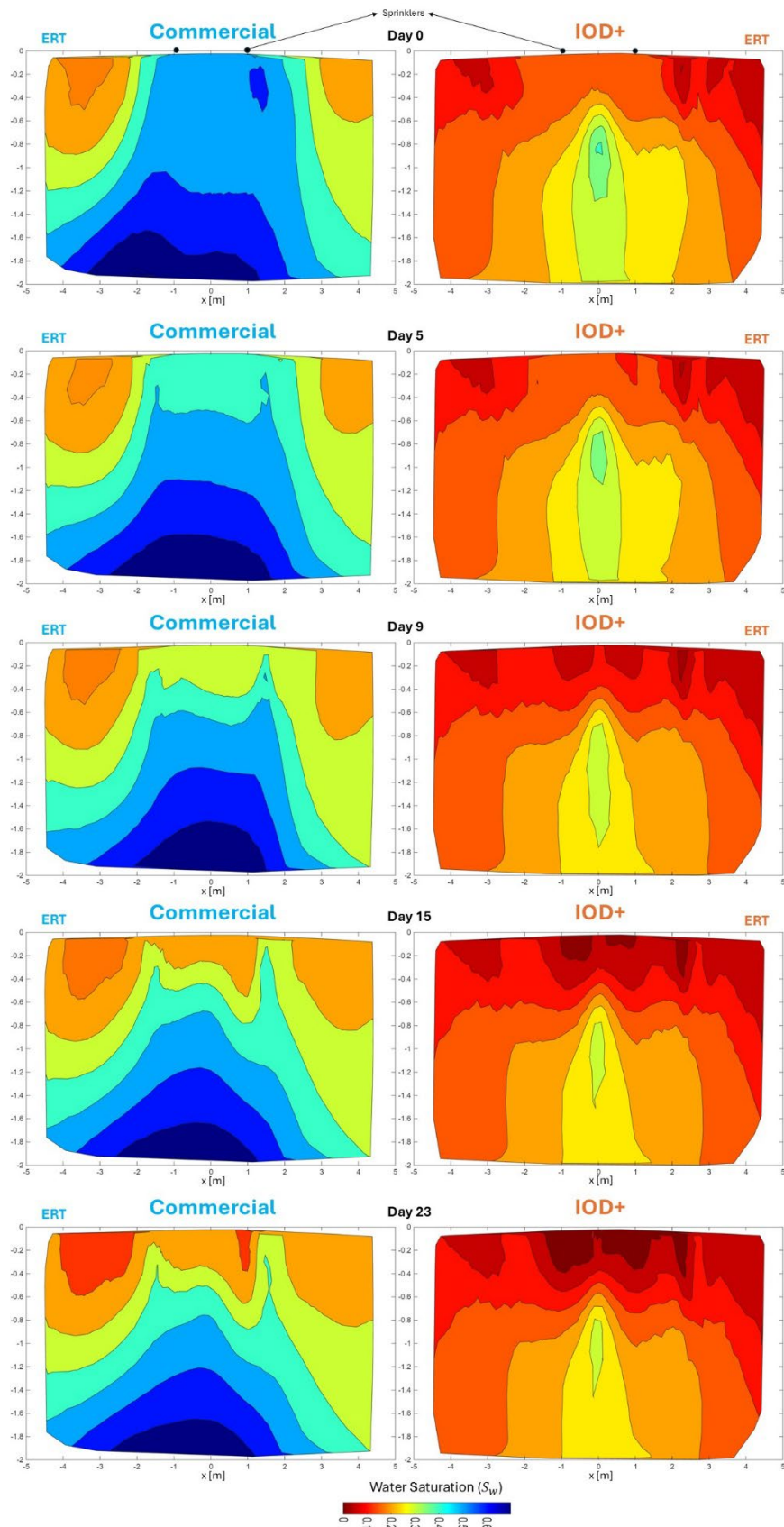
איור 25 : מוליכות חשמלית של תמיסת מי הקרקע (מליחות) מדודה מול חזויה (PINN) לאורך עונת הייבוש בשני חיישנים שונים עבור הטיפול המסחרי



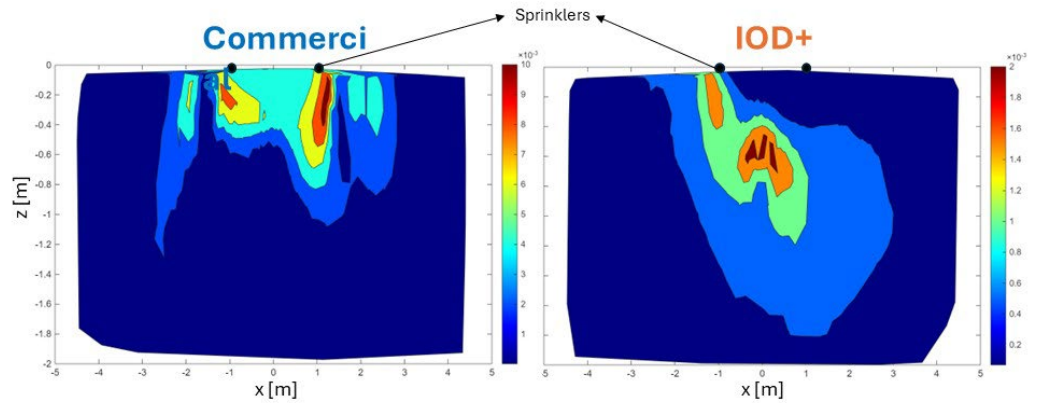
איור 26 : מוליכות חשמלית של תמיסת מי הקרקע (מליחות) מדודה מול חזויה (PINN) לאורך עונת הייבוש בשני חיישנים שונים עבור טיפול הIOD המשופר

לאחר אימות מערכת ה-PINN, ניתן להשוות בין הטיפולים השונים. איור 27 מציג את דרגת הרוויה (רטיבות) עבור שני הטיפולים (זה לצד זה) לאורך עונת הייבוש. מאיור 27 ניתן לראות שאכן תנאי ההתחלה (והסיום) היו שונים לחלוטין בין שני הטיפולים. הטיפול המסחרי מציג ערכי רטיבות גבוהים, עם דרגת רוויה של כ-70% בעומקים של 1.2 מטרים ויותר המעידים על עודף השקיה שגורם להצטברות מים מתחת לבית השורשים. בטיפול ה-IOD משופר דרגות הרוויה נעות בין 20-30% בעומקים הנ"ל. בנוסף, בקרבת פני השטח ורחוק מהמתזים, דרגות הרוויה נמוכות עבור שני הטיפולים, אך עדיין גבוהות יותר עבור הטיפול המסחרי (ערכים של 20% עבור הטיפול המסחרי לעומת 10% עבור טיפול ה-IOD משופר). ישנם גם כמויות מים גבוהות באזור בית השורשים המגיעות ל-50% בטיפול המסחרי לעומת טיפול ה-IOD משופר שנעות סביב 20-30%. יש לציין שקיים אזור "רטוב" עם רטיבות של 50% גם בטיפול ה-IOD משופר בעומק של 80-120 ס"מ מתחת לגזע העץ.

השינויים בזמן בדרגת הרוויה לאורך עונת הייבוש מראים תמונה הגיונית שבה דרגות הרוויה קטנות עם התקדמות עונת הייבוש. ניתן לראות שרוב הצריכה בעיקר רדודה (עד לעומק של 60 ס"מ) וערכי דרגות הרוויה יורדות משמעותית ל-10-20% בטיפול המסחרי לעומת 0-10% בטיפול ה-IOD משופר. ניתן לראות שהצריכה מתרחשת גם בקרבת מרכז השורה (מרחקים של יותר מ-3 מטרים מבסיס גזע העץ) אך זו מתונה יותר. הבדל משמעותי הינו שבעוד שזרימת המים מכוונת בעיקר כלפי מטה (בעקבות גרביטציה) בטיפול המסחרי, בטיפול ה-IOD משופר, קיימת ירידה בדרגת הרוויה גם בעומקים של 1-1.2 מטרים. אותה ירידה בדרגת הרוויה יכולה לנבוע מזרימת מים כלפי מעלה (בניגוד לגרביטציה) בעקבות תנאי יובש קיצוניים בפני השטח (עלייה קפילארית) וצריכת המים על ידי השורשים בקרבת פני השטח. הסבר נוסף הוא צריכת מים ישירה בעומקים של מטר ויותר בעקבות התפתחות בית שורשים עמוק יותר שנגרם ממחסור במים. איור 28 מראה את צריכת המים המקומית היומית הממוצעת (ביחידות של 1 ליום). מאיור 28, אכן ניתן לראות שקיימת צריכת מים מאזורים עמוקים יותר עבור טיפול ה-IOD משופר לעומת הטיפול המסחרי שבו עיקר הצריכה מתרכזת לצדי העץ ועד לעומק של 60 ס"מ.

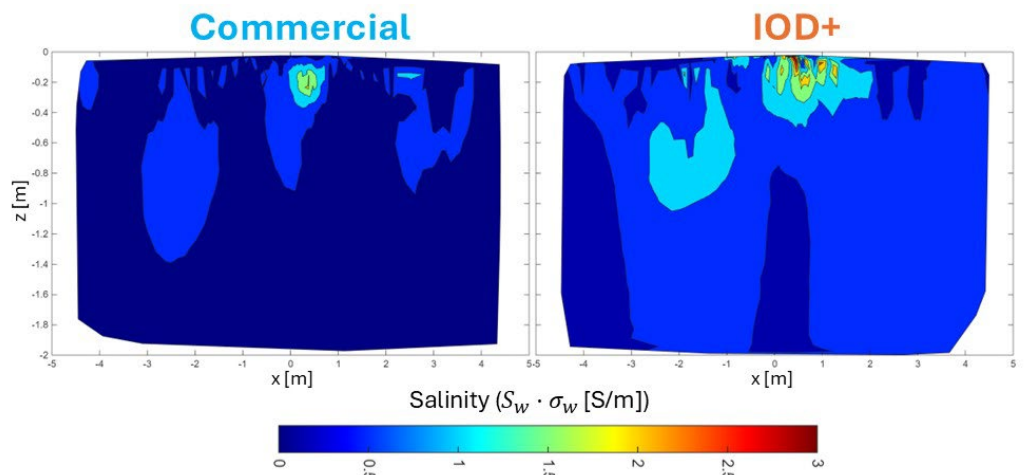


איור 27: דרגת רוויה בזמנים שונים לאורך עונת הייבוש עבור הטיפול המסחרי (פאנל שמאלי) והIOD המשופר (פאנל ימני)



איור 28 : קצב צריכת שורשים ממוצע לאורך עונת הייבוש עבור הטיפול המסחרי (פאנל שמאלי) והIOD המשופר (פאנל ימני)

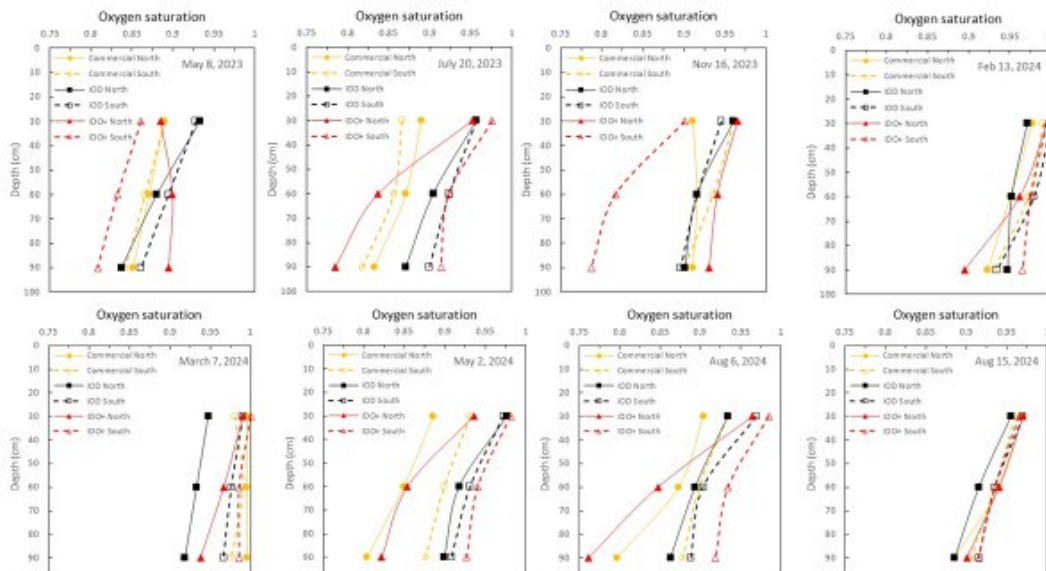
איור 29 מציג את ריכוזי המלחים (בערכי מוליכות חשמלית של תמיסת מי הקרקע) המנורמלים לדרגת הרוויה בתחילת עונת הייבוש עבור שני הטיפולים. מאיור 29 ניתן לראות את תבניות הצטברות המלחים בקרקע. שני הטיפולים מצביעים על תבניות הצטברות זהות שממוקדות בעומקים של 10-30 ס"מ ומוטות קצת דרומה מבסיס גזע העץ ($0 \leq x \leq 1$ מטרים). תבניות אלו הגיוניות ותואמות את אזורי הצריכה העיקריים לאורך עונת ההשקיה (ולא רק בתקופת הייבוש) שממוקמים בין גזע העץ למתזים. ההטיה הדרומית נובעת כנראה מהתאדות גבוהה יותר בצד הדרומי של העץ בעקבות חשיפה ישירה יותר לשמש. בנוסף, ניתן לראות שעבור שני הטיפולים (ובעיקר עבור המסחרי) ערכי המליחות נמוכים יותר ממליחות מי ההשקיה (פחות מ-5 דציסימנס למטר) ברוב המרחב. קיימים אזורים "מלוחים" יותר התואמים את מליחות מי ההשקיה (5-10 דציסימנס למטר) הממוקמים לצידי העץ (במרחק של 2.5 מטרים לשני הכיוונים) וחודרים לעומקים של 1-1.4 מטרים. אזורים אלו נובעים ככל הנראה מהשפעת הטופוגרפיה המקומית - תלוליות הייצוב הגבוהות גורמות לזרימת מים עילית והתנקזות המים במורד התלולית הממוקמת במרחק של 2 מטרים מבסיס הגזע. ההבדל המשמעותי הינו שערכי המליחות בטיפול IOD המשופר גבוהים משמעותית מהטיפול המסחרי ומגיעים לערכים של כ-33 סימנס למטר (!) לעומת הטיפול המסחרי שבו מליחות תמיסת מי הקרקע הינה חצי מזה (כ-1.5 סימנס למטר). כמובן שגם אבחנה זו הגיונית מכיוון שהשקיה מועטה יותר לאורך העונה תגרום להצטברות מלחים משמעותית יותר.



איור 29 : מוליכות חשמלית של תמיסת מי הקרקע (כפרוקסי למליחות) מנורמלת לדרגת הרוויה (איור 25) בתחילת עונת הייבוש עבור הטיפול המסחרי (פאנל שמאלי) והIOD המשופר (פאנל ימני)

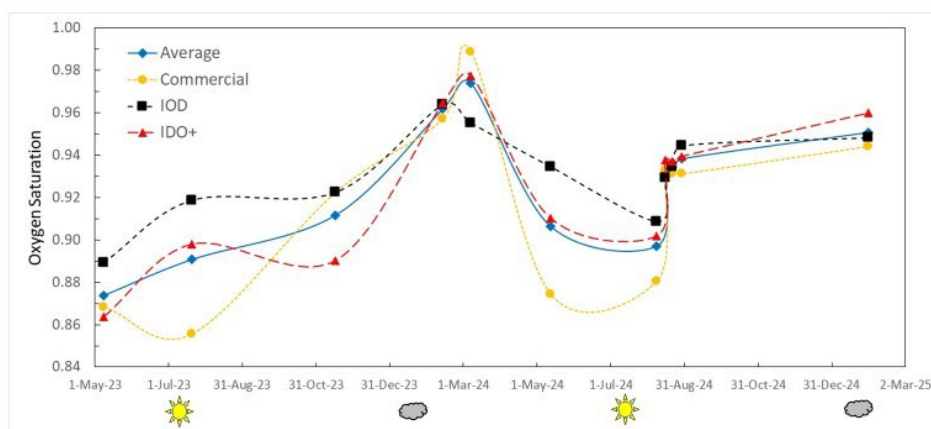
ניטור של ריכוזי החמצן באזור בית השורשים

בתרשים 30 רואים 8 פרופילים של ריכוזי חמצן באווירת הקרקע (מוצגים כאחוז מהריכוז האטמוספירי – 21%) שנמדדו לאורך הניסוי. בחודשי האביב והקיץ רוויות החמצן יורדת עד ל-80% בעומק 90 ס"מ. נראה שיש הבדלים גדולים בין שתי החזרות בכל טיפול. לכן אין הבדל מובהק סטטיסטית בין המדידות בצפון (0.916 ± 0.034 - ממוצע כל המדידות בזמנים השונים) ובדרום (0.929 ± 0.035 - ממוצע כל המדידות בזמנים השונים) החלקה. בתרשים 31 רואים את ריכוזי החמצן הממוצעים (בשלושה העומקים בשתי החזרות) שנמדדו לאורך הניסוי. נראים בבירור



איור 30 : פרופילים של ריכוזי חמצן לאורך העונה

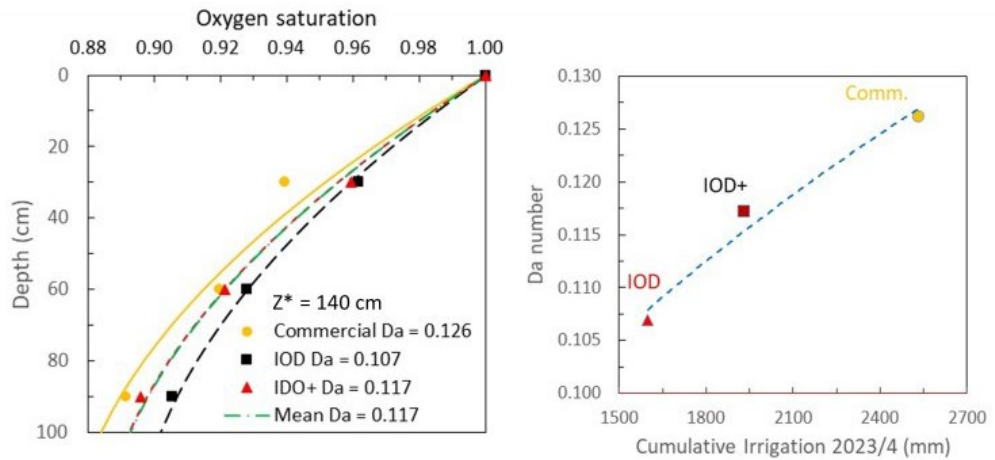
הריכוזים המקסימליים באביב (מרץ-אפריל) והמינימליים בקיץ (יולי-אוגוסט). רואים גם הבדלים קטנים, לא מובהקים סטטיסטית בין הטיפולים: המאוורר ביותר הוא IOD (0.932 ± 0.022 - ממוצע כל המדידות בזמנים השונים), אחריו IOD המשופר (0.922 ± 0.035 - ממוצע כל המדידות בזמנים השונים), והפחות מאוורר הוא הטיפול המסחרי (0.917 ± 0.042 - ממוצע כל המדידות בזמנים השונים).



איור 31 : ריכוזי חמצן ממוצעים (לעומק) לאורך העונה

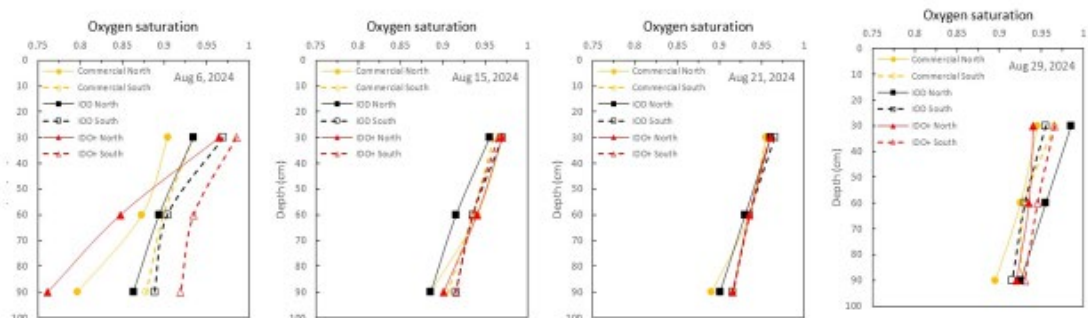
את המגמה הזאת ניתן לראות גם על-פי מספר דמקוהלר שהותאם לפרופילי החמצן הממוצעים (2 חזרות ב-10 זמנים, תרשים 3 משמאל). המאוורר ביותר הוא IOD עם $Da = 0.107$, אחריו IOD+ עם $Da = 0.117$, והפחות מאוורר הוא הטיפול המסחרי עם $Da = 0.126$. זאת בהתאמה לתכולות הרטיבות הגבוהות יותר בטיפול המסחרי לעומת טיפולי ה- IOD המשופר וה- IOD על-פי סקרי ה-ERT (תרשים 27), מנות ההשקיה שהיו הגבוהות ביותר בטיפול המסחרי (1131 מ"מ לעונת 2023-2024), אח"כ

IOD המשופר (869 מ"מ), והטיפול היבש ביותר, ה- IOD (678 מ"מ) (תרשים 32 מימין), ולכך שלא נמצאו הבדלים מובהקים בצריכת המים בטיפולים השונים (תרשים 6). תכולות רטיבות גבוהות מורידות את ריכוזי החמצן בקרקע בשני אופנים. גיסא תכולות רטיבות גבוהות (תכולות אוויר נפחיות נמוכות) מקטינות את מקדם הדיפוסיה של הקרקע לחמצן ואת אספקתו מהאטמוספירה, ומאידך גיסא הן גם מעלות את הפעילות המיקרוביאלית האירובית, ואולי אף את קצב נשימת השורשים.



איור 32 : השוואת זמינות החמצן (על פי יחס נשימה לדיפוסיה) בין הטיפולים

בתרשים 33 ניתן לראות את התגובה המהירה של ריכוזי החמצן בקרקע להפסקת ההשקיה ב-5 באוגוסט 2024 בכל הטיפולים. הפרופילים שנמדדו ב-6 באוגוסט מייצגים את מצב ריכוזי החמצן בתקופת ההשקיה האינטנסיבית (בעיקר בטיפול המסחרי) בקיץ. שבוע אח"כ (ב-15 באוגוסט) נראים ריכוזי חמצן גבוהים יותר בכל הטיפולים, ללא הבדלים גדולים ביניהם, מצב שלא השתנה גם אחרי שבוע (ב-21 באוגוסט) ושבועיים (ב-28 באוגוסט) נוספים.



איור 33 : פרופילים של ריכוזי חמצן לאחר הפסקת ההשקיה ב-5 לאוגוסט 2024

הניסוי הנוכחי מתקיים כבר 3 עונות, במהלכם נראה שברמת החלקה ניתן לנהל את ההשקיה באופן אוטומטי על סמך מתחי מים בקרקע. ב 2 מתחי הסף לפתיחת מים שהיו בניסוי קיבלנו חיטון במים תוך הגדלה של האינטרוול. מהשוואה למחקרים קודמים נראה שהשילוב הזה הוא השילוב שמאפשר את החיטון במים. לעומת זאת ירידה במקדם ההשקיה באינטרוול קבוע פוגעת פגיעה קשה במס' הידות וכן פוגעת בהדרגה ביבול ובגודל הפרי (צפלבץ, 2019). למרות התוצאות, נראה לנו שהרחבה מסחרית של פתיחה וסגירה אוטומטית ע"ס חיווי מטנסיומטרים יכולה להיות בעיתית בגלל העובדה שהמערכות ההידראוליות בבקעה לא בנויות למצב שיש כל הזמן מים בראש המערכת (זה מה שנדרש אם רוצים פתיחה אוטומטית ע"ס מתח המים בקרקע). מהשוואה של היבול והאיכות בשלשת השנים נראה שבשנה הראשונה בטיפול המסחרי היבול היה יותר גבוה, מכוון שטיפול ה IOD יצא שנתנו בשנה הזו רק 34% מהמים שקיבל הטיפול המסחרי. עקב כך ועקב החשש להמלחה שעשויה להחמיר במהלך השנים הוספנו ל 2 הטיפולים של ה IOD מנת מים נוספת קבועה להדחה של מלחים (330 ליטר לעץ להשקיה). ניתן לראות שבשנים הבאות ההפרש בכמויות המים בין הטיפול המסחרי לטיפול ה IOD היה יותר קטן. בשנה האחרונה היה בטיפול המסחרי פחות שילפוח, הסיבה לתוצאה הזו איננה ברורה ויתכן שהיא קשורה לזה שהירידה בכמויות המים בטיפול ה IOD התרכזה רק במאי יוני ולא בכל עונת ההשקיה (יתכן שירידה במים רק בתקופה של שיא הגדילה של הפרי גורמת לעליה בשילפוח). בסה"כ נראה שאפשר מהמחקר הנוכחי ללמוד על המגמות של טיפולי ה IOD ולנסות ליישם אותם כהמלצות במחקר חדש.

ממעקב אחר המוליכות החשמלית של הקרקע דרך טומוגרפיה חשמלית בעת תקופת הייבוש ולאחר שנתיים של טיפולי ההשקיה, נצפו תבניות ייבוש זהות והגיוניות עבור שני הטיפולים, אם כי השינויים בטיפול המסחרי היו משמעותיים יותר. על ידי פיתוח אלגוריתמים ללימוד מכונה מונחה פיסיקה והטמעת המדידות הגאו-חשמליות עם נתוני חיישני הקרקע (רטיבות הקרקע) והמשוואות הפיסיקליות לזרימת מים, הסעת מומסים, הפונקציות ההידראוליות (עקום תאחיזה ומקדם מוליכות הידראולית) והקשרים הפטורופיסיים המכויילים, יכולנו להעריך בצורה כמותית את ההבדלים בין שני הטיפולים.

מערכת לימוד המכונה שפותחה (PINN) נבחנה תחילה עבור מקרה סינטטי, כלומר, מודל פסיקאלי המחקר את תנאי המטע, והראתה יכולות גבוהות בזיהוי תבניות ההרטבה וצריכת מים על ידי שורשים. תוצאות אלו פורסמו בכתב העת *Journal of Hydrology*, המוביל בתחום משאבי המים (Sakar et al., 2026).

כאשר מערכת ה PINN יושמה עבור הנתונים שנאספו במטע, נצפו הבדלים מהותיים בין טיפול ההשקיה המסחרי ל IOD+. מערכת ה PINN חזתה רטיבות נמוכה משמעותית באזור בית השורשים בטיפול ה IOD לעומת הטיפול המסחרי (כ 20-30% הבדלים בדרגת הרוויה). כמו כן, נצפו ערכי רטיבות גבוהים (רוויה של ~70%) מתחת לבית השורשים (עומק של יותר מ 1.5 מטרים) בטיפול המסחרי שלא נצפו בטיפול ה IOD+. המשמעות הינה שבטיפול המסחרי קיימת השקיה בעודף משמעותית הגורמת לאיבוד מים ויעילות השקיה נמוכה יותר.

עם זאת, טיפול ה IOD+ הראה הצטברות מלחים משמעותית באזור בית השורשים שעלולה להצטבר עוד יותר עם הזמן ולהוות סכנה לעצים. ההמלצה הינה לבצע מעקב מקומי על ידי הטמנת חיישנים באזורים בעלי פוטנציאל להצטברות מלחים (שנצפו במחקר זה) ולהדחיק מלחים על ידי השקיה אינטנסיבית באופן יזום כאשר ריכוז המלחים עולה מעל לערך סף מסוים. כמו כן, יש לוודא שהמלחים הודחו כראוי לאחר תקופת הייבוש.

למרות ההצלחה בניטור דינמיקת המים והמלחים בתת הקרקע על ידי שיטות גאו-חשמליות, הגאומטריה המרחבית של המטע (מרחקים של 9 מטרים בין עצים) מגבילים את הסקת המסקנות מטומוגרמות חשמליות דו ממדיות. למשל, לא ניתן להשוות או להטמיע את קצב צריכת השורשים שנמדד על ידי חיישני הזרימה במערכת ה PINN מאחר שנתונים אלו מייצגים אינטגרל תלת ממדי של צריכת השורשים בקרקע. על מנת לקבל תובנות משמעותיות יותר יש להרחיב את שיטת הניטור של תת הקרקע לתלת מימד.

לגבי השפעת הטיפולים על ריכוז החמצן בקרקע ככלל נראה שבתנאי הניסוי במטע אין בעיה חמורה של מצב האוורר של הקרקע ושכנראה ריכוזי החמצן לא מהווים גורם מגביל משמעותי. עם זאת, ההבדלים בריכוזי החמצן לאורך עונות השנה – מקסימליים באביב ומינימליים בקיץ, תגובת פרופיל ריכוזי החמצן למנות ההשקיה והעלייה בריכוזי החמצן עם הפסקת ההשקיה בחודש אוגוסט מעידים כנראה על הגבלה כלשהי של קצב הנשימה בתקופות מסוימות, שמאופיינות בתכולות רטיבות וטמפרטורות גבוהות.

ציפליביץ אפרים, אבי סטרומזה, גיא רשף (2019). השקיית תמר בבקעת הירדן בחינה מחודשת של כמויות המים ושיטת ההשקיה. דו"ח מחקרים ואמצעי פיתוח מו"פ בקעה. mop-bika.org.il

Bandai, T. & Ghezzehei, T. A. 2021. Physics-informed neural networks with monotonicity constraints for Richardson-Richards equation: Estimation of constitutive relationships and soil water flux density from volumetric water content measurements. *Water Resources Research*, 57, e2020WR027642.

Baydin, A. G., Pearlmutter, B. A., Radul, A. A., & Siskind, J. M. (2018). Automatic differentiation in machine learning: a survey. *Journal of Machine Learning Research*, 18, 1-43.

Ben-Noah, I., Friedman, S.P., 2018. Review and evaluation of root respiration and of natural and agricultural processes of soil aeration. *Vadose Zone J.* 17, 1-47.

Ben-Noah, I., Nitsan, I., Cohen, B., Kaplan, G. and Friedman, S.P. 2021. Soil aeration using air injection in a citrus orchard with shallow groundwater. *Agricultural Water Management*, 245, p.106664.

Binley, A. and Slater, L., 2020. *Resistivity and induced polarization: Theory and applications to the near-surface earth*. Cambridge University Press.

Feddes, R. A. (1978). 4.3 Simulation of field water use and crop yield.

Friedman, S.P., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1-3), pp.45-70.

Friedman, S.P., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1-3), pp.45-70.

Friedman, S.P. and Naftaliev, B. 2012. A survey of the aeration status of drip-irrigated orchards. *Agricultural Water Management*, 115: 132-147.

Haruzi, P. and Moreno, Z. (2023) Modeling water flow and solute transport in unsaturated soils using physics-informed neural networks trained with geoelectrical data. *Water resources research*, e2023WR034538.

Laloy, E., Javaux, M., Vanclooster, M., Roisin, C. and Biielders, C.L., 2011. Electrical resistivity in a loamy soil: Identification of the appropriate pedo-electrical model. *Vadose Zone Journal*, 10(3), pp.1023-1033.

Moreno, Z., Arnon-Zur, A. and Furman, A. (2015) Hydro-geophysical monitoring of orchard root zone dynamics in semi-arid region. *Irrigation Science* 33(4), 303-318.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), pp.513-522.

Paudel, I., Kanety, T., Cohen, S. (2013). Inactive xylem can explain differences in calibration factors for thermal dissipation probe sap flow measurements. *Tree Physiology*, 33: 986-1001

Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational physics*, 378, 686-707.

Renninger, H.H.J., N. Phillips, and G.D. Salvucci (2010) Wet- vs. Dry-Season Transpiration in an Amazonian Rain Forest Palm *Iriartea deltoidea*. *Biotropica* 42(4): 470-478. Available at <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00612.x>

Rhoades, J. D., Chanduvi, F., & Lesch, S. M. (1999). *Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements* (Vol. 57). Food & Agriculture Org.

- Sakar, C., Schwartz, N., & Moreno, Z. (2024). Physics-informed neural networks trained with time-lapse geoelectrical tomograms to estimate water saturation, permeability and petrophysical relations at heterogeneous soils. *Water Resources Research*, 60(8), e2024WR037672.
- Sakar, C., Tsukanov, K., Schwartz, N., & Moreno, Z. (2025). A physics-informed neural network workflow for forward and inverse modeling of unsaturated flow and root water uptake from hydrogeophysical data. *Journal of Hydrology*, 134675.
- Schaap, M.G., Leij, F.J. and Van Genuchten, M.T., 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of hydrology*, 251(3-4), pp.163-176.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M.T. and Šejna, M. (2012) The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. *Technical manual, version 2*, 258
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), pp.892-898.
- Waxman, M.H. and Smits, L.J.M., 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8(02), pp.107-122.