

מיהול מים מותפלים עם מליחים ליעול השימוש במים בחקלאות

ומזעור נזקים סביבתיים

נפתלי לזרוביץ - המכון לביוטכנולוגיה וחקלאות באזורים צחיחים, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
אלון בן גל - המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז מחקר גילת
אורי ירמיהו - המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז מחקר גילת
עמי מדואל, רבקה אופנבך ושבתאי כהן - מו"פ ערבה תיכונה וצפונית

תקציר

את המינרלים החסרים ממים מותפלים המיועדים לחקלאות ניתן להוסיף כדשן או לחילופין לספק אותם על ידי ערבוב עם מים מליחים שריכוז היסודות הללו בהם גבוה. שאלת המחקר היא האם ערבוב מים מותפלים עם מליחים להוספת המינרלים שהורחקו בתהליך ההתפלה ודרושים לצמח על מנת לקבל יכול מיטבי הינו פתרון נכון, כלכלי ובר קיימא מבחינה סביבתית? מטרת המחקר היא לבחון את הגישות השונות באספקת המינרלים החסרים לצמח (ערבוב או הוספת דשנים) המושקה במים מותפלים. מטרת ייחודית של המחקר הם: א. כימות היתרונות והחסרונות של ערבוב מים מותפלים עם מים מליחים מבחינת גידול צמחי פלפל, בזיל, ועגבנייה וזיהום הסביבה. ב. התאמה ובחינה של תהליכים במודלים המשלבים זרימת מים והסעת מלחים ברצף קרקע, צמח ואטמוספירה להערכת היכול ונזקי סביבה כתלות באיכות והרכב מי ההשקיה. ג. יחסים בין מינרלים חיוביים ושיליים בקליטה על ידי הצמח ובהצטברות בצמח. המחקר מבוסס על ניסויים בצמחים בתנאים מבוקרים ובחלקות חצי מסחריות. במחקר גם שימוש במודלים למערכת קרקע- צמח - אטמוספירה. מספטמבר 2009 עד מאי 2010 בוצעו שני ניסויים בגידול פלפל (*Capsicum annuum*) מהזן סליקה. ניסוי אחד במערכת של 24 ליזימטרים בחממה בגילת והשני ב-12 ליזימטרים ובחלקות שדה בחממה חצי מסחרית בתחנת זוהר שבכיכר סדום. בהשקיה עם מים מעורבבים ניתן לקבל יכולים השווים לאלה שגדלו עם מים מותפלים מדושנים אך זאת רק כאשר מעלים את מנת ההשקיה ביותר מ-20%. העלות הסביבתית של השקיה עודפת כאשר מליחות המים עולה מ-0.9 (מותפלים מדושנים) ל-2 ד"ס/מ' (מעורבבים מדושנים) היא משמעותית מאחר וכמות המלחים הנשטפים מעבר לבית השורשים הינה כפולה במים המעורבבים בהשוואה למים המותפלים.

מבוא ותיאור הבעיה

את המינרלים החסרים ממים מותפלים המיועדים לחקלאות ניתן להוסיף כדשן או לחילופין לספק אותם על ידי ערבוב עם מים מליחים שריכוז היסודות הללו בהם גבוה. לשתי השיטות יתרונות וחסרונות: דישון המינרלים החסרים כרוך בעלות לא מבוטלת ודורש מערכת דישון נוספת מאחר ולא ניתן להוסיף את הדשנים החסרים לדשנים קיימים בגלל בעיות שקיעה. בנוסף, ניתן לצמצם את מנת המים העונתית המקובלת כיום. מאידך, בשיטת הערבוב אין עלות למינרלים ונפח המים גדל. החסרונות של שיטת הערבוב הם עלייה במקדם השטיפה וזיהום הסביבה במלחים הנשטפים מבית השורשים. בחירת השיטה העדיפה דורשת אופטימיזציה שלוקחת בחשבון את כל המרכיבים. חסר לנו ידע רב בעיקר ביחס לתגובה של צמחים שונים לריכוזי מליחות נמוכים שלא היו זמינים עד כה וכיצד ישפיעו יחסי ערבוב שונים על התוצאות. מודלים משמשים ככלי מחקרי אטרקטיבי להבנה, כימות וחיזוי של תופעות ותהליכים במערכת קרקע-צמח-אטמוספירה ולתכנון וניהול משאבי מים ואיכותם. למרות מורכבותם של מודלים ספרתיים השימוש בהם הולך וגובר הודות להבנה טובה יותר של תהליכי זרימת מים והסעת מומסים, לפיתוח ושיפור שיטות מתמטיות לפתרון משוואות ולפיתוח המואץ של מחשבים המסוגלים לחשב תהליכים שונים בו

זמנית במרווחי זמן ומרחב קטנים. כיום ישנו שימוש גובר במודלים להדמיה של תהליכים הקשורים להשקיה. כמו כן מודלים מאפשרים את חישוב כמות והרכב תמיסת הנקז ויכולים לתרום להערכה של החלופות לזיהום הסביבה.

השאלה שהמחקר מנסה לענות היא: האם ערבוב מים מותפלים עם מליחים להוספת המינרלים שהורחקו בתהליך ההתפלה ודרושים לצמח על מנת לקבל יכול מיטבי הינו פתרון נכון, כלכלי ובר קיימא מבחינה סביבתית? מטרת המחקר היא לבחון את הגישות השונות באספקת המינרלים החסרים לצמח (ערבוב או הוספת דשנים) המושקה במים מותפלים. מטרת ייחודיות לשנת המחקר הנוכחית: א' כימות היתרונות והחסרונות של ערבוב מים מותפלים עם מים מליחים מבחינת גידול צמחי פלפל וזיהום הסביבה.

ב' התאמה ובחינה של תהליכים במודלים המשלבים זרימת מים והסעת מליחים ברצף קרקע, צמח ואטמוספירה להערכת היבול ונזקי סביבה כתלות באיכות והרכב מי ההשקיה. ג' לימוד יחסים בין מינרלים חיוביים ושליילים בקליטה על ידי הצמח ובהצטברות בצמח.

שיטות המחקר

המחקר מבוסס על ניסויים בצמחים בתנאים מבוקרים ובחלקות חצי מסחריות. במחקר שימוש במודלים למערכת קרקע- צמח – אטמוספירה: במודל ספרתי (HYDRUS-1D) אשר מכילים לקרקעות ולצמחים שבניסויים. בעונת 2009/10 התקיים במרכז מחקר גילת ניסוי מבוקר בפלפל. ניסוי נוסף התבצע בחלקות חצי מסחריות בכיכר סדום בתחנת זוהר של מו"פ ערבה תיכונה וצפונית. בניסוי נבחנו שיעורים שונים של השקיה עם מים בעלי איכויות שונים (מותפלים DW, מליחים GW ומעורבבים BW). צמחי פלפל גדלו למשך עונה שלמה ונערך מעקב אחר היבול ואיכותו. התאמת המודל נעשה תוך שימוש בתוצאות שהתקבלו מהניסויים.

ניסוי לזימטרים בגילת – פלפל 2009

הניסוי התקיים במרכז מחקר גילת במערכת לזימטרים מבוקרת בחממה. לזימטרים שנפחם 60 ליטר מולאו בקרקע חולית. שבוע לפני שתילה הושקו המיכלים במים שהכילו את רמות הנתרן הכלורי המתאימות כך שבשתילה צמחי הפלפל נחשפו לרמות המליחות שהיו כבר בקרקע. בניסוי נבחנו 8 רמות מליחות שמייצגות את כל הקשת שבין מים מותפלים ומים מליחים (טבלה 1). למים מותפלים ($EC=0.2$ dS/m) הוסף נתרן כלורי ברמות של 0, 2.5, 5, 10, 20, 30 ו-40 מילימולר. כל טיפול היה ב-3 חזרות במתקן של לזימטרים המותקן על קרוסלה מסתובבת (Lazarovitch *et al.*, 2006) כך שתנאי הסביבה היו שווים לכל הצמחים. במערכת של הלזימטרים יש בקרה מלאה ואוטומציה של הכנה ואספקה של מי ההשקיה, שקילה של הלזימטרים ואיסוף ומדידה של מי הנקז. בתחתית הלזימטרים מחובר נקז המכיל חומר נקבובי בעל מוליכות הידראולית גבוהה (צמר סלעים) השומר תנאי רטיבות בגבול התחתון של בית השורשים דומים לאלה בשדות חקלאיים כך שאפשר לעבוד עם קרקעות אמיתיות (Ben-Gal and Shani, 2002). ריכוזי המינרלים האחידים בכל הטיפולים מוצגים בטבלה 2. כל צמח הושקה עם שיעור שטיפה (leaching fraction) של 20%. שלושה צמחי פלפל נשתלו ב-13/09/09 לאחר כשבוע הורחק צמח אחד. במהלך הגידול הוסרו הפרחים מהצמחים ולא התאפשר גידול של פרי. נמדדו בניסוי: מאזן מים מלא רציף, מוליכות החשמלית של מי הנקז פעם בשבוע, ריכוז יסודות (חנקן, זרחן, אשלגן, סידן, נתרן, כלוריד וסולפט) במי השקיה ומי הנקז פעם בשבוע. בתום הגידול נשקלו צמחים לחלקים השונים (רטוב ויבש). נמדד פיזור השורשים לעומק הקרקע ובדיגומי קרקע נקבע בסוף הניסוי הרכב המינרלים.

טבלה 1. רמות מליחות מי ההשקיה (אחרי דישון) בניסוי פלפל בליזימטרים בגילת

Treatment NaCl (mM)	0	2.5	5	7.5	10	15	20	40
Na (ppm)	3	57	100	159	201	319	416	895
Cl (ppm)	11	103	185	289	372	562	760	1648
EC (dS m ⁻¹)	0.9	1.2	1.4	1.7	2.1	3.1	3.9	6.7

טבלה 2. ריכוזי (מ"ג לליטר) נוטריאנטים במי השקיה בניסוי פלפל בליזימטרים בגילת

N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	B	Mn	Zn	Cu	Mo
88	16	70	80	24	32	5.5E-04	4.9E-04	2.7E-04	1.4E-04	2.0E-05	1.5E-05

ניסוי חצי מסחרי בפלפל בכיכר סדום

בתחנת זוהר בכיכר סדום, (דרומית לים המלח) התבצע ניסוי בו גודל פלפל בחממות. בקרקע נבחנו 2 גורמים: איכות מים ורמות השקיה. שלושת איכויות מים שנבחנו: מים מותפלים (0.2 דצ"ס/מ') מים מליחים (3.2 דצ"ס למ') ומים מעורבבים לפי חישוב של הספקה רצויה של סידן, מגניון וסולפט לצמחי הפלפל (1 חלקי מים מליחים לכל 3 חלקי מים מותפלים). בניסוי בקרקע בשדה, כל סוג מים ניתן ב-4 רמות השקיה. בליזימטרים נבחנה רמה אחד של השקיה של כל איכות מים ב-4 חזרות. רמות ההשקיה חושבו ממאזן המים הנמדד בליזימטרים בחממה. שיעורי ההשקיה הותאמו לאיכות המים לפי תוצאות קודמות (Ben-Gal *et al.*, 2008) (טבלה 3). חישוב לרמות השונות נעשה על מנת לשמור על שיעורי שטיפת מלחים דומה. נערך מעקב של ההרכב הכימי (חומציות, מוליכות חשמלית וריכוזי המינרלים: חנקן, זרחן, אשלגן, סידן, מגניון, גופרה, נתרן וכלוריד) של מי ההשקיה. הניסוי בקרקע היה בגודל של 360 מ"ר כך שיש 48 חלקות באורך 5 מטר וברוחב 1.5 מטר (שטח חלקה 7.5 מ"ר). הניסוי הוצב בבוקים ב-4 חזרות. נבדקו יבול הפרי, איכות הפרי (כמקובל בגידול כולל שחור פיטם) וריכוזי המינרלים בעלים דיאגנוסטיים (חנקן, זרחן, אשלגן, סידן, מגניון, נתרן וכלוריד) נקבעו מידי חודש.

טבלה 3. טיפולי השקיה בניסוי פלפל בתחנת זוהר. $I/ET_p =$ שיעור השקיה מנורמל (השקיה מחולק

לאוופוטנספירציה פוטנציאלית). $LF =$ שיעור שטיפה. ערכי EC לתמיסות כולל הדשן.

Treatment	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EC dS m ⁻¹	0.98	0.98	0.98	0.98	1.94	1.94	1.94	1.94	3.74	3.74	3.74	3.74
I/ET_p	1.5	1.3	1.15	1	2	1.5	1.25	1	2.5	2	1.5	1
LF	0.33	0.23	0.13	0	0.5	0.33	0.2	0	0.6	0.5	0.33	0

ב-11 מועדים נקצרו צמחים נשקלו ונקבעו בהם יסודות זאת על מנת לקבוע את עקום הצמיחה והרחקת מינרלים מהקרקע. פירות נקטפו לפי הבשלה, 14 פעמים החל מיום 104 אחרי השתילה, בערך כל 12 ימים. כל הצמחים נקצרו ב-23 למאי, סוף הניסוי. במועד זה נשקלו ונאסף כל הפרי.

הדמיה ספרתית

חיזוי לתוצאות הניסויים נעשה בעזרת המודל HYDRUS-1D . בסימולציות התמקדנו בקליטת מים, גידול ובקליטתם של חנקן (N) וכלוריד (Cl). נתונים מניסוי בליזימטרים בגילת נלקחו על מנת לחשב את עקום התגובה של פלפל ואשר שימשו להערכת הירידה בטרנספירציה בגלל מליחות.

תוצאות

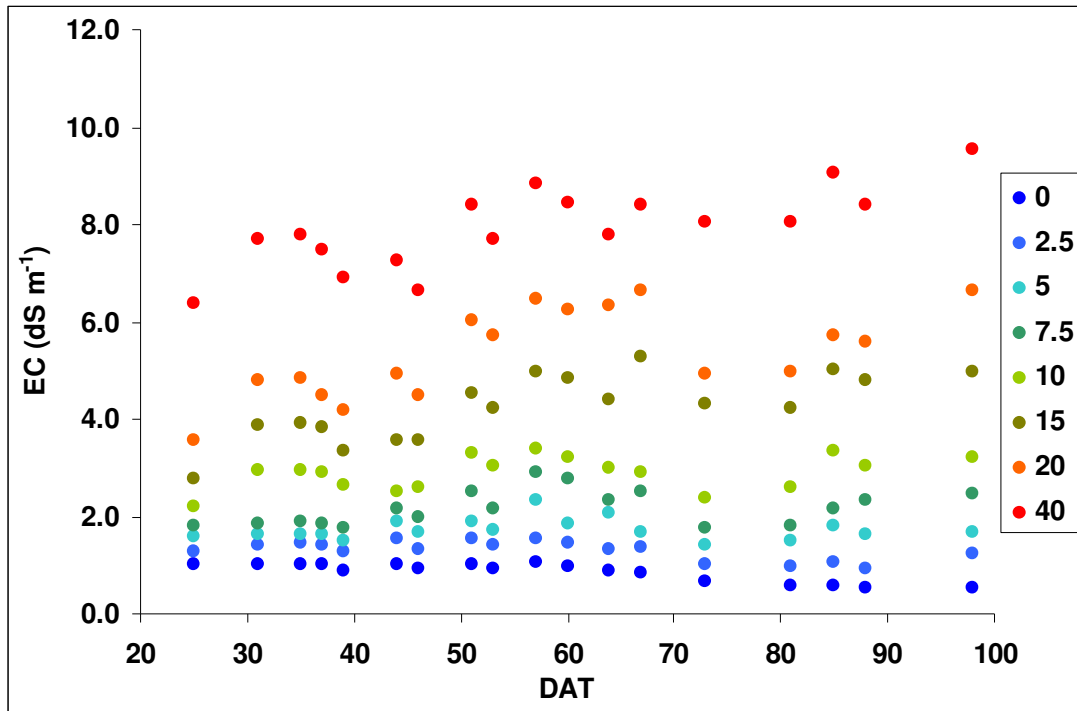
הניסויים התחילו בספטמבר 2009. בשני הניסויים נלמדו פלפל. *(Capsicum annuum)* מזן סליקה להמחשה, תמונות 1 ו-2. ניסוי לזימטרים בגילת



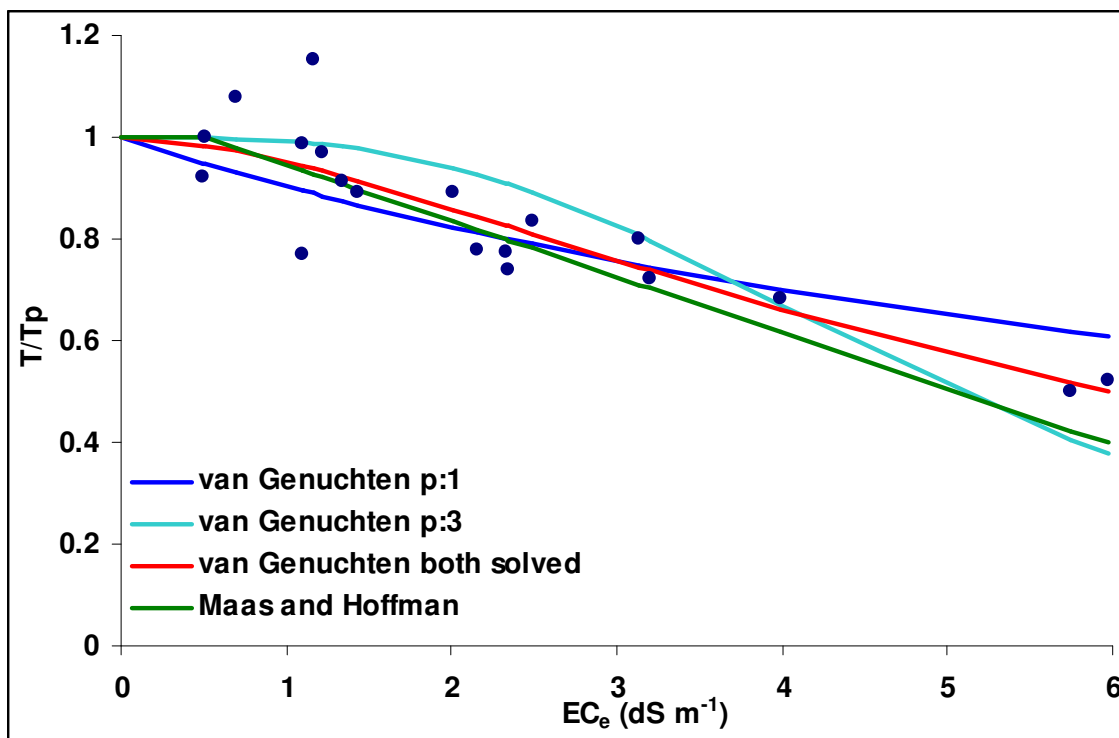
תמונה 1. מערכת לזימטרים וניסוי פלפל בגילת. 03/11/09.



תמונה 2. בית רשת ניסוי הפלפל בתחנת זוהר. שורת בליזימטרים ושטח. אוקטובר 2009.



איור 1. ממוצע מוליכות חשמלית של מי נקז בליזימטרים. DAT = ימים אחרי שתילה. הטיפולים ב- mM NaCl.



איור 2. נתוני טרנספירציה כתלות במוליכות חשמלית של תמיסת הקרקע המושבת בצורה עונתית. הקווים הם תגובת הגידול למליחות לפי van Genuchten (1984) עבור ערכים שונים (1, 3 או אחרי אופטימיזציה) של פרמטר p .

שמונת רמות המליחות במי ההשקיה התבטאו בתמיסות הקרקע ובנקז (איור 1). הנתונים אפשרו בניית עקום תגובת למליחות (איור 2). עקום זה מיצג את העמידות/רגישות של הגידול למליחות ובמודלים מהווה את הפונקציה של ירידה בקליטת מים (טרנספירציה) (איור 2, טבלאות 4 ו-5).

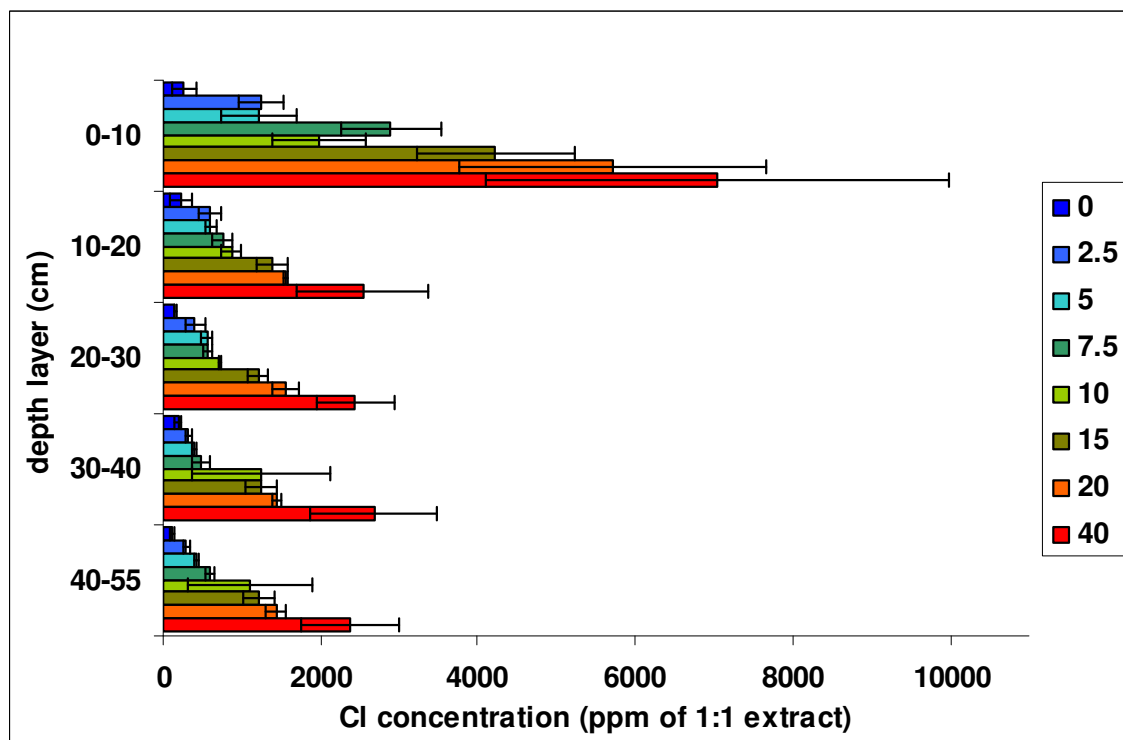
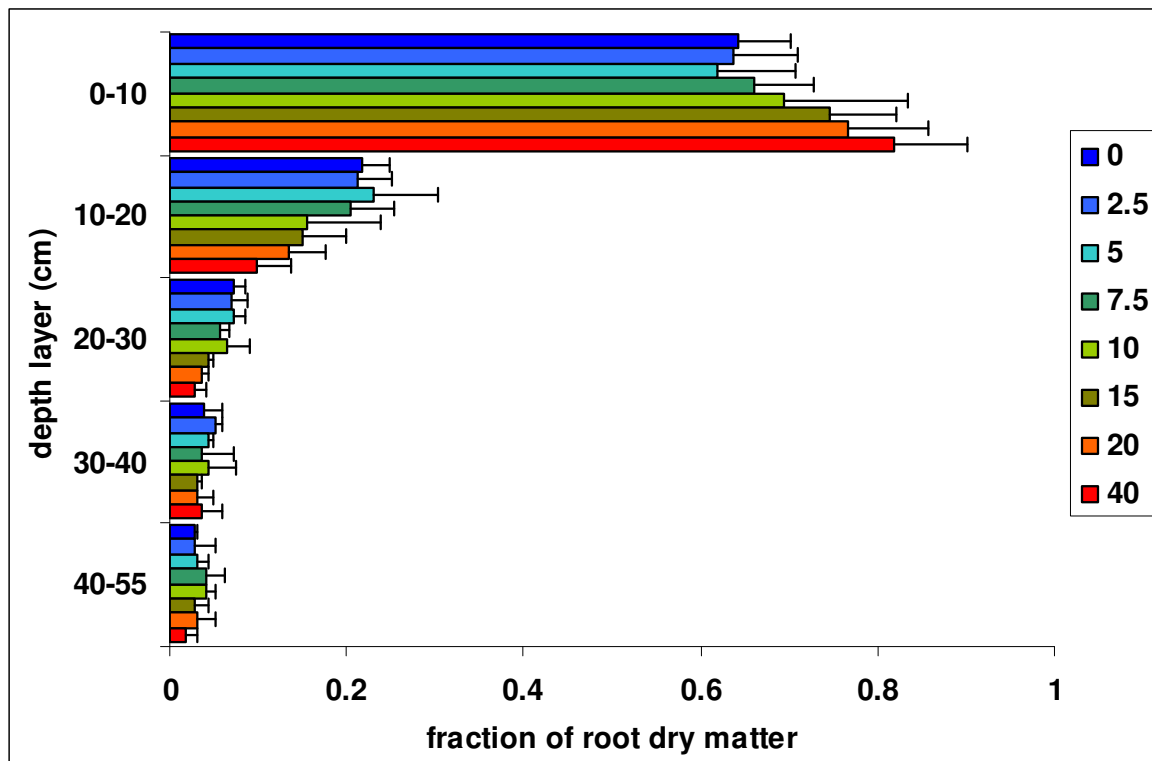
טבלה 4. ערכי סף (A) ושיפועים (B) של עקומי תגובה למליחות מהניסוי ומהספרות (Maas 1990; Yermiyahu et al. 2008).

Carousel 2009-2010	Maas (1990)	Yermiyahu et al. (2008)	
0.50	1.50	0.8	A
11.0	14.0	12.0	B
0.72	0.36	0.64	R ²

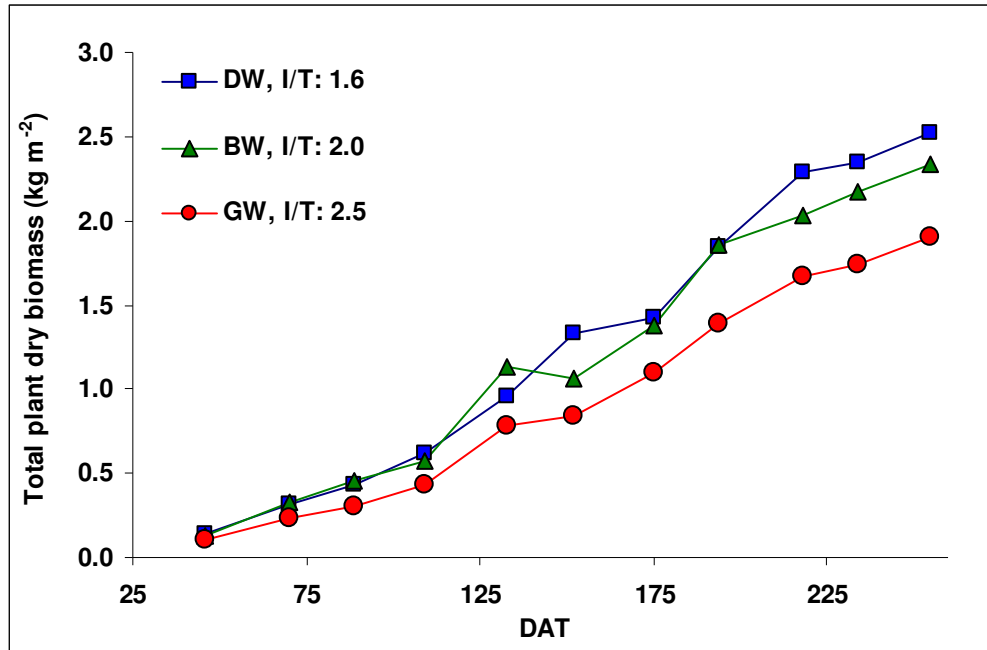
טבלה 5. מוליכות החשמלית הגורמת למחצית יבול (EC_{e50}) וערכי p המיטביים עבור נוסחת van Genuchten בשימוש באיור 4.

<i>p</i> optimized	<i>p</i> =3	<i>p</i> =1	
5.98	5.05	9.34	EC _{e50} (dS m ⁻¹)
1.65	3	1	P
0.77	0.59	0.68	R ²

טיפול המליחות השפיעו על פיזור השורשים בחתך הקרקע (איור 3, עליון). בטיפול של 40 מילימול NaCl 82% מהשורשים התרכזו ב-0.1 מ' של הקרקע העליונה, 10% נמצאו בין 0.1 ל-0.2 מ' עומק. מעט שורשים הגיעו עמוק יותר. שורשים בטיפול ללא NaCl היו מפוזרים יותר בחתך הקרקע: 64% בשכבה העליונה ו-22% בשכבה מתחת. השפעת הטיפולים התבטאה גם בתמיסות הקרקע שנמדדה בסוף הניסוי (איור 3, תחתון) מתאם טוב עם טיפולי המליחות היה בכל הפרופיל. מליחות בשכבה העליונה (0-10 ס"מ) היתה גבוהה בהרבה מהמליחות בשאר השכבות שביניהן ההבדל קטן.

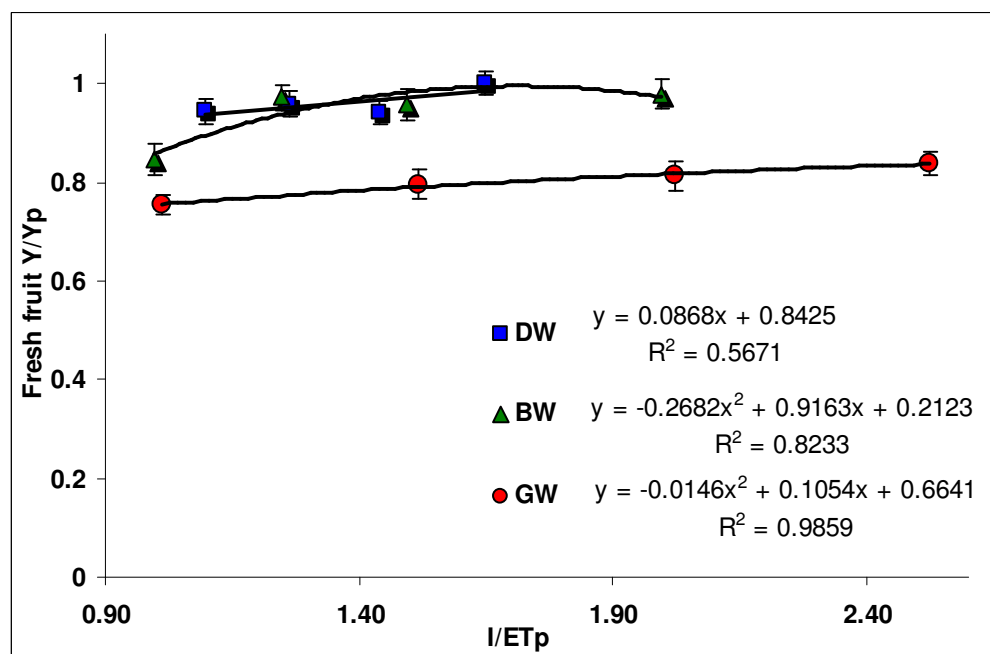


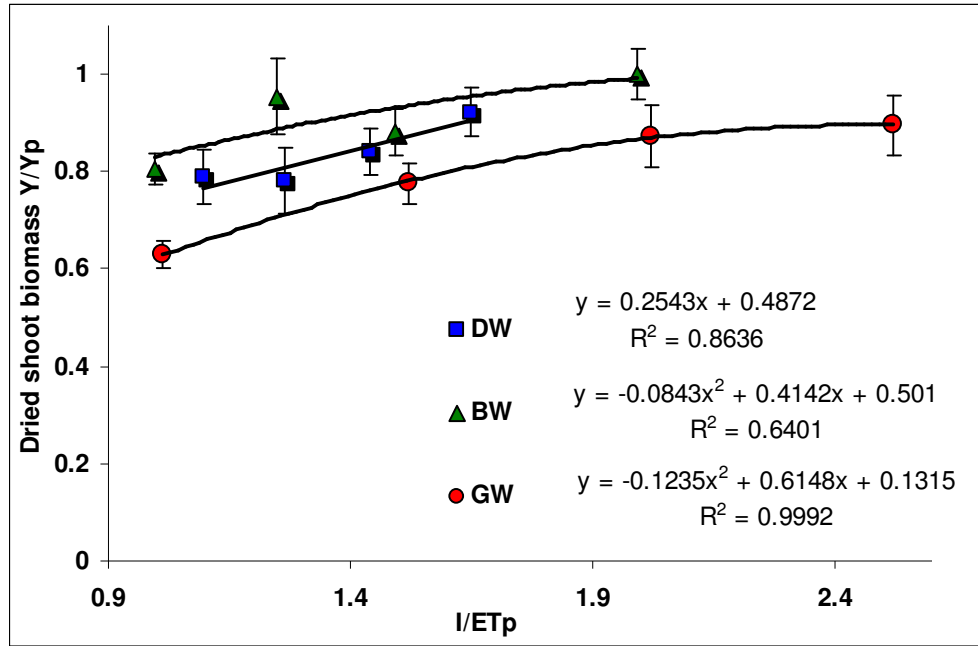
איור 3. יחס של מסה של שורשים (למעלה) וריכוז כלוריד בתמיסה של קרקע (למטה) בשכבות הקרקע בליזימטרים.



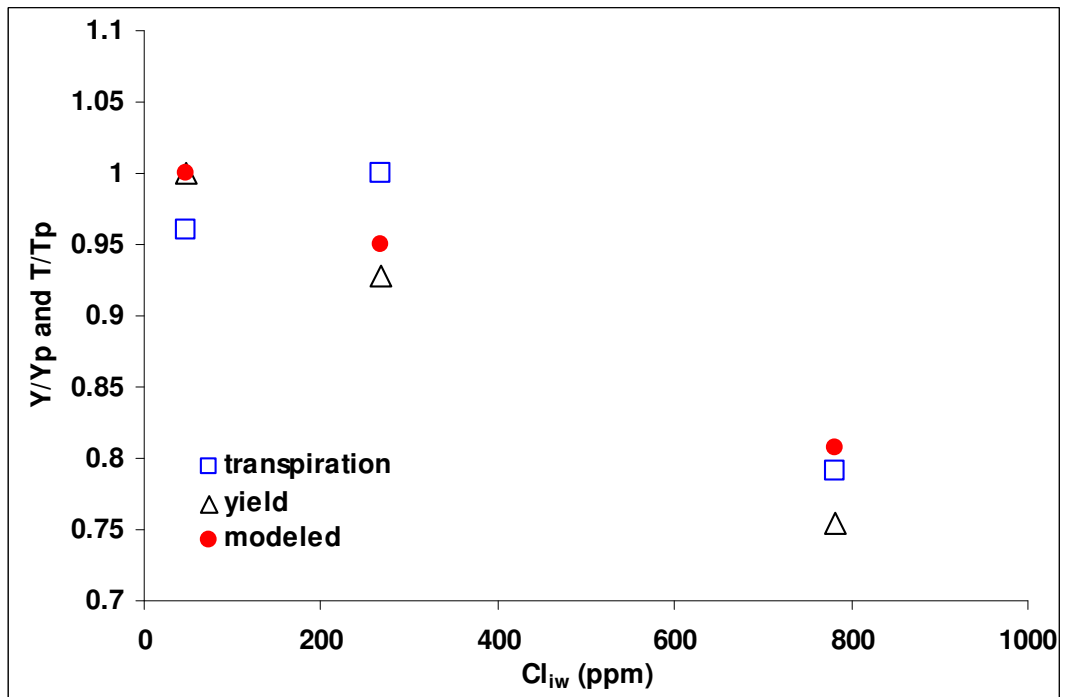
איור 4. ביומסה של צמחים שלמים שנדגמו 11 פעמים במשך ניסוי הפלפל בתחנת זוהר.

סה"כ ביומסה מצטברת הכוללת בפרי, נוף ושורשים של טיפולי ה-I/ETp הגבוהים מוצגים באיור 4. הבדלים בין טיפול מים המליחים (GW) ובין הטיפולים האחרים התחילו מיום ה-70 אחרי שתילה כאשר הבדלים בין טיפול המעורבבים (BW) וטיפול המותפלים (DW) התפתחו רק אחרי כ-200 יום. תוצאות של יבול מסוף העונה של כל הטיפולים מוצגות באיור 5. השקיה במים פחות מליחים גרמה ליבול של ביומסה ופרי גדולים יותר בכל רמה של השקיה (איור 6). העלאת מנת המים השפיעה יותר על גידול ווגטיבי מאשר יצור פרי. תוספות של מים מותפלים ומעורבבים כמעט ולא גרמו לעליות ביבול הפרי.





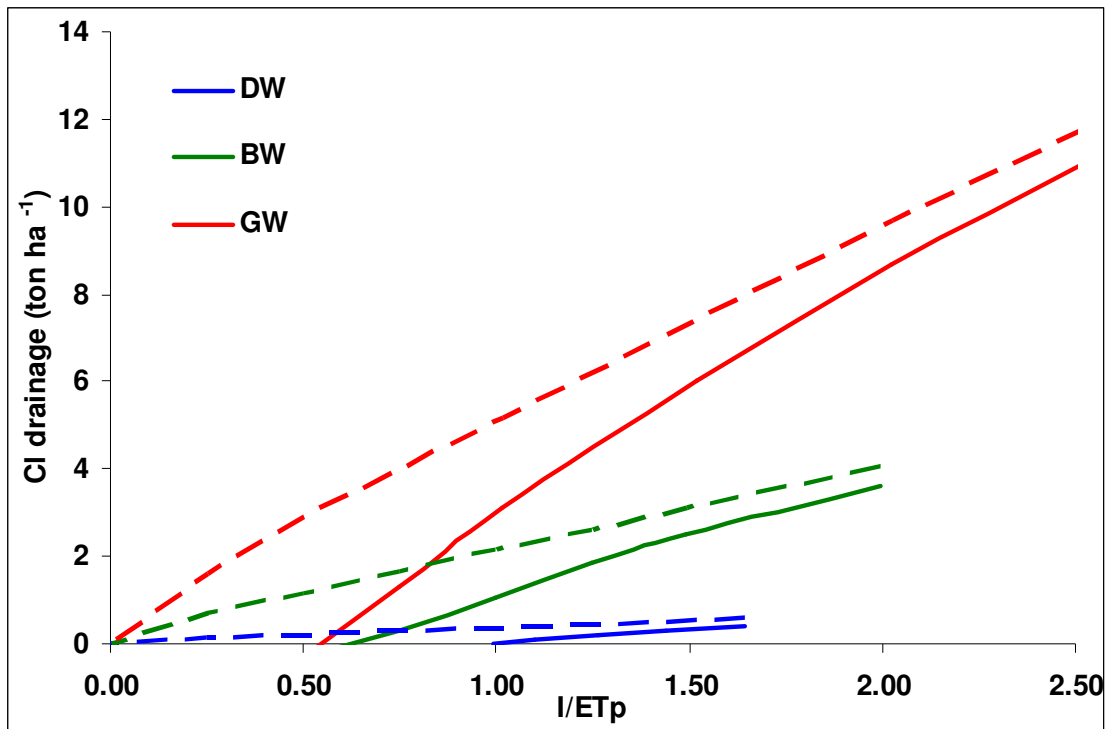
איור 5. יבול פרי טרי (למעלה) וביומסה יבשה (למטה) של פלפל בניסוי חצי מסחרי בזהר. $I/ET_p =$ שיעור ההשקיה מנורמל לאופוטנספירציה פוטנציאלית



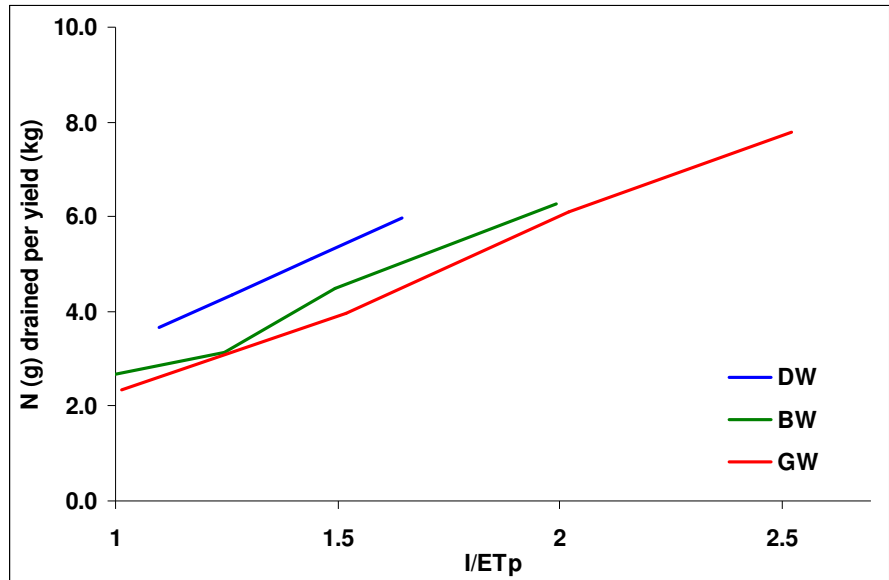
איור 6. יבול (טרנספירציה) של פלפל כתלות בכלוריד במי השקיה. טיפולי מים עם I/ET_p הגבוהים בלבד.

באיורים 7, 8 ו-9 הופעלו הרצות של HYDRUS מהמקרה של הניסוי בזוהר על מנת לשאול שאלות הקשורות להשלכות הסביבתיות של השקיית פלפל עם כל אחד מ-3 רמות המליחות של המים. באיור 7 מוצגים מאזני הכלורידים ורואים את כמויות המלחים היוצאים מתחתית בית השורשים עם תשטפי הנקז כפונקציה של איכות מי ההשקיה והכמות המושקת. באיור 8 מוצגים אותם מאזנים עבור החנקן. באיור 9 מסוכם המחיר הסביבתי של השקיה במים מליחים ומעורבבים.

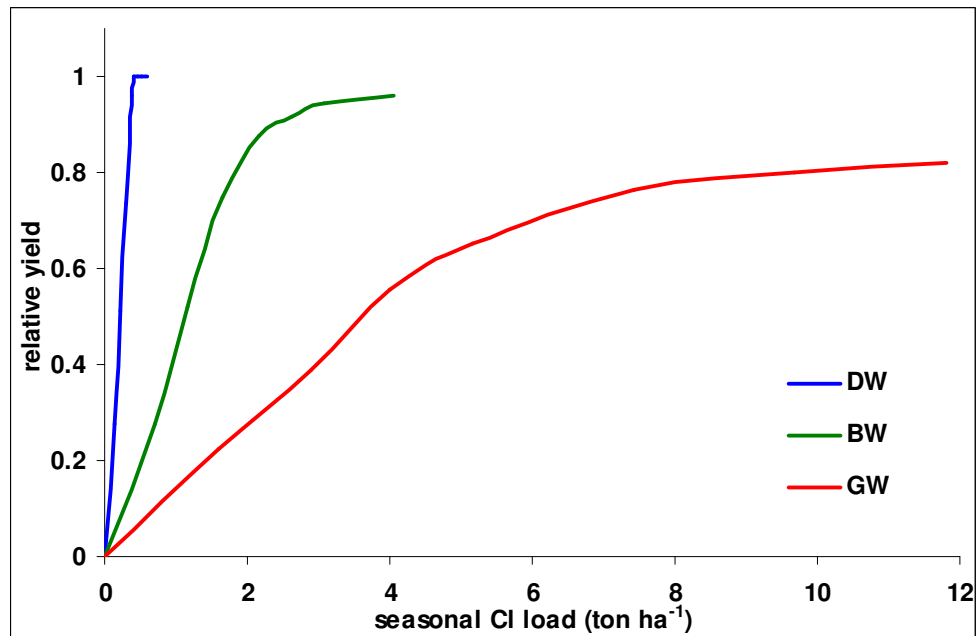
יחסי נוף-פרי שמושפעים מהטיפולים והתרכוזות שונה של המינרלים בחלקי הצמח השונים גורמים למערכת מורכבת שמסבכת את היכולת לנתח את התוצאות. בעקבות זאת הוחלט לעבוד בשלב הראשון גידול ללא פרי זאת על מנת לבחון את המודל במערכת פחות מסובכת. לפיכך, בעונה השנייה של הניסוי (2010/11) יערכו ניסויים בבזיל בכוונה לחזור לניסויים על גידול שמכיל פירות (עגבנייה) בעונה השלישית.



איור 7. תנועה של כלוריד שנכנס (קו שבור) ושיורד כנקז (קו רציף) מחיזוי סימולציה מ-HYDRUS-1D.



איור 8. חנקן היוצא כנקז מנורמל ליבול כתלות בכמות ואיכות מי ההשקיה



איור 9. יבול יחסי כתלות בכמות העונתית של כלוריד הנוסף לקרקע.

מסקנות

בהשקיית פלפל עם מים מעורבבים ניתן לקבל יבולים השווים לאלה שגדלו עם מים מותפלים מדושנים אך זאת רק כאשר מעלים את מנת ההשקיה ביותר מ-20%. העלות הסביבתית של השקיה עודפת כאשר מליחות המים עולה מ-0.9 (מותפלים מדושנים) ל-2 דס/מ (מעורבבים מדושנים) היא משמעותית מאחר וכמות המלחים הנשטפים מעבר לבית השורשים הינה כפולה במים המעורבבים בהשוואה למים המותפלים. השקיה במים מליחים אפילו בכמויות שטיפה הנהוגות כיום בערבה לא תניב יבול מקסימלי וגם תגדיל בשיעור ניכר את כמות המלחים הנשטפים מעבר לבית השורשים.

הבעת תודה

המחקר ממומן חלקית על ידי המדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר (תוכנית מחקר 304039309) ועל ידי קרן יק"א

רשימת ספרות

- Ben-Gal A, Ityel E, Dudley L., Cohen S, Yermiyahu U, Presnov E, Zigmond L and Shani U. 2008. Effect of irrigation water salinity on transpiration and on leaching requirements: A case study for bell peppers. *Agric. Water Manag.* doi:10.1016/j.agwat.2007.12.008.
- Ben-Gal A and Shani U. 2002. A highly conductive drainage extension to control the lower boundary condition of lysimeters. *Plant Soil*, 239:9-17.
- Ben-Gal A. Yermiyahu U. and Cohen S. (2009) Fertilization and blending alternatives for irrigation with desalinated water. *J Environ Qual* 38:529-536.
- Lazarovitch, N., Ben-Gal A., and Shani U. 2006. An automated rotating lysimeter system for greenhouse evapotranspiration studies. *Vadose Zone Journal*. 5:801-804.
- Maas, E.V. 1990. Crop salt tolerance. p. 262-304. In: *Agricultural salinity and assessment management* (K.K. Tanji, ed.). Amer. Soc. Civil Eng., Manuals and Reports on Engineering No. 71. New York: ASCE.
- Shani, U., Ben-Gal, A. Tripler E. and Dudley, L.M. 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
- van Genuchten, M.Th. and G.J. Hoffman. 1984. Analysis of crop salt tolerance data. In: Shainberg, I. and Shalhevet, J. (Eds.), *Soil Salinity under Irrigation*, Ecological Studies, Springer Verlag, Berlin. 51:258-271.
- van Genuchten, M.Th., and S.K. Gupta. 1993. A reassessment of the crop salt tolerance response function. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 41(4):730-737.
- Yermiyahu, U., A. Ben Gal, D. Cohen, D.R. Shemer, and B.T. Golan, A. 2008. Irrigation of Crops with Desalinated Water. Report submitted to Chief Scientist, Israel Ministry of Agriculture and Rural Development. Project # 301-00527-05, 15 p. (in Hebrew).

פרטי הדו"ח באנגלית

Blending of desalinated and saline water for efficient agricultural and responsible environmental use

Naftali Lazarovitch, Alon Ben-Gal, Uri Yermiyahu, Ami Maduel, Rivka Offenbach, Shabtai Cohen

Keywords: Irrigation, Salinity, Lysimeters, Bell peppers, Capsicum