

**מערכת משולבת לטיפול וחסכון במים להשקיה**

**Integrated membrane system for savings in irrigation**

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר

ע"י

בני לב המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי

אברהם ארבל המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי

מורדכי ברק המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי

Beni Lew, Agricultural Engineering Institute, Ministry of Agriculture, P.O.Box 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [benilew@agri.gov.il](mailto:benilew@agri.gov.il)

Avraham Arbel, Agricultural Engineering Institute, Ministry of Agriculture, P.O.Box 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [arbel@agri.gov.il](mailto:arbel@agri.gov.il)

Mordechai Barak, Agricultural Engineering Institute, Ministry of Agriculture, P.O.Box 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [barak@agri.gov.il](mailto:barak@agri.gov.il)

**תקציר**

מוליכות מים באזורים רבים בישראל גבוהה וכתוצאה מכך קיימת בעיה של צריכת מים גבוהה להשקיה. לפחות כ- 40% מהמים המסופקים ביום לגידולים השונים משמשים לשטיפת בית השורשים כדי להבטיח 100% תנובה. עלייה בצריכת מים להשקיה מלווה בהגדלת צריכת אנרגיה ודשנים. בנוסף לכך, עודף המים מחלחל בקרקע והינו מטרד סביבתי עקב ריכוז גבוה של מלחים (גבוה יותר מאשר במי השקיה), דשן ומיקרו-אורגניזמים פתוגנים. מטרת המחקר הינה פיתוח מערכת משולבת של ממברנות NF ו-RO לטיפול במים מליחים להשקיה בעלות נמוכה יחסית (בנייה ותפעול לעומת אוסמוזה הפוכה), עם שמירת הצורונים חיוניים לצמחים במים והפחתת הנזק הסביבתי. תוצאות המחקר הינם מודל מתמטי שחווה את איכות מים תוצר להשקיה על בסיס נתונים של מים מקור וסוג ממברנה. תוצאות המודל הראו שמערכת NF+RO הכי כדאית לטיפול במים מליחים להשקיה. גידול פלפל עם ארבעה סוגי מים שונים גם הוכיחו שמערכת NF+RO גורמת ליבול הגבוה ביותר, אך, איכות הפרי נמוך במאט.

**הצהרת החוקר הראשי: הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.**

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא

## 1.1 תוכן עניינים

02	1.2 מבוא
04	1.3 מטרות המחקר
04	1.4 פירוט עיקרי הניסוי
04	1.5 דיון
06	1.6 רשימה מלאה של הפרסומים המדעיים
06	1.7 ביבליוגרפיה

## 1.2 מבוא

המחסור במים בעולם ובעיקר במזרח התיכון משפיע קשות על המגזר החקלאי. הדרישה הולכת וגוברת של מים באיכות גבוהה לתעשייה ולבני אדם מגבירה את התחרות על משאבים הקיימים ולעיתים קרובות גורמת להקטנת הקצאות המים לחקלאות [1]. השקיה במים מליחים הינה שיטה מקובלת במדינות במזרח התיכון ובהודו [1], אך, השיטה בעלת חסרונות רבים. ראשית, לכול גידול קיימת מוליכות מרבית בה ניתן לדגל אותו. שנית, ככלל, כמות המים המסופקת ביום בהשקיה מחושבת לפי שני פרמטרים: צריכת הצמח ומוליכות המים (בעיקר ריכוז צורוני כלוריד, נתרן, סידן ופוטסיום). מוליכות גבוהה מקטינה את מפל האוסמוטי וקצב קליטת המים ויסודות הדשן ע"י הצמח וכתוצאה מכך היבול נפגע. כדי להגדיל את המפל האוסמוטי, משקיים מים בעודף. שליטת, צורונים הלא רצויים על ידי הצמח (כלוריד ונתרן בעיקר) מצטברים בבית השורשים וגורמים להקטנה נוספת במפל האוסמוטי. אי לכך, שטיפתם מבית השורשים הינה הכרחית וכמות המים הדרושה לכך גדלה עם העלייה במוליכות [2]. מוליכות המים באזורים רבים בישראל גבוהה (בין 1.5 לבין 12.0 dS/m) וכתוצאה מכך לפחות 40% מהמים המסופקים ביום לגידולים השונים משמשים לשטיפת בית השורשים כדי להבטיח 100% תנובה [3].

עלייה בצריכת מים להשקיה מלווה בהגדלת צריכת אנרגיה ודשנים (הדשיה הינה השיטה המקובלת היום להספקת מים ודשנים לצמח), כאשר מחיר הדשנים עבור גידולים מיוחדים הינו כ-1.50 US\$. בנוסף לכך, עודף המים מחלחל בקרקע והינו מטרד סביבתי עקב ריכוז גבוה של מלחים (גבוה יותר מאשר במי השקיה), דשן ומיקרו-אורגניזמים פתוגניים. ריכוז המלח הגבוה גורם להמלחת קרקע ובסוף של דבר בירידת פוריות הקרקע [4]; הדשנים, בעיקר חנקן וזרחן, גורמים לאוטרופיקציה (פעילות מיקרו-אורגניזמים) וזיהום קרקע ומי תהום; והפתוגנים מזהמים את הקרקע ומי תהום ומגבילים את השימוש חוזר של מי העודף.

הטיפול המקובל במים עם מוליכות גבוהה הינו התפלה על ידי ממבראנה RO (אוסמוזה הפוכה). השקיה במים מותפלים תופסת תאוצה לאור יעילותה להשקיה, שמירה על איכות הסביבה והחיסכון במשבים בתהליך הדשיה (פחות מים, דשן ואנרגיה). למרות שמים מותפלים הינם מסופקים לחקלאים להשקיה, שני נושאים מונעים מהתפלת מי ים על ידי RO מלהשיג את יכולתה המרבית בחקלאות. ראשית, הסינון מתבצע באמצעות הפעלת לחץ גבוה כדי להפריד בין המים לבין המלחים, המחייבת צריכה אנרגטית גבוהה [5]. בישראל, עלות התפלת מי ים על ידי ממבראנת RO

יכולה להגיע לכ-0.60 US\$ למ"ק, כאשר התפלת מים מליחים מאזור הערבה עולה בין 0.17-0.23 US\$ למ"ק, בהתאם למוליכות המים [6]. למתקני התפלת מי מליחים הממוקמים בתוך יבשה קיימת בעיה נוספת - טיפול ברכז. במתקנים הנמצאים על יד החוף הרכז מוחזר לים, לעומת זאת במתקנים הממוקמים בתוך היבשה, טיפול הרכז הינו יקר בשל הצורך בהסעתו לים.

שנית, התפלה על ידי ממבראנת RO גורמת להרחקה מלאה של כל הצורונים מהמים, כולל אלו שחיוניים לצמחים ובעלי חיים, כגון מגנזיום, אשלגן וסידן. צורונים אלו נמצאים במי הרכז בריכוז גבוה. העדר של צורונים אלו משפיע על יבולים ומצב בריאותי של הצמח [7]. כיום, המגדל חייב להחזיר את הצורונים החיוניים לצמחים למים שעברו טיפול על ידי מערכת אוסמוזה הפוכה ובעלות גבוהה.

לעומת מערכות RO, ממבראנת ננו-פילטריציה (NF) בעלת נקבובים גדולים יותר, פועלת בלחצים נמוכים יותר (דרישה החשמלית של כ-0.5 קילו ווט שעה למטר קוב מים [8]), ובעלויות הקמה ותחזוקה נמוכות יותר (כ-0.16 US\$ למ"ק). עם זאת, NF מתאפיינת בדחייה נמוכה יותר של חלק מהמלחים ודחייה גבוהה עבור מלחים רב ערכיים ומולקולות בעלי משקל מולקולרי גדול מ-300 גרם למול, בלבד.

הדחייה הנמוכה של מערכת NF יכולה להיות חיסרון עבור הורדת ריכוזי מלח במים (מוליכות התסנין גבוהה יותר מאשר במערכת RO), אך, עשויה להיחפך ליתרון לצורכי החקלאות. היות ו-NF מפרידה בין יונים חיוניים לגידולים (רב ערכיים הנמצאים ברכז) לבין יונים לא רצויים (חד ערכיים הנמצאים בתסנין). אי לכך, ניתן להוריד את מוליכות המים מ-2.1 dS/m ל-0.7 dS/m על ידי שימוש ב-NF ובכך, להוריד את צריכת המים להשקיה בכ-40%-30%. במצב כזה, החיסכון במים שווה ערך לעלות הפעלת מערכת NF, אך, בנוסף, קיים חיסכון בדשנים (של כ-40%-30) ושמירה על איכות הסביבה. במתבסס על היתרונות, מערכת NF להתפלת מים מליחים עשויה להיות יעילה וחסכונית יותר להפקת מים השקיה. עם זאת, אחוז החזר הרכז (אחוז ספקית הרכז מספקת ההזנה) ב-NF עשוי להיות נמוך יחסית.

הפתרון המוצע הינו מערכת ממבראנלית המשלבת ממבראנה NF עם מערכת RO. ממבראנה NF הפועלת בלחצים נמוכים מאפשרת מעבר של מים (תסנין) עם צורונים חד ערכיים (כלוריד ונתרן בעיקר שאינם חיוניים לצמחים) ומונעת מעבר של צורונים רב-ערכיים (סידן ומגנזיום שהינם חיוניים לצמחים) - הרכז. סינון נוסף של תסנין ממבראנת NF על ידי ממבראנת RO (מוליכות וכמות ההזנה הינם נמוכים) תרחיק את כל הצורונים החד ערכיים מהמים. ערבוב תסנין ממבראנת RO עם הרכז של ממבראנת NF עשוי לספק כמות מים גדולה (רק הרכז של ממבראנת RO אינו בעל שימוש לחקלאות) עם מוליכות נמוכה, אך, עם הצורונים החיוניים לצמחים. בשיטה זו, רכז ממבראנת RO יהיה בעל ריכוז גבוה של צורונים חד-ערכיים בלבד, בעיקר נתרן וכלוריד, הניתנים לשיקוע מכוון כסודיום כלוריד.

### 1.3 מטרות המחקר

מטרת המחקר הינה פיתוח מערכת משולבת להתפלת מים מליחים להפקת מי השקיה בעלות נמוכה (בנייה ותפעול) לעומת אוסמוזה הפוכה, עם שמירת הצורונים החיוניים לצמחים במים והפחתת הנזק הסביבתי.

מטרות משניות הן :

א) קביעת תנאי הפעלה של מערכת התפלת מים מליחים להפקת מי השקיה בעלות נמוכה ועם שמירת הצורונים חיוניים לצמחים במים. לצורך זה, שלושה תהליכים יבחנו :

- NF ובהמשך RO ;

- NF ובהמשך ED ;

- NF ובהמשך RO ומערכת אלקטרו דיאליזה (ED).

ב) פיתוח מערכת למניעת פאולינג בממבראנות על ידי שיטת די-אלקטרופורזיס (DP) לארכת חיי הממבראנה וחיסכון בחשמל.

ג) אפיון ההשפעה המתקבלת כתוצאה מהפעלת המערכת שנבחרה (משלושת האפשרויות של סעיף א') ולאורך הזמן.

ד) פיתוח תהליך הנחוץ לטיפול הרכז.

ה) פיתוח מודל מתמטי המתאר את התנאים האופטימאליים של המערכת הנבחרת, להפעלה כתלות באיכות המים בקו ההזנה וזו הרצויה לצורכי השקיה.

### 1.4 פירוט עיקרי הניסוי

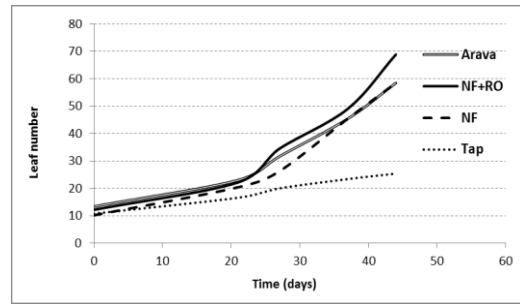
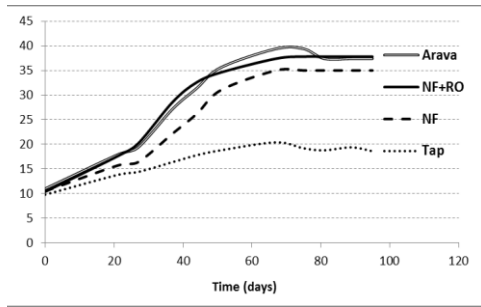
אפיון ההשפעה המתקבלת כתוצאה מהפעלת המערכת שנבחרה (משלושת האפשרויות של סעיף א') ולאורך הזמן

השקית פלפל בחממה על ידי ארבעה מקורות מים שונים: NF ובהמשך RO ; תסנין של NF, מי מקור (מליחים) ומי ברז של אזור המרכז : מטרת הניסוי הינה לקבוע את השפעת סוג מים ליבול ואיכות התוצר.

### 1.5 דיון

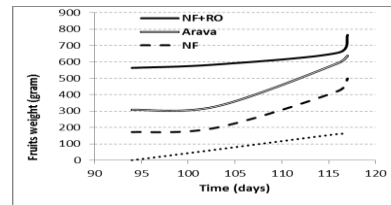
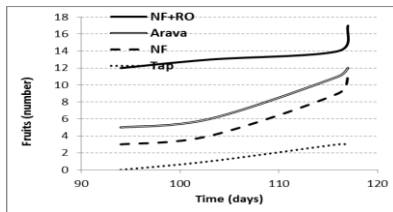
השפעה המתקבלת כתוצאה מהפעלת המערכות שונות לטיפול במים

בשלושת החודשים של הניסוי נלקחו כל שבוע דגימות של פרמטרים שונים של כל הצמחים לבדיקת התפתחותם. הפרמטרים שנבדקו הם : גובה ומספר עלים של הצמח (איור 1). בתוצאות ניתן לראות כי בהשקיה עם מי ערבה ומי NF+RO תסנין גבהי הצמחים היו יחסית שווים וגבוהים יותר מסוגי מי השקיה אחרים ; כאשר בהשקיית מי ברז, גבהי הצמחים הם הנמוכים ביותר מבין 4 סוגי מי השקיה בשלושת חודשי הניסוי. בבדיקת פרמטר של מספר העלים של הצמחים אפשר לראות כי צמחים שהושקו עם מי ערבה נתנו את מספר עלים הגבוה ביותר וכי משבוע שלישי צמחים שהושקו עם מי NF+RO תסנין נתנו את מספר העלים הגובה ביותר ; כאשר מי ברז שוב נתנו את מספר העלים הנמוך ביותר משבוע שני בששת השבועות אלה.



איור 1: גובה הצמח ומספר עלים עם הזמן בהשקיה עם סוגי מים שונים.

לקראת סוף החודש השלישי של הניסוי נקטפו פירות שהושקו עם ארבעת סוגי מים. התבצעו שלושה קטיפים של פירות בהפרש של שבועיים; נספרו ונשקלו כל הפירות שנקטפו בשלושת הקטיפים. מספר פירות ומשקל הפירות המצטבר ניתן לראות באיור 2.



איור 2: מספר פירות מצטבר וסך הכול משקל פירות מצטבר בזמן.

בדומה לתוצאות של גידול צמחים, צמחים שהושקו עם מי ברז הראו את התוצאות הנמוכות ביותר, עקב חוסר מגנזיום במים. אם זאת, בבדיקת יבול, צמחים שהושקו עם מים NF+RO הראו את מספר פירות ומשקל פירות הגבוה ביותר מכול סוגי מים האחרים, בעיקר בקטיפ הראשון. מי מליחים ומים NF הראו תוצאות דומות בכול הקטיפים.

בנוסף, נבדקו פרמטרים שונים בפירות: גובה וקוטר של הפרי, Total Soluble Solids (TSS) - כלל מוצקים מסיסים בפרי כאשר רובם הם סוכרים (טבלה 1).

טבלה 1: איכות הפרי שנקטף לפי סוג מים להשקיה.

Parameter	Arava Brackish	NF	NF+RO	Tap Water
Weight, g	65.08	51.14	53.66	50.63
Length, mm	80.56	73.89	68.02	61.41
Diameter, mm	53.15	50.48	52.01	50.40
Total Soluble Solids, Brix%	7.13	6.57	6.28	5.80
Ascorbic Acid <sup>(*)</sup> , mg/100g	179.02	168.07	152.83	161.90
Rate of Relaxation, N/s	0.49	0.54	0.58	0.54

פלפלים גדולים וכבדים התקבלו כאשר הושקה עם מים מליחים. השקיה עם NF ו/או NF+RO הראו תוצאות דומות. אך, אין הפרש משמעותי בין התוצאות ובתוך שגיאה, דבר המצביע על כך שסוג מים לא משפיע על משקל או גדל הפירות [2].

ריכוז חומצה אסקורבית וTSS גדלו עם עליה במליחות המים [7], אך, גם בפרמטר זה אין הבדל בין התוצאות. תוצאות של מרקם הפרי (rate of relaxation) עלו עם עלייה במליחות המים, כאשר למרקם הפרי יש קשר ישיר עם ריכוז סידן במים.

בסיכום, אן הבדל משמעותי באיכות הפרי בהשקיה עם מים באיכויות שונות. אך, מים מליחים יותר הראו פירות גדולים, כבדים ועם ריכוז סוכר גבוה במאט.

#### **1.6 רשימה מלאה של הפרסומים המדעיים**

Lew, B., Trachtengertz, L., Ratsin, S., Oron, G., Bick, A. (2014) Brackish groundwater membrane system design for sustainable irrigation: Optimal configuration selection using analytic hierarchy process and multi-dimension scaling. *Frontiers Environmental Science- Environmental Toxicology*, 2/56, 1-10.

#### **1.7 ביבליוגרפיה**

- [1] Qadir, M., Sharma, B.R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R. and Karajeh, F. (2007) Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agric. Water Management*, 87(1), 2–22.
- [2] Sadeh, A. and Ravina, I. (2000) Relationships between yield and irrigation with low-quality water - a system approach. *Agric. Systems*, 64(2), 99-113
- [3] Shillo, R., Ding, M., Pasternak, D. & Zaccari, M. (2002). Cultivation of cut flower and bulb species with saline water. *Scientia Horticulturae*, 92(1), 41-54.
- [4] Metternichta, G.I and Zinck, J.A. (2003) Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 85, 1 –20.
- [5] Kurihara, M., Yamamura, H., Nakanishi, T. (1999) High Recovery/High Pressure Membranes for Brine Conversion SWRO Process; Development and its Performance Data, *Desalination* 125, 9-15.
- [6] Betts, K. (2004) Desalination, desalination everywhere. *Environ. Sci. Technol.*, 38(13) 246A–247A.

- [7] Yermiyahu, U., Tal, A., Ben-Gal, A. Bar-Tal, A., Tarchitzky, J. and Lahav, O. (2007) Rethinking desalinated water quality and agriculture. *Science*, 318(5852), 920.
- [8] Mourato, D. (2010) Microfiltration and Nanofiltration. Excerpts from unpublished article. n. pag. ZENON Environmental Inc, Burlington, Ontario Canada. 25 January 2010.
- [9] Saaty, T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, NY.
- [10] Du, F., Hawari, A., Baune, M., Thöming, J. (2009) Dielectrophoretically intensified cross-flow membrane filtration, *Journal of Membrane Science*, 336, 71-78.

### סיכום עם שאלות מנחות

נא להתייחס לכל השאלות בקצרה ולעניין, ב-3 עד 4 שורות לכל שאלה (לא תובא בחשבון חריגה מגבולות המסגרת המודפסת).  
שיתוף הפעולה שלך יסייע לתהליך ההערכה של תוצאות המחקר.  
**הערה:** נא לציין הפנייה לדו"ח אם נכללו בו נקודות נוספות לאלה שבסיכום.

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
קביעת תנאי הפעלה של מערכת התפלת מים מליחים להפקת מי השקיה בעלות נמוכה ועם שמירת הצורונים חיוניים לצמחים במים.
עיקרי הניסויים והתוצאות.
גידלנו פלפל בחממה מושקים בארבעה סוגי מים שונים: NF, NF+RO, מי מליחים ומי ברז. לפי מודל מתמטי, מערכת NF+RO הינה הכדאית ביותר מבחינת חיסכון באנרגיה ואיכות המים. תוצאות גידול פלפל הראו שמערכת NF+RO גורמת ליבול גדול יותר, אך, איכות הפרי קטן במאט.
מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?
מערכת NF+RO הינה הכדאית ביותר לטיפול במי תהום מליחים להשקיה בעיות שנתרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרות המחקר בתקופה שנתרה לביצוע תוכנית המחקר?
במלך המחקר לא הסגנו מטרה אחת: טיפול ברכז
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: <b>פרסומים בכתב</b> - ציטט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי; <b>פטנטים</b> - יש לציין שם ומס' פטנט; <b>הרצאות וימי עיון</b> - יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.
כתבנו מאמר אחד שכבר התפרסם. מאמר שני בכתיבה
פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: (סמן אחת מהאופציות)
רק בספריות ←
ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט) ←
חסוי לא לפרסם ←