

## רועי שפירא

המכון למדעי הקרקע המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי - מרכז וולקני. כיום: תה"ל מהנדסים יועצים בע"מ

## דניאל קורצמן

המכון למדעי הקרקע המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי - מרכז וולקני

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

## ציטוט מומלץ

שפירא ר וקורצמן ד. 2013. הפחתת שטפי חנקה למי תהום מתחת לפרדסים על סמך הדמיות דיסון במודלים מכיליים. *אקולוגיה וסביבה* 4(1): 50-55.



דגימות קרקע שנלקחו מהתווקן הלא-רווי מתחת לפרדס בשרון | צילום: רועי שפירא

## הפחתת שטפי חנקה למי תהום מתחת לפרדסים על סמך הדמיות דיסון במודלים מכיליים

גיליון אביב 2013 / כרך 4(1) / חקלאות, קיימות וסביבה 3 בפברואר, 2013

[חזית המחקר](#)

### על קצה המזלג

- חנקה היא המזהם המשמעותי ביותר במי תהום בארץ.
- אחוז משמעותי מהחומר שמשמש לדישון בשטחים חקלאיים מחלחל למי התהום, ומשפיע על איכות מי השתייה שלנו.
- המחקר מציע מודלים להפחתה של עד 75% מהשימוש בדישון, דבר שיקטין את חלחול החומר המזהם.
- רמת דישון מופחתת, כפי שמציע המחקר, תוריד את הריכוז הממוצע של החומר שמחלחל למי התהום. רמה זו מוצעת כרמת הדישון המומלצת לפרדסים באזור השרון.
- יידוע החקלאים באשר לריכוז החנקן שבמי ההשקיה והבאתו בחשבון כדשן, יסייעו רבות בהפחתת הדישון העודף.

המערכת

## תקציר

חנקת היא המזהם המשמעותי ביותר במי תהום בארץ. חלק ניכר מהחנקן שמשמש לדישון בשטחים חקלאיים מחלחל כחנקה מתחת לבית השורשים, ומשם דרך התווך הלא-רווי העמוק אל האקווא. מחקר זה מתמקד בשטפי חנקה לאקווא החוף מתחת לפרדסים בקרקעות חמרה בשרון. בית השורשים של עצי הדר והתווך הלא-רווי העמוק שמתחתם נדגמו לצורך בדיקות של משתנים כימיים ופיזיקליים המשפיעים על הסעת חנקה. מודלים של זרימה אנכית והסעת אמון וחנקה דרך האזור הלא-רווי, כולו לנתוני הדגימות שנאספו בעזרת תכנת HYDRUS-1D. המודלים המכילים שימשו להדמיית רמות דישון מופחתות. הדמיית שיושמה בהן מחצית מכמות הדשן החנקני המשמשות כיום בחלקות שנדגמו (לא כולל החנקן שבמי ההשקיה), נמצאו יעילות מבחינה חקלאית-סביבתית: רמות דישון אלה גרמו להפחתה של כ-75% בחלחול החנקה לאקווא, בעוד שקליטת החנקן על-ידי השורשים נותרה קרובה להמלצות משרד החקלאות ופיתוח הכפר לדישון פרדסים. רמת הדישון המופחתת תוריד את הריכוז הממוצע במים שבנקבובי התווך הלא-רווי אל מתחת לתקן החנקה למי השתייה, ולכן מוצעת כרמת דישון מיטבית לפרדסים בקרקעות חמרה, מעל אקווא החוף.

## מבוא

חנקה היא מזהם שכיח ביותר של מי תהום. בריכוזים גבוהים החנקה מסוכנת לבריאות האדם, ופגיעתה המשמעותית ביותר היא בירידה ביכולת קשירת החמצן בדם (methemoglobinemia) [7]. בישראל, חנקה היא המזהם הגורם לסגירת המספר הגדול ביותר של מקורות מים לאספקת מי שתייה [2,1].

די ליעל את תפוקתם של גידולים חקלאיים מסחריים, נדרשת תוספת מלאכותית של דשנים המכילים חנקן מינרלי ( $\text{NH}_4^+$  ו- $\text{NO}_3^-$  אמון וחנקה, בהתאמה). חנקן מינרלי זמין לצמחים ונקלט באופן ישיר על-ידי השורשים. עלותו

הנמוכה יחסית והחשש מהפסדים ביבול, הופכים את החנקן המינרלי ליסוד החשוב ביותר מבחינת פוריות ויעילות ניצול הגידול החקלאי ליחידת שטח [5,12]. ניצול לא יעיל של תשומות דשנים על-ידי גידולים חקלאיים, גורם לחלחול אניונים (ובכללם חנקה), שמגיעים למערכות ניקוז [10] או לאקווא שמתחת לשטח החקלאי [6]. נכון למועד כתיבת עבודה זו אין בישראל תקנות המגבילות שימוש בדשן חנקני מינרלי באזורים רגישים הידרולוגית. במאמר זה מוצעת שיטה להערכת רמות דישון מיטביות המתחשבות ביבול החקלאי ובאיכות מי התהום, על-ידי מודלים מכילים של זרימה והסעת חנקן בתווך הלא-רווי המפריד בין הקרקע החקלאית לפני מי התהום.

## שיטות

ביקר בעיות החנקה במי התהום של אקווא החוף הן תחת קרקעות החמרה [8], והדרים הם עדיין הגידול הדומיננטי בקרקעות אלה. לכן נאספו דגימות מהתווך הלא-רווי מתחת לשלושה פרדסים ששוכנים מעל אקווא החוף, שניים באזור השרון (חמרה) ושלישי באזור שפלת יהודה (קרקע חרסיתית – גרומוסול, להשוואה). בשרון, פרדס אחד מושקה במי באר מקומית, ופרדס שני מושקה במי קולחים החל מתחילת שנות ה-80. הפרדס שבשפלה מושקה במים שפירים מהמערכת הארצית. בכל פרדס נקדחו שלושה קידוחים בעומק של 9 מטר. איסוף הדגימות בוצע בשיטת דחיקה ישירה המאפשרת הוצאת גלעינים רציפים ובלתי מופרים של סדימנט לא מלוכלך. הגלעינים נחתכו למקטעים המייצגים 30 ס"מ אנכיים של התווך הלא-רווי, כל אחד.

מקטעים שנדגמו בוצעו בדיקות פיזיקליות: צפיפות גושית; תכולת רטיבות משקלית [3] (לאחר ייבוש ב-105 מעלות צלזיוס); פילוג גודל גרגר (באמצעות הידרומטר), וכן בוצעו בדיקות כימיות: ריכוז כלוריד במימי (באמצעות כלורידומטר. הכלוריד, בהיותו אניון שאינו עובר באקציות וכמעט לא נקלט על-ידי השורשים, מסייע בתהליך כיוול המודלים) [4]; ריכוזי אמון וחנקה במימי (באמצעות אוטואנלייזר).

מודלים ספרתיים (numerical models) משתנים בזמן, המתארים זרימה והסעת חנקן בממד האנכי, כוללו באמצעות [13] HYDRUS-1D לפרופילים שהתקבלו מאיסוף הדגימות העמוקות בפרדסים שבשרון. נבנה מודל לזרימה באזור הלא-רווי המבוסס על משוואת החידור של ריצ'רדס עם מבלע שורשים, ופונקציות הידראוליות על פי van Genuchten [15] ו- [11] Mualem. במודל ההסעה של האמון והחנקה נעשה שימוש בשתי משוואות הסעה (advection-dispersion) מקושרות, שכוללות ספיחה לינארית של אמון ואברי מבלע/מקור: לנידוף אמון, לניטרופיקציה, לניטרופיקציה ולקליטת אמון וחנקה בשורשים (תגובת שרשרת [13]). הוצבו תנאי שפה עליונים משתנים בזמן (רזולוציה יומית) על פי נתוני גשם, התאדות מחושבת

(על סמך נתונים מהשירות המטאורולוגי וממשרד החקלאות ופיתוח הכפר), נתוני השקיה, דישון חנקני ואיכות מי ההשקיה (על סמך נתונים מחקלאים, ממת"ש קולחי השרון ומרשות המים) ומדד כיסוי עלים - LAI. כדי למזער את ההשפעה של תנאי ההתחלה הורצו המודלים לתקופה של 25 שנים המסתיימות ביום איסוף הדגימות. כדי לקבל זמני הסעה אופייניים למי התהום הוארכו המודלים המכילים ל-9 מטר, עד לעומק של מטר בקירוב מעל פני מי התהום, על סמך נתונים מקידוחי מי תהום סמוכים שהתקבלו מארכיון השירות ההידרולוגי.



גימת התונך הלא-רווי בשיטת דחיקה ישירה מתחת לפרדס בשרון | צילום: רועי שפירא

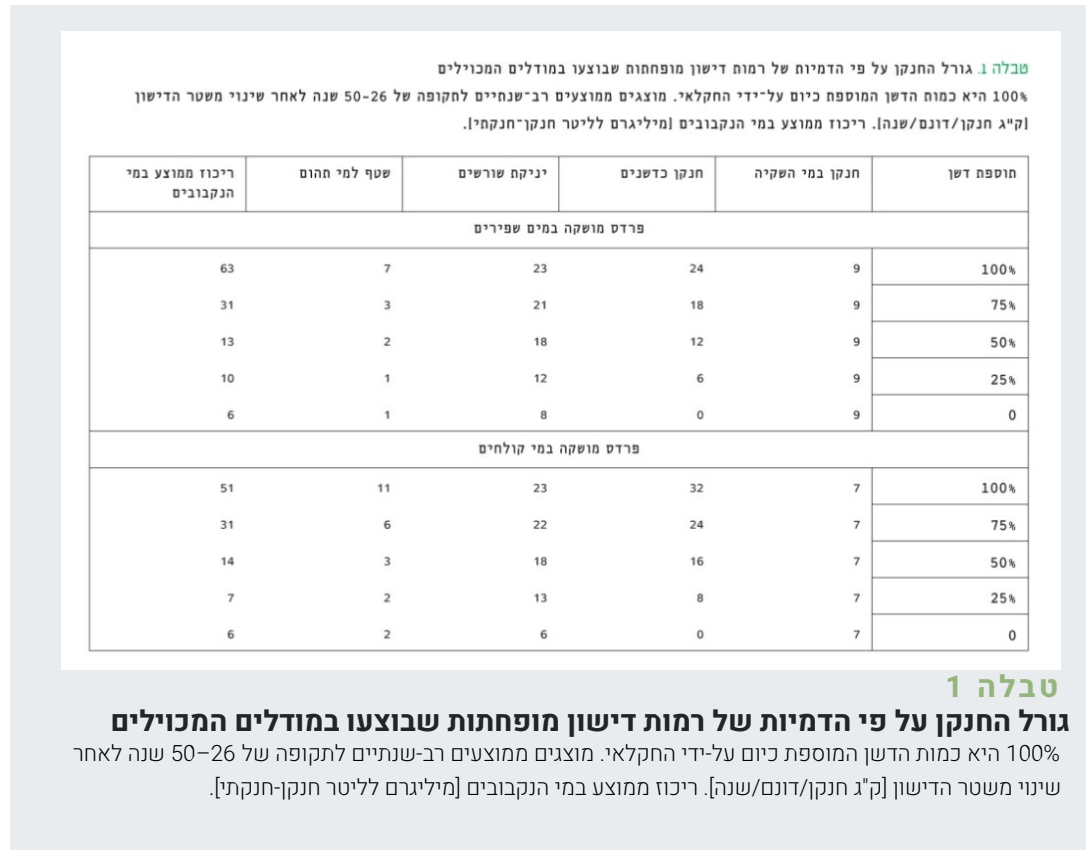
## תוצאות ודיון

בעומקים רדודים התקבלה שונות מרחבית גדולה בפרופילי הכלוריד והחנקה מקידוחים באותה חלקה. לעומת זאת, בעומקים הגדולים משישה מטר נמצאה שונות קטנה. תצפית זו מחזקת את ההנחה שקירוב חד-ממדי [13] המבוסס על נתוני התונך הלא-רווי העמוק הוא סביר לצורך הערכת שטפים למי תהום עמוקים (עומק פני מי התהום גדול בערך בסדר גודל מעומק בית השורשים).

מקדמי מתאם (R) בין פרופילי הכלוריד והחנקה בעומקים גדולים משני מטר (מתחת לבית השורשים) התקבלו בטווח 0.82–0.99 ( $p < 0.001$ , בכל הטווח) בשלושת הפרופילים של הפרדס שמושקה בשפירים בשרון, וזאת לעומת מקדמי מתאם נמוכים בטווח 0.25–0.42 (ללא מתאם, בכל הטווח) שהתקבלו בפרדס שמושקה בשפירים בשפלה. תוצאה זו מצביעה על האפשרות לדניטריפיקציה בעומק האזור הלא-רווי בפרופילים חרסיתיים לעומת התנהגות משמרת של החנקה בחמרה. נוסף על כך, המתאם הגבוה בחמרה יכול ללמד שחלק משמעותי מהחנקה לא נקלט בשורשים, בדומה לכלוריד.

הצעד המשמעותי ביותר במהלך כיוול המודלים היה קביעת סף מרבי עבור ריכוז החנקה שנקלטת ביניקת השורשים, כדי לשמור על התאמה בין פרופילי החנקה המדודים לאלה שהתקבלו במודל. ריכוז הסף שהניב את ההתאמה המיטבית במודלים של שני הפרדסים הוא 30 מג"ל חנקן-חנקתי ( $\text{NO}_3^- \text{N}$ ). בריכוזים נמוכים מסף זה, החנקן במודלים נקלט בשורשים בהתאם לריכוזו בבית השורשים. פונקציית קליטת חנקה זו נתמכת על-ידי מחקרים שבדקו באופן ישיר את קליטת החנקן על-ידי השורשים, ושהראו כי קיימת ירידה משמעותית בכושר הקליטה כאשר ריכוזי החנקה בבית השורשים גבוהים [9, 14]. סף זה מפחית את מידת השפעתם של שינויים ברמות דישון גבוהות על קליטת החנקן בשורשים, ולעומת זאת מעצים את השפעתם על שטפי החנקה אל האקווה בעומק התונך הלא-רווי.

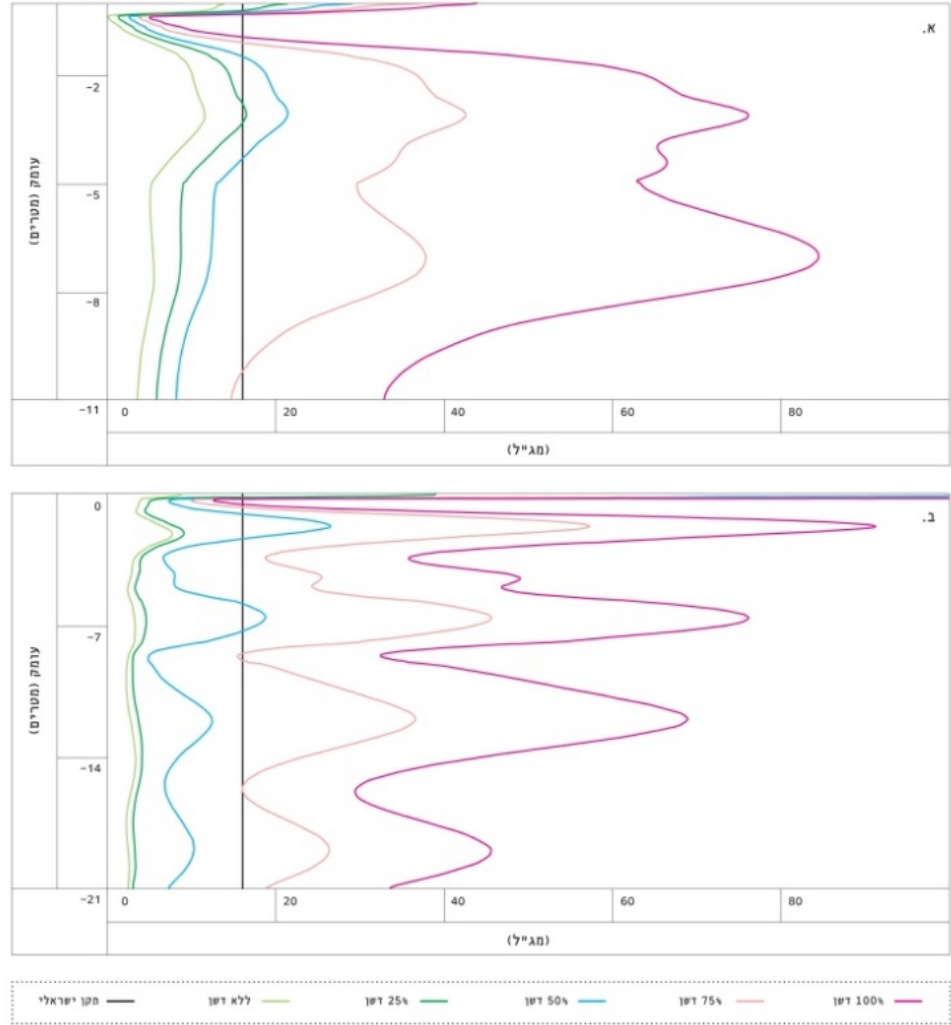
בהדמיות שבוצעו בעזרת המודלים המכיליים, חושבו שטפי חנקן ממוצעים ל-25 השנים שמתחילות 25 שנה לאחר השינוי ברמות הדישון. הפחתה של רבע מכמות הדשן (75%, [טבלה 1](#)) תשאיר קליטה ממוצעת על-ידי השורשים הגבוהה מ-20 ק"ג חנקן לדונם בשנה, ותפחית את מסת החנקן-החנקתי הממוצע המחלחל אל מי התהום בכמחצית. הפחתה של כמות הדשן המוסף בחצי (50%, [טבלה 1](#)) תשאיר קליטה ממוצעת של 18 ק"ג חנקן לדונם בשנה, שקרובה להמלצות משרד החקלאות ופיתוח הכפר לדישון בפרדסים מניבים (20–25 ק"ג חנקן לדונם לשנה), ותפחית את מסת החנקה המחלחלת אל מי התהום בשלושה רבעים בקירוב ([טבלה 1](#))<sup>[4]</sup>.



ההדמיות מראות שניתן להוריד את שטפי החנקה למי התהום בצורה משמעותית. אם כן, אילו רמות דישון מומלצות לשימוש בפרדסים שגדלים על קרקעות חמרה מעל אקוות החוף? התשובה המוצעת כאן היא: רמות דישון שיפחיתו תוך עשרות שנים את ריכוז החנקה הממוצע במי הנקבובים (pore water) שבתווך הלא-רווי שמתחת לפרדס אל מתחת לתקן למי השתייה (70 מ"ג ל-NO<sub>3</sub> או 16 מ"ג ל-NO<sub>3</sub>-N; [טבלה 1](#), [איור 1](#)), מבלי לפגוע בצורה משמעותית ביבול. במצב זה שטף המילוי החוזר מהאזור הלא-רווי לא יוכל להעלות את ריכוז החנקה במי התהום אל מעבר לתקן למי שתייה, ויוריד את ריכוזה במי תהום מזוהמים. עבור פרדסים נראה כי רמת הדישון המומלצת משיקולים חקלאיים (20–25 ק"ג חנקן לדונם לשנה) היא הרמה המיטבית, אך יש צורך לכלול את החנקן שמקורו במי ההשקיה במנת חנקן שנתית זו ([טבלה 1](#)).

יש לציין שהמודלים שכולו בעבודה זו לא מכמתים את השפעתה של השונות המרחבית בקרקע, שגורמת לפיזור לא אחיד של החנקן במרחב. ייתכן שהדישון העודף הנהוג על-ידי החקלאים מפצה על המחסור באזורים שמגיע אליהם יחסית מעט חנקן. עם זאת, אנו מניחים שבשלב זה הקירוב ההומוגני במודלים החד-ממדיים מספק לצורך תכנון רמות דישון מיטביות מבחינה חקלאית והידרולוגית.

**איור 1. חנקן-חנקתי במי החללים - פרדס מושקה במים שפירים בשרון**  
 פרופילים של חנקה במי החללים של האזור הלא-רווי, על פי הדמיות שבוצעו במודלים מכוילים לנתונים שהתקבלו מדגימות שנאספו בתווך הלא-רווי. הפרופילים התקבלו 50 שנה לאחר שינוי משטר הדישון. א) פרדס מושקה במי באר מקומית באזור השרון. ב) פרדס מושקה במי קולחים מתחילת שנות ה-80. 100% היא כמות הדשן המוספת כיום על-ידי החקלאים. החנקן שמגיע עם מי ההשקיה נשאר ללא שינוי בכל ההדמיות. הקו האנכי השחור הוא ריכוז החנקן של חנקן-חנקתי בישראל.



**איור 1**

## חנקן-חנקתי במי החללים - פרדס מושקה במים שפירים בשרון

פרופילים של חנקה במי החללים של האזור הלא-רווי, על פי הדמיות שבוצעו במודלים מכוילים לנתונים שהתקבלו מדגימות שנאספו בתווך הלא-רווי. הפרופילים התקבלו 50 שנה לאחר שינוי משטר הדישון. א) פרדס מושקה במי באר מקומית באזור השרון. ב) פרדס מושקה במי קולחים מתחילת שנות ה-80. 100% היא כמות הדשן המוספת כיום על-ידי החקלאים. החנקן שמגיע עם מי ההשקיה נשאר ללא שינוי בכל ההדמיות. הקו האנכי השחור הוא ריכוז החנקן של חנקן-חנקתי בישראל.

## סיכום ומסקנות

מודלים ספרתיים, המכוילים לנתוני איסוף דגימות מהאזור הלא-רווי העמוק, נותנים קירוב סביר להערכת שטפים שנתיים של מים, כלוריד וחנקה למי התהום. הדמיות במודלים כאלה יכולות לשמש להערכת משטרי דישון שמתאמים לסוגים שונים של גידולים וקרקעות, ושמסתחבים באיכות מי התהום ובצורכי הגידולים החקלאיים. מאמר זה מציג תהליך הכולל דגימה, בדיקה, כיול מודלים והרצת הדמיות מתחת לשני פרדסים בקרקעות חמרה מעל אקוות החוף. הדמיות שרמת הדישון החנקני בהן (לא כולל החנקן במי ההשקיה) מופחתת למחצית מזו שמשמשת כיום, הראו הפחתה של כ-75% בשטפי החנקה למי התהום.

וירידה מעטה בקליטת החנקן בשורשים. רמת דישון מופחתת זו (שהיא במקרה גם הרמה המומלצת כיום) תביא את הריכוז הממוצע במי הנקבובים של התווך הלא-רווי אל מתחת לתקן החנקה במי השתייה, ולכן מוצעת כרמת דישון מיטבית לפרדסים בקרקעות חמרה מעל אקוות החוף. מתן מידע לחקלאים באשר לריכוז החנקן שבמי ההשקיה והבאתו בחשבון כדשן, יסייעו רבות בהפחתת הדישון העודף.

## תודות

המחברים מודים לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר שמימנה את המחקר (תכנית מס' 09-0431-304). כמו כן, תודה לכל מי שסייע בהוצאה לפועל של הפעילות המחקרית: מני בן חור, לאה לייב, אשר ברטל, שושי מרציאנו, אנה בריוזקין ודוד רוסו מהמכון למדעי הקרקע, המים והסביבה במנהל המחקר החקלאי ובני חפץ מהמחלקה לקרקע ומים בפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית. תודה מיוחדת לפרדסנים מהשרון ומהשפלה שאפשרו לנו לאסוף דוגמאות בפרדסיהם.

## מקורות

1. אלחנני ש. 2009. [אתגרים בפעילות השמירה על איכות מקורות במים בישראל](#). כנס ירושלים לסביבה וטבע; 27 במאי 2009; ירושלים. נצפה ב-25 בדצמבר 2012.
2. גולדברג ש. 2009. [מניעה וטיפול בזיהום מים באקוויפרים](#). כנס ירושלים לסביבה וטבע; 27 במאי 2009; ירושלים. נצפה ב-25 בדצמבר 2012.
3. חן י, ענבר י, ברק פ ושנקר מ. 2008. שיטות לבדיקות קרקעות. מהדורה ד'. החוג לקרקע ומים, הפקולטה לחקלאות. רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
4. קורצמן ד, רוסו ד, בר-טל א ובן-חור מ. 2012. יישום חנקן בשטחים חקלאיים בהתחשב בריכוז ניטראט במי תהום: בניית מודל מבוסס תצפיות בשטחים מושקי קולחים מעל אקוויפר החוף. דו"ח מסכם לתוכנית מחקר מספר 09-0431-304. קרן המדען הראשי במשרד החקלאות.
5. Bohn HL, McNeal BL, and O'connor GA. 2001. Soil chemistry. New York: John Wiley & Sons.
6. de Paz JM and Ramos C. 2004. Simulation of nitrate leaching for different nitrogen fertilization rates in region of Valencia (Spain) using a GIS-GLEAMS system. *Agricultural, Ecosystems and Environment* **103**: 59-73.
7. Eskicak S, Dundar C, Basoglu T, and Altaner S. 2005. The effects of taking chronic nitrate by drinking water on thyroid functions and morphology. *Clinical and Experimental Medicine* **5**: 66-71.
8. Kurtzman D. 2012. Aquifer deterioration from the soil and vadose zone point of view: The Israeli Coastal Aquifer case. IMVUL conference on Groundwater Vulnerability – Emerging Issues and New Approaches; 9-12 July 2012; Paris.
9. Lea-Cox JD and Syvertsen JP. 1996. How nitrogen supply affects growth and nitrogen uptake, use efficiency, and loss from citrus seedlings. *Journal of the American Society of Horticulture Sciences* **121**: 105-114.
10. McMahon G and Woodside MD. 1997. Nutrient mass balance for the Albemarle-Palmico drainage basin, North Carolina and Virginia, 1990. *Journal of the American Water Resources Association* **33**(3): 573-589.

- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated .11  
.porous media. *Water Resources Research* **12**(3): 513-522
- Pessarakli M. 2001. Handbook of plant and crop physiology, 2nd ed. New York: Marcel .12  
.Dekker
- Šimunek J, Šejna M, Saito H, et al. 2009. The HYDRUS-1D software package for .13  
simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in  
.variably-saturated media. Riverside, California
- Sorgona A, Abenavoli MR, Gringeri PG, and Cacco G. 2006. A comparison of nitrogen .14  
.use efficiency definition in citrus rootstocks. *Scientia Horticulturae* **109**: 389-393
- van Genuchten MTh. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic .15  
.conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America* **44**: 892-898