

**שטפי חנקה למי תהום מתחת לפרדסים: תצפיות, מודלים והדמיית
תרחישים ברמות דישון מופחתות**

עבודת גמר לתואר מוסמך בהידרולוגיה ומשאבי מים

מוגשת על ידי:

רועי חיים שפירא

מספר תלמיד: 040485518

בהדרכת:

דר' דניאל קורצמן, המכון למדעי הקרקע המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני
פרופ' בני חפץ, המחלקה למדעי הקרקע והמים, הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה

תמוז תשע"ב

יולי 2012

החוג להידרולוגיה ולמשאבי מים
האוניברסיטה העברית בירושלים

**שטפי חנקה למי תהום מתחת לפרדסים: תצפיות, מודלים והדמיית
תרחישים ברמות דישון מופחתות**

עבודת גמר לתואר מוסמך בהידרולוגיה ומשאבי מים

מוגשת על ידי:

רועי חיים שפירא

מספר תלמיד: 040485518

בהדרכת:

דר' דניאל קורצמן, המכון למדעי הקרקע המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני
פרופ' בני חפץ, המחלקה למדעי הקרקע והמים, הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה

תמוז תשע"ב

יולי 2012

החוג להידרולוגיה ולמשאבי מים
האוניברסיטה העברית בירושלים

תקציר

חנקה (NO_3^-) נפוצה במקורות מים רבים ברחבי העולם ובריכוזים גבוהים מהווה סכנה בריאותית לאדם. זיהום בחנקה הוא הגורם השכיח ביותר לסגירת בארות מי שתייה בארץ בכלל ובאקוות החוף בפרט (בעיקר מתחת לשטחי החקלאות הוותיקה בקרקעות חמרה). החנקן הוא הדשן המשמעותי ביותר ברוב הגידולים, וניצול לא יעיל על ידי הצמחים גורם לחילחול עמוק וזיהום מי תהום. בכדי להעריך באופן מושכל משטר דישון מיטבי, אשר מתחשב ביבול מצד אחד ובאיכות מי התהום מצד שני, הצבתי בעבודה זו את המטרות שלהלן. 1. דיגום התווך הלא רווי, תחת פרדסים ומעל אקוות החוף, ובדיקת משתנים כימיים ופיזיקאליים הרלוונטיים לזרימה והסעת חנקן. 2. כיול מודלים של זרימה לא רוויה, הסעת כלוריד והסעת חנקן, לנתוני הדיגום העמוק. 3. בחינת השפעתם של שינויי ממשק על החלחול העמוק, באמצעות הדמיות במודלים המכויילים.

מחקר זה התמקד בחמישה שטחים חקלאיים, השוכנים מעל אקוות החוף מהם נדגמו גלעיני קרקע רציפים מפני השטח ועד לעומק של תשעה מטרים. אתרי הניסוי היו שלושה פרדסים וחלקה המשמשת לגידולים עונתיים מתחלפים (שדה תפוחי אדמה, ובקיץ האחרון מיקשת אבטיחים) בקרקעות חמרה בשרון ופרדס אחד בוורטיסולים של שפלת יהודה. בכל חלקה בוצעו שלושה קידוחים: שניים יחסית קרובים (> 30 מטר) והשלישי רחוק (< 100 מטר). בדיקות כימיות ופיזיקאליות בוצעו במקטעי גלעין, המייצגים 30 ס"מ כל אחד, לצורך אפיון הפרופילים בתווך הלא רווי. שלושה אתרים נבחרו לצורך כיול מודלים חד מימדיים, של זרימה (משוואת החידור של ריצ'ארדס הכוללת איבר יניקת שורשים) והסעת כלוריד, אמון וניטראט (משוואת אדבקציה דיספרסיה, עם אברי מקור/מבלע עבור ריאקציות ויניקת שורשים). הרכב מכאני וצפיפות גושית שמשו להערכה ראשונית, של הפרמטרים ההידראוליים (מודל ואן גנוכטן - מועלם). המשך הכיול בוצע ע"י שינויים קלים בפרמטרים עד להתאמה בין הפרופילים המדודים למחושבים.

הפרופילים של תכולת הרטיבות, הכלוריד והחנקה מכל האתרים מצביעים על הטרוגניות גדולה בתווך הלא רווי בתוך החלקות. יחד עם זאת, הפרופילים הקרובים הראו מיתאם גבוה מזה שהתקבל עבור פרופילים מרוחקים באותה חלקה. ריכוז כלוריד גבוה מתחת לבית השורשים של פרדסים בשרון (טווח של 490-1480 מ"ג/ל), מעיד על מילוי חוזר ממוצע נמוך (325-90 מ"מ/שנה) בהשוואה להערכות מילוי חוזר מגשם והשקיה הנהוגות בשרות ההידרולוגי (360 מ"מ/שנה). אומדני מצב עמיד (steady state) עבור שטפי חנקה למי התהום מתחת לפרדסים בשרון, המבוססים על הפרופילים שנדגמו, הם 5 – 22 ק"ג חנקן חנקתי לדונם לשנה. בין פרופילי הכלוריד והחנקה בשרון התקבלו מקדמי מיתאם גבוהים, שיכולים להצביע על כך שחלק משמעותי מהחנקה אינו נצרך ע"י השורשים ואינו ריאקטיבי באזור הלא רווי שמתחת לבית השורשים. לעומת זאת בין פרופילי הכלוריד והחנקה מהתווך הלא רווי שמתחת לפרדס בקרקע החרסיתית, לא התקבל

מיתאם. הפרופילים של הפחמן האורגני המומס (DOC) בתווך הלא רווי, הראו קשר חזק לתכולת החרסית. בכפר וורבורג התקבלו ריכוזים של ~ 50 מ"ג/ק"ג עד לעומק של תשעה מטרים, ואילו בחמרה התקבלו ריכוזים נמוכים מ ~ 10 מ"ג/ק"ג בעומקים גדולים משני מטרים ובחול התקבלו ריכוזים נמוכים עוד יותר.

התוצאה המשמעותית ביותר שהתקבלה בתהליך ההתאמה בין פרופילי החנקה שהתקבלו מהמודל, לאלו שנדגמו (כיול מודל הסעת חנקה), היא הצורך בהגבלת ריכוז החנקה המירבי, שיכול להיקלט ע"י השורשים, לערך של 30 מ"ג/ק"ג חנקן חנקתי. תוצאה זו תואמת את המיתאם הגבוה, שהתקבל בין פרופילי הכלוריד והחנקה ומחזקת את ההערכה, שחלק משמעותי מהחנקה אינו נקלט בשורשים. הגבלה זו מובילה למסקנה שהשפעתם של שינויים ברמות הדישון על שטפי החנקן לאקוואה יהיו גדולים, וזאת לעומת השפעה נמוכה יותר על שטפי החנקן אל השורשים ועל היבול.

המודלים המכויילים שימשו לבחינת הדמיות, של מספר תרחישי דישון אפשריים בשני פרדסים בשרון (קרקע חמרה) ובפרדס בכפר וורבורג (גרומוסולים של שפלת יהודה). הדמיות, עם 50% מהחנקן המיושם בפני השטח (הפחתה מהדשן המוסף ע"י החקלאי ללא התחשבות בחנקן שמקורו במי ההשקייה) בכל אחד משלושת המודלים, הראו הפחתה של כ- 70% בחלחול החנקן למי התהום, אך יחד עם זאת נותרה רמת קליטה גבוהה על ידי השורשים (18 – 19 ק"ג/חנקן חנקתי/דונם/שנה), שהינה קרובה יחסית להמלצות הדישון לפרדסים. בנוסף, בהדמיה זו התקבלה הפחתה בריכוז החנקן הממוצע באזור הלא רווי שמתחת לבית השורשים. הריכוז הממוצע באזור הלא רווי הופחת מתחת לריכוז החנקה המירבי שמותר על פי התקן למי שתייה בישראל (70 מ"ג/ק"ג $\text{NO}_3^- \approx 16$ מ"ג/ק"ג N-NO_3^-).

עבודה זו מציעה שיטה להורדת הריכוז הממוצע של חנקה במי הנקבובים, אל מתחת לריכוז שנקבע בתקן למי שתייה. הפחתה זו תמנע משטף החנקה, שמגיע מהתווך הלא רווי ונכנס אל מי התהום, להעלות את ריכוז החנקה מעבר לתקן למי שתייה במי התהום עצמם. המודלים המכויילים שהוצגו לעיל מאפשרים הערכה מושכלת של רמת יישום החנקן, שתביא את ריכוזי החנקה במי הנקבובים של האזור הלא רווי העמוק אל מתחת לתקן למי השתייה, רמת יישום זו יכולה להוות בסיס לתקינה של רמות יישום מרביות באזורים רגישים מבחינה הידרולוגית. לגבי דישון חנקני בפרדסים בשרון רמה זו היא 20 – 25 ק"ג חנקן צרוף/דונם/שנה כולל החנקן שבמי ההשקיה.

תודות

בראש ובראשונה אני רוצה להודות למנחה דר. **דני קורצמן**, על ההדרכה, ההכוונה האישית, הדרבון, ועל שסייע לי לעבור את המשוכות ולהתמודד עם המהמורות שבדרך. תודה על המסירות, ההקרבה וההשקעה הרבים.

תודה למנחה **פרופ. בני חפץ**, על שהעניק לי מהניסיון והידע הרבים שלו, על הליווי לאורך הדרך ועל מהירות התגובה וההיענות החיוביים בכל עת.

תודה לחקלאים **קובי** (בני-דרור), **משה** (תל-יצחק) ו**אבשלום** (כפר-וורבורג) על רוח ההתנדבות, הסבלנות והמידע הרב שנתנו, שסייע רבות לביצוע עבודת המחקר.

תודה לכל החוקרים, הטכנאים וצוותי המעבדות, שלקחו חלק בתוכנית המחקר, **לדר. מני בן-חור**, **דר. אשר בר-טל**, **דר. דוד רוסו**, **דר. אדי סיטרין**, **לאה לייב**, **אנה בריוזקין**, **ומרים קינן**, על שסייעו בלימוד שיטות המחקר, כיווני חשיבה וביצוע בדיקות במעבדותיהם.

תודה לצוות המעבדה, **דר. דורית שרגיל וחוסין אבו-עוואד**, על העזרה המקצועית, התמיכה וההקשבה.

לבסוף אני רוצה להודות למשפחתי ובמיוחד להוריי, על תמיכתם, הבנתם, רגישותם ועל נתינה ללא גבולות לאורך כל שנות לימודי.

תודה מיוחדת לאשתי שירה, על האמונה, הכוח, ההבנה והרגישות. תודה על שתמיד את נוכחת עברי, ולעולם אינך מרפה את ידי.

תוכן עניינים

II	.....	תקציר	
IV	.....	תודות	
1	.....	תוכן עניינים	
3	.....	רשימת איורים	
3	.....	רשימת טבלאות	
4	.....	1. רקע מדעי	
4	.....	1.1 חנקה כמזהם מים	
5	.....	1.2 הדישון החנקני וחיבתו בחקלאות	
6	.....	1.3 דליפות חנקה משטחים חקלאיים	
7	.....	1.4 זיהום חנקה באקוות החוף	
8	.....	1.5 אקוות החוף של ישראל – רקע כללי	
10	.....	1.6 קרקע ותווך לא רווי	
11	.....	1.6.1 הערכת מילוי חוזר ממוצע	
12	.....	1.7 חישוב שטפי מים משתנים עם הזמן	
13	.....	1.7.1 פונקציות הידראוליות של קרקע לא רוויה	
14	.....	1.7.2 פונקציות פדו-טרנספר (Pedo-Transfer Functions - PTFs)	
14	.....	1.8 חישוב שטפים משתנים בזמן של כלוריד וחקן	
15	.....	1.9 קליטת חנקן על ידי השורשים	
16	.....	1.10 פיתרון נומרי של משוואות הזרימה והסעה בעזרת HYDRUS-1D	
17	.....	1.11 הנחות המחקר	
18	.....	2. מטרות העבודה	
18	.....	3. שיטות וחומרים	
18	.....	3.1 אתרי השדה	
20	.....	3.2 דיגום שדה	
21	.....	3.3 בדיקות מעבדה	
21	.....	3.3.1 תכולת רטיבות משקלית	
21	.....	3.3.2 צפיפות גושית	
21	.....	3.3.3 תכולת רטיבות נפחית	
	.....	3.3.4 הכנת מיצוי מימי של קרקע לבדיקת הרכב מומסים (כלוריד, חנקן כללי ופחמן אורגני)	
22	.....	3.3.5 מיצוי קרקע ב- 1 מולר KCl למדידת ריכוז אמון, חנקה וניטריט	
22	.....	3.3.6 ריכוז כלוריד במיצוי מימי	
22	.....	3.3.7 ריכוז אמון, חנקה וניטריט	
22	.....	3.3.8 ריכוז מחושב במי הנקבובים	
	.....	3.3.9 פחמן כולל (TC – Total Carbon) וחקן כולל (TN – Total Nitrogen)	
22	.....	במוצק	
23	.....	3.3.10 פחמן אורגני (TOC – Total Organic Carbon) במוצק	
23	.....	3.3.11 פחמן אורגני מומס (DOC – Dissolved Organic Carbon)	

23.....	3.3.12	פוטנציאל חימצון אמון (פוטנציאל חינקון - ניטריפיקציה)
23.....	3.3.13	הרכב מכאני בשיטת ההידרומטר
23.....	3.3.14	מוליכות הידראולית ברוויה
24.....	3.4	מטאורולוגיה
25.....	3.5	השקיה ודישון
25.....	3.5.1	פרדסים של מושב 'בני-דרור'
25.....	3.5.2	פרדס של קיבוץ 'תל-יצחק'
26.....	3.5.3	פרדס של מושב 'כפר-וורבורג'
26.....	3.6	מודלים
27.....	3.6.1	תנאי שפה וכיול מודל זרימה
28.....	3.6.2	תנאי שפה וכיול מודל הסעת כלוריד
29.....	3.6.3	תנאי שפה וכיול מודל הסעת חנקן
30.....	4	תוצאות
30.....	4.1	פרופילים של תכולת רטיבות, כלוריד וחנקן והערכות שטפים ממוצעים
33.....	4.2	ריכוזי אמון בתווך הלא רווי
33.....	4.3	פחמן אורגני וחנקן כללי מומסים
34.....	4.4	פוטנציאל חמצון אמון (פוטנציאל חינקון \ ניטריפיקציה)
35.....	4.5	הרכב מכאני
36.....	4.6	מוליכות הידראולית רוויה בגלעינים בלתי מופרים
36.....	4.7	כיול מודלים של זרימה והסעת כלוריד וחנקן
40.....	4.8	מאזני מים וחנקן במודלים המכילים
43.....	4.9	הדמיות של סמנים אינרטיים (אדישים) במודלים המכילים
44.....	4.10	הדמיות של מנות דישון מופחתות
46.....	5	דיון
	5.1	מודלים חד-מימדיים (על אף ההטרוגניות המרחבית) בתווך הלא רווי, וייחודו של מחקר זה
46.....	5.2	השפעת איכות הנתונים על כיול המודלים
47.....	5.3	גורל החנקן מתחת לבית השורשים בקרקעות חמרה לעומת קרקעות ורטיסוליות
	5.4	ירידה ביעילות קליטת חנקן על ידי השורשים עם עליה בריכוזה והקשר לדליפות למי תהום
48.....	5.5	הצעת שיטה לקביעת תקינת משטרי דישון המתחשבים ביבול ובאיכות מי התהום
49.....	6	סיכום ומסקנות
50.....	7	רשימת ספרות
53.....	8	נספחים
	8.1	פרופילי תכולת רטיבות וכלוריד וחשוב מדדים סטטיסטיים לצורך הכיול – MATLAB code
59.....	8.2	פרופילי תכולת רטיבות, כלוריד וחנקן ומאזני מסה באזור הלא רווי – MATLAB code
62.....		

רשימת איורים

- איור 1.1: מפת קרקעות מעל אקוות החוף ומפת ריכוזי חנקה במי התהום 9
- איור 1.2: חתכים הידרוגיאולוגיים לרוחב אקוות החוף 10
- איור 1.3: מוליכות הידראולי לא רוויה כפונקציה של תכולת רטיבות 13
- איור 1.4: הדיספרסיה ההידרו-דינאמית ועקומי פריצה 15
- איור 1.5: יעילות קליטת חנקן על ידי השורשים 16
- איור 3.1: אזור המחקר בשרון 19
- איור 3.2: דיגום קרקע עמוק בדחיקה ישירה 21
- איור 3.3: מערכת בקבוק מריוט לבדיקת מוליכות הידראולית ברוויה 24
- איור 4.1: תכולת רטיבות וריכוזי כלוריד וחנקה מנתוני הדיגום בבני-דרור, תל-יצחק וכפר-וורבורג 31
- איור 4.2: תכולת רטיבות וריכוזי כלוריד וחנקה מנתוני הדיגום בקריית-שלמה 32
- איור 4.3: פחמן אורגני וחנקן כללי מומסים באתרים שמושקים במים שפירים 34
- איור 4.4: מוליכויות הידראוליות ברוויה בדוגמאות קרקע שנדגמו בדחיקה ישירה 36
- איור 4.5: התאמה בין פרופילי הדיגום העמוק למודלים 39
- איור 4.6: שטפי מים וחנקן שנתיים במודלים המכויילים 42
- איור 4.7: עקומי פריצת סמנים אינרטיים במודלים המכויילים 43
- איור 4.8: פרופילים של התווך הלא רווי בהדמיות של דישון מופחת 45

רשימת טבלאות

- טבלה 1.1: בארות ומקורות מים שנפסלו לשתייה (משרד הבריאות ורשות המים) 5
- טבלה 4.1: סיכום ריכוזי חנקה ואמון בתווך הלא רווי בחמשת אתרי המחקר 33
- טבלה 4.2: פוטנציאל חינקון במדגמי קרקע ידניים ורדודים בשרון 35
- טבלה 4.3: תוצאות בדיקות פילוג גודל גרגר 35
- טבלה 4.4: פרמטרים של מודלי הזרימה וההסעה המכויילים 37-38
- טבלה 4.5: מאזני מים מנתוני המודלים המכויילים 40
- טבלה 4.6: מאזני חנקן מנתוני המודלים המכויילים 41
- טבלה 4.7: מאזני חנקן בהדמיות של דישון מופחת 44

1. רקע מדעי

1.1. חנקה כמזהם מים

חנקה (NO_3^-) נפוצה במקורות מים בכל רחבי העולם, ונחשבת למזהם השכיח ביותר של מערכות מי תהום. בריכוזים גבוהים החנקה מסוכנת לבריאות האדם. הספרות המדעית רוויה במחקרים ותיאורים של תופעות בריאותיות שליליות, שנובעות מצריכת מי שתייה עם ריכוזים חורגים של חנקה. במערכת העיכול NO_3^- מחוזר ל- NO_2^- , שמחמצן באופן ישיר את מולקולות ההמוגלובין ומשנה אותן ל- methemoglobin. ל- methemoglobin יש אפיניות נמוכה לחמצן, וריכוזים גבוהים של המולקולה גורמים למחלת *methaemoglobinaemia*, אשר מאופיינת בחוסר אספקת חמצן לרקמות. התסמינים האופייניים למחלה הם ציאנוזיס (כיחלון), כאבי ראש, ערפול חושים, עייפות, קצב לב מהיר, תרדמת, חנק ובסופו של דבר מוות. פעוטות עד גיל ארבעה חודשים רגישים במיוחד בגלל צריכת נוזלים הגדולה יחסית למשקל גופם. ישנן מחלות נוספות שיכולות להיגרם עקב צריכת חנקה מוגברת, כדוגמת מספר סוגי סרטן ופגיעה בתפקוד בלוטת התריס (Morales-Camargo and Alonso., 2006; Eskiocak et al., 2005; Suarez-Varela et al., 1995; Manassaram et al., 2006).

מי השתייה מהווים מקור עיקרי לצריכת חנקה בקרב אוכלוסיית העולם, באזורים בהם ריכוז החנקן החנקתי¹ גבוה מ- 11 מ"ג/ל (בישראל הריכוז המקסימאלי המותר במי שתייה הינו ~16 מ"ג/ל חנקן חנקתי, באירופה ובארצות הברית ~10 מ"ג/ל חנקן חנקתי). נמצא כי באזורים אלו, כ- 60% מהחנקה שנקלטת בגוף, מקורה במי השתייה. שיעור זה צפוי לעלות ככל שריכוז החנקה במי השתייה יגדל (Morales-Suarez-Varela et al., 1995). על פי המשרד לאיכות הסביבה של ארצות הברית (EPA – US Environmental Protection Agency), קיימים שני גורמים שמציבים איום מיידי לבריאות האדם כאשר ישנה חריגה מהריכוזים המותרים על פי התקן: חיידקים וחנקה (Dar et al., 2012). מקורות המים של ישראל סובלים מעלייה בריכוזי החנקה. מספר מקורות המים שנסגרו בישראל בשנים האחרונות (או כאלה שמחויבים לעבור טיפול), עקב חריגות בריכוזי חנקה, גבוה בהרבה ממקורות מים שנסגרו בשל גורמי זיהום אחרים (טבלה 1.1).

¹ קיימות שתי שיטות להצגת ריכוזי חנקן: בתחום משאבי מים משתמשים לרוב בריכוז היון NO_3^- , לעומת זאת בנושאי דישון מקובל להשתמש בריכוז חנקן חנקתי (N-NO_3^- ; היחס בין ריכוז החנקה לריכוז החנקן החנקתי הוא 4.43). באופן דומה מקובל להשתמש בריכוז חנקן אמוניקלי (N-NH_4^+ ; היחס בין ריכוז האמון לריכוז החנקן האמוניקלי הוא 1.29) ובביטוי חנקן צרוף לייצוג יסוד החנקן בצורה מינראלית כלשהי.

טבלה 1.1 צד שמאל - קידוחי מים שנסגרו בשל זיהום בין השנים 1998-2008 (האגף לאיכות מים, רשות המים, אלחנני 2009). צד ימין - מקורות מים שנפסלו בשל זיהום בשנים 2006-2007 (המחלקה לבריאות הסביבה, משרד הבריאות, גולדברגר, 2009).

מספר בארות שנסגרו בשנים 1998-2008 (רשות במים)	הגורם המזהם	מספר מקוחות מים שנפסלו בשנים 2006-2007 (משרד הבריאות)	הגורם המזהם
2	MTBE	1	גופרית
4	דטרגנטים	1	דילוראתילן 1.2
4	מתכות	1	פנולים
9	פרכלוראט	2	אתילן די ברומיד
14	EDB	2	פלואוריד
18	מיקרוביאלי (קוליפורם)	2	פרכלוראט
21	מיקר-מזהמים אורגנים	3	כלוריד
23	כלוריד	3	סלניום
83	חנקה	5	חיידיקים
178	סה"כ קידוחים	7	עכירות
		55	חנקה
		82	סה"כ קידוחים

1.2. הדישון החנקני וחשיבותו בחקלאות

החנקן קיים בכל התאים החיים ומהווה מרכיב הכרחי בחלבונים, בחומצות גרעין, באנזימים ובתהליכים מטבוליים שקשורים ביצירת אנרגיה ובהעברתה באורגניזמים חיים. דוגמה מעולם הצמחים לחיוניות החנקן ניתן למצוא בצבען 'כלורופיל'. הכלורופיל הינו התורם העיקרי לתהליך הפוטוסינתזה שמתרחש בצמחים ובבסיסו מכיל מספר אטומי חנקן, שמהווים מרכיב הכרחי במבנהו ובתפקודו. החנקן נמנה בין היסודות הנפוצים ביותר על פני כדור הארץ, אך יחד עם זאת הוא מהווה גורם מגביל בהזנת צמחים בכל רחבי העולם. שחרור חנקן אורגני טבעי מהקרקע אינו עונה על הצרכים של גידולים חקלאיים מסחריים, ומרבית הצמחים אינם יכולים לנצל באופן ישיר את החנקן שבגזי האטמוספירה. בכדי ליעל את הגידול והתפוקה נדרשת תוספת מלאכותית של דשנים המכילים חנקן מינרלי, שהינו זמין עבור הצמחים ונקלט ישירות על ידי השורשים. בשל חשיבותו הרבה ונוכחותו בכל התאים, מחסור בחנקן מעכב תהליכים חיוניים במחזור חיי הצמח. לצורך קבלת תפוקה חקלאית מירבית, החקלאים מיישמים כמויות גדולות של חנקן מינרלי בפני השטח. עלותו הנמוכה יחסית והחשש מהפסדים בערך היבול, הופכים את החנקן המינרלי ליסוד החשוב ביותר מבחינת פוריות ויעילות ניצול הגידול החקלאי ליחידת שטח (; Pessaraki, 2001 ; Bohn et al., 2001).

1.3. דליפות חנקה משטחים חקלאיים

בשטחים חקלאיים המעובדים בחקלאות שלחין, חלק מנפח מי ההשקיה מתוכנן לחדור אל מתחת לבית השורשים ולגרום לשטיפה של מלחים עודפים. מים ומלחים מצטברים בתת הקרקע החקלאית, מחלחלים כלפי מטה ולבסוף מגיעים אל האקווה. ניצול לא יעיל של תשומות דשנים על ידי הגידול החקלאי, גורם לחילחול יונים וחומר אורגני, אשר מגיעים למערכות ניקוז (McMahon and Woodside, 1997) או לאקווה, שמתחת לשטח החקלאי (de Paz and Ramos, 2004). הגברת הפעילות החקלאית מגדילה בטווח הארוך את הסיכון לזיהום האקווה על ידי מזהמים כדוגמת חנקן, מלחים, חומרי הדברה וקוטלי עשבים (Hadas et al., 1999; Zhao et al., 2011; Martinez-Alcantara et al., 2012; Tafteh, and Sepaskhah, 2012). עלות החנקן הנמוכה, חשיבותו לתזונת הצמחים וההטרוגניות הטבעית של הקרקע מובילים חקלאים רבים ליישום עודף של דשנים חנקניים (עד 60 ק"ג חנקן צרוף לדונם). במרבית המקרים הגידולים החקלאיים מנצלים באופן ישיר פחות ממחצית מהחנקן המיושם. הדשן החנקני מאופיין בספיחה מועטה לפאזת הקרקע המוצקה (לעומת זרחן ואשלגן), ופירושו באזור הלא רווי העמוק שמתחת לבית השורשים קטן במרבית המקרים. לכן, חלק גדול מהחנקן המיושם בשטחים חקלאיים ואינו נקלט על ידי השורשים, סופו שיגיע למי התהום (Martinez-Alcantara et al., 2012).

חלחול חנקן אל מי התהום הינה בעיה כלל עולמית. (Zhao et al., 2011) הראו שבסין הגידולים החקלאיים צורכים כ- 35% מכלל החנקן המיושם, ולפי הערכות לפחות 50% מסך החנקן המיושם אובד בדרכים שונות ואינו מנוצל (11.3 מגה-טון חנקן מיושם בשנה בסין). בניסוי ארוך טווח (תחילת שנות התשעים עד תחילת שנות האלפיים) שנערך במספר אתרים המייצגים מגוון קרקעות, תנאי אקלים וגידולים, נבחנה השפעתם של שילובים שונים בין חנקן, זרחן ואשלגן בדשנים שמיושמים בחלקות חקלאיות. החוקרים הראו כי לחנקן המיושם בפני השטח יש פוטנציאל ניצול של 76-18% על ידי הגידול החקלאי ושכרבע מסך החנקן המיושם מחלחל אל מתחת לבית השורשים. (Isidoro et al., 2006) ניתחו את עודפי החנקן, שהתנקזו מאגן היקוות, ששימש לגידולי שדה בספרד, ומצאו כי 23% מהחנקן שיושם התנקז מתחת לבית השורשים, ויצר עומס על משאבי המים. במחקר זה התקבלו עודפי חנקה בנקזים התת-קרקעיים בעונת ההשקיה ולאחר אירועי גשם משמעותיים. (Macmahon and Woodside 1997) מצאו ש- 51% בממוצע ממסת החנקן, שיושמה בשדות חקלאיים בצפון קרוליינה ווירג'יניה, התנקזו מהשדות למקורות המים באזור. לעומת מדידה ישירה של עודפי החנקן בנקזים תת-קרקעיים, הערכות חלחול למי תהום בקנה מידה אגני יכולות להתקבל רק על פי אקסטראפולציה של מדידות חלקיות ומודלים. יחד עם זאת, מסת החנקן המגיעה למי תהום, כפי שהתקבלה ממחקרים שונים, דומה לזו, שהתקבלה ממדידות ישירות בנקזים. על סמך אינטגרציית נתונים ממחקרים שונים (חלקם מישראל)

וסימולציות, של מודל חלחול, העריכו (de Paz and Ramos (2004) מקדמי חלחול ממוצעים למי תהום עבור חנקן (מסת חנקן מחלחלת ביחס למסת חנקן מיושם בהשקיה ודישון): 0.33 להדרים ו-0.51 לירקות.

בישראל, כבר בשנות השבעים נבחן הקשר בין תשומות חנקן חקלאיות לעליה בריכוזי חנקה במי התהום של אקוות החוף. רוה וחובריו (1972) מדווחים על דליפות חנקן ממוצעות מתחת לבית השורשים בשימושי קרקע שונים (יחידות - ק"ג חנקן חנקתידונם\שנה): 2 - שטחי בור, 1 - חורשת אקליפטוס, 5 - גידולי בעל, 4 - גידולי שדה במחזור זרעים, 11 - פרדסים ו-14 חממות פרחים. ערכים אלו חושבו על סמך תוצאות דיגומי קרקע עמוקים (2-12 מ') והערכות מילוי חוזר המבוססות על מאזן מי תהום. השונות בין הערכים באותו שימוש קרקע הייתה גבוהה, לדוגמה: ב-13 קידוחים בפרדסים התקבלו דליפות בין 1 - 46 ק"ג חנקן-חנקתידונם\שנה. Mercado (1976) התאים מודל חד-תאי של מאזן החנקן לנתונים חקלאיים וריכוזי חנקה במי תהום מאזור רחובות - נס-ציונה מהשנים 1935-1970. מקדמי חלחול החנקן למי תהום משטחים חקלאיים (כלומר מסת חנקן המחלחלת למי התהום ביחס למסת חנקן המיושמת בפני השטח מדישון, מהשקיה וממשקעים) המתקבלים מעבודה זו הם 0.2 - 0.3. למרות העבודות המרשימות האלו, שנעשו על ידי 'תכנון המים לישראל' (תה"ל) בשנות השבעים (הראו כי עודפי דשן חנקני מחלחלים עמוק לאקוות החוף), עד היום לא הופנמו שיקולים הקשורים באיכות משאבי המים שבקרבת ממשקים חקלאיים. רוסו (1995) העריך בעזרת הדמיה נומרית את גורל החנקן בתנועתו מפני הקרקע אל מתחת לבית השורשים, בפרדס באזור רעננה, המושקה ב-600 מ"מ בשנה קולחים המכילים 45 מ"ג חנקן אמוניקלי לליטר. בעבודה זו הונח, שחנקה משתמרת באזור הלא רווי העמוק, ולכן זהו גורלו של החנקן עד לפני מי התהום. לאחר הרצת 10 שנות גשם והשקיה בקולחים התקבל כי רק 1.4% ממסת החנקן חלחלה אל מתחת לבית השורשים (קליטה גבוהה, ואובדן גבוה של NH_4^+ בוולטיליזציה). יש לציין שמודל זה לא כויל לנתונים מהתווך הלא רווי, וסותר את רוב הערכות הדליפה שהוצגו לעיל המבוססות על נתוני שדה.

1.4. זיהום חנקה באקוות החוף

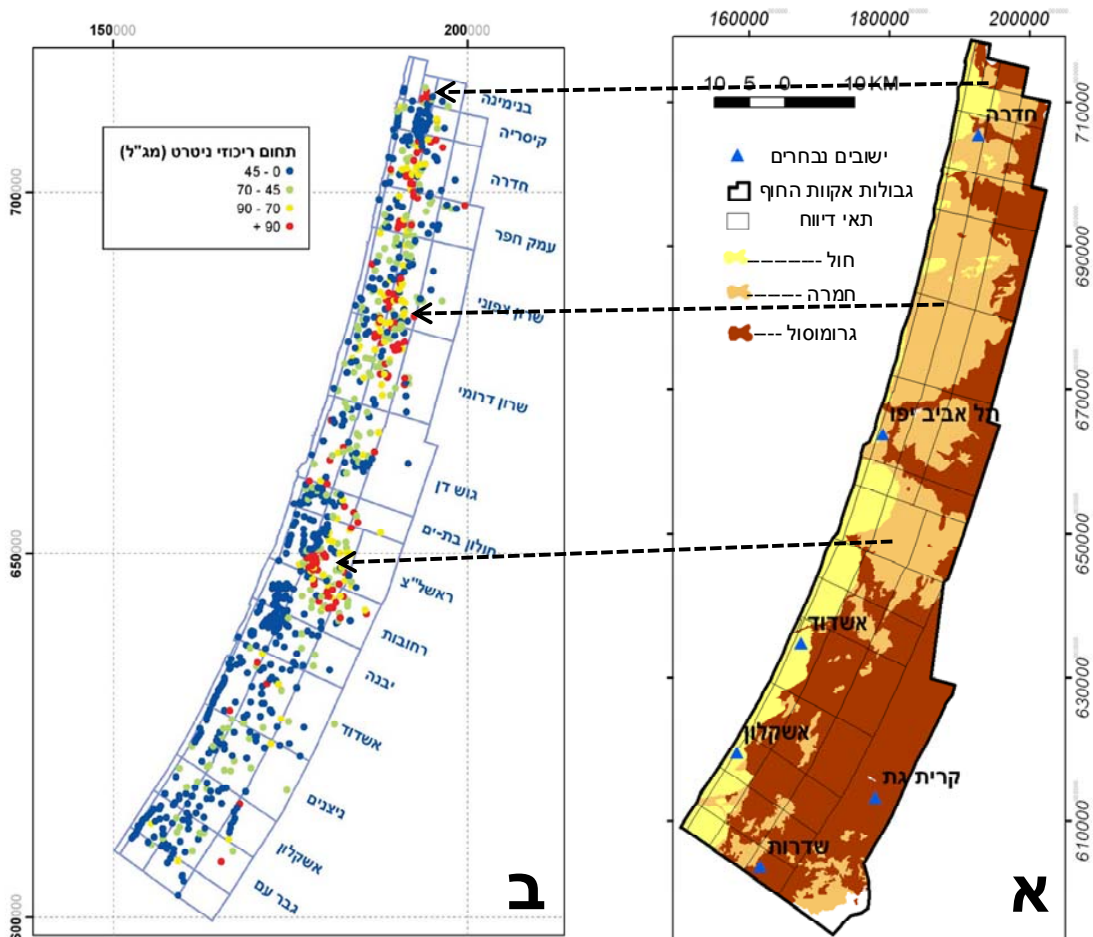
באקוות החוף בולט לעין מיתאם גיאוגרפי בין קרקעות חמרה לבין ריכוזי חנקה גבוהים במים הנשאבים מהאקווה (איור 1.1). כתמי חנקה גדולים מופיעים תחת קרקעות חמרה, לעומת מספר קטן יותר של קידוחים, עם ריכוזים חורגים, מתחת לקרקעות גרומוסול. גם בדיונות החול צפויים שטפי חנקה משמעותיים מתחת לשטחים חקלאיים, אך היקפם של שטחים אלו על גבי קרקעות חוליות הינו קטן יחסית (קורצמן, 2012). זמן שהייה ארוך, קיבול קטיונים גבוה, חומר אורגני ופעילות מיקרוביאלית רבה יותר בגרומוסולים החרסיתיים גורמים לאחד או יותר מהתהליכים

הבאים: קליטה טובה יותר, של חנקה על ידי השורשים, מקדמי ספיחה גבוהים של NH_4^+ (אמון), דה-ניטריפיקציה ונידוף אמוניה, שמפחיתים ו/או מעכבים את מסת החנקן המחלחלת לעומק, ביחס לקרקעות קלות יותר. (Wong and Witter 2009) הראו כי בקרקעות חרסיתיות יש קיבול אניונים חלופיים גבוה הגורם לספיחת חנקה ועיכוב הסעתה. דן ופיין (1999) מיפו את קרקעות המדינה בהתאם לרמת הסיכון, של חילחול מזהמים (בעיקר חנקן) למי תהום כתוצאה מהשקיה בקולחים. קרקעות אקוות החוף סומנו בעבודה זו כבעלות: חדירות רבה ומהירה למי תהום – חול; חדירות בינונית למי תהום – חמרה; חדירות מעטה ואיטית למי תהום – גרומסול. מנתוני השרות ההידרולוגי על ריכוז החנקה הממוצע במי האקווה עולה שב- 1999 הוא עמד על 55 מ"גל' (גבירצמן, 2002) וב- 2006 הריכוז הממוצע הגיע ל- 63 מ"גל' (השרות ההידרולוגי, 2007), כך שקצב העלייה הממוצע בתחילת המאה ה- 21 היה בסביבות מ"גל' בשנה. מגמת העלייה ברמות החנקן עשויה להיבלם בגלל הסדרת הביוב גם בישובים קטנים, שיפור באיכות מי הקולחים המופנים להשקיה (תקנות ענבר, פארטו-הנדסה, 2003), וצמצום השטחים המעובדים. אולם, כבר עתה ריכוז החנקה הממוצע במי האקווה קרוב לתקן של מי השתייה. גבירצמן (2002) מציג מחקרים הטוענים שייבוש הביצות והורדת מפלסי מי התהום בראשית המאה ה- 20, גרמו לעליה חדה בריכוזי החנקה במי התהום. עבודה זו עוסקת בשטפי חנקה ממקורות חקלאיים עכשוויים ולא דנה במקורות חנקה היסטוריים.

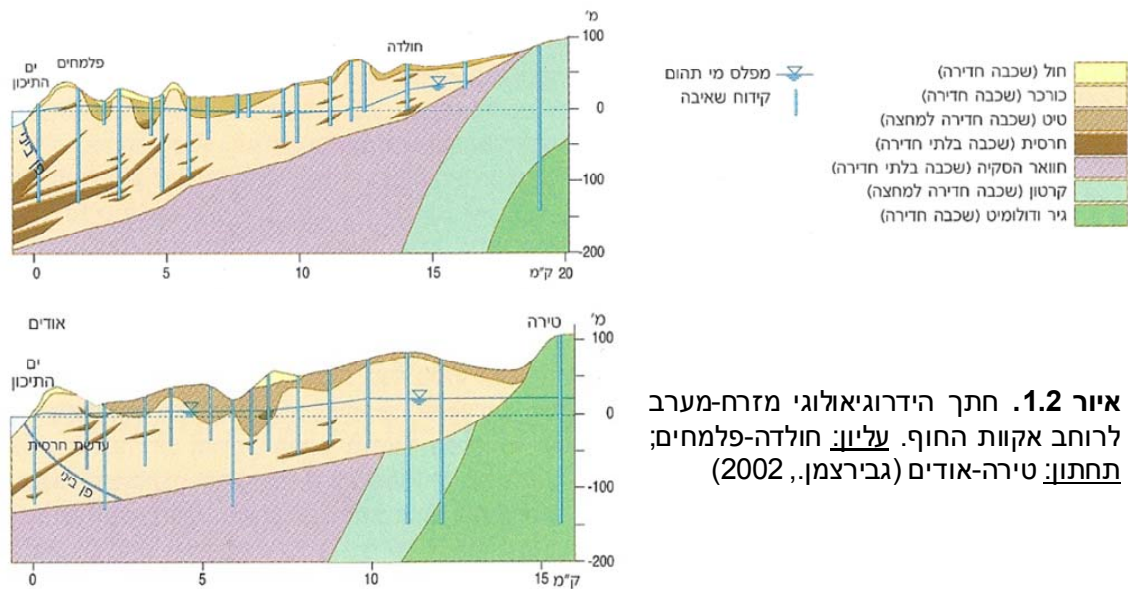
1.5. אקוות החוף של ישראל - רקע כללי

אקוות החוף היא מאגר מי תהום שפירים המשתרע תחת מישור החוף בישראל. האקווה משתרעת לאורך כ- 120 ק"מ, מהר הכרמל בצפון ועד חבל עזה בדרום. רוחבה נע בין 7-20 ק"מ, מקו החוף במערב ועד מרגלות ההרים במזרח. שטחה הכולל נאמד בכ- 2,000 קמ"ר. שלד האקווה בנוי לרוב מחולות וסלעי כורכר מגיל הפליסטוקן, שנמצאים מעל שכבת אקוויקלוד העשויה חוואר מגיל האאוקן העליון עד הפליוקן (שכבת הסקיייה). הסקיייה משתפלת ממזרח למערב, כך שעובי האקווה במזרח הינו אפסי ואילו במערב מירבי; העובי במערב נע בין 100 מטר בצפון ל- 180 מטר בדרום (איור 1.2). תנועת מי התהום מתבצעת ביעילות דרך החולות וסלעי הכורכר. עדשות חרסית דקות, המשתרעות לעיתים תחת אזורים נרחבים, מקשות על זרימת המים, ומחלקות את האקווה למספר תת-אקוות, בעיקר בחלקה המערבי. באופן כללי תנועת המים היא ממזרח למערב, כלומר מהיבשה לים. שיפוע המפלסים באקוות החוף הוא בתחום של 1% - 3%. מוליכותם ההידראולית של שכבות השלד גבוהה יחסית ונעה בין 100 - 10,000 מ' לשנה, כך שבמצב טבעי ללא שאיבות מתקבל זמן שהייה ממוצע של כ- 60 - 70 שנה (גבירצמן, 2002). ממוצע המילוי החוזר הרב-שנתי לאקווה מגשם והשקיה עומד על כ- 280 מליון מטרים מעוקבים (מלמ"ק) בשנה. כאשר מחלקים

את הערך הנ"ל בשטח האקווה מקבלים ששטף המילוי החוזר הממוצע הוא 140 מ"ק/דונם\שנה, שהם 140 מ"מ\שנה מילוי חוזר מגשם והשקיה. מאז שנות החמישים אקוות החוף מנוצלת באינטנסיביות, כך שמוצא המים העיקרי ממנה הינו דרך קידוחים שואבים ורק כ- 10% מהמילוי החוזר נשטף לים (השרות ההידרולוגי, 2007).



איור 1.1. (א) אגרציה לשלוש קבוצות, של חבורות הקרקע מעל אקוות החוף: גרומוסולים (חום); חמרות (כתום); חולות (צהוב) (מידע גיאוגרפי – יחידת סקר ומיפוי קרקע, משרד החקלאות). מצפון לדרום מחולקת האקווה לשש עשרה רצועות, שמקראת לפי הישבים או חבל הארץ הגובלים עימה. כל רצועה מחולקת ממזרח למערב לארבעה תאי דיווח (מזרחי, אוגר מזרחי, אוגר מערבי ומערבי) (ב) ריכוזי חנקה מסתיו 2007 במי קידוחים השואבים מאקוות החוף (השרות ההידרולוגי, 2007). ניתן לראות כי ריכוזי חנקה גבוהים במי התהום נמצאים בעיקר תחת קרקעות חמרה (חצים המקשרים בין א' ל-ב').



איור 1.2. חתך הידרוגיאולוגי מזרח-מערב לרוחב אקוות החוף. עליון: חולדה-פלמחים; תחתון: טירה-אודים (גברצמן, 2002)

1.6. קרקע ותנוך לא רווי

האזור הלא רווי הינו חלק חשוב ובלתי נפרד במחזור ההידרולוגי. תהליכים משמעותיים למחזור המים מתרחשים בתנוך הלא רווי, ובכללם: חידור, חילחול, אגירה, נידוף, יניקת מים על ידי שורשים, מילוי חוזר של מי תהום וריאקציות כימיות וביוכימיות. לאחרונה עלתה בצורה ניכרת ההתעניינות בתנוך הלא רווי בשל דאגה מתגברת והבנה, שהסביבה התת-קרקעית (מי התהום, לעניינינו) מושפעת באופן שלילי מהחקלאות, מהתעשייה ומאורח חיים עירוני. בעבר, עסקו בזרימה לא רוויה בעיקר במדעי הקרקע ובחקלאות, אולם כיום, בעידן בו בעיות זיהום מי תהום עולות בחשיבותן על בעיות הקשורות בהפקתם (במדינות מפותחות), נושא זה הפך למרכזי גם עבור הידרולוגיה של מי תהום. רשויות, גופים פרטיים ומכוני מחקר ברחבי העולם בוחנים את השפעותיהם, של מזהמים שנשפכים בטעות או במתכוון, וחודרים אל מתחת לבית השורשים ועלולים לזהם את מאגרי המים התת קרקעיים (Šimůnek et al., 2009). במסגרת המחקר ההידרולוגי של התנוך הלא רווי, פותחה מערכת לניטור התנוך הלא רווי (vadose zone monitoring system) המסוגלת לנטר תכולות רטיבות ואף לדגום מי נקבובים מעומקים שונים (למעלה מ- 20 מטר) (Dahan et al., 2003; Rimon et al., 2007; Dahan et al., 2009). מערכות מסוג זה יושמו תחת שטחים עירוניים, מקורות זיהום תעשייתיים, מאגרי שפכים ושדות חקלאיים (לדוגמה, Baram et al., 2012; Turkeltaub, 2012). מחקרים הידרולוגיים נוספים עוסקים בהערכות, של שטפי מים ומלחים אל מי תהום, המבוססות על דיגום בלתי מופר של התנוך הלא רווי העמוק מתחת לבית השורשים (לדוגמה, Kurtzman and Scanlon et al., 2007; Scanlon., 2011).

יחד עם זאת, מרבית התהליכים הקובעים את מצב התווך הלא רווי העמוק מתרחשים בחלקו העליון של פרופיל הקרקע. שני סוגי הקרקע העיקריים המכסים את פני השטח, דרכן מגיע המילוי החוזר לאקוות החוף (מלבד דיונות החול במערב שאינן מעובדות ברובן המכריע) הן:

- קרקע חולית אדומה (חמרה) נפוצה באזור הים-תיכוני מעל אקוות החוף ומשמשת לגידולים חקלאיים רבים ובכללם פרדסים (עדיין הגידול הדומיננטי על גבי קרקעות אלו). קרקעות החמרה מגוונות מאוד בתכונותיהן הכימיות והפיזיקאליות ונבדלות זו מזו במרקמן, במתכונת הגיר ובאופי חלוקתו בחתך ובגוונים השונים המלווים את צבען היסודי. בין הסוגים השונים יש הבדלים גדולים בתכונות הפיסיקליות, בגלל הפרשים ניכרים בין אחוזי החול והחרסית. תכולת החרסית בקרקעות חמרה נעה בין 4 ל- 26 אחוזים, תכולת הסילט – בין 1 ל- 16 אחוזים ותכולת החול, שהיא המקטע השולט בכל הקרקעות האלו, נעה בין 58 ל- 95 אחוזים, כך שהרכבן המכאני נמצא בטווח שבין חול (sand) לבין חרסית סייין חולית (sandy clay loam). החתך הוא על פי רוב אחיד בהרכבו המכאני ובמבנהו ומאופיין בחדירת מים וחלחול מהירים עם התנקזות טובה (רביקוביץ, 1992).

- קרקע חומה אלוביאלית (ורטיסול / גרומוסול) נפוצה באזור הים-תיכוני ומשתרעת בעמקים ומישורים מעל אקוות החוף (בעיקר בדרומו) על פני שטחים רציפים לרוב. קרקעות אלו כבדות ולעיתים אף כבדות מאוד עם תכולת חרסית שנעה בין 50 ל- 70 אחוזים. הרטבה וייבוש לסירוגין גורמים לתפיחה והתכווצות ועל כן נוצרים סדקים רחבים ועמוקים. בשל אחוזי החרסית הגבוהים יש לקרקעות אלו קיבול מים רב לכל עומק החתך וחדירת המים נחשבת באופן כללי לאיטית (רביקוביץ, 1992).

כלוריד וחנקה הם מדדים מובילים של איכות מי תהום. אניונים אלה נפוצים במי הנקבובים של הקרקעות והתווך הלא רווי שמעל לאקוות החוף. כלוריד משמש פעמים רבות להערכת שטפים, בשל היותו סמן משמר בתווך הלא רווי ומכיוון שאינו נתון לתגובות הביולוגיות המורכבות, אשר מאפיינות את אגרון החנקה. במרבית הבחינות האחרות, כלוריד מתנהג בחתך הלא רווי באופן דומה לחנקה (Bohn et al., 2001). בכדי להעריך שטפי חנקן וכלוריד מהתווך הלא רווי אל מי התהום, יש לבצע קודם לכן הערכה של שטף המילוי החוזר אל מי התהום.

1.6.1. הערכת מילוי חוזר ממוצע

כלוריד יכול לשמש כסמן טבעי וידידותי לסביבה ובעזרתו ניתן להעריך את קצבי המילוי החוזר הממוצעים (או קירוב למצב עמיד - steady state). על פי מאזן מסת הכלוריד (Chloride Mass Balance - CMB), שטפי כניסת הכלוריד בפני השטח שווים לשטפי יציאתו בתחתית הפרופיל הלא רווי מתחת לבית השורשים. משוואה 1.1 מראה כי המילוי החוזר פרופורציוני הפוך לריכוז הכלוריד בתווך הלא רווי העמוק.

$$P \cdot C_p + I \cdot C_i = RF \cdot C_{duz} \rightarrow RF = \frac{P \cdot C_p + I \cdot C_i}{C_{duz}} \quad (1.1)$$

כאשר: P – גשם ממוצע שנתי [אורך·זמן¹], C_p – ריכוז כלוריד בגשם [מסה·אורך³], I – השקיה שנתי ממוצעת [אורך·זמן¹], C_i – ריכוז כלוריד במי ההשקיה [מסה·אורך³], RF (Recharge Flux) – מילוי חוזר שנתי ממוצע [אורך·זמן¹], C_{duz} – ריכוז כלוריד ממוצע בתווך הלא רווי העמוק [מסה·אורך³] (Scanlon et al., 2007; Scanlon, 2002). בעבודה זו שוכללה השיטה לקביעת C_{duz} מדוגמאות הסדימנט העמוקות ע"י ממוצע המשקלל את עובי האינטרוול שהדגימה מייצגת ואת תכולת הרטיבות שבה (משוואה 1.2).

$$RF = \frac{(P \cdot C_p + I \cdot C_i) \cdot \int_z^{2m} (\theta(z) dz)}{\int_z^{2m} (\theta(z) \cdot Cl(z) dz)} \quad (1.2)$$

כאשר: RF – מילוי חוזר ממוצע [אורך·זמן¹]; z – מימד אנכי [אורך]; P – גשם שנתי ממוצע [אורך·זמן¹]; C_p – כלוריד ממוצע במי הגשם [מסה·אורך³]; I – השקיה שנתי ממוצעת [אורך·זמן¹]; C_i – כלוריד ממוצע במי ההשקיה [מסה·אורך³]; Cl(z) – ריכוז כלוריד במי הנקבובים [מסה·אורך³]; θ(z) – תכולת רטיבות נפחית [אורך³·אורך³]; 2m – שני מטרים, כלומר העומק שממנו מחושב הריכוז בתווך הלא רווי העמוק.

1.7. חישוב שטפי מים משתנים עם הזמן

המים בקרקע זורמים דרך נקבובים פתלתלים ורציפים ובשילוב עם שונות גדולה בשטפים שבפני השטח, מתקבלת שונות גדולה גם בשטפים אל מי התהום. לורנזו ריצ'ארדס גילה בתחילת שנות השלושים כי משוואתו של הנרי דרסי, שפורסמה בשנות החמישים של המאה ה-19, ושימשה לתיאור זרימה רוויה בתווך נקבובי, יכולה לשמש גם לתיאור זרימה לא רוויה בתווך נקבובי. בשנת 1931 פירסם ריצ'ארדס פיתוח למשוואתו של דרסי, המתאר חידור מים בתווך נקבובי לא רווי. פיתוח זה ידוע כיום כמשוואת החידור של ריצ'ארדס, אשר שמוצגת בצורתה התלת מימדית במשוואה 1.3 (Richards, 1931; Darcy, 1856):

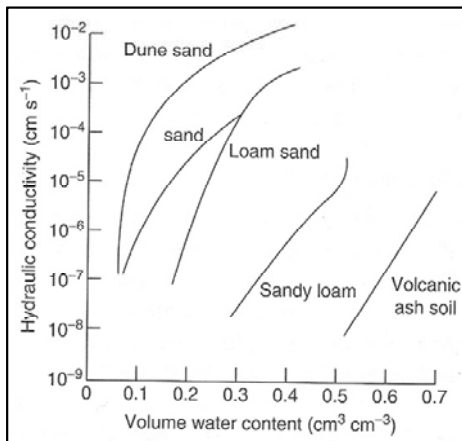
$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} - s(h) \quad (1.3)$$

כאשר: θ – תכולת רטיבות נפחית [אורך³·אורך³]; t – זמן [זמן]; x, y ו-z – מימדים מרחביים [אורך]; K – מוליכות הידראולית לא רוויה [אורך·זמן¹]; h – עומד הלחץ (המתח המטריצי) [אורך]; s – מבלע המייצג את יניקת השורשים [אורך³·אורך³·זמן¹] (s > 0) באזור בית השורשים,

ו- $s=0$ מתחת לבית השורשים) (Miyazaki, 2006 ;Warrick, 2003 ;Pachepsky et al., 2003 ;Šimůnek et al., 2009).

1.7.1. פונקציות הידראוליות של קרקע לא רוויה

המוליכות ההידראולית הרוויה (K_s) תלויה במידת התנגדותם של חלקיקי הקרקע, לזרימת מים דרך החללים. התנגדות זו מושפעת מצורתם, גודלם, מידת הסיעוף והחיבורים, פתלתלותם של חללי הקרקע, צמיגות וצפיפות הזורם. בקרקע לא רוויה קיימת תלות הן של תכולת הרטיבות והן של המוליכות ההידראולית במתח המטריצי. הגדרת אופייה של תלות זו נחוצה לפתרון נומרי של משוואת החידור של ריצ'רדס. מאפיינים אלו מתוארים על ידי התלות בין $K(h)$ ל- $\theta(h)$ (איור 1.3, Miyazaki, 2006).



איור 1.3. מוליכות הידראולית לא רוויה של מספר קרקעות כפונקציה של תכולת הרטיבות (Miyazaki, 2006). ציר אנכי בסקאלה לוגריתמית

קיימים מספר מודלים אנליטיים המתארים את המאפיינים ההידראוליים הנ"ל ובהם: Fujita, 1952 ;Gardner, 1958 and Russo, 1988 (GR) ;and Broadbridge & white, 1987 (FBW) Kosugi, ;Vogel & Cislrova, 1988 ;van Genuchten, 1980 ;Brooks and Corey, 1964 van Genuchten-Mualem 1996 and Durner, 1994. בעבודה זו נעשה שימוש במודל מסוג van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976), שמתאר באופן אנליטי את היחסים בין תכולת הרטיבות הנפחית (θ), עומד הלחץ (h) והמוליכות ההידראולית (K) כפי שמוצג במשוואות 1.4 ו- 1.5.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

$$K(h) = K_s \cdot S_e^l \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (1.5)$$

כאשר: h – העומד ההידראולי [אורך]; θ_r – תכולת הרטיבות השאריתית [אורך³·אורך³]; θ_s –

תכולת רטיבות ברוויה [אורך³·אורך³]; α – מקדם המקושר באופן הפוך לערך פריצת האוויר [אורך¹]; n – פרמטר הקשור לפילוג גודל הנקבובים [] ; l (Lumped parameter) – פרמטר שמתחשב במידת הפתלתלות (tortuosity) ובמידת הקישוריות (connectivity) [] ; $m = 1/n - 1$; K_s – מוליכות הידראולית ברוויה [אורך¹·זמן⁻¹]; $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ [] (Mualem, 1976); van Genuchten, 1980; Šimůnek et al., 2009; Warrick, 2003; Wang et al., 2009).

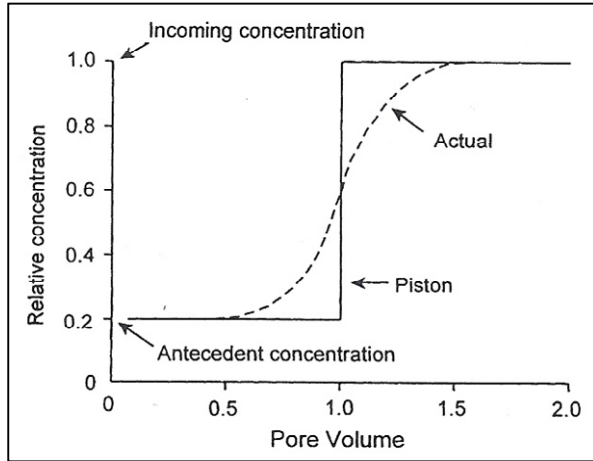
1.7.2 פונקציות פדו-טרנספר (Pedo-Transfer Functions - PTFs)

תהליך בנייה וכיול, של מודלים בתווך הלא רווי, כרוך בהגדרת המאפיינים ההידראוליים של הקרקע. פונקציות פדו-טרנספר (Pedo-Transfer Functions - PTFs) מנצלות מידע קיים בכדי לקבל הערכה של המאפיינים ההידראוליים. המידע הזמין, שמשמש כקלט ל-PTFs, כולל במקרים רבים מסד נתונים רחב המכיל נתוני הרכב מכאני, נקבוביות, צפיפות גושית ופחמן אורגני ממקורות רבים ומגוונים. PTFs מבצעות ניתוח נתונים רגרסיבי על בסיס מסד הנתונים הקיים, ומספקות הערכה של המאפיינים ההידראוליים של הקרקע הנבחנת (Wang et al., 2009; Warrick, 2003). דוגמה לתוכנת מחשב שמיישמת חמש PTFs היא Rosetta, בה מאורגנות ה-PTFs לפי מדרג, לצורך הערכת תאחיזת המים והמוליכות ההידראולית בקרקעות. המדרג מאפשר הערכה, של המאפיינים של פונקציות הידראוליות מסוג van Genuchten-Mualem, בעזרת מידע מוגבל ו/או מפורט על המרקם ו/או מידע חלקי על תאחיזת המים בקרקעות הנבחנות (Schaap et al., 2001).

1.8 חישוב שטפים משתנים בזמן של כלוריד וחנקן

המים אינם רק נוזל, שנע דרך התווך הנקבובי, אלא משתתפים בתהליכים כימיים וביולוגיים, ובכללם הסעת מומסים. תנועת המומסים מונעת על ידי שני מנגנונים עיקריים: הזרימה הנפחית (bulk flow) והדיפוזיה (diffusion). מרכיב הזרימה הנפחית מכונה גם זרימה אדבקטיבית (advective flow), זוהי תכונה, שנובעת מהשפעות של מנגנונים חיצוניים כדוגמת הפרשי לחצים ו/או כוח המשיכה של כדור הארץ. ההסעה האדבקטיבית מקושרת למהירות זרימת הנוזל, כך שכאשר מהירות הזרימה היא אפס, אין תרומה של אדבקציה לתנועת המומסים. בתווך נקבובי קיימים הבדלים במפתחים של החללים ופתלתלות, ולכן ישנם הבדלים באורך מסלולי הזרימה ומהירותה כמו גם הבדלים בצפיפות שב"חזית" הזרימה. שונות זו גורמת לחלק מהמים והמומסים לזרום מהר יותר מה – bulk flow ולחלק לזרום לאט יותר. תופעה זו מכונה דיספרסיה מכאנית והשפעתה בתנאי זרימה רגילים בתווך הלא רווי גדולה מהשפעת הדיפוזיה. מקובל להשתמש בפרמטר הדיספרסיה ההידרו-דינמית (D) הכולל בתוכו את הדיספרסיה המכאנית ואת הדיפוזיה. במצב שבו הדיספרסיה ההידרו-דינמית מתאפסת, מתקיימת תזוזת בוכנה (piston flow), אולם

תמונת מצב יותר מציאותית בתווך נקבובי, היא עקום פריצה סיגמואידאלי (Brodkey, & Warrick, 2003; Hershey, 1988) (איור 1.4).



איור 1.4. עקומי פריצה מסוג תזוזת בוכנה וסיגמואידאלי. (Warrick, 2003)

תנועת המומסים משתנה בזמן ובמרחב. תנועה זו מתוארת על ידי משוואת האדבקציה-דיספרסיה (משוואה 1.6), אשר מתחשבת בזרימה הנפחית, והדיספרסיה.

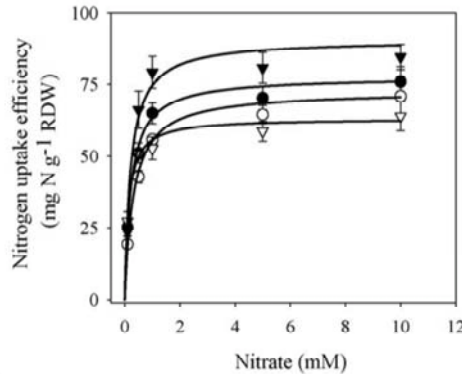
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \nabla^2(C) - V \cdot \nabla(C) = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1.6)$$

כאשר: C – ריכוז בתמיסת הקרקע [מסה · אורך⁻³]; t – זמן [זמן]; D – מקדם הדיספרסיה ההידרו-דינמית [אורך² · זמן⁻¹]; V – מהירות זרימה ממוצעת [אורך · זמן⁻¹]; x, y, z – מימדים מרחביים [אורך].

1.9. קליטת חנקן על ידי השורשים

בפרדסים שמנוהלים כראוי, עם משטר דישון והשקייה מתוכנן לצורך הפחתת הזליגה, יעילות ניצול החנקן צריכה להיות בתחום שבין 40 – 60 אחוזים. שאר החנקן מעורב בהמרות של מעגל החנקן, נצרך על ידי מיקרו-אורגניזמים ו/או צמחים אחרים, מחלחל אל מתחת לבית השורשים, או יוצא מהמערכת בגלל גורמים אחרים (Martinez-Alcantara et al., 2012). בהשוואה לחומרי הזנה מינראליים אחרים, החנקן הינו ייחודי, מכיוון שהוא נצרך על ידי הצמחים בשתי צורות: כאניון NO₃⁻ או כקטיון NH₄⁺. החנקה נקלטת על ידי השורשים באחוזים גבוהים יותר מהאמון (NH₄⁺), ללא השפעה משמעותית של היחס המקורי ביניהם. תופעה זו נובעת בגלל פעולתן של שתי קבוצות חיידקים כימואוטוטרופיים, שנפוצות בקרקעות, ומחמצנות NH₄⁺ ל- NO₃⁻ (nitrification - חינקון) בתנאים חמים ומאווררים היטב, כדוגמת התנאים המועדפים על גידולים חקלאיים (Pessaraki, 2001). יעילות קליטת חנקן כפונקציה של זמינות חנקה בהדרים, מתוארת על ידי עקומי רוויה. יעילות הקליטה עולה עד לריכוז של 14 מ"גל' חנקן חנקתי, ובריכוזים גבוהים יותר מתקבלת רוויה.

איור 1.5) (Sorgona et al., 2006). תופעה זו רומזת שייתכן כי היעילות החקלאית של תשומות חנקן עודפות נמוכה, בעוד שהשפעתן על זיהום האקווא הינה גבוהה.



איור 1.5. יעילות קליטת חנקן של שתילי הדורים מסוג: Rough Lemon (●), Sour Orange (▼), Orange (○) ו-Cleopatra (▽). השתילים גודלו במשך 75 ימים עם ריכוזי חנקן שונים. (Sorgona et al., 2006).

* הריכוזים המוצגים הם של NO_3^-

1.10. פיתרון נומרי של משוואות הזרימה וההסעה בעזרת HYDRUS-1D

בתווך לא רווי עמוק (עומק מי התהום גדול בסדר גודל מעומק השורשים), שפני השטח שלו אחידים יחסית (אותה חלקה חקלאית) קירוב חד-מימדי אנכי של זרימה והסעה הינו סביר (Jacques et al., 2008; Kurtzman & Scanlon, 2011). HYDRUS-1D מדמה באופן חד מימדי זרימת מים לא רוויה, תנועת חום והסעת מומסים, הכרוכה בתגובות דעיכה רציפות מסדר ראשון. HYDRUS-1D פותר באופן נומרי את משוואת החידור של ריצ'רדס במימד האנכי עם איבר מבלע שמייצג קליטת שורשים, עבור מגוון מצבי זרימה (משוואה 1.7).

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} - s(h) \quad (1.7)$$

כאשר: θ – תכולת רטיבות נפחית [אורך³·אורך⁻³]; t – זמן [זמן]; z – מימד אנכי [אורך]; K – מוליכות הידראולית לא רוויה [אורך·זמן¹]; h – עומד הידראולי [אורך]; s – מבלע המייצג את ניקת השורשים [אורך³·אורך⁻³·זמן¹].

על מנת לקבל את סדרות הזמן והמרחב $\theta(z, t)$, $h(z, t)$ ו- $K(z, t)$ מפתרון של משוואה 1.7 יש לקבוע ב-HYDRUS-1D את הפונקציות המאפיינות את תכונות התווך הנקבובי הלא רווי (לדוגמה מודל van Genuchten Mualem, משוואות 1.4 ו-1.5). סדרות זמן ומרחב אלה מאפשרות לחשב את השטפים בכל נקודה במרחב ובזמן. שטפים אלה יוצרים צימוד בין מודל הזרימה שלעיל ומודל ההסעה (משוואות 1.8 – 1.11). בעבודה זו השטפים בתחתית העמודה הלא רוויה מהווים אומדן לשטף המילוי החוזר לאקווא.

HYDRUS-1D פותר באופן נומרי משוואות מסוג אדבקציה-דיספרסיה חד-ממדיות עבור הסעת מומסים. משוואה 1.8 מייצגת הסעת כלוריד, שהינו יון מסיס ומשמר ולכן אין איברי מקור / מבלע

ורכיזו בפאזה המוצקה הינו זניח. בניית מודלים של הסעת החנקן בוצעה על ידי שתי משוואות אדבקציה-דיספרסיה, האחת לאמון והשנייה לחנקה. משוואת ההסעה של האמון כוללת אברי שינוי ריכוז המומס והריכוז בפאזה המוצקה (משוואה 1.9 אגף שמאל), דיספרסיה, אדבקציה, איבר מבלע שמייצג קליטת שורשים ואברי מבלע לחינקון (nitrification) ולנידוף (משוואה 1.9 אגף ימין). הקשר בין ריכוז אמון במוצק ובמומס מוצג על ידי משוואת ספיחה ליניארית לסדימנט (משוואה 1.10). משוואת ההסעה של חנקה לא כוללת ריכוז בפאזה המוצקה (זניח) וכוללת דיספרסיה, אדבקציה, קליטת שורשים, איבר מקור עבור חינקון של אמון ואיבר מבלע עבור דה-ניטריפיקציה (משוואה 1.11). אברי המקור והמבלע שונים מאפס רק בחלק של התווך הלא רווי שבו אנו משערים שהריאקציות הנ"ל מתרחשות.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C_{Cl^-}) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (q C_{Cl^-}) \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C_{NH_4}) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho S_{NH_4}) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C_{NH_4}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (q C_{NH_4}) - f_{NH_4} S_{NH_4} - \mu_{nit} \theta C_{NH_4} - \mu_{vol} \theta C_{NH_4} \quad (1.9)$$

$$S_{NH_4} = K_s - NH_4 C_{NH_4} \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C_{NO_3}) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C_{NO_3}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (q C_{NO_3}) - f_{NO_3} S_{NO_3} + \mu_{nit} \theta C_{NH_4} - \mu_{dnit} \theta C_{NO_3} \quad (1.11)$$

כאשר: C – ריכוז בתמיסת הקרקע [מסה · אורך⁻³]; S_{NH4/NO3} – ריכוז במוצק הקרקע [מסה · מסה⁻¹]; ρ – צפיפות גושית [מסה · אורך⁻³]; θ – תכולת רטיבות נפחית [אורך³ · אורך⁻³]; t – זמן [זמן]; z – המימד האנכי [אורך]; D – מקדם הדיספרסיה ההידרו-דינאמית [אורך² · זמן⁻¹]; q – שטף המים [אורך · זמן⁻¹]; S – קצב קליטת המים על ידי השורשים (משוואה 1.7) [אורך³ · אורך⁻³ · זמן⁻¹]; f_{NO3/NH4} – פרמטר המאפשר הגבלה, של קליטת המומס בשורשים, על פי סף ריכוז; μ_{nit} – קבוע קצב לחינקון (סדר ראשון עבור אמון; סדר אפס עבור חנקה) [זמן⁻¹]; μ_{vol} – קבוע קצב וולטיליזציה (סדר ראשון) [זמן⁻¹]; μ_{dnit} – קבוע קצב לדה-ניטריפיקציה (סדר ראשון) [זמן⁻¹]; K_s – מקדם ספיחה [אורך³ · מסה⁻¹] (Šimůnek et al., 2009).

1.11. הנחות המחקר

- פרדסים הינם גידול עיקרי בקרקעות חמרה באזורים עם ריכוזי חנקה גבוהים במספר גדול של בארות באקוות החוף.
- הערכת שטפי חנקן למי התהום כרוכה בהבנת מצב בית השורשים והתווך הלא רווי העמוק, ובהבנת התהליכים שמתרחשים באזורים אלו.

- מודלים של זרימה והסעת חנקן, המכויילים לנתוני התווך הלא רווי העמוק, יכולים לשמש לבחינה מושכלת של הקשר שקיים בין הדישון החנקני שמיושם בפני השטח לבין שטפי החנקן אל מי התהום.

הנחות אלו הובילו להצבת מטרות העבודה שלהלן.

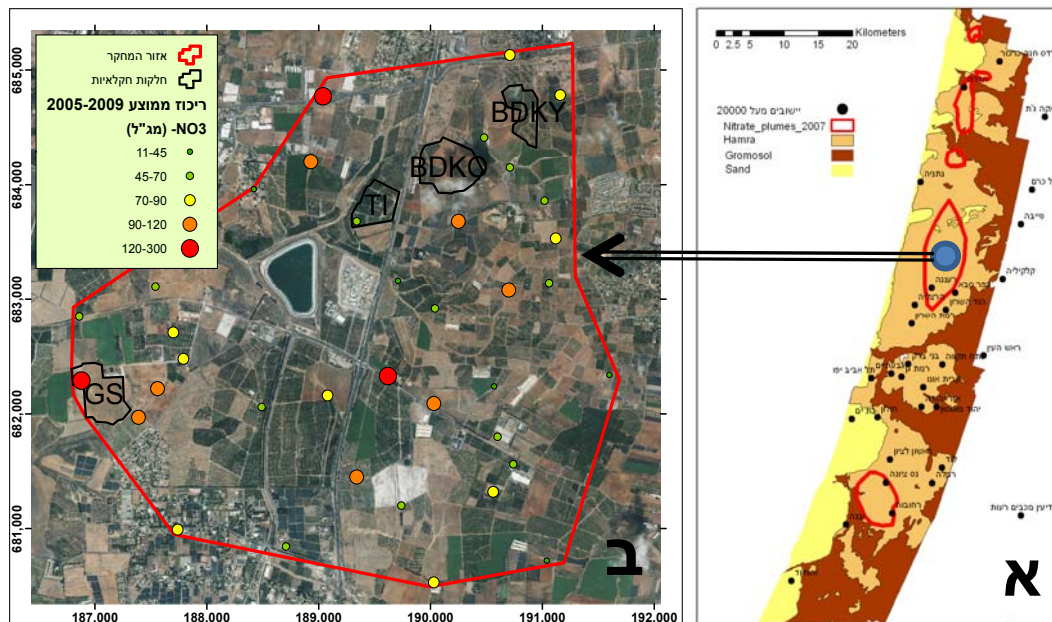
2. מטרות העבודה

1. דיגום התווך הלא רווי, תחת פרדסים באזור השרון (קרקע חמרה) ובשפלת יהודה (קרקע גרומוסול) לצורך אפיון פרופיל הקרקע מבחינת משתנים כימיים ופיזיקאליים רלוונטיים לזרימה והסעת חנקן.
2. כיול מודלים, של זרימה לא רוויה, הסעת כלוריד והסעת חנקן, לנתוני הדיגום העמוק.
3. בחינת השפעתם של שינויי ממשק על החלחול העמוק, באמצעות הדמיות במודלים המכויילים.

3. שיטות וחומרים

3.1. אתרי השדה

אזור המחקר העיקרי נבחר על פי העקרונות הבאים: 1. אזור השוכן מעל אקוות החוף. 2. אזור באקוות החוף עם חריגות בריכוזי חנקה (< 70 מ"ג/ל") במספר משמעותי של בארות (נקודות אדומות וכתומות, איור 3.1 א'). 3. אזור חקלאי רציף, שניתן להזניח בו תרומות חנקן, שאינן חקלאיות, מפני השטח (איור 3.1 ב'), המאגר שנראה באיור הינו חדש יחסית – קיים משנת 2003). אתר נוסף נבחר כביקורת, באזור השוכן מעל אקוות החוף, בו פרופיל הקרקע וחלק משמעותי מהאזור הלא רווי הוא חרסיתי (כפר-וורבורג, בקרבת קריית מלאכי). השוואה כזו מתבקשת בשל העובדה, שכל פלומות החנקה באקוות החוף נמצאות מתחת לקרקעות חמרה (איור 3.1 א'; איור 1.1).



איור 3.1. (א) מפת קרקעות חתוכה על גבולות אקוויפר החוף (ראה מקרא). הפוליגונים האדומים מקיפים אזורים עם מספר רב יחסית של בארות שנמדד בהן ריכוז חנקה גבוה. ניתן לראות שהאזורים המזוהמים נמצאים בעיקר תחת קרקע חמרה ופחות תחת גרומוסול. **(ב)** תצלום אוויר של אזור המחקר החקלאי בשרון. החלקות בהן בוצע דיגום מסומנות בפוליגונים שחורים, וריכוז ממוצע, של חנקה (מג"ל) (בשנים 2005 – 2009) בקדוחי מי תהום, מסומן בנקודות צבעוניות (ראה מקרא).

אזור המחקר העיקרי ממוקם במרכז השרון, ומתוכו נבחרו שלושה פרדסים ושדה מיקשה אחד (איור 3.1 ב'). פרדס רביעי כאמור ממוקם בקרקע חרסיתית בשפלת יהודה. הדיגום העמוק בוצע בחמשת החלקות החקלאיות המפורטות להלן:

- פרדס שמוטי המעובד על ידי מושב 'בני-דרור', ומושקה בקולחים מאז 1980 (BDKO).
- פרדס טבורי המעובד על ידי מושב 'בני-דרור', ומושקה בקולחים משנת 2004 (BDKY).
- פרדס אשכולית צהובה המעובד על ידי קיבוץ 'תל-יצחק', ומושקה במים שפירים, שמקורם בבאר הממוקמת בתוך החלקה (TI).
- חלקה סמוכה לבית האבות 'קריית-שלמה', המשמשת לגידול תפוחי אדמה ומקשה (אבטיחים בקיץ 2010) על ידי מגדלים מתחלפים. החלקה נבחרה, על אף שאינה משמשת כפרדס, מכיוון שבתחומה ובסביבתה הקרובה ישנן שלוש בארות רדודות יחסית, עם ריכוזי חנקה גבוהים במיוחד (120 מג"ל $[NO_3^-] >$) (GS).
- פרדס אשכולית אדומה במושב 'כפר-וורבורג' (סמוך לקריית מלאכי), מושקה במים שפירים, שמספקת חברת 'מקורות' (KV). החלקה שוכנת על קרקע חרסיתית (גרומוסולים של שפלת יהודה), ומעובדת על ידי חקלאי מהמושב.

3.2. דיגום שדה

בכל אחד מחמשת האתרים נקדחו שלושה קידוחים לעומק 9~ מטרים כל אחד. בכדי להתחשב בשונות המרחבית באתרי הדיגום, נקדחו, בכל אתר, שני קידוחים במרחק מירבי של 30~ מטר ביניהם (כל קידוח נקדח בשורת עצים אחרת), וקידוח שלישי במרחק העולה על 100 מטר משני הקידוחים הראשונים. הקידוחים מוקמו בין שורת העצים לבין מרכז השביל המפריד בין השורות, בהתאם למגבלות העבודה של צוות הקידוח, שמירה על נוף העצים והשאיפה להתקרב ככל שניתן לשורה (המרחק בין הקידוח לגזע העץ הקרוב ביותר, הינו בטווח 80 - 240 ס"מ, בכל שנים עשר הקידוחים, שבוצעו בחלקות פרדס).

נבחרה שיטת קידוח בדחיקה ישירה המאפשרת הוצאת גלעין קרקע רציף ולא מופר בתוך שרוול PVC. הקידוחים בוצעו ע"י חברת 'איזוטופ בע"מ' באמצעות מקדח מסוג 'Geoprobe-6610DT' (איור 3.2 א') המוציא שרוולי PVC בעלי קוטר פנימי של 4.3 ס"מ ובאורך של 150 ס"מ כל אחד (איור 3.2 א', ב'). בכל שרוול, החלק שהכיל קרקע (לרוב כל אורך השרוול, אך לעיתים השרוול התמלא באופן חלקי) נחתך בשדה לחמישה חלקים שווים (ארבעה חלקים במקרים נדירים, בהם השרוול התמלא בפחות מ- 80 ס"מ), כך שכל חלק שימש כדוגמת קרקע, שמייצגת מקטע אנכי באורך 30 ס"מ (כאשר השרוול חולק לארבע חלקים, כל דוגמה מייצגת מקטע אנכי באורך 37.5 ס"מ). השרוולים נסגרו עם פקקים ייעודיים, נאטמו בעזרת סרט הדבקה ונשמרו בצידנית מקוררת לטיפול במעבדה (איור 3.2 ג'). בכדי למזער טעויות דיגום בשל נפילת קרקע לתחתית חור הקדח, צוות הקידוח ניקה והרחיב את החור בעזרת מקדח ספיראלה בקוטר 7.5 ס"מ לאחר כל התקדמות של שלושה מטרים בעומק הקידוח. תקלה במכונת הקידוח גרמה לכך שב- GS וב- BDKY שלושת הקידוחים שבתוך החלקות לא נקדחו באותו יום. שמות הקידוחים ותאריכי הדיגום בחמשת האתרים, מפורטים להלן:

- BDKO – שלושת הקידוחים (BDKO1, BDKO2 ו- BDKO3) נקדחו ב- 1.6.2010.
- BDKY – BDKY1 נקדח ב- 29.6.2010. BDKY2 ו- BDKY3 נקדחו ב- 18.7.2010.
- TI – שלושת הקידוחים (TI1, TI2 ו- TI3) נקדחו ב- 4.7.2010.
- GS – GS1 נקדח ב- 18.7.2010. GS2 ו- GS3 נקדחו ב- 25.10.2010.
- KV – שלושת הקידוחים (KV1, KV2 ו- KV4) נקדחו ב- 13.9.2010.



איור 3.2. (א) הוצאת שרול דיגום באורך 150 ס"מ, באמצעות מכונת הקידוח "Geoprobe 6610DT", בשטח לא מעובד בקריית שלמה. (ב) שרול הדיגום מוצא מתוך חור הקדח בפרדס בתל יצחק. (ג) שרולי דיגום חתוכים לדוגמאות, פקוקים ואטומים, מאוכסנים בצידנית מקוררת.

3.3. בדיקות מעבדה

האנליזות לצפיפות גושית, תכולת רטיבות, ריכוזי כלוריד וצורוני חנקן בוצעו בכל המדגמים בשלושת המטרים העליונים, ובכל מדגם שני בעומקים שבין שלושה לתשעה מטרים (סה"כ 20 מדגמים בקדוח). אנליזות לפחמן אורגני, חנקן כללי, פוטנציאל חימצון אמוניה, הרכב מכאני ומוליכות הידראולית בוצעו ברזולוציה נמוכה יותר.

3.3.1. תכולת רטיבות משקלית

היחס בין מסת המים האגורים בקרקע, למסת הפאזה המוצקה. הפרש המסות נמדד על ידי שקילה לפני ואחרי ייבוש ב-105°C, עד להגעה למשקל קבוע.

3.3.2. צפיפות גושית

היחס בין מסת הקרקע היבשה, לבין נפחה הכולל של דוגמת הקרקע. מסת הקרקע היבשה חושבה מתוך המסה הכוללת של הדוגמה ותכולת הרטיבות המשקלית. נפח הדוגמה חושב, על פי מידותיו הפנימיות של שרול ה-PVC ואורכו של גלעין הקרקע. במקרים בהם השרול לא התמלא לגמרי (בעיקר בשרולים הרדודים), נמדד רק נפח השרול שמכיל קרקע.

3.3.3. תכולת רטיבות נפחית

היחס בין נפח המים האגורים בקרקע לבין נפח הדוגמה הכולל. חושב כמכפלה, של תכולת הרטיבות המשקלית בצפיפות הגושית, וחלוקה בצפיפות המים, שהינה 1 גרם/סמ"ק.

3.3.4. הכנת מיצוי מימי של קרקע לבדיקת הרכב מומסים (כלוריד, חנקן כללי ופחמן אורגני)

דוגמת קרקע יבשת תנור ב- 40°C, וטחונה לגודל > 2 מ"מ, הוכנסה למבחנה עם מים מזוקקים פעמיים (Double Distilled Water - DDW) ביחס משקלי 1:5 (25 גרם H₂O ו- 5 גרם קרקע). המבחנה טולטלה במשך שעתיים, ולאחר מכן סורכזה במהירות 6000 סל"ד במשך 10 דקות. לאחר מכן הופרדה הפאזה המימית וסוננה בעזרת נייר סינון. עבור אנליזה של פחמן אורגני וחנקן כלליים מומסים (TOC ו-TN), שפיית הפאזה המימית בוצעה בעזרת פיפטת פסטר (ממרכז הפאזה הנוזלית, כך שלא נכנס חומר מרחף, הנראה לעין, אל תוך הפיפטה) ללא נייר סינון, כדי למנוע הוספת חומר אורגני שמקורו בנייר הסינון.

3.3.5. מיצוי קרקע ב- 1 מולר KCl למדידת ריכוז אמון, חנקה וניטריט

דוגמת קרקע יבשת תנור ב- 40°C, וטחונה לגודל > 2 מ"מ, הוכנסה למבחנה עם תמיסת 1 מולר KCl ביחס משקלי 1:5 (25 גרם תמיסה ו- 5 גרם קרקע). המבחנה טולטלה במשך 40 דקות, ולאחר מכן סורכזה במהירות 4000 סל"ד במשך 5 דקות. עם סיום פעולת הסרכוז, הופרדה הפאזה הנוזלית וסוננה בעזרת נייר סינון.

3.3.6. ריכוז כלוריד במיצוי מימי

מיצוי מימי (ראה סעיף 3.3.4) הועבר לאנליזת כלוריד באמצעות כלורידומטר דיגיטלי מתוצרת Labconco.

3.3.7. ריכוז אמון, חנקה וניטריט

נמדד במיצוי קרקע ב- 1 מולר KCl (ראה סעיף 3.3.5) בעזרת אוטואנלייזר (Autoanalyzer, Lachat, QuickChem 8000/8500).

3.3.8. ריכוז מחושב במי הנקבובים

הונח שריכוז האניונים המסיסים כלוריד וחנקה, במוצקי התנוך הלא רווי, הינו זניח. ריכוזם במי הנקבובים חושב על פי הריכוז לק"ג קרקע יבשה (המתקבל מהריכוז בתמיסת המיצוי ופקטור המייהול) מחולק בתכולת הרטיבות הגרווימטרית (ומוכפל בצפיפות המים שהיא 1 ק"ג/גליטר) כפי שמתואר באנליזת היחידות שלהלן: [מ"ג לק"ג קרקע] / [ק"ג מיס לק"ג קרקע] · 1 [ק"ג מיס/גליטר] ← מ"ג/ל.

3.3.9. פחמן כולל (Total Carbon – TC) וחנקן כולל (Total Nitrogen – TN) במוצק²

~150 מ"ג של קרקע טחונה לגודל גרגר > 250 מיקרומטר, הוכנסה לתוך כמוסות בדיל. הכמוסות נסגרו והוכנסו למכשיר – "NC Soil Analyzer, flash EA 1112 series". המכשיר מכמת את תכולת הפחמן והחנקן בדוגמאות הקרקע. כיול בוצע באמצעות Aspartic acid. סף המדידה עבור פחמן – 0.1%, ועבור חנקן – 0.02%.

² בשל תקלה בתהליך הבדיקה, לא התקבלו תוצאות מאנליזה זו

3.3.10. פחמן אורגני (Total Organic Carbon – TOC) במוצק³

150~ מ"ג של קרקע טחונה לגודל גרגר > 250 מיקרומטר, הוכנסה לתוך כמוסות כסף. הפחמן המינרלי שבדוגמאות הקרקע הורחק בעזרת 10% HCl, לאחר מכן דוגמאות הקרקע יובשו וכמוסות הכסף נסגרו. הכמוסות הוכנסו למכשיר- " NC Soil Analyzer, flash EA " 1112 series" (כיול ורמות דיוק מופיעים בסעיף 3.3.9).

3.3.11. פחמן אורגני מומס (Dissolved Organic Carbon - DOC)

מיצוי מימי (ראה סעיף 3.3.4) הוכנס למכשיר " TOC-VCPN Total Organic Carbon Analyzer, SHIMADZU", אשר מכמת את ריכוז הפחמן האורגני המומס ואת ריכוז החנקן המומס במימיו. כיול בוצע באמצעות Potassium Biphthalate. טווח מדידה יעיל עבור פחמן 10-200 מ"גל" ועבור חנקן 5-100 מ"גל".

3.3.12. פוטנציאל חימצון אמון (פוטנציאל חינקון - ניטריפיקציה)

ארלנמאיריים, עם 20 גרם קרקע לחה, שלא עברה תהליך ייבוש, 90 מ"ל בופר פוספאט ו- 0.2 מ"ל תמיסת אמוניום סולפאט בריכוז 0.25 מולר, טולטלו בתנועה סיבובית בטמפרטורה קבועה של 37°C . בשלב זה הוסף 1.0 מ"ל תמיסת סודיום כלוראט לכל ארלנמאירי, אשר מונעת את חימצון הניטריט, והופעל שעון עצר. נאספו דוגמאות בנפח 5.0 מ"ל בשלושה זמנים: 5 דקות, 3 ו- 6 שעות. מייד עם איסוף הדוגמאות, הוסף 0.05 מ"ל של תמיסת מרטיולאט לעצירת הריאקציה. הדוגמאות נשמרו בטמפרטורה -18°C , ונשלחו לאנליזת ניטריט (ראה סעיף 3.3.8). קצב יצירת הניטריט המתקבל מריכוזו המדוד בשלושת הזמנים הנ"ל, מהווה מדד לגודל האוכלוסייה של מחמצני האמוניה בדוגמת הקרקע – פוטנציאל החינקון של הקרקע (R. W. Weaver., et al. 1994).

3.3.13. הרכב מכאני בשיטת ההידרומטר

40 גרם קרקע יבשת תנור ב- 105°C הורחפה ב- 100 מ"ל תמיסת 5% קלגון ו- 100 מ"ל מים מזוקקים. לאחר המתנה במשך עשר דקות לשקיעה וערבול במשך חמש דקות נוספות, התרחיף הועבר למשורה ונפחו הושלם ל- 1000 מ"ל על ידי הוספת מים מזוקקים. לאחר התייצבות טמפרטורת התרחיף, והמתנה בזמני שקיעה קצובים, נמדדה צפיפות התרחיף, וצפיפות תמיסת הקלגון, בעזרת הידרומטר לקרקעות. אחוז החרסית, הסילט והחול חושבו ביחס לסך מסת הקרקע שהורחפה (40 גרם) (חן י. וחובריו. 2008).

3.3.14. מוליכות הידראולית ברוויה

בקבוק מריוט, המכיל תמיסת KCl בריכוז 400 מ"גל", מהווה כלי כיבול ואספקה של תמיסת המקור, שמקיים עומד מים עליון קבוע במשך תהליך ההרוויה והבדיקה. שרוול PVC מהקידוח

³ בשל תקלה בתהליך הבדיקה, לא התקבלו תוצאות מאנליזה זו

המכיל דוגמת קרקע בלתי מופרת (ראה סעיף 3.2, איור 3.2 ג') חובר על ידי צינורית לנקודת יציאת המים מבקבוק המריוט (ראה איור 3.3). השרוול מוקם גבוה מעומד המים העליון, כך שלא תהיה זרימה של התמיסה אל הקרקע. הרוויית הקרקע שבקולונה בוצעה באופן איטי ומבוקר בכיוון זרימה שמנוגד לכוח המשיכה, תוך הנמכת השרוול בהדרגה מתחת לעומד המים העליון, כך שלא נותר אוויר בחללי הקרקע. לאחר השלמת תהליך ההרוויה, הוזרמה התמיסה דרך הקולונה בהפרש עומדים קבוע ומדוד, עד לקבלת מצב עמיד (ספיקה קבועה). בשלב זה נמדד נפח המים היוצאים מהקולונה בפרקי זמן קבועים. בעזרת חוק דרסי (משוואה 3.1) חושבה המוליכות ההידראולית ברוויה של הקרקע, שבגלעין.

$$K_s = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad (3.1)$$

כאשר: K_s – מוליכות ההידראולית ברוויה [אורך¹·זמן¹], Q – ספיקה [אורך³·זמן¹], A – שטח הפנים הניצב לזרימה [אורך²], ΔL – אורך הקולונה [אורך] ו- ΔH – הפרש עומדים בכניסה וביציאה מהקולונה [אורך].



איור 3.3. מערכת בקבוק המריוט ששימשה לבדיקת המוליכות ההידראולית ברוויה בדוגמה בלתי מופרת, שנדגמה בדחיקה ישירה. המערכת שומרת על עומד מים עליון קבוע בתחתית הבקבוק ועומד מים תחתון קבוע בפתח צינורית הניקוז.

3.4. מטאורולוגיה

נתוני גשם יומיים התקבלו מהשירות המטאורולוגי הישראלי, משלוש תחנות מדידה הקרובות ביותר לחלקות הדיגום העמוק: תחנת 'בני-דרור', הקרובה לחלקות BDKO ו-BDKY; תחנת 'תל-

יצחק', הקרובה לחלקות TI ו- GS; תחנת 'באר-טוביה', הקרובה לחלקה KV. נתוני הגשם, שהתקבלו, מכסים את פרק הזמן שבין השנים 1985 - 2010, שקדם למועד הדיגום העמוק. במודל להסעת כלוריד נלקח ערך ממוצע של 15 מ"גל' כריכוז קבוע של הכלוריד במי הגשמים, (גבירצמן, 2002). נתוני התאדות מחושבת יומית בשיטת 'Penman Monteith' התקבלו מהמחלקה למטאורולוגיה חקלאית של משרד החקלאות ופיתוח הכפר, משתי תחנות המדידה הקרובות ביותר לחלקות הדיגום העמוק: תחנת 'תל-מונד', הקרובה לחלקות BDKY, BDKO, TI ו- GS; תחנת 'נגבה', הקרובה לחלקה KV. נתוני ההתאדות המחושבת, שהתקבלו, מכסים פרק זמן של שמונה שנים בקירוב, שקדם למועד הדיגום העמוק. לצורך הארכת משך נתוני ההתאדות המחושבת, והתאמתם למשך הזמן של נתוני הגשם, בוצע שכפול נתונים אחורה בזמן עד לקבלת רצף נתונים של עשרים וחמש שנים, שקודמות למועד הדיגום העמוק (מידע זה נחוץ כקלט למודלים. פרטים נוספים בהמשך העבודה).

3.5. השקיה ודישון

נתונים של נפחי ההשקיה, וכמויות הדשנים החנקניים (אמון חנקתי) התקבלו מהחקלאים, שמעבדים את החלקות. על פי נתונים אלו, חושבו נפחי השקיה וכמויות דשנים ברזולוציית זמן יומית למשך תקופה התואמת לזו, שהתקבלה מהמטאורולוגיה (25 שנה).

3.5.1. פרדסים של מושב 'בני-דרור'

נתוני השקיה, דישון וריסוס התקבלו, על פי רוב ברזולוציית זמן יומית, מהתקופה 1.1.2005 - 31.10.2009. מקור מי האספקה לחלקות השתנה לאורך ציר הזמן. עד שנת 2002 מי ההשקיה הגיעו מבריכות חמצון קרובות, בין השנים 2002 - 2004, הגיעו קולחים ממט"ש 'קולחי השרון', נאגרו בבריכות החמצון, ומשם הוזרמו לצנרת ההשקיה ומשנת 2004 ואילך, קיים חיבור ישיר בין מט"ש 'קולחי השרון' לצנרת ההשקיה. איכות מי האספקה נקבעה על סמך דו"חות תקופתיים, שבוצעו במט"ש קולחי השרון בין נובמבר 2005 ליוני 2010. על פי דו"חות אלו, ממוצע ריכוזי החנקן האמוניקאלי והחנקן החנקתי הם 8 ו- 3 מ"גל' בהתאמה, הריכוזים המירביים הם 65 ו- 25 מ"גל' בהתאמה והריכוז המינימאלי הוא אפס עבור שניהם.

3.5.2. פרדס של קיבוץ 'תל-יצחק'

לחלקה זו אין ארכיון נתונים מסודר. נפחי השקיה וכמויות דישון ממוצעים הוערכו על פי דיווחי החקלאי. נפח המים השנתי חולק בין החודשים, על סמך נתוני משקעים והתאדות מחושבת, כך שבשבועות גשומים הופסקה ההשקיה, ואילו בשבועות עם התאדות מוגברת הוגדלו נפחי ההשקיה. מגמות אלו הושאו למגמות ההשקיה, שהתקבלו עבור החלקות של מושב 'בני דרור', השכן. מי האספקה נשאבים מבאר מים שפירים (אקוות החוף), שממוקמת בתוך שטח

החלקה (איור 3.1). נתוני איכות מי הבאר התקבלו ממאגרי המידע של השירות ההידרולוגי הישראלי (רשות המים). על פי נתונים אלו אין אמון במים, וריכוז החנקן הממוצע הוא 55 מ"ג/ל', המירבי הוא 75 מ"ג/ל' והמינימאלי הוא 23 מ"ג/ל'.

3.5.3 פרדס של מושב 'כפר-וורבורג'

לחלקה זו אין ארכיון נתונים מסודר. נפחי השקיה וכמויות דישון ממוצעים הוערכו על פי דיווחי החקלאי. נפח המים השנתי חולק בין החודשים, על סמך נתוני משקעים והתאדות מחושבת, כך שבשבועות גשומים הופסקה ההשקיה, ואילו בשבועות עם התאדות מוגברת הוגדלו נפחי ההשקיה. מגמות אלו הותאמו בהשראת מגמות ההשקיה, שהתקבלו עבור החלקות של המושבים 'בני דרור' ו-'תל-יצחק'. משנת 1995 מי האספקה מגיעים מחברת מקורות, והינם זהים למים השפירים, שמסופקים לבתים במושב. נתוני איכות המים התקבלו מחברת מקורות, אם כי אינם מייצגים פרק זמן ארוך ו/או ניטור לאורך זמן. הנתונים כוללים ריכוז מינימאלי ומירבי של כלוריד וחנקן שהם 0.1 ו-0.2 מ"ג/ל' עבור החנקן ו-138 ו-179 מ"ג/ל' עבור הכלוריד משנת 2011.

3.6 מודלים

המודלים מורכבים מפתרונות נומריים חד מימדיים (במימד האנכי - z), של משוואת החידור של ריצ'ארדס (משוואה 1.7) עבור זרימת מי נקבובים, ושל משוואות אדבקציה-דיספרסיה (משוואות 1.11-1.8) עבור הסעת מומסים. המשוואות נבחרו, מתוך הנחה, כי רכיבי הזרימה וההסעה העיקריים בתווך הלא רווי, מתקיימים בניצב לפני השטח, כך שניתן לפשט את התנועה ולהזניח את הרכיבים האופקיים. המודלים בוצעו באמצעות HYDRUS-1D גרסה 4.1, ושימוש בפונקציות הידראוליות מסוג van Genuchten-Mualem (משוואות 1.4 ו-1.5) (Mualem, 1976); van Genuchten, 1980).

פרופילי הקרקע חולקו לשכבות על פי ההרכב המכאני ונתוני תכולת הרטיבות, שהתקבלו מהדיגום העמוק. הערכה ראשונית, של הפרמטרים בעקום התאחיזה ופונקציית המוליכות ההידראולית, נעשתה על ידי התוכנה Rosetta Lite, גרסה 1.1. על פי קלט של צפיפות גושית ואחוזי חול, סילט וחרסית ושימוש ב-PTFs (van Genuchten, 1980; Schaap and Leij, 2001; Šimůnek et al., 2009). התהליך בוצע בנפרד עבור כל אחת מהשכבות, שנקבעו לכל מודל. הפרופילים של הפרמטרים הנ"ל כולל הצפיפות הגושית והנקבוביות (θ_s) מוצגים בעבודה זו בטבלאות המתארות את שכבות המודל.

המודלים המכויילים (תשעה מטרים) הוּארכו עד כמטר מעל לפני מי התהום בקירוב, כדי לקבל זמני הסעה ושטפים מציאותיים בתווך הלא רווי. תכונות המקטע הנוסף בעומק החתך נקבעו על

סמך הערכות מתוך לוגים של קידוחים עמוקים קרובים, שנלקחו מתוך ארכיון הקדוחים שבשירות ההידרולוגי. בעבודה זו שטפי החנקן למי התהום חושבו על סמך ריכוזי החנקן באזור הלא רווי, מעל הציצית הקפילארית. סוגיית התגובות הביוכימיות של צורוני חנקן באזור זה לא נידונה, ותרומתם (שלילית או חיובית) לשטפי החנקן למי התהום הוזנחה (רווה וחובריו 1972).

3.6.1. תנאי שפה וכיול מודל זרימה

תנאי שפה עליונה - מהווה נקודת השקה בין האטמוספירה החופשית לתווך קרקעי. השטף הפוטנציאלי של הנוזל בנקודה זו נשלט על פי תנאים חיצוניים, אולם השטף בפועל תלוי גם בתנאי לחות הקרקע קרוב לפני השטח. תנאי השפה העליונים יכולים להשתנות ממצב של שטף נתון למצב של עומד נתון, כתלות בהשקיה, משקעים, אידי, טרנספירציה והלחות בתת הקרקע. לכן, נקבעו תנאי השפה - 'Atmospheric BC with Surface Layer', עם עומד מירבי בפני השטח של 1 ס"מ, שמושפע ממשקעים, השקיה, אידי וחלחול. החלוקה בין אידי לדיות בהתאם לקבוע מקדם הדעיכה ולקלט משתנה בזמן של נתוני התאדות מחושבת ו- Leaf Area Index (LAI). קבוע מקדם הדעיכה שולט על דעיכת הקרינה, שנגרמת מהחיפוי שמעל לפני הקרקע, כפונקציה של זווית השמש, פיזור הצמחייה וסידור העלים, ערכו נע בין 0.5 ל- 0.75 (Šimůnek et al., 2009). קבוע מקדם הדעיכה נקבע על ערך 0.6 עבור הפרדסים שבעבודה זו.

תנאי שפה תחתונה - כל המודלים הוגדרו בתווך לא רווי, שמעל לעמודת מי התהום, כך שהשפה התחתונה מושפעת רק מתכונות הקרקע, שבסביבתה. על כן, תנאי השפה התחתונים הינם קבועים והוגדרו כ- 'Free Drainage', כלומר אפס גרדיאנט בעומד המטריצי (Šimůnek et al., 2009).

תנאי התחלה - פרופיל תכולת הרטיבות, שהתקבל מהדיגום העמוק, שימש כפרופיל ההתחלתי. קליטת המים על ידי השורשים הינה על פי הפונקציה של Feddes (1978) עם תחום לחצים, של קליטה אופטימאלית ופרמטרים, שמותאמים לעצי תפוז (1- ס"מ - 1000- ס"מ) ללא התחשבות בלחץ האוסמוטי. ערכים אלו נלקחו ממסד הנתונים, שזמין בחבילת התוכנות, של HYDRUS-1D.

כיול - נעשתה התאמה, בין פרופילי תכולת הרטיבות שנדגמו לבין אלו שהתקבלו מהמודלים, עבור מספר פרמטרים, שלא נבדקו בדיגום השדה ובבדיקות המעבדה - פירוס השורשים עם העומק, LAI והפרמטרים של הפונקציות ההידראוליות:

- עומק ופירוס שורשים ראשוני נקבע על פי תצפית במהלך הדיגום והערכות החקלאים.

- הפרמטרים של הפונקציות ההידראוליות הותאמו בתוך תחום ערכים המתאים להגדרת הקרקע הראשונית, שבוצעה בשדה, לתכולת הרטיבות ולתוצאות בדיקת ההרכב המכאני, שנבדקו במעבדה.
 - ערכי ה-LAI נקבעו בגבולות הטווח 6.1 - 8.6 (Cohen and Fuchs., 1986).
 - נבדקה מידת ההתאמה של פרופיל תכולת הרטיבות המדוד, שהתקבל מהמודל ביום הדיגום לאחר הרצה של 9131 ימים (25 שנה). הפרופיל כוייל כך, שמידת ההתאמה של ערכים אלו תהיה מירבית, תוך שמירה על גבולות טווח הערכים של כל אחד מהפרמטרים הנ"ל למרקם הקרקע.
- לצורך ביצוע ההתאמה הנ"ל, נכתבה תוכנית ב-MATLAB, שמקבלת קלט שכולל את קבצי הפלט שמייצרת תוכנת HYDRUS. הפלט של התוכנית הנ"ל מכיל הצגה, על מערכת צירים אחת, של עקומי תכולת הרטיבות שהתקבלו מהדיגום ושל אלו שהתקבלו מהמודל, וזאת בכדי לקבל התאמה ויזואלית. ובנוסף, התוכנית מחשבת מדדים להפרש בין העקומים הנ"ל: Root Mean Square Error (RMSE) ו-Mean Absolute Error (MAE) בכדי לכמת את מידת ההתאמה בין העקומים. כיול המודלים נעשה על ידי שילוב בין התאמה ויזואלית לבין RMSE ו-MAE (ההחלטה התקבלה בעיקר על סמך ההתאמה הויזואלית) (ראה נספח 8.1).

3.6.2. תנאי שפה וכיול מודל הסעת כלוריד

מודל הסעת הכלוריד מתואר על ידי משוואה 1.8, שטפי המים (q) נלקחו ממודל הזרימה המכיל (ראה סעיף 1.10). נקבעה סכמת שקלול בזמן (Time Weighting Scheme) על פי Crank-Nicholson, וסכמת שקלול במרחב (Space Weighting Scheme) על פי האלמנטים הסופיים של Galerkin. מקדם הדיפוזיה במים נקבע על ערך 1.6×10^{-2} [m²/יום] (Porter et al., 1960).

תנאי שפה עליונה – משתנים עם הזמן בהתאם לריכוז המומס בשטף המים הנכנס, ולכן הוגדרו כ-'Concentration Flux BC'.

תנאי שפה תחתונה – כל המודלים הוגדרו בתווך לא רווי, שמעל לעמודת מי התהום, כך שהשפה התחתונה מושפעת רק מתכונות הקרקע שבסביבתה. על כן, תנאי השפה התחתונים הינם קבועים והוגדרו כ-'Zero Concentration Gradient', כלומר אפס גרדיאנט ריכוזים (Šimůnek et al., 2009).

תנאי התחלה – פרופיל ריכוזי הכלוריד, שהתקבל מהדיגום העמוק, שימש כפרופיל ההתחלתי. כיול – נעשתה התאמה, של מקדמי הדיספרסיה של שכבות הקרקע, כך שפרופיל ריכוזי הכלוריד, שהתקבל מהמודל ביום הדיגום, יתאים ככל האפשר לפרופיל הכלוריד המדוד, כפי שבוצע עבור תכולת הרטיבות ומתואר בסעיף 3.6.1.

3.6.3. תנאי שפה וכיול מודל הסעת חנקן

מודל הסעת צורוני החנקן מתואר על ידי משוואות 1.9 – 1.11, שטפי המים (q) נלקחו ממודל הזרימה המכיל, ומקדמי הדיספרסיה ממודל הסעת הכלוריד המכיל (ראה סעיף 3.6.2). הנחת העבודה היא שתגובת החינקון מניטריט לחנקה מהירה באופן משמעותי מתגובת החינקון מאמון לניטריט, לכן, הצורון ניטריט הוזנח והמודל מדמה את הסעת הצורונים אמון וחנקה. משוואת הסעת האמון (משוואה 1.9) כוללת מקדם הספיחה $k_d = 3.5$ [ס"מ³/גרם] (Hanson et al., 2006). משוואת הסעת החנקה כוללת איבר מקור מהחינקון, של האמון, ואברי מבלע עבור קליטת השורשים ודה-ניטריפיקציה (משוואה 1.11). מקדם הדיפוזיה של צורוני החנקן נקבע על ערך 1.6 [ס"מ²/יום] (Milo et al., 2010). המשוואה כוללת איבר המגביל את ריכוז המומסים המירבי שיכול להיכנס אל תוך בית השורשים כיוון שישנה רוויה ביעילות קליטת החנקן על ידי השורשים, (Sorgona et al (2006) תומך בהנחה זו. תנאי התחלה – פרופילי ריכוזי האמון והחנקה, שהתקבלו מהדיגום העמוק, שימשו להערכת הפרופיל ההתחלתי.

כיול – נקבעו מקדמי קצב ראשוניים לריאקציות של צורוני החנקן ב- 30 ס"מ העליונים של הפרופיל. מבחני פוטנציאל חינקון בדוגמאות קרקע הראו שקצב החינקון בעומקים גדולים יותר מ- 30 ס"מ קטן משמעותית, לכן עומק זה נקבע כעומק בו מתרחש עיקר החינקון עם מקדם μ_{nit} גבוה במשוואות 1.9 ו- 1.11. קבועים התחלתיים לפני כיול: קצב נידוף $NH_4^+ - \mu_{vol} = 0.4$ ו-1 μ_{nit} (Lotse et al., 1992), קצב חינקון - $0.2 \mu_{nit}$ ו-1 (Hanson et al., 2006), קצב חיזור NO_3^- (דה-ניטריפיקציה) - $0.01 \mu_{dnit}$ ו-1 (Lotse et al., 1992). הריכוז המירבי של $N-NO_3^-$ שיכול להיקלט על ידי השורשים הוגבל בעקבות הכיול לערך של 30 מ"ג/ל. נעשתה התאמה, של פיזור וגודל מקדמי הקצב של הריאקציות הנ"ל, כך שפרופיל ריכוזי החנקה, שהתקבל בתום ריצת המודל לאורך 25 שנה, יתאים ככל האפשר לפרופיל, שהתקבל מנתוני הדיגום העמוק, כפי שבוצע עבור תכולת הרטיבות ומתואר בסעיף 3.6.1.

4. תוצאות⁴

4.1. פרופילים של תכולת רטיבות, כלוריד וחנקה והערכות שטפים ממוצעים

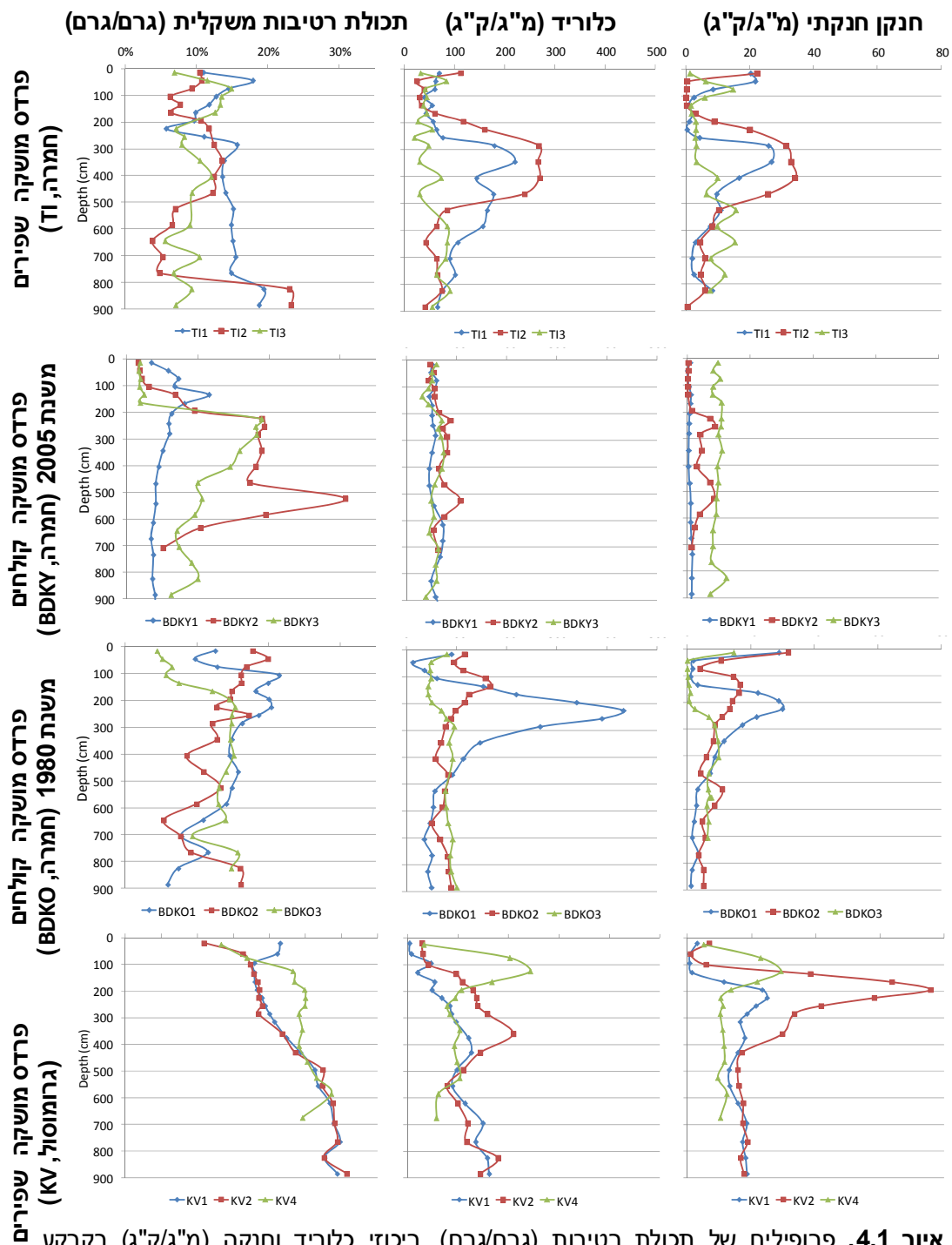
בשלושת הפרדסים בשרון נראית שונות רבה בהשוואה בין פרופילי קידוחים מאותה חלקה (טיפול), לעומת השונות המתקבלת בהשוואה בין פרופילים מחלקות שונות (איור 4.1). השונות בין הקידוחים קטנה בעומק האזור הלא רווי (עומק < 6 מטרים) לעומת בית השורשים והתנוך הלא רווי העליון (לדוגמה, פרופילי הכלוריד - איור 4.1). בהשוואה בין פרופילים של זוגות קידוחים מאותה חלקה, קיים דמיון בין אלו הקרובים לעומת הרחוקים, שאינם דומים זה לזה (הזוגות הקרובים: BDKO1, BDKO2 ; BDKY3, BDKY2 ; TI2, TI1 ; KV2, KV1 ; איור 4.1).

שטף מים ממוצע הוערך בכל אחד משלושת הפרדסים בשרון בשיטת CMB (משוואה 1.2) עם $P=600$ מ"מ/שנה גשם שנתי, $Cl_p=15$ מ"גל' כלוריד במי הגשם, $I=700$ מ"מ/שנה השקיה שנתי, $Cl_i=190$ מ"גל' כלוריד בקולחים (BDKO, BDKY) ו- $Cl_i=140$ מ"גל' כלוריד בשפירים (TI) ונתוני תכולת הרטיבות וריכוז כלוריד בעומקים גדולים משני מטרים (איור 4.1). להלן מוצגים טווחי הערכים שחושבו עבור כל אחת מהחלקות: $RF_{TI} = 90 - 160$ [מ"מ/שנה]; RF_{BDKY} ; $RF_{BDKO} = 170 - 320$ [מ"מ/שנה].

קיים דמיון רב בין פרופילי הכלוריד והחנקה בפרדסי השרון (איור 4.1). מקדמי מיתאם (R) בין פרופילים אלו נבדקו מתחת לבית השורשים (עומקים גדולים משני מטרים) עבור כל אחד מהפרופילים בארבעת הפרדסים. באזור השרון (קרקע חמרה), נתקבלו מיתאמים גבוהים בהרבה מאלו שהתקבלו בכפר-וורבורג (קרקע חרסיתית). טווחי ערכים ומובהקות (P value) המיתאמים הנמוכים בכל חלקה מוצגים להלן:

- TI (שפירים, חמרה): $R_{Cl-NO_3} = 0.82 - 0.99$, $P_{R=0.82} = 0.001$
- BDKY (קולחים משנת 2005, חמרה): $R_{Cl-NO_3} = 0.44 - 0.67$, $P_{R=0.44} = 0.13$
- BDKO (קולחים מתחילת שנות ה-80, חמרה): $R_{Cl-NO_3} = 0.54 - 0.98$, $P_{R=0.54} = 0.08$
- KV (שפירים, גרומוסול): $R_{Cl-NO_3} = -0.25 - 0.42$, no correlation

⁴ לפרק זה הוספו ביאורים של התוצאות, שמקומם הטבעי הוא ליד האיור ו/או הטבלה, וזאת כדי למנוע קפיצות בעמודים במהלך קריאת המסמך. פרק הדיון מרחיב מנקודת מבט פרשנית ופחות צמוד לתוצאות.



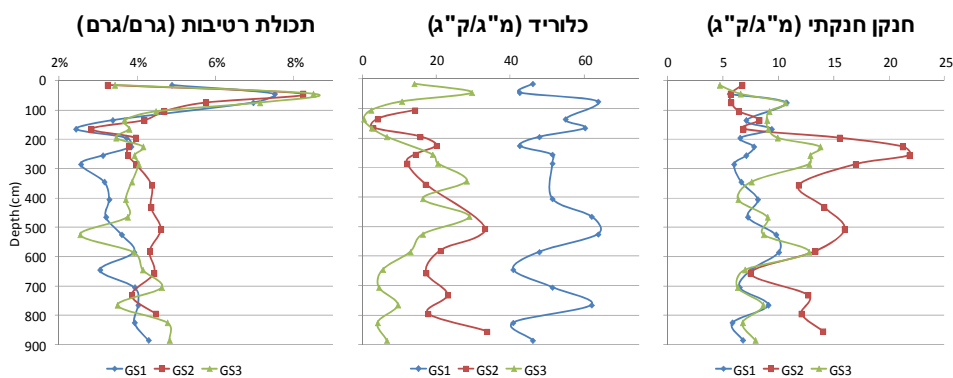
איור 4.1. פרופילים של תכולת רטיבות (גרם/גרם), ריכוזי כלוריד וחנקת (מ"ג/ק"ג) בקרקע מארבעת הפרדסים שנדגמו: TI – מושקה שפירים (חמרה); BDKY – מושקה קולחים משנת 2005 (חמרה); BDKO – מושקה קולחים משנת 1980 (חמרה); KV – מושקה שפירים (גרומוסול). בכל פרדס נקדחו שלושה קידוחים, שניים קרובים (> 30 מטר) ואחד רחוק (< 100 מטר). זוגות הקידוחים הקרובים הם: TI1, TI2; BDKY2, BDKY3; BDKO2, BDKO1; KV2, KV1.

הערכה של שטף חנקה שנתי ממוצע (מצב עמיד) מתחת לבית השורשים (עומקים גדולים משני מטרים) חושב עבור שלושת הפרדסים שבשרון. השטפים חושבו על ידי הכפלת שטף המים הממוצע (חושב לעיל) בריכוז החנקה הממוצע במי החללים של כל אחד מהפרופילים. טווחי הערכים שהתקבלו משלושה קידוחים בכל חלקה מוצגים להלן ביחידות של ק"ג חנקן חנקת'דונם\שנה:

- TI : $Q_{N-NO_3} = 9 - 14$
- BDKY : $Q_{N-NO_3} = 5 - 22$
- BDKO : $Q_{N-NO_3} = 8 - 13$

שטף החנקן הממוצע בתשעת הפרופילים הוא 12 ק"ג חנקן חנקת'דונם\שנה. גודלו של שטף זה נמצא בסדר גודל של שטפי החנקן שנכנסים בפני השטח ומקורם במי ההשקיה (השקיה ללא תוספת דשן). מי ההשקיה בשלושת פרדסי השרון עשירים יחסית בחנקן, כיוון שמקורם בקולחים או באקווה. עבור הפרדס שבכפר-וורבורג (גרומוסול) לא בוצע חישוב שטף החנקן הממוצע, בגלל מחסור בנתוני שטפים וריכוזים בפני השטח. יחד עם זאת, ממוצע ריכוזי החנקה במי החללים תחת הפרדס הזה גבוה מזה שהתקבל באתרים האחרים (טבלה 4.1).

פרופילי תכולת רטיבות, כלוריד וחנקה נבדקו גם בשטח חקלאי שנמצא סמוך לקריית שלמה שבשרון (איור 4.2). GS1 הוא קידוח שבוצע בשטח שלא עובד בשנה שקדמה לדיגום, דבר שיכול להסביר את פרופיל הכלוריד הלא שטוף שנדגם (איור 4.2), ושני הפרופילים הנוספים, GS2 ו-GS3, מאפיינים חלקה עם גידולים משתנים (שדה תפוחי אדמה בחורף 2009-2010 ואבטיחים במועד הדיגום). הקרקע והאזור הלא רווי באזור זה חוליים מאוד (ראה תכולת רטיבות באיור 4.2). יישום רמות גבוהות של חנקן בגידולים באזור זה (תפוחי אדמה לדוגמה) והמרקם הגס הם כנראה הגורמים לרמות החנקה הגבוהות בקידוחי השאיבה הרדודים למי התהום שבסביבת חלקות אלה (איור 3.1). בשל מחסור בנתונים על העיבוד החקלאי, לא בוצעו אומדני מילוי חוזר, ושטף חנקן ממוצע למי התהום.



איור 4.2. פרופילים של תכולת רטיבות (גרם/גרם), ריכוזי כלוריד וחנקן חנקתי (מ"ג/ק"ג) באזור הלא רווי בשטח חקלאי באזור קריית שלמה שבשרון. GS1 - שטח חקלאי שעובד בעבר, אך בשנה שקדמה לדיגום, לא עבר עיבוד חקלאי (שדה קוצים). GS2, GS3 - שטח חקלאי עם גידולי מיקשה משתנים (אבטיחים במועד הדיגום).

4.2. ריכוזי אמון בתוך הלא רווי

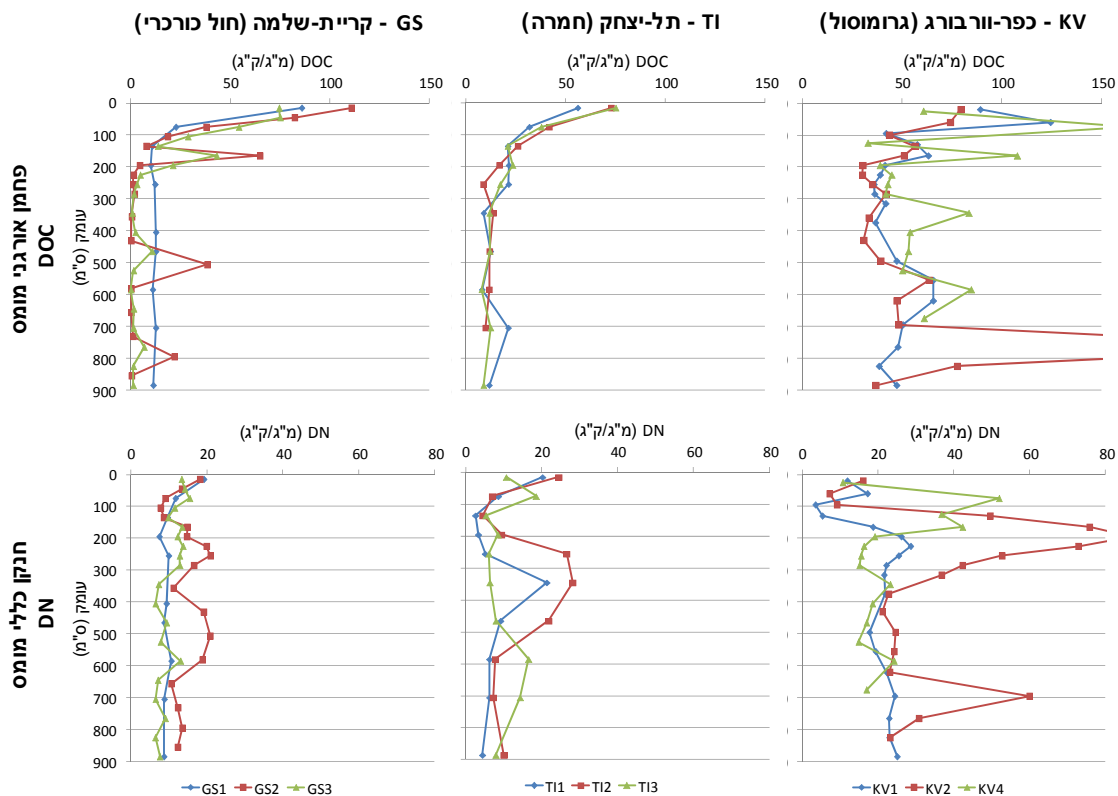
בבדיקת פרופילי האמון התקבלו ערכים נמוכים בעומק החתך בכל האתרים (KV, TI, BDKY) ו-GS), פרט לפרדס שהושקה בקולחים מתחילת שנות השמונים (BDKO). בשלושת הפרופילים שהתקבלו עבור BDKO, ישנה נוכחות משמעותית של אמון בכל עומק החתך, והתקבל ריכוז ממוצע שהינו גדול באופן מובהק מזה שהתקבל בשאר האתרים (t-Test) (טבלה 4.1).

טבלה 4.1. ריכוזי חנקן חנקתי וחנקן אמוניקלי ממוצעים תחת חמשת אתרי המחקר (מ"ג/ק"ג). הערכים חושבו על ידי שימוש בדוגמאות משלושת הקידוחים שבוצעו בכל חלקה ומכל עומק החתך שנדגם. n – מספר הדוגמאות ששימש לחישוב הערך הממוצע וסטיית התקן.

מיקשה, חול כורכרי (GS) שפירים		פרדס, גרומוסול (KV) שפירים		פרדס, חמרה (TI) שפירים		פרדס, חמרה קולחים משנת 2004 (BDKY)		פרדס, חמרה קולחים משנת 1980 (BDKO)		
GS (n=56)		KV (n=51)		TI (n=58)		BDKY (n=55)		BDKO (n=58)		
N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	
9.5	1.4	18.5	3.0	9.4	0.6	4.6	0.5	8.6	8.1	ממוצע
3.8	1.7	14.9	1.5	9.0	1.0	4.2	1.0	7.9	2.2	סטיית תקן

4.3. פחמן אורגני וחנקן כללי מומסים

ריכוזי פחמן אורגני וחנקן כללי מומסים נבדקו בעומק הפרופילים של שלושת האתרים שמושקים במים שפירים (KV, TI) ו-GS; איור 4.3). בכפר-וורבורג (קרקע כבדה - גרומוסול) נמצאו ריכוזי פחמן אורגני מומס גבוהים וקבועים בקירוב לכל עומק החתך (~50 מ"ג/ל). בתל-יצחק (קרקע בינונית - חמרה) ובקריית שלמה (קרקע קלה - חול כורכרי) נמצאו ריכוזי פחמן אורגני מומס גבוהים קרוב לפני השטח, אשר דועכים עם העומק בשני המטרים העליונים של החתך (בית השורשים) ומגיעים מתחת לבית השורשים לערכים בינוניים בתל-יצחק (~10 מ"ג/ל) ולערכים נמוכים יותר בקריית שלמה.



איור 4.3 פרופילים, של פחמן אורגני מומס (DOC) וחנקן כללי מומס (DN), בשלושת האתרים שמוסקים במים שפירים: **KV** – כפר-וורבורג, **TI** – תל-יצחק ו-**GS** – קריית-שלמה. האתרים מתאפיינים בתכולות רטיבות (אחוז חרסית) עולות משמאל לימין (שמאל – קרקע קלה, ימין – קרקע כבדה). הפחמן האורגני המומס והחנקן בעומק מותאמים למגמות של הרטיבות. כמו כן בולטת הירידה החזקה בפחמן האורגני בשני המטרים העליונים של החתכים גסי הגרגר לעומת פרופיל אחיד יותר בחתך החרסיתי.

4.4. פוטנציאל חמצון אמון (פוטנציאל חינקון - ניטריפיקציה)

בכל הדוגמאות העמוקות, שהוצאו מקידוחי הדיגום העמוק שבוצעו בדחיקה ישירה, התקבלו ערכי פוטנציאל חינקון מתחת ליכולת המדידה. לכן, בוצעו בדיקות נוספת בדוגמאות שהוצאו בקידוחים ידניים לעומק של 90 ס"מ בחלקות BDKO ו- TI (טבלה 4.2). ב- TI (השקיה בשפירים) מראות התוצאות, שפוטנציאל חינקון גבוה נמצא ב- 15 הס"מ העליונים של הקרקע וכמעט מתאפס בעומקים גדולים מ- 45 ס"מ. גם ב- BDKO (השקיה בקולחים) פוטנציאל החינקון הגבוה ביותר הינו ב- 15 הס"מ העליונים, אך מתחת ל- 15 ס"מ התקבלו ערכים נמוכים שמשתנים ללא מגמה אחידה.

טבלה 4.2. פוטנציאל חניקון במדגמי קידוחים ידניים שבוצעו לעומק 90 ס"מ בפרדסים במושב בני-דרור (BDKO) ובקיבוץ תל-יצחק (TI) (ממוצע של שלוש דוגמאות בכל אתר). [מ"ג NO₂/יום/ליטר].

עומק (ס"מ)	0-15	15-30	30-45	45-60	60-75	75-90
BDKO	0.60	0.03	0.13	0.20	0.08	0.17
TI	1.27	0.48	0.24	0.08	0.05	0.03

4.5. הרכב מכאני

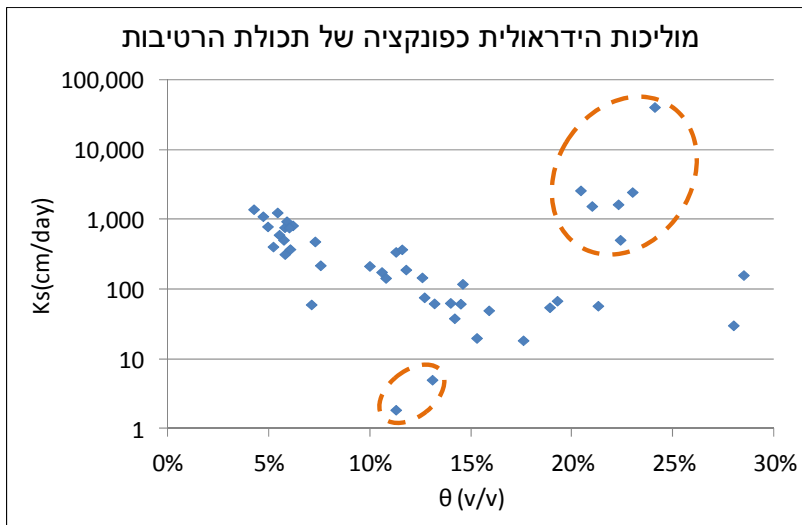
בדיקת ההרכב המכאני לצורך קביעת פילוג גודל הגרגר בוצעה בשלושת האתרים, שבהם הוחלט לכייל מודל: BDKO, TI ו-KV. בכל קידוח (סה"כ 9) נעשו 4-7 בדיקות (סה"כ 49), בדוגמאות שנבחרו באזורים שנחשדו כבעלי מרקם שונה על סמך רישומי יומן הקידוח, ועל פי פרופילי תכולת הרטיבות. בשרון, החתך הוא בינוני, ופילוג גודל הגרגר הממוצע נופל במשולש הקרקעות בתחום sandy clay loam. TI קרוב יותר לאפיק נחל פולג והתווך הלא רווי מתחתיו מעט יותר חרסיתי בהשוואה לזה שמתחת ל-BDKO. שכבת הקרקע העליונה (0-30 ס"מ) בפרדסי השרון חולית יותר (sandy loam) מהממוצע באזור הלא רווי של אזור זה, אשר מכיל גם שכבות חרסיתיות יחסית (טבלה 4.3). התווך הלא רווי מתחת ל-KV הינו אחיד יחסית וחרסיתי (clay) (טבלה 4.3).

טבלה 4.3. פילוג גודל הגרגר (% משקלי) בעומקים שונים בשלושת הקידוחים, שנבחרו לכיול המודלים: BDKO2, TI1 ו-KV2. טווחי הערכים והממוצעים, המוצגים בטבלה, הינם מייצגים עבור האתר כולו (שלושה קידוחים בכל אתר).

KV2				TI1				BDKO2			
חרסית	סילט	חול	עומק (ס"מ)	חרסית	סילט	חול	עומק (ס"מ)	חרסית	סילט	חול	עומק (ס"מ)
42	25	33	20	17	1	82	15	13	6	81	15
44	24	32	60	25	0	75	45	8	3	89	45
49	18	33	225	19	2	79	195	36	12	52	135
58	15	28	555	26	4	70	465	25	8	67	525
58	17	25	885	35	10	55	825	15	3	82	765
42-62	13-28	23-33	טווח ערכים	7-50	0-21	29-92	טווח ערכים	1-45	2-12	52-96	טווח ערכים
51	19	29	ממוצע	22	4	74	ממוצע	21	6	73	ממוצע

4.6. מוליכות הידראולית רוויה בגלעינים בלתי מופרים

מוליכות הידראולית ברוויה נבדקה ב- 45 דוגמאות. ב- 37 דוגמאות התקבלו תוצאות סבירות, וב- 8 דוגמאות התוצאות שהתקבלו סותרות הערכות שמתקבלות ע"י PTFs, המבוססות על נתוני פילוג גודל גרגר של דוגמאות סמוכות. בשש דוגמאות התקבלו מוליכויות גבוהות מהצפוי ובשתי דוגמאות התקבלו מוליכויות נמוכות מהצפוי (איור 4.4). המוליכויות הסוטות כלפי מעלה נמדדו בקרקעות שהינן כבדות יחסית (רטיבויות גבוהות מ- 20% ויותר מ- 25% פרקצייה חרסיתית ברוב המקרים), ככל הנראה בגלל קיומם של נתיבי זרימה מועדפים בגלעיני הקרקע. נתיבי זרימה מועדפים אלה יכולים להיווצר בצורה מלאכותית בעת הקידוח ובשל הוצאת הגלעין אל פני הקרקע, או שהינם נתיבים אמיתיים שקיימים בתת הקרקע (פחות סביר בדוגמאות עמוקות). שתי הנקודות בהן המוליכויות נמוכות מהצפוי הן דוגמאות מהחלק העמוק ביותר של שרוול הדיגום (שרוולי הדיגום נחתכו לדוגמאות שמייצגות 30 ס"מ כל אחת, ראה סעיף 3.2). דוגמאות אלה דחוסות בממוצע יותר מהדוגמאות שבמעלה שרוול הדיגום. דחיסה זו גרמה ככל הנראה להעלאת הצפיפות הגושית והורדת המוליכות ההידראולית בדוגמאות אלה. אמינות הבדיקה רק ב- 80% מהדוגמאות וזמן הבדיקה הארוך, גרמו להעדפה של הערכות המוליכות ההידראולית בעזרת PTFs ללא שימוש בתוצאות בדיקה זו.



איור 4.4. מוליכויות הידראוליות שנמדדו ישירות על גלעיני הקרקע, שהוצאו בדחיקה ישירה. ציר אופקי – ממוצע הרטיבות הנפחית של הדוגמאות הסמוכות (מעל ומתחת לגלעין הנבדק). ציר אנכי (לוגריתמי) – מוליכות הידראולית ברוויה.

4.7. כיוול מודלים של זרימה והסעת כלוריד וחנקן

כיוול שלושה מודלים על פי תצפיות של האזור הלא רווי תחת פרדסים: בני דרור – על פי הקידוח BDKO2; תל-יצחק – על פי הקידוח T11; כפר-וורבורג – על פי הקידוח KV1. בטבלה 4.4 (א' - ג') מופיע פירוט חלוקת פרופילי הקרקע לשכבות, ופרמטרים של הפונקציות ההידראוליות (van Genuchten Mualem), צפיפות גושית, דיספרסיביות וקבועי קצב לריאקציות של חנקן במודלים המכויילים (לאחר הארכתם עד למטר בקירוב מעל מי התהום). תכונות השכבות העמוקות מתשעה

מטרים בשלושת המודלים מבוססות על הערכות, שבוצעו בעזרת לוגים של קידוחים עמוקים מהסביבה הקרובה (ספריית השירות ההידרולוגי). בשלושת המודלים פרוסים השורשים בעומקים 0 עד 60 ס"מ עם צפיפות מירבית בעומק 30 ס"מ. קליטת החנקן במודל הוגדרה כסבילה, כך שהחנקן נקלט בשורשים עם המים. כדי לשמור על התאמה בין רמת ריכוזי החנקן החנקתי המדודים לאלה שבמודל, הוגבל הריכוז המירבי שיכול להיקלט ביניקת השורשים. הגבלה זו נעשתה על ידי הפרמטר f_{NO_3} (משוואה 1.11), שמגדיר סף ריכוז מירבי עבור חנקן חנקתי שיכול להיקלט על ידי השורשים. בסיום תהליך הכיול של שלושת המודלים, התקבל ערך $f_{NO_3} = 30$ מ"גל' חנקן חנקתי. כלומר, כאשר ריכוז החנקן החנקתי במי הנקבובים, שבבית השורשים, קטן מ-30 מ"גל', ייקלט החנקן בשורשים בריכוז השווה לריכוזו בבית השורשים. כאשר הריכוז בבית השורשים גדול מ-30 מ"גל' חנקן חנקתי, ייקלט החנקן בשורשים בריכוז קבוע שערכו 30 מ"גל' חנקן חנקתי.

טבלה 4.4 א'. פרמטרים של מודל הזרימה וההסעה המכיל לנתוני הדיגום העמוק מתחת לפרדס בבני דרוך – BDK02

תגובות NO ₃	תגובות NH ₄		מקדמי זרימה והסעה									
	Denit. (יום ⁻¹)	nit. (יום ⁻¹)	vol. (יום ⁻¹)	Disp. (מ"ס)	B.D (גרם · ס"מ ⁻³)	l	Ks (יום ⁻¹ · מ"ס)	n	α (יום ⁻¹ · מ"ס)	θs	θr	עומק (מטרים)	שכבה
0.0025	0.2	0.05	4	1	0.5	217	1.5	0.035	0.552	0.064	0-0.15	1
0.001	0.2	0	4	1	0.5	217	1.5	0.035	0.552	0.064	0.15-0.3	2
0	0.05	0	4	1.4	0.5	42	1.4	0.023	0.440	0.074	0.3-0.45	3
0	0	0	4	1.4	0.5	42	1.4	0.023	0.440	0.074	0.45-1.5	4
0	0	0	0.1	1.4	0.5	55	1.5	0.025	0.435	0.068	1.5-2.7	5
0	0	0	0.1	1.5	0.5	75	1.6	0.029	0.400	0.058	2.7-5.7	6
0	0	0	1	1.6	0.5	233	2.4	0.030	0.364	0.055	5.7-7.9	7
0	0	0	0.5	1.6	0.5	30	1.4	0.025	0.377	0.065	7.9-9	8
0	0	0	12	1.5	0.5	139	1.9	0.028	0.399	0.060	9-21	9

טבלה 4.4 ב'. פרמטרים של מודל הזרימה וההסעה המכיל לנתוני הדיגום העמוק מתחת לפרדס בתל-יצחק – T11

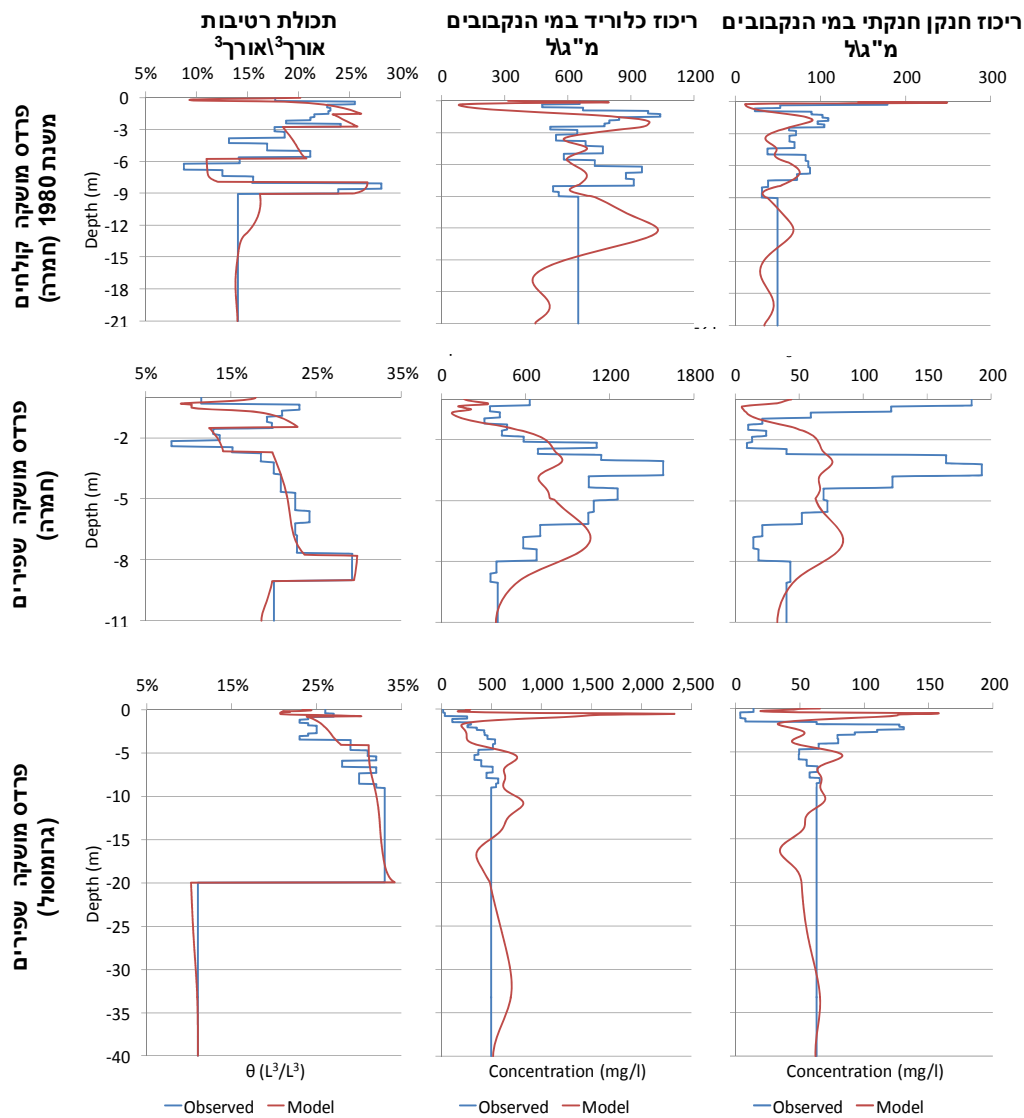
תגובות NO ₃	תגובות NH ₄		מקדמי זרימה והסעה									
	Denit. (יום ⁻¹)	nit. (יום ⁻¹)	vol. (יום ⁻¹)	Disp. (מ"ס)	B.D (גרם · ס"מ ⁻³)	l	Ks (יום ⁻¹ · מ"ס)	n	α (יום ⁻¹ · מ"ס)	θs	θr	עומק (מטרים)	שכבה
0.0025	0.2	0.05	3	1	0.5	206	1.5	0.036	0.559	0.069	0-0.1	1
0.001	0.1	0	3	1	0.5	206	1.5	0.036	0.599	0.069	0.1-0.3	2
0	0.01	0	3	1.5	0.5	42	1.4	0.024	0.411	0.073	0.3-0.85	3
0	0	0	3	1.5	0.5	42	1.4	0.024	0.411	0.073	0.85-1.5	4
0	0	0	3	1.4	0.5	172	1.9	0.028	0.431	0.064	1.5-2.65	5
0	0	0	3	1.5	0.5	65	1.6	0.025	0.406	0.068	2.65-4.95	6
0	0	0	30	1.5	0.5	65	1.6	0.025	0.406	0.068	4.95-7.75	7
0	0	0	30	1.4	0.5	40	1.3	0.023	0.400	0.073	7.75-9	8
0	0	0	30	1.5	0.5	75	1.6	0.029	0.400	0.058	9-11	9

טבלה 4.4 ג'. פרמטרים של מודל הזרימה וההסעה המכיל לנתוני הדיגום העמוק מתחת לפרדס בכפר-וורבורג – KV1

תגובות NO ₃	תגובות NH ₄		מקדמי זרימה והסעה									
	Denit. (יום ⁻¹)	nit. (יום ⁻¹)	vol. (יום ⁻¹)	Disp. (מ"ס)	B.D (גרם·ס"מ ⁻³)	l	Ks (ס"מ·יום ⁻¹)	n	α (ס"מ ⁻¹)	θ _s	θ _r	עומק (מטרים)	שכבה
0	0.09	0.01	3	1.3	0.5	34	1.3	0.018	0.521	0.100	0-0.1	1
0	0.08	0.01	3	1.3	0.5	34	1.3	0.018	0.521	0.100	0.1-0.2	2
5.5E-4	0.025	0	3	1.3	0.5	20	1.3	0.022	0.503	0.103	0.2-0.75	3
0	0	0	3	1.2	0.5	87	1.3	0.020	0.400	0.099	0.75-4.05	4
0	0	0	3	1.2	0.5	57	1.3	0.025	0.450	0.110	4.05-9	5
0	0	0	3	1.2	0.5	57	1.3	0.025	0.450	0.110	9-20	6
0	0	0	3	1.5	0.5	307	2.4	0.030	0.395	0.058	20-40	7

Denit – דניטרפיקציה, nit – ניטרפיקציה, vol – נידוף, Disp – דיספרסיות, B.D – צפיפות גושית, l, K_s, n, α, θ_s ו- θ_r – מקדמים הידראוליים של משוואות ואן גנונטן מועלם.

פרופילי תכולת הרטיבות וריכוזי הכלוריד והחנקה, שהתקבלו מהמודלים לאחר הרצה במשך עשרים וחמש שנים עם תנאי שפה עליונים משתנים בזמן, מוצגים באיור 4.5. הפרופילים שהתקבלו מהמודלים מוצגים על רקע הפרופילים שהתקבלו מנתוני הדיגום העמוק. עבור החלקות שמעובדות על ידי מושב בני דרור התקבל רישום יומי של נתוני ההשקיה והדישון משנת 2005 ועד מועד הדיגום. נתונים אלו אפשרו התאמת מגמות טובה יחסית בין פרופילי תכולת הרטיבות וריכוזי המומסים, שנדגמו, לאלו שהתקבלו מהמודל. עבור הפרדס שמעובד על ידי קיבוץ תל-יצחק לא התקבל רישום של נתוני ההשקיה והדישון ברזולוציית זמן יומית, אלא הערכה של כמויות שנתיות ממוצעות מפי החקלאי. בדומה לפרדס של קיבוץ תל-יצחק, גם בפרדס של מושב כפר-וורבורג אין רישום של נתוני ההשקיה והדישון ברזולוציית זמן יומית, אלא הערכה של כמויות שנתיות ממוצעות של החקלאי. בנוסף, בכפר-וורבורג אין נתונים מדויקים של איכות מי ההשקיה, פרט לריכוז מירבי ומינימאלי של הכלוריד והחנקה במהלך שנת 2011, שהתקבלו מחברת מקורות. לכן, התאמת המגמות, בין פרופילי תכולת הרטיבות וריכוזי המומסים, שנדגמו, לאלו שהתקבלו מהמודל הינה פחות טובה מזו שהתקבלה במודל שבבני-דרור.



איור 4.5. התאמה בין פרופילים שהתקבלו מהתצפיות, לאלו שהתקבלו מהפתרונות הנומריים של משוואות הזרימה וההסעה. מוצגים פרופילי תכולת הרטיבות, ריכוזי הכלוריד והחנקן החנקתי משלושת החלקות שכויל בהן מודל (BDKO2, TI1 ו-KV1). הפרופילים המוצגים הינם לאחר הארכה עד למטר בקירוב מעל מי-תהום. תכונות המקטע המוארך (עומקים גדולים מתשעה מטרים) נקבעו על סמך הערכות מתוך לוגים של קידוחים עמוקים קרובים שנלקחו מארכיון השירות ההידרולוגי, כך שבמקטעים אלו, העקומים הכחולים אינם מייצגים תצפיות.

4.8. מאזני מים וחנקן במודלים המכויילים

מאזן מים שנתי ממוצע מתוך נתוני המודלים המכויילים מוצג בטבלה 4.5. החלחול למי תהום שמתקבל מהנחת מצב עמיד (משוואה 1.2), על פי פרופילי הדיגום העמוק בבני-דרור ובתל-יצחק, הוא 215 ו-125 מ"מ\שנה בהתאמה. המודלים המכויילים חוזים שטפי מילוי חוזר של 207 ו-135 מ"מ\שנה בהתאמה. השטפים שנחזים על ידי המודלים דומים לאלו שהתקבלו בהנחת מצב עמיד והדבר מחזק את הקירוב הגס שבוצע בשיטת CMB.

טבלה 4.5. מאזן מים שנתי ממוצע של שלושת הפרדסים מתוך נתוני המודלים המכויילים (KV1, TI1, BDKO2). הנתונים התקבלו לאחר הרצה במשך עשרים וחמש שנים על פי תנאי שפה עליונים מהשנים 1985-2010. השינוי באוגר של האזור הלא רווי הינו זניח ביחס לאוגר עצמו, שהוא בממוצע 3.4 מטרים בבני-דרור, 2.3 מטרים בתל-יצחק ו- 8.4 מטרים בכפר-וורבורג.

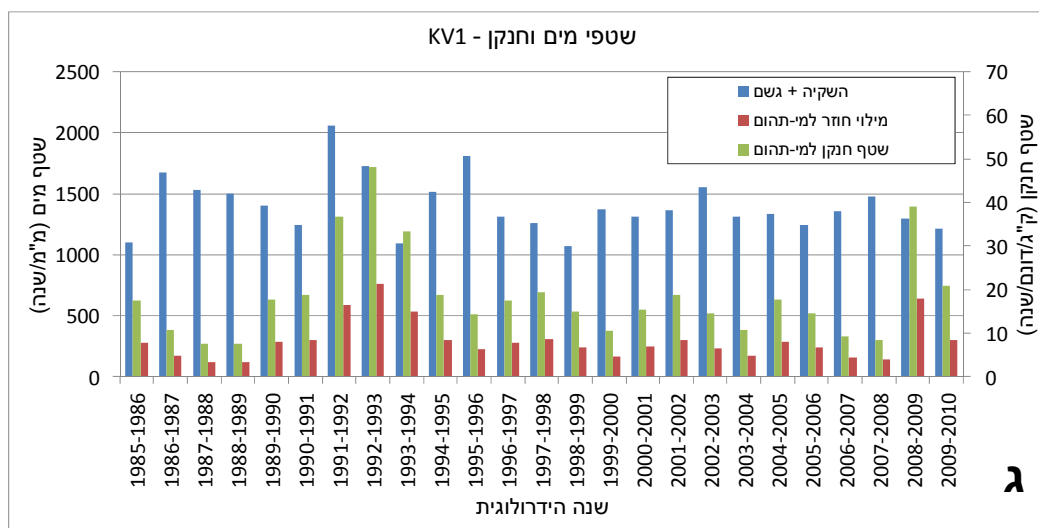
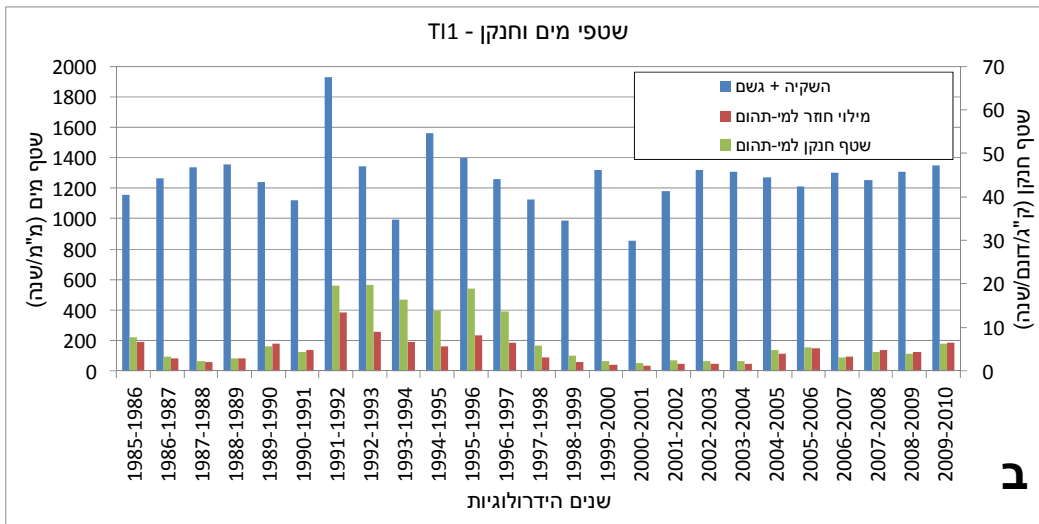
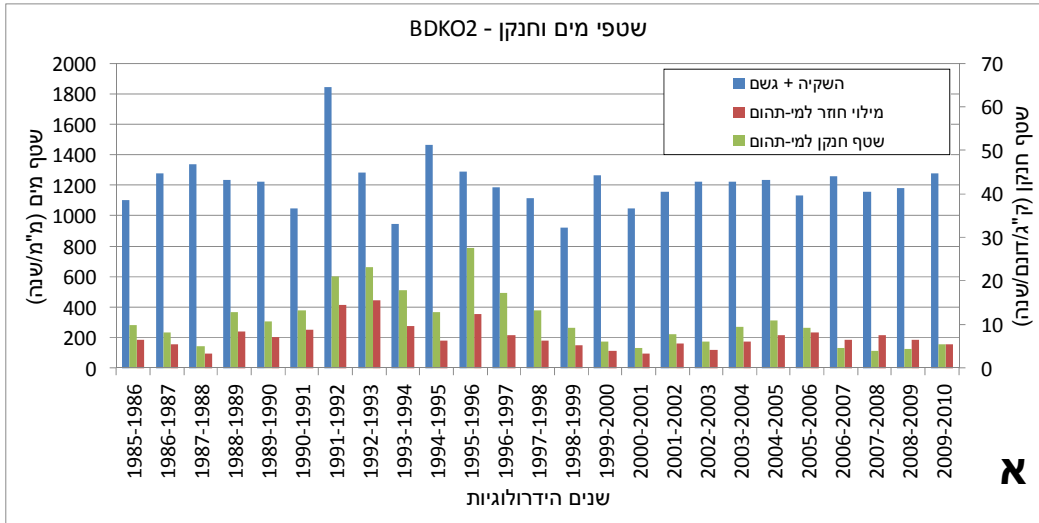
KV1	TI1	BDKO2	
1404	1188	1216	גשם + השקיה (מ"מ)
100	14	31	אידי (מ"מ)
1013	1037	970	יניקת מים על ידי שורשים (מ"מ)
294	135	207	מילוי חוזר למי-תהום (מ"מ)
-3	2	8	שינוי באוגר - ΔS (מ"מ)

מאזן חנקן שנתי ממוצע בוצע מתוך נתוני המודלים המכויילים, ומוצג בטבלה 4.6. ממאזני החנקן, ניתוח נתוני הדישון, מי ההשקיה והמודלים עולה כי קיימים שטפי חנקן משמעותיים אל מי התהום. אחוז החנקן שנכנס אל מי התהום, מתוך סך כל החנקן המיושם בפני השטח, הינו גבוה בשלושת החלקות ומהווה 28% בבני-דרור, 21% בתל-יצחק ו- 38% בכפר-וורבורג (רמת הדישון בפרדס שבכפר-וורבורג גבוהה במיוחד ביחס לפרדסים שנבדקו בשרון). בשלושת הפרדסים התקבלה קליטת חנקן על ידי השורשים של 23 - 26 ק"ג לדונם לשנה בדומה להמלצות הדישון לפרדסים מניבים (20 - 25 ק"ג לדונם לשנה. משרד החקלאות ופיתוח הכפר, 2012). הפרדס שמושקה בקולחים משנת 1980 הינו היחידי עם ריכוזי אמון משמעותיים בעומק וכפי שניתן לראות ממאזן החנקן שמוצג כאן, ישנה שטיפה איטית של אמון למי התהום (1 ק"ג חנקן אמוניקלידונם\שנה בקירוב).

טבלה 4.6. מאזן חנקן שנתי ממוצע (ק"ג/דונם/שנה) מתוך נתוני המודלים המכויילים של שלושת הפרדסים (KV1 ו- TI1 , BDKO2). הנתונים התקבלו לאחר הרצה של עשרים וחמש שנים, על פי נתונים מהשנים 1985-2010. הקלט בפני השטח כולל חנקן שמקורו במי ההשקיה וחנקן שמקורו בדשנים (אמון חנקתי בעיקר).

KV1		TI1		BDKO2		ק"ג/דונם/שנה
N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	
24	24	21	12	18	21	סה"כ כניסה בפני השטח
18	-18	9	-9	14	-14	חימצון אמון (חינקון)
23	3	22	1	19	4	יניקה על ידי שורשים
0	2	0	2	0	3	נידוף
18	0	7	0	10	1	שטף אל מי-תהום
2	---	1	---	3	---	דה-ניטריפיקציה
-1	1	0	0	0	-1	ΔN

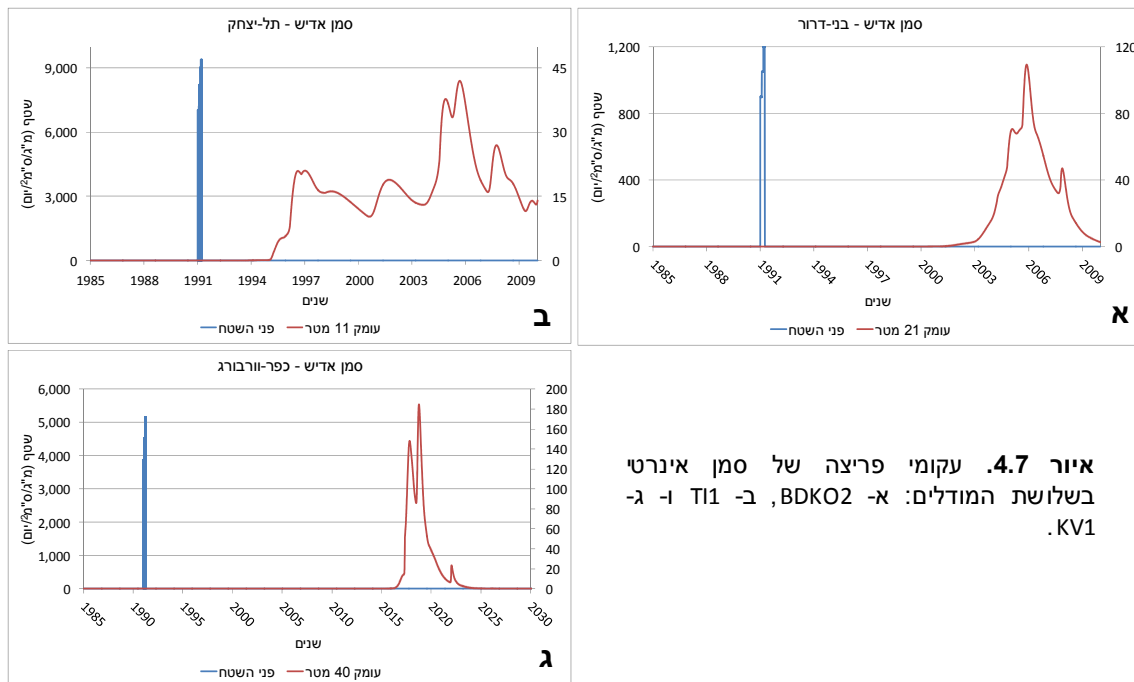
נוסף לשטפים ומאזנים ממוצעים, ישנה חשיבות לבחינת פירוס השטפים עם הזמן. איור 4.6 (א') - ג' מציג את השתנות שטפי המים בפני השטח, ואת שטפי המילוי החוזר והחנקן אל מי התהום שהתקבלו מהמודלים המכויילים כפונקציה של הזמן. ניתן להבחין שעובי גשם גדול ושטף מים גבוה אל מי התהום, שבא בעקבותיו, הם הגורמים המשמעותיים אשר משפיעים על שטף החנקן אל מי התהום. שנות התשעים הגשומות יחסית (1991-1997 באזור זה) הן גם השנים עם שטפי החנקן הגבוהים במודלים של שני האתרים בשרון.



איור 4.6. שטפי מים בפני השטח ושטפי מילוי חוזר וחנקן למי התהום על פי המודלים המכויילים: א- בני-דרור (פרופיל של 21 מטר), ב- תל-יצחק (פרופיל של 11 מטר) ו- ג- כפר-וורבורג (פרופיל של 40 מטר).

4.9. הדמיות של סמנים אינרטיים (אדישים) במודלים המכילים

בכדי לבחון את זמן הגעת המומסים ואופי השטף בקרבת מי התהום, הוזן בכל אחד משלושת המודלים המכילים, קלט של סמן אדיש בפני השטח. הסמנים הוחדרו בריכוזים גבוהים מאוד במשך חודש יוני 1991 (לפני השנה ההידרולוגית הגשומה ביותר 1991-1992), והשטפים נבחנו בתחתית המודלים (21 מטר בבני-דרור, 11 מטר בתל-יצחק ו- 40 מטר בכפר-וורבורג). בבני-דרור ובכפר-וורבורג קיימת דיספרסיה נמוכה יותר אך שטפי המים הממוצעים גבוהים מאלו שבתל-יצחק (טבלה 4.5) ועקומי הפריצה בהתאם (עקומים אדומים, איור 4.7). תופעה מעניינת נוספת היא פריצה מוקדמת משמעותית (כשלוש וחצי שנים לאחר האפליקציה בפני השטח), של הסמן האדיש, בתחתית התווך הלא רווי הדק יחסית שבתל-יצחק. שיא השטף מגיע רק 15 שנה לאחר ההחדרה בפני השטח (איור 4.7 ב'). התופעה נגרמה ככל הנראה בעקבות שנות התשעים הגשומות (-1991 1992 ו- 1994-1995) ונצפתה בתווך הלא רווי הדק יחסית שבתל-יצחק, וזאת לעומת תווך לא רווי עמוק יותר בבני-דרור ובכפר-וורבורג, שם לא נצפתה התופעה. בכפר ורבורג השיא הגיע כ- 40 שנים אחרי ההחדרה, כלומר מהירות ממוצעת של מטר\שנה בקירוב. מהירות זו נמוכה מהמהירות הממוצעת בבני דרור (1.4 מטר\שנה בקירוב, איור 4.7 א'), וזאת למרות ששטף המים למי התהום בכפר-וורבורג גדול משמעותית מזה שבבני-דרור (טבלה 4.5). ההבדל נובע מתכולת הרטיבות הגבוהה בחתך החרסיתי העבה שקיים בכפר וורבורג.



4.10. הדמיות של מנות דישון מופחתות

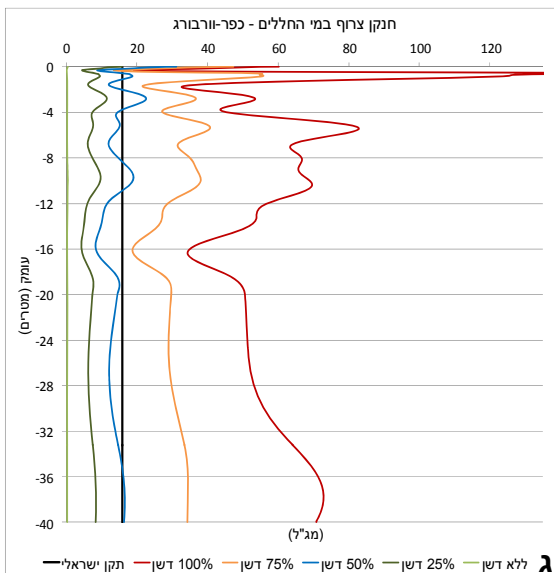
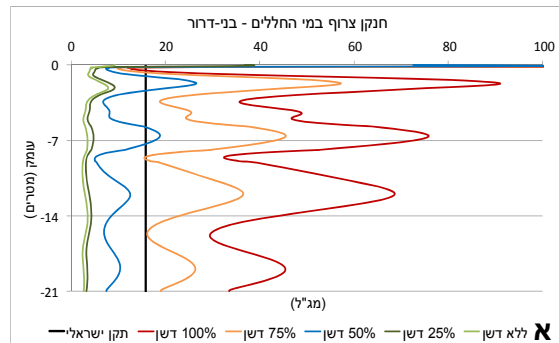
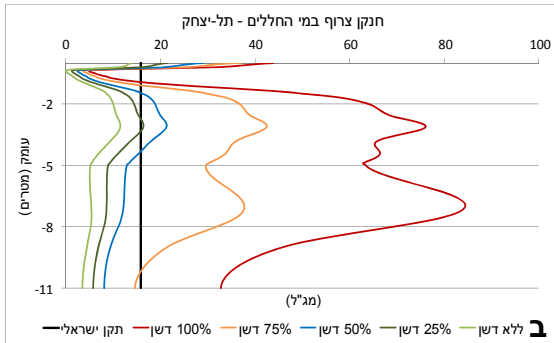
בכדי לבחון את השפעתן של רמות דישון מופחתות על פרופילי החנקן בתווך הלא רווי, ועל שטפי החנקה אל מי התהום, בוצעו ארבע סימולציות עם מנות דישון מופחתות (טבלה 4.7). ההפחתה בוצעה מהדשנים שהחקלאים מיישמים בפני השטח, מבלי להפחית את כמויות החנקן שמגיעות עם מי ההשקיה (קולחים / שפירים). המאזן הממוצע מחושב על פי עשרים וחמש שנים, אשר מתחילות עשרים וחמש שנים לאחר שינוי משטר הדישון, מתוך הנחה שהשפעת משטר הדישון הקודם הינה זניחה.

טבלה 4.7. גורל החנקן לפי הדמיות של רמות דישון מופחתות שבוצעו במודלים המכילים. ממוצעים שנתיים לתקופה של 26-50 שנה לאחר שינוי משטר הדישון [ק"ג/דונם/שנה].

תוספת דשן	חנקן במי השקיה	חנקן כדשנים	שטף כניסה לשורשים	שטף למי תהום	ריכוז ממוצע במי החללים (מג"ל)
בני-דרור					
100%	7	32	23	11	51
75%	7	24	22	6	31
50%	7	16	18	3	14
25%	7	8	13	2	7
0	7	0	6	2	6
תל-יצחק					
100%	9	24	23	7	63
75%	9	18	21	3	31
50%	9	12	18	2	13
25%	9	6	12	1	10
0	9	0	8	1	6
כפר-וורבורג					
100%	0	48	26	18	58
75%	0	36	25	10	31
50%	0	24	19	5	15
25%	0	12	10	4	8
0	0	0	0	2	1

על פי ההדמיות, נראה כי הפחתה של רבע מכמות הדשן (75%, טבלה 4.7), תשאיר רמת קליטה גבוהה שנמצאת בתחום המלצות הדישון (20 - 25 ק"ג/דונם/שנה. משרד החקלאות ופיתוח הכפר, 2012) ותפחית את מסת החנקן החנקתי המחלחל אל מי התהום בכ- 50%. הפחתה של כמות הדשן המוסף בחצי (50%, טבלה 4.7), תשאיר רמת קליטה גבוהה (18-19 ק"ג חנקן צרוף לדונם

בשנה) וקרובה להמלצות הדישון בשלושת הפרדסים, אך יחד עם זאת תפחית את מסת החנקן הצרוף המחלחל אל מי התהום בכ- 70%. בהדמיה זו, ריכוזי החנקן הממוצעים באזור הלא רווי יפחתו לכל הפחות ב- 75%, כלומר ירדו מתחת ל- 15 מ"גל' חנקן חנקתי, ריכוז הנמוך מהתקן הישראלי (70 מ"גל' NO_3^- ~ 16 מ"גל' N-NO_3^-) לחנקה במי שתייה (טבלה 4.7, איור 4.8).



איור 4.8. פרופילי חנקן צרוף במי החללים של האזור הלא רווי. הפרופילים התקבלו 50 שנה לאחר שינוי משטר הדישון על פי הדמיות במודלים המכויילים: א- בני-דרור; ב- תל-יצחק; ג- כפר-ורבורג. 100% הינה כמות הדשן המוספת כיום על ידי החקלאים. החנקן שמגיע עם מי הרקע נשאר ללא שינוי בכל ההדמיות. הקו השחור האנכי הוא ריכוז החנקן החנקתי בתקן מי השתייה.

5.1. מודלים חד-מימדיים (על אף ההטרונגניות המרחבית) בתווך הלא רווי, וייחודו של מחקר זה

נתוני הדיגום העמוק (תכולת רטיבות, ריכוזי כלוריד וחנקן, פילוג גודל גרגר, פוטנציאל חניקון והערכות מילוי חוזר למי-תהום) מראים שהתווך הלא רווי תחת פרדסי השרון איננו אחיד במרחב. השונות עשויה להיות גדולה יותר בתוך אותו הפרדס (טיפול) מאשר בין אתרים שונים, אך יחד עם זאת קיים דמיון יחסי בפרופילים של זוגות הקידוחים הקרובים (עשרות מטרים) בהשוואה לקידוח המרוחק באותה החלקה (מאות מטרים) (איור 4.1). מרחק מיתאם של עשרות מטרים (קצר מאורך הפרדס הממוצע) יתאים למודלים גיאוסטטיסטיים של השונות המרחבית בתווך הלא רווי. מודלים הטרונגניים תלת מימדיים של זרימה והסעה בתווך הלא רווי, המבוססים על תצפיות מעבודה זו, נעשים בימים אלו בשיתוף פעולה עם דר' דוד רוטו ממנהל המחקר חקלאי. יחד עם זאת, מנקודת מבט של שינוי מיוחל במודלים המשמשים לקבלת החלטות בנושאים של משאבי מים, יהיה נכון להתחיל בקרוב דטרמיניסטי פשוט יחסית של התווך הלא רווי. לדעתי, בבוא היום, כשיטמעו תוצאותיהם של מודלים הטרונגניים רב מימדיים בתווך הלא רווי, כתנאי שפה עליונים למודלים הידרולוגיים של מי תהום בקנה מידה אזורי, יהיה עלינו לצמצם אותן על ידי מיצוע מרחבי או שימוש בפרמטרים אפקטיביים במודלים פשוטים יותר, כדוגמת אלו המוצגים בעבודה זו. בנוסף, התצפיות שהתקבלו כאן מצביעות על ירידה בשונות המרחבית בעומק התווך הלא רווי. תוצאות אלה מתיישבות בקנה אחד עם דיווחיהם של פיין וחובריו (2009), שדגמו את התווך הלא רווי במטע אבוקדו באזור בני-ציון, במיקומים מרחביים שונים ביחס לעצים ולמתזים (סמוך לעץ, בין שני עצים, במרכז השביל וכו'). על פי דיווחים אלו, בעומקים גדולים מארבעה מטרים ישנה התכנסות של ריכוזי מומסים, ולפיכך, לצורך הערכת שטפים למי תהום, ניתן להשתמש במודלים דטרמיניסטיים חד-מימדיים המכילים לנתונים מהאזור הלא רווי העמוק. ככל הידוע לי, עבודה זו ייחודית וראשונה מסוגה, באופי כיול מודלים של הסעת חנקן המשתנים עם הזמן, על פי פרופילים מנתוני התווך הלא רווי העמוק (סדר גודל עמוק יותר מבית השורשים). עבודות קודמות, בהן נעשה שימוש במודלים משתנים בזמן של הסעת חנקן למי תהום, אינן מכילות לנתוני שדה ו/או לנתונים מבית השורשים (de Paz and Ramos, 2004; Hanson et al., 2006; Doltra and Munoz, 2010).

5.2. השפעת איכות הנתונים על כיול המודלים

חלק מתהליך כיול המודלים כרוך בהתאמת מגמות וסדרי גודל בין פרופילי תכולת הרטיבות וריכוזי המומסים, שמתקבלים מהמודלים, לאלו שהתקבלו מבדיקות הדיגום העמוק בתנאים דומים (עד כמה שניתן על פי נתוני ההשקיה והדישון והנתונים האגרו-מטאורולוגיים שנאספו). כיול זה מקנה

ביטחון יחסי במודלים המכויילים ובחיזויים שמחושבים בעזרתם. ככל שמאגר הנתונים מפורט וממושך יותר, כך גדלים התנאים להגדלת דיוקו של המודל המכיל. מאגר הנתונים ששימש לכיול המודל של מושב בני-דרור כלל נתוני השקיה ודישון ברזולוציה יומית מחמשת השנים שקדמו לדיגום העמוק. פירוט הנתונים סייע בתהליך הכיול, כך שהמגמות והפרופילים שמתקבלים מהמודל בבני-דרור הם הדומים והקרובים ביותר לפרופילי הדיגום העמוק, מבין שלושת המודלים שכיילו (איור 4.5). עבור הפרדס של קיבוץ תל-יצחק, מאגר הנתונים ששימש לכיול המודל כלל הערכות של כמויות מים ודישון שנתיים ממוצעים. נתוני איכות מי ההשקיה (מקור מי ההשקיה בבאר מים שפירים הממוקמת בתוך החלקה, איור 3.1) בפרדס זה התקבלו ממאגר המידע של רשות המים הכולל נתון שנתי אחד של ריכוזי כלוריד וחנקן. עבור הפרדס של מושב כפר-וורבורג אין מאגר נתונים לצורך כיול המודל, פרט להערכות ממוצעות של כמויות מים ודישון שנתיים. מי ההשקיה בפרדס זה הם מי המערכת של המוביל הארצי, אשר מסופקים על ידי חברת מקורות (מאז 1995). למרות מאמצים רבים להשיג את נתוני איכותם מחברת מקורות, התקבלו רק ערכי סף עליונים ותחתונים עבור ריכוזי הכלוריד והחנקן לשנת 2011 (מועד המאוחר לדיגום העמוק ונתונים הנחוצים לכיול המודל). כמו כן, החתך הלא רווי בכפר וורבורג גדול מ-40 מטר והדיגום המפורט נעשה על פחות מרבע מעוביו - 9 מטרים (לעומת יחסים גבוהים בחלקות שבשרון). יתרה מכך, בשנים האחרונות הוקמו מתקני התפלה שמספקים חלק מהמים שמגיעים לפרדס, עובדה המקשה על הערכת ריכוזי כלוריד וחנקן ממוצעים שמקורם במים אלו. המחסור בנתונים הקשה על תהליך כיול המודל והעלה את דרגות החופש ואי הוודאות, ועל כן רמת הביטחון במודל זה נמוכה מזו שקיימת עבור שני המודלים של הפרדסים בשרון. יחד עם זאת, המודל של כפר-וורבורג מוצג כאן מכמה טעמים: 1. זוהי ההערכה הטובה ביותר שקיימת בשלב זה; ו-2. מודל זה תורם להשוואה בין תווך לא רווי בעל מרקם גס יחסית מהשרון (חמרה) לבין תווך לא רווי חרסיתי מדרום אקוות החוף (לדוגמה תרגיל הסמן האדיש סעיף 4.9). חשוב לזכור שרמות הדשן החנקני המיושם בפרדס זה גבוהות מאוד (כמו גם רמות ההשקיה שכנראה גבוהות מאלה שבפרדסים שבשרון) ולא ניתן להתייחס אליו כאל פרדס מייצג.

5.3. גורל החנקן מתחת לבית השורשים בקרקעות חמרה לעומת קרקעות ורטיסוליות

באקוות החוף בולט לעין מיתאם גיאוגרפי בין קרקעות חמרה לבין ריכוזי חנקן גבוהים במי התהום (איור 1.1). מרבית חלקה הדרומי של האקווה (רצועות יבנה עד ניר עם) מכוסה בפני השטח בקרקע גרומוסול ומאופיין באופן כללי בריכוזי חנקן תקינים, כפי שמתקבל מנתוני השירות ההידרולוגי (איור 1.1, קורצמן, 2012). בין פרופילי הכלוריד והחנקן, שהתקבלו מנתוני הדיגום העמוק בפרדסי השרון, ישנו מיתאם גבוה מתחת לבית השורשים (מקדמי מיתאם בטווח 0.82 -

0.99 בתל-יצחק ו- 0.44 - 0.98 בבני-דרור). תוצאה זו מצביעה על קליטה חלקית של חנקה על ידי השורשים ועל התנהגות אדישה (אינרטי) שלה בעומק האזור הלא רווי החולי (חמרה), וזאת לעומת חוסר המיתאם שמתקבל מהפרופילים של כפר-וורבורג על קרקע חרסיתית (- 0.25 - 0.42). הפרדס שנבדק בכפר-וורבורג שוכן בדרום אקוות החוף, אך בניגוד לציפיות, המודל המכיל מראה נתונים שאינם תומכים בהנחות שלעיל ובריכוזים הנמוכים יחסית של חנקה במי התהום שמתקבלים מהתצפיות. על פי נתוני הדיגום העמוק, ריכוז החנקן הממוצע במי החללים שמתחת לבית השורשים בקידוח KV1 (המודל כויל על פי קידוח זה) הוא 58 מ"ג/ל. על פי הערכות המודל המכיל, שטף המילוי החוזר השנתי הממוצע הינו גבוה (294 מ"מ/שנה) ויחד עם ריכוז החנקן הגבוה במי הנקבובים גורם לשטף גבוה אל האקווה (18 ק"ג חנקן חנקתידונם/שנה) (ראה טבלאות 4.5 ו- 4.6). תשומות הדשנים בחלקה זו הינן גבוהות (123% מכמות הדישון הממוצעת בבני-דרור ו- 145% מזו שמיושמת בתל-יצחק) ולכן קיימת זליגת חנקן גבוהה אל מתחת לבית השורשים. יתכן וקיים מנגנון אחד או יותר שמפחית את ריכוז החנקה בתווך הלא רווי. דוגמה למנגנון אפשרי היא תגובת דה-ניטריפיקציה בעומקים גדולים יותר של התווך הלא רווי, שמאופיין בתכולת רטיבות שעולה עם העומק (ראה פרופיל רטיבות באיור 4.1, תכולת הרטיבות עולה עד לתחתית הפרופיל שנדגם, 9 מטרים). ירידה בריכוז החנקה בעומקים גדולים מעשרה מטרים בקרקעות חרסיתיות באזור באר-טוביה דווחה על ידי (Baram et al., 2012). ייתכן שקיימת דה-ניטריפיקציה תחת אזורים אלו גם במי התהום עצמם.

5.4. ירידה ביעילות קליטת חנקה על ידי השורשים עם עליה בריכוזה והקשר לדליפות למי תהום

במהלך תהליך כיוול המודלים התעורר צורך בהגבלת ריכוז החנקן המירבי שיכול להיקלט על ידי השורשים. הגבלה זו נתמכת על ידי מחקרים שבדקו באופן ישיר את קליטת החנקן על ידי השורשים, ומראים ירידה משמעותית בכושר הקליטה כאשר ריכוזי החנקן בבית השורשים הינם גבוהים (ראה סעיף 1.9; , 1996; Lea-Cox, D, & Syvertsen, J, 2006; Sorgona et al.). תופעה זו גורמת להעצמת השפעתם של שינויים ברמות הדישון על שטפי החנקן לאקווה, וזאת לעומת השפעה מופחתת על שטפי החנקן הנכנסים אל השורשים. הדמיות של רמות דישון מופחתות שבוצעו בעזרת המודלים המכויילים מראות שהפחתה של 50% מכמות החנקן הצרוף המוסף בדשן (לא כולל ערך דישוני של מי הרקע), תגרום לירידה של כ- 70% בחלחולו אל מי התהום, אך יחד עם זאת תשאיר רמת קליטה גבוהה (18-19 ק"ג/חנקן צרוף/דונם/שנה) על ידי השורשים, שהינה קרובה יחסית להמלצות הדישון לפרדסים. כעקרון, הורדת רמות הדישון ו/או העלאתם ישפיעו בראש ובראשונה על זליגת החנקן אל מתחת לבית השורשים. יתכן שאחת מהסיבות לדישון עודף קשורה להטרוגניות של התווך הנקבובי, כך שהחלקאים מעוניינים שגם

לאזורים שמקבלים מעט חנקן, יגיע מספיק בכדי לא לפגוע ביבול. המודלים שכוללו בעבודה זו לא מסוגלים לכמת את השפעת ההטרוגניות המרחבית על היבול, שיתכן ותגדל ברמות דישון נמוכות.

5.5. הצעת שיטה לקביעת תקינת משטרי דישון המתחשבים ביבול ובאיכות מי התהום

חלחול מתחת לשטחים חקלאיים מהווה מקור חנקן משמעותי שנכנס למי האקווה (ראה טבלה 4.6) ומשפיע על איכותם. ריכוז חנקן גבוה במי הנקבובים של התווך הלא רווי משפיע באופן ישיר על ריכוז החנקה בשטף המילוי החוזר שנכנס לאקווה. הפחתה בריכוז הממוצע של החנקן בתווך הלא רווי העמוק, אל מתחת לריכוז שנקבע בתקן למי שתייה, תגרום להפחתה בריכוז החנקן במי המילוי החוזר, כך ששטף החנקן שמגיע מהתווך הלא רווי ונכנס אל מי התהום לא יגרום לחריגה מהתקן (ראה טבלה 4.7 ואיור 4.7). מוצע כאן, שכדי למנוע חריגות בריכוזי חנקה במי התהום, יש לקבוע תקנות דישון, אשר יביאו להפחתת ממוצע ריכוזי החנקן במי החללים שבאזור הלא רווי העמוק, אל מתחת לריכוז החנקה המירבי הקבוע בתקן למי שתייה. בעזרת מודלים מכוילים כדוגמת המודלים שהוצגו בעבודה זו, ניתן לקבוע משטרי דישון, המותאמים לסוגי גידולים וקרקעות, אשר מתחשבים באיכות מי התהום וזאת מבלי לפגוע בגידול החקלאי שבפני השטח. מהמודלים המכויילים בפרדסי השרון מתקבל כי נכון למועד כתיבת עבודה זו, שטף החנקן הממוצע אל מי התהום דומה בערכו לשטף החנקן בפני השטח, שמקורו במי הרקע (ראה טבלאות 4.6 ו-4.7). התחשבות החקלאים בערך הדישוני של מי ההשקיה, יכולה להוות מפנה חיובי ולהוביל להפחתת הדישון החנקני לרמה מיטבית, שמתחשבת ביבול החקלאי ובזיהום האקווה שמתחת לפרדס. על פי ההדמיות, דישון בהתאם להמלצות לפרדסים מניבים (20 - 25 ק"ג חנקן צרוף\לדונם\שנה), אשר כולל את הערך הדישוני של מי הרקע, לא יפגע ככל הנראה ביבול ויפחית בצורה משמעותית את חילחול החנקן אל האזור הלא רווי ואל האקווה שמתחת.

6. סיכום ומסקנות

בעבודה זו נבחנה באופן מקיף תנועת חנקה אל מי התהום מתחת לפרדסים בצורה מקיפה. במהלך העבודה שולבו בדיקות ואפיון המקובלים במדעי הקרקע והחקלאות, הכוללים זרימה בתוך לא רווי, עם שיטות וגישות מתחום ההידרו-גיאולוגיה, הכוללים קידוחים לאזור הלא רווי העמוק והתאמת מודלים לתצפיות שדה. המחקר מתבסס על הנחה, כי יכולת חיזוי של דליפות חנקן למי תהום, טמונה בתכונותיהם ובמצבם של הקרקע באזור בית השורשים ובתוך הלא רווי העמוק שמתחתיה. גישות והנחות אלו התוו תהליך מחקר שכלל מספר שלבים, ובהם: הבנת תהליכי זרימה והסעת חנקן, דיגום של בית השורשים והאזור הלא רווי העמוק, כיול מודלים לנתוני הדיגום והדמיית תרחישים. בסופו של התהליך התקבלה תמונת מצב ברורה יותר לגבי גורל הדשן החנקני, תנועתו באזור הלא רווי ושטפי הכניסה שלו אל מי התהום. תמונת מצב זו יכולה לסייע בהסקת מסקנות אגרו-הידרולוגיות להן יש השלכות יישומיות.

דיגום התוך הלא רווי בוצע בחמישה שטחים חקלאיים, השוכנים מעל אקוות החוף של ישראל. שלושה פרדסים וחלקה המשמשת לגידולים עונתיים מתחלפים (שדה תפוחי אדמה בחורף, ומיקשת אבטיחים בקיץ בשנה שבה בוצע הדיגום) בקרקעות חמרה של אזור השרון ופרדס אחד בוורטיסולים של שפלת יהודה. גלעיני קרקע בלתי מופרים ורציפים נדגמו מהחלקות, מפני השטח ועד לעומק של תשעה מטרים. בכל חלקה נקדחו שלושה קידוחים (בכדי להתחשב בשונות המרחבית), כאשר שניים יחסית קרובים (> 30 מטר) והשלישי רחוק (< 100 מטר). גלעיני הקרקע נחתכו וחולקו לדוגמאות, כך שכל דוגמה מייצגת 30 ס"מ מפרופיל הקרקע האנכי. בדיקות כימיות ופיזיקאליות בוצעו בדוגמאות, ובעזרתן אופיינו פרופילי התוך הלא רווי. שלושה אתרים נבחרו לצורך כיול מודלים נומריים חד-מימדיים המשתנים בזמן, עבור זרימה (משוואת החידור של ריצ'ארדס הכוללת איבר יניקת שורשים) והסעת כלוריד, אמון וחנקה (משוואת אדבקציה דיספרסיה, עם אברי מקור/מבלע עבור ריאקציות ויניקת שורשים לצורוני החנקן). הפתרונות הנומריים התקבלו באמצעות התוכנה HYDRUS-1D. הרכב מכאני וצפיפות גושית שמשו קלט ל-PTFs, לצורך הערכה ראשונית, של הפרמטרים ההידראוליים (מודל ואן גנוכטן - מועלם). המשך הכיול בוצע ע"י שינויים קלים בפרמטרים עד שהתקבלה התאמה בין הפרופילים המדודים למחושבים.

פרופילי תכולת הרטיבות, הכלוריד והחנקה שהתקבלו מחמשת החלקות, מראים כי קיימת הטרוגניות גדולה בתוך הלא רווי שבתוך החלקות עצמן. יחד עם זאת, לפרופילים קרובים יש מיתאם גבוה מזה שמתקבל עבור פרופילים מרוחקים באותה חלקה. ריכוז כלוריד גבוה מתחת לבית השורשים של הפרדסים בשרון (טווח של 490-1480 מ"ג/ל) מעיד, על סמך חישובי מאזן

מסת הכלוריד (Chloride Mass Balance - CMB), על טווח של מילוי חוזר נמוך (90-325 מ"מ/שנה) בהשוואה להערכות מילוי חוזר שמתקבלות לאזורים אלה בשיטת מקדמי המילוי החוזר, הנהוגה בשירות ההידרולוגי (~360 מ"מ/שנה). אומדני מצב עמיד (מבוססים על נתוני הדיגום העמוק) של שטפי חנקה למי התהום שמתחת לפרדסים בשרון, נותנים טווח ערכים של 5 – 22 ק"ג/חנקה חנקתי/דונם/שנה עם ממוצע של 12 ק"ג/חנקה חנקתי/דונם/שנה. בין פרופילי הכלוריד והחנקה בשרון התקבלו מקדמי מיתאם גבוהים. מיתאם זה מצביע על כך שככל הנראה חלק משמעותי מהחנקה אינו נצרך על ידי השורשים, ומחלחל מטה אל מתחת לבית השורשים, וכי החנקה הינה אדישה בקירוב באזור הלא רווי העמוק, בדומה לכלוריד. לעומת זאת, לא התקבל מיתאם בין פרופילי הכלוריד והחנקה מהתווך הלא רווי שמתחת לפרדס בקרקע החרסיתית. תוצאה זו מצביעה על הסבר אפשרי לקשר שקיים בין קרקעות חמרה באזורי החקלאות הוותיקה, לבין ריכוזי חנקה גבוהים במי אקוות החוף שמתחת להם. לעומת זאת, בקרקעות חרסיתיות קיים מצב טוב יותר, מבחינת ריכוזי חנקה במי התהום שמתחת לאזורים חקלאיים. הפרופילים של הפחמן האורגני המומס (DOC) בתווך הלא רווי הראו קשר חזק לתכולת החרסית. בכפר-וורבורג (ורטיסול) התקבלו ריכוזים של ~ 50 מ"ג/ק"ג עד לעומק של תשעה מטרים, ואילו בשרון (חמרה) התקבלו ריכוזים נמוכים מ ~ 10 מ"ג/ק"ג בעומקים גדולים משני מטרים, ובחול התקבלו ריכוזים נמוכים עוד יותר. גם תצפית זאת תומכת באפשרות של ריאקטיביות החנקן גם בעומק התווך הלא רווי החרסיתית.

התוצאה המשמעותית ביותר התקבלה בתהליך כיוול המודלים והיא הצורך בהגבלת ריכוז החנקה המירבי, שיכול להיקלט ע"י השורשים. ערכו של ריכוז זה בשלושת המודלים הינו 30 מ"ג/ק"ג חנקן חנקתי. תוצאה זו תואמת למיתאם הגבוה, שהתקבל בין פרופילי הכלוריד והחנקה ומחזקת את ההערכה, שחלק משמעותי מהחנקה אינו נקלט בשורשים. הגבלה זו גורמת להעצמת השפעתם של שינויים ברמות הדישון, על שטפי החנקן לאקווה, יחד עם השפעה נמוכה יותר על שטפי החנקן שנקלט בשורשים ועל היבול.

המודלים המכויילים שימשו לבחינת הדמיות, של מספר תרחישי דישון אפשריים בשני פרדסים בשרון (קרקע חמרה) ובפרדס בכפר וורבורג (גרומוסולים של שפלת יהודה). הדמיות, עם 50% מהחנקן המיושם בפני השטח (הפחתה מהדשן המוסף על ידי החקלאים, ללא התחשבות בחנקן שמקורו במי ההשקיה) בכל אחד משלושת המודלים, הראו ירידה של כ- 70% בחלחול החנקן למי התהום, אך יחד עם זאת נותרה רמת קליטת חנקן גבוהה בשורשים (18 – 19 ק"ג חנקן צרוף/דונם/שנה – קרובה להמלצות הדישון לפרדסים, שהן 20 – 25 ק"ג חנקן צרוף/דונם/שנה). בנוסף, בהדמיה זו התקבלה הפחתה בריכוז החנקן הממוצע במי הנקבובים, שבאזור הלא רווי

העמוק (עומקים גדולים משני מטרים), אל מתחת לריכוז החנקה המירבי שמותר על פי התקן למי שתייה בישראל (70 מ"גל' $\text{NO}_3^- \approx 16$ מ"גל' N-NO_3^-).

ריכוז חנקה גבוה במי הנקבובים של התווך הלא רווי משפיע באופן ישיר על ריכוז החנקה במי המילוי החוזר לאקווה. הורדת הריכוז הממוצע של החנקן במי הנקבובים, אל מתחת לריכוז המירבי של חנקה המותר בתקן, תגרום להפחתה בריכוזו במי המילוי החוזר, כך ששטף החנקן מהתווך הלא רווי שנכנס אל מי התהום, לא יגרום לחריגה מהתקן במי התהום עצמם. לפיכך, ניתן לקבוע משטרי דישון המותאמים לסוגי גידולים וקרקעות, אשר מתחשבים באיכות מי התהום מצד אחד וביבול החקלאי מצד שני. בעבודה זו מוצעת שיטה לקביעת תקנות דישון, בעזרת הדמיות במודלים מכוילים, אשר יסייעו במציאת רמת דישון שתגרום להורדת ריכוז החנקן הממוצע במי הנקבובים, אל מתחת לריכוז החנקה המירבי המותר על פי התקן למי שתייה, וזאת ככל הנראה מבלי לפגוע משמעותית ביבול של פרדסים. לגבי דישון חנקני בפרדסים בשרון, רמה זו היא 20 – 25 ק"ג חנקן צרוף\דונם\שנה כולל החנקן שבמי ההשקיה. תקינה מסוג זה, תגרום להורדה עתידית של ריכוז החנקה גם במי התהום עצמם, ובכך לשפר את איכותם. יתכן שתקינה כזו איננה מציאותית כיום, אך התחשבות של החקלאים בערך הדישוני של החנקן, שמצוי במי ההשקיה (קולחים, או מי באר מקומית) יכולה לבדה להפחית באופן משמעותי את שטפי החנקה אל האקווה.

7. רשימת ספרות

- אלחנני ש. 2009. אתגרים בפעילות השמירה על איכות מקורות במים בישראל. כנס ירושלים לסביבה וטבע, מאי 2009, ירושלים.
- גבירצמן ח. 2002. משאבי המים בישראל. *יד יצחק בן-צבי*, ירושלים.
- גולדברגר ש. 2009. מניעה וטיפול בזיהום מים באקוויפרים. *כנס ירושלים לסביבה וטבע*, מאי 2009, ירושלים.
- השירות ההידרולוגי – ארכיון לוגים של קידוחים.
- השרות ההידרולוגי – רשות המים. 2007. התפתחות ניצול ומצב מקורות המים בישראל עד סתיו 2006.
- חן י., ענבר י., ברק פ., ושנקר מ. 2008. שיטות לבדיקת קרקעות. מהדורה ד'. *החוג לקרקע ומים*, הפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית בירושלים.
- משרד החקלאות ופיתוח הכפר – שירות ההדרכה והמקצוע, אגף פירות, תחום ההדרים. המלצות דישון להדרים, מאי 2012.
- פיין פ., אלכס פ., אורי מ., אלן ג., דוד ר., רמי ק., ומרדכי ש. 2009. השפעת השקיה במי-קולחים בשרון על תנועת מזהמים ועל תכונות כימיות של החתך הלא רווי עד פני מי-התהום. דוח מסכם לתוכנית מחקר 304-0325-05 מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות. *הוצאת המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה*. 26 עמוד.
- קורצמן ד. 2012. המלחה באקוויפר החוף מתחת לקרקעות חרסיתיות (ורטיסוליות). *הכנס השנתי של האגודה הישראלית למשאבי מים*, מעגן, 23-5-2012.
- רביקוביץ ש. 1992. קרקעות ישראל התהוותן, טבען ותכונותיהן. הקיבוץ המאוחד, תל-אביב.
- רוה י., סליטרניק ח., ו- י. אבנימלך. 1972. פילוג ריכוזי תרכובות חנקן בחתך הקרקע שמעל מי התהום באזור החוף. דו"ח ראשון, *תכנון המים לישראל בע"מ*, תל אביב.
- רוסו ד. 1995. תנועת מזהמים לאקויפר בהשקיית פרדס בקולחים. מתוך פרויקט טיהור קולחי רעננה: המלצות לקריטריונים עבור איכות הקולחים בחלופות שונות. עורכים – פץ פיין, נ. חרובי ו- י. שיינברג. *המכון לקרקע ומים*, מנהל המחקר החקלאי.
- Baram, S., Arnon, S., Ronen, Z., Kurtzman, D., and Dahan, O., 2012. Infiltration Mechanism Controls Nitrification and Denitrification Processes under Dairy Waste Lagoon. *Journal of Environmental Quality*, in press, Posted 17 Apr. 2012, doi:10.2135/jeq2012.0015.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., O'connor, G. A., 2001. Soil Chemistry. *John Wiley & Sons, Inc*, New York.

- Broadbridge, P., and I. White., 1987. Time to ponding: comparison of analytical, quasi-analytical and approximate predictions. *Water Resources Research*, 23: 2302-2310.
- Brodkey, R. S., and Hershey, H. C., 1988. Transport Phenomena, A Unified Approach. *McGraw-Hill Book*, Singapore.
- Brooks, R. H., and A. T. Corey., 1966. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Papers no. 3. Fort Collins. *Colorado State University*.
- Camargo, J. a., and Alonso, A., 2006. Ecological and toxological effects of inorganic pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International*, 32: 831-849.
- Cohen, S., Fuchs, M., 1978. The distribution of Leaf Area, Radiation, Photosynthesis and Transpiration in a Shamouti Orange hedgerow orchard, part 1. Leaf area and radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40: 123-144.
- Dahan, O., E.V. McDonald, and M.H. Young. 2003. Flexible time domain reflectometry probe for deep vadose zone monitoring. *Vadose Zone Journal*, 2: 270-275.
- Dahan, O., Talby R., Yechieli Y., Adar E., Lazarovitch N., and Y. Enzel, 2009. In Situ Monitoring of Water Percolation and Solute Transport Using a Vadose Zone Monitoring System. *Vadose zone Journal*, 8: 1-10.
- Dar, I. A., Sankar, K., Shah, T. S., Dar, M. A., 2012. Assessment of nitrate contamination of Lidder catchment Kashmir, India. *Saudi Society for Geosciences*, 5: 233-243.
- Darcy H., 1856. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, *Dalmont*, Paris.
- de Paz, J. M. and C. Ramos. 2004. Simulation of nitrate leaching for different nitrogen fertilization rates in region of Valencia (Spain) using a GIS-GLEAMS system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103: 59-73.
- Doltra, J., and Munoz, P., 2010. Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU_Rotate_N and HYDRUS-2D models. *Agricultural Water Management*, 97: 277-285.
- Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 32: 211-223.
- Eskiocak, S., Dunadar, C., Basoglu, T., Altaner, S., 2005. The effects of taking chronic nitrate by drinking water on thyroid functions and morphology. *Clinical and Experimental Medicine*, 5: 66-71.

- Feddes, R. A., Kowalik, P. J., and Zaradny, H., 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. *John Wiley & Sons*, New York.
- Fujita, H., 1952. The exact pattern of concentration-dependent diffusion on semi-infinite medium II. *Textile Research Journal*, 22: 823-827.
- Gardner, W. R. 1958. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. *Soil Science*, 85: 228-232.
- Gvirtzman, H., Ronen, D., Magaritz, M., 1986. Anion exclusion during transport through the unsaturated zone. *Journal of Hydrology*, 87: 267-283.
- Hadas, A., Hadas, Aviva., Sagiv, B., Haruvy, N., 1999. Agricultural practices, soil fertility management modes and resultant nitrogen leaching rates under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 42: 81-95.
- Hanson, B. R., Šimůnek, J., Hopmans, J. W., 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management*, 86: 102-113.
- Isidoro, D., Qui'lez, D. and R. Arague' s. 2006. Environmental Impact of Irrigation in La Violada District (Spain): II. Nitrogen Fertilization and Nitrate Export Patterns in Drainage Water. *Journal of Environmental Quality*, 35: 776-785.
- Jacques, d., Šimůnek, J., Mallants, D., and van Genuchten M. Th. 2008. Modeling coupled hydrological and chemical processes: long-term uranium transport following phosphorous fertilization. *Vadose Zone Journal*, 7: 698-711.
- Jimenez-Martinez, J., Skaggs, T. H., van Genuchten, M. Th., and Candela, L., 2009. A root zone modeling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal of Hydrology*, 367: 138-149.
- Kosugi, K., 1996. Longnormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 32: 2697-2703.
- Kurtzman, D., and Scanlon, B. R., 2011. Groundwater Recharge through Vertisols: Irrigated Cropland vs. Natural Land, Israel. *Vadose zone Jurnal*, 10: 662-674.
- Lea-Cox, J. D., and Syvertsen, J. P., 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.
- Lots, E. G., Jabro, J. D., Simmons, K. E., and Baker, D. E., 1992. Simulation of nitrogen dynamics and leaching from arable soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 10: 183-196.

- M, Pessaraki., 2001. Handbook of Plant and Crop Physiology, second edition. *Marcel Dekker*, New York.
- Manassaram, D. M., Backer, L. C., and Moll, D. M., 2006. A Review of Nitrates in Drinking Water: Maternal Exposure and Adverse Reproductive and Developmental Outcomes. *Environmental Health Perspectives*, 114: 320-327.
- Martinez-Alcantara, B., Quinones, A., Legaz, F., and Primo-Millo, E., 2012. Nitrogen-use efficiency of young citrus trees as influenced by the timing of fertilizer application. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175: 282-292.
- McMahon, G., and M. D. Woodside., 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.
- Mercado, A., 1976. Nitrate and Chloride pollution of aquifers: A regional study with the aid of a single-cell model. *Water Resources Research*, 12: 731-747.
- Milo, R., Jorgensen, P., Morgan, U., Weber, G., and Springer, M., 2010. BioNumbers – The database of key numbers in molecular and cell biology. *Nucleic Acids Research*, 38: D750-D753.
- Miyazaki, T., 2006. Water Flow in Soils. *Taylor & Francis*, Boca Raton.
- Morales-Suarez-Varela, M. M., Llopis-Gonzalez, A., Tejerizo-Perez, M. L., 1995. Impact of nitrates in drinking water on cancer mortality in Valencia, Spain. *European Journal of Epidemiology*, 11: 15-21.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3): 513-522.
- Pachepsky, Y., Timlin, D., Rawls, W., 2003. Generalized Richards' equation to simulate water transport in unsaturated soils. *Journal of Hydrology*, 272: 3-13.
- Porter, L. K., Kemper, W. D., Jackson, R. D., and Stewart B. A., 1960. Chloride Diffusion in Soils as Influenced by Moisture Content. *Soil Science Society of America Journal*, 24: 460-463.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1, (5): 318–333
- Rimon, Y., Dahan, O., Nativ, R., and Geyer, S., 2007. Water percolation through the deep vadose zone and groundwater recharge: Preliminary results based on a new vadose zone monitoring system. *Water Resources Research*, 43(5), 1-12.

- Russo, D. 1988. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. *Water Resources Research*, 24: 453-459.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10: 18-39.
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Tachovsky, J. A., 2007. Semiarid unsaturated zone chloride profiles: Archives of past land use change impacts on water resources in the southern High Plains, United States. *Water Resources Research*, 43: W06423.
- Schaap, M. G., & Leij, F. J., 2001. Rosetta: a Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters With Hierarchical Pedotransfer Functions. *Journal of Hydrology*, 251: 163-176.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M. Th., 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. *Riverside, California*.
- Small, E. E., 2005. Climatic controls on diffuse groundwater recharge in semiarid environments of the southern United States. *Water Resources Research*, 41: W04012.
- Sorgona, A., Abenavoli, M. R., Gringeri, P. G., and Cacco, G., 2006. A comparison of nitrogen use efficiency definitions in Citrus rootstocks. *Scientia Horticulturae*, 109: 389-393.
- Tafteh, A., and Sepaskhah, AR., 2012. Yield and nitrogen leaching in maize field different nitrogen rates and partial root drying irrigation. *International Journal of Planet Production*, 6: 93-113.
- Turkeltaub, T., 2011. Monitoring and modeling recharge-water fluxes in the deep vadose-zone under different land uses over the southern coastal aquifer, Israel. Master Thesis, *Ben Gurion University of the Negev*, P. 88.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America*, 44: 892 – 898.
- Vogel, T., and M. Cislerova., 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media*, 3: 1-15.
- Wang, T., Zlotnik, V. A., Šimůnek, J., and Schaap, M. G., 2009. Using pedotransfer functions in vadose zone models for estimating groundwater recharge in semiarid regions. *Water Resources Research*, 45: W04412.

Warrick, A. W., 2003. *Soil Water Dynamics*. Oxford University Press, New York.

Weaver, R. W., Angle, S., Bottomley, P., Bezdicek, D., Smith, S., Tabatabai, A., Wollum., 1994. *Methods of Soil Analysis. part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. Soil Science Society of America, Wisconsin.

Wong, M. T. F., and K, Witter., 2009. Positive charge discovered across Western Australian wheatbelt soils challenges key soil and nitrogen management assumptions. *Australian Journal of Soil Research*, 47: 127-135.

Zhao, B. Q., Li, X. Y., Liu, H., Wang, B. R., Zhu, P., Huang, S. M., Bao, D. J., Li, Y. T., and So, H. B., 2011. Results from long-term fertilizer experiments in China: The risk of groundwater pollution by nitrate. *Wageningen Journal of Life Sciences*, 58: 177-183.

8.1 פרופילי תכולת רטיבות וכלוריד וחישוב מדדים סטטיסטיים לצורך הכיול – MATLAB code

```

1. function NOD_INF_analysis
2. clear all
3. clc
4. folders_path=input('Enter folders path => ' , 's');
5. param_choice=menu('Which parameter do you want to plot?','Water
   flow','Chloride transport');
6.
7. graphs_name=input('Enter graphs name (folders name) => ' , 's');
8. files_path=[folders_path '\NOD_INF.OUT'];
9. [observation model]=import_data(files_path);
10.[Bias , Bias_std , Relative_Bias , MAE , MAE_std , Relative_MAE , RMSE
   , MSE_std , model_index]=statistics(observation , model ,
   param_choice);
11.
12.[figure_handles]=figure_plots(observation , model , graphs_name ,
   param_choice);
13.
14.data_plot(figure_handles , Bias , Bias_std , Relative_Bias , MAE ,
   MAE_std , Relative_MAE , RMSE , MSE_std , model_index);
15.end
16.
17.function [observation model]=import_data(fileToRead1)
18.DELIMITER = ' ';
19.HEADERLINES = 13;
20.newData1 = importdata(fileToRead1, DELIMITER, HEADERLINES);
21.observation=newData1.data;
22.
23.siz=size(observation);
24.
25.HEADERLINES =13 + siz(1) + 9;
26.newData1 = importdata(fileToRead1, DELIMITER, HEADERLINES);
27.model=newData1.data;
28.end
29.
30.function [Bias , Bias_std , Relative_Bias , MAE , MAE_std ,
   Relative_MAE , RMSE , MSE_std , model_index]=statistics(observation ,
   model , param_choice)
31.switch param_choice
32.   case 1
33.     param=4;
34.   case 2
35.     param=12;
36.end
37.error_water(:,:)=model(:,:)-observation(:,:);
38.Bias=mean(error_water(:,param));
39.Bias_std=std(error_water(:,param));
40.Relative_Bias=mean(error_water(:,param)./observation(:,param))*100;
41.MAE=mean(abs(error_water(:,param)));
42.MAE_std=std(abs(error_water(:,4)));
43.Relative_MAE=mean((abs(error_water(:,param)))./observation(:,param))*1
   00;

```

```

44.square_error_water(:,1)=error_water(:,param).^2;
45.RMSE=(mean(square_error_water(:,1)))^0.5;
46.MSE_std=std(square_error_water(:,1));
47.model_index=0.7*MAE+0.3*MAE_std;
48.end
49.
50.function [figure_handles]=figure_plots(observation , model ,
    graphs_name , param_choice)
51.figure_handles=figure('units','norm','position',[.12 .07 .8
    .8],'color',[.15 .23 .37]);
52.set(figure_handles,'Name',graphs_name);
53.uipanel('Parent',figure_handles,'tag','Axes_Panel','Position',[0 .25 1
    .75],'backgroundcolor',[.15 .23 .37]);
54.axes('Parent',findobj(figure_handles,'Tag','Axes_Panel'),'units','norm
    ','position',[.1 .1 .83 .8],'color',[.49 .49 .49],...
55.     'xcolor','w','ycolor','w','xgrid','on','ygrid','on');
56.hold on
57.switch param_choice
58.     case 1
59.         title(['Water content - '
    graphs_name],'color','w','fontname','times new roman','fontsize',20)
60.         xlabel('Water content (-)','fontname','times new
    roman','fontsize',15,'color','w')
61.         ylabel('Depth (cm)','fontname','times new
    roman','fontsize',15,'color','w')
62.         plot (observation(:,4),
    observation(:,2),'b',model(:,4),model(:,2), 'r');
63.     case 2
64.         title(['Chloride concentration - '
    graphs_name],'color','w','fontname','times new roman','fontsize',20)
65.         xlabel('Chloride concentration (mg/cm^3)','fontname','times
    new roman','fontsize',15,'color','w')
66.         ylabel('Depth (cm)','fontname','times new
    roman','fontsize',15,'color','w')
67.         plot (observation(:,12),
    observation(:,2),'b',model(:,12),model(:,2), 'r');
68.end
69.
70.
71.legend('observation','model')
72.set(legend,'textcolor','w','fontsize',14,'location','best','linewidth'
    ,1.5,'edgecolor','w')
73.hold off
74.end
75.
76.function data_plot(figure_handles , Bias , Bias_std , Relative_Bias ,
    MAE , MAE_std , Relative_MAE , RMSE , MSE_std , model_index)
77.data_handle=uipanel('parent',figure_handles,'tag','statistic_panel','p
    osition',[0 .0 1 .25],'background',[.15 .23 .37]);
78.uicontrol(data_handle,'style','text','units','norm','tag','Bias','stri
    ng',...
79.     ['Bias = ' num2str(Bias)],'position',[.02 .7 .2
    .2],'horizontalalignment','left'...
80.     , 'backgroundcolor',[.15 .23
    .37],'foregroundcolor','w','fontsize',15);

```

```

81.uicontrol(data_handle,'style','text','units','norm','tag','Bias_std','
string',...
82.    ['Bias std = ' num2str(Bias_std)],'position',[.32 .7 .2
.2],'horizontalalignment','left'...
83.    , 'backgroundcolor',[.15 .23
.37],'foregroundcolor','w','fontsize',15);
84.uicontrol(data_handle,'style','text','units','norm','tag','Relative_Bi
as','string',...
85.    ['Relative Bias = ' num2str(Relative_Bias) '%'],'position',[.62 .7
.3 .2],'horizontalalignment','left'...
86.    , 'backgroundcolor',[.15 .23
.37],'foregroundcolor','w','fontsize',15);
87.uicontrol(data_handle,'style','text','units','norm','tag','MAE','strin
g',...
88.    ['MAE = ' num2str(MAE)],'position',[.02 .4 .2
.2],'horizontalalignment','left'...
89.    , 'backgroundcolor',[.15 .23
.37],'foregroundcolor','w','fontsize',15);
90.uicontrol(data_handle,'style','text','units','norm','tag','MAE_std','s
tring',...
91.    ['MAE std = ' num2str(MAE_std)],'position',[.32 .4 .2
.2],'horizontalalignment','left'...
92.    , 'backgroundcolor',[.15 .23
.37],'foregroundcolor','w','fontsize',15);
93.uicontrol(data_handle,'style','text','units','norm','tag','Relative_MA
E','string',...
94.    ['Relative MAE = ' num2str(Relative_MAE) ,'%'],'position',[.62 .4
.3 .2],'horizontalalignment','left'...
95.    , 'backgroundcolor',[.15 .23
.37],'foregroundcolor','w','fontsize',15);
96.uicontrol(data_handle,'style','text','units','norm','tag','RMSE','stri
ng',...
97.    ['RMSE = ' num2str(RMSE)],'position',[.02 .1 .2
.2],'horizontalalignment','left'...
98.    , 'backgroundcolor',[.15 .23
.37],'foregroundcolor','w','fontsize',15);
99.uicontrol(data_handle,'style','text','units','norm','tag','RMSE','stri
ng',...
100.   ['MSE std = ' num2str(MSE_std)],'position',[.32 .1 .2
.2],'horizontalalignment','left'...
101.   , 'backgroundcolor',[.15 .23
.37],'foregroundcolor','w','fontsize',15);
102.uicontrol(data_handle,'style','text','units','norm','tag','model_inde
x','string',...
103.   ['Model index = ' num2str(model_index)],'position',[.62 .1 .3
.2],'horizontalalignment','left'...
104.   , 'backgroundcolor',[.15 .23
.37],'foregroundcolor','w','fontsize',15);
105.end

```

8.2. פרופילי תכולת רטיבות, כלוריד וחנקת ומאזני מסה באזור הלא רווי – MATLAB code

```
1. function mass_balance_Graphs
2. clear all
3. clc
4. %=====
   =====
5. [folders_path , models_name]=get_path_and_name;
6. [solute , num_of_solutes]=import_solute(folders_path);
7. [print_times , siz_print_times]=print_time_check(folders_path);
8. [NOD_INF]=import_NOD_INF(siz_print_times , folders_path);
9. [T_LEVEL]=import_T_LEVEL(folders_path);
10.[total_mass_balance , mass_balance_headers]=mass_balance(T_LEVEL ,
    solute , print_times , siz_print_times);
11.[figure_handles]=plots(NOD_INF , models_name , print_times ,
    total_mass_balance);
12.mass_balance_plot(figure_handles, print_times , siz_print_times ,
    total_mass_balance , mass_balance_headers)
13.end
14.%=====
   =====
15.function [folders_path , models_name]=get_path_and_name
16.folders_path=uigetdir;
17.split_path=regexp(folders_path , '\', 'split');
18.siz=size(split_path);
19.models_name=split_path(siz(2));
20.end
21.function [solute , num_of_solutes]=import_solute(folders_path)
22.DELIMITER = ' ';
23.HEADERLINES =4;
24.i=0;
25.while i<10
26.    i=i+1;
27.    k=num2str(i);
28.    solute_exists=exist(strcat([folders_path , '\solute' , k ,
    '.out']));
29.    switch solute_exists
30.        case 2
31.            newData1 = importdata([folders_path '\solute' k '.out'],
    DELIMITER, HEADERLINES);
32.            solute{i}=newData1.data;
33.            otherwise
34.                break
35.        end
36.end
37.num_of_solutes=i-1;
38.end
39.function [print_times ,
    siz_print_times]=print_time_check(folders_path)
40.str='TPrint(1),TPrint(2),...,TPrint(MPL)';
41.fid=fopen([folders_path '\SELECTOR.IN']);
42.count=0;
43.check=0;
44.while check==0
45.    count=count+1;
46.    tline = fgetl(fid);
47.    check=strcmp(tline , str);
```

```

48.     if count>150
49.         break
50.     end
51.end
52.got1=count;
53.DELIMITER = ' ';
54.HEADERLINES =got1;
55.newData1 = importdata([folders_path '\SELECTOR.IN'], DELIMITER,
    HEADERLINES);
56.siz_newData=size(newData1.data);
57.check_NaN=isnan(newData1.data);
58.n=0;
59.for i=1:siz_newData(1)
60.     for k=1:siz_newData(2)
61.         if check_NaN(i,k)==1
62.             break
63.         end
64.             n=n+1;
65.             print_times(1,n)=newData1.data(i,k);
66.     end
67.end
68.print_times(2,:)=print_times(1,+)/365;
69.siz_print_times=size(print_times);
70.end
71.function [NOD_INF]=import_NOD_INF(siz_print_times , folders_path)
72.DELIMITER = ' ';
73.for i=1:siz_print_times(2)+1
74.     switch i
75.         case 1
76.             HEADERLINES =13;
77.         otherwise
78.             siz_model=size(NOD_INF{i-1});
79.             HEADERLINES=HEADERLINES+siz_model(1)+9;
80.     end
81.     newData1 = importdata([folders_path '\NOD_INF.OUT'], DELIMITER,
    HEADERLINES);
82.     NOD_INF{i}=newData1.data;
83.end
84.end
85.function [T_LEVEL]=import_T_LEVEL(folders_path)
86.DELIMITER = ' ';
87.HEADERLINES =9;
88.newData1 = importdata([folders_path '\T_LEVEL.out'], DELIMITER,
    HEADERLINES);
89.T_LEVEL=newData1.data;
90.end
91.function [total_mass_balance ,
    mass_balance_headers]=mass_balance(T_LEVEL , solute , print_times ,
    siz_print_times)
92.model_length=print_times(siz_print_times(1) , siz_print_times(2));
93.model_length=int8(model_length);
94.=====
    =====
95.% Water mass balance:
96.sum_v_top_25yr=abs(T_LEVEL(9131 , 9))*10/25; % Cumulative top water
    depth (mm)

```

```

97.sum_v_root_25yr=T_LEVEL(9131 , 10)*10/25; % Cumulative Root water
    uptake (mm)
98.sum_v_bot_25yr=abs(T_LEVEL(9131 , 11))*10/25; % Cumulative bottom
    water depth (mm)
99.%=====
    =====
100.%Nitrate (N-NO3) Input:
101.sum_NO3_top_25yr=solute{3}(9131 , 4)*10/25; % Cumulative top solute
    flux (kg/dun/year)
102.sum_nitr_25yr=solute{3}(9131 , 6)*10/25; % Cumulative nitrification
    input (kg/dun/year)
103.%=====
    =====
104.% Nitrate (N-NO3) output:
105.sum_NO3_root_25yr=solute{3}(9131 , 12)*10/25; % Cumulative root
    uptake (kg/dun/year)
106.sum_NO3_bot_25yr=abs(solute{3}(9131 , 5))*10/25; % Cumulative bottom
    solute flux (kg/dun/year)
107.sum_denitr_25yr=abs(solute{3}(9131 , 7))*10/25; % Cumulative
    denitrification output (kg/dun/year)
108.%=====
    =====
109.% Ammone (N-NH4) input:
110.sum_NH4_top_25yr=solute{2}(9131 , 4)*10/25; % Cumulative top solute
    flux (kg/dun/year)
111.%=====
    =====
112.% Ammone (N-NH4) outut:
113.sum_NH4_root_25yr=solute{2}(9131 , 12)*10/25; % Cumulative root
    uptake (kg/dun/year)
114.sum_nitr_eva_25yr=abs(solute{2}(9131 , 7))*10/25; % Cumulative
    nitrification & evaporation output (kg/dun/year)
115.sum_eva_25yr=sum_nitr_eva_25yr-sum_nitr_25yr; % Cumulative
    evaporation (kg/dun/year)
116.sum_NH4_bot_25yr=abs(solute{2}(9131 , 5))*10/25; % Cumulative bottom
    solute flux (kg/dun/year)
117.%=====
    =====
118.total_mass_balance=[sum_v_top_25yr , sum_v_root_25yr , sum_v_bot_25yr
    , sum_NO3_top_25yr , sum_nitr_25yr , sum_NO3_root_25yr ,...
119.    sum_NO3_bot_25yr , sum_denitr_25yr , sum_NH4_top_25yr ,
    sum_NH4_root_25yr , sum_eva_25yr , sum_NH4_bot_25yr];
120.mass_balance_headers={'Sum top water depth (mm)' , 'Sum Root water
    uptake (mm)' , 'Sum bottom water depth (mm)' , 'Sum top N-NO3 flux
    (kg/dun/year)' , 'Sum nitrification (kg/dun/year)' , 'Sum root N-NO3
    uptake (kg/dun/year)' ,...
121.    'Sum bottom N-NO3 flux (kg/dun/year)' , 'Sum denitrification
    (kg/dun/year)' , 'Sum top N-NH4 flux (kg/dun/year)' , 'Sum root N-NH4
    uptake (kg/dun/year)' , 'Sum evaporation (kg/dun/year)' , 'Sum bottom
    N-NH4 flux (kg/dun/year)'};
122.%=====
    =====
123.if model_length==75
124.    switch int8(print_times(2,2))
125.        case 50

```

```

126.
%=====
=====
127.          % Water mass balance:
128.          sum_v_top_last_75yr=abs(T_LEVEL(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 9))*10/25 - abs(T_LEVEL(print_times(1,2) ,
9))*10/25; % Cumulative top water depth (mm)
129.          sum_v_root_last_75yr=T_LEVEL(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 10)*10/25 - T_LEVEL(print_times(1,2) ,
10)*10/25; % Cumulative Root water uptake (mm)
130.          sum_v_bot_last_75yr=abs(T_LEVEL(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 11))*10/25 - abs(T_LEVEL(print_times(1,2) ,
11))*10/25; % Cumulative bottom water depth (mm)
131.
%=====
=====
132.          %Nitrate (N-NO3) Input:
133.          sum_NO3_top_last_75yr=solute{3}(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 4)*10/25 - solute{3}(print_times(1,2) ,
4)*10/25; % Cumulative top solute flux (kg/dun/year)
134.          sum_nitr_last_75yr=solute{3}(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 6)*10/25 - solute{3}(print_times(1,2) ,
6)*10/25; % Cumulative nitrification input (kg/dun/year)
135.
%=====
=====
136.          % Nitrate (N-NO3) output:
137.          sum_NO3_root_last_75yr=solute{3}(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 12)*10/25 - solute{3}(print_times(1,2) ,
12)*10/25; % Cumulative root uptake (kg/dun/year)
138.          sum_NO3_bot_last_75yr=abs(solute{3}(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 5))*10/25 - abs(solute{3}(print_times(1,2) ,
5))*10/25; % Cumulative bottom solute flux (kg/dun/year)
139.          sum_denitr_last_75yr=abs(solute{3}(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 7))*10/25 - abs(solute{3}(print_times(1,2) ,
7))*10/25; % Cumulative denitrification output (kg/dun/year)
140.
%=====
=====
141.          % Ammone (N-NH4) input:
142.          sum_NH4_top_last_75yr=solute{2}(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 4)*10/25 - solute{2}(print_times(1,2) ,
4)*10/25; % Cumulative top solute flux (kg/dun/year)
143.
%=====
=====
144.          % Ammone (N-NH4) output:
145.          sum_NH4_root_last_75yr=solute{2}(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 12)*10/25 - solute{2}(print_times(1,2) ,
12)*10/25; % Cumulative root uptake (kg/dun/year)
146.          sum_nitr_eva_last_75yr=abs(solute{2}(print_times(1 ,
siz_print_times(2)) , 7))*10/25 - abs(solute{2}(print_times(1,2) ,
7))*10/25; % Cumulative nitrification & evaporation output
(kg/dun/year)
147.          sum_eva_last_75yr=(sum_nitr_eva_last_75yr-
sum_nitr_last_75yr); % Cumulative evaporation (kg/dun/year)

```

```

148.          sum_NH4_bot_last_75yr=abs(solute{2}(print_times(1 ,
          siz_print_times(2)) , 5))*10/25 - abs(solute{2}(print_times(1,2) ,
          5))*10/25; % Cumulative bottom solute flux (kg/dun/year)
149.
          %=====
          =====
150.          total_mass_balance(2,:)= [sum_v_top_last_75yr ,
          sum_v_root_last_75yr , sum_v_bot_last_75yr , sum_NO3_top_last_75yr ,
          sum_nitr_last_75yr , sum_NO3_root_last_75yr , sum_NO3_bot_last_75yr ,
          sum_denitr_last_75yr , ...
151.          sum_NH4_top_last_75yr , sum_NH4_root_last_75yr ,
          sum_eva_last_75yr , sum_NH4_bot_last_75yr];
152.      end
153.end
154.end
155.function [figure_handles]=plots(model , models_name , print_times ,
          total_mass_balance)
156.graphs_name={'Water content' 'Chloride' 'Nitrate';'Water content [-]'
          'Concentration [mg/cm3]' 'Concentration [mg/cm3]'};
157.figure_handles=figure('units','norm','position',[.12 .07 .8
          .8],'color',[.15 .23 .37]);
158.set(figure_handles,'Name',models_name{1});
159.pos=[0 .5 .5 .5 ; .5 .5 .5 .5 ; 0 0 .5 .5];
160.panel_tags={'Water content' 'Chloride' 'Nitrate'};
161.colors={'blue','green','cyan','magenta','white','yellow','red','black
          '};
162.for i=1:3
163.
          uipanel('Parent',figure_handles,'tag',panel_tags{i},'position',pos(i,:
          ),'backgroundcolor',[.15 .23 .37]);
164.
          axes('Parent',findobj(figure_handles,'Tag',panel_tags{i}),'units','nor
          m','position',[.13 .13 .83 .77],'color',[.49 .49 .49],...
165.          'xcolor','w','ycolor','w','xgrid','on','ygrid','on');
166.      hold on
167.      title(graphs_name{1,i},'color','w','fontname','times new
          roman','fontunits','normalized','fontsize',0.08)
168.      xlabel(graphs_name{2,i},'fontname','times new
          roman','fontunits','normalized','fontsize',0.07,'color','w')
169.      ylabel('Depth (cm)','fontname','times new
          roman','fontunits','normalized','fontsize',0.07,'color','w')
170.      siz_print_times=size(print_times);
171.      switch i
172.          case 1
173.              plot (model{1}(:,4) , model{1}(:,2) , 'color' , colors{1});
174.              for k=1:siz_print_times(2)
175.                  plot
          (model{k+1}(:,4) , model{k+1}(:,2) , 'color' , colors{k+1});
176.              end
177.          case 2
178.              plot (model{1}(:,12) , model{1}(:,2) , 'color' , colors{1});
179.              for k=1:siz_print_times(2)
180.                  plot
          (model{k+1}(:,12) , model{k+1}(:,2) , 'color' , colors{k+1});
181.              end
182.          case 3
183.              plot (model{1}(:,14) , model{1}(:,2) , 'color' , colors{1});

```



```

184.         for k=1:siz_print_times(2)
185.             plot
186.             (model{k+1}(:,14),model{k+1}(:,2), 'color',colors{k+1});
187.         end
188.     if siz_print_times(2)==1 && i==1
189.         names={'observation',[ 'model - '
190.             int2str(1985+print_times(2,siz_print_times(2)))]};
191.     elseif i==1 && print_times(1 , siz_print_times(2))>9131
192.         names={'observation'};
193.         for k=1:siz_print_times(2)
194.             if print_times(1,k)<=9131
195.                 names(k+1)=[ 'model - '
196.                     int2str(1985+print_times(2,k))];
197.             elseif print_times(1,k)>9131
198.                 names(k+1)=[ 'Simulatin (years after 2010) - '
199.                     int2str(-25+print_times(2,k))];
200.             end
201.         end
202.     elseif i==1 && print_times(1 , siz_print_times(2))<=9131
203.         names={'observation'};
204.         for k=1:siz_print_times(2)
205.             names(k+1)=[ 'model - ' int2str(1985+print_times(2,k))];
206.         end
207.     end
208. legend(names)
209. set(legend,'textcolor','w','location','best','linewidth',1.5,'edgecolor',
210.     'r','w');
211. hold off
212. end
213. end
214. function mass_balance_plot(figure_handles, print_times ,
215.     siz_print_times , total_mass_balance , mass_balance_headers)
216. mass_balance_handle=uipanel('Parent',figure_handles,'tag','mass_balan
217. ce','position',[.5 0 .5 .5],'backgroundcolor',[.15 .23 .37]);
218. uicontrol(mass_balance_handle,'style','text','units','norm','tag','su
219. m_v_top_25yr','string',...
220.     'Mass balance after 25 years','position',[.45 .9 .25 .09],...
221.     'horizontalalignment','center','backgroundcolor',[.15 .23
222.     .37],'fontunits','normalized','fontsize',0.4,'foregroundcolor','r');
223. uicontrol(mass_balance_handle,'style','text','units','norm','tag','su
224. m_v_top_25yr','string',...
225.     'Mass balance of the last 25 years (75-50)','position',[.7 .9 .25
226.     .09],...
227.     'horizontalalignment','center','backgroundcolor',[.15 .23
228.     .37],'fontunits','normalized','fontsize',0.4,'foregroundcolor','r');
229. pos=[.02 .825 .45 .068 ; .5 .825 .15 .068 ; .75 .825 .15 .068];
230. for i=1:12
231.     uicontrol(mass_balance_handle,'style','text','units','norm','tag','sum
232.     _v_top_25yr','string',...
233.         strcat(mass_balance_headers(1,i) , ' =
234. '), 'position',pos(1,:),...
235.         'horizontalalignment','left','backgroundcolor',[.15 .23
236.         .37],'fontunits','normalized','fontsize',0.63,'foregroundcolor','w');

```

```

223.
    uicontrol(mass_balance_handle,'style','text','units','norm','tag','sum
    _v_top_25yr','string',...
224.         int2str(total_mass_balance(1,i)),'position',pos(2,:),...
225.         'horizontalalignment','center','backgroundcolor',[.15 .23
    .37],'fontunits','normalized','fontsize',0.63,'foregroundcolor','w');
226.     if int8(print_times(2,siz_print_times(2)))==75
227.         siz=size(total_mass_balance);
228.         switch siz(1)
229.             case 2
230.
                uicontrol(mass_balance_handle,'style','text','units','norm','tag','sum
                _v_top_25yr','string',...
231.                int2str(total_mass_balance(2,i)),'position',pos(3,:),...
232.                'horizontalalignment','center','backgroundcolor',[.15 .23
    .37],'fontunits','normalized','fontsize',0.63,'foregroundcolor','w');
233.                case 1
234.                    if i==1
235.                        disp('second print time in the HYDRUS-1D must be
    18262 (50 years) in order to calculate mass balance of the last 25
    years')
236.
                uicontrol(mass_balance_handle,'style','text','units','norm','tag','sum
                _v_top_25yr','string',...
237.                'second print time must be 50
    years','position',[.7 .5 .25 .09],...
238.                'horizontalalignment','center','backgroundcolor',[.15 .23
    .37],'fontunits','normalized','fontsize',0.4,'foregroundcolor','r');
239.                end
240.            end
241.        end
242.        pos(1:3,2)=pos(1:3,2)-0.075;
243.    end
244. end

```

Abstract

During the last few decade, high NO_3^- concentration is the main cause, for disqualification of drinking water wells in Israel. Fertilization excess or inefficient utilization, of Nitrogen (N) inputs at the surface, may increase N leach and contaminate the underlying aquifer. Several objectives were determined to reach an optimal fertilization regime, that considers crop requirements on the one hand and groundwater quality on the other: 1. Vadose zone sampling under citrus orchards and above coastal aquifer, and examination of chemical and physical parameters that are relevant to water flow and to N transport. 2. Water flow, and chloride & N transport models calibration to deep vadose zone sampled data. 3. Examination of the influence of surface agricultural interface changes on deep vadose zone percolation, using simulations with the calibrated models.

In this study we obtained continuous undisturbed sediment cores from agricultural land above the Israeli coastal aquifer. In total, 15 boreholes of 9 meter depth were drilled using a direct push rig, at five different sites. In each site, three sampling boreholes were drilled, two relatively close (<30 m), and the third relatively far (>100 m). Four sites are located within citrus orchards (three in Hamra soil of the Sharon region and one in Vertisol of the Yehuda low land), and one site is located within a field of variable crops in the Sharon. Soil cores were cut to samples that represent 30 cm of the vertical profile, enabling a detailed analysis of the root zone and deep vadose zone.

One-dimensional water flow (Richards equation with root water uptake) and Cl^- , NH_4^+ and NO_3^- transport (Advection dispersion equation with source & sink terms, representing reactions and root uptake) models were calibrated for three sites. Initial hydraulic parameters (van Genuchten – Mualem hydraulic functions) were estimated using grain size distribution and bulk density input for Pedo Transfer Functions (PTFs). Calibration was obtained using slight parameter changes for best fitting of modeled profiles to those observed.

Water content, Cl^- and NO_3^- profiles show large heterogeneity within the sites. Nevertheless closer profiles have a higher correlation than distant profiles within the same plot. High Cl^- concentrations in the pore water below root zones in the

Sharon region (490-1480 mg/l), indicates of relatively low recharge (90-325 mm/yr). Higher recharge fluxes are estimated by the Israeli Hydrological Service, using recharge coefficients method for irrigation and precipitation. Steady state estimations based on observation, show spatial difference of NO_3^- fluxes to groundwater (5 – 22 kg N- NO_3^- /dun/yr) under citrus orchards in the Sharon region. Unlike the Vertisol profiles, those of Hamra show significant correlation between Cl^- and NO_3^- , suggesting large fraction of NO_3^- that is not withdrawn by the roots and is not reactive in the deep vadose zone. Ammonium concentration profiles are negligible under all sites, apart of one orchard, that is being irrigated using treated waste water since around 1980. Dissolved organic carbon (DOC) profiles show high correlation with clay content. Relatively high concentrated (~50 mg/kg) uniform DOC profiles were found in heavy soils, whereas in lighter soils these profiles are high at the top, and decrease sharply within the top two meters to lower concentrations in the deep vadose zone (10 mg/kg under 2 m' depth in Hamra and even lower concentration in the sandy soils).

An important result was obtained during the calibration of NO_3^- transport models. The process required a restriction of the maximum allowed concentration of NO_3^- root uptake (30 mg/l N- NO_3^-). This result is in-line with the correlation between Cl^- and NO_3^- profiles, and supports the estimation that a large portion of NO_3^- is not consumed by the roots. That restriction enhances the influence of N application differences at the surface, on fluxes to groundwater, whereas, up to some threshold amounts, a decrease in N application will not significantly influence root N uptake and crop productivity.

All three calibrated models were used to simulate optional fertilization scenarios. Simulation of 50% reduction in applied N fertilizers, showed ~70% reduction of N leach to groundwater, while N root uptake remained relatively high (18 – 19 kg N- NO_3^- /dun/yr) and a bit below the fertilization recommendations. In addition, this simulation show that averaged NO_3^- pore water concentration, decreased below the Israeli standard for drinking water (70 mg/l NO_3^- ≈ 16 mg/l N- NO_3^-).

The main conclusion is that lowering the averaged NO_3^- pore water concentration beneath the drinking water standard, will also cause a future reduction of its

concentration in the groundwater recharge flux, and will lower it below the drinking water standard. That will ensure that groundwater recharge flux won't contribute to a future breach of drinking water standard within the groundwater. Calibrated models, like those presented in this paper, can help reach an intelligent evaluation of N surface application amounts, that will lower the averaged pore water concentration of NO_3^- beneath the drinking water standard. These N amounts can be used as a basis for a future standardization for N application amounts above sensitive hydrological zones. For citrus orchards in the Sharon region, N application range is 20-25 $\text{kg}\text{N-NO}_3^-/\text{dun}/\text{yr}$, including the N within the irrigation water.

**Nitrate Flux to Groundwater Under Citrus
Orchards: Observations, Modeling and Simulating
Different Nitrogen Application Rates**

Thesis for the Degree of Master of Science

Submitted by:

Roi Haim Shapira

Under the supervision of:

**Dr. Daniel Kurtzman, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences,
Agricultural Research Organization, Volcani Center**

**Prof. Benny Chefetz, Department of Soil and Water Sciences, The Faculty
of Agriculture, Food and Environment**

July 2012

Department of Hydrology and Water Resources
The Hebrew University of Jerusalem

**Nitrate Flux to Groundwater Under Citrus
Orchards: Observations, Modeling and Simulating
Different Nitrogen Application Rates**

Thesis for the Degree of Master of Science

Submitted by:

Roi Haim Shapira

Under the supervision of:

**Dr. Daniel Kurtzman, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences,
Agricultural Research Organization, Volcani Center**

**Prof. Benny Chefetz, Department of Soil and Water Sciences, The Faculty
of Agriculture, Food and Environment**

July 2012

Department of Hydrology and Water Resources
The Hebrew University of Jerusalem