

תצפיות ומודלים של שטפי חנקה למי תהום משימושי קרקע שונים - מהשדות עד לבארות השואבות מהאקווה

עבודת גמר לתואר מוסמך בהידרולוגיה ומשאבי מים

מוגשת על ידי:

יהודה לוי

מספר תלמיד 036768232

בהדרכת:

ד"ר דניאל קורצמן

פרופ' בנימין חפץ

ינואר 2015

טבת תשע"ה

החוג להידרולוגיה ומשאבי מים
המכון למדעי כדור הארץ – הפקולטה למתמטיקה ומדעי טבע
המחלקה לקרקע ומים – הפקולטה לחקלאות ברחובות
האוניברסיטה העברית בירושלים

**"כי ה' אלוהיך מביאך אל ארץ טובה, ארץ נחלי מים, עיינות
ותהומות יוצאים בבקעה ובהר"**

דברים ח', ז'.

תודות

עבודה זו לא הייתה באה לעולם לולי עזרתם של אנשים רבים וטובים להם ברצוני להודות:

תודה ראשית למנחה המחקר ד"ר **דני קורצמן** מהמכון לקרקע מים וסביבה במנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני - על האמונה וההשקעה הרבה בי ובמחקר, על האיזון הנכון בין לחץ כשצריך לבין שחרור כשצריך, על הזמינות, על המענה לכל פרט ועל הלימוד.

תודה למנחה המחקר פרופ' **בני חפץ** מהמחלקה לקרקע ומים בפקולטה לחקלאות ברחובות על הליווי לכל אורך הדרך ועל המענה המהיר כל אימת שעלה צורך.

תודה רבה ל**רשות המים** על מימון המחקר.

תודה לחקלאים שנתנו לנו את האפשרות להיכנס לשדותיהם ולבצע קידוחים וסיפקו מידע חשוב על הגידולים באופן התנדבותי לחלוטין: **תלי** מקיבוץ שדה אליהו, **חיים** ממושב נורדיה, ו**הראל** מקדימה.

תודה מיוחדת ל**עידו ניצן** טכנאי קבוצת המחקר של ד"ר דני קורצמן, על העזרה הרבה בכלל ובבדיקות המוליכות ההידראולית בפרט.

תודה ל**רועי שפירא** ממקורות שעבודה זו נעשתה בהמשך לעבודתו ועזרה רבה הייתה על בסיס הניסיון שצבר.

תודה לד"ר **יורם כץ** ממקורות על העזרה והטיפים בלימוד ועבודה בתוכנת GMS.

תודה לד"ר **גיא רשף** מהאגף לאיכות מים ולד"ר **יעקב ליפשיץ** מהשירות ההידרולוגי ברשות המים על אספקת הנתונים מהבארות ובמיוחד ל**ליאור נצר** מהשירות ההידרולוגי על ההשקעה בחיפוש נתונים חסרים ומענה ברצון רב לכל בעיה. סליחה על השיגועים.

תודה לד"ר **גיל שטרסברג** על העזרה בתכנות הארכת המודלים החד מימדיים.

לטכנאיות המעבדות במכון לקרקע מים וסביבה מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני - על העזרה בביצוע בדיקות הקרקע.

תודה רבה ומיוחדת לכל סביבתי האישי הורי אחי ובמיוחד לאשתי צופיה וילדי רועי ורוני על החיים ולבורא העולם שנתן לי את כל אלה.

תקציר

אקוות החוף בישראל מהווה משאב מים מרכזי למי שתיה בישראל. במהלך השנים נפסלו לשימוש ביתי מספר רב של בארות מי שתיה באזור זה כתוצאה מריכוזי חנקות גבוהים מהתקן הישראלי (70 mg/L). חלק ניכר מהבארות שנסגרו מצויות באזור השרון בו מתקיימת פעילות חקלאית ענפה ע"ג קרקעות חמרה קלות. בנוסף נצפתה שונות מרחבית ניכרת בריכוזי החנקה על פני סקלת מרחק קטנה (מאות מטרים). השערת המחקר היא כי דישון חנקני לא יעיל גורם לחלחול חנקות לעומק הקרקע, כאשר חיזור החנקה לחנקן גזי לא מתרחש לרוב בקרקעות קלות. במחקר נבחן הקשר בין ריכוזי החנקה בבארות לבין שימושי הקרקע החקלאית. נערך כימות שטפי החנקה למי התהום מתחת למספר שדות חקלאיים בשרון המייצגים שלושה שימושי קרקע עיקריים באזור: פרדסים, מטע נשיר וגידול ירקות. בכל השדות שנדגמו גודלו הגידולים (תפוז, אפרסמון ותפוח אדמה, בהתאמה) לפחות במשך עשור. מכל מגדל נאסף מידע לגבי משטרי הדישון וההשקיה, כן נאספו נתוני איכות מי ההשקיה. בכל שדה נקדחו שלושה קידוחי דיגום לעומק 10 מטרים ובהם הוצאו מקטעי גלעין של הקרקע והסדימנט. תכונות הקרקע נבדקו בבדיקות סטנדרטיות. על פי מאזן מסת כלוריד הוערכו שטפי המילוי החוזר והחנקה לאקווה במצב תמידי. לקידוח אחד מייצג בכל שדה הוצב מודל חד ממדי עיתי (HYDRUS-1D) של זרימה והסעת חנקן.

בעבודה נמצא כי ערך המילוי החוזר הממוצע לאקווה תחת ירקות ונשירים בשרון עמד על 300-400 מ"מ לשנה, הן על פי המודל העתי והן על פי מאזן מסת הכלוריד. אומדני שטפי החנקה היו 10-20 ק"ג חנקן חנקתי לדונם לשנה בפרדס ובמטע נשיר ו- 20-30 ק"ג חנקן חנקתי לדונם בירקות.

החלק השני של העבודה התמקד במודל זרימה (MODFLOW) והסעת חנקה (MT3DMS) במי התהום מתחת לשטח חקלאי בשרון (13.5 קמ"ר). מודל מי התהום הוזן בשטפי מים וחנקה עיתיים מפלטי המודלים המכילים של האזור הלא רווי שהוארכו לעומק התווך הלא רווי הרלוונטי לכל תא במודל מי התהום. תנאי השפה וכיול המודל נעשו באמצעות נתונים מדודים בבארות שהתקבלו מהשירות ההידרולוגי. החלוקה ל-4 שימושי קרקע והצבת מודל לא רווי ייצוגי אחד (אומנם תווך בעל אורך שונה בהתאם לעובי התווך הלא רווי הרלוונטי) הספיקה כדי לחזות את סך כל החנקה באקווה (או ריכוז ממוצע בבארות) בצורה די מדויקת. עם זאת שטפים מייצגים אלה לא הצליחו לשחזר את ריכוזי החנקה בבארות המזוהמות יותר, ולכן גם לא את השונות המרחבית בריכוזי החנקה בבארות השונות. כדי שמודל ההסעה יצליח לשחזר ריכוזים גבוהים של חנקה בבארות היה צורך להכפיל את שטפי החנקה בפני מי התהום בגורמים אקראיים: 0.1 (18% מהשטח), 0.6 (19% מהשטח), 1 (55% מהשטח), 2.8 (4% מהשטח), 5 (3% מהשטח), 10 (1% מהשטח), באופן שסך

החנקה המחלחלת בשטח המודל נשאר זהה. רק עם הכנסת המכפלות הללו במשרעת של שני סדרי גודל ניתן היה לשחזר את השונות הנצפית בריכוזי החנקה בבארות.

המודל המכיל הורץ לתקופה עתידית של 40 שנה (2012-2052) באפשרויות שונות של דישון חנקני בשדות: 1) דישון רגיל, 2) דישון ברמה של 75% מהמקובל, ו-3) דישון ברמה של 50%. בטווח של 40 שנה, המשך דישון רגיל יביא להמשך עליה בריכוזים ופגיעה באקווה. המשך דישון ב-75% יביא לבלימת העלייה וחזרה למצב הקיים באקווה היום פחות או יותר בעוד כ-30-40 שנה. המשך דישון ב-50% מהכמות הנוכחית יביא לטיוב האקווה וריכוז החנקה הממוצע באזור המחקר אף יחזור מעט מתחת לתקן.

המסקנות העיקריות העולות מעבודה זו הן שניתן לשחזר את ריכוזי החנקה הממוצעים באקווה באמצעות שטפים עיתיים מהתווך הלא רווי תחת מספר מוגבל של שימושי קרקע אך לא את השונות המרחבית של הריכוזים בבארות. לשם שחזור השונות יש צורך בהוספת גורמים אקראיים שונים במרחב פני השטח. בנוסף, עתיד איכות המים באקוות החוף באזור השרון ושימושם למי שתייה בעתיד תלויים בהפחתת תשומות דשני החנקן.

תוכן עניינים

III	תודות	.....
V	תקציר	.....
1	תוכן עניינים	.....
3	רשימת תרשימים	.....
4	רשימת טבלאות	.....
5	1. רקע מדעי	.....
5	1.1	דישון חנקני
6	1.2	מעגל החנקן בטבע
6	1.3	חנקן וחנקה
7	1.4	זיהום מים בחנקה
7	1.5	הצטברות חנקה במי תהום כתוצאה מפעילות חקלאית בפני השטח
8	1.6	מאמץ להפחתה בזיהומי החנקה
8	1.7	זיהום חנקה במי תהום בישראל
11	1.8	אזור המחקר והגידולים
12	1.9	מודלים של זרימה והסעת חנקה בתווך לא רווי
12	1.9.1	הנחת מצב תמידי
13	1.9.2	שטפי מילוי חוזר משתנים בזמן
14	1.9.3	שטפי מומסים (כלוריד, חנקן-חנקתי וחנקן-אמוניאקלי) משתנים בזמן
	1.9.4	פתרון נומרי של משוואות הזרימה וההסעה בתווך הלא רווי באמצעות מודל HYDROS-1D
15	1.10	פתרון נומרי של משוואות הזרימה וההסעה במי התהום באמצעות מודל MODFLOW ומודל MT3DMS להסעה
16	1.11	צימוד המודלים של התווך הלא רווי והרווי
17	1.12	השערת המחקר
18	2.	מטרות המחקר
19	3.	חומרים ושיטות
19	3.1	שטפי חנקה מהשדות אל התווך הלא רווי
19	3.1.1	אתרי שדות המחקר
19	3.1.2	איסוף נתונים
21	3.1.3	השקיה ודישון
21	3.1.4	דיגום השדות
22	3.1.5	בדיקות קרקע
23	3.1.6	חישוב שטפי מים וחנקן חנקתי מחלחלים בקירוב מצב תמידי
	3.1.7	חישוב שטפי מים וחנקן חנקתי מחלחלים משתנים בזמן באמצעות מודל נומרי
23	3.1.8	דיסקרטיזציה
24		

24	.....	3.1.9	תנאי שפה והתחלה, איברי מבלע ומשך מודל הזרימה
25	.....	3.1.10	כיול מודל הזרימה
	.....	3.1.11	תנאי שפה והתחלה, איברי מקור\מבלע לריאקציות
25	.....		ומשך מודל ההסעה
25	.....	3.1.12	כיול המודלים של הסעת המומסים
26	.....	3.2	מודל נומרי של זרימה והסעת חנקת במי התהום
26	.....	3.2.1	מיקום ואיסוף נתונים
27	.....	3.2.2	תקופת ההרצה וצעדי הזמן במודל
27	.....	3.2.3	שטפי מים, חנקת ושימושי קרקע
28	.....	3.2.4	עובי התווך הלא רווי
	.....	3.2.5	העמקת המודלים מהתווך הלא רווי עד למי התהום
29	.....		והארכת תקופת ההרצה
30	.....	3.2.6	בניית תאי המודל (GRID)
32	.....	3.2.7	תנאי שפה
32	.....	3.2.8	תנאי התחלה
32	.....	3.2.9	איברי מקור\מבלע
32	.....	3.2.10	כיול המודל
35	.....	3.2.11	הרצת המודל לעתיד בתרחישי דישון שונים
36	.....	4	תוצאות
	.....	4.1	פרופילים של תכולת רטיבות, ריכוזי כלוריד וחנקת מדודים
36	.....		בקידוחי הדיגום בתווך הלא רווי
37	.....	4.2	שטפי מים וחנקת מהשדות אל התווך הלא רווי בהנחת מצב תמידי
37	.....	4.3	ריכוזי חנקת אמוניאקלי בתווך הלא רווי
37	.....	4.4	הרכב מכאני
38	.....	4.5	מודל זרימה והסעה חד ממדי בתווך הלא רווי
41	.....	4.6	מוליכות הידראולית ברוויה בגלעיני קרקע בלתי מופרת
42	.....	4.7	מאזני מים וחנקת במודלים החד ממדיים המכויילים
43	.....	4.8	מגמות במפלס מי התהום בשטח מודל מי התהום ב 40 השנים האחרונות
45	.....	4.9	מפלסים מתאימים במודל הזרימה המכוייל
47	.....	4.10	כיול מודל ההסעה ושחזור השונות המרחבית
52	.....	4.11	תרחישי דישון שונים והרצת המודל ל 40 שנה עתידיות
54	.....	5	דין
54	.....	5.1	הנחות יסוד ושטפי חנקת קיצוניים מפני הקרקע
55	.....	5.2	הצלחה-הצלחה בשחזור השונות המרחבית בריכוזי החנקת בבארות
56	.....	5.3	קישור פלט המודלים מהתווך הלא רווי אל המודלים של מי התהום
57	.....	5.4	ייחודיות העבודה ומסקנותיה הבולטות
58	.....	5.5	תחזיות ריכוז חנקת באקוות החוף – הסתייגות לאור מבט על תחזית קודמת
59	.....	6	סיכום
61	.....	7	רשימת ספרות

רשימת תרשימים

- תרשים 1.1: ריכוז חנקה ממוצע ב30 בארות בשרון במשך 40 שנה 9
- תרשים 1.2: ריכוזי חנקה בבארות באקוות החוף (2010) ומפת קרקעות מעל האקווה 10
- תרשים 1.3: ריכוזי חנקה ממוצעים (2005-2010) בבארות באזור המחקר בשרון 11
- תרשים 1.4: חתך גיאולוגי של אקוות החוף באזור השרון 12
- תרשים 3.1: תמונות מקידוחי הדיגום בשדות 21
- תרשים 3.2: תצלום אוויר של שטח המודל ובארות ששימשו לכיול ולתנאי השפה 26
- תרשים 3.3: שימושי קרקע בשטח המודל 28
- תרשים 3.4: מפת מפלסים ממוצעים ועובי התווך הלא רווי בשטח המודל 29
- תרשים 3.5: שימושי קרקע ועומקי התווך הלא רווי בתאי המודל 30
- תרשים 3.6: עומקי הפרפורציות בבארות בשטח המודל 31
- תרשים 3.7: תאי המודל במבט אלכסוני תלת ממדי 31
- תרשים 3.8: מספר התאים המוכפלים בכל גורם הכפלת שטפי החנקה 34
- תרשים 4.1: נתוני תכולת רטיבות, ריכוזי כלוריד וחנקן חנקתי בקידוחי הדיגום בשדות ... 36
- תרשים 4.2: התאמת פרופילי תכולת רטיבות, כלוריד וחנקן חנקתי מדודים ומחושבים 40
- תרשים 4.2: מוליכות הידראולית ברוויה מדודה בגלעיני הקרקע 41
- תרשים 4.4: מוליכות הידראולית ברוויה על פי מרקם הקרקע כנגד המדודה 41
- תרשים 4.5: מפלס מי תהום ממוצע בבארות בשטח המודל לאורך השנים 43
- תרשים 4.6: שאיבה כללית משטח המודל לאורך השנים 44
- תרשים 4.7: מוליכויות הידראוליות בשטח המודל 45
- תרשים 4.8: נתוני מפלס מי תהום מחושבים כנגד מדודים 46
- תרשים 4.9: ריכוזי חנקה מחושבים כנגד מדודים בבארות בשלב הכיול הראשון 47
- תרשים 4.10: ריכוזי חנקה מחושבים כנגד מדודים בבארות בשלבי הכיול המתקדמים 50
- תרשים 4.11: ריכוזי חנקה מדודים ומחושבים בבארות בשטח המודל לאורך הזמן 51
- תרשים 4.12: סטיות תקן בין נתוני ריכוז חנקה מדודים ומחושבים לאורך הזמן 51
- תרשים 4.13: ריכוזי חנקה בבארות ב40 השנים הבאות בתרחישי דישון שונים 53
- תרשים 5.1: ריכוז חנקה נחזה ונצפה בתא המודל של Mercado 1976 58

רשימת טבלאות

- טבלה 1.1: גורמים לסגירת בארות בישראל ומספר הבארות שנסגרו 9
- טבלה 3.1: תדירות ומנות השקיה ודישון באפרסמון, תות שדה ותפוחי אדמה 20
- טבלה 4.1: שטפי מילוי חוזר וחנקן חנקתי לפי מאזן מסת כלוריד בהנחת מצב תמידי 37
- טבלה 4.2: נתוני מרקם הקרקע בקידוחי הדיגום להם נערך המודל 38
- טבלה 4.3: פרמטרים למודלים המכויילים של הזרימה וההסעה בשדה התפוחי אדמה ... 38
- טבלה 4.4: פרמטרים למודלים המכויילים של הזרימה וההסעה בשדה התות 39
- טבלה 4.5: פרמטרים למודלים המכויילים של הזרימה וההסעה במטע האפרסמון 39
- טבלה 4.6: מאזני מים לפי מודל הזרימה בתווך הלא רווי בשדות 42
- טבלה 4.7: מאזני חנקן לפי מודל ההסעה בתווך הלא רווי בשדות 43
- טבלה 4.8: פרמטרים לזרימה והסעה במודל מי התהום המכיל 44
- טבלה 4.9: ממוצעי הפרשים והטיות בין המפלסים המחושבים ומדודים בבארות 46
- טבלה 4.10: ממוצעי הפרשים והטיות בין ריכוזי חנקה מחושבים ומדודים בבארות
לאחר שלב הכיול הראשון 47
- טבלה 4.11: ממוצעי הפרשים והטיות בין ריכוזי חנקה מחושבים ומדודים בבארות
בהרצת המודל ללא שטפי מקור חנקה 48
- טבלה 4.12: ממוצעי הפרשים והטיות בין ריכוזי חנקה מחושבים ומדודים בבארות
בהרצת המודל לאחר שלבי הכיול המתקדמים 49
- טבלה 4.13: ריכוזי חנקה חזויים בבארות בשנת 2052 בתרחישי דישון שונים 52

1. רקע מדעי

1.1. דיכון חנקני

החנקן הוא יסוד מרכזי בכל אורגניזם חי. הוא מהווה מרכיב מרכזי בחומצות אמינו הבונות את החלבונים בתאים החיים, בחומצות הגרעין, בכלורופיל בצמחים ובתהליכים מטבוליים. החנקן הוא היסוד הנפוץ באטמוספירה (78%) אך בה הוא מצוי בעיקר כחנקן גזי N_2 במצב זה החנקן אינרטי יחסית ואינו זמין לקליטה על ידי הרוב הגדול של הצמחים. על מנת להפוך את החנקן לזמין יש להעביר את החנקן הגזי טרנספורמציה לתצורות מחומצנות או מחוזרות בהן החנקן זמין לקליטה על ידי השורשים: חנקה NO_3^- ואמון NH_4^+ . טרנספורמציה זו מתרחשת באופן טבעי באמצעות ברקים וחיידקים קושרי חנקן אטמוספרי בקרקע (Noxon, 1976). ריכוז החנקן הזמין האופייני בתמיסת הקרקע במצב טבעי הוא 0.01% בעוד שריכוזו האופייני בחומר הצמחי הוא 2.5% (להב וחוב', 2008) כך שהחנקן מהווה את אחד הגורמים המגבילים לצימוח (Paris, 1992). גם החנקן שבקרקע בחלקו אינו זמין לצמחים מסיבות שונות כגון קישור לחומר אורגני שאינו מאפשר כניסה אל השורש, ספיחת אמון (קטיון חיובי הנספח בעיקר לחרסיות) לגרגרי הקרקע ותחרות על הצריכה כנגד מיקרואורגניזמים בקרקע הצורכים חנקן גם כן. סך כמות החנקן האופיינית הטבעית בקרקע – הזמינה לצמחים ושאינה זמינה (אך תיהפך לזמינה עם פירוקה), תספיק לגידול אופייני למספר שנים בודדות בלבד (Bohn et al., 2001). לאור האמור לעיל, בקרקעות שעל גבן מתבצע גידול חקלאי אינטנסיבי עם שאיפה להגיע למקסימום תוצרת חקלאית ליחידת שטח, נהוג מזה שנים רבות להוסיף חנקן זמין לצמחים אל הקרקע ממקור חיצוני – דיכון חנקני. בעבר תוספת זו נעשתה בכמויות קטנות בעיקר באמצעות זבלים אורגניים, מינרלים המכילים חנקה (נדירים יחסית), הפסקת הגידול בשדה למספר שנים (בלשון המשנה "שדה בור") ובאמצעות מחזורי גידול בהם משולבים צמחים שונים (בעיקר קטניות) אשר בשורשיהם מתבצעת סימביוזה עם חיידקים קושרי חנקן המעשירים את הקרקע בתצורות החנקן הזמין.

פריצת הדרך המשמעותית ביותר בדיכון החנקני, ואולי בחקלאות האינטנסיבית בכלל, אירעה בשנת 1918 כאשר קיבל הכימאי היהודי מגרמניה פריץ האבר פרס נובל בכימיה על פיתוח שיטה ליצירת חנקן מינרלי (אמון) מחנקן אטמוספירי גזי בתהליך כימי פשוט וזול. מאז גדלה תשומת החנקן העולמית בשדות חקלאיים פי 20 ויותר (Matthews&Hammond, 1999) ובישראל פי 10 (הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 1997). אוכלוסיית העולם שישחשבו שלא תוכל להמשיך לגדול גדלה מאז בקצב גדול בהרבה מאשר כל ההיסטוריה האנושית. ישנן הערכות שללא מציאת התהליך של האבר (או כפי שהוא נקרא בשפת התעשייה הכימית תהליך האבר-בוש) אוכלוסיית העולם הייתה היום כ-3 מיליארד נפשות

ולא שבעה (Erisman et al., 2008). החנקן המינרלי הפך ליסוד החשוב ביותר מבחינת יעילות ניצול הגידול החקלאי ליחידת שטח (Pessaraki, 2002; Bohn et al., 2001). הדישון החנקני חשוב במיוחד בגידולים הנחשבים כצורכי חנקן כדוגמת תפוחי אדמה (Gaskell et al., 2007), ובפירות וירקות רגישים, אשר החנקן מהווה גורם חשוב באיכותם כדוגמת תות שדה (Rodgers, 1983; Santos et al., 2010) וכן בקרקעות חוליות דלות נוטריינטים. העושר בדישון חנקני זול יחסית הביא גם לצמיחה גדולה של משקי הבשר, החלב, הביצים, והעופות המייצרים זבלים אורגניים המיושמים בשדות. משיחות עם חקלאים, יישום הזבלים נועד ברובו לטיוב הקרקע והעשרתה בחומר אורגני ובמקרים רבים לא נלקח בחשבון החנקן שבזבלים כחלק ממאזן החנקן הדרוש ליבול (תות שדה הוא דוגמה לגידול בו תופעה זו נפוצה, ויש גם אחרים).

1.2 מעגל החנקן

צורני החנקן בטבע מצויים במחזוריות הנקראת לרוב "מעגל החנקן". מעגל זה כולל מרכיבים רבים בים וביבשה אשר לא לכולם נתייחס כאן אך עיקריו הם: החנקן הגזי N_2 אשר עובר באופן טבעי או אנטרופוגני קיבוע והופך לאמון NH_3 , האמון עובר תהליך חימצון "ניטריפיקציה" והופך לחנקה (ניטראט) NO_3^- במהלך תהליך זה ישנו תוצר ביניים רעיל – חנקית (ניטריט) NO_2^- שעל פי רוב נמצא בריכוזים נמוכים משמעותית מרכז החנקה. האמון והחנקה עוברים תהליך "הטמעה" בו הם נקלטים על ידי הצמחים. עם התפרקות החומר האורגני משתחרר ממנו החנקן לרוב כאמון בתהליך "מינרליזציה". בקרקעות מאווררות (רובן הגדול של קרקעות ישראל) האמון מתחמצן לחנקה די מהר. בתנאים פחות מאווררים חיידקים בקרקע משתמשים בחנקה כמחמצן בתאים ומשחררים לאטמוספירה חנקן גזי בחזרה לאטמוספירה בתהליך הדה-ניטריפיקציה. (Galoway, 2004). קליטת חנקן לשורשים מתרחשת בדרך כלל בזרימת מסה עם המים ומוגבלת עד ריכוז סף מסוים שגם אם הריכוז בתמיסת הקרקע יעלה עליו הריכוז הנכנס לשורש יעמוד על ריכוז הסף. ריכוז הסף משתנה מגידול לגידול (Sorgona et al., 2006).

1.3 חנקן וחנקה

ישנן שתי דרכים על מנת לבטא את ריכוז החנקן: בעולם הדישון בו נעשה שימוש הן באמון והן בחנקה מקובל להשתמש במונח של "חנקן צרוף" כלומר התייחסות למשקל אטומי החנקן בלבד מכלל המולקולה. 1 "יחידת חנקן" = 1 ק"ג חנקן צרוף לדונם. כאשר מעוניינים ליחס את החנקן הצרוף לצורן ספציפי משתמשים בביטוי חנקן-חנקית" NO_3^- (Nitrate-nitrogen) N או "חנקן-אמוניאקלי" NH_4^+ -N. בעולם משאבי המים מקובל לרוב להשתמש בריכוז של יון החנקה הכולל את מסת אטומי החמצן הקשורים לאטום החנקן (לדוגמה ריכוז התקן למי

שתיה בישראל הוא 70 מ"ג גליטר חנקה). בעבודה זו כאשר ישנה התייחסות לחנקן בדשן הוא מבוטא באמצעות מסת חנקן צרוף וכאשר ישנה התייחסות לחנקה במי התהום היא מבוטאת באמצעות מסת החנקה. 1 מ"ג חנקן-חנקתי = 4.42 מ"ג חנקה.

1.4 זיהום מים בחנקה

מי השתייה מהווים מקור עיקרי לצריכת החנקה על ידי האוכלוסייה באזורים בהם ריכוז החנקה עומד על 50 מ"ג גליטר (Morales-Suarez-Varela et al., 1995). בתחילת שנות ה-50 של המאה ה-20 נמצאה קורלציה בין מחלת "כחלת תינוקות" *methaemoglobinemia* לבין ריכוזי החנקה במי השתייה (Walton, 1951) ומאז נקבעו ברחבי העולם תקנים שונים לריכוז החנקה במי שתיה: בארצות הברית ובאירופה 45 מ"ג גליטר, באוסטרליה במקרים מסוימים מותר לספק מים עם עד 100 מ"ג גליטר (התקן הרגיל הוא 50 מ"ג גליטר). בישראל עמד התקן על 90 מ"ג גליטר עד לשנת 2001 ומאז עודכן ל-70 מ"ג גליטר. צריכה מוגברת של חנקה עלולה להביא למחלות נוספות ובכללן מספר סוגי סרטן (Camargo and Alonso, 2006; Eskiocak et al., 2005; Manassaram et al., 2006). על פי הסוכנות להגנת הסביבה האמריקאית (EPA) חריגה מתקני ריכוז חניידקים וחנקה מציבה איום מידי לבריאות האדם (US-EPA, 1994; Dar et al., 2012)

1.5 הצטברות חנקה במי תהום כתוצאה מפעילות חקלאית בפני השטח

בשטחי חקלאות מושקים חלק ממנות ההשקיה מיועדות לשטיפת מלחים אל מתחת לבית השורשים. חלק גדול מהמלחים המצטברים בסביבת השורשים היא מדשנים עודפים שאינם נקלטים ע"י הצמח. בתווך הלא רווי העמוק מצטברים המלחים וממשיכים לחלחל עם מי ההשקיה העודפים ומי הגשמים עד למערכות הניקוז ומי התהום (McMahon and Woodside, 1997; de Paz and Ramos, 2004). פעילות חקלאית אינטנסיבית וארוכת שנים מגדילה בטווח הארוך את הסיכון לזיהום מי תהום על ידי חנקן, מלחים וכימיקלים (Hadas et al., 1999; Tafteh and Sepaskhah, 2012). עלויות נמוכות של דשני החנקן ושאיפה למקסימום יכול ליחידת שטח מובילות לדישון בעודף, החנקה והאמון שעובר ניטריפיקציה אינם נספחים אל הקרקעות ואינם מתפרקים בכמות משמעותית בקרקעות קלות ולכן חלק גדול מהדשן החנקני מגיע בסופו אל מי התהום (Martinez-Alcantara et al., 2012). בשנים האחרונות זיהום מי תהום על ידי חנקה הפך לנפוץ ולמשמעותי ביותר כתוצאה מפעילות חקלאית ברוב מדינות העולם (Burow et al., 2010; Jalali, 2005; Kourakos et al., 2012; Vitousek et al., 2009; Kurtzman et al., 2013). לפי הערכות בסין צורכים הגידולים החקלאיים כ-35% בלבד מסך החנקן המיושם (Zhao et al., 2011), ומחקרים דומים ממקומות שונים בעולם הציגו גם כן אחוזי חלחול חנקן גבוהים: 51% בוירג'יניה וצפון

קרולינה (McMahon and Woodside, 1997). ובפילוח לפי גידולים 33% בהדרים ו-50% בירקות (de Paz and Ramos, 2004; Ramos et al., 2002), בתפוחי אדמה 30%-70% (Venterea et al., 2011; Kraft&Stites, 2003) ועד 88% בתות שדה בממשק גידול מקסימאלי (Giumera et al., 1995). בישראל דיווחו בר יוסף וחוב' 1999 על סמך 35 שנות גידול ובדיקות חנקן צמחיות חלחול של 55%-65% מהחנקן המיושם בירקות שונים. גם במטעי תפוחי עץ נצפתה קליטה מועטה ועודפי חנקן של 70%-80% מהמיושם (Ju et al., 2002; Neilsen and Neilsen, 2006). בחלק מהמחקרים אחוזי החנקן המחלחל כוללים את כל עודפי החנקן מהשדה, לא כולו מגיע עד מי התהום חלקו מסולק בדרכים אחרות כנידוף ופירוק כפי שיוסבר להלן. במרבית המחקרים מוזכרת העובדה שדישון בכמויות ובתדירויות נכונות יובילו להפחתה באחוזי חלחול החנקן ולניצול טוב יותר של הדשנים. צפוי הבדל בשטפי החנקה בין פרדסים למטעי נשירים מכיוון שפרדסים קולטים מים גם בחורף ועל כן שטפי המים מהם קטנים יותר ואילו מטעי נשירים מדושנים בקיץ אך אינם קולטים מים בחורף לאחר השרת העלים והגשמים שוטפים יותר חנקה אל העומק.

1.6. מאמץ להפחתה בזיהומי החנקה

ברוב העולם וכן בישראל לא נעשים מאמצים ממשיים ומאורגנים להפחתה בדליפות החנקה מהשדות (בישראל אמנם ישנן הגבלות בריאותיות הנוגעות להשקיה בקולחים ולישום בצות). שונות בכך מדינות האיחוד האירופי על ידן הוחלט בשנת 1991 לצאת בתוכנית מסודרת ומוסכמת שתוביל להפחתה בזיהומי החנקה - ה"Nitrate directive". תוכנית זו כוללת פרטים רבים ומספר פעולות עיקריות בניהן: מדידות סדירות של החנקות מתחת לשדות, עידוד חקלאים לשימוש בשיטות דישון יעילות, עידוד חקלאים לשתילת כיסוי צמחי בחורף שיצרוך את החנקות בקרקע על מנת שלא ישטפו עם הגשמים, הגבלה על שימוש בדשנים באזורים בעלי רגישות הידרולוגית, מחזורי גידול של גידולים שונים, הגבלה על כמויות הזבלים המיושמים בשדות - עד 17 ק"ג חנקן צרוף לדונם וכו' (EEC, Environment, 1991 European Community). תוכנית זו הובילה להפחתה של כ-30% בתשומות החנקן במדינות האיחוד האירופי ולשיפור בריכוזי החנקה בכ-2/3 מתחנות הניטור באיחוד (EEC, 2010).

1.7. זיהום חנקה במי תהום בישראל

בישראל בעיית זיהום מי תהום בחנקה היא הגורם הראשון במעלה ב-15 השנים האחרונות המוביל לסגירת בארות לאספקת מי שתייה (אלחנני, 2009) כמפורט בטבלה מס' 1.1. יותר מחצי הבארות שנסגרו בתקופה זו נסגרו כתוצאה מזיהום חנקה. בעיה זו מצויה בעיקר באקוות החוף, אקווה חופשית ומצויה מתחת לשדות עליהן ישנה חקלאות מפותחת וארוכת

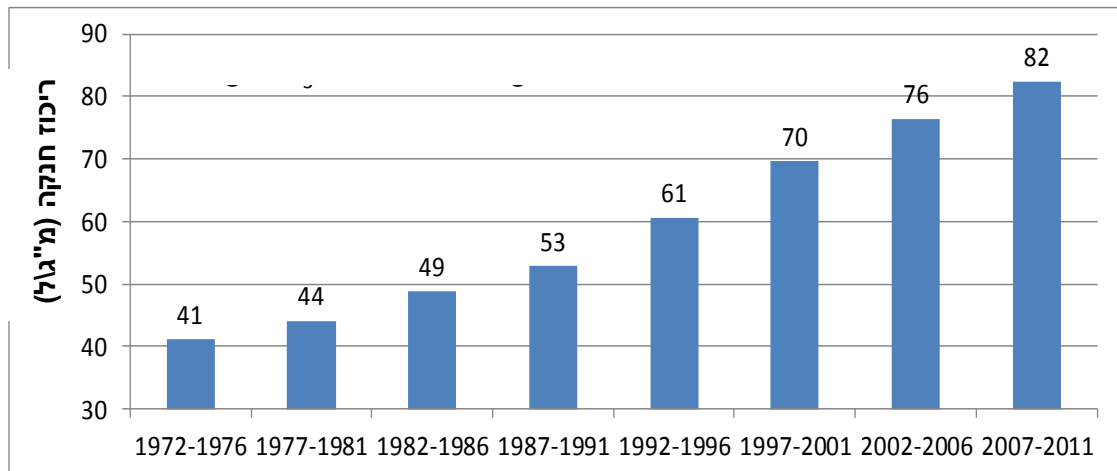
שנים (השירות ההידרולוגי, 2012). דליפות עודפי החנקן מהשדות מעל אקוות החוף אובחנו עוד בשנות ה-70 של המאה הקודמת (רווה וחוב', 1972; Avnimelech and Raveh, 1976; Mercado, 1976) שבחישובים שונים הציגו את כמויות החנקה המחלחלות מגידולים שונים. אבחנות אלו הובילו לתחזיות קודרות לגבי איכות אקוות החוף, עליה של 2.8 מ"גל בשנה בממוצע וסכנה ממשית לאפשרות ניצולו בהמשך השנים (Mercado, 1980). במהלך שנות ה-80 התפרסמו תחזיות אופטימיות בהרבה שהתבססו על נתונים של ריכוזי חנקה באקווה והראו עלייה של 0.13-0.25 מ"גל בשנה בממוצע (Kanfi et al., 1983). כתוצאה מכך מחקרים שונים המעיטו בחשיבות נושא חלחול עודפי החנקה והשפעתו על מי התהום וכן הציגו אפשרויות שונות כמקור הטעות של התחזיות המחמירות כגון תוספת חנקה חד פעמית מייבוש הביצות בראשית הציונות ופירוק החנקה בתווך הלא רווי (Ronen et al., 1983), גבירצמן, 2002).

טבלה מס' 1.1: גורמים לסגירת בארות ומספר הבארות שנסגרו כתוצאה מכל גורם בישראל בשנים 1998-2013. הטבלה פורסמה לראשונה ע"י אלחנני 2009 ומוצגת כאן עם עדכונים שנמסרו באדיבות אלחנני ש.

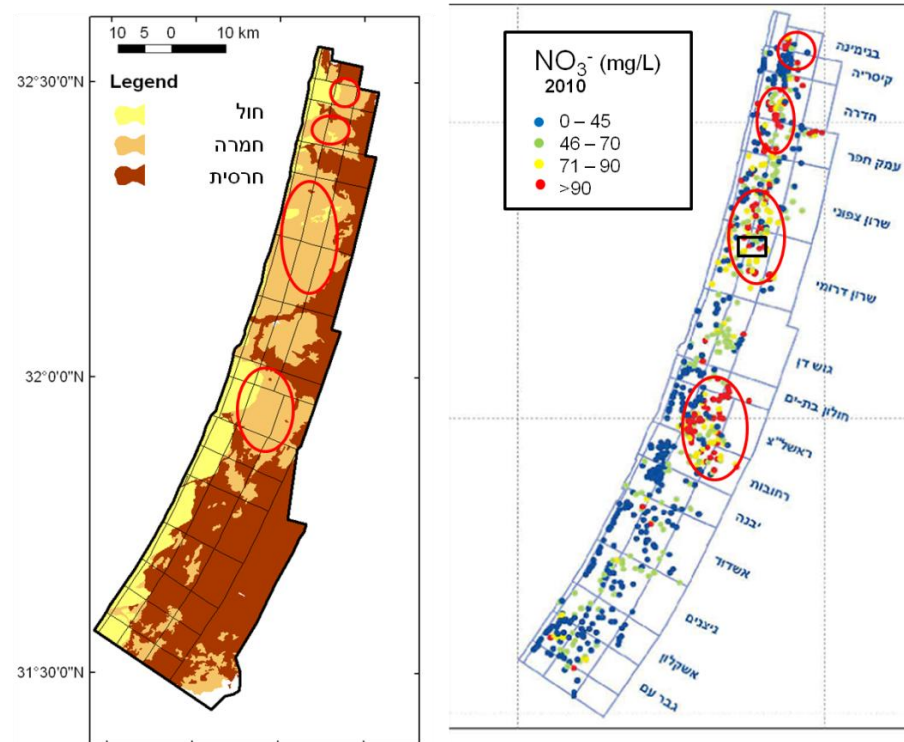
גורם	מס' בארות שנסגרו בשנים 1998-2013
ניטראט	107
כלוריד	24
מיקרומזהמים אורגנים	21
EDB	18
פרכלורט	14
מיקרוביאלי (קוליפורם)	5
מתכות כבדות	4
דטרגנטים	3
MTBE (דלק)	3
סה"כ בארות שנסגרו	199

לפי דו"ח השירות ההידרולוגי ישנה עדיין עלייה בריכוזי החנקה בשיעור של 0.7 מ"גל בממוצע לכלל אקוות החוף (השירות ההידרולוגי, 2012). Kurtzman et al. (2013) הציגו המשך עליה בשיעור של יותר מ 1 מ"גל בממוצע על סמך נתוני 30 בארות עם ריכוזי חנקה גבוהים בשטח חקלאי בשרון במשך 40 שנה (תרשים מס' 1.1). בעבודה זו הודגשה הנקודה שאין לדבר על זיהומי החנקה בכלל אקוות החוף אלא בשטחי החקלאות על גבי קרקעות החמרה הקלות יחסית: באזור רחובות, באזור השרון ובאזור עמק חפר כמוצג ויזואלית בתרשים מס' 1.2. בקרקעות החמרה קצב הזרימה וההסעה מהיר (רביקוביץ, 1992) ולכן

פחות פירוק חנקה בתווך הלא רווי בהשוואה לקרקעות כבדות בהן קצב הזרימה איטי יותר
(Wong and Witter, 2009; Lee et al., 2014).



תרשים מס' 1.1: ריכוז חנקה בממוצע ל-30 בארות בשטח חקלאי בשרון משנת 1972 עד 2011. (מתוך Kurtzman et al., 2013).



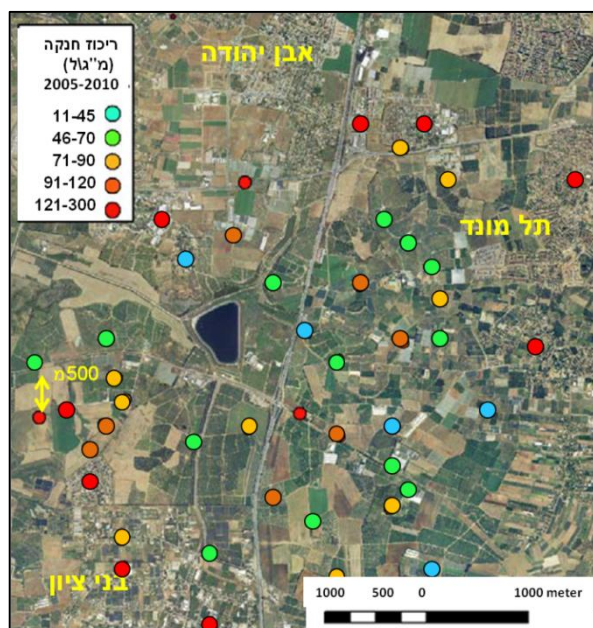
ריכוז הניטרט בקידוחי אגן החוף בשנת 2010

תרשים מס' 1.2: מימין בארות באקוות החוף ותחום ריכוזי החנקה בכל באר (השירות ההידרולוגי, 2012). באדום ובצהוב מסומנות הבארות עם ריכוזי חנקה גבוהים מהתקן. משמאל מפת קרקעות בחלוקה לשלושה סוגים: חרסיתיות, בינוניות (חמרה) וחוליות (מעובד משכבת הקרקעות, יחידת המיפוי במשרד החקלאות). אזורים עם צפיפות גבוהה של בארות עם ריכוזי חנקה גבוהים מוקפים בעיגול אדום. בריבוע שחור קטן מסומן איזור המחקר.

1.8. אזור המחקר, חקלאות והידרולוגיה

מחקר זה נערך באזור השרון בו כפי שהוזכר ישנה בעיה של זיהום חנקה במי התהום. בחלקה, עבודה זו הינה עבודת המשך לעבודתו של שפירא (2012) שחקר באזור זה דליפות חנקה מפרדסים המכסים חלקים נרחבים בשרון אל התווך הלא רווי העמוק. עבודה זו תחקור דליפות מגידולי ירקות: תות שדה ותפוחי אדמה (המכסה שטח של 11% באזור לפי ניתוח נתוני סקר משרד החקלאות 2009) ובהם ניתן דישון חנקני בכמויות גדולות וכן מאפרסמון כמייצג את גידולי הנשירים באזור זה. נעשה שימוש בתוצאותיו של שפירא 2012 מתחת לפרדסים על מנת לחקור את ריכוזי החנקה במי התהום בהתאם לשימושי הקרקע השונים.

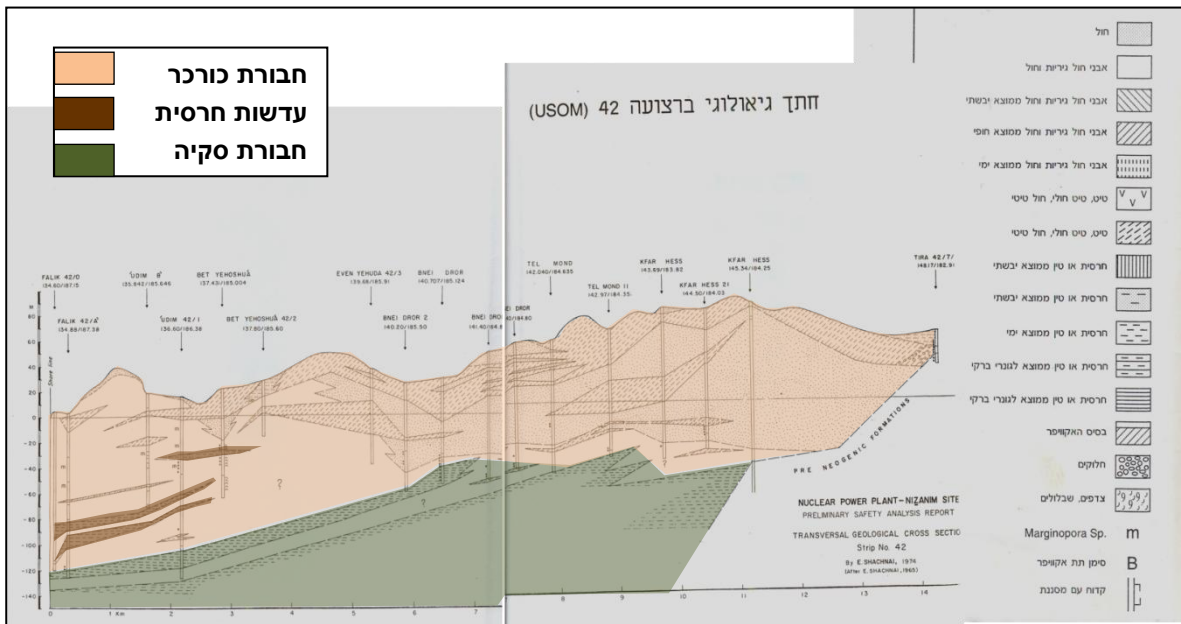
מלבד זיהומי החנקה, בשרון ישנה תופעה נוספת של שונות מרחבית בריכוזי החנקה בבארות. בסקאלת מרחק קטנה של מאות מטרים ספורים ישנן בארות עם ריכוזי חנקה גבוהים ובארות עם ריכוזים נמוכים (תרשים מס' 1.3 ; קורצמן ורוסו, 2011). תופעה כזו באקווה חופשית מרמזת על גורמים מקומיים בפני השטח כגון שימושי קרקע שונים המשפיעים על הריכוזים בבארות (Hall et al., 2001; Wylie, 1994; Lockhart et al., 2013). השונות קשורה גם לעומקי פרפורציות שונים בבארות שבדרך כלל לא מוצגים בתצוגות דו מימדיות של האקווה.



תרשים מס' 1.3: טווחים של ריכוזי חנקה ממוצעים בבארות באזור המחקר בשרון בשנים 2005-2010, במרחקים קרובים ישנם בארות עם ריכוזים שונים. בצבעי כתום ואדום ריכוז חנקה גבוה מ70 מ"ג/ל. מעובד מקורצמן ורוסו, 2011.

אקוות החוף היא אקווה חופשית בחלקים המרכזיים והמזרחיים שלה, בנויה ברובה מקרקעות חוליות בדרגות שונות וסלעי כורכר (חבורת כורכר) על גבי שכבת אקוויקלוד חווארית, חבורת סקיה (גבירצמן, 2002). בשכבות האקווה מפוזרות עדשות חרסית בגדלים

שונים. בתרשים 1.4 מוצג חתך גיאולוגי של האקווה באזור השרון המרכזי, לא נראות עדשות חרסית בעלות השתרעות לטראלית רחבה.



תרשים מס' 1.4: חתך גיאולוגי מזרח-מערב לרוחב אקוות החוף באזור השרון (רצועת 42 USUM). החתך עובר סמוך ליישובים תל מונד ואבן יהודה. מעובד וסרוק משכנאי, 1976.

1.9 מודלים של זרימה והסעת חנקה בתווך לא רווי

1.9.1 הנחת מצב תמידי

ניתן לחשב את שטפי המילוי החוזר ושטפי החנקן החנקתי לאקווה מתחת לשדות באמצעות מאזן מסת כלוריד, בהנחת מצב תמידי. בהנחה שיון הכלוריד אינו נקלט בצמחים שטף הכלוריד הנכנס מפני השטח בגשם ובהשקיה שווה לשטף הכלוריד המחלחל מתחת לבית השורשים וריכוז הכלוריד בעומק התווך הלא רווי ביחס לריכוזו במי הגשם וההשקיה שווה ליחס בין שטף המים בפני הקרקע ושטף המים המחלחל למי התהום. לכן, על ידי נתוני עובי הגשם וההשקיה, ריכוז הכלוריד במי הגשמים וההשקיה וריכוז הכלוריד בתווך הלא רווי שמתחת לבית השורשים ניתן להעריך את שטף המילוי החוזר לאקווה (משוואה 1.1).

$$RF = \frac{[Cl^-]_{(P)} \times P + [Cl^-]_I \times I}{[Cl^-]_{(duz)}} \quad (1.1)$$

RF המילוי החוזר הממוצע לאקווה (Recharge Flux, L/T), P גשם ממוצע שנתי (L/T), $[Cl^-]_P$ ריכוז הכלוריד הממוצע במי הגשם (M/L³, 15 מ"ג ליטר – גבירצמן נ. 2002), I השקיה ממוצעת עונתית (L), $[Cl^-]_I$ ריכוז הכלוריד הממוצע במי ההשקיה (M/L³). $[Cl^-]_{(duz)}$ זהו ריכוז הכלוריד הממוצע בתווך הלא רווי העמוק (Scanlon et al., 2002, M/L³). בחתכי קרקע עמוקים כשרק החלק העליון של התווך נדגם ניתן להניח שריכוזי הכלוריד בין עומק של כ 2

מטר עד מי התהום לא יגלו מגמתיות לכן ממוצע ריכוזי הכלוריד מעומקים הגדולים מ 2-3 מטר מייצג את כל התווך הלא רווי העמוק (תצפיות של כל חתך התווך הלא רווי באקוות החוף, Gvirtzman et al., 1986).

על סמך שטף המילוי החוזר המחושב והכפלה בנתוני ריכוז החנקן החנקתי בתווך הלא רווי מתחת לבית השורשים ניתן לחשב גם את שטפי החנקה מהשדות בהנחת מצב תמידי (משוואה 1.2).

$$NF = RF * [\overline{NO_3^-} - \overline{N}_{(duz)}] \quad (1.2)$$

NF זהו שטף החנקן החנקתי (Nitrate-nitrogen Flux, M/L²/T), RF שטף המילוי החוזר (L/T),

$[NO_3^- - N_{(duz)}]$ ריכוז החנקן החנקתי בתווך הלא רווי העמוק. חישוב זה מתקיים בהנחה שיון החנקה משמר ומוסע ללא עיכובים מתחת לבית השורשים.

1.9.2. שטפי מילוי חוזר משתנים בזמן

על מנת לחשב שטפי מים משתנים בזמן בתווך נקבובי יש לפתור את משוואתו של ריצ'רדס (דיפרנציאלית חלקית מסדר שני, משוואה מס' 1.3, Richards 1931) שפיתח אותה בתווך לא רווי על סמך משוואת דארסי לתיאור זרימה בתווך נקבובי רווי (Darcy 1856).

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \pm S(h) \quad (1.3)$$

h זהו עומד הלחץ (L), θ תכולת הרטיבות הנפחית, t זמן (T), x, y, z מימדי המרחב (L), K מוליכות הידראולית לא רוויה (L/T), S איבר מבלע (סימן שלילי) או מקור (סימן חיובי) כגון מבלע של קליטת המים בשורשים (1/T), (Miyazaki, 2006; Warrick, 2003; Pachepsky et al., 2003; Šimůnek et al., 2009).

המוליכות ההידראולית בתנאי תת רוויה תלויה במתח המטריצי בקרקע שמשתנה בהתאם לתכולת הרטיבות לפי עקום התאחיזה של הקרקע המתאר את הקשר בין תכולת הרטיבות לבין המתח המטריצי בקרקעות. ישנם מספר מודלים מתמטיים המאפשרים חישוב המוליכות ההידראולית בתנאי תת רוויה בהתאם לתכולת הרטיבות ולמספר פרמטרים של סוג הקרקע, ביניהם: Brooks & Corey, 1966; Gardner, 1958 and Russo, 1988; Mualem, 1976 and Van Genuchten, 1980. בעבודה זו נעשה שימוש במודל Van-Genuchten-Mualem משוואות מס' 1.4-1.5:

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

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

h זהו עומד הלחץ (L) , θ_r זוהי תכולת הרטיבות השאריתית, θ_s תכולת רטיבות ברוויה, α מקדם המקושר באופן הפוך לערך פריצת האוויר $(1/L)$, n פרמטר הקשור לפילוג גודל הנקבובים, l (Lumped parameter) תלוי במידת הפתלתלות (tortuosity) וקישוריות, K_s מוליכות הידראולית ברוויה (L/T) , S_e דרגת הרוויה $(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, $m = 1 - 1/n$.

את הפרמטרים למודל של ואן גנוכטן-מועלם ניתן להעריך באמצעות "פונקציות פדו-טרנספר" (PTFs) המקשרות בין מידע על מרקם הקרקע, והצפיפות הגושית לבין הפרמטרים הנ"ל באמצעות ניתוח נתונים גרסיבי המתבסס על מסד נתונים של דוגמאות קרקע רבות ומגוונות (Wang et al., 2009; Warrick, 2003).

1.9.3. שטפי מומסים (כלוריד, חנקן חנקתי וחנקן אמוניאקלי) משתנים בזמן

מומסים נעים בתווך הנקבובי בזרימת מסה עם המים (אדבקציה) ובהתאם לגראינדט ריכוזים בתוך המים (דיפוזיה מולקולארית). הזרימה האדבקטיבית אינה אחידה ונקבעת בהתאם לאורך נתיב הזרימה ולמהירותה המשתנים בהתאם לגדלי הנקבובים ולפתלתלות הזרימה בנקבובים (דיספרסיה מכאנית). מקובל שילוב של הדיספרסיה המכאנית והדיפוזיה המולקולארית לפרמטר אחד המכונה דיספרסיה הידרודינאמית. מומסים נחלקים למשמרים שנעים עם המים ללא עיכוב ולריאקטיביים שמעוכבים מסיבות שונות כגון ספיחה לחלקיקי המוצקים בתווך ונעים לאט יותר מהמים. חישוב כמותי של שטף המומס מתקבל מפתרון משוואת אדבקציה-דיספרסיה - משוואה דיפרנציאלית חלקית מסדר שני, משוואה מס' 1.6:

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial q C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial q C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C}{\partial z} \pm Q \quad (1.6)$$

C זהו ריכוז המומס בתמיסת הקרקע (M/L^3) , x, y, z מימדי המרחב (L) , D מקדם הדיספרסיה ההידרו דינאמית (L^2/T) , q שטף המים (L/T) , θ תכולת רטיבות נפחית, Q איבר מקור/מבלע של המומס $(M/L^3/T)$. (Freeze and Cherry, 1979).

בהסעת מומסים ריאקטיביים נוסף למשוואה מרכיב שמנוסח מתמטית בהתאם לסוג העיכוב. עיכוב הסעה על ידי ספיחת המומס לפאזה המוצקה מתרחשת בדרך כלל כספיחת קטיונים, במקרה שלנו אמון, לחלקיקי חרסית ששטח הפנים שלהם טעון מטען שלילי (להב וחוב'),

2008) ספיחה ליניארית מנוסחת: $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot K_d \cdot C)$ כאיבר חיובי בצד שמאל של משוואת האדבקציה-דיספרסיה. ρ זו הצפיפות הגושית (M/L^3), K_d זהו מקדם הספיחה של המומס, יחס ריכוז הספוח לריכוז המומס (L^3/M).

1.9.4. פתרון נומרי של משוואות הזרימה וההסעה בתווך הלא רווי באמצעות מודל HYDRUS-1D

חישוב מדויק של שטפי מים ומומסים בתווך הלא רווי צריך להתבצע באופן רב מימדי (דו או תלת) על מנת להתחשב בשונות המרחבית בתנאי השפה בפני השטח או בתכונות ההידראוליות של התווך (Russo and Bouton, 1992; Russo et al., 1997) אך בתווך לא רווי עמוק הגדול בסדר גודל לפחות מעומק בית השורשים קירוב חד מימדי של הבעיה והנחת הומוגניות מרחבית הינו סביר (Kurtzman&Scanlon, 2011; Jacques et al., 2008). בעבודתו של שפירא 2012 העוסקת בחישוב שטפי חנקה מפרדסים נעשה גם כן קירוב חד מימדי כנ"ל. מודל HYDRUS-1D פותר באופן נומרי בשיטת אלמנטים סופיים את משוואת ריצ'ארדס ומשוואות אדבקציה דיספרסיה בצורתן החד מימדית (Šimůnek et al., 2009). על מנת לחשב את שטפי המילוי החוזר המשתנים בזמן יש לקבוע את שטפי המים הנכנסים מפני השטח המשתנים בזמן כתנאי שפה את קליטת המים לשורשים ויציאתם באידיוי כאיברי מבלע ולקבוע את התכונות ההידראוליות של התווך. שטפי המים בתחתית עמודת הקרקע הלא רוויה לה התבצע החישוב מהווים אומדן לשטף המילוי החוזר לאקווה.

על מנת לחשב את שטף הכלוריד, החנקן החנקתי והחנקן האמוניאקלי יש לקבוע את שטפיהם הנכנסים מפני השטח כתנאי שפה, את קליטת החנקן לשורשים ומקדמים עבור ריאקציות החנקן כאיברי מבלע, את מקדם ספיחת האמון לפאזת המוצק ואת תכונות ההסעה של התווך. הכלוריד אינו נקלט בשורשים ולכן אין לו איבר מבלע. עבור כל מומס ישנה משוואת אדבקציה דיספרסיה ספציפית עם איברים מתאימים, משוואות 1.7, 1.8, 1.9 לכלוריד אמון וחנקה בהתאמה:

$$\frac{\partial \theta C_{cl}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C_{cl}}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C_{cl}}{\partial z} \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \theta C_{NH4}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho K_d C) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C_{NH4}}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C_{NH4}}{\partial z} - f_{NH4} S \cdot C_{NH4} - \mu_{nit} \theta C_{NH4} - \mu_{vol} \theta C_{NH4} \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial \theta C_{NO3}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C_{NO3}}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C_{NO3}}{\partial z} - f_{NO3} S \cdot C_{NO3} + \mu_{nit} \theta C_{NH4} - \mu_{dnit} \theta C_{NO3} \quad (1.9)$$

C ריכוז המומס (Cl, NH_4^+, NO_3^-) בתמיסת הקרקע (M/L^3), t הזמן (T), z עומק (L), D מקדם דיספרסיה הידרודינאמית (L^2/T), q שטף המים (L/T), ρ צפיפות גושית (M/L^3), θ תכולת רטיבות נפחית, S קבוע קציב קליטת המים לשורשים ממשואת הזרימה 1.3 ($1/T$), f_{NO_3/NH_4} פונקציה המאפשרת הגבלת קליטת המומס בשורש על פי סף ריכוז, μ קבועי קציב לריאקציות צורוני החנקן בקרקע ($1/T$): אידוי אמון (vol) ניטריפיקציה אמון (nit) דהניטריפיקציה חנקה (dnit), K_d מקדם ספיחת אמון לפאזה המוצקה (L^3/M).

משוואת אדבקציה-דיספרסיה נוספת (קודמת למשוואת האמון) ישנה עבור דשנים אורגניים בהם קיימות ריאקציה של מינרליזציה, הידרוליזה ושחרור אמון אל התמיסה. במקומות בהם קיימים דשנים אלו נוסף איבר מקור במשוואת האדבקציה-דיספרסיה לאמון מפירוק החנקן האורגני.

1.10 פתרון נומרי של משוואות הזרימה וההסעה במי התהום באמצעות מודל MODFLOW לזרימה ומודל MT3DMS להסעה.

על מנת לקשר את שטפי החנקה מהשדות והתווך הלא רווי אל נתוני החנקה המצויים בעליה בבארות יש צורך בחישובים של זרימה והסעת החנקה במי התהום מכניסת החנקה בפני מי התהום ועד לנקודות השאיבה בבארות. מכיוון שהבארות פרוסות במרחב ולכל באר עומק שאיבה אחר בהתאם לעומק המסננת (פרפורציה) ישנו צורך בחישוב תלת מימדי של הבעיה. אחת המערכות הנפוצות לביצוע חישובים כאלו היא מערכת (Groundwater, GMS, Modeling System, AQUAVEO, 2012) גיאוסטטיסטיים וחישובי זרימה והסעה שונים ומגוונים. בעבודה זו נעשה שימוש במודל MODFLOW (McDonalds&Harbaugh, 1988) הפותר באופן נומרי בשיטת הפרשים סופיים את משוואת הזרימה במי התהום (משוואה מס' 1.10) ובמודל MT3DMS (Zheng, 1990) הפותר נומרית את משוואת אדבקציה-דיספרסיה למומס במי התהום (משוואה מס' 1.11). גם בהסעת החנקה במי התהום ההנחה היא שהחנקה יון משמר. למומסים ריאקטיביים ישנו מודל אחר - RT3D בו ישנן אפשרויות חישוב לריאקציות שונות (Clement 1997).

$$S_s * \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm w \quad (1.10)$$

משוואת הזרימה במי תהום בה K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} הן המוליכויות ההידראוליות של האקווה (L/T) בכיווני הצירים x, y, z , h העומד ההידראולי של מי התהום (L) התלוי במרחב ובזמן $S_s, h=h(x,y,z,t)$ זוהי האגירות הסגולית של האקווה (1/L), W מבטא איברי מקור/מבלע בספיקת מים אל ומהאקווה ליחידת נפח (1/T). במקרה שלנו מבלע: יציאת המים בבארות השואבות ($-W_{wells}$). מקור: שטף המילוי החוזר ($+W_{RF}$).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial (v_x C)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial (v_y C)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial (v_z C)}{\partial z} \pm \frac{q \cdot C_{source/sink}}{n} \quad (1.11)$$

משוואת אדבקציה-דיספרסיה במי התהום. C ריכוז החנקת (M/L³), v זוהי מהירות המים בתווך הנקבובי (L/T), D זהו קבוע הדיספרסיה ההידרודינמית באקווא (L²/T), x,y,z מימדי המרחב (L), n נקבוביות האקווא, q שטפי מים מקור/מבלע ליחידת נפח (1/T). במקרה שלנו מקור: שטפי מילוי חוזר בפני מי התהום (+q_{RF}) ומבלע: שטפי שאיבה בבארות (-q_{wells}). באיבר המקור ריכוז החנקת המוכפל בשטף המים זהו ריכוז החנקת במי המקור ולא במי האקווא, במקרה של המבלע החנקת שיוצאת בשאיבה מהבארות ע"פ רכוז החנקת באקווא באזור הבאר.

באמצעות מודל מכיל של החנקת במי התהום ניתן לנסות ולבחון את התפתחות הריכוזים בבארות בעתיד. מודל של זרימה (MODFLOW) והסעה (MT3DMS) ובחינת ריכוזים עתידיים באקווא החוף נעשה באזור רמת השרון לבחינת התפשטות הזיהום בפרכלוראט (אדר וחוב', 2009).

1.11. צימוד המודלים של התווך הלא רווי והתווך הרווי

כפי שהוזכר (1.10) בעבודה זו ישנה כוונה לקשר מבחינה חישובית וכמותית את שטפי החנקת החנקתי מהשדות אל ריכוזי החנקת הנצפים בבארות. אמנם על מנת לקשר בין הדישון בשדות לבין הריכוזים בבארות ישנו צורך ליצור ממשק בין חישובי התווך הלא רווי והרווי, באמצעות קישור שכזה ישנה אפשרות לבחון לאורך שנים השפעות משטרי דישון וסוגי גידול על ריכוזי החנקת במי התהום. קישוריות כזו נעשית על ידי שימוש בשטפי המים והחנקת העיתיים בתחתית עמודת הקרקע המתקבלים בפלט החישוב ב HYDRUS-1D כנתוני קלט לשטפי מילוי חוזר ומקור חנקת בפני מי התהום ב MODFLOW ו MT3DMS (Twarakavi et al., 2008; Jovanovic et al., 2009). קישוריות מלאה היא כזו שמתחשבת בשינויי מפלס מי התהום בתחתית עמודת הקרקע בה מתבצעים החישובים הלא רוויים ואכן ישנם מודלים בעלי קישוריות מלאה שמקושרים אף לחישובי נגר עילי (Surface/Subsurface, Panday et al., 2004). ענין זה רלוונטי בעיקר בפרופילי קרקע בעלי אזור בלתי רווי רדוד המושפע מהתווך הרווי שתחתיו אך פחות רלוונטי בתווך בלתי רווי עמוק בו רוב השינויים הדינאמיים בתווך מושפעים מהתווך עצמו ומפני הקרקע ואת השפעות מפלס המים ניתן להזניח (Niswonger and Prudic, 2009). בעבודה זו הקישוריות היא חלקית וחד כיוונית ונעשה שימוש בפלט שטפי המים והחנקת החנקתי בתחתית עמודת התווך הלא רווי המצויה מעל פני מי התהום כקלט שטפי מילוי חוזר וחנקת בפני מי התהום בעיקר מפני שמודל HYDRUS-1D יעיל ביותר

בחישובי שטפים בתווך הלא רווי הכוללים קליטת מים ומומסים לצמחים ושכבות קרקע הטרוגניות (Twarakavi et al., 2008). עומק התווך הלא רווי באזור המחקר בשרון עומד ברובו על 20 מטר ומגיע גם עד ל-50 מטר כך שניתן להניח שהשפעת שינויי המפלס על הזרימות בתווך הלא רווי זניחה, אמנם ישנה התחשבות בעומק התווך הלא רווי עד למפלס מי התהום הממוצע ובמהירות ההתקדמות כדי לדעת את זמן ההגעה של השטפים בתווך הלא רווי עד למי התהום.

1.12. השערת המחקר

קיימות תצפיות על דליפות חנקן משדות חקלאיים, על עליית ריכוזי חנקן בבארות באזור השרון וכן על שונות מרחבית בריכוזי החנקן בין הבארות. השערת מחקר זה היא שישנו קשר בין השונות בריכוזי החנקן בבארות לשונות בשימוש הקרקע החקלאית על פני השטח.

2. מטרת המחקר

מטרתו של המחקר היא לבחון באמצעות מודלים מכוילים לתצפיות בשדה החקלאי, בתווך הלא רווי ובמי התהום, את הקשר המשתנה בזמן בין תשומות חנקן בשדות לריכוז חנקן בבארות. מטרה זו כוללת שלוש מטרת משנה:

- (1) אפיון שטפי החנקן מדישון שדות ירקות ומטעי נשירים בתווך הלא רווי העמוק אל מי התהום באזור השרון.
- (2) בחינת הקשר בין השונות בשימושי הקרקע לשונות המרחבית בריכוזי החנקן בבארות באזור חקלאי בשרון.
- (3) חיזוי השפעתם של שינויים בכמויות הדשן החנקני המיושם בשדות על ריכוזי החנקן בבארות למשך עשרות שנים.

3. חומרים ושיטות

3.1. שטפי חנקה מהשדות אל התווך הלא רווי

3.1.1. אתרי שדות המחקר

לצורך אפיון שטפי החנקה מהשדות החקלאיים נבחרו שלושה שדות עם גידולים שונים באזור השרון בהם בוצעו קידוחי דיגום של התווך הלא רווי. בהמשך במודל מי התהום יחולקו השטפים מהתווך הלא רווי לקטגוריות לפי שימושי הקרקע: פרדסים, עצי פרי נשירים וירקות. עבודה על שטפי החנקה המחלחלים מהפרדסים על קרקעות החמרה בשרון בוצעה על ידי שפירא (2012). במחקר זה נוספו שימושי הקרקע ירקות ונשירים ובהתאם לכך נבחרו אתרי הדיגום: שדה תפוחי אדמה חורפיים סמוך לקיבוץ ניר אליהו (194134/678817), בקיץ ללא גידול או גידול בטטות) ושדה תות סמוך למושבה קדימה (191832/688236, קיץ ללא גידול) מייצגים גידולי ירקות, מטע אפרסמון סמוך למושב נורדיה (688314/191783) מייצג עצי פרי נשירים. על פי נתוני סקר שימוש הקרקע של משרד החקלאות (2009) גידולים אלו תופסים שטחים משמעותיים באזור המחקר בשרון. כל השדות הם בקרקעות החמרה המאפיינות את אזור השרון ואשר בעיקר תחתן קיימים זיהומי החנקה (Kurtzman et al., 2013). שלושת אתרי הדיגום מושקים במים שפירים ומעובדים במשך לפחות 20 שנים באותו גידול ובאותו אופן.

3.1.2. איסוף נתונים

מהחקלאים המגדלים נאספו הנתונים הבאים: מקור מי ההשקיה, שיטת ההשקיה, כמויות ותדירויות ההשקיה, דישון, עונות הגידול, זיבול, זנים וכמויות היבול. על סמך נתונים אלו מתבססים חישובים רבים במהלך עבודה זו. נתונים נוספים שנאספו הם נתוני כמויות משקעים ונתוני התאדות פוטנציאלית לפי משוואת Penman-monteith (Penman, 1948; Monteith, 1965). כפי שנרשמו בתחנות מדידה אוטומטיות של אגף "מטאורולוגיה חקלאית" במשרד החקלאות היחידה לשימור קרקע וניקוז (תחנות מדרשת רופין ותל מונד 24). נתוני ריכוזי כלוריד וחנקה במי ההשקיה בכל שדה נאספו והתקבלו בקבצי אקסל מבסיס הנתונים של רשות המים (דרך דר' יעקב ליבשיץ, השרות ההידרולוגי). מידע רלוונטי שהיה חסר מהחקלאים הושלם על ידי מדריכי שירות ההדרכה והמקצוע במשרד החקלאות (דר, 2011; אבו טועמה, 2012; זילברמן וציפירלביץ, 2003) פרמטרים צמחיים (Leaf Area Index, עומק והתפלגות שורשים) נאספו מהספרות (דר, 1985; אופנהיימר, Serrano et al., 1978; Sokoto et al., 2007, 1991).

3.1.3. השקיה ודישון

שדה תפוחי האדמה מושקה באמצעות ממטרות, שדה התות מושקה בתחילת עונת הגידול כאשר השדה פתוח באמצעות ממטרות ולאחר מכן בשלב שני השדה מחופה במנהרות העשויות יריעות פלסטיק מעל שורות צמחי התות ומושקה באמצעות טפטפות. למעשה במשך כל החורף השדה מחופה והצמחים ניזונים ממי ההשקיה בלבד ולא ממי גשמים. חיפוי זה נועד לשמור על צמחי ופירות תות השדה הרגישים. מטע האפרסמון מושקה בחלקו באמצעות מתזים (מתז אחד לכל עץ, רדיוס הרטבה – 2 מטר) ובחלקו באמצעות טפטפות. הדישון במטע האפרסמון ובשדה התות התבצע באמצעות תמיסות דשן (אמון חנקתי) מיושמות באמצעות מערכת ההשקיה. הדישון בשדה התפוחי אדמה מיושם באמצעות פיזור של אבקת אוריאה על פני השדה המומסת במי הגשם וההשקיה המומטרים על השדה ומשחררת יון אמון. בנוסף לכך בשדה התות מפוזרים כל תחילת עונת גידול 6 קוב קומפוסט ובשדה התפוחי אדמה אחת ל 4 שנים 4 קוב זבל בקרעופות. בטבלה מס' 3.1 מפורטות תדירויות וכמויות המים להשקיה (מ"מ\דונם\יום) והדישון הכימי (ק"ג חנקן\צרוף\דונם\עונה) בכל שדה כפי שנמסר מהחקלאים וממדריכי שה"מ.

טבלה מס' 3.1: תדירות ומנות השקיה (קוב\דונם\חודש) ודשן חנקני (ק"ג-חנקן\דונם\חודש) לאורך עונת הגידול בשלושת הגידולים (לא כולל זבלים).

תפוחי אדמה		תות שדה			אפרסמון			
דשן חנקני (ק"ג\דונם)	תדירות (ימי\השקיה)	מנת השקיה (מ"מ)	דשן חנקני (ק"ג\דונם)	תדירות (ימי\השקיה)	מנת השקיה (מ"מ)	דשן חנקני (ק"ג\דונם)	תדירות (ימי\השקיה)	מנת השקיה (מ"מ)
2.8	5	23	4	5.5	48	0		0
6.8	4	56	5	4	48	0		0
8.5	4	107	7	3	60	0		0
9.4	3	160	3.8	2.5	90	0.7		30
6.2	3	124	3.9	1	90	1.4	בטפטפת-3 השקיות בשבוע. במתז-2 השקיות בשבוע.	60
0	0	0	0	0	0	2.9		120
0	0	0	0	0	0	3.6		150
0	0	0	1.2	5 השקיות	205	3.9		165
0	0	0	1.8	1	300	3.9		165
0	0	0	91.	2.5	90	2.1		90
0	0	0	2	2.5	60	1.4		60
11.3	5	10	4	3.5	45	0		0
44		480	35		1000	20		840

בשדה תפוחי האדמה ערכי מנת ההשקיה ממוצעים ומייצגים והערכים המדויקים נקבעים לפי מקדמי גידול והתאדות פוטנציאלית (גיגית). בנוסף לכך אחת ל-4 שנים מגדלים בקיץ בטטות עם השקיה של 800 קוב לדונם ודישון של 15 ק"ג חנקן לדונם. אחת ל-10 שנים מגדלים שיבולת שועל במקום התפוחי אדמה, גידול בעל ללא השקיה ודישון.

דשנים אורגניים - קומפוסט וזבל בע"ח מכילים חנקן אורגני שעובר מינרליזציה באיטיות. תכולת החנקן בדשן משתנה בין מקורות הדשן ואיכותו. ערך מייצג לתכולת החנקן הוא 2% משקלי (בן הגיא וחוב' 2011) כאשר ערך מייצג לצפיפות הדשן הוא 0.6 טון/קוב. כ-15% 30% מהחנקן האורגני עובר מינרליזציה לאמון בשנה הראשונה וכ-10%-5% עובר מינרליזציה לאמון בשנה השנייה מהפיזור (Eghbal et al. 2002). כך חושבה תוספת החנקן לשדות התות והתפוחי אדמה מהדשנים האורגניים. אחוזי המינרליזציה הנמוכים שימשו לחישוב בקומפוסט והגבוהים לזבל בע"ח. לדוגמא מקוב קומפוסט אחד משתחררת בשנה

$$15\% \cdot 1 \frac{kub}{dunam} \cdot 600 \frac{kg}{kub} \cdot 2\% = 1.8 \frac{kg-N}{dunam}$$

הראשונה מהפיזור מסת החנקן השנתית הבאה:

3.1.4. דיגום השדות

השדות נדגמו בחודשים יוני-יולי 2012, בקידוחי "דחיקה ישירה" (direct push) שהתבצעו על ידי חברת 'LDD' באמצעות מקדח מסוג "POWER PROBE 9700-VTR" (תרשים מס' 3.1) אשר דוחק אל הקרקע צינורות PVC חלולים ושקופים באורך 150 ס"מ ובקוטר 3.9 ס"מ והם נשלפים מלאים בגלעין קרקע יחסית בלתי מופרת, הקידוחים בוצעו עד לעומק של 10 מטרים מפני הקרקע. צינורות אלו נחתכו בשדה לחמישה מקטעים בני 30 ס"מ כל אחד, כל מקטע נפקק, נאטם והוכנס לצידנית מקוררת עד להגעה למעבדה. באופן זה נאספו דוגמאות קרקע/סדימנט של פרופיל קרקע שלם. בכל שדה נקדחו שלושה קידוחים, סה"כ תשעה קידוחים ופרופילי קרקע. בשדות התות והתפוחי אדמה הקידוחים נקדחו במרחק 50-100 מטרים זה מזה במעין משולש בכל שדה. במטע האפרסמון קידוח אחד בחלקה המושקה בטפוף ושני קידוחים סמוכים בחלקה המושקה במתזים, אחד בתוך רדיוס ההרטבה של המתז ושני במרחק 70 ס"מ ממנו מחוץ לרדיוס ההרטבה של המתז.



תרשים מס' 3.1: תמונות מהקידוחים בשלושת השדות ושל מקטעי הקרקע בני 30 ס"מ.

3.1.5. בדיקות קרקע

לכל מקטע קרקע בשלושת המטרים העליונים בכל קידוח ולכל מקטע שני בשבעת המטרים התחתונים של הקידוח בוצעו בדיקות המעבדה הבאות:

- 1. תכולת רטיבות משקלית (במצב טבעי) –** בוצעה על ידי ייבוש הדוגמאות בתנור 105°C עד להגעה למשקל קבוע. תכולת הרטיבות מתקבלת מחלוקת מסת המים (חיסור משקל הדוגמא אחרי הייבוש ממשקלה לפני הייבוש) במסת הקרקע היבשה. בדיקה זו נעשתה באופן מיידי לאחר הקידוח על מנת לא לאבד מים באידוי לפני השקילה הראשונית.
- 2. הערכת צפיפות גושית –** חושבה על ידי משקל דוגמת הקרקע ונפח שרוול ה-PVC שלה.
- 3. ריכוז כלוריד –** דוגמת קרקע יבשת אוויר (40°C , 48 שעות) וטחונה (>2 מ"מ) במשקל 15 גרם טולטלה עם מים מזוקקים ביחס משקלי 1:2 (מים:קרקע) למשך שעתיים וסורכזה למשך 30 דקות בתאוצה 1500g. המיצוי סונן דרך נייר סינון (>15 מיקרון) ונמדד ריכוז הכלוריד במיצוי באמצעות כלורידומטר (Sherwood 926 סף בדיקה 4 mg/L).
- 4. ריכוזי אמון וחנקן –** דוגמת קרקע יבשת אוויר (40°C , 48 שעות) וטחונה (>2 מ"מ) במשקל 5 גרם טולטלה עם תמיסת 1M KCl ביחס 1:5 (מים:קרקע) למשך שעתיים וסורכזה למשך 15 דקות בתאוצה 1500g, המיצוי סונן דרך נייר סינון (>15 מיקרון) ונמדדו ריכוזי האמון והחנקן במיצוי באמצעות אוטואנלייזר (Autoanalyzer, Lachat, QuickChem 8000/8500 (Kachurina et al., 2000)).
- 5. הרכב מכני –** בדיקה זו נעשתה לשש דוגמאות קרקע נבחרות בכל פרופיל, על פי תכולת הרטיבות המדודות, ונועדו לייצג את שכבות הקרקע השונות בפרופיל. ההנחה היא שתכולת הרטיבות הנבדלות זו מזו בעומק הפרופיל מקורן בהבדלי ההרכב המכאני. הבדיקה בוצעה בשיטת ההידרומטר: 40 גרם קרקע יבשת אוויר (40°C , 48 שעות) וטחונה (>2 מ"מ) הורחפה ב-100 מ"ל תמיסת פיזור (נתרן פירופוספט 5% PH=8.3) למשך 10 דקות המתנה ו-5 דקות עירבול. לאחר מכן הנפח הושלם ל-1000 מ"ל עם מים מזוקקים והרחפה נוספת. צפיפות התרחיף נמדדה בזמנים קצובים באמצעות הידרומטר קרקעות ואחוזי החרסית, סילט וחול נמדדו ביחס למסת הקרקע שהורחפה (חן י. וחבריו, 2008).
- 6. מוליכות הידראולית ברוויה במדגם לא מופר –** בדיקה זו נעשתה למספר מקטעי הקרקע הבלתי מופרת מששת המטרים התחתונים של קידוחי הדחיקה הישירה, אלו שלא נעשו להם כל הבדיקות הנ"ל. הבדיקה נועדה לאמת נתוני מוליכות הידראולית

במודל הזרימה וההסעה החד מימדי שחושבו באמצעות פונקציות פדו-טרנספר כפי שיוסבר להלן. מים הוזרמו בצינורית מבקבוק מריוט השומר על עומד מים קבוע וממוקם 30 ס"מ מעל מקטע שרוול ה-PVC והקרקע הבלתי מופרת שבתוכו, דרך השרוול, עד למצב רוויה ולאחר מכן נמדדו נפחי המים שיצאו מהשרוול בפרקי זמן קבועים. המים הוזרמו מתחתית השרוול שממוקם באופן אנכי ויצאו מצידו העליון על מנת להוציא את נפחי האוויר ולמלאם במים. המוליכות ההידראולית חושבה באמצעות חוק דרסי (Darcy, 1856 משוואה מס' 3.1).

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

K_s מוליכות הידראולית ברוויה (L/T), Q ספיקה (L^3/T), A שטח חתך הניצב לזרימה (L^2), ΔL אורך קטע הזרימה (L), ΔH הפרש העומדים בכניסה וביציאה למקטע (L).

3.1.6. חישוב שטפי מים וחנקן חנקתי מחלחלים בקירוב מצב תמידי

שטפי המילוי החוזר והחנקן החנקתי לאקווה תחת השדות חושבו על ידי מאזן מסת כלוריד (משוואות 1.1-1.2) בהנחת מצב יציב (Steady State) ובהנחה שיון הכלוריד אינו נקלט אל השורשים. ריכוזי הכלוריד והחנקן החנקתי הממוצעים בתווך הלא רווי העמוק חושבו בעומקים 2-10 מטר (M/L^3). עומקים אלו מצויים מתחת לבית השורשים של הצמחים שם הריכוז משתנה בעקבות קליטת המים ללא הכלוריד. הריכוזים הממוצעים חושבו באמצעות ממוצע משוקלל שלוקח בחשבון את אורך המקטע ואת תכולת הרטיבות שלו ביחס לכלל האורך והרטיבות בקידוח באינטרוול 2-10 מ' (Kurtzman et al., 2013). חישובי השטפים בהנחת תמידיות, הם יחסית פשוטים ונועדו בעיקר להשוואה בין השטפים המתקבלים מתצפיות באותו שימוש קרקע, ולהטמעה של ערכים ממוצעים לגידול.

3.1.7. חישוב שטפי מים וחנקן חנקתי מחלחלים משתנים בזמן באמצעות מודל נומרי

שטפי המים והחנקן החנקתי חושבו גם ללא הנחת מצב תמידי (Steady State) באמצעות מודל זרימה והסעה חד מימדי אנכי משתנה בזמן (HYDRUS-1D (transient) הפותר נומרית את משוואות ריצארדס ומשוואות אדבקציה-דיספרסיה (משוואות 1.3, 1.7-1.9). חישובים אלו בוצעו לקידוח אחד מייצג בלבד מתוך השלושה בכל שדה (תות, תפוז"א ואפרסמון).

המוליכות ההידראולית הלא רוויה $K(h)$ ועקום התאחיזה (הפונקציות ההידראוליות) חושבו על פי המודל של Van Genuchten-Mualem (Van Genuchten, 1980; Mualem, 1976); משוואות מס' 1.4-1.5). הפרמטרים ההתחלתיים (לפני כיוול) למודל של ואן גנוכטן-מועלם התקבלו על ידי "פונקציות פדו-טרנספר" (PTFs) בתוכנה Rosseta המובנית בתוך מערכת ה-HYDRUS-1D באמצעות נתוני אחוז החול, סילט וחרסית והצפיפות הגושית מגלעיני

הסדימנט (Schaap et al., 2001). כאמור בדיקות אלו נעשו למספר שכבות בפרופיל ובהתאם לכך לכל שכבה נקבעו הפרמטרים ההידראוליים.

קליטת המים לשורשים חושבה לפי פונקצית הקליטה של Feddes, 1978 עם תחום לחצים לקליטה אופטימאלית ומקסימאלית בהתאם לפרמטרים הקשורים לסוג הגידול, במקרה שלנו ירקות ועצי פרי נשירים. הפונקציה וערכים אלו מובנים בתוך מערכת ה-HYDRUS.

3.1.8. דיסקרטיזציה

לצורך ביצוע חישובי הזרימה וההסעה פרופיל 10 המטרים של הקידוח חולק ל-200 אלמנטים בני עובי של 5 ס"מ בערך בעומק הפרופיל, ובני עובי של 1.5 ס"מ בממוצע במטר וחצי העליונים של פרופיל הקרקע. באזור זה מתבצעת קליטת המים לשורשים וכן מתבצעות מרבית הריאקציות של יוני החנקן מפני ששם מרוכזת מרבית הפעילות המיקרוביולוגית בקרקע (Cannavo et al., 2004; Barkle et al., 2007; Peterson et al., 2013; Kurtzman et al., 2013).

3.1.9. תנאי שפה והתחלה, איברי מבלע ומשך מודל הזרימה.

תנאי השפה העליון של המודל הוא מסוג "Atmospheric boundary condition with Surface runoff" בו סדרת שטפי גשם והשקיה יומיים (ס"מ/יום) וכן סדרת נתוני התאדות פוטנציאלית יומית (ס"מ/יום, Penman-Monteith) הוכנסו למודל ושימשו כתנאי השפה. פרמטר נוסף הוא LAI (Leaf Area Index) משתנה בזמן המשפיע על כמויות המים הנקלטות בצמח לפי שלב הגידול שלו. ערך חשוב בתנאי השפה העליון הוא קבוע דעיכה, (extinction coefficient, Šimůnek et al., 2009) שיחד עם ה-LAI קובעים איזה חלק מההתאדות הפוטנציאלית תהיה דיות ואיזה אידיוי מהקרקע. המודל הורץ למשך 10 שנים וסדרות ערכי תנאי השפה המשתנים בזמן נקבעו לפי משטר ההשקיה ורישומי המשקעים היומיים במשך 10 השנים הקודמות למועד הקידוח (2002-2012). תנאי השפה התחתון הוגדר כ"Free Drainage" כלומר גראדינט העומד ההידראולי שווה אפס בתחתית הפרופיל. תנאי ההתחלה למודל הוא תכולת הרטיבות המדודה בפרופיל הקרקע בזמן הקידוח. קליטת השורשים נעשית בעומקים השונים לפי התפלגות השורשים עד לעומק בית השורשים בכל גידול.

3.1.10. כיול מודל הזרימה

כיול מודל הזרימה נעשה באמצעות הרצות חוזרות של המודל עד הגעה להתאמה ויזואלית מרבית בין פרופיל תכולת הרטיבות המדוד בקידוח לבין פרופיל תכולת הרטיבות המחושב ביום הקידוח – היום האחרון של המודל. ההתאמה הושגה באמצעות שינויים קלים בפרמטרים ההידראוליים (במודל ואן גנוכטן-מועלם) מאלו שהתקבלו מתוכנת Rossetan וכן משינוי קבוע הדעיכה המחלק את קליטת המים לשורשים ולאידוי לאטמוספירה. כמו כן כחלק מהכיול חושבו מאזני המים הכוללים כך שתהיה התאמה בין שטף המילוי החוזר המחושב בקירוב מצב תמידי על ידי מאזן מסת הכלוריד לבין שטף המילוי החוזר הממוצע לשנה המחושב מפלט המודל הנומרי. ערכי הפרמטרים ההידראוליים בשכבות השונות מפורטים בפרק התוצאות, ערכי קבועי הדעיכה (Extinction Coef.) הם 0.35 באפרסמון, 0.75 בתפוחי האדמה ו-0.5 בתות השדה.

3.1.11. תנאי שפה והתחלה, איברי מקורלמבלע לריאקציות ומשך מודל ההסעה.

שטפי המים במודלים של ההסעה הם אותם השטפים במודל הזרימה המכיל. תנאי השפה העליון מסוג "Concentration Flux" בו שטפי המומס נכנסים כריכוז בשטף המים (מ"ג/ס"מ³) בהתאם לריכוזם במקור מי ההשקיה (כלוריד וחנקה), בגשם (כלוריד) ובמי ההשקיה לאחר תוספת כמות הדשן היומית (אמון, חנקה ואוריאה וחנקן אורגני המומסים גם במי הגשמים) במשך 10 השנים של הרצת המודל. תנאי השפה התחתון הוא גראדינט ריכוז שווה לאפס באופן המאפשר יציאת מומסים עם המים כלפי העומק מחוץ לטווח המודל. תנאי ההתחלה במודלים הם ריכוז המומסים בתמיסת הקרקע כפי שנמדדו במיצוי וחושבו בחזרה לריכוזם הטבעי (מ"ג/ס"מ) ביחס זהה לפי ערך תכולת הרטיבות המדוד. לשכבות הקרקע הרלוונטיות נקבעו ערכים ראשוניים לקבועי הריאקציות לצורוני החנקן השונים: קבוע הספיחה של אמון לקרקע 3.5 (ס"מ³/גרם), 0.56 (יום/1) להידרוליזת אוריאה וחנקן אורגני (Hanson et al., 2006), 0.05 (יום/1) לאידוי אמון, 0.05-0.2 (יום/1) לניטריפיקציה של אמון, 0.01 (יום/1) לדהניטריפיקציה של חנקה (שפירא, 2012). ערך מקדם הדיספרסיה ההידרודינמית הראשוני נקבע כעשירית מאורך כל שכבה בפרופיל הקרקע.

3.1.12. כיול המודלים של הסעת המומסים

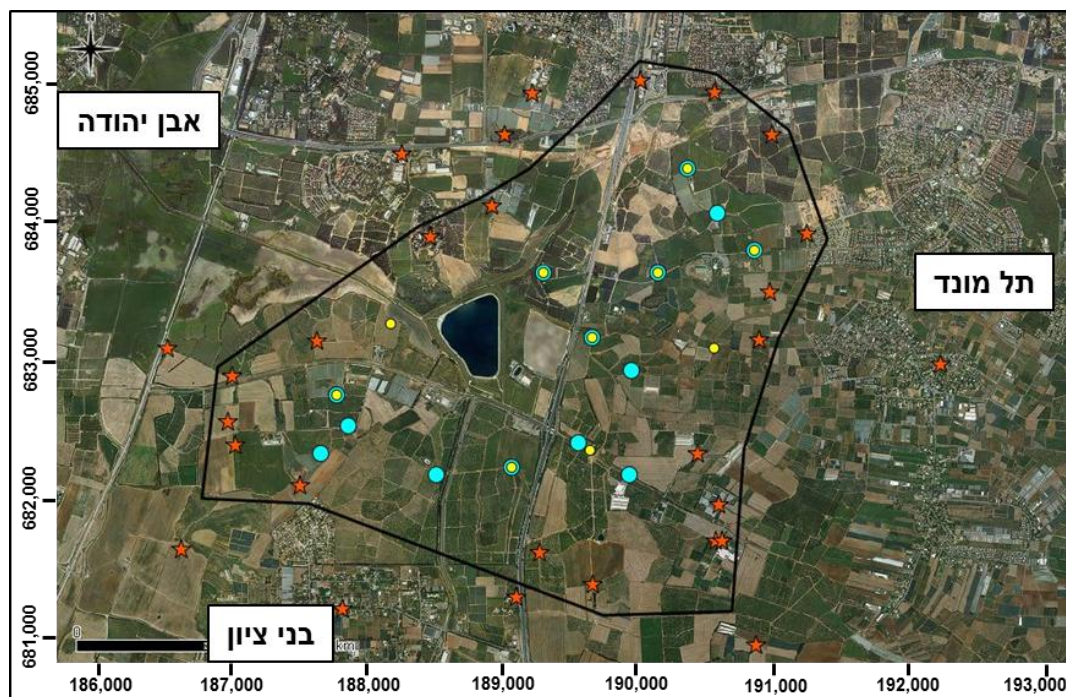
בתחילה כויל מקדם הדיספרסיה ההידרודינמית באמצעות הרצות חוזרות של מודל הסעת הכלוריד עד להתאמה ויזואלית בין פרופיל ריכוז הכלוריד המדוד בקידוח לזה המחושב במודל. כאמור כלוריד אינו משתתף בריאקציות כימיות בקרקע, אינו מעוכב, אינו נקלט בשורשים ומושפע בזרימה מאופי התווך הנקבובי בלבד ולכן הוא מתאים לכיול זה. לאחר מכן כוילו מקדמי ריאקציות החנקן השונות בהרצות חוזרות של מודל הסעת האמון והחנקה (עם

ערכי מקדמי ריאקציות בטווח המקובל בספרות ומפורטות ב(Hanson et al., 2006) עד להתאמה ויזואלית מיטבית בין פרופיל ריכוזי אמון וחנקה המדוד בקידוח לאלו המחושבים במודל. ההתאמה אינה תמיד מושלמת אך הוקפד על כך שסך כמות האמון והחנקה המדודה והמחושבת בפרופיל יהיה דומה. בתהליך הכיול נקבע ערך הסף לקליטה פאסיבית של האמון והחנקה לשורשים בזרימת מסה (Kurtzman et al., 2013). בנוסף כחלק מהכיול חושבו מאזני החנקן הכוללים כך שתהיה התאמה בין שטף החנקן המחלחל המחושב בקירוב מצב תמידי לבין השטף הממוצע לשנה המחושב מפלט המודל הנומרי.

3.2. מודל נומרי של זרימה והסעת חנקה במי התהום

3.2.1. מיקום ואיסוף נתונים

המודל הוצב בשטח חקלאי של 13.35 קמ"ר באזור השרון בין הישובים אבן יהודה, תל מונד, ובני ציון (תרשים מס' 3.2). בשטח זה ישנן יחסית הרבה בארות שואבות, רובן פעילות לאורך עשרות שנים כך שישנם הרבה נתוני מפלס וריכוזי חנקה יחסית לגודל השטח. גבולות המודל שורטטו כך שיכללו שטח חקלאי בלבד ולא שטח עירוני וכן בקרבה מספיקה לבארות שיספקו נתונים לקביעת תנאי השפה. לכן, ניתן להניח שכל החנקה הנכנסת לאקווא מהתווך הלא רווי מקורה בפעילות החקלאית (ללא בורות ספיגה, אתרי סילוק פסולת). מאגר הקולחים במרכז התמונה (תרשים 3.2) הוא חדש יחסית (2008), ובעבודה זו מיוחסים לו לרוב שימושי הקרקע החקלאיים שלפני הקמתו.



תרשים מס' 3.2: תצלום אוויר של שטח המודל, בכוכבים מסומנות הבארות ששימשו לקביעת תנאי השפה. בנקודות צהובות הבארות ששימשו לכיול מודל הזרימה ובנקודות תכולות הבארות ששימשו לכיול מודל ההסעה. בקו שחור גבולות המודל שנקבעו. בתצלום נראה מאגר קולחים חדש שהוקם בשנת 2008.

כל הנתונים מהבארות התקבלו ישירות בקבצי אקסל מהשירות ההידרולוגי. הנתונים כוללים נתונים קבועים (מיקום, גובה פרפורציות וכו') ומשתנים בזמן (מפלס, נפחי שאיבה וריכוזי חנקן). החל משנות ה-70 של המאה הקודמת. הבארות הסמוכות לגבולות המודל שימשו לקביעת תנאי השפה והבארות במרכז השטח שימשו לכיולו (תרשים 3.2). המודל הוצב במערכת GMS 8.2 (AQUAVEO 2012).

3.2.2. תקופת ההרצה וצעדי הזמן במודל

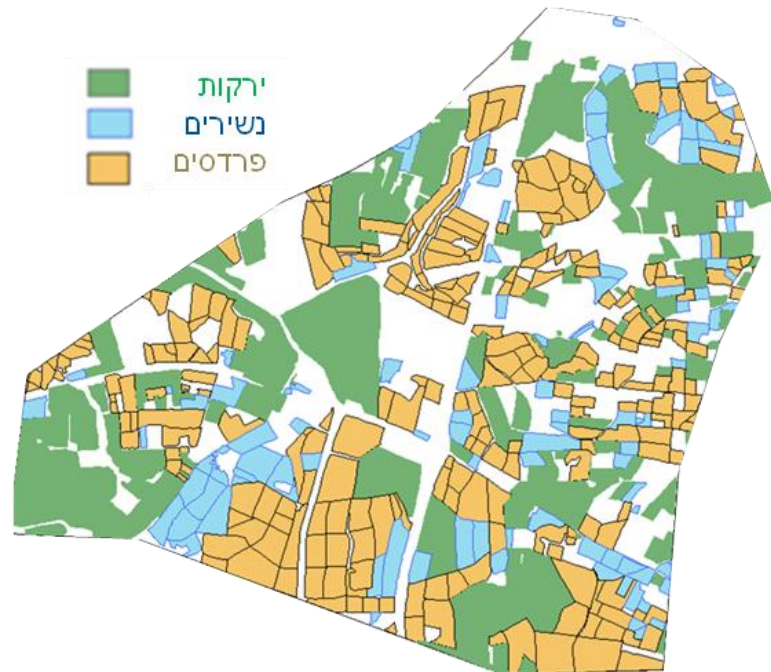
מתוך התבוננות במפלסי מי התהום במשך השנים הוחלט על הרצת מודל מי התהום למשך 20 השנים הקודמות למועד קידוחי הדיגום: 9/1992-8/2012. מפלסי מי התהום עלו באופן משמעותי לאחר חורף 1991-1992 ולאחר מכן המפלסים נשארים יחסית יציבים (תרשים מס' 4.5) – כך יש סבירות גבוהה יותר להצלחת שחזור המפלסים של המודל. סיבה נוספת לתקופה זו היא כפי שיוסבר להלן, בעבודה זו שטפי המים והחנקן לאקווה מהתווך הלא רווי הם אלה שחושבו מהמודלים המכילים לתצפיות השדה בתווך הלא רווי שתוארו בפרקים הקודמים.

כדי לקיים קשר מושכל בין המודלים של התווך הלא רווי ומי התהום הוארך משך המודלים של התווך הלא רווי 50 שנה הקודמים למועד קידוחי הדיגום (1962-2012). לאחר 30 שנה (1992) השטפים בתחתית התווך הלא רווי משקפים את שימוש הקרקע שמעליו ולא מושפעים מתנאי ההתחלה, וניתן להכניס את נתוני השטפים האלו אל מודל מי התהום. מימד הזמן של הפרמטרים של המודל הוא 'יום' אך המודל הורץ ברזולוציית זמן חודשית (Stress Period), כל נתון מנתוני הקלט למודל – שאיבה, מפלס, ריכוז, שטפי מים ושטפי חנקן הינו אחיד לכל החודש, לדוגמא אם בחודש בן 30 יום נמדדה שאיבה של 30,000 מ"ק בבאר מסוימת (נתוני השרות ההידרולוגי), מבחינת המודל ישנה שאיבה אחידה של 1000 מ"ק ביום. רזולוציית זמן זו נקבעה בהתאם לרזולוציות הזמן הקיימות במדידות השאיבות המפלסים והריכוזים. מבחינת החישוב הנומרי כל צעד זמן\חודש (Stress Period) מחולק ל-10 פרקי זמן להם מתבצעים החישובים.

3.2.3. שטפי מים, חנקן ושימושי קרקע.

המרכיב המשמעותי בנתוני הקלט למודל הוא נתוני שטפי המים והחנקן מהתווך הלא רווי אל פני מי התהום. כפי שיוצג בתוצאות החישובים בתווך הלא רווי ישנה שונות בשטפי המים והחנקן בין שימושי קרקע חקלאיים שונים (וכן Mercado, 1976). על פי מפת שימושי קרקע של הממ"ג הלאומי (נתוני שנת 2000) המחלקת את שימושי הקרקע באזור זה ל-4 קטגוריות עיקריות: הדרים, עצי פרי נשירים, ירקות ושטח ללא גידול (תרשים מס' 3.3). שימושי קרקע מפורטים יותר ניתן למצוא בסקר משרד החקלאות - 2009 (60 גידולים שונים בשטח הנ"ל),

אך המחקר בתווך הלא רווי בעבודה זו, ומחקר קודם (שפירא, 2012), כיסו 4 שימושי קרקע בלבד המייצגים בצורה סבירה את אופי הגידולים, כך שיישום התוצאות למודל האקוויטי בפרוט כזה אינו אפשרי.

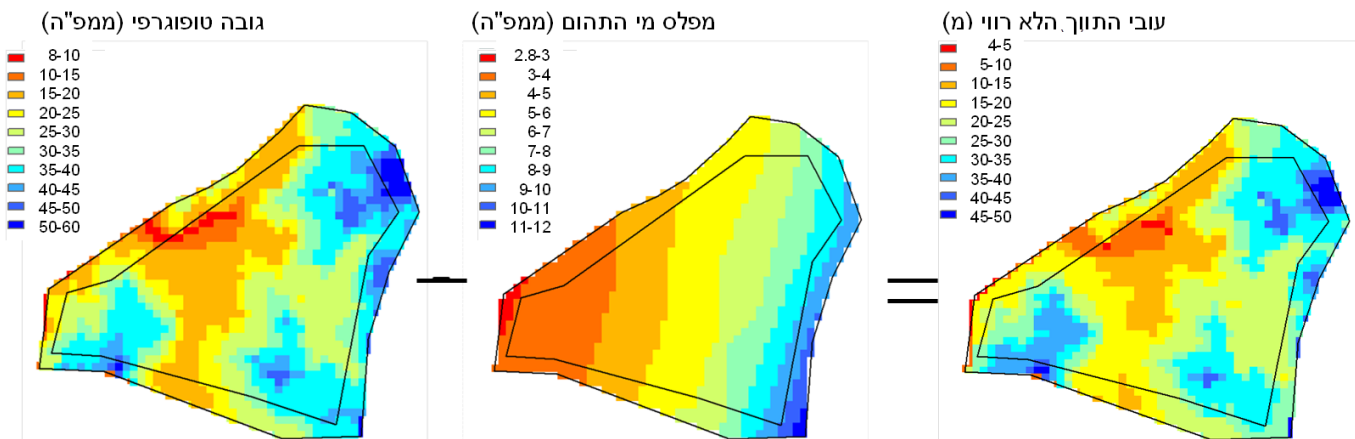


תרשים מס' 3.3: שימושי הקרקע בשטח המודל, השטחים הלבנים אינם מעובדים (מבוסס על הממ"ג הלאומי, נתוני שנת 2000)

השטפים שחושבו מהתווך הלא רווי ייצגו את שימושי הקרקע השונים: אפרסמון את עצי הפרי הנשירים ותפוחי אדמה את הירקות. את השטפים בפרדסים ייצגו השטפים בתווך הלא רווי כפי שחושבו בעבודת המוסמך של רועי שפירא (2012). השטפים בשטח ללא גידול התקבלו מהרצת מודל HYDRUS-1D בחתך קרקע זהה לזה של הפרדסים בעבודתו של שפירא עם גשמים בלבד ללא השקיה ויישום 1 ק"ג חנקן חנקתי לדונם לשנה (שאריתי מהשטחים הסמוכים).

3.2.4 עובי התווך הלא רווי

באמצעות תוכנת ARCGIS (ESRI, 2011) חושבו עומקי התווך הלא רווי בכל שטח המודל: ראשית נבנה שריג מפלס מי התהום הממוצע לתקופת ההרצה בשטח המודל באמצעות אינטרפולציית Kriging של נתוני המפלס הממוצע המדוד בבארות בשטח המודל. ערכי שריג זה הופחתו מערכי שריג הגובה הטופוגרפי של שטח המודל (DEM) וכך התקבל שריג של עומק התווך הלא רווי בשטח המודל (תרשים מס' 3.4).



תרשים מס' 3.4: חישוב עובי התווך הלא רווי בשטח המודל, הפחתת המפלס הממוצע מהגובה הטופוגרפי מייצרת את מפת עובי התווך הלא רווי.

3.2.5. העמקת המודלים מהתווך הלא רווי עד למי התהום והארכת תקופת ההרצה

המודלים שהוצבו מלכתחילה בתווך הלא רווי הוצבו עד לעומק קידוח הדיגום – 10 מטרים. על מנת לקבל שטפים אקטואליים שישמשו כקלט למודל מי התהום הועמקו המודלים בכל שימושי הקרקע עד לפני מי התהום. מכיוון שבשטח המודל ישנם עומקים שונים של התווך הלא רווי, בין 4 ל-50 מטר, הורצו המודלים של התווך הלא רווי לכל עומקי התווך הלא רווי ברזולוציה של 1 מטר (בפעולה זו הסתייעתי בד"ר גיל שטרסברג – מפתח בתחום המודלים ההידרולוגיים ו GIS) התכונות ההידראוליות למודלים הלא רוויים בעומק גדול מ-10 מטרים נלקחו מעבודתו של רועי שפירא (שפירא, 2012). תכונות אלו שימשו לכל עומק התווך הלא רווי מ-10 מטרים ועד פני מי התהום.

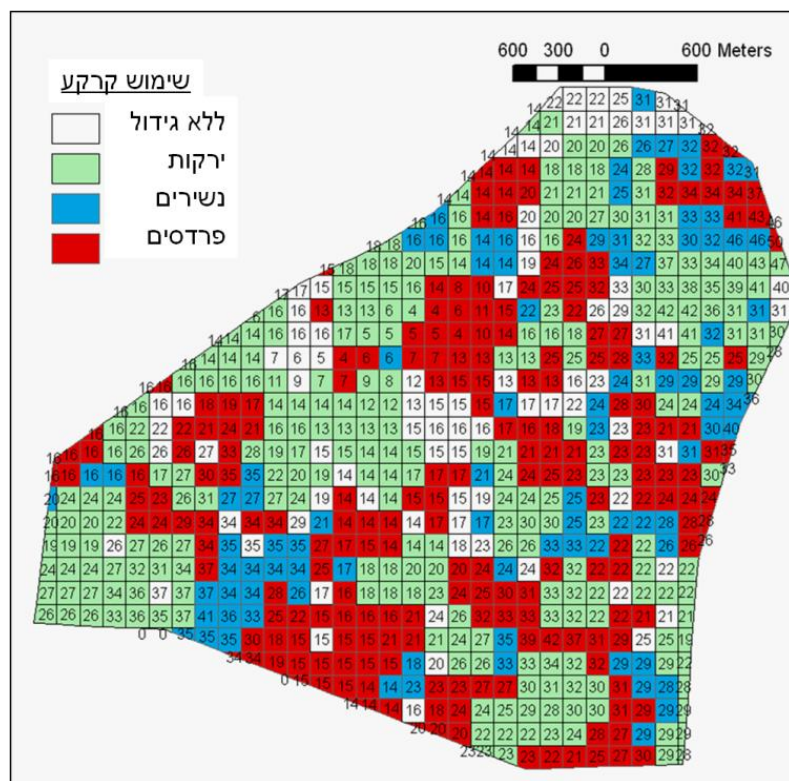
כפי שהוסבר קודם לכן, העמקת המודל בתווך הלא רווי מחייבת גם הארכת משך זמן המודל על מנת שהשטפים בתחתית התווך הלא רווי ייצגו את השפעת הדישון בפני השטח. מהירות זרימת המים הממוצעת בתווך הלא רווי מתחת לפרדסים, בהם שטף המים הנמוך ביותר היא כ-1.2 מטר לשנה ולכן הוחלט על הרצת המודלים הלא רוויים ל-50 שנה מתוך כוונה להריץ את מודל מי התהום למשך 20 השנים האחרונות (1992-2012). לצורך כך שימשו נתונים רשומים החל משנת 1962 של גשם מתחנת תל מונד ונתוני התאדות מגיית מתחנת בית דגן של השירות המטאורולוגי. נתוני ההתאדות מגיית הומרו לנתוני התאדות לפי נוסחת "Penman-Monteith" באמצעות לוח מקדמי המרה לחודשי השנה (גל וחוב', 2012). בהרצות אלה הונח שמשטרי ההשקיה והדישון היו אחידים לכל אורך ה-50 שנה.

המודלים של התווך הלא רווי הורצו ברזולוציית זמן יומית, בהתאם להשקיה וליישומי הדשן. מודל מי התהום הורץ כאמור ברזולוציית זמן חודשית. לכן נתוני הפלט של המודלים מהתווך הלא רווי בתחתית החתך (תחתית התווך הלא רווי, מפלס מי התהום הממוצע) הועברו לנתונים חודשיים באמצעות חישוב ממוצע לחודש (יחידת הזמן של מודל מי התהום היא

עדיין יום למרות שה stress period הוא חודש). בסופו של התהליך התקבל מסד נתונים של שטפי מים וחנקה בפני מי התהום ברזולוציית זמן חודשית לאורך 20 שנה (1992-2012) בארבעת שימושי הקרקע בכל עומקי התווך הלא רווי. מסד נתונים זה שימש כנתוני קלט למודל מי התהום.

3.2.6. בניית תאי המודל (GRID)

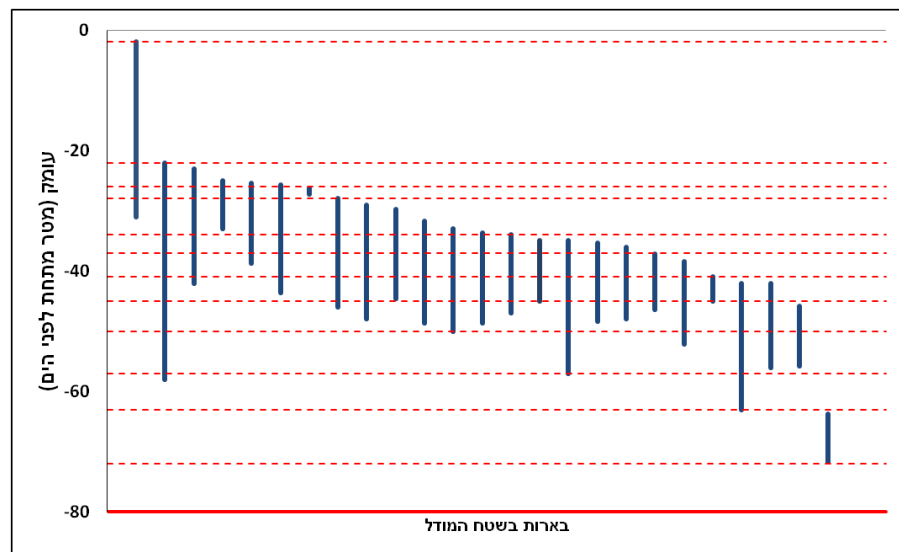
מימדי אורך ורוחב: שטח המודל חולק לתאים ריבועיים של 150*150 מטר, שטח זה מייצג גודל חלקה חקלאית סטנדרטית. לכל תא שטח הותאמו: א) שימוש הקרקע המתאים על פי סקר מפת שימושי הקרקע. בתאים בהם ישנם כמה שימושי קרקע נקבע השימוש על פי חלק שימוש הקרקע הגדול ביותר באותו תא. ב) עומק התווך הלא רווי בתא. כעת ניתן להתאים לכל תא במודל מי התהום את סדרת נתוני שטפי המים והחנקה המתאימים לו על פי עובי התווך הלא רווי ושימוש הקרקע שעל פני השטח מעליו. סה"כ ישנם 685 תאים בשכבה העליונה של המודל (תרשים מס' 3.5).



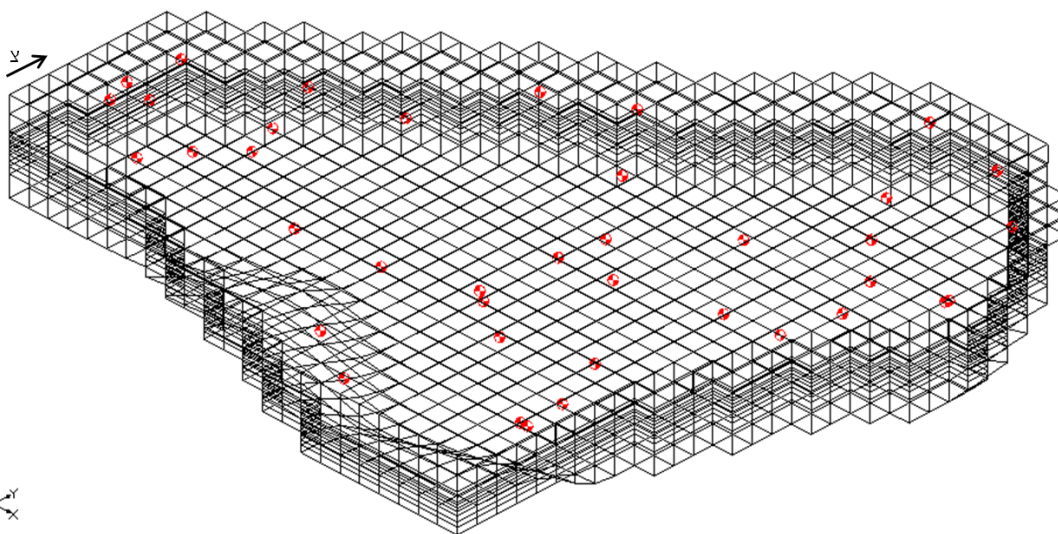
תרשים מס' 3.5: שימושי הקרקע (צבע) ועומקי התווך הלא רווי במטרים (מספר) בתאי שטח המודל. התאים עם התווך הלא רווי הדק יחסית, מעל נחל פולג.

מימד עומק: המודל הינו עד לתחתית שכבות הכורכר - גג חבורת הסקיה (כ- 80 מטר מתחת לפני הים באזור זה). מפת קווי גובה של גג הסקיה (גבירצמן ג., 1970) עברה דיגיטציה ואינטרפולציה מרחבית (IDW) ב 3D Statistical Module הכלול במערכת ה-GMS, כך נקבע הגבול התחתון של המודל. ריכוז החנקה המדוד בבארות לא מייצג את ריכוזו בפני

מי התהום אלא בעומק של הפרפורציה של הבאר. מסיבה זו מודל מי התהום חייב להיות תלת מימדי. על מנת לפשט את המודל הונח שהתכונות ההידראוליות הומוגניות לעומק. שכבות המודל נבנו על פי עומקי הפרפורציות של הבארות בשטח המודל, לבארות השונות בשטח המודל ישנם עומקי גג ותחתית פרפורציה שונים (תרשים מס' 3.6). עומק המודל חולק ל 13 שכבות בהתאם לעומקי הפרפורציות, ישנם בארות בהם הפרפורציה מצויה במספר שכבות וישנן שהפרפורציה בשכבה אחת בלבד (מספר תאי מודל או תא אחד עם מבלע שאיבה, בהתאמה). סה"כ ישנם 7994 תאי מודל בכל השטח ובכל השכבות (תרשים מס' 3.7).



תרשים מס' 3.6: מגוון עומקי הפרפורציות של הבארות השונות בשטח המודל (בכחול, מגג ועד תחתית הפרפורציה) והחלוקה ל-13 שכבות עומק של המודל (באדום מקווקוו). באדום רצוף תחתית המודל). מיקום הבארות על הציר האופקי לא מהותי, משיקולים אסטטיים הבארות הרדודות משמאל והעמוקות מימין.



תרשים מס' 3.7: מבט על אלכסוני תלת מימדי על תאי המודל, בנקודות אדומות מסומנים מיקומי הבארות.

3.2.7. תנאי שפה

נאספו נתוני מפלס וריכוז חנקת מהשירות ההידרולוגי הישראלי ברשות המים של כל הבארות בשטח ובסביבת המודל. תנאי השפה במודל הזרימה ומודל ההסעה הינם עומד מים (מטר) וריכוז חנקת (מ"ג/ל), בהתאמה. העומדים והריכוזים בגבולות המודל משתנים בזמן על פי נתוני הבארות הסמוכות לגבולות (תרשים מס' 3.2). במערכת ה-GMS ניתן לקבוע את הערכים במספר נקודות על גבולות המודל ובאופן אוטומטי מחושבים הערכים לכל התאים בין הנקודות הנ"ל באמצעות אינטרפולציה ליניארית. תנאי השפה שנקבעו הוכנסו בגבולות המודל בכל השכבות עד לעומק המרבי של המודל.

3.2.8. תנאי התחלה

תנאי ההתחלה למודל נקבעו באמצעות ערכי מפלס וריכוז חנקת מדודים בבארות בשטח ובסביבת המודל בזמן התחלת הרצת המודל (9/1992). ערכי המפלס עברו אינטרפולציה מרחבית דו מימדית IDW (בהנחת עומד הידראולי אחיד עם העומק) באמצעות 2D Module Statistical במערכת ה-GMS והוכנסו לתאי המודל כתנאי התחלה למודל הזרימה. ערכי ריכוז החנקת עברו אינטרפולציה מרחבית תלת מימדית IDW באמצעות 3D Statistical Module שבמערכת ה-GMS והוכנסו לתאי המודל כתנאי התחלה למודל ההסעה.

3.2.9. איברי מקור/מבלע

במודלים של הזרימה וההסעה ישנו איבר מבלע והוא השאיבה מהבארות שבשטח המודל (מבלע של מים במודל הזרימה ומבלע של חנקת במודל ההסעה). נתוני השאיבה החודשית בבארות לאורך השנים התקבלו מהשירות ההידרולוגי והוכנסו לבארות שבשטח המודל. איבר המקור במודל הזרימה הינו שטפי המילוי החוזר ובמודל ההסעה שטף החנקת מהתווך הלא רווי. לכל תא מתאי המודל בשכבה העליונה ישנו ערך מילוי חוזר ושטף חנקת ספציפי המחושב לפי עומק התווך הלא רווי וסוג הגידול שמעליו. שטפים אלו התקבלו כאמור מפלט המודל החד מימדי של התווך הלא רווי בשימושי הקרקע השונים.

3.2.10. כיול המודל

כיול מודל הזרימה: מודל הזרימה הורץ מספר פעמים עם ערכי מוליכות הידראולית (K) שונים באזורים שונים של שטח המודל, תפוקה סגולית (Sy) (למעשה הנקבוביות האפקטיבית), אגירות סגולית (Ss), ויחס אנאיזוטרופיה ($K_{horizontal}/K_{vertical}$) שונים עד לקבלת ערכי מפלס מחושבים הקרובים ביותר לערכים המדודים בבארות בשטח המודל כל הערכים שהורצו לפרמטרים השונים הינם בגבולות המקובל בספרות לאקווה החוף (שליו וסלוצקי, 2010; בכמט וחוב', 2003). חלוקת שטח המודל לשטחי משנה בהם מוליכויות הידראוליות שונות

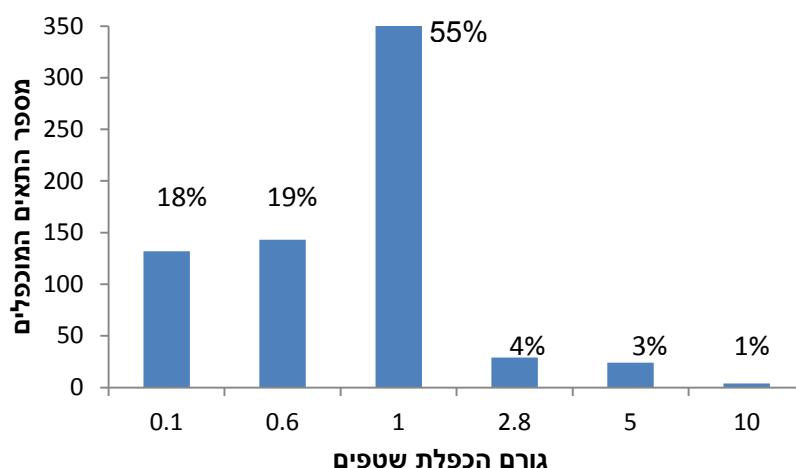
מקובלת בספרות בנוגע למודלים של זרימה (Sultan et al., 2007; Sophocleous et al., 1999). עבור כל באר חושב ממוצע הסטיות בערך מוחלט (MAE-Mean Absolute Error) וההטיה (ממוצע הסטיות לא בערך מוחלט, Bias) בין המפלסים המדודים למחושבים. כמו כן חושבו הממוצעים הנ"ל עבור כלל הנתונים בבארות בשטח המודל ביחד. סף ההפרש הממוצע המקסימלי בין הערכים המחושבים למדודים נקבע על 0.5 מטר וסף זה הושג, מלבד שתי בארות בהן ההפרש חרג מעט והגיע עד 0.7 מטר. כל הנתונים ששימשו לכיול מודל הזרימה הינם נתונים שנמדדו בבארות בחודשים בהם לא התקיימה שאיבה מהבאר מפני שכאשר מתרחשת שאיבה המפלסים יורדים, לצורך מדידת המפלס מפסיקים את השאיבה למספר שעות או ימים. מודל הזרימה אינו "עוצר" את השאיבה שהינה אחידה לכל אורך החודש ולכן ערכי המפלס המחושבים כוללים את קונוס השפילה ואינם מייצגים את המפלס האמיתי. רק בחודשים בהם לא התקיימה שאיבה ערכי המפלס המדודים והמחושבים אמורים לייצג את אותו המפלס. הבארות שעל בסיס נתוניהן כויל המודל הינם הבארות שבתוך שטח המודל עם מספיק נתוני מפלס רלוונטיים (תרשים מס' 3.2), ללא הבארות הסמוכות לגבולות המודל המושפעות יותר מתנאי השפה ולא משטפי המילוי החוזר. הנתונים ששימשו לכיול הם החל משנת 1998 על מנת שהתוצאות המחושבות לא יהיו מושפעות מתנאי ההתחלה אלא משטפי המילוי החוזר. סך הכל שימשו לכיול 123 נתוני מפלס מדודים (לכל אורך שנות הרצת המודל) מ 10 בארות.

כיול מודל ההסעה: כיול מודל ההסעה כלל 3 שלבים עיקריים. בשלב ראשון מודל ההסעה הורץ מספר פעמים לקבלת ערכי דיספרסיביות אורכית ויחס בין מקדמי דיספרסיביות אורכית ואנכית (longitudinal and transverse dispersivity ratio) מיטביים. הערכים של מקדמי הדיספרסיה בהם ההפרשים בין ערכי ריכוז חנקת מדודים בבארות וערכים מחושבים על פי המודל מינימליים שימשו כערכים המכילים.

גם בכיול מודל ההסעה נעשה שימוש בנתוני ריכוז חנקת מדודים בבארות במרכז שטח המודל (תרשים מס' 3.2) ולא מנתוני בארות הסמוכות לגבולות המודל המושפעות מתנאי השפה יותר מאשר משטפי החנקת הנכנסים מהתווך הלא רווי. סה"כ בכיול מודל ההסעה נעשה שימוש ב 208 נתונים מ-14 בארות. עם סיום השלב הראשון התקבלו ריכוזי החנקת הממוצעים מכל הבארות הנצפים והמחושבים כמעט זהים, אך בחלק גדול מהבארות ההבדלים בין הריכוזים המדודים והמחושבים היו עדיין גבוהים וכן השונות המרחבית שהתקבלה בריכוזי החנקת המחושבים הייתה נמוכה משמעותית מהשונות בתצפיות. המודל שיחזר את ריכוז החנקת הממוצע באקווה אך לא את השונות המרחבית בתוך שטח המודל. לצורך וידוא המסקנה הנ"ל הורץ מודל ההסעה ללא שטפי חנקת מפני השטח, הריכוז הממוצע באקווה יצא נמוך ביותר. בשלב זה הוסק שהמודל מצליח לתאר את השפעת שטפי

החנקה מפני השטח על ריכוז החנקה בבארות בממוצע על כל האזור, אך הוא אינו מצליח לתאר טוב את השונות המרחבית של הריכוזים בבארות.

לכן, בשלב שני, נעשה שינוי בהנחה שהשטפים מפני הקרקע בכל שימוש קרקע אחידים והוכנסה התפלגות בשטפים מפני הקרקע בכל אחד מארבעת שימושי הקרקע. השטפים מהתווך הלא רווי בכל תא הוכפלו באחד מהגורמים הבאים: 0.1, 0.6, 1, 2.8, 5, 10 על פי התפלגות השומרת על כך שסך החנקה הנכנסת אל שטח המודל מפני השטח נשארת זהה לשטפים המקוריים לפני הכפלה בגורמים הנ"ל, (תרשים מס' 3.8):



תרשים מס' 3.8: מספר התאים המוכפלים בכל גורם הכפלה של שטפי החנקה, סמוך לכל עמודה מוצגת כמות התאים המוכפלים בגורם באחוזים.

Kourakos et al., 2012 גם כן השתמשו בטווח של שני סדרי גודל לשטפי חנקה מאותו שימוש קרקע בסימולציות שהתעסקו בבעיית זיהום בחנקה באקווה בקליפורניה. שטפים מוכפלים בגורם גבוה יושמו בתאים הסמוכים לבארות בהן ריכוזי חנקה גבוהים ובגורם נמוך בתאים הסמוכים לבארות בהן ריכוזים נמוכים.

השלב השני הותיר באר אחת (בני דרור ד מושב) בה ריכוזי החנקה נמוכים במיוחד (כ-20 מ"ג/ל) עם ריכוזי חנקה מחושבים גבוהים בהרבה (כ-70 מ"ג/ל). על מנת לתת את המענה לבאר זו, בשלב שלישי נוסף תנאי שפה של ריכוז חנקה נמוך (2 מ"ג/ל, כפי שנמדד בבאר בעבר) בנקודה אחת בשכבה העמוקה ביותר של המודל. תנאי שפה זה מייצג תהליך דה-ניטריפיקציה בו חנקה הופכת לחנקן גזי שמתקיים בנקודות שונות בתחתית אקווה החוף בסביבה נטולת חמצן על פי המתועד ב Kurtzman et al., 2012, ממדידות רב שכבתיות עד לתחתית האקווה באתר מגן, תל אביב. לאחר שלב זה בכל הבארות הפרשים בין ריכוזי החנקה המדודים והמחושבים הממוצעים היו קטנים כמו גם ההבדל בשונות המרחבית של ריכוזי החנקה המחושבים והמדודים.

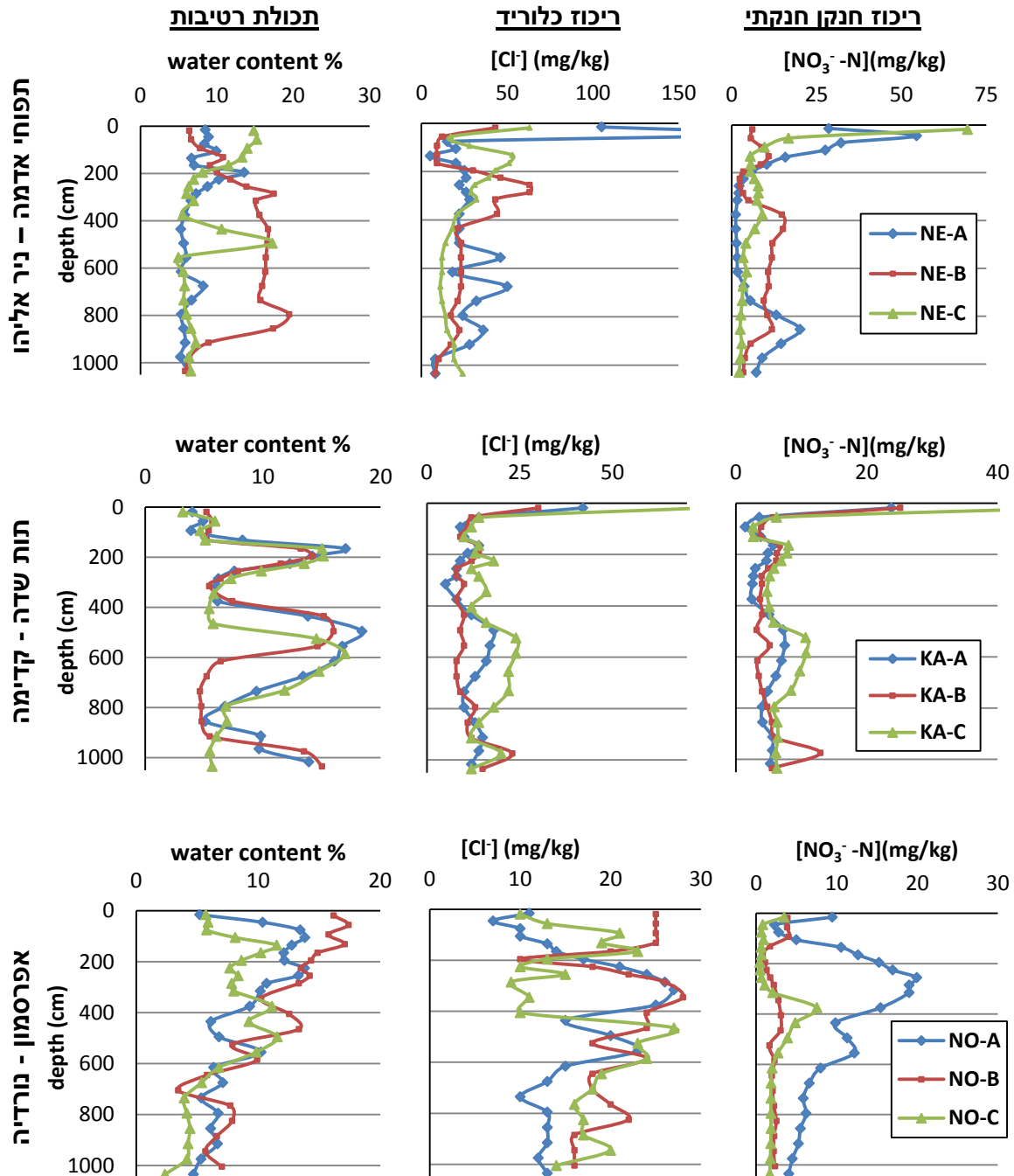
3.2.11. הרצת המודל לעתיד בתרחישי דיכון שונים

הורצו 3 תרחישים: תרחיש א: המשך דיכון כרגיל. תרחיש ב: המשך דיכון ב-75% מהדיכון הנוכחי. תרחיש ג: המשך דיכון ב-50% מהדיכון הנוכחי. על פי מחקרו של שפירא 2012 הפחתת ל 75% בכמות הדשן המיושמת ע"פ השטח תוביל להפחתת השטף בפני מי התהום ב-50% והפחתה בפני השטח ל-50% תוביל להפחתת השטף העמוק ב-72%. בשיעורים אלו (50% ו-72%) הופחתו השטפים בפני מי התהום בתרחישים ב' ו ג'. תנאי השפה המשתנים בזמן בכל תרחיש נקבעו על ידי הרצה ראשונית עם תנאי שפה קבועים (כערך הריכוז בשפות בסיום 20 השנים של המודל המכיל), בחינת השינוי בבארות במרכז המודל ובהתאם קביעת השינוי בתנאי השפה והרצה נוספת עם תנאי השפה המשתנים בזמן. בתרחיש א הריכוזים בשפות ממשיכים לעלות בערך של 0.6 מ"ג חנקהלילטר בשנה, בתרחיש ב' ירידה של 0.3 מ"גלילטר\שנה ובתרחיש ג' ירידה של 0.58 מ"גלילטר\שנה.

4. תוצאות

4.1 פרופילים של התווך הלא רווי

שונות מרחבית משמעותית בתוך החלקה בתכולות הרטיבות, ובריכוזי הכלוריד והחנקת נימצאה באפרסמון ובתפוא"א. בתות השדה השונות בסקאלת השדה קטנה (תרשים 4.1)



תרשים 4.1: נתוני תכולת רטיבות משקלית (%), ריכוזי כלוריד (מ"ג לק"ג קרקע) וריכוזי החנקת החנקת (מ"ג לק"ג קרקע) כנגד עומק הקרקע בשלושת אתרי הקידוח (תפוא"א, ניר אליהו, תות שדה - קדימה, נורדיה אפרסמון - נורדיה) שלושה קידוחים בכל אתר (A,B,C).

4.2 שטפי מים וחנקן חנקתי מהשדות אל התווך הלא רווי בהנחת מצב תמידי

שטפי המילוי החוזר והחנקן החנקתי בעומק האזור הלא רווי לעבר מי התהום בהנחת מצב תמידי חושבו על פי מאזן מסת כלוריד ובחישוב זה נעשה שימוש בנתונים הבאים: כמות הגשם השנתית הממוצעת (2002-2012) היא: 495 מ"מ/שנה מעל שדה התפוחי אדמה בניר אליהו, 540 מ"מ/שנה מעל מטע האפרסמון בנורדיה וללא גשם בשדה התות מפני שהוא מחופה בחורף. ריכוז הכלוריד במי הגשמים 15 מ"ג/ליטר. כמות ההשקיה הממוצעת (2002-2012) היא: 650 מ"מ/שנה בתפוחי אדמה (כולל בטטה), 1000 מ"מ/שנה בתות שדה ו-850 מ"מ/שנה באפרסמון. ריכוז הכלוריד הממוצע (2002-2012) במי ההשקיה: 124 מ"ג/ליטר בתפוחי אדמה, 71 מ"ג/ליטר בתות שדה ו-105 מ"ג/ליטר באפרסמון (מנתוני רשות המים לבארות המקור).

טבלה מס' 4.1: שטפי המילוי החוזר והחנקן החנקתי לעבר מי התהום המבוססים על מאזן מסת כלוריד בשלושת הקידוחים (A,B,C) בכל שדה בהנחת מצב תמידי.

אפרסמון - נורדיה			תות שדה - קדימה			תפוחי אדמה - נייר אליהו			
C	B	A	C	B	A	C	B	A	
263	232	234	188	179	198	266	192	421	ריכוז כלוריד ממוצע במי הנקבובים (מ"ג/ל)
38	25	130	76	53	47	63	63	96	ריכוז חנקן חנקתי ממוצע במי הנקבובים (מ"ג/ל)
370	424	421	378	397	359	330	457	208	שטף מים (מ"מ/שנה)
14	11	54	29	21	17	21	29	20	שטף חנקן חנקתי (ק"ג/דונם/שנה)

אי אפשר להתעלם משטף החנקה הקיצוני בקידוח A במטע האפרסמון, 54 ק"ג/דונם/שנה, ערך גבוה בהרבה יותר מכמות הדשן החנקני המיושם (השוו טבלה 3.1). כנראה מדובר בטעות מדידה או בנתיב הסעה מועדף אליו מתנקזים יוני החנקה, או באיזשהי דליפה מקומית מהזמן שקודם לקידוח הדיגום שגרמה לעליית ריכוזי החנקה בתווך הלא רווי.

4.3 ריכוזי חנקן אמוניאקלי בתווך הלא רווי

ריכוזי החנקן האמוניאקלי הממוצעים בדגימות הקרקע מגלים טווח ערכים רחב בין הקידוחים: 2-30 מ"ג/ליטר במי הנקבובים, הריכוזים הנמוכים כנראה כתוצאה מתהליך הניטריפיקציה בקרקע. מכיוון שהאמון לא מהווה גורם סיכון למי התהום לא נעשתה עבודת המשך בעניינו.

4.4 הרכב מכאני

אחוזי החול, סילט וחרסית בשכבות השונות בקרקע נמדדו בכל הקידוחים ב-6 דוגמאות לכל קידוח על פי חלוקה לשכבות משוערת לפי מראה עיניים בעת הקידוח ונתוני תכולת

הרטיבות. הנתונים משמשים לקביעת התכונות ההידראוליות במודל הזרימה ולכן הם מוצגים רק עבור הקידוחים להם הוצב מודל הזרימה – קידוח אחד בכל שדה.

טבלה מס' 4.2: נתוני מרקם הקרקע בקידוח בו הוצב המודל מוצגים כאחוזי חרסית, סילט וחול בשכבות הקרקע. טווח הנתונים והממוצעים כוללים את שלושת הקידוחים בכל שדה.

נורדיה - אפרסמון				תות שדה - קדימה				תפוחי אדמה - ניר אליהו			
סילט	חרסית	חול	עומק (ס"מ)	סילט	חרסית	חול	עומק (ס"מ)	סילט	חרסית	חול	עומק (ס"מ)
12	2	86	15	3	3	94	18.5	19	2	79	18.5
15	3	82	165	23	2	75	165	11	2	87	195
12	3	85	315	3	2	95	345	4	1	95	375
11	2	87	555	18	4	78	525	2	1	97	495
4	2	94	615	4	3	93	795	5	1	94	735
2	1	97	915	2	2	96	975	2	1	97	975
2-15	1-8	61-97	טווח נתונים	2-27	1-5	67-96	טווח נתונים	2-28	1-4	70-96	טווח נתונים
12	3	85	ממוצע	21	3	85	ממוצע	11	2	87	ממוצע

4.5. מודל זרימה והסעה חד מימדי בתוך הלא רווי

על בסיס נתוני מרקם הקרקע הותאמו בתוכנת Rosseta תכונות הידראוליות ופרמטרים במודל ואן גנוכטן – מועלים לשכבות הקרקע השונות (בקידוחי C בלבד להם הוצב המודל). במהלך הכיול הפרמטרים שונו קלות עד להתאמה הסופית. גם הפרמטרים של מודל ההסעה הותאמו סופית מתוך טווח הנתונים בספרות במהלך הכיול. הפרמטרים המכויילים של המודלים מוצגים בטבלאות 4.3-4.5.

טבלה מס' 4.3: פרמטרים למודלים המכויילים של הזרימה וההסעה בשכבות הקרקע השונות בתפוחי אדמה.

מקדמי ריאקציות			מקדמי זרימה והסעה								
אידיוי אמון, ניטריפיקציה, דהניטריפיקציה.			דיספרסיביות Disp. (מ"ס)	צפיפות גושית ρ (גר/ס"מ ³)	מוליכות הידראולית K_s (ס"מ/יום)	n	α (1/מ"ס)	תכולת רטיבות		טווח עומקים (מטר)	שכבה
μ_{dnit} (1/יום)	μ_{nit} (1/יום)	μ_{vol} (1/יום)						רוויה θ_s	שאריתית θ_r		
0.005	0.2	0.05	1.5	1.45	68	1.6	0.025	0.415	0.068	0-0.15	1
0	0.2	0	1.5	1.45	68	1.6	0.025	0.415	0.068	0.15-0.3	2
0	0.05	0	1.5	1.45	68	1.6	0.025	0.415	0.068	0.3-0.45	3
0	0	0	10	1.45	675	3.1	0.031	0.420	0.058	0.45-1.5	4
0	0	0	25	1.46	165	1.8	0.028	0.445	0.065	1.5-4	5
0	0	0	12	1.43	775	3.3	0.031	0.409	0.057	4-5.2	6
0	0	0	38	1.6	766	3.3	0.031	0.406	0.057	5.2-9.4	7
0	0	0	9	1.57	68	1.6	0.025	0.415	0.068	9.4-10.15	8
0	0	0	25	1.46	165	1.8	0.028	0.445	0.065	10.15-10.3	9

טבלה מס' 4.4: פרמטרים למודלים המכילים של הזרימה וההסעה בשכבות הקרקע השונות בתות שדה.

מקדמי ריאקציות			מקדמי זרימה והסעה								
אידיוי אמון, ניטריפיקציה, דהניטריפיקציה.			דיספרסיות Disp. (מ"ס)	צפיפות גושית ρ (גרמס/מ"מ ³)	מוליכות הידראולית K_s (ס"מ/ימים)	n	α (1/מ"ס)	תכולת רטיבות		טווח עומקים (מטר)	שכבה
μ_{dnit} (1/יום)	μ_{nit} (1/יום)	μ_{vol} (1/יום)						רוויה θ_s	שאריתית θ_r		
0.01	0.18	0.05	1.5	1.46	709	3.2	0.033	0.401	0.053	0 - 0.15	1
0.005	0.18	0	1.5	1.46	709	3.2	0.033	0.401	0.053	0.15 - 0.3	2
0	0.005	0	1.5	1.46	709	3.2	0.033	0.401	0.053	0.3 - 0.45	3
0	0	0	10.5	1.46	709	3.2	0.033	0.401	0.053	0.45 - 1.5	4
0	0	0	14	1.56	34	1.4	0.024	0.388	0.068	1.5 - 2.9	5
0	0	0	2	1.44	788	3.4	0.032	0.405	0.053	2.9 - 4.95	6
0	0	0	12	1.49	61	1.6	0.026	0.408	0.065	4.95 - 6.15	7
0	0	0	8.5	1.23	98	1.4	0.026	0.489	0.075	6.15 - 7	8
0	0	0	6.5	1.65	31	1.4	0.028	0.358	0.059	7 - 7.65	9
0	0	0	25	1.5	767	3.4	0.031	0.392	0.054	7.65 - 10.3	10

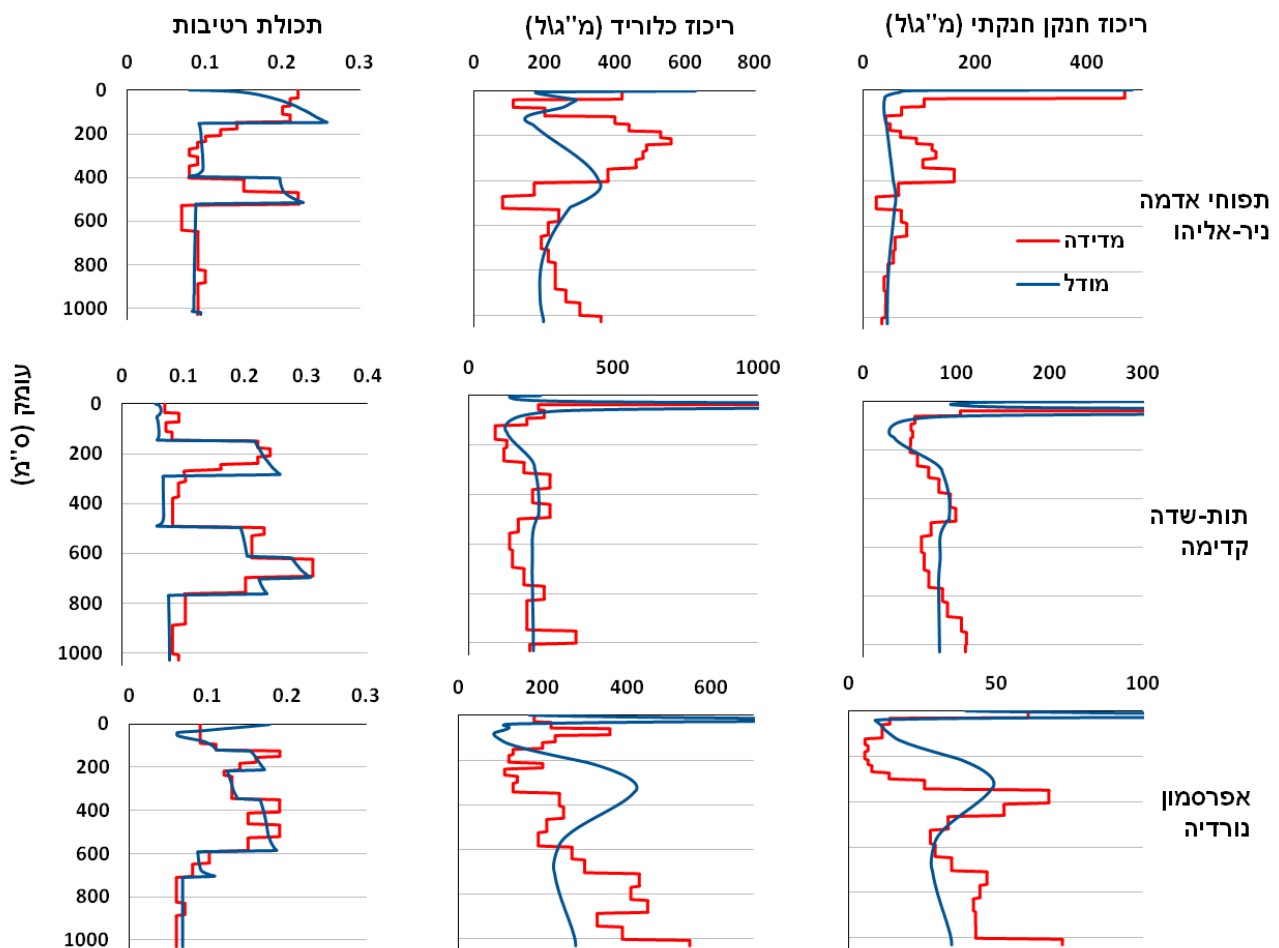
טבלה מס' 4.5: פרמטרים למודלים המכילים של הזרימה וההסעה בשכבות הקרקע השונות באפרסמון.

מקדמי ריאקציות			מקדמי זרימה והסעה								
אידיוי אמון, ניטריפיקציה, דהניטריפיקציה.			דיספרסיות Disp. (מ"ס)	צפיפות גושית ρ (גרמס/מ"מ ³)	מוליכות הידראולית K_s (ס"מ/ימים)	n	α (1/מ"ס)	תכולת רטיבות		טווח עומקים (מטר)	שכבה
μ_{dnit} (1/יום)	μ_{nit} (1/יום)	μ_{vol} (1/יום)						רוויה θ_s	שאריתית θ_r		
0.0025	0.1	0.08	1.5	1.48	159	2	0.028	0.404	0.06	0 - 0.15	1
0.001	0.01	0	1.5	1.48	159	2	0.028	0.404	0.06	0.15 - 0.3	2
0	0	0	7	1.48	159	2	0.028	0.404	0.06	0.3 - 0.45	3
0	0	0	20	1.48	159	2	0.028	0.404	0.06	0.45 - 1.2	4
0	0	0	9	1.61	60	1.6	0.028	0.367	0.059	1.2 - 2.1	5
0	0	0	13.5	1.61	114	1.9	0.030	0.364	0.056	2.1 - 3.45	6
0	0	0	24	1.65	62	1.7	0.030	0.353	0.055	3.45 - 5.9	7
0	0	0	12	1.49	599	3.1	0.030	0.392	0.057	5.9 - 7.05	8
0	0	0	32	1.5	1357	4.5	0.030	0.353	0.053	7.05 - 10.3	9

בשלושת השדות, בכל השכבות, פרמטר הפתלתלות ($T=0.5$) פרמטר נוסף שנקבע בזמן הכיול הוא מקדם סף הריכוז לקליטת שורשים פאסיבית, f . בריכוזי מומס גבוהים יותר יכנס לתא מומס רק בריכוז הסף ולא מעליו. בעבודתו של שפירא 2012 ערך הסף לקליטת חנקן חנקתי בפרדסים הוא 30 מ"ג/ליטר. המודלים בעבודה זו עוסקים בגידולים שונים ולכן גם ערכי הסף לקליטה יכולים לצאת שונים. ערכי סף הריכוז לקליטת

חנקן חנקתי במודלים המכילים הם בתפוחי אדמה $f_{NO_3}=45$, בתות שדה $f_{NO_3}=35$ ובאפרסמון $f_{NO_3}=20$ מ"גליטר חנקן חנקתי.

ערכים אלו נקבעו עם סיום שלב הכיול כאשר התקבלה התאמה המיטבית בין ערכי תכולת הרטיבות, ריכוזי הכלוריד וריכוזי החנקן החנקתי במי הנקבובים המדודים בפרופילי הקרקע לבין הערכים המחושבים. ההתאמה מוצגת בתרשים מס' 4.2.

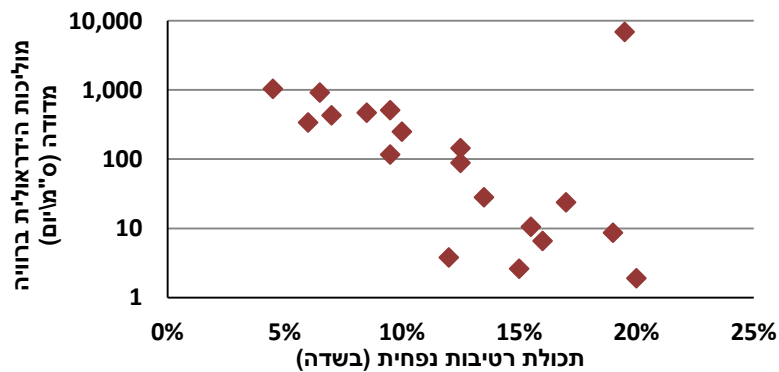


תרשים מס' 4.2: התאמת פרופילי תכולת רטיבות וריכוזי כלוריד וחנקן חנקתי (מ"גליטר) המדודים (קווים אדומים) בשלושת הקידוחים משלושת השדות לאלו המחושבים (קווים כחולים) על פי הפתרון המודל הנומרי. התוצאות המחושבות הן מהיום האחרון של הרצת המודל שזהו יום הקידוח.

התאמות טובות ישנן בתכולות הרטיבות (כיול מודל הזרימה) אך בריכוזי הכלוריד באפרסמון ישנה חוסר התאמה קטנה מבחינת תזמון חלחול של אזור הריכוז הגבוה אך מלבד זאת ישנה התאמה בסך כמות הכלוריד לאורך עמודת הקרקע. חוסר התאמה קל ישנו גם בריכוז החנקן החנקתי בחלק הפרופיל העליון בתפוחי אדמה. על כל פנים אלו ההתאמות המיטביות אליהן היה ניתן להגיע. חוסר ההתאמה קשור לגורמים אקראיים משתנים בזמן: שינויים בריכוזים במי ההשקיה, דישון לא מדויק וכדומה.

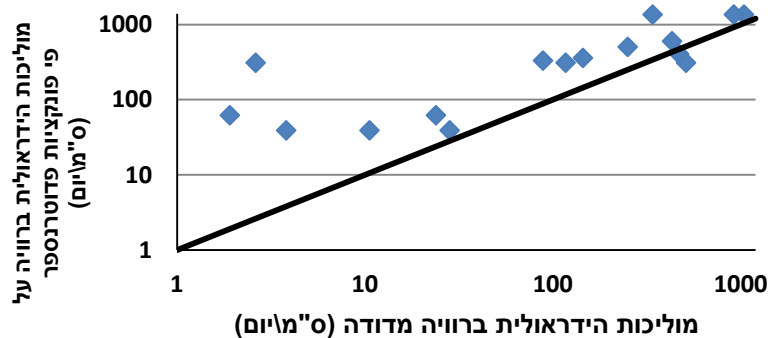
4.6. מוליכות הידראולית ברוויה בגלעיני קרקע בלתי מופרת

בדיקה זו נעשתה לחלק מגלעיני הקרקע בששת המטרים התחתונים של הקידוחים שלא נבדקו בשאר הבדיקות (כנזכר לעיל, בששת המטרים התחתונים בבדיקות הקרקע נעשו לכל דוגמא שניה) ונשארו במצב בלתי מופר. מדידת המוליכות ההידראולית בצורה מדוייקת לוקחת זמן רב וקשה לביצוע מפני שישנם מקורות טעות רבים כגון נתיבי זרימה מועדפת בדופן הפלסטיק של דוגמת הקרקע וכן דחיסה של גלעין הקרקע במהלך הקידוח. לכן בבדיקות אלו התבצעו רק לצורך השלמה ואימות המוליכות ההידראולית שנקבעה בתוכנה Rosseta על סמך נתוני מרקם הקרקע והצפיפות הגושה. המוליכות ההידראולית אמורה לרדת לוגריתמית ככל שתכולת הרטיבות המושפעת מאחוז החרסית בקרקע עולה וגודל הנקבובים קטן לכן אמינות הבדיקות נמדדת ראשית בתנאי זה המוצג בתרשים 4.3. תכולת הרטיבות כאן היא ממוצע תכולת הרטיבות של המדגם מעל ומתחת למדגם שבו נעשה ניסוי דרסי בדוגמא הלא מופרת. התאמת המוליכות ההידראולית ברוויה המדודה לזו שנקבעה לפי מרקם הקרקע מוצגת בתרשים 4.4.



תרשים מס' 4.3: מוליכות הידראולית ברוויה מדודה (ס"מ/יום, לוגריתמי) בגלעיני הקרקע הבלתי מופרת כנגד תכולת הרטיבות הנפחית (%) בדוגמאות השכנות.

רואים שאכן מתקיימת ירידה לוגריתמית במוליכות ההידראולית עם העליה בתכולת הרטיבות.



תרשים מס' 4.4: מוליכות הידראולית ברוויה (ס"מ/יום) על פי מרקם הקרקע כנגד מדודה (צירים לוגריתמיים) בקו שחור הפונקציה $Y=X$.

ישנה התאמה בין ההערכה של Ks מפילוג גודל גרגר וצפיפות גושית בעזרת PTF לזו שנמדדה בניסוי דרסי (הפרש עומד קבוע) בדוגמא בלתי מופרת, במוליכויות הגבוהות (חולות, חמרות חוליות). בדוגמאות הפחות מוליכות המדידה נתנה ערכים נמוכים יותר מההערכה, כנראה בגלל דחיסה, התנפחות חרסיות, התפתחות עובשים מקרוסקופיים (לא נראו בעין) בדוגמאות הלחות והסגורות בעלות המרקם הדק יותר. בכל מקרה במודל נעשה שימוש בחמשת הפרמטרים של ואן-גנוכטן מועלם בכללם המוליכויות הרוויה על פי מרקם הקרקע, צפיפות גושית וה-PTF, המדידות הדינמיות נעשו כאמור לצורך הערכה של מהימנות הבדיקה בדוגמאות מסוג זה.

4.7. מאזני מים וחנקן במודלים החד מימדיים המכויילים

עם סיום כיוול המודלים החד מימדיים נערכו מאזני כניסות ויציאות מים וחנקן (חנקתי ואמוניאקלי) ממוצעים לשנה לפי נתוני הפלט (טבלאות מס' 4.6-4.7). מאזנים אלו משמשים גם הם לכיוול סופי של הפרמטרים במודל באמצעות השוואה בין שטף מילוי החוזר ושטף החנקן החנקתי הממוצעים המחושבים מפלט המודל הנומרי לשטפים המחושבים בהנחת מצב תמידי על בסיס מאזן מסת הכלוריד (ההשוואה היא רק לחישובים בקידוחים בהם הוצב וכיוול המודל הנומרי – קידוח C בכל שדה). ערכי המילוי החוזר השנתי בהנחת מצב תמידי ולפי ממוצע המודל המפורט הנומרי עם סיום הכיוול יוצאים קרובים מאוד, עם פער של עד 24 מ"משנה (6.5%) בין שני החישובים.

ערכי שטף החנקן החנקתי בהנחת מצב תמידי ולפי ממוצע המודל המפורט הנומרי עם סיום הכיוול יוצאים קרובים מאוד, עם פער של עד 2 ק"ג/דונם/שנה (7%) בין שני החישובים. אחוזי החנקן הנשטף מסך החנקן הנכנס גבוהים מאוד – כחצי מכל החנקן שנכנס כדשן וכחנקן במי ההשקיה נשטף אל מי התהום. תוצאה זו נמוכה משטף החנקן מפרדסים בעבודתו של שפירא 2012 (כ 30% שטיפה מסך החנקן הנכנס). כמובן שזה מעיד על דישון בעודף גדול. בעבודתו של שפירא בהדמיות דישון מופחת שהורצו במודל החד מימדי ניתן להפחית את השטפים המחלחלים בכ-70% על ידי הפחתת כמויות הדישון ב-50% עם ירידה של 20% בלבד בקליטת החנקן ע"י השורשים.

טבלה מס' 4.6: מאזן כניסות ויציאות מים (מ"משנה) ממוצעים ל-10 שנות מודל הזרימה בתווך הלא רווי.

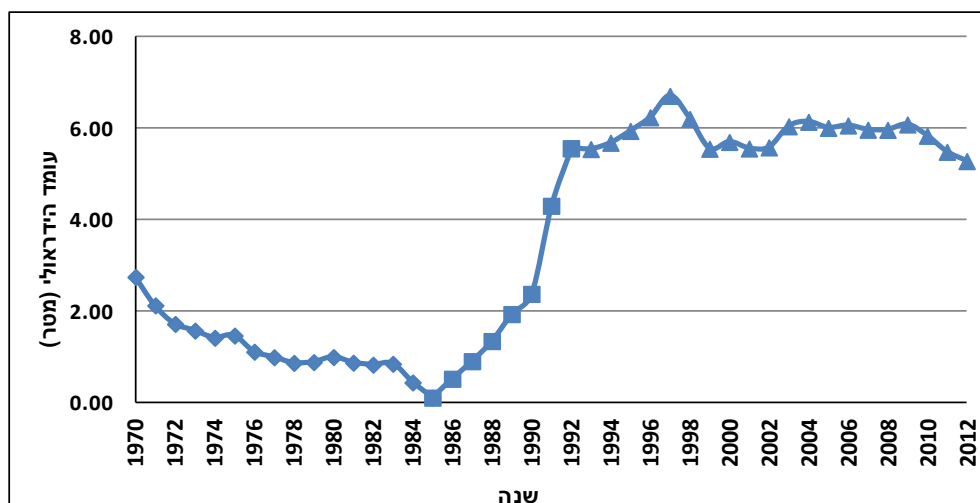
אפרסמון	תות שדה	תפוחי אדמה	
822	1050	463	השקיה
538	0	607	גשם
1360	1050	1070	סה"כ כניסת מים
639	367	467	קליטה בשורשים
352	335	276	אידי
366	354	323	מילוי חוזר לאקווה
370	378	330	מילוי חוזר לפי מאזן מסת כלוריד (קידוחי C בטבלה 4.1)

טבלה מס' 4.7: מאזן כניסות ויציאות חנקן (ק"ג/דונם\שנה) ממוצעים ל 10 שנות הרצת מודל ההסעה בתוך הלא רווי.

אפרסמון	תות שדה	תפוחי אדמה	
20	מינרלי - 35 אורגני - 10	45	דשן חנקני מיושם
9	10	5	חנקן חנקתי במי ההשקיה
29	55	50	סה"כ כניסות חנקן
2.5	3.5	6.5	אידיוי אמוניה
3.5	7.5	6.5	דהניטריפיקציה
2	3.5	2	קליטת חנקן אמוניאקלי לשורשים
11	12.5	16.5	קליטת חנקן חנקתי בשורשים
13	31	20	שטף חנקן חנקתי למי התהום
14	29	21	שטף חנקן חנקתי לפי מאזן מסת כלוריד (קידוחי C טבלה 4.1)
45%	55%	40%	% שטף מסך כניסות החנקן

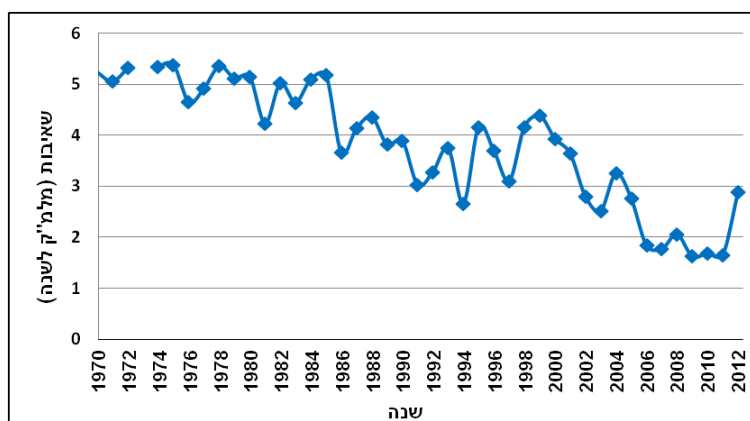
4.7. מגמות במפלס מי התהום בשטח מודל מי התהום ב-40 השנים האחרונות

מפלס מי התהום בשטח המודל יורד בהדרגתיות משנת 1970 עד 1985. משנת 1985 עד שנת 1992 עליה תלולה במפלס. החל משנת 1992 המפלס הממוצע (מרחבית) נשמר יחסית יציב (תרשים מס' 4.5). לאור כך הוחלט שמודל מי התהום יורץ בתקופת השנים 1992-2012.



תרשים מס' 4.5: מפלס מי התהום המדוד (מטר מעל פני הים) הממוצע בבארות בשטח המודל על פי נתוני השירות ההידרולוגי הישראלי לאורך השנים 1970-2012.

הסבר לתמורות במפלסי מי התהום מצוי כמובן בכמויות המשקעים (חורף שנת 1991/2 לדוגמא) אך גם בשינויים במגמות השאיבה מהבארות בשטח המודל כפי שנראה בתרשים מס' 4.6. השאיבות בירידה בגלל קיצוץ מכסות השפירים לחקלאות וגם כתוצאה מעליות בריכוזי החנקה ופסילת בארות לאספקת מי שתיה עקב חריגה מהתקן.



תרשים מס' 4.6: שאיבה כללית (מל"מ"ק לשנה) מכלל הבארות בשטח המודל על פי נתוני השירות ההידרולוגי הישראלי לאורך השנים 1970-2012.

עד 1984 השאיבה יחסית יציבה (וירידה במפלס). מ-1985 עד 1993 ישנה מגמת ירידה מתונה בשאיבה (עליית מפלס). מ-1993 עד 1999 ישנה מגמת עליה נוספת בשאיבה, משנת 2000 ישנה מגמת ירידה נוספת עד 2006 ומאז ישנה התייצבות יחסית על כ-2 מל"מ"ק בשנה (מפלס יציב).

4.8. כיוול פרמטרים במודל הזרימה וההסעה במי התהום

לאחר הרצות חוזרות של מודל הזרימה, עם סיום הכיוול, הותאמו הפרמטרים הבאים (טבלה מס' 4.8) למשוואות הזרימה וההסעה במי התהום (משוואות 1.10-1.11).

טבלה מס' 4.8: פרמטרים מכילים של זרימה והסעת חנקה במי התהום בשטח המודל

S_y (1/m)	S_s (1/m)	K_h/K_v	α (meter)	TRVT	Porosity
0.12	0.00032	5	500	0.1	0.12

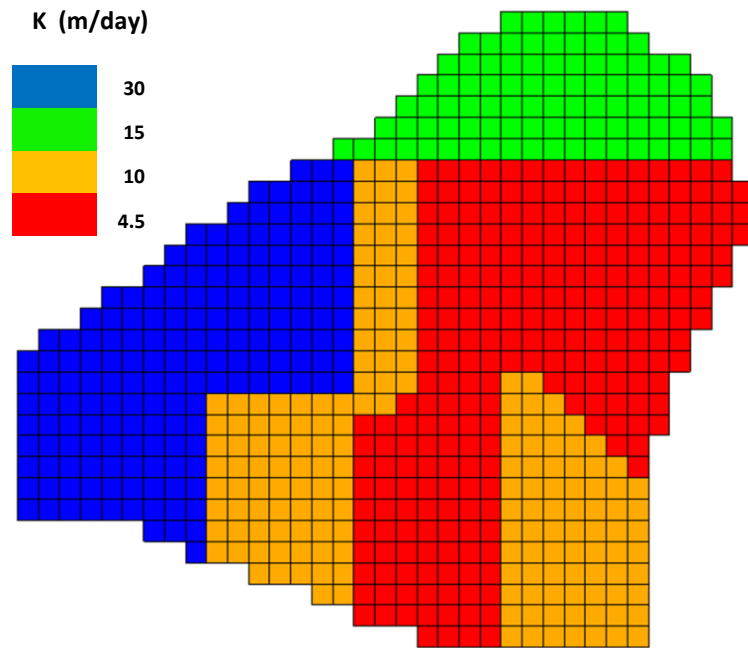
S_y זוהי התפוקה הסגולית (Specific Yield) השווה לאגירות באקוות חופשיות, S_s האגירות הסגולית (Specific Storage) הקשורה לדחיסות האקווה והמים. האנאיזטרופיה בזרימה מבוטאת כיחס קבוע בין המוליכות ההידראולית האופקית לזו האנכית $K_{horizontal}/K_{vertical}$, α זו הדיספרסיות האורכית במודל ההסעה, האנאיזטרופיה בהסעה מבוטאת כיחס בין הדיספרסיה האנכית לאורכית TRVT, הנקבוביות במודל ההסעה (Porosity) דומה לתפוקה הסגולית כמקובל באקווה חופשית.

ערך הדיספרסיביות האורכית קרוב לערך הדיספרסיביות המחושבת בהתאמה לממדי המערכת על פי משוואה מס' 4.1, (Neuman, 1990). נוסחה אמפירית זו התקבלה מניתוח הסעת מומסים בעבודות רבות ע"פ מספר סדרי גודל של מרחק. כאשר מימדי המערכת הם 1000 מטר (סדר גודל של המרחקים בין הבארות במודל זה) הדיספרסיביות היא 420 מטר.

$$\alpha_L = 0.0175 \cdot L_S^{1.46} \quad (4.1)$$

α זו הדיספרסיביות (m). L_S מימדי המערכת בה נערכים החישובים, (m) Length Scale.

המוליכות ההידראולית המכילת בשטח המודל מוצגת בתרשים מס' 4.7 בו באזורים שונים במודל ישנה מוליכות הידראולית שונה על מנת להגיע להתאמה מיטבית בין מפלסים מדודים למחושבים. המודל הורץ מספר פעמים עם מגוון מוליכויות הידראוליות בכל שטחו כך שהתקבלו המוליכויות המתאימות באזור כל באר ולאחר מכן הורץ המודל עם המוליכויות המתאימות בכל אזור מספר פעמים עם שינויים קלים עד להתאמה מיטבית.



תרשים מס' 4.7: מוליכויות הידראוליות (מטר/יום) בשטח המודל (התאים המוצגים בשכבה העליונה, המוליכות היא עבור כל עמודת התאים לעומק שתחת כל תא בשכבה העליונה).

טווח המוליכויות ההידראוליות (4-30 מטר/יום) תואם מחקרים אחרים שנעשו באזור השרון באקוות החוף (שליו וסלוצקי, 2010; השירות ההידרולוגי, 2003).

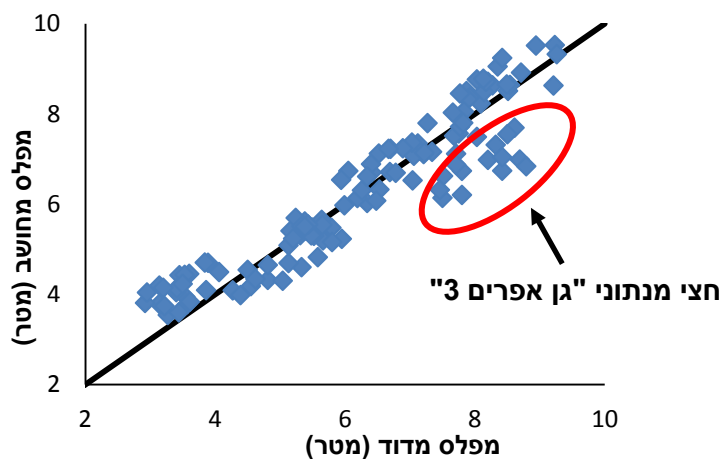
4.9. התאמת המפלסים במודל הזרימה המכיל לתצפיות

התאמת המפלסים המחושבים והנצפים בכיול המודל נבדקה באמצעות חישוב ערכי MAE וכן ערכי Bias (ממוצע השגיאות ללא ערך מוחלט), ערך Bias חיובי פירושו שהמודל מוטה מעלה בבאר (טבלה מס' 4.9).

טבלה מס' 4.9: ממוצעי הפרשים בערך מוחלט (MAE) והטיה (Bias) בין מפלסים מחושבים למדודים בבארות בשטח המודל ששימשו לכיול בשנים 1998-2012.

שם הבאר	מספר הנתונים	MAE (m)	Bias (m)
תל מונד זיו א	8	0.31	0.15
מק תל מונד 8	6	0.4	0.21
יו חרות 41/3	20	0.48	0.29
מק תל מונד 13	9	0.25	-0.008
בני דרוך ד מושב	1	0.31	-0.31
תל יצחק ג קיבוץ	18	0.34	-0.31
יו תל יצחק 41/2	20	0.61	0.49
גן אפרים 3 חקל	27	0.72	-0.56
גן אפרים 2 חקל	8	0.19	0.097
גן שלמה נ ברמן כהן	6	0.45	0.45
כל הבארות	123	0.48	0.003

ה-Bias הממוצע לכלל בארות הכיול כמעט אפסי (המודל אינו מוטה). אך בשני בארות (גן אפרים 3 חקל, יו תל יצחק 41/2) ערך ה-MAE גבוה מ-0.5 מטר. בבאר 'גן אפרים נ ברמן כהן' ערך ה-MAE זהה לערך ה-Bias החיובי כלומר כל הנתונים המחושבים בבאר זו גבוהים מהמדודים. כמו כן בבאר 'גן אפרים 3 חקל' בה ה-MAE גבוה (0.7 מ) כחצי מנתוני המפלס המדודים גבוהים מהמחושבים באופן יחסית גבוה (כ-1 מטר). ניתן לראות זאת בתרשים מס' 4.8 בו מוצגים נתוני המפלס המחושבים כנגד הנצפים. לא נימצאה הסיבה לכך שבבאר בודדת זו יעד הכיול לא הושג במלואו, והוחלט לאשר את מודל הזרימה בכיול זה ולהמשיך למודל ההסעה.



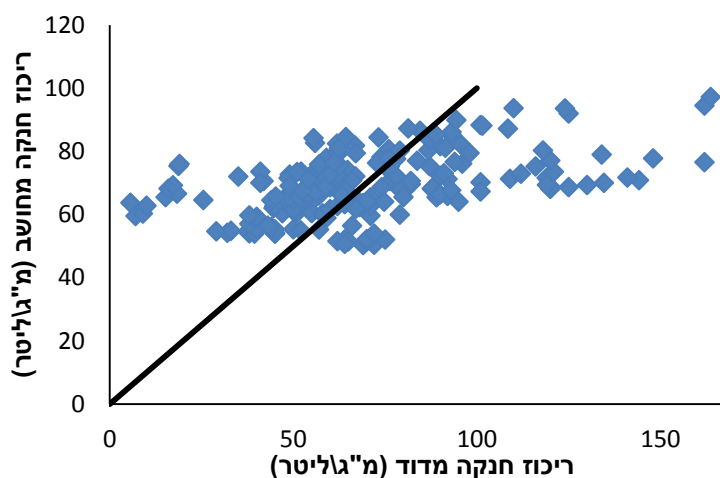
תרשים מס' 4.8: 123 נתוני המפלס המחושב כנגד המפלס המדוד בבארות בשטח המודל ששימשו לכיול מודל הזרימה. בקו שחור רצוף מסומנת הפונקציה $y=X$. בעיגול אדום מסומנים כחצי מנתוני הבאר 'גן אפרים 3 חקל' בהם המפלסים המחושבים נמוכים ורחוקים מהקו $y=X$. (ראו טבלה 4.9).

4.10. כיול מודל ההסעה ושחזור השונות המרחבית

שלב א: כאמור כיול מודל ההסעה כלל שלושה שלבים עיקריים, הראשון הוא התאמה של הפרמטרים באופן מיטבי, הפרמטרים הוצגו בטבלה מס' 4.8. בשלב זה ההבדל בין הריכוז הממוצע של המודל והתצפיות היה אומנם קטן אך בכל באר ובאר ישנן סטיות די גדולות. גם השונות בין הבארות בריכוזי החנקה המחושבים נמוכה יחסית למדודים (טבלה 4.10).

טבלה מס' 4.10: ממוצעי הפרש בערך מוחלט (MAE) והטיה (Bias) בין ריכוזי חנקה מחושבים למדודים וריכוז ממוצע מדוד ומחושב (מ"ג/ליטר) בבארות ששימשו לכיול בשנים 1998-2012.

מס' נתונים	MAE	Bias	ערך מדוד (מ"ג/ל)	ערך ממוצע מחושב (מ"ג/ל)	מיקום
14	47.8	-47.8	20.0	67.7	בני דרור ד מושב
10	12.5	-12.5	51.1	63.6	תל מונד 5 מטעים ה
31	14.6	-1.7	52.9	54.6	מק תל מונד 8
24	14.5	-14.5	54.1	68.6	חרות 6 מושב
9	14	-14.0	59.3	73.3	תל מונד זיו א
13	15.1	-12.8	60.5	73.3	תל יצחק ג קיבוץ
13	12.7	-10	65	75.1	גן אפרים 4 חקל
17	9.3	3.6	66.5	63	מק תל מונד 13
10	11.4	-5.9	70	75.9	גן שלמה מן
15	9.9	-0.3	75	75.3	גן שלמה נ ברמן כהן
13	11.6	10.2	87	76.8	גן אפרים 2 חקל
14	30.1	30.1	100.5	70.3	גן אפרים לפטר
11	26	25.7	115.2	89.5	גן שלמה חקל א
14	58.8	58.8	130.4	71.6	תל מונד חקל 3א
208	20.1	0.3	72.0	71.3	כל הבארות
			28.5	8.1	סטיית תקן



תרשים מס' 4.9: ריכוז חנקה מדוד ומחושב (מ"ג/ליטר) בבארות ששימשו לכיול מודל הסעת החנקה. בקו שחור רצוף מסומנת הפונקציה $y=X$.

בשלב זה ההטיה בריכוזי החנקה הממוצעים בבארות כמעט אפסית אך הסטיות בבארות השונות גדולות ומגיעות עד עשרות מ"גליטר כפי שניתן לראות בתרשים מס' 4.9. גם השונות בריכוזים בין הבארות המבוטאת באמצעות סטיית התקן, הרבה יותר נמוכה בריכוזים המחושבים באמצעות המודל. ניתן לומר כי המודל המבוסס על שטפי חנקה שונים מהתווך הלא רווי (הנובעים מ-4 ממשקים שונים ע"פ השטח בלבד) מצליח לשחזר את ריכוז החנקה הממוצע באקווה אך בניגוד להשערת המחקר לא מצליח לשחזר את השונות בין הבארות. חיזוק לכך שהמודל מצליח לשחזר את הריכוזים הממוצעים באמצעות השטפים השונים מהתווך הלא רווי הוא באמצעות תוצאות הרצת המודל באותם תנאים ללא שטף חנקה נכנס מהתווך הלא רווי, המוצגות בטבלה מס' 4.11.

טבלה מס' 4.11: ממוצעי הפרש בערך מוחלט (MAE) והטיה (Bias) בין ריכוזי חנקה מחושבים למדודים וריכוז ממוצע מדוד ומחושב (מ"גליטר) בהרצת המודל ללא שטף חנקה נכנס, בבארות ששימשו לכיול בשנים 1998-2012.

מס' נתונים	MAE	Bias	ערך מדוד (מ"גל)	ממוצע ממוצע (מ"גל)	ערך ממוצע מחושב (מ"גל)
בני דרור ד מושב	14	20.8	-20.1	20.0	40.1
תל מונד 5 מטעים ה	10	6.8	6.6	51.1	44.5
מק תל מונד 8	31	14.1	10.2	52.9	42.7
חרות 6 מושב	24	12.2	12.2	54.1	41.9
תל מונד זיו א	9	4.1	3.6	59.3	55.7
תל יצחק ג קיבוץ	13	17.5	17.5	60.5	43.0
גן אפרים 4 חקל	13	13.0	12.0	65.0	53.1
מק תל מונד 13	17	24.9	24.3	66.5	42.2
גן שלמה מן	10	19.1	16.0	70.0	54.0
גן שלמה נ ברמן כהן	15	22.4	22.4	75.0	52.6
גן אפרים 2 חקל	13	40.4	40.4	87.0	46.6
גן אפרים לפטר	14	54.4	54.4	100.5	46.0
גן שלמה חקל א	11	38.5	38.5	115.2	76.7
תל מונד חקל 3א	14	86.7	86.7	130.4	43.7
כל הבארות	208	26.1	22.4	72.0	48.8
סטיית תקן				28.5	9.5

בהרצה זו, ללא שטפי חנקה נכנסת מהתווך הלא רווי, ערך החנקה הממוצע בשטח המודל כ-49 מ"גליטר נמוך בהרבה מהריכוז הממוצע הנצפה ובעצם משמר את תנאי ההתחלה והשפה של המודל. נתון זה מחזק כאמור את התוצאה המשחזרת את ריכוז החנקה הממוצע באמצעות שטפים נכנסים מהתווך הלא רווי ומבוססים על המודלים החד מימדיים של התווך הלא רווי, המסתמכים על הדישון המדווח על ידי החקלאים ועל מדידות בדוגמאות הקרקע בתווך הלא רווי העמוק. אך כאמור השונות בין הבארות לא משוחזרת.

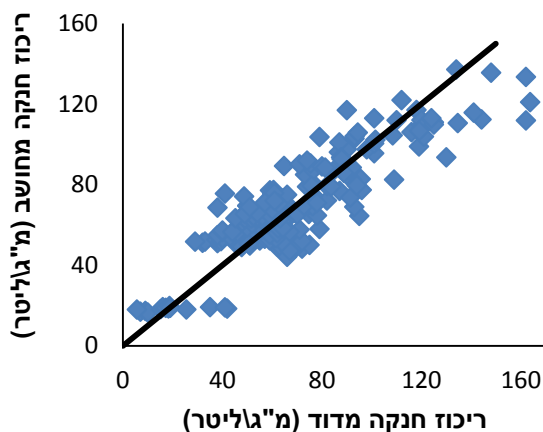
שלבים ב, ג: ההנחה שעמדה בבסיס המודל היא שניתן לצמצם את מספר שימושי הקרקע לארבעה אשר בכל אחד מהם משטר החלחול אחיד וזהה למודל החד מימדי של התווך הלא רווי באותו סוג, לא מספיקה כדי לשחזר את הריכוזים בבארות המזוהמות. בשלב השני שונתה הנחה זו והונח שבכל שימוש קרקע מתחלק השטף המחלחל למספר רמות והשטפים הוכפלו בגורמי הפחתה (עד עשירית) או הגדלה (עד פי 10) תוך שמירה על שטף כולל זהה בשטח המודל. Kourakos et al., 2012 ערכו סימולציות של שטפי חנקה משטחים חקלאיים בקליפורניה והניחו, בדומה לכאן, טווח של שני סדרי גודל בשטפים למי תהום מכל שימוש קרקע. השטפים בתאים הסמוכים לבארות עם ריכוזים גבוהים הוכפלו בגורם הגדלה והתאים הסמוכים לבארות עם ריכוז נמוך להפך. פעולת הכפלה זו נתמכת גם על ידי התוצאה הקיצונית של שטף החנקה בקידוח A במטע האפרסמון, לפי מאזן מסת הכלוריד בהנחת מצב תמידי (טבלה מס' 4.1). בשלב שלישי נוסף תנאי שפה המדמה דהניטריפיקציה בנקודה בעומק האקווה, בסמוך לבאר האנומלית בריכוזי החנקה הנמוכים שלה שהיא גם עמוקה יחסית (בני דרור ד' מושב). תוצאות ההרצה לאחר שלבים אלו מוצגות בטבלה 4.12 ובתרשים מס 4.10.

טבלה מס' 4.12: ממוצעי הפרש בערך מוחלט (MAE) והטיה (Bias) בין ריכוזי חנקה מחושבים למדודים וריכוז ממוצע מדוד ומחושב (מ"ג/ליטר) בהרצת המודל עם שטפים מוכפלים בגורמים. בבארות ששימשו לכיול בשנים 1998-2012.

מס' נתונים	MAE	Bias	ערך מדוד (מ"ג/ל)	ממוצע ערך ממוצע מחושב (מ"ג/ל)	ערך ממוצע מחושב (מ"ג/ל)
בני דרור ד מושב	8.2	1.6	20.0	18.3	14
תל מונד 5 מטעים ה	4.0	-2.9	51.1	54.0	10
מק תל מונד 8	14.2	0.6	52.9	52.3	31
חרות 6 מושב	10.3	-10.3	54.1	64.4	24
תל מונד זיו א	4.7	-4.0	59.3	63.4	9
תל יצחק ג קיבוץ	8.0	7.3	60.5	53.2	13
גן אפרים 4 חקל	10.6	-3.1	65.0	68.1	13
מק תל מונד 13	10.8	-0.6	66.5	67.2	17
גן שלמה מן	13.2	-8.8	70.0	78.8	10
גן שלמה נ ברמן כהן	10.4	-2.3	75.0	77.3	15
גן אפרים 2 חקל	11.5	-4.1	87.0	91.1	13
גן אפרים לפטר	11.6	3.5	100.5	97.0	14
גן שלמה חקל א	14.8	7.8	115.2	107.4	11
תל מונד חקל 3א	18.9	11.5	130.4	118.9	14
כל הבארות	11.2	-0.6	72.0	72.2	208
סטיית תקן			28.5	25.8	

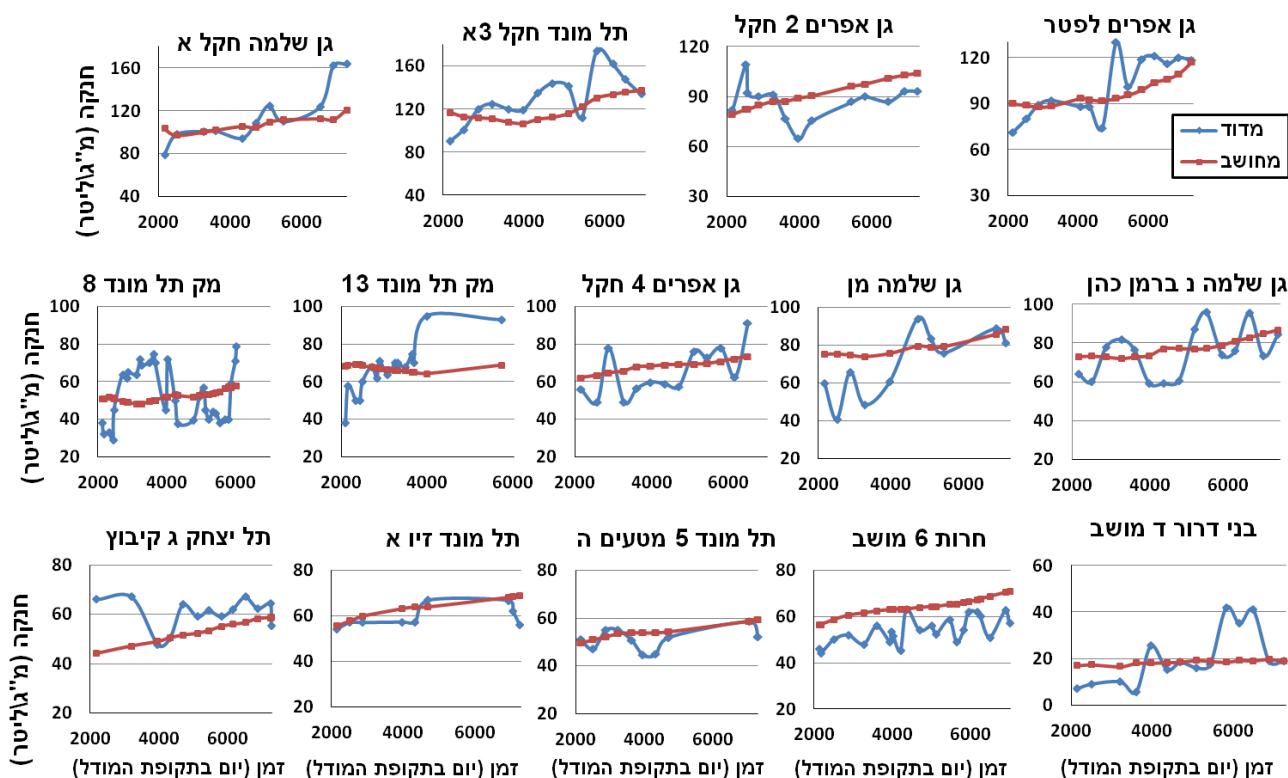
לאחר שלבים אלו הערך הממוצע של ריכוז החנקה בשטח המודל נשאר זהה לשלב ההתחלתי אך גם הסטיות (MAE) של הערכים בבארות ירדו באופן ניכר (מ- 20 עד 11

מ"גליטר טבלאות 4.10, 4.12) כפי שניתן לראות גם בתרשים מס' 4.10 וגם השונות בין הבארות המבוטאת באמצעות סטיית התקן של ממוצע ריכוז החנקה בבארות מגיעה לערכים מאוד קרובים (28.5 מ"גליטר על פי הערכים המדודים וכ-26 מ"גליטר במחושבים).



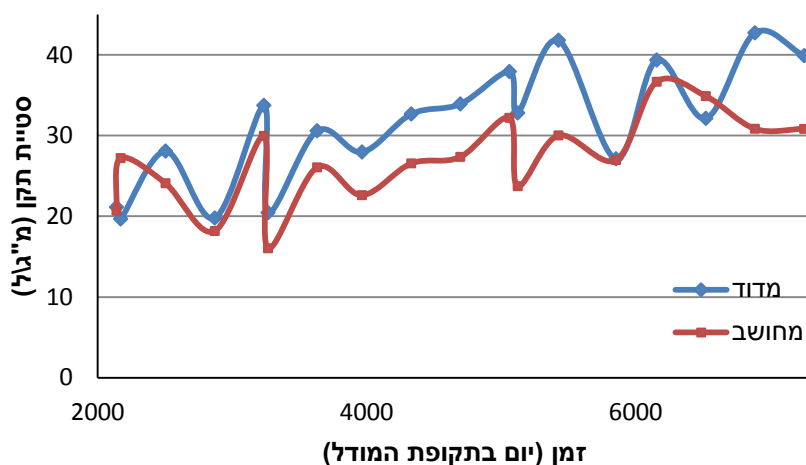
תרשים מס' 4.10: ריכוז חנקה מדוד ומחושב (מ"גליטר) בבארות ששימשו לכיול מודל הסעת החנקה לאחר שלושת שלבי הכיול. בקו שחור רצוף מסומנת הפונקציה $y=X$.

חשוב לציין שכמובן מודל ההסעה לא מצליח לשחזר באופן מדויק את הריכוזים המדודים והסטייה עדיין קיימת אך זו התוצאה המיטבית שניתן להגיע אליה במשאבים שעמדו לעבודה זו. כמו כן ישנה הצלחה בשחזור השונות בריכוזי החנקה בין הבארות באמצעות שטפים אקראיים שונים המגיעים מהתווך הלא רווילמפני השטח בתנאי האקווה הנתונים. את תוצאות שלבי הכיול הסופי ניתן לראות גם בהתאמת הריכוז המחושב למדוד בבארות השונות לאורך שנות המודל בתרשים 4.11, בתרשים ניתן גם לראות את מגמת העלייה בריכוזי החנקה במרבית הבארות לאורך השנים.



תרשים מס' 4.11: ריכוזי חנקת (מ"ג/ליטר) מדודים (קו כחול) ומחושבים (קו אדום) בבארות ששימשו לכיול מודל ההסעה. לאורך השנים 1998-2012, מבוטא כימים מתחילת הרצת המודל.

בטבלה 4.12 השונויות בין הבארות הוצגה באמצעות סטיית התקן של נתוני הריכוז הממוצע בכל הבארות לכל אורך שנות המודל המשמשות לכיול (1998-2012) אך לא הוצגה השונויות בין הבארות בכל צעד זמן. בתרשים 4.12 מוצגת סטיית התקן של נתוני ריכוז החנקת בזמנים השונים. מוצגות סטיות תקן בזמנים בהם נתוני הריכוז המדודים כוללים נתונים של 5 בארות לפחות, זמנים בהם יש נתונים לפחות 5 בארות לא כלולים בחישוב זה.



תרשים מס' 4.12: סטיות תקן בין נתוני ריכוז חנקת (מ"ג/ליטר) מדודים (כחול) ומחושבים (אדום) לאורך שנות המודל המשמשות לכיול 1998-2012. ציר הזמן מוצג כימים מזמן התחלת המודל.

בתרשים 4.12 ניתן לראות שהשונות בין הבארות (המיוצגת באמצעות סטיית תקן) לאורך השנים יוצאת עם ערכים קרובים בין החישוב על פי נתונים מדודים לבין החישוב על פי ערכים מחושבים במודל ההסעה. כמו כן מגמות השינוי בסטיית התקן נשמרות (מלבד בשני הזמנים האחרונים – בשנה האחרונה במודל). מגמות אלו נשמרות רק על בסיס שטפים המתקבלים מהמודלים של חלחול החנקה מהתווך הלא רווי. אמנם לא על סמך ההנחה הראשונית המחלקת את השטפים ל-4 שימושי קרקע בלבד אלא בתוספת הכפלת השטפים בתאי המודל בגורמי הפחתה/הגדלה תוך שמירה על שטף חנקה כללי זהה.

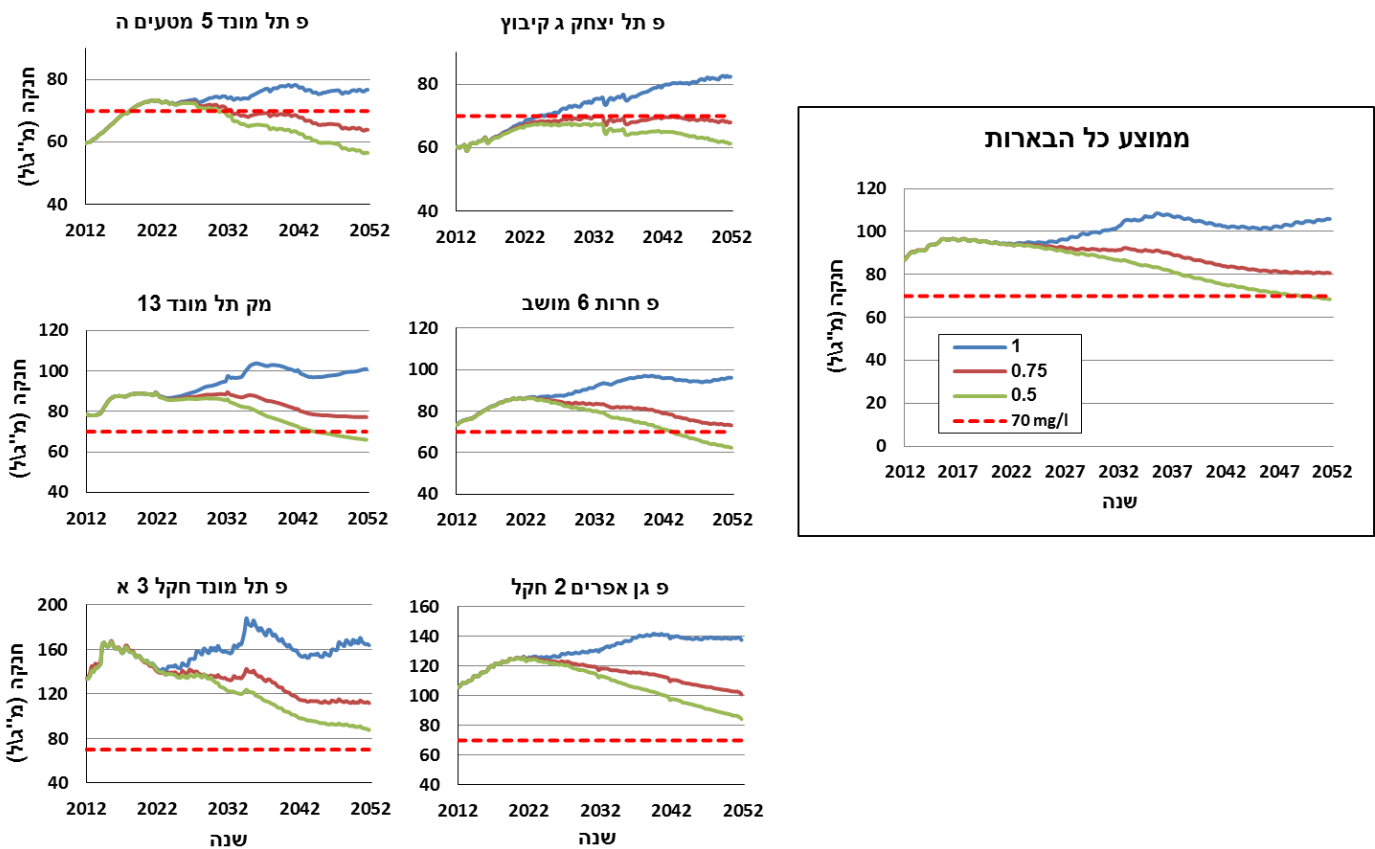
4.11. תרחישי דישון שונים והרצת המודל ל-40 שנה עתידיות

מודל הזרימה וההסעה הורצו למשך 40 שנה עתידיות (2012-2052) תוך הנחה שהמשקעים וההשקיה זהים וכן שימושי הקרקע נשארים ללא שינוי. הדישון בשלושה תרחישים שונים, א: דישון כרגיל. ב: דישון ב-75% מהנוכחי - השטף בפני מי התהום 50% מהמקורי. ג: דישון ב-50% מהנוכחי = השטף בפני מי התהום 28% מהמקורי. שינוי הדישון בפני הקרקע הוא מרגע התחלת ההרצה (2012) אך בכל תא זמן שינוי השטף בפני מי התהום משתנה לפי שימוש הקרקע (שטף המים משפיע על מהירות ההתקדמות בתווך הלא רווי) ועומק התווך הלא רווי. ריכוזי החנקה בתרחישים השונים מוצגים בטבלה מס' 4.13.

טבלה מס' 4.13: ריכוז חנקה (מ"ג/ליטר) בבארות בשטח המודל (ללא הבארות הקרובות לשפות) לאחר 40 שנה בתרחישי הדישון השונים. 100% - רמת דישון ע"פ דיווח של חקלאים ב-2012. בצבע אדום מסומנים הריכוזים הנמוכים מ-70 מ"ג/ליטר – התקן הישראלי למי שתיה.

באר	ריכוז ב- 2052 (לפי רמת דישון מ-2012 ואילך מ"ג/ליטר):		
	50%	75%	100%
בני דרור ד מושב	19	21	27
תל מונד 5 מטעים	57	64	77
תל יצחק ג קיבוץ	61	68	82
תל מונד זיו א	60	67	79
מק תל מונד 8	59	68	83
חרות 6 מושב	62	73	96
מק תלמונד 13	66	77	101
גן אפרים 4 חקל	71	80	99
גן שלמה נ ברמן כהן	73	84	107
גן שלמה מן	75	86	109
גן אפרים 2 חקל	84	101	138
גן אפרים לפטר	78	98	139
גן שלמה חקל א	89	103	130
גן אפרים 3 חקל	86	108	157
תל מונד חקל 3א	88	112	164
ממוצע	69	81	106
סטיית תקן	11.5	16.5	29.1

רואים שבהמשך דישון כרגיל הריכוזים במי התהום ממשיכים לעלות ותוך ארבעה עשורים רק באר אחת תישאר בגבולות התקן ותוכל לשמש כמקור למי שתייה. הפחתה של הדישון ב-75% המשפרת את יעילות הדישון ואת אחוזי קליטת החנקן לצמח ומפחיתה את החלחול תשמור על המצב הקיים באקווה בו מרבית הבארות באזור זה חורגות מהתקן ומיעוטן עומדות בתקן. הפחתה מסיבית של חצי כמויות הדישון תגרום לתהליך של "ניקוי" האקווה מחנקה ולסילוק הדרגתי של הזיהום, יותר בארות יהיו בגבולות התקן וקרובות אליו והריכוז הממוצע באקווה החזוי לאזור יעמוד על 69 מ"ג/ליטר – בגבולות התקן למי שתייה, השיפור הוא בכלל הבארות כך שגם סטיית התקן של ריכוזי החנקה בבארות הולכת וקטנה. תוצאות אלו הן בסוף 40 השנים של הרצת המודל אך בכל התרחישים מדובר בתהליך הדרגתי המתרחש לאורך השנים כפי שניתן לראות בתרשים מס' 4.13.



תרשים מס' 4.13: ריכוזי חנקה (מ"ג/ליטר) במספר בארות מייצגות לדוגמא ובממוצע כל הבארות ששימשו לכיול בשטח המודל לאורך 40 שנות ההרצה העתידית בשלושת תרחישי הדישון (קו כחול דישון כרגיל, קו חום דישון ב-75% מהנוכחי, קו ירוק דישון ב-50% מהנוכחי). בקו אדום מקווקוו מסומן התקן הישראלי לחנקה במי שתייה (70 מ"ג/ליטר).

ניתן לראות היטב שמספר שנים לאחר השינוי בדישון בפני השטח מתחילים תהליכים שונים בריכוזי החנקה בבארות בתרחישי הדישון השונים. הפחתת הדישון תוביל להטבה בריכוזי החנקה במי התהום. המשך פעילות חקלאית עם דישון בעודף בדומה למתרחש בהווה תוביל להמשך זיהום משמעותי במי התהום

5. דיון

5.1. שטפי חנקן חנקתי קיצוניים מפני הקרקע

בעבודה זו הונחו שלוש הנחות מפשטות על מנת לאפשר את המעבר ממחקר בסקאלת השדה לניתוח בסקאלה האזורית. שלוש ההנחות הן:

- (1) בניתוח בסקלה האזורית (קילומטרים רבועים) אובדן האינפורמציה בשל ייצוג הומוגני של שטפי החנקה אל פני מי התהום בכל שדה יהיה זניח. באופן זה מקידוחים ספורים בשדה ניתנה הערכה מייצגת אחת לשטפי המילוי החוזר והחנקן החנקתי עבור כל השדה.
- (2) עבור הניתוח בסקאלה האזורית הונח משטר שטפים אחיד משדות שונים בשימושי קרקע זהים. באופן זה חישובי שטפים משדה אחד בכל שימוש קרקע שימשו כבסיס נתונים לשטפים בכל השדות מאותו גידול באותו אזור.
- (3) חלוקה של שטפי המילוי החוזר והחנקן החנקתי מפני הקרקע לרמת פירוט מוגבלת לפי סיווג ל 4 שימושי קרקע – פרדסים, נשירים, ירקות וללא גידול. באופן זה אפרסמון מייצג את כל מטעי הנשירים, ותפוחי אדמה את כל גידולי הירקות.

הטרוגניות בשטפים בתוך החלקה היא דבר ידוע (Russo et al., 2013; Kurtzman et al., 2013) וגם בעבודה זו התקבלו נתוני שדה המדגימים זאת, באחד הקידוחים במטע האפרסמון (קידוח A) ריכוזי החנקן החנקתי בתווך הלא רווי העמוק נמצאו גבוהים במיוחד (טבלה 4.1). שטפי החנקן החנקתי לעומק שחושבו בהנחת מצב תמידי לקידוח זה גבוהים במיוחד מאד, כ-50 ק"ג/דונם\שנה. כמות הדשן החנקני המיושמת במטע היא 20 ק"ג/דונם\שנה, כמות החנקן החנקתי במי ההשקיה היא 9 ק"ג/דונם\שנה והמטע אינו מזובל. כלומר חלחול החנקן החנקתי בנקודה זו כמעט כפול מכמות החנקן הממוצעת ליחידת שטח הנכנסת לשדה בפני השטח עוד לפני קליטת השורשים. עובדה זו מלמדת על תהליכים שונים המתרחשים בתוך השדה במקומות שונים והטרוגניות בחלקה. תהליכים אלו יכולים להיות שונות בתכונות ההידראוליות של הקרקע שמובילה את המים לנתיבי זרימה מועדפת ומרכזים את המים והחנקן החנקתי למקומות מסוימים. אמנם ישנם תצפיות בהם רואים בעומקים של ארבעה מטרים ויותר אחידות בריכוזים (פיין וחוב', 2009) אך נעשות גם עבודות העושות שימוש במודלים סטוכסטיים תלת מימדיים בתווך הלא רווי שמטרתן לכלול את ההטרוגניות המרחבית בשדה והן מובילות לתיאור הסתברותי אך מציאותי יותר של השטפים מהשדות (Russo et al., 1998; 2001).

מלבד שונות בתכונות ההידראוליות בקרקע בחלקה ישנה גם שונות שמקורה בהתרחשויות על פני החלקה כגון תקלות ופיצוצים במערכות ההשקיה ובמכלי דשן או לחילופין אופי

הזרימה על פני השדה שיוצר התרכזויות של מי השקיה בשלוליות בנקודות ספציפיות בשדה שגורמים לשטפים שונים במיקומים נקודתיים בשדה, כפי שמתועד ע"י Gurdak et al., 2008. סיבות נוספות לשונות מרחבית גדולה בשטפי החנקה יכולות להיות בעיות טכנית בבארות עצמן המובילות לחלחול של מים עם ריכוז גבוה של חנקה ממש בחלל הקדח של הבאר. בארות רבות מצויות ממש בתוך השדות ומשמשות באופן ישיר להשקיה ללא מיכלים אופרטיביים, ובחלק מהמקרים ראשי ההשקיה והדישון נמצאים בקרבת מקום (לרוב זו נקודת החשמל היחידה בשדה ולכן גם "המרכז הלוגיסטי" שלו). במקרים כאלה יכול להיווצר "סחרור" של המים מהבאר אל השדה וכך ריכוז החנקה במי הבאר הולך ועולה.

בין אם השונות הטבעית של התווך הנקבובי מובילה באזורים מסוימים לשטפי חנקה קיצוניים ובין אם אלה תקלות במערכות הדישון או הבארות, מבחינת דיגום השדה והתצפיות שנאספו ממאגרי הנתונים בעבודה זו, שטפי חנקה קיצוניים אלה הם אקראיים. לכן לא היה מנוס לכלול שטפים אקראיים של חנקה על מנת לשחזר את הריכוזים בבארות המזהמות ביותר ואת השונות המרחבית בריכוזי החנקה. עבודה זו ממחישה מדוע נעשה מאמץ גדול במדע ההידרולוגיה ב-40 השנים האחרונות להכניס את האקראיות המכומתת במודלים הידרולוגיים סטוכסטיים, על מנת לאפשר תחזיות מציאותיות יותר אך הסתברותיות ולא דטרמיניסטיות (פרס ישראל למדעי כדור הארץ לשנת תשע"ד ניתן לפרופ' גדעון דגן על תרומתו בתחום זה).

5.2 הצלחה-הצלחה בשחזור השונות המרחבית בריכוזי החנקה בבארות.

המודלים של זרימה והסעה במי התהום, המוזנים משטפי מילוי חוזר וחנקה מהתווך הלא רווי תחת 4 שימושי קרקע חקלאיים, הצליחו לשחזר את ריכוזי החנקה הממוצעים באקווה. אמנם בשלב ראשוני, חוסר הצלחה נרשם בשחזור בבארות עם ריכוזים קיצוניים וכתוצאה מכך גם בשחזור השונות המרחבית של הריכוזים בבארות. מסיבה זו שחזור השונות נעשה על ידי הכפלת שטפי החנקה בגורמי הפחתה/הגדלה אקראיים בסיבתם אך דטרמיניסטיים במיקומם סמוך לבארות הרלוונטיות. חוסר הצלחה בשחזור השונות בשלב הראשון נובע גם מהגסות של הנחות השנייה והשלישית שפורטו בסעיף 5.1. פירוט גידולים רב יותר מ-4 (לדוגמה סקר משרד החקלאות 2009 מחלק את השטח ל-60 גידולים מפורטים) ישנה את השטפים השונים בתאי המודל בהתאם לסוג הגידול המדויק על פני הקרקע, אמנם גם בכך אי אפשר להימנע מההנחה לא מחויבת המציאות, שהגידולים הם אותם הגידולים לאורך עשרות שנים. חלוקה כזו דורשת עבודת דיגום, וחישוב רב מכל סוגי הגידולים, על מנת ליצור מסד נתוני שטפים עבור כל גידול. גם סקרי גידול תכופים בשדות גידול הירקות, אינם בנמצא. נקודה נוספת היא שישנם הבדלים בין שטפים משדות שונים עם אותו גידול. חקלאים שונים משקים ומדשנים בשיטות שונות וביעילות שונה. יתכן במקומות מסוימים חקלאי שמדשן בעודפים גדולים ולהיפך.

למעשה, הכפלות השטפים בגורמי הפחתה\הגדלה אקראיים שנעשו בשלב הכיול השני של מודל ההסעה, נועדו לייצר את מקורות השונות והסטיות שנובעות מההנחות הנ"ל באופן מלאכותי. השטפים האקראיים הקיצוניים פוזרו באופן מכוון בסמוך לבארות הרלוונטיות וללא סימוכין מהשדות הספציפיים עצמם – מלבד הריכוזים הנצפים בבארות. עובדה זו אומנם פוגעת באלגנטיות של המודל והוא אינו מהלך ישיר וחד כיווני מפני השטח אל הבארות כפי שתכננתי לכתחילה, אך היא מייצרת תובנה חשובה מאד והיא: שאי אפשר להסביר את ריכוזי החנקה הגבוהים בבארות המזוהמות ביותר על ידי שטפים ממוצעים וכללי אצבע כדוגמת 30-60% מהחנקן המיושם מחלחל למי התהום. לעומת זאת את הריכוז הממוצע בבארות באזור, או את סך כל החנקה במי התהום שבאזור המודל כן ניתן להסביר בעזרת 4 שימושי הקרקע ושטפים ממוצעים או אופייניים לכל שימוש קרקע.

5.3 קישור פלט המודלים מהתווך הלא רווי אל המודלים של מי התהום

במהלך העבודה בעת שהיה צריך להשתמש בתוצאות החישובים מהתווך הלא רווי כנתוני מקור לחישובים במי התהום, הונחו שתי הנחות שיאפשרו לפשט את החיבור ולבצעו בצורה יעילה.

1) מפלס מי התהום קבוע בזמן (לפי מפת מפלסים ממוצעים). במשך שנות הרצת המודל 1992-2012 אכן המפלס בשטח המודל יחסית יציב (תרשים 4.5). באופן זה אין צורך לשנות את החישובים בתחתית התווך הלא רווי בהתאם לשינויי מפלס המים ומפלס המים לא משמש כתנאי שפה תחתון במודל הלא רווי. הנחה זו סבירה לאור העובדה שהתווך הלא רווי באזור המחקר יחסית עבה, כ-25-20 מטר ברוב השטח ומגיע גם עד 50 מטר, כאשר השינויים במפלס מי התהום קטנים בסדר גודל, בסביבות ה-0.5 מטר. קישור מלא קשה לביצוע במיוחד לאור העובדה שלכל תא שטח במודל מי התהום ישנו מודל חלחול חד מימדי ספציפי בתווך הלא רווי בהתאם לעובי התווך ולסוג הגידול.

2) בעת הרצת המודל בתרחישי דישון שונים לעתיד (2012-2052), שינוי הדישון נעשה באופן היפותטי בעת התחלת ההרצה העתידית (2012) אך שינוי השטף הנכנס למי התהום מתרחש רק לאחר זמן, מספר שנים, בהתאם לעובי התווך הלא רווי ומהירות הזרימה בו. על מנת לא להריץ בתרחישים השונים את המודלים של התווך הלא רווי מעל כל תאי מודל מי התהום, דבר שלוקח זמן רב, הוכפלו השטפים במודלים המקוריים של התווך הלא רווי בכל תא בגורמים המתאימים החל מזמן הגעה ספציפי שחושב. זמן ההגעה חושב לכל תא שטח לפי מהירות התקדמות ממוצעת בתווך הלא רווי ועוביו. חישוב כזה מניח התקדמות בתנועת בוכנה של החנקן החנקתי מפני השטח ומזניח את הדיספרסיה במעבר בפני מי התהום מהשטף שמקורו בדישון

המקורי לבין השטף שמקורו בדישון החדש לפי התרחיש (75% או 50%). הנחה כזו סבירה בתקופת זמן ארוכה של 40 שנות הרצה עתידית של המודלים במי התהום.

5.4 ייחודיות העבודה ומסקנותיה הבולטות

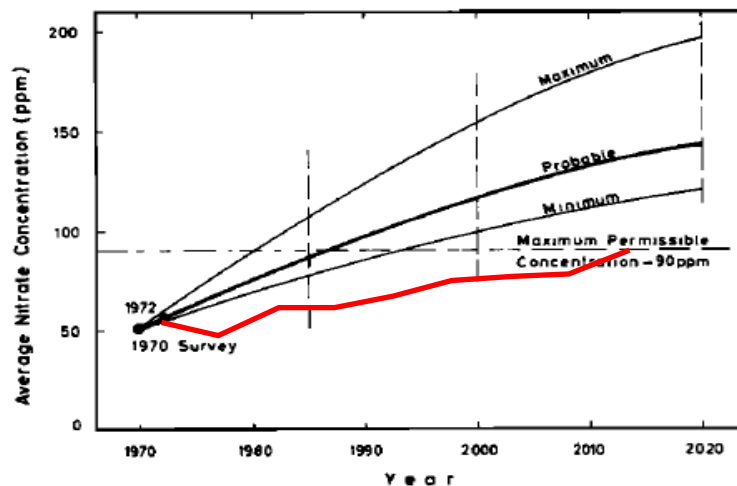
עבודה זו אינה הראשונה בארץ שעוסקת בשטפי חנקה משדות חקלאיים אל העומק וגם אינה הראשונה שעוסקת בזיהומי חנקה במי התהום. אך עבודה זו ייחודית בכך שהיא מקשרת באופן כמותי וישיר בין החנקן המיושם בשדות החקלאיים, אל שטפי החנקן החנקתי בתווך הלא רווי העמוק ועד לחנקה במי התהום וזו הנשאת מהבארות. ייחודיותה של העבודה בפרוט שטפי המים והחנקה בפני מי התהום, המשתנים בזמן ע"פ סוג הגידול ועומק התווך הלא רווי. כימות שטפים אלה נעשה ע"י מודלים של זרימה והסעה מכילים לתצפיות בעומק התווך הלא רווי. לא ידוע לי על עבודות שהשתמשו במתודולוגיה הזו לכיול מודל זרימה והסעת חנקה במי התהום. ייחודיותה זו איפשרה הסקה של שתי מסקנות בולטות והן: (1) ניתן להעריך בעזרת שטפי חנקה אופייניים מהתווך הלא רווי של מספר קטן של שימושי קרקע דומיננטיים את סך החנקה באקווה או את הריכוז הממוצע בבארות. (2) לא ניתן לחזות את הריכוזים בבארות המזוהמות ביותר על סמך שטפים אופייניים, ואלה נוצרים עקב שטפים גבוהים במיוחד באזור הבאר. ייתכן ושטפים גבוהים אלה באזור הבאר נובעים מכשלים טכניים במערכות ההשקיה הדישון ולאו הבאר, או ממשק בזבזני במיוחד וניתן לטפל בהם נקודתית, אך ייתכן כי הם נובעים משונות מרחבית טבעית של התווך הנקבובי שלא ניתן לאתרה ולשנותה בקלות.

הכלי החישובי ליצירת תחזיות של ריכוז חנקה בבארות מתחת לאזור חקלאי כתלות ברמת יישום החנקן בשדות, שיצרתי בעבודה זו, הוא כיום הכלי המושכל ביותר שהשתמשו בו למטרה זו בישראל ולא הרבה עבודות בעולם השתמשו בכלים מושכלים יותר, רמת האוטומציה של מערכת המודלים שיצרתי, נמוכה, ומבחינה זו הכלי לא בשל לשימוש נרחב ודורש מיומנות בהפעלת התוכנות השונות, ועבודה רבה על הכנת קבצי הקלט, אך אין ספק שהעבודה מוכיחה את האפשרות ליצור כלי תומך החלטה המבוסס על המתודולוגיה שהוצגה. עבודות נוספות דומות (אולי כאלה עם רמת פירוט גבוהה יותר במרחב ובזמן) באזורים נרחבים יותר של אקוות החוף יוכלו להוות כלי בידי קובעי מדיניות ומתכננים של משק המים להובלת מהלך של הפחתה בתשומות הדשן החנקני במקומות רגישים המבוססות על תחזיות מושכלות (בדומה ל-Nitrate Directive של האיחוד האירופי) ושיפור מצב האקווה מבחינת הזיהום החנקתי.

כפי שהודגם בעבודה זו, לאחר זיהום מי תהום שהתרחש כתוצאה מעשרות שנים של פעילות חקלאית אינטנסיבית, יש צורך להמתין עשרות שנים עם פעילות חקלאית חסכנית יותר בחנקן עד לשינוי המגמה ושיקום.

5.5. תחזיות ריכוז חנקת באקוונת החוף – הסתייגות לאור מבט על תחזית קודמת.

כפי שהוזכר בפרק הרקע המדעי (1.7) Mercado, 1976 (מחברת תה"ל) באמצעות שימוש במודל נומרי פרסם תחזית לריכוזי החנקת באקוונת החוף באזור רחובות-נס ציונה-ראשון לציון בשטח כולל של 87 קמ"ר, לשנים 1970-2020. המודל כולל שטפי חנקת מפני הקרקע מגורמים שונים: דישון שדות, בורות ספיגה ומערכות ביוב, משקי בעלי חיים ואתרי סילוק פסולת. בהתבוננות וניתוח נתוני ריכוז החנקת בבארות בשטח המודל של מרכזו בשנים 1970-2014 (84 בארות הכוללות נתונים לכל אורך השנים, נתונים התקבלו מהשירות ההידרולוגי ברשות המים) רואים עליית ריכוזים ממוצעת של כ 1 מ"גל בשנה, בדומה לעלייה הנצפית בשטח המודל של עבודה זו בשרון. עלייה זו מתונה בהרבה מזו שנחזתה (תרשים מס' 5.1) על פי התחזיות הריכוז הממוצע באקוונת אמור להגיע כיום (2014) עד לרמה של 100-150 מ"גל בעוד הריכוז הממוצע האקטואלי הוא 90 מ"גל.



תרשים מס' 5.1: תחזית ריכוז החנקת הממוצע באזור רחובות-נס ציונה-ראשון לציון מתוך Mercado 1976. בקו אדום מסומן ריכוז החנקת הנצפה לאורך השנים.

את חוסר הצלחת החיזוי של המודל של מרכזו ניתן לייחס למספר גורמים מרכזיים שהחוט החורז אותם הוא השינויים במקורות כניסת החנקת לאורך השנים. באזור רחובות-נס ציונה-ראשון לציון חלה התפתחות גדולה של השטח העירוני וצמצום השטחים החקלאיים, מערכות הולכת הביוב השתפרו מאוד, השימוש בבורות הספיגה הופסק ואתרי סילוק פסולת נסגרו. גם בעבודה זו התחזיות נעשו באמצעות הנחה של המשך שימוש קרקע זהה לאורך השנים. אמנם שטח המודל בעבודה זו כולל שטח חקלאי בלבד אך צמצום השטח החקלאי לאורך השנים כמובן יפחית את תשומות החנקת לאקוונת. על מנת לחזות בדיוק רב יותר, יש להוסיף למודל איזושהי תחזית על צמצום השטחים החקלאיים לאורך השנים. שאר הגורמים אינם רלוונטיים מכיוון שמערכות הביוב והסילוק כבר שופרו ומקורות החנקת בשטח המודל הם חקלאיים בלבד.

6. סיכום

עבודה זו עוסקת בשטפי חנקן חנקתי משדות חקלאיים אל עומק הקרקע באזור השרון ובקשר לזיהום החנקה במי התהום. בחלקה הראשון היא משלימה את עבודת המוסמך של רועי שפירא 2012. בעבודתו של שפירא נבדקו שטפי חנקן חנקתי מפרדסי הדרים בשרון אל עבר התווך הלא רווי העמוק ובעבודה זו נבדקו שטפי חנקן חנקתי לעומק משדות תפוחי אדמה, תות שדה ומטע אפרסמון. בשלב שני נבדקו השפעת שטפי החנקן החנקתי מהשדות השונים אל עבר מי התהום על התפתחות ריכוזי החנקה במי התהום במשך 20 השנים 1992-2012 והוערכו ריכוזים חזויים ל-40 השנים 2012-2052 בשלושה תרחישי דיסון שונים: 100%, 75% ו-50%. בנוסף נבדק הקשר בין השונות בשימוש הקרקע (סוג הגידול) לבין השונות המרחבית בריכוזי החנקה בבארות. שטפי החנקן החנקתי מפני השטח חולקו לארבעה סוגים: (1) פרדסי הדרים, מעבודתו של שפירא 2012. (2) מטעי נשירים, המיוצגים על ידי האפרסמון. (3) ירקות, המיוצגים על ידי תפוחי האדמה. (4) ללא גידול. פרדסים המושקים בקיץ והעצים מבצעים טרנספירציה גם בחורף מאופיינים בשטפי מים וחנקן חנקתי נמוכים יחסית. מטעי נשירים מאופיינים בשטפי חנקן חנקתי נמוכים ושטפי מילוי חוזר גבוהים מפני שבחורף אין קליטת מים לשורשים ומי הגשמים מחלחלים. גידולי ירקות נעשים בחורף ובקיץ (בעבודה זו יוצגו ע"י גידולי חורף) ומדושים בכמויות חנקן גדולות ובזיבול ומתאפיינים בשטפי מים גבוהים יחסית ושטפי חנקן חנקתי גבוהים.

לאחר איסוף נתוני השקיה ודיסון מהחקלאים ואיכות מים מרשות המים נדגם התווך הלא רווי עד לעומק 10 מטרים בשלושה שדות בשרון: תפוחי אדמה, תות שדה ומטע אפרסמון. בדגימות הקרקע נבדקו: תכולת הרטיבות, ריכוזי כלוריד, ריכוזי חנקן חנקתי ואמוניאקלי, מרקם הקרקע ומוליכות הידראולית ברוויה.

חושבו שטפי מילוי חוזר וחנקן חנקתי מהשדות בהנחת מצב תמידי באמצעות מאזן מסת כלוריד. חושבו שטפים משתנים בזמן באמצעות מודל נומרי חד מימדי HYDRUS-1D מכול, ברזולוציה יומית. המודל קולט שטפי מים וחנקן מפני השטח לפי המשקעים ההשקיה והדיסון הספציפיים לשדה וכולל גם את קליטת המים והחנקן לשורשים ואת ריאקציות החנקן השונות בקרקע במשך 10 שנים: 2002-2012. הפרמטרים ההידראוליים של הקרקע הוערכו לפי פונקציות פדוטראנספר והותאמו במהלך הכיול בהרצות חוזרות של המודל עד להתאמת פרופילי הקרקע המדודים והמחושבים. כך גם מקדמי ריאקציות החנקן. שטפי המילוי החוזר הממוצעים שנמצאו הם כ-400 מ"מ/שנה באפרסמון, כ-380 מ"מ/שנה בתות שדה וכ-350 מ"מ/שנה בתפוחי אדמה. שטפי החנקן החנקתי הם 20-30 ק"ג/דונם/שנה בתות שדה ותפוחי אדמה וכ-13 ק"ג/דונם/שנה באפרסמון. בפרדסים השטפים הממוצעים הם כ-200 מ"מ/שנה וכ-13 ק"ג/דונם/שנה מילוי חוזר וחנקן-חנקתי בהתאמה.

על סמך שטפי המילוי החוזר והחנקן החנקתי המשתנים בזמן שחושבו לגידולים השונים במודל הזרימה וההסעה החד מימדי בתוך הלא רווי הוצב מודל זרימה (MODFLOW) והסעה (MT3DMS) תלת מימדי במי התהום תחת שטח חקלאי מוגדר בן 13.5 קמ"ר באזור השרון. משך המודל הוא 20 שנה 1992-2012, תאי המודל בשטח 150*150 מטר והשכבות האנכיות על פי עומקי הפרפורציות בבארות שבשטח המודל. לכל תא שטח במודל הותאמה סדרת נתוני מילוי חוזר ושטף חנקה לפי א. שימוש הקרקע שמעליו: פרדסים, נשירים, ירקות (לפי תפוחי אדמה) ושטח ללא גידול, ב. לפי עומק התווך הלא רווי שמעליו. פרמטרים הידראוליים ודיספרסיה כוילו על בסיס נתונים מדודים בבארות בשטח המודל. כיול מודל ההסעה כלל גם הכפלת שטפי החנקה מהתווך הלא רווי בגורמים מפחיתים ומגדילים באופן שכמות החנקה הכללית נשארת זהה. תאים בהם השטף גדל פוזרו באופן מכוון סמוך לבארות עם ריכוזי חנקה גבוהים ולהיפך. כך הותאמו הריכוזים המדודים והמחושבים וכן שוחזרה השונות המרחבית בריכוז החנקה במי התהום.

המודל המכיל של מי התהום הורץ למשך 40 שנים עתידיות (2012-2052) בשלושה תרחישי דיזון שונים: 100%, כמו בהווה. 75% מהתשומות הנוכחיות ו-50%. לפי עבודתו של שפירא 2012 הפחתה ל-75% דיזון טוביל להפחתה של 50% בשטפי החנקה למי התהום והפחתה ל-50% דיזון טוביל להפחתה של 72% בשטפים אלה. הרצת התרחישים במודל המכיל הראתה כי: המשך דיזון כרגיל יוביל להמשך זיהום האקווא ולפסילת בארות נוספות; הפחתה ל-75% בתשומות הדשן החנקני טוביל לבלימת עליית הריכוזים במי התהום ותחזיר את מצב הזיהום בחנקה באקווא לזה הקיים היום תוך 40 שנה. הפחתה ל-50% בתשומות הדשנים טוביל לבלימת עליית הריכוזים ולירידה בריכוזי החנקה באקווא ולמגמה של שיקום. בארות נוספות ירדו אל מתחת לסף התקן הישראלי של 70 מ"גל חנקה ויוכלו לשמש כמקור מי שתייה. אך תהליך זה ייקח עשרות שנים.

המסקנות העיקריות העיקריות של העבודה הן:

- 1) זיהומי חנקות במי התהום באזור השרון שנגרמו מדיזון מאסיבי של עשרות שנים יכולים להתנקות, אך רק בעוד עשרות שנים ובתנאי שבדומה ל"Nitrate Directive" של האיחוד האירופי יוחלט על הפחתה בתשומות דשנים חנקניים כבר מעכשיו.
- 2) לא ניתן לחזות את ריכוזי החנקה הגבוהים בבארות המזוהמות במיוחד (100 מ"גל חנקה ומעלה) ואת השונות המרחבית בעזרת שטפים אופייניים לשימושי קרקע מסוימים, ריכוזים אלה נוצרים בגלל שטפים גבוהים במיוחד באזור הבאר.
- 3) ניתן לחשב את הריכוז הממוצע של החנקה באזור האקווא או את סך ריכוז החנקה באקווא שמתחת לאזור החקלאי בעזרת שטפים אופייניים למספר קטן של שימושי קרקע.

7. רשימת ספרות

- אבו טועמה, מ.י., 2012. סיכום מחקרים בתות שדה 2008-2012. *שירות ההדרכה והמקצוע, אגף שירות שדה, האגף לירקות*. משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
- אדר, א., נתיב, ר., רונן, ז., דהן, ע., ויסברוד, נ., יקירביץ, א., כשר, ר., ברנשטיין, ע., גל, ה., קוזניצוב, מ., שגיא, ש., 2009. זיהום מי תהום והתווך הלא רווי באזור רמת השרון. דו"ח מסכם, רשות המים האגף לאיכות מים.
- אופנהיימר, חן., 1978. גידול עצי פרי סובטרופיים. *עם עובד*. תל אביב.
- אלחנני, ש., 2009. אתגרים בפעילות השמירה על איכות מקורות המים בישראל. כנס ירושלים לסביבה וטבע, מאי, 2009 ירושלים.
- בכמט, י., דקס, א., רשף, ג., 2003. תפעול שנתי של אקוויפר החוף. *השירות ההידרולוגי רשות המים (ב2003 - נציבות המים)*, ירושלים.
- בן הגיא, נ., ברנר, מ., רביב, מ., וולקן, ר., שושני, ב., אייזנקוט, א., 2011. אפיון חומרים אורגניים לחקלאות. *עלון הנוטע*, 65: 16-20.
- בר-יוסף, ב., שגיב, ב., פאנג, ש., 1999. השפעות ארוכות טווח של זיבול ודישון בחנקן על גידולים ומאזני חנקן ומלחים בקרקע, ב"חלקות קבועות" בגילת שבנגב. *מחקר חקלאי בישראל*, י': 31-54.
- גבירצמן, ג., 1970. חבורת סקיה (אאוקן מאוחר עד פלייסטוקן מוקדם) במישור החוף והשפלה, ישראל. עבודה לקבלת תואר דוקטור. *המחלקה לגיאולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים*.
- גבירצמן, ח., 2002. משאבי המים בישראל. *יד יצחק בן-צבי*, ירושלים.
- גל, י., אייזנקוט, א., פרס, מ., לוינגרט, ע., 2012. המרת מקדמי השקיה מגיגית למקדמי השקיה מהתאדות מחושבת. *עלון הנוטע*, 66: 28-32.
- דר, צ., 1985. תגובת צמחי תפוא לקיטום עלים, השפעתו על צבירת חומר יבש, התפלגות בצמח ואימות מודל סימולציה לגדילת תפוא"א בהשפעת הסרת עלים. עבודת גמר. *הפקולטה לחקלאות ברחובות. האוניברסיטה העברית בירושלים*.
- דר, צ., 2011. גידול בטטות לקראת עונת אביב-קיץ 2011. *שירות ההדרכה והמקצוע, אגף שירות שדה, האגף לירקות*. משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
- הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. 1997. שנתון סטטיסטי לישראל 1997.
- הממ"ג הלאומי, שכבת שימושי קרקע. 2000. המרכז למיפוי ישראל.
- השרות ההידרולוגי – רשות המים, 2012. התפתחות ניצול ומצב מקורות המים בישראל עד סתיו 2010.
- זילברמן, א., ציפרלביץ, י. 2003. השקיה ודישון של תפוחי אדמה אביביים בנגב. *שירות ההדרכה והמקצוע, אגף שירות שדה, האגף לירקות*. משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
- חן, י., ענבר, י., ברק, פ., שנקר, מ., 2008. שיטות לבדיקת קרקעות. מהדורה ד'. *החוג לקרקע ומים, הפקולטה לחקלאות ברחובות, האוניברסיטה העברית בירושלים*.

להב, נ., שנקר, מ., חן, י., 2008. יסודות מדע הקרקע. מהדורה ב', המחלקה למדעי הקרקע והמים, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים.

משרד החקלאות, 2009. סקר גידולים (שכבת ממ"ג). האגף לתכנון במשרד החקלאות.

סלוצקי, ה., שליו, א., 2010. מבחני סלג למדידת מוליכות הידראולית ותקינות קידוחים באקוויפר החוף. המכון הגיאולוגי, משרד התשתיות הלאומיות, ירושלים.

פיין, פ., אלכס, פ., אורי, מ., אלן, ג., דוד, ר., רמי, ק., מרדכי, 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. עמוד 26.

קורצמן, ד., רוטו, ד., 2011. מודלים של דליפת חנקן משטחים חקלאיים למי התהום: אפיון השונות המרחבית בסקאלות מרחק שונות. הצעת מחקר ליחידת המחקרים ברשות המים במסגרת "קול קורא 2011" – רשות המים.

רביקוביץ, ש., 1992. קרקעות ישראל התהוותן, טבען ותכונותיהן. הקיבוץ המאוחד, תל אביב.

רוה, י., סליטרניק, ח., אבנימלך, י., 1972. פילוג ריכוזי תרכובות חנקן בחתך הקרקע שמעל מי התהום באזור החוף, דו"ח ראשון. תכנון המים לישראל בע"מ, תל אביב.

שכנאי, 1974, חתכים גיאולוגיים ע"פ רצועות יוסום, מתוך האטלס הגיאולוגי של אקוויפר החוף, בעריכת ע. אקר, 1999.

שפירא, ר.ח., 2012. שטפי חנקה למי תהום מתחת לפרדסים: תצפיות, מודלים, והדמיית תרחישים ברמות דיכון מופחתות. עבודת גמר לתואר מוסמך. החוג להידרולוגיה ומשאבי מים. האוניברסיטה העברית בירושלים.

AQUAVEO, 2012. The Department of Defense Groundwater Modeling System, GMS v8.2 *Aquaveo*, South Jordan Utah.

Avnimelech, Y., Raveh, J., 1976. Nitrate leakage from soils differing in texture and nitrogen load. *Journal of Environmental Quality*, 5: 79–82.

Barkle, G., Clough, T., Stenger, R., 2007. Denitrification capacity in the vadose zone at three sites in the Lake Taupo catchment, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research*. 45: 91-99.

Bohn, h. I., Mcneal, B. L., O'Connor, G. A., 2001. Soil Chemistry. *John Wiley & Sons*, Inc, New York.

Brooks, R. H., and A. T. Corey., 1966. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Papers no. 3. Fort Collins. *Colorado State University*.

Burow, K.R., Nolan, B.T., Rupert, M.G., Dubrovsky, N.M., 2010. Nitrate in groundwater of the United States, 1991–2003. *Environmental Science and Technology* 44 (13), 4988–4997.

- 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.
- Cannavo, P., Richaume, A., Lafolie, F., 2004. Fate of nitrogen and carbon in the vadose zone: in situ and laboratory measurements of seasonal variations in aerobic respiratory and denitrifying activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 36: 463-478.
- Clement, T.P., 1997. A Modular Computer Code for Simulating Reactive Multispecies Transport in 3-Dimensional Groundwater System. *Pacific Northwest National Laboratories* , Richland, Washington.
- 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.
- Eghball, B., Wienhold, B.J., Gilley, J.E., Eigenberg, R.E., 2002. Mineralization of manure nutrients. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57: 470-473.
- Environment European Community, 1991. Council Directive: concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. *Official Journal of the European Communities*, L 375/3.
- Environment European Community, 2010. The EU Nitrates Directive. European Comission.
- Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, j., Zbigniew, K., Wilfried, W., 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1: 636-639.
- 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.
- ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. *John Wiley & Sons*, New York.
- Freeze, R.A., Cherry J.A., 1979. Groundwater. *Englewood Cliffs, N.J.*, Prentice-Hall.

- Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., Asner, G. P., Cleveland, C. C., Green, P. A., Holland E. A., Karl, D. M., Micaels, A. F., Porter J. H., Townsend, A. R., Vöösmyrty, C. J., 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70: 153–226.
- 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.
- Gaskell, M., Smith, R., Mitchell, J., Koike, S. T., Fouche, C., Hartz, T., Horwath, W., Jackson, L., 2007. Soil Fertility Management For Organic Crops. *Division of Agriculture and Natural Resources, University of California*, publication 7249.
- Guimera, J., Marfa, O., Candela, L., Serrano, L., 1995. Nitrate leaching and strawberry production under drip irrigation management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 56: 121-135.
- Gurdak, J.J., Walvoord, M.A., McMahon, P.B., 2008. Susceptibility to enhanced chemical migration from depression-focused preferential flow, high plains aquifer. *Vadose Zone Journal*, 7: 1218-1230.
- 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 semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 42: 81-95.
- Hall, M.D., Shaffer, M.J., Waskom, R.M., Delgado, J.A., 2001. Regional nitrate leaching variability: what makes a difference in Northeastern Colorado. *Journal of the American Water Resources Association*, 37: 139-150.
- 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.
- 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.
- Jalali, M., 2005. Nitrates leaching from agricultural land in Hamadan, western Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 110, 210–218.
- Jovanovic, N.Z., Israel, S., Tredoux, G., Soltau, L., Le Maitre, D., Rusinga, F., Rozanov, A., van der Merwe, N., 2009. Nitrogen dynamics in land cleared of alien vegetation (*Acacia saligna*) and impacts on groundwater at Riverlands Nature Reserve (Western Cape, South Africa). *Water SA*, 35: 37-44.
- Ju, X. T., Kou, C. L., Zhang, F. S., Christie, P., 2006. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*, 143: 117-125.

- Kachurina, O.M., Zhang, H., Raun, W.R., Krenzer, E.G., 2000. Simultaneous determination of soil aluminum, ammonium- and nitrate-nitrogen using 1 M potassium chloride extraction. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31 (7–8), 893–903.
- Kanfi, Y., Ronen, D., Magaritz, M., 1983. Nitrate trends in the coastal plain aquifer of Israel. *Journal of Hydrology*, 66: 331-342.
- Kourakos, G., Klein, F., Cortis, A., Harter, T., 2012. A groundwater nonpoint source pollution modeling framework to evaluate long-term dynamics of pollutant exceedance probabilities in wells and other discharge locations. *Water Resources Research* 48, W00L13.
- Kraft, G. J., Stites, W., 2003. Nitrate impacts on groundwater from irrigated-vegetable systems in a humid north-central US sand plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 100: 63–74.
- Kurtzman D., Shpira R.H., Bar-Tal A., Fine P., Russo D. 2013. Nitrate fluxes to groundwater under citrus orchards in a Mediterranean climate: Observations, calibrated models, simulations and agro-hydrological conclusions. *Journal of Contaminant Hydrology* 151, 93-104.
- Kurtzman, D., and Scanlon, B. R., 2011. Groundwater recharge through vertisols: Irrigated cropland vs. natural land, Israel. *Vadose zone Journal*, 10: 662-674.
- Kurtzman, d., Netzer, L., Weisbrod, N., Nasser, A., Graber, E.R., Ronen, D., 2012. Characterization of deep aquifer dynamics using principal component analysis of sequential multilevel data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 761-771.
- Lee, M.J., Sang-Il, H., Hee-Myong, R., 2014. Interpreting the effect of soil texture on transport and removal of nitrate-N in saline coastal tidal flats under steady-state flow condition. *Continental Shelf Research*, 84: 35-42.
- Lockhart, K.M., King, A.M., Harter, T., 2013. Identifying sources of groundwater nitrate contamination in a large alluvial groundwater basin with highly diversified intensive agricultural production. *Journal of Contaminant Hydrology*, 151:140-154.
- 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.
- Matthews, e., Allen, H., 1999. Critical Consumption Trends and Implications. *World Resources Institute*, Washington D.C.

- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. *U.S. Geological Survey, U.S. Government Printing Office*, Washington.
- 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.
- Mercado, A., 1980. The coastal aquifer of Israel, some quality aspects of groundwater management. *Water Quality Management under Condition of Scarcity*, New York: Academic Press, 93-146.
- Miyazaki, T., 2006. *Water Flow in Soils*. Taylor & Francis, Boca Raton.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19: 205-234.
- 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.
- Neilsen, d., Neilsen, G. H., 2002. Efficiency Use of Nitrogen and Water in High-density Apple Orchards. *HorTechnology*, 12(1): 19-25.
- Neuman, S.P., 1990. Universal Scaling of Hydraulic Conductivities and Dispersivities in Geologic Media. *Water Resources Research*, 26: 1749-1758.
- Niswonger, R.G., Prudic, D.E., 2009. Comment on “Evaluating Interactions between Groundwater and Vadose Zone Using the HYDRUS-Based Flow Package for MODFLOW” by Navin Kumar C. Twarakavi, Jirka Šimůnek, and Sophia Seo. *Vadose Zone Journal*, 8: 818-819.
- Noxon, J.F., 1976. Atmospheric Nitrogen fixation by lightening. *Geophysical Research Letters*, 3: 463-465.
- Pachepsky, Y., Timlin, D., Rawls, W., 2003. Generalized Richards’ equation to simulate water transport in unsaturated soils. *Journal of Hydrology*, 272: 3-13.
- Panday, S., Huyakorn, P.S., 2004. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources*, 27: 361-382.
- Paris, Q., 1992. The Von Liebig Hypothesis. *American Journal of Agricultural Economics*, 74: 1019-1028.

- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and physical sciences*, 193: 120-145.
- Pessarakli, m., 2002. Handbook of plant and crop physiology, second edition. *Marcel Dekker*, New York.
- Peterson, M.E., Curtin, D., Thomas, s., Clough, T.J., Meenken, E.D., 2013. Denitrification in vadose zone material amended with dissolved organic matter from topsoil and subsoil. *Soil Biology and Biochemistry*, 61: 96-104.
- Ramos, C., Agut, A., Lidon, A.L., 2002. Nitrate leaching in important crops of th Valencian Community region (Spain). *Environmental Pollution*, 118: 215–223.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1, (5): 318–333
- Rodgers, C., 1983. Effect of nitrogen rates in the nursery and in the field on growth, mineral composition and yield of Strawberry plants. M.Sc. Thesis. *The Department of Field and Vegetables Crops, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot*.
- Ronen, D., Kanfi, Y., Magaritz, M., 1983. Sources of Nitrates in groundwater of the coastal plain of Israel. *Water Research*, 17: 1499-1503.
- 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.
- Russo, D., Bouton, M., 1992. Statistical analysis of spatial variability in unsaturated flow parameters. *Water Resources Research*, 28: 1911-1925.
- Russo, D., Russo, I., Laufer, A., 1997. On the spatial variability of parameters of the unsaturated hydraulic conductivity. *Water Resour. Res.*, 33: 947-956.
- Russo, D., Zaidel, J., Laufer, A., 1998. Numerical analysis of flow and transport in a three-dimensional partially saturated heterogeneous soil. *Water Resource Research*, 34: 1451-1468.
- Russo, D., Zaidel, J., Laufer, A., 2001. Numerical analysis of flow and transport in a combined heterogeneous vadose zone-groundwater system, *Advances in Water Resource*, 24: 49-62.
- Russo, D., Laufer, A., Shapira, R.H., Kurtzman, D., 2013. Assessment of solute fluxes beneath an orchard irrigated with treated sewage water: A numerical study, *Water Resources Research*, 49: 657-674.
- Santos, M. B., 2010. Effects of Preplant Nitrogen and Sulfur Fertilizer Sources on Strawberry. *HorTechnolgi*, 20(1):193-196.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10: 18-39.

- 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.
- Serrano, L., Carbonell, X., Save, R., Marfih, O., and Pefiuelas, M., 1991. Effects of irrigation regimes on the yield and water use of strawberry. *Irrigation Science*, 13:45-48.
- 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*.
- Sokoto, M.B., Magaji, M.D., Singh, A., 2007. Growth and Yield of Sweet Potato (*Ipomea batatas* (L.) Lam.) As Influenced by Intra-Row Spacing and Potassium. *Journal of Plant sciences* 2(1): 54-60.
- Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygari, S.R., Perkins, S.P., 1999. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas. *Journal of Hydrology*, 214: 179-196.
- Sorgona, A., Abenavoli, M. R., Gringeri, P. G., Cacco, G., 2006. A comparison of nitrogen use efficiency definitions in Citrus Rootstocks. *Scientia Horticulturae*, 109: 389-393.
- Sultan, M., Yan, E., Sturchio, N., Wagdy, A., Abdel-Gelil, K., Becker, R., Manocha, N., Milewski, A., 2007. Natural discharge: A key to sustainable utilization of fossil groundwater. *Journal of Hydrology*, 335: 25-36.
- 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.
- Twarakavi, N.K.C., Šimůnek, J., Seo, S., 2008. Evaluating Interactions between Groundwater and Vadose Zone Using the HYDRUS-Based Flow Package for MODFLOW. *Vadoze zone Journal*, 7(2): 757-768.
- US EPA, 1994. Is Your Drinking Water Safe? EPA, Office of Water (publication number 810 F94002. Available from <http://www.epa.gov/nscep/index.html> (January 2013)
- 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.
- Venterea, R. T., Hyatt, C. R., Rosen, C. J., 2011. Fertilizer Management Effects on Nitrate Leaching and Indirect Nitrous Oxide Emissions in Irrigated Potato Production. *Journal of Environmental Quality*, 40: 1103-1112.

- Vitousek, P.M., et al., 2009. Nutrient imbalances in agricultural development. *Science* 324 (5934), 1519–1520.
- Walton, G., 1951. Survey of Literature Relating to Infant Methemoglobinemia Due to Nitrate-Contaminated Water. *American Journal of Public Health*, 41: 986-997.
- 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.
- 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.
- Wylie, B. K., Shaffer, M. J., Brodahl, M. K., Dubois, D., Wagner, D. G., 1994. Predicting spatial distributions of nitrate leaching in northeastern Colorado. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(3): 288-293.
- 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.
- Zheng, C., 1990. A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reaction of Contaminants in Groundwater Systems. S.S. Papadopulos & Associates, Inc, Rockville, Maryland.

Nitrate-Nitrogen flux was found on 100-200 kg/hectare/year in deciduous and 200-300 kg/hectare/year in vegetables.

In the second part of the work water flow and nitrate transport models in the aquifer (MODFLOW and MT3DMS, respectively) were constructed and calibrated below a 13.5 KM² agricultural area in the Sharon region. The top boundary conditions of the groundwater models were the fluxes of water and nitrate which were outputs of the unsaturated zone flow and transport models. These were extended to the actual depth of the unsaturated zone (1 m resolution) for each grid's cell of the groundwater models. Hydraulic head and nitrate concentration data of the wells in this area were obtained from the Israeli Hydrological Service (IHS) and used for constructing the side boundary-conditions and for the calibration of the models. Using 1 characteristic model for the unsaturated zone for each land-use enabled to predict the average concentration of nitrate in the wells but it could not explain the high concentrations in the most contaminated wells. Therefore the nitrate fluxes from the unsaturated zone were multiplied by the factors of:10 (1% of the area), 5 (3% of the area), 2.8 (4% of the area) 1 (55% of the area), 0.6 (19% of the area) and 0.1 (18% of the area) keeping the same total nitrate flux for the model area . Only after this second stage of calibration, the model was able to produce the high concentration and the spatial variability of nitrate in groundwater with good fit to data.

The calibrated model was used for simulations of 40 years to the future (2012-2052) in a three fertilization scenarios: 1) 100% (regular fertilization, similar to the present); 2) 75% of the present fertilization applied; and 3) 50% of the present. In the first "business as usual" scenario the nitrate concentration in the aquifer will keep increasing and more wells will be disqualified as drinking water source (only 1 well in the modeled area will remain below standard by 2052). In the second scenario, the current nitrate conditions in the aquifer are expected in 40 years. In the third scenario (50% reduction in nitrogen fertilization), the nitrate concentration in the wells will decrease, the aquifer will rehabilitate and more well's than now days will have nitrate concentrations below the standard of 70 mg/l.

Abstract

Israel's coastal aquifer is a major water resource and there are many agricultural areas on the land overlying it. During the last decades many wells were disqualified for drinking water due to high nitrate (NO_3^-) concentration, above Israel's standard for nitrate in drinking water – 70 mg/l. Many of these wells are located in the Sharon region at the center of the coastal plain of Israel. In this area there are agricultural activities for many years on Hamra soils (Mediterranean red loamy-sand soils). High spatial variability in nitrate concentration is observed in groundwater wells in this area over small length scales, (i.e. hundreds of meter between wells with high nitrate-concentrations and wells with low concentrations). Inefficient nitrogen fertilization cause low intake to the roots and nitrogen leachate towards the deep unsaturated zone and groundwater, mainly as nitrate -nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$). This research examined the relationship between well's nitrate-concentration and the agricultural land-use in agricultural land in the Sharon area. Nitrate fluxes towards groundwater from three main crops in this area were used for assessment of nitrate in groundwater: 1) Citrus orchards (from Shapira 2012); 2) Persimmon orchard representing plantations of deciduous trees; 3) Potatoes and strawberry fields representing vegetables crops. The fields that were sampled have had a continuous agricultural activity of the same crop for decades. For each field, data on irrigation and fertilization regimes and irrigation water quality was collected. In each field three "Direct Push Drilling" were drilled and the top 10 meters of the unsaturated zone was sampled and standard soil analyses were carried out (bulk density, particle size distribution, water content, chloride in soil water extraction, NH_4 and NO_3 in KCl-solution extraction). Groundwater recharge and nitrate-nitrogen fluxes to the aquifer were calculated assuming steady-state by Chloride Mass Balance (CMB). For one representative sampling-hole in each field a 1-dimensional transient numerical model of water flow and nitrogen transport (HYDRUS-1D) was constructed and calibrated.

The average recharge flux toward the aquifer under vegetables and deciduous was found to be 300-400 mm/year from both CMB and multi-year averages of the numerical models.

Observations and Modeling of Nitrate Fluxes to Groundwater under Diverse Agricultural Land- Uses: From the Fields to the Pumping Wells

Thesis for the degree of Master of Science

Submitted by:

Yehuda Levy

Under the supervision of:

Dr. Daniel Kurtzman

Prof. Benny Chefetz

January 2015

The program to Hydrology and Water Resources
Earth Science Institute
Department of Soil and Water Sciences
The Hebrew University of Jerusalem