

הרכב המים והקרקעות בעמק יזרעאל תחת השקיה בקולחים

דוח מסכם

אורלי גורן, עמיר סנדלר, לירון שירי ובעז לזר

פברואר 2014

תקציר

עמק יזרעאל הוא אחד האזורים החקלאיים החשובים בארץ. המעבר מחקלאות בעל לחקלאות שלחין אינטנסיבית החל משנות ה-50 הגביר את הביקוש למי השקיה והוביל להקמת מערך אספקת מים אל העמק ולבניית מאגרי מים רבים האוגמים בעיקר קולחים ובמידה פחותה מי שיטפונות. ההשקיה האינטנסיבית בקולחים, הקרקעות החרסיתיות, החסימה ההידראולית שיצרו המאגרים ועומד המים הגבוה של האקוויפר העליון יצרו תנאי ניקוז גרועים וכתוצאה מכך הצפות של הקרקע והמלחת הקרקעות ומי התהום. על מנת לפתור את בעיות ההמלחה החרפות שנוצרו, החל משנות ה-80 הותקנו בשדות העמק מערכות ניקוז מלאכותיות שמטרתן ניקוז מהיר של עודפי המים והמלחים משכבת הקרקע העליונה והורדת העומדים ההידראוליים של אופקי המים בקרקע ושל האקוויפר. העבודה הנוכחית באה לבחון את תמונת המצב העדכנית של הרכב המים והקרקעות בעמק ואת ההשפעות של ההשקיה האינטנסיבית בקולחים וקיום המאגרים לאורך נחל הקישון במשך כמה עשורים.

המים במערכת ההידרולוגית הרדודה נדגמו במאגרי מעלה קישון וכפר ברוך, בפיזומטרים החודרים אל אופקי קרקע רדודים, ובקידוחים אל האקוויפר העליון. הקרקעות נדגמו לאורך שלושה חתכים, המתחילים סמוך למאגרי מעלה קישון וכפר ברוך ומסתיימים במרחק מאות מטרים במעלה השטח.

ההשקיה בקולחים על קרקעות חרסיתיות כבדות בעלות ניקוז מוגבל גורמת להצטברות של מלחים בקרקעות המעובדות ולעליית ריכוזי המלחים באופקי המים בקרקע. הצטברות המלחים נובעת ממחזורי הרטבה ויבוש תכופים בתקופת ההשקיה.

המים באופקי הקרקע מהווים את מרכיב הקצה המלוח במערכת ההידרולוגית והחלחול שלהם אל האקוויפר העליון הוא הגורם העיקרי להמלחתו. המים באופקי הקרקע ובאקוויפר העליון מלוחים ממקורות המילוי החוזר האפשריים שלהם – מי גשם, מי נגר ומי קולחים. התהליכים העיקריים המכתיבים את עליית מליחות המים הם שילוב של אידוי והמסת מלחי הליט. יחד עם זאת, ברוב דוגמאות מי הקרקע והאקוויפר קיים עודף של כלוריד ביחס לנתרן המעיד על עיכוב של הנתרן בקרקע כתוצאה מתהליכי ספיחה או שקיעה של מלחי נתרן. בנוסף, הרכב המים באופקי הקרקע ובאקוויפר משתנה כתוצאה משילוב של מספר תהליכים גיאוכימיים שמתרחשים בעוצמות שונות במהלך הזרימה בתת הקרקע כגון המסה של גבס, חיזור סולפאט, דניטריפיקציה, בליה של מינרלים סיליקטיים וחמצון של חומר אורגני. במי הקרקע ובאקוויפר נמדדו ריכוזים גבוהים של ניטרט אשר יכולים להגיע ממספר מקורות כגון קולחים, דשנים סינטטיים וזבל אורגני המפוזר בשדות.

הרכב היונים המסיסים בקרקעות המעובדות וריכוזיהם שונים מאלו שבקרקעות הבור. בקרקעות הבור הסיידן הוא הקטיון הדומיננטי ואילו בקרקעות המעובדות הנתרן הוא הקטיון הדומיננטי, ריכוזי הנתרן, הכלוריד והברומיד בקרקעות המעובדות גבוהים מריכוזיהם בקרקעות הבור, וכן בחלק מהקרקעות המעובדות חלה ירידה בריכוזי הקטיונים הדו ערכיים Ca^{2+} , Sr^{2+} , Mg^{2+} ביחס לריכוזיהם בקרקעות הבור. תצפיות אלו מלמדות על השפעת תהליכי העיבוד החקלאי על הרכב הכימי של הקרקע. מאגר מעלה קישון משפיע על הקרקעות שבקרבתו (במרחק של עד 100-200 מ') וגורם לעליית המליחות בהן. עליה חדה בריכוזי היונים Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Br^-

המסיסים נמצאה בשני מועדי הדיגום בנקודה במרחק של 60 מ' מדרום למאגר מעלה קישון ובמידה פחותה בנקודה במרחק של 160 מ' מצפון למאגר.

ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי בחלק ניכר מדוגמאות הקרקע שנבדקו שונה מההרכב האופייני לקרקעות ורטיות בישראל. התפוצה המרחבית של ההרכבים ביחס לקרקעות בור מצביעה על כך שהן העיבוד החקלאי והן המאגרים גורמים לשינויים במקטע החרסיתי הכוללים איליטיזציה ויצירת פליגורסקיט. ההשקיה בעונה היבשה מוסיפה מחזורי ייבוש-הרטבה ומגבירה את תהליך האיליטיזציה, וכן ההשקיה בקולחי תשלובת הקישון המכילים ריכוזים גבוהים במיוחד של אשלגן מוסיפה אשלגן לקרקע ומאיצה את קיבועו. איליטיזציה מוגברת מתרחשת ליד המאגרים, ככל הנראה, כתוצאה של דליפת של מי המאגר לסביבתו הקרובה. הממצאים הנוכחיים מאשרים ממצאים אקראיים קודמים על תהליכי איליטיזציה בקרקעות העמקים ומסבירים את ההשתנות של הרכב חרסיות סחף הקישון בשטפונות שונים.

היווצרות הפליגורסקיט נמצאה באתר בו האיליטיזציה מוגברת אבל, בניגוד להיווצרות ה-IS המסודר, דווקא בעונת הגשמים ולא בעונה היבשה. באתר זה ערכי ה-pH במי העיסה הרוויה היו גבוהים ביחס לנקודות הדיגום האחרות וריכוזי המגנזיום נמוכים מבין אלה שנמדדו בקרקעות המעובדות כתוצאה מהשתתפות יסוד זה ביצירת הפליגורסקיט. עד כה לא זוהתה בארץ היווצרות פליגורסקיט בקרקעות כתוצאה מעבוד חקלאי. הן איליטיזציה והן היווצרות פליגורסקיט (על חשבון IS), ובמיוחד בקרקעות דלות בחומר אורגני, מקטינות את קבול הקטיונים החליפים של הקרקע ופוגעות ביכולת להחזיק ולהעביר לצמח חומרי הזנה.

תודות

ברצוננו להודות מקרב לב

לולדימיר מירלס מהתחנה לחקר הסחף של משרד החקלאות על המידע הרב שתתן לנו, על הצגת בסיס הנתונים והמודל ההידרולוגי שקיים ברשותו, ובעיקר על הנכונות הרבה לשתף פעולה ולתרום מניסיונו ומהיכרותו עם השטח.

לאנשי מקורות במרחב צפון – אלי דיין, בני בן לולו, שמואל אורנסקי, סלבה שמולביץ ורענן אסור על הנכונות לשתף פעולה ועל ההיענות לעזור בדיגומים, ולגדי זעירא על העצות המועילות, המידע החשוב והרצון הטוב.

ליואב בועז, רמי מדמון, חיים חמו, אולגה ברלין, גלית שרעבי, שלמה אשכנזי, תמי זילברמן ואריאל גיא מהמכון הגיאולוגי על העזרה הרבה בדיגומי המים והקרקעות.

לעיריית גורן ולבר לוי על הכנת דוגמאות הקרקע לאנליזות השונות.

לדינה שטיבר, אולגה יפה, אירנה סגל, רותי בינשטוק, תמי זילברמן ואולגה ברלין על ביצוע האנליזות הגיאוכימיות, האיזוטופיות והמינרלוגיות במעבדות המכון הגיאולוגי.

לבית שבע כהן וחנוה נצר-כהן על העזרה בעריכת הגרפית.

תודה לקרן המדען הראשי של משרד התשתיות על מימון המחקר.

יבואו כולם על הברכה

תוכן עניינים

עמוד

	תקציר
	תודות
	רשימת טבלאות
	רשימת תרשימים
1	1. מבוא
2	2. עמק יזרעאל
2	2.1. הגיאולוגיה וההידרולוגיה של עמק יזרעאל
3	2.2. קרקעות עמק יזרעאל
5	2.3. מערכות אספקת המים בעמק יזרעאל - מאגרים, השקיה וניקוז
7	3. שיטות העבודה
7	3.1. שיטות שדה
8	3.2. שיטות מעבדה
9	4. תוצאות
9	4.1. ההרכב הכימי של המים במערכת ההידרולוגית הרדודה
13	4.2. ריכוזי היונים המסיסים בקרקעות והשתנותם כתלות במרחק ממאגרי הקולחים
15	4.3. ההרכב המינרלוגי של הקרקעות
16	5. דיון
16	5.1. השפעת הפעילות החקלאית בעמק יזרעאל על ההרכב הכימי של המים והמלחים המסיסים בקרקע ובאקוויפר העליון
18	5.2. השפעת הפעילות החקלאית על ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי בקרקעות עמק יזרעאל
20	6. סיכום
23	7. ביבליוגרפיה

רשימת טבלאות

עמוד

- 27 **טבלה 1.** אתרי דיגום המים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 28 **טבלה 2.** מיקום נקודות דיגום הקרקעות בשלושה חתכים : מדרום למאגר מעלה קישון , מצפון למאגר מעלה קישון ומדרום למאגר כפר ברוך.
- 29 **טבלה 3.** מדדי איכות מים והרכב היונים העיקריים במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 30 **טבלה 4.** ריכוזי יסודות קורט ויחסים יוניים במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 31 **טבלה 5.** ריכוזי היונים המסיסים שיצאו במיצוי עם מים מזוקקים מדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל ביחידות של מ"ג לק"ג סדימנט.
- 32 **טבלה 6.** ההרכב המינרלוגי הכולל של דוגמאות קרקע מייצגות מעמק יזרעאל.
- 33 **טבלה 7.** ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי בדוגמאות הקרקע שנדגמו בתאריך 6.11.11 בשלושה חתכים בעמק יזרעאל.
- 34 **טבלה 8.** ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי בדוגמאות הקרקע שנדגמו בתאריך 30.04.12 בשלושה חתכים בעמק יזרעאל.

רשימת תרשימים

עמוד

- 37 **תרשים 1.** מפת מיקום של נקודות דיגום המים במערכת ההידרולוגית העליונה (עיגולים כחולים) ושל נקודות דיגום הקרקעות (עיגולים כתומים).
- 38 **תרשים 2.** ריכוזי ה- Cl^- וה- Na^+ כנגד סך המומסים (TDS) במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 39 **תרשים 3.** ריכוזי ה- Na^+ כנגד ריכוזי ה- Cl^- והיחס האקוויוולנטי ביניהם במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 39 **תרשים 4.** ריכוזי ה- Br^- כנגד ריכוזי ה- Cl^- והיחס המשקלי ביניהם במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 40 **תרשים 5.** ריכוזי ה- Na^+ כנגד ריכוזי ה- SO_4^{2-} במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 41 **תרשים 6.** ריכוזי ה- Ca^{2+} כנגד ריכוזי ה- Cl^- , ה- SO_4^{2-} וה- HCO_3^- במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 42 **תרשים 7.** ריכוזי ה- SiO_2 כנגד ריכוזי ה- HCO_3^- במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 42 **תרשים 8.** ריכוזי ה- Mg^{2+} כנגד ריכוזי ה- Cl^- וה- Ca^{2+} במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 43 **תרשים 9.** ריכוזי ה- K^+ כנגד ריכוזי ה- Cl^- במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 44 **תרשים 10.** ריכוזי ה- NO_3^- , החנקן הכולל (TOTAL N) והפחמן האורגני המומס (DOC) כנגד סך המומסים (TDS) וריכוזי ה- DOC כנגד ריכוזי החנקן הכולל במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 45 **תרשים 11.** ריכוזי ה- Ba , B וה- Zn כנגד סך המומסים (TDS) במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 46 **תרשים 12.** ריכוזי ה- Fe וה- Mn כנגד סך המומסים (TDS) במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.
- 47 **תרשים 13.** הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של Na^+ ו- Ca^{2+} כנגד ה- Cl^- וה- SO_4^{2-} בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל.
- 48 **תרשים 14.** כמות גשם יומית בחמש תחנות באזור המחקר בתקופת דיגומי הקרקעות.
- 49 **תרשים 15.** הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של Na^+ ו- Sr^{2+} כנגד ה- Ca^{2+} בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל.
- 50 **תרשים 16.** הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של K^+ , Mg^{2+} , Br^- ו- NO_3^- כנגד ה- Cl^- בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל.
- 51 **תרשים 17.** השתנות הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של הקטיונים Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ו- Mg^{2+} בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל עם המרחק ממאגר הקולחים מעלה קישון.
- 52 **תרשים 18.** השתנות הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של האניונים Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- ו- NO_3^- בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל עם המרחק ממאגר הקולחים מעלה קישון.

1. מבוא

עמק יזרעאל הינו אזור חקלאי נרחב המתבסס במידה רבה על השקיה בקולחים, בעיקר בחודשי הקיץ. הביקוש הגובר למי השקיה עם המעבר לחקלאות אינטנסיבית הביא עמו הקמת עשרות מאגרי מים האוגמים בעיקר קולחים שניוניים ושלישוניים ובמידה פחותה מי שיטפונות. לאורך נחל הקישון הוקמו שני מאגרים גדולים, מאגר מעלה קישון המכיל את קולחי תשלובת הקישון ומאגר כפר ברוך המשמש בהתאם לצורך לאגירת מי קולחים או מי שיטפונות, להם השפעה רבה על המערכת ההידרולוגית בתת הקרקע.

שדות העמק יושבים על קרקעות חרסיות כבדות בעלות פמיאביליות נמוכה ויכולת ניקוז גרועה. עובייה הממוצע של שכבת הקרקע הוא כ-10 מ' והיא כוללת אופקים דקים של חלוקי גיר המחזיקים מים שעונים. מתחת לשכבת הקרקע קיים אופק חלוקים שעוביו כ-2 מ' המהווה את האקוויפר העליון ועומד המים בו ארטזי וקרוב לפני השטח.

ההשקיה האינטנסיבית בקולחים על הקרקעות החרסיות והחסימה ההידראולית שיצרו המאגרים בתת הקרקע גרמו לעליית העומדים באופקי המים וכן לעליית עומד המים באקוויפר מעל המפלסים של אופקי המים השעונים בקרקע שמעליו. תנאים אלו יצרו בעיות ניקוז וכתוצאה מכך הצפות של הקרקע והמלחת הקרקעות ומי התהום. בנוסף, דליפות של מים מליחים מהאקוויפר למאגרים עשויות לגרום להמלחה של מי המאגרים.

תופעות ההמלחה בקרקעות עמק יזרעאל תוארו בעבודות רבות (ראבקין, 1987; מיכלסון ומרכזן, 1988; גב, 1989; Goldshlger et al., 2006; Benyamini et al., 2005). עבודות אלו התמקדו בעליית ריכוזי הקטיונים והאניונים העיקריים, ה-EC (Total Dissolved Solids) TDS, ה-EC (Electrical Conductivity), וערך ה-SAR (Sodium Adsorption Ratio). הפתרון ההנדסי שיושם באופן נרחב לצמצום תהליכי המלחת הקרקעות בעמק הוא התקנת מערכות ניקוז מלאכותית בתת הקרקע (Schein and Livne, 1998; Benyamini et al., 2005). מערכות אלו נועדו לאפשר ניקוז מהיר של עודפי המים והמלחים משכבת הקרקע העליונה ולהוריד את העומדים ההידראוליים של אופקי המים בקרקע ושל האקוויפר.

מקורות המילוי החוזר למערכת ההידרולוגית הרדודה הינם מגוונים: מי גשם ונגר, עודפי השקיה שכוללים בעיקר קולחים אך גם מי שיטפונות ומים שפירים, מי נחל הקישון הכוללים את מי הנקז ממערכות הניקוז המלאכותיות, כניסה של מים מאקוויפרים רדודים בשולי העמק, וחלחול של מי מאגרים. לכל אחד ממקורות אלו הרכב גיאוכימי שונה ועל כן סביר להניח שקיימת הטרוגניות בתהליכים הגיאוכימיים שמתקיימים במערכת ובאינטרקציות מים-קרקע עם קרקעות העמק.

מאגרי כפר ברוך ומעלה קישון, הממוקמים במרכז העמק לצד אפיק נחל הקישון, משפיעים במידה רבה על התכונות ההידראוליות והגיאוכימיות של האקוויפר העליון. בנוסף, קיום המאגרים עשוי להשפיע על מחזורי ההרטבה והייבוש של הקרקעות הסמוכות וכתוצאה מכך על ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי בקרקעות אלו. קרקעות עמק יזרעאל הן ברובן הגדול מהסוג ורטיסול העשיר בחרסית, כאשר המינרל החרסיתי השולט הוא סמקטיט (איליט-סמקטיט סמקטיטי). הרכב מינרלוגי חריג שהובחן בדוגמת קרקע מאזור כפר ברוך, בה המקטע החרסיתי נשלט על ידי פאזות של איליט-סמקטיט איליטי, מעלה את האפשרות שתהליכים אנתרופוגניים משפיעים על ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי. איליטיזציה של סמקטיט עשויה להתרחש

בקרקה או בסדימנט על ידי קיבוע של אשלגן במהלך מחזורי תכופים של ייבוש והרטבה. עדות נוספת לאפשרות זאת נמצאה בשונות של ההרכב המינרלוגי בסחף של הקישון, כאשר בצד ההרכב הסמקטיטי המקובל של מקטע חרסיתי בורטיסולים, נמצאו לעתים הרכבים שנשלטו על ידי איליט-סמקטיט איליטי. אחת האפשרויות לקיום תהליך כזה היא שמפלס מי התהום באקוויפר העליון סביב מאגרי המים בעמק מושפע ממפלס המאגר או ממידת הדליפה ממנו. לפיכך, סמוך למאגר צפויים להתרחש מחזורי הרטבה-ייבוש בתכיפות גבוהה מאשר הרחק ממנו. בנוסף, השקיה אינטנסיבית במהלך העונה היבשה מוסיפה, אף היא, מחזורי הרטבה-ייבוש, ללא קשר לנוכחות מאגרי המים.

המחקר הנוכחי בא לבחון את השפעת הפעילות האנתרופוגנית בעשורים האחרונים בעמק יזרעאל על המאפיינים ההידרולוגיים והגיאוכימיים של המערכת ההידרולוגית הרדודה ועל הרכב הקרקעות ובפרט ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי. הבנה טובה יותר של המערכת ההידרולוגית בתת הקרקע ושל מאפייני הקרקע תוכל לסייע בניהול המערכות החקלאיות וההידרולוגיות של העמק, ואולי אף להציע פתרונות נוספים לצמצום הפגיעה באיכות המים והקרקע.

2. עמק יזרעאל

עמק יזרעאל הוא אחד האזורים החקלאיים הגדולים בארץ, הכולל השקיה אינטנסיבית במי קולחים על קרקעות חרסיתיות כבדות. המחקר מתמקד בחלקו המרכזי והמערבי של עמק יזרעאל, ממערב לעפולה, בשטח שגבולותיו: הרי נצרת בצפון, בקעת כסולות במזרח, תל קשיש במערב ותוואי נחל הקישון בדרום (תרשים 1). שטח זה מכוסה כולו בשדות חקלאיים המעובדים באופן אינטנסיבי, והוא מנוקז ע"י נחל הקישון שזורם במרכזו ממזרח למערב. השטח כולל את מאגרי כפר ברוך ומעלה קישון של תשלובת הקישון היושבים באפיק נחל הקישון ואוגרים קולחים שניוניים ומי שיטפונות, וכן מאגרי איגום נוספים. כמות המשקעים השנתית בעמק משתנה בטווח 400-600 מ"מ (השירות המטאורולוגי, 2011) וההתאדות היומית הממוצעת משתנה בטווח 3-8 מ"מ ביום (קרמר וגלון, 1996).

2.1. הגיאולוגיה וההידרולוגיה של עמק יזרעאל

עמק יזרעאל הינו שקע מורפוטקטוני שעוצב ע"י אירועי העתקה שהתרחשו בתקופת המיוקן המאוחר ותהליכים מורפולוגיים מאוחרים הכוללים ארוזיה, הרבדת חומר אלוביאל-קולוביאל ויצירת קרקעות. העמק הינו גרבן שכיוונו צפון מערב – דרום מזרח התחום ע"י שני העתקים - העתק ג'נין - ג'למה - חיפה, מדרום והעתק איכסל - גניגר, מצפון (ארקין וחובי, 1987). במיוקן התחתון היה העמק חלק מאגן גדול שכלל את העמקים ואת הגליל התחתון ואשר נוצר, ככל הנראה, כבקע יבשתי ראשוני במערכת שכיוונה צפ-מז' - דר-מז' מואדי סירחאן דרך אגן דמשק ועד לגרבן הקישון (שליב, 1991). במהלך המיוקן הצטבר בעמק חתך עבה של הבזלת התחתונה ובעקבותיו חלה שבירה נוספת ובמרכז העמק הצטבר חתך עבה של סדימנטים דקים ("סדרת החרסית") וסדימנטים ימיים לגונריים (תצורת בירה) שהתחלפו בגירים של ים מתוק (תצורת גשר). התפרצות בזלת הכיסוי בפליוקן הותירה בעמק זרמים בעובי דק יחסית. פאזת שבירה נוספת בסוף הפליוקן/ תחילת הפליסטוקן קבעה את גבולות העמק הנוכחיים.

המערכת ההידרולוגית בעמק כוללת שש יחידות הידרולוגיות מעל אקוויפר חבורת יהודה המכונות בשם סדרת המילוי (פיקרד, 1936; דיקר, 1964):

1. בזלת תחתונה מגיל מיוקן תחתון/תיכון – אקוויפר
 2. סדרת החרסית מגיל מיוקן תיכון – אקוויקלוד
 3. תצורת חוואר בירה מגיל מיוקן עליון – אקוויטרד
 4. בזלת הכיסוי מגיל פליוקן – אקוויפר
 5. יחידת חלוקים מגיל פליוקן-פליסטוקן – אקוויפר
 6. שכבת הקולוביום/אלוביום מגיל פליסטוקן-הולוקן – אקוויטרד
- אקוויפר חבורת יהודה נמצא בעומק של כ- 500 מ' מתחת לפני השטח והוא כלוא בכל השטח הנידון. עומד המים הפיזומטרי בו משתנה בטווח של ± 10 מ' ביחס לגובה פני הים. מעל חבורת יהודה מונחת באי התאמה אירוזיבית הבזלת התחתונה, הכוללת גם שכבות ביניים של חוואר, חרסיות וחלוקים, והזרימה בה מתרחשת בסדקים ובשכבות בליות (וישקין, 1973). עובייה בקידוחי גדעון הוא בטווח 230-320 מ' (ביידא, 1968) ורום מפלס המים בה הוא בטווח 50-100 מ' (ביין, 1967). סדרת החרסית מונחת על הבזלת התחתונה במרכז העמק ועובייה הוא בטווח 0-300 מ' (וישקין, 1973). יחידה זו מהווה יחידה אקוויקלודית המפרידה בין אקוויפר הבזלת התחתונה לבין אקוויפר בזלת הכיסוי (וישקין, 1973). תצורת חוואר בירה מונחת באי התאמה אירוזיבית על הבזלת התחתונה והיא מורכבת בעיקר מסלעי משקע רכים: חוואר, חרסית וקירטון. עובי התצורה כ- 65 מ' (פיקרד, 1936) ותכונותיה ההידרולוגיות משתנות בהתאם לליתולוגיה. באזור עפולה ובמגדל העמק מונחת מעל תצורת בירה תצורת גשר הבנויה בעיר גיר אואוליטי (שליב, 1991). לבזלת הכיסוי הופעה מצומצמת בעמק יזרעאל ועובייה באזור עפולה כ- 20 מ' (וישקין, 1973).

המערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק, בה התמקד מחקר זה, כוללת את שתי היחידות ההידרולוגיות העליונות בסדרת המילוי (גב, 1989). האקוויפר העליון (פליוקן-פליסטוקן) מורכב מגיר חווארי קלסטי והוא מונח מעל תצורת חוואר בירה. עומק האקוויפר משתנה בטווח 7-30 מ', עוביו הממוצע כ- 2 מ' והמים בו כלואים בלחץ ארטזי (גב, 1989). המילוי החוזר העיקרי של האקוויפר מגיע ממניפות הסחף בשולי הרי נצרת ובקעת כסולות, אך ניכרת תרומה של מים מליחים מפני השטח, מעודפי השקיה וממאגרים. שכבת הקולוביום/אלוביום העליונה (פליסטוקן-הולוקן) מורכבת מחרסית סילטית עם אופקים דקים של חלוקי גיר (גב, 1989). עובייה הממוצע של שכבה זו הוא כ- 10 מ'. ככלל, יחידה זו בעלת כושר חלחול נמוך אך היא מחזיקה בתוכה מים שעונים באופקי החלוקים. בשנות ה-80 מפלס המים באופקים אלה היה נמוך מעומד המים ב"אקוויפר העליון" שמתחת (גב, 1989).

2.2. קרקעות עמק יזרעאל

קרקעות העמק נוצרו ברובן מסחף של קרקעות הרי הסביבה. על ההרים והגבעות הבנויים גירים ודולומיטים של חבורת יהודה וגיר של חבורת עבדת מתפתחות קרקעות טרה רוסה (הרי נצרת, הכרמל, שלוחת תמרת) ואילו על הרי הקרטון והחוואר של חבורת יהודה, הר הצופים ועבדת מתפתחות קרקעות רנדזינה (הכרמל, אזור מגידו, טבעון, בית שער) (Ravikovitch et al.,)

1960a). קרקע חומה ים תיכונית נוצרת על קרומי הקלקריט (נארי) המצפים את הסלעים הקרבונטיים הרכים של חבורת עבדת (רמת מנשה, אזור אלונים). קרקעות רזידואליות מצויות על גבעות ורמות בתוך העמק כמו הקרקעות החומות והחומות-אדומות הבולטות הנוצרות על סלעי הבזלת במרכז העמק (אזור עפולה-היוגב) וקרקע חומה הנוצרת על הקלקריט של גבעות יישובי העמק הבנויים על תצורת בירה (תל עדשים, מזרע, שריד, גבת, נהלל ואחרים). בשולי ההרים מצויות קרקעות קולוביאליות שמקורן בסחף של טרה רוסה (רגלי הרי נצרת, הכרמל, הגלבוע) או של קרקע חומה וברנדזינה (רגלי רמת מנשה, סביבות אלונים). במישורי העמק שולטות קרקעות אלוביאליות אשר מקורן אף הוא בסחף מגבעות ומהרי הסביבה אך תכונותיהן שונות במידה רבה מאלה של קרקעות המוצא. בהשפעת מי התהום הגבוהים, וכן הצפות חורף במקומות אחדים, התפתחו קרקעות הידרומורפיות מסוגים שונים, חלקן ביצתיות. רובן מרוכזות בחלקו המערבי של העמק. הסחף של נחל הקישון, הנישא מעבר לגדותיו בעת שטפונות הוא מקור נוסף של חומר אב לקרקעות העמק. אבק, השוקע ישירות על הקרקעות מוסיף חומר דק גרגר.

בקרקעות הקולוביאליות והאלוביאליות של מישורי העמק שולט המקטע החרסיתי (מעל 50%). בשל המרקם דק הגרגר הניקוז של הקרקעות גרוע. תכולת הגיר משתנה מפחות מ- 1% ועד ליותר מ- 20%, תכולת החומר האורגני קטנה מ- 2%, וה- pH הוא בתחום של 7.5-8.2. רוב הקרקעות האלוביאליות והקולוביאליות בעמק מוגדרות כטיפוסים שונים של ורטיסולים (גרומוסולים) במפת חבורות הקרקעות של ישראל (דן ורז, 1970). מעצם הגדרתן, המקטע החרסיתי של קרקעות אלה עשוי ברובו סמקטיט. מאז הפרסום הראשון, שכלל נתונים מינרלוגיים איכותיים ספורים ושלוש אנליזות כימיות (Ravikovitch et al., 1960b), נערך מחקר יחיד שכלל אנליזות מינרלוגיות וכימיות של קרקעות בעמק (גולדשלגר, 1985). במחקר זה, אשר בחן את השפעת חומר האב ומשטר המים על אופי החרסית בקרקעות הכבדות בעמק יזרעאל נדגמו ונבדקו שלושה חתכי קרקע: ביגור, ברמת דוד ובעמק חרוד. בשני החתכים הראשונים נמצא לכל אורכם (עד לעומק של כ- 2 מ') הרכב מקטע חרסיתי של מונטמורילוניט (סמקטיט) 70% - 90%, קאוליניט 30% - 10% אחוז וזוהו עקבות של איליט במדגמים בודדים. תכולת מקטע הגודל החרסיתי היתה 50-58% ביגור ו- 61-66% ברמת דוד. תכולת הגיר בשני החתכים היתה 14-18%. נתונים אחדים על קרקעות בזלתיות בעמק נאספו במהלך השנים על ידי זינגר (Singer, 2007). במחקרים של רביקוביץ (1960) ושל גולדשלגר (1985) נמצאה מגמה של המלחה עם העומק המלווה בעליה בריכוז הנתרן החליף. המרקם החרסיתי גורם לשטיפה מואטת של הקרקעות (וחומר האב) מה שמביא לעליה במליחות ובריכוז הנתרן ואילו השפעת הגומלין היא שהעלייה בריכוז הנתרן גורמת לדיספרסיה של הסמקטיט, לסגירת חללים וסדקים ולהגברת האיטום של הקרקע.

עבוד חקלאי של קרקעות העמק הוא בן אלפי שנים אך עד מלחמת העולם הראשונה היה מוגבל רק לשוליים או לגידולי בעל עונתיים. עם ההתיישבות היהודית, נוקזו קרקעות העמק והפעילות בהן נמשכת בכל עונות השנה. ההתערבות האינטנסיבית של האדם במשטר ההידרולוגי של העמק התבטאה לאורך השנים בסכירה ואגירת מים במאגרים עיליים, בניקוז ובהשקיה. בשנים האחרונות נוסף גורם של השקיה במי קולחים.

הרכב הקרקע, ובמיוחד של החרסיות, אשר הן הגורם הפעיל בה, משפיע על תהליכים כימיים כמו ספיחת קטיונים, מתכות וחומר אורגני ועל ניידותם למי תהום. תכולת החרסיות והרכבן מכתיבות גם תהליכים פיזיקליים של פרמיאביליות המטריקס הקרקעי הרציף (solum), ושל

היווצרות סדקים במהלך התייבשות, תכונה המאפיינת ורטיסולים, ואשר לה השלכות על המשטר ההידרולוגי. תהליכי גומלין נוספים אמורים לפעול בכיוון ההפוך כאשר הרכב הקרקע עשוי להשתנות עקב שטיפה מוגברת בשל השקיה, זירוז תהליכים פדוגניים טבעיים כמו היווצרות הסמקטיט, או קיבוע אשלגן ואמון הנוספים לקרקע מדשנים ומקולחים בשל הגברת מחזורי הרטבה וייבוש (סנדלר וחובריו, 2009). לפיכך, יש לבחון את התהליכים הגיאוכימיים של המלחה, חמצון וחיזור במי התהום הגבוהים ובחתך הבלתי רווי תוך התייחסות להרכב הקרקע. לכאורה, צפוי ההרכב המינרלוגי של קרקעות העמק, שרובן מקבוצת הורטיסול, להיות אחיד למדי. אולם מחקרים קודמים לא התייחסו להרכב של הסמקטיט, שהינו בעצם איליט-סמקטיט מעורב שכבות, לניתוח כמותי, ולהשתנות בקנה מידה מקומי הבוחן שימושי קרקע שונים. מאחר ונחל הקישון מנקז את העמק לכל אורכו ניתן להניח שלסחף שלו יהיה הרכב מינרלוגי המשקלל את סך כל המקורות באגן ההיקוות עם משקל יתר להרכב קרקעות העמק. במחקרים שנערכו בשנים האחרונות על סחף נחלי החוף נמצא הרכב מינרלוגי אחיד למדי של המקטע החרסיתי בסחף של הנחלים אלכסנדר, ירקון ותנינים. בנחל הקישון, לעומת זאת, נמצאו שינויים משמעותיים באותה תחנת איסוף בין שיטפון אחד למשנהו (וכטמן, 2005). בסחף של מורד נחל הקישון הוגדרו במהלך שתי עונות גשם שלושה מאספי חרסיות: מאסף עם שלטון של איליט-סמקטיט סמקטיטי ומעט קאוליניטי, התואם הרכב של ורטיסולים בעמק בפרט ובארץ בכלל; מאסף עם איליט-סמקטיט איליטי, קאוליניטי ומעט איליט, התואם הרכב של קרקעות שטופות כמו טרה רוסה; ומאסף ביניים שהוא ככל הנראה תערובת של שני מאספי הקצה הקודמים והדומה, ככלל, למאספי הנחלים האחרים. הופעת המאסף השני במורד הנחל אינה צפויה ומעלה אפשרות לגבי היווצרותו בקרקעות העמק בתהליכים פדוגניים שטרם זוהו.

2.3. מערכות אספקת המים בעמק יזרעאל - מאגרים, השקיה וניקוז

השדות החקלאיים בעמק יזרעאל המרכזי והמערבי משתרעים על שטח של כ- 250 אלף דונם וכוללים גידולי שדה של גרעינים, ירקות, כותנה ותיירס, מטעי שקדים, זיתים ורימונים ופרדסים. כמות המים המיועדת להשקיה באזור זה עומדת על כ- 70 מיליון מ"ק (מלמ"ק), מתוכם כ- 32 מלמ"ק קולחים שלישוניים מתשלובת הקישון, כ- 25 מלמ"ק קולחים שניוניים ממט"שים של ערי הסביבה, כ- 10 מלמ"ק מי שיטפונות + קולחים עצמיים של יישובי האזור, וכ- 4 מלמ"ק מים שפירים (אגודת המים מי עמק יזרעאל, מידע בע"פ). כמות ההשקיה היא בין 350 ל- 600 מ"ק לדונם לשנה, בהתאם לגידול.

בעמק יזרעאל קיימים מאגרי מים רבים לאיגום מי הקולחים ומי השיטפונות. מאגרים אלו כוללים כ- 70 מאגרי פרטיים של יישובי האזור המכילים תערובת של מי שיטפונות וקולחים עצמיים, 6 מאגרים של מפעל תשלובת הקישון של חברת מקורות המכילים קולחים ממט"ש חיפה וממט"ש עפולה, ומאגר אחד של אגודת המים המכיל קולחים שניוניים (אגודת המים מי עמק יזרעאל, מידע בע"פ). משטר המילוי של המאגרים מאופיין ברום מפלסים גבוה בחורף, הודות לכניסת מי גשם ושיטפונות מחד וצריכה מופחתת להשקיה מאידך, ונמוך בקיץ בשל השקיה מוגברת.

המאגר הגדול ביותר הוא מאגר מעלה קישון שהוקם ב- 1984, בעל נפח של 12 מלמ"ק ושטח פני מים של 1600 דונם (הלפרין וחוב', 2010). המאגר פועל כמאגר "פתוח" הקולט באופן רציף

קולחים שניוניים להשהיה ובאותו זמן מזרים קולחים, לאחר זמן שהות ממוצע של למעלה מ- 60 יום, להשקיה או לאגירה נוספת במאגרים פריפריאליים. המאגר מחולק ע"י סוללה לשני תתי-מאגרים שווים בגודלם, כאשר המעבר של הקולחים ממאגר הכניסה למאגר היציאה מתבצע בפתח המצוי בנקודה המרוחקת ביותר מנקודת הכניסה של הקולחים למאגר ומנקודת היציאה ממנו (הלפרין וחוב', 2010). המאגר השני בגודלו הוא מאגר כפר ברוך שנפחו 5.1 מלמ"ק ושטחו 680 דונם. המאגר הינו מאגר צד הנמצא בסמוך לסכר של נחל הקישון והוא משמש לאגירת מי שיטפונות בתקופת החורף ומי קולחים ממש"ש חיפה בהתאם לצורך. כאשר המאגר קולט קולחים הוא פועל כמאגר "סגור" המתמלא ונסגר למשך 30 יום על מנת להבטיח זמן שהות זה של הקולחים במאגר (הלפרין וחוב', 2010). הקולחים היוצאים משני המאגרים עוברים חיטוי ע"י הכלרה וסינון לפני שהם מסופקים לחקלאות. האגירה העונתית של הקולחים בתשלובת מתבצעת בארבעה מאגרים פריפריאליים הנמצאים בקרבת שטחי ההשקיה (הלפרין וחוב', 2010).

הקמת המאגרים הרבים הגדילה את כמויות המים להשקיה אך בד בבד החמירה את בעיות הניקוז בעמק. המאגרים בעלי השפעה רבה על משטר הזרימה במערכת ההידרולוגית הרדודה (גב, 1989). המאגרים כפר ברוך ומעלה הקישון, היושבים על מערכת הניקוז הטבעית של נחל הקישון, משבשים את הזרימה בשכבות הקרקע ויתכן שגם מצרים את עוביו של האקוויפר העליון עקב לחץ שהם יוצרים על גג השכבה (גב, 1989). תנאים אלו יוצרים הערמות מפלסים באקוויפר ובאופקים השעונים בחתך הקרקע, עליה של בסיס הניקוז, וכתוצאה מכך, תנאי ניקוז לקויים בשדות העמק והמלחה של המים והקרקעות.

על מנת לפתור את בעיות הניקוז בעמק הותקנו כבר בשנות ה- 80 מערכות ניקוז רדודות במעלה אגן קישון עליון צפוני, ובפרט בחלקות שבמעלה מאגר כפר ברוך. מערכות אלו כללו נקזים בעומק של 0.8 מ' שסודרו במרווחים אופקיים של 30 מ'. באזורים בהם המוליכות ההידראולית של האקוויפר הרדוד הייתה גבוהה, נקדחו גם בארות לעומק של 10-15 מ' לשאיבה וניקוז המים מהאקוויפר (Benyamini et al., 2005). בשנות ה- 90 הותקנו מערכות ניקוז משולבות שכללו את רשת הנקזים הרדודה (0.8 מ') ורשת נקזים נוספת בעומק של 2-3 מ', בה המרווח האופקי בין צינורות הניקוז הוא 60-120 מ' (Mirlas et al., 2006). בנוסף, הוקמה רשת של בארות עזר בעומק של 6-10 מ' ובקוטר של 0.6 מ' שחיברו בין מערכת הניקוז התחתונה ובין האקוויפר (Mirlas et al., 2006). עומד המים הארטזי באקוויפר הרדוד גורם לעליית מי התהום שבו למערכת הניקוז התחתונה, הנמצאת מעליו (Mirlas et al., 2006). מערכות הניקוז מעבירות את עודפי המים אל נחל הקישון (הלפרין ואחרים, 2012).

3. שיטות העבודה

המחקר הנוכחי בדק את הרכב המים והקרקות במערכת ההידרולוגית הרדודה במרכז עמק יזרעאל. דוגמאות מים נלקחו ממאגרי מעלה קישון וכפר ברך, מפיזומטרים קרובים למאגר מעלה קישון החודרים אל אופקי קרקע רדודים, ומקידוחים אל האקוויפר העליון. הקרקעות נדגמו לאורך שלושה חתכים, המתחילים סמוך למאגרים ומסתיימים במרחק מאות מטרים במעלה השטח. בנוסף נדגמו קרקעות בלתי מעובדות כ- 700 מ' מדרום למאגר מעלה קישון. מפת נקודות דיגום המים והקרקות מוצגת בתרשים 1. שיטות השדה והמעבדה שננקטו מפורטות להלן.

3.1. שיטות שדה

דיגום המים במערכת ההידרולוגית הרדודה

דיגום המים בתת הקרקע כלל דיגום של שישה פיזומטרים בעומקים שונים מדרום ובצמוד למאגר מעלה קישון ודיגום של 14 קידוחי תצפית רדודים מצפון לנחל הקישון שנקדחו ותוארו ע"י גב (1989). ששת הפיזומטרים שנבדקו הותקנו ע"י התחנה לחקר הסחף של משרד החקלאות והס מרוכזים בשתי נקודות המרוחקות כ- 160 מ' האחת מהשנייה (תרשים 1). בכל נקודה מותקנים 3 פיזומטרים: הפיזומטר העליון (מסומן כ- A) בעל מסננים בעומק 0.5-2 מ', הפיזומטר התיכון (מסומן כ- B) בעל מסננים בעומק 4-5 מ' והפיזומטר התחתון (מסומן כ- C) בעל מסננים בעומק 6-7 מ' בנקודה 1 ו- 10-11 מ' בנקודה 2 (טבלה 1). קידוחי התצפית מפוזרים בשטח השדות המעובדים שמצפון למאגר מעלה קישון וממערב למאגר כפר ברך (תרשים 1). עומק הקידוחים משתנה בטווח 4.8-22 מ' אך רוב הקידוחים הינם בעומק של כ- 10 מ'. על מנת להשמיש את הקידוחים, שבחלקם לא נוטרו מאז שנות ה-80, הקידוחים סומנו מחדש ועברו שאיבות ניקוי עד לקבלת מים צלולים לפני מועד הדיגום.

הדיגום של הפיזומטרים כלל מדידת מפלס המים, שאיבת המים מהפיזומטר באמצעות משאבה פריסטלטיית עד לריקון הפיזומטר או התייצבות המפלס, מדידת קצב עליית מפלס המים עד הגעתו למפלס הראשוני שנמדד, דיגום המים לאנליזות השונות ומדידת הפרמטרים: טמפ', חמצן מומס (DO), מוליכות חשמלית (EC), הגבה (pH), ופוטנציאל חימצון-חיזור (Eh), באמצעות מכשיר מדידה רב-ערוצי של חברת WTW.

דיגום הקידוחים כלל מדידת מפלס המים, שאיבת שלושה נפחי מים בקידוח באמצעות משאבת ניקה, דיגום המים לאנליזות השונות ומדידת הפרמטרים: טמפ', חמצן מומס (DO), מוליכות חשמלית (EC), הגבה (pH), ופוטנציאל חימצון-חיזור (Eh), ומדידת קצב עליית מפלס המים עד הגעתו למפלס הראשוני שנמדד (מבחן שיוב).

דיגום מי המאגרים כלל דיגום של שלושה פרופילי עומק במרכז המאגרים, בצפיפות דיגום של כל 1 מ': 1. במרכז מאגר הכניסה של מעלה קישון; 2. במרכז מאגר היציאה של מעלה קישון; ו- 3. במרכז מאגר כפר ברך (תרשים 1). ההגעה למרכז המאגר נעשתה באמצעות סירת מנוע של חברת מקורות. המים לאורך עמודת המים נשאבו באמצעות משאבה פריסטלטיית, נדגמו לאנליזות השונות, והפרמטרים טמפ', חמצן מומס (DO), pH ופוטנציאל חימצון-חיזור (Eh) נמדדו

באמצעות מכשיר מדידה רב-ערוצי של חברת WTW בכוס מדידה ייעודית. תוצאות פרופילי העומק הוצגו בדוח המסכם של השנה הראשונה (גורן וסנדלר, 2012) ובעבודה הנוכחית מוצגות רק אנליזות בודדות של תוצאות אלו. בנוסף נדגמו המים מברזי היציאה של המאגרים מעלה קישון וכפר ברוך בתקופה בה מאגר כפר ברוך הכיל רק מי נגר ולא קולחים.

דיגום הקרקעות

הקרקעות נדגמו בשני מועדי דיגום, ב- 6.11.11 וב- 30.4.12, לאורך שלושה חתכים, המתחילים סמוך למאגרים ומסתיימים במרחק מאות מטרים במעלה השטח. סביב מאגר מעלה קישון, שהינו המאגר הגדול בעמק, נדגמו שני חתכים: (א) חתך מדרום למאגר. נקודת הדיגום הראשונה נמצאת בחלקת הניסוי עם הפיזומטרים של התחנה לחקר הסחף בסמוך לסוללת המאגר והחתך נמשך דרומה במעלה השטח המעובד. שתי דוגמאות מרוחקות נלקחו מאזור של מחנה צבאי נטוש בין עצי אקליפטוס ומייצגות קרקע לא מעובדת. (ב) חתך מצפון למאגר בכיוון צפון מערב במעלה שלוחה מתונה. הנקודה הסמוכה למאגר נמצאת צפונית לתעלת ניקוז רחבה המקיפה את החלק הצפוני של המאגר (בניגוד לצד הדרומי). חתך נוסף נדגם דרומית למאגר כפר ברוך בשדה המתחיל ליד נחל קישון, המקיף בצד זה את המאגר, ועולה לכיוון מושב היוגב. הדיגום הראשון התבצע לאחר יומיים גשומים. בחתך שנדגם מדרום למאגר מעלה קישון הקרקעות היו רוויות מים ואילו בשאר המקומות הובחנה רטיבות רק בסנטימטרים העליונים קרוב לפני השטח. בכל נקודה נדגמו שני עומקים: 0-20 ס"מ ו- 30-50 ס"מ. העומק העליון נדגם משולי בור שנחפר באמצעות טורייה. לאחר מכן הועמק הבור בעשרה ס"מ נוספים והעומק התחתון נדגם באמצעות מקדח ידני. מכל עומק נדגמו כ- 2 ק"ג. בנקודת דיגום אחת נדגם בנוסף קרום התייבשות שעוביו כ-2 ס"מ.

3.2. שיטות מעבדה

אנליזות של מים

1. הקטיונים העיקריים נמדדו באמצעות מכשיר ICP-AES מדגם Perkin Elmer Optima 3300.
2. יסודות הקורט נמדדו באמצעות מכשיר ICP-MS מדגם Perkin Elmer Elan 6000.
3. האניונים העיקריים נמדדו באמצעות מכשיר יון כרומטוגרף מסוג Dionex ICS-2000.
4. האלקליניות נמדדה ע"י טיטרציה פוטנציומטרית עם 0.02N HCl.
5. האמוניום נמדד באמצעות מכשיר Turner Designs Aquafuor עפ"י הפרוטוקול של Holmes et al., 1999.
6. הפחמן האורגני המומס (DOC) והפחמן האנאורגני המומס (DIC) נמדדו באמצעות מכשיר TOC-V analyzer של חברת Shimadzu.

אנליזות של קרקע

1. עבוד דוגמאות הקרקע - שקיות הדיגום שהו ימים אחדים בתנור בטמפרטורה של 50°C עד להתייבשות מלאה. הקרקע היבשה פוצלה במפצל גדול ומחצית אחת נזרקה. המחצית השנייה נכתשה בעלי ומכתש כדי לפורר אגרגטים והחומר הכתוש נופה בנפה של 2 מ"מ. התהליך נשנה כדי להגדיל את כמות המקטע $2 > \text{מ"מ}$ אך בכל הדוגמאות נותרו אגרגטים קשיחים שלא התפוררו. הבדיקות נערכו על מקטע הקרקע $2 > \text{מ"מ}$.
2. עיסה רוויה - דוגמאות קרקע של 100 גר' נשקלו בתוך כוסות מדידה. אל הקרקע הוספו מים מזוקקים עד לקבלת עיסה רוויה. כמות המים שנוספה נמדדה בשקילה.
3. ערכי pH ומוליכות חשמלית במיצוי עיסה רוויה - הפרדת התמיסה מהעיסה הרוויה נעשתה באמצעות צנטריפוגה וערכי ה-pH והמוליכות נמדדו בתמיסה באמצעות מכשיר מדידה רב-ערוצי של חברת WTW. בנוסף, נערכה אנליזה כימית על מי מיצוי העיסה הרוויה בדוגמאות הקרקע מהדיגום השני.
4. ריכוזי היונים המסיסים בקרקע - דוגמאות קרקע של 3 גר' נשקלו בתוך מבחנות צנטריפוגה של 50 מ"ל ואליהן הוספו 30 מ"ל של מים מזוקקים (יחס 1:10). הדוגמאות טולטלו במשך 24 שעות ולאחר מכן המים הופרדו מהסדימנט באמצעות צנטריפוגה ונלקחו לאנליזה כימית של הקטיונים והאניונים כמפורט למעלה.

4. תוצאות

4.1. ההרכב הכימי של המים במערכת ההידרולוגית הרדודה

הרכב המים במערכת ההידרולוגית הרדודה נבחן באמצעות סדרה של פיזומטרים וקידוחי תצפית, כפי שתואר בפרק 3.1. על סמך הנתונים הליתולוגיים והידרולוגיים הקיימים ברשותנו קשה לקבוע היכן עובר הגבול בין אופקי המים בקרקע לבין מי התהום באקוויפר החלוקים העליון. לצורך ניתוח הנתונים בעבודה זו נקבע עומק של 6 מ' כגבול בין שתי היחידות. כלומר, פיזומטרים וקידוחים שעומקם פחות מ-6 מ' יתוארו כמייצגים מי קרקע, ופיזומטרים וקידוחים שעומקם מעל 6 מ' יתוארו כמייצגים את האקוויפר העליון. ריכוזי היונים העיקריים ומדדי איכות המים מפורטים בטבלה 3 וריכוזי יסודות קורט ויחסי היונים העיקריים מפורטים בטבלה 4.

הכלוריד והנתרן הם היונים העיקריים בכל דוגמאות המים שנבדקו וריכוזיהם מראים התאמה לינארית עם סך המלחים המומסים (TDS) (תרשימים 2A, 2C). התאמה זו מלמדת שריכוזי המלחים במי הקרקע ובאקוויפר מושפעים בעיקר מתהליכי אידוי ושטיפה של מלחים. המים שנדגמו במאגרי מעלה קישון וכפר ברוך, הן מי הקולחים והן מי הנגר, מהווים את מרכיב הקצה המתוק. ריכוזי הכלוריד בקולחים משתנים בטווח $340\text{--}410\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ וריכוזי הכלוריד שנמדדו במי הנגר שנאגמו במאגר כפר ברוך הינו כ- $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (טבלה 3). מנגד, מי הקרקע מתאפיינים בריכוזי מלחים גבוהים והם מהווים את מרכיב הקצה המלוח. ריכוזי הכלוריד במי הקרקע משתנים בטווח $4,000\text{--}12,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ריכוזי הנתרן בטווח $3,000\text{--}5,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ וסך המומסים (TDS) בטווח $10,000\text{--}24,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (טבלה 3, תרשימים 2A, 2C). ריכוזים גבוהים אלו נובעים מכך שהמים באופקי הקרקע העליונים חווים תהליכי אידוי והמסת מלחים ששקעו

לפני כן בפני השטח. בשני קידוחים שדוגמים מי קרקע, קידוח 708 שעומקו 5.5 מ' ופיזומטר P2-A שעומקו 2 מ', נמדדו ריכוזי מלחים נמוכים יותר, הדומים להרכב המים באקוויפר. באקוויפר ריכוזי הנתרן והכלוריד יושבים על קו המגמה בין שני מרכיבי הקצה ומעידים על ערבוב ביניהם. ריכוזי הכלוריד באקוויפר משתנים בטווח $1100-2400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ וריכוזי הנתרן משתנים בטווח $390-1150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. ריכוזים אלו קרובים יותר אל הריכוזים במי הנגר לעומת הריכוזים במי הקרקע, תצפית המעידה על תרומה עיקרית של מי גשם ונגר ותרומה משנית של מי הקרקע המלוחים. בשני קידוחים אל האקוויפר, קידוח 713 ופיזומטר P1-C נמדדו ריכוזים גבוהים מהטווח המצוין המעידים על תרומה גדולה יותר של מי קרקע (טבלה 3, תרשים 2A).

קווי המגמה עליהם יושבים ריכוזי הכלוריד והנתרן במי הקרקע והאקוויפר נמצאים מעל קו האידוי, כלומר השיפוע שלהם גדול יותר (תרשימים 2A, 2C). תצפית זו מלמדת על תוספת של כלוריד ונתרן מהמסה של מלחים, מעבר לעליית הריכוז כתוצאה מאידוי. כאשר מתמקדים באזור של מי האקוויפר ובוחנים את הריכוזים האקוויוולנטיים של הכלוריד והנתרן כנגד ה-TDS ניתן לראות שריכוזי הכלוריד במי האקוויפר גבוהים בכ- $12-15 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ מהריכוזים הצפויים עפ"י קו האידוי ואילו ריכוזי הנתרן בחלק מהקידוחים גבוהים בכ- $12-13 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ מהריכוזים הצפויים עפ"י קו האידוי ובקידוחים אחרים הם קרובים יותר לקו האידוי (תרשימים 2B, 2D). העלייה האקוויוולנטית בריכוזי הכלוריד והנתרן ביחס לקו האידוי מלמדת על המסה של NaCl. הוספת קו המגמה של עליית הכלוריד כנגד TDS כתוצאה מהמסה של הליט מראה שעליית ה-TDS אינה יכולה להיות מוסברת ע"י המסת הליט בלבד ושעליית ריכוז ה-TDS נובעת משילוב של אידוי והמסה של מלחים. עפ"י ריכוזי הכלוריד במי האקוויפר ושיפוע קו המסת ההליט ניתן להעריך שמי האקוויפר מאודים פי 1.5-5 ממי הנגר. ריכוזי הנתרן כנגד ריכוזי הכלור מראים גם כן שמי הקרקע וחלק מקידוחי האקוויפר אינם יושבים על קו האידוי והם מאופיינים בעודף של כלור ביחס לנתרן (תרשים 3A).

היחס האקוויוולנטי Na/Cl במי המאגרים הינו 0.85 במי הנגר ו- 0.96-1.11 במי הקולחים (טבלה 4, תרשים 3B). אידוי של מים אלו ישמור על אותם יחסים אקוויוולנטיים והמסה של מלחי הליט תקרב את היחס ל-1. ברוב נקודות הדיגום של מי הקרקע והאקוויפר נמצאו יחסי Na/Cl נמוכים מהיחס במי הנגר (תרשים 3B). ערכים אלו מעידים אף הם על עודף של כלוריד ביחס לנתרן. כמו כן הם מרמזים שהמקור העיקרי לכלוריד ולנתרן במי האקוויפר אינו המסה של מלחי הליט המצויים בסדימנטים הבונים את האקוויפר, אלא בחלחול של מים מפני השטח במרחב האקוויפר (תרשים 3B).

הברומיד (Br^-) הינו אניון קונסרבטיבי ועל כן הוא יכול להעיד על מקורות המים והמלחים. ריכוזי הברומיד במי האקוויפר ובמי הקרקע עולים בהתאמה עם ריכוזי הכלוריד אולם ברוב הדוגמאות קיים עודף של כלוריד ביחס לקו האידוי, הנובע כאמור מהמסת הליט (תרשים 4A). היחס המשקלי Cl/Br בדוגמאות מי האקוויפר, מי הקרקע ומי הנגר משתנה בטווח 200-350 (תרשים 4B). ערכים אלו דומים ליחס במי הים שהינו כ- 1:286 (Herut et al., 1990) ומעידים על מקור

ימי של המלחים. בשונה מהם, במי הקולחים היחס המשקלי Cl/Br נמוך באופן משמעותי ומשתנה בטווח 50-60 (תרשים 4B). יחס זה מלמד על תוספת של ברומיד במי הקולחים של תשלובת הקישון ויכול להוות סמן למי הקולחים. העובדה שבמי הקרקע ובמי האקוויפר נמצא יחס קרוב ליחס הימי וגבוה באופן ניכר מהיחס בקולחים מלמדת שהמים שנדגמו בתת הקרקע אינם מכילים אחוז משמעותי של מי קולחים. ראוי לציין שכל דוגמאות המים נדגמו בסוף עונת החורף (מרץ-יוני), בה ההשקיה הינה מוגבלת ושדות רבים אינם מושקים, ועל כן עיקר תרומת המים היא ממי גשם ונגר. סביר להניח שבמהלך הקיץ התרומה של הקולחים למים בתת הקרקע גבוהה יותר ונושא זה ייבדק בהמשך המחקר.

ריכוזי הסולפאט במי האקוויפר משתנים בטווח רחב של $0.4-12.6 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ (טבלה 3, תרשים 5A). קידוח 713 ופיזומטר P1-C חורגים מטווח זה וריכוזיהם הגבוהים, אשר התקבלו גם עבור יונים אחרים, מעידים על תרומה גדולה של מי קרקע לקידוחים אלו. במי הקרקע ריכוזי הסולפאט גבוה באופן משמעותי והוא משתנה בטווח צר של $40-45 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$. הטווח הרחב של ריכוזי הסולפאט במי הקרקע ובאקוויפר ללא התאמה לשום יון אחר מרמזת על תהליך של חיזור סולפאט באקוויפר. אפשרות זו תיבדק בהמשך המחקר. כאשר מתמקדים בריכוזי הנתרן כנגד ריכוזי הסולפאט בקידוחי האקוויפר רואים שברוב הקידוחים קיים עודף של נתרן לעומת סולפאט ביחס לקו האידיאלי (תרשים 5B). עודף זה נובע כפי הנראה מתרומה של נתרן כתוצאה מהמסת הליט.

ריכוזי הסיידן במי האקוויפר משתנים בטווח $7-21 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ($140-420 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). במי הקרקע נמדדו ריכוזי סידן גבוהים יותר וטווח הריכוזים רחב מאד, $6-74 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ($120-1480 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (טבלה 3, תרשים 6A). ריכוזי הסיידן כנגד ריכוזי הכלוריד מראים שדוגמאות מי הקרקע אינן יושבות על קו האידיאלי אלא על קו מגמה אחר בו ניכרת תוספת של כלוריד ביחס לסיידן (תרשים 6A). דוגמאות מי האקוויפר קרובות לקו האידיאלי אך הן סוטות ממנו לכיוון מי הקרקע. היחס האקוויולנטי Ca/Cl ברוב דוגמאות מי האקוויפר ובכל דוגמאות מי הקרקע נמוך מהיחס במי הנגר ובקולחים (תרשים 6B). תצפיות אלו נובעות כפי הנראה מעודף של כלוריד כתוצאה מהמסת מלחים. בדוגמאות מי הקרקע היחס האקוויולנטי Ca/Cl עולה עם עליית ריכוזי הכלוריד (תרשים 6B). תצפית זו מעידה על תהליך נוסף שמתקיים בקרקע אשר גורם לעליית ריכוזי הסיידן במי הקרקע. ככלל, תוספת של סידן יכולה להיווצר כתוצאה מהמסת מינרלים המכילים סידן כגון גבס וקלציט או משחרור סידן בתהליך חילוף קטיונים. בשלב זה לא ברור מהו התהליך שמתקיים ושאלה זו תיבדק בהמשך המחקר.

בחינת ריכוזי ה- Ca^{2+} כנגד ריכוזי ה- SO_4^{2-} וה- HCO_3^- מלמדת שלא קיימת התאמה לינארית בין ה- Ca^{2+} לבין אניונים אלו ושהם מושפעים מתהליכים נוספים מלבד תהליך האידיאלי (תרשימים 6D, 6C). ריכוזי הסיידן הגבוהים במי הקרקע מלווים בריכוזים גבוהים של סולפאט ובריכוזים נמוכים של ביקרבונט. ריכוזי הביקרבונט במי הקרקע דומים לריכוזיהם במי הנגר (תרשים 6D). התנהגות זו של הביקרבונט במי הקרקע שונה מהתנהגות היונים העיקריים האחרים (Cl^- , SO_4^{2-}), Br^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), שריכוזיהם במי הקרקע גבוהים באופן ניכר מריכוזיהם במי הנגר.

ומהווים את מרכיב הקצה המלוח. ריכוזי הביקרבונט במי האקוויפר גבוהים מריכוזיהם במי הנגר ובמי הקרקע (תרשים 6D).

ריכוזי הסיליקה במי האקוויפר גבוהים אף הם מהריכוזים במי הנגר ובשתי דוגמאות מי קרקע שנבדקו (תרשים 7). עליה מקבילה בריכוזי הסיליקה ובריכוזי הביקרבונט יכולה להיווצר מבליה של מינרלים סיליקטים. היחס ביניהם תלוי בהרכב המינרלים שעוברים את תהליך הבליה. נושא זה ייבדק בהמשך המחקר.

ריכוזי המגנזיום במי האקוויפר משתנים בטווח $6-21 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ והריכוזים במי הקרקע גבוהים יותר ומשתנים בטווח $24-98 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ (תרשים 8A). גם בריכוזי המגנזיום ניתן לראות עודף של כלוריד לעומת מגנזיום ביחס לקו האידיאלי הנובע מהמסה של מינרלי הלית. ריכוזי המגנזיום כנגד ריכוזי הסידן במי האקוויפר יושבים על קו ששיפועו 1 (תרשים 8B), כלומר ריכוזי המגנזיום שווים לריכוזי הסידן במי האקוויפר. במי הקרקע ריכוזי המגנזיום גבוהים מריכוזי הסידן, תצפית המעידה על תוספת של מגנזיום למי הקרקע. גם במי האקוויפר ניתן לראות עודף של מגנזיום לעומת סידן ביחס לקו האידיאלי המעיד על תוספת של מגנזיום למים.

ככלל, ריכוזי האשלגן במי האקוויפר ובמי הקרקע נמוכים מהריכוז שנמדד במי הנגר שהינו $0.17 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ($7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, טבלה 3, תרשים 9). האשלגן נוטה להיספח על גבי חרסיות ועל כן ריכוזי במי תהום על פי רוב נמוכים. בקידוח אחד, קידוח 713, נמדד ריכוז חריג מאד של אשלגן של $1.9 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ($75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) ובשני קידוחים נוספים נמדדו ריכוזי מעט יותר גבוהים מהריכוז במי הנגר, קידוח 709 ופיזומטר P1-C (תרשים 9). ריכוזי האשלגן במי הקולחים של תשלובת הקישון גבוהים באופן משמעותי מהריכוזים במי הנגר ובמי התהום ומשתנים בטווח $1.13-1.18 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ($44-46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, טבלה 3, תרשים 9). הריכוזים הגבוהים של האשלגן במי הקולחים תורמים אשלגן לקרקע בשדות המושקים. כפי שתואר עפ"י היחס Cl/Br המים שנדגמו בתת הקרקע בסוף עונת החורף (מרץ-יוני) אינם מכילים אחוז משמעותי של מי קולחים. סביר להניח שבמהלך הקיץ התרומה של הקולחים למים בתת הקרקע גבוהה יותר וההשפעה של תרומה זו על ריכוזי האשלגן במי הקרקע תיבדק בהמשך המחקר.

ריכוז הניטרט, NO_3^- , שנמדד במי הנגר במאגר כפר ברוך הינו $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ובמי הקולחים נמדדו ריכוזי ניטרט בטווח $13-54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (טבלה 3, תרשים 10A). ריכוזי הניטרט שנמדדו במי הקרקע ובאקוויפר משתנים בטווח רחב של $5-805 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; ברוב הדוגמאות הריכוזים גבוהים מהריכוזים במי הנגר ובקולחים אולם בחלק מהדוגמאות הריכוזים נמוכים יותר. במי הקרקע והאקוויפר הניטרט הוא הצורן הדומיננטי של החנקן וניתן להתייחס אליו כאל הצורן היחיד. לעומת זאת, בקולחי תשלובת הקישון נמדדו ריכוזים גבוהים יחסית של חנקן בצורותיו היותר מחזוריות, ניטריט ($3-30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NO_2^-) ואמוניום ($16-30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_4^+). הניטריט והאמוניום מתחמצנים והופכים לניטרט ועל כן מוסיפים ניטרט למי הקרקע והאקוויפר. על כן, יש לבחון את ריכוז החנקן הכולל במים. ריכוז החנקן הכולל ברוב דוגמאות מי הקרקע והאקוויפר גבוה מהריכוז במי הנגר (תרשים 10B). במספר קידוחים נמצאו ריכוזי חנקן נמוכים מהריכוז שנמדד במי הנגר וכן מריכוזים אופייניים במי תהום טבעיים. ריכוזים אלו מרמזים על תהליך דניטריפיקציה שמתקיים כפי הנראה באזורים מסוימים באקוויפר. ברוב הקידוחים ריכוזי החנקן

הכולל משתנים בטווח $4-50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ואילו בקולחים ריכוזי החנקן הכולל משתנים בטווח צר של $28-33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (תרשים 10B). בקידוח 707 ובפיזומטרים P1-A ו-P2-A התקבלו ריכוזי חנקן כולל גבוהים במיוחד של מעל $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. תוספות חנקן למים בתת הקרקע, מעבר לחנקן שמקורו במי הקולחים, יכולות להיות מדשני חנקן המוספים לשדות ומזיהום נקודתי של ביוֹב ביתי או חקלאי (שפכי רפתות וכד'). נושא זה ייבדק בהמשך המחקר בעזרת ההרכב האיזוטופי של הניטרט והאמוניום.

ריכוזי הפחמן האורגני המומס (DOC) במי האקוויפר משתנים בטווח $0.6-6.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ובמי הקרקע משתנים בטווח $3-13.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (טבלה 3, תרשים 10C). בקולחים ריכוזי ה-DOC גבוהים יותר ומשתנים בטווח $13-18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ואילו במי הנגר נמדד ריכוז של $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. הריכוזים הנמוכים במי האקוויפר ביחס למי הנגר ולקולחים מעידים על חמצון של החומר האורגני אולם הריכוזים הגבוהים במי הקרקע ובחלק מקידוחי האקוויפר מלמדים על תהליך חמצון איטי. ריכוזי ה-DOC כנגד ריכוזי החנקן הכולל אינם מעידים על התאמה לינארית ביניהם (תרשים 10D). יחד עם זאת, בשני פיזומטרים שדוגמים את מי הקרקע נמדדו ריכוזים גבוהים במיוחד גם של חנקן כולל וגם של DOC ולעומתם בקידוחי אקוויפר שמכילים ריכוזים נמוכים של חנקן, גם ריכוזי ה-DOC נמוכים.

מבחינת יסודות הקורט, הבורון מופיע בריכוזים גבוהים יחסית המשתנים במי האקוויפר בטווח $160-2050 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ובמי הקרקע בטווח $540-4350 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (טבלה 4, תרשים 11A). ריכוזי הבריום והאבץ במי הקרקע דומים לריכוזים במי הנגר ובקולחים ואילו במי האקוויפר הם גבוהים יותר ומשתנים בטווח $36-338 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ו- $3-93 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, בהתאמה (טבלה 4, תרשימים 11B, 11C). בקידוח 711 נמדדו ריכוזים חריגים של בריום ($716 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) ואבץ ($288 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). ריכוזי הברזל והמנגן במי הקרקע נמוכים ודומים לריכוזיהם במי הנגר (תרשימים 12A, 12B). לעומת זאת, בקידוחי האקוויפר ריכוזי הברזל והמנגן משתנים בטווח רחב של $0-330 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ו- $0-377 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, בהתאמה. בקידוח 702 נמדד ריכוז ברזל חריג של $1430 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ובקידוח 709 נמדד ריכוז מנגן חריג של $771 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

4.2. ריכוזי היונים המסיסים בקרקעות והשתנותם כתלות במרחק ממאגרי הקולחים

כפי שתואר בפרק השיטות הקרקעות נדגמו בשדות מעובדים בשלושה חתכים שהתחילו סמוך למאגרי מעלה קישון וכפר ברוך והסתיימו במרחק מספר מאות מטרים במעלה השטח (תרשים 1). בנוסף נלקחו 2 דוגמאות משטח לא מעובד בקרבת עצי אקליפטוס המייצגות את הקרקע הטבעית (pristine soil). בכל נקודה נדגמו שני עומקים: 0-20 ס"מ ו- 30-50 ס"מ אולם מאחר שלא נמצאו הבדלים מהותיים ביניהם (גורן וסנדלר, 2012), לא תהיה לכך התייחסות בעבודה הנוכחית. על מנת לבחון השפעות עונתיות כתוצאה ממי גשם בחורף והשקיה בקולחים בקיץ נערכו שני מועדי דיגום, האחד בסוף הקיץ בנובמבר 2011 והשני בסוף החורף באפריל 2012, בהם נדגמו אותן נקודות באותו אופן.

ריכוזי היונים המסיסים בקרקעות נבדקו באמצעות מיצוי עם מים מזוקקים. הריכוזים המשקליים של היונים בשני מועדי הדיגום מפורטים בטבלה 5 והם נתונים ביחידות של מ"ג לק"ג קרקע. על מנת ללמוד על מקור היונים ועל המלחים בקרקע הריכוזים בתרשימים 13-17 נתונים ביחידות אקוויוולנטיות (מיליאקוויוולנט לק"ג קרקע).

הכלוריד והנתרן הם היונים המסיסים העיקריים בקרקע והם משתנים בקרקעות הבור בטווחים של $13-530 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ו- $64-474 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, בהתאמה, ובקרקעות המעובדות בטווחים של $16-4470 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ו- $240-2517 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, בהתאמה (טבלה 5). ככלל, ריכוזי הכלוריד והנתרן בקרקעות המעובדות גבוהים מריכוזיהם בקרקעות הבור שנדגמו באותו מועד (תרשים 13A). בקרקעות הבור קיים הבדל בין שני מועדי הדיגום כאשר ריכוזי היונים המסיסים בנובמבר נמוכים מהריכוזים באפריל. תצפיות אלו הפוכות להנחת העבודה הראשונית שהדיגום בנובמבר, שאמור היה לייצג את סוף הקיץ, יהיה בעל ריכוזי מלחים גבוהים מהריכוזים בדיגום אפריל, שאמור היה לייצג את סוף החורף. בדיקה של כמויות הגשם היומיות שירדו בחמש תחנות באזור המחקר מלמדת שדיגום נובמבר התקיים יומיים לאחר אירוע גשם באזור ואילו דיגום אפריל התקיים לאחר כחודש ללא גשם (תרשים 14). עדויות אלו מלמדות שהרכב המלחים בקרקע משתנה בהתאם למידת השטיפה באותו זמן ושלקרקע אין "זיכרון" ארוך טווח.

ברוב דוגמאות הקרקע קיים עודף של נתרן על פני כלוריד (תרשים 13A). תמונה זו הפוכה למגמה במי הקרקע והאקוויופר בהם יש עודף של כלוריד על פני נתרן והן משתלבות ביחד ומעידות על עיכוב של הנתרן בקרקע כתוצאה מתהליכי השקעה של מינרלים או ספיחה.

ריכוזי הנתרן כנגד ריכוזי הסולפאט מראים מגמת עלייה בקרקעות המעובדות כאשר ריכוזי הנתרן גבוהים באופן ניכר מריכוזי הסולפאט (תרשים 13B). ריכוזי הסידן אינם מראים התאמה עם ריכוזי הכלוריד והסולפאט וברוב הדוגמאות קיים עודף של סידן ביחס לאניונים אלו (תרשימים 13C, 13D). בשני מועדי הדיגום ריכוזי הסידן ברוב דוגמאות הקרקעות המעובדות נמוכים מהריכוזים בקרקעות הבור. בבחינת ריכוזי הנתרן כנגד ריכוזי הסידן רואים שבקרקעות הבור קיים עודף של סידן ביחס לנתרן ואילו בקרקעות המעובדות המגמה מתהפכת וקיים עודף של נתרן ביחס לסידן (תרשים 15A). ריכוזי ה- Sr^{2+} כנד ריכוזי ה- Ca^{2+} ברוב דוגמאות הקרקע מראים התאמה לינארית ביניהם (תרשים 15B). בדוגמאות הקרקעות המעובדות שנדגמו באפריל ניכרת עליה בריכוזי ה- Sr^{2+} ביחס לקו המגמה.

ריכוזי האשלגן בקרקעות משתנים בטווח $12-46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($0.30-1.18 \text{ meq}\cdot\text{kg}^{-1}$) והם אינם משתנים באופן מהותי בין מועדי הדיגום ובין קרקעות הבור לקרקעות המעובדות (טבלה 5, תרשים 16A). ככלל, ריכוזי המגנזיום המסיסים בדיגום אפריל גבוהים מהריכוזים בדיגום נובמבר הן בקרקעות הבור והן בקרקעות המעובדות (תרשים 16B). ברוב דוגמאות הקרקעות המעובדות נמדדו ריכוזי מגנזיום נמוכים מהריכוזים בקרקעות הבור. יחד עם זאת, במספר דוגמאות של קרקעות מעובדות נמדדו ריכוזים גבוהים של מגנזיום מלווים בריכוזים גבוהים של כלוריד כאשר גם כאן ריכוזי המגנזיום בדיגום אפריל גבוהים מהריכוזים בדיגום נובמבר (תרשים 16B איור פנימי).

ריכוזי הברומיד בקרקעות מראים התאמה לינארית טובה עם ריכוזי הכלוריד אולם בקרקעות המעובדות קיים עודף של ברומיד לעומת כלוריד ביחס לקו המגמה שמתחיל מראשית הצירים ועובר דרך דוגמאות קרקעות הבור (תרשים 16C). יחסים אלו בין הברומיד לכלוריד בקרקעות המעובדות דומים ליחסים בין הנתרן לכלוריד שתוארו לעיל. ריכוזי הניטרט בקרקעות אינם מראים התאמה עם הכלוריד והם אינם משתנים באופן מהותי בין מועדי הדיגום ובין קרקעות הבור לקרקעות המעובדות (תרשים 16D).

השתנות ריכוזי היונים המסיסים עם המרחק מהמאגרים נבדקה בשני חתכים האחד מדרום למאגר מעלה קישון (MK south) והשני מצפון למאגר מעלה קישון (MK north). ריכוזי היונים העיקריים Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- מראים עליה חדה בדוגמאות הקרקע שנלקחו בנקודה הקרובה ביותר למאגר, במרחק של 60 מ', בשני מועדי הדיגום (תרשימים 17,18). רחוק יותר מהמאגר לא נמצאו הבדלים משמעותיים בריכוזי היונים עם המרחק, למעט בנקודה במרחק של 160 מ' מצפון למאגר בה נמדדו ריכוזים מעט יותר גבוהים של Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- . נתונים אלו מלמדים על השפעת מאגר הקולחים מעלה קישון על ריכוזי היונים המסיסים בקרקעות שבקרבתו.

4.3. ההרכב המינרלוגי של הקרקעות

הרכב כולל

המרכיבים העיקריים בקרקעות הם פילוסיליקטים (חרסיות) וקוורץ בתכולה של כ-45% ו-40%, בהתאמה (טבלה 6). קלציט, פלדספר אשלגני ופלגיוקלז נוכחים בתחולה נמוכה מאד ועד כ-10% ואילו תכולת דלומיט מזערית. פיק זעיר של המטיט זוהה בשלושה מדגמים ושל אמפיבול בשני מדגמים.

המקטע החרסיתי

דיגום אוקטובר 2011 (טבלה 7): בכל מדגמי הקרקע איליט-סמקטיט (IS) הוא המינרל העיקרי וטווח תכולתו הוא 60-90% כאשר קאוליניט הוא המינרל המשני וטווח תכולתו 5-15%. איליט, כלוריט וקוורץ נוכחים כעקבות בכל הדוגמאות. בחלק מהמדגמים נוכחים כעקבות, ככל הנראה, קאוליניט-סמקטיט ופלדספר אשלגני. ערכי האוכף, המציינים בקרוב את מידת האיליטיזציה של ה-IS, הם בתחום רחב של יותר מ-1 ל-0.43 כאשר בקרקעות הבור ערכי האוכף הם בתחום צר של 0.68 ל-0.43. ההבדל העיקרי בין מדגמי פני שטח למדגמי עומק הוא בערכי האוכף כאשר בכמחצית מהאתרים הערכים בעומק נמוכים יותר, בכמחצית הם דומים מאד. יוצא דופן הוא האתר הסמוך מדרום למאגר מעלה קישון בו ערך האוכף בעומק גבוה במידה ניכרת מזה של פני השטח.

החתך מדרום למאגר כפר ברוך דומה בהרכב המקטע החרסיתי לזה שבקרקעות לא מעובדות, למעט האתר הקרוב למאגר שבו ערכי האוכף גבוהים במעט מאשר בשאר מדגמי החתך. לעומת זאת, בחתכים שמצפון ומדרום למאגר מעלה קישון חלים במקטע החרסיתי שינויים בולטים לעומת קרקעות הבור. בחתך מצפון למאגר רוב ערכי האוכף גבוהים מאשר בחתך כפר ברוך ובמיוחד בסמוך למאגר. בחתך שמדרום למאגר יורדת תכולת ה-IS ככל שמתרחקים מהמאגר

והוא נעשה איליטי יותר עד כדי ערכי אוכף של מעל 1. בנוסף לכך מופיעים במעלה החתך והרחק מהמאגר IS איליטי מסודר ופליגורסקיט בתכולה קטנה. דיגום אפריל 2012 (טבלה 8): ההרכב הממוצע של כל המדגמים בדיגום זה דומה לזה שבדיגום הקודם כאשר התכולה הממוצעת של IS היא 81 לעומת 83 בדיגום הקודם; ערך האוכף הממוצע הוא 0.65 לעומת 0.71; התכולה הממוצעת של קאוליניט היא 11.3 לעומת 10.2 ואילו כלוריט, איליט וקוורץ נוכחים גם בדיגום זה כעקבות ברוב המדגמים ובחלק מהמדגמים נוכח, ככל הנראה, קאוליניט-סמקטיט כעקבות. איליט-סמקטיט מסודר לא זוהה בצורה ודאית בדיגום זה אך לעומת זאת תכולת הפליגורסקיט עלתה פי שלושה באתר בו זוהתה בדיגום הקודם. שינוי בולט נוסף הוא הירידה בערכי האוכף בחלק ממדגמי חתך כפר ברוך לערכים הנמוכים מאלה שבמדגמי הבור.

5. דיון

5.1. השפעת הפעילות החקלאית בעמק יזרעאל על ההרכב הכימי של המים והמלחים

המסיסים בקרקע ובאקוויפר העליון

המים והקרקעות במערכת ההידרולוגית העליונה בעמק יזרעאל מושפעים במידה רבה מהפעילות החקלאית האינטנסיבית המתקיימת בפני השטח. מחזורי הרטבה ויבוש תכופים כתוצאה מהשקיה והשימוש בקולחים גורמים להצטברות של מלחים בפני הקרקע ולשטיפה של המלחים עם המים המחלחלים לאופקי הקרקע הרוויים ולאקוויפר העליון. בנוסף תוצאות המחקר מלמדות שמאגר מעלה קישון משפיע על הקרקעות שבקרבתו (במרחק של עד 100-200 מ') וגורם לעליית המליחות בהן.

המים באופקי הקרקע הרוויים ובאקוויפר העליון מלוחים ממקורות המילוי החוזר האפשריים שלהם – מי גשם, מי נגר ומי קולחים. עובדה זו באה לידי ביטוי בריכוזי ה- Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ובסך המלחים המומסים (TDS) (תרשימים 2, 6, 8). התהליכים העיקריים המכתיבים את עליית מליחות המים (ה-TDS) הם שילוב של אידיוי והמסת מלחי הליט (NaCl). תהליכים אלו זוהו ותוארו בשדות עמק יזרעאל כבר בשנות ה-80 (מיכלסון ומרכדו, 1988; גב, 1989). בנוסף, התנהגות היונים השונים במי הקרקע ובאקוויפר מלמדת שהרכב המים משתנה כתוצאה משילוב של מספר תהליכים גיאוכימיים שמתרחשים בעוצמות שונות במהלך הזרימה בקרקע ובאקוויפר. עליית ריכוזי הסיידן והסולפאט במי הקרקע מרמזת על המסה של גבס; השתנות ריכוזי הסולפאט במשרעת גדולה המתחילה מריכוזים נמוכים מאוד, ללא התאמה עם מרכיב אחר, מרמזת על חיזור סולפאט; בדומה, השתנות ריכוזי הניטרט במשרעת גדולה המתחילה מריכוזים נמוכים מאוד, ללא התאמה עם מרכיב אחר, מרמזת על דניטריפיקציה; עליה של ריכוזי הביקרבוט והסיליקה במי האקוויפר מרמזת על בליה של מינרלים סיליקטיים; וירידה של ריכוזי ה-DOC במי הקרקע והאקוויפר מרמזת על חמצון של חומר אורגני. בהמשך המחקר יערכו חישובים כמותיים ויבדקו פרמטרים נוספים כגון הרכבים איזוטופיים לאשש או להפריך את קיומם של תהליכים אלו במערכת הנחקרת.

המים באופקי הקרקע הרוויים (מכונים בעבודה זו "מי הקרקע") שונים בהרכבם ממי האקוויפר. ראשית ריכוזי היונים העיקריים וה-TDS במי הקרקע משתנים במשרעת גדולה מאד ואילו במי

האקוויפר השונות קטנה יותר. תוצאות אלו מעידות על השונות הגדולה בעוצמת התהליכים הגיאוכימיים המתקיימים באופקי הקרקע שיכולה להיות גם שונות עיתית וגם שונות מרחבית בקנה מידה קטן. האקוויפר לעומת זאת הוא גוף מים גדול יותר, וכפי הנראה רציף, ועל כן הוא מראה מיצוע של התהליכים המכתיבים את הרכב המים המגיעים אליו. העובדה שרוב דוגמאות מי האקוויפר מרוכזות בענן אחד מבחינת ריכוזי היסודות השונים יכולה להעיד שהאקוויפר העליון הינו רציף במרחב וניתן להתייחס אליו כגוף מים אחד. בחינת מפות מפלסים וחתכים ליתולוגיים בהמשך המחקר יוכלו לאשש טענה זו.

המים באופקי הקרקע תוארו על סמך 6 פיזומטרים וקידוחים שעומקם קטן מ-6 מ'. בשניים מבין קידוחים אלו נמדדו ריכוזי יונים הדומים לריכוזים במי האקוויפר ואילו בארבעת הקידוחים האחרים נמדדו ריכוזים גבוהים באופן ניכר של היונים Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} של DOC, ושל TDS. מי הקרקע מהווים את מרכיב הקצה המלוח במערכת ההידרולוגית והחלחול שלהם אל האקוויפר העליון הוא הגורם העיקרי להמלחתו.

מי הקולחים של תשלובת הקישון מאופיינים ביחס Cl/Br נמוך (יחס משקלי 50-60) בהשוואה ליחס במים טבעיים (~280) בגלל תוספת ברומיד במי קולחים אלו, ובריכוזי אשלגן גבוהים (תרשימים 4, 9). האשלגן נספח במהירות לקרקע אולם הברומיד הינו יון קונסרבטיבי ועל כן היחס Cl/Br יכול לשמש כסמן לקולחי תשלובת הקישון. בכל דוגמאות מי הקרקע והאקוויפר שנבדקו נמצאו יחסי Cl/Br דומים ליחס במי הנגר ובמלחים ממקור ימי (יחס משקלי 200-350) וגבוהים באופן ניכר מהיחס בקולחי תשלובת הקישון. תצפית זו מלמדת שהמים שנדגמו בתת הקרקע אינם מכילים אחוז משמעותי של מי קולחים. יחד עם זאת, כל דוגמאות המים שנבדקו נדגמו בסוף עונת החורף (מרץ-יוני), בה ההשקיה הינה מוגבלת ושדות רבים אינם מושקים, ולכן עיקר תרומת המים היא ממי גשם ונגר. סביר להניח שבמהלך הקיץ התרומה של הקולחים למים בתת הקרקע גבוהה יותר ונושא זה ייבדק בהמשך המחקר.

ריכוזי הניטרט הגבוהים שנמדדו במי הקרקע והאקוויפר יכולים להגיע ממקורות אחרים מלבד קולחים כגון דשנים סינטטיים או זבל אורגני המפוזרים בשדות, ועל כן הם אינם מעידים על תרומה של מי קולחים. בנוסף, יתכן חמצון של אמוניום שנספח לקרקע או שטיפה של מלחי ניטרט שמקורם בקולחים מעונת השקיה קודמת.

מי הקרקע ומי האקוויפר מכילים ריכוזים גבוהים של כלוריד ונתרן הנובעים מהמסת הליט, אולם ברוב הדוגמאות קיים עודף של כלוריד ביחס לנתרן (תרשים 3). מצב זה מעיד על עיכוב של הנתרן המומס בקרקע שיכול להיות תוצאה של תהליכי השקעה או ספיחה שונים. תוצאות מיצוי המלחים המסיסים בקרקע, אשר מראות עודף של נתרן ביחס לכלוריד ברוב הדוגמאות שנבדקו, מחזקות את ההשערה שהנתרן מעוכב בקרקע ולא זורם עם המים (תרשים 13). בנוסף, התצפיות שבקרקעות הבור יש יותר סידן מסיס מנתרן מסיס ואילו בקרקעות המעובדות המצב מתהפך ויש עודף של נתרן על פני סידן מלמדות על הצטברות של נתרן בקרקעות המעובדות (תרשים 15). אופן ההצטברות וצורת הופעתו אינן ידועות בשלב זה.

ריכוזי היונים המסיסים בקרקע מושפעים מתהליכי העיבוד החקלאי של השדות הכוללים השקיה בקולחים, דישון וזיבול, מתכיפות מחזורי ההרטבה והייבוש של הקרקע, ומאירועי גשם בודדים. בקרקעות הבור הסיידן הוא הקטיון הדומיננטי ואילו בקרקעות המעובדות הנתרן הוא הקטיון הדומיננטי (טבלה 5, תרשים 15). ריכוזי הנתרן והכלוריד המסיסים בקרקעות המעובדות גבוהים

מריכוזיהם בקרקעות הבור שנדגמו באותו מועד (תרשים 13). תצפיות אלו מלמדות על הצטברות של מלחי הליט בקרקעות המעובדות. בחלק מהקרקעות המעובדות חלה ירידה בריכוזי הקטיונים הדו ערכיים Ca^{2+} , Sr^{2+} , Mg^{2+} ביחס לריכוזיהם בקרקעות הבור (תרשימים 15, 16). בנוסף, ריכוזי הברומיד בקרקעות המעובדות גבוהים מריכוזיהם בקרקעות הבור ואינם בעלי התאמה עם ריכוזי הכלוריד (תרשים 16). תצפית זו מלמדת על הצטברות של ברומיד בקרקעות המעובדות. אם הברומיד מעוכב בקרקע הוא אינו קונסרבטיבי ויתכן שלא ניתן להשתמש בו כסמן לקולחים. נושא זה מחייב בדיקה ניסויית והוא יבחן בהמשך המחקר.

ההשפעה של המאגרים על הקרקעות באה לידי ביטוי בעליית ריכוזי היונים Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- המסיסים בקרקעות שבקרבת המאגר. עליה חדה ביונים אלו נמצאה בשני מועדי הדיגום בנקודה במרחק של 60 מ' מדרום למאגר מעלה קישון ובמידה פחותה בנקודה במרחק של 160 מ' מצפון למאגר. הסיבה לכך היא כפי הנראה הגברת מחזורי ההרטבה והייבוש בקרבת המאגר. התהליך ההידרולוגי שגורם לכך אינו ברור, האם קיימת תרומה ישירה של מי המאגר אל סביבתו הקרובה או שהוא מפעיל לחץ על תת הקרקע שגורם לעליית עומד המים בקרקע שבקרבתו.

ככלל, ריכוזי היונים המסיסים בקרקע בדיגום נובמבר נמצאו נמוכים מהריכוזים באפריל. הסיבה לכך נעוצה כפי הנראה בשטיפת המלחים ע"י מי גשם. בנובמבר הדיגום נערך יומיים לאחר אירוע גשם ואילו באפריל הדיגום נערך לאחר חודש ללא גשם. התוצאות שהתקבלו הפוכות להנחת העבודה הראשונית שהדיגום בנובמבר ייצג את סוף הקיץ ועל כן יהיה בעל ריכוזי מלחים גבוהים ואילו הדיגום באפריל ייצג את סוף החורף ועל כן יהיה בעל ריכוזי מלחים נמוכים. עדויות אלו מלמדות שהרכב המלחים בקרקע משתנה בהתאם למידת השטיפה באותו זמן ושלקרקע אין "זיכרון" ארוך טווח. מכך ניתן להסיק שהצטברות המלחים הן בקרקעות הבור והן בקרקעות המעובדות הינה תהליך דינמי מאד ותלוי משטר השטיפה הזמני.

5.2. השפעת הפעילות החקלאית על ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי בקרקעות

עמק יזרעאל

למרות שכל הקרקעות שנדגמו הן מטיפוס ורטיסול הרי שרק לחלק מהן הרכב מקטע חרסיתי אופייני לורטיסולים בישראל (שאינם בזלתיים), דהיינו תכולת IS גבוהה מ- 80% וערכי אוסף נמוכים מכ- 0.6 המציינים כ- 50% תפיחתיות (Sandler, 2013). התפוצה המרחבית של ההרכבים ביחס לקרקעות בור מצביעה על כך שהן העבוד החקלאי והן המאגרים גורמים לשינויים במקטע החרסיתי הכוללים איליטיזציה ויצירת פליגורסקיט. איליטיזציה מתרחשת כאשר נוצרים תנאים מתאימים לקליטת אשלגן מהסביבה וקיבועו במרווח הבין-לווחי. בתנאי פני שטח קיבוע של אשלגן מואץ על ידי מחזורי תכופים של ייבוש והרטבה. תנאים כאלה עשויים להתקיים באופן טבעי במשטר גשמים ים תיכוני, בהתאם לתנאים העונתיים ולמידת השטיפה של פרופיל מסוים. בקרקעות הבור שנבדקו כאן תכולת הקלציט גבוהה מאשר בקרקעות מעובדות ומעידה על שטיפה מוגבלת המסייעת גם לאיליטיזציה. תכולת הרבדים האיליטיים כאן היא בטווח 35-55%, גבוהה מזו של ורטיסולים טיפוסיים הנוצרים באקלים סוב-טרופי או ים תיכוני גשום יותר בהם תכולת הרבדים האיליטיים היא בטווח 20-35% (נתונים שונים מהספרות). הקרקעות של עמק יזרעאל מעובדות באופן אינטנסיבי עם גידולים מתחלפים במהלך כל השנה. ההשקיה בעונה היבשה

מוסיפה מחזורי ייבוש-הרטבה ומגבירה את תהליך האיליטיזציה. עם זאת, נראה שהגורם העיקרי להגברת איליטיזציה הוא ההשקיה במי קולחים, שבהם גבוה ריכוז האשלגן פי כ- 10 מאשר במי תהום או במי כנרת. יתר על כן, ריכוז חריג של כ- 70 מ"ל אשלגן במי האקופר שנמדד באחד הפיזומטרים, הרבה מעל הריכוז במי קולחים, מעיד שבמקרים מסוימים חרסיות הקרקע רוויות באשלגן והעודף מתרכז במי הקרקע בשל אידיוי ומחלחל למי התהום. לכן, ברוב האתרים ערכי האוכף גבוהים בסוף העונה היבשה, בה מתקיימת השקיה, מאשר בסוף העונה הגשומה. שיא התהליך הינו היווצרות פאזה של IS מסודר איליטי במעלה חתך הדרומי המלווה בריכוז חריג של אשלגן במי הקרקע. באתר זה נוכח גם פליגורסקיט פדוגני, שנותר בקיץ לאחר היווצרותו, ככל הנראה, בעונת הגשמים (ראה בהמשך). יחד עם זאת, השונות בין אתרים קרובים ודומים, כמו בין שני אתרי קרקעות הבור, מצביעים על כך שתנאים מקומיים שאינם ידועים משפיעים גם הם על תהליך האיליטיזציה.

בחתך שמדרום למאגר כפר ברוך ערכי האוכף הם הנמוכים ביותר ביחס לחתכים האחרים בשני הדיגומים. ההרכב של מי מיצוי הקרקע בסוף העונה היבשה מצביע על השקיה במים עם ריכוזי מומסים נמוכים. ההשקיה בחלקה זו אכן בוצעה באותה עונה במי קולחים שעברו טיפול שניוני מעורבים במי שטפונות.

מהלך אחר של איליטיזציה מוגברת מתרחש ליד המאגרים והוא, ככל הנראה, תוצאה של דליפת של מי המאגר לסביבתו הקרובה, כפי שמעידים הלחות הגבוהה והריכוז הגבוה של רב הקטיונים שנבדקו (ראה פרק 5.1). הדליפה אמורה להשפיע בשני אופנים: הגברת הספקת האשלגן לקרקע והוספת מחזורי ייבוש-הרטבה העוקבים אחרי השינויים במפלס המים במאגר. הממצאים הנוכחיים מאשרים ממצאים אקראיים קודמים על תהליכי איליטיזציה בקרקעות העמקים ומסבירים את ההשתנות של הרכב חרסיות סחף הקישון בשטפונות שונים (Sandler, 2013).

פליגורסקיט נוצר בקרקעות באקלים צחיח או צחיח למחצה בתנאים של pH גבוה יחסית, בין 8 ל- 8.5 וריכוז מגנזיום גבוה. בארץ מצוי פליגורסקיט פדוגני בתכולה נמוכה בקרקעות הנגב עד מצפון לרצועת הלס. היווצרות פליגורסקיט בקרקעות כתוצאה מעבוד חקלאי לא זוהתה עד כה בארץ. כאן, הפליגורסקיט נוצר אמנם באתר בו האיליטיזציה מוגברת אבל, בניגוד להיווצרות ה-IS המסודר, דווקא בעונת הגשמים ולא בעונה היבשה. בסוף עונת הגשמים ערכי ה-pH במי הקרקע של אתר זה הינם רק 7.91 ו- 7.96, אך אלו מהערכים היותר גבוהים מבין כל החתכים. אין בנתונים של מי מיצוי הקרקעות כדי להצביע על הגורמים להיווצרות דווקא באתר המסוים בחתך שמדרום למאגר מעלה הקישון אבל ריכוזי המגנזיום כאן הם הנמוכים מבין אלה שנמדדו במי הקרקעות המושקות כתוצאה מהשתתפות יסוד זה ביצירת הפליגורסקיט. בעולם דווח על מקרה יחיד של תופעה כזו, מהודו. ברחבי מדינת מהרסטר, נמצא שפליגורסקיט נוצר בקרקעות ורטיות מושקות שהפכו למליחות-נתרניות (saline-sodic). המחקר הצביע על היווצרות "מהירה" של פליגורסקיט (Hillier & Pharande, 2008) מאחר והשקיה החלה שם 40-50 שנה לפני כן.

הן איליטיזציה והן היווצרות פליגורסקיט (על חשבון IS), ובמיוחד בקרקעות דלות בחומר אורגני, מקטינות את קבול הקטיונים החליפים של הקרקע ופוגעות ביכולת להחזיק ולהעביר לצמח חומרי הזנה. אין עדיין מידע מקיף לגבי התכונות הפיזיקליות-הידראוליות של קרקע המכילה

פליגורסקיט אך ידוע שלפליגורסקיט פוטציאל גבוה לדיסאגרציה ולכן היא המהירה מבין חרסיות הקרקע לנדוד כלפי העומק וליצור חסימה הידראולית (Neaman and Singer, 2004).

6. סיכום

העבודה הנוכחית בחנה את השפעת הפעילות החקלאית בעמק יזרעאל, ובפרט ההשקיה בקולחים והמאגרים, על הרכב המים והקרקעות במערכת ההידרולוגית הרדודה ואת יחסי הגומלין בין המים לקרקע. ההשקיה בקולחים על קרקעות חרסיות כבדות בעלות ניקוז מוגבל גורמת להצטברות של מלחים בקרקעות המעובדות ולעליית ריכוזי המלחים באופקי המים בקרקע. הצטברות המלחים נוצרת כתוצאה ממחזורי הרטבה ויבוש תכופים הכוללים עלייה נימית של המים לפני השטח והתאדותם, והיא משתנה במידה רבה בהתאם למידת השטיפה של הקרקע. כך, ריכוזי היונים המסיסים בקרקע נמוכים לאחר אירוע גשם בנובמבר לעומת ריכוזיהם לאחר חודש ללא גשם בסוף אפריל, הן בקרקעות הבור והן בקרקעות המעובדות.

המים באופקי הקרקע הרוויים ובאקוויפר העליון מלוחים ממקורות המילוי החוזר האפשריים שלהם – מי גשם, מי נגר ומי קולחים. התהליכים העיקריים המכתיבים את עליית מליחות המים הם שילוב של אידוי והמסת מלחי הליט. תהליכים אלו זוהו ותוארו בשדות עמק יזרעאל כבר בשנות ה-80 (מיכלסון ומרכדו, 1988; גב, 1989). בנוסף, התנהגות היונים השונים במי הקרקע ובאקוויפר מלמדת שהרכב המים משתנה כתוצאה משילוב של מספר תהליכים גיאוכימיים שמתרחשים בעוצמות שונות במהלך הזרימה בקרקע ובאקוויפר כגון המסה של גבס, חיזור סולפאט, דניטריפיקציה, בליה של מינרלים סיליקטיים וחמצון של חומר אורגני.

המים באופקי הקרקע הרוויים מהווים את מרכיב הקצה המלוח במערכת ההידרולוגית והחלחול שלהם אל האקוויפר העליון הוא הגורם העיקרי להמלחתו. הרכב המים באופקי הקרקע משתנה באופן ניכר כתוצאה מהשונות העיתית והמרחבית הגדולה בעוצמת התהליכים הגיאוכימיים המתקיימים באופקי הקרקע המקומיים. האקוויפר לעומת זאת הוא גוף מים גדול יותר, וכפי הנראה רציף, ועל כן הוא מראה מיצוע של התהליכים המכתיבים את הרכב המים המגיעים אליו. ריכוזי הניטרט הגבוהים שנמדדו במי הקרקע והאקוויפר יכולים להגיע ממספר מקורות כגון קולחים, דשנים סינטטיים וזבל אורגני המפוזר בשדות. היחס הגבוה של Cl/Br במי הקרקע והאקוויפר לעומת היחס הנמוך בקולחי תשלובת הקישון מרמז שבסוף עונת החורף הקולחים אינם מהווים מרכיב משמעותי במי הקרקע והאקוויפר. לכן, סביר שמקור הניטרט בעונה זו אינו ממי הקולחים. יחד עם זאת, הצטברות הברומיד בקרקעות המעובדות לעומת קרקעות הבור מעלה את השאלה האם הוא יון קונסרבטיבי במערכת הנידונה והאם ניתן להשתמש בו כסמן לקולחי תשלובת הקישון. נושא זה ייבדק בהמשך המחקר.

מי הקרקע ומי האקוויפר מכילים ריכוזים גבוהים של כלוריד ונתרן הנובעים מהמסת הליט, אולם ברוב הדוגמאות קיים עודף של כלוריד ביחס לנתרן. לעומת זאת, במיצוי המלחים המסיסים בקרקע התקבל עודף של נתרן ביחס לכלוריד ברוב הדוגמאות שנבדקו. תצפיות אלו מלמדות על עיכוב של הנתרן המומס בקרקע שיכול להיות תוצאה של תהליכי השקעה או ספיחה שונים. אופן ההצטברות וצורת הופעתו אינן ידועות בשלב זה.

הרכב היונים המסיסים בקרקעות המעובדות וריכוזיהם שונים מאלו שבקרקעות הבור. בקרקעות הבור הסיידן הוא הקטיון הדומיננטי ואילו בקרקעות המעובדות הנתרן הוא הקטיון הדומיננטי,

ריכוזי הנתרן, הכלוריד והברומיד בקרקעות המעובדות גבוהים מריכוזיהם בקרקעות הבור, וכן בחלק מהקרקעות המעובדות חלה ירידה בריכוזי הקטיונים הדו ערכיים Ca^{2+} , Sr^{2+} , Mg^{2+} ביחס לריכוזיהם בקרקעות הבור. תצפיות אלו מלמדות על השפעת תהליכי העיבוד החקלאי על ההרכב הכימי של הקרקע.

מאגר מעלה קישון משפיע על הקרקעות שבקרבתו (במרחק של עד 100-200 מ') וגורם לעליית המליחות בהן. עליה חדה בריכוזי היונים Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- המסיסים נמצאה בשני מועדי הדיגום בנקודה במרחק של 60 מ' מדרום למאגר מעלה קישון ובמידה פחותה בנקודה במרחק של 160 מ' מצפון למאגר. הסיבה לכך היא כפי הנראה הגברת מחזורי ההרטבה והייבוש בקרבת המאגר. התהליך ההידרולוגי שגורם לכך אינו ברור, האם קיימת תרומה ישירה של מי המאגר אל סביבתו הקרובה או שהוא מפעיל לחץ על תת הקרקע שגורם לעליית עומד המים בקרקע שבקרבתו.

ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי בחלק ניכר מדוגמאות הקרקע שנבדקו שונה מההרכב האופייני לורטיסולים בישראל שכולל תכולת IS גבוהה מ- 80% וערכי אוכף נמוכים מכ- 0.6 המציינים כ- 50% תפיחתיות. התפוצה המרחבית של ההרכבים ביחס לקרקעות בור מצביעה על כך שהן העבוד החקלאי והן המאגרים גורמים לשינויים במקטע החרסיתי הכוללים איליטיזציה ויצירת פליגורסקיט.

איליטיזציה מתרחשת כאשר נוצרים תנאים מתאימים לקליטת אשלגן מהסביבה וקיבועו במרווח הבין-לווחי. בתנאי פני שטח קיבוע של אשלגן מואץ על ידי מחזורים תכופים של ייבוש והרטבה.. ההשקיה בעונה היבשה מוסיפה מחזורי ייבוש-הרטבה ומגבירה את תהליך האיליטיזציה. עם זאת, נראה שהגורם העיקרי להגברת איליטיזציה הוא ההשקיה בקולחי תשלובת הקישון, שבהם גבוה ריכוז האשלגן פי כ- 10 מאשר במי תהום או במי כנרת. לכן, ברוב האתרים ערכי האוכף גבוהים בסוף העונה היבשה, בה מתקיימת השקיה, מאשר בסוף העונה הגשומה. יחד עם זאת, השונות בין אתרים קרובים ודומים, כמו בין שני אתרי קרקעות הבור, מצביעים על כך שתנאים מקומיים שאינם ידועים משפיעים גם הם על תהליך האיליטיזציה.

איליטיזציה מוגברת מתרחשת ליד המאגרים, ככל הנראה, כתוצאה של דליפת של מי המאגר לסביבתו הקרובה, כפי שמעידים הלחות הגבוהה והריכוז הגבוה של רב הקטיונים שנבדקו במיצוי המלחים מהקרקע. הדליפה יכולה להשפיע בשני אופנים: הגברת הספקת האשלגן לקרקע והוספת מחזורי ייבוש-הרטבה העוקבים אחרי השינויים במפלס המים במאגר. הממצאים הנוכחיים מאשרים ממצאים אקראיים קודמים על תהליכי איליטיזציה בקרקעות העמקים ומסבירים את ההשתנות של הרכב חרסיות סחף הקישון בשטפונות שונים.

פליגורסקיט נוצר בקרקעות באקלים צחיח או צחיח למחצה בתנאים של pH גבוה יחסית, בין 8 ל- 8.5 וריכוז מגנזיום גבוה. היווצרות פליגורסקיט בקרקעות כתוצאה מעבוד חקלאי לא זוהתה עד כה בארץ. כאן, הפליגורסקיט נוצר אמנם באתר בו האיליטיזציה מוגברת אבל, בניגוד להיווצרות ה-IS המסודר, דווקא בעונת הגשמים ולא בעונה היבשה. אין בנתונים של מי מיצוי הקרקעות כדי להצביע על הגורמים להיווצרות דווקא באתר המסוים בחתך שמדרום למאגר מעלה קישון. יחד עם זאת, ערכי ה-pH במי הקרקע של אתר זה גבוהים ביחס לנקודות הדיגום האחרות (7.91 ו- 7.96) וריכוזי המגנזיום כאן הם הנמוכים מבין אלה שנמדדו בקרקעות

המעובדות כתוצאה מהשתתפות יסוד זה ביצירת הפליגורסקיט. בעולם דווח על מקרה יחיד של תופעה כזו מהודו שם נמצא שפליגורסקיט נוצר בקרקעות ורטיות מושקות שהפכו למליחות-נתרניות לאחר כ- 40-50 שנות השקיה (Hillier & Pharande, 2008).

הן איליטיזציה והן היווצרות פליגורסקיט (על חשבון IS), ובמיוחד בקרקעות דלות בחומר אורגני, מקטינות את קבול הקטיונים החליפים של הקרקע ופוגעות ביכולת להחזיק ולהעביר לצמח חומרי הזנה. אין עדיין מידע מקיף לגבי התכונות הפיזיקליות-הידראוליות של קרקע המכילה פליגורסקיט אך ידוע שלפליגורסקיט פוטציאל גבוה לדיסאגרציה ולכן היא המהירה מבין חרסיות הקרקע לנדוד כלפי העומק וליצור חסימה הידראולית (Neaman and Singer, 2004).

7. ביבליוגרפיה

- ארקין, י., ברטוב, י., הורוביץ, א., ויסבורד, ט., לוי, ז., מזור, ע., שמרון, א., שפרן, נ. 1987. נדבכים בגיאולוגיה של ישראל. תל אביב: האוניברסיטה הפתוחה.
- ביידא, א. 1968. חוות דעת על המצב ההידרוגיאולוגי של קידוחי גדעון. תה"ל.
- ביין, ע. 1967. ההידרוגיאולוגיה של האקוויפר הקנומן טורוני בגליל המרכזי – מזרחי. המכון הגיאולוגי, דו"ח הידרו/66/1.
- גב, י. 1989. תופעות המלחה בקרקעות עמק יזרעאל כתלות במערכת ההידרוגיאולוגית. עבודה לתואר מוסמך, אוניברסיטת בן גוריון בנגב, באר שבע.
- גולדשלגר, נ. 1985. השפעת חומר האב ומשטר המים על אופי החרסית בקרקעות הכבדות של עמק יזרעאל. עבודת גמר, אוניברסיטת ת"א.
- גורן, א., סנדלר, ע. 2012. הרכב המים והקרקעות במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל – יחסי גומלין והשפעת האדם. דוח מסכם שנה א'. דו"ח מס' GSI/02/12, המכון הגיאולוגי, ירושלים.
- דיקר, ת. 1964. הגיאולוגיה של אזור עמק יזרעאל המרכזי. עבודה לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- דן, י., רז, צ. 1970. מפת חבורות הקרקעות של ישראל. מכון וולקני לחקר החקלאות, האגף לשימור קרקע וניקוז.
- הלפרין, ר., אסור, ר., שמולביץ, ס., אהרונ, א. 2010. ניטור מפעל תשלובת הקישון: עיבוד ניתוח וסיכום הממצאים. דו"ח לשנת 2009, מקורות חברת המים הלאומית, מרחב צפון והטכניון, הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, הנדסת הסביבה ומשאבי מים.
- השירות המטאורולוגי. 2011. שינויים אקלימיים בישראל: ממצאי השירות המטאורולוגי, דוח השירות המטאורולוגי, סימוכין 00076312.
- וישקין, י. 1973. המבנה הגיאולוגי והגיאוכימיה של המים כבסיס להבנת המשטר ההידרולוגי של מי התהום באזור עמק יזרעאל. עבודה לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- וכטמן, ד. 2005. הסעת רחופת על ידי נחלי החוף אל מדף היבשת של ישראל - נחל קישון ונחל אלכסנדר. דו"ח GSI/03/05, המכון הגיאולוגי, ירושלים.
- מיכלסון, ח., מרכדן, א. 1988. תופעות המלחת מי תהום בעמק יזרעאל. דו"ח התקדמות מס' 1. תה"ל 01/88/50.
- סנדלר, ע., בר-טל, א., פיין, פ. 2009. השפעת דישה והשקיה על הרכב קרקעות מעובדות. דו"ח GSI/33/2009, המכון הגיאולוגי, ירושלים.
- פיקרד, ל. 1936. מי תהום בעמק יזרעאל המערבי. האוניברסיטה העברית, המחלקה לגיאולוגיה, ידיעות מס' 1.
- קרמר, ע., וגלון, י. 1996. לוחות מקדמי צריכת מים להשקיית גידולי גן הנוי. חוברת בהוצאת שה"מ, משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
- ראבקין, ש. 1987. בעיות המליחות בעמק יזרעאל הצעה לפתרון באמצעות שינויים במאגר כפר ברוך ובמערך הספקת המים בעמק יזרעאל. מקורות חברת המים בע"מ.

- שליב, ג. 1991. שלבים בהתפתחות הטקטונית והוולקנית של האגן הנאוגני בגליל התחתון ובעמקים. דו"ח GSI/11/91, המכון הגיאולוגי, ירושלים.
- Benyamini, Y., Mirlas V., Marish S., Gotesman M., Fizik, E., and Agassi, M. 2005. A survey of soil salinity and groundwater level control systems in irrigated fields in the Jezre'el Valley, Israel. *J. Agricultural Water Management*, 76(3): 181-194.
- Goldshlger, N., Mirlas, V., Ben Dor, E. and Eshel, M. 2006. New Approach for Localization, Prediction, and Management of Saline-Infected Soils. ERSA conference papers, Volos, Greece, p. 23.
- Herut, B., Starinsky, A., Katz, A., Bein, A. 1990. The role of seawater freezing in the formation of subsurface brines. *Geochim. Cosmochim. Acta*, V. 54,1: 13-21.
- Hillier, S., Pharande, A.L., 2008. Contemporary pedogenic formation of palygorskite in irrigation induced, saline-sodic, shrink-swell soils of Maharashtra, India. *Clays and Clay Minerals* 56, 531–548.
- Holmes, R. M., Aminot, A., Kerouel, R., Hooker, B. A., Peterson, B. J. 1999. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56:1801–1808.
- Mirlas, V., Benyamini, Y., Marish, S., Gotesman, M., Fizik, E., Agassi, M. 2006. Long-term changes in groundwater regime of a semi-confined aquifer in Jezre'el Valley, Israel. *J. World Assoc. Soil Water Conserv.*, J1: 98-112.
- Neaman, A., Singer, A., 2004. The effects of palygorskite on chemical and physicochemical properties of soils: a review. *Geoderma* 123, 297–303.
- Ravikovitch, R., Koyumdjiski, H., Dan, Y. 1960a. Soils of western and central Valley of Yizreel. *Bull. 64, Agricultural Research Station, Beit Dagan*.
- Ravikovitch, R., Pines, F., Ben-Yair, M. 1960b. Composition of colloids in the soils of Israel. *J. Soil Sci.* 11: 82-91.
- Sandler, A., 2013. Clay distribution over the landscape of Israel: from the hyper-arid to the Mediterranean climate regimes. *Catena* 110, 119-132.
- Schein, Z. and Livne, A. 1998. Drainage for salinity control in the Jezre'el Valley in Israel. *Proc. 7th International Drainage Symposium, "Drainage in the 21st Century: Food Production and the Environment"*, Orlando, Florida, USA, March 1998, Am. Soc. Agr. Eng., p. 10.
- Singer A., 2007, *The Soils of Israel*. Springer-Verlag, Berlin. 306 pp.

טבלאות

טבלה 1. אתרי דיגום המים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.

Water type	Pizometer	Location	Pizometer depth	Pipe edge elevation	Water table depth	Water table elevation
			m		m	m
Soil horizon	P-1A	223418/723840	2.0	49.71	1.03 (2.3.11)	48.68
Soil horizon	P-1B	223418/723840	5.0	49.89	1.16 (2.3.11)	48.73
Soil horizon	P-2A	223496/723701	2.0	48.75	1.21 (2.3.11)	47.55
Soil horizon	P-2B	223496/723701	5.0	48.49	0.93 (2.3.11)	47.56
Soil horizon	705	224585/725579	4.8	58.44	3.06 (8.5.13)	55.376
Soil horizon	708	224442/729113	5.5	73.669	2.93 (10.6.13)	70.739
Aquifer	P-1C	223418/723840	8.0	50.04	1.30 (2.3.11)	48.74
Aquifer	P-2C	223496/723701	12.0	48.55	1.00 (2.3.11)	47.55
Aquifer	702	226417/727590	9.7	80.482	5.30 (8.5.13)	75.182
Aquifer	703	226391/726239	12.0	66.264	3.08 (8.5.13)	63.184
Aquifer	707	221989/726220	10.7	60.973	8.01 (8.5.13)	52.963
Aquifer	709	224442/727768	11.7	58.3	2.67 (29.4.13)	55.63
Aquifer	710	223271/728428	7.0	63.137	4.35 (30.5.13)	58.787
Aquifer	711	224309/729643	11.7	88.498	4.85 (8.5.13)	83.648
Aquifer	713	222346/728938	11.9	68.109	3.60 (29.4.13)	64.509
Aquifer	714	221230/728753	10.8	60.254	2.79 (29.4.13)	57.464
Aquifer	716	223831/727739	7.6	75.696	1.74 (10.6.13)	73.956
Aquifer	Kfar Baruch 1	219958/726828	10.0	47.146	1.38 (30.5.13)	45.766
Aquifer	Kfar Baruch 2	219955/726825	19.5	47.372	0.08 (30.5.13)	47.292
Aquifer	Kfar Baruch 3	220247/727302	22.0	48.04	over pipe (30.5.13)	above 48.04
Effluent		Ma'ale Kishon reservoir				
Effluent		Maale Kishon reservoir				
Effluent		Kfar Baruch reservoir				
Effluent		Kfar Baruch reservoir				
Effluent		Maale Kishon reservoir				
Runoff		Kfar Baruch reservoir				

טבלה 2. מיקום נקודות דיגום הקרקעות בשלושה חתכים: מדרום למאגר מעלה קישון, מצפון למאגר מעלה קישון ומדרום למאגר כפר ברוך.

מרחק מהמאגר (מ')	עומק	נ. צ.	תאור	דוגמה
60	0-20 ס"מ	223474/723890	שדה מעובד, ליד פיזומטרים 1A,B,C, מדרום למאגר מעלה קישון, בחלקת הניסוי של התחנה לחקר הסחף, ליד מט"ש עפולה	EYS-1
60	30-50 ס"מ	223474/723890	אותו מיקום של EYS-1	EYS-2
160	0-20 ס"מ	223473/723775	כ- 120 מ' מדרום לנקודות דיגום 1,2, שדה מעובד	EYS-3
160	30-50 ס"מ	223473/723775	אותו מיקום של EYS-3	EYS-4
260	0-20 ס"מ	223474/723650	כ- 120 מ' מדרום לנקודות דיגום 3,4, שדה מעובד	EYS-5
260	30-50 ס"מ	223474/723650	אותו מיקום של EYS-5	EYS-6
780	0-20 ס"מ	223151/723120	קרקע לא מעובדת, בין שני אקליפטוסים, מדרום לנקודות דיגום 1-6, בקרבת המנחת של מגידו	EYS-7
780	30-50 ס"מ	223151/723120	אותו מיקום של EYS-7	EYS-8
710	0-20 ס"מ	223028/723193	קרקע לא מעובדת, בתוך חורשת אקליפטוסים, מדרום מערב לנקודות דיגום 1-6, בקרבת המנחת של מגידו	EYS-9
710	30-50 ס"מ	223028/723193	אותו מיקום של EYS-9	EYS-10
160	0-20 ס"מ	223233/725379	שדה מעובד, מצפון למאגר מעלה קישון, לצד הדרך אל המאגר	EYS-11
160	30-50 ס"מ	223233/725379	אותו מיקום של EYS-11	EYS-12
220	0-20 ס"מ	223112/725443	שדה מעובד, כ- 100 מ' צפונית-מערבית מנקודות דיגום 11,12 במעלה המדרון	EYS-13
220	30-50 ס"מ	223112/725443	אותו מיקום של EYS-13	EYS-14
430	0-20 ס"מ	222982/725621	שדה מעובד, כ- 100 מ' צפונית-מערבית מנקודות דיגום 13,14 במעלה המדרון	EYS-15
430	30-50 ס"מ	222982/725621	אותו מיקום של EYS-15	EYS-16
740	0-20 ס"מ	222774/725872	שדה מעובד, כ- 300-400 מ' צפונית-מערבית מנקודות דיגום 15,16 במעלה המדרון	EYS-17
740	30-50 ס"מ	222774/725872	אותו מיקום של EYS-17	EYS-18
740	2 ס"מ עליונים	222774/725872	אותו מיקום של EYS-17, קרום סדקי בוצ	EYS-19
500	0-20 ס"מ	219553/726398	שדה מעובד, מדרום למאגר כפר ברוך, לצד הדרך שמקיפה את המאגר	EYS-20
500	30-50 ס"מ	219553/726398	אותו מיקום של EYS-20	EYS-21
630	0-20 ס"מ	219573/726267	כ- 120 מ' מדרום לנקודות דיגום 20,21, שדה מעובד, במעלה המדרון	EYS-22
630	30-50 ס"מ	219573/726267	אותו מיקום של EYS-22	EYS-23
750	0-20 ס"מ	219597/726150	כ- 120 מ' מדרום לנקודות דיגום 22,23, שדה מעובד, במעלה המדרון	EYS-24
750	30-50 ס"מ	219597/726150	אותו מיקום של EYS-24	EYS-25
890	0-20 ס"מ	219626/726011	כ- 120 מ' מדרום לנקודות דיגום 24,25, שדה מעובד, במעלה המדרון	EYS-26
890	30-50 ס"מ	219626/726011	אותו מיקום של EYS-26	EYS-27

טבלה 3. מודדי איכות מים והרכב היונים העיקריים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.

Water type	Pizometer	Sample	Sampling date	TEMP	DO	EC	pH	Eh	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Sr ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	TDS	R.E.	DIC	DOC	SiO ₂
				° C	mg.L ⁻¹	mS.cm ⁻¹		mV						mg.L ⁻¹						%	mg C.L ⁻¹	mg.C.L ⁻¹	mg.L ⁻¹
Soil horizon	P-1A	YZ-6	02.03.11	18.8	5.3	36.1	7.4	155	5,270	5	1,480	1,185	26.9	12,745	2,027	154	38	600	23,531	-1.57	33	13	
Soil horizon	P-1B	YZ-5	02.03.11	21.1	3.5	25	7.7	143	4,200	5	655	684	17.5	8,340	1,931	205	27	5	16,070	-1.26	33	6.1	
Soil horizon	P-2A	YZ-10	02.03.11	18.4	4.5	6.64	7.7	55	900	2	267	162	4.1	1,360	517	230	7	805	4,254	0.08	45	1.1	
Soil horizon	P-2B	YZ-9	02.03.11						3,200	5	125	286	5.5	4,190	1,947	752	16	130	10,656	-1.18	148	7.5	
Soil horizon	705	LS-2	08.05.13	22.4	3.8	27.2	7.2	70	4,694	3	1,042	800	18.0	10,162	2,146	200	42	45	19,152	-2.0	44	3.0	10
Soil horizon	708	LS-25	10.06.13	23.1	4.2	3.7	7.4	122	521	2	191	75	1.9	966	155	317	5	215	2,450	-0.9	59	3.6	11
Aquifer	P-1C	YZ-4	02.03.11	21.7	6.1	22.7	7.4	166	3,700	10	545	917	17.5	7,850	1,951	325	26	5	15,347	-0.64	78	5.3	
Aquifer	P-2C	YZ-8	02.03.11	21.3	0.2	5.45	7.3	-82	1,050	1	47	77	1.4	1,120	348	998	3	0	3,646	-0.75	180	1.4	
Aquifer	702	LS-8	08.05.13	23.2	4.0	6.8	7.0	-26	930	< 2	329	185	3.6	1,998	360	311	8	126	4,250	0.8	74	1.6	24
Aquifer	703	LS-6	08.05.13	27.8	3.4	6.5	7.2	-225	1,155	< 2	144	118	2.8	1,680	440	657	6	39	4,243	-0.6	144	1.2	23
Aquifer	707	LS-5	08.05.13	23.6	4.9	6.6	7.3	78	974	2	308	133	3.3	1,737	605	165	7	450	4,383	-2.0	37	3.2	15
Aquifer	709	LS-3	29.04.13	22.2	3.1	7.3	7.7	-104	758	11	414	250	4.3	2,375	163	289	10	18	4,291	-0.6	51	6.7	14
Aquifer	710	LS-15	30.05.13	23.3	4.2	5.2	6.9	67	436	< 2	383	190	3.5	1,562	97	247	6	115	3,039	1.6	54	0.8	34
Aquifer	711	LS-1	08.05.13	26.2	5.4	5.5	7.0	37	393	2	421	212	5.4	1,630	21	365	5	177	3,231	0.4	85	2.4	32
Aquifer	713	LS-9	29.04.13	22.8	4.1	10.2	7.3	115	1,810	75	371	238	5.6	3,013	1,213	513	13	130	7,382	-0.8	67	5.3	15
Aquifer	714	LS-4	29.04.13	23.2	3.8	5.8	7.4	193	822	4	239	109	2.4	1,595	290	251	6	131	3,450	-0.5	48	6.5	10
Aquifer	716	LS-26	10.06.13	23.3	4.1	4.7	7.0	72	448	1	331	176	3.0	1,362	250	224	5	101	2,901	1.6	48	1.0	38
Aquifer	Kfar Baruch 1	LS-14	30.05.13	22.7	2.3	5.4	7.2	7	733	2	189	140	3.1	1,616	102	329	7	6	3,127	-0.3	58	0.7	25
Aquifer	Kfar Baruch 2	LS-13	30.05.13	23.0	3.2	6.6	6.8	98	733	2	340	201	4.4	2,126	60	242	8	29	3,745	-0.2	51	1.2	30
Aquifer	Kfar Baruch 3	LS-12	30.05.13	22.3	8.8	4.2	7.0	80	457	< 2	225	134	2.9	1,244	85	267	5	52	2,472	0.1	54	0.6	30
Effluent	Ma'ale Kishon reservoir	YZ-12	07.04.11	19.8	1.4		7.7	245	236	44	82	37	0.6	380	118	493	7	44	1,485	-5.13	101	16	
Effluent	Maale Kishon reservoir	YZ-22	07.04.11	19.5	0.4		7.8	-3 - +3	248	46	82	38	0.6	375	122	496	7	54	1,514	-3.74	102	18	
Effluent	Kfar Baruch reservoir	YZ-33	22.06.11						268	45	89	41	0.7	372	128	420	8	26	1,444	0.69	81	18	
Effluent	Kfar Baruch reservoir	YZ-37	22.06.11						260	43	88	40	0.7	407	122	439	8	13	1,460	-1.77	89	18	
Effluent	Maale Kishon reservoir	LS-10	30.05.13	26.3	4.3	2.0	7.7	362	240	46	85	38	0.7	342	128	380	5	40	1,304	-0.6	63	13	17
Runoff	Kfar Baruch reservoir	LS-11	30.05.13	26.5	7.6	1.0	8.3	196	103	7	55	22	0.5	187	45	174	1	15	608	-0.4	34	4.7	8

טבלה 4. ריכוזי יסודות קורט ויחסים יוניים במערכת ההידרו-לוגית הרדודה בעמק יזרעאל.

Water type	Pizometer	Sample	Sampling date	Al	As	B	Ba	Cr	Fe	Mo	Mn	Zn	Na/Cl	Ca/ (HCO ₃ +SO ₄)	Ca/SO ₄	Ca/Cl	Mg/Ca	Na/(Ca+Mg)	Cl/Br	SAR		
				µg·L ⁻¹										eq.							whight	
Soil horizon	P-1A	YZ-6	02.03.11	< 2	13	2800	60	≤ 10	40	10	28	10	0.64	1.7	1.75	0.21	1.32	1.34	335	25		
Soil horizon	P-1B	YZ-5	02.03.11										0.78	0.8	0.81	0.14	1.72	2.05	309	27		
Soil horizon	P-2A	YZ-10	02.03.11	< 2	< 5	800	23	≤ 10	< 10	5	6	4	1.02	0.9	1.24	0.35	1.00	1.47	200	11		
Soil horizon	P-2B	YZ-9	02.03.11	≤ 2	< 5	4350	17	25	< 10	15	14	8	1.18	0.1	0.15	0.05	3.77	4.68	267	36		
Soil horizon	705	LS-2	08.05.13	6	< 10	1775	35		33	3	15	72	0.71	1.1	1.16	0.18	1.27	1.73	242	27		
Soil horizon	708	LS-25	10.06.13	6	< 10	541	88		106	≤ 1	141	65	0.83	1.1	2.95	0.35	0.65	1.44	186	8		
Aquifer	P-1C	YZ-4	02.03.11	< 2	< 5	2050	75	≤ 10	≤ 10	5	230	18	0.73	0.6	0.67	0.12	2.77	1.57	302	22		
Aquifer	P-2C	YZ-8	02.03.11	< 2	≤ 5	1900	57	40	330	0.5	180	3	1.45	0.1	0.32	0.07	2.70	5.26	361	22		
Aquifer	702	LS-8	08.05.13	4	< 10	766	119		1430	≤ 1	353	80	0.72	1.3	2.19	0.29	0.92	1.28	254	10		
Aquifer	703	LS-6	08.05.13	7	< 10	773	36		187	4	111	19	1.06	0.4	0.79	0.15	1.35	2.97	285	17		
Aquifer	707	LS-5	08.05.13	9	< 10	330	71		34	2	103	36	0.86	1.0	1.22	0.31	0.71	1.61	259	12		
Aquifer	709	LS-3	29.04.13	8	< 10	257	94		0	3	771	69	0.49	2.5	6.08	0.31	1.00	0.80	245	7		
Aquifer	710	LS-15	30.05.13	5	< 10	211	282		59	< 1	3	93	0.43	3.1	9.45	0.43	0.82	0.55	279	5		
Aquifer	711	LS-1	08.05.13	3	< 10	159	716		186	2	158	288	0.37	3.3	48.03	0.46	0.83	0.45	326	4		
Aquifer	713	LS-9	29.04.13	7	< 10	547	38		3	5	348	30	0.93	0.6	0.73	0.22	1.06	2.06	224	18		
Aquifer	714	LS-4	29.04.13	8	< 10	584	95		< 2	4	106	55	0.79	1.2	1.98	0.27	0.75	1.71	253	11		
Aquifer	716	LS-26	10.06.13	5	< 10	202	132		59	< 1	< 2	60	0.51	1.9	3.17	0.43	0.88	0.63	278	5		
Aquifer	Kfar Baruch 1	LS-14	30.05.13	3	< 10	535	218		104	3	377	50	0.70	1.3	4.45	0.21	1.22	1.52	241	10		
Aquifer	Kfar Baruch 2	LS-13	30.05.13	7	< 10	360	338		18	2	5	61	0.53	3.2	13.57	0.28	0.97	0.95	253	8		
Aquifer	Kfar Baruch 3	LS-12	30.05.13	7	< 10	272	198		32	≤ 1	3	50	0.57	1.8	6.35	0.32	0.98	0.89	265	6		
Effluent	Maale Kishon reservoir	YZ-12	07.04.11	5	2.0	254	54	≤ 2	40	1.9	123	6	0.96	0.4	1.67	0.38	0.74	1.44	56	5		
Effluent	Maale Kishon reservoir	YZ-22	07.04.11	7	1.9	303	56	≤ 2	48	2.0	130	6	1.02	0.4	1.61	0.39	0.76	1.49	56	6		
Effluent	Kfar Baruch reservoir	YZ-33	22.06.11	≤ 2	2	280	33	≤ 2	< 10	3.2	160	6	1.11	0.5	1.67	0.42	0.76	1.49	47	6		
Effluent	Kfar Baruch reservoir	YZ-37	22.06.11	≤ 2	2	270	40	≤ 2	< 10	2.8	320	3	0.99	0.5	1.73	0.38	0.75	1.47	52	6		
Effluent	Maale Kishon reservoir	LS-10	30.05.13	6	< 10	216	40		24	8	81	32	1.08	0.5	1.60	0.44	0.74	1.41	64	5		
Runoff	Kfar Baruch reservoir	LS-11	30.05.13	9	< 10	93	54		23	≤ 1	4	19	0.85	0.7	2.97	0.52	0.66	0.98	203	3		

טבלה 5. ריכוזי היונים המסיסים שיצאו במיצוי עם מים מזוקקים מדוגמאות הקרקע מעמק זרעאל ביחידות של מ"ג לק"ג סדימנט. בתאור הדוגמאות pristine soil - קרקע טבעית, MK south - דוגמא מהחתך מדרום למאגר מעלה קישון, MK north - דוגמא מהחתך מצפון למאגר מעלה קישון, ו-KB south - דוגמא מהחתך מדרום למאגר כפר ברך.

Sample	Sampling date	Horizon	Description	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Sr ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ²⁻	SiO ₂
mg·kg ⁻¹														
EYS-7	6.11.11	a: 0-20cm	pristine soil	106	24	373	57	31	1.55	80	0.3	130		
EYS-8	6.11.11	b: 30-50cm	pristine soil	145	22	305	50	63	1.36	30	0.3	46		
EYS-9	6.11.11	a	pristine soil	64	27	441	70	35	1.95	60	<0.1	90		
EYS-10	6.11.11	b	pristine soil	149	12	264	56	20	1.53	13	0.15	39		
EYS-1	6.11.11	a	MK south	2517	41	666	257	1486	7.01	4470	14.9	350		
EYS-2	6.11.11	b	MK south	2253	20	339	153	1127	3.98	3310	10.7	140		
EYS-3	6.11.11	a	MK south	243	34	235	60	41	1.91	80	0.8	140	1.9	
EYS-4	6.11.11	b	MK south	240	31	261	66	55	2.19	70	0.9	140		
EYS-5	6.11.11	a	MK south	564	46	213	45	192	1.42	220	1.7	220	10.6	
EYS-6	6.11.11	b	MK south	650	24	201	41	185	1.38	430	2.4	110		
EYS-11	6.11.11	a	MK north	1309	40	312	106	503	2.63	1820	9.6	340	6.9	
EYS-12	6.11.11	b	MK north	1327	37	295	103	554	2.54	1750	9.1	310	10	
EYS-13	6.11.11	a	MK north	620	37	228	57	194	1.33	440	6.7	180	13.5	
EYS-14	6.11.11	b	MK north	540	19	107	31	214	0.66	240	3.2	140	6.9	
EYS-15	6.11.11	a	MK north	427	28	150	38	112	0.84	220	1.4	240	6	
EYS-16	6.11.11	b	MK north	548	37	320	85	150	1.97	240	1.6	160	3.3	
EYS-17	6.11.11	a	MK north	582	26	302	73	138	1.64	370	6	760	0.9	
EYS-18	6.11.11	b	MK north	468	14	132	34	93	0.74	120	2	150		
EYS-20	6.11.11	a	KB south	328	33	229	48	54	1.18	40	0.8	70	5.9	
EYS-21	6.11.11	b	KB south	348	23	125	32	194	0.66	50	0.5	45	7.3	
EYS-22	6.11.11	a	KB south	412	28	330	74	40	1.80	50	0.7	100		
EYS-23	6.11.11	b	KB south	403	12	125	39	77	0.73	50	0.4	90	6.8	
EYS-24	6.11.11	a	KB south	316	25	148	32	29	0.73	16	0.3	200	14	
EYS-25	6.11.11	b	KB south	391	16	125	33	34	0.67	17	0.4	54	7.8	
EYS-26	6.11.11	a	KB south	347	27	134	28	36	0.69	27	0.4	210	11.2	
EYS-27	6.11.11	b	KB south	484	17	122	28	185	0.66	120	1.2	34	2.3	
EYS-7	30.4.12	a	pristine soil	335	34	565	93	183	2.82	499	1.1	95		105
EYS-8	30.4.12	b	pristine soil	361	28	528	91	276	2.73	531	1.4	87		105
EYS-9	30.4.12	a	pristine soil	319	39	545	97	166	2.83	470	1.8	88		115
EYS-10	30.4.12	b	pristine soil	474	29	334	89	209	2.22	467	2.1	53		95
EYS-1	30.4.12	a	MK south	2110	43	1051	440	1934	13.51	4200	13.5	391		67.5
EYS-2	30.4.12	b	MK south	2050	30	718	349	1467	10.71	3725	12.4	224		57
EYS-3	30.4.12	a	MK south	550	33	318	79	175	2.77	491	1.8	114		100
EYS-4	30.4.12	b	MK south	616	26	279	76	201	2.59	498	1.8	134		100
EYS-5	30.4.12	a	MK south	511	21	281	54	166	2.15	484	1.6	68		105
EYS-6	30.4.12	b	MK south	658	18	216	45	172	1.82	490	2.1	48		100
EYS-11	30.4.12	a	MK north	1106	32	332	107	294	3.09	1367	6.4	96		75
EYS-12	30.4.12	b	MK north	1338	41	343	123	744	3.30	1419	6.3	159		80
EYS-13	30.4.12	a	MK north	540	31	310	80	170	2.10	469	1.9	125		85
EYS-14	30.4.12	b	MK north	668	30	269	77	197	2.00	484	2.7	57		100
EYS-15	30.4.12	a	MK north	571	46	423	111	183	3.00	623	3.0	24		105
EYS-16	30.4.12	b	MK north	663	21	293	84	183	2.21	617	3.2	24		90
EYS-17	30.4.12	a	MK north	612	27	392	87	196	2.32	681	4.5	33		95
EYS-18	30.4.12	b	MK north	617	21	306	74	182	1.92	613	3.1	30		90
EYS-20	30.4.12	a	KB south	321	35	531	98	191	2.76	628	2.9	39		100
EYS-21	30.4.12	b	KB south	375	34	513	104	263	2.85	653	3.4	30		105
EYS-22	30.4.12	a	KB south	435	22	490	81	190	2.40	664	2.5	61		95
EYS-23	30.4.12	b	KB south	359	17	502	91	194	2.61	679	2.6	36		100
EYS-24	30.4.12	a	KB south	396	17	494	84	183	2.51	664	2.7	55		90
EYS-25	30.4.12	b	KB south	333	15	480	94	188	2.74	662	2.8	43		90
EYS-26	30.4.12	a	KB south	372	23	507	93	181	2.69	659	2.7	62		90
EYS-27	30.4.12	b	KB south	307	19	518	101	179	2.91	661	2.7	46		95

טבלה 6. ההרכב המינרלוגי הכולל של דוגמאות קרקע מייצגות מעמק יזרעאל.

	quartz	phyllosill.	calcite	dolomite	K-felds.	plagioc.	others
EYS 1	40	40 - 45	<5	<1	5	5 - 10	hemat.? amphib.?
EYS 2	40	50	<5	<1	<5	<5	hemat.?
EYS 3	40	45 - 50	<5	-	5	5	-
EYS 5	40	45 - 50	5	<1	<5	<5	-
EYS 7	40 - 45	35 - 40	10	<1	5 - 10	<5	-
EYS 9	40	40 - 45	5	<1	5 - 10	<5	-
EYS 11	40 - 45	40 - 45	5	<1	<3	5	hemat.? amphib.?
EYS 12	35 - 40	50	5 - 10	?	<5	?	
EYS 17a	35	45	10	<1	<5	5	-

טבלה 7. ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי בדוגמאות הקרקע שנדגמו בתאריך 6.11.11 בשלושה חתכים בעמק יזרעאל.

sample	depth	IS	saddle	Ka	I	Ch	P	Q	IS or	others
1st section - south Ma'ale Qishon Reservoir										
EYS 1	a	80 - 85	0.65	10	5	<3		<2	?	Kf <3
EYS 2	b	85	0.90	10	<3	<3		<1		
EYS 3	a	75 - 80	0.98	10	5	<5	?<3	<1		Kf <3
EYS 4	b	75 - 80	~1	10	5	<3	?<5	?		
EYS 5	a	65	>1	15	?	<5	5 - 10	<2	5 - 10	KaS?
EYS 6	b	75 - 80	>1	10 - 15	?	<3	5 - 10	<2	?	
EYS 7	a	85	0.68	10	<3	<3		<2		
EYS 8	b	80 - 85	0.58	10 - 15	<3	<5		<1		
EYS 9	a	85 - 90	0.57	10	<3	<3		<1		Kf <3
EYS 10	b	85	0.43	10	?	<3		<1		Kf <3
2nd section - north Ma'ale Qishon Reservoir										
EYS 11	a	85	0.82	5 - 10	<3	<5		?		
EYS 12	b	85	0.70	10	<3	<5				Kf <3
EYS 13	a	85 - 90	0.69	10		<3		<1		KaS?
EYS 14	b	80	0.74	10	<5	5		<1		
EYS 15	a	80	0.72	10	<5	5		<1		goe?
EYS 16	b	85 - 90	0.62	10	?	<5				
EYS 17	a	80 - 85	0.73	10	<3	5		?		KaS
EYS 18	b	85	0.57	10 - 15		<5		<1		
EYS 19	0	85	0.50	10	<3	<3		?		
3rd section - south Kfar Baruch Reservoir										
EYS 20	a	85 - 90	0.70	5 - 10	?	<3				
EYS 21	b	85	0.69	5 - 10	<3	<3		?		
EYS 22	a	85	0.57	10	?	<3		<1		Kf <3
EYS 23	b	85	0.55	10	<3	<3		<1		
EYS 24	a	85	0.51	10	<3	<3		<1		
EYS 25	b	85	0.63	10	?	<3		?		
EYS 26	a	85	0.56	10	?	<3		<1		
EYS 27	b	85	0.55	10	?	<5		?		

IS = איליט-סמקטיט

saddle = אוקף

Ka = קאוליניט

I = איליט

Ch = כלוריט

P = פליגורסקיט

Q = קוורץ

IS or = איליט-סמקטיט מסודר

Kf = פלדספר אשלגני

KaS = קאוליניט-סמקטיט

goet = גטיט

טבלה 8. ההרכב המינרלוגי של המקטע החרסיתי בדוגמאות הקרקע שנדגמו בתאריך 30.04.12 בשלושה חתכים בעמק יזרעאל.

sample	depth	IS	saddle	Ka	I	Ch	P	Q	IS or	others
1st section - south Ma'ale Qishon Reservoir										
EYS 1a	a	80 - 85	0.79	10 - 15	<5	<5		<1	?	
EYS 2a	b	80 - 85	0.79	10	<5	<5		<1		KaS?
EYS 3a	a	70 - 75	~1	10 - 15	10	<3	?	<1	?	
EYS 4a	b	75	~1	10 - 15	5	<5	?	<1	?	
EYS 5a	a	65	>1	10	<5	<5	20 - 25	<1	?	
EYS 6a	b	60	>1	10	5	<5	20 - 25	<1	?	
EYS 7a	a	85	0.63	10	<3	<3		<1		KaS?
EYS 8a	b	80 - 85	0.64	10	<3	<3		<1		
EYS 9a	a	80 - 85	0.50	10 - 15	<5	<3		<1		
EYS 10a	b	80	0.50	15	<3	<3		<1	?	
2nd section - north Ma'ale Qishon Reservoir										
EYS 11a	a	80	0.69	10 - 15	<5	<3		<1	?	
EYS 12a	b	85	0.64	10	?	<3		<1	?	
EYS 13a	a	85	0.68	10	<5	<5		<1		
EYS 14a	b	85	0.63	10 - 15	?	<5		?		
EYS 15a	a	85	0.53	10	?	<5		<1		
EYS 16a	b	85 - 90	0.72	10	?	<3		?		
EYS 17a	a	80	0.50	15	<3	<5		<1		
EYS 18a	b	85	0.63	10	?	<3		?		
3rd section - south Kfar Baruch Reservoir										
EYS 20a	a	85	0.60	10	?	<3		?		KaS?
EYS 21a	b	85 - 90	0.38	10	<3	<3		?		
EYS 22a	a	85	0.59	10		<3		?		
EYS 23a	b	80 - 85	0.46	10 - 15	?	<3		?		
EYS 24a	a	80 - 85	0.45	10 - 15		<3		<1		
EYS 25a	b	85	0.32	10 - 15		?		?		
EYS 26a	a	80 - 85	0.31	10 - 15		<3		<1		
EYS 27a	b	85 - 90	0.58	5 - 10	?	<3		?		

IS = איליט-סמקטיט

saddle = אוקף

Ka = קאוליניט

I = איליט

Ch = כלוריט

P = פליגורסקיט

Q = קוורץ

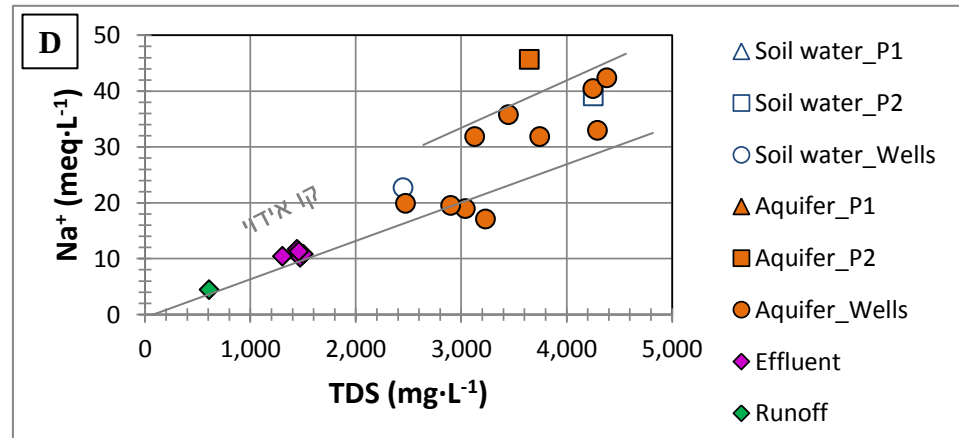
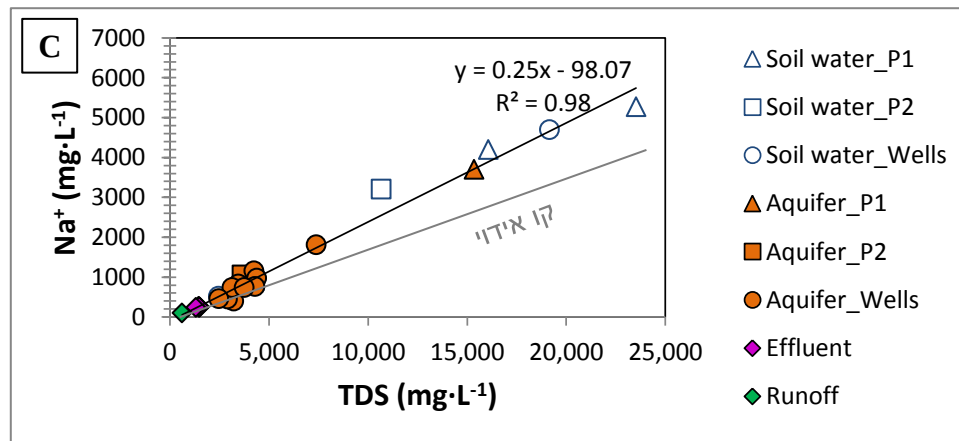
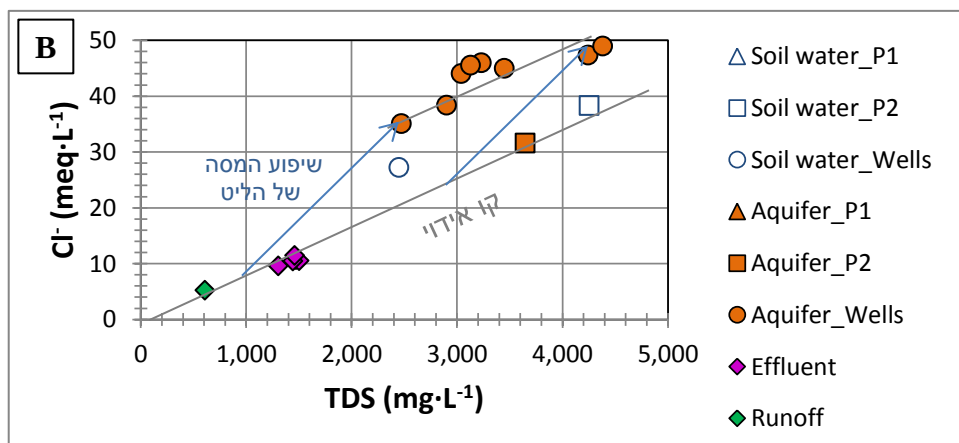
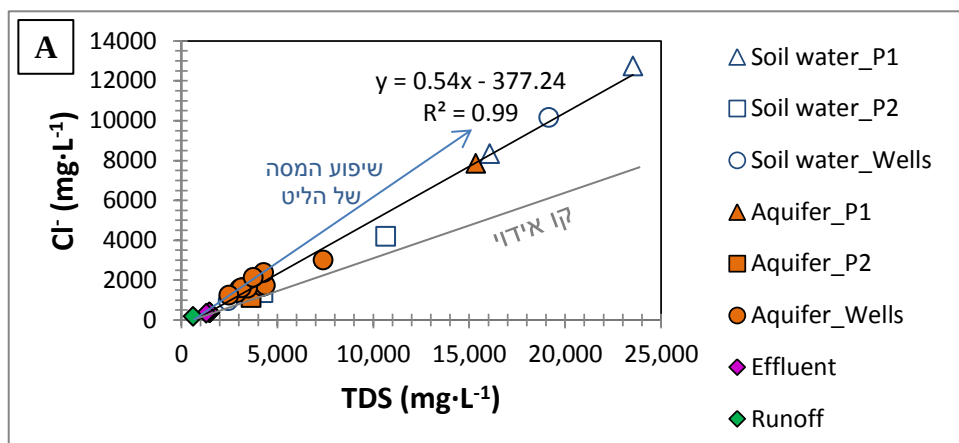
IS or = איליט-סמקטיט מסודר

Kf = פלדספר אשלגני

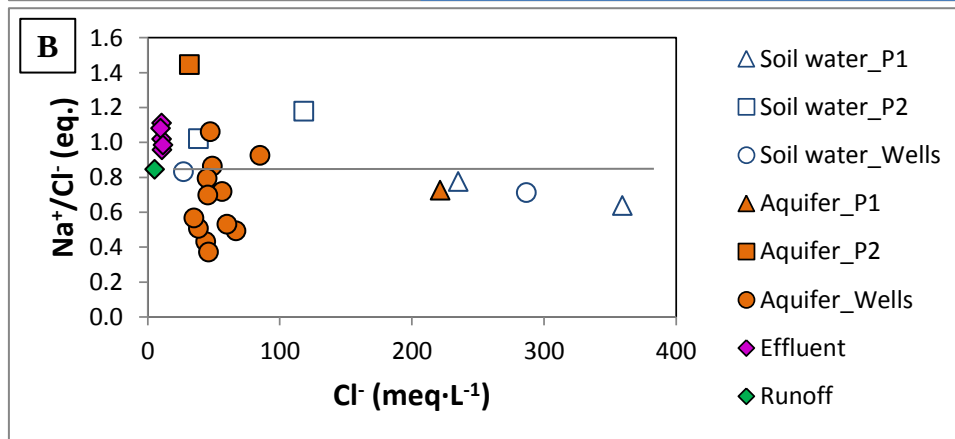
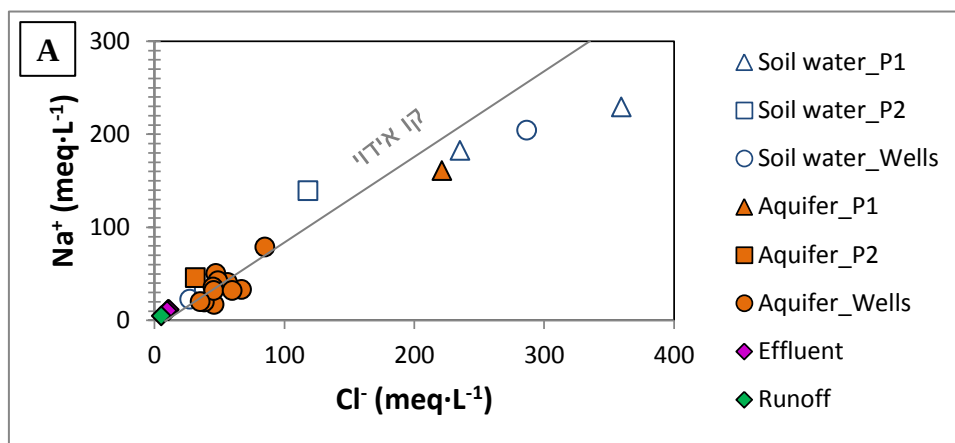
KaS = קאוליניט-סמקטיט

goet = גטיט

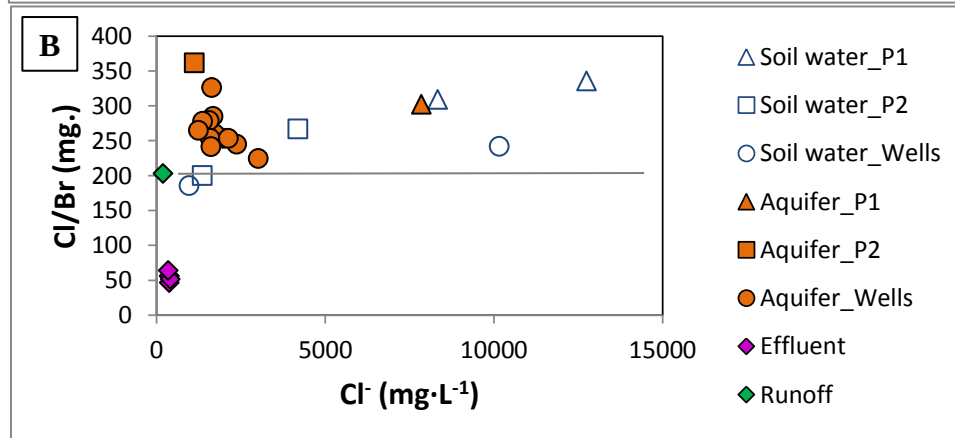
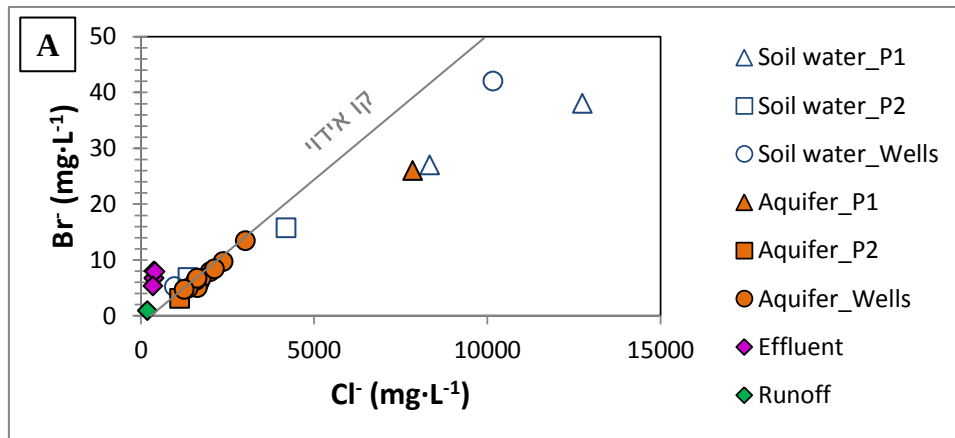
תרשימים



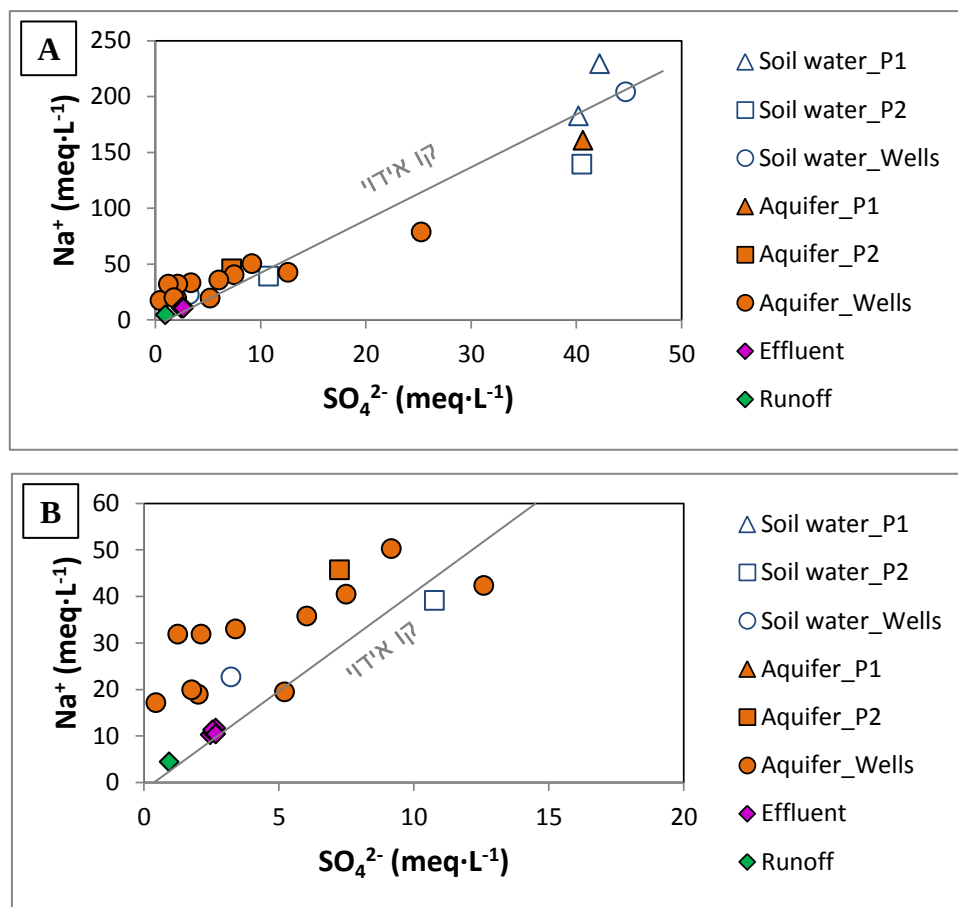
תרשים 2. ריכוזי ה-Cl⁻ וה-Na⁺ כנגד סך המומסים (TDS) במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל. הסימונים P1 ו-P2 במקרא מתייחסים לקבוצות פיוזומטרים אלו והקידוחים (wells) הם הקידוחים שנקדחו ע"י גב (1989) (ראה מפה בתרשים 1).



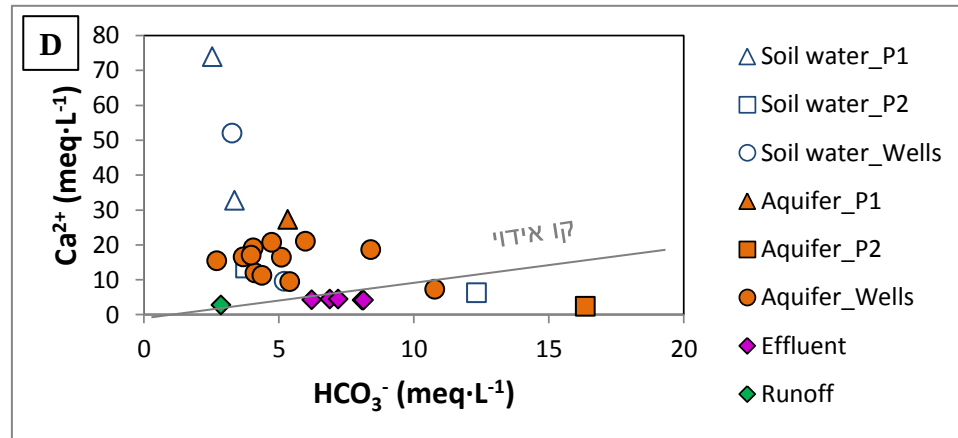
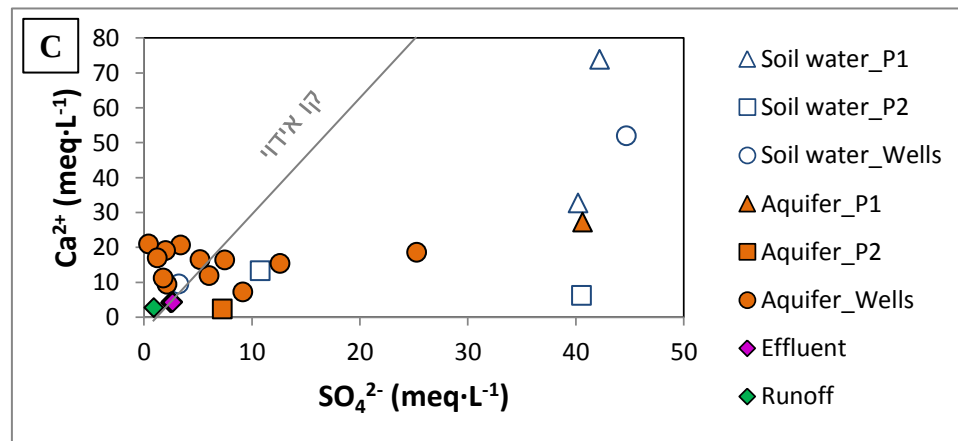
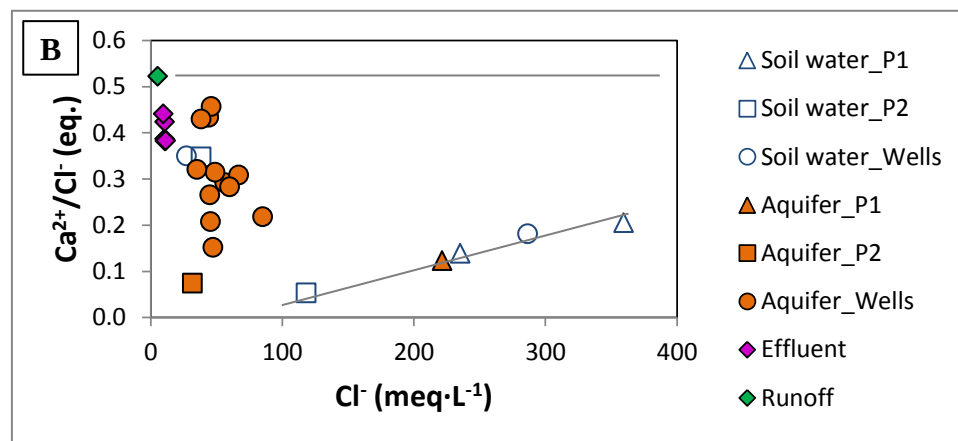
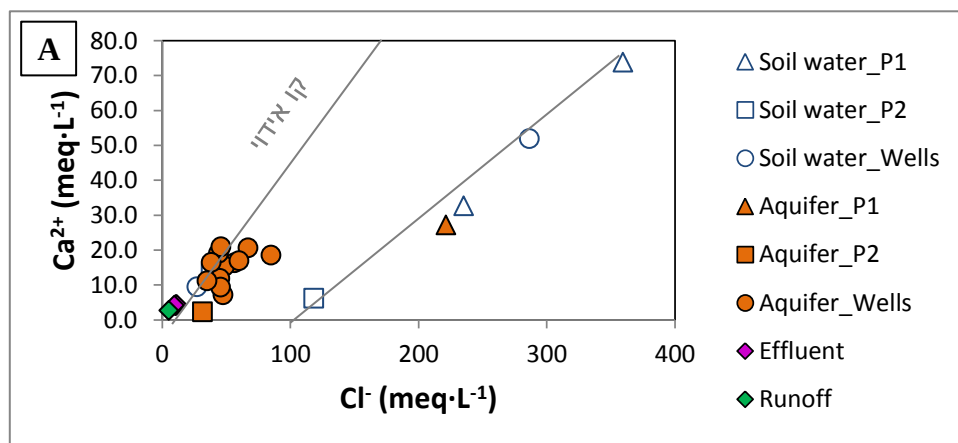
תרשים 3. ריכוזי ה- Na⁺ כנגד ריכוזי ה- Cl⁻ והיחס האקוויוולנטי ביניהם במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.



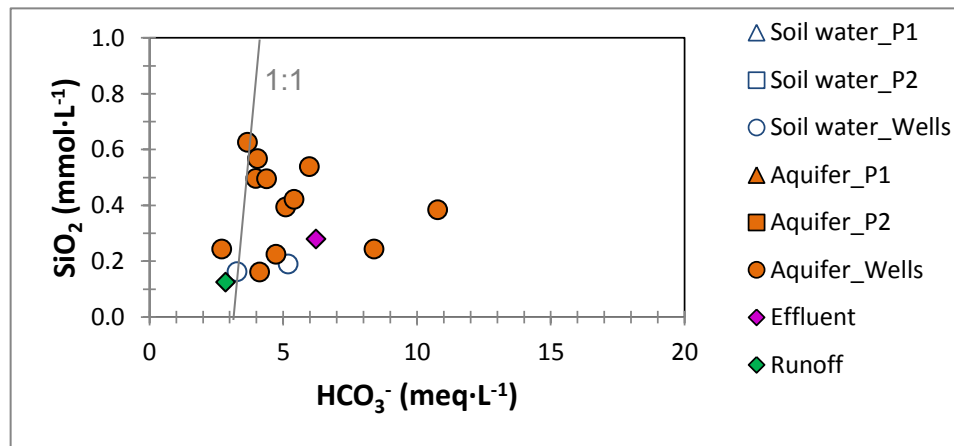
תרשים 4. ריכוזי ה- Br⁻ כנגד ריכוזי ה- Cl⁻ והיחס המשקלי ביניהם במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.



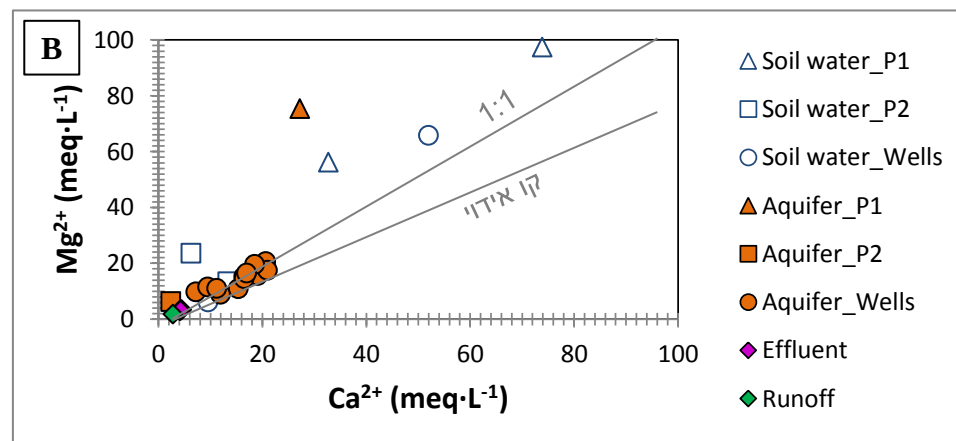
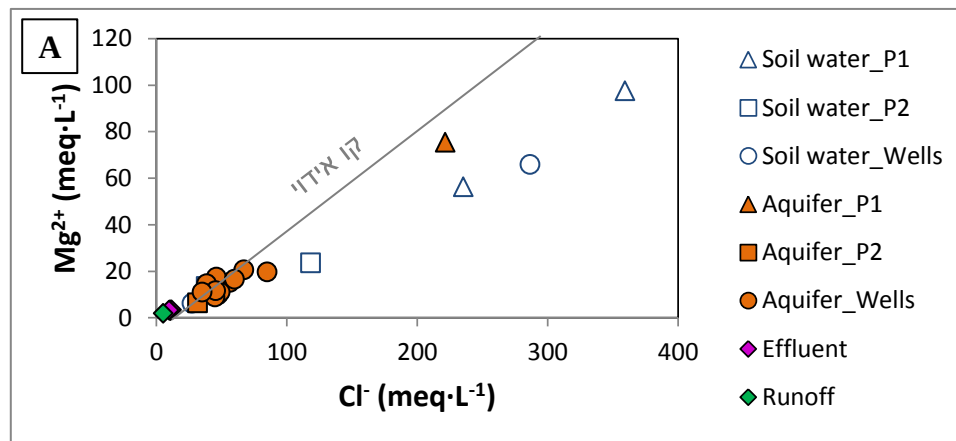
תרשים 5. ריכוזי ה- Na^+ כנגד ריכוזי ה- SO_4^{2-} במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.



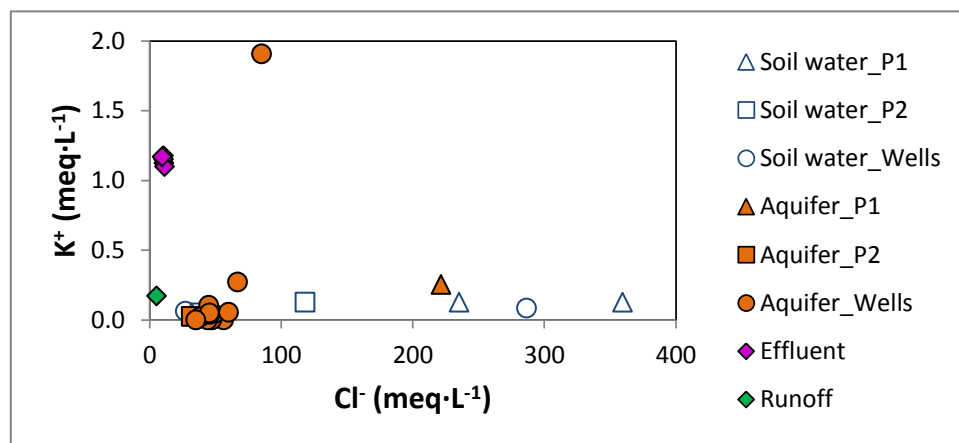
תרשים 6. ריכוזי ה- Ca²⁺ כנגד ריכוזי ה- Cl⁻, ה- SO₄²⁻ וה- HCO₃⁻ במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל.



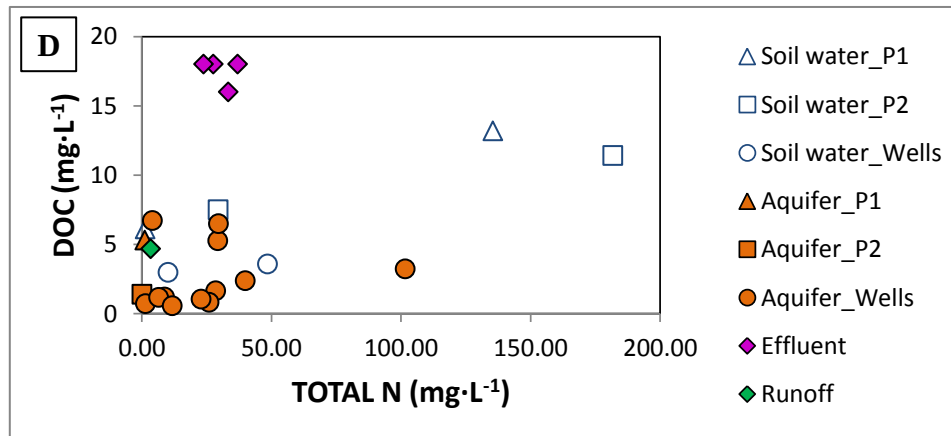
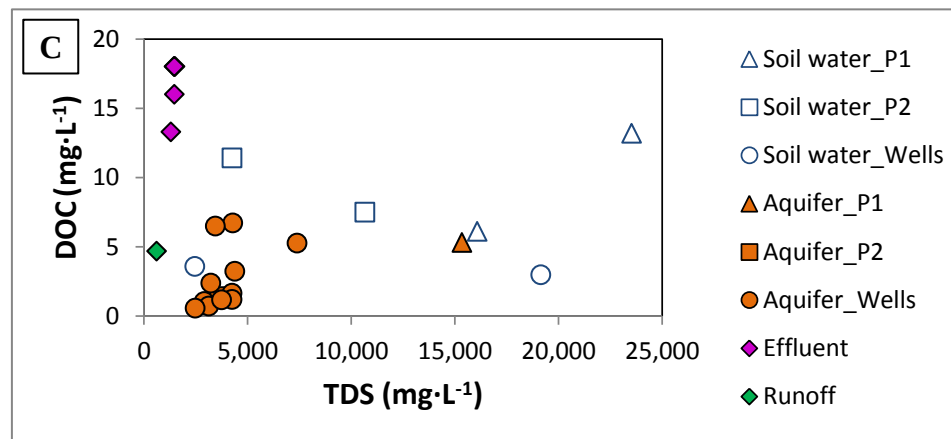
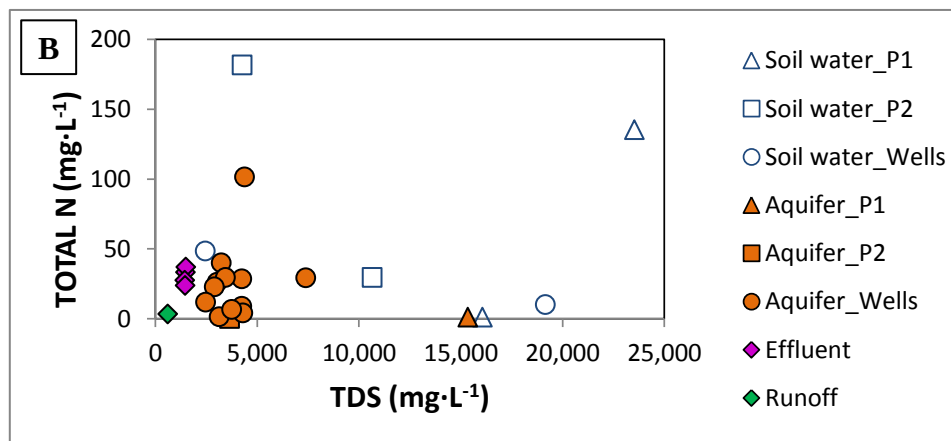
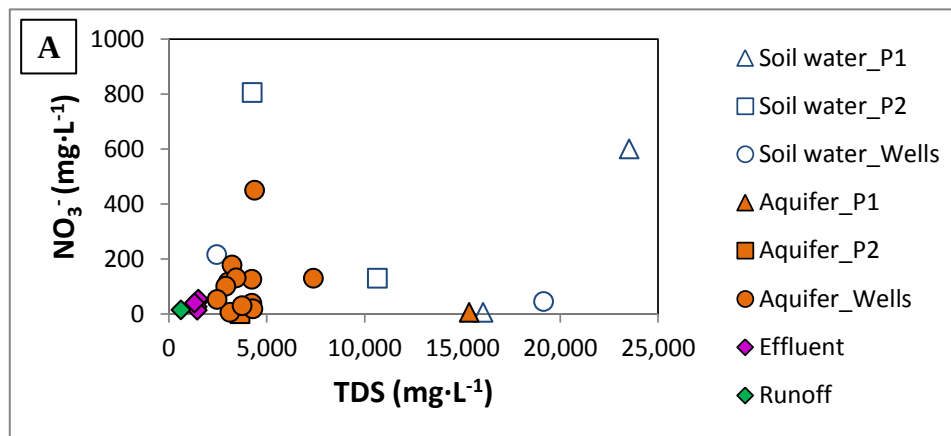
תרשים 7. ריכוזי ה- SiO_2 כנגד ריכוזי ה- HCO_3^- במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל. הסימונים P1 ו-P2 במקרא מתייחסים לקבוצות פיזומטרים אלו והקידוחים (wells) הם הקידוחים שנקדחו ע"י גב (1989) (ראה מפה בתרשים 1).



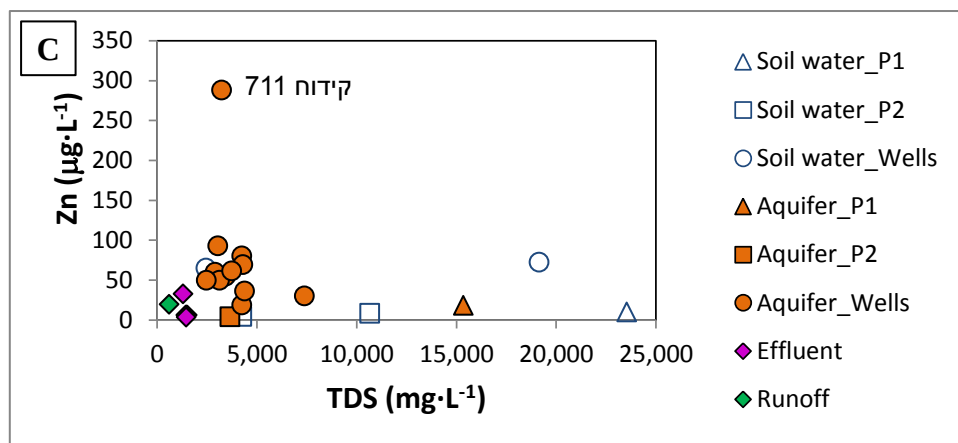
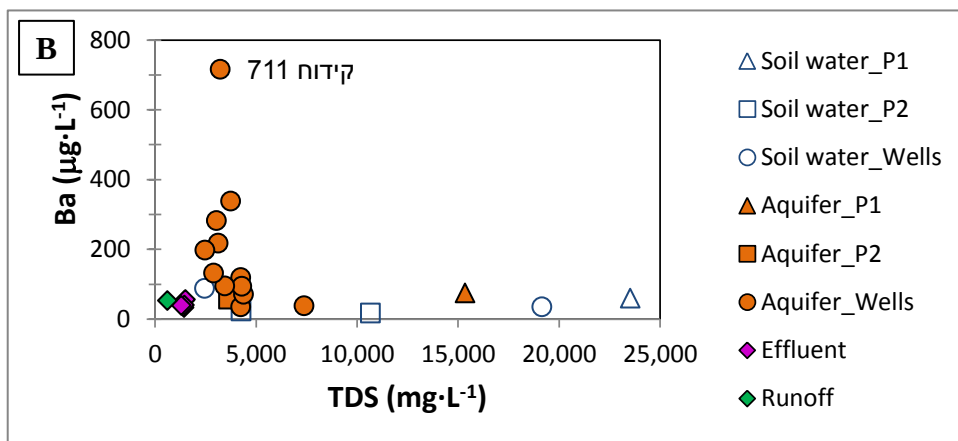
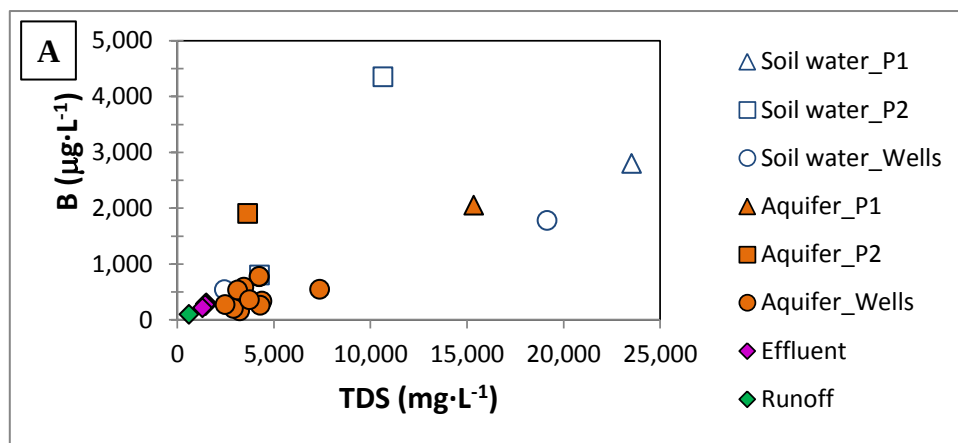
תרשים 8. ריכוזי ה- Mg^{2+} כנגד ריכוזי ה- Cl^- וה- Ca^{2+} במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל. הסימונים P1 ו-P2 במקרא מתייחסים לקבוצות פיזומטרים אלו והקידוחים (wells) הם הקידוחים שנקדחו ע"י גב (1989) (ראה מפה בתרשים 1).



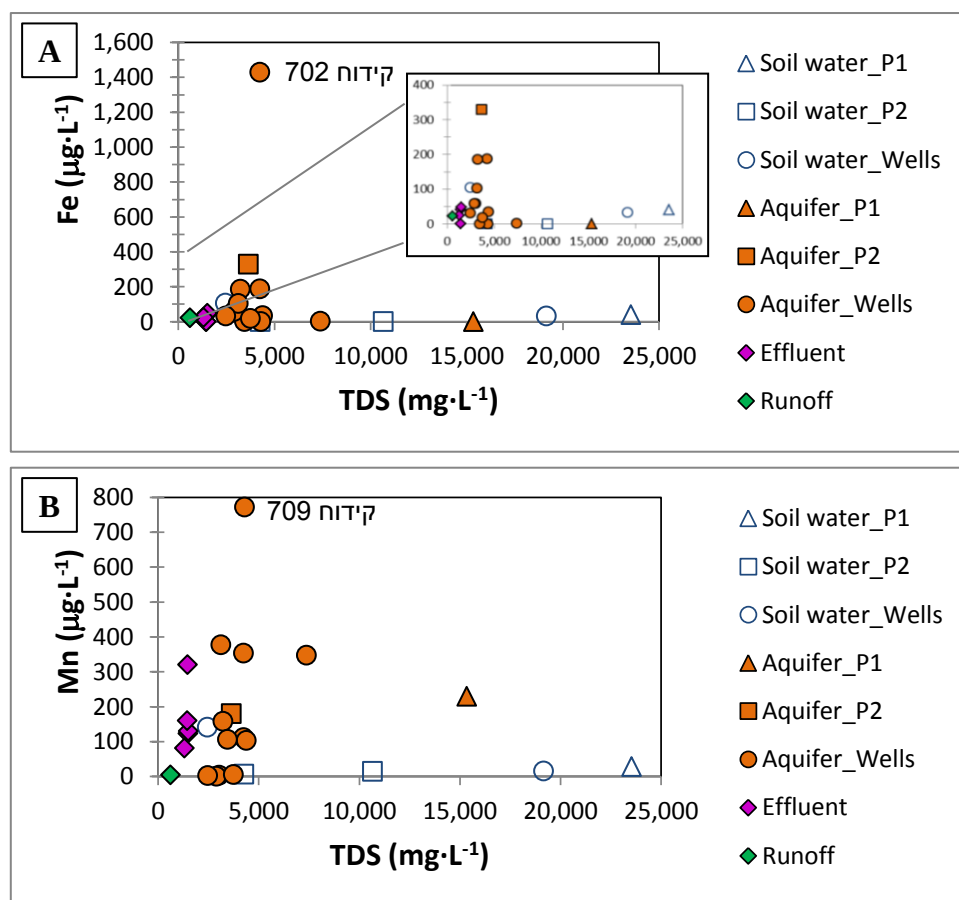
תרשים 9. ריכוזי ה- K^+ כנגד ריכוזי ה- Cl^- במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל. הסימונים P1 ו-P2 במקרא מתייחסים לקבוצות פיזומטרים אלו והקידוחים (wells) הם הקידוחים שנקדחו ע"י גב (1989) (ראה מפה בתרשים 1).



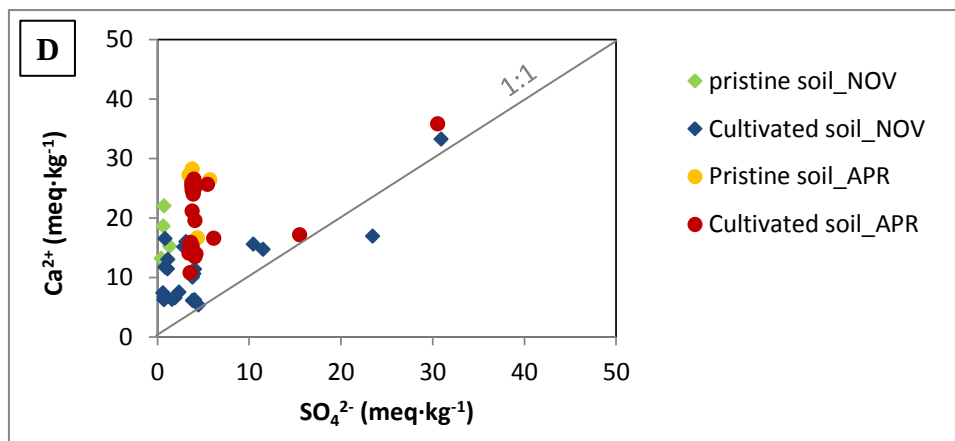
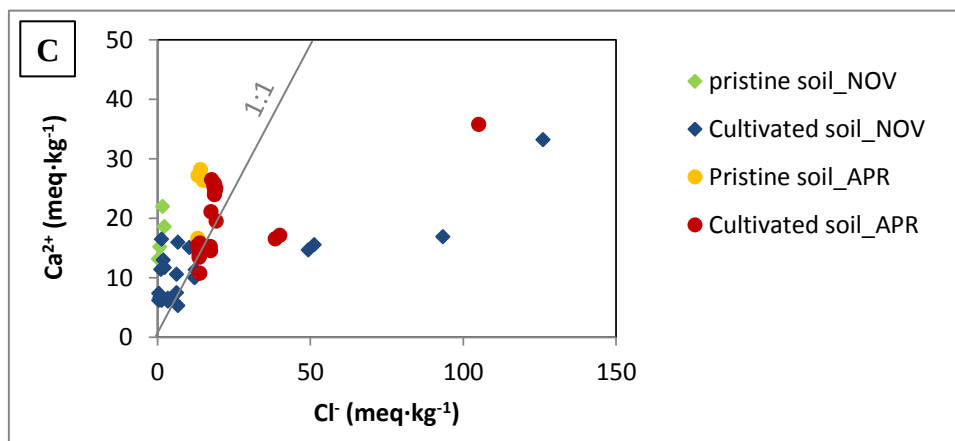
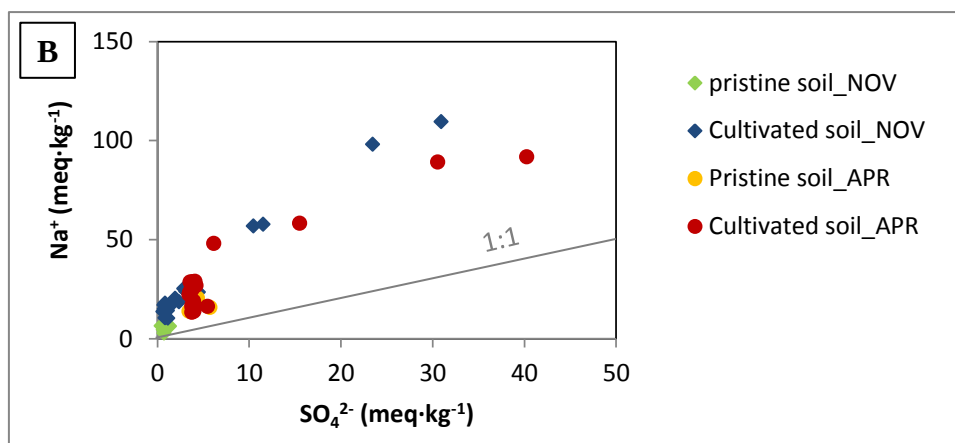
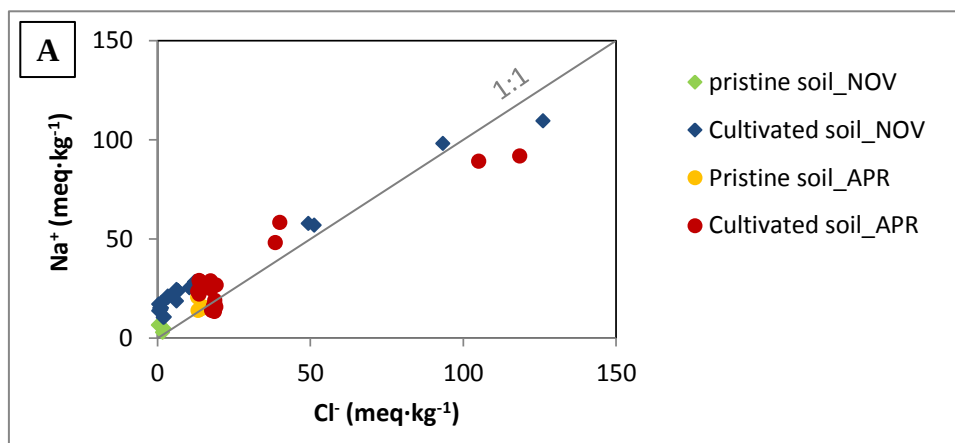
תרשים 10. ריכוזי ה- NO₃⁻, החנקן הכולל (TOTAL N) והפחמן האורגני המומס (DOC) כנגד סך המומסים (TDS) וריכוזי ה- DOC כנגד ריכוזי החנקן הכולל במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל. הסימונים P1 ו- P2 במקרא מתייחסים לקבוצות פיזומטרים אלו והקידוחים (wells) הם הקידוחים שנקדחו ע"י גב (1989) (ראה מפה בתרשים 1).



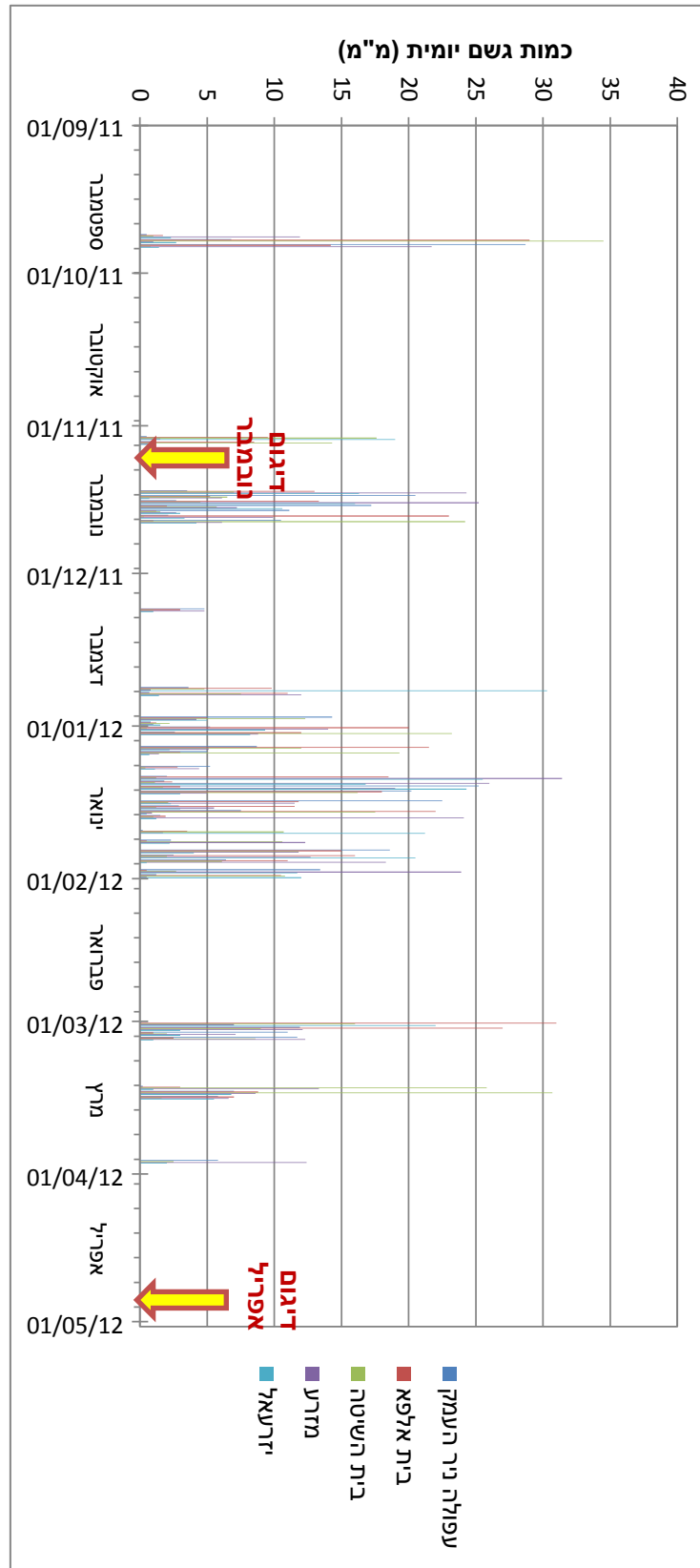
תרשים 11. ריכוזי ה-B, Ba, ו-Zn כנגד סך המומסים (TDS) במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל. הסימונים P1 ו-P2 במקרא מתייחסים לקבוצות פיזומטרים אלו והקידוחים (wells) הם הקידוחים שנקדחו ע"י גב (1989) (ראה מפה בתרשים 1).



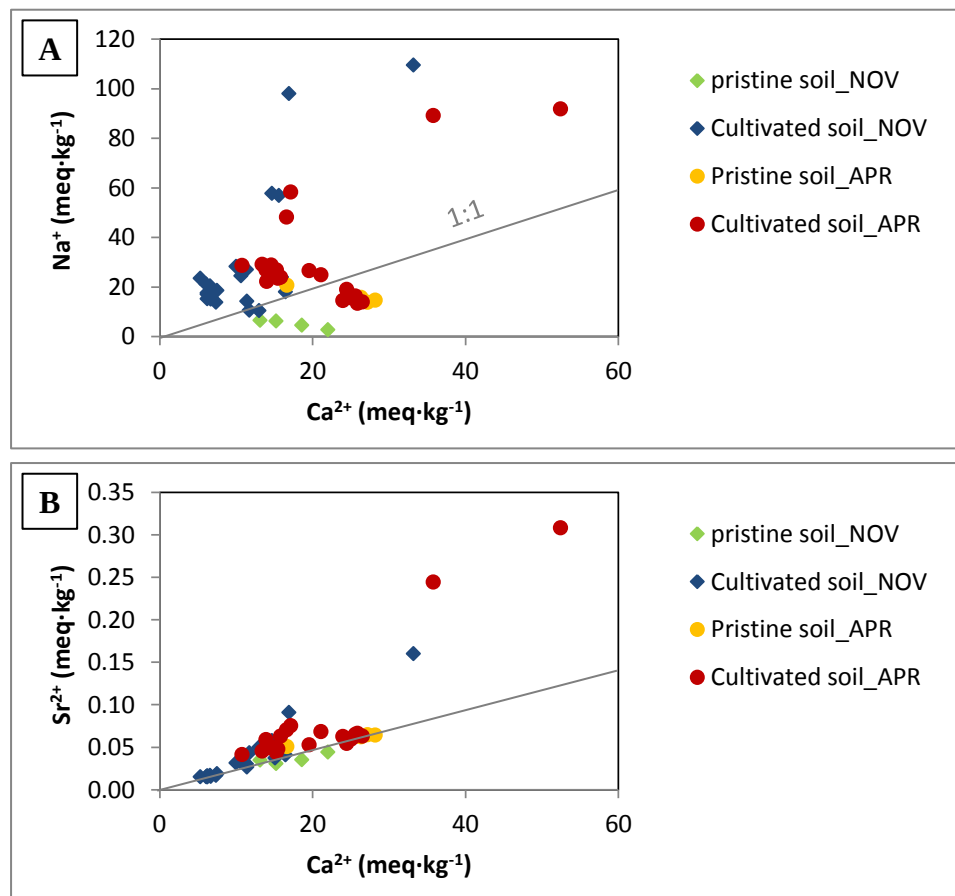
תרשים 12. ריכוזי ה-Fe וה-Mn כנגד סך המומסים (TDS) במים במערכת ההידרולוגית הרדודה בעמק יזרעאל. הסימונים P1 ו-P2 במקרא מתייחסים לקבוצות פיזומטרים אלו והקידוחים (wells) הם הקידוחים שנקדחו ע"י גב (1989) (ראה מפה בתרשים 1).



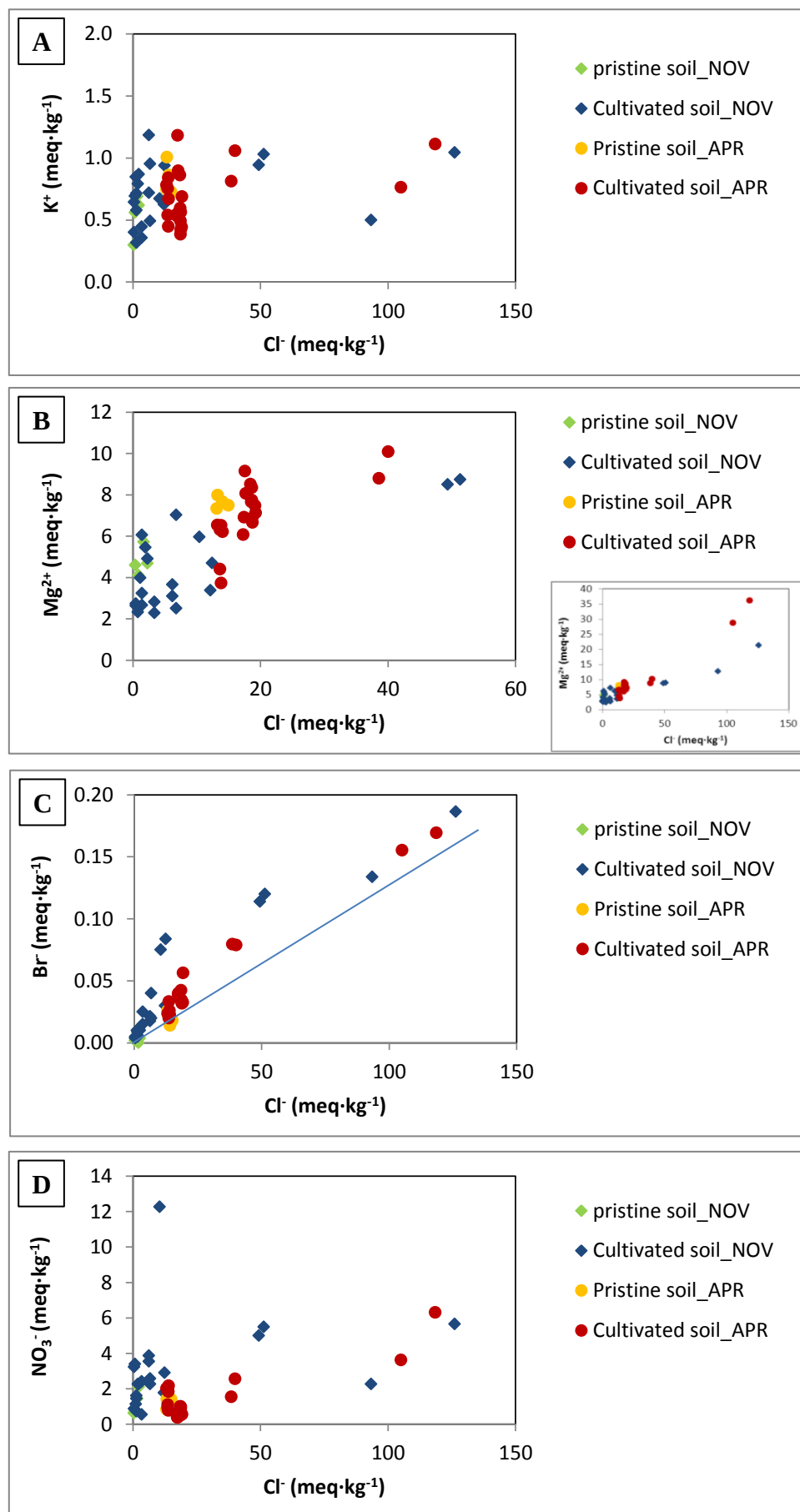
תרשים 13. הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של Na⁺ ו-Ca²⁺ כנגד ה-Cl⁻ וה-SO₄²⁻ בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל. על מנת ללמוד על מקור היונים ועל המלחים בקרקע הריכוזים מוצגים במיליאקוויוולנטיים לק"ג קרקע.



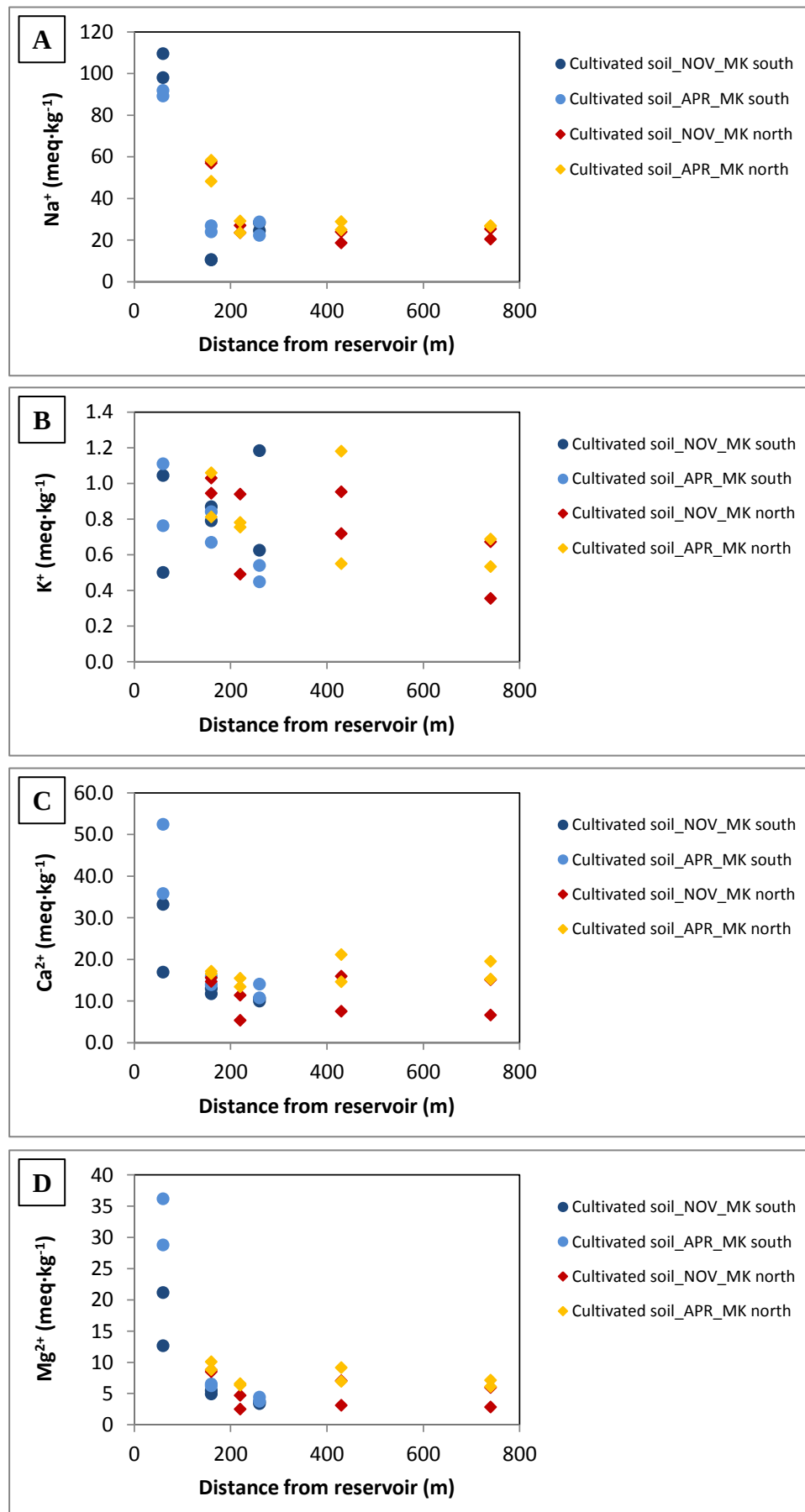
תרשים 14. כמות גשם יומית בחמש תחנות באזור המחקר בתקופת דיוגמי הקרקעית.



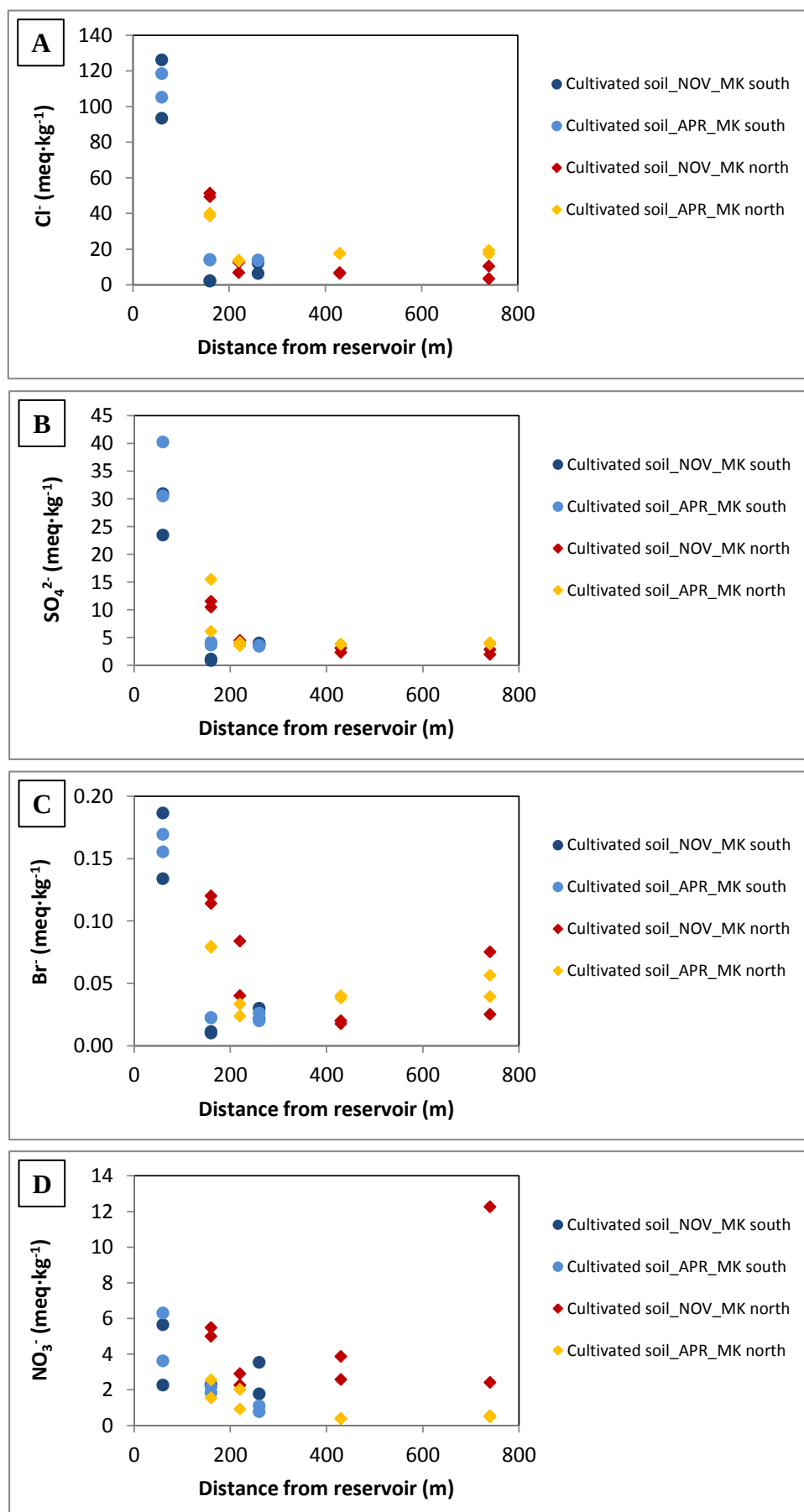
תרשים 15. הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של Na^+ ו- Sr^{2+} כנגד Ca^{2+} בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל. על מנת ללמוד על מקור היונים ועל המלחים בקרקע הריכוזים מוצגים במיליאקוויוולנטיים לק"ג קרקע.



תרשים 16. הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של K^+ , Mg^{2+} , Br^- ו- NO_3^- כנגד Cl^- בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל. על מנת ללמוד על מקור היונים ועל המלחים בקרקע הריכוזים מוצגים במיליאקוויוולנטיים לק"ג קרקע.



תרשים 17. השתנות הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של הקטיונים Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ו- Mg^{2+} בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל עם המרחק ממאגר הקולחים מעלה קישון. על מנת ללמוד על מקור היונים ועל המלחים בקרקע הריכוזים מוצגים במיליאקוויוולנטיים לק"ג קרקע.



תרשים 18. השתנות הריכוזים המסיסים במים מזוקקים של האניונים Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- ו- NO_3^- בדוגמאות הקרקע מעמק יזרעאל עם המרחק ממאגר הקולחים מעלה קישון. על מנת ללמוד על מקור היונים ועל המלחים בקרקע הריכוזים מוצגים במיליאקוויוולנטיים לק"ג קרקע.

the Na^+ is the dominant cation. The cultivated soils have higher concentrations of Na^+ , Cl^- and Br^- and lower concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} compared to those of the fallow soils. The Ma'ale Kishon reservoir increases the soluble ion concentrations in the nearby soils (to a distance of 100-200 m) due to increasing the hydraulic head of the subsurface water horizons and enhancing the wetting and drying cycles.

The mineralogical composition of the clay fraction in most of the examined samples is more illitic than in other vertic soils in Israel. The spatial distribution of the clay compositions indicates that irrigation with effluent and the reservoirs cause illitization of the clay fraction and palygorskite formation at one site. The illitization in the cultivated soils is enhanced by the frequent wetting and drying cycles due to irrigation during summer and by the high potassium concentration in the effluent from the Kishon project complex.

Palygorskite was detected in the site where enhanced illitization was also found but unlike the ordered IS formation, the palygorskite was found at the end of the rainy season. This site had the highest pH values in the saturated dough water and the lowest soluble Mg concentration due to its incorporation into the palygorskite. The formation of palygorskite as a result of agricultural cultivation has not been reported in Israel until the present work. Both, illitization and palygorskite formation decrease the cation exchange capacity of the soil and harm the ability of the soil to maintain and transfer feed materials to the plants, mainly in poor organic matter soils.

ABSTRACT

The Yizre'el Valley is a large agricultural area, which is intensively irrigated by effluents and flood waters stored in reservoirs. During the past decades, the valley suffered from drainage problems due to intensive irrigation of clayey soils, hydraulic obstruction of the Kishon drainage system by the reservoirs, and the high hydraulic head of the confined upper aquifer. This inadequate drainage system leads to salinization of the groundwater and the soils. In order to diminish the severe salinization phenomena artificial drainage systems were installed in the valley since the eighties. These systems aim to enable rapid drainage of water and salts from the upper soil layer and to reduce the hydraulic heads of the water levels in the soil and of the aquifer. The present study provides an updated picture with regarding to the water and soil compositions in the Yizre'el Valley under this irrigation and drainage regime. The study examines the impacts of intensive irrigation with effluents and of reservoirs existence on the geochemical characteristics of the groundwater and on the mineralogical and geochemical compositions of the soils.

Water was sampled from the Ma'ale Kishon and Kfar Baruch reservoirs, from shallow piezometers and from 14 observation wells in the upper aquifer. The soils were sampled along three sections from near the reservoirs and further upslope.

The irrigation with effluent cause to accumulation of salts in the cultivated soils and to high salts concentrations in the soil water horizons. This salts accumulation is a result of the frequent wetting and drying cycles during the irrigation period.

The water in the soil horizons is the saline end member of the shallow hydrological system and contributed to the aquifer salinization. The waters in the aquifer and in the soil horizons are much more saline than their potential recharge sources – rain, runoff and effluent, mainly due to evaporation and NaCl dissolution. Nonetheless, in most samples Cl^- is in excess compared to Na^+ , indicating Na^+ retaining in the soil. In addition, the groundwater composition varies due to combined geochemical processes that occur in different intensities along the aquifer such as gypsum dissolution, sulfate reduction, denitrification, weathering of silicate minerals and organic matter oxidation. The high nitrate concentrations in the soil horizons and in the aquifer may be derived from effluent, fertilizers or organic manure.

The soluble ion compositions in the cultivated soils are different from those in fallow soils. In the fallow soils the Ca^{2+} is the dominant cation whereas in the cultivated soils

PUBLICATION DOCUMENTATION PAGE

1. Publication No. ES-04-14	2.	3. Recipient Accession No.
4. Title and Subtitle The composition of water and soil in the Yizre'el Valley under irrigation with effluent, Final report	5. Publication Date 4.2.2014	
	6. Performing Organiz. Code	
7. Author (s) Orly Goren, Amir Sandler, Liron Shiri, Boaz Lazar	8. Performing Organiz. Rep. No. GSI/03/2014	
9. Performing Organization Name and Address Geological Survey of Israel	10. Project/ Task / Work Unit No.	
	11. Contract No. 210-17-047	
12. Sponsoring Organization (s) Name and Address (a) The Ministry Of National Infrastructures, energy and water resources P.O.B. Box 13106, 91130 Jerusalem	13. Type of report and period covered Final report	
	14. Sponsoring Organiz. Code	
15. Supplementary Notes		
16. Abstract (Limit 200 Words) The Yizre'el Valley is a large agricultural area, which is intensively irrigated by effluents and flood waters stored in reservoirs. During the past decades, the valley suffered from drainage problems due to intensive irrigation of clayey soils, hydraulic obstruction of the Kishon drainage system by the reservoirs, and the high hydraulic head of the confined upper aquifer. This inadequate drainage system leads to salinization of the groundwater and the soils. In order to diminish the severe salinization phenomena artificial drainage systems were installed in the valley since the eighties. These systems aim to enable rapid drainage of water and salts from the upper soil layer and to reduce the hydraulic heads of the water levels in the soil and of the aquifer. The present study provides an updated picture with regarding to the water and soil compositions in the Yizre'el Valley under this irrigation and drainage regime. The study examines the impacts of intensive irrigation with effluents and of reservoirs existence on the geochemical characteristics of the groundwater and on the mineralogical and geochemical compositions of the soils.		
17. Keywords Yizre'el Valley, aquifer, clay minerals, agricultural effect, shallow hydrological system, effluent, irrigation, soil		
18. Availability Statement Geological Survey of Israel	19. Security Class (This Report)	20. Security Class (This Page)
	21. No. of Pages 46	22. Price