

הקרקה, האזור הלא רווי והמלחת מי התהום בדרום-מזרח אקוויפר החוף

דני קורצמן

המכון למדעי הקרקע המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני, בית דגן 50250

[מפרסומי מינהל המחקר החקלאי, מס' 603/11; המאמר עבר ביקורת מדעית]

תקציר

מאז שנות החמישים של המאה הקודמת הומלחו אזורים שונים באקוויפר החוף הדרום-מזרחי וההפקה מבארות רבות הופסקה. מאמר זה מציע שהמעבר לחקלאות אינטנסיבית על גבי הקרקעות החרסיתיות באזור זה גורם לשטיפה משמעותית של מלחים שהצטברו במשך מאות שנים באזור הלא רווי לאקוויפר, ולהמלחתו. בהבדל ממנגנוני המלחה שהוצעו בעבר, המנגנון המוצע נתמך בתצפיות ישירות במקור המלח הקרוב לאקוויפר, ותצפיות וניתוח כמותי המלמדים על הסעה של מלח זה אל האקוויפר. ניתוח-מרחבי היסטורי ותצפיות חדשות תומכים ישירות ובעקיפין במנגנון ההמלחה המוצע.

מבוא

אקוויפר החוף הוא אקוויפר חופשי המשתרע מתחת לאזור המיושב ביותר בארץ, ושימושי הקרקע על גבי מחשופיו נתונים לשינויים תכופים יחסית. שינויים אלה עשויים להשפיע על ספיקות המילוי החוזר וריכוזי המומסים שמים אלה נושאים עימם למי התהום. בין פני הקרקע לפני מי התהום של אקוויפר החוף, עוברים המים דרך תווך לא רווי עבה יחסית (לרוב בין 10 ל-60 מ'). לכן, בבואנו לחקור תהליכים דינמיים באקוויפר מן הראוי לבחון כנבד ראש גם שינויים בפני השטח ואת השפעתם על הזרימה הלא רוויה. המלחת מי התהום באזור באר טוביה החל משנות החמישים של המאה הקודמת (Vengosh and Ben Zvi, 1994) או ההמלחה ועליית המפלסים המתמשכת באזורים נרחבים בדרום מזרח אקוויפר מאז שנות השבעים (רצועות רחובות – ניצנים, השרות ההידרולוגי, 2007), הם דוגמה לתהליכים כאלה.

הפיכת קרקע טבעית או שטחי מרעה, לקרקע מעובדת בעיבוד מודרני תגרום לרוב לשנוי במשטר החלחול העמוק של מים. אפילו גידולי שדה בבעל (ע"פ רוב דגנים מעל דרום אקוויפר החוף) ישפיעו על החלחול העמוק, כי צמחי תרבות פחות יעילים מהצמחייה הטבעית בצריכת המים מהחלק העליון של החתך הלא רווי. אם האידוי של המים דרך הצמחים (דיות – transpiration) קטן יותר הרטיבות הנותרת בחתך הלא רווי גדולה יותר כמו גם יכולת ההולכה הגרביטציונית של המים מטה אל מי התהום (Scanlon et al., 2007). החריש מגדיל את יכולת החדור של הקרקע ומאפשר למי הגשם בתחילת החורף לפני הנביטה ומיד אחריה בזמן שהדיות של הדגן קטנה, לחלחל לעומק ולשטוף עימם מלחים לעבר מי התהום. לא כל שכן בשטחים המשמשים לגידולי שדה המושקים בקיץ ובהרבה מקרים לא מתקיים בהם כלל גידול חורף, לכן הדיות בעונת הגשמים אפסית והתנאים לחלחול עמוק של מי הגשם טובים. בנוסף, מי ההשקיה בעונה היבשה לא תמיד מנוצלים במלואם ע"י הגידול וחלקם מחלחלים לעומק ושוטפים עמם מלחים בדומה למי הגשם.

בעבודה זו נחקרה תופעת ההמלחה בדרום אקוויפר החוף הן מפני הקרקע תוך התייחסות לסוג ואופי הקרקע, לשימוש הקרקע הדומיננטי – חקלאות, ולמנגנוני זרימה והסעת מלחים בתווך הלא רווי, והן מניתוח של נתונים הידרוגיאולוגיים היסטוריים מהאקוויפר. המסקנה העיקרית של מאמר זה היא שהשינוי בפעילות האנושית על פני הקרקע בדרום-מזרח אקוויפר החוף היא שהניעה את תהליך ההמלחה של

האקוויפר ולא השרשרת שמתחילה בפעילות האנושית באקוויפר, קרי: שאיבה - ירידת מפלסים – חדירה של מים מליחים משכבות רוויות שכנות, כפי שנטען בעבודות קודמות (בינן Vengosh and Ben Zvi, 1994; Avisar et al., 2004). מקור המלח להמלחה המואצת באזור זה נמצא באזור הלא-רווי שמעליו. הדרך למסקנה זו ותצפיות תומכות, מפורטות בארבעת חלקי המאמר להלן:

א. קרקעות ושימושי קרקע חקלאיים בפני השטח שמעל אקוויפר החוף – הדומיננטיות של הגרומוסולים המעובדים בדרום מזרח האקוויפר.

ב. החלק המרכזי של המאמר הכולל: תצפיות ומודלים של זרימה והסעת כלוריד בתוך הלא רווי תחת גרומוסולים מעובדים ולא מעובדים ומסקנות על מנגנוני חלחול. חיזוי השפעת שינוי בשימוש הקרקע ובמי ההשקיה על שטפי מילוי חוזר של מים ומלח לאקוויפר. ובדיקה האם השנוי במנגנון החלחול שהוצע יכול להסביר את מקרה ההמלחה המפורסם באזור באר טוביה.

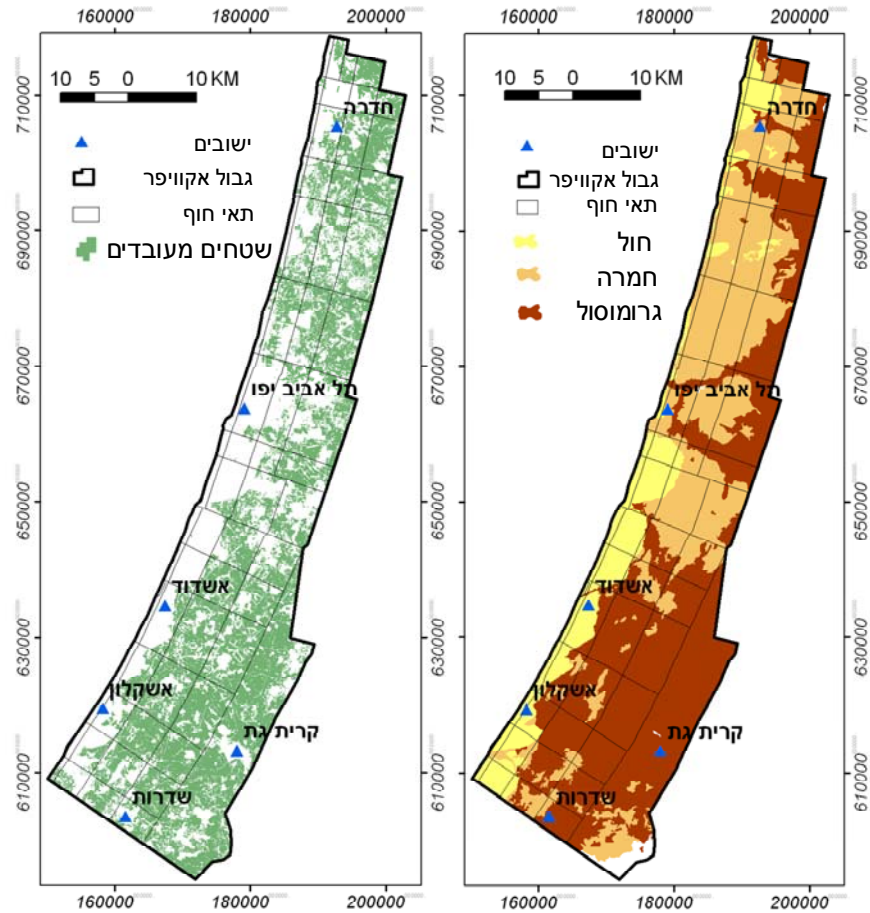
ג. ניתוח מרחבי של נתונים הידרוגיאולוגיים ואנתרופוגניים מתקופת המנדט המתמקד בשאלות: מה היה פירוס ריכוזי הכלוריד בשנות ה-30 באקוויפר החוף הדרומי? ומה גרם לפירוס הני"ל?

ד. דיון קצר על דליפות מהשכנים הרוויים של האקוויפר, הסקיה והאיאוקן.

א. קרקעות ועיבוד חקלאי מעל אקוויפר החוף

ניתן לחלק את הקרקעות המכסות את שטחי המילוי החוזר של אקוויפר החוף באופן גס לשלושה סוגים: חולות במערב האקוויפר, קרקעות חמרה במרכז וצפון האקוויפר וגרומוסולים בדרום, במזרח ובעמקי הנחלים (איור 1). הגרומוסולים הן קרקעות חרסיתיות הנוטות לפתח סדקי כוץ עמוקים בהתייבשותן (ורטיסולים). עיבוד והשקיה מתמשכים מצמצמים את העומק ואת צפיפות הסדקים. הגרומוסולים משמשים יותר לגידולי שדה מהחמרות שמתאימות לגידול הדרים, השטחים המעובדים בחול קטנים (2% משטח החולות). חיתוך מפת הקרקעות עם מפת השטחים המעובדים (איור 1) מדגיש את הדומיננטיות של הקרקעות הגרומוסוליות המעובדות על שטחי המילוי החוזר באקוויפר בכלל ובדרומו במיוחד (טבלה 1).

החרסיות, שבמצב טבעי יפתחו סדקים (גרומוסול), מכסות שני שלישים מאקוויפר החוף הדרומי והן דומיננטיות ביותר בחלק המרכזי והמזרחי של האקוויפר הדרומי (~90% מהשטח מתא אוגר מזרחי ומזרחה, איור 1, טבלה 1). כשלושה רבעים מהשטחים הגרומוסולים מעובדים. לכן, יתכן כי מחקר העוסק בחלחול העמוק תחת קרקעות גרומוסוליות מעובדות באינטנסיביות לעומת גרומוסולים טבעיים יכול לשפוך אור על השתנות בשטפי המילוי החוזר בעקבות השנויים בשימוש הקרקע ובאינטנסיביות העיבוד.



איור 1. מפת קרקעות (ימין) ושטחים מעובדים (שמאל) מעל אקוויפר החוף. הקלסיפיקציה לשלוש סוגי קרקע נעשתה ע"י אגרגציה של סוגי קרקע דומים משכבת הקרקעות הארצית שהוכנה ע"י היחידה לסקרים ומיפוי קרקע, משרד החקלאות. מפת הקרקעות המעובדות הוכנה משכבת שימושי הקרקע של הממ"ג הלאומי, המרכז למיפוי ישראל (מידע גיאוגרפי מעודכן לשנת 2000). הגבול המזרחי של האקוויפר מרצועת ראשון וצפונה, נלקח כגבול התא המזרחי ע"פ "תאי חוף" המקובלים בשרות ההידרולוגי, רשות המים. מרצועת רחובות דרומה הגבול נקבע בקרוב ע"פ המופעים המזרחיים של התצורות הפליאוקניות (יפו ופלשת) במפה הגיאולוגית של ישראל 1:200,000, גיליון 2, סנה וחוברי, המכון הגיאולוגי, 1998.

טבלה 1. אחוזי כיסוי של סוגי קרקע ושטחים מעובדים מעל אקוויפר החוף

משתנה מרחבי	% מהשטח הכללי	% משטחי הגרומוסול
גרומוסול	49	
חמרה	35	
חול	15	
קרקע אחרת	1	
שטח מעובד	51	75
גרומוסול	67	
חמרה	15	
חול	15	
קרקע אחרת	3	
שטח מעובד	59	77

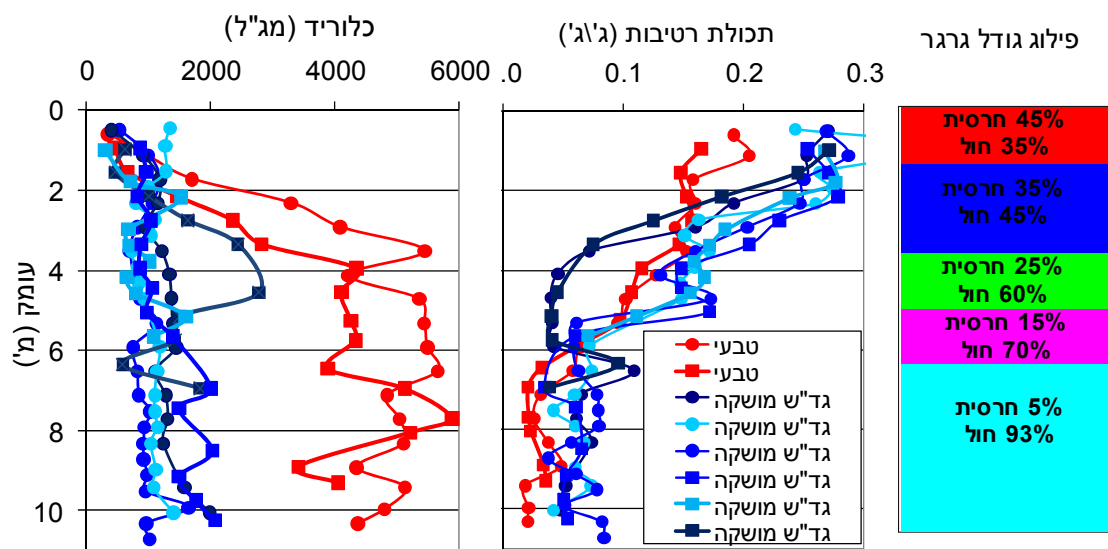
אקוויפר החוף כולו
(שרטוט 1), שטח – 2210 קמ"ר

אקוויפר החוף הדרומי
(רצועות רחובות - ניר עם, גבול מזרחי, ע"פ 1130 שרטוט 1), שטח – 1130 קמ"ר

ב. זרימה והסעת כלוריד בתווך הלא רווי תחת גידולי שדה (גד"ש) מושקים וקרקות בור בגרומוסולים

עבודה שהתמקדה בשאלה הנ"ל התפרסמה לאחרונה בכתב העת Vadose Zone Journal (Kurtzman and Scanlon, 2011). בפרק זה יוצגו תוצאות ומסקנות מעבודה זו בקיצור רב וסימולציות נוספות המבוססות על תוצאות עבודה זו מתפרסמות כאן לראשונה. שישה קידוחים עמוקים (~10 מ') לדגום קרקע נקדחו בשטחי גד"ש מושקים של קבוץ רבדים ושני קדוחים בשטח טבעי סמוך (לא מעובד). בכל הקדוחים עובי החרסית העליונה (חרסית $\leq 35\%$) נע בין 2 ל 4 מטרים. בעומק של 6 מטרים ומעלה המרקם היה חולי (חול $\leq 90\%$) בכל 8 הקידוחים. שכבות הביניים (6-3 מ' עומק) היו חוליות בשני קידוחים ובינוניות בשישה. פרופיל אופייני של פילוג גודל הגרגר מוצג באיור 2. התצפית הבולטת היא ריכוזי הכלוריד הגבוהים בצורה מובהקת תחת הקרקע הטבעית מאלה תחת הקרקע המעובדת ומושקה (250-550 מ"מ שנה, תלוי בגידול). השוואת תכולות הרטיבות בפרופילים תחת שני שמושי הקרקע במקטעים בהם המרקם נמצא דומה בכל 8 הקידוחים (0-3 מ' ויותר מ-6 מ' עומק) מראה שתחת השדות המעובדים הרטיבות גבוהה יותר בצורה מובהקת מאשר זו שתחת הקרקע הטבעית (Kurtzman and Scanlon 2011).

מודלים של זרימה והסעה אנכיים דרך המטריקס הנקבובי הלא רווי תחת שני שימושי הקרקע כוילו לתצפיות המרקם, תכולת הרטיבות והכלוריד (איור 2). שטפי החלחול הממוצעים למי התהום שהתקבלו מהמודלים המכילים הם - 145 מ"מ לשנה תחת הגד"ש לעומת כ-2 מ"מ בשנה בלבד תחת הקרקע הלא מעובדת (Kurtzman and Scanlon, 2011). הערכות מלוי חוזר ממוצע לאזור זה המבוססות על נתוני מי תהום, גשם, השקיה, ושאובה ומשמשות לחישוב מאזנים בשרות ההידרולוגי הן כ- 50 מ"מ לשנה מלוי חוזר מגשם ו- 70 - 80 מ"מ לשנה מהשקיה של 500 מ"מ לשנה (ע"פ מקדמי מלוי חוזר של 0.1 לגשם ו- 0.14 - 0.16 להשקיה, בכמט וחובריו, 2003). יוצא איפה שקימת התאמה בין המילוי החוזר שחושב מתצפיות במי התהום לבין זה שחושב במודל זרימת מטריקס בתווך הלא רווי תחת הגד"ש, וקיים חוסר התאמה בולט בין המילוי החוזר הממוצע שמחושב מנתוני המטריקס תחת הקרקע הטבעית לצפי למילוי חוזר מגשם בלבד המחושב בעזרת נתוני מי תהום. גם ריכוזי הכלוריד במי הנקבובים בתווך הלא רווי שמתחת לבית השורשים בגד"ש (1000 - 2000 מג"ל) דומים לריכוזי הכלוריד במי התהום באזור זה בימינו, לא כן ריכוז הכלוריד במי הנקבובים בעומק תחת הקרקע הטבעית (3000 - 6000 מג"ל). ריכוזי כלוריד במי התהום משנות ה-30 באזור רבדים נעים בין 180 ל- 470 מג"ל והממוצע קרוב ל- 250 מג"ל (Department of land Settlement and Water Commissioner 1947). שטח הקרקעות הטבעיות בשנות ה-30 היה גדול יותר ובקרקעות המעובדות גידלו בבעל בלבד והחריש היה רדוד ביחס לעיבוד האינטנסיבי המקובל היום. יוצא איפה, שתחת הקרקע הטבעית זרימת מטריקס לא יכולה להסביר את נתוני התווך הלא רווי ומי התהום, לעומת זאת תחת גד"ש זרימת מטריקס באזור הלא רווי מתיישבת עם כל הנתונים. מודלים של זרימה והסעה בתווך בו יש אזור מוליך ואזור לא מוליך (dual porosity/mobile immobile) יכולים ליישב את הסתירות בין נתוני מי התהום ההיסטוריים ונתוני התווך הלא רווי תחת הקרקע הטבעית (Kurtzman and Scanlon, 2011).



איור 2. פרופילים של מרקם, רטיבות משקלית, וריכוז כלוריד מיוחס למי נקבובים תחת שימוש קרקע בור (טבעי) וגד"ש מושקה.

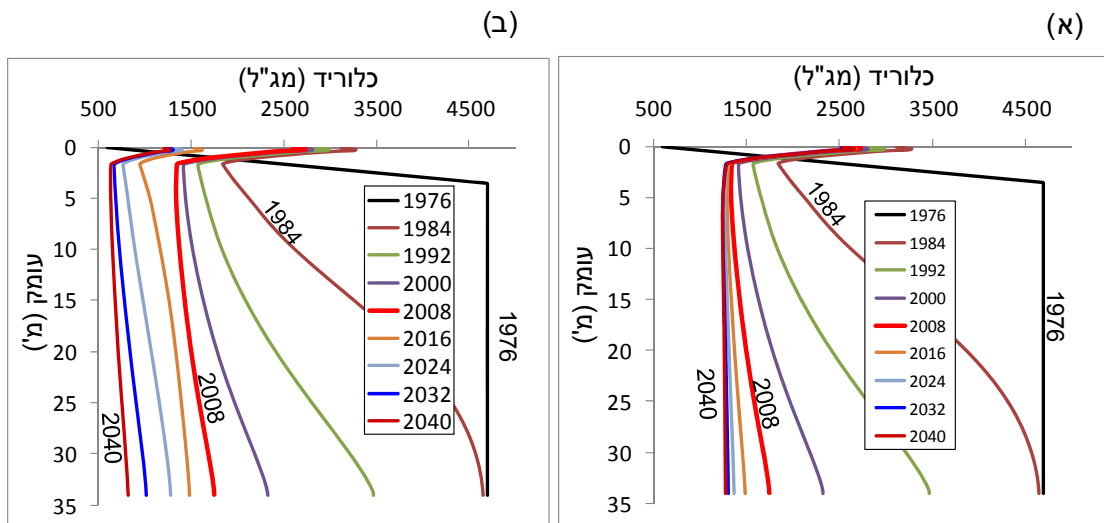
מהנתונים והניתוח לעיל ומתצפית בגרומוסולים טבעיים (לא מעובדים) מוצע, שמנגנון המילוי החוזר העיקרי תחת קרקעות אלה הוא בנתיבים מועדפים. מי הגשמים החזקים חודרים לרשת הסדקים שברובה לא נאטמת בעומק (ברעם וחובריו, 2011) זורמים אופקית בעומק בו הסדקים הופכים להיות תת-מילימטריים, מצטברים ומחלחלים לעומק רב תחת עומד חיובי באזורים נמוכים של תחתית רשת הסדקים. חלחול במנגנון מהיר זה, בנתיבים בעלי אגרות נמוכה, מסביר את הימצאותם של מים במליחות נמוכה באקוויפר תחת קרקעות אלה טרום עיבוד אינטנסיבי. מודל קונספטואלי כזה בו נתיבי החלחול העמוק מרוחקים מרחק ניכר אחד מהשני (הרבה יותר ממרחק בין סדקים על פני השטח ~ 1 מ') יכול להסביר את הרטיבות הנמוכה וריכוזי הכלוריד הגבוהים גם בחולות שבעומק (איור 2, הפילוג מחדש (redistribution) של הרטיבות בשולי הנתיב המהיר בחול מוגבל אופקית).

מנגנון חלחול זה שופך אור חדש גם על אירועי עבר באקוויפר. Goldenberg et al., 1996 ניתחו את מגמת ההמלחה לפני ואחרי עונת הגשמים יוצאת הדופן של 1991-1992. על פי עבודה זו, בעוד שבתאי האוגר הצפוניים הנשלטים ע"י קרקעות החמרה (איור 1) מגמת ההמלחה התחזקה, בתאי האוגר הדרומיים תחת קרקעות גרומוסוליות וחוליות (איור 1) נצפה גם היפוך מגמה והמתקה לאחר שנה מבורכת זו. זרימת בוכנה בתווך הלא רווי העבה (חמרה) מתיישבת עם הגברת ההמלחה עקב דחיקה של מלחים שהצטברו באזור הלא רווי בשנים קודמות שחונות יחסית. ההשפעה של חלחול מהיר בנתיבי זרימה מועדפים על המילוי החוזר (גרומוסולים), מתיישבת עם מילוי חוזר במים מתוקים ממי הרקע והיפוך במגמת ההמלחה בחלק ניכר מתאי האוגר הדרומיים, כפי שדווח בעבודתם של גולדנברג וחובריו.

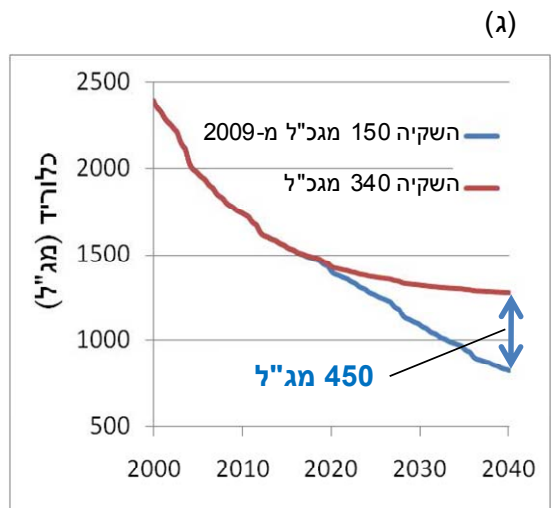
שינוי בשימוש הקרקע לחקלאות אינטנסיבית והשקיה מפחיתים את האבפוטנציאל בגלל הורדת הצמחייה הטבעית וחסילה של מערכת הסדקים, התורמת לאידי מוגבר (עקב זרימה אנכית קונבקטיבית של אוויר Weisbrod and Dargila, 2006). הרטיבות בקרקע המעובדת עולה לרמה המאפשרת חלחול משמעותי דרך המטריקס. חלחול זה דוחק את המלחים שהצטברו באזור הלא רווי בתקופות ממושכות (מאות שנים) לפני העיבוד (קרקע טבעית, איור 2) וגורם להמלחה מואצת של מי התהום. מנגנון זה הוא האחראי העיקרי לדעיית עליה במליחות אקוויפר החוף הדרום-מזרחי בעשורים האחרונים.

איור 3 מציג תוצאות של סימולציה המבוססת על המודל שכולל תחת שדה הגד"ש המושקה ברבדים (איור 2). המודל המכיל והסימולציות מבוססות על פיתרון נומרי של משוואת ריצ'רדס כולל איבר מבלע שורשים ופונקציות הידראוליות ע"פ ואן גנוכטן – מועלם לזרימה הלא רוויה, ומשוואת אדבקציה דיספרסיה להסעה אינרטיית של כלוריד (סימולאטור - Hydrus 1D). תנאי ההתחלה של הפרופיל (רטיבויות, וריכוז כלוריד) הם תנאים הדומים לתצפיות תחת הקרקע הטבעית (טרומ עיבוד, "טבעי" איור 2). הונח כי הפרופיל ממשיך להיות חולי מתחת ל-10 מ' עד לתחתית המודל (34 מ' ~ עומק פני מי התהום היום). הסימולציה של 64 השנים ברזולוציה יומית (תנאי שפה בפני השטח - גשם, אידוי פוטנציאלי, כסוי עלים (LAI) והשקיה), מתחילה ב-1976 בה הוקם המאגר הראשון למי השקיה ברבדים, והיא בוחנת עבר, הווה ועתיד עד לשנת 2040. המשקעים היומיים בשפה העליונה של המודל הם 8 סדרות עוקבות של תצפיות גשם יומי מאוקטובר 2000 לאוקטובר 2008 ממד הגשם בקיבוץ רבדים. הסימולציה מדמה גידול קיץ עם מנת השקיה שנתית קבועה של 490 מ"מ הניתנת במשך 100 ימים החל מתחילת מאי במנות עולות (~תירס), ללא גידול חורף.

מקור המלח להמלחה המואצת של מי התהום שאזור זה עבר בין סוף שנות השבעים לשנת 2000 (נתוני שרות הידרולוגי לבאר רבדים, Kurtzman and Scanlon 2011) מבוטא בשטח הגדול שבין הפרופילים המתאימים לשנים אלו באיור 3א'. בעיבוד הנ"ל וללא הטבה במי ההשקיה, אנו קרובים היום לריכוזי כלוריד תמידיים באזור הלא רווי, ומי המילוי החוזר יתייצבו באזור ה-1300 מגכ"ל (איור 3 א' ו-ג' ואיור 2). מעבר להשקיה בקולחי מותפלים (150 מגכ"ל, בסימולציה המוצגת) יביא לשטיפה נוספת של האזור הלא רווי ומליחות המילוי החוזר תגיע ל-850 מגכ"ל ב-2040 (איור 3ג'). ערכים אלה מורים שמתקני ההתפלה של הנקז המזרחי (התפלת מליחים < 400 מגכ"ל) יועילו גם עשרות שנים לאחר המעבר להשקיה בקולחי מותפלים באזור זה.



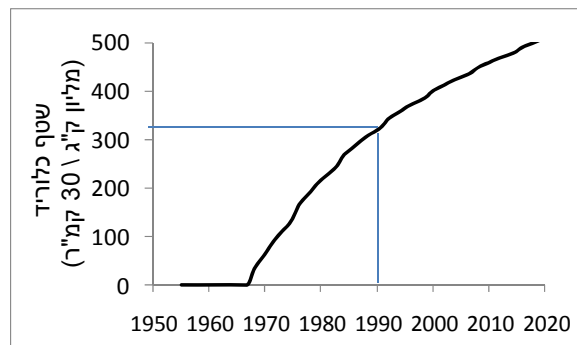
איור 3. סימולציה של ריכוזי הכלוריד במי הנקבובים של התווך הלא רווי לאחר תחילת העיבוד בגד"ש מושקה תחת גרומוסולים בדרום מזרח אקוויפר החוף (מבוסס על נתונים מאזור קבוץ רבדים): (א) פרופילים בהנחה של המשך השקיה במים במליחות הנוכחית - 340 מג"ל, (ב) פרופילים בהנחה שהחל מ-2009 מי ההשקיה במליחות 150 מג"ל. (ג) התפתחות מליחות המים קרוב לפני מי התהום (עומק 34 מ') בשתי האפשרויות.



המציאות, כמובן מורכבת בהרבה ממה שניתן להדגים בסימולציות. הרבה מן השטחים המושקים היו שטחי בעל לפני כן ולא שטחי בור. בחלק מהשטחים שימושי הקרקע השתנו (גד"ש מטעים, בור, חממות, מגורים וכו'), כמו גם מליחות מי ההשקיה, ובחלק מהשטחים מגדלים גם גדולי חורף בבעל. בנוסף, עובי התווך הלא רווי ויותר מזה עובי האקוויפר גדלים באזור זה לכוון מערב. לעובי האקוויפר ולשיפוע של בסיס האקוויפר השפעה על קצב ההמלחה של מי התהום (Assouline and Shavit, 2004). עם זאת, המודל הנ"ל המכויל לתצפיות, מספיק בכדי להעריך האם דחיקת המלח מהאזור הלא רווי יכולה לספק את מסת הכלוריד הדרושה להמלחה שנצפתה?

כדי לענות על השאלה שנשאלה בסוף הפסקה הקודמת, השתמשתי במאזן מסת הכלוריד במי התהום תחת כתם המליחות המפורסם של באר טוביה מעבודתם של ונגוש וכן צבי (Vengosh and Ben Zvi, 1994). חוקרים אלה חישבו את מסת הכלוריד שנכנסה לאקוויפר שבתחום כתם המליחות (שטח של 30 קמ"ר), בין השנים 1967 – 1990 ב- 117×10^6 ק"ג. החתך האופייני של חרסית מעל חול אופייני גם לאזור באר טוביה, ריכוזי כלוריד גבוהים באזור הלא רווי העמוק תחת קרקע לא מעובדת (ברעם וחוברי, 1994).

(2011) וריכוזי כלוריד נמוכים בהרבה נמצאו תחת פרדס באזור זה (קורצמן, 2011). לכן אין סיבה לחשוב ששטיפה דומה של האזור הלא רווי שנצפתה ברבדים לא התרחשה תחת השטחים המעובדים בבאר טוביה. לכן הרצתי את סימולציית 64 השנים בפרופיל לא רווי בעובי של 42 מ' בהם 6 המטרים העליונים חרסיתיים מתחתם 3 מטרים של פילוג גודל גרגר בינוני (loam) ומתחתם סדימנט חולי (93% חול), דומה לחתך לא רווי ממוצע באזור באר טוביה. מליחות מי ההשקיה במודל זה הייתה 250 מג"ל, מליחות אופיינית למי מוביל ומי בארות בבאר טוביה בסוף שנות השישים של המאה הקודמת. ריכוז הכלוריד ההתחלתי במי הנקבובים בפרופיל שנלקח דומה בצורתו לזה שנצפה תחת קרקע טבעית ברבדים עם עליה לינארית מ-500 מג"ל ל-4600 מג"ל בשכבת החרסית וקבוע משם עד תחתית הפרופיל. פרופיל כזה הוא כנראה מלוח פחות מבמציאות בגלל החרסית העבה ותצפיות מהאזור (ברעם וחובריו, 2011). שטף הכלוריד המצטבר בתחתית העמודה שחושב בעזרת הסימולציה מוצג באיור 4.



איור 4. שטף כלוריד מצטבר תחת שטח גד"ש: תוצאות סימולציה לחתך לא רווי אופייני באזור באר טוביה. היחידות של מיליון ק"ג ל-30 קמ"ר ושנת ההתחלה של הסימולציה נבחרו לשם נוחות ההשוואה עם מאזן מסת הכלוריד לאזור באר טוביה ע"פ ונגוש וכן צבי 1994.

אחרי המעבר לגד"ש מושקה תכולת הרטיבות של האזור הלא רווי עולה ושטיפת המלח לא מתחילה עד שכל החתך מגיעה לרטיבות המאפשרת חלחול משמעותי דרך המטריקס (145 מ"מ/שנה, ממוצע רב שנתי במקרה זה). באיור 4 הוזזה סקלת הזמן כך שהפריצה תתחיל עם הפריצה בבאר טוביה – 1967 (מעבר לגד"ש מושקה ב-1955). מסת הכלוריד המחושבת שמחלחלת תחת 30 קמ"ר גד"ש מושקה בין 1967 – 1990 היא כ- 320×10^6 ק"ג (איור 4). כלומר, מסת הכלוריד הדרושה להמלחה בבאר טוביה ע"פ ונגוש וכן צבי 1994 (117×10^6 ק"ג), יכולה הייתה להיות מסופקת אם כשליש מהשטח עובד בתנאים הנ"ל. יוצא איפה שמנגנון השטיפה של התווך הלא רווי עם המעבר לחקלאות אינטנסיבית על קרקעות גרומוסוליות בדרום אקוויפר החוף יכול להסביר את מקור המלח גם לכתם המליחות המפורסם בבאר טוביה. מנגנון שטיפת המטריקס מהאזור הלא רווי תחת השטחים המושקים מסביר מדוע כתם המליחות המשיך לגדול בשטחו ובמסת הכלוריד שהוא מכיל גם שנים רבות לאחר שיקום המפלסים (Vengosh and Ben Zvi 1994). כתם המליחות בבאר טוביה היה כתם כי חקלאות שלחין אינטנסיבית באזור זה הקדימה בכמה עשורים אזורים אחרים בדרום אקוויפר החוף. אזורים גרומוסוליים אחרים בדרום הומלחו בקצבים משתנים בתקופה של עליית מפלסים 1970 - 2010, ויוצרים את בעיית המליחות של דרום מזרח האקוויפר היום. אחת הטענות שנטענות נגד ההנחה שמנגנון זה אחראי להמלחה המואצת של אקוויפר החוף הדרום-מזרחי היא שכבר בשנות ה-30 היו מי התהום די מלוחים שם, טענה זו נבחנת בפרק הבא.

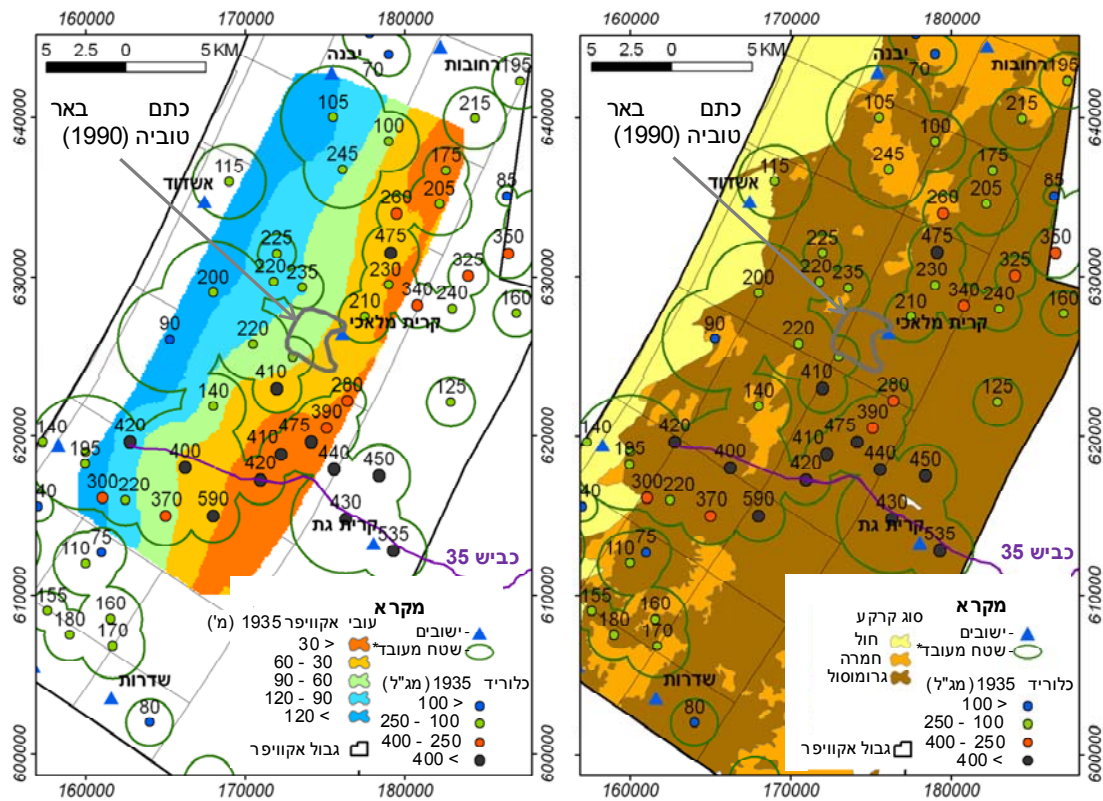
ג. מליחות אקוויפר החוף הדרומי ב-1935: ניתוח מרחבי

נתוני מים מתקופת המנדט הבריטי נלקחו מספר בשם Water Measurements prior to October 1944 שנערך ע"י נציבות המים המנדטורית – Department of land settlement and water commissioner, irrigation Service. בסיס נתונים הידרולוגי זה, מאגד מדידות שבוצעו ע"י ממשלת המנדט, מחלקת המים של הסוכנות היהודית, חברת המים של פלסטינה וארגונים אחרים (Department of Land Settlement and Water Commissioner 1947). המדידות והדיגומים בבארות באקוויפר החוף הדרומי שמדווחות כאן בוצעו בין פברואר ליולי 1935 ע"י הממשלה המנדטורית. בעבודה זו נעשה שימוש בנתונים הבאים ממקור זה: מיקום מוערך (Approx. Co-ordinates, במקור) במערכת הקורדינטות המכונה היום "רשת ישראל ישנה", מפלס מוערך במטר מעל פני הים, וריכוז כלוריד במים (במקור ביחידות של 1:100,000, הוכפל ב-10 למג"ל כאן). אין בבסיס הנתונים המנדטורי מידע על עומקי הבארות או המסננים והניתוח המרחבי של נתוני הכלוריד והמפלס בעבודה זו הוא במישור האופקי בלבד.

משטח של גובה בסיס האקוויפר (גג הסקיה) חושב מדיגטציה ואינטרפולציה של נקודות שנדגמו מחתכים לאורך רצועות יוסום (שכנאי 1974, מתוך האטלס הגיאולוגי של אקוויפר החוף, בעריכת ע. אקר 1999). עובי האקוויפר באביב 1935 הוא ההפרש בין רום המפלס בשנה זו לרום גג הסקיה.

הערכה גסה של הפיזור המרחבי של השטחים המעובדים בשנת 1945 (קרי, אזורים בהם היו יותר שטחים מעובדים ואזורים בהם היו פחות) נעשתה על סמך נתוני יישובים מאתר האינטרנט www.palestineremembered.com. הסבירות שהערכים המוחלטים של נתונים אלה מוטים פוליטית, גבוהה, והניתוח להלן לא מתייחס לערכים המוחלטים אלא לפיזור המרחבי של השטחים המעובדים בלבד שלגביו מונחת אי הטיה.

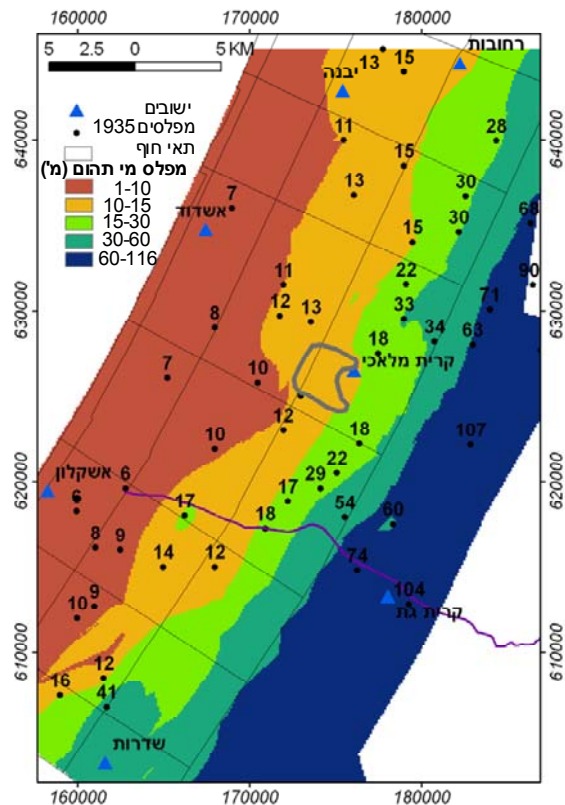
נלקחו בחשבון באנליזה המרחבית רק נתוני בארות ושטחים מעובדים של יישובים בהם נמצא מידע בשני המקורות, כלומר הייתה לפחות באר אחת ששויכה ליישוב ונדגמה ע"י ממשלת המנדט ב-1935 וקיימת הערכה של השטחים המעובדים של היישוב הנ"ל. ביישובים בהם מדווחות מספר בארות שנדגמו ב-1935 נלקחו הממוצעים האריתמטיים של המפלסים וריכוזי הכלוריד והם יוחסו למיקום מרכזי בין הבארות של אותו יישוב. באיור 5 גודל השטח המעובד מופיע כמעגל ירוק סביב הבאר (או הנקודה המרכזית) של כל יישוב. בשני מקרים (מתוך 55) בהם נמצאו הבדלים משמעותיים בריכוזי הכלוריד, בבארות מרוחקות יחסית (קילומטרים) ששויכו לאותו יישוב, מופו שתיים או שלוש נקודות ליישוב הנ"ל כדי לא לאבד מידע על פירוס הכלורידים, השטח המעובד במקרה זה צויר רק סביב אחת מהנקודות.



איור 5. ריכוזי כלוריד (מג"ל) בבארות שנדגמו ב-1935, על רקע סוג קרקע (ימין) ועובי האקוויפר בזמן הדיגום (שמאל). שטחי המעגלים הירוקים סביב הבארות מהווים מדד יחסי לשטח המעובד באזור (מקורות הנתונים בטקסט).

ריכוזי הכלוריד באזור 5, מראים אזור עם מליחות של מעט מעל 400 מג"ל, לאורך כביש אשקלון קריית גת (כביש 35, איור 5). ציר זה היה דרך ראשית בשנות ה-30 (מפות דרכים מהתקופה) וסביר שגם בתקופות קדומות ("אל תגידו בגת אל תבשרו בחוצות אשקלון..." קינת דוד, שמואל ב פרק א). אזור זה באקוויפר מצוי תחת קרקע גרומוסולית שחלקים גדולים ממנה היו מעובדים יחסית לאזורים מצפון או מדרום, גם במחצית הראשונה של המאה הקודמת (איור 5). בשאר האזורים באקוויפר החוף הדרום-מזרחי ריכוזי הכלוריד בשנת 1935 נעו לרוב בין 100-400 מג"ל (מלבד תצפית אחת מאזור מסמייה, איור 5).

משתנה נוסף שנמצא בקורלציה מרחבית (הפוכה) עם הלשון המליחה על בסיס ציר קריית גת אשקלון, הוא עובי האקוויפר. מבנה שלוחה בגג הסקייה על ציר זה גורם לכך שהאקוויפר יהיה דק יחסית (איור 5). אזור אקוויפרי בעל נפח קטן יושפע חזק יותר משטפים מלוחים. באזור בו הופיע כתם המליחות בבאר טוביה השטחים המעובדים היו מעטים יחסית בתקופה זו כמו גם במעלה הגרדיאנט ממנו מזרחה. האקוויפר באזור באר טוביה היה עבה יחסית ב-1935 וריכוז הכלורידים במי התהום היה בסביבות 200 מג"ל ב-1935 (איור 5). צפונה משם באזור מסמייה המליחות מעט יותר גבוהה ב-1935 כמו גם הקף השטחים המעובדים שם ובמעלה הגרדיאנט מזרחה. מאינטרפולציה של נתוני מפלס המים מ-1935 לא ניתן לזהות מפלסים נמוכים לאורך הציר המליח (איור 6), כך שלא ניתן לייחס את המליחות מתחת לאזור המיושב והמעובד יותר שמתחתיו אקוויפר דק יחסית, לשאיבות.



איור 6. מפלס מי תהום בדרום אקוויפר החוף, אינטרפולציה של נתוני אביב-קיץ 1935 (מ' מעל פני הים).

קורלציות מרחביות לבדן הן בודאי לא ראייה מספיקה לקביעת הסיבה לרמת המליחות הגבוהה באזור מסוים באקוויפר. אולם, לאחר שבפרק הקודם הוצגו מדידות בהן אותר מקור מלח באזור הלא רווי תחת גרומוסולים לא מעובדים, ותצפיות וניתוח כמותי הראו שמלח זה מוסע לאחר תחילת העיבוד למי התהום, הניתוח המרחבי שהוצג בפרק זה מהווה נדבך נוסף. להערכתי אם כן, שטיפה חלקית של מלחים מהאזור הלא רווי תחת שדות מעובדים על קרקע גרומוסולית, הפרוסים לכל רוחב האקוויפר הביא את מי האקוויפר באזור זה לרמות מליחות של מעל 400 מג"ל בשנות ה-30 של המאה הקודמת. המתאם המרחבי של אזור זה עם האזורים בהם האקוויטרד האאוקני גובל באקוויפר יבחן בפרק הבא.

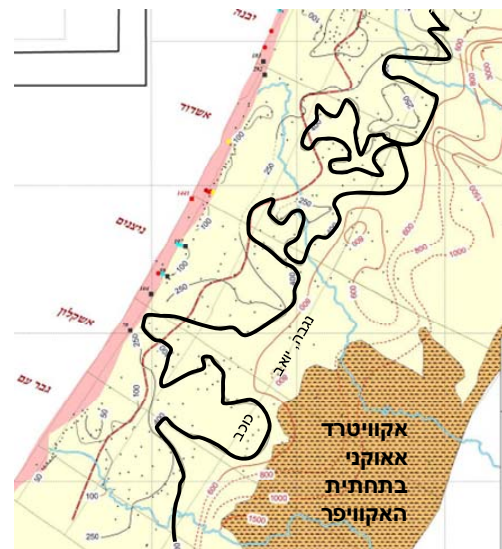
ד. השכנים הרוויים, הסקיה והאקוויטרד האאוקני

מספר עבודות ייחסו את המלח שהוסע לאקוויפר וגרם להמלחה המהירה באזור באר טוביה למקור עמוק (Vengosh and Ben Zvi, 1994; Avisar et al., 2004). יחסי היונים השונים במים המליחים מאלה שבמים הלא מליחים באזור יוחסו לשני סוגי תימלחות כמקורות שונים (Vengosh and Ben Zvi, 1994). ההבדל בין מנגנוני המילוי החוזר התלויים בשימוש הקרקע שמוצעים כאן: קרי, נתיבים מועדפים טרום עיבוד זרמיט מטריקס דרך החרסיות לאחר העיבוד יכולים ליצור גם הם מי תהום עם יחסי יונים שונים, עקב חילוף קטיונים בחרסיות וזמן רב לריאקציות סדימנט-מים באזור הלא רווי בחלחול האחיד, לעומת החלחול המהיר בנתיבים מועדפים. אנליזה גיאוכימית, לא כלולה בעבודה זו והמומחים לכך מוזמנים לבדוק את הרעיון הנ"ל. בכל מקרה העבודות לעיל שהסיקו מקור מלח תחת, התבססו על ניתוח גיאוכימי של מים מבארות הפקה ולא על תצפיות רב שכבתיות (multi-level sampling). לעומת זאת,

תצפיות רב שכבתיות מקדוחים עמוקים חדשים באזור באר טוביה מראות שהשכבות העמוקות באקוויפר מליחות פחות מהעליונות ושוללות מקור מלח עמוק (Negev et al. 2011).

גבול המזרחי של אקוויפר החוף הדרומי נמצא מספר ק"מ מזרחה מהאזור בו כדאי לקדוח קידוחי הפקה (האקוויפר בעל עובי (תולכה) מספקים). האזור המזרחי מהווה אזור שתורם למילוי החוזר של האקוויפר אך לא משמעותי כאזור הפקה, גם בזמן שמימיו היו שפירים. לצורכי תפעול נקבע הגבול המזרחי של האקוויפר מערבית לגבול ההידרוגיאולוגי (הגבול המזרחי של תאי המזרח עמוק בתוך האקוויפר, איור 1). תנאי גבול המשמשים באזור זה בכלים התפעוליים של האקוויפר מביאים בחשבון את הזרימות ממזרח ע"י עומד וריכוזי כלוריד גבוהים שם (בכמט וחובריו, 2003). זרימות אלה לא צריכות להיות מיוחסות דווקא לאקוויטרד האוקני אלא לשטחי המילוי החוזר שבמזרח. מליחות האקוויפר באזור זה יכולה להיות מוסברת ע"י מנגנון ההמלחה שהוסבר לעיל המשפיע מהר על מי האקוויפר באזור זה, בגלל עוביים הקטן של האזור הלא רווי והרווי.

האקוויטרד האוקני מחליף את הסקיייה בשטחים נרחבים בבסיס האקוויפר במזרח ברצועות ניצנים – גבר עם (איור 7). אם הוא אכן מקור המלח העיקרי לדרום מזרח האקוויפר ניתן היה לצפות שמפת ריכוזי הכלוריד תצייר מתאם מרחבי עם שטחי החשיפה של האקוויטרד לאקוויפר. באיור 7 ניתן לראות שמתאם כזה לא קיים. לשונות של מליחות גבוהה חודרות מערבה גם מול החשיפה הגדולה לאקוויטרד אך גם צפונה משם. בקרבת החשיפה לאקוויטרד ניתן למצוא קידוחים מליחים (נגבה ויואב) ופחות מליחים (כוכב, איור 7). לכן לדעתי הראיות להמלחה במנגנון המוצע בעבודה זו חזקות מאלו הרואות באקוויטרד האוקני מקור מלח משמעותי לאקוויפר.



איור 7. מפת ריכוזי כלוריד מסתיו 2006 בדרום האקוויפר. קו שווה 400 מג"ל מודגש בשחור. מעובד ממפת ריכוזי כלוריד במי תהום, אגן החוף, גיליון דרומי. השרות ההידרולוגי רשות המים.

הנקז המזרחי שהולך ונבנה יביא לעצירה/האטה של התפשטות האזורים המליחים מערבה בין אם הזרימות המליחות ממזרח קשורות לאקוויטרד האוקני ובין אם לאזור הלא רווי ושימוש הקרקע. יעילותו של הנקז תהייה גדולה יותר אם הורדת המפלסים שתיגרם בעקבות הפעלתו לא תגרום לכניסת מלח נוספת שתתרחש אם מקור המלח העיקרי הוא מהשכנים הרוויים של האקוויפר. לכן ברור שתוצאות עבודה זו תומכות בטפול מסוג pump & treat בדוגמת הנקז המזרחי.

סיכום ומסקנות

קרקעות גרומוסול מכסות את רוב רובן של פני הקרקע מעל אקוויפר החוף הדרום-מזרחי. תצפיות מהתווך הלא רווי תחת קרקעות מעובדות וקרקעות בור מהסוג הזה מלמדות על מאגר מלח משמעותי שנמצא תחת הקרקעות הלא מעובדות, שנשטף בחלקו הגדול תחת עבוד אינטנסיבי. שילוב של מסקנות ממודלים של זרימה והסעה בתווך הלא רווי שכולו לתצפיות הנ"ל ונתונים מהאקוויפר מוביל למסקנה שהחלחול העמוק תחת גרומוסולים לא מעובדים מתרחש בעיקר בנתיבים מועדפים לעומת זאת תחת קרקעות מעובדות החלחול אחיד יותר ושטף את המטריקס. סימולציות שנעשו בעזרת המודלים המכילים תחת שדות מעובדים מלמדות: ששטף המלח מהאזור הלא רווי לאקוויפר באזור באר טוביה היה מספיק בכדי לגרום להמלחה האינטנסיבית באזור זה. הסתכלות על העתיד בעזרת מודל זה מלמדת שהורדה במליחות של כ- 200 מג"ל במי ההשקיה תביא בתוך כ- 30 שנה לירידה של 450 מג"ל במי המילוי החוזר לאקוויפר (אזור רבדים). ניתוח מרחבי של נתונים הידרולוגיים ונתוני עיבוד מתקופת המנדט הבריטי מראה שהאזור היחיד באקוויפר החוף הדרומי (ללא רצועת עזה) שהיו בו מים מליחים ב- 1935 (לרוב לא יותר מ- 450 מג"ל), היה גם האזור בו היו יותר קרקעות חקלאיות ע"ג גרומוסולים מאשר באזורים אחרים בדרום האקוויפר. להערכתי גם לשון מליחות זו ע"ב הדרך מקריית גת לאשקלון של היום, קשורה בדחיקת מלח מהאזור הלא רווי תחת קרקעות גרומוסוליות מעובדות ואין ליחסה לדליפה מהאקוויטרד האוקני. בנוסף, תצפיות רב שכבתיות חדשות המדווחות ע"י Negev et al., 2011 שוללות מקור מלח עמוק באזור באר טוביה.

תודות

עבודה זו מומנה בעיקרה ע"י מנהל המחקר החקלאי, משרד החקלאות. התצפיות מאזור רבדים מומנו ממחקר משותף של מנהל המחקר החקלאי והאוניברסיטה של טקסס, אוסטין (ארה"ב). תצפיות אחרות המדווחות ע"י עבודות מצוטטות מומנו בין השאר ע"י רשות המים, קרן המדען הראשי של משרד החקלאות, וחברת מקורות. המחבר מודה לשלושת המבקרים של המאמר ולדר', נירית ברנשטיין מנהלת המערכת לבקרת מאמרים בעברית במנהל המחקר החקלאי, על הערותיהם הבונות.

מראי מקום

- בכמט י., דקס א. ו- ג. רשף. 2003. תפעול שנתי של אקוויפר החוף, שלב א'. דוח הידרו/1/2003, השרות ההידרולוגי, נציבות המים.
- ברעם, ש., שיר, י., קורצמן, ד., רונן, ז., ו- ע. דהן. 2011. חלחול מים והמלחה בקרקעות חרסיתיות. הכנס השנתי של האגודה הישראלית למשאבי מים (אי"ל), 5-6 בינואר, ים המלח.
- השרות ההידרולוגי – רשות המים. 2007. התפתחות ניצול ומצב מקורות המים בישראל עד סתיו 2006 .
- קורצמן ד. 2011. חלחול של מים, כלוריד וניטראט לאקוויפר החוף תחת שטחים חקלאיים. הכנס השנתי של האגודה הישראלית למשאבי מים (אי"ל), 5-6 בינואר, ים המלח.

Assouline, S., and U. Shavit. 2004. Effects of management policies, including artificial recharge, on salinization in a sloping aquifer: The Israeli Coastal Aquifer case, *Water Resour. Res.*, 40, W04101, doi:10.1029/2003WR002290.

Avisar, D., Rosenthal E., Shulman H., Zilberbrand m., Flexer A., Kronfeld J., Ben Avraham Z. and L. Fleischer. 2004. The Pliocene Yafo Fm. in Israel: hydrogeologically inert or active? *Hydrogeol. J.*, 12, 291–304.

Department of Land Settlement and Water Commissioner. 1947. Water measurements prior to October 1944. *Government of Palestine, Government Printer, Jerusalem.*

Goldenberg, L. C., Melloul A. J. and U. Zoller. 1996. The “short cut” approach for the reality of enhanced groundwater contamination. *J. Env. Mgmt.* 46, 311–326.

Kurtzman, D. and B. R. Scanlon. 2011. Groundwater recharge through Vertisols: irrigated cropland versus natural land, Israel. *Vadose Zone Journal* 10:662–674
doi:10.2136/vzj2010.0109

Negev, I., Rozenhal A. , Lidgi I., and J. Guttman. 2011. Salinization mechanism in the Coastal Aquifer near Beer-Tuvia, Israel: reassessment based on updated data from new and existing wells. EGU General Assembly. April 3-8, Vienna, Austria

Scanlon, B. R., R. C. Reedy, and J. A. Tachovsky. 2007. Semiarid unsaturated zone chloride profiles: Archives of past land-use change impacts on water resources in the southern High Plains, United States. *Water Resour. Res* 43, W06423, doi:10.1029/2006WR005769.

Vengosh, A., and A. Ben-Zvi. 1994. Formation of a salt plume in the Coastal Plain Aquifer of Israel: the Be'er Toviyya region, *J. Hydrol.*, 160, 21–52.

Weisbrod N. and M. I. Dargila. 2006. Potential impact of convective fracture venting on salt-crust buildup and ground-water salinization in arid environments. *Journal of Arid Environments*, 65, 386-399