

מודל של גוף המים המלוח בחלקו הצפוני של אקוויפר ירקון-תנינים

אמיר פסטר¹, גדעון דגן¹

תמצית

תמלחת בריכוז קרוב למי ים נמצאה בבסיס אקוויפר ירקון תנינים, בשוליים המערביים שלו. ממצאים חדשים מקידוחי ניטור מצביעים על כך שהתמלחת לכודה בשולי האקוויפר כאשר מים מתוקים זורמים מעליה, עם הפרדה עם פן ביני חד יחסית. שתי השאלות הבסיסיות הכרוכות בניצול האקוויפר הן אופי הקשר של התמלחת עם הים ומציאת מנגנון שמסביר את תגובת הגוף המלוח לשינויים בזרימת המים המתוקים עקב שאיבה.

ממצאי המחקר הם כי מאז שנות החמישים, השאיבה מביאה לירידת העומדים המתוקים בכל האקוויפר וכפי הנראה גורמת לכניסה מוגברת של מי ים לאקוויפר. קצב השטיפה (כפי שמתבטא בתפוקת המלח במעיינות תנינים) הוקטן ולכן נפח התמלחת עולה. כתוצאה מכך הפן הביני הולך ומתרומם בקצב של מס' מטרים בשנה. תחת המשך משטר השאיבות הנוכחי, התרוממות זו תימשך עד שהפן הביני יתייצב מחדש.

הקדמה

השמירה על איכות המים המתוקים של אקוויפר ירקון והבנת מנגנונים הקשורים להמלחת המים הינם בעלי חשיבות רבה. בשנים האחרונות ביצעה נציבות המים סידרת קידוחי ניטור עמוקים בחלקו הצפוני של האקוויפר. בכמה מקידוחים אלו (גן-שמואל, פרדס-חנה, רעננה, ונתניה דרום) התגלה שבעומק האקוויפר, מתחת למים המתוקים, קיים גוף מים מלוח, בעל מליחות הקרובה לזו של מי ים (ר' תרשים 1). באופן פשטני ניתן לומר כי המים המתוקים "צפים" מעל המים המלוחים, שהינם בעלי צפיפות גבוהה יותר. עוד נתגלה בקידוחי הניטור כי אין חציצה גיאולוגית בין המים המתוקים למלוחים, ואזור המעבר, שנמצא בעומק של כ- 900 עד 1000 מ', הינו בעובי של כ- 5-20 מ' בלבד, שהוא צר יחסית לעובי הכולל של האקוויפר, וניתן להתייחס אליו בקירוב כפן ביני חד. זהו ממצא מפתיע, שכן לכאורה היה ניתן לצפות לאזור מעבר רחב יותר, בגלל הדיספרסיה הכרוכה במבנה הסדוק של האקוויפר.

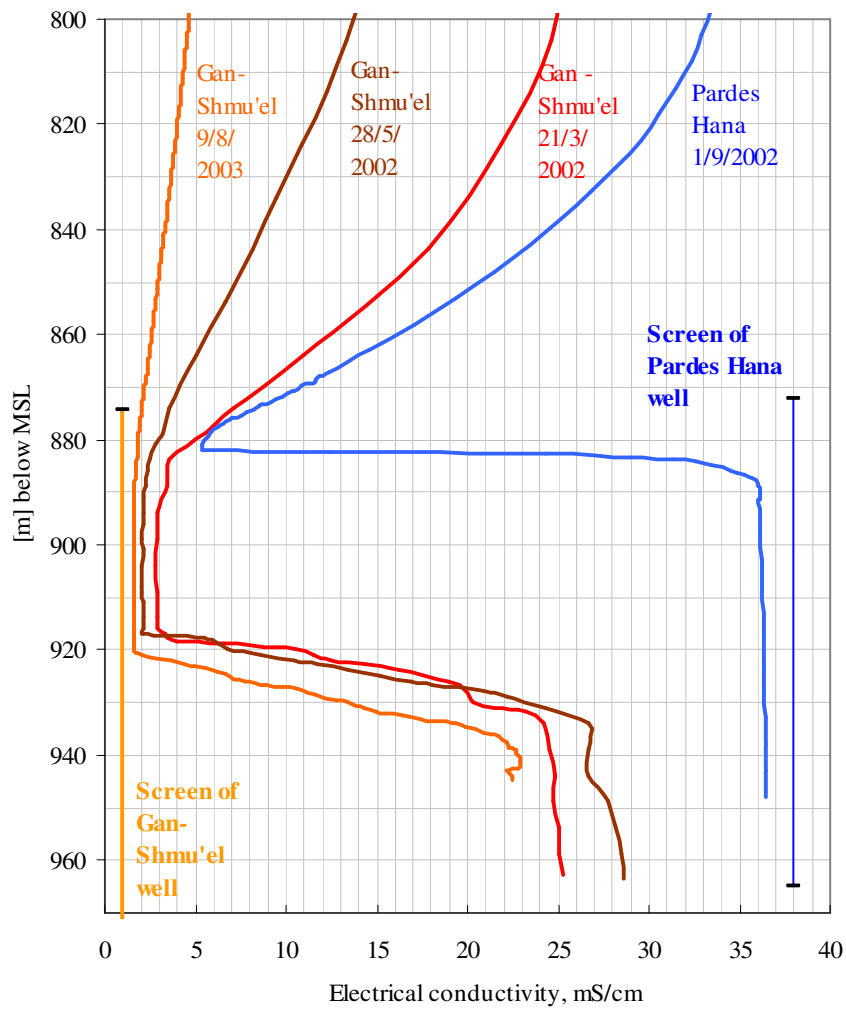
ממצאים אלו עוררו עניין בהצבת מודל מעודכן של הזרימה באקוויפר, שייקח בחשבון את גוף המים המלוח המצוי בעומק. המחקר מתבסס על נתוני השדה הקיימים, ועל נתוני האקוויפר כפי שנתקבלו במודלים קודמים, שטיפלו בזרימת המים המתוקים בלבד.

מטרות המחקר

המטרה הראשונית של המחקר היתה הצבת מודל הידרולוגי כמותי שמאפשר למצוא את הגיאומטריה של הפן הביני בתנאי זרימה שונים, במצב תמידי. על מנת להציב מודל כמותי, היה צורך לקבוע את המודל הקונצפטואלי של גוף המים המלוחים, הכולל את אופי הקשר שלו עם הים ואת תגובתו

¹ הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן, אוניברסיטת תל - אביב

לשינויים בזרימת המים המתוקים עקב שאיבה. בהמשך המחקר נוספו עוד מטרות, שהחשובות ביניהן- הערכת קצב ההתרוממות של הפן הביני בתקופת השאיבות, וחיזוי ההתנהגות העתידית של הפן הביני.

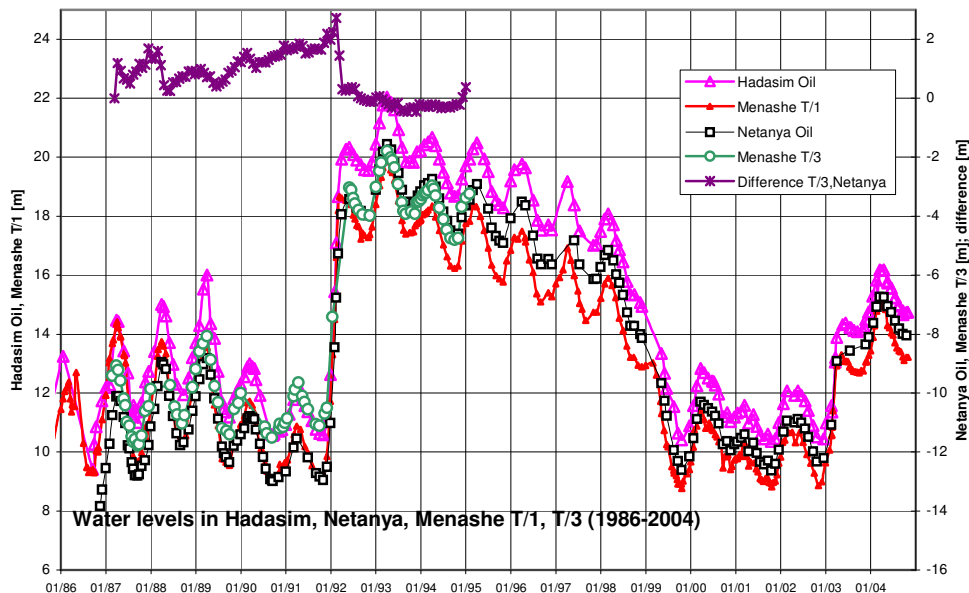


תרשים 1: לוג מוליכות חשמלית בקידוחי הניטור גן שמואל ופרדס חנה. נתונים מדוחות הקידוחים (גוטמן, רוזנטל וגוטליב, 2002, דו"ח מקורות מס' 795 ו-813)

מתודולוגיה – שיטות המחקר

בחלקו הראשון של המחקר, על מנת להעריך כיצד עומק הפן הביני באקוויפר משתנה בזמן, הגענו למודל הקונצפטואלי המבוסס על הרכיבים הבאים:

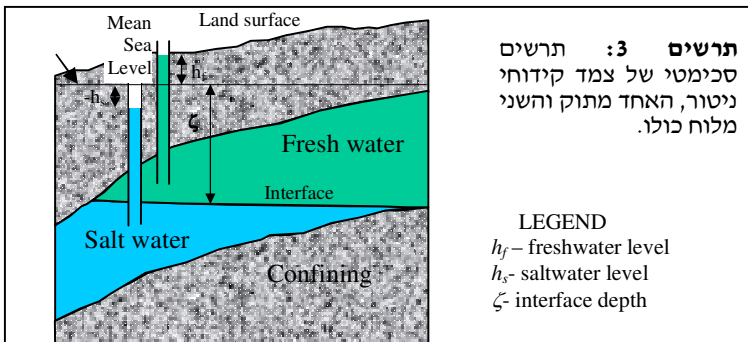
1. הגוף המלוח הינו בעל צפיפות אחידה, $\rho_s \cong 1.023 \text{ g/cm}^3$. קירוב זה מתבסס על נתוני ההרכב הכימי של המים בקידוחי הניטור (כמפורט בדוחות הקידוחים). תכולת כלוריד אופיינית של מים אלו הינה כ- 16,000 - 19,000 מג"ל.
2. פן ביני חד מפריד בין גוף המים המלוחים לגוף המים המתוקים שצפים מעליו. פישוט זה מתבסס, כאמור, על דקיקותו של אזור המעבר (20-5 מ') ביחס לעובי האקוויפר (כ- 900 מ').
3. עומד הלחץ בגוף המלוח נקבע על פי העומד בגוף המים המתוקים ומיקום הפן הביני. תמונה זו מבוססת על הממצאים מהקידוחים העמוקים מנשה ת/3 ונתניה נפט, שהגיעו לגוף המלוח, וצינור הקידוח בשניהם מלא כולו במים המלוחים. התבוננות במדידות המפלס החדשיות בקידוחים אלו, שבהם המפלס הנמדד מייצג את עומד הלחץ בגוף המלוח, מראה התנהגות קרובה ביותר להתנהגות המפלסים המתוקים באקוויפר בסמוך לקידוחים הללו (ממזרח להם, ר' תרשים 2) (גוטמן וחובי, 1988). בנוסף, הפרש העומדים הקטן בין שני הקידוחים מהווה תמיכה לטענה כי הזרימה בגוף המים המלוח הינה איטית ביחס לזרימה בגוף המתוק. הנחות אלו מאפשרות להשתמש במדידות המפלסים של שני הקידוחים המלוחים ע"מ לחשב את השתנות עומק הפן הביני בתלות בזמן במהלך תקופת המדידות של הקידוחים.



תרשים 2: מפלסים מדודים בקידוחים מנשה ת/1 והדסים נפט (קידוחים מתוקים, ערכים בציר שמאלי), מנשה ת/3 ונתניה נפט (קידוחים מלוחים, ערכים בציר ימני; ההפרש ביניהם מוצג גם כן).

חישוב עומק הפן הביני

פענוח עומק הפן הביני מתאפשר אם קיימים 2 קידוחי ניטור קרובים אחד לשני, שבאחד הגיעו לגוף המתוק ובשני הגיעו לגוף המלוח (ר' תרשים 3). המפלס של הקידוח המתוק מסומן כ- h_f והמפלס של הקידוח המלוח מסומן כ- h_s (ערך שלילי במקרה שלנו). נניח כי בין הקידוחים קיימת זרימה זניחה, את הלחץ בפן הביני ניתן לבטא כלחץ הידרוסטטי מכיוון המים המתוקים או מכיוון המים המלוחים, כלומר $\rho_f g (h_f + \zeta) = \rho_s g (h_s + \zeta)$ כאשר ρ_f, ρ_s צפיפות המים המתוקים והמלוחים, בהתאמה;



ו- ζ עומק הפן הביני . עם

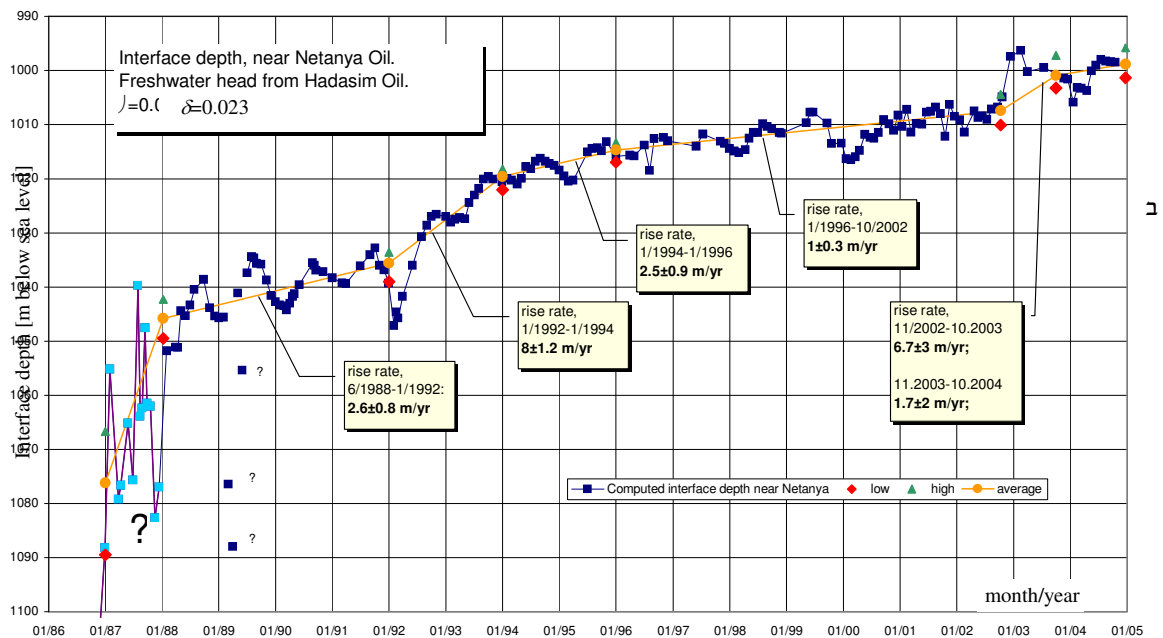
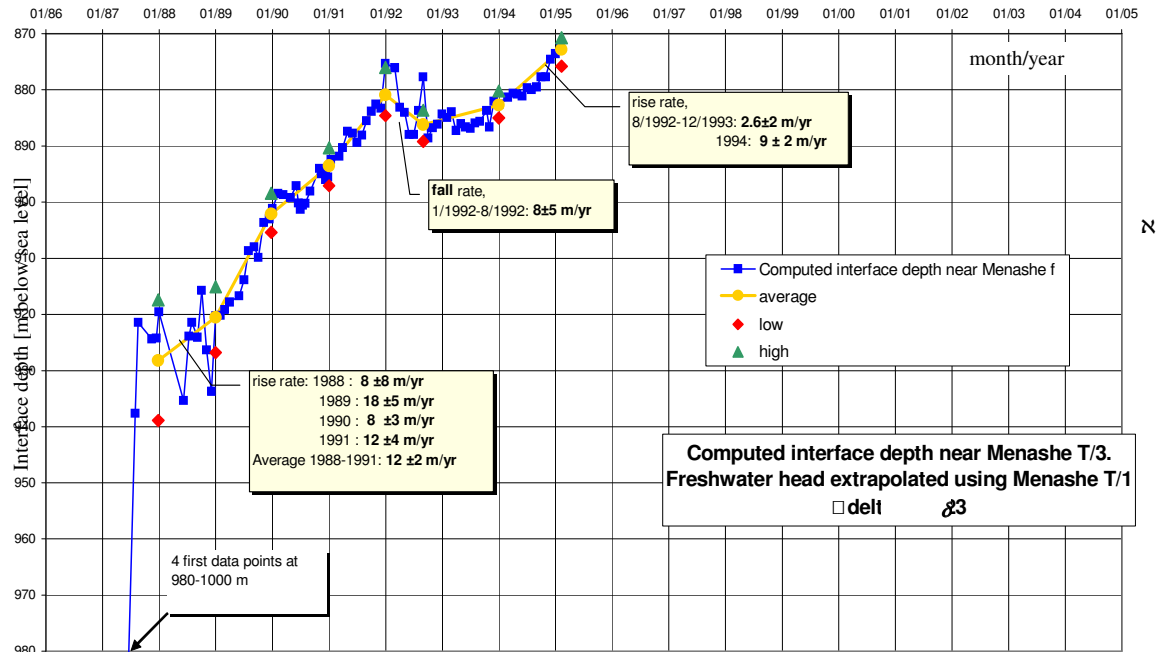
$$\delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \approx \frac{1.023 - 1}{1} \approx 0.023$$

$$\text{מתקבל: } \zeta = \frac{1}{\delta} [h_f - (1 + \delta)h_s]$$

נוסחא זו מאפשרת לחשב את עומק הפן הביני בכל נק' זמן שבה יש נתוני מפלס של הקידוח המתוק והמלוח.

כיוון שלא בהכרח ישנו קידוח שהגיע לגוף המתוק הנמצא בסמוך לקידוח שהגיע לגוף המלוח, יש לבצע השלכה של המפלס המתוק עפ"י קידוח מתוק שכן. בקידוח מנשה ת/3 מתעוררת בעיה מעין זו. הפתרון הוא ע"י השלכה של המפלס המתוק מהקידוח הקרוב ביותר שיש לנו מדידות ממנו.

התרוממות הפן הביני במנשה ונתניה מתוארת בתרשים 4. ניתן לראות כי קצב העלייה איננו קבוע. כך למשל, סמוך למנשה ההתרוממות מהירה יחסית, וסמוך לנתניה היא איטית יחסית.



תרשים 4: א. מיקום הפן הביני המחושב באזור מנשה ת/3. ב. מיקום הפן הביני המחושב באזור נתניה.

קצב העלייה משתנה בעקבות חורף 91/2. הדבר ניכר באופן בולט במנשה ת/3 בכך שהפן הביני מפסיק לעלות, ויורד מספר מטרים במהלך המחצית הראשונה של שנת 92. אחרי שנה זו הפן מתחיל שוב להתרומם, אך בקצב נמוך בהרבה מזה שאפיין את התקופה שקדמה לחורף 91/2. בנתניה מתרחש שינוי הפוך בקצב עליית הפן הביני ב- הקצב גדל (פי 3) למשך כשנתיים ולאחר מכן מואט בשנים 1994-2002, ועולה שוב לאחר מכן. קצב העלייה הממוצע לאורך כל התקופה (1986-2004) הינו 3 מ"שנה. אם כן, בנתניה קצב העלייה גדל כאשר מפלסי האקוויפר גבוהים, בעוד שבמנשה קצב העלייה קטן (ואף נהיה שלילי). תמונה זו תומכת בטענה כי קיים קשר בין האקוויפר לים באזור מנשה (Paster, 2004).

לאור התוצאות הנ"ל הגענו למודל הקונצפטואלי הבא:

(א) בתקופה היסטורית (עד תחילת שנות החמישים) היה קיים משטר תמידי (במיצוע שנתי) עם פן ביני יציב. בגלל השטיפה ע"י המים המתוקים שזרמו למעיינות התנינים, כמות שנתית של מלח שוות ערך ל-3-4 מלמ"ק מי ים נגרעה מהגוף המלוח. כדי לשמור על פן יציב יש צורך במקור המחדיר מים מלוחים לגוף המלוח. אנחנו מניחים שמי ים נכנסים לגוף המלוח באזור שבר אור-עקיבא, אם כי לא ניתן לשלול קיומם של מקורות נוספים. כניסת מי ים דרך השבר נגרמת ע"י הפרש בין עומד הים ($h_s = 0$) לבין העומד השלילי בגוף המלוח, וניתן להניח כי ככל שההפרש גדול יותר הספיקה הנכנסת גדולה יותר. ע"י השלכה אחורנית בזמן העומד בגוף המלוח נמצא כ- $h_s \approx -3.5m$.

(ב) בתקופת השאיבה המוגברת העומד המתוק h_f הלך וירד וכתוצאה מכך גם העומד h_s ירד (כפי שראינו בתרשים 2) בגלל המגע בין הגופים. כתוצאה, ההפרש ביחס לים גדל וכניסת מי הים גברה. לכן, הפן הביני התחיל לעלות, והעלייה ממשיכה (תרשים 4). הקצב הממוצע של התרוממות הפן הביני בנתניה (3 מ"שנה) יכול לשמש אותנו כמדד להתרוממות האופיינית של הפן הביני בכלל האקוויפר בתק' זו.

האם הפן הביני יגיע למצב יציב במשטר השאיבה הנוכחי?

התשובה לשאלה זו ניתנת על בסיס ההנחות הבאות: (1) מתקיים מאזן מלח לפיו הכמות הנכנסת מהים שווה לתוספת לגוף המלוח ועוד שטיפה למעיינות התנינים, (2) קצב השטיפה של מלח לתנינים קבוע, (3) קיים קשר בין הספיקה הנכנסת של מים מלוחים והעומד המלוח, כך שככל שהגרדיאנט בין המקור (הים) לגוף המלוח עולה, הספיקה עולה. (4) מאזן המים המתוקים נשמר (סה"כ השפיעה במעיינות והשאיבות משתווה למילוי החוזר). על סמך הנחות אלו אנו צופים כי קצב התרוממות הפן הביני ילך ויפחת והפן הביני יתייצב בעומק חדש, בתלות בפרמטרים שצוינו.

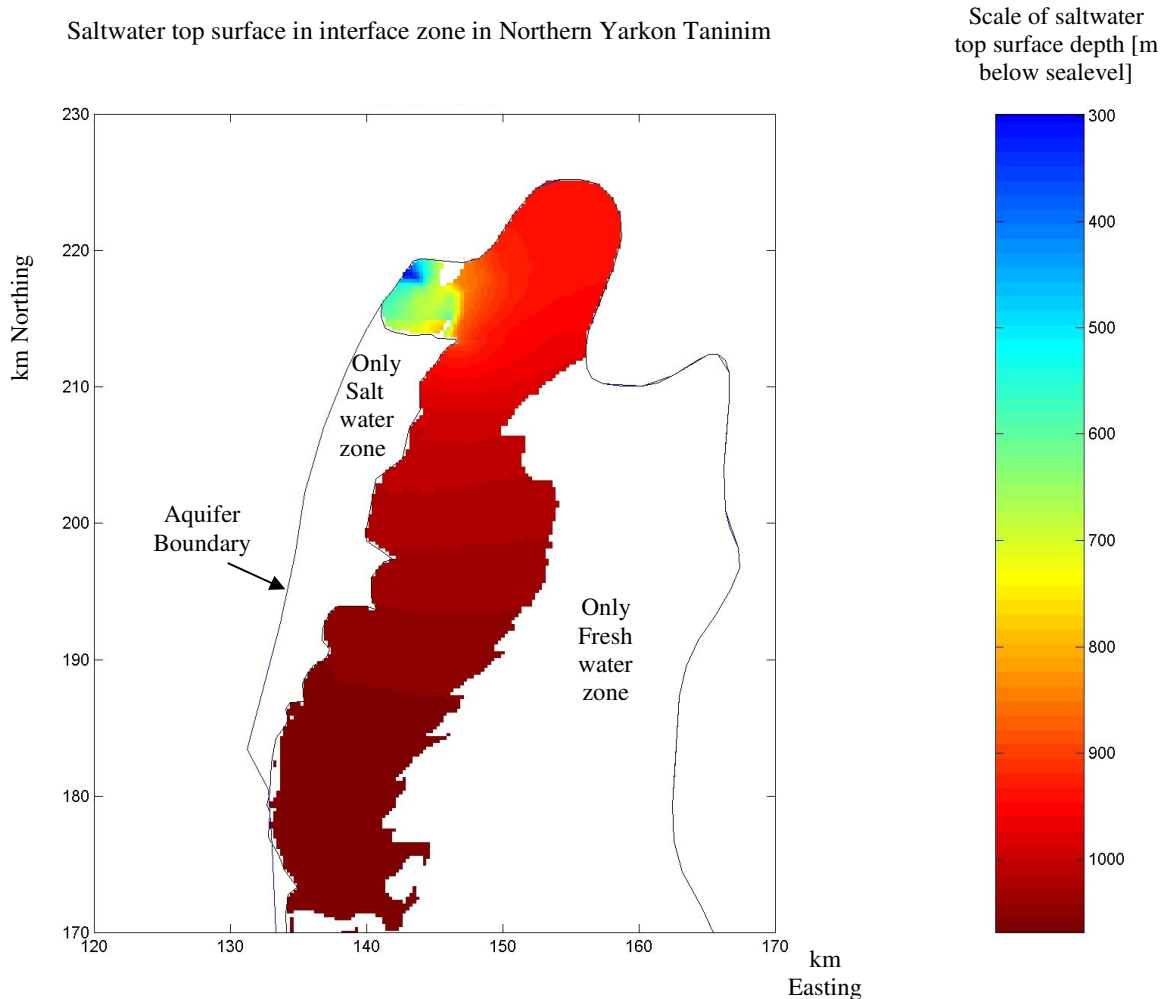
חישוב כמותי מקורב של מיקום הפן הביני

בחלקו השני של המחקר, הוצב מודל רגיונלי תמידי מקורב המאפשר לקבל את דגם הזרימה בגוף המים המתוק ואת הגיאומטריה של הפן הביני בכל שטח גוף המים המלוח בשוליים הצפון-מערביים של האקוויפר. מודל זה הסתמך על ההנחות: קיום חוק דארסי והנחת דיפואי בגוף המתוק; הזרימה

בגוף המלוח זניחה, ולכן העומד המלוח קבוע; החלוקה לתת-אקוויפרים הינה מקומית ולכן ניתנת להזנחה. הפתרון חושב עבור שני מקרים מייצגים: (1) מצב היסטורי, לפני שהחלה השאיבה המוגברת, (2) מצב בתקופת השאיבות, הלוקח בחשבון את ירידת המפלסים הן בגוף המתוק והן בגוף המלוח, את השאיבות מהאקוויפר ושפיעת המעיינות המופחתת. מצב זה מתייחס לתקופה של ראשית שנות התשעים.

ממצאים

התמלחת פרוסה בחלקים נרחבים של האזור הצפוני והדרום-מערבי ובשוליים המערביים של האקוויפר (ר' תרשים 5), ונפחה הינו מסדר גודל של מספר מליארדי מ"ק. באופן מופשט, ניתן לתאר את הגיאומטריה של הגוף המלוח כך: בחתך צפון-דרום, הפן הביני מתרומם ככל שעולים צפונה ומתקרבים למוצא (מעיינות התנינים); בחתך מזרח-מערב, הפן הביני שטוח יחסית. פירוט נרחב לגבי המודל הרגיונלי וממצאיו מופיע בדו"ח שנת המחקר הראשונה (פסטר ודגן, 2004).



תרשים 5: גיאומטריה של הפן הביני בתק' השאיבות בצפון אק' ירקת'ן. הצבע מציין את עומק הפן הביני מתחת לפני הים.

רשימת מקורות (חלקית)

- גוטמן י., מרכדו, א., מיכאלי, א., ביידא, א., 1988: ניתוח ממצאי קידוח מנשה ת/3 והשלכותיהם על דרכי הניטור וההפעלה של אקוויפר ירקון-תנינים. תה"ל 01/88/08.
- פסטר א., דגן, ג., 2004: מודל של גוף המים המלוח בחלקו הצפוני של אקוויפר ירקון-תנינים, דו"ח מדעי לשנת המחקר הראשונה, 2003/4, מוגש לנציבות המים.
- Paster, A., 2004. Modeling the saltwater body in the northern Yarkon-Taninim aquifer, Israel. MSc Thesis, Tel Aviv University.
- Paster, A., Dagan, G. and J. Guttman, 2005: The salt-water body in the Northern part of Yarkon-Taninim Aquifer: field data analysis, conceptual model and prediction. (paper submitted to J. Hydrology).