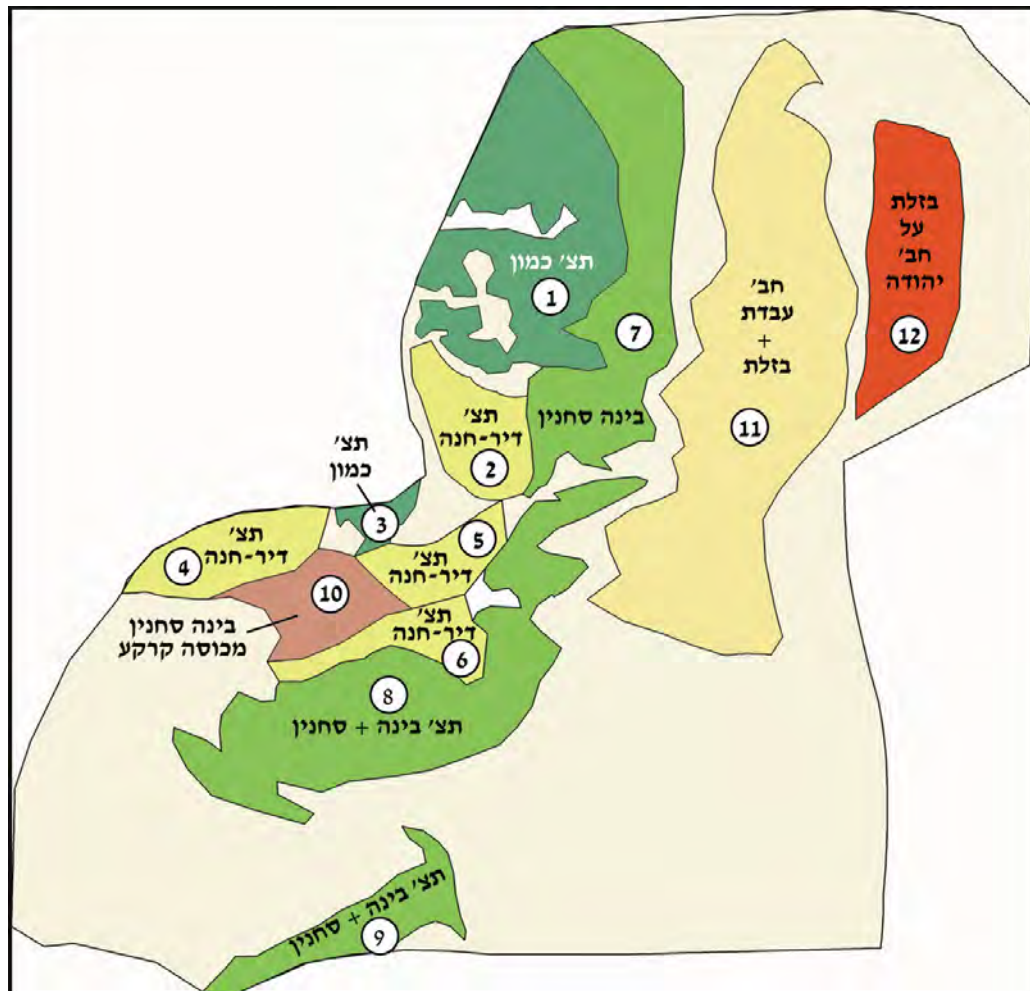




משרד התשתיות הלאומיות  
המכון הגיאולוגי

## מודל תלת מימדי של אגן כלנית (אגן פוליה-טבחה)

יוסף יחיאלי, גבי שליב, סטיוארט וולמן, אבנר קסלר, מרסלו רונזפט, דייגו ברגר ועמוס ביין







משרד התשתיות הלאומיות  
המכון הגיאולוגי

## מודל תלת מימדי של אגן כלנית (אגן פוליה-טבחה)

יוסף יחיאלי<sup>1</sup>, גבי שליב<sup>2</sup>, סטיוארט וולמן<sup>1</sup>, אבנר קסלר<sup>3</sup>, מרסלו  
רוזנזפט<sup>1</sup>, דייגו ברגר<sup>4</sup> ועמוס ביין<sup>5</sup>

- 1- המכון הגיאולוגי
- 2 – עין כרם, ירושלים
- 3 - הנדסת סביבה ומשאבי מים בע"מ
- 4 – מקורות
- 5 - RPD-Geohyd יועצים



## תקציר

אגן מי התהום, הכולל את חלקו של הגליל המזרחי המתנקז לעבר המעיינות במערב הכנרת מכונה כאן בשם "אגן כלנית" או בשם אגן פוליה-טבחה, על שם מעיינות המוצא העיקריים שלו. האגן גובל בצפון באגן מי תהום המתנקז לעבר עמק החולה, במערב - באגנים המתנקזים מערבה, לעבר הים התיכון ובדרום - באגנים המתנקזים לעבר בקעת בית שאן.

מטרות העבודה הנוכחית הן להבין את המערכת ההידרוגיאולוגית של מערב הכנרת, לבחון את ההשפעה הצפויה של הפקה בגליל המזרחי על שפיעת המים והמלחים במעיינות מערב הכנרת ולבדוק שינויים אפשריים של מערכת תפעול ההפקה באגן מי התהום. במסגרת העבודה בוצעה הצבת מודל ממוחשב לדימוי זרימת מי התהום והסעת המומסים באגן. העבודה נעשתה במימון של השירות ההידרולוגי, רשות המים.

בשלב הראשון של העבודה התבצע עדכון של המפות הגיאולוגיות של כל אזור העבודה ובעקבותיו גם מיפוי סטרוקטורלי של השכבות הגיאולוגיות שבהם מתבצעת זרימת מי תהום. בשלב הבא, לצורך הצבת המודל הממוחשב התלת מימדי, נעשה עדכון של המודל ההידרוגיאולוגי הקונספטואלי של האגן המערבי של הכנרת. לאחר מכן, בוצעו הרצות הכיול של המודל התלת מימדי ובשלב האחרון של העבודה נבדקו תרחישים של הפקה עתידית בהתאם להצעות של אנשי רשות המים.

המערכת האקוויפרית הפעילה בתחומי האגן כוללת אקוויפרים ויחידות החוצצות ביניהם, בחתך הגיאולוגי שגילו מקרטיקון תחתון עד הווה. האקוויפרים העיקריים בהם מתרחשת זרימת מי התהום המגיעים אל מערב הכנרת הם אקוויפר חבורת יהודה (המחולק לעליון ותחתון) ואקוויפר חבורת עבדת. מקור המילוי החוזר של מי התהום באגן המערבי של הכנרת במשקעים היורדים על המחשופים של אקוויפרים אלה.

מודל אגן פוליה - טבחה פותח באמצעות קוד של FEFLOW שהינו מודל של אלמנטים סופיים לסימולציות של מערכות זרימה והסעה של מי תהום. הרצת המודל החלה בשלב של אגם מלוח לפני 10,000 שנה (אגם הלשון) שמליחותו דומה לזו של חמי טבריה (כ- 36 גרם לליטר). תוצאות הכיול של שלב השטיפה בתנאים שבהם אין מקור מליחות נוסף מהעומק מראות כי רב מסת המלח היתה נשטפת מתוך האקוויפרים והריכוזים היו נמוכים בהרבה מאלו המדודים. בהסתמך על הסימולציות הללו, ברור כי צריך להיות מקור מליחות נוסף. כדי לייצג מסת מלח שנכנסת מהעומק (אקוויפר חבורת כורנוב) הוכנסו קידוחי הזרקה שבהם נוספת מסת מלח (כ-25% מהכמות השנתית שיוצאת במעיינות). ההנחה היא כי רב המים המלוחים שעולים עושים זאת דרך ההעתקים, בהם הוצבה מוליכות הידראולית אנכית גבוהה בהרבה מזו הקיימת בסביבתם.

בהרצות שנעשו לתקופה של 1963-2008 נמצאה התאמה סבירה בין תוצאות כיול המודל התלת מימדי לבין נתוני השדה, המלמדת כי המודל מייצג באופן סביר את המצב בשדה. ההתאמה מתבטאת בשפיעת המעיינות (כולל השינויים העונתיים במעיין טבחה), במליחותם הכללית (לא כולל שינויים עונתיים) ובמפלסי מי תהום בקידוחים מייצגים.

המילוי החוזר שהוכנס למודל היה בממוצע 81 מלמ"ש (פיזורו החודשי התקבל מכיול מודל התאים - קסלר 2010) והוא כלל גם תרומה של 6 מלמ"ש מדליפות מהמוביל הארצי. השפיעה המחושבת של מעיינות מערב הכנרת (כולל אלה מחבורת עבדת), היתה בשנות השישים כ- 77 מלמ"ש, בממוצע וירדה לכ- 59 מלמ"ש בממוצע בשנים 2000/01 עד 2007/08. ההפקה מקידוחים באגן עלתה בהדרגה מכ- 10 מלמ"ש בשנות השישים ל- 31.2 מלמ"ש בממוצע בשנים 2000/01 עד 2007/08. ריקון האוגר שחושב לשנים הראשונות היה 4 מלמ"ש בממוצע ולכל התקופה הוא היה כ- 7.5 מלמ"ש, בממוצע.

תוצאות הרצות של המודל במספר תרחישים ל- 45 שנים מ- 2010 עד 2055 מלמדות כי המשך ההפקה בתנאים הנוכחיים יביא כנראה לירידה לא גדולה של מפלסי מי תהום, שתתייצב תוך מספר שנים וכן גם לירידת השפיעות של המעיינות שגם היא תתייצב תוך מספר שנים. ירידה זו מתקיימת בתרחיש שבו לוקחים ממוצע ערכי מילוי חוזר של 15 השנים האחרונות ולא את ממוצע ערכי המילוי החוזר של 45 השנים האחרונות, שגדול ב- 8-15 אחוז באזורים השונים של העבודה. בתרחיש שבו ערכי המילוי החוזר נלקחו כממוצע של 45 השנים האחרונות, הירידה בשפיעות מועטה מאוד. לפי תוצאות המודל מליחות המעיינות לא צפויה להשתנות באופן משמעותי. מסת המלח המגיעה דרך המעיינות לכנרת אמורה לרדת בגלל הירידה בשפיעת המעיינות.

אם תהיה הפקה גדולה יותר (נבדק המקרה של הפקת 55 מלמ"ק לשנה לעומת כ- 38.5 מלמ"ק כיום), צפויה ירידה משמעותית הרבה יותר בשפיעת המעיינות ובמפלסי מי תהום. גם במקרה זה, תהיה הגעה לשווי משקל אם כי במפלסים נמוכים יותר ובספיקות נמוכות יותר של המעיינות, לאחר זמן רב יותר. נראה כי גם במקרה קיצוני זה, רוב הקידוחים יוכלו להמשיך לתפקד, אם כי נושא זה דורש בדיקה מדוקדקת יותר.

תוצאות התרחישים מרמזות כי המשך ההפקה לא יגרום לשינוי גדול במליחות המעיינות ויריד, באופן כללי, את מסת המלח שזורמת דרך המעיינות לכנרת. דבר זה נכון לגבי המשך ההפקה בכמות הנוכחית וכן גם במקרה של הגדלת ההפקה, אם כי במקרה השני יהיו מספר קידוחים שההפקה מהם תפסק בגלל ירידת מפלסים מתחת לתחתית הקידוח ואז קשה יותר לחזות את ההשפעה האמיתית על המערכת ההידרולוגית. לכן, מבחינה הידרולוגית, נראה כי אפשר להפיק בשנים הקרובות בכמויות שבין ההפקה הנוכחית לבין ההפקה של 55 מלמ"ק/שנה בלי שתהיה פגיעה גדולה במערכת ההידרולוגית של הכנרת וככל הנראה אף תוך הורדת מסת המלח המגיעה מהמעיינות לכנרת. חשוב לציין כי במקרה הקיצוני של הגברת השאיבה תהיה ירידה מאוד חזקה של מפלסי מי תהום וקשה לדעת מה מידת יכולתו של המודל לחזות את מיקום התמלחת בתנאים כאלה. לכן, בתנאים קיצוניים אלה צריך להתייחס ביתר זהירות לתוצאות המודל.

השוואה בין מודל תלת מימדי למודל התאים מלמדת על דמיון סביר בין תוצאות שני המודלים, בעיקר בשפיעות של המעיינות בתרחישים השונים. הבדל גדול נמצא בתרחיש של הגברת שאיבה מהאקויפר התחתון כאשר מודל התאים מראה ירידה דרסטית במליחות מי המעיינות בעוד שבמודל התלת מימדי התקבלה ירידה קלה בלבד. חשוב לציין כי לא ניתן לצפות להתאמה מלאה בין שני המודלים מכיוון שהם כוילו בנפרד וחלק מהנחות הבסיס אינן זהות.

עמוד	תוכן עניינים
1	הקדמה
1	<b>א. מודל קונספטואלי</b>
1	1. מבוא
1	2. המערכת האקוויפרית הפעילה
4	3. גבולות האגן
4	3.1 הגבול הצפוני
4	3.2 הגבול המערבי
5	3.3 הגבול הדרומי
6	3.4 הגבול המזרחי
6	3.5 אזורים ללא מילוי חוזר ישיר
7	4. האקוויפרים הראשיים
7	4.1 אקוויפר חבורת יהודה
7	4.1.1 הפרדה לתת אקוויפרים
8	4.1.2 מוצאים
8	4.1.2.1 מעיינות
9	4.1.2.2 קידוחים והפקה
10	4.2 האקוויפר העליון- חבורת עבדת+יחידות נאוגניות
10	4.2.1 האקוויפר ותחום השתרעותו
10	4.2.2 מוצאים
10	4.2.2.1 מעיינות
11	4.2.2.2 קידוחים והפקה
11	5. מילוי חוזר
13	6. מאזן המים
13	7. פיזור התכונות ההידראוליות במרחב
13	7.1 אנאיזוטרופיות
13	7.2 התכונות ההידראוליות של ההעתקים
13	7.3 שינויים בתכונות ההידראוליות בקרבת המעיינות הראשיים
14	7.4 תלות התכונות ההידראוליות במבנים סטרוקטורליים
15	8. מיקום התמלחות, העומד המניע שלהן ומנגנון עלייתן
17	9. טמפרטורת המים (פיזור הטמפרטורה עם העומק)
18	<b>ב. סימולציות הידרולוגיות: כיול המודל ההתחלתי ושלב השטיפה</b>
18	1. מבנה המודל
20	2. תנאי הגבול לכיול המודל בשלב השטיפה
20	2.1 מילוי חוזר
21	2.2 שפיעות המעיינות

22	3. כיוול המודל עד סוף שלב השטיפה
22	3.1 כיוול השלב הראשון של הזרימה, ללא הסעה
24	3.2 סימולציות לקבלת תנאי ההתחלה של פיזור המלחים בשכבות המודל
24	3.3 סימולציות לשלב השטיפה, מנסיגת אגם הלשון עד היום (כ- 10,000 שנה)
28	<b><u>ג. המודל הלא תמידי (transient) לשנים 1963-2008</u></b>
28	1. הצבת המודל ותנאי הרצתו
29	2. כיוול המודל הלא תמידי
30	3. תוצאות ההרצות של המודל הלא תמידי
32	<b><u>ד. בדיקת תרחישי תפעול עתידיים</u></b>
32	1. התרחישים
34	2. תוצאות הרצות התרחישים
37	3. השוואת תוצאות בין שני המודלים (מודל תאים ומודל תלת מימדי)
37	<b><u>ה. סיכום, מסקנות והמלצות להמשך</u></b>
37	1. סיכום ומסקנות
39	2. מגבלות ויתרונות המודל התלת מימדי
40	3. המלצות להמשך
41	<b><u>ו. הבעת תודה</u></b>
42	<b><u>ז. רשימת ספרות</u></b>
46	<b>ח. נספחים :</b>
46	1. פיזור ערכי מוליכות הידראולית באגן פוליה-טבחה
47	2. טבלת שאיבות בשלב התרחישים
49	3. טבלת התאמת הקידוחים לשאיבות הקיצוניות

## רשימת טבלאות

## עמוד

3	טבלה 1: הגדרת היחידות ההידרו גיאולוגיות
9	טבלה 2: מעיינות שעונים באקוויפר חבורת יהודה באגן כלנית
11	טבלה 3: מעיינות באקוויפר חבורת עבדת באגן כלנית
12	טבלה 4: מקדמי מילוי חוזר ליחידות ההידרו גיאולוגיות
18	טבלה 5: היחידות ההידרוגיאולוגיות של המודל
20	טבלה 6: הפרמטרים ההידראולים ששימשו במודל התלת מימדי
21	טבלה 7: קצבי המילוי החוזר ששימשו בהרצות המודל בשלב השטיפה
22	טבלה 8: שפיעת מעיינות בשווי משקל במודל כלנית
22	טבלה 9: שפיעת מעיינות חבורת עבדת (איאוקן) הכלולים בטבלה הקודמת
28	טבלה 10: רשימת הקידוחים המפיקים באגן
33	טבלה 11: התרחישים שנבדקו במסגרת העבודה הנוכחית

## רשימת איורים

- איור 1. מפת מיקום
- איור 2. חתך הידרוגיאולוגי סכימתי ממרכז הגליל לצפון הכנרת
- איור 3. מפה גיאולוגית
- איור 4. מפה סטרוקטורלית של בסיס חבורת יהודה
- איור 5. מפת מפלסים בחבורת יהודה בתחילת ההפקה
- איור 6. מפת אזורי המילוי החוזר
- איור 7. מפת חלוקת שטח המודל לרשת אלמנטים, מיקום ההעתקים הראשיים וגבולות המודל
- איור 8. מפת פיזור ערכי המוליכות ההידראולית במודל
- איור 9. מפת מפלסים מחושבים בסוף ההרצה של שלב השטיפה (תחילת שנות ה-60)
- איור 10. חתך הידרוגיאולוגי באזור פוליה המתאר את פיזור ריכוזי המלחים (TDS) במצב שיווי משקל עם אגם מלוח
- איור 11. ירידה מחושבת בריכוזי המלחים במעיינות פוליה וטבחה בשלב השטיפה ללא מקור מלח מהעומק
- איור 12. מיקום הוספת תמלחת מהעומק לאורך העתקים באזור הכנרת
- איור 13. ירידה מחושבת בריכוזי המלחים במעיינות פוליה וטבחה בשלב השטיפה עם מקור מלח בכמות של 8 מלמ"ק
- איור 14. ירידה מחושבת בריכוזי המלחים במעיינות פוליה וטבחה בשלב השטיפה עם מקור מלח בכמות של 2 מלמ"ק
- איור 15. חתך הידרוגיאולוגי באזור פוליה המראה את פיזור ריכוזי המלחים (TDS) בסוף שלב השטיפה
- איור 16. השתנות השפיעות בפוליה עם הזמן
- איור 17. השתנות השפיעות בטבחה עם הזמן
- איור 18. השתנות המליחות בטבחה עם הזמן
- איור 19. השתנות המליחות בפוליה עם הזמן
- איור 20. השתנות המליחות בפוליה עם הזמן, הרצה עם דיספרסיביות נמוכה
- איור 21. השתנות מסת המלח היוצאת במעיינות באזור טבחה ופוליה עם הזמן
- איור 22. מפת מפלסים מחושבת לשנת 2008
- איור 23. השתנות המפלסים עם הזמן בקידוח חטיין 3
- איור 24. השתנות המפלסים עם הזמן בקידוח כלנית 1
- איור 25. השתנות המפלסים עם הזמן בקידוח כנרת 8
- איור 26. השתנות בזמן של מרכיבי מאזן המים באגן, כולל מילוי חוזר, שפיעת מעיינות, הפקה בקידוחים, חדירת תמלחת מהעומק ושינוי אוגר
- איור 27. תחזית שינויי השפיעות בפוליה (ב-5 תרחישים)
- איור 28. תחזית שינויי השפיעות בטבחה
- איור 29. תחזית שינויי המליחות בפוליה
- איור 30. תחזית שינויי המליחות בטבחה
- איור 31. תחזית השתנות מסת המלח היוצאת לכנרת באזור פוליה
- איור 32. תחזית השתנות מסת המלח היוצאת לכנרת באזור טבחה
- איור 33. תחזית שינויי המפלסים בקידוח חטיין 3
- איור 34. תחזית שינויי המפלסים בקידוח כלנית 1
- איור 35. תחזית שינויי המפלסים בקידוח כנרת 8
- איור 36. תחזית שינויי המליחות בטבחה אם תהיה שאיבה גדולה מאקוויפר חבורת עבדת
- איור 37. מפת מפלסים חזויים בעוד 45 שנה, תרחיש 1.1 (המשך שאיבות כמו היום)
- איור 38. מפת מפלסים חזויים בעוד 45 שנה, תרחיש 2.1 (הפקה מקסימלית – 55 מלמ"ק)

**איור 39.** מפת הפרש מפלסים שבין סוף שלב הכיול לסוף תרחיש 1.1 (המשך הפקה בכמויות של היום)

**איור 40.** מפת הפרש מפלסים שבין סוף תרחיש 1.1 לסוף תרחיש 2.1 (הפקה שנתית של 55 מלמ"ק)

**איור 41.** שינויי המליחות החזויים בפוליה במקרה התיאורטי שבו ישנה הפרדה משמעותית יותר בין שני תת האקוויפרים של חבורת יהודה

**איור 42.** השוואת תוצאות בין מודל התאים למודל התלת מימדי – שפיעות בפוליה

**איור 43.** השוואת תוצאות בין מודל התאים למודל התלת מימדי – שפיעות בטבחה



# מודל תלת מימדי של אגן כלנית (אגן פוליה-טבחה)

## הקדמה

מטרות העבודה הנוכחית הן להבין את מערכת ההידרוגיאולוגית של מערב הכנרת, לבחון את ההשפעה הצפויה של הפקה בגליל המזרחי על שפיעת המים והמלחים במעיינות מערב הכנרת ולהציע שיפורים אפשריים של מערכת תפעול ההפקה באגן מי התהום. במסגרת העבודה בוצעה הצבת מודל ממוחשב לדימוי זרימת מי התהום והסעת המומסים באגן. העבודה נעשתה במימון של השירות ההידרולוגי, רשות המים.

בשלב הראשון של העבודה התבצע עדכון של המפות הגיאולוגית של כל אזור העבודה ובעקבותיו גם מיפוי סטרוקטורלי של השכבות הגיאולוגיות שבהן מתבצעת זרימת מי תהום (אבלסון וחובי, 2009). בשלב הבא, לצורך הצבת המודל הממוחשב התלת מימדי, התבקש עדכון של המודל ההידרוגיאולוגי הקונספטואלי של האגן המערבי של הכנרת. לאחר מכן, נעשו הרצות הכיול של המודל התלת מימדי ובשלב האחרון של העבודה נבדקו תרחישים של הפקה עתידית בהתאם להצעות של אנשי רשות המים.

במסגרת העבודה הנוכחית, במקביל להצבת המודל שתואר לעיל, הוצב וכויל גם מודל תאים (קסלר, 2011), וממצאים שהתקבלו במהלך העבודה עליו סייעו בהגדרת המודל הקונספטואלי המתואר להלן.

## א. מודל קונספטואלי

### 1. מבוא

אגן מי התהום, הכולל את חלקו של הגליל המזרחי המתנקז לעבר המעיינות במערב הכנרת (איור 1), מכונה כאן בשם "אגן כלנית". שם נוסף לאגן הוא אגן פוליה-טבחה, על שם מעיינות המוצא העיקריים שלו. האגן גובל בצפון באגן מי תהום המתנקז לעבר עמק החולה, במערב - באגנים המתנקזים מערבה, לעבר הים התיכון ובדרום - באגנים המתנקזים לעבר בקעת בית שאן. תאור הגבולות מובא בפרק 3, להלן.

המודל הקונספטואלי בא לתאר את התנאים הבסיסיים של מערכת זרימת מי התהום באגן ואת התנאים שמשפיעים על שפיעת המעיינות המליחים במערב הכנרת, אשר לפיהם מוצב המודל הממוחשב התלת מימדי.

### 2. המערכת האקוויפרית הפעילה

חלוקת החתך הגיאולוגי בגליל המזרחי ליחידות הידרוגיאולוגיות (איור 2) מבוססת על עבודות קודמות והיא עודכנה לאחר ניתוח הנתונים הגיאולוגיים וההידרוגיאולוגיים במסגרת העבודה הנוכחית. המפה הגיאולוגית (איור 3) והמפות הסטרוקטורליות של השכבות השונות הוצגו בדו"ח

מקדים (אבלסון וחובריו, 2009). לצורך הרצת המודל ההידרוגיאולוגי, נעשתה הפשטה של המפות הסטרוקטורליות (דוגמה באיור 4).

בטבלה 1 מרוכזים נתוני היחידות הסטרטיגרפיות המרכיבות את היחידות ההידרוגיאולוגיות, הליתולוגיות העיקריות שלהן ועוביין בתחומי האגן. היחידות ההידרוגיאולוגיות מוצגות בחתך דו ממדי החוצה את הגליל המזרחי מצפון-מערב לדרום-מזרח ועובר במעיינות טבחה (איור 2).

היחידה התחתונה היא של האקוויפר העבה של סלעים גיריים מגיל יורה, המצוי בגליל המזרחי בעומק גדול ומוכר רק ממספר קטן של קידוחי נפט. האקוויפר מכיל תמלחות עם ריכוז מלחים גבוהה מריכוזים במי ים (פלוישר, 1969), שככל הנראה מנותקות מהמחזור ההידרולוגי הפעיל. הנחתנו הבסיסית כאן היא שאקוויפר זה אינו כלול במערכת הפעילה היום מלבד, אולי, תרומה קטנה של מים מלוחים. לפיכך, בסיס המודל נקבע בבסיס שכבות החול של אקוויפר חבורת כורנוב, שגילו קרטיקון תחתון.

המערכת האקוויפרית הפעילה בתחומי האגן כוללת אקוויפרים ויחידות החוצצות ביניהם, בחתך הגיאולוגי שגילו מקרטיקון תחתון עד הווה (טבלה 1; איור 2).

האקוויפר התחתון (אקוויפר חבורת כורנוב) מצוי בסלעים החוליים של תצורת חתירה ובגירים של תצורת עין אל אסד (הבלנש), שעוביים הכולל באזורנו הוא כ- 250 מ'. המילוי החוזר הישיר לאקוויפר זה קטן מאוד כיוון ששטחי המחשופים שלו, הקיימים באזור עילבון, אינם עולים על 2 קמ"ר (איור 3). מקור מי תהום באקוויפר התחתון יכול להיות גם מדליפה מהאקוויפר שמעליו או במעבר ממנו דרך העתקים. סביר להניח כי כמויות המים הזורמות דרך אקוויפר חבורת כורנוב קטנות מאוד. יתכן כי באקוויפר התחתון נמצאים מים עתיקים פוסיליים, ללא הזנה עכשווית, כפי שקיימים באקוויפר זה במקומות אחרים בישראל. נתונים לגבי מי התהום המצויים בחבורת כורנוב בתחומי האגן מוכרים רק מקידוחי הנפט ירדן 1 ו-2, שבקרבת חמי טבריה. לפי נתונים אלה, מליחות המים והטמפרטורה שלהם גבוהות וזרות לאלה במעיינות חמי טבריה.

האקוויפרים העיקריים בהם מתרחשת זרימת מי התהום המגיעים אל מערב הכנרת הם אקוויפר חבורת יהודה ואקוויפר חבורת עבדת. האחרון כולל גם, באזורים מצומצמים, קונגלומרטים נאוגניים וסלעי בזלת המונחים על סלעי חבורת עבדת (פרוט בהמשך). מקור המילוי החוזר של מי התהום באגן המערבי של הכנרת במשקעים היורדים על המחשופים של אקוויפרים אלה ועל כיסוי אלוביאלי המכסה אותם. האקוויפרים האלה מתוארים בהרחבה בפרק 4, בהמשך.

בין אקוויפר חבורת יהודה לבין אקוויפר חבורת עבדת חוצצת היחידה האקוויקלודית של חבורת הר הצופים, שעובייה לרוב 200 עד 300 מ'. במערב האגן, במורדות המערביים של הרי נצרת, היחידה החוצצת כוללת גם את תצורת תמרת הקירטוניית-חוארית המופיעה שם בחלקה התחתון של חבורת עבדת.

האזור שממערב לכנרת הוא חלק מהאגן המזרחי של הקמר הראשי העובר במרכז הגליל, הנטוי לדרום מזרח, לעבר בקע ים מלח (איור 2). הוא מתחלק, על ידי העתקים רוחביים בעלי כיוון צפון מערב – דרום מזרח עד מערב מזרח, לסדרת בלוקים הנטויים לדרום-מערב. מבנה הבלוקים נמשך גם מתחת לחלק הצפון-המערבי של הכנרת (ראה גם אצל זלצמן, 1964).

משטח המגע בין הסלעים הניאוגניים לבין הסלעים עליהם הם מונחים הוא משטח גדוע. בהתאם לכך עובי יחידות הסלעים הניאוגניות הכוללות בעיקר קונגלומרטים, חווארים, גירים ויחידות וולקניות מגיל מיוקן ופליוקן משתנה מ- 0 למאות מטרים על פני מרחקים קצרים (ראה טבלה 1). לפי חתכי קידוחים המצויים בתוך הכנרת באזור הברבוטים שמדרום לטבחה, החתך הגיאולוגי של

כינוי היחידה ההידרוגיאולוגית	ליתולוגיה עיקרית	חבורה	תצורות	גיל	עובי (מטרים)
אקוויקלוד החרסית	חרסית חרסית+חלוקים	ים המלח		פליסטוקן	30 - 20 100-200
אקוויפר עבדת (+יחידות ניאוגניות)	בזלת ופירוקלסטים חוואר, גיר, אופוריטים קונגלומרט	ים המלח	בזלת הכיסוי גשר בירה אום סבונה	פליוקן מיוקן	250 - 0
	בזלת, קונגלומרט, חוואר, חול	טבריה	בזלת תחתונה הורדוס	מיוקן	600 - 0
	גירים קרסטיים גיר קירטוני- חווארי	עבדת	בר כוכבא תמרת	איאוקן	400 - 0
אקוויקלוד הר הצופים	קירטונים וחווארים קירטון וגיר	הר הצופים	טקיה, ע'רב עין זיתים	פאליאוקן סנון	300 - 60
אקוויפר יהודה עליון	דולומיט וגיר	יהודה	סח'נין, בענה	קנומן- טורון	300 - 130
אקוויטרד דיר חנה	דולומיט, גיר וחוואר	יהודה	תצורת דיר חנא - פרט ראש הנקרה	קנומן	200 - 60
אקוויפר יהודה תחתון	דולומיטים	יהודה	כמון+ פרט כרכרה של תצ' דיר חנא	אלביין	470 - 100
אקוויקלוד	חווארים וגירים	כורנוב	הידרה, רמה	אלביין	250 - 130
אקוויפר כורנוב	גירים וחווארים בעיקר אבני חול	כורנוב	נבי סעיד, עין אל אסד חתירה	אפטיין	60 - 50
	בזלות ופירוקלסטים				200
אקוויקלוד			וולקני תיסיר		50 - 30
אקוויפר היורה	בעיקר גירים גירים ודולומיטים חווארים דולומיטים וגירים סלעים וולקניים	ערד	חלוצה באר שבע כידוד זוהר וולקני אשר	יורה עליון עד יורה תחתון	

טבלה 1: הגדרת היחידות ההידרוגיאולוגיות

יחידה זו משתנה בעוביו ובאופיו הליתולוגי. קידוח D-1021 (מסומן באיורים 1 ו-3) חדר מתחת לקרקעית האגם חתך הבנוי מסילט וחרסית, קונגלומרט, חול וחילופי חוואר, גיר וחרסית מגיל ניאוגן עד הווה שעוביו של 280 מ', המונח ישירות על סלעי חבורת יהודה (כהנוביץ ומירו, 1973).

הסלעים הניאוגניים הם בחלקם הגדול אקוויקלודיים ובחלקם אקוויטרדים או אקוויפרים גרועים. בהעדר נתונים לגבי מיקום הגבול בין סלעי חבורת עבדת לבין הסלעים הניאוגניים המונחים מעליהם מתחת לכנרת, וכן בהעדר נתונים הידרולוגיים (כגון מפלסי מים) לגבי היחידות הניאוגניות, מוכללות יחידות סלע אלה בהצבת המודל באקוויפר של חבורת עבדת.

מתחת לקרקעית הכנרת קיימת שכבת חרסית מגיל פליסטוקן שעובייה ברוב השטח ממטרים ספורים ועד כ-20 עד 30 מטרים. במרבית שטח האגן שבתוך הכנרת ולאורך החוף המערבי הסלעים הניאוגניים ושכבת החרסית הפליסטוקנית שמעליהם, חוצצים הידרולוגית בין האקוויפרים של החבורות יהודה ועבדת לבין קרקעית האגם או לפני השטח. הנחתנו כאן היא שזרימת מי התהום מהאקוויפרים אל מעיינות מערב הכנרת, הן מעיינות החוף והן מעיינות הנובעים בתוך האגם, מתרחשת באזורים מצומצמים הקשורים בהעתקים (הרחבה לגבי המעיינות ראה בפרק 4.1.3).

### 3. גבולות האגן

להלן תיאור של גבולות האגן כפי שהם מותווים באיורים 1 ו-3 והנימוקים לקביעתם:

**3.1 הגבול הצפוני** הוא גבול של פרשת מים בין אגן כלנית לבין אגן עינן, הכולל את קטע הגליל המזרחי המתנקז מזרחה לעבר מעיינות עינן הנובעים סמוך לגבול המערבי של עמק החולה. מיקומו של הגבול הצפוני אינו ברור לגמרי. סביר שאקוויפר חבורת יהודה בקטע שבין שוליו המזרחיים של הר מירון במערב (לגבי הגבול המערבי בתחום הר מירון ראה למטה) לבין שולי בקע ים המלח ורמת כורזים במזרח, מתנקז לעבר מעיינות עינן בצפון מזרח, אך יתכן שהוא מתנקז לעבר הכנרת בדרום מזרח. בהעדר קידוחים בכל התחום שבין אזור שדה אליעזר בשוליו הדרומיים מערביים של עמק החולה בצפון לבין קידוח נחל עמוד 1 בדרום (איור 3), לא ניתן היה להתוות את הגבול על סמך נתוני מפלסים והגבול הצפוני בחלקו המזרחי נקבע על פי שיקולים הידרוגיאולוגיים המסתמכים על רום בסיס האקוויפר ומיקום העתקים (איור 3). בחלק המערבי הגבול הועבר מדרום לרמת דלתון ומצפון לאגן מי התהום המקומי המזין את מעיינות נחל עמוד העליון (להלן) ובהמשך מזרחה הוא הועבר מדרום לקידוחי תל חצור שבשולי עמק החולה, הכלולים באגן כלנית ומצוי מדרום לגבול שתואר, (שליב, 2006). קיים קטע של מחשופי חבורת יהודה הכלול באגן כלנית ומצוי מדרום לגבול שתואר, שאינו מתנקז ישירות לעבר מעיינות טבחה בחוף הכנרת, אלא למעיינות שעונים בתוך האגן, כגון מעיינות נחל עמוד העליון ונחל מירון, אשר מפורטים בהמשך בטבלה 2.

**3.2 הגבול המערבי.** לכאורה סביר היה להעביר את הגבול המערבי של האגן לאורך הציר הסטרוקטורלי הראשי של הגליל, המפריד אותו מאגני מי התהום המתנקזים מערבה, לעבר הים התיכון. כך בהנחה שמאזור הציר, בו בסיס האקוויפר הרגיונלי של חבורת יהודה נמצא ברום הגדול ביותר, זרימת מי התהום היא בכיוון נטיית השכבות מערבה ומזרחה. בהתאם להנחה זו, הגבול מותווה לאורך הציר הסטרוקטורלי הראשי של הגליל הועבר בחלק המזרחי של הר מירון ונמשך עד להר חזון בדרום. נתוני המפלסים בקידוחי חזון שבאזור הר חזון אכן מלמדים על מיקום הגבול

המערבי של האגן באזור הציר הסטרוקטורלי הראשי (תרשים 2). בקטע זה הגבול הוא גבול הידרולוגי אטום לגבי אקוויפר חבורת יהודה שהוא האקוויפר הראשי (להלן), כיוון שבסיס האקוויפר מצוי מעל לרום מפלס מי התהום.

לעומת זאת, מהר חזון ועד לגבול עמק יזרעאל בדרום, מפלסי המים הנמדדים באקוויפר חבורת יהודה מלמדים על הסטה של גבול האגן מאזור הציר הסטרוקטורלי הרחק מערבה עד לגבול המערבי של בקעת בית נטופה (מיכאלי וחובריו, 1973; Kafri and Arad, 1978 וראה איורים 1 ו-3). הודות לקיום מבני ההעתקה החוצים את הגליל לרוחבו ומורידים את בסיס אקוויפר חבורת יהודה במאות מטרים, מתאפשרת זרימת מי התהום באקוויפר זה מזרחה, לעבר בסיס הניקוז באזור הכנרת הנמוך בכ- 200 מ' מפני הים התיכון דרך אזור ציר הקמר המרכזי של הגליל, העובר במזרח בקעת בית נטופה.

הגבול בקטע שבין הר חזון לבין מערב בקעת בית נטופה מותווה כאן לאורך הרום הסטרוקטורלי של הר נטופה – הר עצמון. הגבול במערב עמק בית נטופה הותווה לפי נתוני המפלסים בקידוחים (איור 5). באזור זה חתך חבורת יהודה כולו נמצא מתחת לרום מפלס מי התהום וקיים שם גבול פתוח של פרשת המים בין האגן המתנקז מזרחה לעבר הכנרת לבין האגן המתנקז לעבר עין נעמן בצפון מזרח או לעבר שולי עמק יזרעאל במערב. מיקומו של גבול זה נתון להשפעה של משטר ההפקה משני עבריו (שכנאי, 1990).

**3.3 הגבול הדרומי.** בדרום גובל האגן בעמק יזרעאל, אשר מי התהום בו מתנקזים אל מוצאים אפשריים בבקעת בית שאן במזרח ולעבר הים התיכון במערב. מיקומו של הגבול הדרומי של אגן כלנית אינו ברור לגמרי. הקטע המערבי של הגבול הדרומי נקבע כאן, בשלב ראשון, לאורך העתק תמרת (איור 3), בהתבסס על נתוני המפלסים בקידוחים שלאורך השוליים הצפוניים של עמק יזרעאל - קידוחי שימרון, גניגר ואיכסל ועל ממצאי קידוח שימרון 6. ההעתק, המוריד את הגוש מדרומו בכ- 300 מ', מציב שכבות אטימות של חבורת הר הצופים מול החתך האקוויפרי של חבורת יהודה בבלוק הצפוני, המורם. ההעתק מהווה גבול הידרולוגי שמדרומו אקוויפר חבורת יהודה בחלקו התחתון מכיל מים מליחים (גוטמן ורוזנטל, 2002). הקידוחים גניגר 1, 2 שמדרום להעתק ושימרון 3 ו-4 שעליו אינם כלולים באגן כלנית.

בכל האזור הנרחב שבין הרי נצרת במערב לבין הכנרת ושולי עמק הירדן במזרח, אקוויפר חבורת יהודה כולו בעומק גדול מתחת ליחידות של חבורת הר הצופים וחבורת עבדת ובקטעים גדולים גם מתחת לכיסוי עבה של בזלות וסדימנטים נאוגניים ואין לו מילוי חוזר ישיר. ריכוזי הכלורידים בקידוחי דברת (כ- 1550 מגכ"ל בחבורת יהודה) ועין דור 4 (כ- 1000 מגכ"ל בחבורת עבדת) מלמדים שהאקוויפרים הקרבונטיים של חבורת עבדת וחבורת יהודה אינם שטופים ולפיכך זרימת מי התהום בהם קטנה (שליב, 2000). נתוני המפלסים בשני קידוחים שחדרו לאקוויפר חבורת יהודה מצפון ומדרום לגבעת המורה מצביעים על כך שבאזור זה זרימת מי התהום באקוויפר זה היא לדרום מזרח (שליב, 2000) ולא לעבר הכנרת. בהתאם לנתונים אלה הותווה חלקו המזרחי של הגבול הדרומי של אגן כלנית מצפון לשוליה הצפוניים של בקעת כסולות והלאה מזרחה, שרירותית, לאורך קו רוחב אל מדרום לקצה הדרומי של הכנרת. כיוון שאין בכל האזור הזה מילוי חוזר לאקוויפרים של חבורת עבדת וחבורת יהודה, וכיוון שאין שם כל הפקה בקידוחים, הרי שלמיקומו המדויק של הגבול בקטע זה אין חשיבות רבה בשלב של הצבת המודל בהמשך.

לסיכום, מיקומו של הגבול הדרומי ובמידה מסוימת גם מיקום הגבול המערבי אינו ברור לגמרי. יתכן כי הגבול עובר מספר קילומטרים מצפון למקום בו הוא מועבר בעבודה הנוכחית. במסגרת העבודה הנוכחית בוצעה גם סימולציה שבדקה את המצב ההידרולוגי כאשר הגבול מועבר צפונה יותר מהמתואר למעלה, כפי שהוא מותווה בחלוקה לתאים של השרות ההידרולוגי (ראה מפת החלוקה לתאים בדוחות השרות ההידרולוגי), כך שאזור הרי נצרת יהיה מחוץ לאגן הנידון. בסימולציה זו נמצא כי המיקום המדויק של הגבול אינו משפיע באופן משמעותי על הזרימות והמליחות של המעיינות שזו היתה מטרת העבודה העיקרית.

**3.4 הגבול המזרחי.** הגבול המזרחי של האגן נקבע בתוך הכנרת, עד לגבולה הצפוני, לאורך העתק הגבול המפריד בין הגושים הנטויים של הגליל המזרחי הנמשכים מתחת למערב הכנרת (זלצמן, 1964), לבין המבנה העמוק של בקע ים המלח, המלא בסדימנטים אטומים. מיקום ההעתק בעבודה הנוכחית (איור 3) נקבע בעקבות (Hurwitz et al., 2000). לאורך המשכו הצפוני של העתק זה, העובר בחלקה המערבי של רמת כורזים (העתק טבחה), הזריקה האנכית קטנה ואינה גורמת להפרדה הידרולוגית בין שני צידיו. מצפון לכנרת גבול המודל נקבע לאורך העתק הירדן המפריד בין רמת כורזים לבין רמת הגולן, כיוון שלאורך העתק זה קיימת העתקה אנכית גדולה והנחתנו היא שקיימת לאורכו הפרדה הידרולוגית באקוויפרים שמתחת לבזלת הכיסוי, כך שאין תרומת מי תהום לאגן הכנרת מצדו המזרחי של הבקע (מרמת הגולן).

### **3.5 אזורים בתחומי האגן שאין בהם מילוי חוזר ישיר לאקוויפרים הפעילים המתנקזים לעבר הכנרת**

אזורי המילוי החוזר העיקריים של אגן כלנית מתוארים באיור 6. קיימים ארבעה אזורים בתוך גבולות האגן (שהותוו למעלה) שבהם מי התהום אינם מתנקזים לעבר מערב הכנרת ולכן המילוי החוזר בהם אינו כלול במאזן האגן הנידון בעבודה הנוכחית. אולם, סביר כי נגר עילי מקטעים של אזורים אלה מגיע למחשופים של חבורת יהודה ומגדילים את המילוי החוזר בהם (ראה בהמשך פרק 5). האזורים הם (איורים 3 ו-6):

1) מחשוף חבורת עבדת במורדות המערביים של הרי נצרת. האקוויפר כאן שעון מעל ליחידה החוצצת של חבורת הר הצופים והוא מתנקז מערבה ודרומה לעבר מעיינות ציפורי ויפתחאל ולעמק יזרעאל. שטח הכולל של המחשופים הוא כ- 60 קמ"ר. אולם, יתכן שחלק מהמילוי החוזר בשטח זה מגיע דרך העתקים לחבורת יהודה או שזרימה עילית מקטעים שם מגיעה למחשוף חבורת יהודה ותורמת למילוי החוזר של אקוויפר חבורת יהודה המתנקז לעבר הכנרת (ראה פרק 5, להלן)

2) מחשוף חבורת עבדת באזור בית קשת וצפון רמת סירין המתנקזים, ככל הנראה, לעבר מעיינות נחל תבור ושטחם כ- 70 קמ"ר.

3) האקוויפר הבזלתי בבקעת יבנאל ושוליה, בשטח של כ- 60 קמ"ר, המתנקז לעבר מעיינות נחל יבנאל.

4) חלקה המזרחי של רמת כורזים, בגודל של כשליש משטחי מחשוף הבזלת, בו האקוויפר הבזלתי המכסה את פני השטח מתנקז לעבר מעיינות שעונים במורדות לעבר ערוץ הירדן במזרח ולחוף הכנרת בדרום. להערכתנו, אין בשטח זה זרימת מי תהום משמעותית באקוויפרים של

חברות יהודה ועבדת. שטח מחשופי הבזלת שאינם מתנקזים דרך האקוויפרים העיקריים (שהוגדרו לעיל) לעבר מעיינות טבחה מוערך כאן ב - 25 קמ"ר.

#### **4. האקוויפרים הראשיים**

##### **4.1 אקוויפר חבורת יהודה**

אקוויפר חבורת יהודה הוא האקוויפר הראשי בתחום האגן הנידון. מחשופי הסלעים של חבורת יהודה, כלומר שטחי המילוי החוזר, מכסים חלק ניכר ממערב ומרכז שטח האגן (תרשים 3) ודרכו זורמים מירב מי התהום המתנקזים לעבר מעיינות מערב הכנרת.

##### **4.1.1 הפרדה לתת אקוויפרים**

בעקבות עבודות קודמות ובהסתמך על ניתוח מדוקדק של הנתונים ההידרולוגיים (מיקום מעיינות, מפלסים בקידוחים, נתונים כימיים של המים ועוד), שרוכזו בבסיס הנתונים של הפרויקט הנוכחי (קסלר, 2009), אקוויפר חבורת יהודה מחולק לתת אקוויפר עליון ולתת אקוויפר תחתון, הנפרדים בקטעים שונים של האגן.

החלוקה לשני תת האקוויפרים בעבודה הנוכחית היא כדלקמן:  
תת האקוויפר התחתון כולל את תצורת כמון והפרט התחתון של תצורת דיר חנה (פרט כרכרה) ותת האקוויפר העליון כולל את התצורות סחנין ובינה. ההפרדה ההידרולוגית בין שני תת האקוויפרים היא לרוב בפרט העליון של תצורת דיר חנה (פרט ראש הנקרה), העשיר בשכבות קירטוניות-חואריות. באזורים מסוימים החלק העליון של תצורת דיר חנה מהווה, לפי ממצאי קידוחים, חלק מתת האקוויפר העליון.

עדות להפרדה קיימת בהופעת המעיינות הנובעים מבסיס תצורת סחנין בנחלי מירון ועמוד העליון (מעיינות יקים, תרון ופועם, ראה בתיאור הגבול הצפוני בפרק 3, לעיל). עדות נוספת היא העובדה שבאזורים בהם ישנם נתונים מקידוחים לגבי מפלסי המים בשני תת האקוויפרים, במצב הבלתי מופר (ללא השפעת הפקה), נמצאו הפרשים ברורים בין המפלסים (נספח 1). לדוגמא, במערב עמק בית נטופה, מפלסי המים בתת האקוויפר העליון גבוהים ב- 1 עד 4 מטרים מאלה בתת האקוויפר התחתון. לעומת זאת באזור הקרוב יותר לכנרת (בקער של מגדל - ארבל) שבו אקוויפר חבורת יהודה כולא בעומק גדול (איור 2), לפי נתונים בודדים הקיימים לגבי האקוויפר העליון משלב הקדיחה של הקידוחים ארבל 1 וכחל 1, המפלס באקוויפר התחתון היה גבוה ב- 2 עד 3 מטרים מהמפלס באקוויפר העליון.

ההנחה בעבודה הנוכחית היא שהמוליכות ההידראולית בתת האקוויפר העליון גבוהה מזו בתת האקוויפר התחתון, בגלל הקרסט המפותח יותר בו. בנוסף, הונח כי המוליכות ההידראולית האנכית של פרט ראש הנקרה נמוכה יחסית בגלל היחידות החואריות למרות שהמוליכות האופקית אינה נמוכה במיוחד (ערכים ספציפיים יפורטו בהמשך).

אולם ההפרדה בין שני תת האקוויפרים איננה מלאה. באזורים שונים במעלה האגן קיים קשר הידרולוגי ומעבר מים ביניהם לאורך העתקים וככל הנראה קיימת אף דליפה במקומות בהם השכבות החוצצות אינן עבות, או שסדקים ותופעות המסה קרסטית מקשרים בין שני תת האקוויפרים דרך היחידה החוצצת. קיומו של קשר כזה באזור מעיינות חוף הכנרת ידון בהמשך (פסקה 7.3).

ההנחה בעבודה הנוכחית היא שקיימת הפרדה בין שני תת האקוויפרים ברב המרחב מלבד באזורים בהם קיים קשר הידראולי ביניהם, כמו בקרבה מיידית לאתרי הנביעה של מעיינות מערב הכנרת ולאורך חלק מההעתקים הראשיים (דבר שבא לידי ביטוי בעת הצבת המודל הממוחשב).

## **4.1.2 מוצאים**

### **4.1.2.1 מעיינות**

מרבית מי התהום באגן הנידון מתנקזים לעבר מעיינות הנובעים לאורך החוף המערבי של הכנרת ומרוכזים בשלשה אתרים על החוף: טבחה, פוליה וחמי טבריה ובשני ריכוזי נביעות בתוך הכנרת – ברבוטים, שמדרום לטבחה ומעגן, מדרום מזרח לפוליה (איור 4). כמות הנביעה במעיינות בתוך האגם איננה נמדדת והיא מופיעה בהצגת המאזנים של האגם, יחד עם שפיעה של נביעות קטנות לאורך החוף שלא נמדדו - כ"נביעה בלתי מנוטרט" (ראה הצגת המאזנים אצל רימר, 1996; ברגר וחובריו, 2008).

גודל הנביעה הממוצעת במעיינות מערב הכנרת הוערך על ידי מירו וסימון (1988), מתוך מאזני מים ומלח של הכנרת לשנות השישים עד תחילת שנות השמונים של המאה הקודמת. הם העריכו את כמות השפיעה ב- 67.6 מלמ"ש, מתוכה 33.8 מלמ"ש בטבחה-ברבוטים, 32.4 מלמ"ש בפוליה-מעגן ו- 1.4 מלמ"ש בחמי טבריה (כולל נביעות מתחת לפני הכנרת). יש לקחת בחשבון שמעיינות מערב הכנרת מהווים מוצא גם למים המגיעים מאקוויפר חבורת עבדת (ראה גם להלן בפסקה 4.2.2).

לעומת זאת, השפיעה השנתית הממוצעת במעיינות מערב הכנרת ב- 13 השנים האחרונות, שהתקבלה ממאזני מים ומלח של הכנרת לשנים האחרונות, הייתה כ- 45 מלמ"ק/שנה (ברגר וחובריו, 2008). טל וחובריו (2009), שהסתמכו על מספר סקרי מעיינות שנעשו במהלך שנת 2008, העריכו את השפיעה בשנה זו, בכ- 48 מלמ"ק. התייחסות לגבי הסיבה לירידה בשפיעה משנות ה-80 לשנת 2008 מוצגת בפרק 6, להלן.

מליחת מי המעיינות – הקשר בין המליחות הכללית לריכוז הכלור הוא בקרוב אחד לשנים (כלומר ריכוז המלחים הכללי הינו בקרוב כפול מריכוז הכלורידים בלבד). בדו"ח הנוכחי ישנו שימוש בשני הפרמטרים הללו. הריכוזים המשוקללים של הכלורידים במי קבוצות המעיינות טבחה ופוליה בשנים האחרונות הוערכו לאחרונה בעזרת מדידות בשדה וכן במסגרת כיול מודל תאים לאגן כלנית, על ידי קסלר (2010). להלן ריכוזי הכלורידים קבוצות מעיינות העיקריות:

מעיינות טבחה: ריכוז הכלורידים המשוקלל הוא כ- 1,500 מג"ל; באזור זה יש מעיינות בטווח ריכוזים רחב (מפחות מ- 1000 עד לכ- 2200 מג"ל). הערך של כ- 1500 מג"ל נלקח כסדר גודל מתאים לריכוז המשוקלל.

מעיינות פוליה: ריכוז הכלורידים של מעיינות החוף הינו כ- 300 - 1,000 מג"ל. בנביעות באגם הריכוז גבוה יותר ומגיע ל- 2,500 מג"ל, לפי המליחות של פוליה A. קיימים מעיינות נוספים באגם שמליחות לא ידועה (כגון מעיינות מעגן שמליחותם גבוהה יותר). היחס בין כמות המים במעיינות חוף לעומת מעיינות באגם אינו ברור. בהרצות המודל התלת ממדי, בהמשך, נלקח כ- 1:1.

מעיינות חמי טבריה, כולל בתוך האגם: 18,000 מג"ל. ריכוז הכלורידים הזה הינו לפי הריכוז במעיינות המלוחים ביותר באזור זה וכן לפי נתונים משנות השישים ממספר קידוחים שנקדחו באגם ובקרבת חמי טבריה.

ההערכה הראשונה לגבי התרומה היחסית של הזרימה בכל אחד מהאקוויפרים הראשיים למעיינות נעשתה על סמך מליחות המים, מתוך הנחה כי מי מרכיב הקצה המלוח נתרמים מתוך תת האקוויפר התחתון של חבורת יהודה בלבד. לפי מליחות מי המעיינות הוערך כי תרומת המים מתת האקוויפר התחתון הסתכמה בכ- 10% מכמות הנביעות. הערכה זו הינה בעייתית מכיוון שכנראה קיים רכיב נוסף של מים מלוחים מעומק רב יותר (דיון בהמשך), דבר שמוריד לכאורה את הכמות שאמורה להגיע מתת האקוויפר התחתון. מצד שני, יתכן כי גם דרך אקוויפר זה עולים מים מתוקים במקומות מסוימים, בהתאם למבנה המקומי.

מלבד המעיינות הראשיים שבקרבת חופי הכנרת, נובעים בתחומי האגן עוד מספר מעיינות מתוך אופקים שעונים באקוויפר חבורת יהודה. חלקם הגדול של מי מעיינות אלה נתפסים במפעלים מקומיים ומנוצלים במעלה (מי מעיינות נחל עמוד העליון, נחל מירון ומעיינות רמיאל ופרוד להספקת מים לישובים הסמוכים). חלקם האחר זורם בערוצים ובחלקו הגדול מחלחל שוב לאקוויפר. מיקום מעיינות אלה מופיע במפה באיור 2 ונתוני השפיעות השנתיות הממוצעות במעיינות הנמדדים, ומדווחים על ידי השרות ההידרולוגי, מרוכזים בטבלה 2.

הכמות הכוללת של מי המעיינות השעונים, במצב הבלתי מופר, הסתכמה בכ- 4 מלמ"ש. הנחתנו היא שמרבית מי המעיינות השעונים (מלבד כמות קטנה שנוצלה בקרבת המעיינות ומעט מים שאבדו באופוטורנספירציה) מגיעה, לאחר לחלוח באפיקי הנחלים, למעיינות הכנרת. לכן, בהצבת המודל למצב הבלתי מופר, התעלמנו ממעיינות אלה.

שם המעיין	מס' זיהוי בשרות ההידרולוגי	קואורדינטות	רום הנביעה (מטרים מפ"ה)	שפיעה שנתית ממוצעת (מלמ"ש)
מירון	31250	24128/76490	695	0.72
תרון	31260	24382/76461	530	0.08
יקים	31262	24388/76458	520	0.72
פועם	31245	24440/76478	515	0.74
רמיאל	31301	24113/76126	630	1.16
פרוד	31305	24036/76042	480	0.29
רביד	31330	24468/75240	100	* 0

**טבלה 2:** מעיינות שעונים באקוויפר חבורת יהודה באגן כלנית (\* עין רביד יבש ב-35 השנים שלפני 2007)

#### 4.1.2.2 קידוחים והפקה

ההפקה מאקוויפר חבורת יהודה באגן החלה ב-1952 מקידוחים בשולי עמק יזרעאל והיא הלכה וגדלה במשך השנים תוך פיתוח הדרגתי של מספר "שדות הפקה". כיום שואבים מכ- 30 קידוחים. מיקום הקידוחים וסימון שדות ההפקה מופיעים במפות באיורים 1 ו-5. להלן פירוט שדות ההפקה, מספר הקידוחים השואבים בכל שדה ומועד תחילת ההפקה בו:

קידוחי שולי עמק יזרעאל ומערב עמק בית נטופה, תל עדשים, אכסל, שימרון, ציפורי, הסוללים ונטופה. ההפקה החלה ב- 1953 והיום שואבים מ- 10 קידוחים.

קידוחי חיטין: 5 קידוחים שואבים, התחלת ההפקה - 1955.

קידוחי צומת גולני: 3 קידוחים, התחלת הפקה - 1974.

קידוחי חזון: 4 קידוחים באגן וסמוך לגבולו. ההפקה בקידוח הראשון מ-1970.

קידוחי כלנית – נחל עמוד: התחלת הפקה ב-1983 והיום שואבים ב-8 קידוחים.

ההפקה הכוללת מאקוויפר חבורת יהודה בתחומי האגן גדלה בין השנים 1990/91 ל-2007/08 מכ-21 עד ל-41 מלמ"ק לשנה, בהתאמה.

## **4.2 האקוויפר העליון- חבורת עבדת+יחידות נאוגניות**

### **4.2.1 האקוויפר ותחום השתרעות**

אקוויפר חבורת עבדת, השעון מעל ליחידה האקוויקלודית של חבורת הר הצופים, בנוי בעיקר מהגירים הקשים הקרסטיים של חבורת עבדת אך במקומות גם סלעי בזלת הכיסוי וקונגלומרטים נאוגניים המונחים על סלעי חבורת עבדת (לעיל פרק 2). מחשופים של אקוויפר זה, ששטחם כ-80 קמ"ר, מצויים במורדות המזרחיים של הר צפת (איור 4), בתחום המתנקז לעבר מעיינות טבחה. מחשופים נוספים, ששטחם כ-15 קמ"ר, מצויים מדרום להעתק ארבבל בחלק האגן המתנקז לעבר מעיינות פוליה. האקוויפר שם מתנקז בחלקו לעבר עין ארבבל (טבלה 3) וחלק מהמילוי החוזר בתחום זה מגיע, ככל הנראה באזורי העתקה, לאקוויפר חבורת יהודה ודרכו למעיינות פוליה.

בתת הקרקע, האקוויפר קיים בתחום רחב יותר מהמחשופים בחלקו המזרחי של האגן, כולל מתחת לחלקה הצפוני מערבי של הכנרת (ראה מפות בדו"ח של אבלסון וחובריו, 2009). מתחת לקרקעית האגם סלעי חבורת עבדת מכוסים בסלעים בעלי מוליכות נמוכה, בעיקר חווארים וחרסיות מגיל ניאוגן עד פליסטוקן, בעובי משתנה ביו אפס למאות מטרים. בהתאם לחלוקה של החתך הסטרטיגרפי ליחידות הידרוגיאולוגיות במסגרת המודל הנוכחי, סלעים אלה כלולים ביחידה של אקוויפר חבורת עבדת.

### **4.2.2 מוצאים**

#### **4.2.2.1 מעיינות**

כאמור לעיל, מעיינות טבחה מנקזים גם מים שמקורם במילוי חוזר לאקוויפר חבורת עבדת באזור המורדות המזרחיים של הר צפת עד מערב רמת כורזים. כמות המים המגיעה למעיינות אלה באקוויפר חבורת עבדת אינה ניתנת למדידה וניתן להעריכה רק מתוך הערכת המילוי החוזר באזור זה (פרק 5), לאחר גריעת שפיעת המעיינות נון, עמוד וכנר (להלן), הנובעים ישירות מתוך אקוויפר חבורת עבדת. חיזוק מסוים לתרומה של אקוויפר חבורת עבדת למעיינות טבחה נמצא על ידי קליין (1995), בהסתמך על פרמטרים כימיים.

נתוני השפיעה השנתית הממוצעת במעיינות המנקזים את אקוויפר חבורת עבדת בלבד מפורטים בטבלה 3. מיקומם של המעיינות מופיע על גבי מפה באיור 3.

שם המעיין	מס' זיהוי	קואורדינטות	רום הנביעה	שפיעה שנתית
ארבל	31355	24622/74790	-140	0.60
נון	31335	25818/74972	-192	2.0
עמוד	31295	24730/75314	-100	0.40
כנר	31235	25075/75255	-200	0.65
כרי דשא*		25121/25280	בערך -210	3.5

### טבלה 3: מעיינות באקוויפר חבורת עבדת באגן כלנית

\* - לגבי הנביעות לאורך חוף "כרי דשא" (הקואורדינטות הן של נקודה מרכזית ברצועת נביעות שאורכה גדול מ- 100 מ'), ישנה הערכה כללית בלבד, מתוך שתי מדידות רגעיות שנעשו בחודשים נובמבר ודצמבר, 2008, כאשר מפלס הכנרת היה נמוך במיוחד (טל וחובריו, 2009).

#### 4.2.2.2 קידוחים והפקה

למרות ששני קידוחי המים הראשונים לאקוויפר חבורת עבדת נקדחו כבר בשנות הארבעים של המאה העשרים, הפקה בכמות משמעותית מאקוויפר זה באזור שממערב לכנרת החלה רק בשנות השישים משני קידוחים. בסך הכל נקדחו לאקוויפר זה שמונה קידוחים באזור שבין עמידר בצפון למגדל בדרום. ההפקה הלכה וגדלה עד שנות השמונים והגיעה בשיאה, בשנה ההידרולוגית 1981/82, לכ- 2 מלמ"ש. בשנים האחרונות שואבים רק מארבעה קידוחים וההפקה הצטמצמה לפחות מ- 0.8 מלמ"ש.

## 5. מילוי חוזר

הערכה ראשונית של המילוי החוזר הישיר מגשם בשטח האגן מתבססת על הערכה של כמות השפיעה בשנות השישים במעיינות מערב הכנרת, כולל מעיינות חבורת עבדת, בתוספת המעיינות הקטנים השעונים באגן כלנית. בדרך זו הערכנו את המילוי החוזר הכולל באגן ב- 73 מלמ"ש, בממוצע רב שנתי שהינו הערך של שווי המשקל.

יחוס המילוי החוזר לשטחי המחשופים של האקוויפרים השונים, נעשתה על ידי מכפלות של כמויות הגשם השנתיות הממוצעות על שטחי המילוי החוזר של כל האקוויפרים בערכים של מקדמי מילוי חוזר. לצורך זה חולק שטח מחשוף האקוויפרים לפוליגונים, אשר כל אחד מהם יוחס לאקוויפר מסוים, בהתאם למחשופים בו (איור 6). מקדמי המילוי החוזר לכל פוליגון נקבע בהתאם לתכונות ההידראוליות של הסלעים החשופים בו. הערכת מקדמי המילוי החוזר מתבססת על תחום ערכים מוכר מתוך עבודות קודמות. למחשופים בתחום הר מירון (פוליגון מס 1 באיור 6), למרות שחלקם הם מחשופים של פרט ראש הנקרה, יוחס מילוי חוזר כמו לאקוויפר התחתון של חבורת יהודה מהשיקול שהנגר העילי המוגבר מהאזורים הגבוהים בהם חשוף פרט ראש הנקרה מגיע מידת למחשופים של האקוויפר התחתון בגיאיות.

המסלע של חבורת עבדת במחשופים באזור הארבל ובמורדות המזרחיים של הר צפת הוא גיר קשה וקרסטי ולכן ההערכה הראשונית היתה שהמילוי החוזר במחשופיו דומה לזה של חבורת יהודה (אם

כי נמוך כבשליש), באותן כמויות גשם. המילוי החוזר במחשופי הבזלת נמוך יותר ומוערך, לפי נתונים מהספרות, בכמצית עד שליש מהמילוי החוזר בסלעים הקרבונטים. בטבלה 4 מרוכזים ערכי מקדמי המילוי החוזר הראשוניים בהם נעשה שימוש בשלב הראשון של הרצות הכיול של המודל הממוחשב.

מקדם מילוי חוזר	היחידה
0.11	חבורת יהודה מכוסה בבזלת הכיסוי (ברמת כורזים)
0.26	חבורת עבדת
0.41	חבורת יהודה- תת אקוויפר עליון (סחנין+בינה)
0.26	חבורת יהודה- תת אקוויפר עליון (סחנין+בינה) מכוסה בקרקע
0.19	תצורת דיר חנה, פרט ראש הנקרה
0.1	תצורת דיר חנה, פרט ראש הנקרה מכוסה בקרקע
0.39	חבורת יהודה- תת אקוויפר תחתון (כמון+פרט כרכרה)
0.2	חבורת יהודה- תת אקוויפר תחתון (כמון+פרט כרכרה) מכוסה בקרקע

**טבלה 4:** מקדמי מילוי חוזר ליחידות ההידרוגיאולוגיות

מקדמי המילוי החוזר לשטחי המחשופים של יחידות הסלע השונות, המוצגות באיור 6, אשר שימשו בשלב הרצות הכיול של המודל במצב הבלתי מופר, תוקנו בהמשך כדי להתאים את סך כל המילוי החוזר באגן לסה"כ היציאות במעיינות, שנלקח על ידינו כ- 73 מלמ"ש (ראה פסקה 4.1.2, לעיל). חישוב המילוי החוזר בכל פוליון לקח בחשבון את הגשם הממוצע על כל שטח מחשופים התחום בפוליון באיור 6.

נוסף על המילוי החוזר הישיר לאקוויפר חבורת יהודה קיים, ככל הנראה, מילוי חוזר לא ישיר לאקוויפר ממשקעים היורדים על גבי מחשופים של סלעי חבורות הר הצופים, עבדת ובזלת הכיסוי (ראה הרחבה לגבי נושא זה בהמשך). תרומת המים מיחידות סלע אלה לאקוויפר חבורת יהודה יכולה להיות בחלקה מנגר עילי על משטחי המחשופים של יחידות אלה לעבר ערוצים העוברים דרך מחשופי חבורת יהודה וחלקה במעבר באזורי העתקה. גודלו של מילוי חוזר זה מוערך בכ- 6 מלמ"ק לשנה בהתבסס על גודל השטחים להם שיפוע לעבר מחשופי חבורת יהודה ועל כמויות המשקעים והוא הוסף לאותם שטחים אליהם הוא מגיע (פוליונים מספר 5, 7, 8, 9, 10) באמצעות הגדלת מקדם המילוי החוזר שיוחס להם בטבלה 4. גורם נוסף של מילוי חוזר, שקשה להעריך את כמותו, הוא מאיבודים לאורך התעלה של המוביל הארצי (דיון בדו"ח של קסלר, 2010). ההערכה הכללית היא כי גורם זה תורם כ- 6 מלמ"ק לשנה בשנות ההרצה של המודל התלת ממדי.

## **6. מאזן המים**

בהעדר אפשרות לחשב ישירות את רכיבי המילוי החוזר, מקובל בעבודות הידרולוגיות לבסס את מאזן מי התהום של אגן על רכיבי המוצאים. רכיבי כניסות המים, בהם המילוי החוזר, מחושבים מתוך המאזן כך שיאזנו את יציאות המים מהאגן, במצב הבלתי מופר. בעיה מרכזית כאן היא, כאמור לעיל, שבתוך ההערכה של היציאות קיים הרכיב הבלתי זניח של הנביעות הבלתי מנוטרות. את ירידת שפיעת מעיינות מערב הכנרת מכמות של 67.6 מלמ"ש, במצב הבלתי מופר לכמות ממוצעת של 45 - 48 מלמ"ש בשנים האחרונות (ראה פסקה 4.1.2 לעיל), יש ליחס בעיקר להפקה בחבורת יהודה (4.1.3, לעיל). חלק מההפקה עדיין לא מתבטא בירידת השפיעה, כיוון שהוא נעשה על חשבון ריקון אוגר באקוויפר, דבר המתבטא בירידת מפלסים.

גורם נוסף שיש להתייחס אליו הוא התרומה של התמלחות מהעומק. בעבודה הנוכחית נבדקו אפשרויות תרומת תמלחות בכמות של 2 - 8 מלמ"ק לשנה (פירוט נוסף מובא בפרקים 8 ו-9).

## **7. פיזור התכונות ההידראוליות במרחב**

### **7.1 אנאיזוטרופיות**

באופן כללי, עבור מרבית שטח המודל, המוליכות ההידראולית בכיוון האנכי נלקחה כקטנה בסדר גודל מהמוליכות האופקית בהתחשב בקיום שכבות חוואריות שבהן המוליכות קטנה יותר. שכבות כאלה אינן משפיעות באופן משמעותי על המוליכות האופקית כיוון שחלקן היחסי בחתך קטן אבל הן משפיעות יותר על תנועת המים בניצב לשיכוב. בשכבות של תצורת דיר חנא, בגלל ריבוי שכבות החוואריות, נלקחה אנאיזוטרופיות גדולה יותר (של שני סדרי גודל).

### **7.2 התכונות ההידראוליות של ההעתקים**

עבור הצבת המודל הממוחשב (פרק ב) הונח כי באזורי ההעתקים הראשיים המוליכות ההידראולית נמוכה בניצב למישור ההעתק בגלל מציאות חומר שחק דק ובגלל אי רציפות של שכבות מוליכות. המוליכות בכיוון האנכי של מישור ההעתק (ההעתקים נלקחו כאנכיים) הינה גבוהה יותר במספר סדרי גודל מהאופקית ובדרך כלל גם גבוהה יחסית לסלעי הסביבה. עדויות למוליכות אנכית גבוהה באזורי העתקים נמצאו במקומות רבים בעולם. היא מתבטאת בעיקר בקיום מעיינות העתק שבהם עולים מים מהעומק בגלל המוליכות הגבוהה. בעבודה הנוכחית, ההנחה לגבי מוליכות הידראולית ייחודית באזור העתק מתייחסת רק לגבי מספר העתקים עיקריים שזריקתם גדולה ורובם נמצאים בקרבת הכנרת.

### **7.3 שינויים בתכונות ההידראוליות בקרבת המעינות הראשיים**

המעיינות הראשיים נמצאים על אזורי העתקים ראשיים של מערב הכנרת ולכן המוליכות ההידראולית האנכית בקרבתם גבוהה. הונח שבתחומים הסמוכים ביותר למעינות הראשיים, המוליכות ההידראולית האופקית גבוהה במיוחד, באופן משמעותי יותר מזו של שאר אזורי ההעתק, בגלל הקרבה של סלעי האקוויפר (חבורת יהודה) לפני הקרקע (ולכן הסדקים פתוחים) ובגלל הזרימה המהירה שגורמת להאצת ההמסה ויצירת מערכות קרסט מפותחות עם מוליכות הידראולית גבוהה במיוחד.

#### 7.4 תלות התכונות ההידראוליות במבנים סטרוקטורליים

הונח כי המוליכות ההידראולית נמוכה יותר באזורים שבהם נטיית השכבות חריפה וכן באזורים של מבנים סינקליניים. הקשר בין מונוקלינות לבין גרדיאנטים הידראוליים חריפים נמצא במקומות רבים בארץ כמו לדוגמא באקוויפר יהודה באזור שער הגיא. לגבי מקומות אלו הוסבר כי הקימוט שיצר את הנטיות החריפות גרם גם ללחץ על הסלעים שמקטינה את המוליכות ההידראולית (Yecheili et al., 2007). באופן כללי, הונח כי המוליכות באזורים סינקליניים נמוכה מאשר המוליכות באזורים אנטיקליניים. כך לדוגמא, באזור שממזרח לקידוח כחל קיים אזור עם מוליכות הידראולית נמוכה יותר שגורם לגרדיאנט הידראולי חריף. הסינקלינה עצמה אינה נראית באופן ברור במפות הסטרוקטורליות (אבלסון וחובריו, 2009) בהעדר נתונים מקידוחים באזור הצפוני. אכן, באזור זה הקרוב לחוף המערבי של הכנרת נמצאו ערכים נמוכים יחסית של מוליכות הידראולית (ברגלסון, 1997). מבנה נוסף שמשפיע על המוליכות ההידראולית הוא זה שנמצא באזור של קידוחי גולני, בו קיים גרדיאנט הידראולי חריף (איור 5) היכול להיות מוסבר בנטיות חריפות במבנה הגיאולוגי שמורידות את המוליכות ההידראולית. לרצועה ברוחב של 2 - 3 ק"מ ממערב למונוקלינה זו יוחס ערך של מוליכות הידראולית בתת האקוויפר התחתון של חבורת יהודה הגבוהה בסדר גודל מזו שבמרבית שטח האגן (ראה פירוט בפרק ב'). ההנחה הייתה שכתוצאה מקיומו של "מחסום" הידראולי לאורך המונוקלינה, קיימת הסטה של כיוון הזרימה מכיוון מערב - מזרח לזרימה לצפון-צפון-מזרח, לאורך המונוקלינה. כתוצאה מריכוז הזרימה לרצועה צרה מונח שהיתה בו התפתחות קרסט מוגברת שהגדילה את המוליכות ההידראולית וזו גרמה לריכוז נוסף של זרימת מי התהום לאזור זה, תופעה המגבירה את עצמה עם הזמן. המוליכות ההידראולית מתאימה לנתוני המפלסים באזור זה.

אזור נוסף שיוחסה לו מוליכות הידראולית נמוכה מזו המאפיינת את האקוויפר במרבית שטח האגן הוא זה שמצפון לעיר נצרת, אשר במערבו נמצא קידוח מק ריינה, שהוא קידוח יחיד שחדר את חבורת יהודה בכל האזור (איור 3). לפי נתוני הקידוח המוליכות ההידראולית בתחום זה של האגן, בחלקו התחתון של אקוויפר חבורת יהודה, שרק הוא טבול, היא נמוכה מאוד. עובדה המתאימה לקיומו של מפלס גבוה יחסית לסביבתו בקידוח זה (איור 5). אזורים נוספים שבהם נלקחה מוליכות הידראולית שונה מהערך הכללי מובאים בנספח ח1.

## 8. מיקום התמלחות, העומד המניע שלהן ומנגנון עלייתן

הנושאים של מיקום התמלחות, העומד המניע שלהן ומנגנון עלייתן מהעומק מורכבים ביותר וחסרים עדיין נתונים בסיסיים כדי לקבוע עמדה ברורה לגביהם. אולם, בשלב של ההרצות של המצב הלא תמידי (transient), יש הכרח בהגדרה של מיקום התמלחות ולא ניתן לבצע הרצות ללא קביעת התנאים ההידרולוגיים הבסיסיים לגבי התמלחות. לכן, בדיון זה נסקור את האפשרויות השונות לגבי התמלחות שנלקחו בחשבון בעבודה הנוכחית. הנושא של מיקום התמלחות ומנגנון עלייתן נבדק בעבודות רבות (למשל מירו וסימון, 1988; רימר 2008; בייך, 1999; Gvirtzman et al., 2003; Abbo et al., 1999; Rimmer et al., 1997), אך עדיין קיימות שאלות פתוחות בנושא זה.

ההנחה כאן, בעת הצבת המודל, היתה שקיימות באזור לפחות שתי תמלחות שונות. תמלחת אחת במליחות גבוהה, הקרובה לזו של ים המלח (100-220 גר/ליטר כלורידים), שנמצאת בעומק רב (כנראה בשכבות מגיל יורא) ונמצאה בקידוחים עמוקים מחוץ לאזור העבודה (פליישר, 1969). עדויות עקיפות לתמלחת זו נמצאו בסקרים גיאופיסיים (בשיטה גיאושמלית TDEM) בחלק הדרומי של הכנרת (Hurwitz et al., 1999). מקור תמלחת מרוכזת זו הוא כנראה בים הניאוגני שהציף חלקים גדולים של בקע ים המלח. המים עברו התאדות עד שמליחותם עברה את סף השקעת הליט. התמלחת השניה הקיימת במערכת ההידרולוגית של מערב הכנרת, קרויה "תמלחת הכנרת" ומליחותה קרובה לזו של מי ים רגילים (כ- 18000 גר/ליטר כלורידים (Bergelson et al, 1999); בייך, 1999). תמלחת זו, שנמצאה במספר קידוחים בשכבות של חבורת כורנוב ובחלק התחתון של חבורת יהודה, נובעת ללא מיהול במעיינות של חמי טבריה ולאחר מיהול של כ- 90 אחוז במעיינות של טבחה ופוליה. התמלחת נמצאת במגע עם החלק הפעיל של האקוויפרים של מערב הכנרת.

יש לציין שההבחנה בין שתי התמלחות אינה בהכרח חדה כפי שמצוין לעיל. ההנחה שרק מי תמלחת הכנרת מעורבים במערכת הפעילה ואין תרומה כלל של התמלחות העמוקות יותר ומלוחות יותר, מתבססת בעיקרה על ההרכב הכימי של המים המלוחים במעיינות ובקידוחים. כלומר, לא ניתן להגיע להרכב הכימי והאיזוטופי של המעיינות המלוחים על ידי ערבוב של מים מתוקים עם תמלחת מהסוג של ים המלח (בייך, 1999; Bergelson et al, 1999). אולם, יתכן כי תמלחת הכנרת היתה מלוחה יותר (בכ- 50%), דבר שקשה יהיה לפסול רק לפי ההרכב הכימי. נוסף על כך, יתכן מצב של ערבוב של שלושה מקורות ביחסי ערבוב שונים שבו קיימת תרומה מסוימת גם של התמלחת המרוכזת. מנגנון נוסף שהוצע הוא של תרומה עשווית של מי ים תיכון שמגיעה בעומק רב עד לאזור הכנרת ועולה שם באזור ההעתקים (Kafri and Arad, 1978). גם למנגנון זה יש מספר קשיים בהקשר של ההרכב הכימי והאיזוטופי. אולם, יתכן כי מנגנון כזה יכול לתרום במשהו לדחיפה כלפי מעלה של התמלחות הקיימות בעומק, נושא שעדיין לא ברור.

לגבי המנגנון של עליית התמלחות והערבוב שלהן עם מי התהום המתוקים באקוויפרים השונים, השאלה העיקרית היא האם יש לתמלחות לחץ עצמי או שמנגנון עלייתן תלוי רק במחזור הפעיל של הזרימה באקוויפר התחתון של חבורת יהודה, כפי שנטען על ידי חלק מהחוקרים בעבר (למשל Goldschmidt et al., 1967). בעבודה הנוכחית אין ניסיון לפתור את הבעיה בכללותה, אך נעשה ניסיון למצוא דרך סבירה להתמודד עם הנושא ולערוך סימולציות עבור המצב הקיים ותחזית לשנים הקרובות.

בגלל חוסר היכולת להכריע באופן ברור בין המנגנונים, ובגלל הטמפרטורה הגבוהה של מעיינות טבריה ושל המים בקידוחים העמוקים (כפי שמתואר בפרק הבא), הונחו ההנחות הבאות עבור הסימולציות של התנאים ההידרוגיאולגיים של התמלחות באזור המעיינות:

1) בשלב ראשון (בתקופת הניאוגן, לאחר חדירת הים, ניתוקו והאיזוי המוגבר) הונח כי היו באזור תמלחות מרוכזות מהסוג של ים המלח, שנמצאות כיום בעיקר בשכבות שמתחת לחבורת כורנוב (כלומר בשכבות מגיל היורא). ההשפעה של תמלחות אלה אינה ברורה ולא הוכנסה להרצות של המודל התלת מימדי.

2) בשלב הבא, שהיה קיים בזמן שבו אגם הלשון הגיע עד לאזור הכנרת, התקיים באזור אגם מלוח שמליחותו היתה דומה למליחות של תמלחות הכנרת, כפי שנמצאו לדוגמא במעיינות טבריה. האגם הזה התקיים באזור לפני כ- 20,000 שנה והגיע לגובה טופוגרפי של כ- 170 מתחת למפלס הים הכללי (כלומר כ- 40 מטר מעל מפלס הכנרת הנוכחי). אין מספיק נתונים כדי לקבוע בבירור כמה זמן היה אגם מלוח באזור זה ומה היה בתקופה שלאחר מכן.

3) בשלב הנוכחי, שכאמור לא ברור מתי בדיוק הוא התחיל, קיים באזור אגם מתוק שבו המפלס הוא 210 מטר מתחת לפני הים.

4) נקודה נוספת, שחייבים לתת את הדעת לגביה, היא לגבי תרומה נוספת עשווית של תמלחות מהעומק. לפי חישוב של מאזני מלח, במקרה שהמערכת ההידרוגיאולוגית נמצאת בשווי משקל ואינה נשטפת כיום, הרי שכמות המלח שיוצאת דרך המעיינות מחייבת כניסה של כ- 8 מלמ"ק תמלחת בריכוזי מלחים של תמלחת הכנרת. ברור כי אם חלק ממי התמלחת הזו הינם בריכוזים גבוהים יותר, הרי נדרשת כמות תמלחת קטנה יותר. השאלה העיקרית כאן היא האם המערכת נמצאת בשווי משקל כיום ואין שטיפה של האקוויפרים מאז ירידת המפלסים והשינוי במליחות של האגם. מכיוון שידוע רק כי לא היה שינוי במליחות המעיינות בעשרות השנים האחרונות, אבל אין דרך לקבוע האם היה שינוי כזה בטווח של מאות ואלפי שנים, הרי אין התייחסות בעבודה למערכת ההידרוגיאולוגית כאל מערכת בשווי משקל. יתכן כי המערכת נמצאת בתהליך של שטיפה איטית מאז שהיה באזור גוף מים מלוח. בכל מקרה, כאשר יורץ המודל למשך זמן של עשרות שנים בלבד לא צפוי שינוי משמעותי במליחות המעיינות. אולם, לא ברור מה יהיה המצב בטווח של מאות שנים קדימה.

5) בהקשר לכתוב לעיל, וכן בהקשר לכתוב למטה בעניין הטמפרטורה של התמלחת, הונח כאן כי ישנה תרומה מסוימת של תמלחות מהסוג של תמלחת הכנרת מהשכבות התחתונות של המודל, כלומר מחבורת כורנוב. יתכן כי תרומה זו מגיעה מעומקים גדולים יותר, משכבות היורא שאינן חלק מהגדרת המודל הנוכחי ולכן תרומתן יכולה להיות רק כגבול תורם בחלק התחתון. ההנחה בעבודה הנוכחית היא כי התמלחות הללו נמצאות בעיקר באזור שקרוב לכנרת ועולות למעלה דרך ההעתקים העיקריים. בגלל חוסר הידע לגבי כמות התמלחת שיכולה להגיע מלמטה, נלקחו בחשבון מספר אפשרויות לגבי כמות התמלחת הנכנסת למערכת (מ-2 ועד 8 מלמ"ק לשנה).

חשוב לציין כי יתכן שקיימים גם מקורות נוספים של מים מלוחים או מליחים בתת הקרקע שאינם קשורים בהכרח באופן פיזי לאלו שנמצאים בקרבת הכנרת. רמזים לקיום מים מלוחים אלו נמצאו במספר קידוחים הרחוקים מאוד מהכנרת כדוגמת שימרון 6 וכפר קנה 1. לאחרונה נמצאו מים

מליחים גם ארבל 1 שנמצא במרחק כ- 3 ק"מ מהכנרת ולא ברור הקשר של מים מליחים אלו לתמלחת הכנרת. מקור המים הללו יכול להיות ימי, יתכן אף מתקופת הניאוגן שבה הים הציף חלקים נרחבים מאזור העבודה.

## 9. טמפרטורת המים (פיזור הטמפרטורה עם העומק)

גם הנושא של פיזור הטמפרטורה במי תהום בתת הקרקע של אזור כלנית מורכב וחסרים נתונים בסיסיים לגביו .

באופן כללי, ההנחה היא כי הטמפרטורה עולה עם העומק בהתאם לגרדיאנט הגיאותרמי. אולם, בחלק מהמקומות שבהם נמדדו טמפרטורות במי תהום בקידוחים נמצא כי הן גבוהות מהצפוי לעומקם, לפי גרדיאנט הטמפרטורות הרגיל. הגרדיאנט הגיאותרמי הרגיל באזור זה של הבקע הוא כ- 2.5 מעלות למאה מטר, כלומר בעומק של 1000 מטר צפוי שהטמפרטורה תהיה גבוהה מזו שבפני השטח ב- 25 מעלות. מכיון שהטמפרטורה בפני השטח היא כ- 22 מעלות, הרי בעומק של 1000 מטר היא אמורה להיות פחות מ- 50 מעלות. בפועל נמצאו טמפרטורות גבוהות יותר במספר קידוחים שהגיעו לחלק התחתון של חבורת יהודה (כנרת 8 באזור טבחה – 52 מעלות וכנרת 10ב', בפוליה – 54 מעלות). בנוסף, הטמפרטורה של מי תהום בקידוחי ירדן, שחדרו לחולות של חבורת כורנוב, היתה דומה לזו בחבורת יהודה. כלומר, יש כאן עדות ברורה כי לפחות חלק מהתמלחות עולות במהירות מעומק רב יותר מהעומק של סלעי חבורת יהודה. גם הטמפרטורה הגבוהה יחסית של מעיינות חמי טבריה (כ- 60 מעלות) מלמדת על עלייה מעומק רב יחסית (כ- 1500 מטר). חשוב לציין כי בכל מקרה העומק הזה הוא עומק מינימלי מכיוון שהתמלחות יכולות לאבד חלק מהחום בזמן עליתן, בהתאם לקצב עלייתן. כלומר יש כאן עדות שהתמלחות עולות מהסלעים של חבורת כורנוב ויתכן אף כי מסלעים בעומק רב יותר. כל הכתוב לעיל מתבסס על גרדיאנט גיאותרמי כפי שידוע מנתונים רבים בבקע. במקרה שקיים באזור זה גרדיאנט גיאותרמי חריף יותר, הרי מערכת השיקולים תצטרך להשתנות.

לצורך הפשטות של הסימולציות במודל התלת מימדי אין התייחסות רגילה בעבודה הנוכחית להשפעה של הטמפרטורות על הצפיפות. השפעה זו הוכנסה על ידי קיזוז של השפעת המליחות של התמלחות על הצפיפות. כך לדוגמא תמלחות שהמליחות שלהן כ- 18000 מג/ל כלורידים (כ- 35 גר/ל מליחות כללית), והצפיפות שלהן אמורה להיות קרוב לזו של מי ים רגילים (1.025), נלקחה כ- 1.015 בגלל גורם הטמפרטורה הגבוהה של התמלחות .

ניתן לעשות קיזוז כזה בעיקר בגלל הקורלציה הטובה בין מליחות לטמפרטורה במי תהום ומעיינות באזור הכנרת (השתנות הצפיפות עם העומק תלויה בעיקר בהשתנות המליחות). בכל מקרה, הנתונים של הטמפרטורות בקידוחים ובמעיינות מהווים אילוץ שלפיו חלק משמעותי מהתמלחות עולה מעומק רב יותר מאשר השכבות של חבורת יהודה.

## ב. סימולציות הידרולוגיות: כיול המודל ההתחלתי ושלב השטיפה

### 1. מבנה המודל

מודל אגן פוליה - טבחה פותח באמצעות קוד של FEFLOW (Diersch, 2009) שהינו מודל של אלמנטים סופיים לסימולציות של מערכות זרימה והסעה של מי תהום. מודל האקוויפרים בנוי משבע יחידות (שכבות) הידרוגיאולוגיות בהתאם ליחידות ההידרוגיאולוגיות המפורטות בטבלה למטה (טבלה 5) כפי שתוארו במודל הקונספטואלי.

Model Layer	Hydrogeological Unit Name	Type	Layer Top	Layer Bottom
1	Avedat	Aquifer	DTM	Base Taqiya-Timrat
2	Mt. Scopus	Aquiclude	Base Taqiya or Timrat	Top Bina
3	Upper Judea	Aquifer	Top Bina	Base Sakhnin
4	Deir Hanna	Aquitard	Base Sakhnin	Top Karkara
5	Lower Judea	Aquifer	Top Karkara	Base Kamon
6	Hydra Rama	Aquiclude	Base Kamon	Base Hydra-Rama
7	Kurnub	Aquifer	Base Hydra-Rama	250 m below base Hydra Rama

**טבלה 5:** היחידות ההידרוגיאולוגיות של המודל

רשת ה-DTM (Digital Terrain Model) נלקחה מעבודתו של הול (Hall, 2008), בהפרש גבהים של 25 מטר.

הגבהים של בסיס וגג שכבות המודל נבנו בשלב ראשון מתוך מפה סטרוקטורלית שהוכנה במיוחד לפרויקט הנוכחי (אבלסון וחובריו, 2009) ברשת של 50X50 מטר. אולם, רשת התאים העדינה הזו יצרה שיפועים חדים מאוד, בעיקר באזורי השברים, וגרמה לבעיות נומריות במודל הזרימה וההסעה. לכן, הוחלט ל"החליק" את הטופוגרפיה של הנתונים הסטרוקטורליים על ידי שימוש ברשת נתונים פחות צפופה של 2000X2000 מטר. דוגמה למפה שהתקבלה לאחר החלקה זו הוצגה באיור 4, למעלה.

כפי שמוסבר בדוח של אבלסון וחובריו, (2009) ובפרק של המודל הקונספטואלי, עובי השכבות נקבע לפי הידע הגיאולוגי שהתקבל מנתוני הקידוחים וממפת המחשופים. השכבה התחתונה, של אקוויפר כורנוב, נלקחה בעובי אחיד של 250 מטר מתחת לשכבה של הידרה-רמה בכל אזור המודל בהעדף נתונים אחרים.

גבולות המודל וההעתקים העיקריים מוצגים באיור 7. כל הגבולות הצדדיים (צפון, דרום, מזרח ומערב) נלקחו כגבולות אטומים. הגבול העליון נלקח כגבול תורם לפי כמות ההזנה החוזרת שחושבה לפי הגשם ומקדם מילוי חוזר. הגבול התחתון נלקח כגבול אטום. מיקום ההעתקים במודל הוגדר על ידי פוליגונים צרים ברוחב של כ- 200 מטר.

כל אחת מחמש השכבות העליונות של המודל חולקה לשלוש תת שכבות כדי לאפשר רזולוציה אנכית טובה יותר עבור הסעת מומסים. השכבות התחתונות (הידרה-רמה וכורנוב) לא חולקו לתת שכבות. לכן, ברב ההרצות המודל כלל 17 שכבות. רק בהרצה אחת חולקה שכבת הידרה-רמה לחמש שכבות.

הרשת (mesh) של מודל האלמנטים הסופיים בנויה מאלמנטים משולשים, כפי שנראה באיור 7. גודל האלמנטים משתנה בין מקסימום של כ- 500 מטר למינימום של כ- 50 מטר באזורים של ההעתקים. חלוקה לאלמנטים קטנים, בגודל של כ- 50 מטר, נעשתה גם באזורים בקרבת המעיינות. החלוקה זהה בכל אחת משכבות המודל. סך הכל נעשה שימוש ב- 250,000 אלמנטים בכל 17 שכבות המודל.

המודל של רום השכבות נבנה על ידי אינטרפולציה לינארית של הרשת של 2X2 קילומטר של הנקודות הסטרוקטורליות לתוך התאים של האלמנטים הסופיים. אזורי המחשופים של המודל יוצרו במקומות שבהם גג של שכבה מסוימת חותך את שכבת ה-DTM. כדי לשמור על המשכיות במודל, שכבות המודל העליונות קיבלו ערך של עובי דמיוני (פנטום) של 0.1 מטר.

בגלל גודל התאים, וכדי להימנע מבעיות נומריות, נאלצנו להשתמש בערכי דיספרסיביות גבוהים יחסית, שנקבעו באופן אוטומטי על ידי המודל. במספר מקרים נבדקו גם מספר הרצות עם ערכי דיספרסיביות נמוכים יותר (כ- 20 ו- 2 מטר, טבלה 6), שמראים וריאביליות במליחות המעיינות הדומה יותר לזו המדודה (דיון בהמשך).

Parameter	Value
Hydraulic Conduct. (K)	See Figure 8
Recharge for steady-state calibration	See Figure 6; table 7
Recharge for transient calibration	from Kesler (2010), with adjustments for better fit
Specific yield (Sy)	3% everywhere
Confined storage coefficient	$1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$
Longitudinal Dispersivity*	20 m
Transverse Dispersivity*	2 m

**טבלה 6.** הפרמטרים ההידראוליים ששימשו במודל התלת מימדי

\* - ערכי דיספרסיביות אלו נקבעו רק בחלק קטן מההרצות. ברב ההרצות נקבע ערך גבוה יותר באופן אוטומטי על ידי המודל כדי למנוע בעיות נומריות

## 2. תנאי הגבול לכיול המודל בשלב השטיפה

לכיול המודל בקרוב ראשון נעשה שימוש בהרצת המודל לתקופה ממושכת של 10,000 שנה, המייצגת את תקופת שטיפת האקוויפרים ממי התמלחת מאז נסיגת ימת הלשון ויצירת אגם מים מתוקים באזור הכנרת (ראה על כך בפרק א' 8 שלב 2). מצב זה מייצג את האקוויפר בתנאים הטבעיים לפני התחלת השאיבות. בשלב זה, כל הזרימה לאקוויפר הינה תוצאה של מילוי חוזר מגשם וכל היציאות הינן דרך המעיינות. כאמור, כל הגבולות החיצוניים של המודל הוגדרו כגבולות אוטומים.

### 2.1 מילוי חוזר

כמויות ההזנה (המילוי החוזר) של האקוויפרים הוערכו לכל אחד מאזורי המחשופים של השכבות האקוויפריות השונות (חבורת עבדת, חבורת יהודה עליון, דיר חנא, חבורת יהודה תחתון). הפוליגונים שמייצגים את כל אחד מאזורי ההזנה מוצגים באיור 6. ערכי ההזנה במצב שווי משקל חושבו לפי הנוסחה הבאה:

$$C * P = R$$

כאשר R - כמות ההזנה השנתית (במטר לשנה), C הוא מקדם ההזנה (החלק של הגשם שתורם להזנה) ו-P - כמות הגשם השנתית.

כמות הגשם השנתית נלקחה בשלב ראשון מתוך מפת קונטורים של גשם ממוצע בשלושים השנים של 1960-1990 (לפי נתונים של השירות המטאורולוגי). מקדמי החידור המחושבים באזורים השונים (Recharge factor בטבלה 7), הוערכו בתחילה על פי מקדמי החידרות המקובלים בספרות של התצורות השונות ולאחר מכן שונו כדי להתאים את כמות המילוי החוזר הכולל להערכת השפיעה הכללית במעיינות בקרבת הכנרת בתקופה שקדמה להפקה באגן (כמות של 73 מליון קוב לשנה). בהרצות בשלבים מאוחרים יותר נלקחו נתוני המילוי החוזר לכל פוליגון מתוצאות הכיול של מודל התאים בעבודתו של קסלר (2010), כדי לנסות ליצור התאמה בין שני המודלים שהורצו

במקביל. גם ערכים אלו שונו כדי ליצור התאמה טובה יותר לנתוני ספיקות המעיינות והמפלסים של מי תהום.

Polygon No.	Aquifer	Area (km2)	Avg rain (mm)	Rech factor	Recharge Rate (m/yr)	Recharge Volume (mcm/yr)
1	Kamon	56.2	750	0.39	0.2925	16.44
2	Deir Hanna	16.7	600	0.19	0.114	1.90
3	Kamon	3.6	600	0.39	0.234	0.84
4	Deir Hanna	16.9	600	0.19	0.114	1.93
5	Deir Hanna	11.2	600	0.19	0.114	1.28
6	Deir Hanna	11.8	570	0.19	0.1083	1.28
7	Bina	54	650	0.41	0.2665	14.39
8	Bina	67.4	550	0.41	0.2255	15.20
9	Bina	17.4	600	0.41	0.246	4.28
10	Bina (covered)	15.1	570	0.26	0.1482	2.24
11	Avedat Group	80.9	550	0.26	0.143	11.57
12	Bina (East)	32.6	500	0.11	0.055	1.79
<b>Total</b>						73.14

**טבלה 7:** המילוי החוזר בשטחי המחשופים באגן ששימשו בהרצות המודל בשלב השטיפה

מאזן הזרימה מסתמך על הכמויות השופעות במעיינות כפי שמצוין בטבלאות 8 ו-9. כלומר, הערכת החידור נקבעה לפי השיקולים הבאים:

1. כמות החידור שווה לכמות המים שיוצאים במעיינות במצב הבלתי מופר (ללא הפקה).
2. השפיעות של המעיינות במצב זה הוערכו לפי מספר דו"חות שנתנו הערכות לגבי השפיעות בשנות הששים ומסוכמות בפרק א'.
3. מקדם החידור נקבע לפי הפרמטרים ההידראולים של כל שכבה.
4. הערכים הספציפיים, המופיעים בטבלה 7, חושבו כדי לקבל התאמה מיטבית עבור ערכי השפיעות המדודים.

## 2.2. שפיעת המעיינות

השפיעות שנעשה בהם שימוש במודל לצורך הכיול מופיעות בטבלאות 8 ו-9. מיקום המעיינות מופיע באיור 1. מספר מעיינות שעונים במערכת מי תהום של חבורת יהודה לא הוכנסו לחשבון מתוך הערכה שהם קטנים ולא ישפיעו על הזרימה הכללית (ראה פירוט בפרק א' 4.1.2.1).

Spring	Flow (mcm/yr)
Tabkha	36.9
Fulia	30.6
Hamei Teveria	1.5
3 Avedat aquifer springs	4.1
<b>Total</b>	<b>73.1</b>

**טבלה 8 :** שפיעת מעיינות בשווי משקל במודל כלנית

Spring	Flow (mcm/yr)
Kanar	0.6
Nun	2.0
Karei Deshe	1.5
<b>Total</b>	<b>4.1</b>

**טבלה 9 :** שפיעת מעיינות חבורת עבדת (איאוקן) הכלולים בטבלה הקודמת

עבור המעיינות שנובעים ישירות לכנרת באזור פוליה, הערך של העומד באזור המעיין אינו קבוע אלא מתנוודד ביחד עם מפלס הכנרת. מיקומם של המעיינות הימיים (לדוגמא פוליה A) במודל הינו כ- 50 מטר מזרחה מהמיקום של המעיינות היבשתיים. כל המעיינות באזור פוליה נמצאים בתוך אזור ההעתק.

### 3. כיול המודל עד סוף שלב השטיפה

#### 3.1 כיול השלב הראשון של הזרימה, ללא הסעה

כיול המודל נעשה על ידי הצבת ערכים שונים של המוליכות ההידראולית האופקית והאנכית בשכבות המודל באזורים שונים (תוך התייחסות לאנאיזוטרופיות האנכית) והשוואת מפלסי מי תהום המחושבים למפלסים מדודים בקידוחים. בשלב הראשון נעשו הרצות של זרימה בלבד (ללא הסעת מלחים) ונבדקו המפלסים בקידוחים והשפיעות במעיינות. בשלב הבא הוכנסה גם ההסעה ונבדקו גם המליחיות של המעיינות. מיקום הקידוחים ששימשו להשוואה מופיע באיור 5 (מפת מפלסים לשנות ה-60).

הורצו יותר מ- 50 הרצות של המודל שכללו שינויים בערכי המוליכויות ההידראוליות באזורים השונים ואף שינויים בחלוקת שטח האגן לאזורים אלה תוך שמירה על כללי ההיגיון המיטבי של הבנת ההידרוגיאולוגיה של אזור העבודה.

סימולציות לבדיקה של התנאים ההתחלתיים של המודל נעשתה גם בעזרת תכנת PEST שהינה תכנת כיוול אוטומטית שניתנת לשימוש מתוך תכנת ה- Feflow (Doherty, 1995). מערכת ה- PEST מריצה את מודל ה- Feflow מספר רב של פעמים תוך התאמה של הפרמטרים הנתונים עם מטרות העבודה שהיא הקטנה למינימום של ההבדלים בין המפלסים המדודים והמחושבים בקידוחים ספציפיים. ערך אחיד ניתן לכל אחת משכבות המודל. בשלב זה, השפיעות במעיינות הוצבו על ידי ערך קבוע של זרימה בכל אחד מהמעיינות המיוצג על ידי הפקה בקידוח.

בסיום הרצות אלה התקבלו מפלסי מים מחושבים, ערכי אופטימיזציה של מוליכות ההידראולית ( $K_x$ ) וערכי האנאיזוטרופיות האנכיים שמתאימים להם. בערכים שהתקבלו היו הבדלים ניכרים בין הלחצים הפיזומטריים המחושבים והמדודים. כלומר, לא ניתן היה לקבל תוצאות טובות בעזרת הרצת המודל במערכת PEST.

מפה של חלוקת האגן לאזורים שווי מוליכות הידראולית מוצגת באיור 8, בו מוצגים ערכי המוליכויות שהוצבו באזורים אלה בסיום כיוול המודל. פרוט נוסף לגבי האזורים וערכי המוליכות בהם מובא בנספח ח.1. ככלל, פרט לאזורים לגביהם צוין אחרת, הוצבו ערכי מוליכות הידראולית אנכית ( $K_v$ ) בסדר גודל אחד קטן מהמוליכות האופקית ( $K_h$ ). באזור של סינקלינת כחל-ארבל (אזור צפוני) ושל פלכסורת גולני הוכנסו ערכים קטנים בסדר גודל מאשר ערכי הרקע בסביבתם. באזורי ההעתקים הוצב ערך גבוה בכיוון האנכי ( $K_z=100\text{m/day}$ ) ונמוך יותר בכיוונים האופקיים. הערכים האופקיים בקרבת הכנרת הם 10 מטר ליום בחבורת יהודה עליון ( $U_j$ ) ו-1 מטר ליום בחבורת יהודה תחתון ( $L_j$ ). בחבורת כורנוב, שהינה השכבה התחתונה של המודל, נלקח ערך אחיד ( $K_x=1\text{m/d}$ ; ) בחבורת הר הצופים ובהידרה-רמה הם של יחידות אקוויקלודיות בעלות ערך אחיד נמוך ( $K=3e-6\text{m/d}$ ), מלבד אזורי ההעתקים שבהם נלקחו ערכים גבוהים של מוליכות אנכית. כלומר, ההעתקים מאפשרים מעבר של מים ומסה גם דרך היחידות האקוויקלודיות.

מפת המפלסים המחושבים בסיום הכיוול של שלב זה מוצגת באיור 9 שבה מוצגים הקונטורים המחושבים של העומדים הפיזומטריים יחד עם מפלסי מים מדודים. בגלל מיעוט הנתונים בתחילת שנות השישים (זמן סיום השלב השטיפה והתחלת השלב הדינמי, במשטר הפקה), נעשה שימוש גם במפלסים שנמדדו מאוחר יותר, תוך תיקון מיטבי לשינוי המפלסים המוערך בהתאם לשנת המדידה. בשלב זה הוחלט שכיוול סביר הוא כאשר ההבדלים בין מפלסים מדודים ומחושבים אינו עולה על הפרש אנכי של 20 מטר.

שפיעת המעיינות במודל מוגדרת כתנאי גבול מסוג שלישי, שידוע גם כתנאי גבול בשם Cauchy כאשר הזרימה תלויה בעומד במקום המעיין. ניתן לתאר את המערכת הזו כדלקמן:

$$Q = C * (h-h_0),$$

כאשר

$Q =$  שפיעת המעיין במ"ק ליממה ( $\text{m}^3/\text{day}$ ) spring outflow

$C =$  מקדם המעיין במ"ר ליממה ( $\text{m}^2/\text{day}$ ) spring coefficient

$h =$  עומד פיזומטרי באזור המעיין (מטר) piezometric head at spring (m)

רום בסיס המעיין (מטר)  $h_0 = \text{elevation of base of spring (m)}$

במודל ההידרולוגי שבו השתמשנו (קוד פיפלו), מקדם המעיין אינו מוגדר באופן ספציפי אלא עד ידי שימוש בפרמטר המוגדר כך:

$$C = \tau * A, \text{ where}$$

כאשר

$\tau = \text{transfer coefficient (day-1)}$  (המעבר)

$A = \text{spring outflow area (m}^2\text{)}$  שטח שפיעת המעיין

הערכים של מקדם הטרנספר עבור המעינות לא ניתנים למדידה ישירה ויכולים להיות רק מוערכים תוך כיול המודל.

### 3.2. סימולציות לקבלת תנאי ההתחלה של פיזור המלחים בשכבות המודל

בשלב הראשון, לצורך קבלת השתרעות גופי המים במליחיות השונות עם אזור פן ביני בין גוף המים המלוח ממזרח (מתחת לאגם) לגוף המים המתוק (במרחק מהכנרת), בוצעו הרצות כאשר גוף המים של האגם במזרח היה בריכוז מלחים של תמלחת הכנרת למשך תקופה ארוכה. ההנחה כאן היתה שהיה מצב של אגם מלוח לאורך תקופה מספיק ארוכה שאפשרה הגעה בקירוב למצב שווי משקל בין אגם מלוח לגוף מי תהום מתוקים בקרבתו. בפועל, אין נתונים ברורים לאושש או להפריך השערה זו. המודל הורץ לתקופה של 100,000 שנה כדי לוודא שהגענו לפתרון של תנאי שווי משקל.

התפלגות הריכוז ההתחלתי של ריכוזי המלח, אשר יוצר בסוף שלב הרצת השווי משקל (100,000 שנה), הוצב כתנאי התחלה המייצגים את תנאי אגם הלשון באזור זה לפני 10,000 שנה. התהליך נעשה תוך שימוש בריכוז מלחים של 36,000 מ"ג TDS לליטר וצפיפות של 1.015. הצפיפות הזו, שהיא נמוכה מזו שניתן היה לצפות לפי ערכי המליחות בלבד (1.025 ~), לוקחת בחשבון גם את העובדה שהמים המלוחים הינם בעלי טמפרטורה גבוהה (60 מעלות צלסיוס) באזורים נרחבים של המודל ולכן צריך לפצות את ערכי הצפיפות בהתאם (טמפרטורה גבוהה מורידה את הצפיפות) והערך המפוצה הוא 1.015. רום מפלס האגם בתקופת סוף אגם הלשון נקבע כ-170 ונקבע כתנאי גבול של המערכת. לצורך הפשטה בשלב זה של ההרצות נלקחו כל שכבות המודל כהומוגניות עם מוליכות הידראולית של 10 מטר ליום בכל אזור המודל. כמות המילוי החוזר נלקחה באופן שמתואר קודם. ההתפלגות של ריכוזי המלחים (TDS) בחתך שעובר דרך מעיין פוליה מוצג באיור 10. הנתונים הסופיים של הרצה זו שימשו כנתוני התחלה עבור ההרצה הבאה שהתחילה בסוף תקופת אגם הלשון.

### 3.3. סימולציות לשלב השטיפה, מנסיגת אגם הלשון עד שנות הששים (כ-10,000 שנה)

סימולציות לא תמידיות (transient) של הסעת מסה בוצעו עבור התקופה מאז נסיגתו של אגם הלשון (לפני כ-10,000 שנה) ועד לשנות הששים, לפני תחילת ההפקה בקידוחים. הריכוזים שהתקבלו בסוף ההרצות נלקחו בתור ריכוזים של תנאי ההתחלה לסימולציות הבאות של תקופת

ההפקה באגן, שהחלה להיות משמעותית בתחילת שנות השישים. הערכים המכילים של המוליכות ההידראולית שהתקבלו בהרצות של המודל לדימוי הזרימה בלבד (פסקה 3.1) שימשו להרצות אלו.

במרבית הרצות המודל הוכנס קשר ההידראולי בין האקוויפר לבין אגם כנרת רק באזור מעיין פוליה - באמצעות יצירת קשר ההידראולי דרך השכבות הלא מוליכות שמתחת לקרקעית האגם, בתאים שבתוך הפוליגון המייצג את אזור ההעתק העובר שם. בוצעו גם מספר הרצות בהן היה קשר כזה גם באזור מעיינות ברבוטים (בתוך האגם, מדרום למעיינות טבחה). אולם, בגלל כמות המים הקטנה השופעת באזור זה, רב ההרצות נעשו ללא קשר זה, לצורך הפשטה.

תוצאות הכיול הראשוניות של שלב השטיפה מוצגות באיור 11 בתנאים שבהם אין מקור מליחות נוסף מהעומק, כסדרת זמן של ריכוזים במעיינות (טבחה ופוליה). התוצאות מראות שבתנאים אלה רב מסת המלח היתה נשטפת מתוך האקוויפרים בתוך 10,000 שנה והריכוזים היו נמוכים בהרבה מאלו המדודים.

בהסתמך על הסימולציות הללו, היה ברור כי צריך להיות מקור מליחות נוסף במערכת זו, שמגיע מהאקוויפרים העמוקים. כדי לייצג מסת מלח שנכנסת מהעומק (אקוויפר חבורת כורנוב), הוכנסו קידוחי הזרקה שבהם נוספת מסת מלח. קידוחי הזרקה אלו מוקמו בתחתית אקוויפר חבורת כורנוב לאורך העתקים כפי שמוצג באיור 12, בהנחה כי רב המים המלוחים שעולים עושים זאת דרך ההעתקים, בהם הוצבה מוליכות הידראולית אנכית גבוהה בהרבה מזו הקיימת בסביבתם.

קידוחי ההזרקה מחדירים כמות ספציפית של מים עם ריכוז מלחים קבוע בנקודות שבהם הם מוקמו. הריכוז הכללי (TDS) בקידוחים נקבע כ- 36,000 מג' לליטר. שטף מסת המלח הכוללת המגיעה מקידוחי ההזרקה ניתן לחישוב באופן הבא:

$$M = Q * C$$

כאשר

M is the injected mass salt flux in tons per year מסת המלח המוזרקת בטון לשנה

Q is the injected water flux in the wells ( $10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ ) מסת המים המוזרקת במיליון קוב לשנה

C is the mass concentration (mg/l) TDS ריכוז המלחים

אולם, יש לקחת בחשבון שהמסה הכללית המתקבלת בסימולציות יכולה להיות גבוהה יותר כיוון שהזרימה בתאי המודל (Q), במקומות שבהם ממוקמים קידוחי ההזרקה יכולה לכלול גם זרימה אופקית אל התא והמסה המחושבת היא תוצאת מכפלת הזרימה הכללית בתא ולא רק הזרימה של ההזרקה. מסיבה זו, מוקמו קידוחי ההזרקה בתחתית שכבת כורנוב, במקום שבו אין זרימה אופקית משמעותית, דבר שמוריד את הבעייתיות המתוארת לעיל.

כמות מסת המלח במי המעיינות (טבחה פוליה וחמי טבריה) חושבה מתוך נתוני השפיעה וריכוזי המלח של המעיינות והיא מגיעה לכ- 300,000 טון מלח לשנה. כדי לקבל כמות כזו של מלח ולשמור על המערכת בשווי משקל מבחינת כמות המלחים, צריך להוסיף כמות של 8 מלמ"ק עם ריכוז של 36,000 מג' לליטר. אולם לא ברור אם המערכת ההידרוגיאולוגית של מערב הכנרת אכן נמצאת

בשווי משקל כיום. קיימים נתונים רק מעשרות השנים האחרונות שמראים שונות גדולה אבל לא מראים מגמה ברורה בשינוי הרב שנתי. לכן, גם אם בסימולציות מתקבל שינוי מסוים לאורך השנים, אין בכך כדי להצביע על אי התאמה לנתונים המדודים.

כדי לדאוג שהמליחות של מעיינות חמי טבריה תהיה גבוהה כמו הנתונים, היה צורך לסגור את האזור על ידי שכבות עם מוליכות הידראולית נמוכה מכל הכיוונים וכל עומק השכבות. הדבר הזה יכול לייצג מערכת קרסטית שבה המוליכות גבוהה מאוד בקטע של המוליכים הקרסטיים (בעיקר מוליכות הידראולית אנכית המעלה את המים המלוחים אל המעיין למעלה) בעוד שבאזורים האחרים המוליכות יכולה להיות נמוכה מאוד. חשוב לציין כי בגלל כמות המים המעטה במעיין של חמי טבריה ובגלל חוסר הנתונים והקושי לשחזר את המצב במעיין זה, לא נעשה ניסיון לכייל בדיוק את התנאים במעיין זה אלא רק ברמה של סדר גודל.

בוצעו מספר סימולציות עם הזרקת תמלחת בכמות שבין אפס לשמונה מלמ"ק/שנה בריכוז TDS של 36,000 מג' לליטר. תוצאות ההרצות מוצגות באיורים 13 ו-14. בהרצה שבה הוזרקו 8 מלמ"ק/שנה, המליחות שהתקבלה לאחר 10,000 שנה היתה גבוהה באופן ניכר מזו המדודה (איור 13). לעומת זאת, בהרצה עם ההזרקה של 2 מלמ"ק/שנה, התקבלו בסימולציות ערכי מליחות במעיינות הדומים לאלו המדודים (איור 14).

באזור חמי טבריה, שבו המליחות גבוהה במיוחד, נעשה גם ניסיון לתת למי ההזרקה ריכוז גבוה יותר (מליחות פי 1.5 מחמי טבריה) כדי לקבל מים עם הריכוז המדוד במעיין. חשוב לציין כי אין מידע ברור על רמת המליחות של המים המלוחים ובהחלט יתכן שישנם אזורים שבהם המליחות גבוהה יותר מהמים שמתגלים במעיינות חמי טבריה.

לצורך כיוול המליחות של מעיינות פוליה וטבחה, נעשה שינוי מסוים בקידוחי ההזרקה. בעוד שבשלב הראשוני הוכנסו קידוחי ההזרקה בפיזור שווה לכל אורך ההעתקים הראשיים, בשלבי הכיוול האחרונים הוכנסו יותר קידוחי הזרקה באזור טבחה מאשר באזור פוליה (תוספת של כמעט פי 2 יותר קידוחים באזור טבחה).

בשלב ראשון, לפני ההרצות עם הסעת מומסים במודל התלת מימדי, נעשו הרצות במודל דו-מימדי כדי לקבל מושג על מערכת הזרימה ועל היחסים בין הגופים בעלי מליחות וצפיפויות שונות. כבר בהרצות אלו הסתבר כי לא ניתן לדחוף את המים המלוחים על ידי מי תהום מתוקים באופן פשוט, מכיוון שבמערכת כזו נוצר אזור פן ביני שהינו אזור הערבוב בין המים המתוקים למים המלוחים. מתחת לאזור הפן הביני, בחלק העמוק המזרחי (האזור שמתחת ובקרבת הכנרת) של המערכת ההידרוגיאולוגית הנלמדת נמצא הגוף המלוח שבגלל צפיפותו הגבוהה יחסית אינו משתתף במערכת הזרימה העיקרית. לכן, הזרימה כלפי מעלה של המים המלוחים נעשית על ידי סחיפה על ידי המים המתוקים באזור הפן הביני של מים מלוחים בכמות שאינה מאוד גדולה.

אחד הנושאים שנבדק בהרצות של 10,000 שנה היה האם השכבות בעלות הפרמיאביליות הנמוכה (לדוגמה אלו של הידרה רמה) אינן נשטפות ושומרות על מליחותם הגבוהה במשך 10,000 שנה. בהרצות הרגילות נראה כי המליחות ההתחלתית נעלמת לגמרי ושכבות אלו שטופות כמו אלו של חבורת יהודה שמעליהן. בהרצה מיוחדת, בה חולקה שכבת הידרה רמה ל-5 שכבות, נמצא כי אכן המליחות ההתחלתית אינה נעלמת וישנה רק שטיפה חלקית. למען פשטות ההרצות, מתוך הבנה

שהשפעת הזרימה ביחידות האקוויטרדיות אינה משמעותית עבור המודל הלא תמידי של 45 שנה בלבד, ההרצות נעשו ללא חלוקה משנית תוך ידיעה שהמליחות הנמוכה אינה מייצגת בהכרח את המצב האמיתי.

ההתפלגות של ריכוז המלחים (TDS) בחתך שעובר דרך מעיין פוליה בסיום "שלב השטיפה", לפני תחילת ההפקה מקידוחים באגן, מוצגת באיור 15. באיור זה רואים בבירור כי ישנה שטיפה כמעט מלאה של החלק העליון של חבורת יהודה בעוד שבחלק התחתון של חבורת יהודה נשארו עדיין מים מלוחים, בעיקר בקרבת הכנרת (בהתאם לנצפה בקידוחים כנרת 8 ו-10ב', שהגיעו לעומק זה).

ניתן לראות שההבדל המתקבל בין הריכוזים במעיינות עבור קצבי הזרקה שונים אינו פרופורציוני פשוט לכמות ההזרקה מכיוון שישנה כאן מערכת מורכבת של מצב פן ביני ומערכת המושפעת מזרימה תלוית צפיפות בגלל ריכוז המלחים הגבוה בחלק המזרחי התחתון של המודל.

## ג. המודל הלא תמידי (transient) לשנים 1963-2008

### 1. הצבת המודל ותנאי הרצתו

בשלב ראשון נעשו הרצות לתקופת זמן של 13 שנה (אוקטובר 1994 לספטמבר 2007) כדי לבדוק את התנאים בשנים האחרונות. בשלב השני נעשו הרצות לאורך של 45 שנה (מ- 1963 עד 2008). הסימולציות נעשו בצעדי זמן של חודש אחד. כמויות הפקה חודשית עבור 32 קידוחים הוכנסו למודל (מיקום ושם האקוויפר מופיע בטבלה 10).

Index	Well Name	Well ID	Aquifer
1	Migdal Hadasha	24819701	Avedat
2	Migdal MM	24919701	Avedat
3	Ginosar	25119701	Avedat
4	Hokok 2	25219701	Avedat
5	Hokok	25219702	Avedat
6	Tel Adashim 5	23117701	Upper Jud
7	Tel Adashim 1	23117702	Upper Jud
8	Iksal 1	23117901	Upper Jud
9	Iksal 2	23218001	Upper Jud
10	Shimron 4	23317001	Upper Jud
11	Shimron 5	23317201	Upper Jud
12	Hasolelim 1	24017101	Upper Jud
13	Zipori 1	24017501	Upper Jud
14	Zipori 2a	24217601	Upper Jud
15	Hitin 4	24619101	Upper Jud
16	Hitin 1	24619201	Upper Jud
17	Hitin 3	24719301	Upper Jud
18	Calanit 6	25018902	Upper Jud
19	Rina	23617902	Lower Jud
20	Golani 1	24118701	Lower Jud
21	Kana 1	24117901	Lower Jud
22	Netufa 5	24117801	Lower Jud
23	Golani 2	24218901	Lower Jud
24	Netufa 4	24317901	Lower Jud
25	Netufa 1	24318001	Lower Jud
26	Hitin 5	24819201	Lower Jud
27	Calanit 5	25018901	Lower Jud
28	Calanit 2	25219201	Lower Jud
29	Calanit 1	25319101	Lower Jud
30	Hazon 2	25418501	Lower Jud
31	Hazon 1	25518501	Lower Jud
32	Amud 1	25719501	Lower Jud

טבלה 10: רשימת הקידוחים המפיקים באגן.

הקידוחים המובאים בטבלה לעיל הוכנסו לפי מיקומם הגיאוגרפי והסטרוקטורלי האמיתי. אולם, בחלק מהמקרים כתוצאה של ההפשטה של המודל הסטרוקטורלי, ישנה חוסר ההתאמה בין נתוני העומק האמיתיים לבין העומק הסטרייגרפי של האקוויפר שממנו נעשית ההפקה בפועל. לכן, עומק הקידוח במודל נלקח כעומק של תחתית שכבת המודל האמצעית של שכבת האקוויפר שממנו שואבים. בדרך זו, קיימת התאמה בין השכבה שבה נעשית ההפקה במודל לבין הנתונים האמיתיים של השכבה הנשאבת.

ריכוזי המלח והמפלסים ההתחלתיים להרצות במצב הלא תמידי נלקחו מהתוצאות הסופיות של ההרצה של 10,000 שנה (שלב השטיפה). בהרצות של ה-13 שנה היה צורך לגשר על הפער בין תחילת שנות השישים, תחילת ההפקה המשמעותיות באגן, לבין שנת 1994. הפער גושר בעזרת הרצה חוזרת של התקופה של 13 שנה. בעיה זו אינה קיימת כאשר מתייחסים להרצה שמתחילה בשנת 1963 מכיוון שאז אין פער ותוצאות סוף הרצת 10,000 שנה מתאימות בדיוק לשמש כנתוני התחלת ההרצה הלא תמידי שכוללת הפקה מקידוחים.

נתוני המילוי החוזר הראשוניים נלקחו מתוצאות כיוול מודל התאים (קסלר, 2010) ועודכנו במהלך הרצות הכיוול של המודל התלת ממדי.

כמות המילוי החוזר הכללית לאקוויפר היא 73.1 מלמ"ק. בנוסף הוספו 6 מלמ"ק שהם כמות המים שיכולה לחלחל מתוך תעלת המוביל הארצי (קסלר, 2010). נתון זה הינו הערכה גסה בלבד מכיוון שאין נתון רשמי מצד אחד ומצד שני ברור שאין מערכת אטומה לגמרי ולכן סביר שכמות מים מסוימת נתרמת על ידי מערכת זו. כלומר, ישנה כאן כניסת מים לאקוויפרים של 79 מלמ"ק. עבור כל ההרצות במצב הלא תמידי נלקחו ערכים של ספיקה יחסית של 0.03 לכל שכבות אקוויפר חבורת יהודה ומקדם האגירות של האקוויפר הכלוא נלקח כנמוך בכמה סדרי גודל ( $1.5e^{-5}$ , טבלה 6).

שפיעת המעיינות במודל במצב הלא תמידי מוגדרת לפי תנאי גבול מספר שלוש של Cauchy, שלפיהם הזרימה תלויה בעומד באזור המעיינות כפי שמתואר בסימולציות של המצב היציב בשלב השטיפה (פרק ב').

## 2. כיוול המודל הלא תמידי

במהלך הרצות הכיוול נעשתה התאמה של הגורמים הבאים לנתונים מדודים:

- (1) השפיעה בקבוצות המעיינות של פוליה וטבחה. הסדרה המדודה במעיינות טבחה מבוססת על סדרה שהתקבלה כמייצגת את השפיעה במהלך הכיוול של מודל התאים שנעשה במסגרת העבודה הנוכחית. במסגרת זו חושבו ערכי השפיעה הכוללת ממכפלה של הערכים המדודים במעיין של עין נור במקדם של 1.6, כדי לקבל את כל השפיעה במעיינות טבחה. לגבי פוליה לא קיימת סדרת זמן של נתוני שפיעה וניתן היה להשוות רק לנתונים שנמדדו בשנים האחרונות (טל ורימר, 2008).
- (2) תפרושת המפלסים באגן. נעשתה התאמה לנתונים הידועים ממספר קידוחים ששמשו כנקודות התייחסות (לדוגמא קידוח חיטין 3, כלנית 1, כנרת 8).

כיוון שהפרש המפלסים המדודים בין אלה באקוויפר חבורת יהודה העליון לאלה באקוויפר חבורת יהודה תחתון בכל אזור הם בגודל של מטרים בודדים (ראה תיאור המודל הקונספטואלי, פסקה 4.1.1), קטנים באופן משמעותי מיכולת הדיוק של המודל, הכיול נעשה למפלסים באקוויפר התחתון, הרגיונלי בלבד.

(3) ריכוז המלחים (לפי הכלורידים) במעיינות טבחה, במעיינות פוליה ובמידה מסוימת גם בחמי טבריה.

תוך כדי הכיול שונו ערכי המוליכות ההידראוליות בשכבות המודל השונות כדי לשפר את התאמת הגורמים המחושבים הללו לאלה המדודים בקידוחים ובמעיינות השונים.

### 3. תוצאות ההרצות של המודל הלא תמידי

תוצאות ההרצות של המודל הלא תמידי ל-45 השנים (1963-2008) מראות מספר דברים: ספיקות מעיינות – איורים 16-17 מראים את השינוי בספיקה המחושבת של המעיינות עם הזמן. כיוון שאין נתונים מהימנים של השפיעה בכל מעיינות פוליה לאורך התקופה, לא מוצג גרף של שפיעה מדודה באיור 16. ניתן לראות את השינוי העונתי בשפיעות של שתי קבוצות המעיינות אם כי השינוי הרבה יותר משמעותי במעיין טבחה. הסיבה לכך היא שבטבחה המודל מתייחס רק למעיין אחד יבשתי בעוד שבפוליה המודל מתייחס לשני אזורי מעיינות (ימי ויבשתי) שמתנהגים באופן הפוך מבחינת השפיעה העונתית שלהם (קסלר ורימר, 2003). לכן השינויים בשפיעות שלהם מקוזזים זה את זה באופן ניכר והסכום של שניהם (איור 16) מראה שינוי עונתי קטן.

ניתן לראות בתוצאות המודל מגמה של ירידה רב שנתית בשפיעות של המעיינות, כפי שנמצא במדידות. הערך שמתקבל במודל עבור שנת 2008 דומה לזה שנמדד בשדה בשנים האחרונות (טל ורימר, 2008; טל וחובריו, 2009).

**מליחות מעיינות** – איורים 18 ו-19 מראים את השתנות המליחות במעיינות עם הזמן. יש לשים לב לכך שריכוז המלחים המדוד המוצג באיור 19 הוא הריכוז במעיין פוליה A, לגביו יש מדידות רצופות בשנים האחרונות, שהוא גבוה יותר מהריכוז המשוקלל של כלל המעיינות בקבוצת פוליה (ראה בפרק 4.1.2.1). הריכוז המחושב הוא הריכוז בתא מודל מסוים שאינו בהכרח הריכוז המחושב המשוקלל.

באופן כללי, לא ניתן לראות מגמה ברורה של השתנות המליחות עם הזמן, בדומה לנתוני השדה שגם הם לא מראים מגמה ברורה אלא רק שינויים עונתיים ורב שנתיים ללא מגמה רב שנתית ברורה. ירידה מסוימת במליחות הובחנה בתוצאות הסימולציות של מעיינות טבחה (איור 19). בתוצאות הרצות המודל לא התקבלו השינויים השנתיים במליחות המעיינות כפי שמראים נתוני השדה, כנראה בגלל מקדם הדיספרסיביות הגבוה שהוכנס בהרצות.

בגלל האמור לעיל, נעשה ניסיון לבדוק את השפעת הדיספרסיביות על המליחות של המעיינות. לשם כך נעשו מספר הרצות עם דיספרסיביות נמוכה. הרצות אלו נעשו רק עבור תקופת הרצה של 45 שנה (לא עבור 10,000 שנה). ניתן לראות כי הרצות אלו נתנו תנודתיות גבוהה יותר של המליחות במעיינות, בקירוב טוב יותר לנתונים האמיתיים (איור 20). במקרה זה, תוצאות המודל היו דומות

לנתונים, גם בהסתכלות על השינוי הרב שנתי וגם על השוני העונתי. העובדה שהרצות המודל בהן הוצב ערך דיספרסיה נמוך נתנו תוצאות דומות באופן סביר לנתונים המדודים במעיין פוליה מלמדת כי אכן הדיספרסיה הגבוהה היא הסיבה לכך שלא התקבלה תנועתיות שנתית בתוצאות הקודמות. חשוב לציין כי מכיוון שמטרת העבודה הנוכחית היתה לחזות את ההתנהגות הרב שנתית ארוכת הטווח, נעשה גם כאן לצורך הפשטה שימוש בערכי דיספרסיה גבוהים שמנעו בעיות נומריות.

**עומס המלח שמובל לכנרת** – איור 21 מראה את עומס המלח שמובל לכנרת על ידי שני המעינות העיקריים (טבחה ופוליה). ניתן לראות כי עומס המלח קטן בשני המעינות עם הזמן, וזאת כתוצאה מכך שהשפיעה קטנה בעוד שהמליחות לא השתנתה באופן משמעותי.

**מפלסי מי תהום** – השינוי במפלסי מי תהום בשנים 1963-2008 נבדק בעזרת השוואה בין המפות השונות וכן בעזרת בדיקת השנוי עם הזמן בקידוחים מייצגים.

בקטע המערבי, של אזור עמק בית נטופה ובשולי עמק יזרעאל בגבול הדרומי, המפלסים המחושבים של תחילת הרצת המודל הלא תמידי (שנת 1963, איור 9) היו גבוהים במקצת מאשר המדודים בעוד שבשנת 2008 המפלסים נמוכים בכ- 20 מ' מהמדודים (איור 22). השינויים הללו קטנים יחסית ובגלל ריחוק האזור הזה ממעינות הכנרת לא אמורים להשפיע באופן משמעותי על תרומת המלחים לכנרת.

**מפלסי מי תהום בקידוחים מייצגים** - איורים 23-25 מראים את השינוי בזמן במפלס מי תהום במספר קידוחים מייצגים. בשלושת הקידוחים נראית התאמה סבירה בין המפלסים המחושבים למפלסים המדודים. בקידוח כלנית 1 ישנו הפרש של כ- 25 מטר בין המדוד למחושב אולם הפרש זה נשאר קבוע לכל אורך ההרצות. בשני הקידוחים האחרים ההתאמה טובה עוד יותר. בקידוחי חיטין וכלנית ניתן לראות ירידת מפלסים משמעותית משנת 1994 ועד היום עם שינוי מגמה אחד בשנת 2003 שהיתה שנה ברוכת גשמים באזור זה.

#### **סיכום שלב כיוול – מאזני מים**

איור 26 מראה את השינוי בזמן של רכיבי מאזן המים של שלב הכיוול. ניתן לראות כי היתה ירידה משמעותית בשפיעת המעינות (מכ- 80 מלמ"ש לכ- 55 מלמ"ש) שהיא בעיקר תוצאה של הגברת ההפקה מכ- 10 מלמ"ש בתחילת התקופה (שנות השישים) עד לכמעט 40 מלמ"ש בסופה (שנת 2008). במשך התקופה הזו היתה כנראה ירידה מסוימת בכמות המילוי החוזר כפי שניתן להבין מההשוואה בין הממוצע של 45 השנים האחרונות לעומת הממוצע של 15 בשנים האחרונות (האחרון קטן ב- 8-15 אחוז מהראשון). בגלל הוריאביליות הגדולה בערכי הגשם ולכן גם בערכי המילוי החוזר, קשה להעריך את השינוי באוגר של האקוויפר שהוא כנראה בקרוב 5-10 מלמ"ש. חשוב לציין כי האוגר הכללי של האקוויפרים באגן כלנית כולו הינו כ- 23 מליארד מ"ק מים.

## ד. בדיקת תרחישי תפעול עתידיים

### 1. התרחישים

הגדרת תרחישי תפעול הפקה אפשריים באגן לבדיקה בהרצת המודל נעשתה בשיתוף פעולה של צוות הפרויקט עם אנשי רשות המים. בכל התרחישים נבדקו ההשפעות של משטרי הפקה ומשקעים שונים על מספר פרמטרים הידרולוגים כגון: שפיעת המעיינות (טבחה ופוליה), מליחות המעיינות האלה, כמות המלח שיוצאת במעיינות הללו ושינוי המפלסים במספר קידוחים מייצגים. בטבלה 11 מוצגים התרחישים שנבדקו. להלן תאור של התרחישים:

**תרחיש 1** – המשך הפקה בכמות המופקת היום למשך תקופה של 45 שנה (אורך תקופה דומה לזה שעבורו נעשה הכיול, מ-1963 עד 2008). באופן כללי, השאיבות נלקחו לפי נתוני הפקה החודשיים של שנת 2010 שהיא השנה הראשונה של התרחישים (בכמות שנתית כוללת של כ-38 מלמ"ק לשנה). בתרחיש זה נבדקו מספר תת תרחישים השונים זה מזה בעיקר במשטר המילוי החוזר.

בתת תרחיש 1.1 נבדק המצב כאשר המילוי החוזר החודשי בכל שנה ב-45 השנים הקרובות זהה למוצע השנתי ב-45 השנים הקודמות והפיזור החודשי לאורך כל שנה לפי הממוצע החודשי של 45 השנים האחרונות. מפלס הכנרת נלקח עבור שני מקרים קיצוניים של מפלס כנרת גבוה ונמוך (לפי המפלסים שנמדדו לאורך השנה בשנים 1995/96 ו-1999/2000, תת תרחישים 1.1.1 ו-1.1.2) שנלקחו קבועים במשך כל 45 שנות ההרצה. אלה תרחישים שאינם סבירים ושימשו כאן רק לצורך בדיקת מקרים קיצוניים של מפלסי כנרת. תרחיש נוסף (1.1.3) בדק את התוצאות כאשר נלקח מפלס כנרת ממוצע בין הרומים בשתי שנים קיצוניות אלה.

בתת תרחיש נוסף (תרחיש 1.2) נלקח מילוי חוזר קטן ב-15 אחוז מזה של התרחיש הקודם, מכיוון שישנה טענה כי קיימת ירידה מסוימת בכמות הגשמים בשנים האחרונות ומתוך כוונה לבדוק את המצב אם יתגשמו ההערכות שמדברות על ירידה עתידית בכמות הגשם וכמות המילוי החוזר. יתכן כי ירידה של 15 אחוז הינה גבוהה מהחזוי (דיון בהמשך), אולם מטרת תרחיש זה הייתה לבדוק את השינויים במקרים יחסית קיצוניים כדי ללמוד על התנהגות המערכת גם במקרים כאלה.

חשוב לציין כי בכל התרחישים שנבדקו, וכבר בשלב הכיול, היה צורך לבצע שינוי של מיקום מספר קידוחים מפיקים כדי שניתן יהיה להמשיך את ההפקה בהתאם להגדרת התרחיש. הסיבה לכך היא שבמהלך שנות ההפקה ירד מפלס המים המחושב במודל במספר קידוחים אל מתחת לרום נקודת ההפקה שהוצבה לגביהם במודל. להערכתנו הסיבה לכך ש"התיבשות" כזו התקבלה בהרצת המודל בשלב הכיול לגבי קידוחים המפיקים בפועל, היא שבמספר אזורים לא קיימת התאמה מלאה בין המפות הסטרוקטורלית של הגבולות בין שכבות המודל, כפי שהוזנו בו (פרוט בפרק ב'1), לבין רומי גבולות אלה במציאות. לכן, כבר בשלב הכיול נתקלנו במצב שמספר הקידוחים שהמשיכו להפיק בהרצה עד לסוף התקופה היה קטן ממספר הקידוחים שהפיקו בפועל. לפי התנאים במודל, היו מקרים שבהם נמצאת תחתיתם של הקידוחים מעל שכבות האקוויפר באופן שאינו מאפשר הפקה, או שפני המים ירדו אל מתחת לבסיסם כבר במשך תקופת הרצת השלב הלא תמידי או בשלב התרחישים. במקרים כאלה הוזנו הקידוחים למרחק של כ-1 ק"מ למקום סטרוקטורלי שיאפשר הפקה. במקרים אחרים, התייחסנו לקידוחים כאילו הם עמוקים יותר ולכן עדיין מאפשרים הפקה ברור כי ככל שההפקה גדולה יותר, כך יותר קידוחים יצאו מכלל פעולה גם בפועל בשטח. בגלל

ההפשטה של המפה הסטרוקטורלי, לא ניתן לבדוק אלמנט זה (שלא הוגדר כאחת ממטרות העבודה) בדיוק בעזרת הסימולציות הנוכחיות (תוצאות בדיקה ראשונית מופיעות בהמשך).

מספר תרחיש	תיאור כללי	הערות	מוצג באיורים
1.1.1	הפקה כמו ב- 2010	כנרת נמוכה (לפי שנת 95/96)	לא
1.1.2	הפקה כמו ב- 2010	כנרת גבוהה (לפי שנת 99/00)	לא
1.1.3	הפקה כמו ב- 2010	כנרת ממוצעת	כן
1.2	הפקה כמו ב- 2010	מילוי חוזר קטן ב- 15%	כן
2.1	הפקה מקסימלית	מילוי חוזר רגיל (כמו 1.1.1)	כן
2.2	הפקה מקסימלית	מילוי חוזר קטן ב- 15%	כן
2.3	הפקה מקסימלית + הגדלת הפקה בחב' עבדת	מילוי חוזר רגיל (כמו 1.1.1)	כן, באופן חלקי
2.4	הפקה מקסימלית	כניסת מים מהגבול המערבי	לא
3.1	הפקה באקוויפר תחתון	העברת הפקה מעליון לתחתון	לא
3.2	הפקה באקוויפר עליון	העברת הפקה מתחתון לעליון	לא
3.3	הפקה כמו ב- 2010	תוספת 10 מלמ"ק לעליון	כן
3.4	הפקה כמו ב- 2010	תוספת 10 מלמ"ק לתחתון	לא
3.5	הפקה כמו ב- 2010	תוספת 10 מלמ"ק לתחתון, חסימה מוחלטת בין העליון לתחתון	כן, באופן חלקי
3.6	הפקה כמו ב- 2010	תוספת 10 מלמ"ק לעליון, חסימה מוחלטת בין העליון לתחתון	כן, באופן חלקי

### **טבלה 11:** טבלה של התרחישים שנבדקו במסגרת העבודה הנוכחית.

יש לשים לב לכך שנבדקו תרחישים בהם לא התקבלו תוצאות שונות או שבוצעו באופן ראשוני בלבד, הדורש בדיקה מחודשת ולכן תוצאותיהם לא הוצגו באיורים בדו"ח הנוכחי.

**תרחיש 2** – בתרחיש זה נבדק המצב כאשר כל הקידוחים ישאבו בשיא הפוטנציאל שלהם (לפי רשימה שהוכנה על ידי אנשי השירות ההידרולוגי (טבלה מצורפת בנספח 2), בכמות כוללת של כ-55 מלמ"ק לשנה). גם במקרה זה נבדקו מספר תת תרחישים בהתאם למילוי החוזר המפורט בתרחיש הקודם (תרחישים 2.1 ו- 2.2).

נבדקו תת תרחיש נוסף (תרחיש 2.3) שבו הוגברה גם ההפקה באקוויפר חבורת עבדת בכמות של 6 מלמ"ק/שנה. תת תרחיש נוסף שנבדק (תרחיש 2.4) היה לגבי השפעת הגבול המערבי על תוצאות המודל. הדבר נבדק על ידי הכנסת מים דרך הגבול המערבי בכמות של 6 מלמ"ק לשנה. כאן באה לביטוי ההנחה שכיוון שבמציאות גבול זה איננו גבול סגור (ראה בתיאור המודל הקונספטואלי, פרק א' 3.2) ואילו במודל הוצב מלכתחילה גבול אטום (פרק ב' 1), הרי שהורדת מפלסים במערב האגן תגרום להסטה מערבה של פרשת המים עם אגן נעמן במערב וכתוצאה מכך לתוספת מים במאזן אגן פוליה-טבחה.

**תרחיש 3** – בתת תרחיש אחד (תרחיש 3.1) נבדקה האפשרות שעיקר ההפקה תרוכז באקוויפר התחתון ואילו בתת תרחיש השני (תרחיש 3.2) נבדקה האפשרות של הפקה בעיקר מהאקוויפר העליון של חבורת יהודה. בתרחיש זה נבדקו עוד שני תת תרחישים (3.3 ו- 3.4) שבהם נלקחה

ההפקה לפי זו בשנת 2010 (תרחיש 1.1.3) ואליו הוספה הפקה משמעותית בקידוחים הקרובים לכנרת (ארבל וכחל) בכמות של כ- 5 מלמ"ק/שנה בכל אחד מהם. בתרחיש 3.3 ההפקה הוגדלה באקוויפר העליון ובתרחיש 3.4 ההפקה הוגדלה באקוויפר התחתון. שני תת תרחישים נוספים נבדקו עבור המקרה התיאורטי שבו יש הפרדה מוחלטת על ידי דיר חנא בין האקוויפר העליון והתחתון של חבורת יהודה, כאשר השאיבה בתחתון היא תרחיש 3.5 והשאיבה בעליון היא תרחיש 3.6.

## 2. תוצאות הרצות התרחישים

**תרחיש 1** (המשך הפקה בספיקות דומות לאלו של 2010 לתקופה של 45 שנים נוספות) – בשלב ראשון נבדק האם יש הבדל משמעותי בין ההרצות עם מפלסי כנרת נמוכים לעומת מפלסי כנרת גבוהים (תרחישים 1.1.1 ו- 1.1.2). מכיוון שלא נמצא הבדל כזה, נלקחו בכל התרחישים האחרים ערכי כנרת ממוצעים חודשיים שבין שתי השנים הקיצוניות הללו (תרחיש 1.1.3).

בתרחיש זה אין ירידה משמעותית בשפיעה של שתי קבוצות המעיינות העיקריות, כלומר לא ניכרת השפעת ההפקה על כמות המים שמגיעה למעיינות (איורים 27 ו- 28). ישנה ירידה קטנה במליחות של מעיינות טבחה וכמעט אין שינוי במליחות במעיינות פוליה (איורים 29 ו- 30). כמות המלח שזורמת לכנרת אינה משתנה באופן משמעותי עם הזמן בגלל שהשינוי במליחות קטן מאוד ואין שינוי משמעותי בספיקות של שני המעיינות (איורים 31 ו- 32).

בתרחיש זה אין ירידת מפלסים בקידוחים המייצגים (כדוגמת חיטין 3, כלנית 1 וכנרת 8, איורים 33, 34, 35). תוצאות אלו, יחד עם זה שלא נמצא שינוי משמעותי בשפיעות המעיינות, נראות מוזרות מכיוון שלפי הנתונים של השנים האחרונות היתה ירידת מפלסים מהירה בקידוחי חיטין וכלנית. על פניו, הסבר אפשרי לכך הוא שהמערכת הגיבה עד 2010 להגברת ההפקה המהירה בקידוחים אלה בשנים 2000 עד 2008 ואילו לאחר שקבענו קצב הפקה קבוע, יש הגעה מהירה למצב שווי משקל (אולי מהר מדי בסימולציות – כלומר יתכן שזה יקרה במציאות לאחר מספר שנים ובמודל זה קורה תוך פחות משנה). לאחר זמן קצר של מספר שנים המערכת מגיעה בקירוב לשווי משקל חדש שבו כמות המילוי החוזר שווה לשפיעת המעיינות + ההפקה ואין ריקון אוגר משמעותי.

הסבר אלטרנטיבי הוא שערכי המילוי החוזר שנלקחו בתרחיש זה גבוהים מהערכים האמיתיים בשטח. בהרצה הראשונה נלקח ערך ממוצע של 45 שנים אחרונות ומכיוון שכנראה יש ירידה בכמות הגשם ב-15 השנים האחרונות, סביר להניח שהערך הזה גבוה מדי. בהשוואה בין הממוצע ב-45 השנים האחרונות לממוצע של 15 השנים האחרונות נמצא פקטור של ירידת כמות המשקעים של כ- 15-8% באזורים השונים. לכן נעשתה ההרצה הנוספת לפי מילוי חוזר מופחת זה (תרחיש 1.2). בתרחיש זה, בו המילוי החוזר קטן ב- 15%, התקבלו, כצפוי, שינויים משמעותיים יותר בשפיעות של המעיינות (איורים 27 ו- 28) וכן במפלסי הקידוחים המייצגים (איורים 33, 34 ו- 35). מכיוון שבהרצה זו אין הגברת ההפקה, הרי ירידת מפלסי מי תהום בקידוחים המייצגים היא תוצאה של ריקון האוגר שהחל כבר בשנים עברו ותוצאותיו ישפיעו גם בעתיד. גם במקרה זה יש הגעה למצב של שווי משקל אבל ברור כי שווי משקל חדש זה מתקיים במפלסים נמוכים יותר מאלו שהיו בשנות השישים וגם מאלה שהיו ב- 2010.

**תרחיש 2** – (הפקה מקסימלית בכל הקידוחים הקיימים) - בתרחיש זה מתקבלת ירידה חריפה יותר בשפיעות (איורים 27 ו-28). גם במקרה זה מתקבלת הגעה למצב של שווי משקל, אך במפלסי מי תהום נמוכים יותר ובספיקות מעיינות נמוכות יותר. המקרה הקיצוני ביותר הוא של הפקה מקסימלית וירידה בכמות המילוי החוזר (תת תרחיש 2.2). במקרה זה יש ירידה חזקה במפלסי מי תהום וכן בספיקות של המעיינות.

בדיקת תת התרחיש 2.3, שבו הוגברה גם ההפקה באקוויפר חבורת עבדת (איאוקן), מראה כי אכן הפקה משמעותית באקוויפר זה תוריד את השפיעה ותעלה את המליחות במעיין טבחה (איור 36) ולא תשפיע על מעיין פוליה. העובדה שההפקה באקוויפר זה משפיעה בהתאם לצפוי מחזקת את העובדה שהמודל מתאר נכון את המציאות.

בכל התרחישים התקבלו ירידות חריפות של מפלסי מי תהום באזור המערבי כפי שניתן לראות במפות המפלסים (למשל בקידוחי נטופה - ירידה של כמעט 100 מטרים, איורים 37, 38). ניתן לראות טוב יותר את ירידות מפלסים אלו במפות הפרשי מפלסים בין סוף שלב הכיול לסוף תרחיש 1.1 (איור 39) ובין סוף תרחיש 1.1 לסוף תרחיש 2.1 (איור 40). ירידות חזקות התקבלו באזור זה גם בשלב של הרצות הכיול (מעל 30 מטר), בניגוד לנתונים בשדה שהראו כי לא קיים שינוי משמעותי למרות ההפקה המסיבית. לצורך בדיקה של סיבות אפשריות נעשו שתי הרצות נוספות: 1) הרצה עם אגירות גבוהה יותר של החלק המערבי של המודל, 2) הרצה שבה יש תרומה של מים (6 מלמ"ק בשנה) מהגבול המערבי (תת תרחיש 2.4). ההיגיון מאחורי ההרצה השניה היא שבמודל הכנסנו גבול אטום בעוד שבמציאות הגבול המערבי (בין אגן כלנית לאגן נעמן במערב) הוא גבול של פרשת מים (ראה פרוט בפרק א'3.2). תוצאות ההרצות הראו כי אכן שתי האפשרויות הללו מביאות, כצפוי, לירידה קטנה יותר של מפלסי מי תהום באזור המערבי.

נושא נוסף שנבדק באופן ראשוני בעבודה זו הוא כשירותם של הקידוחים הקיימים, המפיקים מחבורת יהודה, להפקה המוגברת (ראה נספח ח3). לצורך כך נבדק עומק הקידוחים המפיקים לעומת המפלס הצפוי לאחר 45 שנה בתרחיש 2.1, כדי לחזות מה יהיה עובי החתך הטבול בסוף התקופה. בשלב זה לא נלקחו בחשבון גורמים משפיעים נוספים, כגון יציאת קידוחים מפעילות בגלל בעיות המלחה, מיקום המסננות בכל קידוח וקוטר הצנרת בחלק התחתון (מגבלה על אפשרות העמקת המשאבה ולכן על הספיקה של הקידוח), חוסר דיוק בחיזוי המפלס במספר אזורים בגלל ריכוזי שאיבה מלאכותיים בזמן ההצבה במודל ובגלל הזות קידוחים.

לפי עובי החתך הטבול שחושב והספיקות היחסיות בכל קידוח (לפי תוצאות מבחני השאיבה שנעשו בקידוחים בסיום הקדיחה) חולקו הקידוחים לשלש קבוצות:

1. קידוחים שכנראה יצאו מכלל פעולה – 10 מתוך 34.
  2. קידוחים שספיקתם תרד משמעותית – 7 מתוך 34.
  3. קידוחים "בטוחים" שירדו בספיקתם אך במעט – 15 מתוך 34.
- לגבי 2 קידוחי חזון לא ניתן היה לקבל מהמודל הנוכחי תחזית לגבי רום המפלס.

**תרחיש 3** – (בדיקת ההשפעה של תוספת הפקה מהאקוויפר העליון או מהאקוויפר התחתון) – בבדיקה הראשונית נמצא כי העברת חלק מההפקה מהאקוויפר העליון לאקוויפר התחתון או להפך אינה משנה באופן משמעותי את כמות המים שנובעים במעיינות. תוצאות אלו תואמות את הציפיות מכיוון שמיקום ההפקה לא אמור להשפיע באופן משמעותי על כמות המים במעיינות, בייחוד לאור

העובדה שאין הבדל מפלסים גדול בין האקוויפרים והעובדה שמאזן המים צריך להישמר בכל מקרה. השינויים הקטנים שהתקבלו הינם, כנראה, תוצאה של מעבר בין שתי קבוצות המעיינות (פוליה וטבחה) באופן ששומר על מאזן המים הכללי. גם במפלסי מי תהום לא נמצאו הבדלים גדולים, כנראה בגלל שבמודל, כפי שהוצב, ישנם מעברים בין שני האקוויפרים הללו. המוליכות ההידראולית של השכבה האקוויטרדית ביניהם שהוצבה במודל אינה נמוכה מאוד וישנם כנראה מקומות שבהם עובי השכבה קטן ושם השכבה אינה חוסמת מעבר בין האקוויפרים הללו. מלבד זאת, סביר להניח כי ההעתקים בקרבת הכנרת מאפשרים מעבר מים בין האקוויפרים ולכן יוצרים התנהגות דומה ללא קשר לאקוויפר הנשאב בספיקות גדולות יותר. יתכן כי זה אכן גם המצב בשטח, אם כי באזורים אחדים נמצא הפרש מפלסי מי תהום של מספר מטרים בין האקוויפר העליון לתחתון. גם במליחות לא נמצא שינוי ברור בשני המעיינות שיכול לבטא תהליך ברור השונה בין הפקה בעליון או בתחתון.

תוספת של 10 מלמ"ק/שנה הפקה בקידוחים ארבל וכחל, השואבים מתת האקוויפר התחתון של חבורת יהודה גורמת, כצפוי לירידת שפיעת המעיינות וגם לירידת מסוימת במפלסי מי תהום בעיקר בקרבת מקום. גם כאן לא נמצא שינוי משמעותי במליחות של המעיינות, בניגוד להשקפה שהובעה בעבר, ששאובה מתת האקוויפר התחתון תוריד את המליחות (בגלל הפחתה של דחיפת התמלחות) ושאיבה בעליון תעלה את המליחות בגלל ירידה במיהול.

גורם נוסף, שמשפיע בצורה שאינה ברורה לגמרי, הוא עניין תוספת המים המלוחים מהעומק (בקידוחי ההזרקה) שכמותה כ-2 מלמ"ק לשנה אבל השפעתה במרחב אינה מספיק ברורה. בכל מקרה, בגלל המבנה ההידרוגיאולוגי המסובך וההעתקים בקרבת הכנרת, יתכן כי נוצרים במודל קשרים בין האקוויפרים שאינם קיימים במציאות. לכן, חשוב יהיה להריץ את המודל בעזרת תוכנה מתקדמת יותר שתאפשר שימוש בשכבות המבנה הסטרוקטורלי באופן מדויק יותר. נושא זה, שנבדק באופן ראשוני בהרצות לעיל, חייב להיבדק באופן מסודר ועקבי יותר במסגרת פרויקט ההמשך שמוצע בפרק הבא. יותר מכך, כדאי יהיה להריץ גם עבור מקרה שבו ההפרדה בין האקוויפר העליון לתחתון הינה משמעותית יותר ולראות אם במקרה זה יתקבל הבדל במליחות המעיינות בהתאם לאקוויפר שממנו התגברה שאיבה. הרצות ראשוניות שנעשו עבור מקרה שבו ההפרדה כמעט מוחלטת, אכן הראו כי אכן מתקבל הבדל מסוים במליחות המעיינות לפי מיקום ההפקה (איור 41). כאשר ההפקה מרוכזת באקוויפר התחתון (תת תרחיש 3.5) אזי המליחות נמוכה באופן משמעותי מהמקרה שבו מרוכזת השאיבה באקוויפר העליון (תת תרחיש 3.6). תוצאות אלו הגיוניות משתי סיבות אפשריות: (1) המים באקוויפר העליון מתוקים בהרבה ממי המעיינות ולכן שאיבה מאקוויפר זה מורידה את כמות המיהול ומעלה את המליחות. (2) זרימת המים באקוויפר התחתון היא זו שבעיקר גורמת לעליית המים המלוחים (הנמצאים באקוויפר זה) דרך השברים לכיוון המעיינות. לכן, שאיבה באקוויפר התחתון תגרום לירידה במליחות המעיינות. לסיכום, שאיבה מוגברת באקוויפר התחתון ולא בעליון אמורה להוריד את המליחות בגלל שני התהליכים הללו. אולם, מכיון שהתהליך האמיתי בשטח אינו דחיפה פשוטה של התמלחת על ידי מי תהום באקוויפר התחתון אלא תהליך מורכב יותר של אזור פן ביני שגם מיקומו מושפע מכמות המים שזורמת באקוויפר ולכן הוא משפיע על מליחות המים שתעלה באזור ההעתקים אל המעיינות, קשה לחזות איך אמורה להיות השפעת שאיבה באקוויפר זה. בכל מקרה, לא ברור מהם הערכים

האמיתיים של השכבה המפרידה ומה מידת ההפרדה בשדה ולכן קשה להעריך מה התרחיש הנכון יותר.

### **3. השוואת תוצאות התרחישים בין מודל התאים והמודל התלת מימדי**

איורים 42,43 מציגים השוואה בין תוצאות שני המודלים בשינויים בשפיעות של מעיינות פוליה וטבחה בשני תרחישים (תרחיש של המשך שאיבה כמו ב- 2010 ותרחיש של שאיבה מקסימלית). באופן כללי ניתן לראות כי התוצאות מלמדות על מגמות זהות בשינויים והתחזית של מודל התאים נמצאת בין שני התרחישים הראשוניים (תרחישים 1.1 ו-1.2) של המודל התלת מימדי, מכיוון שערך המילוי החוזר שנלקח מצוי גם הוא בין אלה שנלקחו בשני תרחישים אלו. גם בתרחיש של שאיבה מקסימלית רואים התאמה סבירה בין תוצאות מודל התאים למודל התלת מימדי (בין תרחיש 2.1 ל-2.2). גם במליחות של המעיינות לא נמצא הבדל גדול בין תוצאות שני המודלים בין שני התרחישים הללו.

לעומת זאת, נמצא הבדל גדול בין תוצאות המודלים עבור המקרה של הפקה גדולה באקוויפר התחתון. במקרה זה, מודל התאים חוזה ירידה דרסטית, למליחות מאוד נמוכה, במעיינות פוליה כאשר שואבים באקוויפר התחתון בקידוח ארבל. לעומת זאת, במודל התלת מימדי, מתקבלת ירידה מסוימת, אך קטנה בהרבה. גם במקרים שבהם מפסיקים את הזרקת התמלחת מהעומק, לא מתקבלת ירידת מליחות גדולה, המתקרבת לזו של תחזית מודל התאים. יש להתייחס בזהירות לירידה הדרסטית במליחות לפי מודל התאים ולאמת את הנחות הבסיס של המודל לפני שמסיקים מסקנות מעשיות בנושא זה. חשוב לציין כי אין לצפות שתהיה התאמה מלאה בין התוצאות של שני המודלים. בכל אחד מהמודלים נעשה כיוול בנפרד ונעשו הנחות שאינן זהות בגלל השונות בסוג המודלים. ייתכן כי בגלל ההבדל בצורת ההכנסה של תרומת המלח בין שני המודלים (כמלח במודל התאים וכמים מלוחים מהתחתית במודל התלת מימדי) מקבלים תוצאות שונות במקרים הקיצוניים. יתכן גם כי ההנחה בדבר ההפרדה המוחלטת בין האקוויפר העליון לאקוויפר התחתון והיחס בין כמויות המים הזורמות בכל אחד משני האקוויפרים, שהתקבל בכיול מודל התאים (כ-15% באקוויפר התחתון), אינן מדויקים וגורמים לחלק מההבדל.

## **ה. סיכום, מסקנות והמלצות להמשך**

### **1. סיכום ומסקנות**

נקודות חשובות שניתן ללמוד עליהן מהרצת המודל התלת מימדי הן: הסימולציות של 10,000 שנה מלמדות שללא תוספת מים מלוחים, המערכת היתה כנראה נשטפת והמעיינות היו היום מתוקים. מקור המים המלוחים הללו, העולים מהעומק במערב הכנרת, לא נלמד בעבודה הנוכחית בגלל חוסר בנתונים ברורים ודורש עבודה נוספת. בעבודה הנוכחית נלקחה

תוספת מים מלוחים (ריכוז של 18,000 מ"ג כלורידים לליטר) בכמות של כ- 2 מלמ"ק/שנה התורמת כ-25 אחוז מהכמות של המלח שיוצאת במעינות, מכיוון שכמות זו נתנה בכיול ערכי מליחות במעינות המתאימים לערכים המדודים. במצב כזה המערכת היום אינה בשווי משקל אלא נשטפת אבל בקצב איטי שאינו מורגש בסימולציות של עשרות שנים וכנראה גם לא הורגש בניטור של המעינות בעשרות השנים האחרונות.

לא ניתן לקבל בפשטנות את "מודל הדחיפה" של גולדשמיט, שבו המים המתוקים דוחפים את המים המלוחים בדרכם למעלה. נראה שנכון יותר לחשוב על מנגנון סחיפה המקובל לאזורים של פן ביני עם ים, בו המים המלוחים נגררים עם מי תהום מתוקים בדרכם לים. במקרה הנוכחי, של אזור הכנרת, המצב יותר מורכב מכיוון שאין פה גוף מים מלוח בגודל אינסופי כמו בים.

בהרצות הכיול שנעשו לתקופה של 1963-2008 נמצאה התאמה סבירה בין תוצאות המודל התלת מימדי לבין נתוני השדה, המלמדת כי המודל מייצג באופן סביר את המצב בשדה. ההתאמה מתבטאת בספיקות המעינות (כולל השינויים העונתיים במעיין טבחה), במליחותם הכללית (לא כולל שינויים עונתיים) ובמפלסי מי תהום. הדיספרסיביות הגבוהה, שנלקחה כדי למנוע בעיות נומריות, מנעה התאמה של נתוני מליחות ברמה העונתית או שנתית קצרת טווח אבל נראה כי ברמה של סדר גודל המודל מתאר באופן סביר גם את נתוני המליחות בשדה.

תוצאות הרצות התרחשים הראו כי בתנאי מילוי חוזר שנתי ממוצע שיהיה בעתיד זהה למילוי החוזר השנתי הממוצע ב- 45 השנים האחרונות והפקה זהה להפקה הנוכחית, לא תמשך ירידה במפלסי מי התהום ובשפיעת המעינות. לעומת זאת, אם המילוי החוזר יהיה לפי הממוצע של 15 השנים האחרונות, שקטן בכ- 8-15 אחוז באזורים השונים של העבודה וההפקה תהיה זהה להפקה הנוכחית, תהיה ירידה לא גדולה של מפלסי מי תהום, שתתייצב תוך מספר שנים וכן גם ירידה קטנה של שפיעת המעינות, שגם היא תתייצב תוך מספר שנים.

תוצאות אלה מלמדות לכאורה על מערכת שנמצאת כבר היום בשווי משקל לעומת המקרה של ערכי מילוי חוזר נמוכים יותר שבהם תהיה הגעה לערכי שווי משקל רק בעוד מספר שנים, כאשר ההתייצבות תהיה עם ערכי שפיעות ומפלסים נמוכים יותר. לפי תוצאות הרצות המודל, מליחות המעינות לא צפויה להשתנות באופן משמעותי. מסת המלח המגיעה דרך המעינות לכנרת אמורה לרדת בגלל הירידה בספיקת המים המעינות.

במקרה של הפקה גדולה מהנוכחית (נבדקה הפקה של כ-55 מלמ"ק לשנה לעומת כ- 38 מלמ"ק כיום), צפויה ירידה הרבה יותר משמעותית של שפיעות במעינות ושל מפלסי מי תהום עד להגעה לשווי משקל חדש. גם במקרה זה, נראה כי רוב הקידוחים יוכלו להמשיך לתפקד, אם כי נושא זה דורש בדיקה מדוקדקת יותר.

תוצאות התרחשים מרמזות כי המשך ההפקה לא יגרום לשינוי גדול במליחות המעינות ויריד, באופן כללי, את מסת המלח שזורמת דרך המעינות לכנרת. דבר זה נכון לגבי המשך ההפקה בכמות הנוכחית וכן גם במקרה של הגדלת ההפקה, אם כי במקרה השני יהיו מספר קידוחים שייאלצו להפסיק לשאוב בגלל ירידת מפלסים מתחת לתחתית הקידוח ואז קשה יותר לחזות את ההשפעה האמיתית על המערכת ההידרולוגית. לכן, מבחינה הידרולוגית, נראה כי אפשר לשאוב בשנים הקרובות בספיקות שבין השאיבות הנוכחיות והשאיבות המקסימליות בלי הפרעה גדולה למערכת של הכנרת ואולי אף תוך הורדת מסת המלח מהמעינות לכנרת.

ההשפעה של הפקה זו על המליחות של מי תהום במערב הכנרת אינה ברורה ולא ידוע איך היא תשפיע על תנועת מי תהום מלוחים מתחתית הכנרת לכיוון מערב. נושא של המלחת מי תהום לא היה בין מטרות העבודה העיקריות ולכן גם אין מסקנות בעניין. החשש של המלחת מי תהום בקידוחים הינו משמעותי במיוחד לאור התוצאות של עלית המליחות בקידוח ארבל, אם כי לא ברור אם עלית המליחות היתה תוצאה של סחיבת התמלחת של הכנרת לכיוון מערב או בגלל עלית תמלחת מקומית כתוצאה מההפקה. בכל מקרה, ברור כי יש צורך להתייחס בזהירות לתוצאות התרחישים, במיוחד לאלו של המקרים הקיצוניים ביותר ובתקופות שלאחר זמן הרצה ארוך, מכיון שהמודל אינו מכויל לתנאים אלו.

## 2. מגבלות ויתרונות המודל התלת מימדי

מגבלות – מגבלות המודל נובעות בעיקר מחוסר בנתונים ומקושי להתמודד עם מערכת הידרוגיאולוגית מורכבת כל כך במודל נומרי תלת מימדי.

הנתונים החסרים היו: המליחות של התמלחות בעומק, מיקום התמלחות ומנגנון עליתן, המבנה סטרוקטורלי המדויק של השכבות והשברים והתכונות ההידראוליות שלהם. במיוחד חסר ידע על התכונות ההידראוליות של השברים, שזו נקודה בעייתית שעדיין לא נפתרה גם בעבודות רבות אחרות העולם. למרות חוסר הידע, לעתים אפילו ברמה של סדרי גודל, הצבת המודל דורשת נתונים של כל הפרמטרים הללו שהוכנסו לפי מיטב הידע הקיים.

בעניין המידול הקשיים היו בעיקר בהתמודדות עם מבנה סטרוקטורלי כל כך מורכב, דבר שגרם לאי שמירה על עובי השכבות ואף אפשרות מעבר מסה משכבה אקוויפריית אחת לשניה דרך שכבה אקוויקלודית באופן שלא קיים בשדה. אילוף זה דחף לעבודה עם מבנה סטרוקטורלי מופשט יותר למרות שהיו נתונים סטרוקטורליים מדויקים יותר. בגלל בעיות נומריות היה אילוף לעבוד עם ערכי דיספרסיביות גבוהה, דבר שגרם למריחה של גרדיאנטי המליחות וחוסר יכולת לכייל היטב את הסיגנל השנתי ועונתי של המליחות. בגלל הדיספרסיה הגבוהה, ניתן להתייחס למליחות מי תהום בקידוחים רק ברמה של סדר גודל ולא ניתן לסמוך על עליית מליחות קטנה בקידוחים.

יתרונות – המודל הנוכחי מתאר את המצב ההידרוגיאולוגי התלת מימדי עם פחות הפשטה לעומת מודלים דו מימדיים. כך לדוגמא, המודל מאפשר התייחסות לזרימה מתכנסת, כפי שקיימת במערב הכנרת המתכנסת לשני אזורי המעיינות (פוליה וטבחה), דבר שלא אפשרי במודל דו מימדי. המודל מאפשר תיאור נכון יותר של יחסי השדה בין גופי המים השונים, כולל יחסי פן ביני בין הגוף המלוח במזרח והגוף המתוק במערב. המודל התלת מימדי הזה יאפשר בדיקה של השפעה של פעולות ספציפיות באזורים מוגבלים בעלי עניין.

לראיה, ניתן היה לכייל את המודל לפי הנתונים והידע הקיים ולקבל התאמה סבירה עם נתוני השדה. כלומר, הצלחנו לתאר באופן סביר את מערכת הזרימה וההסעה התלת מימדית.

### 3. המלצות להמשך

כדאי יהיה לשוב למיפוי הסטרוקטורלי המפורט, אולי רק באזורים מסוימים. המעבר למיפוי הפחות מפורט נעשה לאחר כשנה שבה ניסינו לכייל את המצב ההידרולוגי במודל זרימה להסעת מלחים ללא הצלחה מספקת. במיפוי הסטרוקטורלי המפורט היו מצבים שבהם השכבות השונות היו דקות מאוד והגיעו לעוביים כמעט אפסיים ויצרו חיבורים בין אקוויפרים שונים ובין גופי מים במליחיות שונות באופן שלא קיים במציאות ולכן לא ניתן היה לכייל לפי הנתונים הקיימים. כאמור, ייתכן כי במצב הידע הקיים על הרצת מודל מהסוג הזה, ניתן יהיה לכייל גם עבור מפה סטרוקטורלית מפורטת יותר, אולי רק עבור אזורים ספציפיים בעלי עניין מיוחד. סביר להניח גם כי השיפור הצפוי באפשרויות המידול והמחשוב יאפשר גם הוא התמודדות טובה יותר עם הבעיות שהתמודדנו בפרויקט הנוכחי.

מתוצאות ההרצות של מרבית התרחישים נמצא כי חזויה ירידה גדולה של מפלסים באזור המערבי. ירידה גדולה יחסית (אם כי לא יותר מ- 30-40 מטר) התקבלה באזורים אלו גם בשלב הכיול, בעוד שבמציאות כמעט לא הובחנה ירידת מפלסים בקידוחים. כלומר, המודל אינו מדמה מספיק טוב את האזור הזה. אפשר להניח שחלק מהמים החסרים היו אמורים להגיע ממערב, מאגן נעמן. כדי לבדוק את הנושא ניתן לעשות שני דברים:

א. להכניס באופן מלאכותי תרומת מים מהגבול המערבי ולראות אם זה מדמה נכון יותר את מפלסי מי תהום. בדיקה ראשונית שנעשתה מראה כי הכנסת כמות של כ- 6 מלמ"ק/שנה גורמת לכך שלא תהיה ירידת מפלסים משמעותית.

ב. כדאי גם לבדוק באופן קונספטואלי את החיבור בין אגן הכנרת לאגן נעמן. בדיקה של חתכים הידרוגיאולוגיים תאפשר חשיבה לגבי אפשרות זו. לאחר בדיקה קונספטואלית כזו, אפשר יהיה לחשוב על פרויקט נוסף של סימולציות של כל האזור מהכנרת עד לים תיכון.

הרצה במודלים מתקדמים יותר – עדיף להמשיך בוורסיות חדשות של תוכנת ה-FEFLOW בגלל פשטות ההרצה וההמשכיות של העבודה. אבל, צריך לבדוק גם אפשרות למעבר לתוכנה אחרת, אם תימצא תוכנה שמיטיבה להתמודד עם המצב ההידרוגיאולוגי המורכב באזור הכנרת. מודל כזה יאפשר אולי גם שימוש בערכי דיספרסיביות נמוכים יותר ולכן גם התאמה טובה יותר לנתוני השדה העונתיים של המליחות.

חשוב לשמור על רצף של עבודה עם המודל בעתיד – כלומר לשמור על קבוצת עבודה שתבדוק את הנתונים המדודים בעתיד מול תחזיות המודל ותעדכן את המודל, גם בעזרת קידוחים חדשים. קבוצת עבודה זו תוכל גם לבדוק תרחישים נוספים בהתאם לבקשות של רשות המים. לצורך זה כדאי לשמור על וועדת ההיגוי כגוף שיבקר וינחה את קבוצת העבודה גם בעתיד.

אחד התרחישים שצריך להיבדק שוב הוא של ההבדל בין שני המקרים של שאיבות המרוכזות שעיקרן באקוויפר העליון לעומת אלו המרוכזות בתחתון. כאמור לעיל, תוצאות ההרצות שנעשו עד עכשיו אינן מספיק ברורות ודורשות חיזוק ואימות.

אחד הנושאים שלא נבדק עד כה וחשוב שייבדק בעתיד הוא ההשפעה האפשרית של הגברת הפקה על מליחות מי תהום באזורים השונים של אגן פוליה טבחה. ברור כי הפקה מסיבית יכולה לגרום לסחיבה של תמלחת ממזרח או מהעומק וחשוב להעריך את משמעות תהליכים אלו.

גם בעתיד כדאי להמשיך לבדוק את המצב בשני המודלים (מודל התאים והמודל התלת מימדי) ולהשוות בין תוצאות שניהם, אם כי ברור שלא ניתן לקבל תוצאות זהות בגלל ההבדלים הבסיסיים בהנחות שני המודלים.

## ו. הבעת תודה

לבת שבע כהן ונילי אלמוג ממחלקת השרטוט של המכון הגיאולוגי על העזרה הרבה בהכנת השרטוטים לדוח.  
לאביחי חדד ועדי טל מהשירות ההידרולוגי על הלווי הצמוד, ההערות הבונות בכל שלבי העבודה שעזרו לחדד ולשפר את תוצרי העבודה.  
לגבי ויינברגר, מנהל השירות ההידרולוגי, על הניהול של וועדת ההיגוי ושיתוף הפעולה לאלון רימר מחקר ימים ואגמים, ישראל גב מרשות המים ויוסי גוטמן ממקורות, על הנכונות להקשיב ועל ההערות הבונות במהלך העבודה  
לולדימיר ליחובסקי ואיל שלו, מהמכון הגיאולוגי, על העצות והנכונות לעזור בכל שלבי ההרצה של המודל הנומרי.  
לשירות ההידרולוגי (רשות המים) על המימון של עבודה זו.

## ז. רשימת ספרות

- אבלסון, מ., סנה, ע., רוזנפט, מ., בורשסקי, א., שליב, ג., וולמן, ס., 2009. שחזור מבנה שכבות הסלע בגליל – קרטיקון תחתון עד הווה – עבודת פרויקט כלנית. המכון הגיאולוגי, ירושלים, 14 עמ' + מפות.
- ביין, ע., 1967. ההידרוגיאולוגיה של הגליל המרכזי-מזרחי. עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- ביין, ע., 1999. תהליכי ההמלחה בכנרת והשלכתם על מדיניות תפעול האגם וניצול מי התהום בשוליו. מים והשקיה, גליון 397, עמ' 3 - 12.
- בן-גיא, י., רזניקוב, מ., 1997. סקר סיסמי רב ערוצי בכנרת (שלב א). דו"ח מג"י 733/167/97.
- ברגלסון, ג., 1997. המעיינות המלוחים באגן הכנרת. עבודת דוקטור, 69 ע' + תרשימים ונספחים.
- ברגר, ד., רום, מ., טלטש, ב., 2008. מאזני מים, מלח ואנרגיה של הכנרת 2006/07. יחידת המעבדות ואגן הכנרת, מקורות. 36 עמ'.
- בר יוסף, י., מיכאלי, א., וולמן, ס., 1997. תכנון הידרולוגי של הפקה מאגן הנעמן, דו"ח מסכס. אן. אר. די. דו"ח NR/22/97, תל אביב.
- גוטמן, י., רוזנטל, א., 2002. קידוח שימרון 6, סיכום ממצאים ראשוניים. מקורות, דו"ח מס' 752, תל אביב, 7 ע' + נספחים ותרשימים.
- גולדשטוף, י., אברבך, ש., מיכלסון, ח., 1981. אגן חיטין – נטופה – נעמן. הצבה וכיול של מודל זרימה לאקוויפר חבורת יהודה. דו"ח תה"ל, 01/81/87, תל אביב.
- זלצמן, ע., 1964. הגיאולוגיה של אזור טבחה – חוקוק – מגדל. תה"ל, פ"מ 374, תל אביב.
- טל, ע., חן, ש., מינץ, י., כחלון, א., 2009. סיכום סקרי מעיינות בחוף המערבי של הכנרת, 2008. השירות ההידרולוגי, ירושלים, 19 ע' + טבלאות.
- טל, ע., רימר, א., 2008. אמדן נפח ועומס מלח שנתי מהמעיינות המלוחים בכנרת – סיכום סקרי מעיינות. רשות המים, השרות ההידרולוגי, ירושלים. 30 עמ'.
- כהנוביץ, א., מירו, פ., 1973. הזרימות המלוחות לכנרת. דו"ח תה"ל, 01/73/26, תל אביב, 54 ע'.
- כפרי, א., קסלר, א., 2001. תכנית תכנון הידרוגיאולוגי לפיתוח הפקה וניצול באגן כברי. דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/36/2001, ירושלים, 106 ע'.
- מיכאלי, א., שהרבני, מ., בלנק, ד., (גיאולוגיה- מיכלסון, ח., יחסי גשם נגר – בן צבי, א.), 1973. פתוח וכיול מודל זרימת מי תהום באגן הנעמן. דו"ח תה"ל 01/73/29, תל אביב, 45 ע' + תרשימים.
- מיכלסון, ח., 1975. הפקת מים מתוקים מאבני החול והגיר מגיל קרטיקון תחתון בגליל. דו"ח תה"ל 01/75/59, תל אביב.
- מירו, פ., סימון, א., 1988. מודל דימוי סימולטאני של כניסת מים ומלח לכנרת, דו"ח תה"ל, אגף למשאבי מים והנדסת סביבה 01/88/02. 22 עמ'.
- מרכזו, א., מירו, פ., 1985. הזרימות המלוחות לכנרת, דו"ח התקדמות מס' 2, סימולציה של נביעות הפוליה כדגם של הזרימות המלוחות לכנרת. תה"ל, 01/85/23, תל אביב, 57 ע'.
- פליישר, ע., 1969. אספקטים הידרוגיאוכימיים של מי תהום באיזור הכנרת. דו"ח הידרו/1/69, המכון הגיאולוגי, ירושלים. 25 עמ'.
- קליין, ע., 1999. מאפיינים גיאוכימיים והידרולוגיים של המעיינות המלוחים במערב הכנרת. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 116 ע' + נספחים.
- קסלר, א., שליב, ג., 2008. ניתוח הידרולוגי של שפיעת המלח לכנרת, דו"ח התקדמות מס' 1, הצבת בסיס נתונים הידרולוגי. הנדסת סביבה ומשאבי מים (2002) בע"מ, חיפה. 16 ע'.
- קסלר, א., ביין, ע., 2010. ניתוח הידרולוגי של שפיעת המלח לכנרת, דו"ח התקדמות מס' 2, הצבה וכיול מודל תאים הידרולוגי. הנדסת סביבה ומשאבי מים (2002) בע"מ, חיפה. 58 ע'.
- קסלר, א., 2011. ניתוח הידרולוגי של שפיעת המלח לכנרת, דו"ח התקדמות מס' 3, הרחבת מודל התאים והרצת תרחישי הפקה. הנדסת סביבה ומשאבי מים (2002) בע"מ, חיפה. 58 ע'.

קסלר, א., רימר, א., 2003. השפעת מפלס הכנרת על שפיעת המעינות התת-ימיים באזור פוליה. הנדסת סביבה ומשאבי מים (2002) בע"מ, חיפה. 38 ע'.

קסלר, א., כפרי, א., מרגולין, א., קסלר, נ., 2006. הפקת מים באגן נעמן – כורדני, הצבת מודל תפעולי. הנדסת סביבה ומשאבי מים (2002) בע"מ, חיפה, 83 ע'.

רימר, א., 1996: מליחות הכנרת, הערכת מאפייני השפיעות המלוחות שאינן נמדדות. יחידת אגן ההיקוות, מקורות-חבל הירדן.

רימר, א., 2008: השפעת שינויים במשטר הניצול של האקוויפרים בגליל המזרחי על השפיעה והמליחות של מעיין הסרטנים בטבחה. חקר ימים ואגמים לישראל, T13/2008, מוגש לרשות הטבע והגנים.

רימר, א., הורוביץ, ש., 1997. מנגנון שפיעת מים ומלח ממעינות החוף המערבי של הכנרת. יחידת אגן ההיקוות, חבל הירדן, מקורות. 65 ע'.

שכנאי, ע., 1990. מפעל עמק מרכזי, ניתוח בעיות ההפקה וההמלחה במרכז ובדרום אגן חיטין – נטופה – נעמן. דו"ח תה"ל, 01/90/32, תל אביב, 34 ע'.

שליב, ג., 1980. אגני בית שאן והשומרון המזרחי, עדכון המודל ההידרוגיאולוגי. תה"ל ת"א, דו"ח 01/80/51, 82 ע'.

שליב, ג., 1991. שלבים בהתפתחות הטקטונית והוולקנית של האגן הנאוגני בגליל התחתון ובעמקים. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים (1989), דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/11/91, 100 ע'.

שליב, ג., 2000. אקוויפר הבזלת בגליל התחתון המזרחי – אפשרויות להגדלת פוטנציאל הפקת מי תהום. דו"ח התקדמות לסיכום שנה ראשונה, מוגש לנציבות המים, חוזה מחקר 067/99, 46 ע' ונספחים.

שליב, ג., 2006. עדכון הידע ההידרוגיאולוגי לאגן עינן בגליל העליון המזרחי והצעות לפיתוח ההפקה, דו"ח מס' 1 (טיוטה). מוגש לנציבות המים, אגף התכנון (הזמנה 193/04), 33 ע' + נספחים.

Abbo, H., Shavit, U., Markel, D., Rimmer, A., 2003. A numerical study of the fractured regions on lake/groundwater interaction; the Lake Kinneret (Sea of Galilee) case. J. Hydrology 283: 225-243.

Bergelson, G., Nativ, R., Bein, A., 1999. Salinization and dilution history of ground water discharging into the Sea of Galilee, the Dead Sea Transform, Israel. Applied Geochemistry 14: 91-118.

Diersch, H.-J.G., Feflow 5.4 – Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System User's Manual. DHI-WASY, GmbH. Berlin, Germany. 2009.

Doherty, J., PEST – Parameter Estimation Module, version 2.1. Watermark Computing, Corinda, Australia. 1995.

Goldschmidt, M.J., Arad, A., Neev, D., 1967. The mechanism of the saline springs in the Lake Tiberias depression. Geo. Surv. Israel, Bull. 45.

Gvirtzman, H., Garven, G., Gvirtzman, G., 1997. Hydrogeological modeling of the saline hot springs at the Sea of Galilee, Israel. Water Resour. Res. 33: 913-926.

- Hall, J.K., The 25-m DTM (Digital Terrain Model) of Israel. *Israel Journal of Earth Sciences*. Vol 57, no.3-4, 2008.
- Hurwitz, S., Goldman, M., Gvirtzman, H., 1999. Geophysical (TDEM) delineation of a shallow brine beneath a fresh-water lake, the Sea of Galilee, Israel, *Water Resour. Res.* 35: 3631-3638.
- Hurwitz, S., Garfunkel, Z., Ben-Gai, Y., Reznikov, M., Rotstein, Y. and Gvirtzman, H. 2000a. The tectonic framework of complex pull-apart basin: The Kinarot-Beit-Shean Basin, Dead Sea Transform. *Tectonophysics*, 359: 289-306.
- Hurwitz, S., Lyakhovsky, V. and Gvirtzman, H., 2000b. Transient salt transport modeling of a shallow brine beneath a fresh water lake, the Sea of Galilee, *Water Resour. Res.* 36:101-107.
- Hurwitz, S., Stanislavsky, E., Lyakhovsky, V. and Gvirtzman, H., 2000c: Transient groundwater-lake interactions in a continental rift: Sea of Galilee, Israel, *GSA Bull.* 112; no 11; p1694-1702.
- Israel Meteorological Service, Precipitation map of Standard Normals for the Period 1961-1990, 1990.
- Kafri, U., Arad, A., 1979. Current subsurface intrusion of Mediterranean seawater – A possible source of groundwater salinity in the rift valley system, Israel. *J. Hydrology* 44: 267-287.
- Kafri, U., Arad, A., 1978. Paleohydrology and migration of the groundwater divide in regions of tectonic instability in Israel. *J. Geol. Soc. Am. Bull.* 89: 1723-1732.
- Rimmer, A., Hurwitz, S. and Gvirtzman, H., 1999. Spatial and temporal characteristics of saline springs.: Sea of Galilee, Israel. *Ground Water*, 37: 663-673.
- Yeichieli, Y., Kafri, U., Wollman, S., Lyakhovsky, V. and Weinberger, R., 2007. On the relation between steep monoclinial flexure zones and steep hydraulic gradients. *Ground water* 45: 616-626

## ח. נספחים

### נספח ח1. הסבר על התפלגות ערכי המוליכות ההידראולית (HC) באזורים השונים של המודל

באופן כללי, ערכי המוליכות ההידראולית מופיעים באיור 8 ומוסברים בקצרה בטקסט של הדוח. להלן הרחבה של ההסברים על פוליגונים נוספים שבהם הוצבו ערכים שונים מהערכים בכלל האגן (ערכי הרקע Background K):

1. אזור רינה – כדורי בו נמצאו ערכים נמוכים באקוויפר חבורת יהודה התחתון בשאיבות ניסיון.
2. "מחסום גולני", בו הוצבו ערכים נמוכים כדי לקבל את גרדינט המפלסים החרף שנמצא בקידוחי צומת גולני.
3. "מסדרון מעבר" ממערב למחסום גולני, בו הוצבו ערכים גבוהים ביחידות של דיר חנה ואקוויפר יהודה התחתון כדי לאפשר מעבר המים מאזור בקעת בית נטופה ובקעת תרען לצפון-מזרח.
4. אזור חיטין – כלנית, בו הוצבו ערכים גבוהים במיוחד כדי לקבל אזור בו גרדינט המפלסים המדודים מינימלי ובהתאמה לספיקות היחסיות שהתקבלו בקידוחים.
5. אזור קער מגדל (או קער ארבל – כחל, על שם הקידוחים), בו הוצבו ערכי מולכות נמוכים בשני סדרי גודל מערכי הרקע כדי לקבל את מפל המפלסים (המדודים) בין אזור קידוחי כלנית לבין אזור חוף הכנרת.
6. הגוש שמדרום להעתק ארבל (אזור רמת פוריה ובקעת יבנאל) שם אקוויפר חבורת יהודה קבור בעומק גדול. הוצבו בו ערכי מוליכות נמוכים, כדי לקבל זרימה קטנה לעבר חמי טבריה ובהתאם להנחה שבאזור זה זרימת מי התהום היתה קטנה מאז שנוצר בסיס ניקוז באגן הכנרת ולכן לא היתה בו התפתחות של נתיבי זרימה קרסטיים.
7. אזור האגם במזרח (הפוליגון המזרחי), הכולל את אזורי 3 קבוצות המעיינות טבחה, פוליה וחמי טבריה. באזור זה נלקח ערך המוליכות באקוויפר חבורת יהודה התחתון נמוך בסדר גודל מהערך באקוויפר חבורת יהודה העליון כדי לקבל באקוויפר העליון זרימה גדולה בסדר גודל מזו באקוויפר התחתון.

נספח ח2. הפקות בקידוחים בתרחישים השונים

טבלה 1 - הפקות ממוצעות בתרחיש 1

תרחיש 1 - חלופה אפס - הפקה 2010

שם	מספר	אקויפר	אגן	כלוא/פריאטי	הפקה 2009/2010(מ"ק)
מק הסוללים 1	24017101	עליון	פוליה	פריאטי	0.0
נטופה-5 קד.	24117801	תחתון	פוליה	פריאטי	1.1
מק כפר קנה 1	24117901	תחתון	פוליה	פריאטי	1.0
מק צומת גולני 1	24118701	תחתון	פוליה	כלוא	1.4
מק צומת גולני 3	24118801	תחתון	פוליה	כלוא	1.2
מק נטופה 6	24217303	תחתון	פוליה	פריאטי	3.2
מק ציפורי 2 א	24217601	עליון	פוליה	פריאטי	2.3
מק צומת גולני 2	24218901	תחתון	פוליה	כלוא	0.4
מק נטופה 4	24317901	תחתון	פוליה	פריאטי	1.7
מק נטופה 1	24318001	תחתון	פוליה	פריאטי	2.5
מק נטופה 2	24517401	עליון	פוליה	פריאטי	4.6
מק ארבל 1	24519601	תחתון	פוליה	כלוא	
מק חיטין 4	24619101	עליון	פוליה	כלוא	0.3
מק חיטין 1	24619201	עליון	פוליה	כלוא	0.5
מק חיטין 3	24719301	עליון	פוליה	כלוא	0.4
מק חיטין 5	24819201	תחתון	פוליה	כלוא	0.3
מק כלנית 5	25018901	תחתון	פוליה	פריאטי	1.5
מק כלנית 6	25018902	עליון	פוליה	פריאטי	2.0
מק כלנית 2	25219201	תחתון	פוליה	פריאטי	0.9
מק כלנית 3	25219202	עליון	פוליה	פריאטי	0.1
מק כלנית 1	25319101	תחתון	פוליה	פריאטי	1.1
מק חזון 2	25418501	תחתון	טבחה	פריאטי	0.6
מק כלנית 4	25419401	עליון	טבחה	פריאטי	1.1
מק כלנית 7	25419402	תחתון	טבחה	פריאטי	3.4
מק כחל 1	25419901	תחתון	טבחה	כלוא	0.5
מק חזון 1 נחל צלמון	25518501	תחתון	טבחה	פריאטי	0.5
מק נחל עמוד 1	25719501	תחתון	טבחה	פריאטי	0.3
כחל 2	25419902	עליון	טבחה	כלוא	
לבנים 2	25119502	עליון	טבחה	כלוא	
נחל עמוד 2		תחתון	טבחה	פריאטי	
חיטין 6	24619202	תחתון	פוליה	כלוא	
<b>סה"כ</b>					<b>32.6</b>

Tel Adashim + Iksal + Shimron = 5.0

**נספח ח2 המשך,**  
טבלה 2 הפקות ממוצעות בתרחיש 2

תרחיש 2 - הפקה מירבית

שם	מספר	אקויפר	אגן	כלוא/פריאטי	הפקה (מ"ק)
מק הסוללים 1	24017101	עליון	פוליה	פריאטי	0.0
נטופה-5 קד.	24117801	תחתון	פוליה	פריאטי	1.1
מק כפר קנה 1	24117901	תחתון	פוליה	פריאטי	1.0
מק צומת גולני 1	24118701	תחתון	פוליה	כלוא	1.4
מק צומת גולני 3	24118801	תחתון	פוליה	כלוא	1.2
מק נטופה 6	24217303	תחתון	פוליה	פריאטי	3.2
מק ציפורי 2 א	24217601	עליון	פוליה	פריאטי	2.3
מק צומת גולני 2	24218901	תחתון	פוליה	כלוא	0.4
מק נטופה 4	24317901	תחתון	פוליה	פריאטי	1.7
מק נטופה 1	24318001	תחתון	פוליה	פריאטי	2.5
מק נטופה 2	24517401	עליון	פוליה	פריאטי	4.6
מק ארבל 1	24519601	תחתון	פוליה	כלוא	1.8
מק חטיין 4	24619101	עליון	פוליה	כלוא	0.3
מק חטיין 1	24619201	עליון	פוליה	כלוא	0.5
מק חטיין 3	24719301	עליון	פוליה	כלוא	0.4
מק חטיין 5	24819201	תחתון	פוליה	כלוא	1.5
מק כלנית 5	25018901	תחתון	פוליה	פריאטי	2.9
מק כלנית 6	25018902	עליון	פוליה	פריאטי	3.5
מק כלנית 2	25219201	תחתון	פוליה	פריאטי	3.9
מק כלנית 3	25219202	עליון	פוליה	פריאטי	0.3
מק כלנית 1	25319101	תחתון	פוליה	פריאטי	1.3
מק חזון 2	25418501	תחתון	טבחה	פריאטי	0.6
מק כלנית 4	25419401	עליון	טבחה	פריאטי	1.5
מק כלנית 7	25419402	תחתון	טבחה	פריאטי	3.6
מק כחל 1	25419901	תחתון	טבחה	כלוא	2.0
מק חזון 1 נחל צלמון	25518501	תחתון	טבחה	פריאטי	0.5
מק נחל עמוד 1	25719501	תחתון	טבחה	פריאטי	0.3
כחל 2	25419902	עליון	טבחה	כלוא	2.0
לבנים 2	25119502	עליון	טבחה	כלוא	1.5
נחל עמוד 2		תחתון	טבחה	כלוא	1.0
חטיין 6	24619202	תחתון	פוליה	כלוא	1.5
<b>סה"כ</b>					<b>50.3</b>

Tel Adashim + Iksal + Shimron = 5.0

נספח ח3. טבלת מעצ הפקה אפשרי בקידוחים באגן טבח-פוליה בעוד 45 שנים לפי תרחיש 2.1

קבוצה	חוקר טכול גוט בסוף תרחיש 2.1	נפילה דינמית	חוקר טכול בסוף תרחיש 2.1	עומק פ מ בסוף תרחיש 2.1	עומק פ מ בסוף כיל	רום פ מ מית בסוף תרחיש 2.1	רום פ מ בסוף כיל	עומק קידוח (מ')	רום פני הקרקע	γ	χ	קיד אקוויפר	שם קידוח בשרות הידרולוגי	זיהוי קידוח בשרות הידרולוגי
בקני	22.5	6.5	28	234	183	-73	-22	262	160.9	731300	227400	400	תל ערדסים 5	23117701
בעייתי	0	0	0	220	169	-73	-22	172	147.3	731350	227970	400	תל ערדסים 1	23117702
בעייתי	0	0.2	0	226	175	-73	-22	149	153.5	731180	228690	400	תל ערדסים 3	23117801
בעייתי	3	40	43	232	181	-73	-22	275	159.2	731830	229190	400	איסל 1	23117901
מלוחץ			391	283	232	-73	-22	674.5	210.1	732578	224385	400	שמרון 6	23217401
בעייתי		?	40	229	178	-73	-22	269	156	732120	230030	400	איסל 2	23218001
לא שואב		לא שואב	279	213	162	-73	-22	492	139.8	733720	220820	400	שמרון 4	23317001
השבת	248	14?	262	218	167	-73	-22	480	144.9	733440	221300	400	שמרון 3	23317102
בעייתי	0	3	0	270	219	-73	-22	252	196.9?	733610	222540	400	שמרון 5	23317201
טוב			89	321	271	-75	-22	410	245.8	734351	223028	400	מק שמרון 7	23417301
לא שואב									292.4	736490	229120	500	מק רינה	23617902
טוב	236	37	273	213	162	-74	-22	486	139.5	740350	221740	400	מק הסוללים 1	24017101
טוב	140?	?	177	249	198	-73	-22	526	176.3	740200	225850	400	מק צפורי 1	24017501
טוב	240	56	296	223	188	-50	-15	519	173.1	741720	228550	500	נטופה-5 קד.	24117801
טוב	195	80	275	220	200	-40	-20	495	179.7	741550	229740	500	מק כפר קנה 1	24117901
בקני	157	30	187	315	295	-120	-100	502	195.1	741500	237270	500	מק צומת גולני 1	24118701
בעייתי	401	56	345	256	231	-155	-130	601	200.7	741596	238569	500	מק צומת גולני 3	24118801
בעייתי	3	33	36	233	185	-73	-25	269	159.8	742010	226490	400	מק צפורי א 2	24217601
בעייתי	200	45	247	399	377	-177	-155	646	222.3	742990	239740	500	מק צומת גולני 2	24218901
בקני	107	30	137	178	158	-20	0	315	158	743330	229730	500	מק טוטה 4	24317901
בקני	89	30?	119	183	163	-20	0	302	163	743990	230700	500	מק טוטה 1	24318001
בעייתי	8	2	10	240	160	-80	0	250	160	745780	224030	400	מק טוטה 2	24517401
מלוחץ								1140	24.4	745146	246408	500	מק ארבל 1	24519601

## נספח חג, המשך

קבוצה	חתי טבול נטו בסוף תרחיש 2.1	נפילה דינמית	חתי טבול בסוף תרחיש 2.1	עומק פ מ בסוף תרחיש 2.1	עומק פ מ בסוף מ כיוול	רום פ מ מס תרחיש 2.1	רום פ מ בסוף כיוול	עומק (מ')	רום פ מ הקרקע	γ	X	קוד אקוויפ- אולוגי	שם קידוח בשרות הידרולוגי	זיהוי קידוח בשרות הידרולוגי
טוב	113	3	116	257	197	-190	-130	373	66.7	746480	241880	400	מק חיסון 4	24619101
בינוני	48	1	49	230	169	-191	-130	279	38.9	746870	242420	400	מק חיסון 1	24619201
טוב	1207	7	143	194	132	-192	-130	501	1.8	747600	243180	400	מק חיסון 3	24719301
טוב	438.6	6.4	445	205	140	-191	-124	650	13.43	748340	242130	500	מק חיסון 5	24819201
טוב						-193	-126						מק חיסון 6	
טוב	236	12	248	232	163	-191	-122	480	40.39	750757	239633	500	מק כלנית 5	25018901
בינוני	96.5	4.5	101	232	163	-191	-122	333	40.85	750850	239600	400	מק כלנית 6	25018902
בעייתי	25.4	5.6	31	234	166	-193	-125	265	41.2	752590	242860	500	מק כלנית 2	25219201
בעייתי	28.8	4.2	33	232	164	-193	-125	265	-39.18	752578	242849	400	מק כלנית 3	25219202
טוב	300	8	308	232	163	-190	-121	540	42	753430	241570	500	מק כלנית 1	25319101
אין חיסוי		1.8						367	129.7	754660	235630	500	מק חסון 2	25418501
אין חיסוי		3.2						352	137.9	755250	235300	500	מק חסון 1	25518501
טוב	108.3	1.7	110	170	100	-193	-123	280	-22.94	754451	244180	400	מק כלנית 4	25419401
טוב	473.7	4.9	478.6	166.4	96.4	-193	-123	645	-26.61	754391	244128	500	מק כלנית 7	25419402
טוב			971	229	179	-190	-140	1200	39	754376	249343		מק כהל	25419901
טוב	502	100	602	243	186	-180	-123	845	63	757700	245620	500	מק נחל עמוד 1	25719501

הערות: יש לקחת בחשבון שלא נבדקו עדיין הנתונים הבאים:

1. יציאת קידוחים בגלל בעיות המלחה - למשל באזור אכסל - תל עדשים- שמרון עומק המסגרות
2. מיקום המסגרות בכל קידוח וקוטרו האגרות בחלק התחתון (מגבלה על הספיקה של הקידוח)
3. חוסר דיוק בחיסוי המפיל במספר אזורים בגלל ריכוזי שאיבה מלאכותיים בזמן ההאבה במודל ובגלל חזרת קידוחים
4. אי התאמה של ערכי השאיבה שהוכנסו על ידי השרות ההידרולוגי, לערכים שניתן לשאוב בפועל בכמה קידוחים

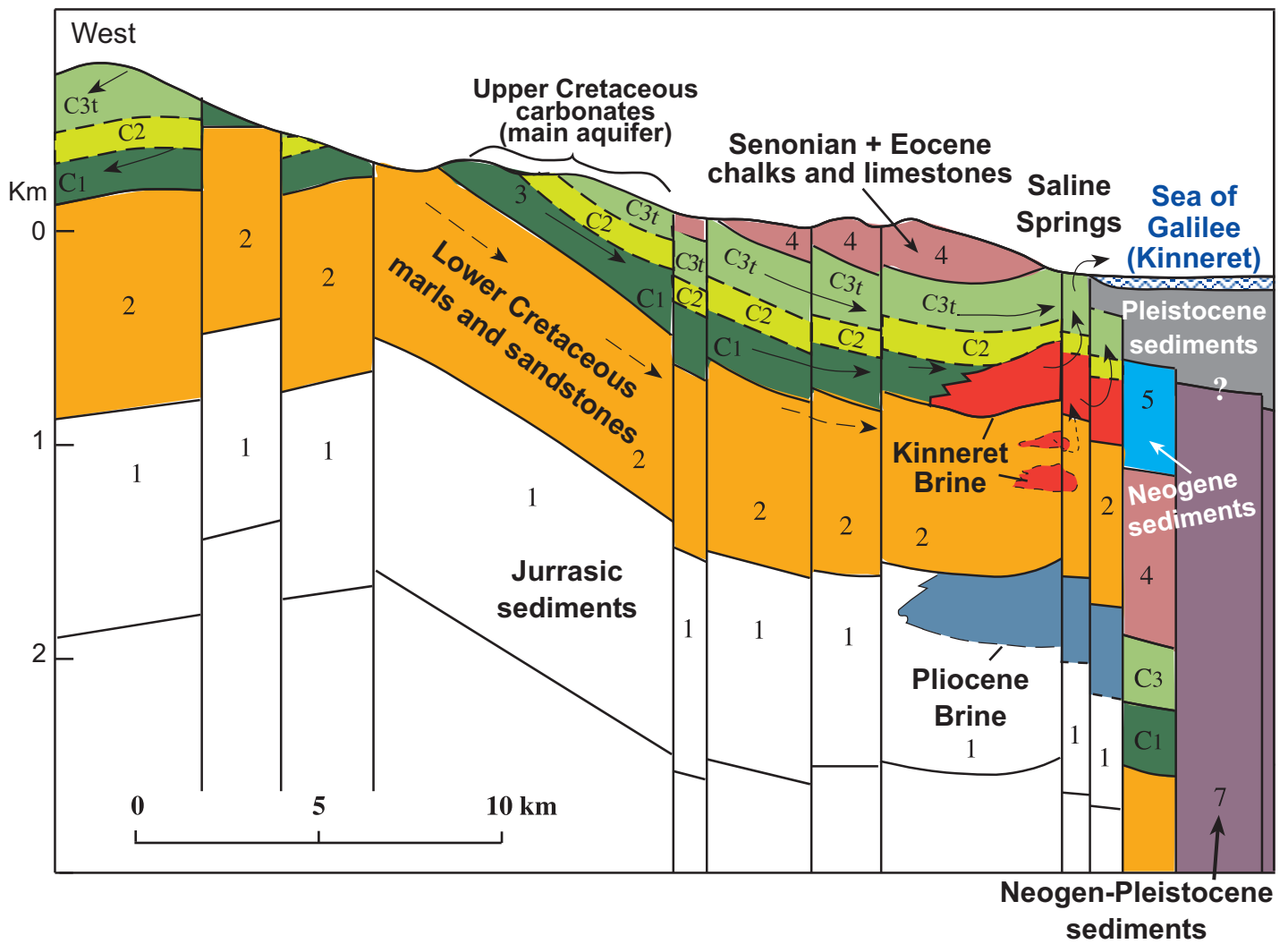
מתוך 34 קידוחים שאובים מתחבורת יהודה

10 בעייתיים

7 במצב בינוני (סביר שהספיקה תרד משמעותית)

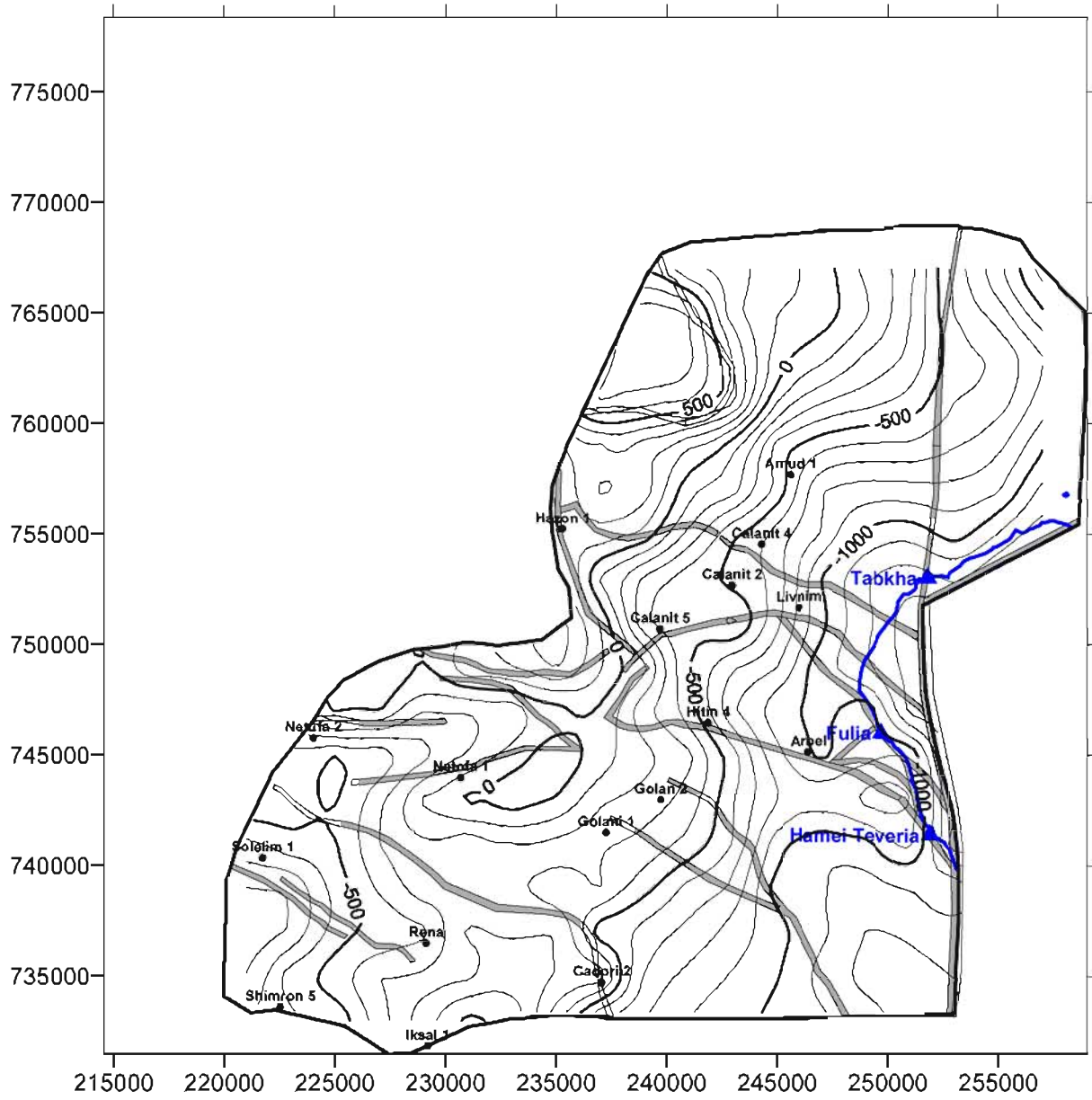
15 איפשרו המשך הפקה, בספיקה דומה לנוכחית





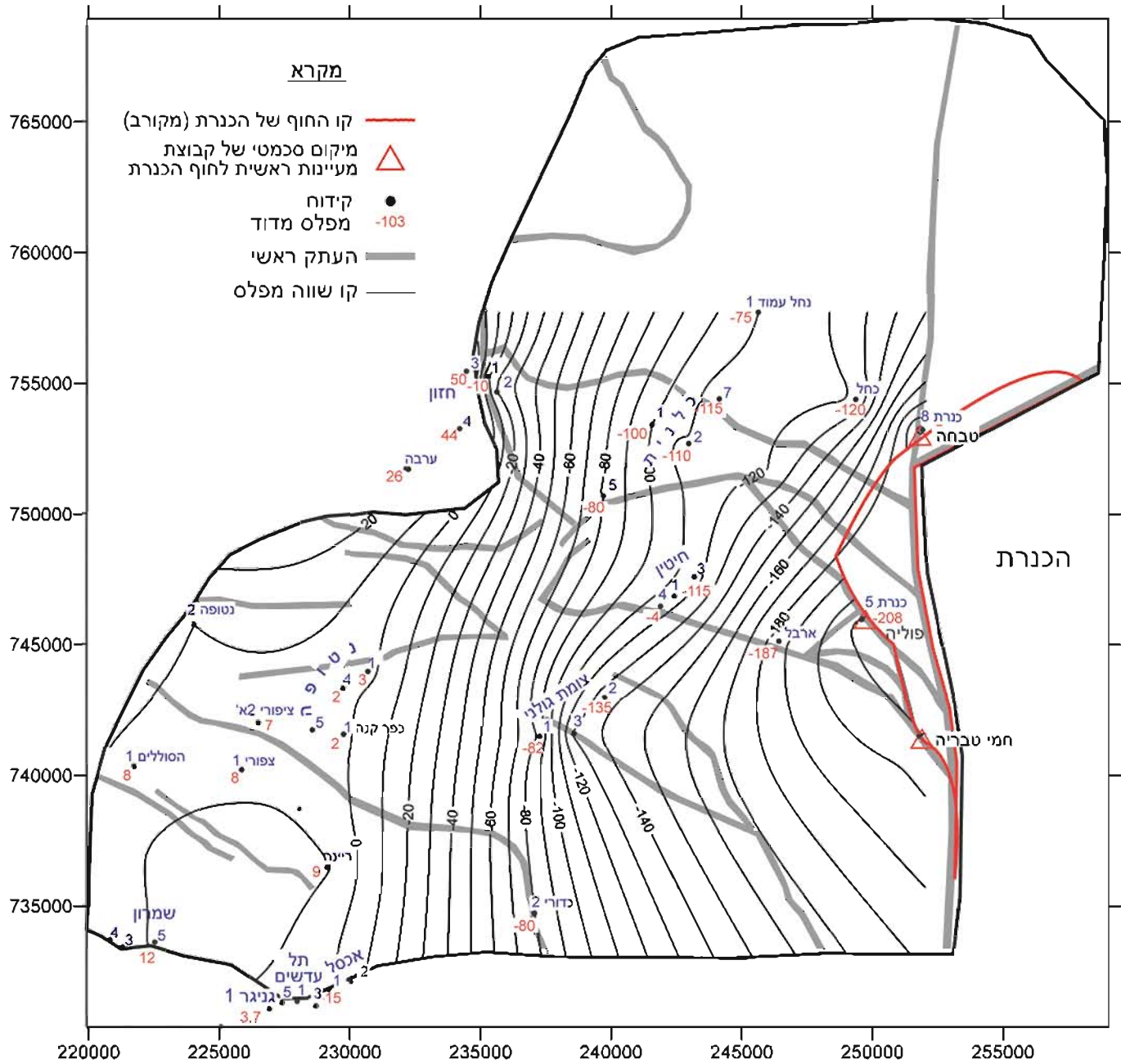
איור 2. חתך הידרוגיאולוגי סכימתי ממרכז הגליל לצפון הכנרת (אחרי ביינן, 1999).



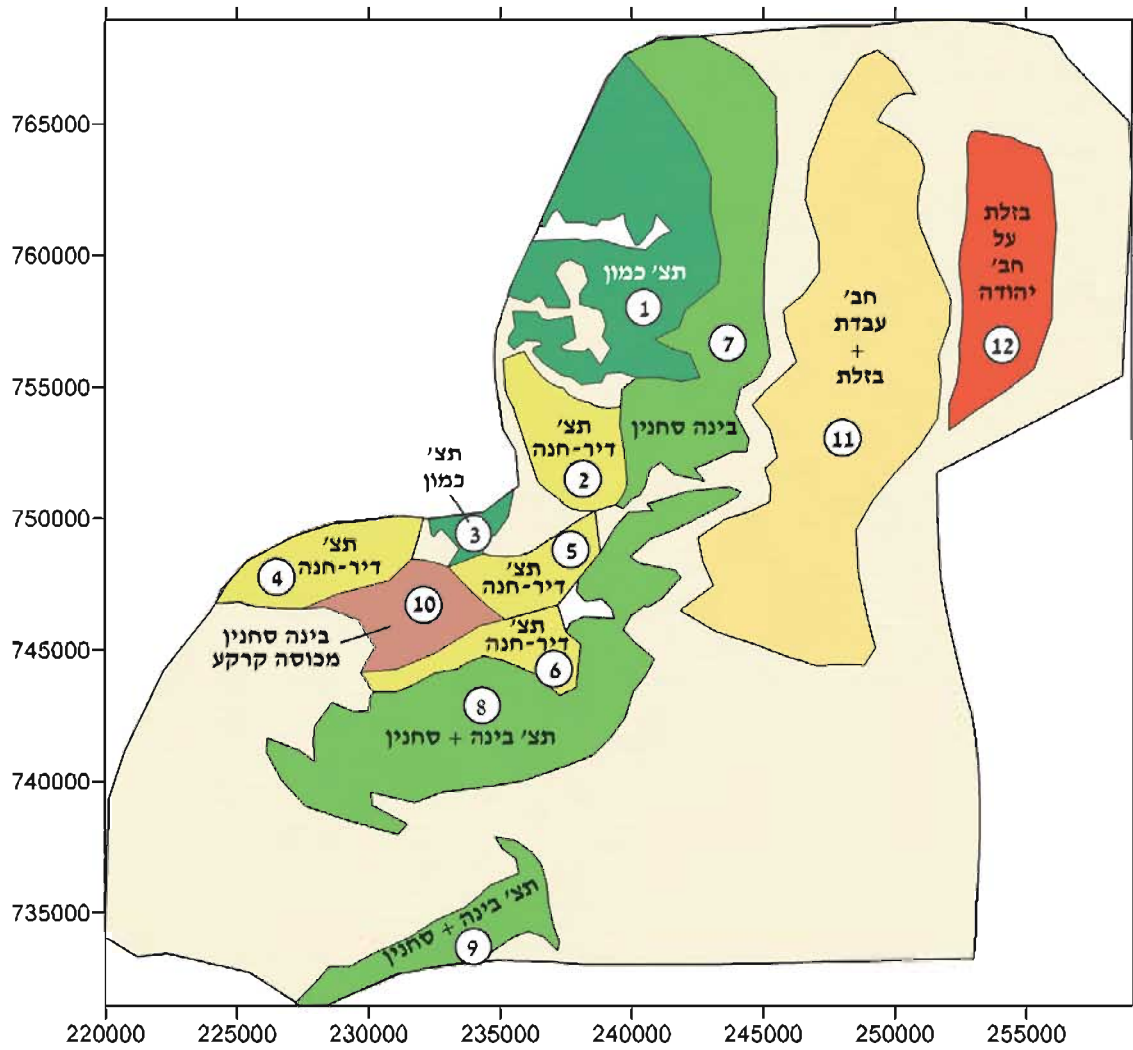


איור 4. מפה סטרוקטורלית ממושטת של בסיס אקוויפר תבורת יהודה.

אגן כלנית  
 מפת מפלסים בחבורת יהודה  
 Steady State



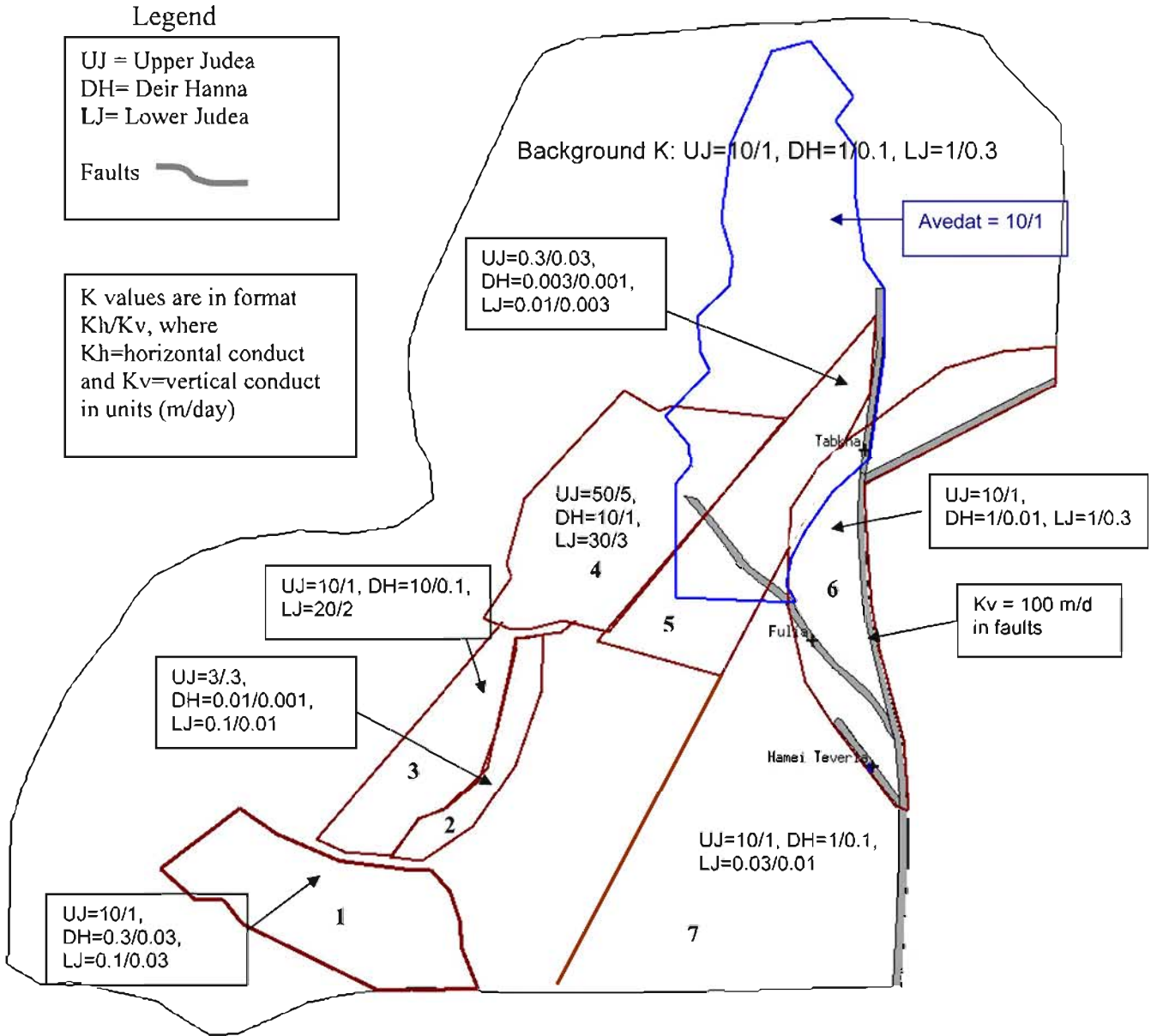
איור 5. מפת מפלסים בחבורת יהודה בתחילת ההפקה (בשנות ה-60), במצב "שווי משקלי". המפה הוכנה בעזרת תכנת surfer ולא לפי התוצאות של הסימולציות. בחלק מהקידוחים הנתונים מאוחרים בהרבה לזמן תחילת ההפקה (למשל בקידוח ארבל, משנת 2008) ונעשתה הערכה מיטבית לגבי הנתונים המתאימים לשנות ה-60.



**איור 6.** מפת אזורי המילוי החוזה מספרי האזורים מתייחסים לפוליגונים של המחשופים, אשר נתונים לנביהם מפורטים בטבלה 7.



## Calibrated Hydraulic Conductivity Regions in Judea and Avedat Groups



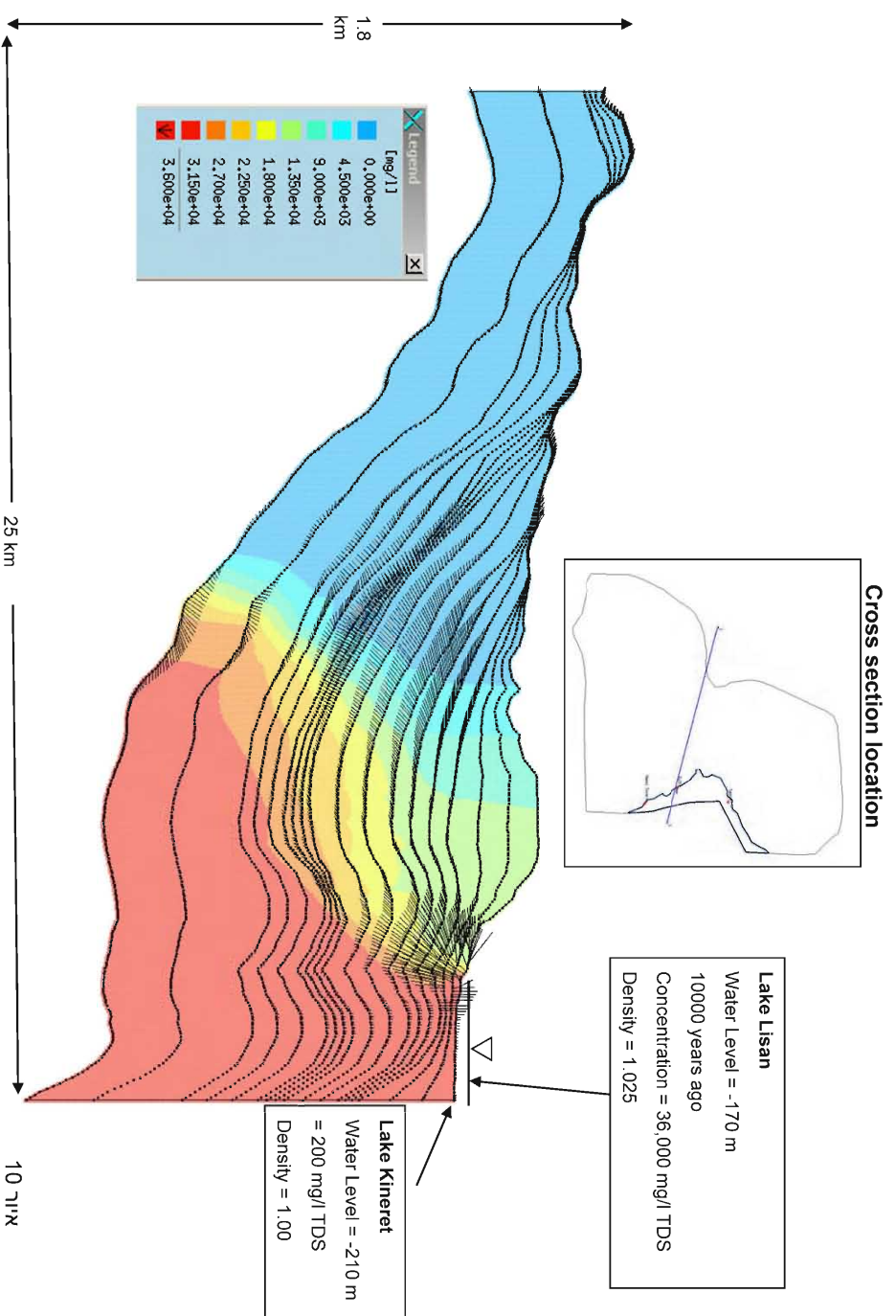
### איור 8. מפת פיזור ערכי המוליכות ההידראולית במודל.

האזורים עם ערכים שונים מ"ערכי הרקע" ( Background ) :

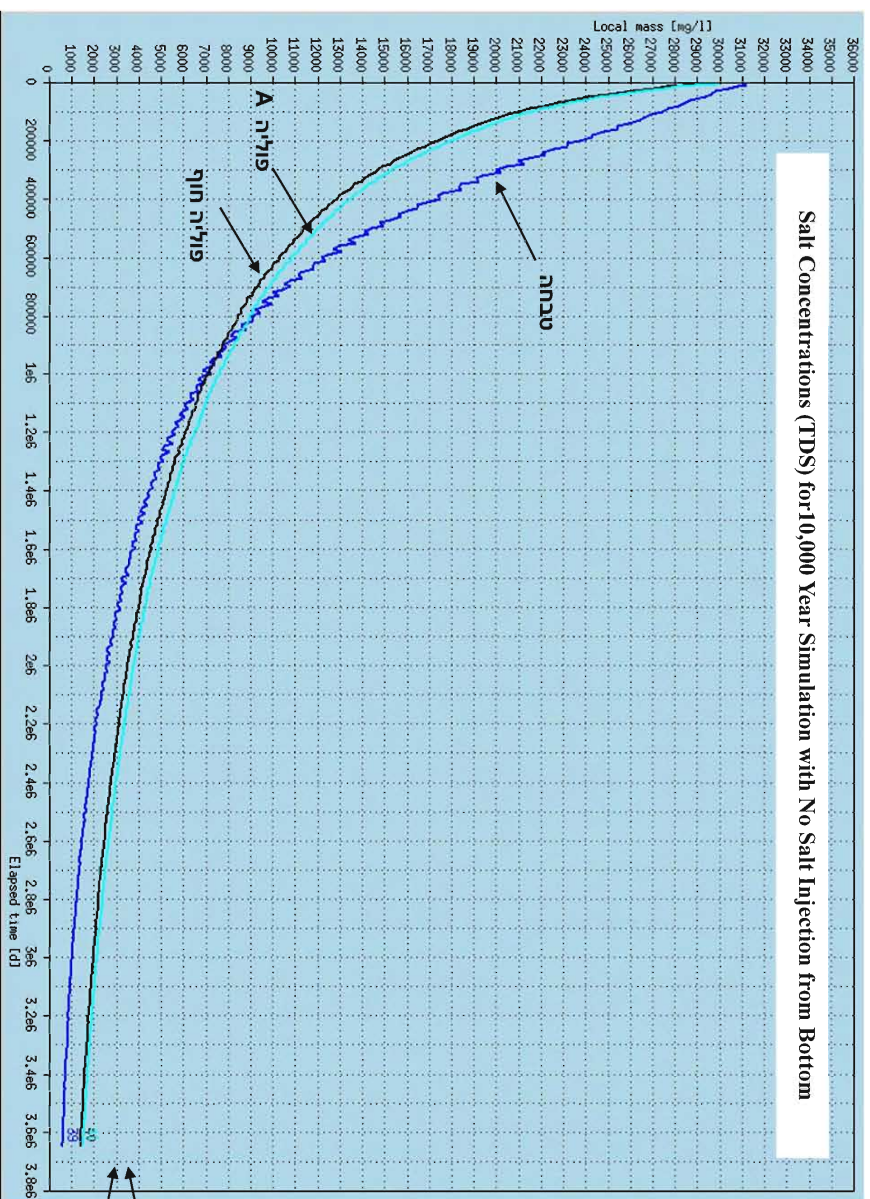
- (1) איזור רינה - כדורי, ערכים נמוכים לפי תוצאות הקידוחים.
- (2) "מחסום גולני" - ערכים נמוכים לפי גרדינט המפלסים המדודים
- (3) "מסדרון" ממערב למחסום גולני, עם מוליכויות גבוהות
- (4) אזור כלנית עם מוליכויות גבוהות לפי תוצאות הקידוחים
- (5) קער ארבל - מגדל עם מוליכויות נמוכות, לפי גרדינט המפלסים בין איזור כלנית לאזור הכנרת
- (6) אזור פוליה ומתחת לאגם הכנרת
- (7) האזור מדרום להעתק ארבל עם מוליכות נמוכה בתת האקוויפר התחתון



## Steady-State Lake Lisan Salt Distribution (TDS) as Initial Condition 10,000 Years Ago

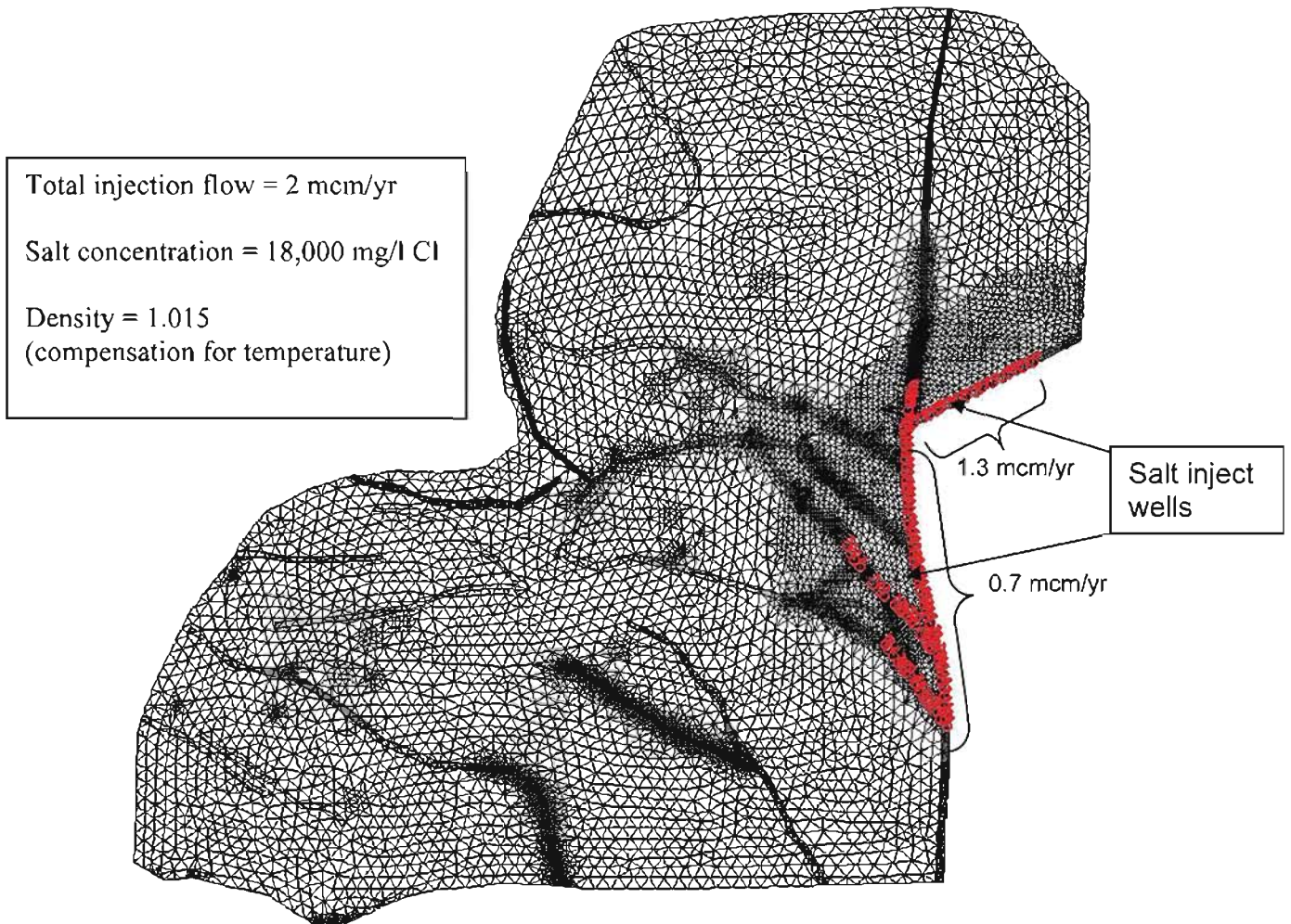


איור 10. חתך הידרוגרפיק באזור פוליה המתאר את פיצור ריכוזי המלחים (TDS) במצב שיווי משקל עם אגם מלוח.

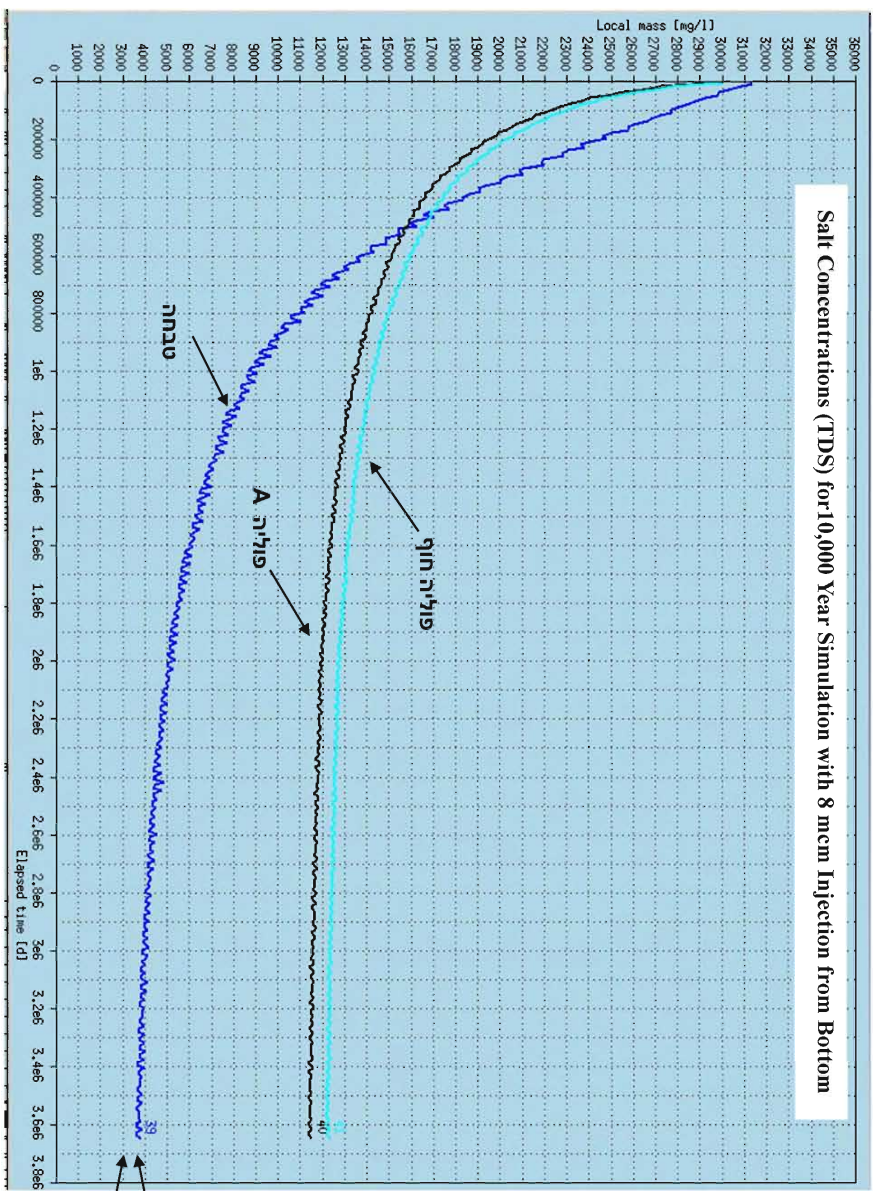


**איור 11.** ירידה מחושבת בריכוזי המלחים במעיינות פוליה וטבתה בשלב השטיפה ללא מקור מלח מתעמק.  
 הערכים המדודים מצויינים בצד ימין של האיור.

## Location of Salt Injection Wells in the Kurnub Formation



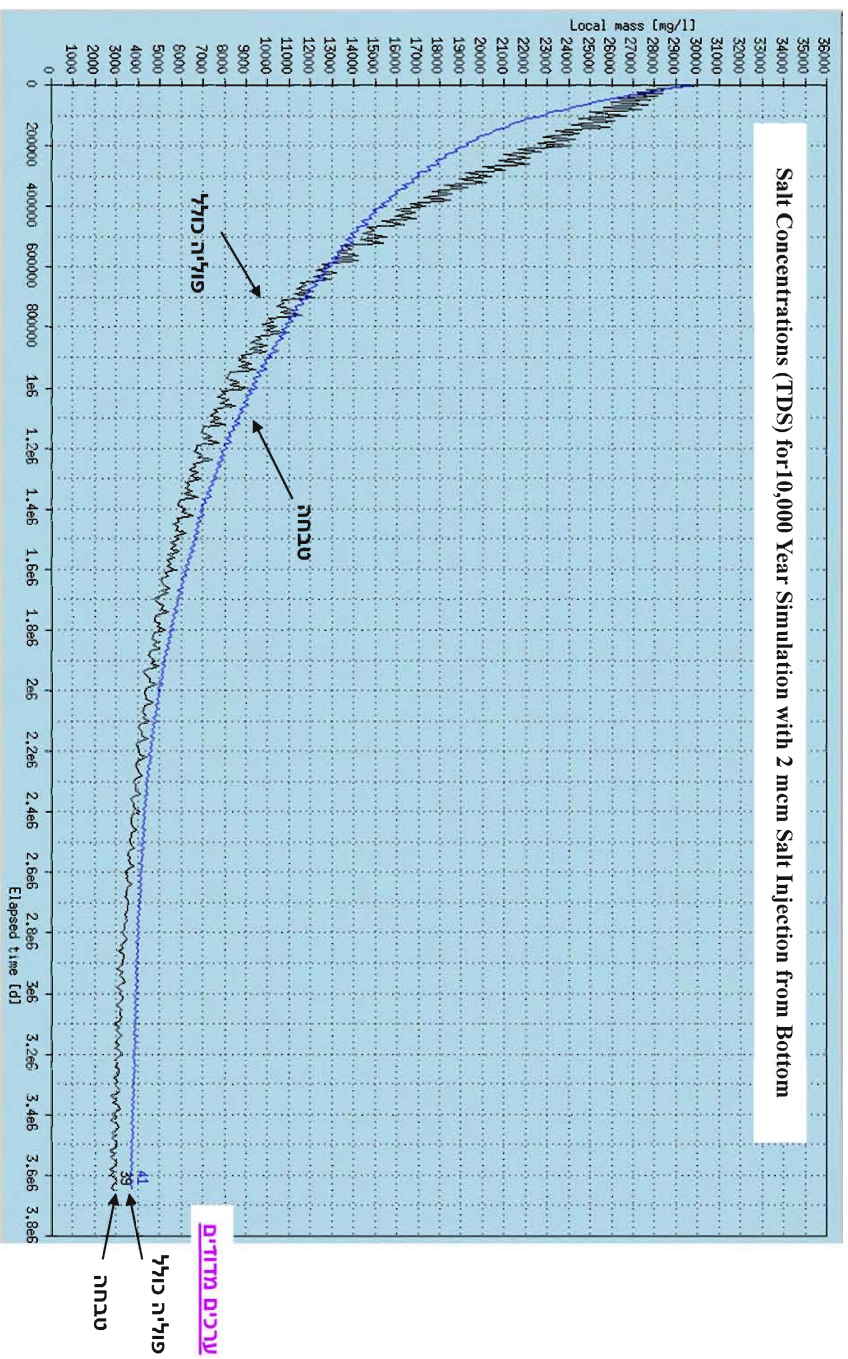
איור 12. מיקום הוספת תמלחת מהעומק לאורך העתקים באזור הכנרת. הסימולציה של החדרת המלח נעשתה באמצעות קידוחי החדרה המפוזרים לאורך ההעתקים הראשיים. התמלחת המוחדרת הינה בריכוז של 36,000 מג"ל (TDS), ובצפיפות של 1.015 (הסבר ראה בפרק ב' 3.2)



**ערכים מדודים**

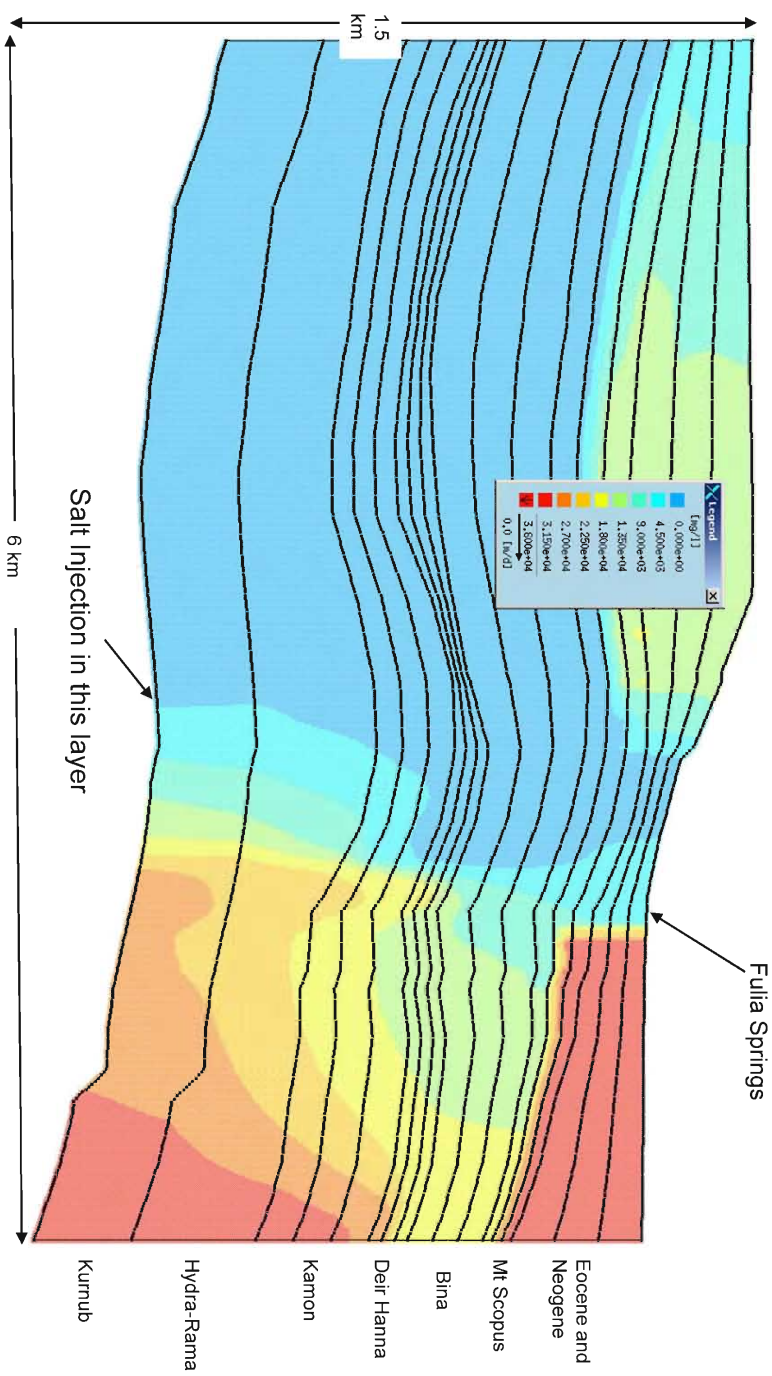
- פוליה כולל
- טבחה

איור 13. נרידה מחושבת בריכוזי המלחים במעיינות פוליה וטבחה בשלב השטיפה עם החזרת תמלחת בכמות של 8 מל"מ.



איור 14. ירידה מחושבת בריכוזי המלחים במעיינות פוליה וטבחה בשלב השטיפה עם החדרת המלחת בכמות של 2 מל"מ/ק.

Salt Concentrations in 1960's in Cross Section through Fulia  
 (Initial Condition for Transient Simulation)



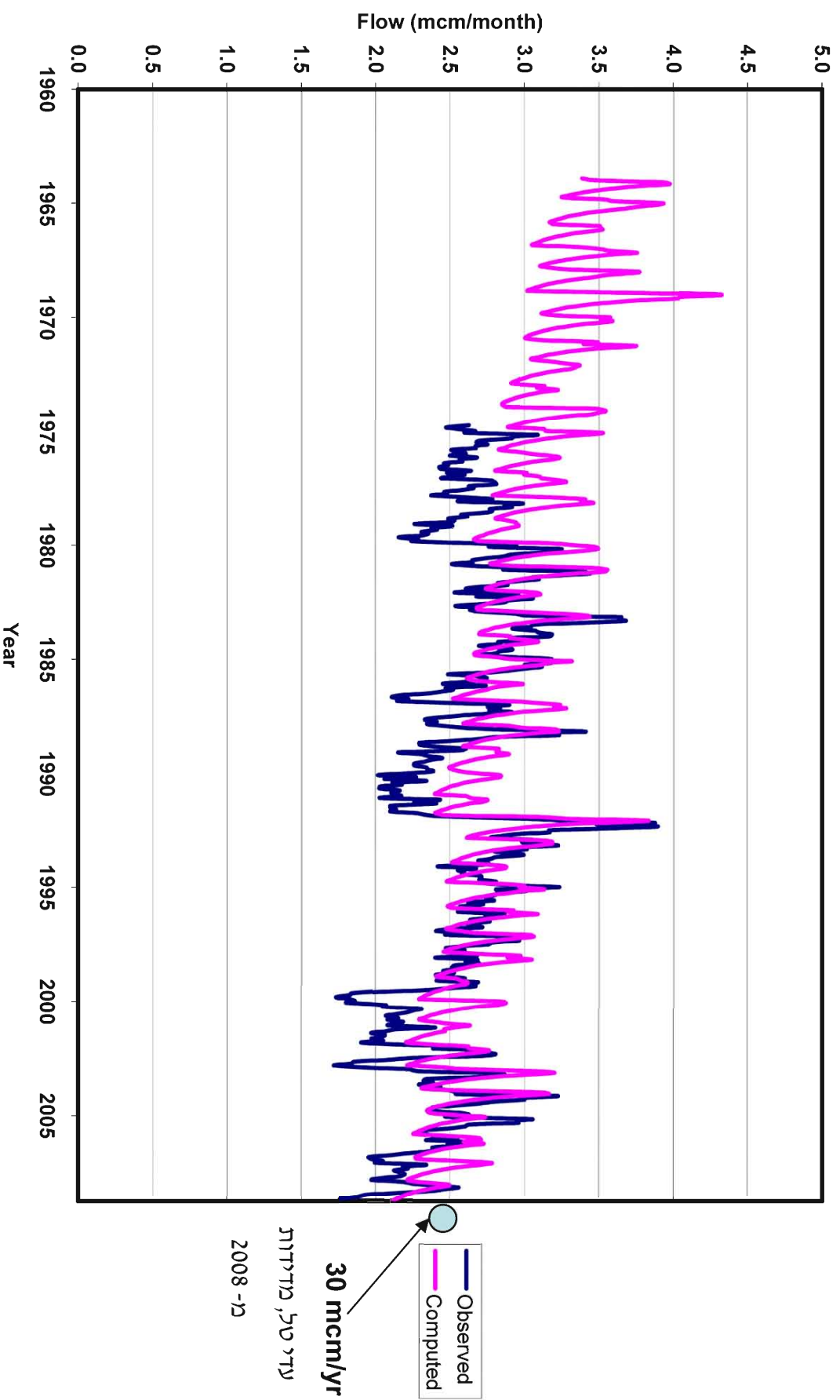
אורך 15. חתך הידרוגיאולוגי באזור פוליקה המראה את פיזור ריכוזי המלחים (TDS) בסוף שלב השטופה (תחילת שנות השישים).

## Calibrated Fula Spring Flows



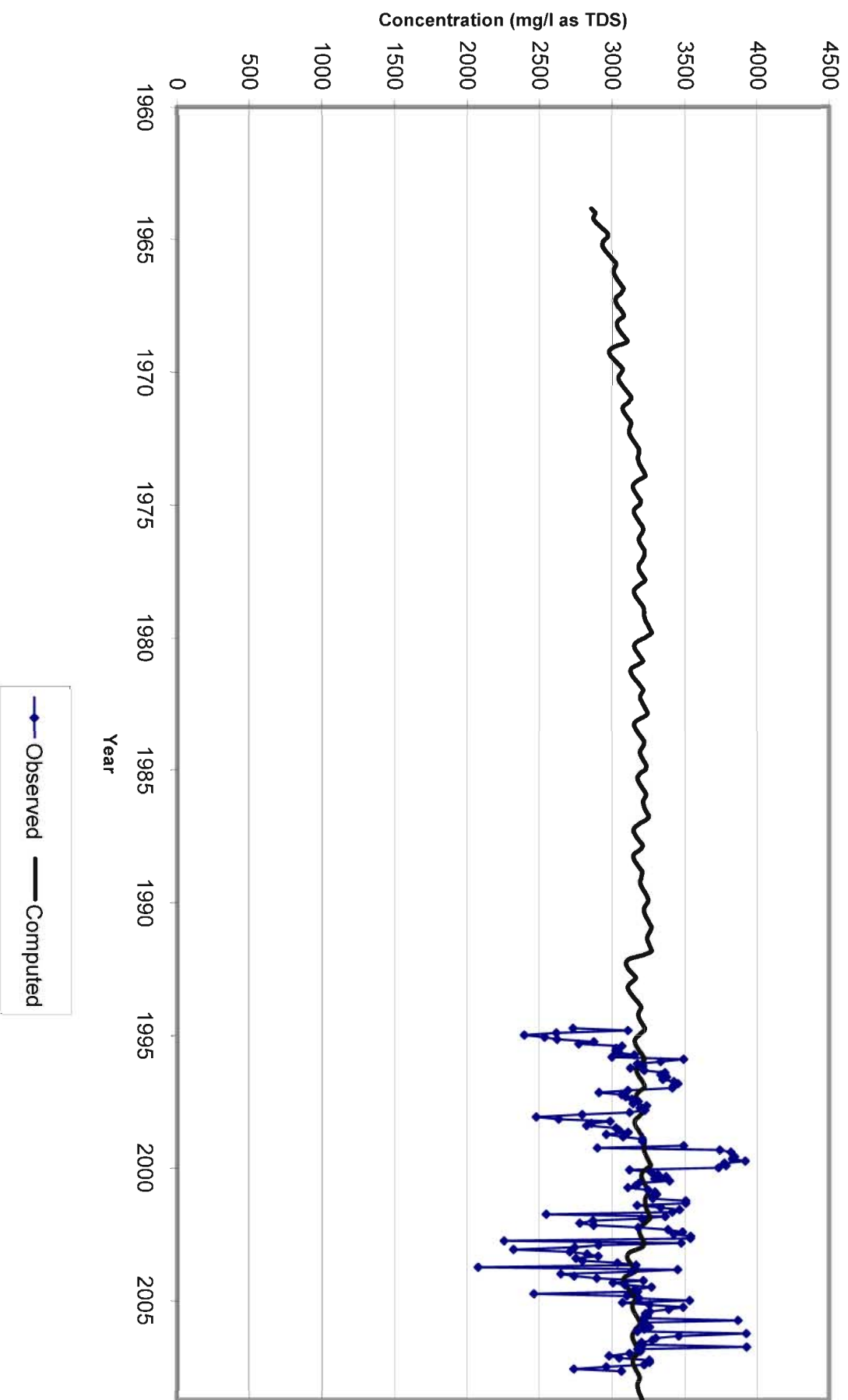
איור 16. השתנות בזמן של השפיעה המתושבת בפוליה.

# Calibrated Tabbkha Spring Flows



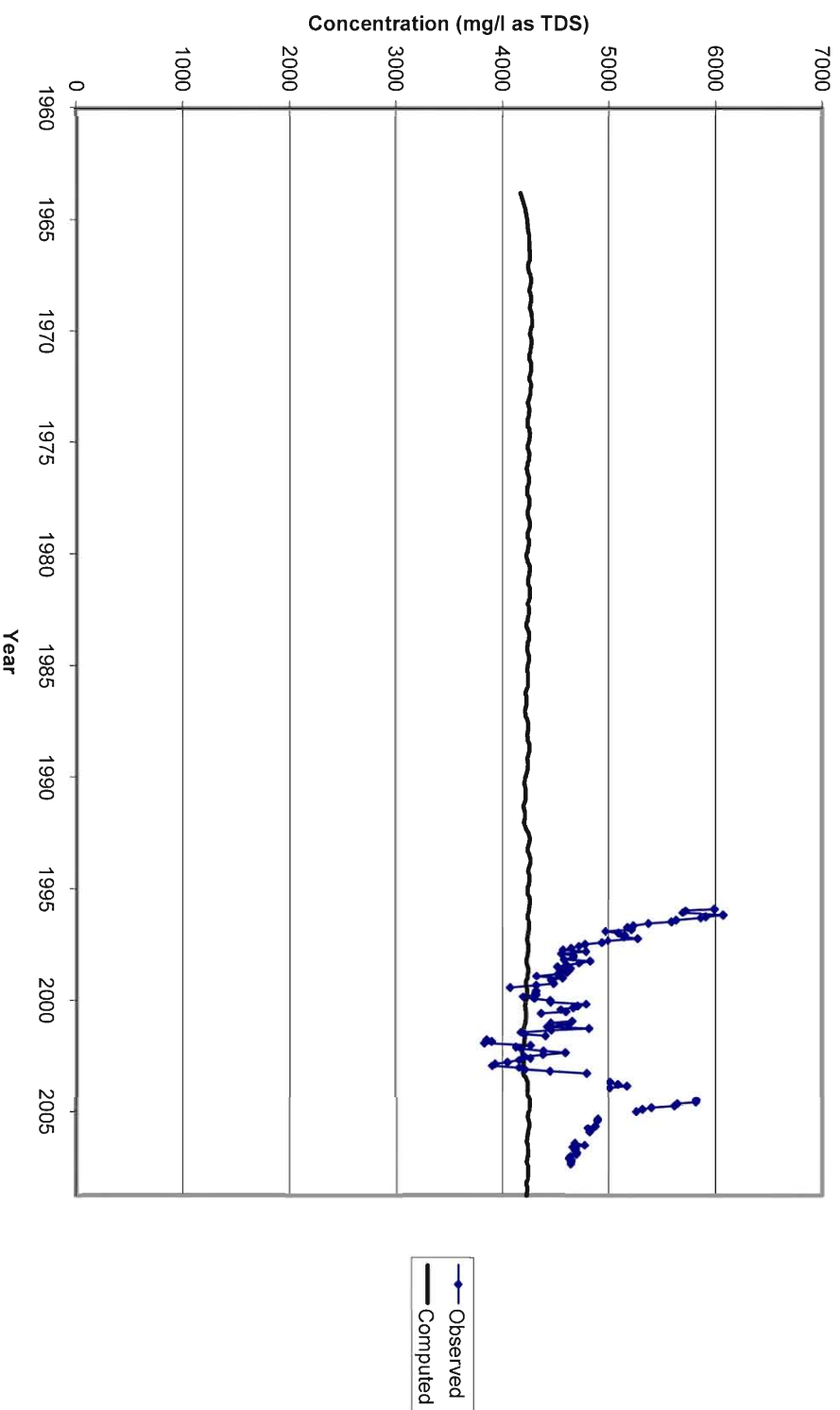
אירוי 17. השתנות בזמן של השפיעה הממושכת והשפיעה המודדה בטבת.

## Tabkha Spring Concentrations



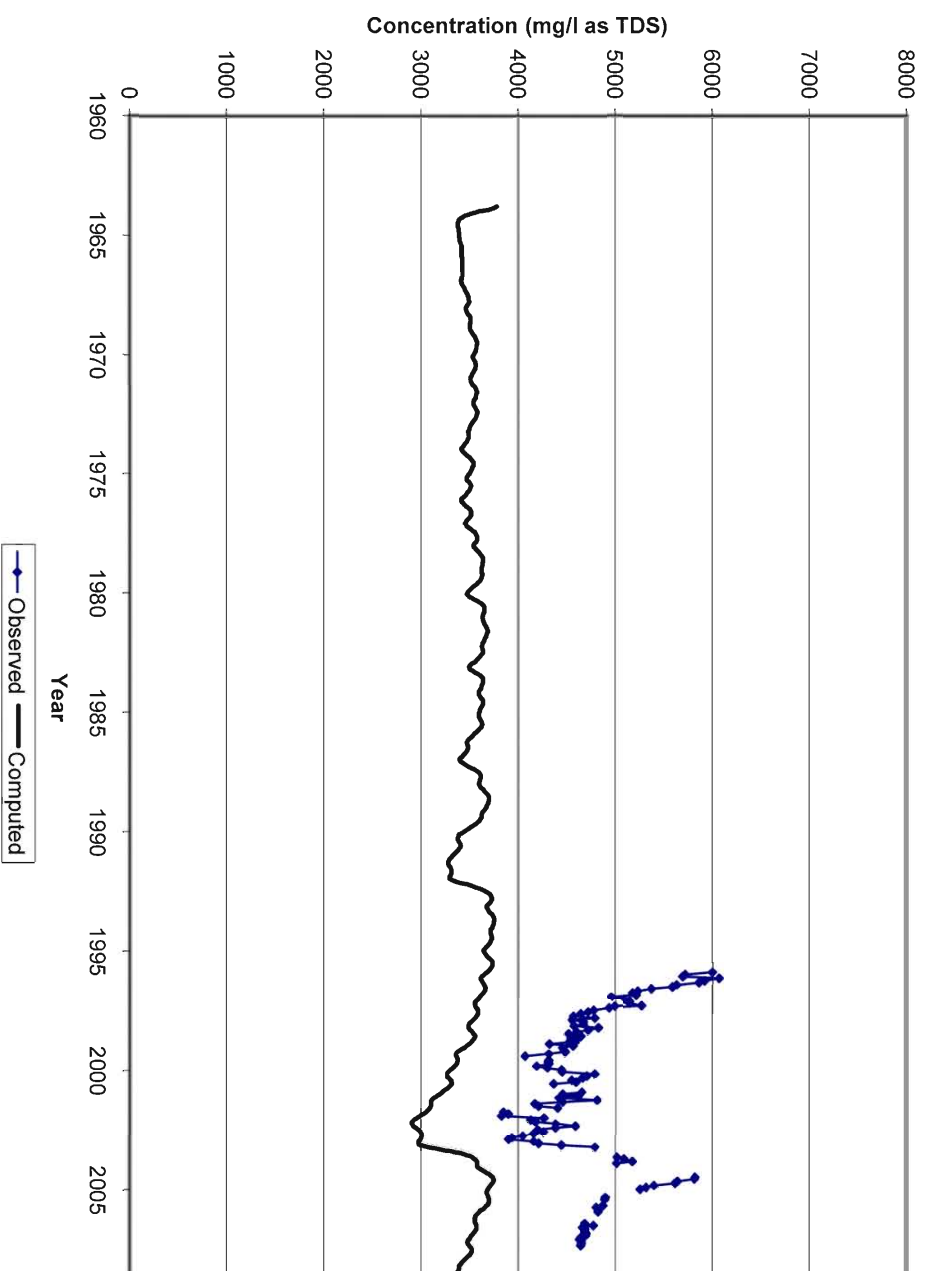
איור 18. השתנות באופן של המליחות המתושבת לעומת המליחות המדודת בטבחה.

### Fulia A Spring Concentration



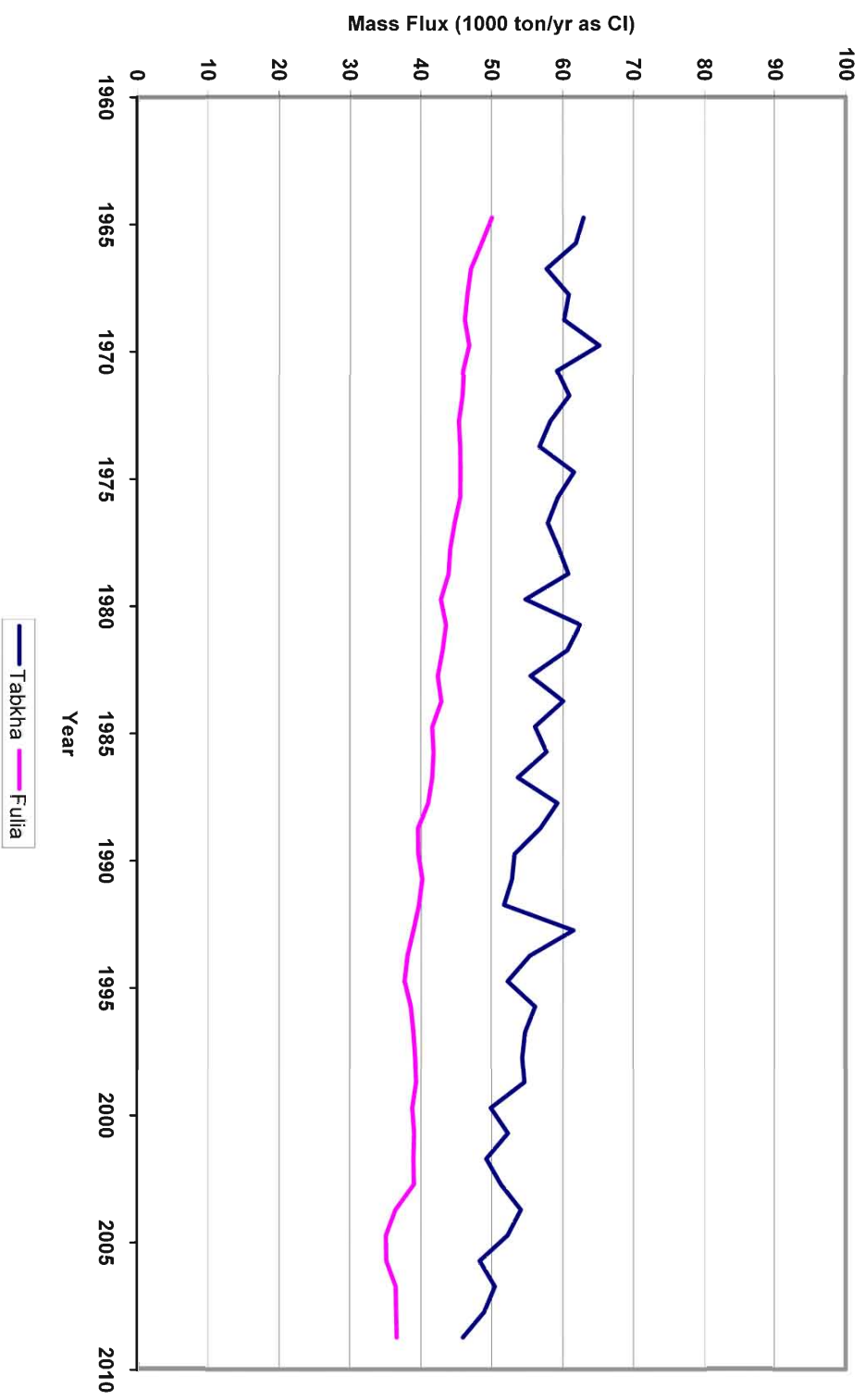
איור 19. השתנות בזמן של המליחות בפוליה. הריכוז המודד המוצג הוא הריכוז במעיין פוליה A (ראה טבלה)

### Fullia Beach Spring Concentration (Low Dispersivity)



איור 20. השתנות בזמן של המלחות בפוליה, הרצה עם דיספרסיויות נמוכה

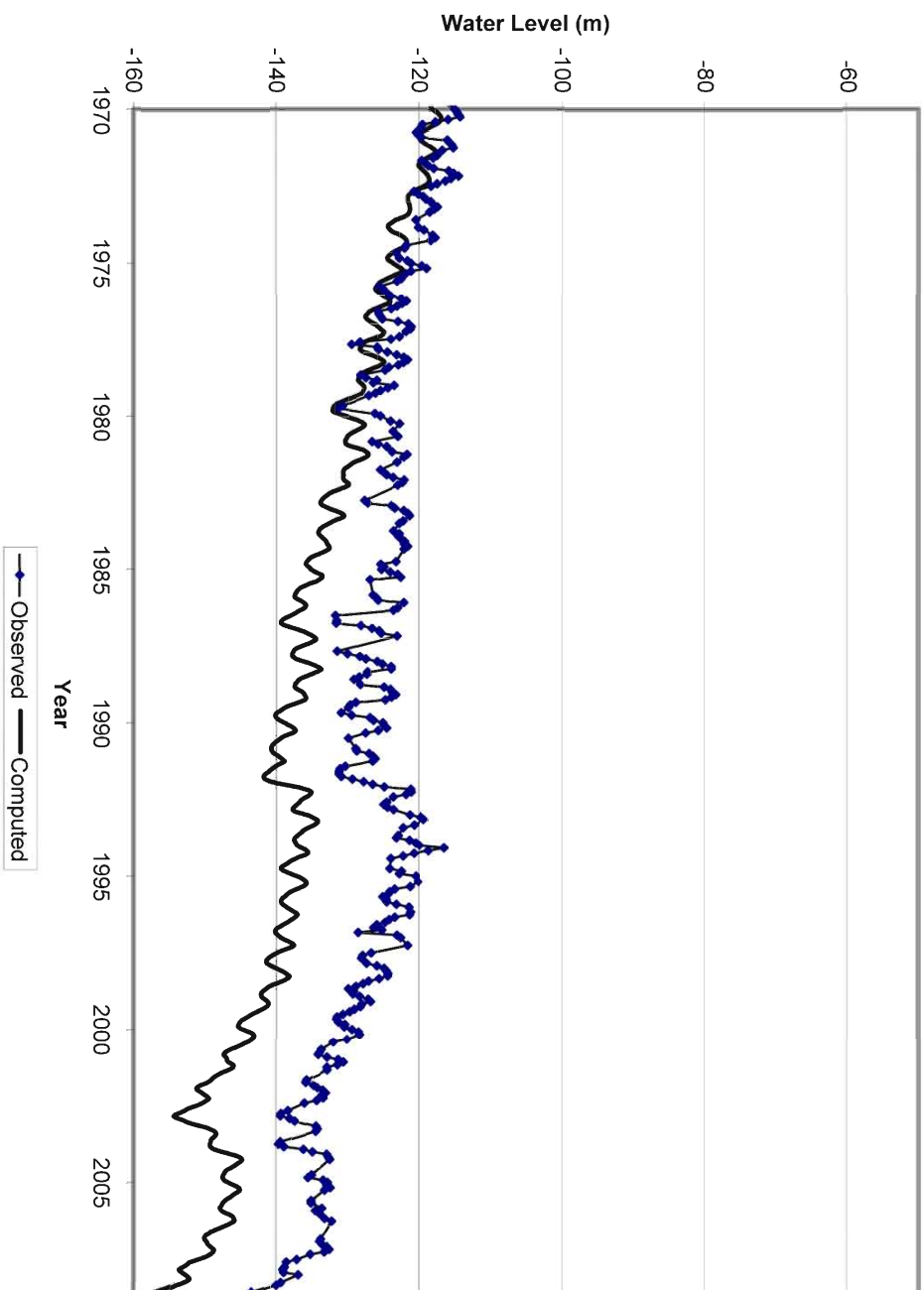
### Computed Annual Average Mass Flux from Springs



איור 21. השתנות בזמן של מסת המלח היוצאת במעינות באזור טבחה ובאזור פוליה

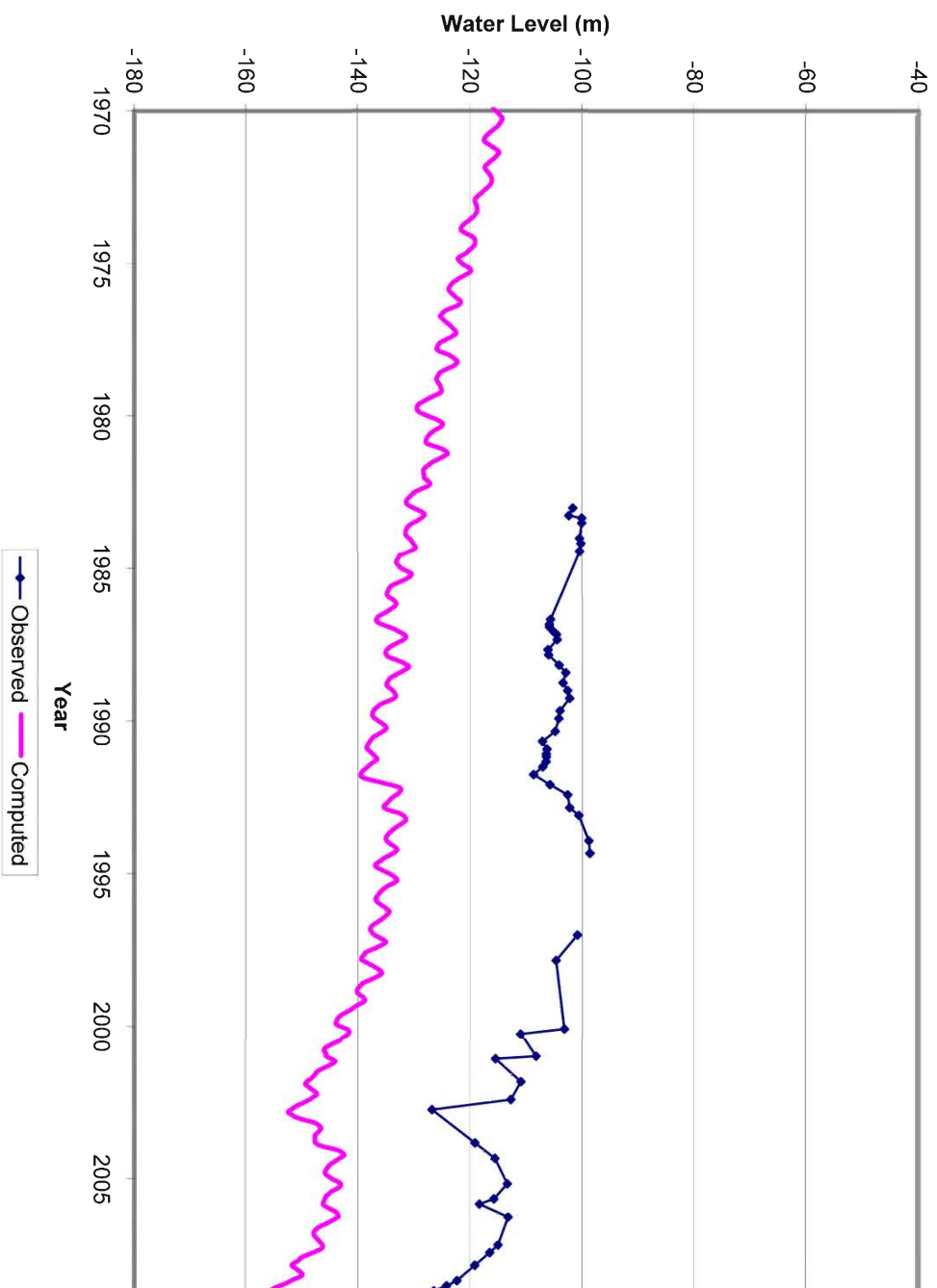


### Calibrated vs Observed Water Level in Hittin 3 (24719301)



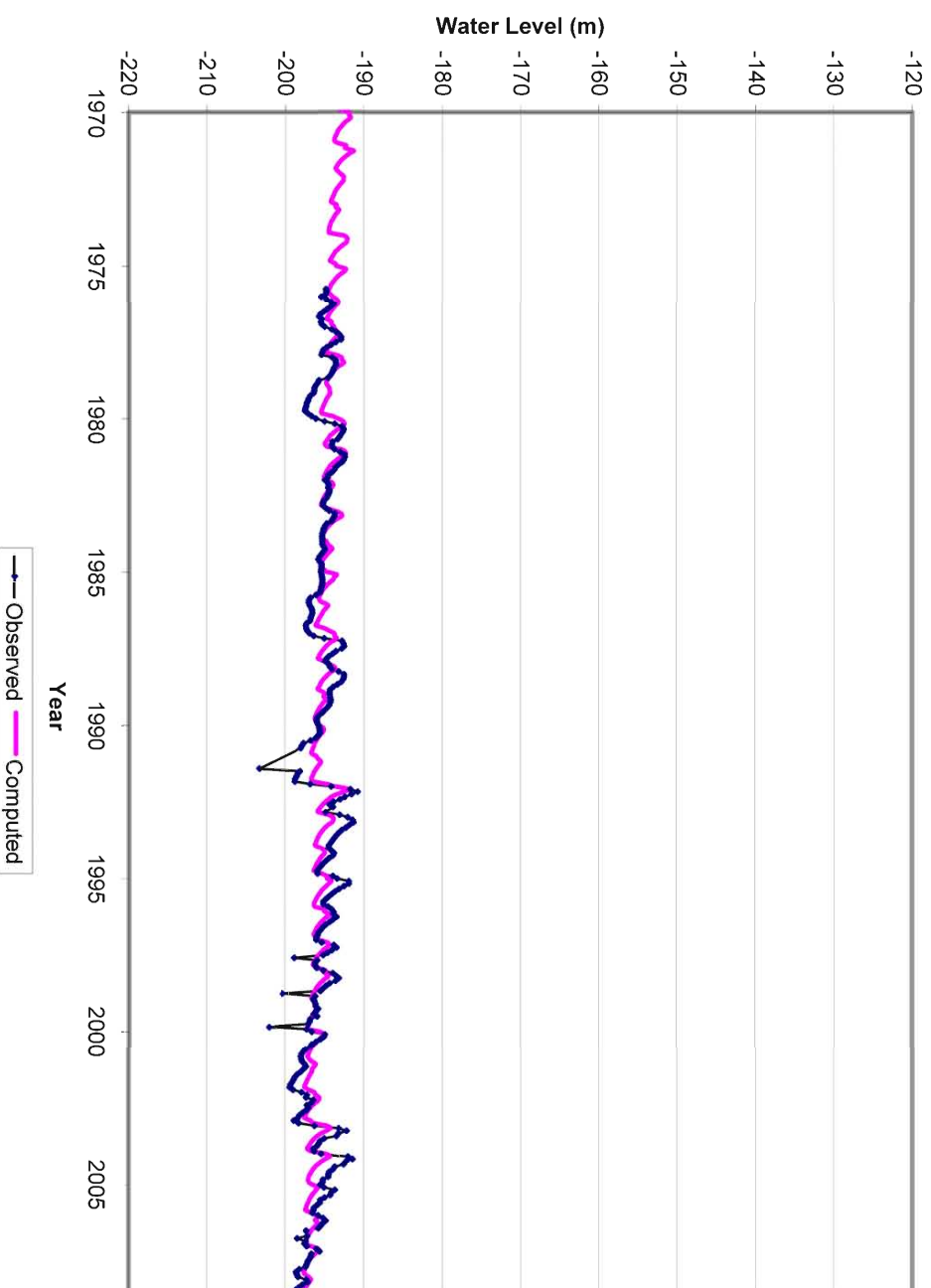
איור 2.3. השתנות בזמן של המפלסים בקידוח חייטין 3

Calibrated vs Observed Water Level in Calanit 1 (25319101)



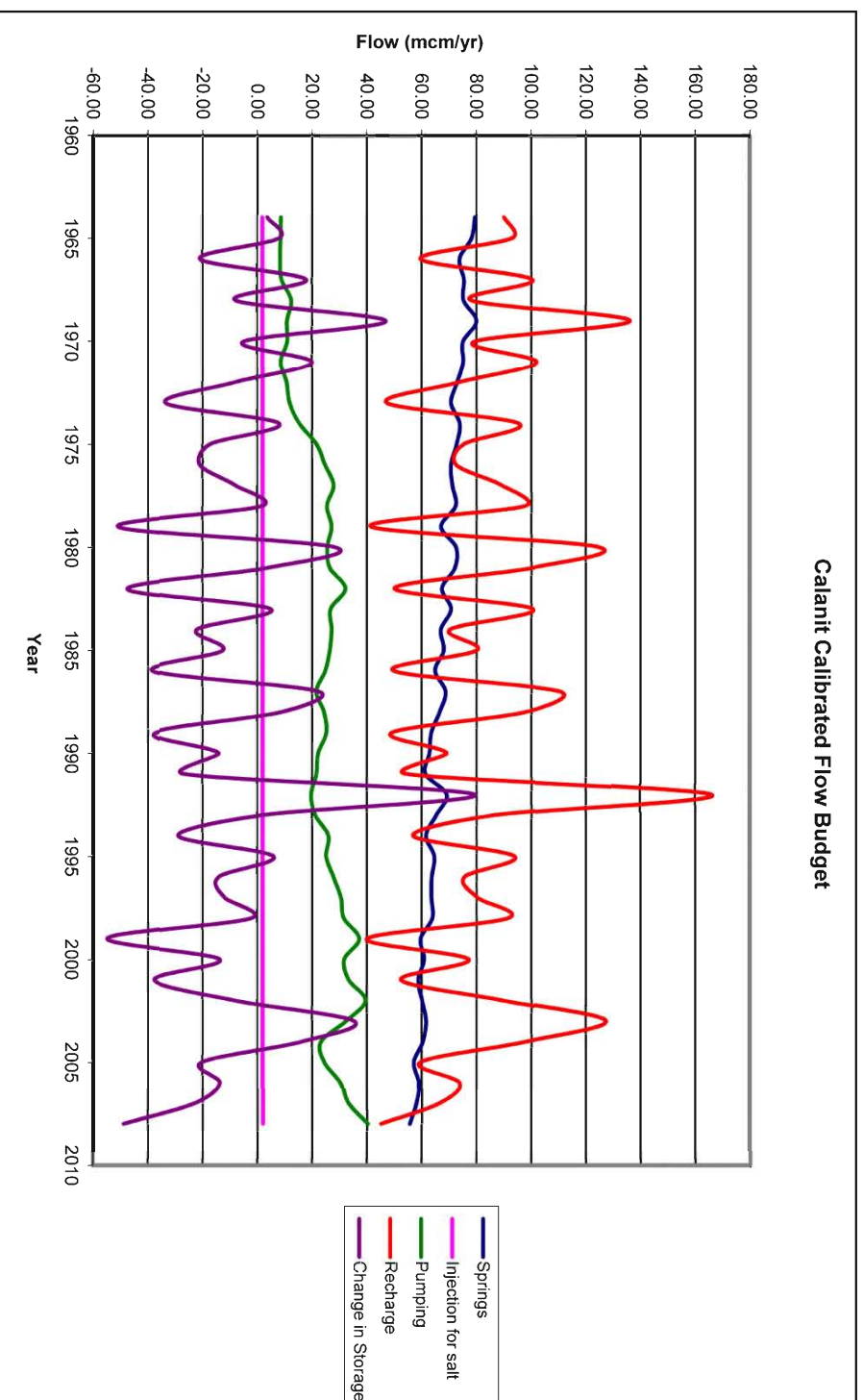
איור 24. השתנות בזמן של המפלסים בקידוח כלנית 1

Calibrated vs Observed Water Level in Kinneret 8 (25320201)



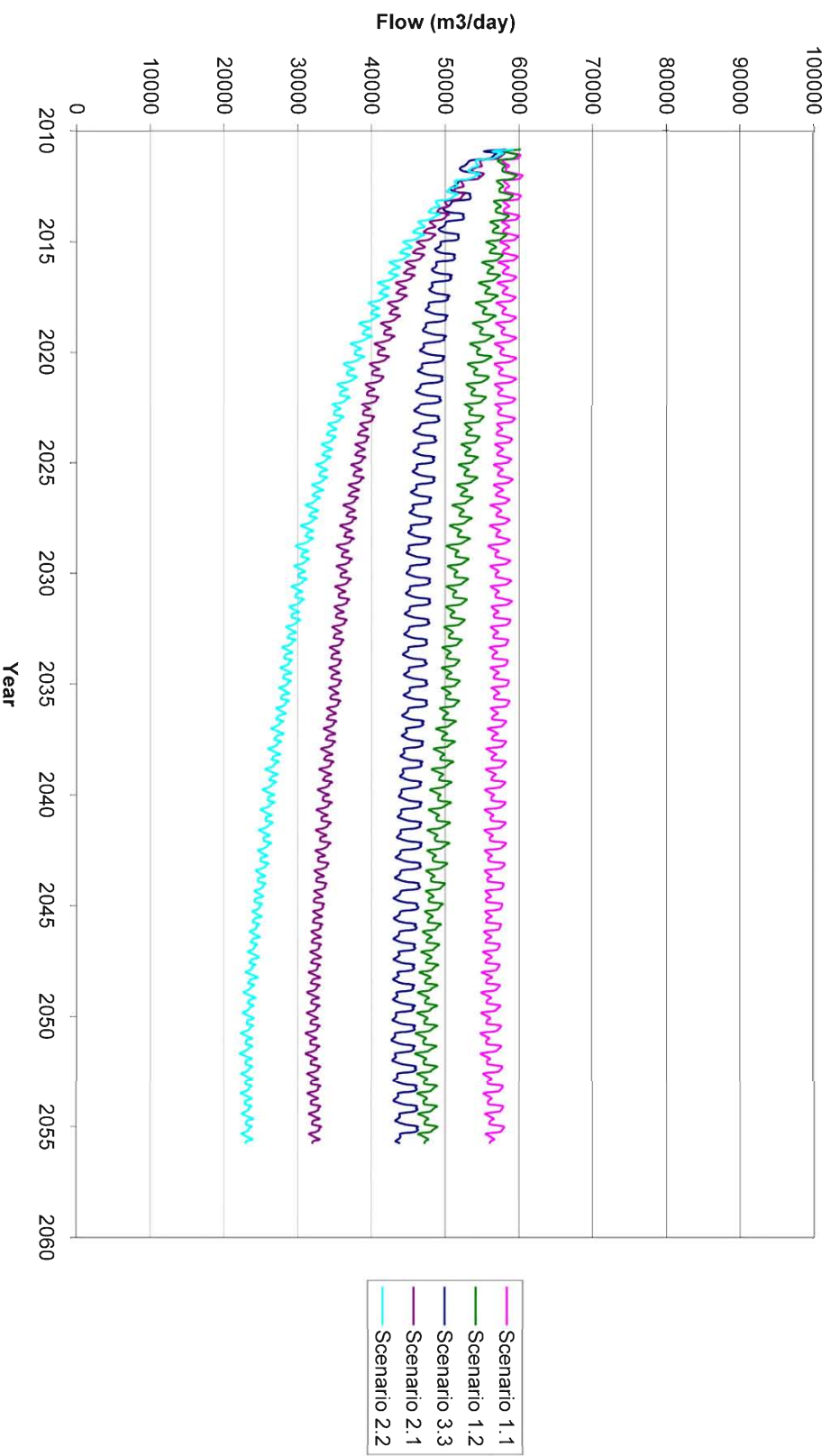
איור 25. השתנות בזמן של המפלסים בקיזוח כנרת 8

Calanit Calibrated Flow Budget



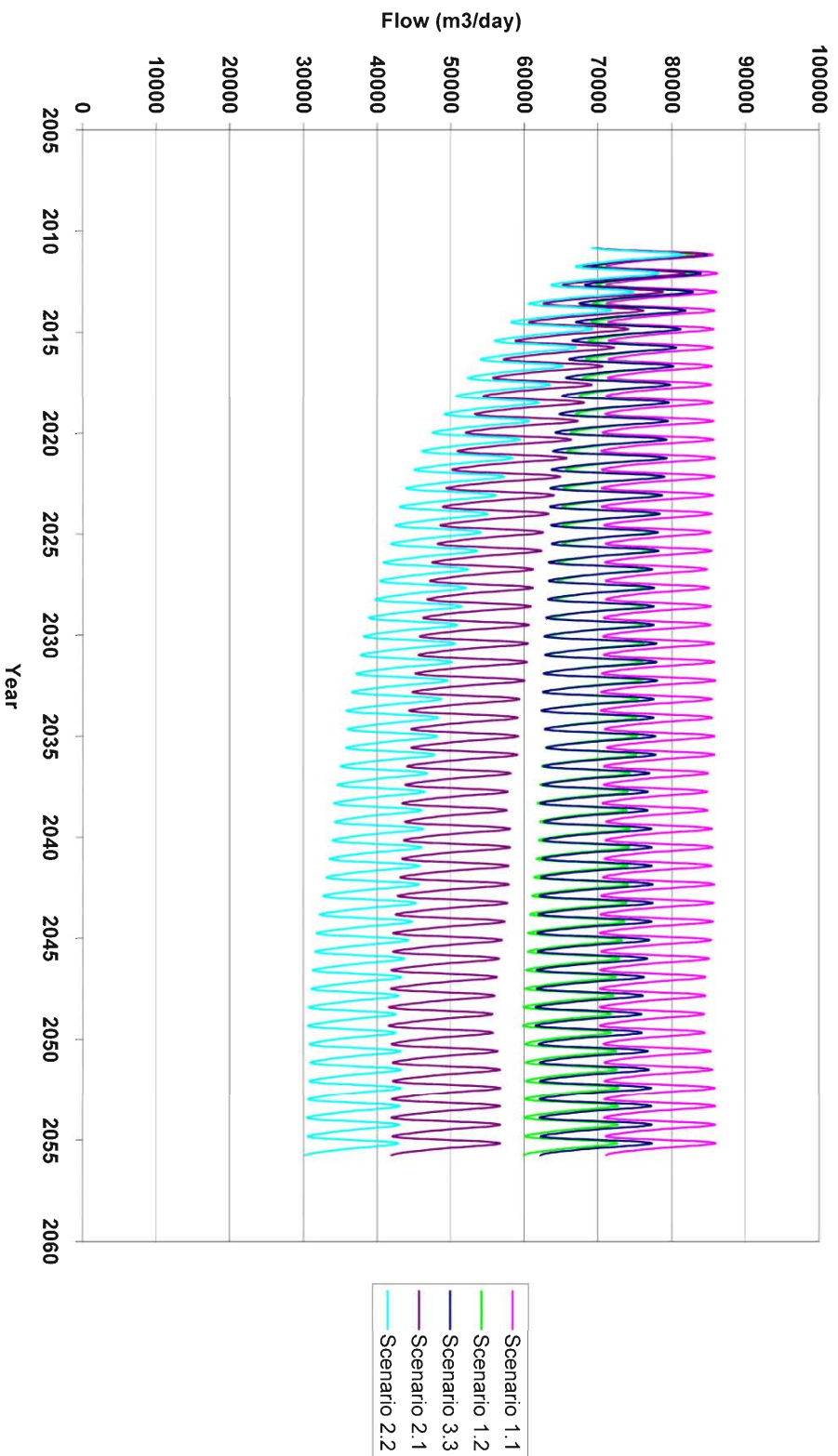
איור 26. השתנות בזמן של מרכיבי מאזן המים במערכת - מילוי חוזר, שפיעת מעיינות, הפקה בקידוחים, הזרקת תמלחת ושניוי אוגר

### Fulia Spring Flow Scenarios



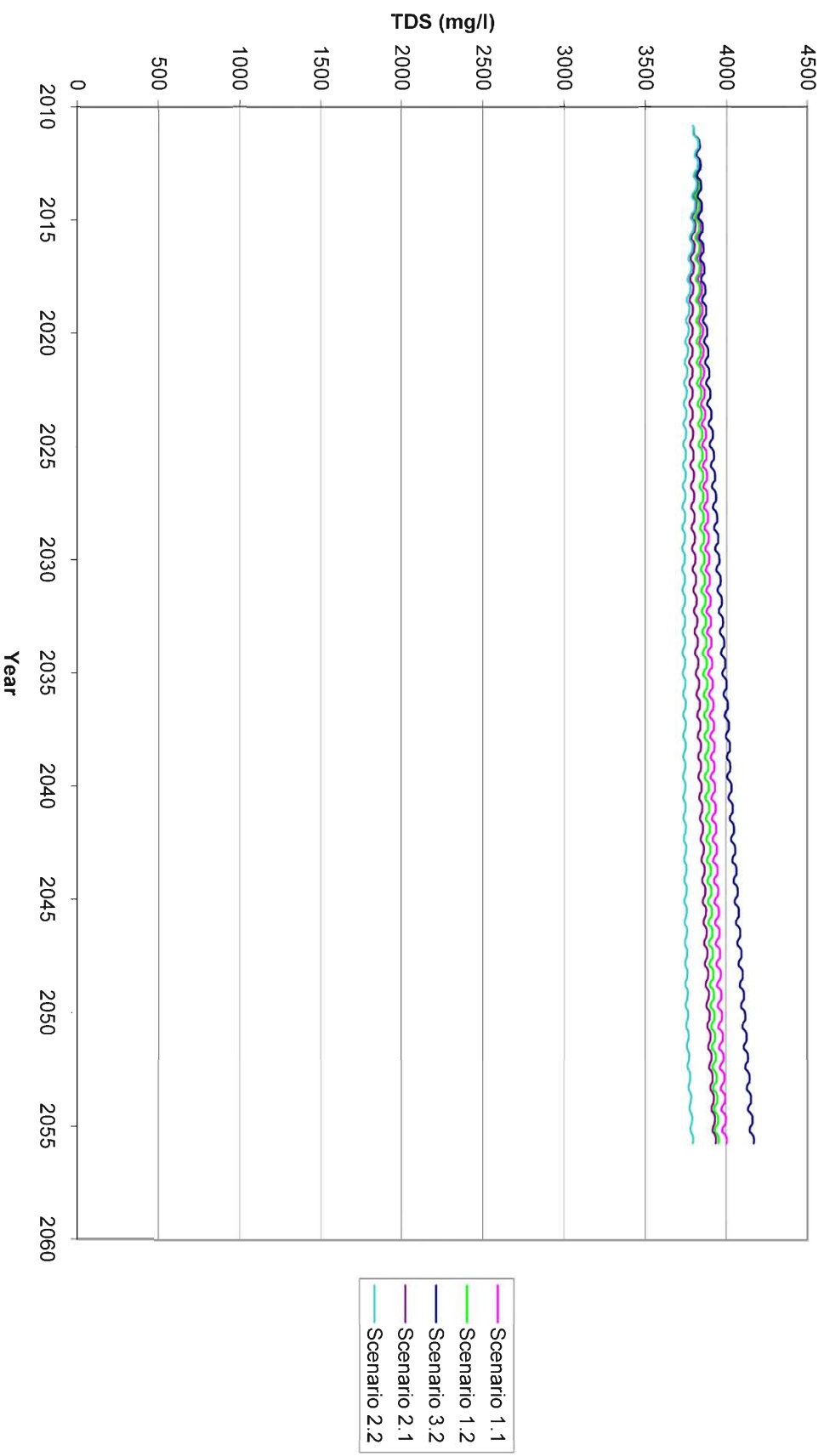
**איור 27.** תחזית השתנות השפיעות בפוליה ב-5 תרחישים: תרחיש 1.1 - הפקת בכמות זהה להפקה ב-2010, מילוי חוזר לפי הממוצע בתקופת הכליל; תרחיש 1.2 - הפקת בכמות זהה להפקה ב-2010 ומילוי חוזר קטן ב-15% מהממוצע בתקופת הכליל; תרחיש 3.3 - תוספת הפקת של 10 מלמ"ש על ההפקה ב-2010, כל התוספת באקוויפר חבורת יהודה העליון; תרחיש 2.1 - הפקת שנתית של 55 מלמ"ש (פרוט) ראה בטכסט, פרק 1.1; ומילוי חוזר קטן ב-15% מהממוצע בתקופת הכליל

### Tabkha Spring Flow Scenarios



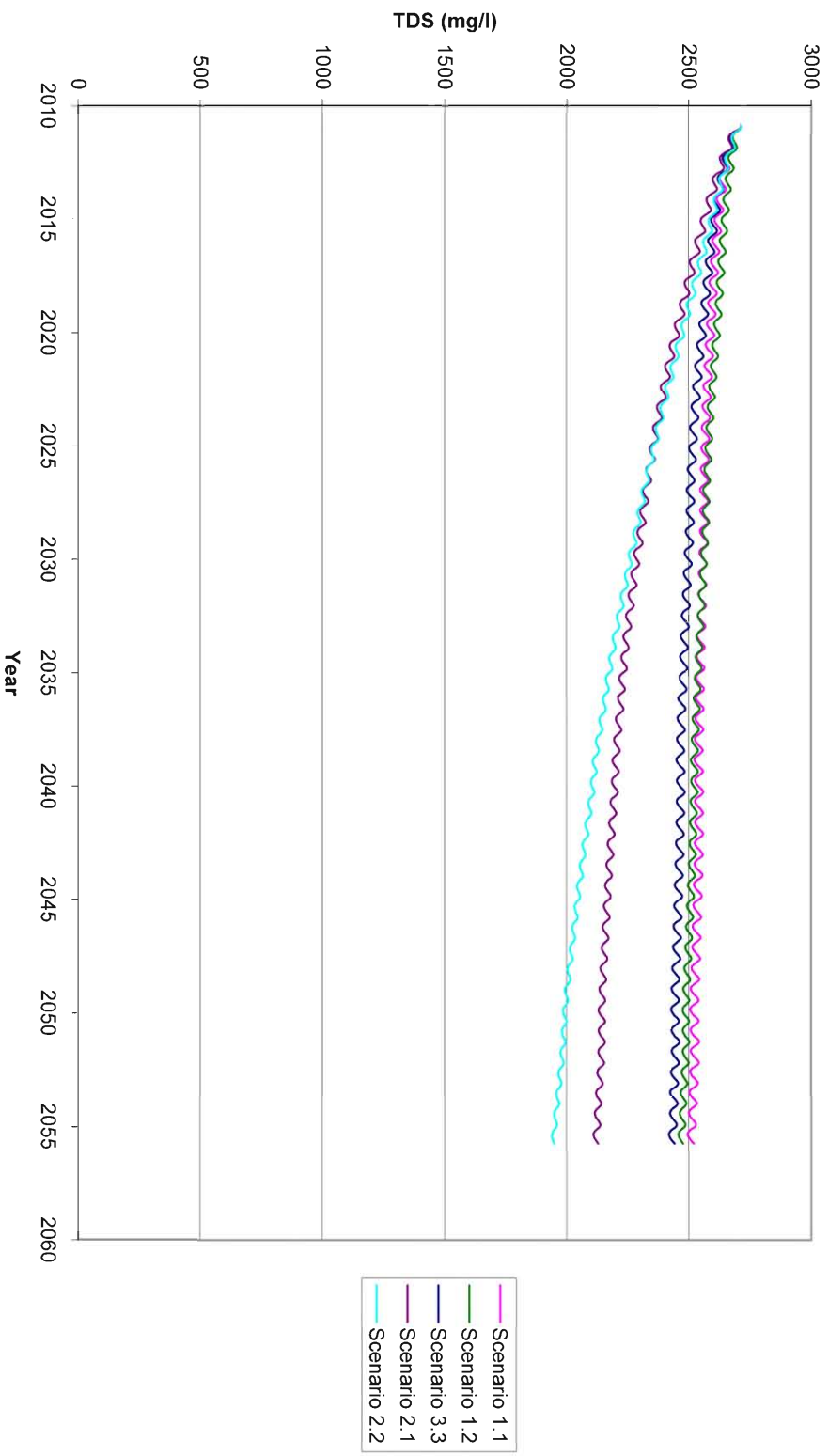
איור 28. תחזית השפיעות בטבחה. הצגת נתוני התרחישים ראה איור 27

### Fullia Beach Spring Concentration Scenarios



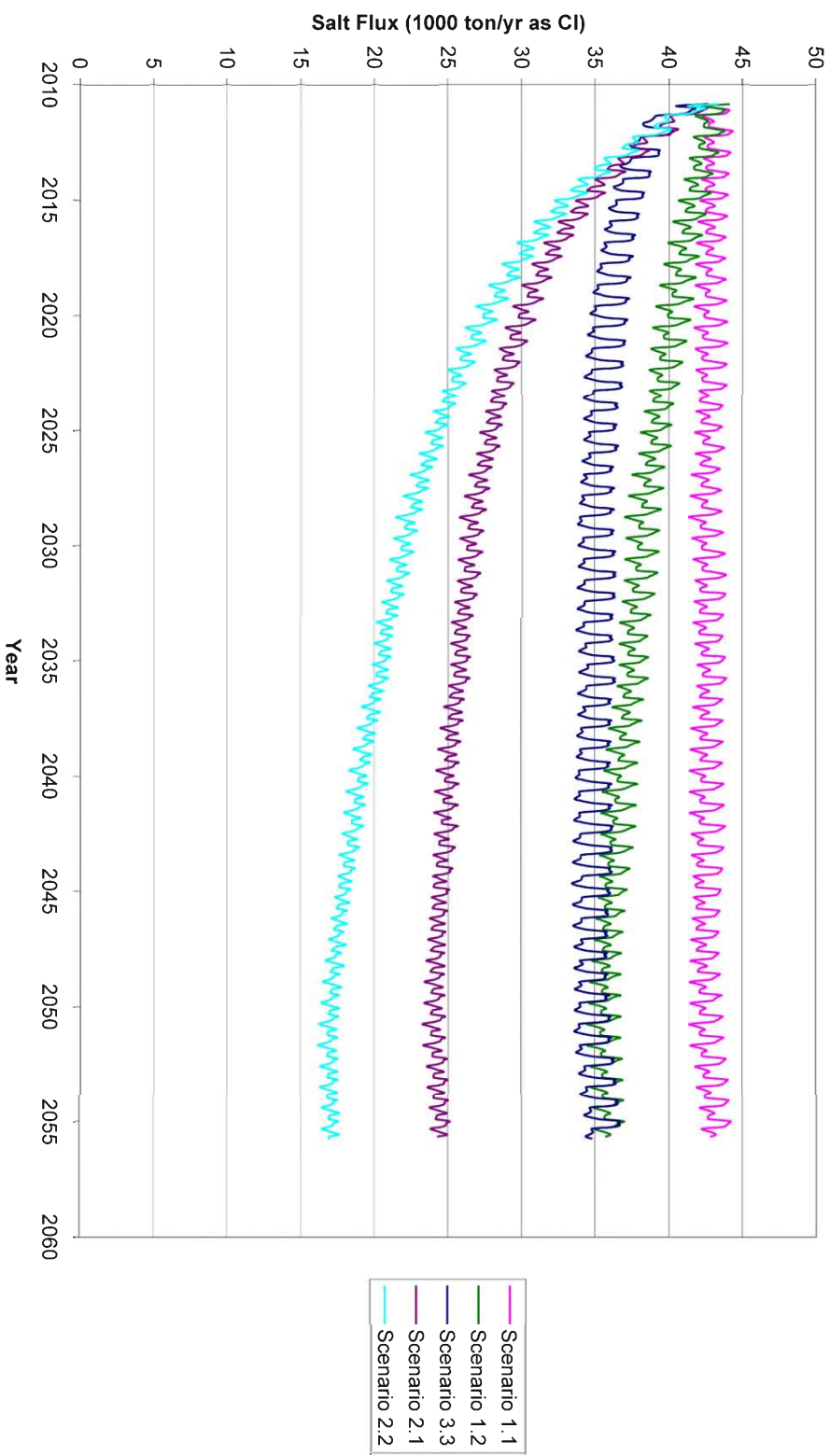
איור 29. תחזית המליחות בפוליה. הצגת נתוני התרחישים ראה איור 27

### Tabkha Spring Concentration Scenarios



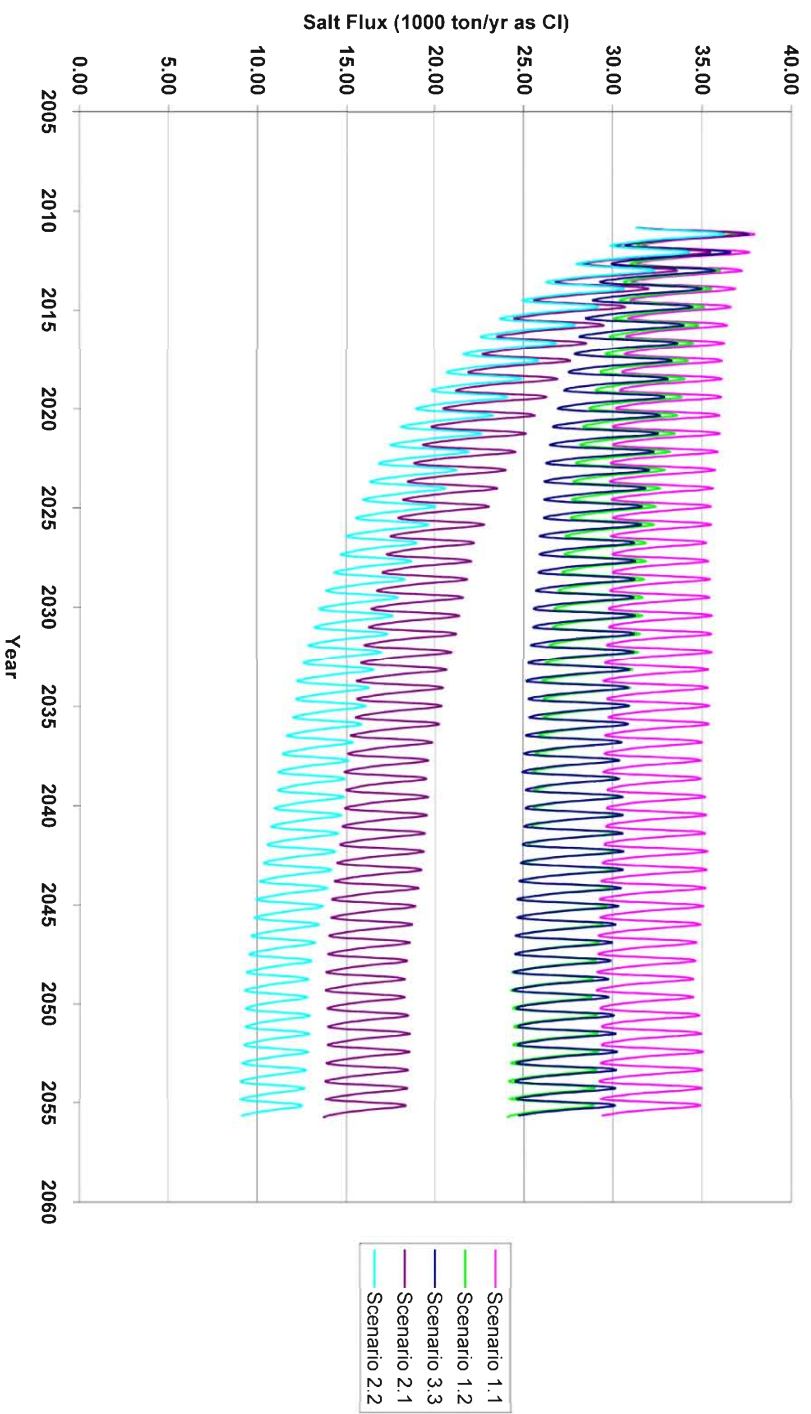
איור 30. תחזית המליחות בטבחה. הצגת נתוני התרחישים ראה איור 27

### Fullia Salt Flux Scenarios



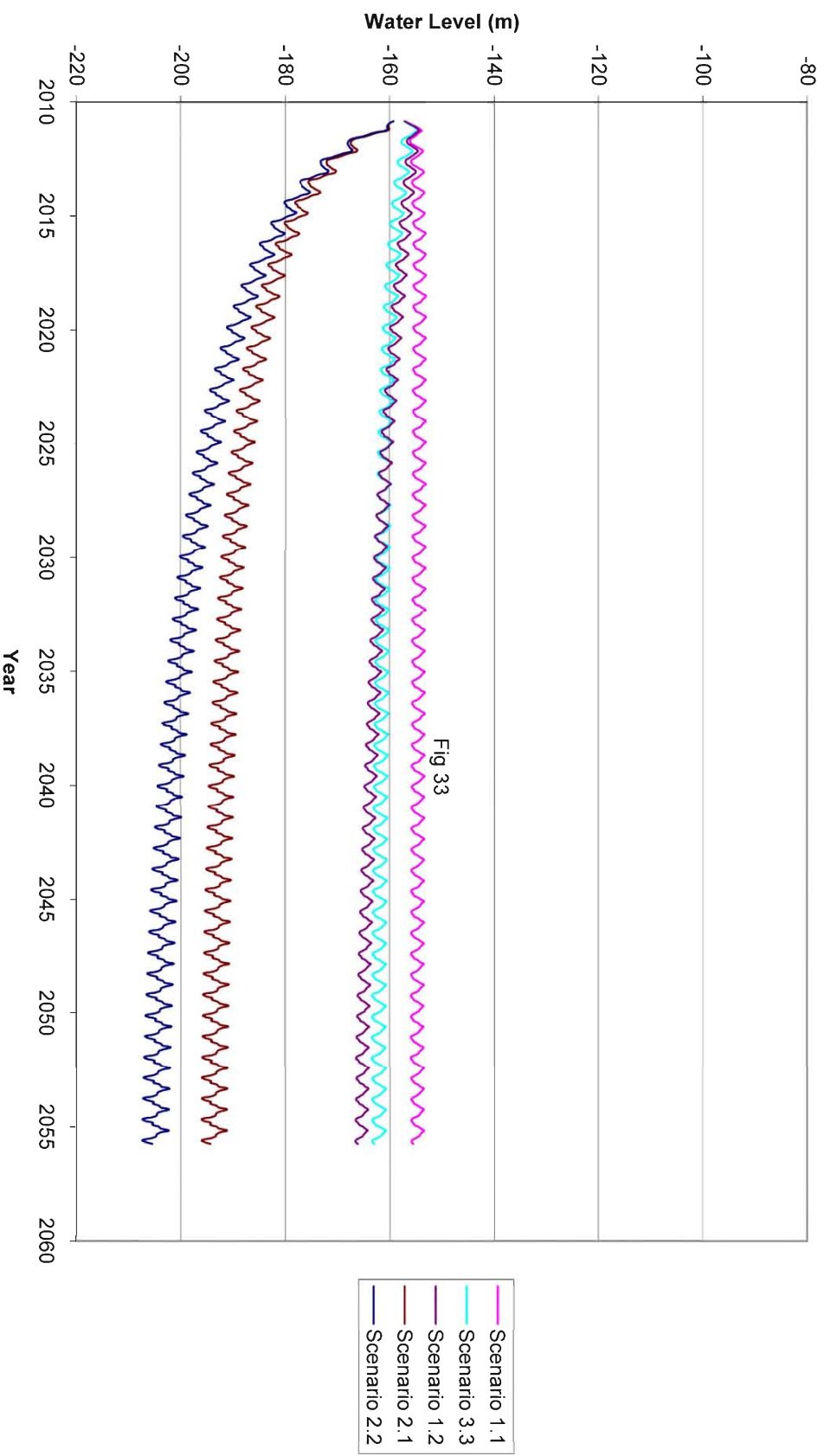
**איור 3.1.** תחזית ההשתנות מסת המלח היוצאת לכנרת באזור פוליה: תרחיש 1.1 - הפקח בכמות זהה להפקה ב-2010, מילוי חוזר לפי הממוצע בתקופת הכיול; תרחיש 1.2 - הפקח בכמות זהה להפקה ב-2010 ומילוי חוזר קטן ב-15% מהממוצע בתקופת הכיול; תרחיש 3.3 - תוספת הפקח של 10 מלמ"ק על ההפקה ב-2010, כל התוספת באקוויפר חבורת יהודה העליון; תרחיש 2.1 - הפקח שנתית של 55 מלמ"ק (פרוט ראה בטכסט, פרק 1'ד) ומילוי חוזר קטן ב-15% מהממוצע בתקופת הכיול ראה בטכסט, פרק 1'ד) ומילוי חוזר קטן ב-15% מהממוצע בתקופת הכיול

Tabkha Salt Flux Scenarios



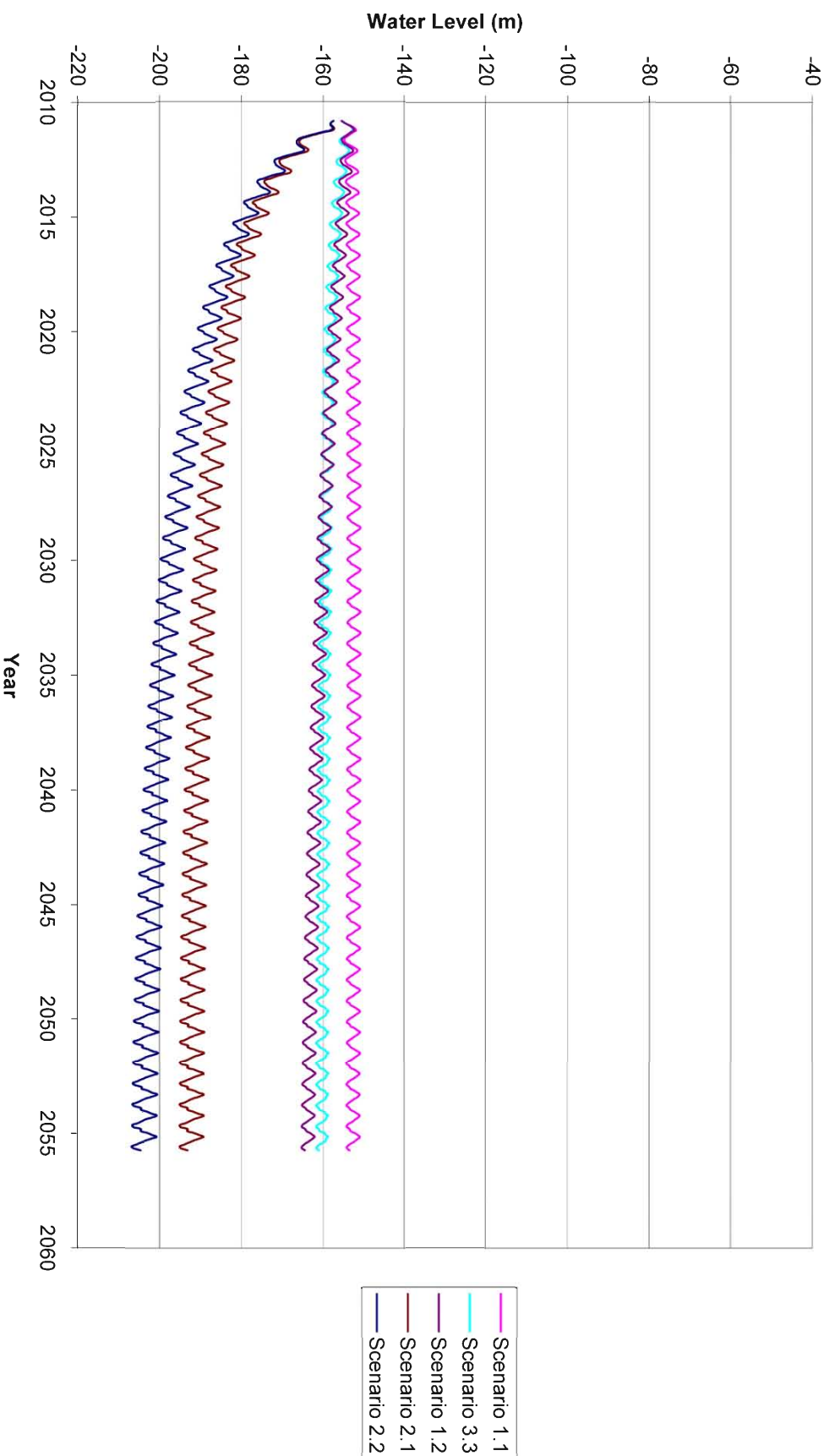
איור 31. תחזית השתנות מסת היוצאת לכנרת באזור טבחיה. הצגת נתוני התרחישים ראה איור 31

### Hittin 3 (24719301) Scenario Water Levels



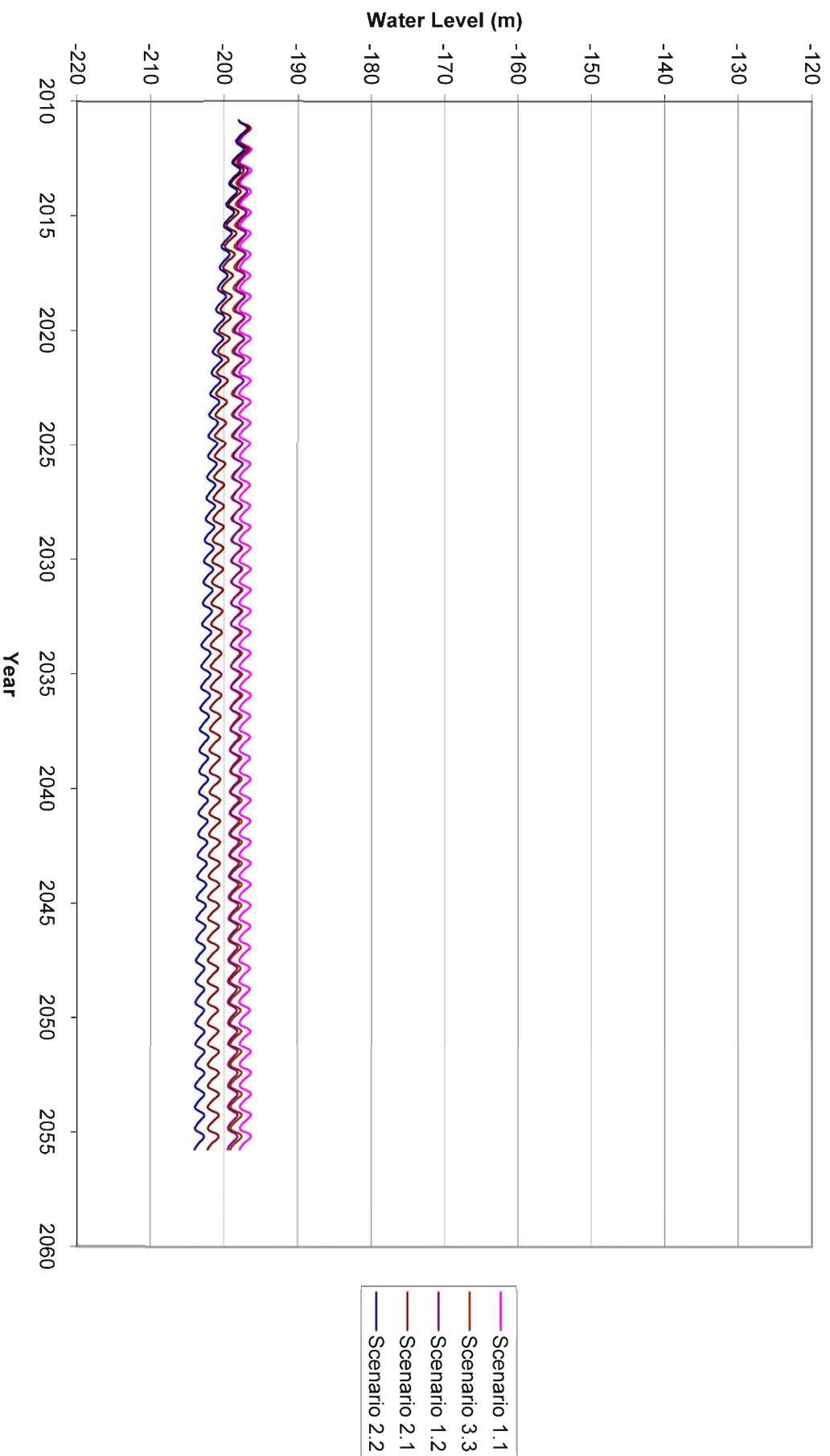
איור 33. תחזית שניוני המפלסים בקידוח ח'טיין 3. להצגת נתוני התרחישים ראה איור 31

### Calanit 1 (25319101) Scenario Water Levels



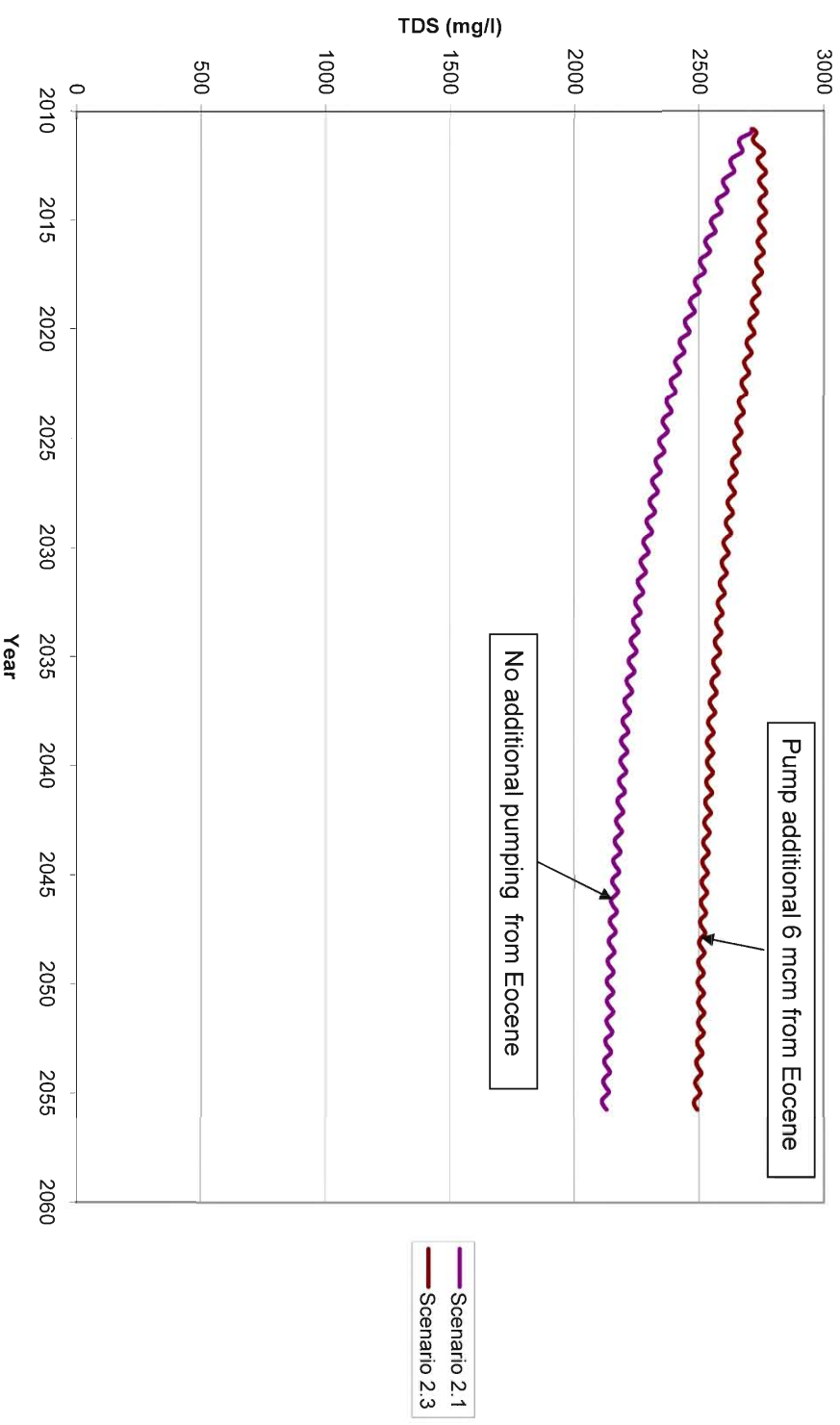
איור 34. תחזית שינויי המפלסים בקידוח כלנית. להצגת נתוני התרחישים איור 31

### Kinneret 8 (25320201) Scenario Water Levels



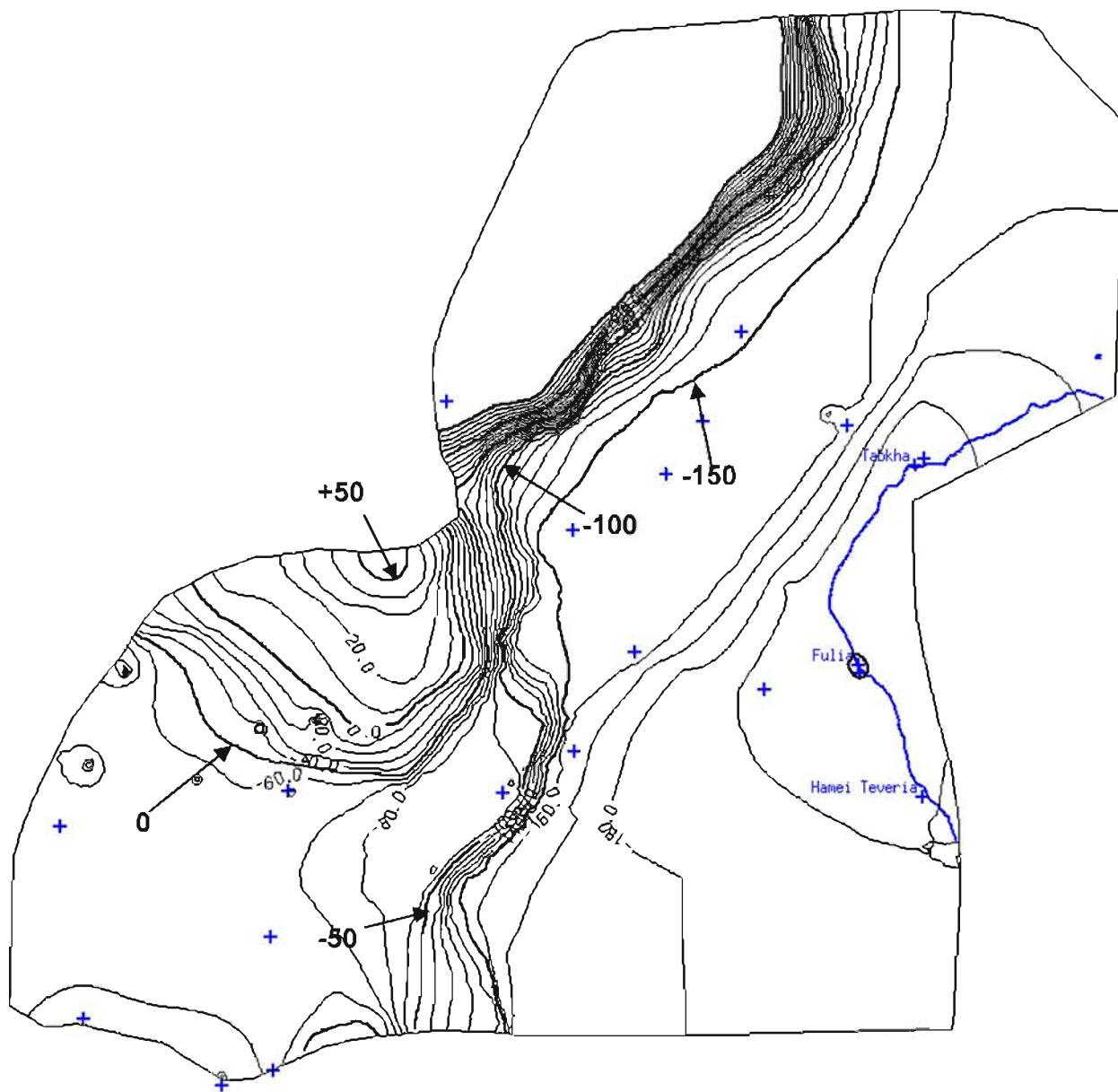
איור 35. תחזית שינויי המפלסים בקידוח כנרת 8. להצגת נתוני התרחישים איור 31

Additional 6 mcm pumped from Eocene  
Tabkha Spring



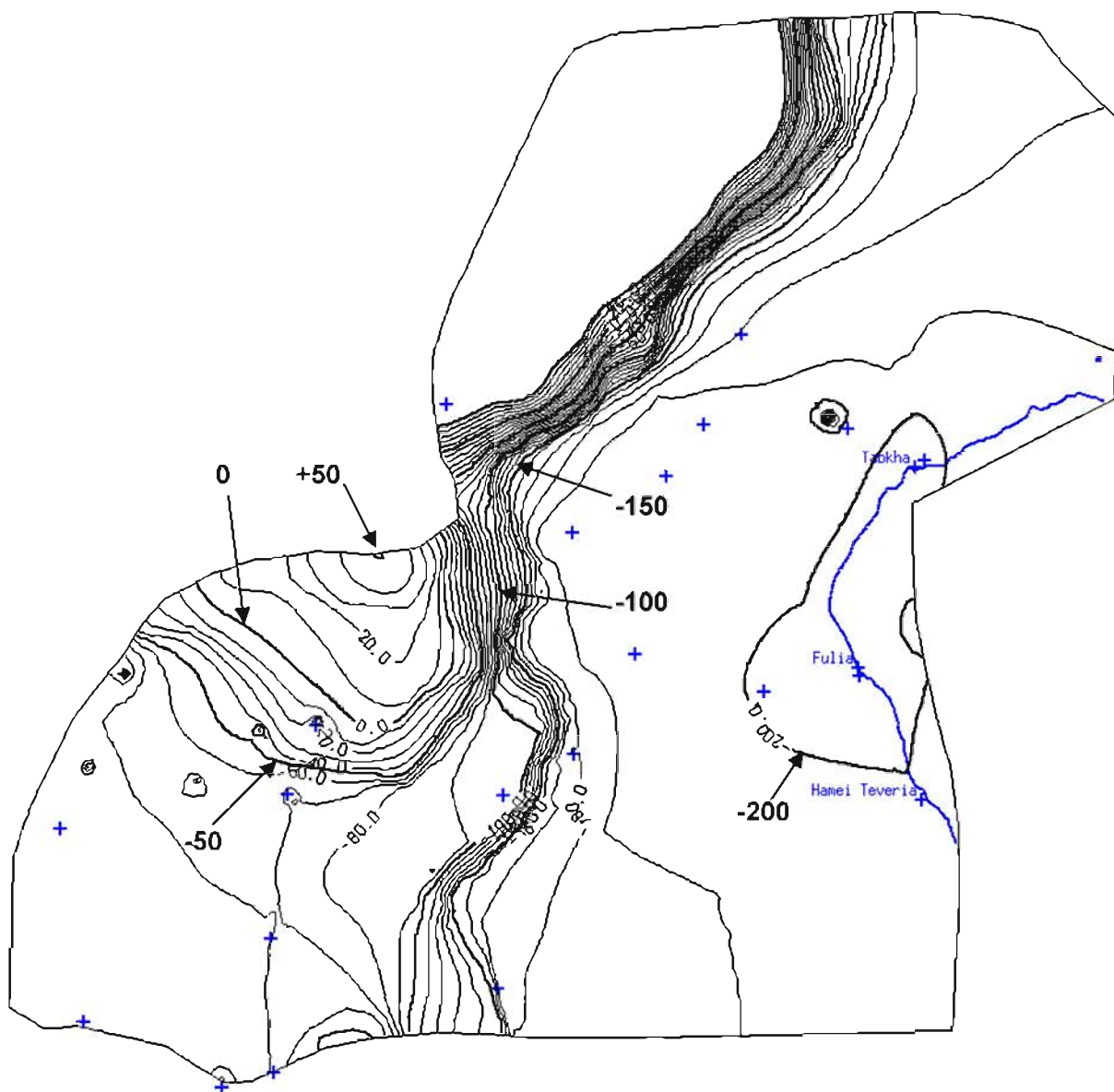
איור 36. תחזית שינויי המליחות בטבחה אם תהיה שאיבה גדולה מאקוויפר חבורת עבדת

# תחזית מפת מפלסים לאחר 45 שנה, תרחיש 1.1



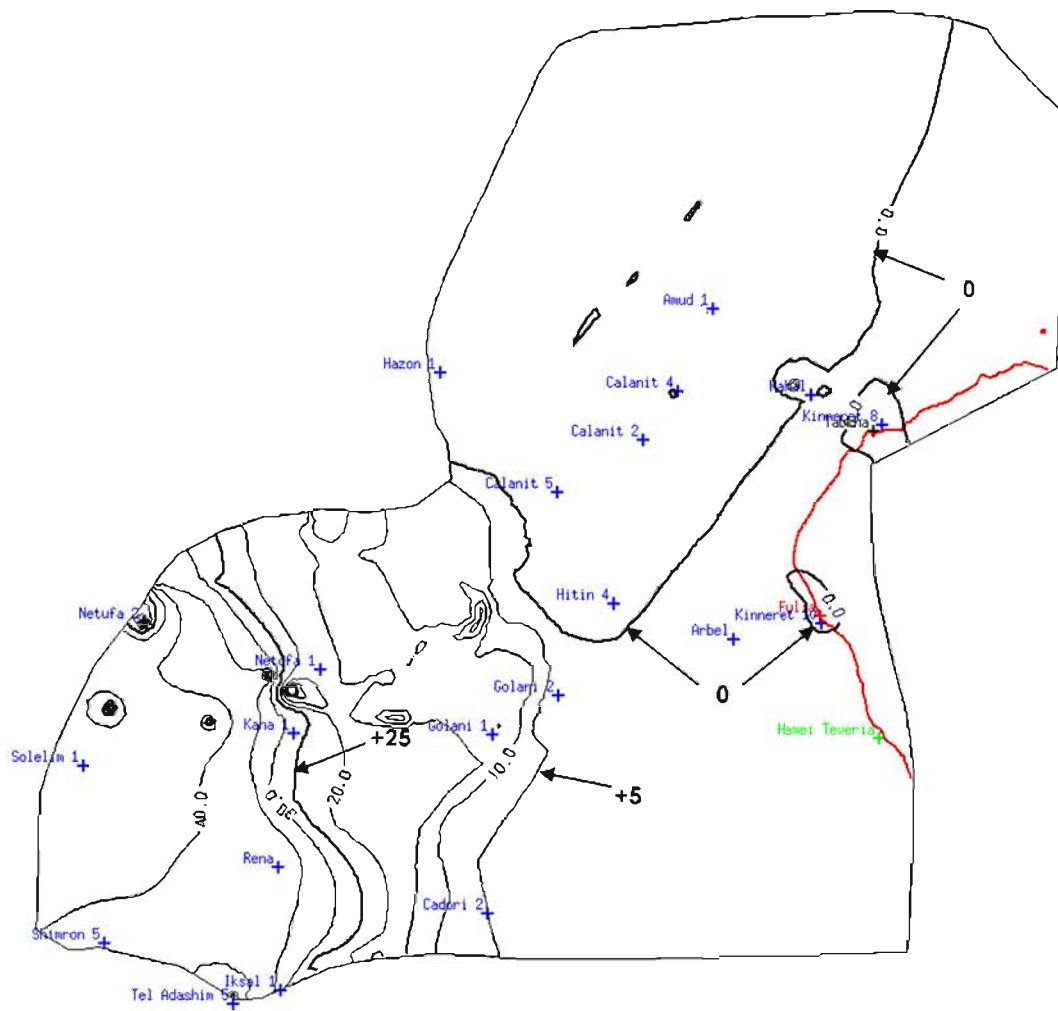
איור 37. מפת מפלסים חזויים בעוד 45 שנה, תרחיש 1.1 (המשך שאיבות כמו היום)

## תחזית מפת מפלסים לאחר 45 שנה, תרחיש 2.1



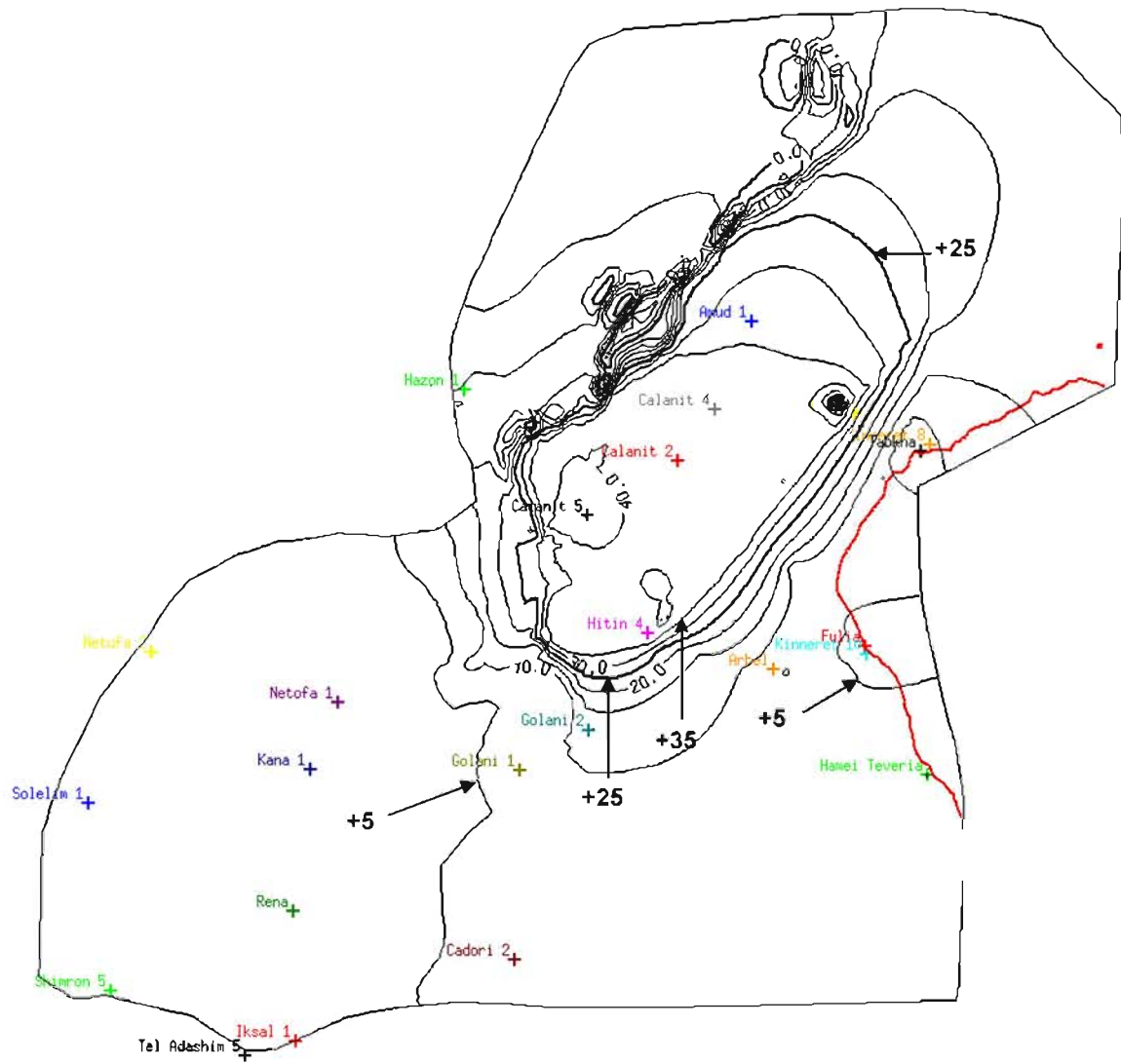
איור 38. מפת מפלסים חזויים בעוד 45 שנה, תרחיש 2.1 (ההפקה השנתית באגן 55 מלמ"ק)

## Head Difference: End of Calibration – Scenario 1.1



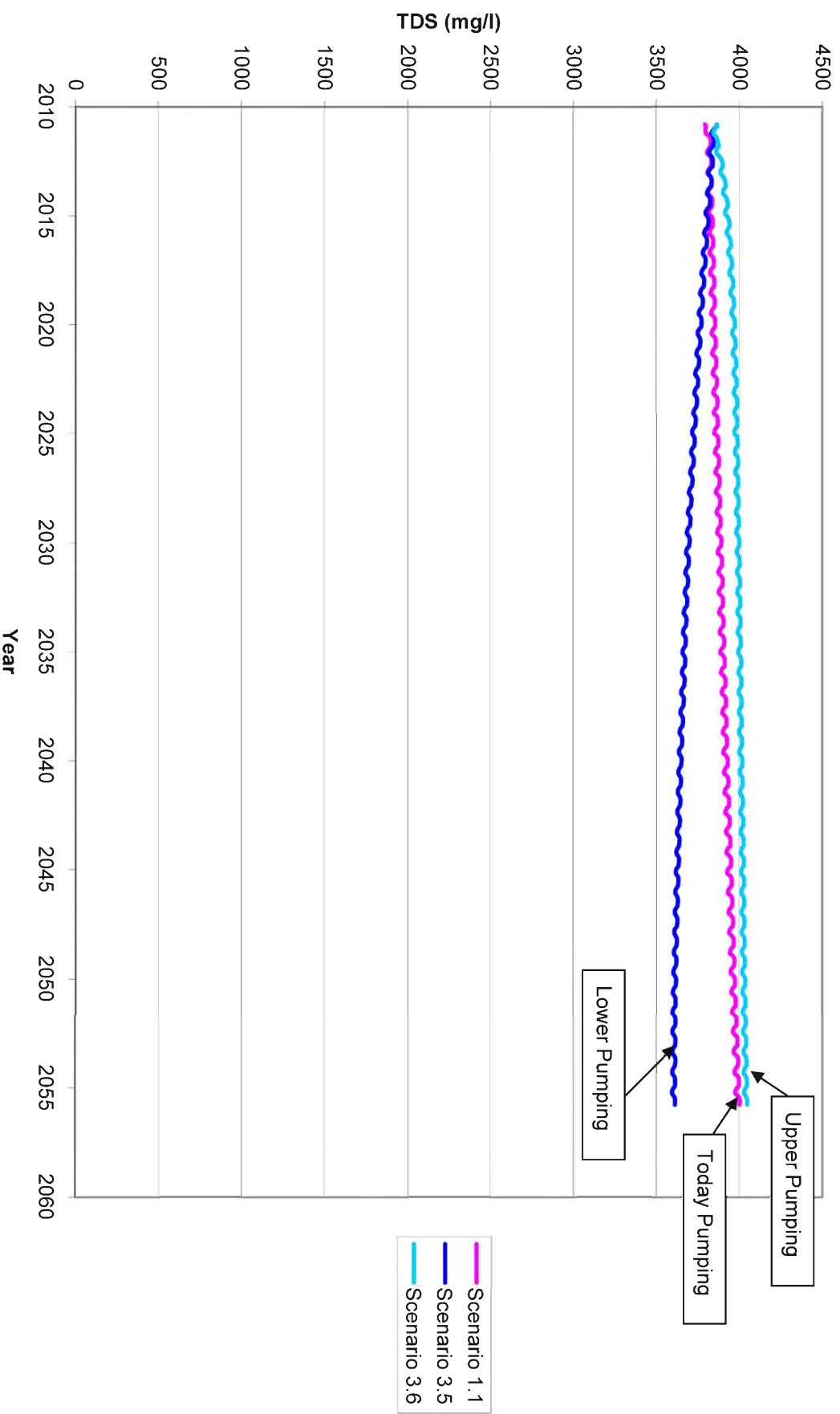
איור 39. מפת הפרש מפלסים שבין סוף שלב הכיול לסוף תרחיש 1.1 (המשך הפקה בכמויות של חיום)

## Head Difference: Scenario 1.1 – 2.1



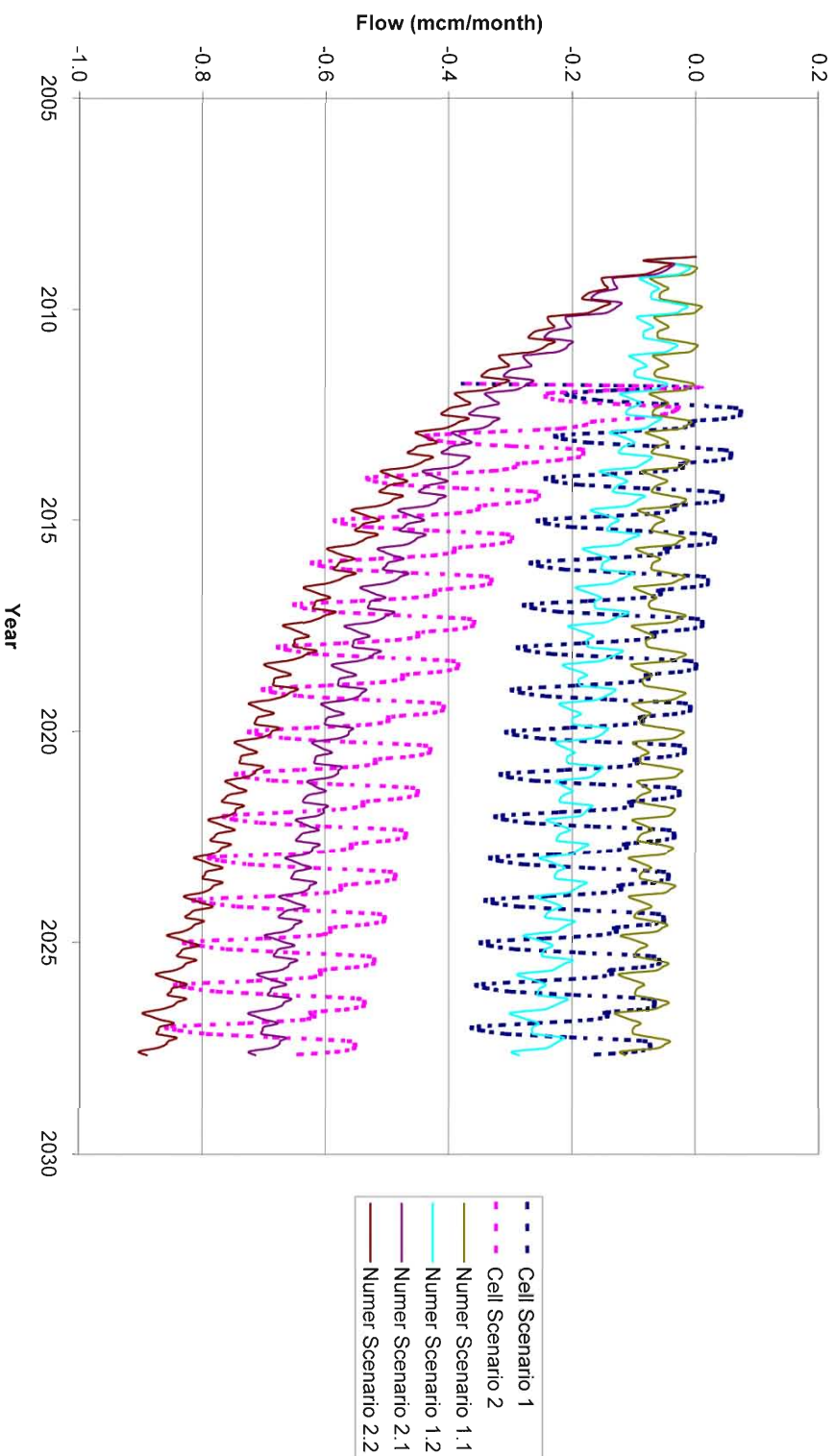
איור 40. מפת הפרש מפלסים שבין סוף תרחיש 1.1 לסוף תרחיש 2.1 (הפקה שנתית של 55 מלמ"ק)

### Fulia Beach Spring Concentration Scenarios (Impervious Deir-Hanna Layer and Pumping additional 10 mcm in Upper or Lower Subaquifer)



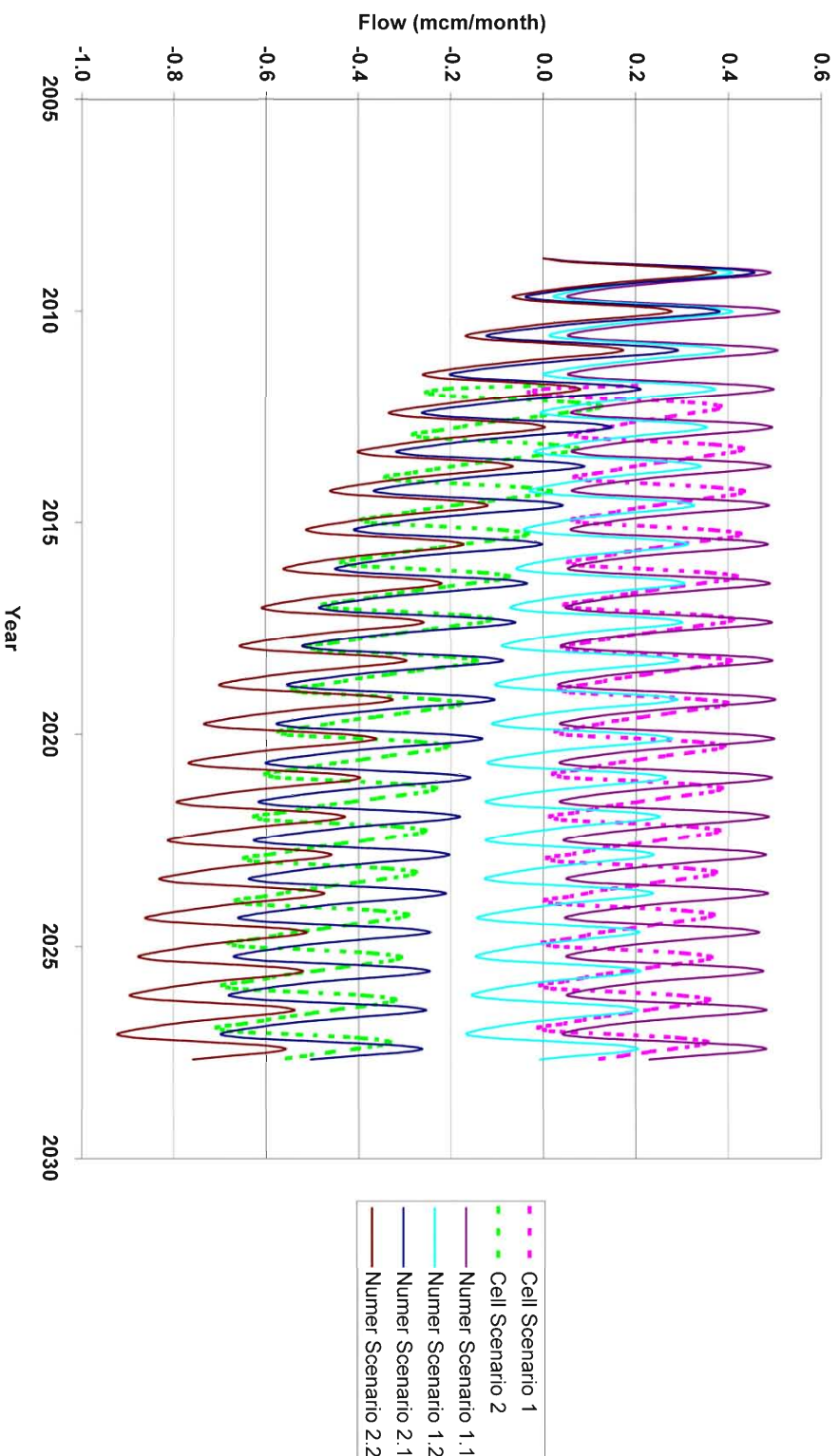
איור 4.1. שינויי המליחות החזויים בפוליה במקרה התאיורטי שבו ישנה הפרדה משמעותית יותר בין שני תתי האקוויפרים של חבורת יהודה

### Fulia Spring Flow Scenarios - Change in flow from end of calibration



איור 42. השוואת תוצאות בין מודל התאים (cell) למודל התלת ממדי (numner) – שפיעות בפוליה

### Tabkha Spring Flow Scenarios - Change in flow from end of calibration



איור 4.3. השוואת תוצאות בין מודל התאים (cell) למודל התלת ממדי (numner) – שפיעות בטבריה





THE MINISTRY OF NATIONAL  
INFRASTRUCTURES  
GEOLOGICAL SURVEY OF ISRAEL

## **Three-dimensional modeling of the Kalanit Basin (Fulia- Tabkha Basin)**

**Yechieli<sup>1</sup> Y., Shaliv<sup>2</sup>, G., Wollman<sup>1</sup>, S., Kessler<sup>3</sup>, A., Rosensaft<sup>1</sup>, M.,  
Berger<sup>4</sup>, D. and Bein<sup>5</sup>, A.**

- 1 – Geological Survey of Israel, Jerusalem
- 2 – En Karem, Jerusalem
- 3 – Environmental & Water Resources Engineering (2002) Ltd.
- 4 – Mekorot Water Company
- 5 – RPD-Geohyd consultant