

המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון
ת.ד. 447 מיגדל 14950,
טלפון: 046721444 פקס: 046724627
דואר אלקטרוני: kll@ocean.org.il



חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ

שפיעת מעיינות באיזור פוליה

טיוטה לשרות ההידרולוגי

אלון רימר

המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל

1. מודל קונספטואלי

1.1 ההידרולוגיה של המעיינות המלוחים

לצורך הבנה כללית של ההידרולוגיה של המעיינות המלוחים בכנרת מתואר החתך הגיאולוגי האפייני של האזור באופן סכמטי, כמערכת המכילה 4 חלקים עיקריים כמתואר בתרשים 1:

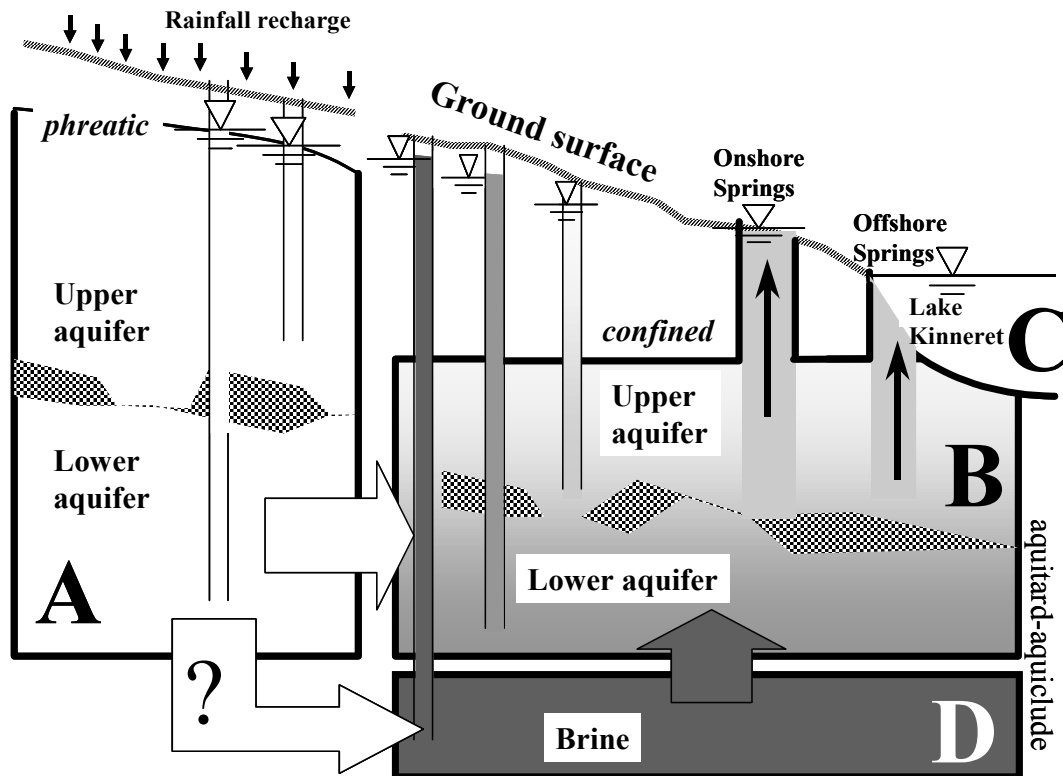
A: מערכת האקוויפרים בגליל המזרחי הכוללת יחידה אקוויפרית עליונה פריאטית עם העשרה בגשם, יחידה תחתונה המופרדת בחלקה מהיחידה העליונה על ידי שכבה חוצצת, וכן קידוחי הפקה;

B: המשך של אותה מערכת לכיוון מזרח, כאשר היא כוללת שתי יחידות של אקוויפרים כלואים באזור חוף הכנרת, עם סדקים אנכיים המהווים מוצא למעיינות חוף ולמעיינות תת-ימיים, וקידוחי תצפית;

C: אגם הכנרת, המפלס והמליחות שנמדדו בו על פני השנים, והמידע שנצבר אודות פעילות המעיינות המלוחים מתוך חישובי מאזן מים ומלח באגם;

D: יחידה נפרדת, שמהווה ייצוג למקור התמלחת, והקשרים ההידרולוגיים בינה לבין היחידות האקוויפריות האחרות A ו-B.

לכל חלק במערכת יש חשיבות בתאור מנגנוני ההמלחה. המודל המוצע בעבודה זו (פרק 5) יישתלב בתאור הסכמטי שבתרשים 3 וייצג את היחידות השונות.



תרשים 1. ארבע יחידות עיקריות בתיאור מנגנוני ההמלחה ותוצאותיה באזור הכנרת: אקוויפרים פריאטיים (יחידה עליונה ותחתונה) והעשרה בגליל המזרחי (A); אקוויפרים כלואים (יחידה עליונה ותחתונה) באזור חוף הכנרת, עם מוצא למעיינות חוף ומעיינות תת-ימיים (B); שינויי המליחות שנמדדו באגם הכנרת (C); מקור התמלחת (D).

מודלים קודמים

מודל הידרוגיאולוגי הוא הפשטה הכרחית של המערכת ההידרולוגית האמיתית, ומטרתו לספק הסבר פיזיקלי מתקבל על הדעת לתצפיות שנאספו ונמדדו בשטח. מודלים פיזיקליים מפורטים (Distributed Model, DM) שבהם קיימת חלוקה של מרחב המודל לחלקים קטנים, ועבור כל חלק קיים ערך מדוד של הפרמטר המבוקש, הם קשים ליישום. מודלים כאלה דורשים מאפיינים הידראוליים מדויקים של אזור המודל- מידע שמבחינה מעשית קשה להשגה. מאחר ובדרך כלל לא ניתן להשיג נתונים מדויקים על הגיאומטריה של המערכת ועל הפרמטרים ההידראוליים, סימולציה של מערכות כאלה נעשית ע"י כיוול מודלים של "קופסאות שחורות" (Black Box, BB).

בין המודלים שהוצעו עבור ההידרולוגיה של אגן מערב הכנרת ניתן למצוא רמות פירוט גיאוגרפי שונות; מודלים למצב יציב בלבד לעומת הרצות בזמן; סקלות של זמן משבועות ספורים ועד עשרות אלפי שנים; ועוד. להלן ייסקרו בקצרה חלק מהמודלים הידועים לנו.

מודל BB המתאר את מרכיבי המערכת ההידרולוגית של מעיינות טבריה, פוליה וטבחה כמערכת מיכלים ומובלים פותח ע"י כהנוביץ ומירו (1973). כל קבוצת מעיינות במודל תוארה באמצעות מבנה שונה של מיכלים ומובלים, ובאמצעות משוואות זרימה הגיעו המחברים לביטויים שבאמצעותם ניתן לכייל את המודל לפי ערכים מדודים של ספיקת המעיינות.

במודל דו-מימדי אנכי (DM) שפותח למערכת מעיינות הכנרת (מרכדו ומירו, 1984) תואר חתך דרך אקוויפר חבורת יהודה מאזור קידוחי חטיין במערב עד מעיינות פוליה במזרח. המודל היה תלוי זמן, ואיפשר לחוקרים לבחון את התנהגות המערכת לאורך תקופת שאיבה של שנים. כבר במודל זה הראו המחברים שמשטר ספיקת המעיינות התת-ימיים מתנהג בזמן בהתאמה הפוכה למשטר ספיקת מעיינות החוף. – אבחנה שאושרה מאוחר יותר ע"י מדידות מפורטות יותר (ראה סעיף 4.2 בהמשך).

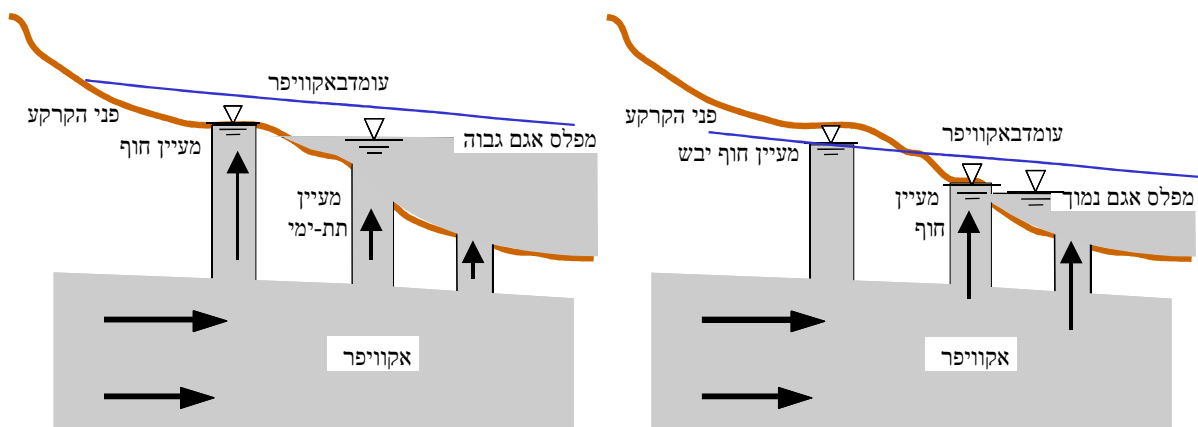
מודל BB אחר של כניסות מים (פ. מירו, תה"ל, מודל MM08), שימש מאוחר יותר גם לתאור כניסות מלח לכנרת (Mero and Simon, 1992). המודל מבוסס על תאור מתמטי-סטטיסטי של שפיעה יומית של מים ומלח לכנרת מ-4 מקורות אפשריים: נהר הירדן; גשם ישיר על פני הכנרת; נגר ישיר מאגנים סביב לכנרת שאינם כלולים באגן הירדן; ומעיינות מלוחים ברמת מליחות משתנה. המודל הכיל 3 רכיבים-מאזן מים, מאזן מלח, וחישוב כולל. לכל רכיב חושבה סדרת שפיעה מאפיינת כפונקציה של גשם, וסדרה זו כוילה – הן עבור שפיעה והן עבור ריכוז כלור- כנגד נתונים מדודים. סכום השפיעות כויל כנגד השינוי במפלס הכנרת וכנגד מליחות הכנרת.

במודל ההידרולוגי כמותי דו-מימדי אנכי (DM) של Gvirtzman et al (1997) הוצגו ההבדלים העקרוניים בין מודל "הפוטנציאל העצמי" לבין "מודל השטיפה", וההשלכות המעשיות הכרוכות בקבלת מודל אחד ודחייתו של אחר (ראה תרשים 2 אצל Gvirtzman et al, 1997). המודל (כולל את כל היחידות המופיעות בתרשים 3 לעיל), הופעל תחת הנחת זרימה קבועה (steady state) באקוויפרים המתנקזים לכנרת, ובכך חסרונו העיקרי, שכן עיקר הערכים הנמדדים במערכת ההידרולוגית של מערב הכנרת הם שינויים בזמן. החוקרים הציעו כי מקור ההבדלים במשטרי השפיעה וההמלחה של קבוצות המעיינות השונים הוא במבנה אזורי ההעשרה של האקוויפר המתוק

(יחידה עליונה) והמלוח (יחידה תחתונה) בהרי הגליל המזרחי. מסגרת המודל כקבוע בזמן אפשרה לבחון הצעה זו באופן כללי בלבד, אך ללא אפשרות ממשית להשוות את תוצאות המודל למדידות הניטור במעיינות הכנרת.

רימר והורוביץ (1997) ו-Rimmer et al (1999) הציעו מודל המלחה קונספטואלי מטיפוס BBo תלוי זמן, המתאר את מנגנון המלחת המעיינות בחוף המערבי של הכנרת כקבוצת מיכלים (אקוויפר עליון, אקוויפר תחתון, ואגם) המקושרים ביניהם ע"י מובלים שדרגת ה"הולכה" (conductance) שלהם שונה עבור כל קבוצת מעיינות. המודל נוסח בסדרת משוואות שניתן לפתור אנליטית, ולהשוות את התוצאה המתקבלת למשטר שינוי העומד והספיקה של מעיינות החוף המערבי. מסקנתו העיקרית של המודל היתה שמנגנוני ההמלחה ב-3 אתרי השפיעה העיקריים (טבחה, פוליה, וטבריה) נבדלים ביניהם במידת הקשר שבין האקוויפרים לאגם, ובמידת ההשפעה שיש לכל רכיב על המפלסים, הספיקה, והריכוזים הנמדדים בסביבת המעיינות.

מודל אנליטי מפורט המציג באופן תאורטי את השפעת מפלס הכנרת על שפיעת המעיינות באזור פוליה הוצע ע"י Rimmer (2000), ועיקרי התאוריה מופיעים בנספח א' במסמך הנוכחי. המנגנון המוצע מתייחס אך ורק לתחום B בתרשים מס. 3 לעיל. (אקוויפרים כלואים, עם מוצא למעיינות חוף ומעיינות תת-ימיים). כפי שיוצג בהמשך, לתנועת מפלס האגם יש השפעה מכרעת על אופי המדידות המתקבלות בדיגום מעיינות פוליה. ירידת מפלס האגם גורמת להקטנת העומד בנקודת הנביעה של מעיין תת-ימי (תרשים 2). כתוצאה מכך הפרש העומד בין האקוויפר המתנקז לאגם לבין נקודת הנביעה גדל, והשפיעה התת ימית גדלה. במקביל, קצב ההתנקזות המוגבר של האקוויפר למעיינות התת ימיים גורם לירידה בעומד של האקוויפר ביחס לנקודות הנביעה הקבועות של מעיינות החוף, וכתוצאה מכך קטנה או מפסיקה השפיעה מנקודות נביעה גבוהות. ירידת מפלס האגם גורמת במקביל להיחשפותן של נקודות נביעה תת-ימית (שהיו שם קודם לכן, אך לא ניתן היה לראותן) שמרגע היחשפותן הן מייצגות מעיין חוף. בהיותן נמוכות יותר מאלו שהנביעה בהן פסקה, הן שופעות מים. מכאן ההגדרה של "נדידת מעיינות" שאיננה נדידה כלל ועיקר.



תרשים 2. מודל לשפיעת מעיינות פוליה במפלס אגם נמוך (ימין) וגבוה (שמאל). אורך החצים מייצג באופן סכמטי את שיעור השפיעה לכל מוצא של האקוויפר.

המודל התלת מימדי של Abbo et al (2003) הוא DM המיועד לתאר בעיקר את השפעתם של אזורים סדוקים שמקשרים בין אקוויפר כלוא לאגם. התחום התלת מימדי חולק לשישה תתי

תחומים המייצגים מבנה הידרוגיאולוגי - שכבות או סדקים. השכבות והסדקים הוגדרו בעזרת מקדמי מוליכות, נקבוביות, אנאיזוטרופיות ודיספרסיה אופיינים. האלגוריתם של MODFLOW אינו בנוי על מנת לתאר דינמיקה של זרימה בסדקים בודדים, ולכן התחום המייצג את הסדקים במודל מתאר למעשה תחום שתכונותיו ההידראוליות הן ממוצעות על פני איזור סדוק. המודל התמקד בהדגשת ההבדלים שבין איזורי טבחה ופוליה; בהבנת התנהגות מעיינות חוף ומעיינות תת-ימיים; וכן ניתן להראות בעזרתו את ההבדלים הצפויים בין מעיינות שכנים בתוך אותה קבוצת מעיינות.

2. מעיינות חוף ומעיינות תת-ימיים-סיכום ממצאים

2.1 נתוני אזור פוליה

סיכום ממצאים מפורט לגבי שפיעה, עומדים ומליחות במעיינות פוליה מופיע אצל רימר והורוביץ 1997, וכן אצל Rimmer et al. (1999) ו-Rimmer (2000). הממצאים העיקריים מסוכמים בנקודות הרשומות להלן, ובתרשימים 5, 6, 7 ו-8.

- הגשם המדוד באזור הר כנען מובא בתרשים 3 כמייצג של הכח המניע של התהליך ההידרולוגי הכולל. בהשוואה לאזור טבחה למשל מפלסי קידוחים באזור פוליה מושפעים מהגשם במידה קטנה (תרשים 4). שינויי עומד שנכפים על המערכת ההידרולוגית בפוליה בשל עליית מפלסים בהרי הגליל המזרחי, כמעט ואינם מורגשים בסמוך לאגם, שכן אזור זה מושפע בעיקר משינויים במפלס הכנרת. זו הסיבה שמתוך נתוני רום המפלסים בפוליה לא ניתן להבחין בהשפעה ישירה של הגשמים בגליל המזרחי ובקרבת הכינרת.

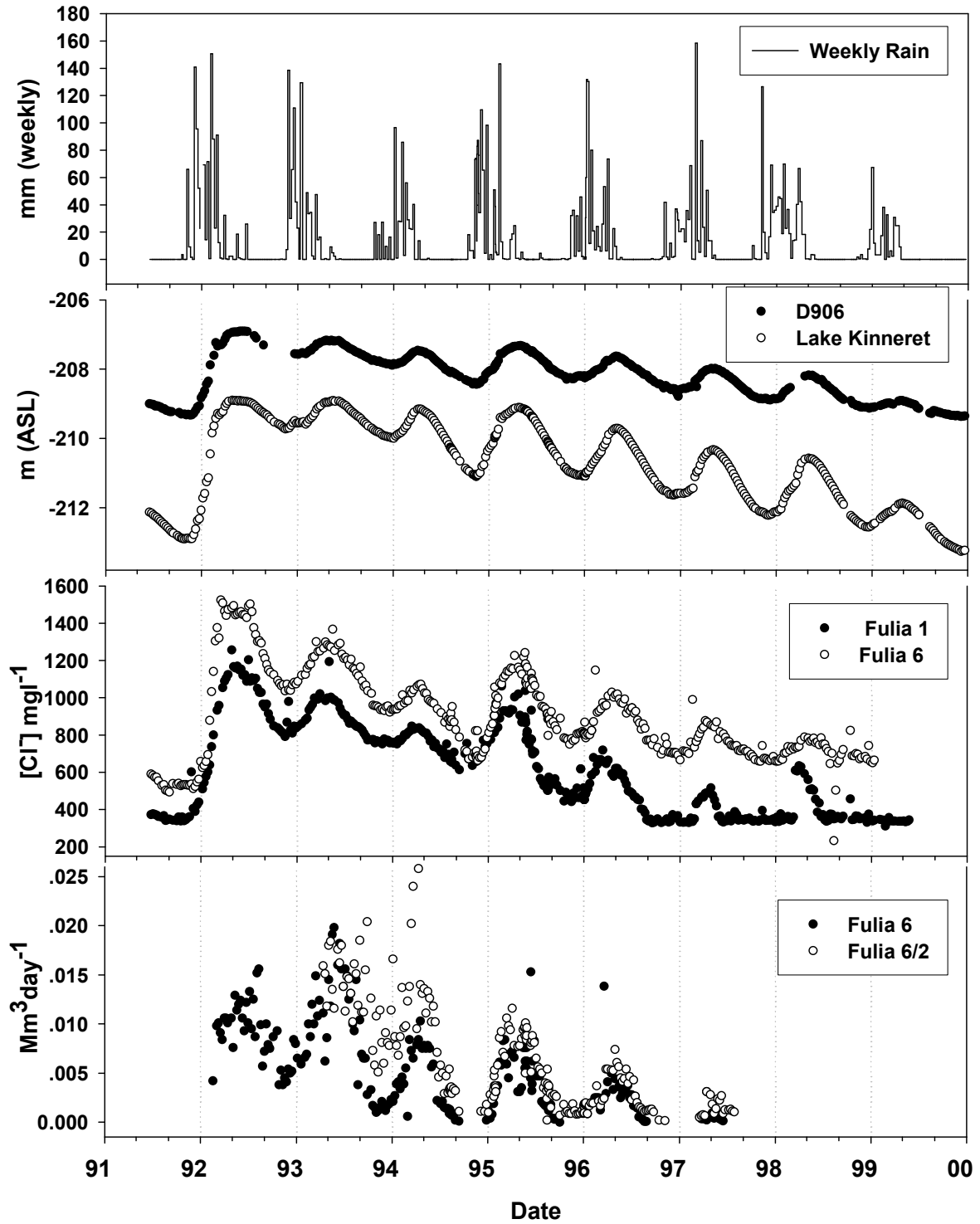
- תנודת מפלס הכינרת במהלך השנה (שנקבעת ע"י גורמים חיצוניים למערכת המעיינות, כגון גשם, שפיעת ירדן, שאיבה, התאדות וכו') משרה תנודה מקבילה, אך קטנה יותר, במפלס האקוויפרים המחוברים לכינרת באזור פוליה. משרעת התנודה הולכת וקטנה ככל שקידוח התצפית רחוק יותר מן האגם. קיימת תלות ליניארית מובהקת בין מפלס הכנרת לבין מפלסים הנמדדים בקידוחי תצפית בקרבת האגם באזור פוליה (וגם בטבריה), ובהם מקדם הרגרסיה נמצא בין 0 ל-1. בקידוחים D906 (תרשים 5) וכנרת 1 למשל, מקדם הרגרסיה הוא 0.52, ובצינור התופס את המים של פוליה A מקדם הרגרסיה הוא 0.89.

- על פי תרשים 3 קיימת תלות ברורה בין מפלס הכנרת לבין המליחות המדודה במעיינות. לעומת זאת קיימים ממצאים המראים כי בקידוח D906 המליחות היא נמוכה יחסית (כ- 400 מג"ל) ומשתנה כתמונת ראי של מפלס האגם (בכיוון הפוך להשתנות מליחות המעיינות). נושא זה ייבחן בפירוט יתר בהמשך.

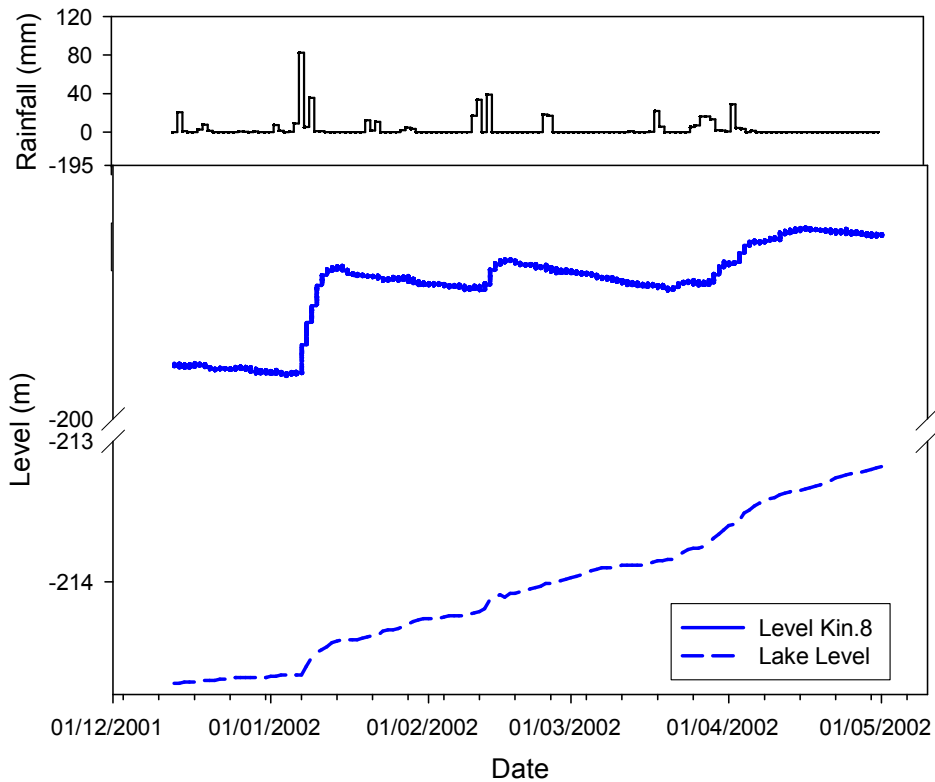
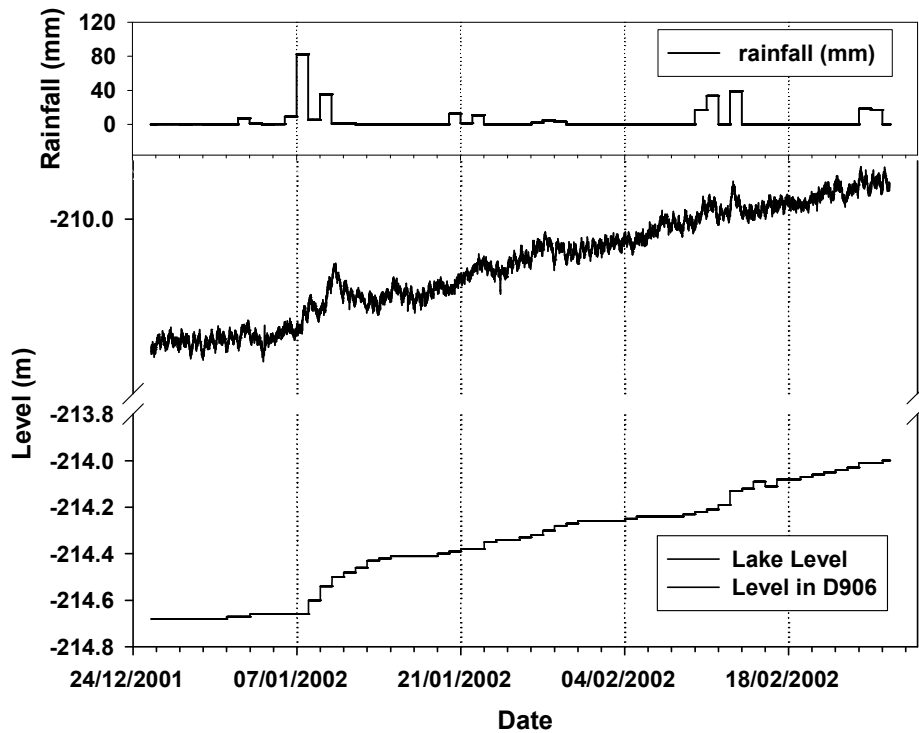
- במערכת ההידרולוגית של פוליה התנודה האנכית המושרית ע"י מפלס האגם היא הדומיננטית גם בקביעת הספיקות הנמדדות במעיינות החוף בקרבתו. בשני המעיינות המוצגים בתרשים 3 בולטת תלות זו, וכן בולטת העובדה שבמפלס אגם נתון (210.5- בקירוב) מעיינות אלה מתייבשים. כמו כן נראה בבירור כי "לוח הזמנים" של ספיקת המעיין, מקביל ללוח הזמנים של מפלס הכנרת. עובדה זו בולטת במיוחד בהשוואה בין שפיעת מעיינות פוליה לשפיעת מעיינות טבחה (תרשים 6), כאשר

האחרונים מייצגים מערכת הידרולוגית שאיננה מושפעת באופן מובהק ממפלס האגם, ושיא השפיעה שלהם מקדים את מפלס הכנרת בכחודש – חודשיים.

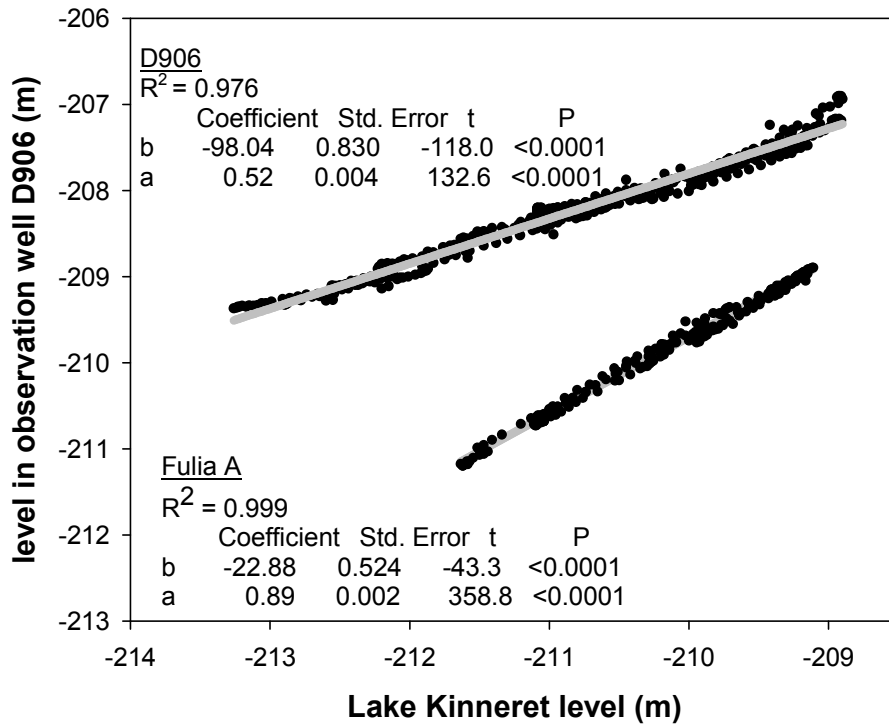
- בזמן שאיבת ניסיון שנעשתה בקידוח 10ב' (מ- 22/12/1996 שעה 10:00; עד 26/12/1996 שעה 16:00) נידגמו מפלסים, מליחיות ושפיעת מעיינות. שפילת המפלס בקידוחים כינרת 1 ו - D906 כתגובה לתחילת השאיבה בקדוח 10ב החלה דקות ספורות לאחר תחילת השאיבה. במרבית שלבי הניסוי השפילה ב- D906 המרוחק יותר מן הקדוח השואב (350 מ') קטנה בכ-1 ס"מ מזו שבקידוח כינרת 1 (250 מ'). השפילה בכינרת 5 (45 מ' מן הקידוח השואב) בשלבי השאיבה הראשונים גדולה בהרבה מזו שבשני הקידוחים האחרים. בתוך כ-36 שעות התייצבה השפילה בקידוחים המרוחקים על כ-21 ס"מ תחת המפלס ההתחלתי (מצב יציב). על סמך תוצאות השפילה חושבו התולכה והאגירות של האקוויפר (רימר וברגר, 1997; Braester1997; לומלסקי ומיכלסון, 1997) והתקבלו ערכי תולכה כ- 12000 עד 25000 מ² ליום, ואגירות בין 0.0055 ל-.0.1.



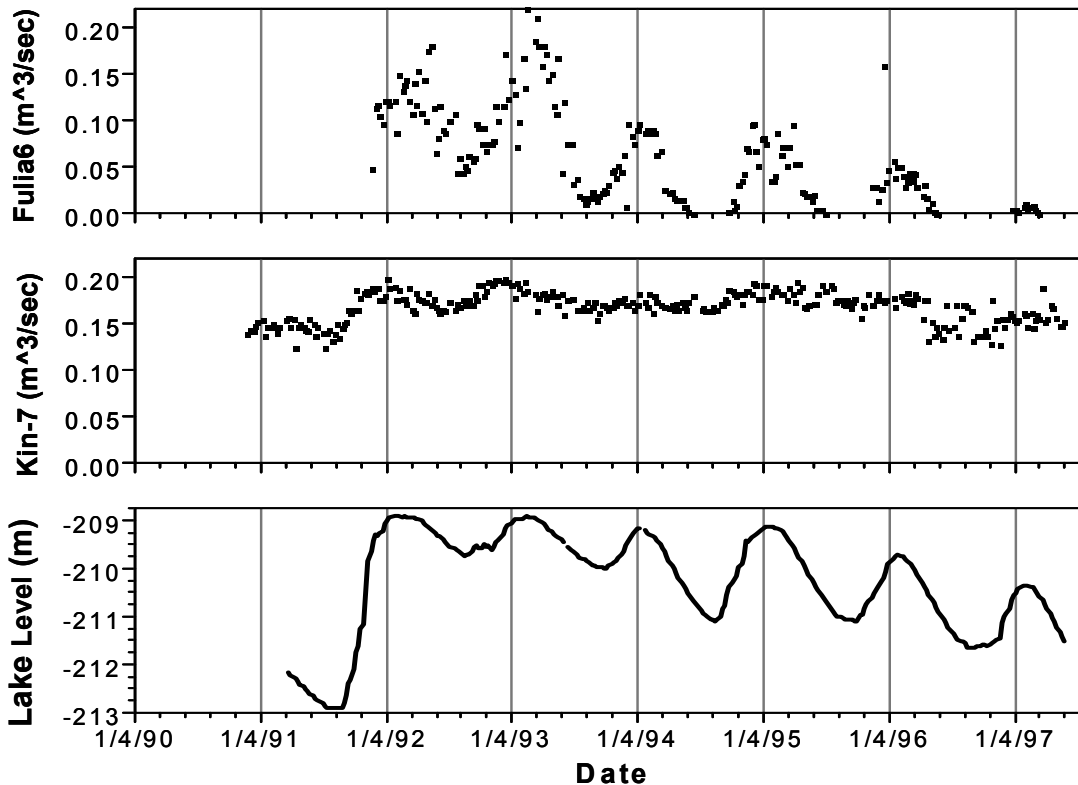
תרשים 3. נתונים מדודים לשנים 1991–2000. מלמעלה למטה: גשם שבועי בהר-כנען; מפלס כנרת ומפלס קידוח D906; מליחות מדודה במעיין פוליה 6 ופוליה 1; ספיקות מעיינות חוף (פוליה 6; ופוליה 6/2).



תרשים 4. השוואה בין גשם יומי בהר כנען, מפלס כנרת יומי, והמפלסים הרגועים שנמדדו בבאר התצפית D906 בפוליה (למעלה) ובבאר התצפית כנרת 8 בטבחה (למטה) (נתוני Diver מדורן מרקל לחורף 2001-2002). מפלס קידוח D906 עולה בעיקר במקביל למפלס הכנרת, ונרשמת עלייה מזערית כתוצאה מגשמים, שקטנה ודועכת תוך ימים ספורים. המפלס שנמדד באזור טבחה רושם עלייה הניכרת בתגובה לאירועי גשם.



תרשים 5. רגרסיה ליניארית בין מפלס הכנרת והמפלסים שנמדדו בבאר התצפית D906 ופוליה A (מידות שבועיות)



תרשים 6. השוואה בין מפלס הכנרת, ספיקות מעיין באזור פוליה (למעלה) וספיקות מעיין באזור טבחה. ספיקת מעיין באזור פוליה מקבילה בזמן למפלס הכנרת, וכן חלים בה שינויים גדולים, בעוד שבאזור טבחה שיאי ספיקת המעיין מקדימים במעט את שיא מפלס הכנרת, והספיקה יציבה יחסית.

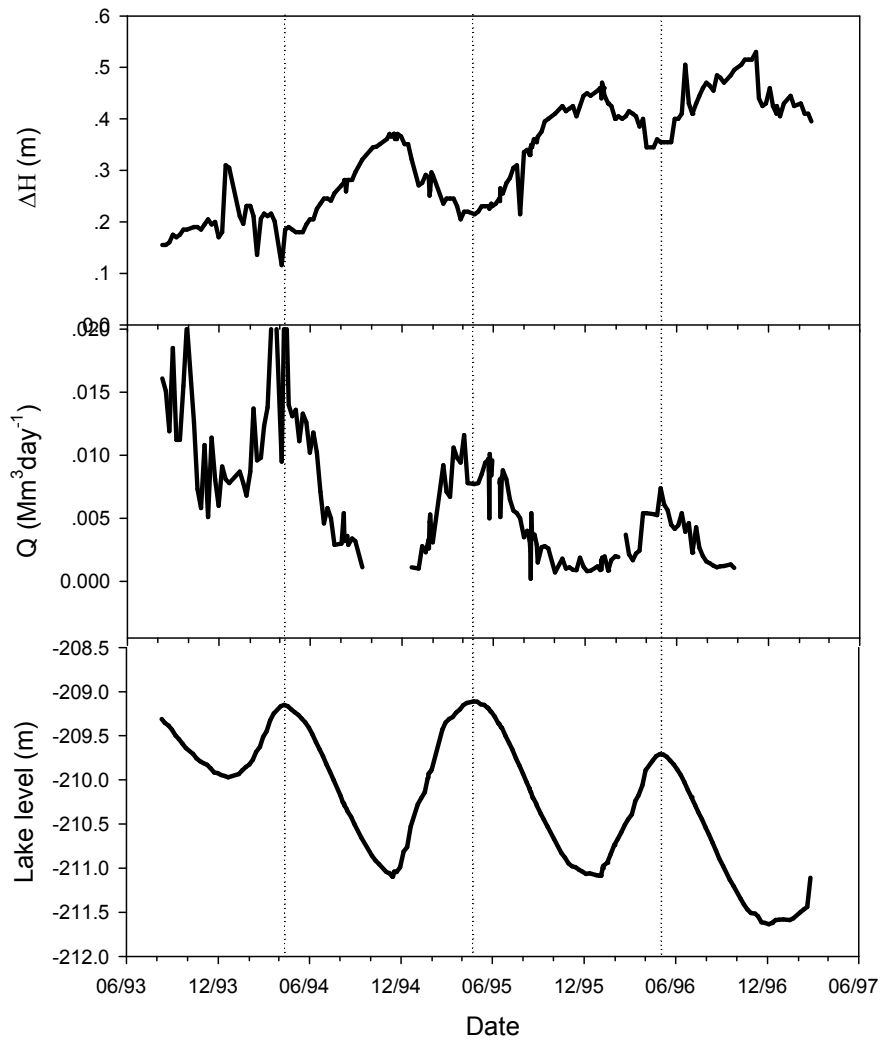
מדידות של שפיעת המעיינות התת-ימיים

בשל מגבלות מובנות במדידת ספיקות של מעיינות תת-ימיים יש לנצל כל דרך המובילה להערכה של סדר הגודל ומגמות השינויים החלים בעצמת שפיעתם. שלוש השיטות העיקריות נתונות להלן:

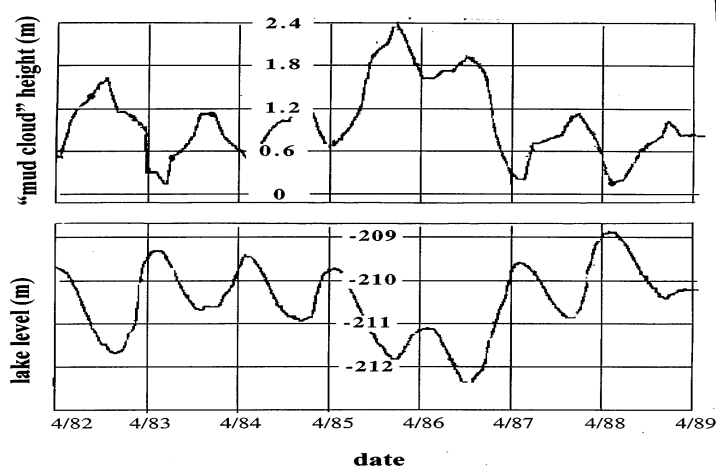
הפרשי עומד: מעין פוליה A הוא מעין תת-ימי שנתפס בחלקו ע"י צינור, שעוגן לקרקעית הכנרת באמצעות יציקת בטון. במפלסים שאיפיינו את הכנרת בין שנת 1992 ל-2000, היתה נקודת הנביעה מטובעת, אך ניתן היה למדוד את העומד הפיאזומטרי בצינור ולהשוותו למפלס הכנרת (תרשים 7). הפרש העומדים (ΔH) מייצג את המאפיינים של השתנות ספיקת המעיינות התת-ימיים בזמן, בהשוואה למפלס הכנרת (ראה משוואה 3 בנספח א'). משטר שינוי הפרשים בזמן הוא תמונת ראי של מפלס הכנרת, ומעיד על כך שספיקת המעיינות התת-ימיים מצויה בהתאמה הפוכה למפלס האגם, כלומר, ככל שמפלס האגם נמוך יותר תהיה ספיקתו של מעין תת-ימי נתון גבוהה יותר (ראה גם משוואה 11 בנספח א').

"גובה ענן הבוץ": על פי דיווחי תה"ל (סימון ואייזיק, 1991) במשך מספר שנים נמדדהווערך ע"י צוללן גובה ענן הבוץ שמיתמר מעל מכתש מעיינות "מעגן" והיווה אינדיקציה לעצמת הספיקה במעיינות אלה (מעיינות "מעגן" הם תוצאה של התנקזות האקוויפרים מאיזור פוליה דרך מוצא תת-ימי). גובה ענן הבוץ (תרשים 8) מעיד באופן ברור למדי על מגמה הפוכה של הספיקה התת-ימית ביחס למפלס הכנרת.

מדידות ספיקה באמצעות מדי חלחול תת-ימיים: במספר עבודות שנעשו לאחרונה נמדד שעור החלחול משולי האגם, בנקודות שאינן מוגדרות כנביעות של מעיינות תת-ימיים, אלא כ"שפיעה מפוזרת" (dispersed intergranular advective flow). ניתן להבחין בשני אזורים שונים מבחינת תרומת המלח: 1. החלק המרכזי של קרקעית האגם, באזור המילוי הסדימנטרי; 2. שולי האגם, בעיקר בחלקו הצפון-מערבי, מעל שכבות אקוויפריות. בעבודתם של Hurwitz et al., 2000a אשר עסקה בשטף המומסים דרך החלק המרכזי של קרקעית האגם, מדווחים החוקרים על מהירות זרימת מים אנכית של כ- 0.2 ס"מ לשנה בלבד. לעומתם, Mortimer et al., 1999 אשר בדקו את שטף המים מהקרקעית בקרבת חוף חמי טבריה (30-37 מטרים מהחוף), מדווחים על מהירות אנכית של 164-30 ס"מ לשנה. חוקרים אלה מציעים כי אזור ה-litoral במערב הכנרת מייצג אזור פעיל של חדירת מלח דרך הקרקעית לאגם. עם זאת, חישוביהם מראים כי על מנת לספק את כל מסת המלח הנכנסת לאגם ממקורות לא מנוטרים דרוש שטח קרקעית גדול מאד, אשר אינו עולה בקנה אחד עם נתוני השטח. לכן הסיקו החוקרים כי מעיינות תת-ימיים הם המספקים, בשפיעה נקודתית, את רוב מסת המלח. ממצאים אלה מתיישבים גם עם תוצאות מחושבות במודל של Abbo et al. (2003). לפי שעה אין הערכות לגבי משטר הספיקה בזמן של השפיעה המפוזרת התת-ימית, אך ההגיון הפיזיקלי מחייב שהשינויים בזמן יהיו דומים במגמתם לאלו של המעיינות התת-ימיים.



תרשים 7. נתונים מדודים לשנים 1993-1997. מפלס כנרת יומי (למטה); ספיקת מעיין חוף (פוליה 6/2; אמצע); והפרשים מדודים בין מפלס פוליה A והכנרת (למעלה) כמייצגים את משטר הספיקה התת-ימית, בהנחה שזו תלויה ליניארית בהפרש המפלסים (ראה גם משוואה 11).



תרשים 8. גובה ענן הבוץ שנמדד מעל מכתש מעיינות "מעגן" והיווה אינדיקציה לעצמת הספיקה במעיינות אלה. (ע"פ סימון ואייזיק, 1991).