

מנגנון ספיקת מים ומלח מן המעיינות המלוחים במערב הכנרת

אלון רימר, חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ, המעבדה לחקר הכנרת

הקדמה

למליחות מי הכנרת השלכות ישירות על מערכת אספקת המים הארצית, שכן הכנרת מספקת כ- 30% מתצרוכת המים של ישראל דרך שאיבה למוביל הארצי ובשאיבות מקומיות. מדיניות שאיבה טובה, שלפיה תסופק כמות המים המרבית מן הכנרת ומן האקוויפרים בגליל המזרחי תוך שמירה על איכותם, מהווה אינטרס חיוני של מערכת אספקת המים הארצית. בעיית המליחות מחריפה בעיקר בשנים שחונות שבהן כמות הגשמים קטנה, מפלס האגם נמוך, ומיהול המלח באגם ע"י מי נגר עילי מתוקים מוגבל. כיום, לנוכח שינויים אפשריים במדיניות תפעול הכנרת והסכמי המים עם ממלכת ירדן, יש לבחון כל מדיניות שאיבה גם לגבי מידת השפעתה על מליחות האגם.

במהלך 30 השנים האחרונות נערכו מחקרים רבים שמטרתם להבין את תהליכי ההמלחה ולהעריך כמותית את חלקם של המקורות השונים בהמלחת הכנרת. מדידות הוכיחו כי קיימים הבדלים ניכרים במשטר שפיעת המים והמלח ממעיינות החוף המערבי, ולכן ניתנו בעבר מספר הסברים למנגנון ההמלחה. ע"פ הממצאים הגיאוכימיים ההנחה המקובלת היא שמקור המעיינות המלוחים הוא בערבוב מים מטאוריים מתוקים שמקורם באקוויפרים שבהרי הגליל המזרחי, עם מי תמלחת מאקוויפר עמוק יותר. גם לאחר קבלת הנחה זו לא נמצא הסבר שיניח את הדעת הן מבחינה הידרולוגית והן מבחינה גיאולוגית למשטר השפיעה והמליחות המגוון של מעיינות אלה. מודלים של מנגנוני המלחה שהוצעו בעבר, ייחסו את ההבדלים במשטר המליחות של המעיינות למנגנוני המלחה שונים בתכלית (מודל הפוטנציאל העצמי לעומת מודל השטיפה), או להבדלים באזורי ההעשרה של האקוויפר המתוק והמלוח.

מטרת העבודה היא להסביר את מנגנון שפיעת המעיינות המלוחים לכנרת בשני שלבים עיקריים: בשלב ראשון נוסח מודל המלחה קונספטואלי, המבוסס על מידע קודם וממצאים חדשים על ההידרוגיאולוגיה של אגן הכנרת בכלל, והאזור הקרוב (כמה מאות מטרים) לחוף האגם בפרט. בשלב שני נבחנה התכנות המודל באמצעות משוואות ערבוב ומשוואות זרימה, וכן נתוני ספיקה, מפלסים וגיאוכימיה שנאספו ע"י יחידת אגן ההיקוות של מקורות והשרות ההידרולוגי במהלך עשרים השנים האחרונות בתדירות שבועית. בכוונתנו להשיב לשאלות הבאות:

1. האם ניתן להסביר את כל משטרי ההמלחה באמצעות מודל אחיד?
2. מדוע קיימים הבדלים קיצוניים בין משטרי ההמלחה של מעיינות החוף המערבי?
3. כיצד מושפעת ספיקת המעיינות מהגשמים באגן ההיקוות של הכנרת, והיכן נוכל להבחין בהשפעה זו?
4. כיצד משפיע רום מפלס הכנרת על ספיקת מעיין חוף, וכיצד ישפיע על ספיקת מעיין תת-ימי?

המבנה הגיאולוגי של אזור המעיינות

הכנרת ממוקמת באגן (Pull Up Basin) שמכוסה ע"י יותר מ- 4000 מ' של יחידות מילוי מתקופת מיוקן עד רביעון, המכיל משקעי נחלים ומשקע ימי, סלעים מגמתיים ואופוריטים. יחידות המילוי אטימות בעיקרן ותכונה זו גורמת לשינוי בכיוון זרימת מי-תהום מהאקוויפרים האזוריים: באזור השבר נתקלים מי האקוויפרים ביחידות המילוי האטימות ועולים לפני השטח לאורך סדקים שנוצרו בשברים גיאולוגיים מקומיים.

שלוש קבוצות מעיינות החוף העיקריות (טבחה, פוליה וחמי-טבריה) ממוקמות בנקודות מפגש של שתי מערכות שברים גיאולוגיים שגרמו לבלוקים מורמים של אקוויפר חבורת יהודה (קנומן-טורון) להיחשף בפני השטח. מחשופים אלה הם היחידים שאותרו לאורך החוף המערבי של הכינרת, וייתכן שעובדה זו מצביעה על קשר אפשרי בין מיקום המעינות והבלוקים המורמים.

אזור ההעשרה של האקוויפרים האזוריים שמתנקזים לכיוון הכינרת מצוי באזור הגליל המזרחי ושטחו כ - 660 קמ"ר. האזור מתנשא עד גובה 1200 מ' מעל פני הים (הר מירון), והרום המקסימלי של מי תהום שנמדד בו הוא כ- 400 מ' מעל פני הים. אזור ההעשרה מחולק למספר אגנים, המופרדים ביניהם ע"י שברים עיקריים שמגבילים מעבר מים מאגן אחד לאחר. כל אגן כזה מתנקז למעשה ע"י קבוצת מעיינות אחרת לחוף האגם או בקרקעיתו. שני אקוויפרים עיקריים מתנקזים למעינות הכינרת:

1. אקוויפר חבורת יהודה (קנומן-טורון, קרטיקון עליון) שמכיל בעיקר דולומיט ואבן גיר מהווה את עיקר אזור ההעשרה של מעיינות החוף המערבי. האגן המתנקז במעינות חמי טבריה מורכב רובו ככולו מסלעי חבורת יהודה, ובפוליה חלקו היחסי פוחת אך הוא נשאר המרכיב העיקרי. בשטח המתנקז ע"י מעיינות טבחה חלקה של חבורת יהודה באזור ההעשרה קטן יחסית לזה של פוליה. במספר מקומות בגליל אקוויפר חבורת יהודה ניתן לחלוקה אופקית לשני תת-אקוויפרים (עליון ותחתון) ע"י אקוויטרד של תצורת דיר-חנה. במקומות אחרים האקוויפר שומר על רציפות.
2. אקוויפר חבורת עבדת (איאוקן) מורכב בעיקרו מאבן גיר קרסטית. שטחו באזור ההעשרה של טבחה 60 קמ"ר, לעומת 10 קמ"ר בקירוב באזור ההעשרה של פוליה וללא מחשופים באזור ההעשרה של חמי-טבריה.

פירוס המליחות לעומק בקידוחי תצפית עמוקים כינרת 10'ב' (פוליה) וכינרת 8 (טבחה) מגלה פן-ביני שבו חל שינוי מליחות חד בעומק של כ - 200-300 מ' בין מליחות של כ- 3500 מג"ל בעומק של כ - 200 מ', ל - 15,000 ו - 18,000 מג"ל החל מעומק 300 מ' ומטה. הפן הביני המוגדר ע"י שינויי מליחות אינו מלווה בממצאים ליתולוגיים המאפשרים אבחנה מדויקת של שכבה שונה בתכונותיה ההידראוליות בעומק 200 מ' ואילך. למרות זאת אנו מעריכים כי האנך שלאורכו משתרע גרדיאנט המליחות (ובקידוח כינרת 8 גם גרדיאנט העומד הסטטי) מגדיר שכבת הפרדה בין אקוויפר עמוק מלוח, לאקוויפר מהול בחלק העליון. ככל הנראה, הפן הביני מהווה את חלקו התחתון של אזור הערבוב בין התמלחת בעומק לבין אקוויפר המים המתוקים שמעליה. המשמעות של קביעה זו היא שערבוב מי תמלחת ומים מתוקים שנצפה בהרכב הכימי של מעיינות טבחה ופוליה חל בעומק קטן מ - 300 מ'. בחמי טבריה הערבוב זניח או שאינו מתרחש כלל, ופרופיל המליחות כולו מצוי בתחום 15,000 - 18,000 מג"ל.

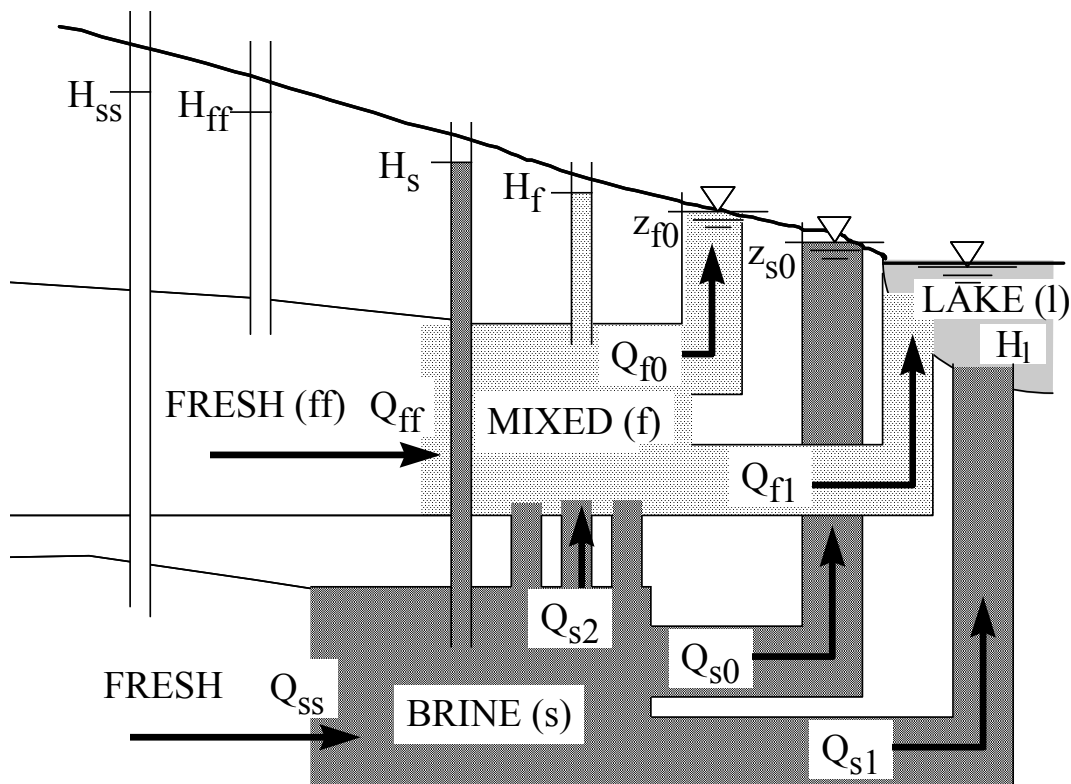
לאור ממצאים אלה ואחרים הנחנו כי אזור התמלחת שתורם למעינות הכינרת מצוי בד"כ ברצועה בעומק קטן מ - 300 מ' מתחת לפני האגם, לאורך קטעים מוגדרים, שגבולם המערבי מגיע עד טווח מאות מטרים ספורים בלבד מהחוף המערבי של הכינרת.

מודל קונספטואלי

על סמך המידע הגיאולוגי וההידרולוגי המוצג לעיל, וההסכמה הכללית בדבר מנגנון ערבוב של מי תמלחת מרוכזים עם מים מטאוריים מתוקים, מוצע בזאת המודל הקונספטואלי הבא (תרשים 1) לתיאור רכיבי המערכת של מעין מלוח. המודל הוא הפשטה הכרחית של המערכת הפיזיקלית האמיתית, ומטרתו לספק הסבר פיזיקלי מתקבל על הדעת לתצפיות שנאספו ונמדדו בשטח. המודל כולל אקוויפר כלוא מתוק עליון (FRESH), ככל הנראה אקוויפר האיאוקן וחלקו העליון של אקוויפר הקנומן-טורון), ותחתיו אקוויפר כלוא, מלוח בחלקו המזרחי הקרוב לאגם (BRINE), ככל הנראה חלקו התחתון של אקוויפר הקנומן-טורון).

העומד באקוויפר התחתון במרחק גדול מן האגם (H_{ss}) נקבע ע"י מחזור המים המטאוריים בדומה לעומד (H_{ff}) באקוויפר המתוק. האקוויפרים מופרדים ע"י חציצה אקוויקלודית (תצורת דיר חנה?) ומתערבבים ביניהם דרך מערכת סדקים ליצירת קטע אקוויפר מהול (MIXED) בסמיכות לחוף הצפון מערבי של הכינרת ואף מתחת לתשתית האגם. אנכית לאזור הערבוב העומד ההידראולי של האקוויפר המלוח (H_s) תמיד גבוה מזה של האקוויפר המתוק (H_f) וכתוצאה מכך מים בספיקה Q_{s2} זורמים מהאקוויפר המלוח למתוק. כהנחת יסוד, לשני האקוויפרים אפשריים מוצאי ניקוז לאגם (Q_{f1} ו- Q_{s1}) בשפיעה מרוכזת דרך מעיינות תת-ימיים, ושפיעה איטית מפוזרת ע"פ שטח גדול) ולריכוזים של מעיינות חוף (Q_{f0} ו- Q_{s0}). המים המהולים מתנקזים דרך סדרת מוצאים ברום z_{f0} , המייצגים את מעיינות החוף המלוחים, ודרך סדרת מוצאים תת-ימיים בעומד השווה למפלס האגם H_l . האקוויפר המלוח מתנקז דרך האקוויפר המתוק שמעליו, Q_{s2} , אל סדרת מעיינות חוף ברום z_{s0} , ואל מוצאים תת-ימיים בעומד H_l .

על פי המודל הקונספטואלי המוצע מחזור המים המטאוריים הוא הקובע את תהליכי הערבוב (מודל השטיפה). מנגנוני ההמלחה ב-3 אתרי השפיעה העיקריים נבדלים ביניהם במידת הביטוי שיש לכל רכיב במערכת ההידרולוגית (אקוויפר מתוק, אקוויפר מלוח, ואגם), ובמוליכות ההידראולית של הנתבים המקשרים בין רכיבי המערכת. שני גורמים אלה קובעים למעשה את הריכוזים, הספיקה, והמפלסים הנמדדים בסביבת המעיינות.



תרשים 1: מבנה המערכת ההידרולוגית של מעיינות החוף המערבי- מודל קונספטואלי

יחסי ערבוב בין רכיב המים המתוקים ורכיב התמלחת

מציאת יחסי תרומת התמלחת ותרומת המים המתוקים למעיינות, היא דרישה יסודית באימות המודל הפיזיקלי. יון הכלור, שריכוזו בתמלחת גדול בשני סדרי גודל בקירוב מריכוזו באקוויפרים המתוקים, מהווה סמן מובהק לנוכחות התמלחת. בנוסף, על סמך בדיקה נרחבת של ההרכב הכימי של כל

מעיינות החוף המערבי, ולמרות העובדה שיוני NO_3 (ניטרט) אינם קונסרבטיביים בתנאים מסוימים, קבענו שיון זה יהווה סמן לנוכחות מים מן האקוויפר המתוק במעיין.
 ע"פ המודל הקונספטואלי ההרכב הכימי של של המים (כלור וניטרט) באקוויפר המתוק הוא אחד עבור כל המעיינות באותה קבוצה, ואילו ריכוז הכלוריד באקוויפר המלוח, נקבע עבור כל מעיין בנפרד, מאחר והוא תלוי בעומק אזור הערבוב ובתנאי מליחות מקומיים. הצבת משוואות ערבוב ופתרון מאפשרים הערכה סבירה של : א. ההרכב הכימי של האקוויפר המתוק והמלוח; ב. יחסי תרומת תמלחת ומים מתוקים למעיין; ו-ג. הערכת עומק משוער של אזור הערבוב.

מודל שפיעת מים ומלח

לצורך הצגה מתמטית של המודל, הספיקה ליחידת עובי זרימה של 1 מטר, Q (מטר²/יום), מנקודה אחת במערכת ההידרולוגית (1) לנקודה אחרת (2)

$$Q(t) = \alpha [H_1(t) - H_2(t)] \quad ; \quad \alpha = \frac{KA}{L}$$

היא מכפלה של מקדם α (מטר/יום), בהפרש העומד הכולל, $H_1 - H_2$ (מטר) בין שתי הנקודות. המקדם α מייצג את המוליכות ההידראולית של התווך, K (מטר/יום), את רוחב הזרימה המשוקלל A (מטר), ואת מרחק הזרימה L (מטר) ביניהם. לפי תאור מתמטי זה ספיקת מעיינות חוף, למשל, מוגדרת ע"י

$$Q_{f0}(t) = \alpha_{f0} [H_f(t) - z_{f0}]$$

בנוסף להגדרות אלה מציבים משוואה דיפרנציאלית המתארת את שימור המסה (מים) לכל אקוויפר. על פי המשוואה שיוני העומד ליחידת נפח באקוויפר ליחידת זמן פרופורציונלי להפרש (ספיקות נכנסות ליחידת נפח-ספיקות יוצאות מיחידת נפח). בכך מסתכם למעשה החלק הפיזיקלי של הצבת הבעיה, ויש לפתור אותה כמערכת של שתי משוואות דיפרנציאליות צמודות. למעשה ניתן לפשט את הפתרון המתמטי במידה רבה ע"י התייחסות רק לפרק הזמן שבו חל תהליך ההתנקזות של האקוויפר, שבמהלכו כניסת מים לאקוויפר דרך אזורי ההעשרה מתאפסת בקירוב (בקיש אין גשם). ההתנקזות בפרק זמן זה, שבין האביב לתחילת החורף של השנה הבאה, היא תהליך נוח לניתוח אנליטי מאחר ואיננה כוללת השפעה של רכיב אקראי (גשמים) שמסבך את המודל. הפשטה נוספת אפשרית אם מניחים כי בטבחה ובפוליה לא ייתכנו מעברים ישירים מאקוויפר התמלחת העמוק לפני השטח ולאגם, מאחר ו- א. לא נמצאו באזורים אלה מעיינות שריכוזם גדול מ- 4000 מג"ל, ו-ב. מעבר מים מלוחים דרך האקוויפר המתוק ללא ערבוב איננו סביר. הפתרון המתמטי של המודל, והשוואתו לנתונים המדודים, מספק את ההתנהגות הצפויה של תנודת מפלסים בזמן, כתלות בתנודת מפלס האגם, ובקשרים ההידרולוגיים שבין האקוויפר לאגם, ולמעיינות החוף.

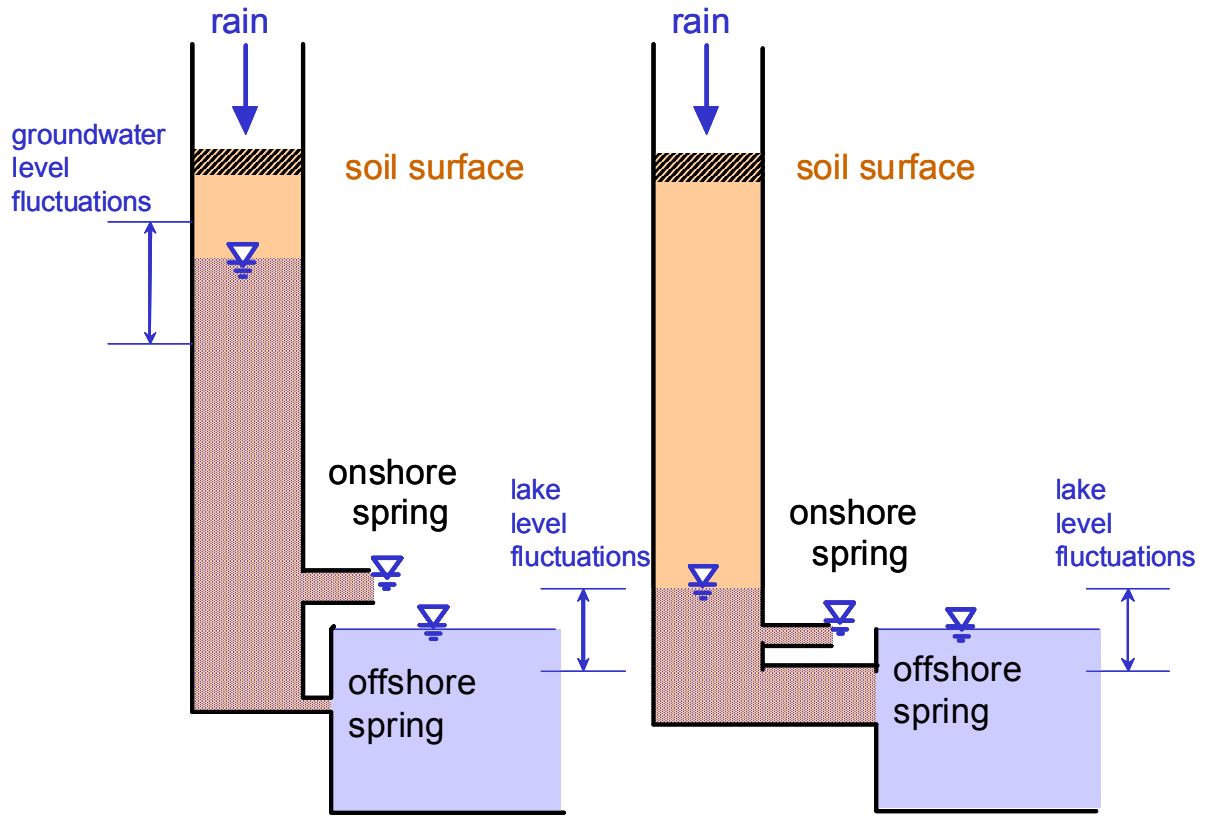
מסקנות יישום המודל למעיינות החוף המערבי

טבחה: בעזרת המודל ניתן להוכיח כי הקשר ההידרולוגי שבין האקוויפר המהול בטבחה לאגם הוא זניח, ושהשפעת מפלס הכינרת על המערכת ההידרולוגית של המעיינות מוגבלת. לפיכך, שיוני עומד שנכפים על המערכת ההידרולוגית בשל עליית מפלסים בהרי הגליל המזרחי הם הדומיננטיים במערכת ההידרולוגית של טבחה. בהתייחס לשפיעת המים בלבד, מערכת המעיינות בטבחה דומה בהתנהגותה לעמודת קרקע רוויה, המתנקזת דרך קבע באיטיות יחסית דרך מוצא הפתוח לאטמוספירה (תרשים) כאשר בחלק מהזמן (עונת הגשמים) נוספות מנות מים לחלקה העליון כמתואר בתרשים 2.

תהליך שינויי המליחות במעינות טבחה הוא כדלקמן: עם תחילת עונת הגשמים עולים מפלסי האקוויפרים האזוריים וכתוצאה מכך מתרוממים גם המפלסים הנצפים בקידוחים ליד חוף האגם. עליית מפלס האקוויפר התחתון המלוח כתוצאה מהגשמים היא בד"כ מתונה יותר מעליית מפלס האקוויפר העליון המתוק, ולכן בעקבות הגשמים קטן הפרש העומד לדליפת תמלחת מן האקוויפר המלוח למתוק, שפיעת המלח לאגם פוחתת, היחס הכמותי של מי תמלחת למים מתוקים קטן וחלה המתקה של המעינות המלוחים. המתקת המעינות חלה במשך כל החורף בצמידות לאירועי גשם, כאשר רצף של ימי גשם גורם לעליית מפלסים שמלווה בהמתקת המעינות בקפיצות חדות. בסוף החורף מתחיל תהליך רציף של המלחה, כאשר מפלס האקוויפר המתוק יורד מהר יותר ממפלס האקוויפר המלוח, וכתוצאה מכך הפרש העומדים (וספיקת ההתנקזות ממלוח למתוק) הולך וגדל במשך הקיץ.

פוליה: המודל מוכיח כי (בניגוד לטבחה) ניתן להראות תלות מובהקת בין המפלסים שנמדדו בקידוחי התצפית לבין מפלס הכינרת. שאיבות ניסיון בפוליה מעידות על מוליכות הידראולית גבוהה, ותגובה הידראולית קצרה ביותר (מספר שעות), שנמדדו בקידוחי תצפית ליד חוף האגם עד מספר מאות מטרים ממנו. ע"פ ממצאים אלה מפלסי האקוויפרים בקרבת הכינרת מושפעים הן ע"י מפלס האגם עצמו והן ע"י רום הנביעה של מעיינות החוף. בפוליה, קשרים הידראוליים טובים בין האקוויפר המהול לכינרת גורמים לכך שתנודות מפלס הכינרת במהלך השנה (שנקבעת ע"י גורמים חיצוניים למערכת המעינות, כגון שפיעת ירדן, שאיבה, התאדות וכו') גורמת לתנודה מקבילה, אך קטנה יותר, במפלס האקוויפר המהול המחובר לכנרת. משרעת התנודה הולכת וקטנה ככל שקידוח התצפית רחוק יותר מן האגם. במערכת ההידרולוגית של פוליה התנודה האנכית המושרית ע"י מפלס האגם היא דומיננטית בהשפעתה על המפלסים הנמדדים קרוב אליו, ולכן שינויי עומד שנכפים על המערכת ההידרולוגית בשל עליית מפלסים בהרי הגליל המזרחי, כמעט ואינם מורגשים בסמוך לאגם. זו הסיבה שבנתוני רום המפלסים בפוליה לא ניתן להבחין בהשפעה ישירה של הגשמים בגליל המזרחי ובקרבת הכינרת. המערכת ההידרולוגית בפוליה דומה אם כן לעמודת קרקע, המתנקזת במהירות דרך מוצא פתוח לאטמוספירה, אך גם דרך מוצא אחר הפתוח למיכל ענק שכמות המים בו משתנה בזמן (תרשים 2). במערכת מסוג זה יעמדו המים בעמודה בגובה שתלוי תמידית במפלס המים במיכל, ויפסיקו לזרום דרך המוצא הפתוח לאטמוספירה כאשר מפלס המים במיכל יהיה נמוך מערך סף נתון. המודל אף מצביע על כך שבמערכת עם קשרים הידראוליים כמו אלה של פוליה, שינוי ספיקת מעיינות החוף בזמן תלוי באופן ישיר בשינוי רום מפלס האגם (מפלס עולה- ספיקה עולה, מפלס יורד- ספיקה יורדת). לעומת זאת במעינות התת-ימיים שינוי ספיקת המעינות בזמן תלוי באופן הפוך בשינוי רום מפלס האגם (מפלס עולה- ספיקה יורדת, מפלס יורד- ספיקה עולה).

חמי-טבריה: המודל המסתמן עבור חמי-טבריה כולל אקוויפר כלוא עמוק שבו מצויה תמלחת מרוכזת (15000 - 18000 מגכ"ל). האקוויפר המתוק האופייני לפוליה וטבחה וגורם למיהול מי-התמלחת, אינו קיים או זניח בחמי טבריה. סידוק אינטנסיבי ליד חוף הכינרת מאפשר מעבר מי תמלחת מן האקוויפר הכלוא המצוי בעומד כולל גבוה, לפני הקרקע ולאגם המצויים בעומד נמוך יותר. חלק מן הסדקים מנקזים את מי התמלחת לחוף חמי-טבריה (מעיינות החוף) וחלק אחר מסתיים בקרקעית האגם (מעיינות תת-ימיים). התהליך המתאר את משטר שפיעת המים בחמי טבריה דומה אם כן לזה של פוליה, אך משטר המליחות שונה בשל היעדר מרכיב האקוויפר המתוק.



Tabgha model

Fuliya model

תרשים 2: מסקנות המודל-פוליה לעומת טבחה