

האם מדינת ישראל ערוכה לקראת משבר המים הנוכחי?

הנחוץ לחברות בין לאומיות לתכנן את המתקן, לתמחר את הפרוייקט, לזכות במכרז (ללא עיכובים כתוצאה מערעורים בבג"ץ), לבנות, להפעיל ולספק מים לצרכנים, הוא כשלוש שנים בתסריט האופטימלי. מדינת ישראל אינה ערוכה אפילו ליבוא מים מטורקיה. הנחת צינור מים חדש מנמל הנפט באשקלון עד למוביל המים הארצי (הדרך המהירה ביותר) תושלם באמצעות צווי חירום במשך 11 חודשים, אך בוודאי לא לפני הקיץ הקרוב. מחסור חמור במים איננו אסֶיֶן חזון אפוקליפטי, אלא הוא אפשרות מציאותית בעלת סבירות ריאלית. האם האפשרות היחידה שנותנה לנו היא להתפלל שהשנים הבאות תהיינה ברוכות?!

הרי ידוע ש"אין סומכים על הנס"!
החוקרים והמהנדסים בארץ אינם מסוגלים להציג פתרונות פלא. הם מסוגלים לתת פתרונות חלקיים, ואף הם לטווח קצר בלבד. רבים עוסקים היום בחיפוש "מקורות מים" חלופיים כמו הגברת הגשם, איגום מי שטפונות, מיחזור מי ביוב, קידוחים לשאיבת מי תהום שוליים, שעשויים להוסיף 40-100 מיליון מ"ק בשנה (במידה ויכתרו בהצלחה), דהיינו כ-2%-5% מהצריכה השנתית. שאיבה של מטר אחד נוסף מהכינרת (סוגיה השנויה במחלוקת כשלעצמה הן מבחינת המליחות והן מבחינת אקולוגיה) תוסיף כ-170 מיליון מ"ק (עוד 8%), ואף פתרון זה הוא חד־פעמי ומוגבל. אם לא יתרחש נס, מדינת ישראל עלולה לעמוד בפני משבר מים חמור ביותר, שיביא למשברים כלכליים (חיסול ענפי חקלאות רבים) ופוליטיים (הסכמי מים בין מדינות) כאחד. ולמרבה הפלא, אין הסברה, אין מודעות לחומרת המצב, ואין כל תרבות של חסכון במים...

שנת הבצורת הנוכחית היא הקשה ביותר במאה השנים האחרונות! בסוף האביב (אפריל 1999), עוד בטרם החלה עונת השאיבה, היו חסרים בכינרת שלושה מטרים של מים, דהיינו: מפלס הכינרת עמד על מטר אחד בלבד מעל הקו האדום. האידוי של הקיץ והשאיבה הנוכחית במוביל הארצי (15% בהשוואה לשנה נורמלית) הביאו לירידת מפלס הכינרת עד לקו האדום התחתון ולחצייתו בסוף חודש ספטמבר 1999. אספקת המים בשנה הנוכחית בה לא בוצעו בפועל פעולות ממשיות של קיצוץ וחסכון באה ממאגרי מי התהום, שאף הם הולכים ומדלדלים בקצב מזוהז. בכך למעשה, מאגרי החירום של מדינת ישראל התרוקנו לחלוטין בשנה זו, ונותרנו עם אפס רזרבות – מצב שלא היה כמותו מעולם! מה צפוי בשנה הבאה? ומה בעוד שנתיים?

האקלים בו שוכנת מדינת ישראל הוא חצי־מדברי, והוא מתאפיין בשכיחות של רצף שנות בצורת (בשנות השמונים, לדוגמה, היו שני מחזורים שחונים בני שלוש שנים כל אחד). אם חס וחלילה, תהיה תש"ס גם כן שנת בצורת, יהיה צורך לשאוב ולהוריד מפלסים אל מתחת לקווי האדומים במאגרי מי התהום ובכך יגרמו כנראה נזקים בלתי הפיכים. גם אז, יספיקו המים עבור צריכת המים העירונית בלבד. החקלאים יצטרכו כנראה לעמוד בקיצוץ של 60%-80% בהשקיה. ואם לא יתרחש נס, וגם שנת תש"א תהיה שחונה – נתדרדר למצב שלא היה כמותו מעולם: לא יהיו מים בברזים בימי הקיץ בערים רבות!

מדינת ישראל אינה ערוכה לעידן ההתפלה. אפילו אם ממשלת ישראל תיתן היום "אורי־רוק" ויצא מכרז בין־לאומי לבניית מתקני התפלה של מי ים, המלאכה לא תושלם בתוך שנתיים. הזמן

המשמעות התפעולית של המחקר היא שניתן לשאוב מי תהום בגליל המזרחי, ובכך להביא להפחתת האנרגיה הפוטנציאלית של התמלחת בעומק, ולהביא בעקיפין להקטנת שפיעת המלח לכינרת. המסקנות הן:

1. ניתן להוריד את מליחות מי הכינרת ולשפר את איכותם. בכך יוקטן יצוא המלח למרכז הארץ, ותשופר איכות מי הקולחים של הערים הניזונות מהכינרת.
2. ניתן להפיק מי תהום מתוקים נוספים בגליל המזרחי על חשבון שפיעת המעיינות המלוחים. בכך תיחסך גם אנרגיית שאיבה של כ-200 מטרים גובה.
3. ניתן להוריד את הקו האדום התחתון בכינרת. בכך יגדל האוגר התפעולי של האגם, וימנע אובדן מי שטפונות בשנים ברוכות במיוחד. מסקנה זו התקבלה בימים אלו ממש, כשנציב המים התיר שאיבת מים גם אם תוביל לירידה אל מתחת לקו האדום.

A

חיים גבירצמן הוא מרצה בכיר בהידרולוגיה במכון למדעי כדור הארץ באוניברסיטה העברית בירושלים, וחבר במועצת המנהלים של חברת "מקורות".

המים עולה, ואילו במעיינות חמת־גדר המים החמים הם דווקא מתוקים. השוני בין המעיינות מיוחס לפי המודל הנוכחי לשוני במנגנוני הסעת החום משני צדי הבקע. מי התהום המזינים את מעיינות הכינרת נובעים ממערכות זרימה פתוחות, ולכן המים החמים באים מהאקוויפרים העמוקים שהם גם מלוחים. לעומת זאת, מעיינות חמת גדר נובעים מאקוויפר רדוד ומתוק. מקור החום במעיינות אלו הינו מסיקולציה במערכות אקוויפרים עמוקות, כלואות וסגורות. אנרגיית החום מועברת אל האקוויפר העליון המתוק בתהליך של הולכה (ולא בהסעה) דרך שכבות אטימות למחצה המפריד ביניהם.

מסקנות מעשיות

תוצאות המחקר מלמדות שהכוח הפיסיקלי המכריע הגורם לזרימת מי תהום ולנביעת התמלחות הוא כוח הגרביטציה הנובע משיפועים במפלס מי התהום, ולא עודף לחץ של קומפקציה כתוצאה מכוחות טקטוניים ו/או עומס משקעים. תיאוריה זו מסוגלת להסביר, הן באופן איכותי והן באופן כמותי, את מכלול התופעות ההידרולוגיות והתרמיות באזור הכינרת, שהוצגו במאמר זה, ושהסברם היה שנוי במחלוקת במשך שנים רבות.

מעיינות הטבחה, ואילו בקבוצת מעיינות הפוליה, מליחות המים עולה דווקא כאשר השפיעה יורדת. בשני אגני הניקוז התת-קרקעיים ישנו אקוויפר עליון מתוק, ותחתיו אקוויפר אמצעי שמליחותו בינונית, ומתחתם אקוויפר עמוק המכיל תמלחת, ושלושתם מתנקזים בפרופורציות שונות אל המעיינות. בכל מסלולי הזרימה, הכוח המניע הוא הגרביטציה, וההבדלים בהתנהגות המעיינות בשני הגושים מיוחסים ליחסי ערבוב שונים בין האקוויפרים השונים בעונות השנה השונות. ההתנהגות השונה נובעת מהמבנה ההידרו-גיאולוגי של שני אגני הניקוז. עובדת כליאתו המוחלטת של האקוויפר המלוח תחת שכבת סלעים חדירה למחצה באגן הטבחה, והיותו פתוח לחלחול ישיר של מי גשמים באגן הפוליה, משפיעה באופן משמעותי על רגישותו לירידת גשמים, ועל השינויים בהתפלגות אנרגית מי התהום בתוכו. בחורף, נוצרים שינויים בהתפלגות אנרגית המים הפוטנציאלית בעיקר באקוויפרים החשופים לחלחול ישיר של מי גשמים. לכן, באגן הפוליה עולה אנרגית המים בחורף גם באקוויפר התחתון המליח, ולכן המליחות גדלה במעיינות כאשר הספיקה מתגברת. לעומת זאת, באגן הטבחה עולה אנרגית מי התהום באופן משמעותי רק באקוויפר העליון המתוק, ועליית הספיקה מלווה בירידת המליחות. הדמיות ספרתיות המתארות את הספיקה הכוללת בשני האגנים, ואת התרומה של כל אחד משני האקוויפרים, עבור תנאי מפלס גבוהים או נמוכים באזור המילוי החוזר, מאשרת את ההיפותזה המוצעת.

תופעה שניה קשורה לקצבי שפיעת החום ממעמקים. בקידוחי מיצד שפיעת החום כפולה מאשר זו שבקרקעית הכינרת, וזו שבכינרת כפולה משפיעת החום הנמדדת

ובקידוחים ניתן למדוד את קצב עליית הטמפרטורה עם העומק. מפל הטמפרטורות תלוי בשטף החום המגיע ממעמקים, במוליכות התרמית של הסלעים, ובזרימת מי התהום. באזור הכינרת, בקידוחים הקרובים זה לזה מבחינה גיאוגרפית, נמצאו באופן מפתיע, ערכים גבוהים מאד וערכים נמוכים מאד (בהשוואה לממוצע הארצי), הן במפל הטמפרטורות והן בשטף החום המחושב. בקידוחי מיצד שליד חמת-גדר במזרח, ובקידוח כינרת-6 שמצפון לטבריה במערב, נמצאו מפלי טמפרטורות כפולים מאשר זו שנמדדה בקרקעית הכינרת, ושפיעת החום בקרקעית הכינרת נמצאה כפולה מזו הנמדדת בקידוח צמח שמדרום לאגם.

התיאוריה שהוצעה בעבר להסבר התופעה היא שכנראה גוף מאגמתי (לבה חמה שחדרה ממעמקי כדור הארץ) קבור תחת אזור חמת-גדר, והוא הגורם לחימום הסלעים, נתקלת בקשיים כי תיאוריה זו בדרך-כלל מוצאים פריצות וחדירות מאגמתיות בתוך בקעים יבשתיים ולא בכתפיהם, ואילו בכינרת נמצאה תופעה הפוכה: שטף חום גבוה נמצא דווקא בכתפי הבקע, ובתוך הבקע נמצא שטף חום נמוך! ובנוסף, ההתפרצויות הוולקניות הצעירות ביותר באזור הכינרת התרחשו לפני 700,000 שנים, ומאז הם התקררו כבר, ולא מסוגלות לגרום לשטף חום גבוה כל-כך. התופעה "הלא-סבירה" השלישית קשורה ביחסי מליחות המים והטמפרטורה: מי תהום הנמצאים בעומק רב הם בדרך-כלל חמים ומלוחים, ומי תהום הנמצאים בעומקים רדודים הם בדרך כלל קרים ומתוקים. לפיכך, במעיינות ניתן למצוא בדרך-כלל יחס ישר בין טמפרטורת המים למליחותם. באזור הכינרת משתבשים הכללים, וקיימת שונות רבה בין המעיינות שבמזרח ואלו שבמערב. ממערב לכינרת, המעיינות אכן מלוחים וחמים, וככל שמליחותם

אם לא יתרחש נס, מדינת ישראל עולה לעמוד בפני משבר מים חמור ביותר, שיביא למשברים כלכליים ופוליטיים כאחד

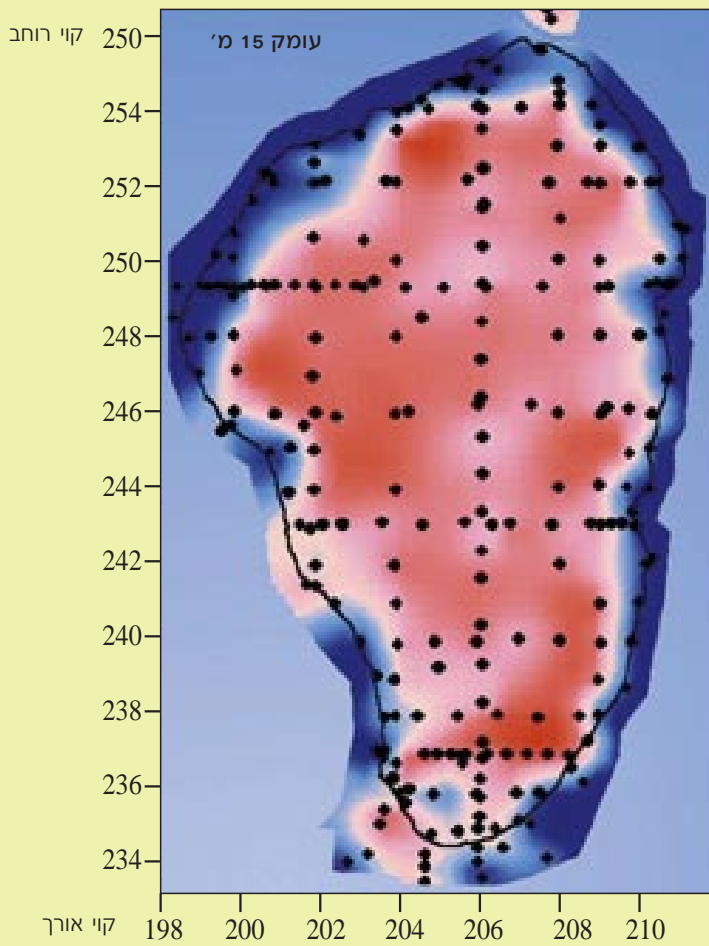
בקידוח צמח מדרום לאגם. לפי המודל החדש, השוני מיוחס לתהליכי הקירור והחימום המושפעים מזרימת מי התהום. במקומות בהם מי התהום עולים ממעמקים אל פני השטח, שפיעת החום המדודה היא מעל הנורמלי, וזוהי התופעה הנצפית בשוליים המערביים של הכינרת ובאזור אל-חמא. לעומת זאת, בנקודות בהם אין עליה של מים מהעומק, כתוצאה מאטימות הידראולית של המשקעים, כפי שמתרחש בצמח, אין הסעה של חום ולכן שפיעת החום נמוכה באופן יחסי.

תופעה שלישית קשורה ליחס בין הטמפרטורה למליחות במעיינות הכינרת טמפרטורת המים עולה ככל שמליחות

עולה גם חומם עולה, בהתאם לציפיות. אולם, במעיינות חמת-גדר שבמזרח, באופן מפתיע המים חמים אך מתוקים. התיאוריה שהוצעה בעבר לתופעה זו היא קיומם של מחדרים מאגמטיים באזור חמת-גדר, הגורמים לחימום מי תהום רדודים ומתוקים. את הקשיים בתיאוריה זו מנינו בסעיף הקודם.

כח ההסבר של המודל הממוחשב

המחקר הנוכחי מסוגל להסביר את שלוש התופעות ההידרולוגיות, שנסקרו לעיל. מליחות המים עולה כאשר השפיעה עולה בקבוצת



איור 3: מפת התנגדות חשמלית על גבי משטח המצוי בעומק 15 מ' תחת קרקעית הכינרת. ההתנגדות החשמלית הנמוכה (צבע אדום) תואמת למי תהום מלוחים, ולעומתה הגבוהה (צבע כחול) תואמת למי תהום מתוקים. מסתבר שתחת מרבית האגם מצויה תמלחת הלכודה בסלעים אטומים באופן יחסי. תחת שולי האגם (שם מצויים סלעים בעלי התמלחת כתוצאה מזרימת מי תהום מתוקים באופן מסיבי).

מתנהגים באופן אחיד: כאשר שפיעתם עולה – מליחותם יורדת, דהיינו: תלות הפוכה בין שפיעה למליחות. לעומת זאת באזור פוליה, כאשר שפיעתם עולה – מליחותם גם-כן עולה, דהיינו: תלות ישירה בין שפיעה למליחות. שתי תיאוריות הוצעו בעבר לתופעות אלו. האחת גורסת שעודף לחץ במעמקים (קומפקציה) דוחף תמלחת כלפי מעלה, ובקרבת המעינות נמהלת התמלחת עם מי תהום מתוקים הזורמים מהגליל. והשנייה, כי אין עודף לחץ במעמקים, והתמלחת נדחפת כלפי מעלה כתוצאה משטיפתה ע"י מי התהום מתוקים שמקורם בגשמים. התיאוריה הראשונה מסבירה היטב את התנהגות מעיינות הטבחה כי התמלחת נמהלת יותר בחורף כתוצאה מהתגברות המרכיב המתוק. התיאוריה השנייה מסבירה היטב את מעיינות הפוליה, כי בחורף הזרימה המתוקה מתחזקת ושוטפת יותר תמלחת. הבעיה היא שאף תיאוריה לא מסוגלת להסביר את קבוצת המעינות השנייה. מעבר לכך, לא יתכן שבכל אתר קיים מנגנון שונה, כלומר: לא יתכן שבמקום אחד יש עודף לחץ במעמקים ובמקום השני אין, כאשר שני האתרים קרובים כל-כך זה לזה. התופעה השנייה קשורה בשפיעת החום: ככל שיורדים אל מעמקי כדור-הארץ הטמפרטורה נעשית גבוהה יותר,

מתוך המחקר מסתבר שהמערכות ההידרולוגיות ממזרח וממערב לבקע נשלטות ע"י כוחות שונים. הכוח העיקרי הגורם לזרימת מי התהום תחת הגליל המזרחי הינו כוח הגרביטציה הנובע משינויים במפלס מי התהום, בעוד שתחת הגולן הכוח הדומיננטי באקוויפרים העמוקים הוא כוח הציפה הנובע משינויים בצפיפות (ובטמפרטורת) מי התהום. בגליל המזרחי, המערכת ההידרולוגית פתוחה, דהיינו: מי גשמים מחלחלים לאקוויפרים השונים, וזורמים במהירויות שונות לאורך מסלולי זרימה ארוכים או קצרים שבסופם הם מתנקזים אל הכינרת. לעומת זאת, תחת הגולן, באקוויפרים העמוקים נמצאים המים בתוך מערכת סגורה ללא כניסות ויציאות, והזרימה נעשית בתוך תאי ערבוב סגורים כתוצאה משטף החום המגיע מהעומק והגורם למציאות של מים קרים וצפופים היושבים מעל מים חמים ופחות צפופים.

המודל מספק הערכות משיעורי-רצון בהקשר להשפעת השאיבה במעלה אגני היקוות של המעינות המלוחים. הערכות אלו יכולות לשמש כבסיס לקבלת החלטות על מדיניות שאיבה חלופית בגליל המזרחי.

המודלים מלמדים ש"סחיטת" מי התהום מהמשקעים יוצרת זרימה אנכית אל תוך הכינרת בקצב של מספר מילימטרים ואולי מספר סנטימטרים בשנה. כמות המלח הנתרמת בתהליך זה היא כ-2,500 טון כלור בשנה, דהיינו כ-2% מכניסת המלח הכוללת לאגם. לפיכך, מנגנון הקומפקציה אינו מסוגל בשום אופן להסביר את כמות המלח הנכנסת באופן שוטף לכינרת.

בכל מערכות זרימת מי התהום המוכרות בעולם, ידוע שכאשר קיימים שני סוגי כוחות באגן אחד, המערכת הגרביטציונית תהיה דומיננטית בהשוואה למערכות הלחץ האחרות. אין ספק שסביב הכינרת מצויה גם מערכת גרביטציונית (מפלסי מי התהום משתפלים לפחות ב-200 מטרים מהגליל התחתון ולפחות ב-350 מטרים מהגליל העליון), ולפיכך אפילו אם תמלחת נסחטת מהמשקעים עקב לחצים מקומיים, מערכת זו תהיה זניחה בהשוואה למערכת הגרביטציונית.

התופעות "הבלתי-סבירות" סביב הכינרת

במשך עשרות השנים האחרונות, התמודדו החוקרים עם שלושה סוגים של תופעות הידרולוגיות בלתי מובנות: יחסי שפיעה ומליחות במעינות הכינרת, קצב שפיעת חום ממעמקים, ויחסי מליחות וטמפרטורה במעינות ובקידוחים. במעינות הכינרת, שפיעת המים גוברת בחורף ובאביב כתוצאה מירידת הגשמים, והשפיעות נחלשות בקיץ ובסתיו. לעומת זאת, השתנות מליחות המים בעונות השנה אינן זהות, וניתן למצוא יחסים הפוכים בין שפיעה למליחות באתרים השונים. באזור טבחה, כל המעינות

שיצרו גלי קול שחדרו ופגעו בשכבות סלע בעומקים שונים, וחזרו ונקלטו במכשירי המדידה. בכל שמונה שניות בוצע פיצוץ, וזמן החזרה של הגלים נמדד במשך ארבע שניות עוקבות. המיקרופונים שקלטו את גלי הקול החוזרים, הותקנו במרווחים של מטרים בודדים על גבי כבל באורך 600 מטרים שנגרר במים אחרי הרפסודה. הסקר בוצע במשך שלושה שבועות, לאורך עשרים קווי ימיים (סה"כ 180 ק"מ) הפזורים על פני כל שטח האגם. גלי הקול החוזרים הוקלטו על גבי קלטות, ועובדו במחשב תוך שימוש בתוכנות מתוחכמות.

תוצאות הסקר מלמדות שבאזור הכינרת מצוי בור עמוק המלא במשקעים צעירים. מבחינה הידרוגיאולוגית, חשוב להדגיש את המבנה התת־קרקעי שהתגלה בשליש המערבי של צפון האגם. באזור זה נמצאו יחידות סלע קשות בעומק של מספר מאות מטרים, המהוות את בסיס יחידות המילוי. יחידות אלו שבורות בצורת בלוקים הנוטים לדרום־מערב, והן מהוות המשך של מבנה הרמות המוטות המוכר מהגליל התחתון המזרחי. ביחידות אלו מצויים כנראה האקוויפרים המוכרים מהגליל המזרחי. מעל היחידות הקשות ובמזרחן מצויות שכבות מילוי צעירות, המהוות מבחינה הידרוגיאולוגית סדרה של יחידות סלע אטימות כמעט לחלוטין, החוסמות את זרימת מי התהום המתנקזים מהאקוויפרים האזורים.

המודל ההידרו־גיאולוגי

הכוח המניע את רוב מערכות הזרימה הטבעיות, הוא הגרביטציה, כוח הכובד, הנובע משיפועים הקיימים במפלס מי התהום. כתוצאה מכך, זורמים מי התהום מאזור שמפלסם גבוה לאזור שמפלסם נמוך. כך מתפתחות מהירויות זרימה של עשרות מטרים לשנה, והן נמשכות לאורך מסלולים ארוכים המגיעים עד ל־1000 ק"מ. כוח־מניע חלופי הוא כאשר מי תהום בצפיפות גבוהה (כגון: מים קרים או מלוחים) מונחים על מי תהום בצפיפות נמוכה. כך נוצרות מהירויות זרימה של 0.1-1 מטרים לשנה ומרחקי זרימה של 10 ק"מ. כוח מניע שלישי הוא עודף לחץ הנוצר מקומפקציה⁵ של משקעים הגורם לסחיטת מי התהום המצויים בתוכם. מהירויות הזרימה האופייניות במערכות אלו הן 0.01-0.1 מטר לשנה ומרחקי הזרימה הם ק"מ בודדים. בספרות המדעית מצויות דוגמאות רבות מכל העולם לכל אחד מכוחות אלו. במחקר זה השתמשנו במודלים ספרתיים בכדי להעריך באופן כמותי את ספיקת המים המלוחים אל תוך אגם הכינרת כתוצאה מכל אחד משני מנגנונים אלו.

5. קומפקציה היא תהליך המקטין את נפח הסלעים (למעשה, את נפח הנקבוביות שבסלעים) כתוצאה מהצטברות לחץ.

שנים, ומפלס המים שלו עלה לתקופות קצרות עד לגובה של 180 מטרים, ומימיו חלחלו והרוו את המשקעים. בשלב מאוחר יותר, כאשר נסוגה הימה המלוחה והצטמצמה לאזור ים המלח בלבד, התמלא הבור הטופוגרפי (בקעת כנרת) במים מתוקים, שנכנסו מצפון ויצאו מדרום (נהר הירדן העליון והתחתון, בהתאמה) ושטפו את גוף המים באופן אינטנסיבי, וכך נולדה הכינרת המוכרת לנו. בשלב זה החלה דיפוזיה איטית של מלחים מהקרקעית אל תוך האגם המתוק, הנמשכת לאורך עשרות־אלפי השנים האחרונות, עד להיווצרותו של מפל הריכוזים הנוכחי.

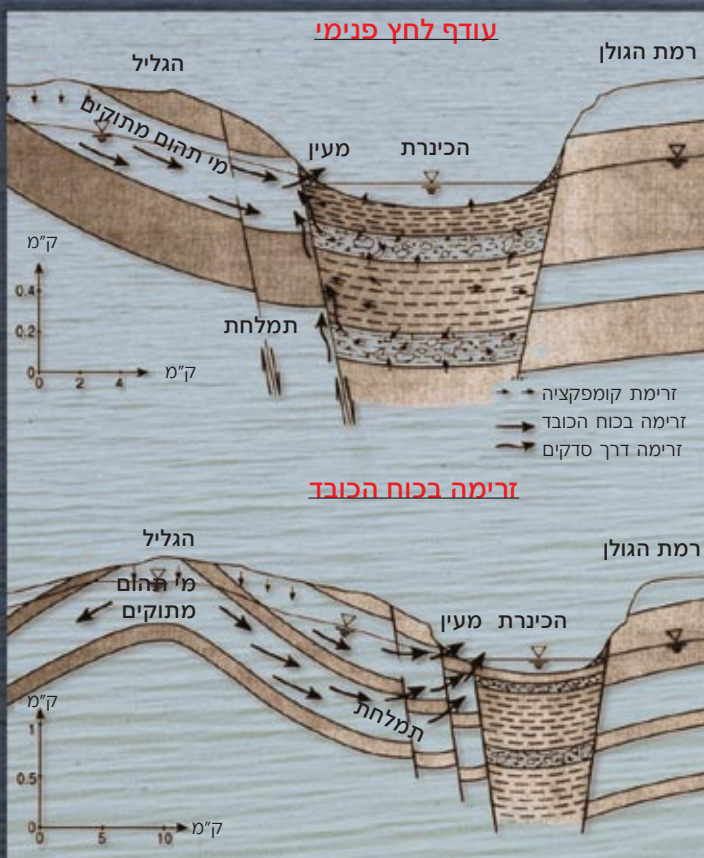
הדליפה האיטית של התמלחת מתרחשת דרך 90% משטח הקרקעית. אולם, בשל אטימות המשקעים שבקרקעית האגם, נתרמים בדרך זו רק כ־3% מהמלחים הנכנסים לאגם. לעומת זאת, תחת השוליים הצפוניים, המערביים והמזרחיים של האגם, וזהו באמצעות הסקר הגיאורחשמי מים מתוקים עד לעומק של יותר ממאה מטרים מתחת לקרקעית, מכיוון שהמלחים נשטפו משם כתוצאה מזרימת מי תהום אינטנסיבית מהאקוויפרים הסובבים. במספר נקודות באזור השוליים קיימים מעיינות מלוחים גדולים התורמים את מרבית המלחים הנכנסים לאגם שמקורם משכבות עמוקות יותר.

הסקר הסמי למיפוי האקוויפרים

מטרת הסקר הייתה למפות את המבנה הגיאולוגי של הבקע באזור הכינרת עד לעומק של שלושה ק"מ. הסקר הסמי נעשה באמצעות שתי ספינות שגררו רפסודה גדולה שהועמסה במכשירי מדידה. במהלך השיט בוצעו פיצוצים תתיימיים (חלשים – שאינם פוגעים בבעלי־החיים!),

איור 2: מערכת המדידה הניידת בסקר הגיאורחשמי בכינרת. אנטנת השידור המעגלית קשורה ל"גלגלים־צף" בקוטר 25 מטרים ויוצרת שדה אלקטרומגנטי. אנטנת הקליטה ממוקמת במרכז המעגל ומחוברת לסירת גומי ובתוכה ציוד למדידת השדה האלקטרומגנטי המושרה. הזרמים המושרים הנוצרים במשקעים פרופורציונליים לריכוז המלחים המומסים במי התהום שבמשקעים. כל המערכת נגרת באמצעות סירת מנוע, והניווט לקביעת נקודות המדידה נעשה באמצעות לוויינים (GPS).





הזורמים בתת-הקרקע. במשך ארבעים השנים האחרונות הסתמכה נציבות המים על התיאוריה שקיים עודף לחץ במעמקים, ועל-פיה נקבעה "מדיניות התפעול" של משאבי המים בצפון הארץ, לפי שני העקרונות הבאים: העיקרון הראשון מתייחס לקו האדום התחתון בכינרת. עד לימים האחרונים חששה נציבות המים מפריצת תמלחות מקרקעית הכינרת אם יורידו את מפלס המים באגם אל מתחת הקו האדום התחתון (מינוס 213 מטרים), ולכן אסרה זאת. כאשר מפלס המים מתקרב לקו האדום, עוצרים את שאיבת המים במוביל הארצי. הקווים האדומים מגבילים לפיכך את "האוגר-הפעיל" של הכינרת לנפח מקסימלי של 680 מיליון מטרים מעוקבים⁴. אילו ניתן היה להוריד את הקו האדום התחתון במטר אחד נוסף בלי לגרום לפריצת תמלחות, ניתן היה להגדיל את האוגר הפעיל בכ-170 מיליון מ"ק, ובכך להגדיל את פוטנציאל המים השפירים של ישראל. כך ניתן יהיה לאגור רזרבות מים משנים ברוכות לשנות בצורת מחד, ומאידיך לפנות נפח גדול בסוף הקיץ לתפיסת מי שטפונות בחורפים מבורכים שעד היום היו גולשים לים המלח.

העיקרון השני מתייחס לאיסור שאיבת מים בגליל המזרחי. נציבות המים חששה מפריצת תמלחות מקרקעית הכינרת כאשר שואבים מי תהום בגליל המזרחי, ולכן אסרה זאת. איסור זה עדיין בתוקף, אם כי לא נשמר בקפדנות יתירה. לפיכך, אספקת המים העיקרית לתושבי הגליל היא מהכינרת (ממפלס של 210 מטרים מתחת לפני הים) ולא ממי תהום מקומיים (שבגליל התחתון, הם מצויים במפלס ממוצע של 5-10 מטרים מעל פני הים), לשם כך מושקעת אנרגיית שאיבה רבה. במידה ויתברר שהחשש מפריצת תמלחות איננו מבוסס מבחינה מדעית, ניתן יהיה לשאוב מי תהום מתוקים נוספים בגליל על חשבון שפיעת המעיינות המלוחים, ובכך נרוויח מים מתוקים, נקטין שפיעת מלח לאגם, ותיחסך כמובן אנרגיית שאיבה רבה.

המחלוקת טרם הוכרעה מכיוון שנמצאו תופעות הידרולוגיות שתמכו בתיאוריה הראשונה וסתרו את השנייה, ומאידיך, נמצאו תופעות אחרות שהובילו למסקנה ההפוכה. המחלוקת לא הוכרעה במשך שנים רבות וזאת משום שמבנה תת-הקרקע לא היה ידוע באופן משיביע רצון, ולא ניתן היה למפות את מסלולי הזרימה של מי התהום ואת מליחותם בכל אחד מהמסלולים. בנוסף, לא היו כלי עבודה ממוחשבים שבאמצעותם ניתן היה לכמת את אנרגיית מי התהום, את מהירות זרימתם ואת כיוונם בכל המרחב התת-קרקעי. מטרתנו במחקר הנוכחי הייתה

איור 1: חתכים סכמתיים לרוחב הכינרת (מזרח-מערב) להסבר שתי התיאוריות בענין מנגנון ההמלחה של האגם. לפי המודל הראשון, התמלחת בתת-הקרקע מצויה בלחץ עודף (כתוצאה מתנועה לאורך שברים גיאולוגיים או העמסת משקעים) הגורם לקומפקציית המשקעים ול"סחיטת" מי התהום המלוחים. לפי המודל השני, הלחול הגשמיים בגליל והמשך זרימתם באקוויפרים במסלולים שונים לכיוון הכינרת מביא לשטיפת מעט מהתמלחת המצויה באקוויפרים העמוקים.

לפיכך כפולה: ראשית, להשלים את הידע החסר באמצעות סקרים גיאופיזיים, ושנית לחשב את שדה הזרימה באמצעות מודל מתמטי-הידרו-גיאולוגי ממוחשב.

הסקר הגיאוא-חשמלי למיפוי התמלחת

מטרת הסקר הגיאוא-חשמלי הייתה לזהות ולמפות את מליחות מי התהום מתחת קרקעית הכינרת. הסקר בוצע בשיטה קלסית של שידור וקליטת פולסים אלקטרומגנטיים. השיטה שוכללה על ידי המכון הגיאופיזי לישראל לביצוע מהיר ויעיל על גבי אגמים מתוקים, תוך שימוש באנטנות שידור וקליטה הצפות והנגררות על פני הכינרת (איור 2). הניווט לאורך קווי אורך ורוחב באגם בוצע בעזרת לוויינים. המערכת סיפקה נתונים על המוליכות החשמלית של המשקעים הרוויים במים תחת קרקעית האגם, שהיא מדד לריכוז המלחים המומסים במי התהום. תוצאות הסקר (איור 3) מלמדות שתמלחת בריכוז של יותר מ-20,000 מ"ג כלור מצויה בעומק של 5-15 מטרים מתחת למרבית שטח הכינרת. בחלק הדרומי של האגם, התמלחת קרובה עוד יותר לקרקעית, בעומק של 5-10 מטרים בלבד. מפל הריכוזים החריף מתאים לפרופיל הנוצר כתוצאה מדיפוזיה (פעפוע) של מלחים.

מסתבר שתמלחת זו הינה שריד של אגם מלוח (כנראה ימת הלשון) שמילא את הבקע לפני כמה עשרות אלפי

4. הפרש של 4 מטרים בין קו אדום עליון (209- מ') לקו אדום תחתון (213- מ') על שטח של 170 קמ"ר.

והמים מנוצלים בערים (בשימוש ביתי או תעשייתי) הם יוצאים לאחראי מכון בביוב העירוני, עוברים טיפול במתקנים מתאימים, הופכים ל"קולחים" המנוצלים להשקיה בשדות חקלאיים, ומחלחלים בסופו של דבר גם-כן לאקוויפר. לפיכך, באופן ישיר או עקיף, המוביל הארצי הוא גם "מוביל מלח ארצי", וחלק ניכר מהמלח מגיע בסופו של דבר אל אקוויפר החוף. במשך 35 שנות קיומו של המוביל הארצי יוצאו יותר מ-10 מיליון טונות מלח למרכז הארץ. ייצוא זה גורם לבעיה סביבתית קשה, המתבטאת בעליית מליחות מי התהום באקוויפר החוף ומתחילת המאה העשרים מליחותו הממוצעת עלתה פי שלושה. השימוש העירוני במים גורם בדרך-כלל לתוספת מליחות למים היוצאים מהעיר בצורת ביוב (שהופך, כאמור, לאחר טיפול מתאים למי קולחים עבור השקיה חקלאית). לפיכך, מי הקולחים הבאים מערים הניזונות מהכינרת, יהיו במליחות ברמה בלתי מתאימה לרוב הגידולים החקלאיים. לעומתם, קולחים שמקורם הראשוני באקוויפר ההר או החוף, ראויים לשימוש לרוב הגידולים. מציאות זו גורמת לאובדן יכולת המחזור של מי הכינרת ולהפסד מרובה. אילו ניתן היה להוריד את מליחות מי הכינרת ולאפשר את מחזורם לאחר השימוש העירוני, הייתה מדינת ישראל יוצאת נשכרת.

האם אפשר לרדת מן "הקו האדום"?

האם ניתן להוריד את מליחות הכינרת? כדי לענות על שאלה זו, יש צורך להבין את התנהגות המערכת ההידרולוגית. השאלה העומדת בפנינו היא: מהם הגורמים המעלים את

כינרת מתרחשים תהליכים מוזרים ומפתיעים, שהמומחים מתקשים להסבירם. על חלק מהם נעמוד במאמר זה. מליחות¹ מי הירדן ויתר הנחלים הזורמים לכינרת היא כ-20 מיליגרם (מ"ג) כלור בליטר¹, ואילו מליחות מי הכינרת משתנה בתחום ריכוזים הגדול פי 10 ויותר. הסיבה למליחות הכינרת היא המעינות המלוחים הנובעים בחופה ובקרקעיתה, התורמים בשנה ממוצעת כ-150,000 טונות של כלור. המעינות הגדולים מרוכזים בצפון מערב הכינרת, ומסודרים בשלושה אתרים: טבחה, פוליה וחמי טבריה. בקרקעית האגם מצויים מעיינות הנקראים ברבטים ומעגן. המעינות המלוחים ביותר הם חמי טבריה. המוביל-המלוח שהחל לפעול לקראת הפעלת המוביל הארצי, אוסף ומטה את מרבית מי המעינות המלוחים הנובעים על החוף, ובכך מקטין את כניסת המלח בשליש לערך. כתוצאה מכך, ירד ריכוז הכלור בכינרת מרמתו הטבעית של 400-350 מ"ג כלור לפני שנת 1964 עד לכ-240-210 מ"ג כלור לאחר שנת 1969. היום עדיין מתנקזים לאגם חלק ממעינות החוף וכל המעינות התתימיים המלוחים, ולכן ריכוז הכלור הנוכחי באגם גבוה פי 10 מריכוז הכלור במי הירדן ויתר הנחלים הנכנסים לאגם. מציאות זו מקשה על התפעול השוטף של משק המים מחד, ויוצרת בעיה סביבתית מאידך. מליחות הכינרת נמוכה אומנם מהתקנים המקובלים בעולם להגדרת מי שתייה ומי השקיה, אולם היא גבוהה ממליחות מי התהום של אקוויפר² ההר, ושל אקוויפר החוף, ולמעשה גבוהה מדי עבור מקצת הגידולים החקלאיים.

המוביל הארצי הוא גם "מוביל מלח ארצי", וחלק ניכר מהמלח מגיע בסופו של דבר אל אקוויפר החוף

התמלחות³ הקבורות בעומק מאות עד אלפי מטרים, אל פני השטח? הוויכוחים התיאורטיים בין ההידרולוגים נמשכים מעל ארבעים שנה. שתי התיאוריות שהוצעו סתרו זו את זו הן מבחינה תיאורטית והן במשמעות היישומית (איור 1). התיאוריה הראשונה גרסה כי עודף לחץ הנוצר באופן רציף במעמקים גורם ל"סחיטת" הסלעים ולדחיפת המים המלוחים הלכודים בהם כלפי מעלה. מים אלו נמהלים בקרבת המעינות עם מי תהום מתוקים הזורמים מהגליל. התיאוריה השנייה גרסה לעומתה כי עודף הלחץ במעמקים זניח (אם הוא קיים בכלל). המים המלוחים שבעומק נשטפים החוצה על-ידי מי התהום המתוקים

המוביל הארצי, השואב בשנה ממוצעת מהכינרת כ-400 מיליון מטרים מעוקבים מים, מזרים גם את המלחים המומסים במים. בהתבסס על ההרכב הכימי הממוצע של מי הכינרת, מתברר שבכל שנה מוזרמים במוביל הארצי כ-85,000 טון כלור, 42,000 טון נתרן, וכמויות ניכרות של מומסים אחרים. בסה"כ מועברים באמצעות המוביל הארצי כ-230,000 טון מלח למרכז הארץ. במידה והמים מנוצלים לחקלאות, מרבית המלחים המומסים מחלחלים באופן ישיר אל מי התהום המקומיים, ובמידה

1. ריכוז יוני הכלור המומסים במים הוא מדד נוח למדידת מליחות, ולכן במשך שנים רבות הוא מהווה מדד אופייני לרמת המליחות.
2. אקוויפר הינו שכבת סלע תת-קרקעית, בעלת תכונת הולכת מים טובה, המשמשת כמאגר מי תהום.
3. תמלחת היא מים מלוחים שריכוזם גבוה ממליחות מי הים.

חיים גבירצמן

הקו האדום והכוס הריקה

הויכוחים אודות מדיניות התפעול של משאבי המים באזור הכינרת כבר נמשכים 40 שנה. האם הורדת הקו האדום בכינרת או שאיבת מי תהום בגליל עלולים לגרום להמלחת הכינרת? מחקר חדש שנערך במכון למדעי כדור הארץ באוניברסיטה העברית, המסתייע בסקרים גיאופיזיים ובמודל מתמטי ממוחשב, שולל את סכנת ההמלחה ומציג פתרון לשאלות תיאורטיות ויישומיות כאחד. אך האם מדינת ישראל ערוכה לקראת משבר המים הנוכחי?

