

נדידת תמלחות מבקע ים המלח

אייל שלו וחיים גבירצמן*

מבוא

לפני כשלושה עד שישה מיליוני שנים פלש הים התיכון הקדום לבקע ים המלח דרך עמק יזרעאל ויצר בו לגונה צרה וארוכה שהשתרעה מהכנרת עד ים המלח – לגונת סדום (זק, 1967). הלגונה התקיימה במשך כמה מאות אלפי שנים, ואולי אפילו כמיליון שנה. לגונת סדום חדלה מלהתקיים כאשר כתוצאה מאידוי אינטנסיבי הושקעו שכבות מלח. עמק יזרעאל התרומם ונוצר ניתוק בין הבקע לבין הים התיכון. ייתכן שגם לאחר הניתוק היו אירועים קצרים יחסית שבהם התרחשו פלישות נוספות של הים התיכון לבקע ים המלח, ואלה גרמו להשקעה נוספת של מלח. מאז נוצרה לגונת סדום ועד היום היה קיים תמיד גוף מים מלוחים באזור ים המלח, בין אם כאגם המנותק מהים התיכון ובין אם כלגונה. האגם הגדול האחרון שקדם לאגם ים המלח נקרא אגם הלשון. גם באגם זה, שהתקיים לאורך עשרות אלפי שנים, חלו כל העת שינויים במפלס ובמליחות. המפלס המרבי של האגם הגיע לגובה של 170 מטר מתחת לפני הים, ומליחותו הגיעה למחצית מזו של ים המלח.

מאז יצירת לגונת סדום ועד היום התרחשה אינטראקציה בין מי גוף המים שעל פני השטח לבין מי התהום. המים חלחלו אל תוך הסלעים ונבעו חזרה אל פני השטח במעיינות לאורך החופים. במהלך זרימתם בתת־הקרקע המים חל שחלוף מלחים עם סלעי הסביבה, ולפיכך ההרכב הגאוכימי של המים שחלחלו מפני השטח

* ד"ר אייל שלו הוא חוקר בתחום ההידרולוגיה במכון הגאולוגי לישראל, משרד התשתיות. חיים גבירצמן הוא פרופסור במכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

היה שונה מהרכב המים שחזרו אליו. מליחות המים הייתה תלויה בכמות כניסת המים ובכמות האידוי, ואילו הרכב המלחים היה תלוי באינטראקציה של המים עם סלעי הסביבה. ההרכב ההתחלתי של לגונת סדום היה של מי ים מאודים. הרכב המים השתנה מאוד במשך הזמן בגלל תהליכים של שחלוף המלחים עם סלעי הסביבה.

הרכב המלחים של גוף מים מעיד על ההיסטוריה שלו. תהליכים שונים שעוברים על מים יובילו להרכב מלחים שונה. מיהול מים מלוחים עם מים מתוקים יגרום לירידה במליחות הכללית אבל לא לשינוי היחס בין המלחים השונים. בניגוד למיהול, קיימים תהליכים אחרים שמשנים גם את יחסי המלחים. שני תהליכים כאלה הם תהליך האידוי ותהליך האינטראקציה עם סלעים. בגיליון 1 של 'מלח הארץ' (עמ' 46) הופיע הסבר להשתנות יחסי היסודות Na/Cl ו- Ca/Mg בתהליכי האידוי והדולומיטיזציה.

אברהם סטרינסקי (סטרינסקי, 1974) טען שעל פי הקריטריונים שהוסברו לעיל, ובעיקר לפי היחס Na/Cl , אפשר לזהות מים שמקורם בבקע ים המלח, ואכן נמצאו מים כאלה בקידוחי נפט עמוקים בדרום הארץ. על סמך הנתונים הכימיים כשלעצמם הוא הסיק שמקור המים המלוחים בתת-הקרקע שנמצאו באזור שבין ים המלח לאשקלון הוא בבקע ים המלח. השאלה העולה ממסקנה זו היא כיצד מים שנמצאים ברום טופוגרפי של כ-400 מטר מתחת לפני הים הצליחו לזרום במעלה הזרם ולהגיע לשכבות עמוקות מתחת לים התיכון? הרי יש כיום עדויות לזרימה בכיוון הפוך, מהרי יהודה אל ים המלח?

העבודה המתוארת במאמר זה נותנת הסבר פיזיקלי לזרימה אפשרית כזו בעזרת שימוש במודלים ממוחשבים (Stanislavsky & Gvirtzman, 1999). אחרי שנתאר את הרקע לנתונים הגאולוגיים, הגאוכימיים וההידרולוגיים נענה על השאלה ונסביר את תשובתנו גם בצורה אינטואיטיבית.

מבנה גאולוגי

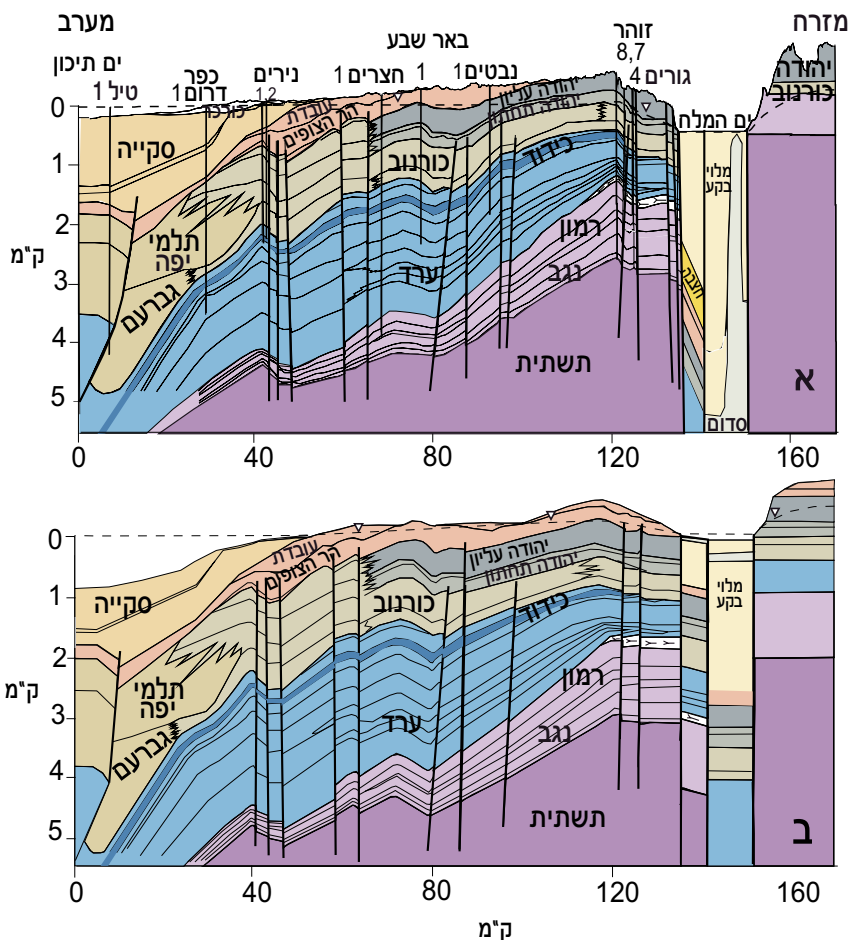
השלב הראשון במחקר היה תיאור ואפיון המבנה הגאולוגי. לצורך כך נעזרנו במפות גאולוגיות ובנתונים מקידוחים עמוקים (הקידוחים מופיעים באיור 1). על סמך נתונים אלו נבנה חתך גאולוגי לאורך ציר א-א שבאיור 1, והוא



איור 1: מפת מיקום. דוגמאות מים נלקחו מהקידוחים המופיעים במפה, ששימשו גם להכנת החתך הגאולוגי (איור 2).

מופיע באיור 2. בחתך זה באים לידי ביטוי רוב הסלעים הבונים את הסלעים הסדימנטריים בישראל.

כל הסלעים יושבים על סלעי תשתית המורכבים מסלעים מגמתיים ומטמורפיים. במרכז החתך רוב עמודת הסלעים מורכבת מקרבונטים (גיר, דולומיט וקרטון). בחלקה התחתון של חבורת נגב מגיל פרם יש גם אבני חול. גם בחבורת רמון מגיל טריאס וחבורת ערד מגיל יורה יש שכבות גיר. בחלקה העליון של חבורת ערד נמצאת תצורת כידוד, המכילה בעיקר חרסיות. חבורת כורנוב מגיל קרטיקון תחתון מורכבת מאבני חול וגיר. מעל חבורת כורנוב נמצאת חבורת יהודה, הבנויה בעיקר מגיר ודולומיט עם שכבה של פצלים בחלקה התחתון. חבורת הר הצופים (גיל סנטון-מסטריכט) וחבורת עובדת (גיל אאוקן) מכילות בעיקר קרטון. הסלעים בחלק המערבי של החתך הם בעיקר חרסית של חבורות גברעם, תלמי יפה וסקייה. באזור בקע ים המלח נקברו כל הסלעים הללו עד לעומק של 10 ק"מ מפני הקרקע, ועל גביהם שקעו סלעים צעירים יותר המכילים קונגלומרט, חרסיות ומלח. תצורת סדום, המורכבת ממלח, התרוממה ויצרה את דיאפיר סדום (וינברגר ובגין, 2005).



איור 2: התפתחות בקע ים המלח. (א) חתך גאולוגי נוכחי (מיקום באיור 1); (ב) שחזור החתך הגאולוגי למיוקן (לפני 3-6 מיליוני שנה), זמן השקעת תצורת סדום.

חתך גאולוגי נוסף, המתאר את הגאולוגיה בזמן השקעת תצורת סדום, הוכן על אותו ציר. התהליכים הגאולוגיים העיקריים שהתרחשו מאז השקעת תצורת סדום ועד היום באים לידי ביטוי בהבדל שבין שני החתכים. ההבדל העיקרי נובע מהמשך השתפלותו של בקע ים המלח והמשך התרוממותה של שדרת ההר בעבודה זו אנו מניחים כי המבנה הגאולוגי השתנה באופן רציף מזמן לגונת סדום ועד היום.

מושגים

עומד הידראולי – מדד להגדרת אנרגיית המים, הנקבע לפי הגובה שאליו עולים המים מנקודה מסוימת כתוצאה מהלחץ שבו הם נתונים. נמדד ביחידות של גובה (מטר).

מסנתת של קידוח – המקטע המחורר בצינור הקידוח, שדרכו יכולים מי התהום להיכנס אל הצינור ולהישאב החוצה.

מוליכות הידראולית – היכולת של סלע או קרקע להעביר מים דרך החללים והסדקים שבתוכם. נמדד ביחידות של מהירות (מטר/יום).

דיפוזיה – קצב מעבר החומר במרחב הנובע מהתנועה האקראית של המולקולות. נמדד ביחידות של שטח לזמן (מטר²/שנייה).

מודל קונספטואלי – מודל מחשבתי המתאר את התהליכים והמנגנונים החשובים המתרחשים במערכת הנחקרת.

מודל ספרתי – מודל ממוחשב המבוסס על חוקים פיזיקליים ומסוגל להעריך באופן כמותי את קצב התהליכים.

תנאי שפה – תנאים פיזיקליים הקיימים בגבול המרחב בו מתרחשים תהליכים המתוארים במודל הספרתי.

שטף חום – קצב מעבר החום, הנמדד ביחידות של כמות האנרגיה העוברת דרך יחידת שטח ביחידת זמן (ואט/מטר²).

תנאים הידרוסטטיים – תנאים פיזיקליים הקיימים בעמודת המים כאשר לא מתקיימת בה תנועה אלא היא נמצאת בתנאים של שיווי משקל.

ים מבקיעים – ים קדום מתקופת האירוע המסיני (לפני כשישה מיליון שנה) בו התייבש חלק מהים התיכון. על קרקעית הים הצטברו מלחים.

תא קונוקציה – תא סגור של זרימה סיבובית שבו עולים מים חמים מצד אחד ויורדים מים קרים מצד שני.

תאוריה

כידוע, מים זורמים ממקום גבוה למקום נמוך, ולכן המדד ההידרולוגי החשוב ביותר הוא העומד ההידראולי, או מפלס מי התהום. מפלס מי התהום נמדד בקידוחים ומייצג את לחץ המים בעומק שבו נמצא האקוויפר ובו מוצבת המסננת של הקידוח (המרווח שממנו נשאבים המים). מדידות מראות כי המפלסים משתנים ממקום למקום ומשכבה לשכבה. באופן תאורטי, מי התהום באותו מיקום גאוגרפי יכולים לזרום מזרחה בשכבה אחת ומערבה בשכבה אחרת. מי התהום זורמים ממפלס גבוה לנמוך כאשר צפיפות המים אחידה. צפיפות המים תלויה במליחות ובטמפרטורה של המים. ככל שהמים מלוחים או קרים יותר כך הם צפופים יותר. מאחר שצפיפותם של מי ים המלח היא 1.24 גרם/סמ"ק ואילו צפיפות מי ים היא 1.03 גרם/סמ"ק, הרי שעמודת מי ים המלח בעובי של 100 מטר שקולה לעמודה של 120 מטר של מי ים ו-124 מטר של מים מתוקים. לכן, נוסף על מדידת המפלס בקידוח יש למדוד את צפיפות המים.

מהירות הזרימה של מי התהום תלויה גם בצמיגות המים. צמיגות המים היא מדד למידת ההתנגדות של המים לזרימה עקב חיכוך המולקולות זו בזו. כמו הצפיפות, גם הצמיגות תלויה במליחות ובטמפרטורה. מים שצמיגותם נמוכה יזרמו מהר יותר ממים שצמיגותם גבוהה. כדי להמחיש התנהגות זו אפשר להשוות את המים לדבש. לדבש קר צמיגות גבוהה והוא יזרום לאט, ואילו לדבש חם צמיגות נמוכה והוא יזרום מהר.

עד כה הזכרנו רק את תכונות המים המשפיעות על זרימת מי התהום. ואולם, מי התהום זורמים דרך הנקבובים בסלעים, ואלה מגבילים או מאפשרים זרימה דרכם. המוליכות ההידראולית של הסלע תלויה במידת הרציפות של נקבובי הסלע. המוליכות ההידראולית נובעת מהחיבור שבין הנקבובים או הסדקים הקיימים בסלע. ככל שהמוליכות ההידראולית גבוהה יותר כך מהירות הזרימה של מי התהום בסלע גבוהה יותר. המוליכות ההידראולית של חרסית היא בין 10^{-7} מטרום ל- 10^{-3} מטרום, והמוליכות ההידראולית של חול היא בין 0.01 מטרום ל-1,000 מטרום. השונות הגדולה בערכי המוליכות ההידראולית בין הסלעים השונים גורמת למדד זה להיות החוליה החלשה של ההידרולוגים בכימות בעיות של זרימת מי תהום. גם ידיעת סוג הסלע מותירה אי-ודאות רבה באשר לקביעת ערך המוליכות ההידראולית. ניתן למדוד את המוליכות ההידראולית

על ידי מבחנים שונים הכוללים מבחני שאיבה מקידוחים ולקיחת דוגמאות שדה למעבדה, אך מבחנים אלה אינם פשוטים לביצוע ואינם זמינים בכל מקום. דרך נוספת למציאת המוליכות ההידראולית היא באמצעות הדמיות מחשב שבהן משחזרים התנהגות מערכת הידרולוגית שלמה ומכילים את ערכי המוליכות ההידראולית עד לקבלת תוצאות המתאימות למדידות בשדה.

שני תהליכים נוספים המשפיעים על זרימת מי התהום ומושפעים ממנה הם הסעת מומסים והסעת חום. מי התהום מסייעים בזרימתם חום ומלחים. ללא זרימת מי תהום, פיזור הטמפרטורות והמלחים במרחב היה שונה. טמפרטורת הסלעים עולה עם העומק בשיעור של כ-20 מעלות לקילומטר. בחוברת 'מלח הארץ' 1 נתון גרף קשר בין טמפרטורה לעומק באזור ים המלח. בעומק של חמישה קילומטרים מתחת לפני הקרקע הטמפרטורה גבוהה ב-100 מעלות מזו שבפני השטח. זרימת מי התהום משנה את המצב הזה. אם לזרימת מי התהום יש רכיב כלפי מעלה, הם מביאים אתם חום מהעומק. דוגמה ברורה למצב זה הם מעיינות תרמליים. הטמפרטורה של המעיינות מבטאת את הטמפרטורה מהעומק שממנו מגיעים המים. אם מי הגשם מחלחלים למטה, הרי שהם מקררים מקומות שבהם הטמפרטורה הייתה אמורה להיות גבוהה יותר. תהליך הסעת המלחים דומה לתהליך הסעת החום. ללא זרימת מי תהום המלחים נעים רק בדיפוזיה. במצב כזה היו המלחים של ים המלח עוברים דיפוזיה אטית למי התהום וממליחים את מי התהום המתוקים. בגלל הזרימה של המים יש שטיפה מתמדת של מים מתוקים, שאינה מאפשרת המלחה של כל האקוויפר. לעומת זאת, מי ים המלח זורמים גם הם בתת-הקרקע וממליחים אזורים אחרים במהירות גדולה יותר מהמלחה דיפוזיבית. לכן ברור שמי התהום משפיעים על פיזור הטמפרטורה והמלחים בתת-הקרקע. עם זאת, כפי שהוסבר קודם, הטמפרטורה והמליחות משפיעות על תכונות המים כמו הצפיפות והצמיגות. לפיכך מערכות מי תהום, המלחים והחום תלויות זו בזו או בשפה מקצועית 'מצומדות'. בגלל ההשפעה ההדדית בין כל המערכות אי-אפשר לפתור בעיה במערכת אחת ולהתבסס על פתרון זה למערכת שנייה, אלא צריך לפתור את כל המערכות ביחד. לדוגמה, אם נמצא את שדה המהירויות של מי תהום, אפשר יהיה לכאורה לחשב את פיזור הטמפרטורות. ואולם, מכיוון שפיזור הטמפרטורות השתנה, הרי שהחישוב הראשוני של שדה המהירויות אינו נכון מאחר שהתבסס על פיזור טמפרטורות אחת. כיום ניתן לפתור בעזרת תכנות מחשב את כל המערכות יחד ולקבל את שדה המהירויות, פיזור הטמפרטורות ופיזור המלחים.

מודל הידרולוגי

לפני שנסביר את המודל ההידרולוגי שפיתחנו, נחזור על שאלת המחקר ונגסה להבין את הפתרון שאנו מציעים באופן קונספטואלי. ים המלח הוא המקום הנמוך ביותר על היבשות, ולכן סביר להניח שהוא מנקז אליו לא רק מים עיליים אלא גם את מי התהום. מצד שני, עדויות גאוכימיות מלמדות שמים שמקורם באזור ים המלח נמצאו בקידוחים בכל מרחב הנגב ואפילו באשקלון. השאלה שאנו מנסים לפתור היא כיצד הצליחו מים אלה לזרום מהבקע למרחק של יותר מ-100 קילומטר, לכאורה כנגד כיוון הזרם?

הפתרון לבעיה זו קשור לצפיפות המים. כפי שהסברנו בסעיף הקודם, צפיפות מי ים המלח גדולה מאוד בשל מליחותם הגבוהה. נניח שמי ים המלח חלחלו וממלאים את כל עמודת הסדימנטים באזור ים המלח, מים מתוקים ממלאים את כל עמודת המים באזור שדרת ההר ומי ים ממלאים את כל עמודת המים באזור מישור החוף. בגלל רום טופוגרפי שונה, עמודת המים באזור ים המלח קצרה מהעמודה באזור מישור החוף ב-400 מטר ומהעמודה באזור ההר ב-1,000 מטר. משקלה של עמודה בים המלח, שעובייה 5 קילומטר, צפיפותה 1.24 גרם/סמ"ק ושטחה מטר על מטר, הוא 6.2 מיליון ק"ג; משקלה של עמודה באזור מישור החוף, שצפיפותה 1.03 גרם/סמ"ק, עובייה 5.4 קילומטר ושטחה מטר על מטר, הוא 5.6 מיליון ק"ג; משקלה של עמודה באזור ההר, שצפיפותה 1 גרם/סמ"ק, עובייה 6 קילומטר ושטחה מטר על מטר, הוא 6 מיליון ק"ג. מכאן שעמודת המים באזור ים המלח היא הכבדה ביותר. למשקל הגבוה של עמודת המים בים המלח יש יכולת לדחוף את המים האחרים ולגדוד מערבה.

מובן שפתרון זה פשטני מדי, ונדרש חישוב מדויק יותר שיתאר את התהליך של נדידת התמלחת. אל המודל הספרתי מוזנים נתונים הכוללים את הגאולוגיה ומדדים הידרולוגיים, כימיים ותרמליים. החתך הגאולוגי מחולק לתאים (אלמנטים), וכל תא מקבל ערכים המייצגים את הסלע שנמצא בו (לוח 1). שיטה זו נקראת 'שיטת אלמנטים סופיים', מכיוון שכל המשוואות נפתרות בחישוב לכל תא. המודל מדמה את זרימת מי התהום מזמן השקעת תצורת סדום, לפני שלושה מיליון שנה, ועד היום. במשך זמן זה החתך הגאולוגי השתנה באופן הדרגתי והפך מהמצב המתואר באיור 2 למצב באיור 2א. מלבד המדדים ההידרוגאולוגיים של הסלעים צריך להגדיר תנאי שפה ותנאי התחלה של מים, מלחים וטמפרטורה.

לוח 1. חלוקה הידרוסטרטיגרפית של החתך הגאולוגי וערכיהן הפיזיקליים של היחידות

מוליכות (תרמלית/ת' m ⁰ C)	מוליכות הידראולית אנכית (מטר/ שנה)	מוליכות הידראולית אופקית (מטר/שנה)	נקבוביות (-)	הרכב סלעים	חבורה או תצורה
2	1×10^{-3}	1×10^{-2}	0.03	קונגלומרט וחרסית	מילוי בקע
4	1×10^{-3}	1×10^{-3}	0.01	מלח	סדום
2.5	8×10^0	8×10^2	0.15	קונגלומרט ואבן חול	חצבה
2	1×10^{-3}	1×10^{-2}	0.03	חרסית	סקייה
2.5	1×10^{-3}	1×10^{-1}	0.10	קרטון וגיר	עבדת
2.5	1×10^{-3}	1×10^{-1}	0.10	קרטון	הר הצופים
2.5	8×10^0	8×10^2	0.15	דולומיט וגיר	יהודה עליון
2.5	6×10^{-3}	6×10^{-1}	0.05	חוואר ודולומיט	יהודה תחתון
2	1×10^{-3}	1×10^{-2}	0.03	חרסית	תלמי יפה
2	1×10^{-3}	1×10^{-2}	0.03	חרסית	גברעם
2.5	5×10^{-2}	5×10^0	0.10	גיר ואבן חול	כורנוב
2	1×10^{-3}	1×10^{-2}	0.03	חרסית	כידוד
2.5	1×10^{-3}	1×10^{-1}	0.05	גיר ודולומיט	ערד
2	1×10^{-3}	1×10^{-2}	0.03	גבס	מוחילה
2.5	1×10^{-3}	1×10^{-1}	0.05	גיר ודולומיט	רמון
2.5	1×10^{-3}	1×10^{-1}	0.05	גיר ודולומיט	נגב
2.5	8×10^0	8×10^2	0.15	אבן חול	ים סוף
3.5	0	0	0.01	גרניט	תשתית

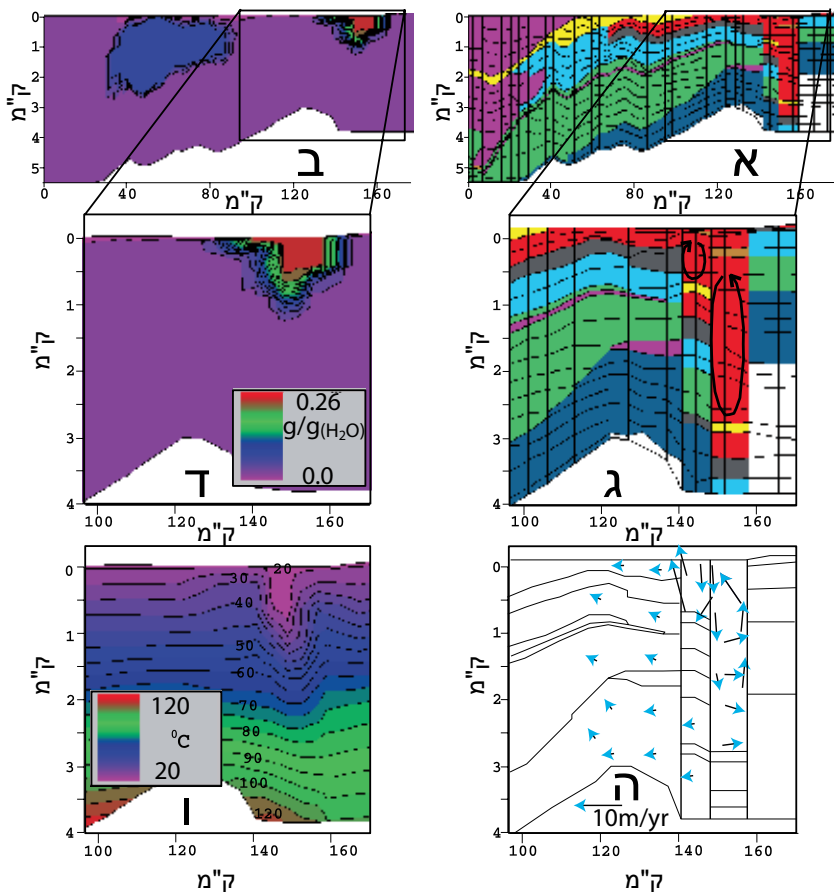
תנאי שפה: הגבולות הימני, השמאלי והתחתון בחתך המחקר אטומים לזרימת מים על פי הנחת המודל. הגבול התחתון אטום גם כי יחידות התשתית אינן מאפשרות מעבר מים. הגבול השמאלי, בקצה המערבי של החתך, אטום כי הוא עשוי מיחידות חרסיתיות. הגבול העליון ברוב החתך הוא מפלס מי התהום, כאשר במזרח המפלס הוא של ים המלח ובמערב המפלס הוא של הים התיכון. המליחות בגבול העליון היא 0 גרם מלח בק"ג מים באזור מי התהום המתוקים, 267 גרם בק"ג מים (0.267 גרם/גרם) באזור ים המלח ו־34.4 גרם בק"ג מים (0.0344 גרם/גרם) באזור הים התיכון. הטמפרטורה בגבול העליון היא 20 מעלות צלסיוס, ושטף החום בגבול התחתון הוא 50 mW/m^2 . אין מעבר חום בגבול הימני ובגבול השמאלי.

תנאי התחלה: התנאים ההידרולוגיים ההתחלתיים הם הידרוסטטיים. רוב החתך מלא במי ים במליחות של 0.0344 גרם/גרם. באזור ים המלח (סדום) המליחות היא 0.267 גרם/גרם, וממזרח לחוף הים התיכון יש כתם של מים מלוחים יותר (0.098 גרם/גרם), שהם שארית של לגונה בים שנוצרה מבקיעים שהשקיע גבס. הטמפרטורה ההתחלתית בחתך משתנה באופן הדרגתי בגרדיאנט של 20 מעלות לקילומטר.

התוצאות מראות כי תמלחת הבקע עוברת, בנדידתה מאזור ים המלח, מספר שלבים: (א) שקיעה אנכית בבקע ים המלח; (ב) נדידה מערבה; (ג) שטיפה מזרחה במים 'מתוקים' מאקוויפרים רדודים והמשך נדידה מערבה באקוויפרים עמוקים.

שלב א: עם חדירתה של לגונת סדום אל בקע ים המלח נוצר מצב לא יציב שבו מים מלוחים וכבדים של לגונת סדום מונחים מעל מי תהום קלים הרבה יותר. במקרה זה המים הכבדים ישקעו לתוך המים הקלים. החתך הגאולוגי לאותו זמן שוחזר בהתבסס על מספר הנחות, והוא מתואר באיורים 3 ו־3ג. שדה המהירויות של מי התהום מוצג באיור 13. תיאור הזרימה מופיע גם באיור 13ג. בגלל אי־היציבות נוצרו שני תאי קונוקציה שהחדירו מים כבדים לעומק. לצורך המחשה, זרימה דומה מתקבלת אם שופכים מים על שמן: המים, הכבדים מהשמן, ישקעו לתוך השמן ויצרו תאי זרימה דומים. כתוצאה מזרימה זו הטמפרטורה של המים עולה במקום שבו המים עולים ויורדת במקום שבו הם זורמים כלפי מטה (איור 13).

שלב ב: התמלחות נודדות לרוחב כל החתך (איור 4), ובעיקר בחלק העליון שם מהירות הזרימה האופיינית היא 10 מטר/שנה. באיור 14 מוצגים קווים שווי

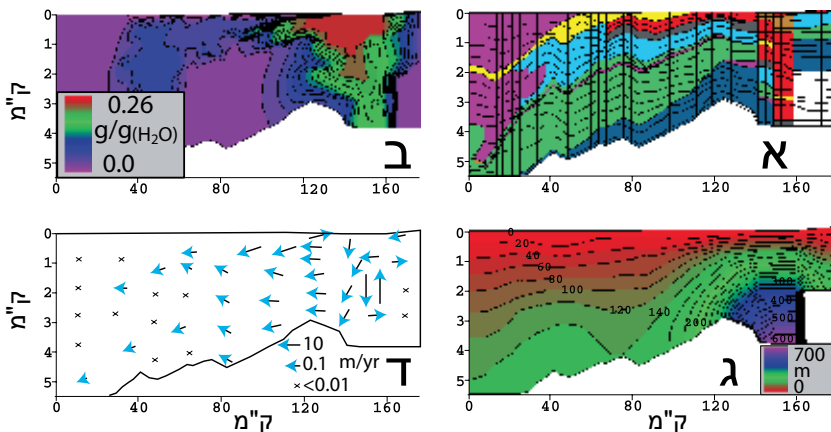


איור 3: הדמיית המחשב לתיאור הזרימה 500 שנה לאחר חדירת ים סדום. התהליך העיקרי שהתרחש בשלב זה הוא שקיעת התמלחות בתאי קונוקציה. (א) חלוקת השכבות, כל יחידת סלע צבועה בצבע שונה; (ב) מליחות המים בחתך; (ג) הגדלה של חלוקת השכבות ותיאור סכמתי של כיווני הזרימה של מי התהום; (ד) הגדלה של מליחות המים באזור הבקע; (ה) מהירויות הזרימה של מי התהום. גודל החצים מייצג את מהירות הזרימה; (ו) התפלגות הטמפרטורה בחתך.

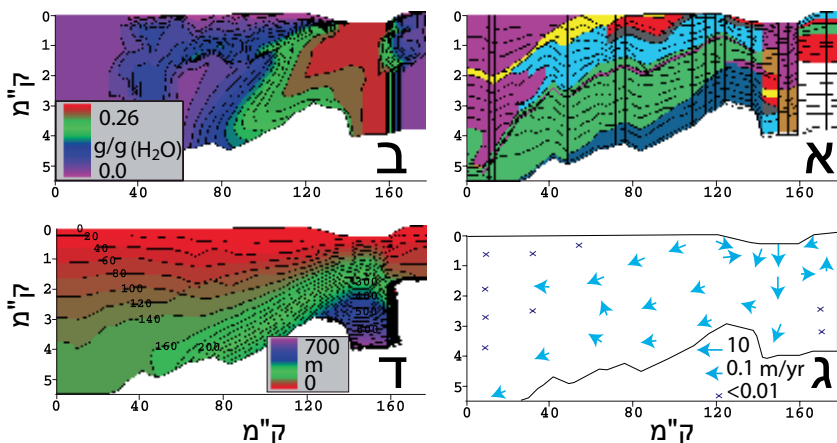
עומד הידראולי (equivalent fresh water head). באזור הבקע מגיע העומד ההידראולי בשכבות העמוקות לערכים גבוהים, מכיוון שהחתך באזור זה מלא במים כבדים (איור 4ב) ועמודת המים כבדה יותר מעמודת המים שמחוץ לבקע.

כתוצאה מהפרשי העומדים בממד האופקי נוצרת זרימה ממזרח למערב. באיור 4 וקטורי המהירות פרופורציוניים באופן לוגריתמי למהירות הזרימה. מהירות הזרימה משתנה בסדרי גודל במקומות שונים בחתך. הצגה זו אמנם מעוותת את עצמת המהירות של המים, אך היא מאפשרת לראות כיווני זרימה גם במהירויות נמוכות מאוד. רק תא קונוקציה אחד, בחלק העמוק, ממשיך להתקיים במהירות אופיינית נמוכה יותר של 5 מטר/שנה.

שלב ג: עם ירידת מפלס המים באגם החלה שטיפה של תמלחות (בשלב זה רק בחבורת יהודה) חזרה אל תוך הבקע בקצב של 0.5-1 מטר/שנה (איור 5). נדידת התמלחות מערבה נמשכה, אם כי רק בחלק האמצעי והעמוק של החתך. משלב זה ועד היום מתקיימות שתי מערכות זרימה אחת מתחת לשנייה. במערכת העליונה יש זרימה מזרחה, ובמערכת התחתונה יש זרימה מערבה. נדידת התמלחות מערבה בחלק העמוק של החתך גרמה להחלפת מים כבדים במים קלים שהיו שם קודם, ועל ידי כך להקטנת הפרש העומדים בין הבקע לבין החתך הסדימנטרי שמחוץ לבקע. סיכום השלבים מזמן היווצרות ים סדום ועד היום מופיע באיור 6.

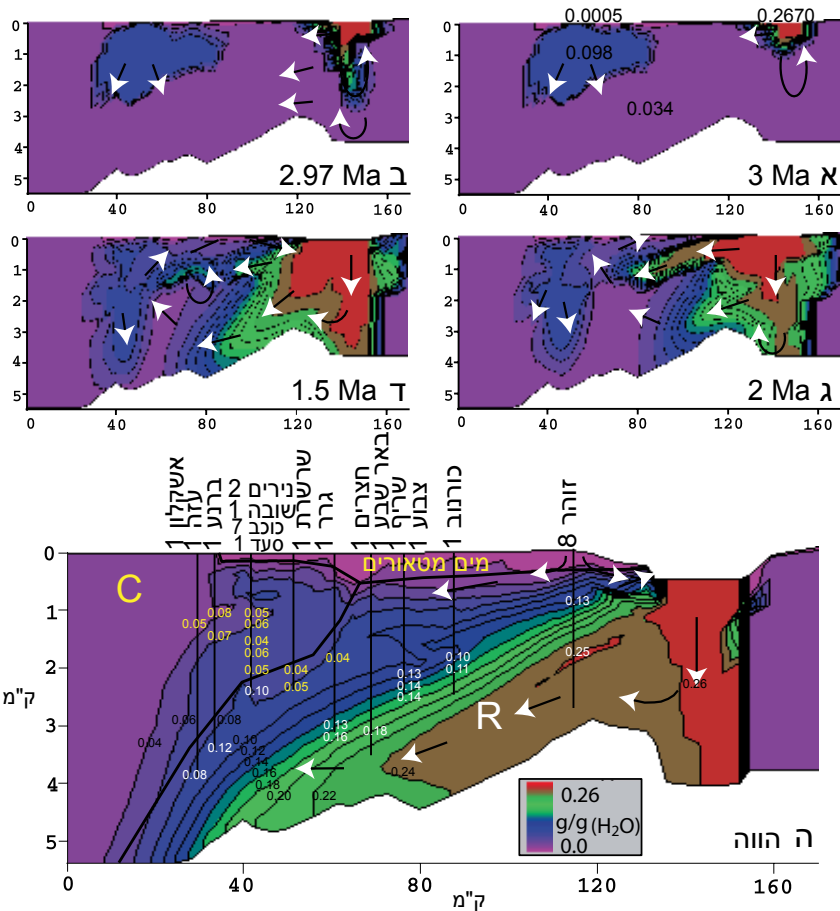


איור 4: הדמיית מחשב לתיאור נדידת התמלחות לפני 2.5 מיליוני שנה. בשלב זה מתחילה נדידה אופקית מערבה. (א) חלוקת השכבות; (ב) מליחות המים בחתך; (ג) עומד ההידראולי (equivalent freshwater head); העומד ההידראולי בבקע גדול מהעומד ההידראולי מחוץ לבקע; (ד) מהירויות זרימת מי התהום. גודל החצים מייצג את מהירות הזרימה.



איור 5: הדמיית המחשב לתיאור נדידת התמלחות לפני 1.5 מיליון שנה. בשלב זה מתחילה שטיפה של תמלחות שחדרו אל חברת יהודה חזרה אל הבקע. (א) חלוקת השכבות; (ב) מליחות המים בחתך; (ג) מהירויות הזרימה של מי התהום. גודל החצים מייצג את מהירות הזרימה; (ד) התפלגות העומד ההידראולי (freshwater head).

החצים הלבנים מסמנים את כיוון הנדידה של התמלחת. באיור 6 מוצגת השוואה בין תוצאות המודל לבין המדידות מהקידוחים. הערכים הלבנים מציינים את מליחות המים בקידוחים שמקורם באזור ים המלח. הערכים הצהובים מציינים את מליחות המים בקידוחים שמקורם באזור של חוף הים התיכון. הקו האדום הנו תוצאת המודל, והוא מפריד בין גופי המים השונים. תוצאות המודל מתאימות למדידות מהקידוחים הן מבחינת מקור המים והן מבחינת מליחות המים. בלוח 2 מוצגות הכמויות של המלחים למטר רוחב, שהוסעו מהבקע אל תוך החתך הסדימנטרי ונשטפו מהחתך הסדימנטרי חזרה לבקע. בהנחה שנדידת התמלחות נעשתה לאורך קטע צפון-דרום של כ-40 ק"מ, יש להכפיל את כל הערכים ב-40,000 על מנת לחשב את סך כל המלחים שנדדו. עיקר תנועת התמלחות הייתה בחברת יהודה, אולם רוב התמלחות שהוסעו בה (≈80%) נשטפו חזרה לבקע לאחר שהגיבו עם סלעי הסביבה, ואילו התמלחות שלא נשטפו שקעו לשכבות העמוקות.



איור 6: חמישה שלבים בנדידת תמלחות מבקע ים המלח: (א) שקיעה ורטיקלית; (ב) תחילת הנדידה מערבה; (ג) חדירה מערבה בשני אקוויפרים עיקריים; (ד) שקיעת התמלחות תוך כדי נדידה; (ה) המצב כיום. תוצאות המודל כוללות קווים שווי מליחות וקו אדום המפריד בין סוגי מים שונים. מדידות מליחות המים מופיעות לאורך הקידוחים: לבן – מים מסוג R שמקורם בבקע ים המלח; צהוב – מים שמקורם באזור הים התיכון ומי גשם. קיימת התאמה טובה של מליחות המים וסוג המים בין תוצאות המודל לבין הנתונים המדודים.

לוח 2. כמויות המלחים שהוסעו בשכבות השונות

תבורה	כמות המלחים שהוסעו מהבקע מערבה ('ק"ג/מ')	כמות המלחים שהוסעו אל הבקע ('ק"ג/מ')
רמון + נגב (פלאוזאיקון + טריאס)	2.35E+10	—
ערד (יורה)	2.42E+09	—
כורנוב (קרטיקון תחתון)	4.39E+09	3.70E+09
יהודה (קרטיקון עליון)	2.33E+11	1.89E+11
סה"כ	2.63E+11	1.93E+11

סיכום

העבודה מוכיחה כי התהליך של נדידת התמלחות מים המלח לכיוון הים התיכון, כפי שהציע אברהם סטרינסקי (סטרינסקי, 1974), אפשרי. במאמר זה סיכמנו את הממצאים והסברנו את התהליכים שגרמו ליצירת תמלחות באזור ים המלח ולנדידתן מערבה. לגונת סדום, שנוצרה בבקע ים המלח, התקיימה במשך כמה מאות אלפי שנים, השקיעה שכבות מלח עבות ויצרה תמלחות מרוכזות וכבדות. מזמן יצירתה של לגונת סדום ועד היום קיים באזור ים המלח גוף מים מלוחים, בין אם כאגם המנותק מהים התיכון ובין אם כלגונה. מאז יצירת ים סדום ועד היום התרחשה אינטראקציה בין גוף המים שעל פני השטח לבין מי התהום. המים חלחלו אל תוך הסלעים ונבעו חזרה ללגונה או לאגם במעיינות לאורך החופים. במהלך זרימתם שחלפו המים מלחים עם סלעי הסביבה, כך שהרכב הכימי של המים שחלחלו היה שונה מזה של המים שחזרו.

דוגמאות מים שנלקחו מקידוחים עמוקים בדרום ישראל היו דומים מבחינה כימית למי ים המלח, ולכן הוצע כי תמלחות אלו נדדו מבקע ים המלח ועד אזור אשקלון. במאמר זה הראינו כיצד מים הנמצאים ברום טופוגרפי של כ־400 מטר מתחת לפני הים הצליחו לזרום 'במעלה הזרם' ולהגיע לשכבות עמוקות מתחת לים התיכון. למרות הרום הטופוגרפי הנמוך של ים המלח, מי התהום הממלאים

את החתך באזור זה כבדים ממי ים ומי גשם. הודות למשקלם הגבוה של המים, תמלחות ים המלח דוחקות במי התהום הקלים וממלאות את החתך. במשך שלושה מיליוני השנים האחרונות הצליחו תמלחות אלו להתקדם עד לאזור של חוף הים התיכון בעומקים של 3-5 ק"מ מתחת פני הקרקע. המודל הממוחשב הראה שכמויות תמלחת גדולות נדרו ממקום היווצרותן באזור ים המלח הנוכחי, קודם על ידי שקיעה אנכית ולאחר מכן על ידי נדידה מערבה. בשלב מאוחר יותר נשטפו חלק מהתמלחות, שהיו בשכבות רדודות יחסית, חזרה אל אזור ים המלח.

רשימת מקורות וקריאה נוספת

- וינברגר, ר' ובגין, ב"ז. 2005. 'מה ראתה אשת לוט? עליית מחדר המלח של הר סדום בשני מיליון השנים האחרונות', מלח הארץ 1: 1-18.
- זק, י'. 1967. 'הגאולוגיה של הר סדום', חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה, האוניברסיטה העברית בירושלים.
- סטרינסקי, א'. 1974. 'יחסי גומלין בין תמלחות Ca- כלורידיות לסלעי משקע בישראל', חיבור לשם קבלת תואר דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- Stanislavsky, E. and Gvirtzman, H. 1999. 'Basin-scale Migration of Continental-rift Brines: Paleohydrologic Modeling of the Dead Sea Basin', *Geology* 27: 791-794.