

בולעני ים המלח: מה מספרים עליהם המלוחים שבתוכם?

תמי זילברמן*

מבוא

במהלך 3000 השנים האחרונות עמד מפלס ים המלח סביב 400 מטר מתחת לפני הים עם שינויי מפלס של מספר עשרות מטרים. בשנות השלושים של המאה העשרים הגיע המפלס למקסימום של 391 מ' מתחת לפני הים ומאז ירד ברציפות. כתוצאה משאיבת מים מהכינרת ומהירמוך ואיוד מוגבר של מי ים המלח בבריכות התעשייתיות הואצה ירידתו ליותר ממטר לשנה. בעקבות ירידה זו יורד גם מפלס מי התהום* האזורי. המחקר שנעשה מאז הופעת הבולענים מראה, שירידת המפלס מהווה גורם מרכזי בהתפתחותם, וכי ים המלח כיסה ברציפות את אתרי הבולענים עד חשיפתם בתחילת שנות ה-80 של המאה ה-20.

ירידת המפלס של ים המלח לוותה בעליה במליחותו*. מאז סוף המאה ה-19 לפחות, ועד חורף 1978/79 היה האגם משוכב* כאשר שכבת המים התחתונה, המלוחה יותר, הייתה רוויה* ביחס למלח בישול (שם מדעי הליט, נוסחה כימית NaCl) בעוד ששכבת המים העליונה הייתה דומה מבחינת הרכבה הכימית לתחתונה, אך פחות מלוחה. החל משנות ה-60 של המאה העשרים החלה עלייה מתמדת בצפיפות ומליחות המים בשכבה העליונה עד שבשנת 1979 השתוו המליחות והצפיפות של שתי השכבות, והאגם התערבב והפך לאחיד בהרכבו הכימי.

לאורך החוף של ים המלח נובעים מעיינות רבים, חלקם חמים, בעלי טווח מליחיות רחב מאוד, החל במים שפירים (לדוגמא עין שולמית, מליחות של 0.5 גרם בליטר) ועד למים בעלי מליחות-על (hypersaline) (לדוגמא: עין אשלג, המכיל 381 גרם בליטר, גבוה יותר ממליחות ים המלח עצמו שהיא 340 גרם לליטר). החלוקה הגיאוכימית והסיסטמטית של התמלחות באגן ים המלח והתפתחותן ממי ים קדומים, (הכוללת גם את מעיינות החוף המערבי של האגם) הניחה את היסוד להבנת האבולוציה של התמלחות בתת הקרקע בארץ ומקובלת עד היום.

* מאמר זה מבוסס על המחקר לתואר M.Sc באוניברסיטה העברית בירושלים בהדרכת אמתי כץ, אתי גבריאל ויוסי יחיאלי.

הבולענים (sinkholes) הם בורות המגיעים לקוטר של כ-25 מטרים ולעומק של כ-20 מטרים. מספרם ההולך וגדל בקצב מואץ נאמד כיום מעל ל-6000. הבולענים מופיעים לאורך החוף משני עבריו של ים המלח. בצדו המזרחי של האגם הם מרוכזים בדרום, ובצד המערבי הם מצויים לכל אורך החוף, בין נווה זוהר שבדרום ועינות צוקים שבצפון (איור 1).

העניין הציבורי הגובר בתופעת הבולענים נובע מפגיעתם החמורה בתיירות, בנגישות לחוף, בחקלאות ובתשתיות, ומן הסיכון הממשי לחיי אדם הנובע מהם. מכאן מובן גם המאמץ המחקרי הניכר שהושקע ומושקע בהבנת מקורם ומנגנון התפתחותם.

חלל הבולען שנפער ומתפתח במשטח בלתי מופרע מחייב שהחומר שמילא אותו סולק ופונה מן המקום ללא השארת עקבות על פני השטח. לגיאולוגים מוכרות שתי דרכים עיקריות לתהליך הסילוק הנדרש ליצירת חלל כזה:

1. סחיפה, ע"י מי תהום הזורמים לעבר האגם, של חומר מינרלי דקיק (טיין וחרסיות) הממלא את החללים שבין מרכיבים גסים יותר (חלוקי נחל ושברי סלעים).

2. סילוק כימי של חומר מינרלי שמי התהום מסוגלים להמיסו (במקרה זה מלח ביסול, halite), והסעתו בתמיסה לעבר האגם.

כיום מקובלת הדעה שיצירת הבולענים מתרחשת לפי התהליך השני, כלומר יצירת חלל המסה מתחת לפני השטח שלתוכו קרסה ה"תקרה" שמעל.

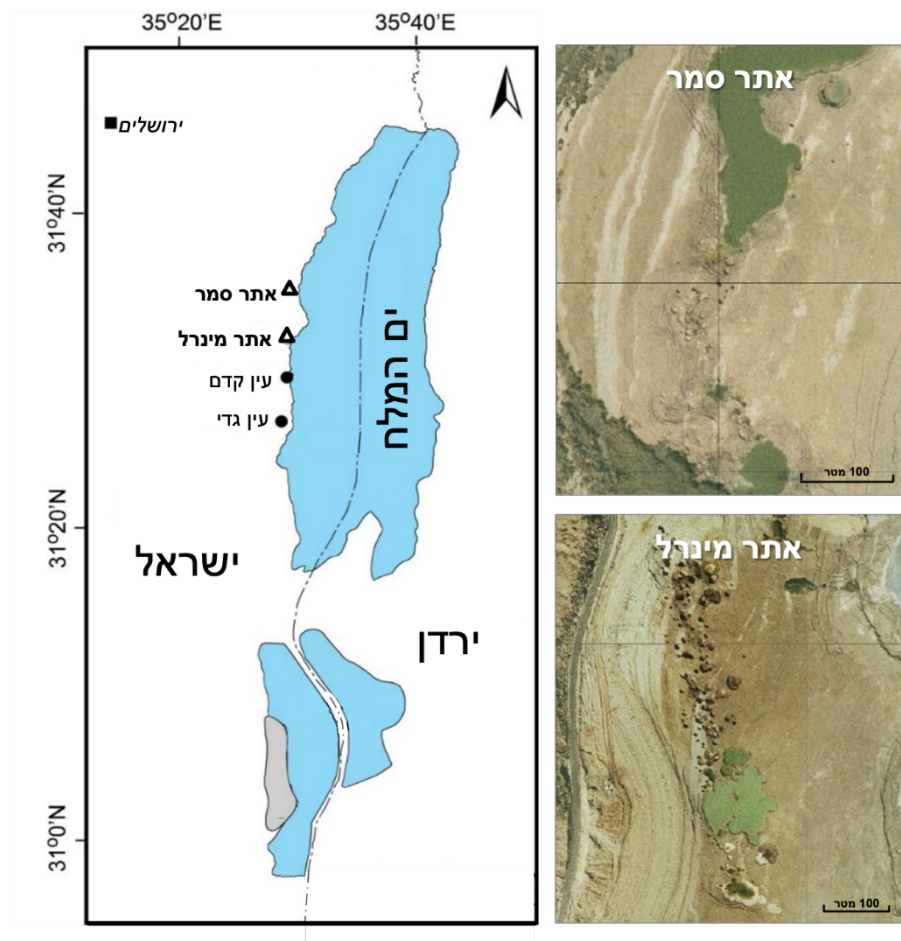
מספר לא מבוטל מן הבולענים מכילים מים מלוחים בשיעור הנע בין עשרות למאות גרם מלחים בליטר (ר' איור 2); משרעת צפיפותם היא 1.04-1.38 ק"ג/ליטר. מים מלוחים אלה, שהם מושא מאמרו, נקראים כאן "תמלחות הבולענים". קירותיהם של בולענים רבים מצופים במלחים שונים המופיעים מעל ומתחת למפלס המים שבבולען (איור 2). ציפויי מלח מופיעים גם בבולענים שהתייבשו.

השונות הגדולה במליחות הכוללת (total salinity) (סכום משקלי המלחים השונים המומסים בנפח או במשקל נתון של התמלחת או בקיצור TDS) וביחסים הכמותיים שבין המומסים בתמלחות של בולענים שונים (או אפילו בבולען מסוים בזמנים שונים) קשורה בהכרח למקור/ות המים ולתהליכים שמים אלה עברו.

להלן מספר דוגמאות להבהרת עניין זה:

התחום הרחב של המליחות עשוי לייצג תהליך ערבוב בין מי תהום מתוקים שמליחותם זניחה, עם מים של ים המלח. ככל שחלקם של המים המתוקים בתמלחת גדול יותר, תקטן מליחותה מבלי שישתנו היחסים הכמותיים שבין מומסיה. לעומת זאת, אם נחליף את מקור המים המתוקים שבדוגמה במי תהום

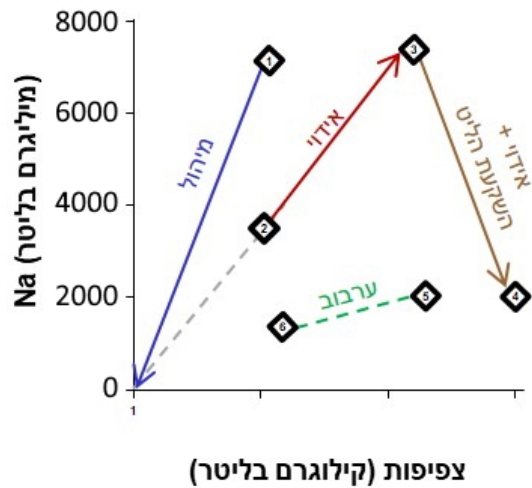
שמליחותם ו/או הרכבם הכימי שונים משמעותית מאלה של מי ים המלח, יחסי המרכיבים המומסים בתמיסה המעורבת יפלו אי שם בין אלה המאפיינים את שני המקורות שהתערבבו (איור 3). תהליך אחר וחשוב המשפיע על המליחות וההרכב הכימי של תמלחות הבולענים הוא האיזוי. בתהליך זה מאבדת התמלחת לאויר מים נטולי מלחים. לכאורה, תהליך זה הוא הופכי של התהליך הראשון שהוזכר לעיל (מיהול מי ים המלח ע"י מים מתוקים) אולם הוא נשאר כזה רק כל עוד עליית המליחות אינה גורמת להתגבשות מלח אחד או יותר, תהליך המוצג למשל בקרומי ההליט הלבנים על קירות הבולענים (איור 2). אם האיזוי מתמשך, יצטרפו לרצף ההתגבשות מספר מינרלים נוספים, קרנליט (Carnallite, $MgKCl_3 \cdot 6H_2O$) ובישופיט (Bischofite, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$) כל אחד בתורו. שלושה המינרלים שצוינו הם אלה החשובים לדיוננו, בעיקר מבחינה כמותית. תמלחות בעלות הרכב כימי שונה שתרוכזנה באיזוי (מי אוקינוס למשל) תצגנה סדרות התגבשות אחרות האופייניות לכל אחת מהן.



איור 1: אזור המחקר. אתר סמר ואתר מינרל הם שני אתרי הבולענים שנחקרו בעבודה הנוכחית.



איור 2. סדרת בולענים באתר סמר, מלאים בתמלחות ומצופים על ידי הליט (ולעיתים קרובות גם קרנליט) אשר התגבשו מהתמלחת בתהליך האיזוי.



איור 3. איור סכמתי המראה את ההבדל בין עקומות מיהול, ערבוב ואיזוי. המעווינים מציגים הרכבי מיים שונים. ראשית הצירים: מיים מתוקים. 1-ראשית הצירים: מיהול עם מיים מתוקים. 2-3: איזוי המלווה בעליה בצפיפות ובריכוז Na. 3: נקודת רוויה להליט. 3-4: איזוי מתקדם המתבטא בעליה בצפיפות ומלווה בהשקעת הליט הגורמת לירידה בריכוז Na. 5-6: ערבוב שני סוגי תמלחות.

השוואה וכיול ההרכב הכימי של תמלחות הבולענים לזה המתקבל באיזוד מי ים המלח ותמלחות אחרות הבולענים שנדגמו קרובים מאד לקו החוף של ים המלח (איור 1) והתמלחות שבהם דומות, בחלק מתכונותיהן הכימיות, לאלה של אגם זה. בכך אין די כדי להכריע האם איזוד או מיהול במים מתוקים של תמלחת ים המלח לבדם יכולים להסביר את הרכבן הכימי. ים המלח הוא תוצר של היסטוריה סביבתית רבת-שנים, שאינה מיוצגת דווקא ע"י תנאי הסביבה העכשווית. יתר על כן, נפח התמלחת בבולען, ולו הגדול ביותר, קטן לאין ערוך מנפחו של ים המלח ולכן תגובתו לשינויים סביבתיים (לחות יחסית, טמפרטורה, איזוד ומיהול) צפויה להיות גדולה ומהירה בהרבה מזו של האגם. כדי להשוות בין תגובתו

הכימית של ל ים המלח לזו של תמלחות הבולענים תחת התנאים השוררים כיום באתרים שנדגמו (איור 1) ביצענו על שפת ים המלח ניסויי איוד מבוקרים של תמלחת ים המלח מתוך מיכלים שהוצבו במרחק כמה עשרות מטרים משפת ים המלח. במקביל הורצה סידרת ניסיונות עם תמלחת מאחת הנביעות (עין קדם) כדי לברר האם איחוד תמלחת כזו היה עשוי להסביר טוב יותר את הרכב תמלחות הבולענים מאשר ים המלח. הריכוזים יחסים ספציפיים בין היסודות הכימיים השונים שנמדדו הוצבו בדיאגרמות ריכוז (ו/או יחסים בין ריכוזי יסודות מסוימים, איורים 5,6,8,9) כנגד צפיפות התמלחת, המשקפת מצידה את התקדמות האיוד.

מנגנון היוצרות הבולענים

חללי המסה מוכרים היטב ממכרות מלח במקומות שונים בעולם וגם בישראל (מערת ארובותיים בהר סדום, כדוגמה) אך נפוצים אף יותר גם בסלעים אחרים. מערת שורק בשמורת אבשלום וכמעט כל מערה אחרת בארץ נוצרה ע"י המסה כימית, במי גשם שחלחלו דרך סלעי דולומיט ו/או גיר. מבנה הנוף המחורר המתקבל נקרא "קרסט" (Karst) והתהליך בכללותו מכונה תהליך קרסטי, ויש לו חשיבות רבה ביצירת אקופרים למי תהום.

התפוצה הנרחבת של הבולענים מחייבת את קיומה של שכבת מלח בשטח הדומה (או אף גדול) לזה התפוס כיום ע"י בולענים. מי התהום ממיסים את שכבת המלח תוך יצירת חלל, שיכול להגיע לממדים גדולים לפני קריסת השכבות שמעליו ויצירת בולען בפני השטח. ואכן, בכל הקידוחים שנעשו בקרבת אתרי הבולענים נמצאה שכבת מלח קדומה שעובייה משתנה בין מספר עשרות סנטימטרים ועד ל-25 מטרים. עומקו של גג השכבה מצוי בין 19 ו-76 מטר מתחת לפני השטח. בחלק מן הקידוחים אף התגלו חללים בשכבת מלח זו. עובדות אלו מחזקות מאד את המסקנה שחללי המסה בשכבת המלח הם-הם הגורם הראשוני להופעת הבולענים.

מי ים המלח ושל תמלחות מלוחות מאד בתת הקרקע בסביבתו רוויים או כמעט רוויים ביחס להליט ואינם מסוגלים להמיס מינרל זה אלא אם נמהלו תחילה. מים מתוקים הגיעו ומגיעים לחופי ים המלח כנגר עילי וזרימה בתת הקרקע מרחבי אגן הניקוז שלו, כפי שמראות מניפות הסחף הנרחבות בפתחי הירדן והנחלים ומים מתוקים ומליחים הנובעים למלוא אורכו. השאלה מתעוררת, לפיכך היא האם וכיצד יכולים מי ים המלח להתערבב ולהימהל במים המתוקים לצורך יצירת החללים.

כאשר יורד מפלס המים באגם, נסוג בעקבותיו גם מישור המגע שבין המים המלוחים לבין המים המתוקים שבתת הקרקע, דבר המתרחש באקופר החופי של ים המלח מאז תחילת נסיגתו הנוכחית. עם נסיגת האגם נסוגה שכבת המגע בין מי התהום המתוקים ומי האגם כלפי מטה והגיעה לשכבת ההליט.

אזורי המחקר

המחקר התמקד באתרי הבולענים בסמר ובחוף מינרל (איור 1) ונערך בשנים 2006-2007. האתרים בסמר ובחוף מינרל נבחרו למחקר בשל ריבוי הבולענים שבהם, טווח המליחיות הרחב של המים שבתוכם, ומשקעי המלח השונים הנפוצים סביב הבולענים ועל קירותיהם, שאפשרו בדיקה של המינרלים המתגבשים מתמלחות הבולענים (איור 2).

דיון

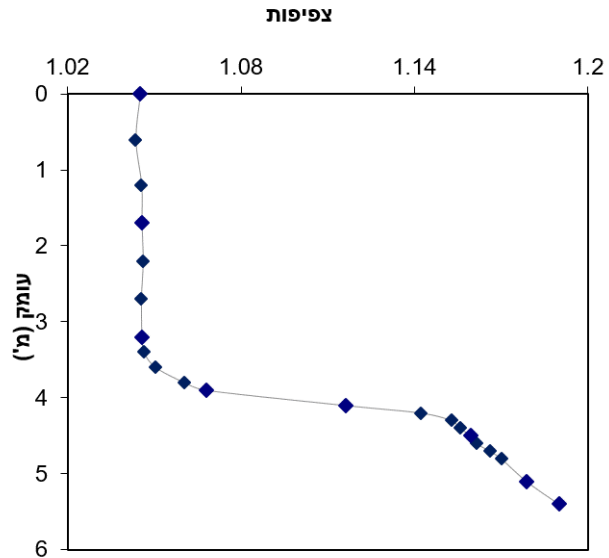
הדיון הבא מיועד לברר ולהשיב על השאלות העיקריות שהעלינו קודם, דהיינו:

- ✓ מקור ומהות המים והמלחים שהשתתפו ביצירתן של תמלחות הבולענים.
- ✓ מהות התהליכים שהביאו למגוון המליחיות וההרכבים הרחב של תמלחות אלה.
- ✓ מיקומן של פעילויות אלה.
- ✓ זמנן של התרחשויות אלה.

שאלות אלו נוגעות לכל תמלחות הבולענים בחוף ים המלח. תופעות ייחודיות לאתר מסייעות להבהיר השפעה מקומית (טופוגרפיות וגיאולוגיות בעיקרן) על התהליכים ועל הרכב התמלחות.

אתר סמר

הבולענים באתר סמר חולקו לשתי קבוצות עיקריות על פי הופעתם בשדה: בולענים בעלי ממדים קטנים (קוטר עד 5 מ') שבשוליהם וקרקעיתם משקעי מלח ובולענים גדולים ברוחב של עשרות ובאורך מאות מטרים, שנוצרו כתוצאה מהתחברות של מספר בולענים והמנקזים אליהם מי נביעה מתוקים. חלוקת הבולענים על פי הופעתם מתאימה גם להתפלגות צפיפות התמלחות שבהם: בקבוצה הראשונה נמצאו תמלחות עם צפיפויות בתחום 1.21-1.38 ק"ג לליטר ובקבוצה השנייה נמצאו מים בצפיפות נמוכה מ-1.21 ק"ג לליטר. בבולען אחד ("הבריכה", השייך לקבוצה השנייה) בוצע פרופיל עומק עד לקרקעיתו (בעומק 5.4 מ'). מתחת לעומק של כ-3.5 מטר (איור 4), נמצאה תמלחת שריכוזה גדל בהדרגה לעבר הקרקעית. מעל לעומק זה נמצאו מים מתוקים ה"צפים" על פני השכבה המלוחה במבנה משוכב.



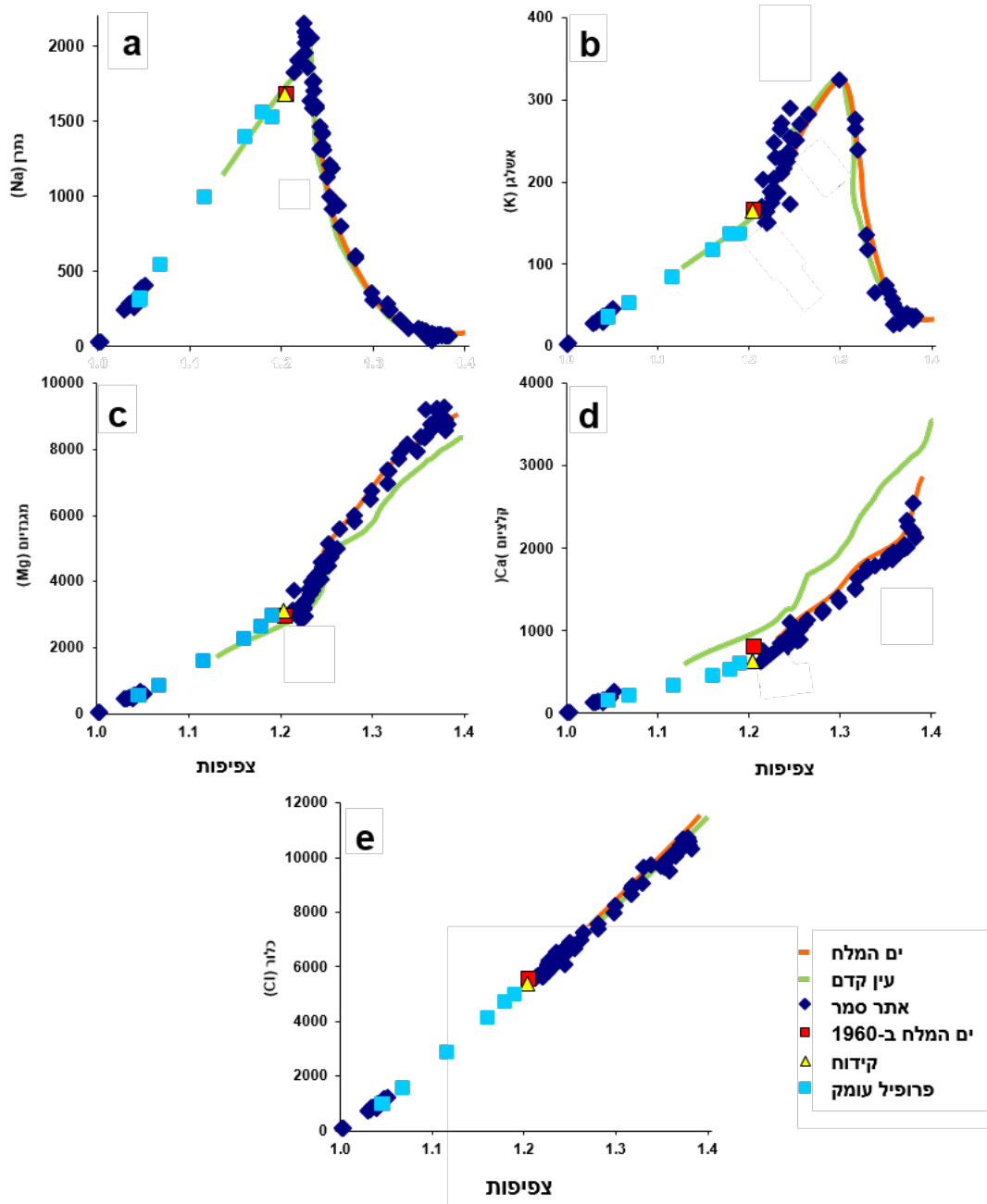
איור 4: פרופיל עומק-צפיפות בבריכה באתר סמר.

לבד ממקרה אחד של בולען שאליו מתנקזים במישרין מים מתוקים, הגבול התחתון של תחום הצפיפויות הנ"ל קרוב לצפיפות הנוכחית של ים המלח (1.24 ק"ג/ליטר בשנת 2006). מאידך, לא נמצאו בבולעני סמר תמלחות שצפיפותן נופלת בין זו של ים המלח לאלו הנפוצות לאורך החוף המערבי של אגם זה (1.13 ק"ג בליטר בעין קדם). מימצאים אלה תומכים בכך שהמרכיב המלוח בתמלחות בולעני סמר הם מי ים המלח, ולא מי הנביעות המלוחות. במסקנה זו, שהיא כוללנית למדי, תומכים גם שינויי ריכוזי המומסים העיקריים (major solutes) ביחס לצפיפות של התמלחות הנדונות. נתרן (Na), אשלגן (K), מגנזיום (Mg), קלציום (Ca) וכלור (Cl). מומסים אלו מוצגים באיור 5a-e בדיאגרמות ריכוזים כנגד צפיפויות התמלחות שנדגמו. לשם השוואה נכללו בדיאגרמות אלה גם התוצאות שהתקבלו מניסויי האיוד של מי ים המלח ומי עין קדם זילברמן-קרן (Zilberman et al., 2017; 2008) שנערכו על החוף הסמוך ממערב לבולענים.

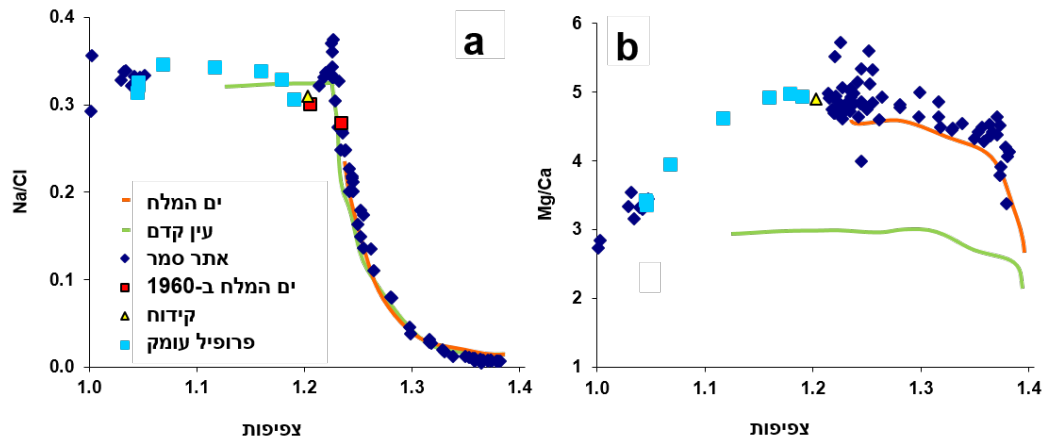
הדיאגרמות המוצגות באיור 5 מראות דמיון רב בין הקשרים שבין ריכוזי ה-Cl, K, Na לצפיפות בשני ניסויי האיוד; יתר על כן על הקווים המתוארים נופלים גם הריכוזים שנמצאו בתמלחות שבבולענים. במוסגר נוסף כאן כי גם ארבעה מומסי קורט (trace solutes), שאינם מוצגים באיור 5 (בריום (Ba), סטרונציום (Sr), ליתיום (Li), בריום (Br) מתנהגים באורח דומה. התנהגותם של שלושה מן המומסים הראשיים (Na, K, Cl) מראה כי המרכיב המלוח בתמלחות הבולענים מיוצג ע"י תמלחת ים המלח ו/או מי הנביעות המלוחות. יחסי Na/Cl בבולענים בסמר נופלים לאורך עקומות האיודי החופפות של מי ים המלח ומי עין קדם (איור 6a).

ההכרעה בין שתי האפשרויות של מקור תמלחות הבולענים בסמר ניתנת ע"י התנהגות המומסים Mg ו- Ca (איור 5 c,d). עקומות האיוד של Mg ו-Ca בים המלח (קו כתום) ובמי עין קדם (קו ירוק) המוצגות כאן שונות מאד זו מזו ומראות העדפה ברורה של קו האיוד של ים המלח ע"י תמלחות הבולענים. כך גם לגבי היחס Mg/Ca בבולענים העובר קרוב לקו ההתפתחות של ים המלח והרחק מקו האיוד של מי עין קדם (איור 6b).

לסיכום, נראה כי מי ים המלח הם המקור למי הבולענים באתר סמר. התמלחות שצפיפותן נמוכה מזו המתאימה להרכב שבו מי ים המלח רוויים להליט מסודרות לאורך קו האיוד ומעידות על כך שמליחותו של ים המלח שסיפק את התמלחת המלוחה לבולענים היתה צריכה להיות פחותה מזו של היום, ומתאימה לזמן שבו אגם זה עדיין לא הגיע לרוויה להליט. תמלחת זו חלחלה לתוך שכבות הסדימנטים דרך קרקעית האגם ונשמרה שם כמי חללים (המים השמורים בין גרגרי הסדימנט). הדבר מתאים גם לכך שאתר הבולענים בסמר היה שרוי עד שנת 1996 מתחת לפני ים המלח.



איור 5: הרכב המים בבולענים בסמר על גבי עקומות האיזוד שהתקבלו בניסויי האיזוד של מי ים המלח ומי עין קדם. ריכוזי המומסים מוצגים כנגד צפיפות התמלחת. באיור סומנו גם הרכבי מי ים המלח מהשכבה העליונה והתחתונה שנדגמו על ידי Neev and Emery (1967) בשנת 1960, במי הקידוח הרדוד שבוצע במסגרת העבודה באזור הבולענים, ובמי הבריכה באתר סמר.



איור 6: יחסי Na/Cl ו-Mg/Ca בבולענים בסמר ובעקומות האיוד שהתקבלו בניסויי האיוד של מי ים המלח ומי עין קדם. היחסים המולריים מוצגים כנגד צפיפות התמלחת. באיור סומנו גם הרכבי מי ים המלח מהשכבה העליונה והתחתונה שנדגמו בשנת 1960, מי הקידוח ומי הפרופיל בבריכה באתר סמר.

הרכב וגיל מי החללים - עדויות מקידוח רדוד סמוך לבולען

מים שנשאבו מקידוח רדוד שבוצע במסגרת מחקר זה בקרבת הבולענים באתר סמר, מסייעים להבנת הקשר בין תמלחת הבולענים לבין מי החללים המזינים אותם. ההנחה היא כי התמלחת המצטברת בקידוח דוגמת את מי החללים בתת הקרקע שבסביבת הבולענים, טרם תחילת התאיידותם מן הבולען עצמו, כאשר פניו חשופים לאטמוספירה.

הרכב מי הקידוח (משולש צהוב באיור 5) דומה מאוד להרכב הכימי הממוצע של גוף המים העליון של ים המלח בשנת 1960. לבד מסטייה קלה הקיימת בריכוז ה-Ca בין מי הקידוח ומי ים המלח של שנת 1960 (איור 6a) במי הקידוח קרוב מאוד לעקומת ההתפתחות של מי עין קדם, אולם זו חופפת בהמשכה לעקומה של ים המלח ולכן לא ניתן להשתמש ביחס זה כקריטריון לשיוך מי הקידוח לאחד משני הקווים. לעומת זאת היחס Mg/Ca במי הקידוח (איור 6b) דומה מאד ליחס במי ים המלח ותומך בכך שהאחרונים, ולא מי עין קדם, מהווים את המקור של תמלחות הבולענים בסמר.

אתר סמר נחשף לאוויר רק בשנת 1996. היה סביר כי מי ים המלח ששרדו בסדימנטים באזור יהיו בהרכב של מי ים המלח האחרונים שכיסו את האזור, כלומר מהמחצית הראשונה של שנות ה-90 לכל המאוחר. מאידך, הדמיון הרב בין הרכב מי הקידוח לזה של גוף המים העליון של ים המלח בתחילת שנות ה-60 מצביע על כך שמקור מי הקידוח הוא מי ים המלח הקודמים לשנות ה-90. היות שמי הקידוח הם תת-רויים ומי ים המלח הגיעו לרוויה ביחס להליט בתחילת שנות ה-80, חדירת מי ים המלח לתוך הסדימנטים

לא יכלה להיות מאוחרת ל-1980. להשתמרותה בסדימנטים של תמלחת זו במשך 40 שנה לפחות היא הקצב האיטי של שטיפת הסדימנטים החרסיתיים שבאתר.

השפעתם של מי נביעות מקומיות על ההרכב הכימי של תמלחות סמר

ההשפעה המקומית של נביעות על הרכבן הכימי של תמלחות הבולענים באה לידי ביטוי במידגמים שהתקבלו מחתך העומק (איור 4) של בולען הבריכה בסמר. כאן נראית בבירור זרימת המים לפני הבולען וזו מביאה לשיכוב הבריכה לחלק העליון (צפיפות סביב 1.03 ק"ג/ליטר) ולתחתון, שצפיפות מימיו עולה מערך זה עד לבסיס הדגימה של החתך. תמונה זו (איורים 5, 6) היא אופיינית לגופי מים משוכבים המוזנים בחלקם העליון מי מעיינות מתוקים וצפופים פחות מאלה הבונים את השכבה התחתונה שעליה הם צפים. מבנה זה יציב יותר ככל שההבדל בין צפיפויות השכבות גדול יותר. תופעת השיכוב נפוצה מאד בעולם במקווי מים ואגמים.

ניתן לפרש את חתך הצפיפות שבבריכה כזה בזרם המים המתוקים המגיע מפני השטח ומחלחל גם מתוך שוליה הרדודים של הבריכה, או במקור מים מלוחים שמקורו בעומק מסוים מתחת לקרקעית. היותו של מפל המליחות והטמפרטורה בשכבת המים התחתונה אלכסוני תומך בכך שחלק זה מייצג את שכבת הערבוב בין השכבה העליונה, ובין המים המלוחים המצויים מתחת לקרקעית הבולען.

כפי שנראה באיור 5a-e מתאימה צפיפות השכבה העליונה של המים בבריכה בסמר בקירוב רב לקו *מיהול* של מי ים המלח משנות ה-60 של המאה הקודמת עם מים מתוקים (שעליו נופלת גם הנקודה המייצגת את מדגם המים מן הקידוח הרדוד). יתר על כן, גם היחס Na/Cl במי הבריכה מתאים ליחס זה כפי שהיה קיים בשכבה העליונה של ים המלח באותן שנים רחוקות. תצפיות אלו מאפשרות להסיק שהרכב מי הבריכה נקבע ע"י ערבוב ומיהול בדרגות שונות של מי ים המלח שנכלאו בחללי הסדימנטים (כדוגמת מי הקידוח הרדוד), כאשר האגם עדיין כיסה את האזור, לבין מי מעיינות מתוקים שהחלו לחלחל לתת הקרקע מאז נסיגתו של הים וממשיכים בכך גם כיום.

בבולעני סמר לא נמצאים מים המצביעים על השתתפותם בהמסת שכבת המלח האחראית ליצירת החללים שקריסתם הביאה ליצירת הבולענים. היות שבמלח היחס $Na/Cl=1$, מים כאלה היו אמורים להציג יחס Na/Cl מזה שנמצא בתמלחות הבולענים (0.33 באתר סמר). מים כאלה (שהמסו מלח) נמצאים כנראה בעומק רב יותר, ברבדים בהם נמצאת שכבת המלח וסמוך אליה.

אתר מינרל

הרכב התמלחות שנדגמו מן הבולענים באתר מינרל דומה באופן כללי לזה שנצפה באתר סמר, אך עם הבדלים שיפורטו מטה. טווח צפיפויות מי הבולענים באתר מינרל נע בין 1.12-1.38 ק"ג בליטר כאשר הגבול התחתון קרוב מאוד לצפיפות מי עין קדם (1.13 ק"ג בליטר) והגבול העליון גבוה בהרבה מצפיפות ים המלח (~1.24 ק"ג בליטר) ודומה מאד לצפיפות המקסימלית שנמצאה באתר סמר. בסמיכות לאחד הבולענים נמצאה גם נביעה אשר התנקזה אליו מפני השטח (איור 7). ניתן להסביר את הרכב הכימי של מי הבולענים כאן ע"י שני מקורות: מי ים המלח ומים דומים בהרכבם למי עין קדם. ריכוזי המומסים Na, K, Cl, בבולעני אתר מינרל מסודרים לאורך קווי ההתפתחות החופפים של מי ים המלח ומי עין קדם (איורים 8a,b,e, בהתאמה). ריכוזי ה-Mg, Ca (איורים 8c,d, בהתאמה) נמצאים בחלקם על קו האיוד של מי ים המלח ובחלקם לאורך קו ההתפתחות של מי עין קדם או בין שני הקווים.

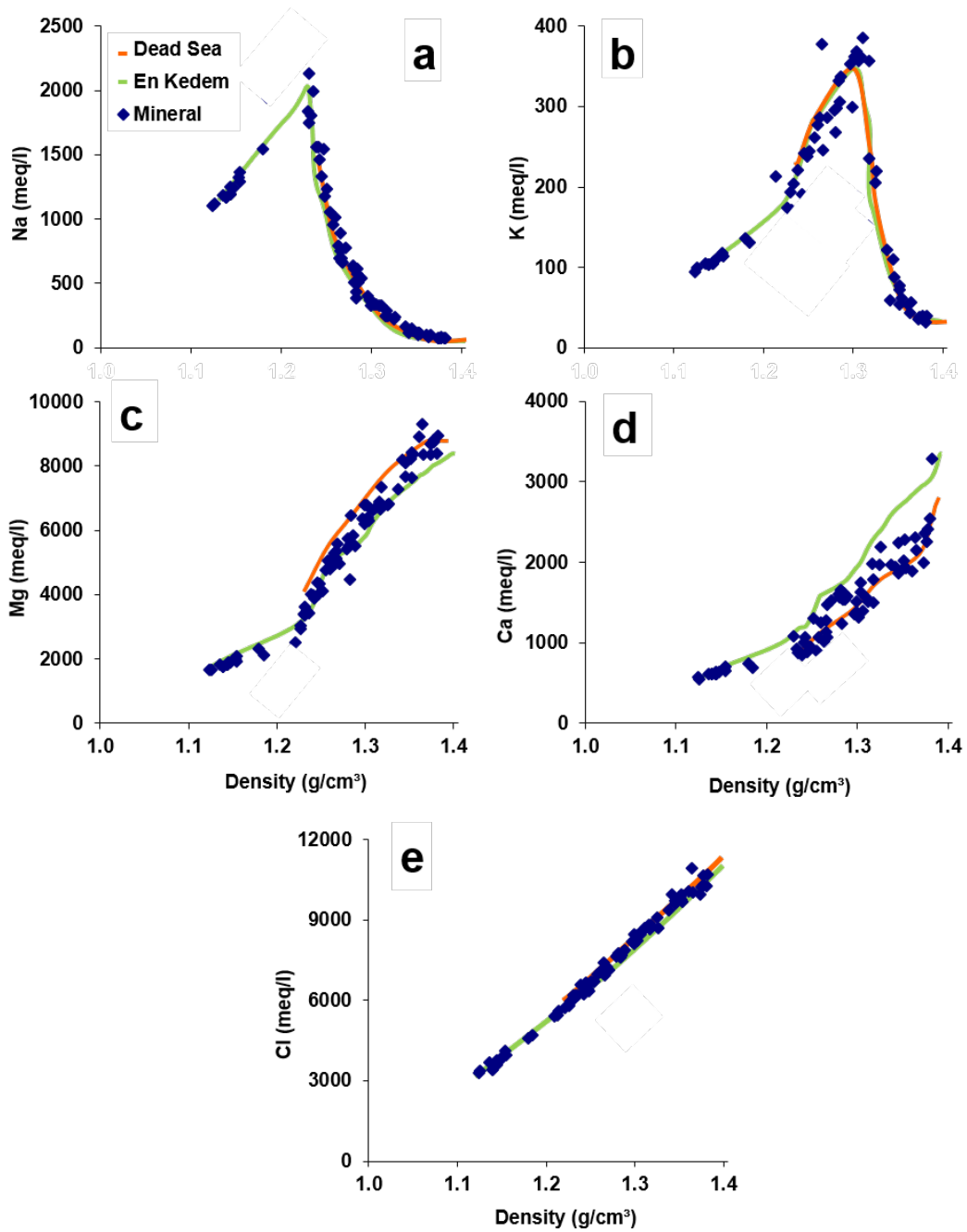


איור 7: נביעה הזורמת לתוך בולען באתר מינרל. הנביעה זורמת מן החלק התחתון של התמונה לכיוון הבולען בחלקה העליון. החצים מצביעים על כתמי העכירות הכהים באזור הערבוב בין מי הנביעה למי הבולען.

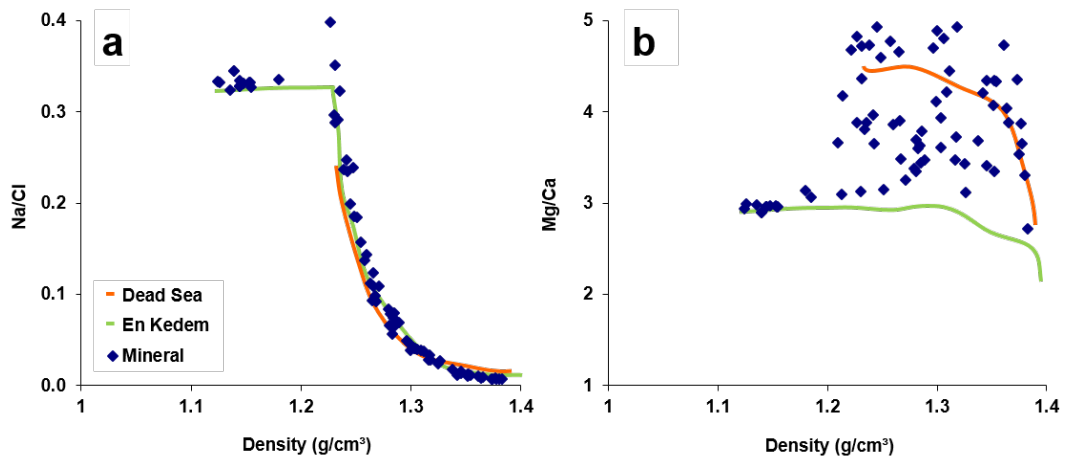
יחסי Na/Cl בבולענים (איור 9a) נופלים לאורך קווי ההתפתחות החופפים של עין קדם וים המלח ויחסי Mg/Ca (איור 9b) מכסים את כל התחום שבין קו האיוד של ים המלח וזה של מי עין קדם ואינם נופלים מתחת לגבול התחתון של תחום זה. בצפיפויות הנמוכות מ-1.21 ק"ג בליטר יחסי Mg/Ca בבולענים נופלים לאורך קו ההתפתחות של עין קדם בלבד.

באתר מינרל מצויות נביעות הדומות בהרכבן לנביעות של עין קדם. עם זאת, נמצאו בבולענים רבים תמלחות המתאימות לקו ההתפתחות של ים המלח. באיור 10 מוצגת חלוקה לקבוצות לפי הרכבן הכימי בצורה מרחבית על גבי מפת אתר מינרל. בבולענים המנקזים אליהם במישרין מי נביעה או הנמצאים בסמוך לה מתקבל יחס הדומה מאוד לזה של תמלחת עין קדם. בבולענים המרוחקים קצת יותר מן הנביעה מתקבלים יחסי ביניים בין זה של מי עין קדם לזה שבמי ים המלח. המסקנה ככל הנראה תמלחת ים המלח קיימת בתת הקרקע במרבית השטח של אתר מינרל ואילו מי הנביעה הם אלמנט מקומי המשפיע רק על בולענים קרובים, בחלקו הדרומי של האתר. תצפית זו מלמדת כי מי התהום הרדודים בסדימנטים הסובבים את הבולענים רוויים במי ים המלח ולא נשטפו על ידי מי הנביעה. קיומם של בולענים שהרכב התמלחת שבהם דומה להרכב מי עין קדם אינה מעידה בהכרח על היעדרם של מי ים המלח אלא על השפעתה המקומית החזקה יותר של נביעה קרובה.

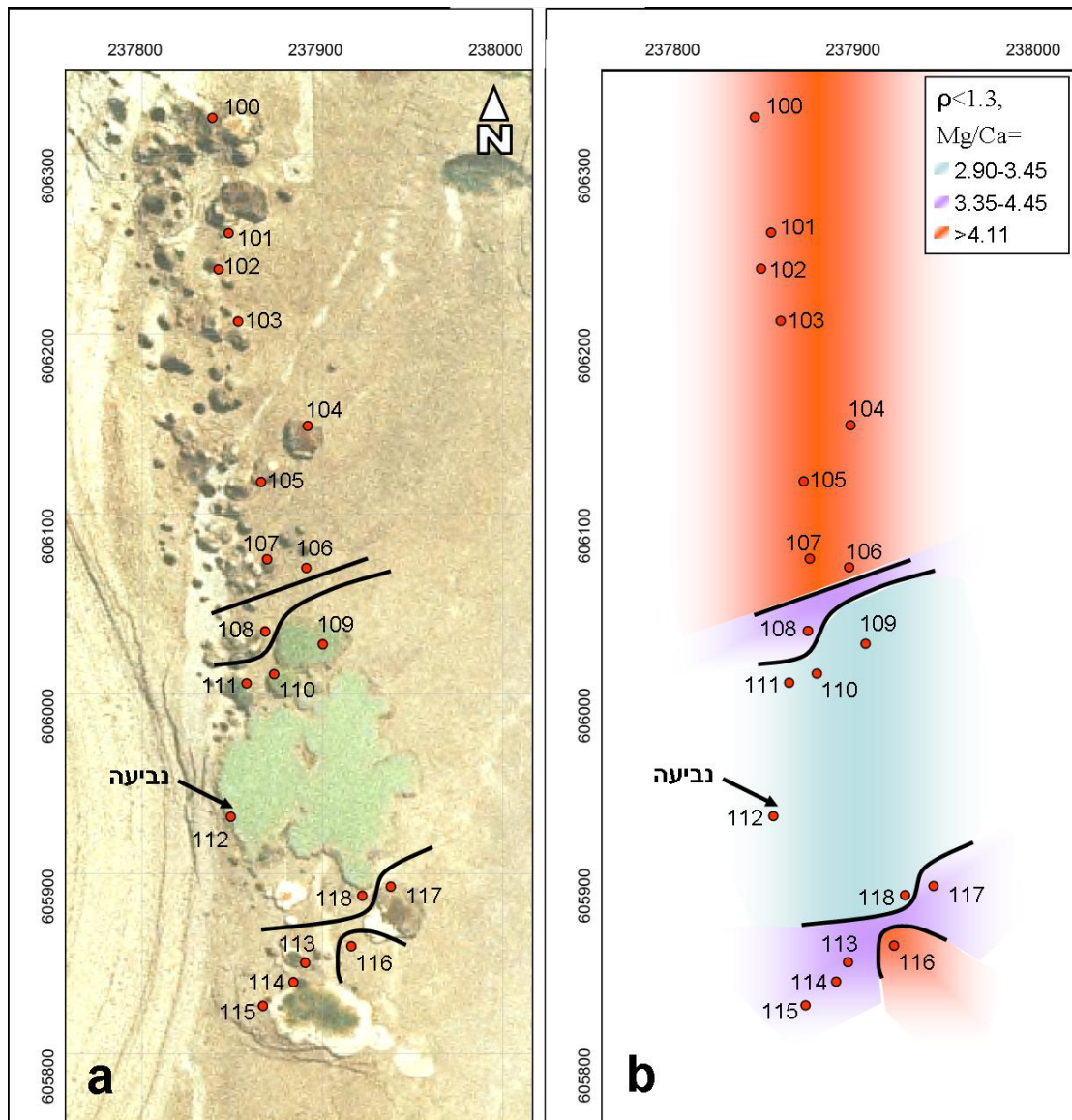
מודגש כי באף לא אחד מן הבולענים זוהתה תמלחת שניתן לייחס את הרכבה לזה שהיה מתקבל ממי עין קדם שהמסו הליט משכבת המלח שבעומק (יחס Mg/Ca נמוך ו-Na/Cl גבוה). כלומר, מי התהום שממסים את המלח ויוצרים חללים זורמים בתת אקוויפרים עמוקים יותר ואינם קשורים הידראולית לסדימנט הרדוד ביותר שהוא זה שתורם את מימיו לבולענים. למעשה, הבולענים יוצרים חלון לתת האקוויפר הרדוד ביותר בלבד. בקידוחים עמוקים יותר בחוף מינרל אכן נמצאו מים בעלי יחס Na/Cl גבוה יותר המלמד על המסת מלח.



איור 8: הרכב המים בבולענים באתר מינרל בהשוואה להרכבים המתקבלים בניסויי האיוד של מי ים המלח ומי עין קדם. ריכוזי המומסים מוצגים כנגד צפיפות התמלחת. מי הבולענים מסומנים בכחול, מי ים המלח בדרגות איוד שונות בכתום ומי עין קדם בדרגות איוד שונות בירוק.



איור 9: השוואה בין יחס Na/Cl ו-Mg/Ca בתמלחות הבולענים באתר מינרל לבין אלה שהתקבלו בניסויי האיוד של מי ים המלח ומי עין קדם. היחסים הם מולריים ומוצגים כנגד צפיפות התמלחת. מי הבולענים מסומנים בכחול, מי ים המלח בדרגות איוד שונות בכתום ומי עין קדם בדרגות איוד שונות בירוק.



איור 10: חלוקת ה**בולענים** באתר מינרל על פי היחס **Mg/Ca** ב**מי הבולענים**. (a) גבולות החלוקה מסומנים על רקע תצ"א של האתר, (b) סימון האזורים בצבעים ללא רקע. בחלוקה לא נכללו דוגמאות שצפיפותן גבוהה מ-1.3 ק"ג בליטר משום שאלו מושפעות מגיבוש קרנליט ובישופיט המוריד את היחס **Mg/Ca**. כל בולען נדגם מספר פעמים ולכן קיימת חפיפה חלקית בין הטווחים של ערכי **Mg/Ca** של האזורים השונים. נקודה אדומה ולצידה מספר בין 100-115 מציינת בולען ומספרו הסיידורי שנדגם במחקר.

סיכום ומסקנות

1. אנליזות כימיות של מים שהתקבלו בניסויי האיוד של שני סוגי המים הנפוצים באזור (מי ים המלח ומי נביעות הדומים לאלה שבעין קדם) מראות שניתן לקבל את טווח ההרכבים הכימיים במי הבולענים באתרים סמר ומינרל בעיקר על ידי איוד של מי ים המלח שכיסו את האזור בעבר.
2. התמלחות הממלאות את הבולענים בשני אתרים אלו הינן בהרכב כימי שונה מבולען לבולען והן מייצגות רמות איוד שונות והשקעת מינרלים שונים, הבאות לידי ביטוי הן במליחות הכללית והן ביחסי מומסים מסוימים.
3. הרכב התמלחות בבולענים ובקידוח שנעשה באתר סמר מראים שהסדימנטים שבתוכם התפתחו הבולענים רוויים בתמלחת ים המלח. חריגים מכללים אלו ניתנים להסבר על ידי תרומה מקומית, כפי שנמצא באתר מינרל.
4. על סמך אנליזות כימיות של מי ים המלח מתקופות קודמות, דרגת הרוויה של תמלחת זו ביחס להליט וההיסטוריה של המפלסים של ים המלח, ניתן לקבוע כי הזמן שבו חדרו מי ים המלח לסדימנטים באתרי סמר ומינרל הוא לכל המאוחר בשנת 1980, טרם תחילת שקיעת ההליט בים המלח המודרני.
5. לא נמצאה בתמלחות הבולענים כל עדות לנוכחות מי תהום שהמסו את שכבת המלח המצויה בעומק והאחראית להתפתחותם של הבולענים.

נספחים:

- א. **מפלס מי תהום:** גובה פני המים באקוויפר מי התהום.
- ב. **תמיסה רוויה ביחס למינרל:** תמיסה בה מומס מינרל מסוים ולא ניתן להמיס בה עוד ממינרל זה. כל הוספה של מינרל זה לתמיסה רוויה תוביל לשקיעתו לקרקעית ללא המסתו.
- ג. **אגם משוכב:** אגם בו עמודת המים מתחלקת לשכבות שונות בעלות מאפיינים פיזיקליים וכימיים שונים (טמפרטורה, הרכב כימי) כאשר צפיפות המים העליונים נמוכה מאלו של המים מתחת. לדוגמא, אגם בו שכבה חמה הצפה מעל שכבה קרה יותר.
- ד. מליחות, מליחות כוללת, ((total dissolved salts, TDS): סך המלחים המומסים בתמיסה מסוימת.

מקורות

זילברמן-קרן ת. (2008) המקור וההתפתחות הגיאוכימית של תמלחות הבולענים בחוף המערבי של ים המלח. עבודת מאסטר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

Zilberman T., Gavrieli I., Yechieli Y., Gertman I., Katz A. (2017) Constraints on evaporation and dilution of terminal, hypersaline lakes under negative water balance: The Dead Sea, Israel. *Geochim. Cosmochim. Acta* 217, 384-398.