

סודות המים הכלואים מתחת לקרקעית ים המלח העמוק

*אילן לוי

מי שהרטיב את ידיו במי ים המלח מבין שמדובר במים מיוחדים. זוהי תמיסה מלוחה מאוד וצפופה, המאפשרת ציפה. חפצים שנדחפים בכוח אל תוך מי האגם עולים אל פני המים, או, אם עובר מספיק זמן, עוטים ציפוי מרשים של גבישים לבנים. מדוע לטרוח ולהתנגד לטבעם של המים ולחדור ולחקור את מעמקי האגם? יש סודות בים המלח העמוק, והם חבויים בקרקעיתו.



קרקעית האגם מורכבת מסדימנטים של חרסיות וקרבונוטים שמקורם באבק, או מגבישים של ארגוניט, גבס ומלח, השוקעים כימית ומצטברים עם הזמן. למשל, בנחל פרצים תבחינו במשקעי אגמים עתיקים כאלה, החושפים שכבות אופקיות בעובי מילימטר עד סנטימטר, שנערמות לגובה בצבעים כהים ובהירים לסירוגין (איור 1). אם נשווה זאת לספר ענק, כל שכבה היא עמוד שמספר את סיפורו של האגם בתקופה מסוימת בעבר הרחוק. החומר המוצק המרכיב את השכבות הללו מקביל להירוגליפים, כלומר למילים כתובות שאינן בהכרח מובנות מראש, ותפקידו של החוקר בתחום המומחיות שלו הוא לשחזר את הסיפור הכתוב הרלוונטי לתחמו.

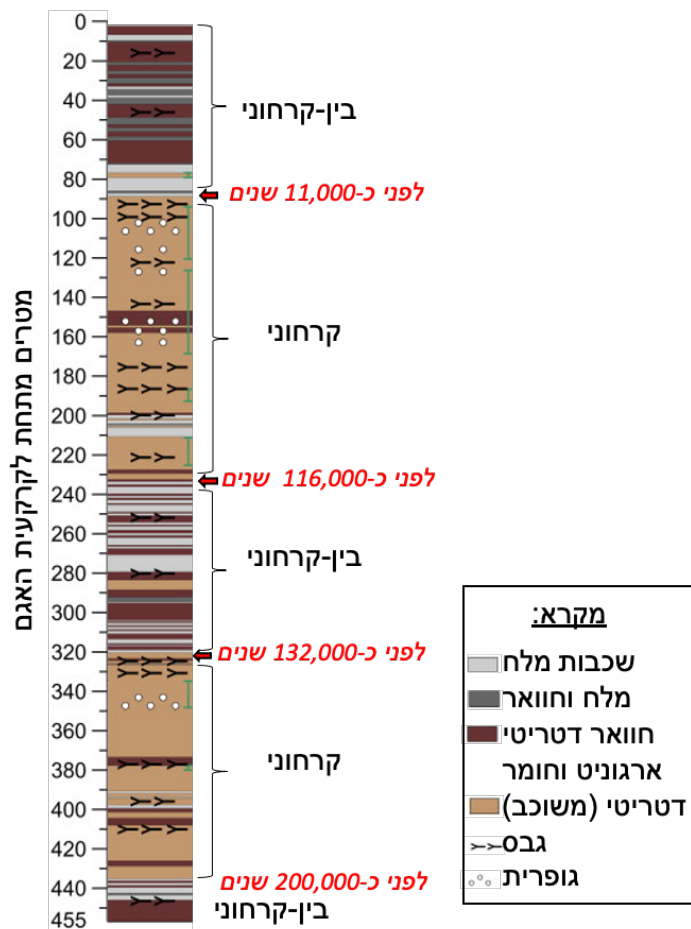
איור 1. חתך סדימנטים בנחל פרצים. צילום: אילן לוי.

* המאמר הוא פרק מעבודת הדוקטור של אילן לוי באוניברסיטת בן-גוריון בנגב בהנחיית אורית סיון, יוסי יחיאלי ואיתי גבריאלי.

הסדימנטים בנחל פרצים מספקים את ההיסטוריה הסביבתית של ים המלח בתקופה שמפלסי האגם היו גבוהים בעשרות מטרים מהיום. פרקי הספר שמתאימים לתקופות שמפלסי האגם היו נמוכים בהשוואה להיום – חסרים. כדי לקבל תיעוד רציף יותר אין להסתכל על שולי האגם, אלא על הסדימנטים שבקרקעיתו. במהלך השנים 2010 ו-2011 קדח צוות בראשות מדענים מתחום מדעי כדור הארץ מאוניברסיטאות וממוסדות מחקר בישראל יחד עם חוקרים מומחים מאמריקה, מאירופה ומאסיה, במסגרת תוכנית הקידוח המדעי היבשתי הבין-לאומית (International Continental Scientific Drilling Program – ICDP), קדחו וחילצו גלענים של סדימנטים באורך של כ-450 מטר ממרכז האגם, כ-300 מטר מתחת לעמודת המים. על פי תארוך של הסדימנטים נמצא כי הם מייצגים פרק זמן באורך של כ-220,000 שנים, והם משלימים את הפרקים החסרים של "רומן ים המלח". במאמר הנוכחי אני מספר סיפור, שהוא חלק ממחקר הדוקטורט שלי, המתאר את השתנות ההרכב הכימי של מי האגם לאורך תקופה של 220,000 שנים, כפי שסופר על ידי המים שנכלאו בין חלקיקי הסדימנטים (מי החללים או לחילופין מי הנקבובים) בגלעין העמוק של ים המלח (Levy et al., 2017; Levy et al., 2018; Levy et al., 2019).

חתך תת-הקרקע במרכז האגם

ניתן לחלק את תת-הקרקע של ים המלח, כפי שנחשפה מבדיקת הגלעין העמוק, לשני חלקים: המוצק (סדימנטים), לרוב כ-50% עד 75% מהנפח, והנוזל (מי חללים) שממלא את שאר הנפח. סדימנטים הם באופן טבעי המוקד העיקרי של מחקרים מדעיים הקשורים לקידוחים עמוקים. הסדימנטים של ים המלח, המתפרסים על כ-450 מטר, הציגו לראשונה תיעוד מתמשך של השקעה הקשורה לשינויי האקלים באזור. ניתן לחלק את הסדימנטים של הגלעין לפי נוכחות שכבות מלח בהם: עומקים המכילים שכבות מלח ועומקים שאין בהם מלח. בחלוקה גסה זאת הגלעין מתחלק לחמש יחידות: שלוש המכילות שכבות מלח רבות בעומקים 0–90 מטר, 230–320 מטר, ו-440–450 מטר, ושתיים שהן למעשה לרוב חסרות שכבות מלח (איור 2). יחידות המלח הצטברו במרכז האגם, כאשר מפלס המים היה נמוך יחסית, והתמלחת הייתה מרוכזת. ההופעה לסירוגין של יחידות המלח מצביעה על מחזוריות בשינויי האקלים האזורי בטווחי זמן של עשרות אלפי שנים. על פי תארוך הסדימנטים של הקידוח נמצא שקיימת התאמה בין יחידות המלח לתקופות חמות בעולם, בין-קרחוניות, לעומת היחידות הדלות במלח, המייצגות תקופות קרות בעולם, קרחוניות. לשם השוואה, הסדימנטים שנמצאים בפאתי ים המלח בנחל פרצים, הגבוהים בעשרות מטרים מהאגם כיום, שקעו בתקופת הקרח האחרונה, והם כמובן לא מכילים שכבות מלח.



איור 2. חתך עמודי המציג את הסדימנטים העיקריים בגלעין העמוק. הקשר בין יחידות המלח לתקופות הקרחוניות והבין-קרחוניות מוצג.

המרכיבים העיקריים של התמלחת

לפני שבוחנים כיצד השתנה ההרכב הכימי של מי האגם במשך עשרות אלפי שנים, חיוני שתהיה הבנה בסיסית של ההרכב הכימי של ים המלח היום. כמו כל גוף מים טבעי, מי ים המלח מורכבים בעיקר ממימן ומחמצן, אך גם מכילים כמויות משמעותיות של מרכיבים אחרים (מומסים) שאינם נראים לעין ויוצרים תמיסה עם מליחות, צפיפות וצמיגיות גבוהות מאוד. אידוי ליטר אחד של מי ים המלח ישאיר כשליש קילו של מינרלים מסוגים שונים. ששת המומסים העיקריים במי ים המלח לפי ריכוזם הם כלוריד (Cl), מגנזיום (Mg), נתרן (Na), סידן (Ca^{2+}), אשלגן (K) וברומיד (Br). הריכוזים נתונים ביחידות גרם לליטר תמיסה בטבלה 1.

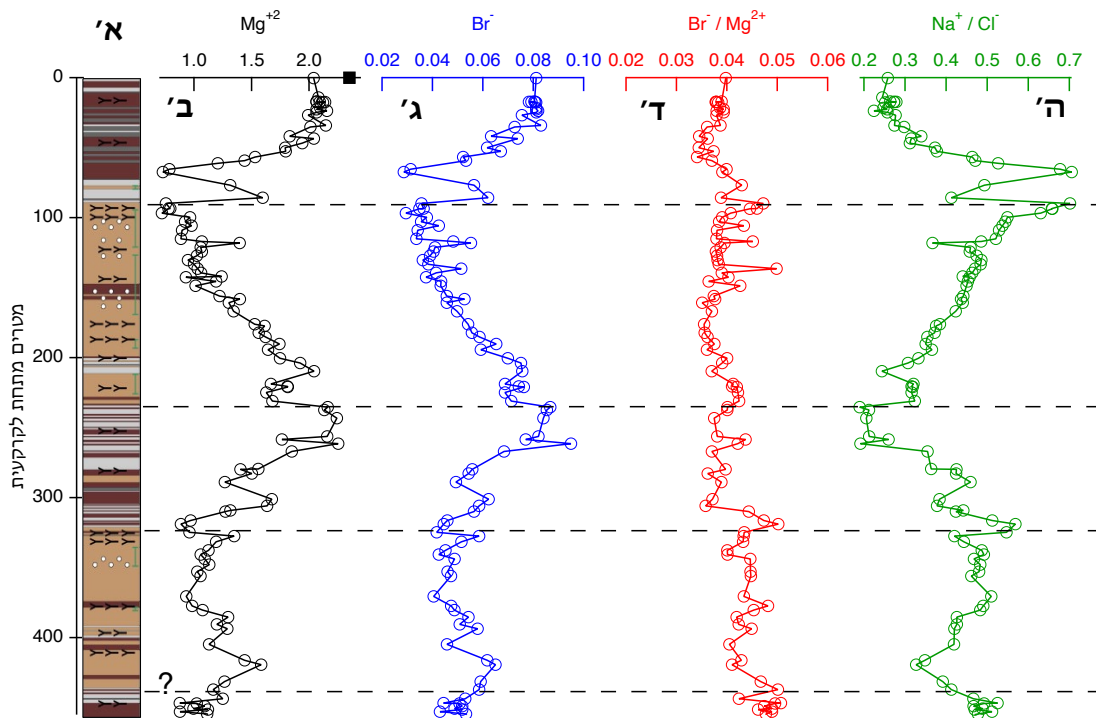
מי ים המלח נמצאים כיום ברוויה לגבי מינרלים אחדים. שינויים קטנים בתהליכים פיזיקליים, כמו אידוי ושינוי טמפרטורה, יגרמו להם לשקוע. הסדימנט העיקרי כיום הוא נתרן כלוריד (NaCl), המוכר כמלח שולחן, וידוע בקהילת הגיאולוגים כמינרל הליט. שני הסדימנטים העיקריים האחרים הם סידן פחמתי (CaCO_3) וסידן סולפט דיהידרט ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), המכונים ארגוניט (וקלציט) וגבס, בהתאמה. ניתן להגדיר את המומסים Br-I Mg כמומסים שמרניים (קונסרבטיביים), והם ממלאים תפקיד חשוב בשחזור ובהבנה של תהליך התפתחות התמלחת במי החללים.

שימור מי החללים

מי חללים הם מים שנלכדים במהלך הצטברות סדימנטים בין החלקיקים הנערמים על הקרקעית. שאלה חשובה שיש לשאול היא: האם ניתן להניח שמי החללים ישקפו באופן מדויק את השינויים הכימיים ההיסטוריים באגם העמוק?

במחקרים קודמים שנעשו על מי החללים שמקורם בסדימנטים באוקיינוסים השונים, מתבררת תמונה אחידה: ככל שמעמיקים, ההבדלים בריכוזם של המרכיבים הקונסרבטיביים קטנים. הסיבות לכך הן תהליכים פיזיקליים המשנים את הרכבם של מי החללים בתת-הקרקע, כגון הסעה (אדוקציה) ודיפוזיה. לעומת זאת, הפרופילים של ריכוזי Br-I Mg בים המלח (איור 3 ו-3ג), מציגים שינויים גדולים לאורך הגלעין כולו, ולכן עולה השאלה: האם ניתן להניח מראש שלא חלו תהליכי הסעה ודיפוזיה? התשובה היא לא. עם זאת, ניתן להעריך את השינויים בריכוזים של היונים הקונסרבטיביים שהתרחשו במהלך תהליכי ההסעה והדיפוזיה בתת-הקרקע על ידי: א. מודל של ההובלה התת-קרקעית של מומסים במי החללים; ב. השוואת ההרכב הכימי של מי החללים לסמנים מקבילים בסדימנטים המוצקים (מינרלים) המייצגים את הכימיה של האגם. במחקר זה השתמשנו בשתי השיטות כדי לבדוק אם התרחשו תהליכי הסעה ודיפוזיה בסדימנט. התוצאות מהמודל והשוואה לסמנים אפשרו לנו להעריך כי היו שינויים מזעריים בריכוז המומסים הקונסרבטיביים בתת-הקרקע. לכן, ניתן להניח שריכוזי ה-Mg וה-Br מייצגים בצורה טובה את ריכוזם המקורי באגם העמוק בטווחי זמן של עשרות אלפי שנה.

בעומקים שיש בהם שכבות מלח, 0–90 מטר, 230–320 מטר ו-440–450 מטר, ישנה שונות גדולה יחסית בריכוזים של היונים הקונסרבטיביים. התנאים הייחודיים של ים המלח, כגון שכבות המלח האטומות, מי החללים בעלי הצמיגיות הגבוהה והיעדר בעלי חיים בקרקעית האגם, יצרו סביבה כמעט מושלמת לשמירה על ריכוזם של המומסים הקונסרבטיביים במי החללים לאורך זמן.

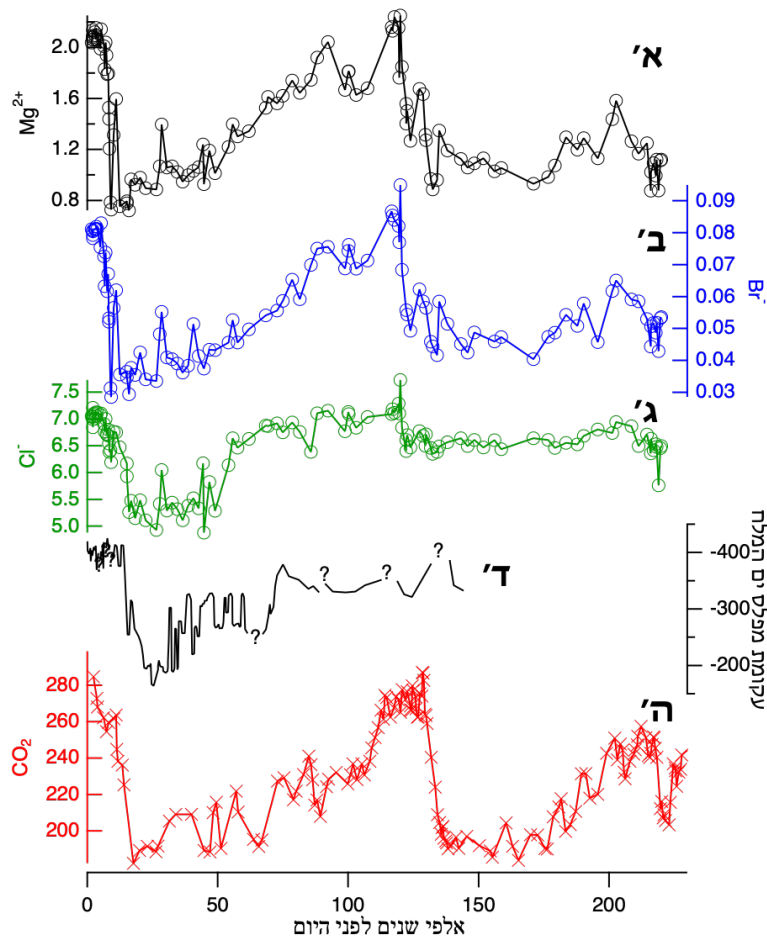


איור 3. השתנות ריכוזי מומסים נבחרים במי החללים מהקידוח העמוק. כל הריכוזים נתונים ביחידות (mol/Kg_{H2O}).
 א. הסדימנטים העיקריים בגלעין העמוק. ב. השתנות ריכוזי המגנזיום (Mg);
 ג. השתנות ריכוזי הברום (Br); ד. היחס Br/Mg; ה. היחס Na/Cl.

מה מלמדים אותנו מי החללים

הריכוזים של המומסים הקונסרבטיביים במי החללים הם מדידה ישירה של המים בקרקעית האגם הקדום. באיור 3 רואים שבתקופות הבין-קרחוניות (העומקים שיש בהם שכבות מלח באיור 2) ריכוזי ה-Mg וה-Br עולים, והיחס Cl/Na יורד (איור 3ה). התנהגות זו מתאימה לתהליך של אידוי הגורם לשקיעת מלח, שאכן מצוי בעומקים הללו. מכאן, רואים שמי החללים והסדימנטים מספקים עדויות משלימות לעומת זאת, בממצאים הרלוונטיים לתקופות הקרח לא נמצאו שכבות מלח. ריכוזי היונים הקונסרבטיביים נמוכים יותר, והיחס Cl/Na במי החללים עולה, דבר המעיד על המסת המלח. מכיוון שהיחס Mg/Br נשמר בגלעין (איור 3ד), ריכוזי ה-Mg וה-Br יכולים לשמש להערכה כמותית לקצב ולדרגת המיהול והאידוי של האגם בעבר (איור 4א ו-4ב). ים המלח הוא אגם הממוקם באגן ניקוז סגור, ולכן, ניתן לפרש את השינויים בדרגת המיהול והאידוי כמדד לכמויות הכוללות של המים שנכנסים לאגם פחות המים שיוצאים בשל האידוי (מאזן מים). מדד נוסף למיהול ולאידוי הוא עקומת המפלסים של ים המלח (איור 4ד). אף על פי שעקומת המפלסים של ים המלח אינה רציפה ומייצגת פחות זמן, היא מספקת תיאור לתנודות במים עיליים ולפעילות האקלימית בטווחי זמן קצרים יותר (אלפי ומאות שנים).

לעומת זאת, המומסים הקונסרבטיביים במי החללים מדגישים שינויים ארוכי טווח, כי הם מייצגים את האגם העמוק, ואולי הושפעו מהדיפוזיה התת-קרקעית. ישנן אי-התאמות בין הריכוזים הקונסרבטיביים במי החללים לבין מפלסי האגם. למשל, על פי עקומת המפלסים, המיהול המרבי של האגם ניכר במהלך תקופת הקרח האחרונה (לפני כ-20,000 שנה), בעוד המומסים הקונסרבטיביים במי החללים ממשיכים לרדת ומציגים מיהול מרבי עד לתקופת ה-Younger Dryas (כ-11,000 שנה). אחת הסיבות האפשריות לסתירה זו היא הנטייה של מי החללים לתעד שינויים בעומק האגם שבאים אחרי השינויים במים עיליים. כאשר משווים את סדרות הזמן של המומסים הקונסרבטיביים לסמנים שונים של האקלים העולמי, כמו ריכוזים של גז החממה פחמן דו-חמצני בגלעיני קרח באנטארקטיקה (איור 4ה), מסתבר שהרכב מים המלח משתנה בהתאם לאקלים העולמי בתקופות קרחוניות ובין-קרחוניות.



איור 4. השתנות ריכוזי מומסים נבחרים מהקידוח העמוק לאורך הזמן.

א. ריכוזי המגנזיום (Mg); ב. ריכוזי הברומיד (Br); ג. ריכוזי הכלוריד (Cl); ה. ריכוזים בסעיפים א-ג נתונים ביחידות mol/Kg_{H2O}. ד. עקומת מפלס ים המלח. תקופות ששחזור העקומה חסר בהן מסומנות בסימני שאלה; ה. ריכוזי הפחמן הדו-חמצני (CO₂) מגלעיני קרח בווסטוק באנטארקטיקה (ביחידות ppm).

האם ריכוזי כלוריד יכולים לשמש סמן גיאוכימי לשינויים במאזן המים באגם?

הליט (NaCl) הוא מינרל המורכב מריכוזים שווים של Na ו-Cl. במי החללים היחס Na/Cl קטן מ-1, ולכן כאשר מלח שוקע, היחס בתמלחת יורד. עדות לכך ש-Cl סולק מתמלחת של ים המלח בעבר מוצאים במי החללים בשכבות מלח ומהתקופות הבין-קרחוניות. ריכוזי ה-Mg וה-Br באותן שכבות עולים באופן משמעותי בגלל האידוי באגם. מגמה הפוכה נצפית בעומקים שאינם מכילים מלח: ישנה ירידה בריכוזי Br-Mg ועלייה של היחס Na/Cl. עדויות אלו מצביעות על תהליך של המסה של מלח בעקבות מיהול התמלחת. בתקופת הקרח האחרונה, למשל, ירדו ריכוזי ה-Cl, אם כי לא באותה מידה כמו אלה של ה-Br-Mg, ולכן לא ניתן להתייחס ל-Cl כסמן גיאוכימי לשינויים במאזן המים באגם הקדום.

סיכום

- מי החללים הם מייצגים ישירים של מי ים המלח העמוק הקדום.
- תנאי תת-הקרקע הקטינו את השפעתם של תהליכי השינוי האפשריים, כמו הסעה ודיפוזיה, וכך אפשרו את שימור הרכבם של היונים הקונסרבטיביים.
- בעזרת היונים הקונסרבטיביים ניתן לשחזר את השינויים במאזן המים שחלו באגם העמוק בצורה כמותית ומדויקת.
- Cl⁻ אינו קונסרבטיבי ומושפע לא רק מתהליכי מיהול ואידוי, אלא גם משקיעה ומהמסה של מלח. עם זאת ניתן להשתמש בו ככלי לשחזור שינויי המליחות באגם.

שם	סמל כימי ומטען	ריכוז
כלוריד	Cl ⁻	223.7
מגנזיום	Mg ²⁺	51.1
נתרן	Na ⁺	33.6
סידן	Ca ²⁺	18.6
אשלגן	K ⁺	7.9
ברומיד	Br ⁻	5.7

טבלה 1. ההרכב הכימי של מי ים המלח.

החומרים מסודרים לפי ריכוזיהם (משנת 2013) ביחידות גרם לליטר.

נספחים:

- א. **יסוד קונסרבטיבי (שמרני)** – במאמר זה הכוונה ליון בעל העדפה להישארות במצב מומס במי ים המלח, ושאינו משתתף בריאקציות כימיות (כמו למשל שקיעה כמינרל, השתתפות בתהליכים מיקרוביאליים, או אינטראקציה עם סדימנטים אחרים). ריכוזו משתנה בהתאם לאידוי או למיהול של המים.
- ב. **הסעה (אדווקציה)** – הכוונה להעברת מומסים על ידי זרימת הנוזל בתת-הקרקע.
- ג. **דיפוזיה** – הכוונה לפיזור של המומסים במורד מפל ריכוזים, מאזור עם ריכוז מומסים גבוה לאזור שריכוז המומסים בו נמוך.
- ד. **מול בקילוגרם מים ($\text{mol}/\text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}}$)** – יחידות המתארות את ריכוזם של מומסים במים, וקשורות לכמות המומס במולקולות (ולא למשקל כמו גרם) יחסית למשקל המים (ולא לנפח הנוזל כמו ליטר). יחידות אלו נפוצות בשימוש אצל גיאוכימאים.
- ה. **סמן גיאוכימי** – מוגדר כמאפיין כימי השמור (לרוב) במינרלים ויכול להצביע על תכונות של הסביבה בעבר. תכונות נפוצות הן טמפרטורות, הרכב כימי (ריכוזים אבסולוטיים או יחסיים, רמת חומציות), לחצים וכן הלאה. מדידת סמנים מחליפה מדידה ישירה.

מקורות

Levy EJ, Stein M, Lazar B, Gavrieli I, Yechieli Y, and Sivan O. 2017. Pore fluids in Dead Sea sediment core reveal linear response of lake chemistry to global climate changes. *Geology* **45**(4): 315–318.

Levy EJ, Yechieli Y, Gavrieli I, Lazar B, Kiro Y, Stein M, and Sivan O. 2018. Salt precipitation and dissolution in the late Quaternary Dead Sea: Evidence from chemical and $\delta^{37}\text{Cl}$ composition of pore fluids and halites. *Earth and Planetary Science Letters* **487**: 127–137.

Levy EJ, Sivan O, Antler G, Lazar B, Stein M, Yechieli Y, and Gavrieli I. 2019. Mount Sedom salt diapir – Source for sulfate replenishment and gypsum supersaturation in the last glacial Dead Sea (Lake Lisan). *Quaternary Science Reviews* **221**: 105871.