

לזכרה של ד"ר אלין ארליך (1991-1928)
חוקרת האצות הצורניות בתצורת ליסאן

איך אפשר לאמוד את מליחות המים באגם שהתאדה מזמן

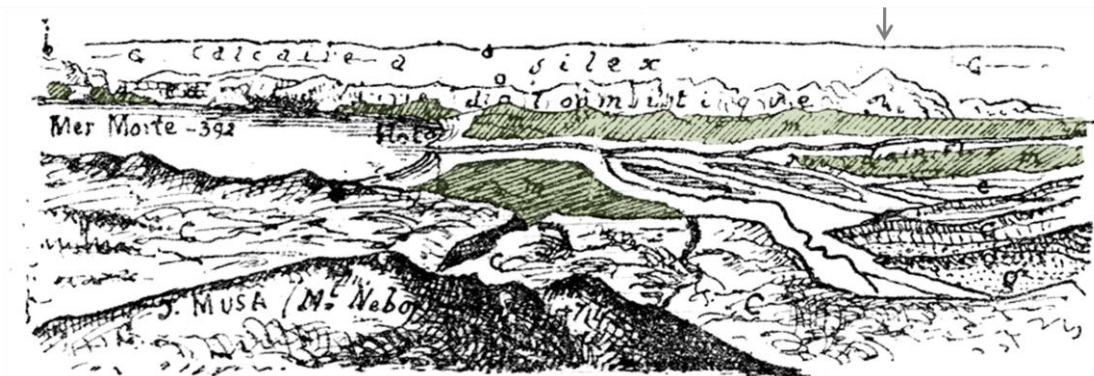
זאב ב' בגין

מבוא

ב-1863 יצא הגאולוג הצרפתי הצעיר לואי לרטֶה (Louis Lartet, 1840-1899), מי שגילה בצרפת את שלדי האדם הקדמון שנקברו באתר קרו-מניון, איור 1) למסע מחקר בארץ ישראל. כעבור שנתיים הוא פרסם את תצפיותיו על אודות ים המלח וסביבותיו, ובהן שכבות חוואר וגבס המפותחות בייחוד בחצי האי "הלשון" ("ליסאן" בערבית) שמעידות על מפלס אגם קדום שנמצא 100 מטר מעל למפלס ים המלח. את השינוי בגובה האגם הוא ייחס לשינוי במאזן בין כמות הגשם לבין שיעור האידוי. ב-1869 הוא פרסם את חיבורו "הגאולוגיה של ארץ ישראל", שהניח את היסוד למחקר השיטתי בגאולוגיה באזורנו. הוא זיהה את יחידת הסלע הזו ברציפות גם צפונית לים המלח עד הר סרטבה, בגובה עד כ-200 מטר מעל מפלס ים המלח בזמנו (392- מטר, איור 2), וכינה אותה "משקעי הלשון".



איור 1: לואי לרטֶה, 1840–1899



איור 2: איור מתוך ספרו של לואי לרטֶה "הגאולוגיה של ארץ ישראל", 1869 – מבט מהרי מואב מערבה, מים המלח עד צפונית להר סרטבה (מתחת לחץ). יחידות הסלע העיקריות מצוינות, ובהן "משקעי הלשון" (בקווים אלכסוניים, מסומנים כאן בירוק).

"משקעי הלשון" מכונים בימינו "תצורת ליסאן". ("תצורה" היא יחידת סלע, בדרך כלל בעובי עשרות מטרים לפחות, הנבדלת בתכונותיה משכנותיה, ומשתרעת על פני מרחק רב), והאגם שהיא נוצרה בו נקרא "אגם הלשון". תכונתה הבולטת ביותר של תצורת הליסאן, שעובייה המרבי 40 מטר, היא קיומן של אלפי שכבות דקות, מילימטר אחד עוביין, למינות בלע"ז, כהות ובהירות לסירוגין. הלמינות הכהות בנויות גרגירים שמקורם מחוץ לאגם, והן הובלו לתוכו על ידי נחלים; הלמינות הבהירות בנויות גבישים דקים, כמאית מילימטר אורכם, של המינרל ארגוניט, שהרכבו הכימי פחמת הסידן (CaCO_3). המעבר החד בין למינות אלה מצביע על יצירתן בשני תהליכים שונים, הנבדלים בזמן וחוזרים על עצמם. בחורף הגיעו לאגם מי הנחלים, שנשארו אתם גרגירים קטנים וקלים **המרחפים** במים, ומרכיבים כימיים **המומסים** במים. הגרגירים ריחפו במי האגם במשך חודשים אחדים (איור 3) ושקעו אט-אט לקרקעית האגם. בינתיים התאדו המים בחלק העליון של מי האגם, ריכוז המלחים בהם עלה, ובעקבות זאת, לאחר חודשים אחדים, נוצרו שם גבישי ארגוניט. עכשיו החלו גם הם לשקוע אל קרקעית האגם, ובהגיעם אליה יצרו למינה בהירה מעל הלמינה הכהה הבנויה גרגירים ובה מעט ארגוניט, וחוזר חלילה.

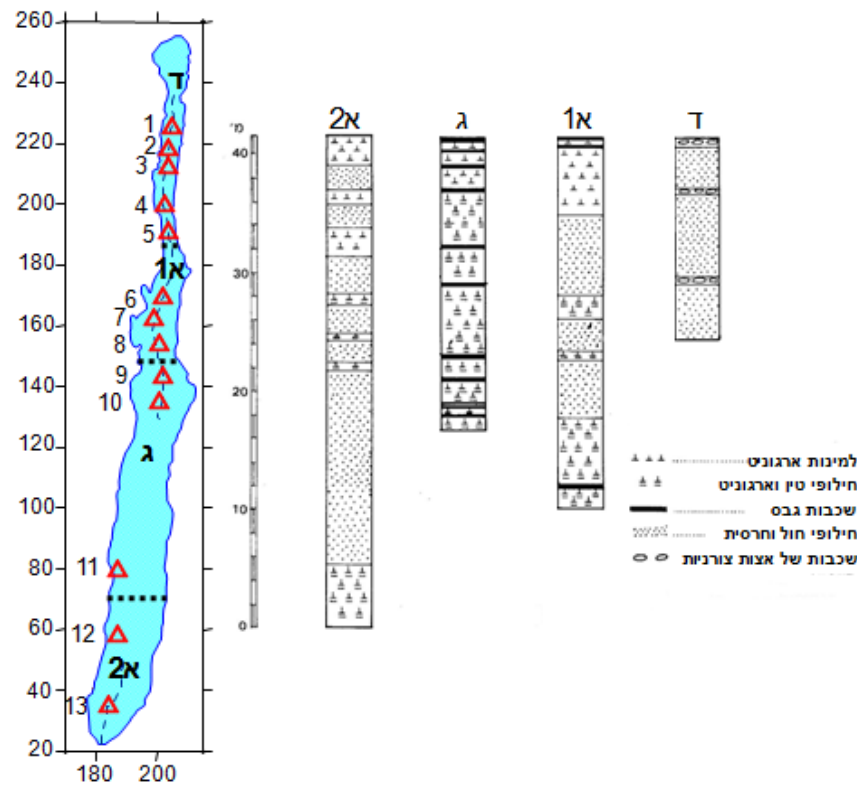


איור 3: מוצא נחל לים המלח לאחר שיטפון – גרגירים מרחפים באגם טרם שקיעתם לקרקעית | צילום: יאיר זיידנר, אתר מפה.

שינויים בהרכבה של תצורת הליסאן

הרכבה של תצורת הליסאן משתנה בשיטתיות מקצות אגם הלשון למרכזו (איור 4). בעמק בית שאן היא בנויה בעיקרה חול וחרסית, ויש בה שלוש שכבות הבנויות אצות צורניות (דיאטומיות, ומכאן שם הסלע: דיאטומיט; איור 4 סימן "ד"). בין שפך ואדי מליח לירדן לבין האזור שצפונית לגשר אלנבי בנויה התצורה בעיקרה חילופין של למינות גרגירים וארגוניט, וניתן למצוא בהן, בבדיקה בעזרת מיקרוסקופ, אצות צורניות בין גבישי הארגוניט (איור 4 סימן א1). כמו כן, מופיעות כאן שכבות אחדות של גבס (שהרכבו הכימי גפרת הסידן, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). בין גשר אלנבי למצדה (איור 4 סימן "ג") בנויה תצורת

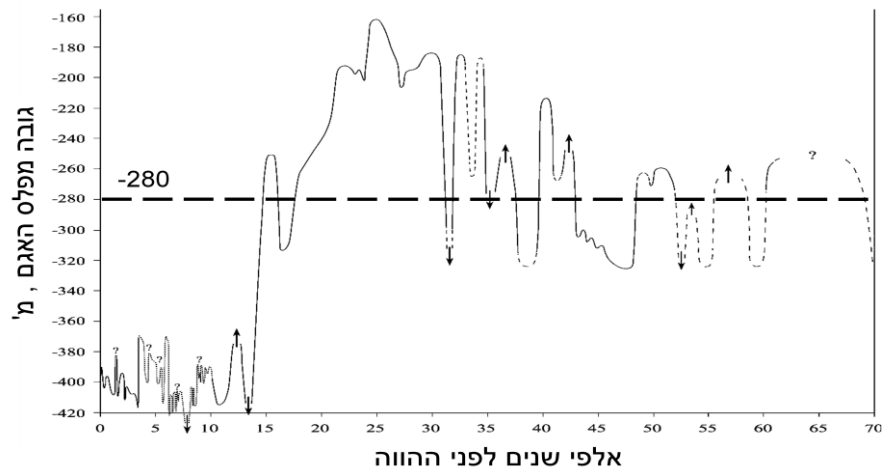
הליסאן למינות חרסית וארגוניט, ובהן פחות מאובנים של אצות צורניות, אך כאן מופיעות שכבות רבות של גבס. דרומית למצדה דומה הרכב תצורת הליסאן לזה שבין ואדי מליח לגשר אלנבי (איור 4 סימן "א2").



איור 4: שינויים בהרכב תצורת הליסאן בחתכים המייצגים אזורים שונים באגם הלשון (בעקבות Begin et al., 1980). במפה מוצגים גם אתרי החתכים הגאולוגיים שנבדקו לאורך אגם הלשון: 1. נהריים; 2. ירדנה; 3. עין חסידה; 4. אבו סוס; 5. ואדי מליח; 6. גשר דמיה; 7. דיר שמן; 8. אום שורט; 9. גשר אלנבי; 10. גשר בית הערבה; 11. מצדה; 12. נחל פרצים; 13. נחל אמציה.

בשינויים אלה כשלעצמם אין רבותא. לדוגמה, על קרקעית ים המלח נוצרות כיום שכבות של מלח, ואילו על קרקעית הכנרת נוצרות שכבות של טין, והשוני בין המשקעים מוסבר בקלות על ידי העובדה שהם נוצרים בשני אגמים נפרדים. אולם לאחרונה הציג טורפשטיין (Torfstein et al., 2013a) עקומת מפלסים מעודכנת של אגם הלשון וים המלח ב-70,000 השנים האחרונות (איור 5). מהעקומה עולה שמתוך 55,000 שנות הרבדתה של תצורת הליסאן, המפלס של מי אגם הלשון היה גבוה מ-280 מטר במשך כ-40,000 שנים, כלומר ב-70% מתקופת קיומו של האגם. בהיותו במפלס זה השתרע האגם בדרום עד אזור סדום ובצפון עד לאזור שמצפון לגשר דמיה (איורים 8, 11ב). מכאן המסקנה שהשינויים בהרכב תצורת הליסאן מדרום לעמק בית שאן משקפים ברוב הזמן שינויים בהרכב המים באותו אגם עצמו. מאחר ששקיעת שכבות גבס מתוך תמיסה מתרחשת כאשר מליחות התמיסה גבוהה

יחסית, ריבוי שכבות הגבס בתצורת הליסאן במרכזו של אגם הלשון מרמז על מליחות רבה יותר של מימיו באזור זה. הערכה זו היא איכותית, וברצוננו לאמוד עתה את השינויים במליחות מי האגם גם באופן כמותי.



איור 5: מפלסי אגם הלשון וים המלח ב-70,000 השנים האחרונות (בעקבות Torfstein et al., 2013a).

אומדן מליחות אגם הלשון בעזרת מאובנים

בבואנו לאמוד את השינויים בכיוון צפון-דרום במליחותם של מי אגם הלשון אנו עומדים בפני אתגר, כי מים אלה התאדו לפני 14,000 שנים. אולם, בסלעי תצורת הליסאן שנוצרו במי האגם מצויים שרידים מאובנים של אורגניזמים שחיו באותו אגם. ננסה להיעזר בהם, על ידי לימוד תחומי המליחות המאפשרים חיים לאורגניזמים אלה בימינו, ובהנחה שאלה היו גם תחומי המליחות שהם חיו בהם באגם הלשון.

א. אצות צורניות (דיאטומיות)

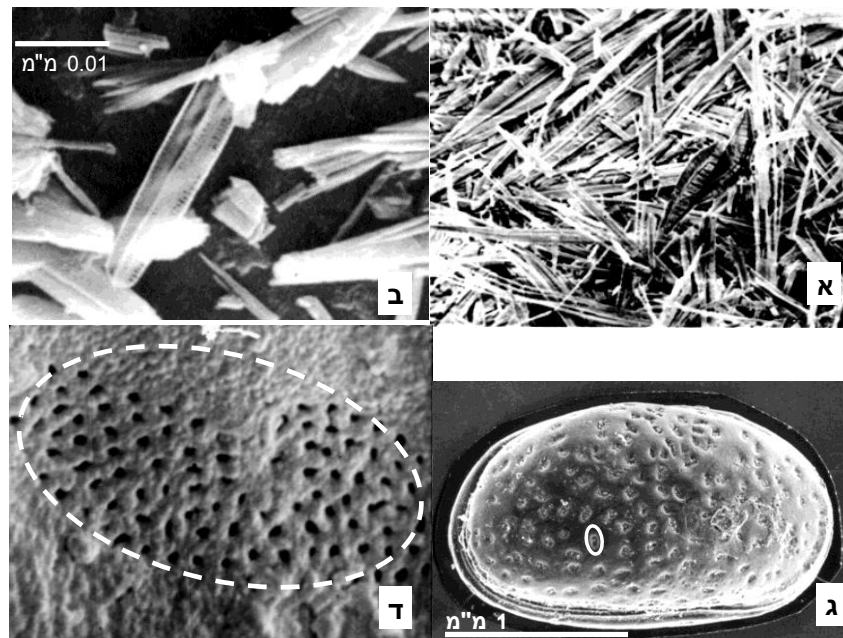
מינים רבים של אצות בנויים שלד בגודל מאיות מילימטר המורכב מתחמוצת צורן. הטווח של מליחות המים שאצות צורניות חיות בו כיום רחב מאוד, 0-200 גרם לליטר. אלין ארליך זיהתה מאה וחמישים מינים של אצות כאלה בתצורת הליסאן. מציאות שכבות דיאטומיט בעמק בית שאן (איור 6 א), מעידה על תנאים שעודדו פריחה נמרצת שלהן, ומכאן אנו מסיקים על קיום מים מתוקים באגם הלשון באזור זה.

בתצורת הליסאן מדרום לעמק בית שאן מועטות האצות הצורניות והן מופיעות בין גבישים של ארגוניט (איור 6 ב). מינים אחדים של אצות אלה מוגבלים ביכולתם להסתגל למליחות גבוהה מאוד, ולדוגמה, האצה *Rhopalodia gibberula* חיה בטווח מליחות של 0-80 גרם לליטר. בחלקה העליון של תצורת הליסאן (המכונה לעתים "הפרט העליון" או "פרט המצוק הלבן"), שגילו 14,000-31,000 שנים, מצויים מאובנים של מין זה לאורך אגם הלשון מלבד באזור ים המלח, בין גשר בית הערבה למצדה. מכאן

המסקנה שבאותה תקופה מליחות המים הייתה נמוכה מ-80 גרם לליטר ברוב אורכו של האגם, אך גבוהה יותר באזור ים המלח.

ב. סרטנים

אוסטרקודים הם סרטנים זעירים בגודל 0.5-2 מ"מ החיים בקרקעית של מקווי מים רדודים. הסרטנים מסדרה זו, הנתונים בין שתי קשורות, חיים כיום בטווח המליחות 0-80 גרם לליטר. מאובניהם נמצאו בתצורת הליסאן מעמק בית שאן ועד כ-20 ק"מ מצפון לים המלח. נוסף על הידיעה הכללית הזו ניתן להיעזר במין מסוים של אוסטרקודים (*Cyprideis torosa*) כדי לקבוע את השינויים במליחותו של אגם הלשון ביתר פירוט, וזאת בדרך הבאה: בקשוותיהם של אוסטרקודים מצויים נקבים, שתפקידם לאפשר לשערות חישה של הסרטן לצאת מבעד לקשורה אל סביבתו (איור 6 ג). במין הזה הנקבים הקטנים מרוכזים באזורים מסוימים על שטח הקשווה, ולכן הם נקראים נקבי-נפה. לנפות של *Cyprideis torosa* יש צורות שונות – חלק מהן מאורכות וחלק קרובות למעגלים (איור 6 ד). אמנון רוזנפלד (1944-2014) וברנד וספר (Rosenfeld and Vesper, 1977) בדקו מאות פרטים חיים של מין זה ומצאו שבקשוות של אלה שחיו במים מלוחים יותר, קטן יותר חלקם היחסי של נקבי-הנפה העגולים. מכיוון שסרטנים כאלה נמצאו כמאובנים בתצורת הליסאן, ניתן היה להשתמש באחוז של נקבי-הנפה העגולים שבהם כדי לאמוד את המליחות שחיו בה. מהשוואה זו עלה כי מליחותם של מי אגם הלשון הייתה 4 גרם לליטר בעמק בית שאן, והיא עלתה בהדרגה בכיוון דרום ל-60 גרם לליטר על פני מרחק של 50 ק"מ.



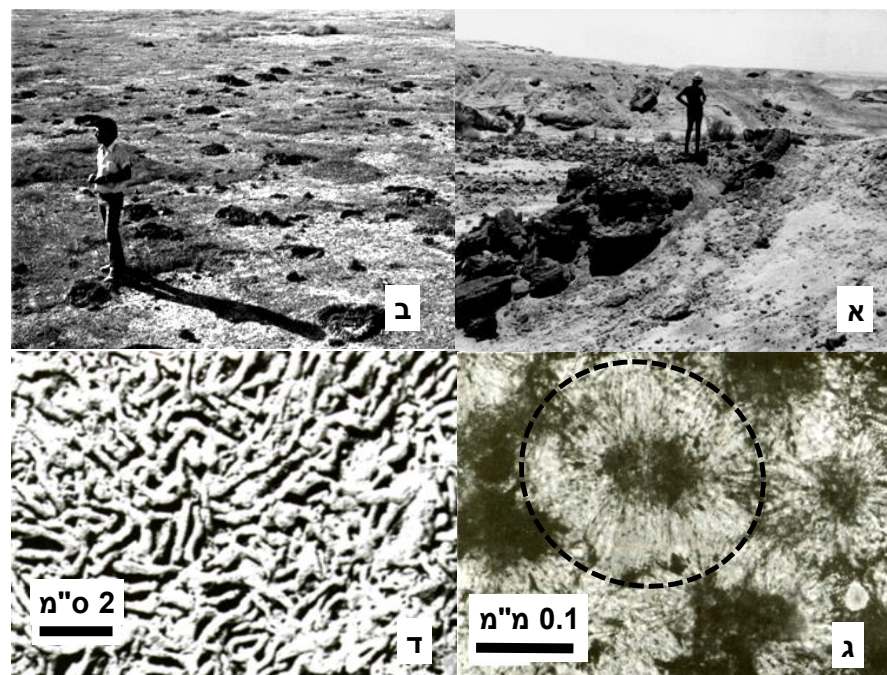
איור 6: א. תצלום במיקרוסקופ סריקה אלקטרוני של דוגמת סלע משכבה בתצורת הליסאן בעמק בית שאן, המכילה בעיקר אצות צורניות (דיאטומיט) (אלין ארליך). ב. גבישי ארגוניט מאורכים בתצורת הליסאן וביניהם אצה צורנית (אלין ארליך). ג. אחת הקשוות של אוסטרקוד ובה נקבי-נפה (אמנון רוזנפלד). ד. מבט מקרוב על קשוות אוסטרקוד ובה נקב-נפה במתאר אליפטי (אמנון רוזנפלד).

ג. חיידקים כחולים

בתצורת הליסאן, בין אזור אום שורט לבין דרום ים המלח מצויים מבנים עשויים גיר בצורת אגנים (איור 7א). הגדולים ביניהם, באורך של כ-10 מטר, מרוכזים בדרום ים המלח, ומבנים קטנים יותר, בקוטר עשרות סנטימטרים, מצויים מצפון לים המלח (איור 7ב). בנימין בוכבינדר (Buchbinder, 1981) הראה שהם בנויים כדורים בקוטר עשירות מ"מ (איור 7ג), שנוצרו בעקבות הפרשת גיר על ידי "חיידקים כחולים" (ציאנובקטריות; בעבר סברו שמקור המבנים באצות כחוליות-ירוקיות). קבוצת החיידקים הכחולים, שחלק ממנה יוצר מבנים כדוריים וחלק מבנים חוטיים, חיה כיום בטווח מליחות רחב מאוד, 0-250 גרם לליטר, אולם החיידקים יוצרי הכדורים חיים רק במליחות גבוהה מ-55 גרם לליטר.

ד. דגים

באזור נחל פרצים נמצאו לפני כארבעים שנה מאובנים של הדג נאוויט (*Aphanius*) בחלקה התחתון של תצורת הליסאן, ושנים רבות לאחר מכן מצא זאב לוי (Begin et al., 2004, p. 1630) באותו אזור גללים מאובנים של אותו דג (איור 7ד). דג זה חי כיום בטווח מליחות שבין מי ים (38 גרם לליטר) ל-150 גרם לליטר.



איור 7: א, ב. מבנים בתצורת הליסאן שנוצרו כתוצאה מהפרשת גיר על ידי חיידקים כחולים, בנחל מור (בנימין בוכבינדר) וצפונית למושב נעמה. ג. מבט מקרוב על כדורים הבנויים גבישי גיר מאורכים הפונים אל המרכז, שיצרו חיידקים כחולים (בנימין בוכבינדר). ד. גללים מאובנים של הדג נאוויט בתצורת הליסאן (זאב לוי).

ה. עקומת המליחות לאורך אגם הלשון

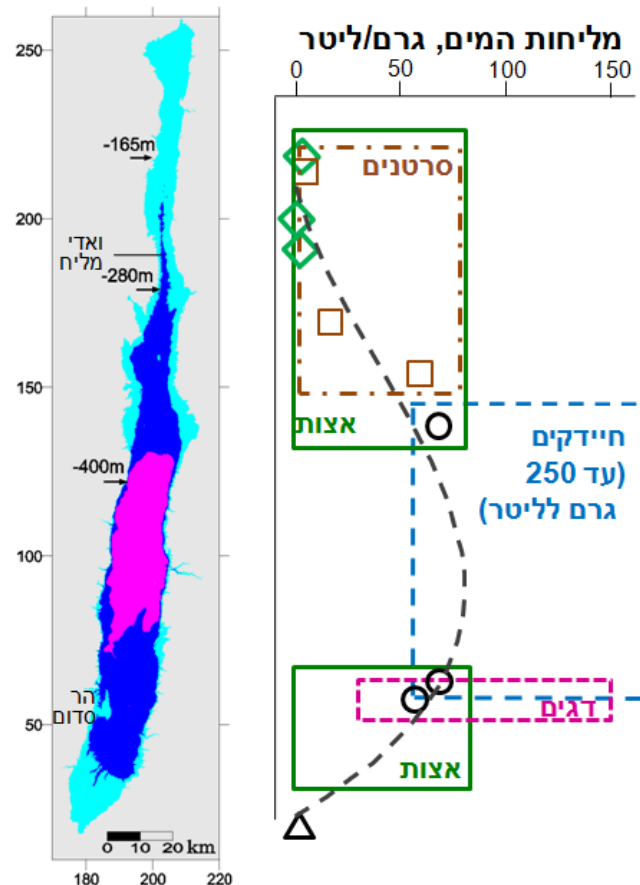
האורגניזמים שנעזרנו בהם לאומדן המליחות של מי אגם הלשון חיו בחלק העליון של גוף המים, המואר על ידי השמש. לכן, מן הנתונים על אודות תפוצתם במרחב של הסמנים הביולוגיים ותחומי המליחות שלהם ניתן להפיק אומדן כמותי של השתנות המליחות בחלקם העליון של מי אגם הלשון (איור 8). בחלקו הצפוני של האגם, בעמק בית שאן, מעידות השכבות הבנויות דיאטומיט על מים מתוקים, וגם צורתם של נקבי-הנפה של הסרטנים מצביעה על מליחות נמוכה מאוד שם. מדרום לעמק בית שאן מצביע סמן זה על הגברה הדרגתית של המליחות בכיוון דרום עד ל-60 גרם לליטר מצפון לגשר אלנבי, ומאפשר לציין שתי נקודות מידע נוספות כבסיס לאומדן המליחות.

מאזור גשר אלנבי ודרומה ניתן להיעזר בשלוש נקודות מידע המוגדרות כאן במרכזים של מלבני החפיפה בין תחומי המליחות המאפיינים את המאובנים. בשני תחומי החפיפה בין האצות הצורניות לחידקים הכחולים יש להניח שהמליחות הייתה גבוהה מ-55 גרם לליטר, שהיא המליחות המזערית המאפשרת התפתחות חידקים היוצרים מבנים כדוריים, אך נמוכה מ-80 גרם לליטר, שהיא המליחות המרבית המאפשרת התפתחות של האצה הצורנית *Rhopalodia gibberula*. בתחום החפיפה בין האצות האלה לבין הדג נאוויית יש להניח שהמליחות הייתה גבוהה מ-38 גרם לליטר, שהיא המליחות המזערית שבה המין הזה חי, אך נמוכה מ-80 גרם לליטר, שהיא המליחות המרבית המאפשרת התפתחות של האצה הצורנית. נקודת מידע נוספת מבוססת על ההנחה שמקור של מים מתוקים שפע בקצהו הדרומי של אגם הלשון.

בידינו עתה עשר נקודות מידע, ומן העקום שהותאם אליהן (הסבר במסגרת) עולה כי שיא המליחות בשכבת המים העליונה באגם הלשון היה 80 גרם לליטר. שיא זה לא היה בקצהו הדרומי, כפי שניתן לצפות מאגם ללא מוצא שמקור מימיו בצפון, אלא היה במרכז האגם, באזור שהוא כיום האגן הצפוני של ים המלח (איור 8). מצב זה משקף כנראה מקור מים חשוב מדרום לאגם הלשון, וזאת בניגוד למצב כיום, שבו תרומת מי הנחלים מאגן הניקוז הגדול שמדרום לים המלח דלה מאוד (Begin et al., 2004). מתוך עקום המליחות ניתן לחשב גם את מליחותה הממוצעת של שכבת המים העליונה לאורך אגם הלשון, והיא כ-50 גרם לליטר, כלומר 35%-70% מן המליחות הממוצעת של אגם הלשון (במפלסים 165- מטר ו-280- מטר, בהתאמה).

במונח **התאמת עקום** מתכוונים לבניית משוואה מתמטית המתארת מקבץ של נקודות מידע בצורה הטובה ביותר. שיטה מקובלת לכך היא התאמת משוואה שהמשתנה מופיע בה בחזקות שונות ("פולינום"), שעל פי הגבוהה בהן נקבעת ה"מעלה" שלה. לדוגמה, משוואה ממעלה שלישית עשויה להיראות כך:

$y = aX^3 + bX^2 + cX + d$ ובה X הוא משתנה והאותיות a, b, c, d מייצגות מקדמים קבועים. ניתן להתאים משוואות שונות לאותו מקבץ של נקודות מידע ולבחון איזו מהן מתארת את הנקודות בדיוק טוב יותר. המשוואה הנבחרת מאפשרת אומדן של ערכי y גם בין נקודות המידע.



איור 8: א. התפוצה במרחב של מאובנים בתצורת הליסאן, שניתן להסיק ממנה על המליחות בחלק העליון של מי אגם הלשון. העקום, שהותאם לנקודות המידע על ידי משוואה ממעלה שלישית (ראו הסבר במסגרת) עם מקדם מתאם 0.94, מבוסס על עשר הנקודות הבאות: מעוינים ירוקים (דיאטומיט); ריבועים חומים (נקבי-נפה של סרטנים); עיגולים שחורים - שניים במרכזים של מלבני החפיפה בין תחומי המליחות של אצות צורניות וחיידקים כחולים ואחד במרכז מלבן החפיפה בין תחומי המליחות של אצות צורניות והדג נאוויט; משולש שחור, בהנחה שהיה לאגם הלשון מקור מים מתוקים בדרומו. ב. מפת גבהים של בקע ים המלח שניתן ללמוד ממנה על תחום השתרעותו של אגם הלשון במפלסים -280 מטר ו-165 מטר (באדיבות ג'ון הול).

סמנים נוספים לשינויים בהרכב המים לאורך אגם הלשון

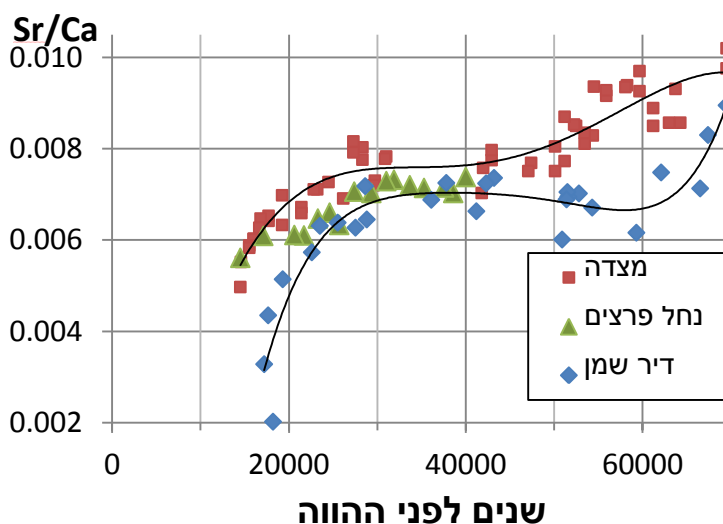
מן הסמנים הביולוגיים הפקנו אומדן כמותי של השתנות המליחות לאורכה של שכבת המים העליונה באגם הלשון, שעולה ממנו כי המים היו מתוקים בקצות האגם בצפון ובדרום ומלוחים מאוד במרכזו. מדדים נוספים בסלעי תצורת הליסאן מעידים על שינויים בהרכב המים לאורך אגם הלשון, ונציג אותם בשלושה חתכים גאולוגיים על פני מרחק של 80 ק"מ.

א. היחס Sr/Ca

בדומה לאורגניזמים שתוארו לעיל, גם גבישי הארגוניט נוצרו בחלק העליון של מי אגם הלשון, ולכן הרכבם משקף את הרכב המים בחלק זה של גוף המים. כן, קולודני וניסנבאום (Katz et al., 1977) בדקו מדדים כימיים של גבישי ארגוניט בלמינות הבהירות בתצורת הליסאן בשלושה אתרים: דיר שמן, מצדה ונחל פרצים (איורים 9, 11). גיל הלמינות נקבע במאמר זה על ידי התאמת המיקום של דוגמאות

הסלע – שנדגמו ונבדקו לפני ארבעים שנה – למדידות גיל חדשות בתצורת הליסאן בשלושת האתרים האלה ובאתרים נוספים (Torfstein et al., 2013b).

מדד אחד שנבדק הוא היחס בין מספר האטומים של סטרונציום (Sr) למספר האטומים של סידן (Ca) בגבישי הארגוניט (היחס Sr/Ca). מן הנתונים באיור 9 ניכר הבדל בין ערכי היחס Sr/Ca בגבישי ארגוניט בשלושת האתרים. במשך כל זמן קיומו של אגם הלשון ערכי היחס הזה היו נמוכים יותר בחלקו הצפוני של האגם באזור דיר שמן בהשוואה לחלקו המרכזי באזור מצדה. בנחל פרצים נדגם בזמנו בעיקר חלקה העליון של תצורת הליסאן, והשוואת ערכי Sr/Ca בתקופה הצעירה מראה כי הם היו נמוכים מן הערכים במצדה באותה תקופה. ערכי החציונים של מדד זה בחלקה העליון של תצורת הליסאן בשלושת האתרים מוצגים באיור 11. בפרק הבא נדון במשמעותה של תצפית זאת.



איור 9: ההשתנות בזמן של היחס בין מספר האטומים של סטרונציום למספר האטומים של סידן בגבישי הארגוניט בתצורת הליסאן בשלושה אתרים: דיר שמן, מצדה ונחל פרצים (ראו מיקומם באיור 4). נתוני Sr/Ca מתוך Katz et al., 1977; נתוני הגיל מתוך Torfstein et al., 2013b. שני העקומים הותאמו לנקודות המידע בעזרת משוואות מן המעלה החמישית (הסבר במסגרת) עם מקדמי מתאם 0.94 במצדה ו-0.93 בדיר שמן. ערכי Sr/Ca בדיר שמן נמוכים מאלה שבמצדה בכל תקופת הקיום של אגם הלשון.

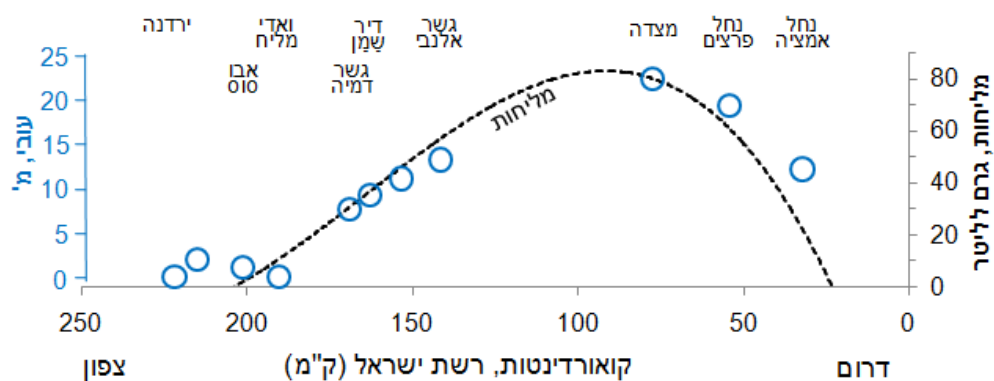
ב. היחס Na/Ca

באותן למינות בדקו כץ, קולודני וניסנבאום (Katz et al., 1977) גם את היחס בין מספר אטומי הנתרן (Na) למספר אטומי הסידן (Ca) בגבישי ארגוניט. בניסויי מעבדה שערכו, נוצרו גבישי ארגוניט בתמיסות של מי ים המלח כשהן מהולות במים מתוקים. התברר שהיחס Na/Ca בגבישים נקבע במידה רבה על ידי דרגת המיהול של התמיסה: לגבישי ארגוניט שנוצרו בתמיסה מהולה יותר, שריכוז הנתרן בה נמוך יותר, נכנסו פחות אטומים של נתרן, ולכן היחס Na/Ca בגבישים אלה היה נמוך יותר. ערכי

החציונים של התפלגות ערכי Na/Ca בחלק העליון, הצעיר, של החתכים בשלושת האתרים מוצגים באיור 11: הערכים נמוכים יותר בדיר שֶׁמֶן שבצפון מאשר במצדה ובנחל פרצים. מניסויי המעבדה ניתן להסיק שהדבר מבטא מליחות גבוהה יותר של שכבת המים העליונה באזור מצדה-נחל פרצים בהשוואה לדיר שֶׁמֶן. את העובדה שבנחל פרצים, כ-20 ק"מ דרומית למצדה, ערכי היחס Na/Ca גבוהים יותר מאשר במצדה, ניתן ליחס לקרבת האתר הזה להר סדום, שמרכיב חשוב בין סלעיו הוא מלח הבישול המורכב מנתרן ומכלור. מלח זה, שהוא מסיס מאוד במים, עשוי היה לתרום כמות גדולה של נתרן למי האגם, שכיסו בזמנו את הר סדום.

ג. העובי הכולל של ארגוניט וגבס בתצורת הליסאן

העובי הכולל של למינות הארגוניט ושכבות הגבס בתצורת הליסאן נבדק בחתכים גאולוגיים לאורך אגם הלשון. מכיוון שקשה למדוד את עוביין הכולל של אלפי למינות, נזקקנו לאומדן, בהנחה שלמינות הארגוניט מהוות מחצית מרצף הבנוי חילופי למינות ארגוניט ולמינות המורכבות מגרגירים. האומדנים מצביעים על עלייה ניכרת בעובי הכולל של ארגוניט וגבס מקצות האגם לכיוון מרכזו (איור 10), שמזכירה את עקום המליחות שהתקבל מתפוצת המאובנים בתצורת הליסאן (איור 8).



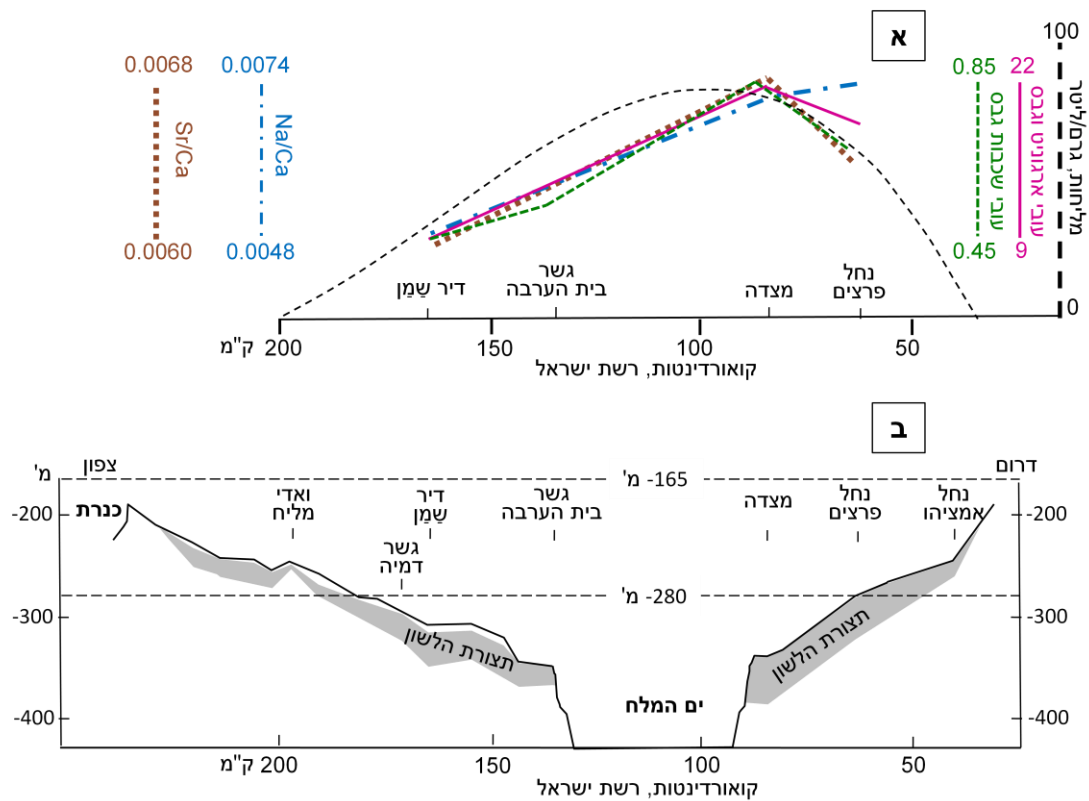
איור 10: שינויים בעובי הכולל של שכבות ארגוניט וגבס בתצורת הליסאן (בעקבות Begin et al., 1980) על רקע עקום שינויי המליחות לאורך אגם הלשון המוצג באיור 8. למיקום האתרים ראו איור 4.

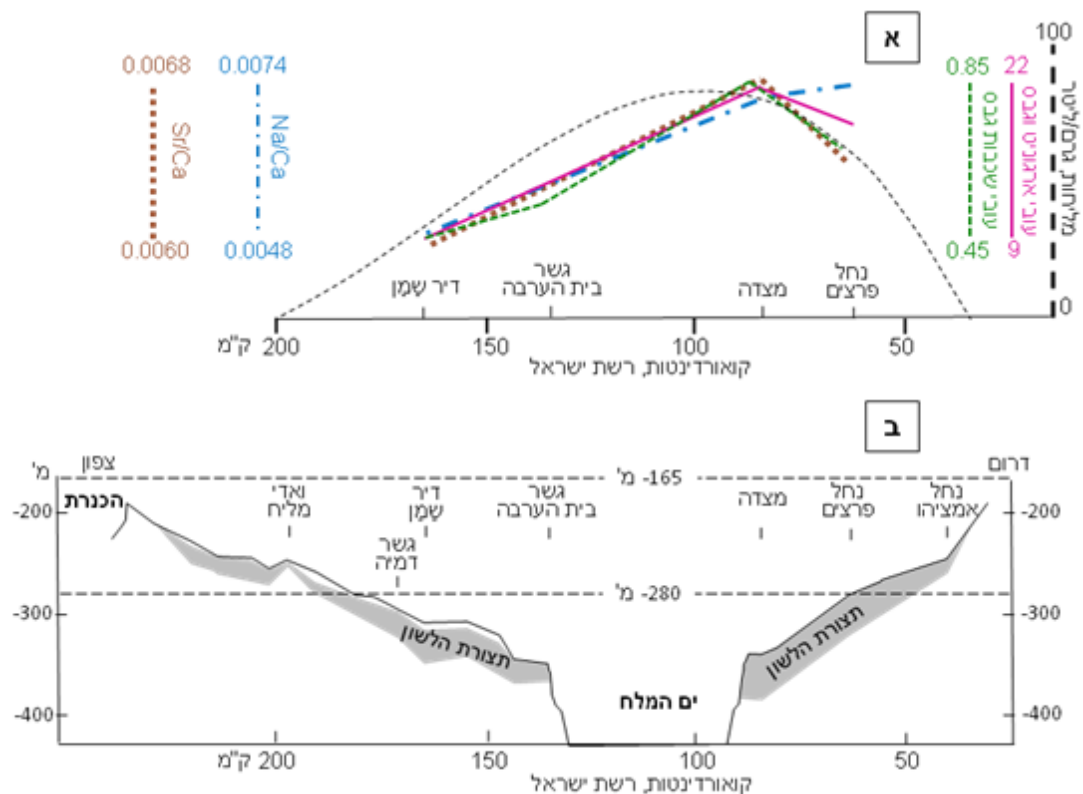
ד. עובי שכבות הגבס בגג תצורת הליסאן

היחידה הצעירה ביותר בתצורת הליסאן, הבנויה בעיקרה גבס וארגוניט, הורבדה במשך 2,000 שנה לפני 17,000-15,000 שנים. לכן, השינויים בעובי שכבות הגבס ביחידה זו מאפשרים השוואה בתקופה קצרה בין האתרים בדיר שֶׁמֶן, בגשר בית הערבה, במצדה ובנחל פרצים (Torfstein et al., 2008).

ארבעת המדדים האלה מצביעים על שינויים בהרכב של שכבת המים העליונה לאורך אגם הלשון. השתנותם לאורך האגם מוצגת באיור 11 על בסיס משותף של טווח ערכיהם בשלושת האתרים, על רקע

העקום המתאר את השינויים במליחות המים לאורך אגם הלשון (מאיור 8). מן ההשוואה עולה תמונה עקיבת, שעל פיה ערכי כל המדדים היו נמוכים בחלקו הצפוני של אגם הלשון בהשוואה לשני החתכים הדרומיים. נוסף על כך, הערכים של שלושה מדדים – היחס Sr/Ca , עובי שכבות הגבס בחלקה העליון של תצורת הליסאן והעובי הכולל של ארגוניט וגבס בתצורת הליסאן – נמוכים בנחל פרצים בהשוואה למצדה, ומזכירים את עקום המליחות.





איור 11: א. השינויים בערכי ארבעה מדדים בתצורת הליסאן בדיר שמן, במצדה ובנחל פרצים על רקע עקום המליחות שהתקבל מתפוצת המאובנים בתצורת הליסאן (איור 8). העובי הכולל של ארגוניט וגבס בתצורת הליסאן ועובי שכבות הגבס ביחידת הגבס העליונה בתצורת הליסאן ניתנים במטרים; היחסים Sr/Ca ו- Na/Ca הם חסרי ממדים, ומיוצגים באיור על ידי הערכים החציונים של התפלגויותיהם בחלקה העליון של תצורת הליסאן.
ב. חתך גאולוגי לאורך תצורת הליסאן. כאשר מפלס אגם הלשון היה גבוה מ-280- מטר התקיים אגם אחד בין גשר דמיה לנחל פרצים.

הגורמים לשינויים בהרכב המים לאורך אגם הלשון

א. שתי שכבות במי אגם הלשון

יש בידינו עתה מקבץ של תצפיות המצביעות על שינויים חריפים בהרכב המים לאורך אגם הלשון. תוצאה זו מעניינת כשלעצמה, אך כדאי גם לנסות להסבירה במסגרת כוללת. בנסיבות כאלה נעזרים לעתים בהשוואה לתופעות דומות במקומות אחרים, אך לא מצאנו מצב דומה באגמים בימינו. גם לשתי תכונות חשובות של אגם הלשון אין מקבילה בימינו: ההרכב הכימי הייחודי של מלחיו (שהיה דומה להרכב

המלחים בים המלח), ומיקומו המיוחד במרחב. אם כך, ייתכן שההסבר לתצפיותינו טמון בתכונות המיוחדות לאגם הלשון.

אגם הלשון התהווה בעמק צר שהוכתב על ידי רצועת ההעתקים של בקע ים המלח, ועובדה זו קבעה את צורתו המאורכת (במפלס השיא של האגם היה היחס בין אורכו לרוחבו הממוצע בערך 20; איור 4) ואת העובדה שכיוון ציר האורך שלו היה צפון-דרום. שני אלה, יחד עם צורת אגן הניקוז של האגם שגם הוא צר ומאורך באותו כיוון, קבעו את מיקום מקור המים העיקרי שלו. אז כהיום, התרומה העיקרית למי האגם הגיעה מצפון באמצעות נחלי הירדן והירמוך, ובכמות גדולה בהרבה. לדוגמה, כדי לקיים במפלס קבוע את האגם בשיא מפלסו, בשטח של כ-3,000 קמ"ר, בהנחה ששיעור האידוי השנתי היה לפחות מטר אחד, נדרשה בכל שנה כניסת מים לאגם שנפחם לפחות 3 מיליארד מ"ק, פי שלושה מן הנפח השנתי שהגיע לים המלח עד שנות ה-80 של המאה שעברה. בהנחה נוספת, שמצפון הגיעו לאגם 60% מן הכמות השנתית, נפחם היה לפחות 2 מיליארד מ"ק בשנה.

בדרך כלל ניתן היה להניח שמי הנחלים התערבבו במי אגם הלשון סמוך למקום כניסתם אליו, אך ככל הנראה לא כך היה, כפי שניתן להסיק מתוך אומדן גס של המליחות הממוצעת של מי האגם. אומדן זה מתאפשר על יסוד ההבנה שאותם מלחים שהיו מומסים באגם הלשון הם אלה המומסים כיום בריכוז גבוה יותר בים המלח, שנותר לאחר שרוב מימיו של אגם הלשון התאדו. נפח ים המלח במפלס 400- מטר הוא 130 ק"מ מעוקבים, בעוד שנפח אגם הלשון במפלס 280- מטר היה כ-300 ק"מ מעוקבים ובשיאו היה כ-600 ק"מ מעוקבים. מכאן, שמליחות האגם המדולל במפלס 280- מטר הייתה פחותה ממליחות ים המלח פי 2.3 (130/300), ומכיוון שמליחותו של ים המלח (במפלס 400- מטר) היא 320 גרם לליטר, אנו מסיקים שהמליחות הממוצעת של אגם הלשון במפלס 280- מטר הייתה פחותה פי 2.3, כלומר 140 גרם לליטר. באותה דרך נסיק כי מליחות אגם הלשון במפלס השיא, 165- מטר, הייתה כ-70 גרם לליטר (פי שנים ממליחות האוקיינוסים). לעומת זאת, בהיכנסם לאגם היו מי הירדן והירמוך בעלי תכולת מלחים נמוכה מאוד, כמליחותם כיום, 0.2 גרם לליטר.

הפרש המליחות בין מי הנחלים למי האגם גרם להפרש בצפיפותם. הצפיפות של מי הנחלים הייתה 1.00, אך במליחות ממוצעת של 70–140 גרם לליטר צפיפות מי האגם הייתה 1.05–1.10 (אברהם סטרינסקי, דברים בעל פה, 2014). מכאן שהיחס בין צפיפותם של מי הנחלים לצפיפות הממוצעת של מי האגם המלוחים היה 0.93–0.9. לכאורה, אין זה הבדל גדול, אך הבדל דומה בצפיפות גורם לשמן לצוף על מים. על כן, יש להניח שבמשך רוב זמן קיומו של אגם הלשון צפה שכבת מים צפופה פחות על פני שכבת מים תחתונה ומלוחה מאוד, ומצב זה התקיים כל עוד שיעור האידוי לא היה גבוה, בהשוואה לכמות המים שנכנסו לאגם, עד כדי ירידת מפלס המים בו. בעקום מפלסי האגם (איור 5) ניתן לראות שהתקופות שמפלס אגם הלשון ירד בהן לאורך זמן היו קצרות יחסית, בנות כמה מאות שנים כל אחת (10 תקופות

שמשכן הכולל 5,000 שנים בלבד מתוך 55,000 שנים). יש להדגיש שלא הייתה כמובן חציצה מלאה בין שכבות המים, ואטומים ומולקולות נדדו ביניהן במשך הזמן.

ב. השפעת אידוי המים

תיארנו את השינויים במדדים אחדים בסלעי תצורת הליסאן, המצביעים על הבדלים בהרכב המים שתיארנו לאורך אגם הלשון. משיקולים אחרים הסקנו על קיום שכבת מים באגם, ולכך אנו מוסיפים עתה את מסקנתנו הקודמת, שהשינויים המרחביים בהרכב המים התרחשו בשכבת המים העליונה, שבה חיו האורגניזמים ונוצרו גבישי הארגוניט. עם זאת, עד עתה לא ניסינו להסביר את התופעות ולקשר ביניהן בעזרת התהליכים שחוללו אותן.

כדי להציע הסבר כזה ניתן לחשוב על שני תהליכים שונים באגם הלשון שגרמו, מבחינת תפוצת המאובנים והשינויים במדדים האחרים, לתוצאה דומה. תהליך אחד הוא **אידוי המים** מפני השטח של האגם. אמנם איננו יודעים מה היה שיעור האידוי לאורך אגם הלשון אבל גם ללא ידיעה מפורטת על כך, חוקי הפיזיקה מאפשרים לנו להציע תוצאה אפשרית של תהליך זה. אורי שביט וליאת בירנהק הציגו פתרון של המשוואות המקובלות לתיאור זרימה ולהובלת מליחות במים עבור גוף מים צר וארוך, שמימיו מתאדים בשיעור שאינו משתנה לאורכו, והוא מוזן בקצהו במים בעלי מליחות נמוכה (אורי שביט, דברים בעל פה, 2002). הם הראו שבתנאים אלה מליחות המים עולה ככל שגדל המרחק מקצה האגם, ותופעה דומה נצפתה גם בניסוי מעבדה שהם ערכו במכל מים בממדים של 10x200 ס"מ, ביחס הדומה לזה של ממדי אגם הלשון בשיאו. תוצאות אלה תואמות באופן כללי את תצפיותינו באגם הלשון, אולם נראה שאין בכך כדי להסביר את התופעה במלואה. הסיבה היא שמליחות המים בכניסתם לאגם הלשון הייתה מלכתחילה נמוכה מאוד (0.2 גרם לליטר) כך שגם אם הריכוז של שכבת המים העליונה במרכז האגם היה גדול פי 100 מן הריכוז הראשוני שלה, מליחותה שם לא עלתה על 20 גרם לליטר. לעומת זאת, מתפוצת המאובנים בתצורת הליסאן הסקנו שמליחות מי השכבה העליונה במרכז האגם הגיעה ל-80 גרם לליטר (איור 8). אם כך, יש להשלים את ההסבר בעזרת תהליך נוסף, שעשוי להגביר עוד יותר את מליחותה של שכבת המים העליונה במרכז האגם.

ג. השפעת ערבוב שכבות המים באגם הלשון

אם הנחתנו הראשונה נכונה, ועקב האידוי הייתה שכבת המים העליונה במרכז האגם מלווה יותר מאשר בקצותיו, היא הייתה גם צפופה יותר שם, ולכן הפרש הצפיפויות בינה לבין השכבה התחתונה היה קטן יותר. בתנאים אלה גובר הסיכוי **לערבוב** נמרץ יותר בין שכבות המים במרכז האגם, וכתוצאה מכך לעלייה נוספת במליחות המים במרכז האגם יחסית לקצהו.

תמיכה בקיומו של תהליך זה יש בהשתנות של ערכי היחס Sr/Ca לאורך אגם הלשון. כדי להציע הסבר לתופעה זו נחזור לאיור 9, שמוצגת בו ירידה בערכי Sr/Ca עם הזמן בשלושת האתרים. הירידה הייתה אטית מאוד (במוצע, שינוי של אלפית האחוז בשנה), אך ניתן לעקוב אחריה כיום מכיוון שהתקיימה במשך רבבות שנים. בשלב המוקדם של קיום האגם הערכים של היחס Sr/Ca במצדה היו גבוהים ודומים לאלה של ים המלח היום (0.010), והם ירדו לפני כ-50,000–70,000 שנים, נותרו קבועים בתקופה שלפני 50,000 ל-30,000 שנה, וניכרת בהם ירידה נוספת בתקופה שלפני 30,000 ל-14,000 שנה. ניתן להשוות את השינויים ביחס Sr/Ca לשינויים במפלס אגם הלשון (איור 5): בתקופה שלפני 50,000 ל-30,000 שנה עלה וירד מפלס האגם פעמים אחדות בהשוואה למפלס של 280- מטר, אך לפני כ-30,000 ל-15,000 שנה נותר המפלס כל הזמן מעל גובה זה. במפלסיו הגבוהים של האגם שטחו היה גדול, נפח המים שהתאדה ממנו בכל שנה היה גדול, וכמויות גדולות מאוד של מים מתוקים נכנסו אליו מדי שנה במשך 15,000 שנים. ההתאמה בזמן בין העלייה האחרונה במפלס האגם לפני 30,000 שנה לבין תחילת הירידה האחרונה ביחס Sr/Ca מאששת את ההסבר שהעלו בזמנו כץ, קולודני וניסנבאום (Katz et al., 1977) לירידה זו: שכבת המים העליונה באגם הלשון הוזנה במי הנחלים שנכנסו לאגם הלשון, שבהם היחס Sr/Ca היה נמוך יחסית, בדומה למי הנחלים היום. עם הזמן התערבבו המלחים בשכבת מים זו בשכבת המים התחתונה, והירידה ביחס Sr/Ca בגבישי הארגוניט מבטאת מיהול ארוך טווח של שכבת המים התחתונה במי הנחלים, שמצא את ביטוי גם בשכבת המים העליונה שגבישי הארגוניט נוצרו בה.

הסבר זה באשר לשינויים ביחס Sr/Ca בזמן מועיל גם בניסיון להסביר את השינויים במדד זה במרחב, לאורך אגם הלשון. במצדה, הערכים הגבוהים יותר של היחס Sr/Ca בגבישי הארגוניט מצביעים על כך שהרכב שכבת המים העליונה הושפע שם במידה רבה מתרומת מים שמקורם בשכבת המים התחתונה, העשירה יחסית בסטרונציום. לעומת זאת, הערכים הנמוכים יותר של היחס Sr/Ca בגבישי הארגוניט בדיר שמן מצביעים על השפעה רבה יותר של מרכיב המים המתוקים בשכבה העליונה בחלקו הצפוני של האגם, הקרוב יותר למקור המים המתוקים, כלומר על מיהולה במי הנחלים. מכאן ניתן להסיק ששיעור הערבוב של שכבת המים העליונה במי השכבה התחתונה היה גבוה יותר במרכז האגם יחסית לצפונה. בנחל פרצים נדגם בזמנו בעיקר חלקה העליון של תצורת הליסאן, והשוואת ערכי Sr/Ca בתקופה הצעירה (איור 9) מראה כי הם היו נמוכים מן הערכים במצדה באותה תקופה. מכאן, ששיעור הערבוב בין שכבות המים באגם היה גבוה יותר במרכז האגם גם ביחס לדרומו. מכיוון ששכבת המים התחתונה הייתה מלווה מאוד יחסית לשכבה העליונה, שיעור ערבוב גבוה יותר בין שתיהן הביא למליחות גבוהה יותר של שכבת המים העליונה במרכז האגם יחסית לקצותיו, והדבר תואם את עקום המליחות באיור 8.

ייתכן שגורם נוסף, שפעל באותה מגמה, הייתה הרוח, וגם לזאת תרמו השקע שאגם הלשון היה מצוי בו – שרוחות חזקות נושבות בו בעיקר מצפון – וצורתו המאורכת של האגם. הרוח מעוררת גלים גבוהים יותר ככל שגדל אורך גוף המים שהיא נושבת מעליו, וכשהאגם היה במפלס 280- מטר עלה אורך זה מאפס

בקצותיו ל-100 ק"מ במרכזו. במצב זה ניתן לצפות לגלים גבוהים יותר במרכז האגם מאשר בקצותיו, שעשויים היו לגרום שם לערבוב נמרץ יותר בין שכבות המים, ולמליחות גבוהה יותר בשכבת המים העליונה.

השפעות נוספות של הערבוב בין שכבות המים באגם הלשון

שכבת המים התחתונה באגם הלשון, בדומה למי ים המלח כיום, הייתה עשירה בסידן במופעו כאטום בעל מטען חשמלי חיובי Ca^{++} , והוא היה מצוי בכמות קטנה יותר בשכבת המים העליונה. לעומת זאת, מי השכבה העליונה, שמקורם במי נחלים מחוץ לאגם, היו עשירים יחסית במולקולות הטעונות מטענים חשמליים שליליים: ביקרבונט (HCO_3^-) וסולפט (SO_4^{--}) (Stein et al., 1997). לכן, יצירת כמות גדולה של גבישי ארגוניט (CaCO_3) או גבישי גבס ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) באגם הלשון הייתה מותנית במפגשים קרובים בין הסידן ה"מארח" למולקולות ה"אורחות". מפגשים אלה אפשרו את פעולת כוח המשיכה בין אטומים ומולקולות בעלי מטענים חשמליים הפוכים, והולידו בשכבת המים העליונה גבישי ארגוניט וגבס. אפשר להניח שערבוב מי השכבה התחתונה בשכבה העליונה אפשר יותר מפגשים כאלה במרכז האגם יחסית לקצותיו.

השינויים במליחות המים השפיעו ישירות על תפוצת האורגניזמים שחיו באגם בדרך הבאה: קרומי התאים ומנגנוני התאמה כימיים פועלים לווסת את כמות המים בתאים, ובכך קובעים את יכולתם לעמוד במליחות גבוהה (אורן, 2008). מאחר שיכולת זו שונה בין המינים, אנו יכולים ללמוד על אודות שינויי המליחות במי אגם הלשון מן השינויים בתפוצת האורגניזמים לאורך האגם (איור 8). נוסף על כך, ראינו לעיל שמליחות המים השפיעה גם על ערכי היחס בין נתרן לסידן בלמינות הארגוניט.

מן הדיון הזה עולה כי קיים הבדל בין השקעת ארגוניט וגבס כתוצרים ישירים של אידוי תמיסות לבין יצירתם באגם הלשון. במקרה הראשון התמיסה מכילה מלכתחילה את כל המרכיבים הדרושים לשקיעת ארגוניט וגבס מתוכה, ושקיעתם מתוך התמיסה תלויה רק בהגדלת ריכוזה של התמיסה ומליחותה עד לדרגת הרוויה הכימית הנדרשת לשם כך. לעומת זאת, מן ההרכב הייחודי של אגם הלשון נבע שיסודות אחדים היו מלכתחילה נפוצים יותר בשכבת המים התחתונה, ואילו אחרים הגיעו לאגם בנחלים ונכללו בשכבת המים העליונה. מכאן, שהשקעת גבישים אלה הייתה מותנית בחלקה, כאמור, בערבוב בין שכבות המים. בהקשר זה ניתן לראות באיור 8 שמליחותה של שכבת המים העליונה החלה לעלות בכיוון דרום רק דרומית מעמק בית שאן, אף על פי שהאגם השתרע עד הכנרת במשך כ-15,000 שנה. ניתן להסביר זאת על ידי ההנחה ששכבת המים התחתונה על מרכיביה המיוחדים לא הגיעה לאזור זה, אלא נותרה מדרום לסף הטופוגרפי הגבוה יחסית באזור השפך של ואדי מליח לאגם הלשון (איור 11ב). מסיבה זו, וגם עקב קרבתו למקורות המים המתוקים וממדיו הצרים, מליחות מי האגם בעמק בית שאן הייתה נמוכה.

סיכום

אגם הלשון התאדה לפני 14,000 שנים, ואיננו יכולים לבדוק את הרכב מימיו באופן ישיר. עם זאת, האגם הותיר אחריו את סלעי תצורת הליסאן, וניסינו להבין את משמעות הרמזים ששולחים אלינו מן העבר סמנים שונים המצויים בסלעים אלה. לשם כך נעזרנו בידע מתחומי הביולוגיה, הכימיה והפיזיקה, ונשענו על מחקרים שפורסמו במשך ארבעים שנה, שבמהלכן נוספו תצפיות שדה, שוכללו שיטות המדידה והועמקה ההבנה המדעית. מפסיפס הנתונים עולה תמונה הנסמכת על ארבעה סמנים ביולוגיים ונתמכת באופן איכותי על ידי ארבעה מדדים כימיים ומינרלוגיים. ההתאמה בין הנתונים – הן אלה שמקורם בתצורת הליסאן כולה הן אלה שמקורם בחלקה העליון בלבד, או אף בתקופה בת 2,000 שנה בחלקה הצעיר ביותר – מבססת את ההשערה מרחיקת הלכת, שאכן התקיים לאורך אלפי שנים הפרש גדול במליחותה של שכבת המים העליונה באגם הלשון בין מרכז האגם לקצותיו. ניסינו להסביר את השינויים המרחביים האלה בעזרת תהליכי האיזוי והערבוב במי האגם, אך יש לציין שהשפעת התהליכים האלה באגם הלשון אינה ברורה כל צורכה והפרשנות המוצעת כאן אינה שלמה.

בשנת 1948 יצא לאור ספרו של הגאולוג משה אבנימלך (1899-1971) "צפונות סלעי ארצנו". שם הספר, האופייני לתקופתו, יאה לתצורת הליסאן, המהווה ארכיב מגוון שהמתין בסבלנות רבבות שנים למפענחי צפונותיו. בעשורים האחרונים הניבה התצורה שלל מחקרים, שעלה מהם כי נרשמו בה כמעט ברציפות עקבותיהם של תהליכים שונים שהתרחשו באגם שהיא הורבדה בו ובסביבתו. מסלעי תצורת הליסאן למדנו על שינויים אטומיים בשדה המגנטי של כדור הארץ, על תדירותן של רעידות אדמה חזקות באזור ים המלח, על שינויים בתכולת הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה, על שינויי האקלים באזורנו ועל הקשר בינם לבין האקלים באזורים מרוחקים מאוד ממנו. כדי להבין נכונה את רישומן של תופעות אלה בסלעי תצורת הליסאן יש ללמוד את התהליכים שהתרחשו באגם, ואת המנגנונים שקבעו את הרכב הסלעים שהצטברו בו. מאה וחמישים שנה אחרי מסעו של הצעיר חד-העין לוואי לרטה לים המלח, "משקעי הלשון" שבחן עדיין אוצרים בקרבם ידע שטרם מוצה. תצורת הליסאן הצנועה תרמה רבות לידוע לנו על כדור הארץ, זיכתה תלמידים בתוארי מוסמך ודוקטור, והעניקה בנדיבות לחוקרים צעירים וותיקים – ובוודאי עוד תעניק להם – את חזות הגילוי המדעי.

תודות

אני מבקש להודות לאמתי כץ, ליהושע קולודני, לאברהם סטרינסקי ולעדי טורפשיין, חוקרים מובהקים של אגם הלשון וים המלח, על העידוד והעצה הטובה במהלך כתיבת המאמר.

אורן א'. 2008. 'חיים בים המלח - עבר, הווה ועתיד'. *מלח הארץ* 3: 71-85.

Begin Z.B., Nathan Y., and Ehrlich A. 1980. 'Stratigraphy and facies distribution in the Lisan Formation, new evidence from the area south of the Dead Sea, Israel'. *Israel Journal of Earth Sciences* 29: 182-189.

Begin Z.B., Stein M., Katz A., Machlus M., Rosenfeld A., Buchbinder B., and Bartov Y. 2004. 'Southward migration of rain tracks during the last glacial, revealed by salinity gradient in Lake Lisan (Dead Sea rift)'. *Quaternary Science Reviews* 23: 1627-1636.

Buchbinder B. 1981. 'Morphology, microfacies and origin of stromatolites of the Pleistocene precursor of the Dead Sea, Israel'. In: Monty C. (Ed.), *Phanerozoic Stromatolites*, Springer, Berlin, pp. 181-196.

Katz A., Kolodny Y., and Nissenbaum A. 1977. 'The geochemical evolution of the Pleistocene Lake Lisan - Dead Sea system'. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41: 1609-1626.

Rosenfeld A. and Vesper B. 1977. 'The variability of the sieve-pores in recent and fossil species of *Cyprideis torosa* (Jones, 1850) as an indicator for salinity and palaeosalinity'. In: Löffler H. and Danielopol D. (Eds.), *Aspects of Ecology and Zoogeography of Recent and Fossil Ostracoda*, Dr W. Junk, The Hague, pp. 55-67.

Stein M., Starinsky A., Katz A., Goldstein S.L., Machlus M., and Schramm, A. 1997. 'Strontium isotopic, chemical, and sedimentological evidence for the evolution of Lake Lisan and the Dead Sea'. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 3975-3992.

Torfstein A., Gavrieli I., Katz A., Kolodny Y., and Stein M. 2008. 'Gypsum as a monitor of the paleo-limnological-hydrological conditions in Lake Lisan and the Dead Sea'. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 2491-2509.

Torfstein A., Goldstein S.L., Stein M., and Enzel Y. 2013a. 'Impacts of abrupt climate changes in the Levant from Last Glacial Dead Sea levels'. *Quaternary Science Reviews* 69: 1-7.

Torfstein A., Goldstein S.L., Kagan E.J., and Stein M. 2013b. 'Integrated multi-site U-Th chronology of the last glacial Lake Lisan'. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 104: 210-231.