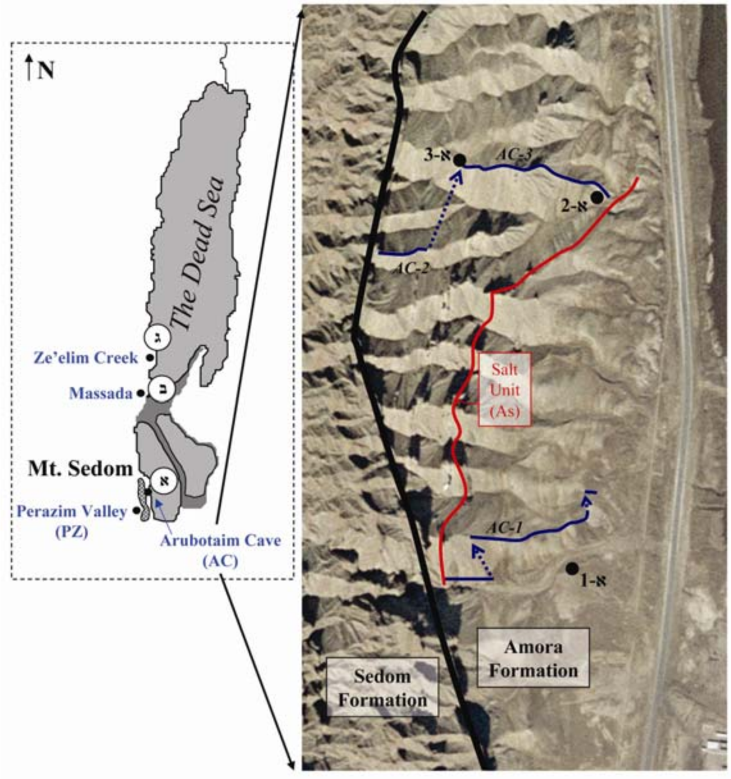
סיור מס' 6

פלאוסייסמולוגיה והתפתחות אגמית באגן ים המלח הרביעוני - מחקרים חדשים על תצורות עמורה, הלשון וצאלים

עדי טורפשטיין, אליסה קייגן, מרדכי שטיין, אמוץ עגנון
המכון הגיאולוגי והמכון למדעי כדה"א באוניברסיטה העברית

מהלך הסיור

בסיור זה נבקר במחשופי תצורת עמורה ליד מערת ארובותיים, מחשופי תצורת הלשון למרגלות מצדה ומחשופי תצורת צאלים בשפך נחל צאלים (איור 1). נתאר את החתכים הסטרטיגרפים, הטיפוסים הליתולוגים והשתרעותם המרחבית, ונדון בהסטוריה הגיאוכימית של גופי המים מהם שקעו הסדימנטים, תוך התמקדות במערכת הגפרית ובהקשריה להיסטוריה הפלאוהידרולוגית ופליאוקלימית. כמו כן נציג ממצאים חדשים ברקורד הפלאוסייסמי האגמי ונדון בהשלכות ממצאים אלה על תבנית התנהגות רעידות האדמה באגן ים המלח.



איור 1 – מפת תחנות הסיור. מימין, הגדלה של אתר מערת ארובותים, שם מתקיים חלקו הראשון של הסיור. יחידת המלח (As) בתצורת עמורה מודגשת באדום. הכיתוב AC-1,2,3 מציין את מיקום החתכים העמודיים.

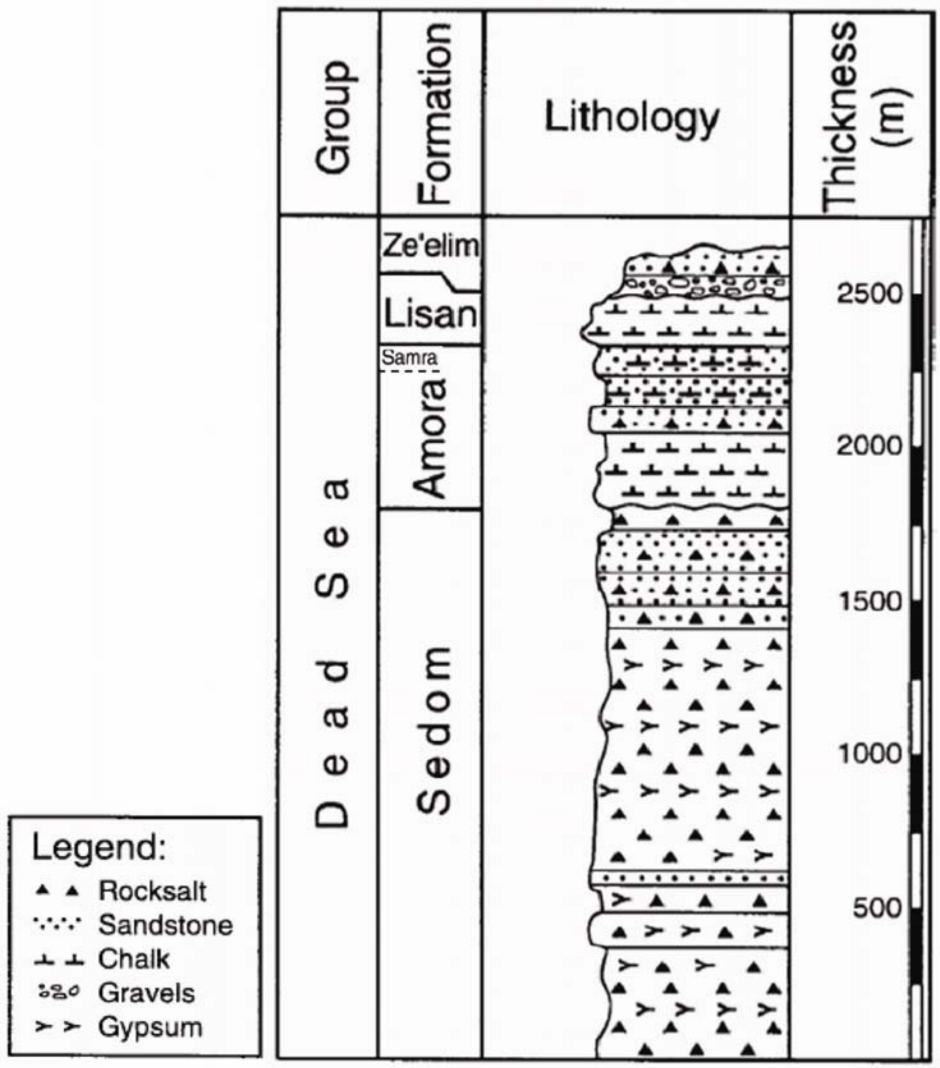
הקדמה

לאחר ניתוק לגונת סדום הפליוקנית מהים הפתוח התקיימו באגן ים המלח – בקעת הירדן מספר אגמים שהרכבם הכימי, מבנם, גובה מפלסם והשתרעותם המרחבית השתנו עם הזמן בהתאם לכמויות המים המתוקים והמלוחים שהוזנו לתוכם- שלכשעצמם משקפים את השינויים האקלימיים-הידרולוגים שעברו על אזורינו במהלך הרביעון. ברביעון העליון התקיימו באזור אגמי עמורה, סמרה, הלשון וים המלח ההולוקני, אשר מהם שקעו תצורות עמורה (~700-140 ka BP), סמרה (~140-80 ka BP) הלשון (~70-14 ka BP) וצאלים (הולוקן), בהתאמה (איור 2; זק, 1967; Neev & Emery, 1967 & 1995; Begin et al., 1974; Stein, 2001).

המאפיינים הסדימנטרים של כל תצורה הוכתבו על ידי התנאים האקלימיים-הידרולוגים שהתקיימו במהלך קיום כל אגם. למשל, בתקופות אקלימיות גשומות, כפי שהיה המצב בשיא תקופת הקרח האחרונה, אופיין אגם הלשון במפלסים גבוהים, עמודת מים היתה לרוב משוכבת ומינרלים אוופוריטים (ארגוניט, גבס) הושקעו בקצבים גבוהים יחסית. לעומת זאת, בתקופות יבשות יותר, מפלסי האגמים ירדו, עמודת המים היתה לעיתים מעורבבת, קצב השקעת ארגוניט וגבס פחת מאוד, והצטברו סדימנטים קלסטים ואף קלציט, כנראה פרימרי.

גופרית מופיעה בחתכים הסדימנטריים כגבס בשכבות מסיביות, כלמינות גבס וכן כנודולות גופרית בתוך סדימנטים מארחים. כמות הגבס בחתך וההרכב האיזוטופי של גפרית ביחידות גיבסיות ואחרות משקפים את מקורות וכמויות של המים הנכנסים ואת מבנה עמודת המים ולכן מדידת פרמטרים אלה מאפשרת את שחזור הסביבה הלימנולוגית-הידרולוגית. נושא זה יידון בהרחבה בסיור.

קצב ההשקעה הגבוה וכרונולוגית הזמן המפורטת שהושגה למשקעי אגם הלשון וים המלח ההולוקני, מאפשרים את שחזור השינויים הלימנולוגים ברזולוציה גבוהה. התרחשות רעידות אדמה הותירה חותם ייחודי בסדימנטים בדמות יחידות רסק וערבוב. שחזור זמני ההתרחשות והחזרה לצד עוצמת הרעידות מתאפשר מתוך החתכים ויידון בסיור.



איור 2 – חתך עמודי מוכלל של חבורת ים המלח. מעובד מתוך: זק (1967).

חלק א - תצורת עמורה

תחנה א-1 – מערת ארובותיים

1. כללי

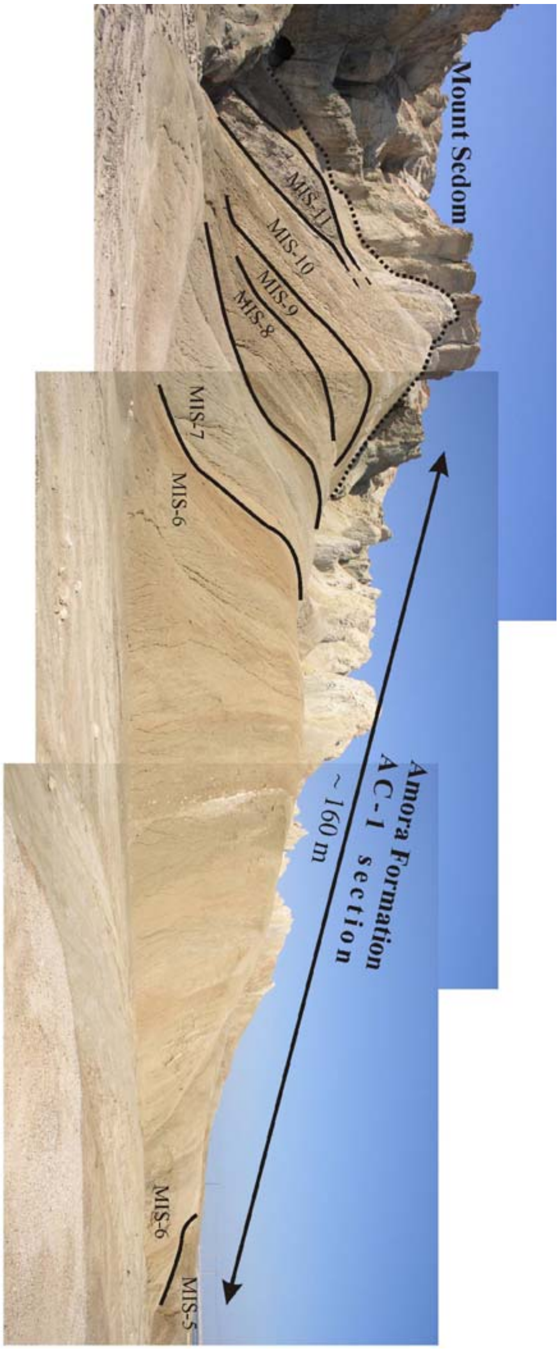
עמודת הסדימנטים ששקעה באגן ים המלח לאחר ניתוק לגונת סדום מהים הפתוח ולפני תקופת הקיום של אגם הלשון (70-14 ka BP) ואשר חשופה באזור הר סדום, בעיקר לאורך

שוליו המזרחיים, הוגדרה על ידי זק (1967) כתצורת עמורה. תצורת עמורה היא יחידה כרונוסטרטיגרפית שכוללת (כפי שנראה בסיור) תת-יחידות ליתולוגיות-אגמיות שונות שיכולות לשקף מספר מחזורים אקלימיים-אגמיים ויתכן שיהיה צורך בעתיד לחלק את התצורה לתת יחידות נוספות. תצורת סמרה, החשופה באזורים אחרים בבקע, מוגדרת כיחידה כרונוסטרטיגרפית המכסה את פרק הזמן שבין 140 ועד 80 ~ אלפי שנים לאחור (התקופה הבין-קרחונית האחרונה; Waldmann, 2002).

תצורת עמורה מונחת באי התאמה על תצורת סדום הפליוקנית. עובייה המקסימלי במזרח הר סדום הוא 400~ מטרים ומרכיביה הליתולוגיים העיקריים הם: ארגוניט ראשוני למינרי המופיע ברצפים עם למינות של דטריטוס סילטי (alternating aragonite-detritus; “aad”), חווארים משוכבים, שכבות גבס ואנהידריט ויחידות חול וקונגלומרט. החתך הסדימנטרי של תצורת עמורה הורם והוטה על ידי דיאפיר המלח הבונה את ליבו של הר סדום כך שכיום שכבות התצורה ניצבות אנכית לאורך שוליו המזרחיים של הר סדום (איור 3). תצורת עמורה חולקה על ידי זק (1967) לחמישה פרטים (טבלה 1). באתר מערת ארובותים נחשף טור סדימנטים בעובי כולל של 320~ מטרים (איור 1).

שם וסימון הפרט	עובי	הרכב	גיל מוערך	הערות
חוואר, קרטון וחול (Ams)	+45	חואר, aad, חול, אנהידריט, קונגלומרט	צעיר מ- 200 אלפי שנים, כנראה שקע במהלך MIS6	ככל הנראה רק בסיס הפרט חשוף ליד מערת ארובותיים והיתר בצפון הר סדום
חוואר (Am)	160	aad, חוואר, אנהידריט וגבס, חול, גפרית, מעט הליט	380-190~ אלפי שנים (ייתכן כי גג הפרט צעיר יותר), שקע במהלך MIS10 to 6	
מלח (As)	6	הליט מסיבי, חוואר	400~ אלפי שנים, שקע במהלך MIS11	
חוואר ואנהידריט (Ama)	60	חוואר, אנהידריט וגבס, aad	500-430~ אלפי שנים, שקע במהלך MIS13-12	
חוואר, חול וקונגלומרטים (Amc)	+100	חוואר, חול, אנהידריט, aad, קונגלומרט, הליט	750-500~ אלפי שנים, שקע במהלך MIS20-19 to 14-13	מונח באי התאמה על פרט פצלי לוט של תצורת סדום

טבלה 1 - החלוקה לפרטים ותאורם בתצורת עמורה. ככלל, התצורה מורכבת 40% קרבונטים, 19% קלציום-סולפאטים, 18% הליט (זק, 1967). גילי הפרטים מתוך תוצאות העבודה הנוכחית.



איור 3 - חתך מזרח-מערב של תצורת עמורה ליד מערת ארובותים (AC-1). ניתן להבחין בשכבות הניצבות ביחס לאופק והשעונות על הר סדום. מוצגים המעברים בין שלבים איזוטופים מרינים.

2. *תיארוך תצורת עמורה וקורלציות רגיונליות*

תארוך תצורת עמורה באתר זה מתבסס על שילוב בין מספר שיטות:

1. שימוש בסדרות אורניום: גילי ^{230}Th-^{234}U בלמינות ארגוניט ראשוני (בהתאמה למתודה שפותחה לארגוניטים של תצורת הלשון ע"י- Haase-Schramm et al. (2004)). בנוסף, יחסי האקטיביות הראשוניים של $^{234}U/^{238}U$ שחושבו מתוך מדידות ארגוניט בתצורות הלשון וצאלים מראים ערך הומוגני וקבוע בזמן (1.50 ±0.04). על בסיס זה, חושבו גילי למינות ארגוניט בחתך עמורה, כאשר הטווח האפשרי שנבחר ליחסי אקטיביות ראשוניים הינו 1.4 עד 1.6.

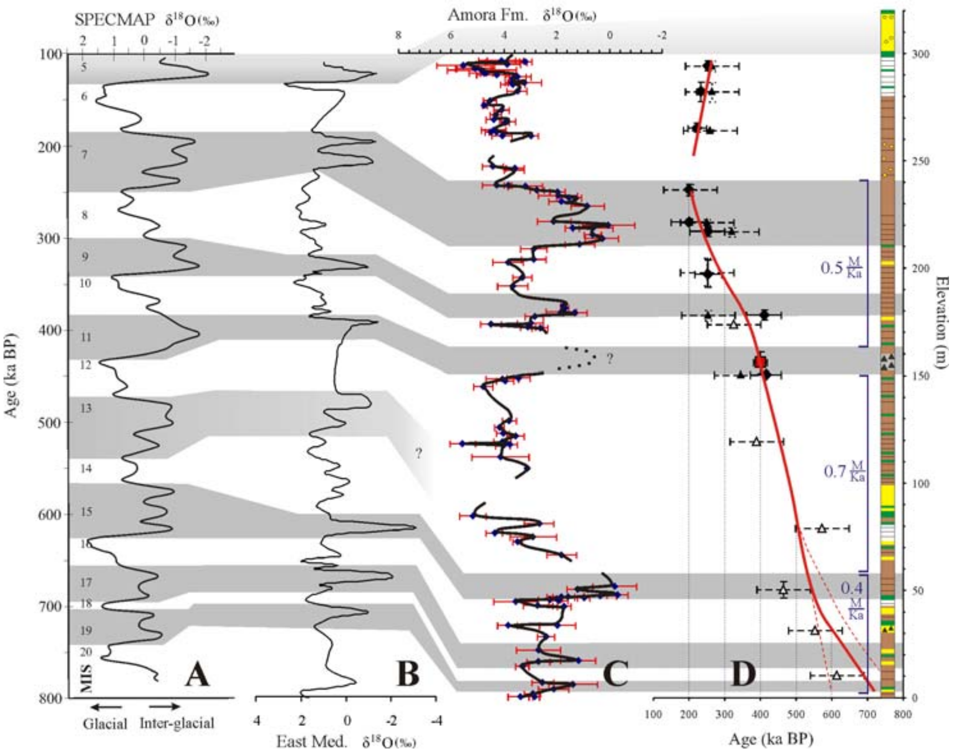
2. איזוטופים של חמצן: התאמת שינויים בערכי $\delta^{18}O$ בלמינות ארגוניט לאורך החתך לשינויים אזוריים ועולמיים. הוצע כי מגמות השינוי בהרכב $\delta^{18}O$ בארגוניט בתצורות הלשון וצאלים משקפות בעיקר שינויים בהרכב המקור, קרי מי הים התיכון (Kolodny et al., 2005). לפיכך, עקומת השינויים בהרכב האיזוטופי של חמצן במי הים התיכון מספקת אמצעי תארוך בלתי תלוי לארגוניטים הפרימריים ששקעו מאגמי הבקע.

3. פלאומגנטיזם: נתונים פלאומגנטים מצביעים על סיגנל מגנטי נורמלי בסדימנטים כלומר, מגבילים את גיל בסיס החתך החשוף להיות צעיר מההיפוך המגנטי האחרון שאירע לפני 780 אלפי שנים (ווינברגר, 1992; Torfstein et al., 2005a).

שילוב נתונים אלו וגילי המודל של תצורת עמורה מוצגים באיור 4 (Torfstein et al., 2006).

גיל הסדימנטים בבסיס החתך נקבע לסביבות 700 (±80) אלפי שנים טרם זמנינו, במהלך שלבים איזוטופים מרינים (Marine Isotope Stages) MIS20-16. החתך הסדימנטרי בתקופה זו (פרט Amc בבסיס החתך) מאופיין בתכולה גבוהה של יחידות קלסטיות דקות וגסות. לאחר מכן, החתך מאופיין בחילופין בין חווארים, אנהידריט ו- aad (פרט Ama) ומעליו פרט המלח (As) בבסיס חתך AC-1.

גיל פרט Am (שמרכיב את השלוחה הצמודה מצפון למערת ארובותיים) נע מ- 380~ (MIS10) בבסיסו עד כ- 190 אלפי שנים לפני ההווה (MIS6). פרט נוסף של תצורת עמורה כמעט אינו חשוף כאן ותועד בצפון הר סדום (זק, 1967). נראה כי גיל פרט זה צעיר מ- 190~ אלפי שנים. מרכיביו הליתולוגים מרמזים על שינוי אקלימי ברור, כלומר ייתכן שהוא שקע במהלך MIS5, דהיינו תקופת ההשקעה של תצורת סמרה. תצורת סמרה עצמה חשופה בצידו המערבי של הר סדום (בנחל פרצים ונחל סדום; ולדמן, 2003).



איור 4 - גרף קליברציה של הכרונולוגיה של תצורת עמורה. A. שינויים בערכי $\delta^{18}O$ מרינים גלובלים (Imbrie et al., 1984 ;SPECMAP), B. שינויים בערכי $\delta^{18}O$ בגלעין ממזרח הים התיכון (Kroon et al., 1998), C. גרף שינויי $\delta^{18}O$ בתצורת עמורה, D. גילי U-Th ו- U-U בחתך תצורת עמורה. קו אדום מציין את התאמת גיל-גובה הסבירה ביותר לחתך (הקווים המקווקוים מתארים את אי הודאות לגבי התאמה זו בבסיס החתך). בחלק הימני של גרף D מוצגים גם קצבי סדימנטציה מחושבים לחלקים שונים בחתך וכן חתך עמודי מוכלל.

מקרא לגרף גילים (D): מעויין שחור- גילי U-Th מתוקנים למרכיב הדטריטי; משולש שחור- גילי U-U לערכים מתוקנים למרכיב דטריטי; משולש אפור- גילי U-U לערכים מדודים (פרטים נוספים בטקסט). מקרא לחתך העמודי (חלק ימני של D): צהוב- קלסטי; חום- חוואר; ירוק- גבס או אנהידריט; משולש שחור- הליט; קווים אופקיים (על רקע לבן או חום)- aad.

3. פרט המלח, בסיס חתך AC-1 והמגע עם תצורת סדום

בסמוך למערת ארובותיים נחשפת יחידת מלח עבה (6~ מטרים) המצוינת בטבלה 1 כפרט המלח (As). היחידה מהווה סמן סטרטיגרפי בולט במרכז מחשופי תצורת עמורה במזרח הר סדום. בתחנה זו, פרט המלח מופיע בניצב לאופק, כ-15 מטרים מעל (סטרטיגרפית) מישור העתק המחדר של הר סדום (איור 3).

פרט המלח מורכב בעיקר משכבות הליט מסיביות (0.5~ מטרים כ"א) המופרדות זו מזו על ידי אופקים דקים של חוואר חום.

הפרט שקע במהלך שלב איזוטופי 11 (400,000~ שנים טרם זמנינו). גיל זה נקבע בעזרת תארוך למינות ארגוניט מעל ומתחת המלח בשיטת U-Th, תוך שילוב עם גרף שינויי $\delta^{18}O$ בלמינות ארגוניט לאורך תצורת עמורה (איור 4). יחידת מלח עבה בשולי אגן ים המלח מופיעה גם בבסיס תצורת צאלים ההולוקנית (Migowski et al., 2004 & 2006; Yechieli et al., 1993). ייתכן שהתנאים האקלימיים ששררו בשלבים איזוטופיים 11 ו-1 באיזור ים המלח היו דומים מאוד, כפי שעולה גם מדמיון בין שלבים אלה ברקורד הגיאולוגי העולמי. יחידת המלח בבסיס ההולוקן שקעה לאחר ארוע התייבשות משמעותי של אגם הלשון (שטיין, 2007).

4. חתך AC-1 (השלוחה הקרובה למערת ארובותיים)

הטיפוסים הליתולוגים הבולטים בחתך הם: חילופים בין למינות ארגוניט ודטריט, שכבות גבס או אנהידריט, יחידות חוואריות, מעט חולות דקים ונודולות גפרית אלמנטרית. האחרונים מופיעים באופן מרוכז לאורך כ-20 מטרים (בגובה 250~ מטרים) בחתך, שם הם מהווים מרקר סטרטיגרפי החופף את המעבר בין MIS7 ל- MIS6. כאמור, מופעים של מינרלי קלציום-סולפאט אינם מוגבלים לגבס בלבד אלא כוללים גם אנהידריט. מוצע כי גבס פרימרי שקע מעמודת המים אך עבר לעיתים דה-הידרציה כתוצאה מקבורתו בעומק, והפך לאנהידריט. אותם תהליכים לוו גם בגיבוש מחדש לגבישים תאומים גסים, גבישי "זנב סנונית".

בגובה 300 מטרים מתחלף החתך האגמי הטיפוסי (ארגוניט, חוואר, גבס) בחתך קלסטי (חוואר, חולות, קונגלומרט, גבסים) שצבעו אדמדם. גג החתך מכוסה רכסי חוף הולוקנים היושבים ב- onlap על גבי השכבות הנטויות של תצורת עמורה. תיארוך רדיוקרבון של שרידי עצים שנמצאו בתוך הסדימנטים של רכס החוף הניב גיל של 1,400 שנים לפני ההווה (Migowski et al., 2006) והוא מציין את העלייה המירבית האחרונה של ים המלח ההולוקני. לאחר מכן נסוג הים לסביבות 390-400 מטרים מתחת לפני הים לפני שהחל בנסיגתו המודרנית – רובה ככולה בהשפעת מעשי האדם.

ההיסטוריה של התרוממות תצורת עמורה השפיעה על רציפות המחשופים הנוכחיים. ביחידות רבות ניתן להבחין בהעתקים אופקיים-ימניים עם זריקה של עד מספר מטרים. תופעה זו בולטת ביחידות גיבסיות וקיימת בקנה מידה גדול יותר, במעבר משלוחה לשלוחה כלפי צפון.

תחנה א-2 – חתך AC-3 (ליד פרט המלח)

נטיית שכבות תצורת עמורה אנכית בקרבת העתק המחדר אך ככל שהן רחוקות יותר ממנו נטייתן מתמתנת עד שבקרבת הכביש היא מגיעה ל- 45^o לכיוון מזרח.

בחינה של יחידת המלח במצב נטוי מגלה כי היא עברה המסה וגיבוש מחדש עד כי לא ניתן לזהות כמעט את כיוון השכבות. נראה כי בנקודה זו, אירעה גם קריסה חלקית של השכבה (כתוצאה ממצבה הנטוי) שתוצאתה עיבוי ניכר של מחשוף המלח.

בתצפית לכיוון דרום מערב אנו מזהים שתי יחידות סטרטיגרפיות בולטות בחתך: הרכבן חילופין בין אנהידריט, aad וחולות (להלן "הכרבולות"). בסיס הכרבולות מציין את המעבר מהפרט הקלסטי התחתון של תצורת עמורה (Amc) לפרט החוואר והאנהידריט (Ama).

תחנה א-3 – בסיס תצורת עמורה בקרבת המגע

התחנה ממוקמת בקרבת המעבר בין חתך AC-2 ל- AC-3, בגובה סטרטיגרפי של כ- 50 מטרים, וצפה דרומה. גיל הסדימנטים בתחנה זו הוא כ- 600 אלפי שנים, או מעט יותר, כלומר החלק המוקדם של MIS15.

ההבדלים בכיווני השכבות משני צידי העתק המחדר ניכרים היטב- ממערב, פצלי לוט (תצורת סדום) נטויים קלות מערבה (מאחוריהן טור חולות עבה מאותו פרט), וממזרח, שכבות אנכיות של בסיס תצורת עמורה. השכבות הקרובות למישור ההעתק מופרעות יחסית לשכבות הרחוקות ממנו. בנוסף, נטיית השכבות הולכת ומתמתנת לכיוון מזרח.

בתחנה זו ניתן להבחין בהפרעות הסטרוקטורליות בחתך עמורה: שברים ימניים הניכרים בדרגשי גבס, ושגורמים לשינויי עובי לטרלים של השכבות.

ככלל, פרט Amc, הנמוך בחתך, הוא בעל מאפיינים שונים מהסדימנטים מעליו. הוא עתיר יחידות קלסטיות, חלקן גסות ועבות (עד 10 מטרים של חול וקונגלומרט) וערך $^{234}U/^{238}U_{(i)}$ במי האגם היה כנראה יותר רדיוגני מאשר בתקופות צעירות יותר. נדון בסיבות אפשריות לשינוי זה.

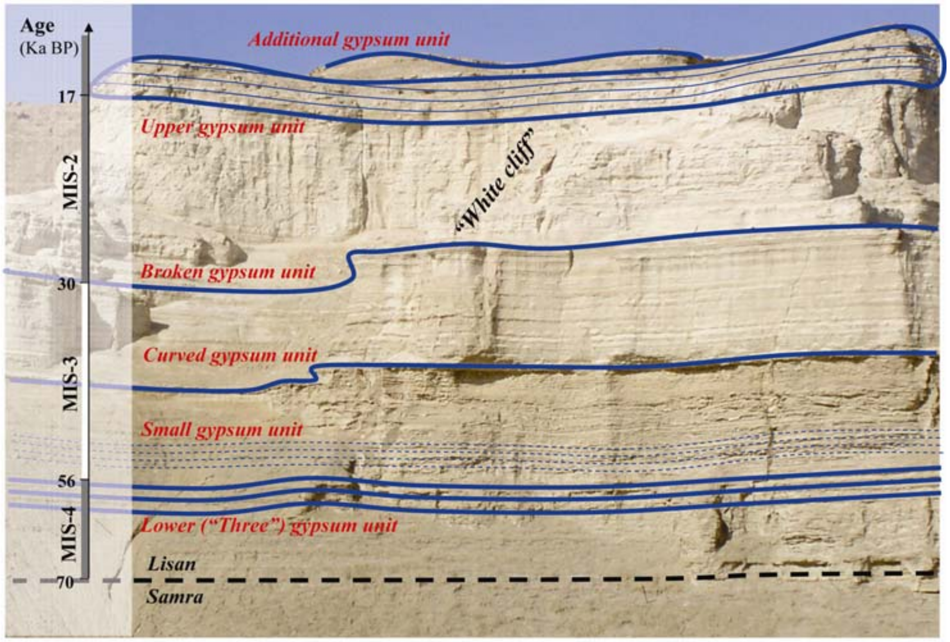
חלק ב – תצורת הלשון

תחנה ב-1 – חתך מצדה-1 (M-1)

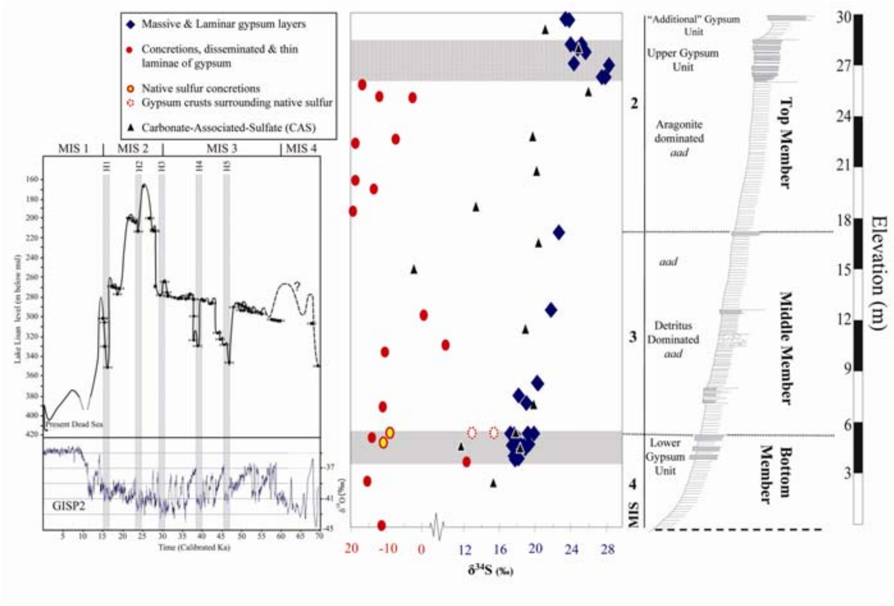
תצורת הלשון הנחשפת למרגלות האתר הארכאולוגי של מצדה נחלקת לשלושה פרטים (איורים 5,6): 1. פרט תחתון (~70-57 ka BP) – חבילת aad ובראשה רצף של שלוש שכבות גבס ("שלושת הגבסים"), 2. פרט תיכון (~57-30 ka BP) – aad שבו הפרקציה הדטריטית מועשרת יחסית, מופיעות מספר שכבות גבס ויחידת קונגלומרט שמתאצבעת לתוך יחידה סדימנטרית מופרעת (Convolute) , 3. פרט עליון (~30-14 ka BP) – רצף aad ("המצוק הלבן"), מעליו יחידת גבס עבה ("הגבס העליון") ומעליה כמטר וחצי של aad וגבס.

החלוקה לפרטים דומה לחלוקה לפרטים בחתך בנחל פרצים (Machlus et al., 2000). עובי תצורת הלשון במצדה 30~ מטרים, כ-8 מטרים פחות מנחל פרצים וזאת למרות רצף סטרטיגרפי כמעט מלא (לעומת אי התאמה של כ- 8,000 שנים בחתך בנחל פרצים). דבר זה משקף את מיקומו העמוק יחסית של החתך באגם (374 mbsl ; Waldmann, 2002) ואת התכולה הנמוכה יחסית של חומר דטריטי הנוטה "לעבות" את החתך.

שקיעת למינות ארגוניט ודטריט שעוביין 1-2 מ"מ מיוחסת להשקעה עונתית של חומר דטריטי דק שנשטף לאגם בחורף. הארגוניט מתגבש ושוקע מחלקו העליון של גוף המים בשלב מאוחר יותר בשנה. קצב ההשקעה הגבוה של הארגוניט מתאפשר הודות לאספקת בי-קרבונט (לאגם המדולדל במרכיב זה) על ידי מי שטפונות ונחלים.



איור 5 - חתך מצדה (M-1). שכבות הגבס הפרימרי בחתך מודגשות בכחול ושמות השדה שלהם מופיעים באדום.



איור 6 - ההרכב האיזוטופי של גפרית ($\delta^{34}S$) בחתך תצורת הלשון במצדה. משמאל, עקומת מפלסי האגם ב-70 אלפי השנים האחרונות והתאמתה לאירועים גלובלים (עקומת שינויי $\delta^{18}O$ בגרינלנד (GISP) ואירועי היינריך (H), מתוך: Bartov et al., 2003).

נושאים עיקריים שיוצגו בתחנת חתך M-1

- הופעת גבס ומערכת הגופרית באגם הלשון (מבוסס על עבודותיהם של ע. טורפשטיין, א. גבריאלי, א. כץ, י. קולודני ומ. שטיין)
- סדימנטציה שנתית בפרט העליון של תצורת הלשון ותדירויות אקלימיות (מבוסס על עבודותיהם של ס. פרסאד, ס. גולדשטיין, נ. וולדמן, י. נגנדנק ומ. שטיין)
- הופעת ברקציות סדימנטריות והומוגניטים המיוחסים לפעילות סייסמית (מבוסס על עבודותיהם של א. קגן, ש.מרקו, א. עגנון ומ. שטיין)

1. הופעת גבס ומערכת הגפרית באגם הלשון

לאורך החתך ניתן לזהות מספר טיפוסים ליתולוגים המכילים גפרית (איורים 6,7): (1) שכבות גבס בעובי של 10-20 ס"מ, היוצרות דרגשים בולטים בנוף. לעיתים השכבות בעלות מופע מסיבי (דוגמת השכבה המרכזית מבין שלושת הגבסים) ולעיתים הן מורכבות חילופין בין למינות גבס, דטריט ומעט ארגוניט (דוגמת שתי השכבות הקיצונית בשלושת הגבסים). הרכבן האיזוטופי ($\delta^{34}S$) הוא בטווח 17-28‰, (2) גבס משני המופיע כלמינות דקות או "פרחי" (נודולות) גבס בתוך חבילות aad (בעיקר בפרקציה הדטריטית). הופעת גבס זה בדרך כלל מלווה בהסטה של האופקים הסובבים, כלומר היווצרותו מאוחרת להשקעת הסדימנטים המארחים. הרכבו האיזוטופי, כמו גם של גבס המאותר בפרקציה של מלחים מסיסים בלמינות ארגוניט הוא נמוך ונע בטווח 10‰ עד ‎-20‰, (3) גפרית אלמנטרית המופיעה בדרך כלל כנודולות בקוטר של עד 5 ס"מ. הגפרית נצפית באזורי aad ובתוך שכבות גבס. לעיתים, מופיעה גפרית אלמנטרית גם בתוך פרחי גבס גדולים. הרכבה האיזוטופי דומה לקבוצה הקודמת (כ-‎-10‰), (4) מאגר גפרית נוסף, קטן מבחינה כמותית ולא נראה בשדה, הוא הסולפאט הנמצא כיסוד קורט בתוך הארגוניט. ריכוזו הממוצע 5,000 ppm והרכבו האיזוטופי ‎-2‰ עד 26‰.

סיכום הכמויות המדודות והמחושבות וההרכבים האיזוטופים של הגפרית בחתך מצדה מופיע בטבלה 2.

	שכבות גבס פרימרי	פרקציות קלות איזוטופית	סולפאט בארגוניט	סיכום
תכולת סולפאט (g/cm^2)	214 (±40)	135 (±90)	10	359 (±130)
הרכב איזוטופי ממוצע (‰)	23.4	-15	~17	
הרכב איזוטופי ממוצע: 10.7 ‰ (±5)				

טבלה 2 - סיכום התכולה וההרכב האיזוטופי של גפרית (מנורמל לסולפאט) בחתך תצורת הלשון המצדה. הערכים בסוגריים מציינים את טווח הטעות המשוקלל הנובע מאי הוודאות במדידת עוביים ובהערכת תכולת סולפאט בפרקציות השונות.

בתקופות של מאזני מים חיוביים התפתחו באגם גוף מים עליון מהול יחסית ותמלחת תחתונה שבה הניתוק מהאטמוספירה הביא להתפתחות תנאים מחזרים. בתקופות של מאזן מים יציב או שלילי, עמודת המים כולה התערבבה והתחמצנה. עיקר מקור הגפרית לאגם, שהרכב מימיו היה קלציום-כלורידי, היה סולפאט במי גשם, נחלים, שטפונות ומעיינות מים מתוקים שנכנסו לאגם. הרכבו האיזוטופי הממוצע של סולפאט זה היה כ- 10‰, ועל כן לאורך זמן, הרכב הסולפאט בגוף המים העליון באגם שאף להרכב זה. מאידך, התנאים המחזרים שהתפתחו בגוף המים התחתון אפשרו חיזור (בתיווך בקטריאלי) של סולפאט לסולפיד (איור 7). לתהליך זה שתי השלכות: 1. פרקציונציה איזוטופית חזקה בין הסולפיד לסולפאט השאריתי (~30‰), 2. קיבוע סולפיד בלתי מסיס בסדימנטים לעומת העשרת התמיסה בסולפאט מועשר איזוטופית. לאורך זמן, תהליך זה הביא להעשרה ניכרת של ההרכב האיזוטופי של סולפאט בתמלחת התחתונה (40‰ ויותר; Torfstein et al., 2005b).

ריכוזי קלציום גבוהים באגם גרמו לכך שריכוז הקלציום כמעט לא הושפע מתהליכי גיבוש והשקעה אלא בעיקר ממיהול עמודת המים. לכן, בגוף המים העליון המהול יותר היו ריכוזי הקלציום נמוכים מריכוזיהם בתמלחת התחתונה. ריכוזים אלו השליכו גם על יכולת התמיסה להכיל סולפאט: ככל שריכוז הקלציום גבוה יותר, כך כמות קטנה יותר של סולפאט מספיקה כדי להביא את התמיסה לעל רוויה לגבס.

לפיכך, באירועי ערבוב של עמודת המים (כתוצאה ממעבר למשטר אקלימי יבש יותר) אירעה שקיעה נרחבת של גבס (גוף מים עליון, עשיר יחסית בסולפאט ועני בקלציום, התערבב עם גוף מים תחתון בעל תכונות הפוכות). הרכבו האיזוטופי של גבס זה, המופיע כשכבות גבס בחתך, מייצג את הערבוב היחסי בין שני מאגרי הסולפאט שהוצגו.

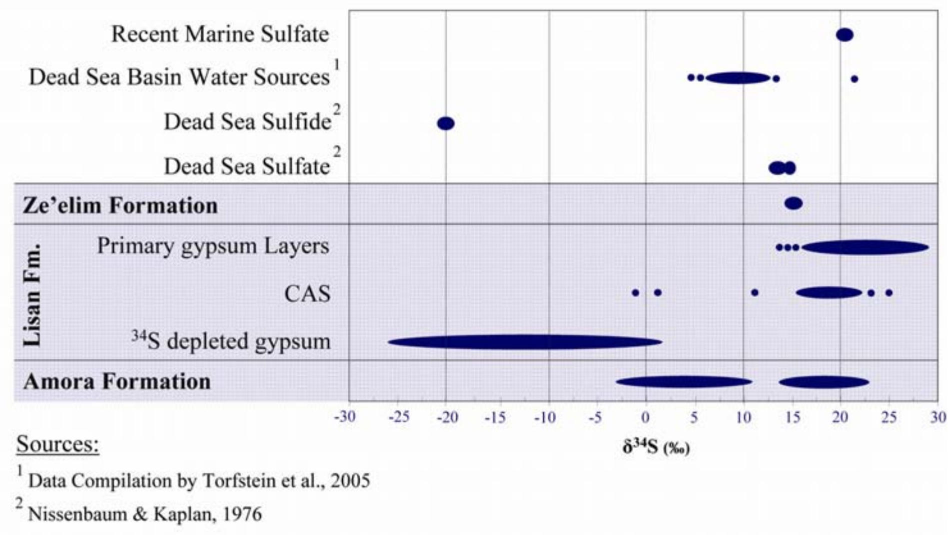
מאידך, הפרקציה הסולפידית, המדולדלת איזוטופית, נותרה מקובעת בסדימנטים. בהמשך סולפידים אלו חומצנו באופן חלקי לגפרית אלמנטרית או באופן מלא לסולפאט שבהמשך התגבש לכדי גבס. תהליך החמצון אינו מלווה בפרקציונציה איזוטופית ועל כן הסימון האיזוטופי הקל נשמר. החמצון התרחש לאורך זמן. ראשיתו זמן קצר לאחר ההשקעה, כאשר מפלס המים אפשר קיום בקטריות מחמצנות סולפיד בסדימנטים, והמשכו מאוחר יותר, לאחר נסיגת האגם וחשיפת החתך לאטמוספירה.

למרות זאת, מגבלת מסיסות גבס במים דמויי מי אגם הלשון (בתנאי קיצון, ריכוז הסולפאט המירבי האפשרי הוא 3,000 mg/l; Torfstein et al., 2005c & 2007) מכתיבה כי עוביו המירבי של גבס ששוקע מהאגם במהלך אירוע בדיד מוגבל ל- 20-30 ס"מ. נתון זה אינו תואם לעובי המצטבר של הגבס (עובי יחידת הגבס העליון במצדה, 85-100 ס"מ).

מוצע כי שינויי מפלס האגם לוו בתהליך נדידת תמלחות אל ומתוך הסדימנטים הרדודים בבקע ים המלח. במפלסי אגם גבוהים, תמיסות אגמיות עשירות סולפאט חלחלו לסדימנטים. עם ירידת המפלס ונסיגת האגם, תמיסות אלו נוקזו חזרה לכיוונו. ריכוזי סולפאט גבוהים בתמיסות אלו, והרכבים איזוטופים ששיקפו את המים מהם הם נגזרו (בעיקר המים העליונים באגם) ואשר הושפעו באופן מוגבל מתהליכי חיזור בקטריאלי בסדימנטים, אפשרו אספקה של כמויות גדולות של סולפאט כבד איזוטופית לאגם בפרק זמן קצר.

אישוש לקיום תהליכים אלה מתקבל מעבודתם של .Gavrieli et al (2001), אשר דיווחו על קיומן של תמיסות עשירות בסולפאט כבד איזוטופית בסדימנטים רביעוניים רדודים באזור ים המלח ושיערו כי ייתכן שמקורן במי אגם עתיקים יותר שחלחלו בעבר לסדימנטים.

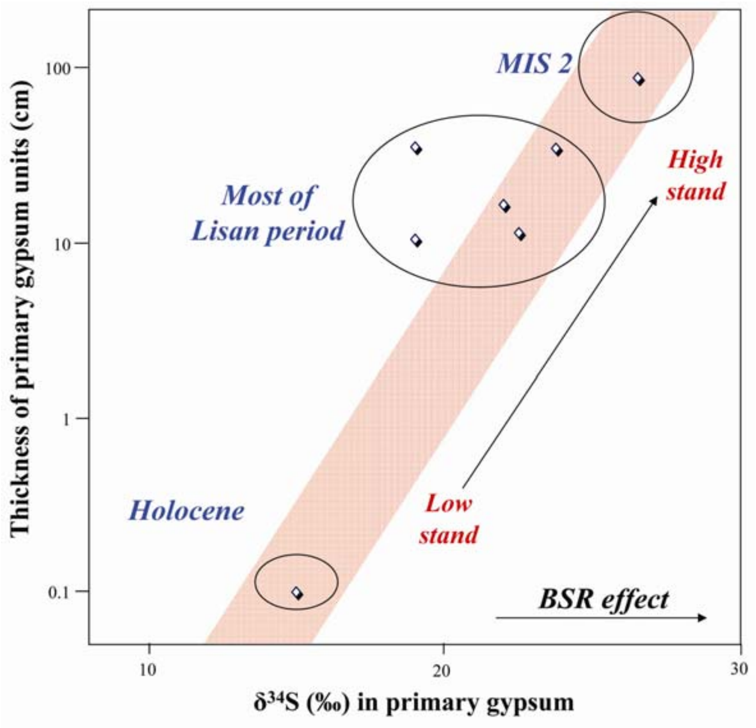
כאמור, בתקופות משוכבות הסולפאט הצטבר בעיקר במים העליונים ששטח השתרעותם היה גדול, אך שקיעתו כגבס פרימרי התרחשה על פני שטחים קטנים יותר (כפי שמלמדת החלוקה לפאציסים מרחביים של .Begin et al (1974)). לפיכך, חלק מהעובי ה"עודף" של הגבס נובע גם מתהליך זה.



איור 7 - ההרכב האיזוטופי של גפרית ($\delta^{34}S$) בסדימנטים ותמיסות בבקע ים המלח. הערכים המיוחסים לתצורת הלשון מבוססים על דגימות חתכים בנחל פרצים, נחל מור, מצדה, נחל משמר, בית הערבה ודיר-שמאן.

<u>מערכת הגפרית באגמי עמורה, הלשון וים המלח:</u> מופעי הגפרית והרכבם האיזוטופי בתצורות עמורה והלשון דומים מאוד זה לזה בהבדל אחד בולט והוא הופעה של שכבות אנהידריט בתצורת עמורה (ראו תחנה א-1). לעומתם, תצורת צאלים ששקעה מים המלח ההולוקני, היא בעלת מאפיינים שונים: כמויות קטנות יחסית (למינות) של גבס פרימרי, לצד גבס בפרקציית מלחים מסיסים. הרכבם האיזוטופי אחיד: (±0.7) 15‰ (,.Torfstein et al 2007). בנוסף, דווח על נוכחות פרקציות ברזל-סולפיד קלות איזוטופית בתצורת צאלים (Oldenburg et al., 2000; Ron, 2006). הכמויות המצומצמות של הגבס והרכבו ההומוגני והנמוך יחסית לגבס הפרימרי בתצורות עמורה והלשון, נובעות ממפלסי אגם נמוכים ששררו לאורך ההולוקן. המפלסים הנמוכים הובילו לערבוב תכוף יותר של עמודת המים שגרר את חמצונם והגביל תהליכי חיזור. בנוסף, שינויי המפלס המוגבלים מנעו נדידה משמעותית של תמיסות מהאגם לסדימנטים ולהיפך, ובכך הוגבלה פעילותו של מנגנון נוסף של יצירת שכבות גבס בחתך הסדימנטרי. באותו אופן נמנעה ההשפעה של שינויי שטח האגם.

מסתבר אם כן, כי עוביין והרכבן האיזוטופי של יחידות גבס פרימרי משקפות את התנאים ההידרולוגים-אקלימיים ששררו לפני ותוך כדי השקעתן. תקופות רטובות ושינויי מפלס גדולים מיוצגים על ידי שכבות עבות עם הרכב איזוטופי כבד, דוגמת הגבס העליון ששקע בשלהי MIS2. לעומת זאת, בתקופות יבשות, קיומו של גוף מים נמוך שבו שינויי המפלס מוגבלים, נרשם על ידי הופעת שכבות דקות יותר של גבס פרימרי בעל הרכב איזוטופי קל יחסית (איור 8). על כן, תכונות הגבס הפרימרי משמשות ככלי עצמאי לשחזור ההיסטוריה הלימנולוגית של גוף מים בבקע ים המלח. על בסיס זה מוצע, כי במהלך תקופת קיומו, לא היתה באגם עמורה תקופה רטובה יותר מ- MIS2 וכי על פי רוב, היו תנאי האגם דומים לאלו של אגם הלשון הנמוך (MIS4,3). במובן זה, אירוע השקעת פרט המלח (As) היה חריג.

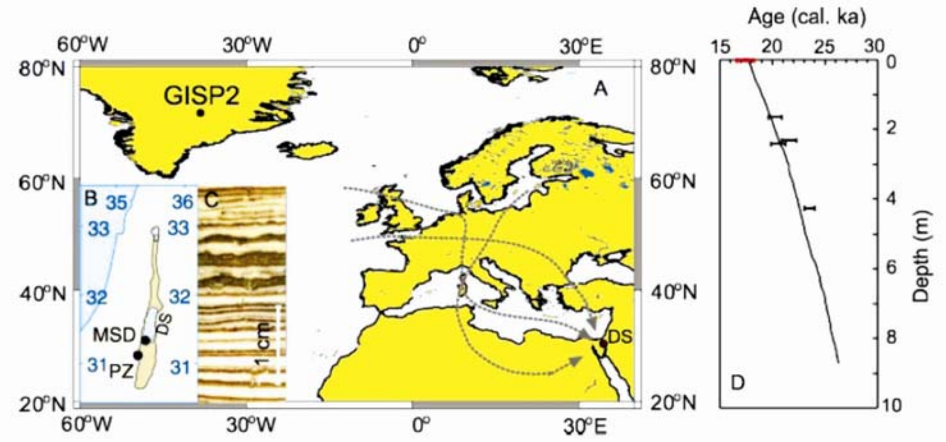


איור 8 - ההרכב האיזוטופי ($\delta^{34}S$) והעובי של יחידות גבס פרימרי בתצורת הלשון, וההתאמה לתנאים הלימנולוגים-אקלימיים.

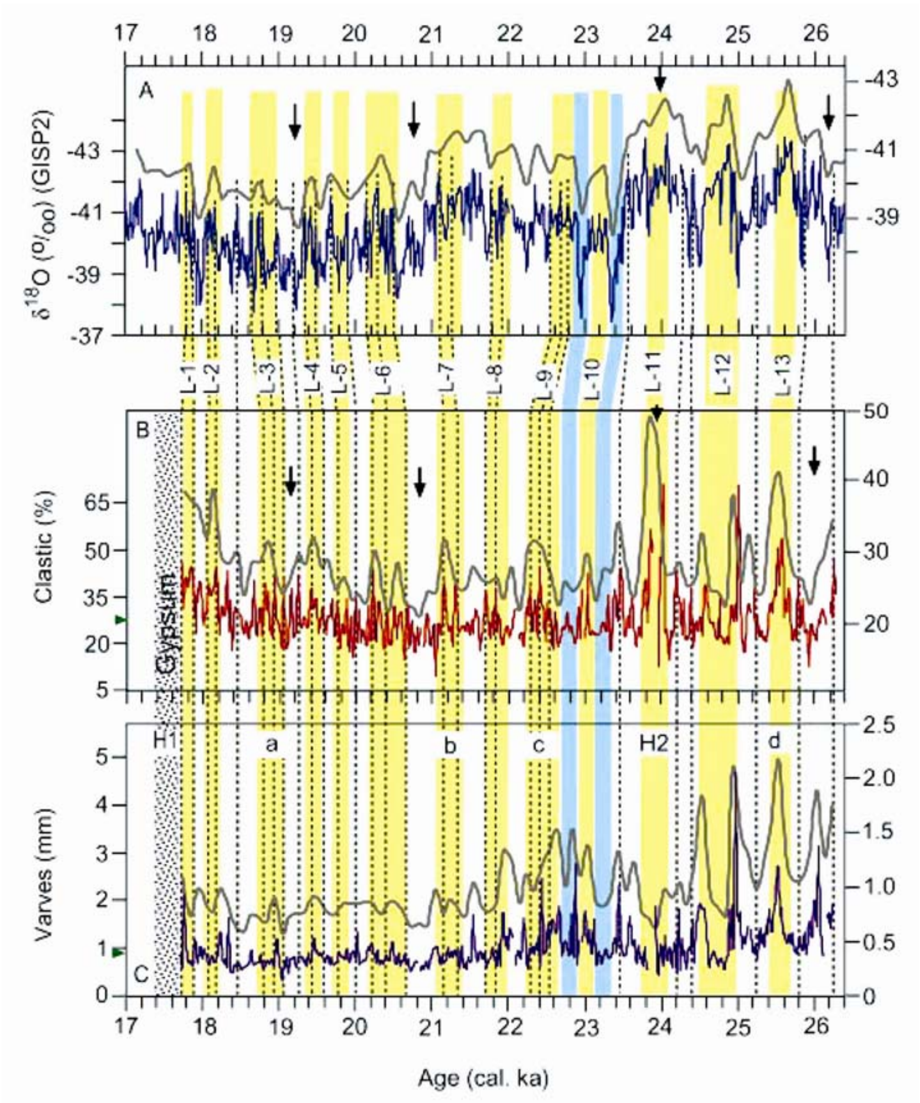
2. *סדימנטציה שנתית בפרט העליון של תצורת הלשון ותדירויות אקלימיות*

חלקה העליון של תצורת הלשון בחתך מצדה ("הפרט הלבן") נדגם לצורך מדידות מינרלוגיות, פטרוגרפיות וגיאוכימיות ברזולוציה שנתית. לשם כך נדגמו גלעיני –קיר רצופים (בעובי חתך כולל של 8.80 מטרים), הוכנו מהם שקפים פטרוגרפיים והופרדו דוגמאות ארגוניט וחומר דטריטי-סילטי דק. למינות הארגוניט –והדטריטוס הדק ניספרו. כרונולוגיית החתך בו

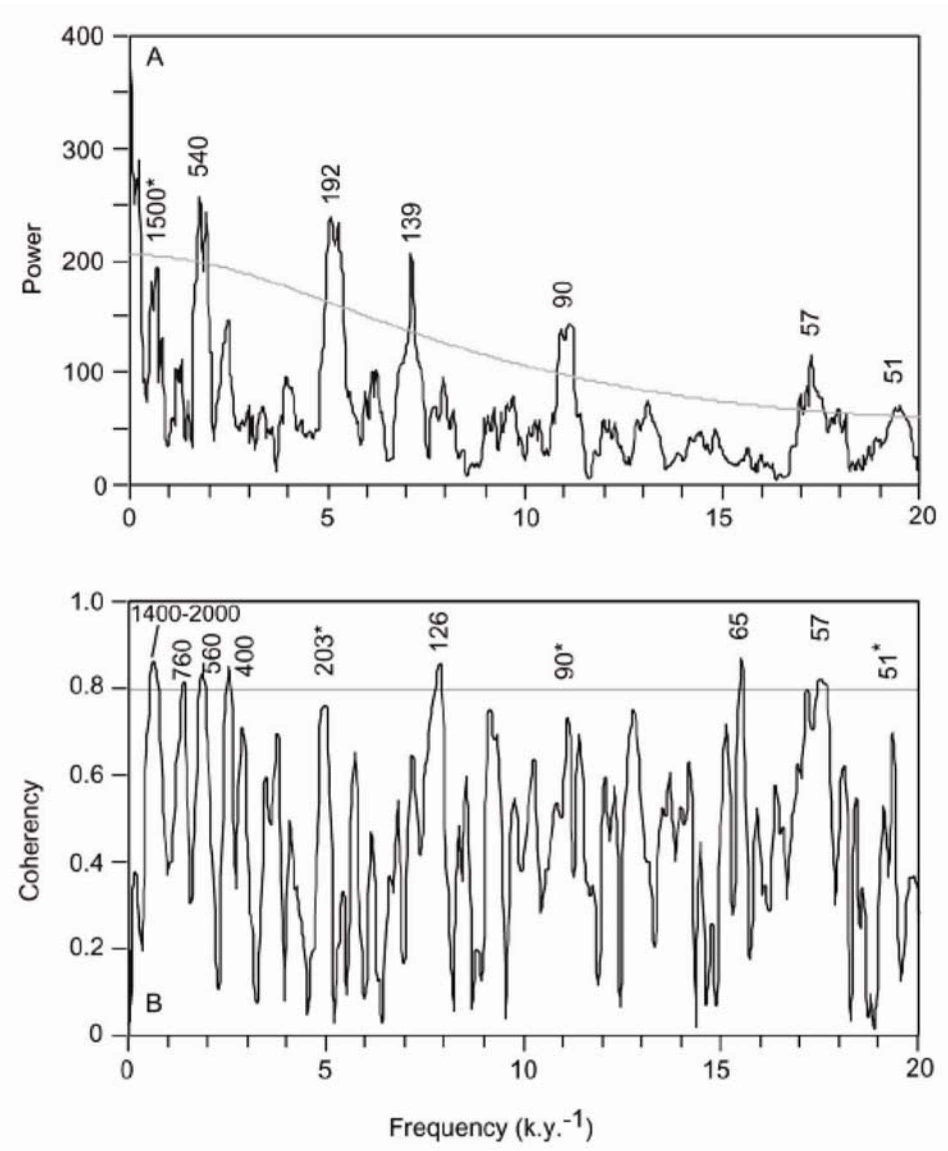
נעשתה ספירת הלמינות נקבעה על ידי גילי רדיוקרבון וסדרות אורניום והנתונים הליתולוגיים עובדו לסדרות זמן (Prasad et al., 2004). נמצאה התאמה בין תבניות השקעת הסדימנטים באגם לארועים אקלימיים קצרים בצפון האטלנטי (למשל, ארועי יובש קצרים מתאימים לארועים קרים בצפון אטלנטי) וכן נמצא כי התדירויות שעלו מניתוח סדרות בזמן מתאימות למחזורים סולאריים קצרים – תוצאה המעידה על השפעה סולארית על שינוים קצרים באקלים האיזורי והגלובאלי (איור 9).



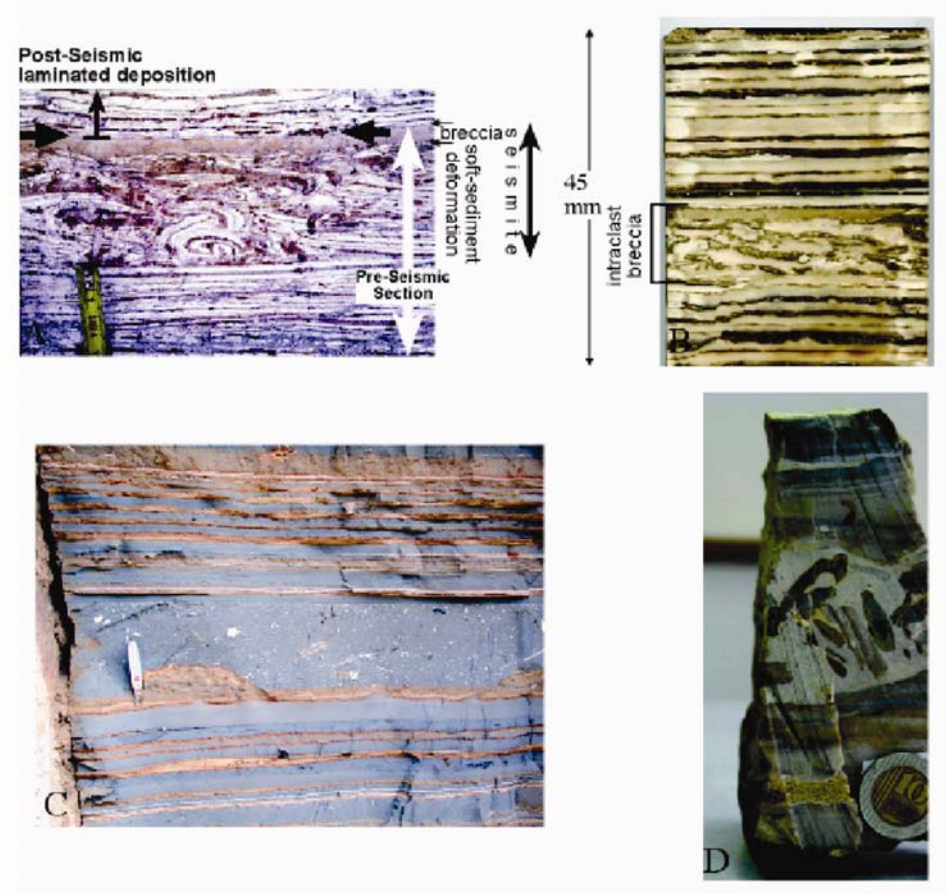
איור 9-א - מימין-כרונולוגית ספירת הלמינות בחתך M1. "שעון" הלמינות מוגבל בגילי פחמן-14 וגילי אורניום-תוריום. משמאל- הגדלה של רצף למינות ארגוניט ראשוני ודטריטוס-דק. ספירת הלמינות ומדידת עוביין במקטע הזמן שבין 30 ו- 17 אלף שנים לאחור אפשר ביצוע אנליזות סדרת זמן לקביעת תדירויות אקלימיות (איורים 9ב,ג). נתוני למינות הליסאן הושוו לנתוני איזוטופים של חמצן (המציינים שינויי טמפרטורות) מגלעין הקרח בגרינלנד. נמצאה קורלציה טובה המעידה על הקשר ההדוק בין שינויים קצרי מועד באקלים הצפון אטלנטי והאקלים באזור אגן הניקוז של אגם הלשון.



איור 9-ב - נתוני עובי הלמינות הדטריטיות (ב- % מעובי כולל של צמד למינות שנתי - ורוות). הגרפים האפורים בשלושת הדיאגרמות מציינים עקומות מוחלקות (סקלה ימנית). הדיאגרמה מראה התאמה טובה של השינויים בתבניות ההשקעה של אגם הלשון לשינויי הטמפרטורות בגלעין הקרח של גרינלנד. עולה כי ארועים קרים בגרינלנד קורלטיביים ללמינות דטריטוס עבות יותר יחסית ללמינות הארגוניט (ב-% לצמד). יתכן שטמפרטורות קרות בצפון אטלנטי השפיעו על ירידה בשטף הקרבונט לאגם – נתון המשקף את כמות המים המתוקים נושאי הבי-קרבונט. המסקנה שעולה מדיאגרמת השוואה זאת- קשר חזק במשרעות זמן קצרות בתבנית האקלים הגלובאלי והמשטר הסדימנטרי וכנראה ההידרולוגי באגן הניקוז של אגם הלשון.



איור 9-ג - תדירויות של הופעת למינות דטריטוס בחתך תצורת הלשון במצדה. ניתן לראות פיקים של מחזורים קצרי זמן אותם ניתן לקשור להשפעה סולרית על האקלים הגלובאלי והרגיונלי.



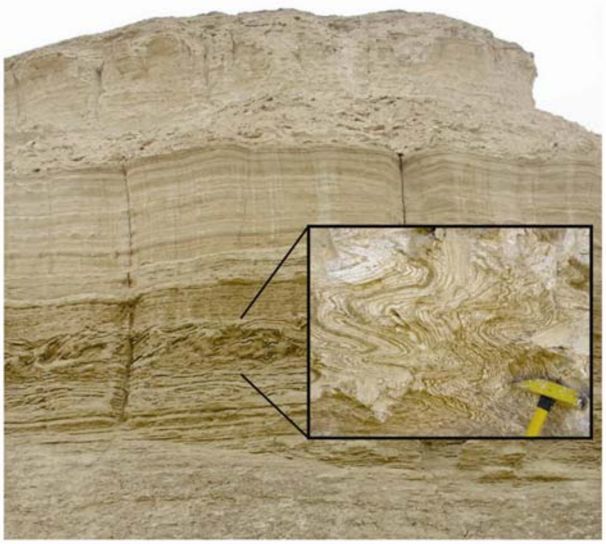
איור 10 - תצלומים של ברקציות אינטרקלסטיות–סייסמיטיות. A. ברקציה טיפוסית מכסה חתך מופרע של למינות ארגוניט ודטריטוס, B. מיקרוגרף של חתך מגלעין הקדוח בעין גדי המראה ברקציה אינטרקלסטית בעובי 1 ס"מ הנמצאת בין שני רצפים בלתי מופרעים של ארגוניט-דטריטוס, C. ברקציה אינטרקלסטית שזוהתה ע"י קן-תור וחובריה (תארוך פחמן-14) עם רעידת האדמה של 31 BC המדווחת על ידי פלביוס, D. ברקציה אינטרקלסטית בצור מישאש הקמפני הדומה מאוד לברקציות בחתכי ים המלח הרביעוני הדבר מצביע על אפשרות של מנגנון יצירה דומה (התמונות לקוחות מעבודותיהן של קלאודיה מיגובסקי ורויטל קן-תור (בוקמן) ושותפיהן. תמונת הברקציה בצור באדיבותו של יהושע קולודני).

3. הופעת ברקציות סדימנטריות והומוגניטים המיוחסים לפעילות סייסמית בחתך M1

עבודותיהם של Marco & Agnon (1995) ושל Marco et al. (1996) על שכבות ברקציה (interclast breccias) (שכונו קודם לכן: "שכבות ערבוב"; איור 10) בתצורת הלשון הניחו את הבסיס לעבודה הפלאוסייסמית המודרנית באגן ים המלח. עבודות אלה הראו ששכבות הברקציה האינטרקלסטית (להלן- שכבות הברקציה) קשורות בזמן עם העתקים המופיעים בפני השטח- עדות למקורם הפלאוסייסמי של הבקרציות (בהמשך הסיור נראה את יחסי השדה בין העתקים וברקציות). מאוחר יותר בוצעו מחקרים פלאוסייסמיים בתצורת צאלים ההולוקנית

(המשך הסיור) שם הראו .Ken-Tor et al (2001) ו- .Migowski et al (2004) שקיימת התאמה טובה בין זמני הופעת הברקציות (כפי שניקבעו בתיארוך של חומר אורגני שנימצא בשכבות אלה בשיטת פחמן-14) והגילים הארכיוניים של רעידות האדמה ההסטוריות.

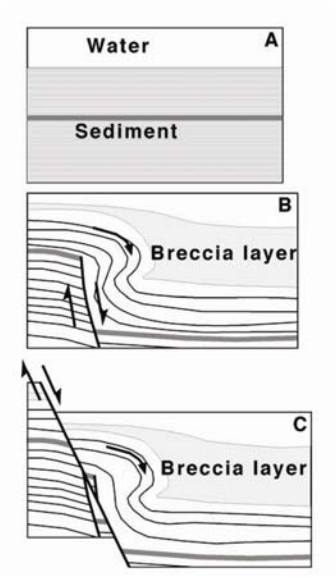
רקורד רעידות האדמה שתועד בתצורת הלשון ע"י .Marco et al (1996) התבסס על שני אתרים בנחל פרצים (אחד מהם PZ1 תוארך בשיטת U-Th ברזולוציה גבוהה; -Haase Schramm et al., 2004) ואתר M1 (תחנת הסיור הנוכחי) במישור מצדה. הקורלציה בין שלושת החתכים התבססה בעיקר על שקולים סטרטיגרפיים (Marco et al., 1996). קורלציה זאת וגילי הארגוניט שימשו לביסוס סדרת הזמן הראשונה של הופעת הברקציות והצביע על תופעת צברים של רעידות אדמה (חילופין בין תקופות פעילות ושקטות). מאוחר יותר הציעו .Begin et al (2005) כי ניתן לזהות את רעידות האדמה החזקות בחתכי תצורת הלשון הנידונים והציעו כי השינויים בעובי שכבות הברקציה בין החתכים השונים (מצדה לעומת פרצים) משקפים תגובות אתר לעוצמה המקומית של רעידת האדמה. לנתוחים חשובים מעין אלה של תבנית פזור רעידות האדמה בזמן ותגובות אתר לרעידות אדמה ספציפיות נדרשת כרונולוגיה ברזולוציה גבוהה באתרים הנחקרים. גילי U-Th וגילי פחמן-14 חדשים הושגו בחתך M1 במצדה. אנו נציג את הכרונולוגיה המעודכנת של שכבות הברקציה במצדה ואת הקורלציה המעודכנת בין החתכים במצדה ובנחל פרצים. בנוסף נציג טיפוסים נוספים של שכבות סדימנטריות שהופרעו על ידי פעילות סייסמית: הומוגניטים ו- convolute layers (איור 11).



איור 11 - הופעת שכבת ה- Convolute בחתך תצורת הלשון במצדה. השכבה מוגבלת בין גילי אורניום-תוריום (מדידות של למינות ארגוניט ראשוני) של 50 ו-46 אלפי שנים לאחור ונופלת בתחום ההיאטוס שנמצא בחתך תצורת הלשון בנחל פרצים (בין 49 ל-44 אלפי שנים לאחור; איור 6)

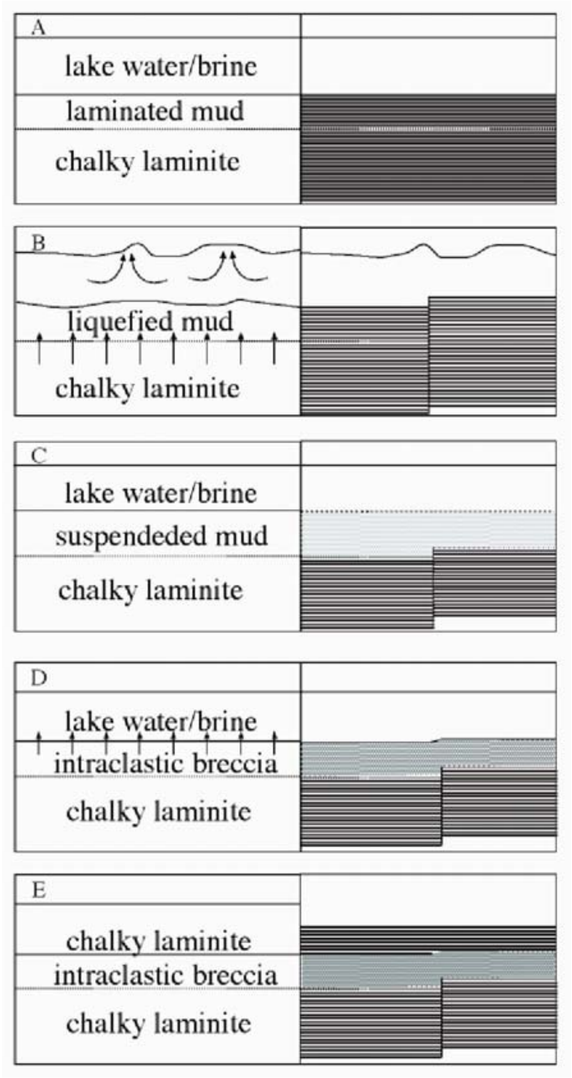
תחנה ב-2 – ברקציות סייסמיטיות בהקשר להעתקים בתצורת הלשון

המטרה העיקרית בתחנה זאת היא להציג את יחסי השדה בין העתקים נורמלים המופיעים פני השטח ובין הופעת השכבות הסדימנטריות המופרעות של תצורת הלשון – שמכונות ברקציות סדימנטריות (Marco & Agnon, 1995; Agnon et al., 2006). מהשוואה מפורטת של רצפי הסדימנטים משני צידי ההעתקים עולה שכל העתק בודד פעל 1 עד 5 פעמים. כל ארוע העתקה היה מלווה בהפרעה שתוצאתה שכבת ברקציה הבנויה תערובת של למינות ארגוניט מרוסקות בתווך של דטריטוס דק. ניתן להבחין בהקטנה כלפי מעלה של גודל הפרגמנטים המרוסקים. בבסיס שכבת הברקציה ניתן לפעמים לראות מעבר הדרגתי לקמטים שדועכים בהדרגה כלפי מטה ללמינות לא מופרעות. האסוציאציה של ההעתק והברקציות בד בבד עם צורת הופעת שכבת הברקציה משני צידי ההעתק (איור 12) הובילו את מרקו וחובריו לפרש את שכבות הברקציה כסייסמיטים. תצפיות ברצפים סדימנטריים של אגמים מודרניים מציעות כי ברקציות סדימנטריות יווצרו ברעידות אדמה הגדולות ממגניטודה 6. התנודות החזקות גרמו כנראה להנזלה שהובילה לריסוק הלמינות העליונות ביותר על קרקעית אגם הלשון ולהרחפת החלקיקים הדקים. שקיעה מדורגת של החלקיקים הדקים על פני הפרגמנטים הגדולים יותר יצרה את חלקה העליון של שכבת הברקציה בעוד הלמינות העמוקות עוד יותר (שרק התקמטו) בונות את החלק התחתון (איורים 11-13). יש לציין כי הופעות הליקוופקציה ישתנו בהתאם לאופי הסדימנט. בתחנת צאלים נראה למשל תופעות ליקוופציה בשכבות חוליות.



איור 12 - הופעת שכבות ברקציה אינטרקלסטית באסוציאציה עם העתקים בפני השטח (באדיבות שמוליק מרקו). האיור מבוסס על תצפית שדה באזור מצדה. ניתן לראות בו שלושה שלבים בהתפתחות הסדימנטרית–טקטונית של החתך: A. השקעת סדימנט אגמי (למינות ארגוניט

פרימרי ודטריטוס סילטי), B. רעידת אדמה היוצרת העתק נורמלי ושכבת ברקציה שהיא עבה יותר בצידו הירוד של הבלוק הסדימנטרי ודקה יותר בצידו העלוי ושכבות למינריות מקומטות מתחת לשכבת הברקציה, C. רעידת אדמה נוספת גורמת לתזוזה נוספת על ההעתק.



איור 13 - תאור סכמטי של שלבים ביצירת ברקציה אינטרקלסטית. A. סדימנט אגמי שוקע (כבוץ) על תחתית האגם (סדימנט מוקשה), B. רעידת אדמה גורמת לתנודות קרקע ללחץ נוזלי עודף וגלי מים, הסדימנט המוקשה הבונה את קרקעית האגם מועתק (fault rupture) ונוצרת מדרגה טופוגרפית, C. השכבות העליונות של הסדימנט הבוצי מופרעות, הלמינות הסדימנטריות נקרעות ומסה מונזלת (liquefied) מתפזרת (בהרחפה) במי האגם, D. המסה המפוזרת כתרחיף במי האגם שוקעת על התבליט בקרקעית האגם, E. השקעה רגילה ממשיכה מעל הרצף הסדימנטרי המופרע. (מתוך: Agnon et al., 2006).

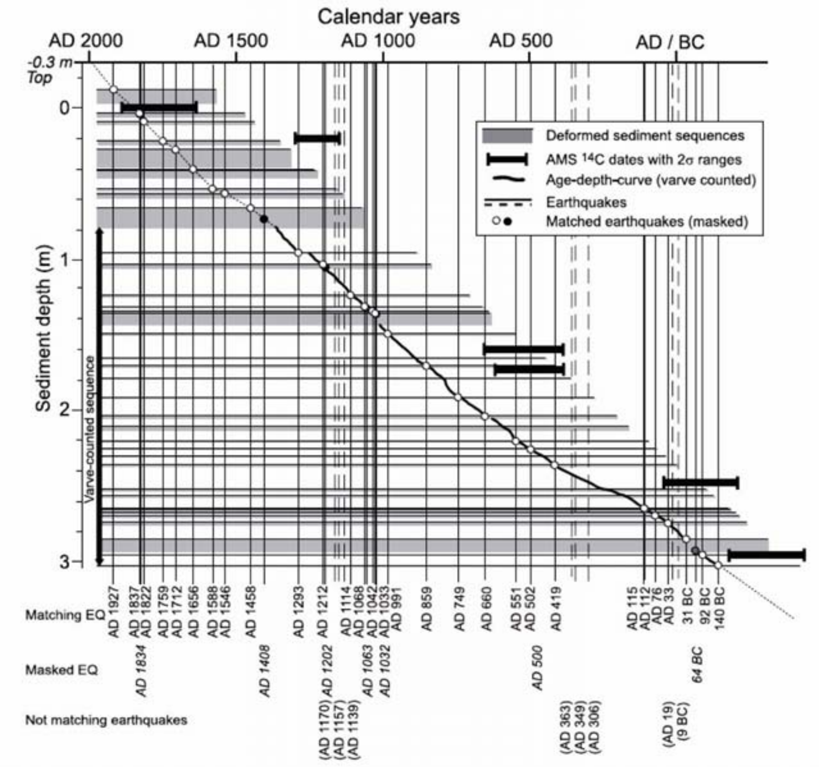
חלק ג – תצורת צאלים

תחנה ג-1 : קניוני טרסת צאלים

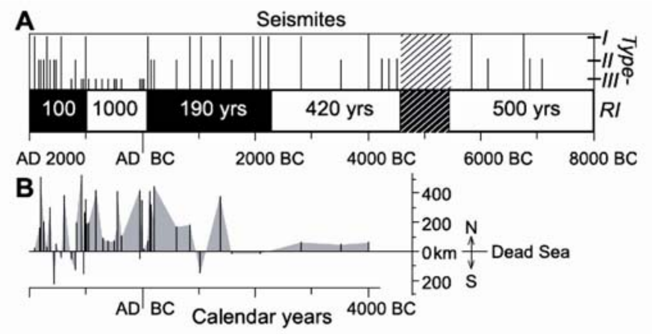
נסיגתו המהירה של ים המלח בעשורים האחרונים גורמת לקריסת החוף, תופעה המוצאת ביטוי ביצירת בולענים וביצירת קניונים עמוקים החוצים את טרסות הסדימנטים ההולוקנים ובסופו של דבר ממוטטים את הטרסות. התופעה בולטת במיוחד בסמוך למניפות הנחלים שם השטפונות סוחפים איתם את קירות הקניונים המתמוטטים ומגבירים בכך את מהלך התמוטטות הטרסה. הקניונים שנוצרו בטרסת צאלים מצפון לערוץ העיקרי של נחל צאלים מדגימים תופעות אלה וחושפים את החתך ההולוקני. חשיפה זאת אפשרה לנו לתעד את השינויים הליתולוגיים-סדימנטריים לאורך קירות הקניון, לזהות רכסי חוף ומשקעי חוף קדומים ולאסוף שרידי עצים וחומר אורגני ששימשו לקביעת כרונולוגיה של החתך בשיטת פחמן-14. בנוסף ניתן היה לתעד בקירות הקניונים את הופעת שכבות ברקציה ותופעות ליקוויפקציה (Ken-Tor et al., 2001). רקורד שכבות הברקציה והליקוופקציות בטרסת צאלים מופר על ידי אי התאמות בחתך (הממוקם באתר הרגיש לשינויים במיפלס ים המלח ההולוקני). השוואה לרקורד הארכיוני של רעידות האדמה ההיסטוריות מראה התאמה טובה אבל גם חוסר ברעידות אדמה אחדות המופיעות ברקורד ההיסטורי. מרביתן של רעידות האדמה החסרות נופל בחסרים סדימנטריים (hiati) בחתך. רקורד שכבות המזוהות כסייסמיטים שתועד בגלעין עין גדי משלים את כל רעידות האדמה החסרות תוצאה הנותנת גיבוי חזק לפרוש הברקציות הסדימנטריות כסייסמיטים ומאפשר ניתוח סדרת הזמן של רעידות האדמה ההולוקניות (Migowski et al., 2006; איור 14).

האינפורמציה שנאספה ממחשופי קניוני טרסת צאלים (ומנחל דוד) שימשה לבניית עקומת מפלסי ים המלח ההולוקני ב-4000 השנים האחרונות (Bookman (Ken-Tor) et al., 2004). בשנים האחרונות התעמק הקניון וכיום הוא חושף חלקים עמוקים יותר של תצורת צאלים. לאחרונה נעשה כאן דיגום ברזולוציה גבוהה לצורך מדידת נפיצות פולן (Neumann et al., 2007).

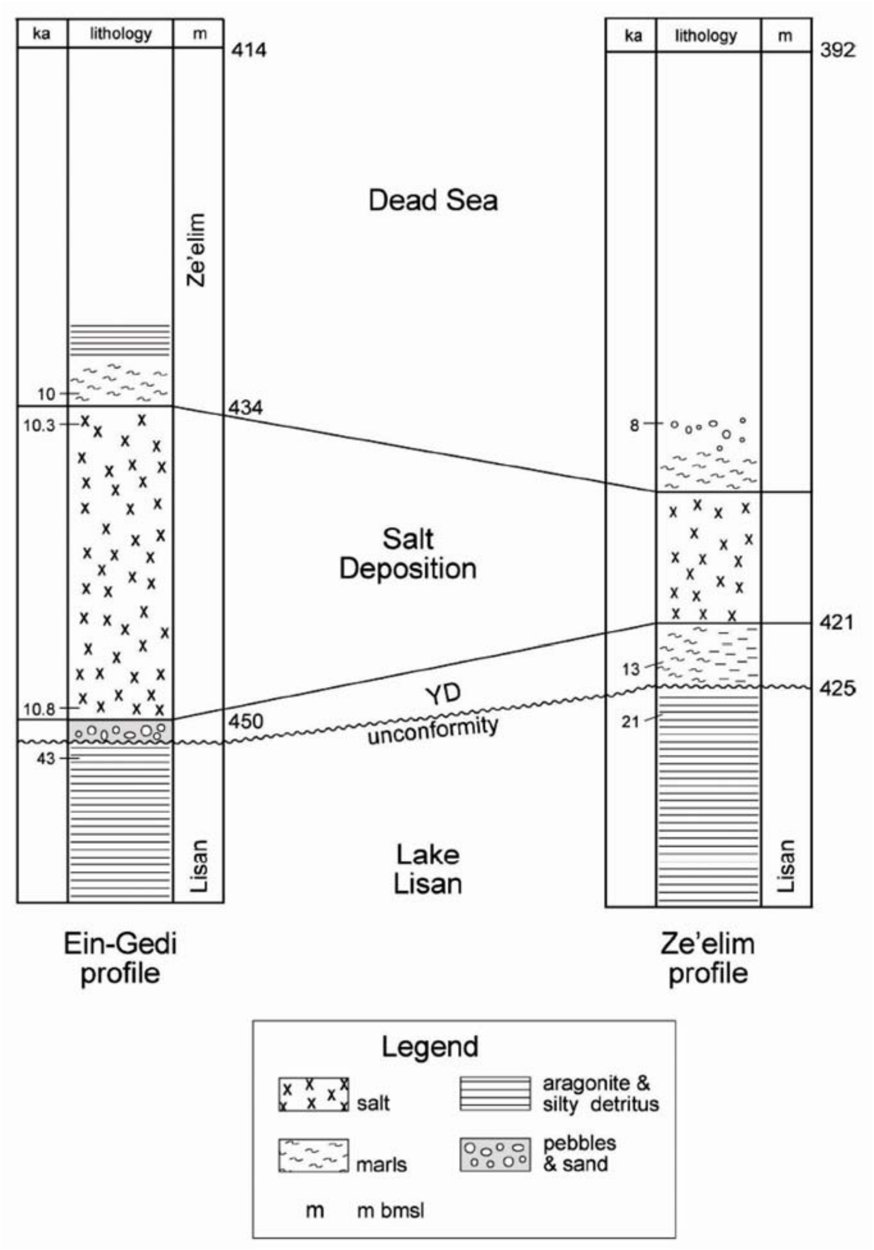
<u>התופעות העיקריות אותן נראה במהלך הסיור בנחל צאלים</u>: ליתולוגיה וסטרטיגרפיה של תצורת צאלים, הופעת רכס החוף מגיל 3,300 שנים לפני ההווה ומשמעותו בהקשר לסוגיית שינויי המפלס של ים המלח ההולוקני (איורים 16,15). כן נראה את הברקציות הסדימנטריות המפורשות כ"סייסמיטים" (למשל רעידת האדמה של 31 לפני הספירה הנזכרת בספרו של פלביוס) ותופעות של ליקוויפקציה בשכבות חוליות. כמו כן נראה את אתרי הקידוחים שחדרו את חתך ההולוקני-ליסאני ונדון באינפורמציה אותה הם מספקים על נפילת אגם הלשון בתקופת ה-ALLEROD, עליית ים המלח בתקופת ה- YOUNGER DRYAS, השקעת המלח בבסיס ההולוקן ועלית ים המלח ההולוקני (איור 15).



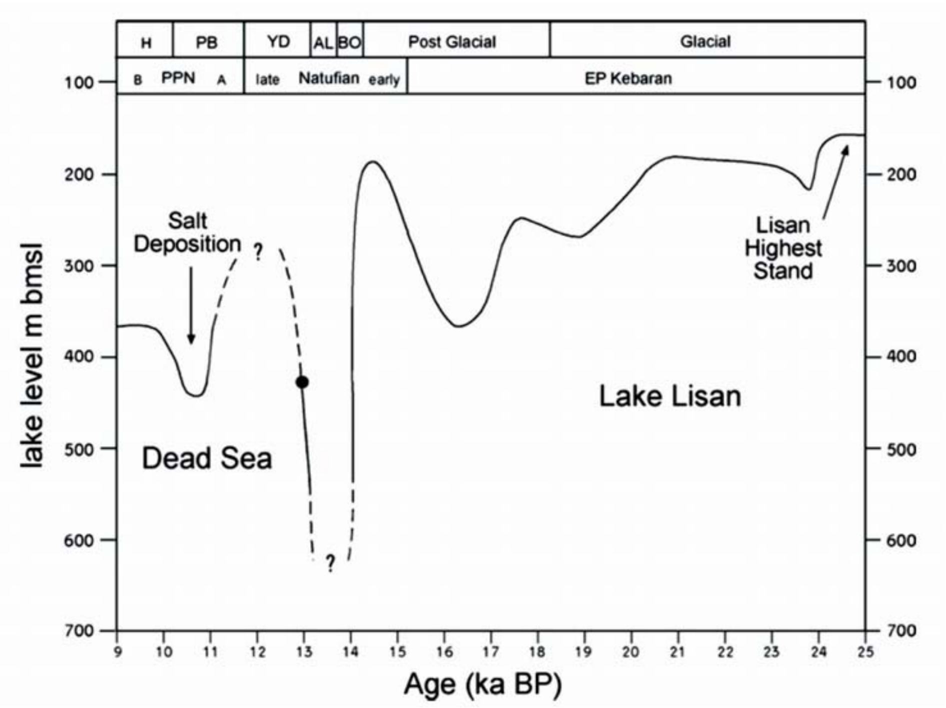
איור 14-א - הופעת ברקציות אינטרקלסטיות בגלעין הקידוח שנעשה בחוף מרחצאות עין גדי. כרונולוגיית החתך נקבעה באמצעות גילי פחמן-14 על שרידי חומר אורגני ובקטעים מסויימים נספרו הלמינות הסדימנטריות השנתיות. נעשתה התאמה בין גילי פחמן-14, ספירת הלמינות ורקורד רעידות האדמה ההיסטוריות. דיאגרמה זאת מציגה את התעוד השלם והמפורט ביותר של רצף רעידות האדמה באזור בתקופת ההולוקן. הנתונים שימשו לניתוח סדרת הזמן של מופע רעידות האדמה (מתוך: Migowski et al., 2004).



איור 14-ב - תבנית הופעת הברקציות האינטרקלסטיות (המפורשות כסייסמיטים) והופעתן במרחב. ניתן לראות כמה תבניות של זמני חזרה של רעידות אדמה והופעה ברורה של מוקדיהן באיזור שמצפון לים המלח ב-3000 השנים האחרונות (מתוך: Migowski et al., 2004).



איור 15 - השוואה בין הרצפים הסדימנטריים בגלעינים של עין גדי וצאלים. האיור מראה את אי ההתאמה בבסיס הרצף הסדימנטרי ששקע בתקופת ה-Younger Dryas. אי התאמה זאת משקפת את נפילתו הדרמטית של אגם הלשון בסביבות 14 אלפי שנים לאחור אל מתחת ל-450 מ' מפני הים וכנראה אל מתחת לגובה זה. שכבת המלח המופיעה בבסיס החתך ההולוקני שקעה באלף ה-11 לפני ההווה (באדיבות מ. שטיין וי. יחיאלי).



איור 16 - עקומת מפלסי האגם בפרק הזמן שבין שיא תקופת הקרה ותחילת ההולוקן. נפילתו החדה של אגם הלשון באלף ה-14 לפני ההווה מבוססת על נתוני הקידוחים המוצגים באיור 15 ובתצפית של ניב והול על קיומן של תעלות ארוזיביות בקרקעית ים המלח. בפנל העליון מוצגות התקופות הגיאולוגיות והתרבויות ההיסטוריות שעלו או נעלמו במעבר מתקופת הקרח האחרונה לתחילת ההולוקן באזור אגן ים המלח.

מקורות

וינברגר ר. (1992) פליאומגנטיות בהר סדום: שיטה לקביעת מבנה גוף המלח, ושחזור עלייתו מתת הקרקע, עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

זק י. (1967) הגיאולוגיה של הר סדום, עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

שטיין מ. (2007) שינויים אקלימיים באגן ים המלח והתפתחות תרבות האדם בישראל וסביבותיה ברביעון המאוחר. *מלח הארץ* 2, 21-38.

Agnon A., Migowski C., and Marco S. (2006) Intraclast breccia layers in laminated sequences: recorders of paleo-earthquakes, *in*: Enzel Y., Agnon A., Stein M., eds., New Frontiers in Dead Sea Paleoenvironmental Research: Geological Society of America Special Paper 401, 195-214.

Bartov Y., Goldstein S. L., Stein M., and Enzel Y. (2003) Catastrophic arid episodes in the Eastern Mediterranean linked with the North Atlantic Heinrich events. *Geology* 31, 439-442.

Begin B.Z., Steinberg D.M., Ichinose G.A., and Marco S. (2005) A 40,000 years unchanging seismic regime in the Dead Sea Rift. *Geology*, 33, 257-260.

Begin Z. B., Ehrlich A., and Nathan Y. (1974) Lake Lisan: the Pleistocene precursor of the Dead Sea. In *Geol. Surv. Isr. Bull.*, Vol. 63, pp. 30.

Bookman (Ken-Tor) R., Enzel Y., Agnon A., and Stein M. (2004) Late Holocene lake levels of the Dead Sea. *Geo. Soc. Am. Bull.* 116, 555-571.

Gavrieli I., Yechieli Y., Halicz L., Spiro B., Bein A., and Efron D. (2001) The sulfur system in anoxic subsurface brines and its implication in brine evolutionary pathways: the Ca-chloride brines in the Dead Sea area. *Earth Planet. Sci. Lett.* 186, 199-213.

Haase-Schramm A., Goldstein S. L., and Stein M. (2004) U-Th dating of Lake Lisan (late Pleistocene Dead Sea) aragonite and implications for glacial East Mediterranean climate change. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68, 985-1005.

Imbrie J., Hays J.D., Martinson D.G., McIntyre A., Mix A.C., Morley J.J., Pisias N.G., Prell W.L., and Shackleton N.J. (1984) The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}O$ record, *in*: Berger et al., eds., Milankovitch and climate, part 1, pp. 269-305.

Ken-Tor R., Agnon A., Enzel Y., Marco S., Negendank J. F. W., and Stein M. (2001) High-resolution geological record of historic earthquakes in the Dead Sea basin. *J. Geophys. Res.*, 106, 2221-2234.

Kolodny Y., Stein M., and Machlus M. (2005) Sea - Rain - Lake relation in the last Glacial East Mediterranean revealed by ^{18}O - ^{13}C in Lake Lisan aragonites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 4045-4060.

Kroon D., Alexander I., Little M., Lournes L.J., Matthewson A., Robertson A.H.F., and Sakamoto T. (1998) Oxygen isotope and sapropel stratigraphy in the Eastern Mediterranean during the last 3.2 million years. *Proc. ODP* 160, 181-189.

Machlus M., Enzel Y., Goldstein S. L., Marco S., and Stein M. (2000) Reconstructing low levels of Lake Lisan by correlating fan-delta and lacustrine deposits. *Quat. Int.* 73-4, 137-144.

Marco S., Stein M., Agnon A., and Ron H. (1996) Long-term earthquake clustering: A 50,000-year paleoseismic record in the Dead Sea Graben. *J. Geophys. Res. - Solid Earth* 101, 6179-6191.

Marco S. and Agnon A. (1995) Prehistoric earthquake deformations near Masada, Dead Sea graben, *Geology* 23, 695-698.

Migowski C., Stein M., Prasad S., Negendank J.F.W., and Agnon A. (2006) Holocene climate variability and cultural evolution in the Near East from the Dead Sea sedimentary record. *Quat. Res.* 66, 421-431.

Migowski C., Agnon A., Bookman R., Negendank J. F. W., and Stein M. (2004) Recurrence pattern of Holocene earthquakes along the Dead Sea transform revealed by varve-counting and radiocarbon dating of lacustrine sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 222, 301-314.

Neev D. and Emery K. O. (1967) The Dead Sea: Depositional processes and environments of evaporites. In *Geol. Surv. Isr. Bull.*, Vol. 41, pp. 147.

Neev D. and Emery K. O. (1995) The destruction of Sodom. Gomorrah and Jericho. Oxforf University Press. New York. 175p.

Neumann F., Kagan E., Schwab M., and Stein M. (2007) Palynology, sedimentology and paleoecology
of the late Holocene Dead Sea. Quat. Sci. Rev.

Nissenbaum A. and Kaplan I. (1976) Sulfur and carbon isotopic evidence for biogeochemical processes in the Dead Sea ecosystem. *in:* ed. J. Nriagu, Environmental Biogeochemistry, pp. 309-325. Ann Arbor Science Publishers.

Prasad S., Vos H., and Negendank J. F. W. (2004) Evidence from Lake Lisan of solar influence on decadal- to centennial-scale climate variability during marine oxygen isotope stage 2. *Geology* 32, 581-584.

Oldenburg T. B. P., Rullkotter J., Bottcher M. E., and Nissenbaum A. (2000) Molecular and isotopic characterization of organic matter in recent and sub-recent sediments from the Dead Sea (vol 31, pg 251, 2000). *Org. Geochem.* 31, 773-774.

Ron H., Nowaczyk N.R., Frank U., Marco S., and McWilliams M.O. (2006) Magnetic properties of Lake Lisan and Holocene Dead Sea sediments and the fidelity of chemical and detrital remanent magnetization, *in*: Enzel Y., Agnon A., Stein M., eds., New Frontiers in Dead Sea Paleoenvironmental Research: Geological Society of America Special Paper 401, p. 171-182.

Stein M. (2001) The sedimentary and geochemical record of Neogene-Quaternary water bodies in the Dead Sea Basin - inferences for the regional paleoclimatic history. *J. Paleolimn.* 26, 271-282**.**

Torfstein A., Gavrieli I., Katz A., Kolodny Y., Stein M. (2007) Brine exchange between Dead Sea rift lakes and surrounding rocks: evidence from sulfur mass balance and isotopic compositions in lake sediments, *in*: Annual Meeting, Israel Geological Society.

Torfstein A., Waldmann N., Kolodny Y., Gavrieli I., and Stein M. (2006) U-Th and $\delta^{18}O$ chronology of the Amora Formation, Mount Sedom, *in*: Kessel R., Kagan E., Porat N. (Eds.), Annual Meeting, Israel Geological Society, Bet-Shean, p. 128.

Torfstein A., Katz A., Gavrieli I., and Stein M. (2005c) Mass balance constraints on gypsum deposition in Lake Lisan, *in*: Abramovich S. (Ed.), Annual Meeting, Israel Geological Society, Mashabim, p. 115.

Torfstein A., Gavrieli I., and Stein M. (2005b) The sources and evolution of sulfur in the saline Lake Lisan (paleo-Dead Sea) revealed by ^{34}S in gypsum. *Earth Planet. Sci. Lett.* 236, 61-77.

Torfstein A., Kagen E., Asael D., and Ron H. (2005a) The magnetostratigraphy of the Amora Formation, eastern Mt. Sedom, unpublished data.

Waldmann N., The geology of the Samra Formation in the Dead Sea Basin, M.Sc. Thesis, Hebrew University, Jerusalem, 2002, 175 pp.

Yechieli Y., Margaritz M., Levy Y., Weber U., Kafri U., Woelfli W., and Bonani G. (1993) Late Quaternary geological history of the Dead Sea area, Israel. *Quat. Res.* 39, 59-67.