

ההיסטוריה של האגמים הקדומים בבקע ים המלח

עדי טורפשטיין

הקדמה

חלק גדול מחקר שינויי האקלים ברביעון (הזמן [התור] הגאולוגי הנוכחי, שהחל לפני כ-1.8 מיליוני שנים [מ"ש]) נסמך על ניתוח ההרכב של גלעיני משקעים (סדימנטים) מקרקעית האוקיינוסים וגלעיני קרח מגרינלנד ומאנטרקטיקה. ארכיבים גאולוגיים אלה משקפים תהליכים בקנה מידה עולמי ומאפשרים השוואות בין הארכיבים לבין עצמם וביניהם לבין ארכיבים אחרים. לעומת זאת, חקר אקלימי העבר בסביבות יבשתיות, בעיקר כאלו הממוקמות ברחבים גאוגרפים בינוניים ונמוכים, מורכב בהרבה, מכיוון שהגורמים המשפיעים על האקלים ועל דרך רישומו בארכיב הגאולוגי רבים ומגוונים. תבליט פני השטח (הרים לעומת עמקים), המרחק מהאוקיינוסים (מקור הלחות), השפעות אפשריות של כיסוי הצמחייה ועוד יכולים להכתיב מגמות אקלימיות בעלות אופי מקומי הקשה יותר לשחזור. למרות זאת, דווקא ההיסטוריה של שינויי אקלים באזורים אלו חשובה ביותר שכן ביכולתה ללמד רבות על הפרה-היסטוריה וההיסטוריה של המין האנושי, ונוסף על כך גם על מגמות של שינויי אקלים עתידיים בעלי השפעה ישירה על רוב רובה של האנושות.

מיקומו הגאוגרפי של בקע ים המלח, בגבול שבין רצועת המדבריות של סהרה וחצי האי ערב לבין האקלים האירופאי הממוזג, הופכות אותו לאתר רגיש לתזוזות מרחביות במיקום קו המגע בין שתי רצועות אקלים אלו. נדידה אפשרית של גבול המדבר צפונית בעתיד הקרוב טומנת בחובה סכנה הידרולוגית (וגאופוליטית)

* עדי טורפשטיין, מכון למונט-דוהרטי למדעי כדור הארץ, אוניברסיטת קולומביה.

לתושבי האזור, וראוי לבחון אם התרחש תהליך דומה בעבר, מתי התרחש ומה היו השפעותיו. יתר על כן, העובדה שבקע ים המלח נמצא במרכז נתיב נדידתו של האדם הקדמון מאפריקה לשאר העולם – תהליך שהושפע בוודאי משינויי אקלים אזוריים, לצד השפעות אפשריות של האקלים על התפתחות תרבויות היסטוריות ודעיכתן (שטיין, 2006) – מסמנת כי הכרת ההיסטוריה של שינויי האקלים באזור, המתועדת על ידי משקעי האגמים בבקע, היא בעלת עניין וחשיבות גדולים ביותר.

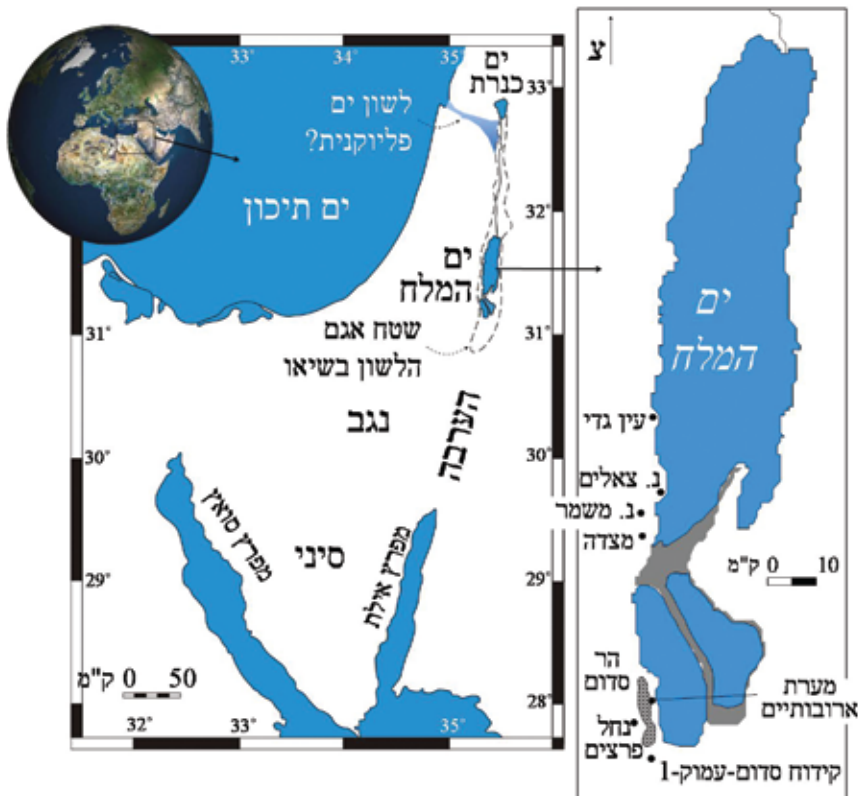
מפלס ים המלח כיום (כ־420 מטרים מתחת לפני הים) נמצא בשפל של למעלה מ־100 שנים, והוא הולך ונסוג בקצב מהיר. עדויות רבות מצביעות על כך כי בעבר הגאולוגי כבר התרחשו אירועי התייבשות דומים, אך עולה מהן גם כי גופי מים גדולים בהרבה ובעלי מליחיות נמוכות יותר אכלסו את בקע ים המלח. די להביט במחשופים של סלעי המשקע הרכים הפזורים לאורכו ולרוחבו של הבקע ובשינויי הצבע הבולטים בתוכם, או על גוש המלח הבונה את הר סדום בדרום ים המלח, כדי להעיד על אופיים השונה והמגוון של אותם גופי מים.

מאמר זה מציג את ההיסטוריה של גופי המים בבקע, החל מפלישת לשון ים לתוכו לפני מספר מיליוני שנים ויצירת לגונה מלוחה וצרה המכונה 'לגונת סדום', דרך אירוע ניתוקה של הלגונה מהים הפתוח ועד התפתחותה של שרשרת אגמים מלוחים בבקע, הם אגמי עמורה, הלשון וים המלח ההולוקני. המאמר דן בהיסטוריה של אגמי הבקע בהקשר של שינויי אקלים אזוריים ורחבים יותר בעולם, שהתרחשו במהלך הרביעון, והוא מציג מספר דוגמאות של שיטות וכלים גאוכימיים המסייעים בשחזור של היסטוריית האגמים הקדומים.

לגונת סדום

ראשית ההיסטוריה של גופי המים העמוקים והמלוחים בבקע ים המלח בפלישת לשון ים לבקע במהלך תקופת הפליוקן (5.3–1.8 מ"ש), קרוב לוודאי דרך עמק יזרעאל, אשר הובילה ליצירת גוף מים צר וארוך המכונה 'לגונת סדום' (זק, 1967) (איור 1). מליחות מי הלגונה הייתה גבוהה מזו של מי ים רגילים מכיוון שהשילוב בין תחלופת המים המוגבלת לתנאי האקלים המדבריים עודד קצב אידי גבוה של פני המים, שגרם לעלייתם של ריכוזי המלחים במים הנתורים. מצד אחר,

החיבור של גוף המים לים הפתוח אפשר זרימה מוגבלת אך קבועה של מי ים לתוך הלגונה כפיצוי על אבדן המים באידוי. בתורם, גם מים אלו עברו אידוי. מנגנון מחזורי זה של אידוי ואספקה מחודשת, המכונה 'מנגנון הלגונה' (איור 2א), הביא לעלייה נמשכת בריכוז המלחים המומסים במים. בשלב מסוים הגיעו ריכוזי חלק מהמלחים לרוויה, והם סולקו מהמים בצורת גבישי מינרלים ששקעו לקרקעית הלגונה. המינרל הבולט בהקשר זה הוא מלח הבישול (הליט, NaCl), שנצבר בכמויות גדולות מאוד בקרקעית האגן ועוביו מגיע לשני קילומטרים ויותר. רוב המלח קבור בתת-הקרקע.



איור 1: מפת מיקום. בקע ים המלח הוא חלק ממערכת נרחבת של שברים שמשתרעת מים סוף בדרום ועד טורקיה בצפון, שהחלה להיווצר לפני כ־18 מיליוני שנים ומכונה 'השבר הסורי-אפריקני'. במאמר זה המושג 'בקע ים המלח' מתייחס למרחב הכולל את שני האגנים המאכלסים כיום את ים המלח וים כנרת. אלו משתרעים לאורך למעלה מ־300 ק"מ, החל ממרכז הערבה בדרום ועד מורדות החרמון בצפון.

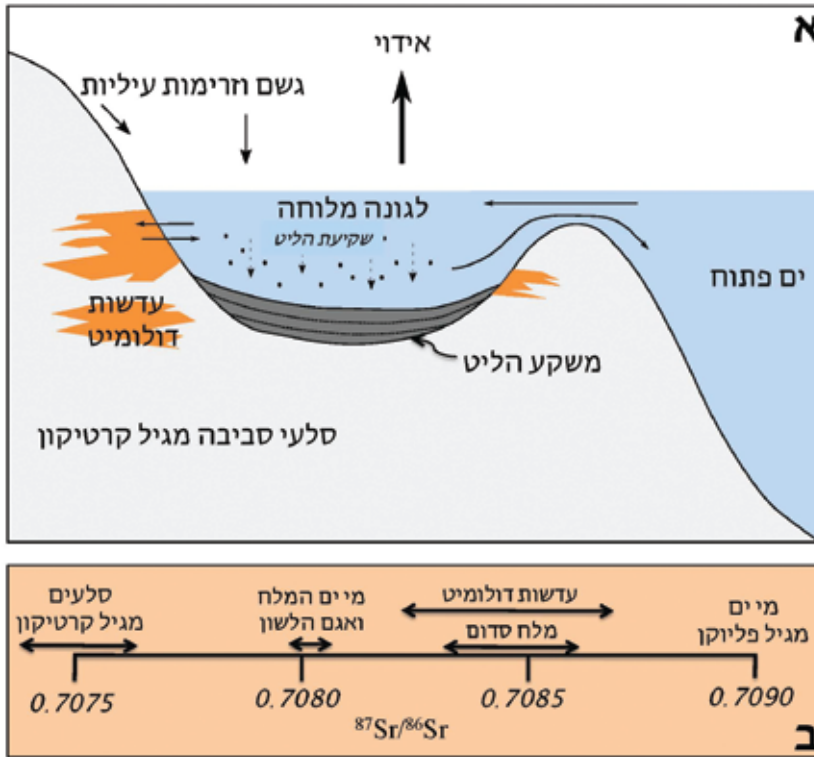
ראוי להתעכב על השאלה, כיצד אנו יודעים כי מדובר בלגונה (כלומר גוף מים בקשר עם הים) ולא באגם יבשתי גדול? התשובה מתבססת על תצפיות סטרטיגרפיות וחשובי מאזנים כימיים, לצד ניתוח ההרכב הכימי והאיוזוטופי של משקעי לגונת סדום. ראשית, נבחן את תהליך האידיוי של מי ים רגילים. היות ומליחות מי הים היא כ-35 גרם לליטר (כלומר בכל ליטר של תמיסה יש 35 גרם של מלחים מומסים), הרי שאידיוי מוחלט של עמודת מי ים בעובי 1,000 מטרים תוביל להצטברות של מעט יותר מ-15 מטרים של מלחים (בהנחה שהצפיפות הממוצעת של המלחים היא כ-2 גרם לסמ"ק). לפיכך, סך עובייה של עמודת מי הים שצריכה הייתה להתאדות כדי לייצר חתך של שני קילומטרים של מלח הוא למעלה מ-100 ק"מ! מכיוון שעומק המים הממוצע של האוקיינוסים הוא קילומטרים ספורים, ברור כי צבירת החתך של מלח סדום דורשת תהליכי אידיוי והשקעה מצטברים, דוגמת 'מנגנון הלגונה', שניתן לתארו כמפעל טבעי לייצור אבפוריטים (ראו מסגרת). יתר על כן, קצב השקעת המלחים בסביבות לגונריות גבוה עד כדי כך שצבירת חתך אבפוריטי*¹ עבה מתוך הלגונה מחייב תהליך מתמיד של השתפלות טקטונית (שקיעה) של קרקעית האגן, שאם לא כן עלולים המלחים השוקעים למלא את נפח האגן ולחסל את הלגונה.

איך נוצרה 'תמלחת סדום'?

הרכב המלחים במי ים המלח ובמעיינות הנובעים בשוליו ייחודי מאוד ושונה מזה של מי האוקיינוס (סטרינסקי, 2005). תמלחת ים המלח מועשרת בהשוואה למי ים רגילים ביחסי היסודות סידן (קלציום, Ca), מגנזיום (Mg), אשלגן (K) וברום (Br) לכלור (Cl), ובאופן דומה מדולדלת בסולפט (SO_4^{-2}) ובפחמה (קרבונט, CO_3^{-2}). תמלחת בהרכב כזה מוגדרת כתמלחת קלציום-כלורידית ומכונה באזור בקע ים המלח 'תמלחת סדום'.

לאורך זמן חלחלו מי לגונת סדום לסלעים שבשולי האגן, רובם סלעים שהורבדו במהלך תור הקרטיקון (65.5-144.5 מ"ש) כסלעי גיר בשולי ים תטיס הקדום. המגע בין מי לגונת סדום, שנגזרו ממי הים הפליוקניים, לבין סלעי הגיר מהקרטיקון

* ראה הסברים למושגים בסוף המאמר.



איור 2: מודל סכמטי של מנגנון הלגונה. (א) החצים מציינים את הכיוונים של שטפי מים אל הלגונה ומתוכה בצורת זרמים, אידוי ושטף עלי, חלחול בתת-הקרקע ומגע עם סלעי הסביבה מגיל קרטיקון; (ב) היחסים האיזוטופיים של סטרונציום ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) מבטאים את תהליכי הערבוב בין מרכיבי הקצה במערכת זו, שהם מי הים הפליוקניים וסלעי הסביבה מגיל קרטיקון. ההרכב האיזוטופי של סטרונציום במי הלגונה (מלח סדום) ועדשות הדולומיט מראה הרכב ביניים המשקף את תהליכי הערבוב בין שני מרכיבי הקצה. ערכי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ידועים בדיוק שמעבר לספרה הרביעית אחרי הנקודה העשרונית, ועל כן טווח ההרכבים המוצג בפאנל (ב) רחב מאוד באופן יחסי ומשקף תהליכי ערבוב ניכרים.

הוביל לתהליכי החלפה של יסודות כימיים ושל איזוטופים שונים של יסודות כימיים (ראו מסגרת), שגרמה לשינוי בהרכב הכימי והאיזוטופי הן של הסלעים והן של מי הלגונה. אחד הביטויים הבולטים של תהליך זה הנו הדלומיטיזציה של חלק מסלעי הסביבה, כלומר החלפת סלעי הגיר בסלעי הדולומיט, סלעים שהמינרל העיקרי בהם הוא דולומיט ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). תהליך זה משתקף גם

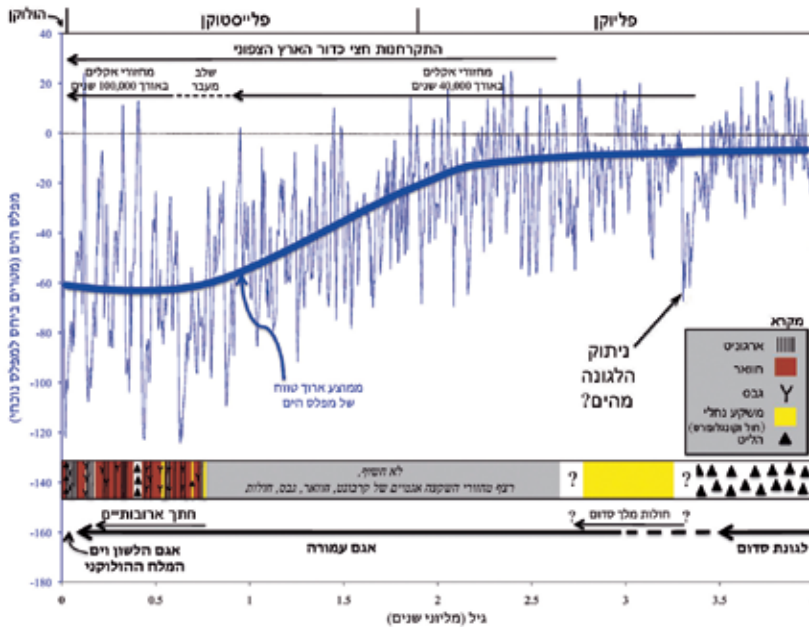
בהרכב האיזוטופי של היסוד הכימי סטרונציום (Sr) במים ובסלעים באזור הבקע. הסטרונציום הוא יסוד קורט, כלומר מופיע בכמויות קטנות במים ובמינרלים שונים כגון גיר. ערכו של היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ במי ים מגיל פליוקן הוא 0.7090 (איור 2ב). לעומת זאת, ההרכב שנמדד במלח סדום נמוך יותר (0.7083-0.7086) ודומה מאוד להרכב של גופי הדולומיט בשולי האגן (0.7082-0.7087). המנגנון הסביר ביותר שיכול להסביר את ההבדל בין ההרכב האיזוטופי של מי הים הפליוקנים לבין זה שאפיינ את מי לגונת סדום הוא בתהליכי החלפה וערבוב עם מקור בעל חותם איזוטופי אחר. כזה הוא למשל חתך סלעי הסביבה הגירניים מהקרטיקון, המאופיינ ביחס איזוטופי בטווח של 0.7074-0.7076. יתר על כן, ים המלח כיום, והמעיינות המלוחים שנובעים לתוכו, מאופיינים בערך $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של 0.7080~ המשקף את המשך תהליכי ההחלפה בין שרידי מי הים הפליוקניים שחדרו לתת-הקרקע לסלעי הגיר הקרטיקוניים.

מתי נותקה לגונת סדום מהים?

הנתונים בנוגע לתזמון הניתוק הסופי בין לגונת סדום לים הפתוח מעטים יחסית, אך כולם מצביעים על חלון זמנים דומה, סביב 3.5-3 מ"ש בקירוב:

(א) בעבודתו המקיפה על הגאולוגיה של הר סדום העריך זק (1967) מניתוח יחסי שדה כי לגונת סדום התקיימה בפליוקן במשך כמיליון שנים; (ב) כותב שורות אלה תארך את תצורת עמורה בעזרת סדרות פירוק של אורניום² וסטרטיגרפיה של חמצן³ והעריך כי גילו של בסיס תצורת עמורה בקידוח בדרום ים המלח (סדום עמוק 1) הוא 3 מ"ש בקירוב; (ג) שפך בזלת בעבר הירדן המזרחי נוצר בזמן קיומו של גוף מים גבוה בבקע ים המלח, כזה שהיה ככל הנראה קשור לים הפתוח (מתוך שיקולי שדה גאולוגיים). הבזלת תוארכה בשיטת אשלגן-ארגון ל-4-3.4 מ"ש (Steinitz & Bartov, 1991). מכאן שגוף המים הגבוה, קרי לגונת סדום, היה קיים לפחות עד לפני 3.4 מ"ש; (ד) גיל תהליכי הדולומיטיזציה של סלעי הסביבה הגירניים, תהליך שהתרחש בזמן קיום הלגונה או זמן קצר לאחר ניתוקה מהים, הוערך על בסיס יחסי איזוטופים של אורניום ועופרת ל-3.2 מ"ש (Stein & Agnon, 2007).

נראה אפוא כי סביר להניח שהקשר בין לגונת סדום לים הפתוח ניתק לפני



איור 3: עקומת השינויים במפלס האוקיינוסים במהלך ארבעה מיליון השנים האחרונות והיסטוריית ההתפתחות של גופי המים בבקע ים המלח. העקומה הכחולה המודגשת מייצגת את הממוצע ארוך הטווח של שינויי מפלס הים. היא מראה מגמה של ירידת מפלס ברורה, שהחלה לפני כשני מיליון שנה, שמהווה חסם גיל עליון לגיל הלגונה וקשורה לתהליכי ההתקרחות בחצי כדור הארץ הצפוני, שהביאה להקטנת הנפח הכולל של מים הזמין לאוקיינוסים.

תזמון האירוע של ניתוק לגונת סדום מהים הפתוח מוצע על בסיס העדויות הבאות: (א) גיל שפך הבולת בעבר הירדן (4-3.4 מ"ש); (ב) גיל היווצרות עדשה דולומיטית (3.2-3 מ"ש); (ג) גיל המגע בין תצורות סדום ועמורה בתת-הקרקע (3-3 מ"ש); (ד) אירוע נפילה חדה של מפלס הים לפני 3.3-3.4 מ"ש. תצורת סדום מורכבת רובה ככולה ממלח הליט. מעליה, בחתך העמודי, יושבת תצורת עמורה, שבבסיסה סדרת חולות מלך סדום. מרבית החתך של תצורת עמורה קבור וטרם נחקר, אולם באזור מערת ארובותים חשופים כ־320 מטרים של חתך התצורה, המכוסה במשקעי אגס הלשון (14-70 אלפי שנים) וים המלח ההולוקני.

כ־3.5-3 מ"ש. בהקשר זה ראוי לציין כי הצפה ימית כה משמעותית דורשת מפלס ים גבוה מספיק, המסוגל להתגבר על המדרגה הטופוגרפית בדרך להצפת פנים היבשת. שחזורי מפלס הים העולמי (Miller et al., 2005) מראים כי יש סבירות שגפילה חדה של מפלס הים לפני 3.3-3.4 מ"ש (איור 3) קשורה לאירוע ניתוק

הלגונה מהים. עם זאת יש לזכור כי שדרת ההר המרכזית טרם התפתחה, או הייתה בשלבי התפתחות ראשוניים בסוף הפליוקן, וכי תבליט פני השטח היה שונה מזה הקיים היום, כך שגובהו של המכשול הטופוגרפי בין הים ללגונה יכול להיות שונה מזה הקיים כיום ובעל השלכות על תזמון סיומם של חיי הלגונה, נושא הדורש בירור נוסף.

מדוע משנים אגמים את נפחם?

שינויי נפח המים באגמים משקפים את היחס שבין שטפי הכניסה לשטפי היציאה של המים לאגם וממנו. במקרה של אגמים סגורים וטרמינליים (סופניים), כלומר כאלה שמימיהם אינם מתנקזים אל מחוץ לאגם, משקף נפח המים את היחס בין שטפי הכניסה של מי גשם ונגזרותיהם לשטפי יציאתם של המים באידוי. מחד גיסא, ככל שאגן הניקוז גדול יותר כך גדל שטף המים הכולל הנכנס לאגם; מאידך גיסא, ככל שהאידוי חזק יותר, כך גדל שטף יציאת המים. במקרה של אגמי בקע ים המלח, השילוב בין אגן הניקוז הגדול של בקע ים המלח (כ־40,000 קמ"ר) לבין התנאים המדבריים המעודדים אידוי מוגבר מפני האגם מביא לכך שהשינויים בנפחם ניכרים, והנם רשמים רגישים של שינויים במשטר ההידרולוגי האזורי. לכך יש להוסיף כי הנדידה במרחב של הגבול בין רצועת המדבריות של סהרה-ערב לבין האקלים האירופי הממוזג מכתיבה שינויים גדולים מאוד במשטר הגשמים האזורי בתקופות שונות.

מאפייני אגמי הבקע

שלב המעבר מלגונה לאגם מאופיין בשינוי ניכר באופי החתך הסדימנטרי, מסדרות עבות של מלח הליט לסדימנטים קלסטיים דקים, שהובלו משולי האגן למרכזו על ידי שיטפונות, נחלים ורוח. מאוחר יותר גוברת נוכחותם של מינרלים אבפוריטיים, המאפיינים גופי מים מלוחים שבהם אידוי מוגבר מעלה את ריכוז המלחים במים עד הגיעם לרוויה. כאשר מושגת רוויה, מינרלים אלה מתגבשים ושוקעים לקרקעית ומצטברים לאורך שכבה אופקית. אחד המינרלים הראשונים הנוטים להתגבש באידוי מי ים הוא ארגוניט (CaCO_3). בשלבי אידוי מתקדמים

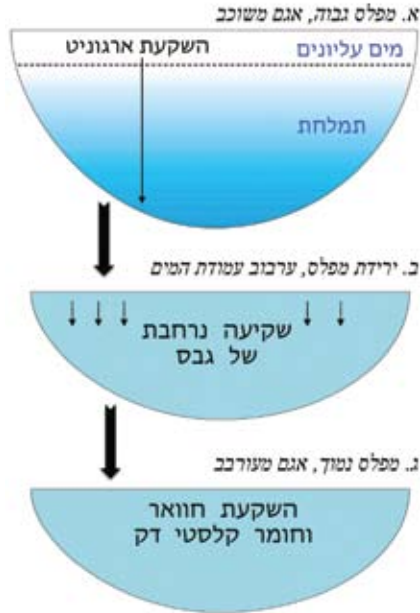
יותר מתגבש גבס ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ומאוחר יותר גם מלח בישול (הליט, NaCl). בהמשך האידיוי נוצרים גם מינרלים של מגנזיום-אשלגן-סולפט. כך, השינוי בהרכב המינרלים לאורך החתך הגאולוגי יכול ללמד על התפתחותה של דרגת הרוויה במים ובהתאם לכך על דרגת האידיוי ותנאי האקלים ששררו באזור.

המרכיבים העיקריים של הארגוניט והגבס הם קלציום (בשניהם), סולפט (בגבס) וקרבונט (בארגוניט). מי התמלחת האופיינית לבקע ים המלח (תמלחת סדום הקלציום-כלורידית) עשירים בקלציום. מקור הסולפט והקרבונט באגמים הוא במי נגר מתוקים (נהר הירדן, נחלים, שיטפונות), המתעשרים בשני היונים הללו תוך כדי הזרימה לכיוון האגם והמגע עם סלעי הסביבה. כניסתם של מים מתוקים לעמודת המים של האגם בעיקר בעונות החורף משנה את ריכוזי שני היונים הללו באופן עונתי ומלווה בהיווצרות שיכוב בעמודת המים, זאת בשל הבדלי צפיפיות בין המים המתוקים והקלים למי האגם המלוחים והכבדים (שיכוב כזה נוצר בים המלח גם בימינו, לאחר חורפים רטובים במיוחד) (איור 4). מקץ מספר חודשים מביא אידיוי פני המים בקיץ לעלייה בריכוזי המלחים במים, והם מגיעים לרוויה ביחס לארגוניט אשר מתגבש, שוקע ויוצר שכבה לבנה דקיקה בקרקעית האגם. יחד עם מי השיטפונות בחורף מובלים לאגם חלקיקי בוץ קטנטנים, בעיקר חרסיות, השוקעים לקרקעית ויוצרים שכבה כהה דקה של דטרטיטוס⁴. זוגות הארגוניט והדטרטיטוס יוצרים יחדיו שכבה עונתית-שנתית המכונה רווה (*varve*). הנוורות הן מן המאפיינים הבולטים של החתכים האגמיים בבקע ים המלח ומתעדות את היסטוריית האגם בקנה מידה שנתית.

יתרון חשוב בנוכחות ארגוניט בחתך נובע מהיכולת להשתמש בו לתארוך רדיואקטיבי (למשל בשיטות פחמן-14 או U-Th, ראו מסגרת) וכן מכך שהרכבו הכימי והאיוטופי⁵ משקף את הרכב המים שמהם שקע ומאפשר שחזור של הרכב מי האגם בזמנים שונים.

נראה אפוא כי ניתן ללמוד רבות על היסטוריית האגמים מתוך רצף סלעי המשקע שהותירו אחריהם ומבדיקתם של סלעים אלה: ארגוניט נוצר כתוצאה מכניסת מים מתוקים ומאפיין אגם שמפלסו גבוה ושהתקיים בתקופה רטובה, חוואר או גבס מציינים ירידת מפלס או מפלס ביניים, ואילו שכבות הליט או חומר נחלי (חול, חלוקים) משקפים נפילה חדה במפלס המים ותנאים יבשים. הנחות אלה מתורגמות לשינויים ביחס בין שטפי הכניסה והאידיוי ומוצגות יחד עם עקומת שינויי המפלס באיור 76.

איור 4: מבנה עמודת המים של אגמי הבקע וטיפוסי המשקעים בשלבי אקלים שונים. (א) בתקופה רטובה, שטף המים הנכנסים גבוה ותומך במפלס אגם גבוה ובעמודת מים משוכבת. בתנאים אלה שוקעים מהאגם רצפים שנתיים של ארגוניט ודטריטוס; (ב) ירידות מפלס ניכרות גוררות ערבוב של עמודת המים לצד השקעה נרחבת של גבס. באגם הלשון, אירועים מסוג זה הם בריזומניים לאירועים של גלישת כמויות עצומות של קרחונים מגרינלנד לתוך האוקיינוס האטלנטי ('אירועי היינריך') ושינויים דרמטיים באקלים העולמי; (ג) משקעי האגמים במהלך תקופות יבשות ארוכות מאופיינים בתכולה גבוהה של חרסיות וחואר ואף חולות ומשקעי נחלים.



אגם עמורה

גוף המים הראשון שהתקיים לאחר ניתוק לגונת סדום מהים מכונה 'אגם עמורה' והתקיים כנראה עד תחילת תקופת הקרח האחרונה לפני 70,000 שנים. רוב רובה של תצורת עמורה שהורבדה מאגם עמורה קבור בתת-ההקרקע, ורק חלקה העליון ביותר מבצבץ אל פני השטח במקומות מסוימים לאורך הבקע. מכיוון שחשיפת סלעי התצורה מוגבלת במרחב, תוארו מחשופי סלע שונים המקבילים לחלק העליון של תצורת עמורה בשמות כגון חמרמר וסמרה; כאן מיוחס השם 'תצורת עמורה' לכל החתכים האגמיים שמעל תצורת סדום ומתחת תצורת הלשון (ראו להלן). חלקה התחתון והקדום ביותר של התצורה זוהה רק בקידוחים כגון קידוח סדום עמוק 1 בדרום ים המלח (איור 1). עומק המגע סדום-עמורה בקידוח זה הוא כ-3.7 ק"מ, שם עובר מלח סדום במעבר חד לסדרות סלעי משקע נחליים-חופיים בעובי כולל של כ-900 מטרים המכונים 'חולות מלך סדום'. יש בכך כדי להעיד כי בשלביו הראשונים היה כנראה מפלס גוף המים נמוך, וניתן לשער בכלליות כי

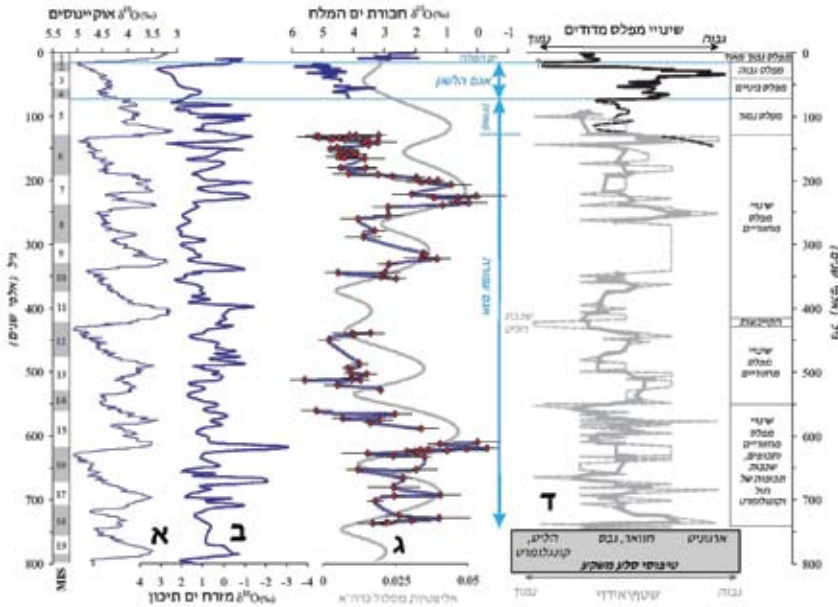


איור 5: חתך תצורת עמורה באזור מערת ארובותיים. ניתן להבחין בשכבות סלעי המשקע השעונוות על הר סדום, שהתרוממותו מתת־הקרקע הסיטה והרימה את שכבות הסלע שכיסו אותו. גיל המשקעים צעיר יותר ככל שהן רחוקות מהמגע עם הר סדום.

הדבר משקף תנאי אקלים יבשים לצד תהליכי בליה מוגברים בשלבי ההתפתחות הראשוניים של הבקע. מעל חולות מלך סדום מופיעה סדרה ארוכה של מחזורי השקעה של סלעים אגמיים מובהקים כגון חווארים, גבסים, פצלים וחולות, שגילם אינו מוגדר ושלא נחקרו (איור 3).

המקום היחיד שבו נחשף חתך ארוך וניכר של התצורה בפני השטח הוא בשוליים המזרחיים של הר סדום באזור מערת ארובותיים (איור 1). שם, התרוממות 'פקק' (דיאפיר) המלח של הר סדום מתת־הקרקע אל פני השטח (וינברגר ובגין, 2005) הרימה והסיטה שכבות של סלעי משקע שהורבדו מעל מלח סדום עד כדי הצבתן במצב מאונך ושעון על הר סדום (איור 5). עובי חתך הסלעים באתר ארובותיים כ־320 מטרים, וגילו נע בין 740 ל־140 אלפי שנים טרם זמננו. גילים אלה נקבעו על ידי שילוב בין תארוך באמצעות סדרות הפירוק של אורניום לבין 'סטרטיגרפיה של חמצן' (ראו מסגרת).

החתך מורכב מחילופים של חבילות ארגוניט ודטריטוס, חוואר וגבס, וכן יחידות חול וקונגלומרט, המתארים מספר מחזורי השקעה. ככלל, מחזורים אלו תואמים מחזורים אקלימיים עולמיים של תקופות קרחוניות ובין־קרחוניות. חתך תצורת עמורה באזור מערת ארובותיים חופף את השלבים האיזוטופיים של חמצן 6–19 (איור 6)⁶, והחלק העליון של התצורה שחשוף באזור נחל פרצים חופף את השלב האיזוטופי 5, המכונה גם 'תקופת הקרח האחרונה'.



איור 6: ההיסטוריה הלימנולוגית של אגמי הבקע במהלך 740 אלפי השנים האחרונות. (א) שינויים בהרכב האיזוטופי של חמצן ($\delta^{18}\text{O}$) באוקיינוסים המגדירים שלבים איזוטופיים של חמצן (Marine Isotope Stages, MIS); (ב) שינויים בהרכב $\delta^{18}\text{O}$ במי אגם עמורה, אגם הלשון וים המלח ההולוקני כפי ששוחזרו ממשקעי ארגוניט. גילם של משקעי אגם עמורה נקבע על בסיס שילוב בין תארוך רדיואקטיבי בעזרת סדרות ההתפרקות של אורניום לבין התאמה בין עקומת $\delta^{18}\text{O}$ של מי האגם לאלו של האוקיינוסים ושינויים מחזוריים בשטף קרינת השמש, המיוצגים כאן על ידי שינויים באליפטיות של מסלול כדור הארץ סביב השמש; (ג) שחזור ההיסטוריה של אגמי הבקע מתוך עקומות שינויי המפלס המוחלט באגם הלשון וים המלח (קו שחור), יחד עם הערכת השינוי ביחס בין שטף הכניסה של מי גשמים לשטף היציאה באידי באגם עמורה מתוך הרכב הסלעים בחתך (קו אפור מקוקו); הקו האפור המודגש מייצג ממוצע רץ). ככלל, אגם גבוה מאופיין בהרכב $\delta^{18}\text{O}$ גבוה, ולהפך. ב-(ג), הנקודות האדומות מציינות ערך ממוצע של כעשר דוגמאות מאותו גובה בחתך.

מהעקומה המוכללת של ההיסטוריה של אגמי הבקע ניתן ללמוד כי במהלך שתי תקופות הקרח האחרונות (החופפות את שלב איזוטופי 6 לפני 130-190 אלפי שנים ואת השלבים האיזוטופיים 2-4 לפני 14-70 אלפי שנים) התקיימו באזור תנאים רטובים במיוחד, וכי אגם עמורה אופיין בדרך כלל במפלסי ביניים עם תנודות מוגבלות מעלה ומטה. מחזורי תנודות אלו היו תכופים יחסית לפני 550-740 אלפי שנים ביחס למחזורים ארוכים יותר בתקופה שלאחר מכן.

אגם הלשון

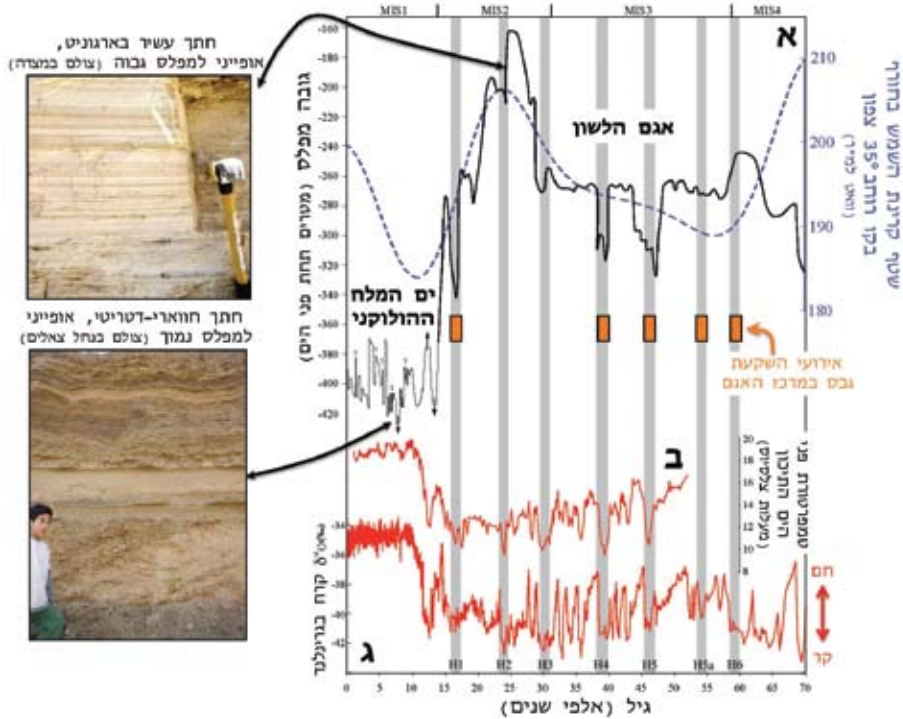
אגם הלשון התקיים בבקע לפני 14-70 אלפי שנים במקביל לתקופת הקרח האחרונה. אגם זה הגיע לנפחים הגדולים ביותר מבין האגמים הרביעוניים ובשיאו, לפני כ־25,000 שנים, השתרע בין חצבה שבדרום לכנרת שבצפון, ומפלסו הגיע עד 160 מטרים מתחת לפני הים, כלומר יותר מ־250 מטרים מעל מפלס המים הנוכחי (איורים 1, 6 ו־7). בשלבים מוקדמים יותר של קיומו נע מפלס המים הממוצע סביב 260 מטרים מתחת לפני הים (ברטוב, 2005). אגם זה הוא הנחקר ביותר מבין אגמי הבקע, וההיסטוריה שלו מוכרת ברמה הטובה ביותר. לכך תורמים המחשופים הנאים, הנוחים לגישה ומאפשרים השוואות מרחביות המספקות נתונים בנוגע לרום המפלס המוחלט של האגם בתקופות שונות (איור 7, וראו את הקו השחור באיור 6 לעומת השחזור היחסי של התנהגות המפלס באגם עמורה [קו אפור מקווקו]; לפרטים נוספים ראו ברטוב, 2005).

ים המלח ההולוקני

עם הנסיגה הסופית של הקרחונים מצפון אירופה וצפון אמריקה תמה תקופת הקרח האחרונה והחלה תקופת ההולוקן, שבמהלכה נעו מפלסי המים סביב 400 מטרים מתחת לפני הים (שטיין, 2006). סלעי המשקע המרכיבים שהורבדו מים המלח ההולוקני (ומכונים 'תצורת צאלים') עשירים בחומר חווארי וחרסיתי דק (איור 7), זאת לצד מופעים של חולות וחלוקים מחד וארגוניט וגבס מאידך. ככלל, ובהתאמה לעקומת שינויי המפלס, משקפת תצורת צאלים גוף מים נמוך יחסית לקודמיו, המאפיין תקופה יבשה.

מחזורי קרינת השמש, אקלים כדור הארץ ואגמי הבקע

משטר האקלים ברביעון הוא בעל מאפיינים ייחודיים בהיסטוריה הארוכה של כדור הארץ. עיקרו שינויים מחזוריים חריפים, הכוללים התפשטות והתכווצות של כיסויי קרח נרחבים ברחבים גאוגרפיים גבוהים, שינויים בנפח ובמבנה



איור 7: עקומת שינויי המפלס של אגם הלשון וים המלח בי 70 אלפי השנים האחרונות. (א) מפלס האגם גבוה בזמן שטמפרטורות המים של פני השטח בים התיכון (ב) ובגרינלנד (ג) נמוכות יחסית, ולהפך (בגרינלנד, ערך $\delta^{18}O$ נמוך יותר מייצג טמפרטורה נמוכה, ולהפך). בזמן תקופת הקרח האחרונה מפלס האגם עוקב בכלליות אחר השינוי בשטף קרינת השמש בחורף בקו רוחב 35° צפון (עקום כחול מקווקו), אולם השינוי בתנאי המערכת בתקופות בין-קרחוניות מוביל להתנהגות בלתי תלויה בין מפלסי המים לשטף קרינת השמש בחורף. מבנה עמודת המים באגם ונפחה מאופיינים על ידי טיפוסים שונים של סלעי משקע – אגם גדול וגבוה נוטה להשקיע רצפי ארגוניט בהירים בעובי 1~מ"מ (תמונה בצד שמאל למעלה) וגוף מים מצומצם יותר המאופיין בהשקעת חוואר ודטריטוס חום-כהה (שמאל למטה). השינוי הגדול ביותר במפלסי המים מקביל למעבר בין תקופת הקרח האחרונה להולוקן. ניתן לזהות מחזורים קטנים יותר המאופיינים על ידי נפילות מפלס חדות של אגם הלשון במקביל להתרחשות 'אירועי היינריך' בצפון האוקיינוס האטלנטי (H), מסומנים לפי הסדר [1-6] בתחתית האיור ועל ידי פסים אפורים). כל אחת משכבות הגבס ששקעו מאגם הלשון תואמת בזמן את האירועים האלה, כמו גם צניחה זמנית בטמפרטורות המים של פני השטח בים התיכון וגרינלנד.

הפיזיקלי של האוקיינוסים, תנודות חריפות בתפוצתם של שטחי המדבריות ושינויים ניכרים במשטר ההידרולוגי באזורים רבים. מגמות אלה משקפות מגוון תהליכים, שהעיקרי שבהם הוא שינויים בשטף קרינת השמש לפני כדור הארץ, המוכתבים על ידי מידת האליפטיות של מסלול כדור הארץ סביב השמש (זמן מחזור של 100,000~שנים), נטיית ציר הסיבוב של כדור הארץ על צדו (41,000 שנים) וההשתנות המחזורית של נטייה זו (23,000 שנים). מחזורים אלו מכונים 'מחזורי מילנקוביץ', על שם המדען שתיאר אותם לראשונה. שינויים בשטף הקרינה גוררים שינויים במנגנוני פיזור החום על פני כדור הארץ דרך האטמוספירה והאוקיינוסים, שבתורם מכתיבים תהליכים ושינויים אזוריים בריזמוניים כמעט, אם כי אופי השינוי האקלימי במקומות שונים בעולם אינו זהה בהכרח. לדוגמה, בשיא תקופת הקרח האחרונה, לפני כ־25,000 שנים, היה מפלס האוקיינוס נמוך בכ־120 מטרים מהמפלס הנוכחי, צפון אירופה כוסתה בקרח, מדבר סהרה היה יבש ואזורנו היה, כאמור, גשום מאוד ומפלס אגם הלשון היה גבוה ממפלסו הנוכחי של ים המלח בכ־250 מטרים. מפלס אגם הלשון עוקב, בין השאר ובכלליות, אחר שטף קרינת השמש ברחבים בינוניים (קו כחול מרוסק באיור 7א), אך בתקופות בין־קרחוניות (למשל בהולוקן) המגמה הפוכה. גם אירועים קצרי טווח מתועדים בריזמנית ברחבי העולם; אירועי גלישת קרחונים לתוך צפון האוקיינוס האטלנטי ('אירועי היינריך') מתרחשים בעת ובעונה אחת עם היחלשות גשמי המונסון בדרום מזרח אסיה, התגברות היצרנות הביולוגית במי האוקיינוס הדרומי ליד אנטרטיקה ובצורות קשות באזורנו, שביטויין נפילות מפלס האגם והשקעת שכבות גבס עבות. אפילו טווחי זמן קצרים יותר של שנים בודדות מראים התאמה בין אזורים שונים: למשל, עוביין של למינות הארגוניט בתצורת הלשון משתנה במקביל לערכים האיזוטופיים של חמצן בגלעיני קרח בגרינלנד, ושניהם יחדיו עוקבים אחר שינויים מחושבים בשטפי קרינת השמש.

המנגנונים המקשרים בין שלל התצפיות שהוזכרו מורכבים ולא נדונו כאן, אך מתוך העדויות שנסקרו עולה כי משקעי האגמים הקדומים בבקע ים המלח מספקים תיעוד רציף ומפורט על שינויי אקלים אזוריים המשקפים מגמות עולמיות. ייחודו של ארכיב זה, פרט לאיכותו וטווח הזמן הארוך יחסית שהוא מתעד, הוא במיקומו בקו רוחב בינוני שכפי שהוזכר בפתיח, חשוב מאוד להבנת השפעותיהם של שינויי אקלים באזורים מאוכלסים.

לסיכום, חקר ההיסטוריה של גופי המים הקדומים בבקע ים המלח מתבסס על שילוב בין הבנת ההתפתחות הטקטונית של האזור, שחזור נפח המים והרכבם מתוך ההרכב המינרלוגי, הכימי והאיזוטופי של המשקעים שהורכדו מהם, קביעת גילם בעזרת כלים רדיואקטיביים ושיקולים גאולוגיים כלליים. כאמור, התפתחותם של גופי המים בזמן בבקע ים המלח קשורה קשר ישיר לשינויי אקלים עולמיים. בהיפוך תפקידים יכולה ההיסטוריה שהוצגה במאמר זה לסייע בשחזור מגמות אקלימיות בעולם, ועל כן חקר אגמי הבקע הנו כלי חשוב ביותר להבנת מנגנוני שינויי אקלים בעולם בעבר, בהווה ואולי בעתיד.

הסברים למושגים המופיעים במאמר

1. אבפוריט: סלע הנוצר כאשר תמיסה עוברת אבפורציה, כלומר אידוי, הגורם לעלייה בריכוזי המלחים המומסים בתמיסה עד שמושגת רוויה ונוצרים גבישי מינרלים מוצקים. אלה שוקעים לקרקעית ויוצרים שכבת סלע אבפוריט.

2. סדרות פירוק של אורניום (תארוך בשיטת U-Th): אורניום (U) הנו יסוד טבעי ונפוץ בטבע, ובכלל זה בסלעי משקע גירניים דוגמת הארגוניט שבמשקעים האגמיים בבקע ים המלח. יסוד נוסף, תוריום (Th), הוא בלתי מסיס וכמעט אינו נוכח במים טבעיים. ברגע גיבושו של מינרל דוגמת ארגוניט הוא 'כולא' בתוכו אורניום מהתמיסה אך אינו מכיל תוריום. אחד האיזוטופים של אורניום (^{234}U) דועך לאיזוטופ של תוריום (^{230}Th), ולכן כל אטום ^{230}Th שנוכח בדוגמה נתונה חייב היה להיווצר לאחר זמן הגיבוש וההשקעה. מכיוון שקצב הייצור וההתפרקות של האיזוטופים השונים ידוע (זמן מחצית החיים של ^{230}Th הוא 75,200 שנים, ומבוטא במשוואת הגיל על ידי קבוע הדעיכה $\lambda_{^{230}\text{Th}}$), ניתן לחשב במדויק את גיל הדוגמה (t) מתוך מדידת היחסים האיזוטופיים $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ו- $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$. התארוך בשיטת $^{230}\text{Th} - ^{234}\text{U}$ מוגבל לדוגמאות שגילן עד 400-500 אלפי שנים.

משוואת הגיל של שיטת U-Th:

$$\left(\frac{{}^{230}\text{Th}}{{}^{238}\text{U}}\right) = (1 - e^{-\lambda_{230\text{Th}}t}) + \left(\left(\frac{{}^{234}\text{U}}{{}^{238}\text{U}}\right) - 1\right) \times \left(\frac{\lambda_{230\text{Th}}}{\lambda_{230\text{Th}} - \lambda_{234\text{U}}}\right) \times (1 - e^{-(\lambda_{230\text{Th}} - \lambda_{234\text{U}})t})$$

3. סטרטיגרפיה של חמצן, כרונוסטרטיגרפיה: לעתים קרובות אין אפשרות לקבוע גילים של חתכים גאולוגיים בשיטות רדיואקטיביות. במקרים כאלה ניתן לקשר בין מגמות שינויים ליתולוגיים, כימיים, איזוטופיים או אחרים לאורך חתך לבין מגמות מקבילות של שינויים בחתכים אחרים, שגילם ידוע באופן בלתי תלוי. קביעת גיל על בסיס התאמה סטרטיגרפית בין חתכים מכונה 'כרונוסטרטיגרפיה'. שיטה זו יושמה על מנת לסייע בקביעת גילי תצורת עמורה באזור מערת ארובותיים, שם הותאמו מגמות שינויים בהרכב האיזוטופי של חמצן בלמינות ארגוניט למגמות שינוי בהרכב האיזוטופי של חמצן במשקעים במזרח הים התיכון.

4. דטריטוס, סלע דטריטי: סלע המורכב משברי סלעים אחרים.

5. איזוטופ: יסודות כימיים (כגון חמצן, פחמן וכו') הם בעלי מספר אטומי המציין את מספר הפרוטונים בגרעין. יש יסודות שמופיעים כאיזוטופים שונים הנבדלים ביניהם במספר הניוטונים שבגרעין, ועל כן הם בעלי מספר פרוטונים זהה אך מסה כוללת שונה. לעתים קרובות היחס בין איזוטופים של יסוד מסוים (לדוגמה היחס בין האיזוטופ ${}^{87}\text{Sr}$ לאיזוטופ ${}^{86}\text{Sr}$ המתואר כיחס האיזוטופי של סטרונציום, ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$) הוא ייחודי במאגרים גאולוגיים שונים, כגון מי ים בני גיל נתון, סלעי משקע או סלעים מגמטיים שונים. עובדה זו מאפשרת שחזור כמותי של השטפים בין המאגרים השונים.

יש יסודות שלהם איזוטופים שאינם יציבים (רדיואקטיבים) ואשר מתפרקים בקצב קבוע המוגדר כ**זמן מחצית חיים**, שהוא פרק הזמן שבו מתפרקת מחצית מכמות אטומים נתונה. אם זמן מחצית החיים ידוע, מדידת ריכוזיהם של שני האיזוטופים, זה שהתפרק וזה שהצטבר, מאפשרת חישוב מדויק של גיל דוגמה נתונה.

שתי שיטות תארוך נפוצות למשקעי אגמים הן שיטת פחמן-14 ו-U-Th. כל שיטה מכסה טווחי זמן שונים ובעלת יתרונות וחסרונות שונים. לסקירה של שיטת פחמן-14 ראו מאמרו של ברטוב (2005).

6. שלבים איזוטופיים של חמצן (Marine Isotope Stage; MIS): ההרכב האיזוטופי של חמצן ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) במי האוקיינוסים אינו קבוע. הסיבה המרכזית לכך (אך לא היחידה) היא העובדה שכאשר מים מתאדים, האיזוטופ הכבד יותר (^{18}O) נוטה להיוותר בנוזל יותר מאשר האיזוטופ הקל (^{16}O), שימעדיף לעבור למצב הגזי (אדי המים). על בסיס זה ניתן לצפות כי ככל שכמויות גדולות מאוד של מי האוקיינוסים עוברות אידיוי והנפח הכולל של המים קטן, כך יהיה האיזוטופ הכבד מועשר יותר באוקיינוסים והיחס $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ קטן יותר. אבדן המים באוקיינוסים מאוזן בעלייה בנפח של כיסוי הקרח בקוטבי כדור בארץ (תקופות קרחוניות). מתוך ההסבר עולה כי השינויים בהרכב האיזוטופי של חמצן באוקיינוסים תואמים את מגמות השינויים בנפח של כיסוי הקרח בקטבים. לכן מקובל להגדיר את התזמון של תקופות קרחוניות בעזרת שינויים בהרכב האיזוטופי של החמצן באוקיינוסים, ובמילים אחרות 'שלבים איזוטופיים של חמצן'. שלב איזוטופי 1 מקביל להולוקן, שלבים 2 עד 4 מגדירים שלבי ביניים בהתפתחות תקופת הקרח האחרונה וכן הלאה.

רשימת מקורות וקריאה נוספת

- ברטוב, י'. 2005. 'אגם הלשון: מפלסים ואקלים', מלח הארץ 1: 19-33.
 וינברגר, ר' ובגין, ב"ז. 2005. 'מה ראתה אשת לוט? עליית מחדק המלח של הר
 סדום בשני מיליון השנה האחרונות', מלח הארץ 1: 1-18.
 סטרינסקי, א'. 2005. 'אגם ים המלח: הנביעה הגדולה בעולם', מלח הארץ 1:
 35-51.
 שטיין, מ'. 2006. 'שינויים אקלימיים באגן ים המלח והתפתחות תרבות האדם
 בישראל וסביבותיה ברביעון המאוחר', מלח הארץ 2: 21-38.
 זק, י'. 1967. הגאולוגיה של הר סדום, חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה,
 האוניברסיטה העברית בירושלים.
 Miller, K.G., Kominz, M.A., Browning, J.V., Wright, J.D., Mountain,
 G.S., Katz, M.E., Sugarman, P.J., Cramer, B.S., Christie-Blick,
 N. & Pekar, S.F. 2005. 'The Phanerozoic Record of Global Sea-Level
 Change', *Science* 310: 1293-1298.
 Stein, M. & Agnon, A. 2007. 'So, What is the Age of the Sedom Lagoon?',
 In: *Israel Geological Society Annual Meeting, Neve Zohar*.
 Steinitz, G. & Bartov, Y. 1991. 'The Miocene-Pleistocene History of
 the Dead Sea Segment of the Rift in Light of K-Ar ages of Basalts',
Israel Journal of Earth Sciences 199: 40-208.

