

מה ראתה אשת לוט?

עליית מחדר המלח של הר סדום בשני מליון השנים האחרונות

ר. וינברגר, ז.ב. בגין

המכון הגיאולוגי

נתחיל בבראשית. "השמש, יצא על-הארץ; ולוט, בא צערה. ויהנה, המטיר על-סדם ועל-עמרה--גפרית ואש: מאת יהנה, מן-השמים. ויהפך את-הערים האל, ואת כל-הפפר, ואת כל-ישיבי הערים, וצמח האדמה. ונפבו אשתו, מאחרי; ונתי, נציב מלח" (בראשית י"ט 23-26). פסגת הר סדום ניצבת היום בגובה 165- מתחת לפני הים (כ 240 מטרים מעל ים המלח, איור 1), אך אם אמנם הסתכלה בה אשת לוט לפני כ-4,000 שנה הפסגה היתה נמוכה 30 מטרים. מדידות מדויקות הנערכות בשנים אלה מצביעות על התרוממות הר סדום בקצב של 9-5 מ"מ בשנה - הקצב הגבוה ביותר של תנועת גושי סלע באזורנו - ותצפיות גיאולוגיות מראות שההר התרומם בקצב זה ב-14,000 השנים האחרונות, לפחות.

הגורם העיקרי המניע את הר סדום בדרכו כלפי מעלה הוא הרכב הסלעים שבו. לא במקרה הונצחה סקרנותה של אשת לוט על ידי הפיכתה לנציב מלח, כי אכן, ההר בנוי ברובו שכבות מלח. המלח, תרכובת של נתרן וכלור, נוצר בבקע ים המלח כתוצאה של התאדות מי ים, כאשר הים התיכון הקדום פלש לבקע דרך עמק יזרעאל לפני 5-6 מיליון שנה ויצר בו מפרץ צר וארוך (איור 2). במשך כמה מאות אלפי שנים הוצף המפרץ מדי פעם במי ים שהותירו עם התאדותם שכבות מלח. השתפלות הבקע אפשרה שוב כניסת מי ים, שהתאדו והוסיפו שכבות מלח וחוזר חלילה, עד להצטברות רצף שכבות מלח בעובי כאלפיים מטר בחלקים ניכרים של בקע ים המלח.

שתי תכונות מייחדות מלח מסלעים אחרים והן שאפשרו את היווצרותו של הר סדום. התכונה הראשונה היא שינוי צורתו תחת לחץ ונטייתו "לזרום", אם גם באיטיות רבה. תכונה זו מפתיעה כשמדובר בסלעים אך דוגמא יומיומית תמחיש את הדבר. נציב גוש פלסטלינה על גיליון נייר, נסמן את גבולותיו ונניח עליו משקולת. כעבור שעות אחדות נוכל להבחין שגוש הפלסטלינה התדקק אך התרחב בבסיסו. תכונת חומר זו מכונה *פלסטיות*¹. אף למלח תכונה זו ועם הזמן הוא "זורם". עדות לכך שמלח הר סדום אכן זרם ניתן לראות במחצבת המלח בהר סדום, סמוך לסלע הידוע כ"אשת לוט". כאן מצויות שכבות דקות קרועות של דולומיט ופצלים בין שכבות מלח עבות (איור 3). בפערים שבין קרעי השכבות הדקות מצוי מלח, תצפית המעידה כי הוא נלחץ וזרם אל הפערים שנוצרו².

¹ נוכל לחשב את קצב שינוי הצורה, הוא קצב המעוות: נניח שהגוש התארך ב-60 מילימטר לעומת אורכו המקורי שהיה 100 מילימטר. שיעור ההתארכות (המעוות) הוא 60/100, כלומר 0.6 (מספר זה הוא חסר ממדים). אם הגענו למעוות זה אחרי שעתיים, קצב המעוות הוא 0.6/2, כלומר 0.3 לשעה או, במונחים שנתיים, בערך 2600 לשנה. כפי שניתן לצפות, קצב המעוות תלוי לא רק בתכונות הפלסטיות של החומר אלא גם בלחץ שאנו מפעילים על גוש הפלסטלינה באמצעות המשקולת שהנחנו עליו.

² אפשר למדוד כאן את שיעור ההתארכות (המעוות), שהוא 0.6 (איור 3). אנו מניחים (להלן) שהמלח החל לזרום לפני כ-2 מיליון שנה, ואם נייחס את המעוות שנמדד במלח למשך זמן זה נקבל שיעור מזערי של קצב המעוות, שהוא 0.6/2,000,000, כלומר 0.0000003 לשנה. קצב זה קטן בהרבה מקצב המעוות של הפלסטלינה, אך נזכור כי המעוות של מלח הר סדום נמשך זמן ארוך מאד.



איור 1 – הר סדום נישא מעל האגן הדרומי של ים המלח. מבט דרומה מאזור עין בוקק.

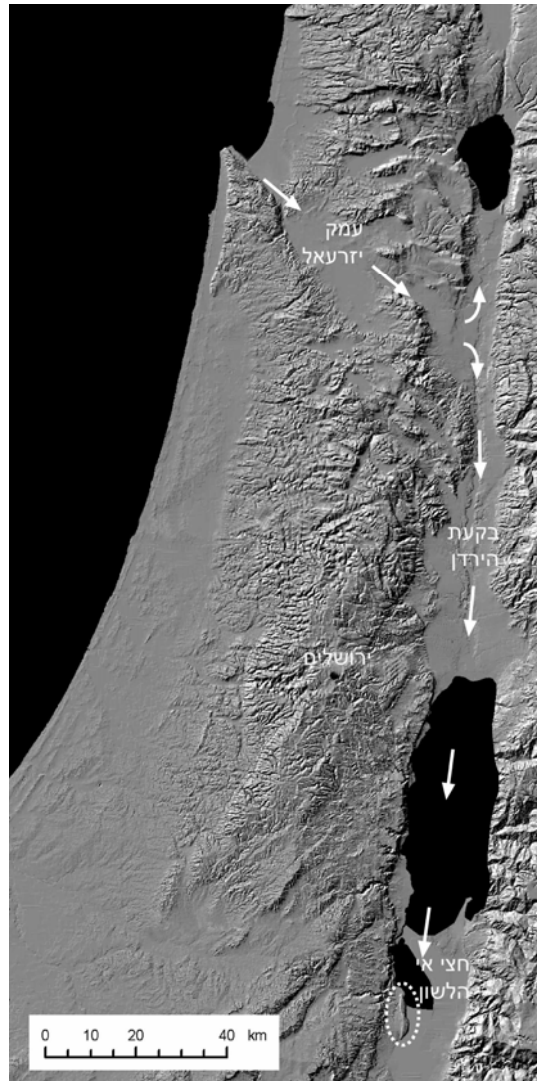
התכונה השנייה האופיינית למלח היא צפיפותו הנמוכה: 2.15 טון/מ^3 , לעומת $2.30\text{--}2.70 \text{ טון/מ}^3$, שהוא הערך האופייני לרוב הסלעים הקבורים בעומק. תכונה זו גורמת למלח לנוע ביתר קלות בסביבתו הצפופה ממנו, ולהתנשא על סביבתו. אנו נתבסס על הבדלי הצפיפויות בין המלח לסלעי הסביבה כדי לחשב את הגובה המרבי שאליו יגיע הר סדום בעוד כמה עשרות אלפי שנים.

כדי להבין את תולדות עלייתו של הר סדום עלינו לפנות למבנה התת קרקעי של בקע ים המלח. גג שכבות המלח מצוי במרכז בקע ים המלח בעומק כ-5,500 מטרים והן מכוסות שכבות של חלוקים, אבני חול, וחרסיות שהצטברו בבקע. הנתונים שבידינו (להלן) מצביעים על כך שמלח סדום החל להתרומם כאשר עובי השכבות שהצטברו מעל המלח היה כשניים וחצי קילומטרים. המלח שנלחץ על ידי עמוד השכבות שמעליו התחיל לזרום לצדדים בקצב של מילימטרים אחדים בשנה, עד שעבר מרחק של קילומטרים אחדים והגיע, כעבור מאות אלפי שנים, לאזור שבור בשוליים המערביים של אגן ים המלח (איור 4). ההעתקים באזור זה מגיעים לעומק קילומטרים אחדים והם יצרו אזור נוח לתנועת המלח כלפי מעלה, כך שהמלח אשר נלחץ במרכז הבקע החל להתרומם בשולי הבקע דרך רצועת השבירה. השכוב במלח נשמר בעיקרו בעת התנועה, שבמהלכה השכבות הוטו ממצבן האופקי המקורי עד שהגיעו למצבן האנכי הנוכחי. הן תוארו כחפיסת קלפים ניצבת שבה שכבות המלח, כקלפים, מחליקות זו לעומת זו בתנועתן כלפי מעלה (איור 5) בעת שהן נדחפות מלמטה על ידי המלח הזורם. הר סדום הוא איפה מחדר (דיאפיר) מלח.

בבקע ים המלח מצויים מחדרי מלח נוספים. הגדול בהם מצוי בעומק חצי אי הלשון מול מצדה, וקטנים יותר וזהו מתחת לים המלח וכן מתחת לבקעת הירדן המזרחית, דרומית לגשר אדם (דמיה). בקידוח צמח-1 דרומית לכנרת נחדרו כ-1,000 מ' של שכבות מלח, אולם כיוון שהן כנראה נטויות עוביין קטן יותר. מחדרי מלח מצויים גם מתחת לקרקעית הים התיכון וים סוף. באזורנו, ייחודו של הר סדום הוא בעובדה שהמלח פרץ כאן אל פני השטח. מחדרי מלח אחרים שפרצו לפני השטח ויצרו גבעות המתנשאות מעל סביבתן מוכרים בטוניסיה ובאיראן והמשותף לאזורים אלה הוא האקלים היבש. מסיסותו של המלח במים היא כה גבוהה (כל מ"מ גשם בשנה עשוי להמיס במשך שנה שכבת מלח שעובייה כ-0.2 מ"מ) עד כי גשם רב ממיס את שכבות המלח

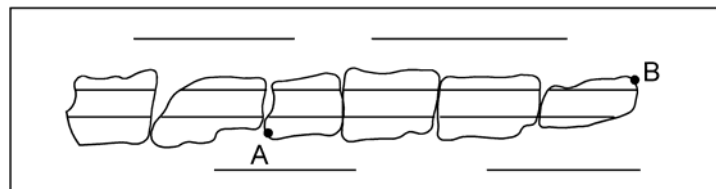
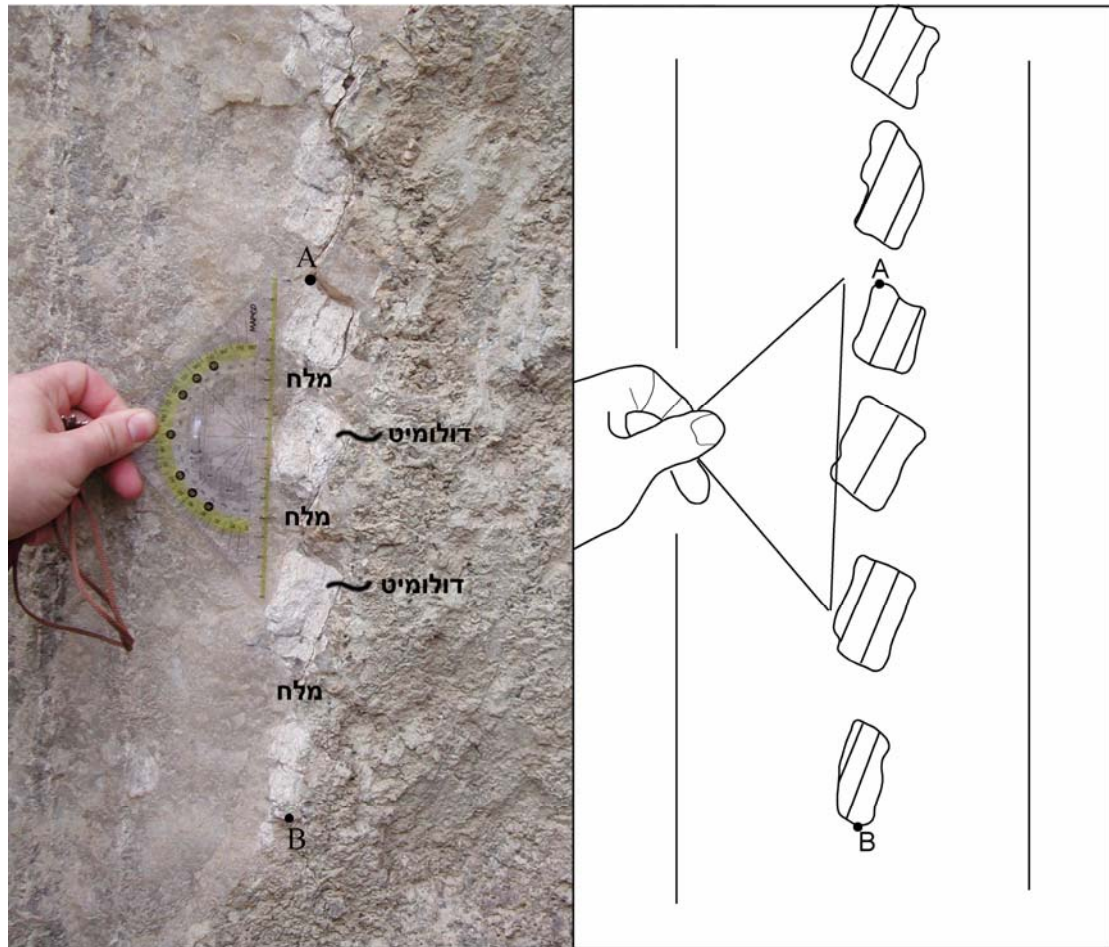
המתרוממות ומונע היווצרות גבעה. לדוגמא: אזור שיורדים בו 500 מ"מ גשם בשנה עשוי להמיס בשנה שכבת מלח בעובי כ-100 מ"מ. אם המלח נדחף מעלה בקצב נמוך משעור זה הוא לא ייצור שם גבעה בפני השטח.

לעומת זאת, באיראן קצב ההתרוממות של מחדרי המלח עשוי להגיע ל-1000 מ"מ ויותר בשנה והיובש שם מאפשר למחדרי המלח לעלות במהירות כה גבוהה עד כי הם יוצרים "מזרקות מלח", בהן המלח השופע "נשפך" לצדי הגבעה ובמשך אלפי שנים מגיע למרחק קילומטרים אחדים ממנה.

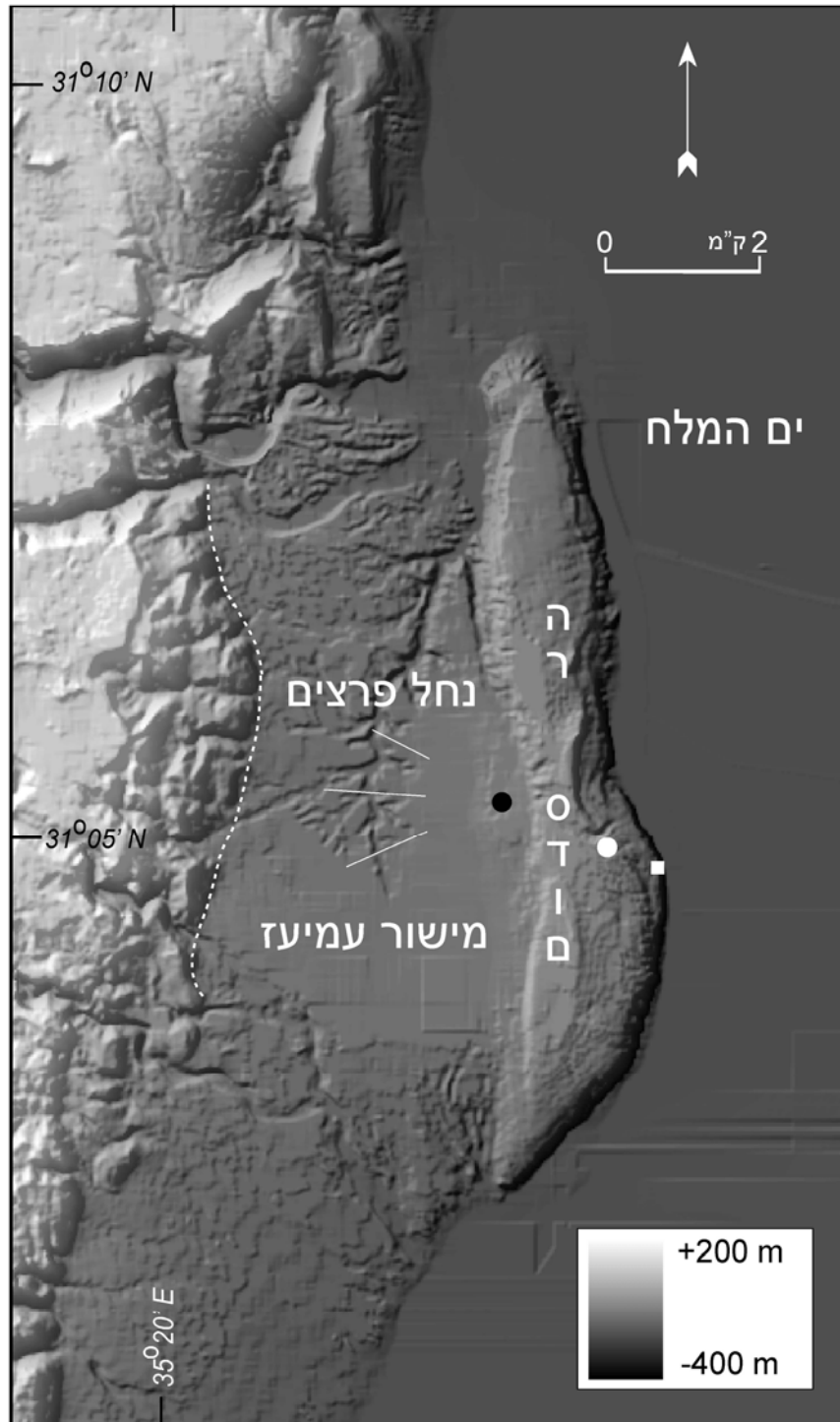


איור 2 – מפת תבליט של מרכז ישראל וסימון נתיב חדירת הים (חיצים לבנים) דרך עמק יזרעאל ובקעת הירדן אל ים המלח לפני 5-6 מיליון שנים. הר סדום מוקף בקו מרוסק בתחתית האיור (ראה הגדלה באיור 4).

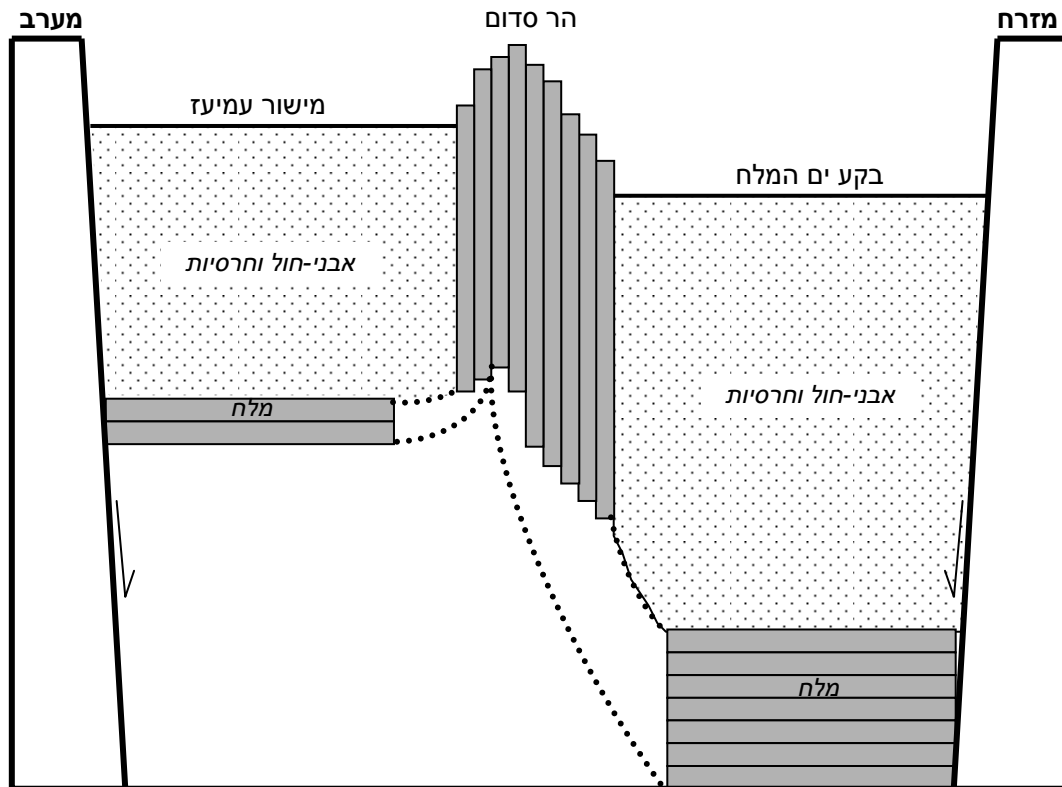
נביא עתה עדויות הגיאולוגיות המאפשרות לנו לשחזר אבני-דרך בנתיב העלייה של שכבות המלח בהר סדום ואף לאמוד את קצב התרוממותו. ראוי לשים לב לעובדה שידיעותינו רבות ומפורטות יותר ככל שהסלעים נוצרו בתקופות צעירות יותר.



איור 3 – קרעי דולומיט מסובבים מוקפים במלח במחצבת הר סדום. הפירוש למצב הנוכחי הוא ששכבת דולומיט דקה ואופקית (תחתית האיור) נקרעה עקב זרימת המלח בעת התרוממות הר סדום. המלח שזרם חדר אל הפערים שבין קרעי שכבת הדולומיט, וכתוצאה מכך המרחק בין נקודות A ו B גדל בהשוואה למרחק המקורי בין נקודות אלו.



איור 4 – מפת תבליט של הר סדום וסביבתו. עגול שחור – "הגבעה הלבנה"; עגול לבן – "הגבעה הלבנה"; רבוע לבן – מחצבת המלח. קווים לבנים מייצגים סדקים רדיאליים. קו המצוק (מסומן בחלקו בקו מקווקו) התוחם את מישור עמיעז ממערב הינו ביטוי להעתק השוליים של בקע ים המלח.



איור 5 – שרטוט המתאר את הטיית שכבות המלח ממצבן האופקי המקורי למצבן האנכי והתרוממותן. בעומק רב שכבות המלח זורמות, מדקקות ומתעוותות. בעומק רדוד שכבות המלח האנכיות, הנדחפות מלמטה על ידי המלח הזורם, מחליקות זו לעומת זו, כחפיסת קלפים, בתנועתן כלפי מעלה. רוחב חפיסת הקלפים 2 ק"מ.

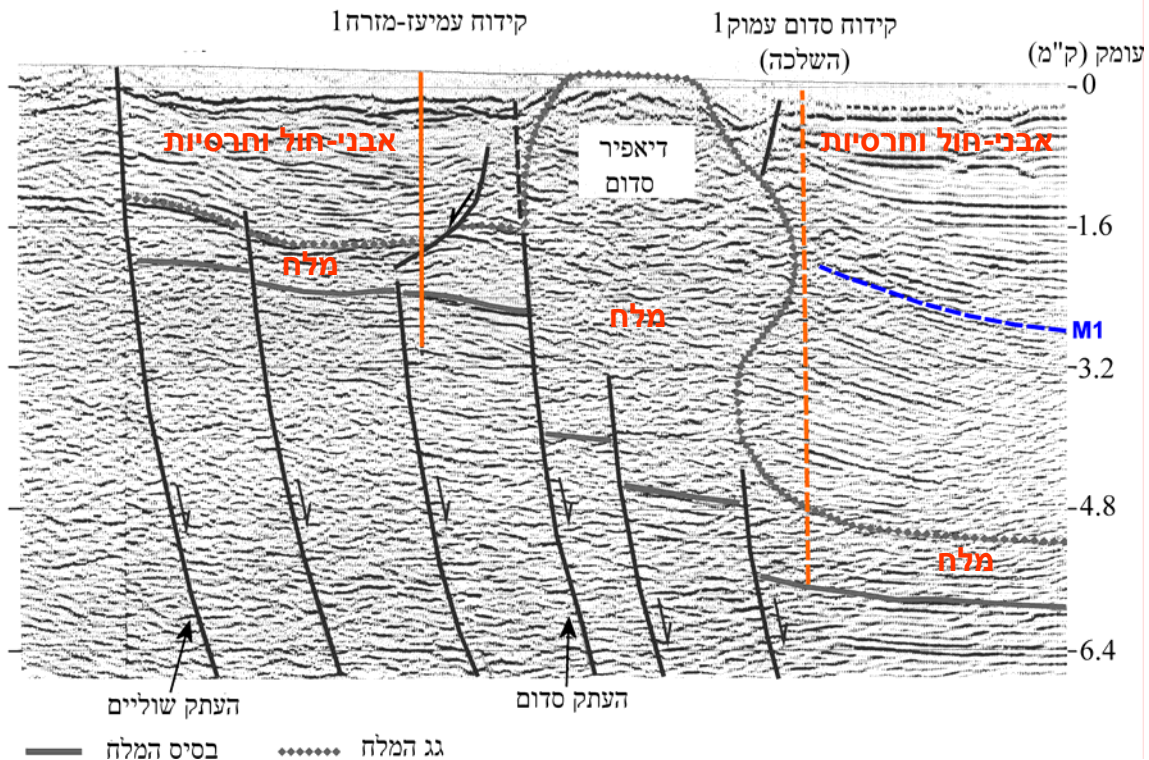
שלבים בעליית מחדר המלח של הר סדום

2 מיליון שנים לפני ההווה – תחילת העלייה של מחדר המלח

ידיעותינו על תקופה זו נשענות על פענוח של "חתכים סיסמיים" בבקע ים המלח. "חתך סיסמי" הוא תוצאה של יצירת גלים (בדרך כלל ע"י פיצוצים) הנשלחים לעומק ומוחזרים משכבות הסלע. הגלים המוחזרים נקלטים על ידי מכשירים בפני השטח, ומפוענחים כך שניתן לדמות בעזרתם את השכבות בעומק רב. באיור 6 ניתן לראות כי מתחת להחזרה המסומנת M1 אין שינויים בעובי השכבות הסמוכות למחדר המלח, אך מעליה ניתן להבחין בכך שהשכבות בקרבת מחדר המלח דקות יותר מאשר במרחק ממנו. הפירוש לכך הוא כי השכבות הצעירות יותר מן ההחזרה M1 הורבדו בעת שמחדר המלח התרומם ומציאותו השפיעה על ריבודן, ומכאן שגיל תחילת ההתרוממות של מחדר המלח צעיר מגיל השכבות המיוצגות על-ידי ההחזרה M1, המצויות בעומק כ-2,800 מ'. גיל השכבות בעומק זה נאמד על-פי מאסף אבקת הצמחים (פולן) בפיסות סלע שנלקחו מקידוח עמוק ליד הר סדום והוא כ-2 מיליון שנה. שכבות אלה מצויות כ-2,400 מ' מעל לגג שכבות המלח שבבקע.

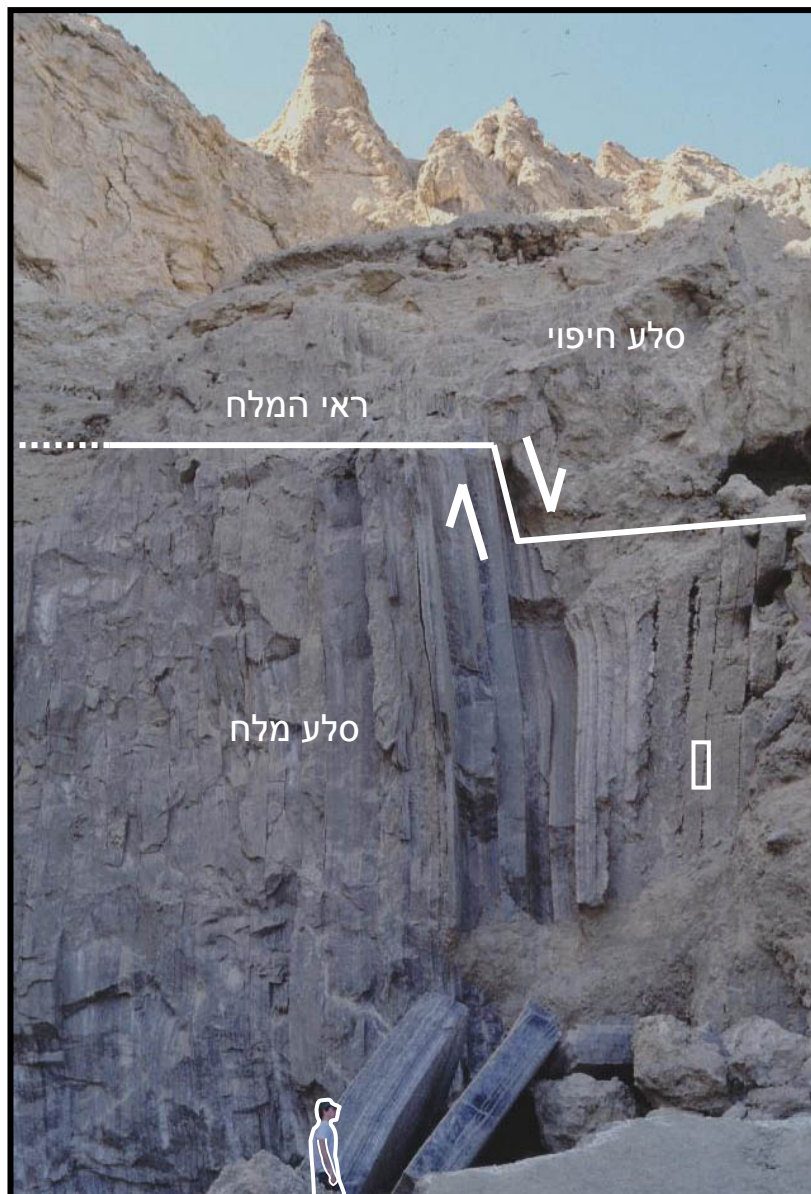
מערב

מזרח



איור 6- חתך סייסי מזרח-מערב דרך הר סדום ומיקומם של שני קידוחי נפט העוזרים בפענוחו. החתך מראה את העתק השוליים המערבי של בקע ים המלח והעתקים נוספים מקבילים לו. מחדר מלח סדום מאופיין על ידי חוסר סדר בהחזרה הסייסמית. משני צדי המחדר נמצאים סלעי מילוי הבקע (אבני חול, חרסיות) להם החזרות סייסמיות המאפיינות סלע משוכב. זמן תחילת התנועה של המלח נקבע על ידי המציין הסייסמי M1: שכבות הסלע מעליו דקות יותר בקרבת האגף המזרחי של הר סדום כתוצאה מתנועת מלח סדום בעת הרבדתן. החתך באדיבות מ. גרדוש, המכון הגיאופיזי לישראל.

בין 300,000 ל-150,000 שנים לפני ההווה - הגעת מחדר המלח ממעמקים אל קרבת פני השטח בחלקו העליון של הר סדום מונחת על השכבות האנכיות של המלח שכבות אופקיות בנויות גבס, חרסית וחול דק המכונות "סלעי חיפוי", והן נבדלות משכבות המלח על ידי מישור ברור המכונה "ראי מלח" (איור 7). "סלעי חיפוי" אלה הם השארית של שכבות הבנויות בעיקרן מלח אך הן מכילות כ-5% סוגי סלעים שכמעט ואינם נמסים במים. כאשר שכבות המלח הומסו על ידי מי התהום או מי אגם מתוקים יחסית הן הותירו אחריהן את השארית הבלתי מסיסה שהצטברה ובנתה את סלעי החיפוי. מי התהום קרובים למפלסי האגמים שהיו באגן ים-המלח, מפלס שב-300,000 השנים האחרונות לא היה נמוך מכ-400 מ' מתחת לפני הים. על כן, היווצרות סלעי החיפוי בהשפעת מי התהום או מי האגם מבטאת את הגעת גוף המלח מעומק של אלפי מטרים לקרבת פני השטח. זמן היווצרות של סלעי החיפוי נקבע על פי העובדה שסימנים להמסת שכבות המלח ולריבודם של חלקיקי השארית הבלתי מסיסה מצויים ביחידות סלע שגילן מוערך ב-100,000-300,000 שנה, אך לא בקדומות יותר. מכיוון שהשארית הבלתי מסיסה מהווה רק 5% משכבות המלח, הצטברות סלעי חיפוי, שעוביים 30-40 מטרים מבטאת המסה של שכבות מלח בעובי פי 20, כלומר כ-600-800 מ'. שכבות אלה נדחפו מלמטה אך בכל פעם שהגיעו למפלס מי התהום או מי האגם הן סולקו על ידי המסתן.



איור 7 - שכבות של סלע החיפוי בנויות גבס, חרסית וחול דק, מונחות על שכבות אנכיות של מלח ונבדלות מהן על ידי משטח המסה המכונה "ראי מלח". בכמה מקומות ראי המלח מועתק כתוצאה מהחלקה לאורך מישורי הריבוד בעת עליית המלח. האדם בתחתית התמונה מהווה קנה מידה. המלבן תוחם את האזור המוגדל באיור 3.

בין 150,000 ל 70,000 שנים לפני ההווה – המשך עליית מחדר המלח

בנחל פרצים, כ 100 מטרים מהשוליים הצפון-מערביים של הר סדום, חשופות שתי יחידות סלע: תצורת חמרמר ומעליה תצורת הלשון, שגיל בסיסה הוא כ-70,000 שנה. השכבות בשתי היחידות נטויות, אך בשיעור שונה, מצב המכונה "אי-התאמה זוויתית". תצורת חמרמר נטויה מערבה בזווית של 10° - 15° ואילו שכבות תצורת הלשון נטויות מערבה כ- 5° בלבד. את המצב הזה ניתן לפרש כך: התרוממות מחדר המלח גרמה להטייתן של השכבות בסביבתן בתקופה שקדמה ל-70,000 שנה. מן העובדה ששכבות תצורת הלשון בנחל פרצים כמעט ואינן נטויות – למרות שידוע לנו שמחדר המלח המשיך להתרומם – ניתן אולי ללמוד שמחדר המלח התרומם ב-70,000 השנים האחרונות בהר סדום עצמו ולא בשוליו.

בין 70,000 ל-40,000 שנים לפני ההווה – מחדר המלח נחשף לראשונה בפני השטח

רצף השכבות החשוף בנחל פרצים הסמוך להר סדום כולל שכבות של תצורת הלשון שגילן בין 70,000 ל-14,000 שנים לפני ההווה. לעומת זאת, על הר סדום עצמו, גיל שכבות תצורת הלשון הקדומות ביותר הוא כ-43,000 שנים. מאחר שתצורת הלשון הורבדה באגם, העדר שכבות על הר סדום שגילן בין 70,000 ל-43,000 שנים לפני ההווה מעיד על כך שלפחות בחלק מאותה תקופה הר סדום לא היה טבול במי האגם אלא בצבץ כאי מעל פני המים. ידוע שבמהלך רוב תקופה זו גובה מפלס האגם היה כ-280 מ' מתחת לפני הים ומכאן עולות שתי מסקנות: (1) פסגת הר סדום הייתה גבוהה מ-280 מ' מתחת לפני הים, ו(2) אם הורבדו עליה שכבות דקות של תצורת הלשון (כאשר הייתה נמוכה לזמן קצר מ-280 מ' מתחת לפני הים) הן הוסרו ממנה כאשר מפלס האגם ירד מגובה זה לגובה 340 מ' מתחת לפני הים, וזאת בתקופה בין 48,000 ל-43,000 שנים לפני ההווה.

בין 40,000 ל-14,000 שנים לפני ההווה – התרוממות והטייה של הר סדום

בפסגת הר סדום, במקום הידוע כ"גבעה הלבנה", 18 מ' מעל לבסיסה של תצורת הלשון ניכרת בה-אי-התאמה זוויתית: השכבות התחתונות נטויות מזרחה בזווית של כ-10° מעלות בעוד שהשכבות העליונות נטויות מזרחה בזווית 5° מעלות בלבד. הגיל של אי-התאמה זאת הוא בין 30,000 ל-21,000 שנה לפני ההווה ומשמעות יחסי השדה היא שבמהלך תקופה זו התרומם הר סדום בסמוך למרכזו יותר מאשר בשוליו המזרחיים והדבר גרם להטיית תצורת הלשון מזרחה.

אחרי 14,000 שנים לפני ההווה – המשך ההתרוממות של הר סדום

א. הטיית השכבות הצעירות של תצורת הלשון

השכבות הצעירות ביותר של תצורת הלשון המופיעות על הר סדום נטויות מזרחה בשיעור כ-5° וניתן לייחס הטייה זו לשלב נוסף של עליית הר סדום. מכיוון שגיל השכבות האלה הוא כ-14,000 שנים, העובדה שהן נטויות מעידה על עליית הר סדום בתקופה צעירה יותר.

ב. סחף מעל תצורת הלשון

ב"גבעה הלבנה" שבפסגת הר סדום תצורת הלשון מכוסה שכבת סחף הכוללת חלוקים מעוגלים שמקורם בסלעי "חבורת יהודה". חלוקים אלו הובלו הנה מהמצוקים החשופים מערבית לים המלח ולמישור עמיעז. במצב הטופוגרפי בהווה חלוקים מסוג זה אינם יכולים להגיע ממחשופי הסלע האלה לראש הר סדום כיוון שזה מצוי כ-70 מ' מעל למישור עמיעז המפריד ביניהם. מכאן נובע שהחלוקים הורבדו על הר סדום כאשר הוא היה נמוך ממישור עמיעז, כלומר לפחות 70 מ' נמוך מגובהו היום. ההר הורם בשיעור זה לפחות בתקופה הצעירה מ-14,000 שנים לפני ההווה.

ג. סדקים ליד ה"גבעה השחורה"

מישור עמיעז חצוי בחלקו המזרחי על ידי מערכת של סדקים, המלאים בחומר רך שהובל לתוכם. יובלי נחל פרצים מתחתרים לאורך סדקים אלו, ו"מערת הקמח" התפתחה לאורך אחד מהם. כמה עשרות מסדקים אלה מתכנסים אל ה"גבעה השחורה" (איור 4) שלמרגלות הר סדום ויוצרים מערכת רדיאלית. מתכונת זאת תואמת את האפשרות שכיווני הסדקים קשורים להתרוממותה של הגבעה השחורה. ייתכן שאונה של גוף המלח הבונה את הר סדום, המצויה מתחת לגבעה השחורה, התרוממה והרימה גם את הגבעה. מן העובדה שבין הסדקים האלה יש אחדים החוצים את כל תצורת הלשון אנו למדים שהם צעירים ממנה, כלומר צעירים מ-14,000 שנה.

ד. גיל המערות בהר סדום.

מלח נמס במהירות רבה לאחר חשיפתו למי הגשם וכתוצאה מכך נוצרו בהר סדום מערות. לכן, קביעת הגיל הקדום ביותר של המערות מאפשרת אומדן טוב של הזמן שבו הגיע הר סדום אל פני השטח ונחשף לגשם. גילן של מערות בהר סדום נקבע על-ידי תיארוך בשיטת פחמן-14 של פיסות עצים שנסחפו בנחלים ונקברו בסחף שהצטבר במערות. הגיל הקדום ביותר שנקבע הוא כ-8,000 שנים לפני ההווה ומכאן שגוף המלח בהר סדום נחשף לראשונה לגשם זמן קצר קודם לכן, לאחר שהתרומם מעל מישור עמיעז. כאמור לעיל, מראיות קודמות למדנו שהדבר אירע בתקופה שאחרי 14,000 שנה לפני ההווה, וגיל המערות מאפשר לנו לדייק יותר ולקבוע שהדבר ארע זמן קצר יחסית לפני כ-8,000 שנה.

קצב ההתרוממות של הר סדום

יש בידינו שש עדויות גיאולוגיות שונות וכמעט בלתי תלויות שמהן ניתן לאמוד את קצב ההתרוממות של הר סדום. ניתן להשוות אומדנים אלה לחישובים קצרי-טווח המבוססים על תצפיות בשנים האחרונות.

א. הקצב הממוצע הכללי של עליית מחדר המלח

הנתון הראשון הדרוש לחישוב זה הוא גובה עמוד המלח שהתרומם מעומק בקע ים המלח ואותו ניתן לאמוד על-פי שני מרכיבים. האחד, עובי סלעי המילוי שבאגן ים המלח, כ-5,500 מ', שאותם חצה גוף המלח בדרכו ממעמקי בקע ים המלח כלפי מעלה. המרכיב השני הוא עובי המלח שעלה אך הומס, ואותו ניתן לאמוד על-פי עובי "סלעי החיפוי" שנותרו כשארית הבלתי מסיסה לאחר המסת שכבות המלח. כאמור לעיל, עובי המלח שהומס הוא כ-800 מ', כך שגובה עמוד המלח שהתרומם הוא $5,500 + 600 = 6,100$ מ'. הנחנו לעיל שהמלח החל להתרומם לפי 2 מיליון שנה ומכאן שהקצב הממוצע הכולל של התרוממות המלח הוא כ-3 מ"מ בשנה.

ב. היווצרות סלע החיפוי

כאמור, עובי עמוד המלח שממנו נותרו סלעי החיפוי נאמד ב-800 מ'. ההנחה היא שסלעי החיפוי החלו להיווצר לפני 300,000 עד 100,000 שנים לפני ההווה, כאשר עמוד המלח חצה את מפלס מי התהום. כלומר, במשך 100-300 אלף שנים חלף על פני מפלס מי התהום, בדרכו כלפי מעלה, עמוד מלח בעובי כ-600-800 מ'. מכאן ניתן לחשב קצב התרוממות של 2-8 מ"מ בשנה.

ג. העתקת "ראי המלח".

לאחר שמפלס אגם הלשון ירד בקירוב עד למפלס ים המלח הנוכחי נפסקה פעולת ההמסה של שכבות המלח בהר סדום ונקטעה יצירת ראי המלח שתואר לעיל. מכאן שכל תזוזה של משטח זה מאוחרת לאותה ירידת מפלס, אשר ארעה 11,000 שנים לפני ההווה. מאחר ש"ראי המלח" מועתק כך שהוא גבוה יותר סמוך למרכז הר סדום מאשר בשוליו, ניתן להניח שהעתקת משטח זה היא תוצאה של התרוממות הר סדום. שיעור ההעתקה שנצפה בשולי ההר המזרחיים הוא 80 מ', ובהנחה ששיעור זה מייצג את התרוממות הר סדום ניתן לחשב קצב של כ-7 מ"מ בשנה.

ד. שכבות סחף מעל תצורת הלשון

כפי שנזכר לעיל, שכבות הסחף שבפסגת הגבעה הלבנה בהר סדום מציירות התרוממות של כ-70 מ', מגובה 265 מ' מתחת לפני הים לגובה הנוכחי של פסגת הגבעה, שהוא 194 מ' מתחת לפני הים, במהלך 14,000 השנים האחרונות. מכאן מחושב קצב התרוממות של 5 מ"מ בשנה.

ה. התחתרות מערות בהר סדום.

מערות אחדות בשולי הר סדום מאופיינות במספר מפלסים. קביעות גיל מצביעות על כך שהמפלסים הנמוכים צעירים מן המפלסים הגבוהים יותר. מצב זה מצביע על התחתרות המערה אל מפלס ים המלח שהיה באותה תקופה. שני גורמים, כוונים מנוגדים, עשויים להביא לכך: התרוממות הר סדום וירידת מפלס ים המלח. המערה הקדומה ביותר בהר סדום נוצרה לפני כ-8,000 שנה והיא נחתרה מאז כ-50 מ' עד לקרקעית הנוכחית. קצב ההתחתרות הוא איפה 6 מ"מ בשנה. מראייה זו ניתן ללמוד שזהו הקצב המרבי של התרוממות הר סדום, בהנחה שלא היתה ירידה של מפלס ים המלח בתקופה זו. מאחר שידוע שמפלס זה אכן ירד ב-8,000 השנים האחרונות קצב התרוממות הר סדום, על פי ראייה זאת, היה נמוך מ-6 מ"מ בשנה.

ו. מפלס קדום של ים המלח

לאורך החוף המערבי של ים המלח מצויות שכבות שנוצרו בחוף האגם לפני 2,600-3,500 שנים לפני ההווה והן מעידות שבאותה תקופה מפלס ים המלח היה בגובה 400 מ' מתחת לפני הים. מאותה תקופה מצוי בהר סדום מפלס מערה שגילו דומה, 3,100 שנים לפני ההווה, אולם גובהו 365 מ' מתחת לפני הים. אם אמנם מפלס זה נוצר כאשר פני ים המלח היו בגובה 400 מ' מתחת לפני הים, כי אז הר סדום התרומם 35 מ' ב-3,100 שנים, כלומר בקצב של 11 מ"מ בשנה.

על יסוד שש עדויות אלה, קצב ההתרוממות של מחדר המלח של הר סדום נאמד בין 3 ל-11 מ"מ בשנה. למרות שטווחי הזמן עליהם נשענים אומדנים אלה הם בין 22 מיליון שנה לבין אלפי שנים, תוצאות החישוב בשיטות השונות מצביעות על קצב דומה: מילימטרים אחדים בשנה. עד לשנים האחרונות נאלצנו להסתפק בשיטות גיאולוגיות אלה להערכת קצב ההתרוממות של הר סדום. אולם, בשנים האחרונות יש בידנו שיטות מדידה ישירות, שדיוקן מספיק כדי להעריך את קצב התרוממות הר סדום בימינו. בשיטה אחת, מדידות גיאודטיות חוזרות בדיוק רב של גובה הר סדום בין השנים 2001-2003 הראו שקצב ההתרוממות של הר סדום הוא בין 6 ל-9 מ"מ בשנה. בשיטה אחרת, המתבססת על עיבוד מדידות מכ"ם מלווין בין השנים 1992-2001 עולה כי קצב ההתרוממות של הר סדום הוא בין 5 ל-9 מ"מ בשנה.

ההתאמה בין המדידות הישירות, קצרות הטווח, לבין האומדנים הגיאולוגיים היא טובה מאד. כדי להבין את משמעותה ניתן לתאר מדידת מהירות של מכונית בדרכה מירושלים לתל-אביב. אם בודקים את זמן היציאה וזמן ההגעה (למשל, שעה אחת) ומחלקים במרחק (60 ק"מ) מקבלים מהירות ממוצעת של 60 קמ"ש. עתה נניח שבמהלך הנסיעה מודדים את המהירות במשך 3 שניות, ומקבלים, שוב, מהירות של 60 קמ"ש. ההתאמה בין שתי המדידות מאפשרת לנו להניח בהסתברות גבוהה שהמכונית התמידה לכל אורך הדרך במהירות קבועה של 60 קמ"ש. השלכת הדוגמה הזאת על אומדני קצב ההתרוממות של הר סדום מאפשרת לנו להניח שלפחות במשך 14,000 השנים האחרונות הר סדום התרומם בקצב אחיד למדי ששיעורו נאמד, במגבלות שיטות המחקר, ב-5-11 מ"מ בשנה.

לאיזה גובה יגיע הר סדום בעתיד?

ידיעותינו על הגיאולוגיה של הר סדום וסביבתו מאפשרות לנו לדון בשאלה מסקרנת: עד איזה גובה עשוי ההר המתרום להגיע? הדרך לענות על שאלה זו בדיוק סביר אינה כה סבוכה. את המצב ניתן לתאר בפשטות על ידי מאזניים (איור 8): על כף אחת מניחים פרוסות של אבן חול ועל הכף השניה מניחים מספר זהה של פרוסות באותו גודל, אך הן עשויות מלח שצפיפותו נמוכה יותר. במצב זה פרוסות אבן החול יכריעו את הכף ויגרמו לכף שעליה מונחות פרוסות המלח להתרום. כדי להגיע לאיזון נצטרך להוסיף פרוסות מלח ולהגביה את עמוד המלח. במקרה שלנו, שכבות אבן החול בבקע ים המלח שמעל לשכבות המלח לוחצות על המלח שמתחתן; בתגובה, מחדר המלח עולה בשולי הבקע. מחדר המלח יגיע לשווי משקל ולא יוסיף לעלות אם גובהו (H), הבלתי ידוע) יהיה כזה שמשקלו יהיה שווה למשקל שכבות אבן החול שמעל לשכבות המלח בבקע. זהו תרגיל פשוט באלגברה:

משקל השכבות שמעל המלח = עובי שכבות אבן החול X הצפיפות הממוצעת של השכבות

$$12,650 \text{ טון/מ}^2 = 5,500 \text{ מ}^3 \times 2.3 \text{ טון/מ}^3$$

משקל מחדר המלח = גובה מחדר המלח X צפיפות המלח

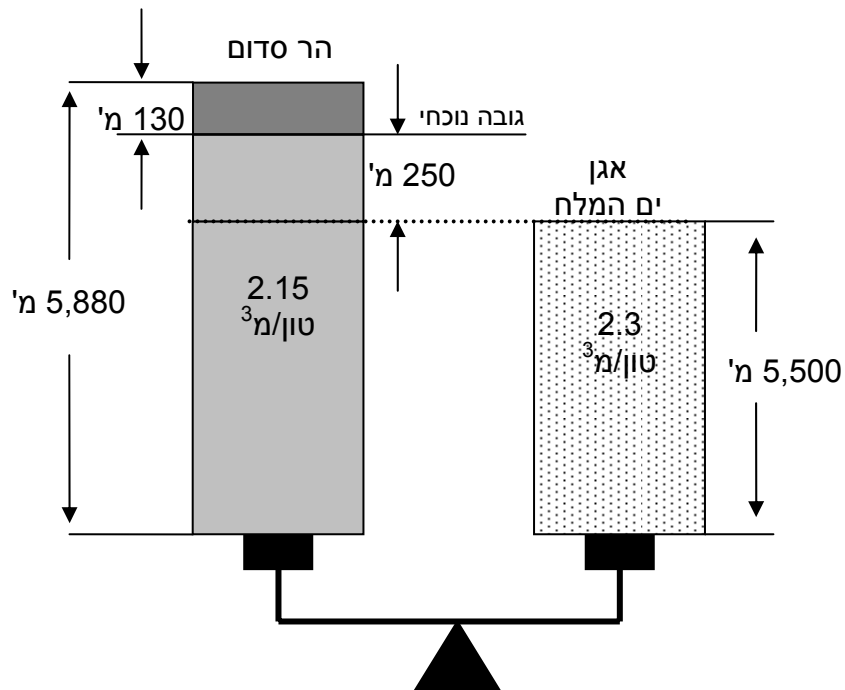
$$H \text{ מ} = 2.15 \text{ טון/מ}^3 \times X$$

במצב שבו המשקלים שווים:

$$12,650 \text{ טון/מ}^2 = H \text{ מ} \times 2.15 \text{ טון/מ}^3 \text{ (מלח), ומכאן:}$$

$$H = 5,880 \text{ מ}^3$$

היום גובה מחדר מלח סדום מעל ים המלח הוא 250 מ', כלומר 5,750 מ' מעל גג המלח המצוי בעומק כ-5,500 מ'. כיוון שעל פי חישובנו מחדר המלח יכול להגיע לגובה 5,880 מ' מעל גגו הרי הוא יוכל להתרום עוד 130 מ', ואז ייעצר. התמוטטויות בראש ההר הצפופות עם המשך העלייה ובלייח כתוצאה ממי גשמים ישפיעו כמובן על גובהו הסופי של ההר.



איור 8- מאזניים שעל כפם הימנית אבן חול ועל כפם השמאלית סלע מלח שצפיפותו נמוכה יותר. איזון בין כפות המאזניים מושג כאשר מתווספת להר סדום הנוכחי "פרוסת" סלע מלח שעובייה 130 מ'.

מתי יגיע הר סדום לשיא גובהו האפשרי? בקירוב ראשון, התשובה מצויה בחלוקה של הגובה הצפוי הנוסף (130 מ') בקצב ההתרוממות הידוע לנו, 5-10 מ"מ בשנה, כלומר הדבר יקרה בעוד כ-13,000–26,000 שנה. אולם, יש להניח שככל שההר יתרומם ומשקלו יגדל כן יואט קצב התנועה עד שההר ייעצר, ומכאן שעצירת התרוממות ההר תתרחש בעוד כמה עשרות אלפי שנים. מן העובדה שהקצב הנוכחי של התרוממות הר סדום דומה לקצב שנאמד עבור 14,000 השנים האחרונות ניתן ללמוד שההר טרם הגיע לשלב של האטה ניכרת בהתרוממותו.

תודות

מינהל מדעי האדמה תמך במחקר. תודתנו נתונה לעמיר אידלמן על ההערות והעצות המועילות.

לקריאה נוספת (בעברית):

וינברגר, ר. ועגנון, א., 1993. מבנה גוף מלח סדום (תוצאות מחקר פליאומגנטי וסטרוקטורלי), מדריך סיורים, כנס החברה הגיאולוגית בערד, ע"מ 158-184.
 זק י., 1967. הגיאולוגיה של הר סדום. עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
 זק י., 1988. הליתוסטריגרפיה והמבנה של מחדר מלח סדום. מדריך סיורים, כנס החברה הגיאולוגית בעין בוקק, ע"מ 158-184.
 פרומקין, ע., 1992. מערכת הקרסט במחדר המלח הר סדום. עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים.