

מערכת הקרסט במחזור המלח של הר סדום

דברי הסבר: עמוס פרומקין (תקציר עבודת דוקטור)

מדריך הסיור: צבי צוק

הר סדום הוא גוף מחדר (דיאפיר) של סלעי מלח של תצורת סדום, עם מעט יחידות ושכבות ביניים של אנהידריט, קרבונטים, פצלים וחלוקים. ההר נמצא בבקע ים המלח, סמוך לקצהו הדרום-מערבי של האגן הדרומי (היבש כיום) של ים המלח. ממדי הר סדום $1.5 \text{ ק"מ} \times 11 \text{ ק"מ}$. ראשו מתנשא כ-250 מ' מעל פני ים המלח (160 מ' מתחת לפני הים התיכון), ועומקו בתת הקרקע מעל שלושה ק"מ. בהר המלח מערות קרסטיות מפותחות מאד, המשתרעות בכל נפח ההר מעל למפלס בסיס הניקוז באגן ים המלח. האקלים באזור חם וצחיח: טמפרטורה שנתית ממוצעת כ- 25°C , ו-50 מ"מ גשם בממוצע רב שנתי.

מטרה עיקרית של המחקר היא לימוד וכימות התהליכים בהיווצרות ובעיצוב מערות בסלעי המלח של דיאפיר הר סדום והשלכות למערות קרסטיות בכלל. כמו כל תורם המחקר לניתוח תכונות התרוממות דיאפיר הר סדום, וקצב התנועה משלב היווצרות ראי המלח ועד למצב הנוכחי. מטרה נוספת היא שחזור פלאואקלימי של ההולוקן באזור, תוך התבססות על ההיסטוריה המורפולוגית של המערות.

רוב נפח ההר בנוי אמנם מסלעי מלח, אך סלע זה חשוף על פני השטח רק בכ-5% משטח ההר, בעיקר בפתחי פירים ודוליות ובמתלולים שנוצרו בגלל העתקי החלקה או גידוד ים המלח. בפני השטח מופיעים בדרך כלל סלעים מסיסים פחות, ועיקרם סלע חיפוי – שארית בלתי מסיסה מתוך סלעי המלח ושכבות הביניים של תצורת סדום, לאחר שהמלח הומס עם התרוממות מחדר סדום וחדירתו לתחום מי תהום.

רוב שטחו של ההר (57%) מנוקז לתת הקרקע במערכת הקרסטית המפותחת. מערות קרסטיות מהוות ערוצים תת קרקעיים מסועפים, שמאפייניהם דומים לאלה שהוצעו על ידי Horton למערכות ניקוז עיליות. אלמנטים מורפולוגיים בולטים במערות: בולען, מחילה בסלע כיסוי, פיר אנכי, מחילה תת-אופקית ומוצא פתוח אל בסיס הניקוז. 31% משטח ההר מנוקז למערות עם מוצא פתוח אל בסיס הניקוז, ול-26% משטח ההר יש מוצא בחילתול בלבד. אגן ניקוז גדול מאפשר התפתחות תלל תת קרקעי שממדיו גדולים יותר, ובמקרים רבים יש לו מוצא פתוח אל בסיס הניקוז. בולענים מרוחקים מבסיס הניקוז מפתחים בדרך כלל מערות בעלות מוצא בחילתול.

זרימה במערכות הניקוז בהר סדום לא התפתחה בעוצמות גשם קטנות מ-1 מ"מ/10 דקות, ואילו עוצמות גשם של מעל 4 מ"מ/10 דקות גרמו לנגר מדרוני כולל ולזרימה חזקה בכל הערוצים. מי הנגר השטפוני אינם מגיעים בדרך כלל לרוויה במלח במהלך זרימה שטפונית בתת הקרקע. מים מגיעים לרוויה כשהם עומדים במאגרים תת קרקעיים, מחלחלים בקצב איטי דרך סדקים או זורמים בפילם דק לאורך דפנות הפירים. מים מטאוריים ממיסים בעיקר הליט ומתעשרים בהדרגה בנתרן וכלור. בשיא הזרימה השטפונית מגיע ריכוז התמס במים למינימום, אך ספיקת התמס מגיעה למכסימום.

הזרימה השיטפונית בדרך כלל טורבולנטית למרות הצמיגות הגבוהה יחסית של המים. כל נפח המים מתערבל ומגיע למגע עם הסלע, ולכן הגורם הקובע את קצב המסת הסלע הוא קצב הריאקציה בפני הגביש. לעומת זאת בדפנות פירים הזרימה למינרית, כאשר עוביו הקטן של הפילם (כמה עשיריות מ"מ) מאפשר דיפוזיה טובה של התמס לכל תלקי הנוזל. זרימת הפילם מאפשרת המסה בפירים וגידול רוחבם גם בספיקות נמוכות.

כמות התמס השנתית המוסעת מהר סדום מגיעה ל- $10^6 \times 15$ ק"ג לפחות.

נביעות מי תהום במערות ובפני השטח שונות בהרכבן הכימי באופן מובהק מן המים שמקורם בגשם ובשיטפונות בהר סדום. מי הנביעות הם תמלחות עשירות ב-K, Mg, Ca.

התנודות המיקרואקלימיות בתוך המערות קטנות יותר מאשר בסביבה החיצונית. זרימת אוויר במערה מגבירה את שיעור ההתאדות. מי נגר שיטפוני שנעצרו במאגרים תת קרקעיים מתעשרים בהדרגה ב- $\delta^{18}\text{O}$ בתהליך התאדות.

קצב התחתרות רגעי של מחילה בסלע מלח בשיא הספיקה מגיע ל-0.37 מ"מ/שנה. במשך 5 שנות תצפית התחתרה קרקעית המחילה התלולה ב-2 עד 8 ס"מ ובממוצע ב-4.38 ס"מ (כ-9 מ"מ/שנה בממוצע).

נמצא מתאם בין הגיל של מחילה נטושה (אנלוגית לטרסה של נחל עילי) לבין גובהה מעל המחילה הפעילה כיום. גיל המחילה נקבע בעזרת פחמן 14 של ענפים שנסחפו לתוכה. קצב ההתחתרות הרב שנתי הממוצע המוערך בשיטה זו הוא 6.9 מ"מ/שנה. קצב התחתרות מירבי שנמדד בשיטה זו הגיע ל-25 מ"מ/שנה.

ההפרש הגדול בין קצב השיא הרגעי להתחתרות לבין הקצב הרב שנתי נובע ממשך הזרימה הקצר. למרות האקלים הארידי, ועמו משך הזרימה הקצר, הקצב הרב שנתי עודנו גבוה בסדר גודל אחד לפחות מקצב נסיגת הדופן במערות בסלעים קרבונטיים.

קצב ההתחתרות האנכית במחילה גבוה מקצב נסיגת מפלים לאורך המחילה. קצב ההתחתרות בסלע חיפוי נמוך במידה ניכרת מן הקצב בסלע המלח. במעבר מסלע החיפוי לסלע המלח מתפתח בדרך כלל פיר אנכי.

פרופיל המחילות בסלע המלח בדרך כלל קעור – שבו השיפוע קטן אקספוננציאלית במורד הזרימה. מחילות צעירות בסלע מלח הינן תלולות ובקרקעיתן אין משקע אלוביאלי. המחילה מתחתרת במהירות עד שהמוצא מגיע למפלס בסיס הניקוז. במחילה בוגרת הקרקעית מכוסה באלוביום, ופרופיל המחילה נמצא במצב שיווי משקל. מפלס האיזון שבו מתפתחות מחילות המלח במערות עם מוצא בחילחול קשור בעומק שאליו מגיעים הסדקים בכל אתר. גורמים נוספים המשפיעים על מפלס המחילות הם הספיקה השיטפונית הנגזרת משטח אגן הניקוז, וכמות הסחף התלוי בתכונות פני השטח דוגמת ליתולוגיה ושיפוע המדרונות.

שכבות סלע קשה תמס בין שכבות המלח מעכבות את התחתרות המחילה אל מפלס שיווי המשקל, ויוצרות נקעים בפרופיל המחילה.

סדק או מישור שיכוב אנכי מהווה מסלול מועדף להתפתחות ראשונית של מחילות. ברוב המחילות בסלע מלח התפתחו נפתולים תרותים והזרימה סתתה מן הסדק הראשוני. שכבות קשות תמס עבות מעכבות את התפתחות המערות ומגבילות את השתרעותן לתחום שכבות המלח.

מחילות נטושות תוארכו (בעזרת פחמן 14 של ענפי עצים ששקעו באלוביום שבקרקעיתן) לתקופה שבין 200–7000 שנה לפני זמננו (^{14}C בלתי מכוויל).

שיחזור פלאואקלימי של תקופה זו מתבסס על ההנחה, ששינוי אקלימי משפיע על המערות באופנים הבאים:

אקלים לח יותר (יותר משקעים) בהר סדום גורם להתרחבות המחילות בגלל התגברות השטפונות, ולתוספת צמחיה המגדילה את כמות הענפים במערות. אקלים לח יותר (יותר משקעים ו/או פחות התאדות) באגן הניקוז של ים המלח גורם לעליית מפלס הים, שהוא בסיס הניקוז של המערות. כתוצאה מכך מתרומם מפלס שיווי המשקל של המחילות, הן מתרחבות ושוקע יותר אלוביום. לפיכך תקופות לחות מאופיינות במחילות רחבות, שפע של ענפי עצים, ומפלסים גבוהים של מוצאי המחילות המעידים על עליית מפלס ים המלח. תקופות יבשות מאופיינות במחילות צרות, מעט עצים וירידת מפלס מוצאי המחילות.

קצב ההתרוממות של דיאפיר סדום (ביחס למישור שלרגליו) הוערך במדידה ישירה (בשוליה המזרחיים) ב-9 מ"מ לשנה בקירוב בשנים 1990–1992. הרכיב הסיבובי של התרוממות דיאפיר סדום הוערך לפי מידת הטיתם של אלמנטים גיאומורפיים שונים אשר תנוחתם המקורית ניתנת לשחזור:

- א. מפלסי המסה בתוך המערות
- ב. נטיפים
- ג. ראי המלח
- ד. פני השטח של במת הר סדום

השוואת תנוחתם המקורית והעכשווית של אלמנטים אלו מלמדת שראש הדיאפיר הוטה מזרחה באלפי השנים האחרונות בשיעור של עד 11° .

הרצף ההולוקני של הר סדום חולק לעשרה שלבים אקלימיים. לפני כ-7000 שנות פחמן 14 הסתיימה תקופה לחה, וסלע המלח של הר סדום החל להחשף מעל מפלס בסיס הניקוז הנסוג. מגמת ההתייבשות הסתיימה לפני כ-6000 שנות פחמן 14. התקופה הלחה ביותר ב-6500 השנים האחרונות הגיעה לשיא לפני כ-4300 שנות פחמן 14. לאחר מכן חלה התייבשות ניכרת עם תנודות קלות בין אקלים יבש מעט יותר מהיום לבין אקלים לח מעט יותר מהיום. ארועים לחים במקצת התרחשו במחזוריות של 1000 שנה בקירוב, לפני כ-3000 שנה, 2000 שנה ו-1000 שנה.

קיימת קורלציה טובה למדי בין הרצף הפלאואקלימי של הר סדום לבין תופעות מורפולוגיות אחרות באזור, כמו טרסות נחלים בחופו המזרחי של ים המלח, והסדימנטים של האגן הדרומי של ים המלח. קיים מכנה משותף נרחב בין מערכות קרסטיות בסלע מלח לבין אבפוריטים אחרים וקרבונוטים, ולפיכך אפשר להקיש עקרונות מורפולוגיים בסיסיים מסוג קרסט אחד למשנהו. הבדלים קיימים באופי תהליך ההמסה, קצב התהליכים והתפשטותם לעומק, במשקל הסגולי של התמיסות, וכתוצאה מכל אלה גם בפרטים מורפולוגיים.