

מערות מדבר יהודה: גאולוגיה, מורפולוגיה והתפתחות הנוף

עמוס פרומקין

מדבר יהודה וחבל סְפֶר המדבר נמצאים בשיפולים המזרחיים של קמר חברון-רמאללה, בין גב ההר לבקע ים המלח. על אף האקלים הצחיח, זה האזור העשיר בארץ במערות גיר גדולות. המערות ומשקעיהן שיידונו להלן הם תוצר משולב של תנאי מסלע, מבנה גאולוגי וזרימת מי תהום.



תצורות גאולוגיות בגדה הצפונית של נחל ערוגות תחתון; תצורת אבנון מפותחת באזור זה על חשבון תצורת תמר (מתוך דוידוביץ 2014)

מסלע

במדבר יהודה חשופים בעיקר סלעים קרבונטיים (גיר, דולומיט וקירטון) מגיל קרטיקון. הסלעים הקדומים יחסית, של חבורת יהודה, חשופים בקירות הקניונים, מצוק ההעתקים ולעתים גם ברמת המדבר. עובייה המרבי של החבורה החשוף במצוק ההעתקים מגיע לכ-600 מ'. חבורת יהודה שקעה בים חם ורדוד בשולי אוקיינוס תטיס בתקופת הקרטיקון. המשקע עבר לרוב גיבוש מחדש, שינוי מינרלוגי והידוק על ידי שכבות שהצטברו מעליו. התוצר הסופי שהתקבל הוא סלע קרבונטי קשה בדרך כלל, עם שכבות ביניים רכות המכילות חרסיות בריכוזים משתנים. בעוד המשקע הקרבונטי שקע מתוך גוף המים, החרסיות הובאו כנראה על ידי נחלים מן היבשת. תצורות חבורת יהודה החשופות במדבר יהודה הן (בסדר סטרטיגרפי עולה): חביון, עין ירקעם, צפית, אבנון, תמר, דרורים, שבטה ונצר (לפירוט ומראי מקום ראו ליסקר ואחרים, 2010). באזורים הצפון-מערביים של מדבר יהודה נעשה לעתים שימוש גם בשמות תצורות מקבילות: למשל, תצורת בענה מחליפה את מקבילותיה המדבריות – דרורים, שבטה ונצר. בגלל נדירות המערות ברוב התצורות שמתחת לתצורת בענה, המינוח הצפון-מערבי לא יפורט כאן.

שני טיפוסים דולומיט מופיעים בחבורת יהודה באזור ים המלח (רז, 2012): (1) דולומיט 'סטרטיגרפי', שמופיע בשכבות בעלות השתרעות רחבה בתצורות חביון, צפית ותמר; (2) דולומיט אפיגנטי (מאוחר להיווצרות שכבות הסלע), שמופיע כגופים אי-רגולריים בתצורות שבטה ונצר בגב חבורת יהודה וגם בתצורת מנוחה של חבורת הר הצופים. התצורות תמר עד נצר מגיל קנומן עליון – טורון, בונות את המקטעים העליונים של רוב המצוקים במדבר יהודה. תיתכן התעבות של תצורה על חשבון הידקקות או היעלמות של תצורה אחרת. להלן מתוארות התצורות האלה, שבהן גם התפתחו רוב מערות מדבר יהודה. תצורת תמר (מגיל קנומן) עשויה דולומיט 'סטרטיגרפי' אפור עד צהוב, חלקה התחתון מסיבי והעליון משוכב ויוצר נוף מדורג (במצוק ההעתקים). תצורת דרורים בנויה גיר משוכב ויוצרת נוף מדורג. תצורת שבטה (טורון תחתון-עליון) עשויה בעיקר גיר קשה (ולעתים דולומיט), מסיבי וקרטני מאוד. התצורה נחשפת לאורך מצוק ההעתקים וקניוני הנחלים. בתצורה זו מופיעות מערות קרסטיות רבות, ביניהן מערות הגיר הגדולות במדבר יהודה ובארץ כולה. תצורת נצר (טורון עליון) עשויה בעיקר גיר (לעתים גם דולומיט אפיגנטי) וחשופה לאורך קירות הקניונים והחלק העליון של מצוק ההעתקים. חתך התצורה מתחלק לשלוש יחידות: יחידת גיר ודולומיט, יחידת גיר, חוואר וקירטון ויחידת גיר משוכב.



תצורות שבטה (מצוק מעל העץ) ונצר (מדרון משופע מעל המצוק), נחל חמר עליון

חבורת הר הצופים (סנון – פאלאוקן), שמונחת מעל חבורת יהודה, שקעה בעקבות התעמקות האגן. עיקרה סלעים רכים דוגמת קירטון, חוואר, פוספוריט, פצלי שמן, וכן גם מעט צור קשה. סלעים אלה נחשפים ברוב רמת מדבר יהודה. חלק מפצלי השמן הותמרו בטמפרטורה גבוהה והפכו ל'חתרורים' – שכבת סלע יחודית ומגוונת בהרכבה הקלציום-סיליקטי. בחבורת הר הצופים לא נמצאו מערות טבעיות גדולות או חשובות. החבורה תפקדה ככיסוי אטי שכלא את חבורת יהודה מלמעלה ועודד התפתחות מערות גדולות בתוכה. חבורת עבדת (אאוקן) כמעט אינה מופיעה במדבר יהודה.

תצורת חצבה (מיוקן) בנויה משקעים יבשתיים של חול וחלוקים וכן חרסיות ששקעו באגמים ואינה מכילה מערות טבעיות גדולות או חשובות.

חבורת ים המלח (מיוקן עליון – פלייסטוקן) כוללת את המילוי שבתוך בקע ים המלח ובשוליו. רוב המשקעים האלה הצטברו בתוך גופי מים שמילאו את הבקע (טורפטיין, 2012). הבולטים שבהם מבחינת תפוצת מערות:

תצורת סדום מגיל מיוקן מאוחר (סלעיה החשופים

בהר סדום עשירים במערות אך אינם נדונים בכרך זה של האטלס);

תצורת עין פשחה (פליוקן – פלייסטוקן) שקעה לחופי אגם קדום ומצפה את בסיסו של מצוק ההעתקים במחשופים לא רצופים בעובי 10-15 מ', לאורך קטע של כ-30 ק"מ מנחל קדם צפונה, ברום שבין 390- עד 70- מ' (מתחת פני הים התיכון). התצורה בנויה קונגלומרט שפניו החיצוניים מלוכדים היטב על ידי גיר ששקע ממעינות ומכוסה פטינה כהה, בעוד החלק הפנימי מלוכד פחות, ולעתים אף אינו מלוכד כלל. תכונות אלה מאפשרות היווצרות מערות קטנות בתהליך של בליית החלק הפנימי;

תצורת הלשון (פלייסטוקן עליון) בנויה לסירוגין משכבות דקיקות לבנות של ארגוניט, שכבות אפורות של גרגרי סחף ואבק וכן שכבות גבס. בתוך סלעי התצורה הרכים התפתחו מערות בתהליכי סחיפה. בימת הלשון, שהשקיעה תצורה זו, שקעו גם סטרומטוליטים (ראו להלן), שחדרו בין השאר לתוך מערות רדודות במצוק ההעתקים.

מבנה הנוף והתפתחות

מדבר יהודה עבר קימוט מאז תקופת הטורון, כחלק מן הקשת הסורית המשתרעת ממזרחים דרך ישראל לסוריה (Shahar, 1994; Garfunkel & Ben-Avraham, 1996). בשיפולים המזרחיים של קמרי חברון ורמאללה קיימת כפיפה החופפת כיום בקירוב את אזור ספר המדבר. ממזרח לכפיפה זו התפתחו קמרים וקערים קטנים, שאחד הבולטים בהם הוא קמר כידוד באזור ערד. הכיוון הכללי של המבנים הנו לצפון-צפון-מזרח. חלק מן הכפיפות הנוטות מזרחה תלולות למדי והתפתחו על גבי העתקים הפוכים עמוקים. בתקופת האוליגוקן עבר האזור גידוע נרחב על ידי ארוזיה וקרט (Frumkin, 1993) והתבליט היה שטוח למדי. במדבר יהודה הסיר הגידוע את הסלעים מגיל אאוקן. במיוקן כוסו דרום מדבר יהודה והבקע במשקעי תצורת חצבה. שכיחותן הרבה של מערות גיר גדולות שהתפתחו בתוך מי התהום (להלן) מרמזת כי ברוב האוליגוקן-מיוקן הייתה חבורת יהודה רוויה במימי אקוויפר רצוף שניזון ממחשופי החבורה שבמערב.



אתר קומראן על גבי טראסה של תצורת הלשון, הנשענת על מצוק ההעתקים. במצוק נחשף החלק העליון של חבורת יהודה ומעליו חבורת הר הצופים

בתקופת המיוקן, לפני כ-18-14 מיליון שנה, החלה תנועה אופקית לאורך בקע ים המלח, בעקבות ראשית התפתחותו של ים סוף (גרפונקל, 2006). בתחילה המשיך הנוף להיות שטוח למדי; נחלים זרמו מרמת אדום אל הים התיכון על פני דרום מדבר יהודה ומילאו שקעים בבקע (קלבו, 2012). בזלת שהורבדה על פני רמת המדבר ממזרח לים המלח לפני כשישה מיליון שנה מעידה על נוף שטוח שקדם להתחתרות הקניונים (Steinitz & Bartov, 1991). מימי הים התיכון חדרו לתוך שקעים רדודים באזור הבקע. השפעתם הורגשה במיוקן המאוחר במינרליזציה ברמת המדבר (Ryb et al., 2009) ובהשקעת אוופוריטים בלגונות שבבקע ים המלח (שליב, 1991; Matmon et al., 2014). לאגמים אלה התלוותה הופעה ראשונית של מתלולים נמוכים לאורך הבקע אגב ירידת מפלס האקוויפר במדבר יהודה. הפעילות הטקטונית בבקע הלכה והתגברה ועלתה על קצב מילוי הבקע בסדימנטים (בן אברהם ולזר, 2008). היא לוותה בהתרוממות כללית של גב ההר הנוכחי בהרי יהודה במבנה קמרוני שכיוונו הכללי צפון-דרום, המקביל לבקע. מבנה מורם זה אינו חופף מבנים של הקשת הסורית: הוא כולל בתוכו קמרים (דוגמת קמר חברון) וקערים (דוגמת קער שכם). התבליט המתגבר גרם לירידתו של מפלס האקוויפרים ולהתרוקנות רוב האקוויפר העליון של חבורת יהודה ממי תהום (Laronne Ben-Itzhak & Gvirtzman, 2005). נחלים התחתרו ויצרו ערוצים עמוקים, בעיקר לאורך הבקע אך גם בכפיפות שבשולי שדרת ההר המתרוממת. המערות התרוקנו תחילה ממי התהום, ונחתכו לאחר מכן על ידי פני השטח במצוק ההעתקים ובקניונים המתעמקים. תוך כדי התעמקות הבקע והתחתרות הקניונים התמלאו חלק מן המערות בסדימנטים נחליים ואגמיים (Frumkin, 2001; Lisker et al., 2010, Late Neogene; Matmon et al., 2014) התבליט החריק ממשיך להתפתח גם כיום בתהליכי ארוזיה מואצים בשולי הבקע.

היווצרות מערות מתחת לפני מי התהום

נראה כי רוב מערות מדבר יהודה נוצרו ללא קשר הדוק (גנטי) עם פני השטח וללא פתח עביר לבני אדם. לא נמצא קשר בין רוב המערות לבין המעיינות הגדולים במדבר יהודה: ליד מעיינות גדולים אין מערות גדולות, ולהפך. כמו כן לא נמצא קשר גנטי בין רוב המערות לבין פני השטח הנוכחיים, כלומר בדרך כלל אין מדובר בנחלים או מים עיליים שנבלעו או נבעו בנקודה שבה חוצה המערה את פני השטח. תצפיות אלה מעידות על קדמות המערות ועל היעדר קשר ביניהן לבין המערכת ההידרולוגית הנוכחית.

השתרעות המערות והמורפולוגיה שלהן מלמדות על אופן התפתחותן. מבחינה מורפולוגית, המערות, ובייחוד הגדולות שבהן, מכילות אלמנטים דוגמת דפנות מוחלקות, כיפות המסה, ארובות אנכיות עיוורות, חתך רוחב אליפטי ומבנה כללי שטוח בשינויים מקומיים בכיוון נטיית השכבות. אלמנטים אלה מלמדים על היווצרות המערות מתחת לפני מי התהום. מאחר ששם מצוי 'התחום הפראטי', שכיח בספרות השימוש בכינוי 'מורפולוגיה פראטית' לציון תופעות אלה (פרומקין, 1988). מערות הנמצאות בכפיפה של שולי קמרים נטויות אף הן בכיוון נטיית השכבות.

עם התקדמות המחקר התברר שרוב מערות מדבר יהודה נוצרו בתוך אקוויפר כלוא ולא פראטי. מרבית המערות, ובכלל זה הגדולות ביותר במדבר יהודה, התפתחו סמוך לראש החתך הסטריטיגרפי של חבורת יהודה, בתצורת שבטה ולעתים גם נצר (פרומקין, 1991). ההסבר העיקרי לעדיפות של תצורות שבטה ונצר הנו הכיסוי האטים יחסית של חבורת הר הצופים, שגרם לכליאה של האקוויפר הרווי מתחתיו. כליאה כזו מאפשרת זרימה ממושכת ומרוכזת של מי תהום באקוויפר הכלוא. הכיסוי שרד בחלקו עד היום, אך הוסר בארוזיה בחלקים מוגבהים של פני השטח.

הסבר זה נתמך על ידי הגאומטריה של מערות מדבר יהודה: יחס אורך-רוחב גבוה המאפיין מערות אלה בגלל ריבוי המחילות הצרות, שלעתים מתחברות זו לזו ויוצרות מבנה דמוי

רשת (דוגמת מערות חריטון, נחל קינה, עראק א-נעסנה, סלע, הגיא, יוגב ועוד). מבנה זה שכיח במדבר יהודה, שבו היה כיסוי מלא של חבורת הר הצופים בשעת היווצרות המערות. לשם השוואה, למערות במערב השומרון יש בדרך כלל צורת אולם, והן מאופיינות לכן ביחס אורך-רוחב נמוך, קרוב ל-1 (Frumkin & Fischhendler, 2005). המערות במערב השומרון מופיעות בתצורות קרסטיות שונות בחתך של חבורת יהודה. ההסבר לתופעות הללו במערב השומרון הוא היעדר הכליאה של חבורת הר הצופים. מאחר שהביטוי 'אקוויפר כלוא' (תחת שכבה אטימה) מנוגד לביטוי 'אקוויפר פראטי' (חופשי, בהיעדר שכבה אטימה מלמעלה), אנו ממעיטים להשתמש כאן במונח 'מורפולוגיה פראטית', המגדיר מורפולוגיה הנוצרת בשני סוגי האקוויפרים.

תפרוסת המערות על פני מדבר יהודה מציגה פן נוסף. רוב המערות, לרבות הגדולות שבהן, מסודרות לאורך שני קווים שכיוונם צפון-צפון-מזרח. הקו המערבי משתרע לאורך הכפיפה המזרחית של קמר חברון-רמאללה, ממערב סלע בדרום דרך מערות חריטון, אל-מציה, הגיא, מכוך, וחיתה ונחל דלייה. הקו המזרחי מקביל למערבי ומשתרע ממערב נחל קינה בדרום, דרך מערות צבוע, כידוד, קנאים, מכלול צאלים, פרחי המלח, אגרות, מורבעאת וקומראן. שני הקווים עוקבים ככל הנראה אחר מבנים של הקשת הסורית (שכיוונם צפון-צפון-מזרח) ואינם קשורים למבנים של בקע ים המלח (כיוון צפון-דרום). הקו המזרחי של המערות אף נחתך על ידי מצוק ההעתקים של הבקע, והמשכו קבור בתוך הגוש הירוד של הבקע. הקו המערבי נחצה על ידי רצועת ההעתקה של סמיה הקשורה לבקע (בגין, 1974), אך זו איננה משפיעה על תפרוסת המערות. חלקו הדרומי של קו המערות המזרחי, עד מערת קנאים, עוקב אחר הכפיפה המזרחית של קמר כידוד. לעומת זאת, החלק הצפוני של אותו קו נמשך באותו כיוון גם בהיעדרה של הכפיפה. אפשר אפוא לשער שהמערות אינן עוקבות דווקא אחר הכפיפות, אלא אולי אחר ההעתקים ההפוכים הקבורים מתחתיהן (Shahar, 1994). ייתכן שדרך העתקים אלה עלו מים מעומק רב אל האקוויפר הכלוא של חבורת יהודה, באזור הכליאה חל ערוב עם מים רדודים יותר והמים הפכו אגרסיביים (בעלי כושר המסה). מערה שנוצרה בתהליך זה מוגדרת 'היפוגנית'. להשערה זו יש תמיכה גם בתופעות פרטניות שנצפו בכמה מן המערות. ה'חשודות' העיקריות בתהליך זה הן המערות בעלות מבנה דמוי רשת, מבנה אופייני למערות היפוגניות כלואות. במערות מדבר יהודה נראה כי התנאים הכלואים שררו ברוב מכריע של המערות בעת היווצרותן, אך בחלקן קשה יותר להוכיח תנאים היפוגניים. לכן נציין ברוב המערות את היווצרותן בתנאים כלואים (confined).

תהליכים יוצרי מערות מסוגים אחרים

מערות מעטות יחסית במדבר יהודה נוצרו בתהליכים שונים מאלה שתוארו לעיל. מדובר לרוב במערות קטנות, ולעתים רחוקות במערות בינוניות באורכן. רובן המכריע נוצר ברביעון המאוחר, תקופה שבה פני השטח דמו למצב כיום.



חללי המסה עדשתיים לאורך סדק, מערת סלע - עדות להמסה מתחת פני מי התהום



חללים רדודים של בליית פני שטח: טאפוני וצנירים (נחל חמר)

בכוח הכבידה או הרוח. מערות אולם שפתחן פעור בתקרה (למשל המערות: בור מכוך, ביר אורידה, ביר אל-קעיר, בור יהל) אינן מאפשרות פינוי זה של החומר, והיווצרותן התרחשה קרוב לוודאי מתחת לפני מי התהום, כאשר החומר המומס הוסע במים.

תהליך יוצר מערות נדיר במדבר יהודה קשור בזרימת מים בתחום הוואדוסי. לדוגמה, למערת זרניק בסלע גיר קשה יש מבנה של קניון ואדוסי וקשר הדוק לערוץ הנחל הסמוך, שכנראה נשבה בעבר לתוך המערה. נראה שמי השיטפונות בערוץ הרחיבו סדק והפכוהו למערה ואדוסיית, אך ייתכן שגם כאן היה קיים חלל ראשוני שמקורו היפוגי, ועומקו של החלל אפשר לו להישאר פתוח למרות חדירה מאוחרת של סחף נחלי.

מערת היצ'קוק בנחל דרגה נוצרה בתצורת הלשון הרכה בתהליך ארוזיבי המכונה piping. סדק בלע מי נגר עילי של ערוץ קטן. המים פוררו את הסלע הרך בכוח האנרגיה המכנית של הזרימה, בשילוב עם המסה של מרכיבים מסיסים בסלע, שסייעה לפירוק והובלה של המרכיבים המסיסים פחות. מערת הקמח בנחל פרצים ומערות נוספות, רובן מדרום לים המלח, נוצרו אף הן בתהליך דומה.

כאשר גלים בחופי אגמים בבקע ים המלח מכים בסלע רך אך מגובש, הם עשויים לפרקו באופן מכני וליצור צנירים ומערות ארוזיביות רדודות. הרטבה במי ים מלוחים והתייבשות תוך גידול גבישי מלח מסייעים בתהליך. ים המלח ואגמי הבקע שקדמו לו הם אגמים טרמינליים המושפעים משינויי אקלים (פרומקין, 2014), ולכן מפלסם השתנה באופן תדיר וגרם לארוזיה וחללים במתלול מצוק ההעתקים.

מערות סדק נוצרו על ידי תזוזה של גוש סלע והתרחקותו מגוש סמוך. הדבר מתרחש בגלל תהליך טקטוני (העתקה) או כבידת, דוגמת גושי סלע שמתנתקים ממצוק ועומדים להידרדר במדרון.

עד כאן נדונו מערות 'משניות', שנוצרו בתוך סלע שהיה



חלל שנוצר בגלל סדקי שחרור לחץ במצוק (מעל עין נמר)

קיים קודם לכן. לעומתן, אגב היווצרות הסלע שבתוכו נמצאת המערה. דוגמה לכך היא מערת המתבודד באזור נחל דוד בעין גדי. נביעת מים השקיעה כאן טופה, בצורת נטיפים ודרגשים. תוך כדי השקעת הטופה נותרו חללים בין המשקעים, וחללים אלה מהווים את המערה. חללים כאלו מוכרים גם במחשופי טרוורטין שבמזרח ים המלח (דוגמת עינות קלירוהי) ונדירים יותר במרחבי מדבר יהודה.

הזדקנות המערות

בשלב מאוחר יחסית נפרצו המערות הקדומות באופן אקראי במהלך ההתחברות, ההעתקה ונסיגת המדרונות. בגדולות שבהן המורפולוגיה המקורית ברורה, ואילו בקטנות היא קשה לפיענוח, כנראה בגלל תהליכי בליה הפועלים באינטנסיביות סמוך לפתחי מערות. לעתים תהליכי הבליה החיצוניים פעילים בעיצוב חללים קטנים, יותר מאשר ההמסה המקורית הקדומה. למערה יש מחזור חיים שבסופו היא נהרסת או נסתמת (Frumkin et al., 2009). הרס המערה נגרם מתהליכי התמוטטות של תקרתה או ארוזיה של פני השטח המתקדמת בהדרגה ופוגעת במערה. על קצב התהליך אפשר ללמוד למשל במערת אום קטפה (נחל תקוע): בעת הפעילות הפרהיסטורית (לפני כחצי מיליון שנה?) אורך המערה היה כ-30 מ'. מאז נסוג קו הנטף כ-15 מ' בגלל התמוטטות התקרה, שקשורה לנסיגת המצוק שהמערה נמצאת בו (אפשר לראות כי אין מדובר בהתמוטטות מקרית של גג המערה בלבד). קצב נסיגה דומה נצפה במערות פרהיסטוריות אחרות בארץ. במערות רבות התרחשה התמוטטות שלעיתים פערה פתח בתקרה או אף הביאה לנפילת התקרה כולה. פתח כזה עשוי להיות מלכודת לבעלי חיים שנופלים לתוכו. כאשר זהו הפתח היחיד, עשויים להיות למערה מאפיינים של בור אנכי במבט ראשון, אך לרוב המיפוי מוכיח שהמבנה המקורי היה אופקי יחסית (דוגמת ביר אל-קעיר בנחל חבר). הזדקנות מערות מסוג אחר הנה הצטברות סדימנטים מסוגים שונים, שעשויים לעתים לסתום את המערה לחלוטין.

משקעי מערות

משקעי מערות ממוצא גאולוגי כוללים סדימנטים קלסטיים וכימיים. משקע קלסטי שכיח הנו שברי סלעים שהתמוטטו מדופנות המערה ותקרתה או אבנים וגרגירים קטנים שניתקו בתהליכי בליה והצטברו על הקרקעית. חלוקים מעוגלים שכיחים במצוק ההעתקים כתוצאה מבליית קונגלומרט וחדירת חומר ממניפות סחף או מרכסי חוף של האגם. משקע דק יותר עשוי לשקוע במערה הן מבליה מקומית והן בהובלה על ידי מים ורוח. משקע חרסיתי קדום, הקשור להיווצרות המערה, מופיע למשל במערת חריתון. מקורו עשוי להיות שארית בלתי מסיסה של הסלע שבו התפתחה המערה. חרסיות עשויות לחדור לתוך מערות גם דרך סדקים מפני השטח, שם הן שכיחות בקרקע. רוח מסיעה אבק לתוך מערות, וזה מצטבר לרוב באזור הפתח.

בעלי חיים משאירים במערה חומר ביוגני, למשל גללים (המצטברים לעתים כמרבצי גואנו), עצמות, פרווה, קוצים ועוד. בני אדם מביאים חומר מגוון נוסף, אשר מפורט במבוא הארכיאולוגי ובתיאורי המערות. ככלל, התנאים במדבר יהודה יבשים יחסית, ולכן הסדימנטים יבשים ואבקתיים יותר ביחס לאזור הים-תיכוני, שם שכיח יותר סדימנט לח ובוץ. בהיעדר לחות, הסדימנטים במדבר עוברים תהליכים כימיים מעטים יותר ונוטים להשתמר במצבם הכימי המקורי, עובדה המסייעת להשתמרות חומרים אורגניים. בתוך תחומי המדבר ניכרים הפרשי הלחות בין מערות יבשות לאורך מצוק ההעתקים ובדרום לבין מערות לחות יחסית בספר המדבר.

בשל היובש נדירים במדבר ספלאותמים (משקעים כימיים של מערות) הנוצרים בתחום



משקעים של גוף מים קדום: רפסודות קלציט (מתחת לאצבע) וקווי מפלס המים (מעל האצבע). מכלול המטמון, נחל משמר

הוואדוסי כתוצאה של טפטוף, דוגמת נטיפים, זקיפים ומשטחי זרימה (flowstone). הופעתם בנקודות מסוימות בתוך מערות בודדות היא עדות לצירוף של תנאים: מערכת סדקים שמרכזת מים אל הנקודה ותקופה לחה, עתירת משקעים.

נדירים יותר ספלאותמים ששקעו מגופי מים קדומים. רפסודות קלציט מייצגות ככל הנראה את פני מי התהום הקדומים (או גוף מים מקומי?). רפסודות כאלו נמצאו במערת באב אל הווא ובמכלול המטמון.

באקלים היבש של מדבר יהודה שכיחים משקעים אוויריים. במיוחד שכיחים מלח בישול (הליט) וגבס. הם מופיעים לעתים בצורת פרחי מלח וגבס שנוצרים כאשר תמיסות יוצאות מדופן מערה ומתאדות עם הגיען לחלל היבש יחסית. גבישי מלח או גבס מושקעים על הדופן. בהמשך התהליך נדחפים ראשי הגבישים על ידי חומר מושקע חדש בבסיסם, במגע עם הקיר, והספלאותם צומח ומסתלסל בדומה למשחת שיניים הנלחצת החוצה משפופרת. קרומי גבס המצפים את הדופן והתקרה (דוגמת מערת קנאים ונחל קינה) עשויים להעיד על נוכחות חומצה גפרתית, שהופכת את הגיר בדופן המערה לגבס.

מערה מתפקדת כקופסה מוגנת מפגעי האקלים והארוזיה. לפיכך השתמרו במערות גם סדימנטים של פני שטח שלעתיים הוסרו ונעלמו מחוץ למערה. לאורך מצוק ההעתקים התופעה בולטת במיוחד בשל הארוזיה האינטנסיבית בפני השטח התלולים. במערות שבמצוקים השתמרו משקעי אגמים קדומים שמייצגים תקופות קדומות של התפתחות בקע ים המלח (Frumkin, 2001; Lisker et al., 2010, Late Neogene).

משקעים אגמיים משוכבים שנוצרו במים רדודים על ידי מיקרואורגניזמים, מופיעים לאורך מצוק ההעתקים במערות רדודות שהוצפו על ידי ימת הלשון והשתמרו שם טוב יותר מאשר בפני השטח (Lisker et al., 2009).

תארוך ופלאו-סביבה

לא קל לתארוך מערה, מעצם הגדרתה כחלל, כלומר כהיעדר של חומר. בדרך כלל מתארכים סדימנט ששקע בתוכה, אך זה מסובך בסדימנטים קדומים, והמערה עשויה להיות קדומה בהרבה לסדימנט ששקע בתוכה. מילוי של מערת ברבור ברכס דימונה בצפון-מזרח הנגב שעבר ברזול (Ryb et al., 2009) מייצג אולי חדירת תמלחת מבקע ים המלח לפני כ-12-11 מיליון שנה, בתנאים פראטיים. המעבר לתנאים ואדוסיים התרחש כנראה מאוחר יותר: המשקע הנחלי במערת האגרות תוארך לכ-3.4 מיליון שנה בעזרת איזוטופים קוסמוגניים. משקע דומה במערת מצדה 2008 תוארך באותה שיטה לכ-3.6 מיליון שנה (Matmon et al., 2014).

בשיטת אורניום-עופרת תוארכו ספלאותמים ואדוסיים ששקעו על גבי סלע האם במערת אשלים בצפון-מערב הנגב לכ-3.1 מיליון שנה, ובדרום הנגב לכ-3.3 מיליון שנה (Vaks et al., 2013). משמעות מקבץ הגילים הללו היא שלפני כשלושה מיליון שנה המערות כבר התרוממו מעל פני מי התהום שבתוכם נוצרו. במקרה של מערת האגרות אפשר לקשר

את התרוממות כתפי הבקע והיווצרות התבליט להתחתרות נחל חבר, שחתך את המערה. היווצרות המערות התרחשה ודאי מוקדם יותר (בהרבה?) מן הגילים הללו. חיתוך המערות הכלואות על ידי העתקי בקע ים המלח, כמו גם הופעתן בגובה ניכר במצוקים, מלמד על גילן היחסי. כאמור לעיל, המערות קדמו להתפתחותו של בקע ים המלח בצורתו הנוכחית. יתר על כן, היעדר קשר גנטי ביניהן לבין העתקי הבקע מרמז על כך שהמערות קדמו גם להעתקים עצמם.

פעילות בעלי חיים ואדם במערות מאפשרת את תארוך הסדימנט בשיטות יחסיות, המסתמכות על סדר ההופעה וההתפתחות של בעלי חיים או כלים. לשם כך נעשה שימוש ב'מאובנים מנחים', שהם באופן אידאלי בעלי השתרעות רחבה ופרק זמן מוגבל. שיטה זו נוחה לשימוש בסדימנטים ימיים ומוגבלת יותר בסדימנטים יבשתיים. המערה הקדומה ביותר בארץ שאפשר לקבוע למילוי שלה גיל באופן כזה היא מערת בית לחם, הסמוכה לספר מדבר יהודה. היא נמצאה סתומה בסדימנט שהכיל שפע עצמות יונקים ששויכו לפליוקן – פלייסטוקן מוקדם (Tchernov, 1988; Hooijer, 1958). במערת אום קטפה הסמוכה, שהיא הקדומה במערות הפרהיסטוריות במדבר, מעידים שרידי היונקים הקטנים וממצא מהתרבות האשלית על מוצאם מהפלאולית התחתון.

לסיכום, התארוכים המוקדמים שבידינו מעידים על הצטברות סדימנטים במערות שבתחום הוואדוסי כבר לפני למעלה משלושה מיליון שנה. באזור מצוק ההעתקים, התחתרות נחל חבר הצעיר לעומק עשרות מטרים מתחת לרמת מדבר יהודה וחשיפת מערת האגרות בערוץ הנחל לפני 3.4 מיליון שנה לפחות, וכן הצטברות משקעי אגם וסחף בתוכה (Frumkin, 2001; Matmon et al., 2014), מלמדים על שקע טופוגרפי בבקע שבשוליו מצויים נמוכים. סמוך לראש המצדה החל הנחל הקדום או החוף למלא מערה כבר לפני כ-3.6 מיליון שנה. סדימנט אגמי קדום נמצא גם במערות אחרות סמוך לראש מצוק ההעתקים (Lisker et al., 2010, Late Neogene). מילוי מערת בית לחם סמוך לאותה תקופה, והתרוממות מערת אשלים מעל מפלס מי התהום, מעידים כי ההתרוממות ויצירת התבליט לא פסחו על אזור ההר. אפשר אפוא להניח שבמהלך הפליוקן התרומם גב ההר ביחס לבקע המשתפל ונוצר תבליט שגורם לארוזיה מוגברת. תמונה דומה מסתמנת גם מתארוך בזלות ממזרח לים המלח (Steinitz & Bartov, 1991).

תארוך ספלאותמים במדבר יהודה בשיטת אורניום-תוריום (Lisker et al., 2010, Late Pleistocene) הראה כי בתקופות הקרח האחרונות האקלים היה לח יותר מאשר בתקופות בין-קרחוניות ובהולוקן, מה שאפשר היווצרות ספלאותמים אף בדרום מדבר יהודה ולאורך מצוק

ההעתקים. ממצא זה מאפשר לקבוע כי מדבר יהודה הושפע בתקופות הקרח מנדידה דרומה של חגורות האקלים והתגברות המשקעים (Frumkin et al., 2011).

תארוך הסטרומטוליטים במערות מצוק ההעתקים אפשר לקבוע שמפלס ימת הלשון



מילוי בעובי 11 מ' של סדימנטים מגוונים בין סלעי התמוטטות במערת האגרות: למטה משקע של גוף מים, ולמעלה משקע נחלי



סורין ליסקר בוחן
משקע סטרומטוליטים
(בגובה העיניים) במערה
בקונגלומרט עין פשחה
מצפון לקומראן

היה גבוה לאורך רוב תקופת הקרח האחרונה (Lisker et al., 2010, Late Pleistocene), ומכאן שהאקלים היה אז לח גם בצפון אגן הניקוז של הימה. מפלסי הסטרומטוליטים אפשרו גם לקבוע כי השקיעה הטקטונית בבקע מהירה יותר ממה שהיה מקובל לחשוב קודם (Lisker et al., 2009). לקראת ההולוקן ירד מפלס הימה באופן דרמטי, ובמהלך ההולוקן נע המפלס סביב 400- מ' (Frumkin, 1997).

שחזור האקלים הקדום על סמך משקעי מערות מאפשר גם להבין טוב יותר את פעילות האדם. אפשר למשל להסביר את חדירת טיפוסים שונים של אדם לאזורנו בתקופות פרהיסטוריות בעזרת חלונות אקלימיים המתבטאים בהשקעת הספלאותמים במדבר יהודה ובנגב (Vaks et al., 2007; Frumkin et al., 2011).

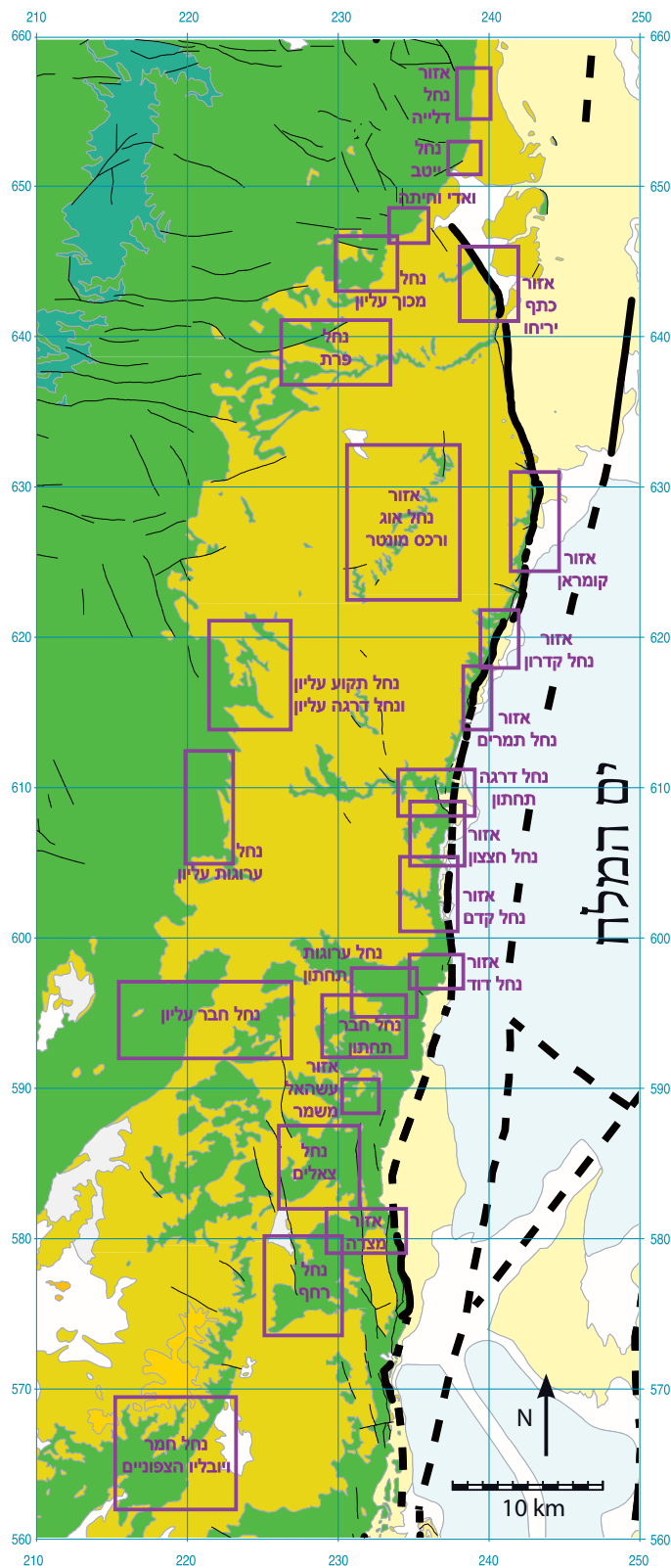
סיכום

במדבר יהודה נמצא הריכוז הגדול ביותר של מערות הגיר הארוכות בישראל, למרות האקלים המדברי. אפשר לייחס תופעה זאת לצירוף של תנאים אחדים שלא התקיימו בשאר חלקי הארץ ולנסות לשחזר את תנאי היווצרות המערות כדלקמן.

אקוויפר כלוא יציב עם זרימה אטית, בעל השתרעות רחבה, התקיים באזור זה במשך מיליוני שנים באוליגוקן-מיוקן. האקוויפר ניזון ממשקעים שירדו ממערב למדבר יהודה באזור עתיר משקעים שבו נגדעה קודם לכן חבורת הר הצופים ונחשפה חבורת יהודה. כליאת האקוויפר על ידי חבורת הר הצופים מנעה תנודות אנכיות של אזור הזרימה המועדפת, שהתרכזה בגג חבורת יהודה גם כשהשטח עבר קימוט במהלך התפתחות הקשת הסורית. העתקים עמוקים שלא הגיעו אל פני השטח (או התבטאו בכפיפות בלבד) אפשרו עליית מי תהום כלפי מעלה אל האקוויפר הכלוא הרדוד. בד בבד לא התרחשה העתקה חדה של פני השטח ולא נוצרו גרביים והורסטים, בניגוד לאזורים צפוניים יותר (שומרון וגליל). עקב כך נמנעו במשך תקופה ארוכה התרוקנות האקוויפר או תזוזה אנכית של פני מי התהום.

בעקבות התפתחות בקע ים המלח והתרוממות מקבילה של גב ההר התרוקן האקוויפר העליון של חבורת יהודה ומפלס מי התהום ירד. השלב העיקרי שיצר את התבליט הנוכחי החל בפליוקן. העתקי הבקע והקניונים חתכו את המערות ואפשרו הצטברות סדימנטים ופעילות של בעלי חיים ואדם בתוכן. המערות שימשו כ'קפסולות זמן' ששימרו בתוכן עדויות פלאו-סביבתיות. שיטות תארוך מודרניות מאפשרות להבין את הכרונולוגיה של משקעי המערות והשינויים הסביבתיים המיוצגים בהם. לפני יותר משלושה מיליון שנה כבר היו מערות המדבר מורמות מעל מפלס מי התהום, והנחלים המוכרים לנו כיום כבר החלו להתחתר.

מפה גאולוגית מוכללת של שטח האטלס



מקרא - חתך עמודי

חבורות סלע		גיל גיאולוגי	גיל מיליוני שנים
קאנוניקון	רביעון	הולוקן	0.0117
		פלייסטוקן	
	שלשון	פליוקן	2.58
		מיוקן	5-33
		אוליגוקן + אאוקן עליון	23
		אאוקן	39
מוזואיקון	קריטיקון	פאלאוקן - סנון	56
		טורון - קנומן	90
	תחתון	אלביאן + (לא חשוף)	100
		כורנוב** (לא חשוף)	146

העתק

העתק ראשי

העתק ראשי לא חשוף

אזור באטלס

נחל חבר עליון

* חבורת יהודה מגיל אלביאן מאוחר, קנומן וטורון

** חבורת כורנוב מגיל קריטיקון תחתון (עד אלביאן)



קטע מתוך:

אטלס מערות

מדבר יהודה וספר המדבר

בעריכת
עמוס פרומקין

תוכן העניינים

ח	מקרא לחללי מערות
ט	מקרא לתופעות ומשקעי מערות
יא	שלמי תודה
יב	על המחברים
1	מבוא
3	סיכונים ואמצעי בטיחות במערות
5	שמירת טבע במערות
7	שיטות סקר, מיפוי ומחקר במערות
12	מערות מדבר יהודה: גאולוגיה, מורפולוגיה והתפתחות הנוף
23	מערות מדבר יהודה: ארכיאולוגיה והיסטוריה
37	לוח תקופות ארכיאולוגיות/היסטוריות
38	האקולוגיה של מערות מדבר יהודה
42	תולדות מחקר המערות במדבר יהודה
48	המערות הגדולות במדבר יהודה ומיפוי

מערות מדבר יהודה

96	מערות אום קטפה	54	נחל חבר עליון
98	מערות מצוק הפטרייה 10	56	מערות כרמל
100	מערות מצוק הפטרייה 9	58	מערות סלע
102	מערות פטרייה	62	מערות ביר אל-קעיר
104	מערות הנר	64	נחל ערוגות עליון
106	מערות אום קלעה	66	מערות אל-מצידה
108	מערות אגור	68	מערות א-טבן עילית
110	עראק אל-אחמר	70	מערות א-טבן
112	מערות אל-מציה	72	טור סיף
114	נחל פרת	74	מכלול אבו זיף
116	מערות ח'רבת עין פארה	76	מערות אום א-זויתנה
118	מערות ואדי קלט	78	מערות צחבה
120	מערות יזנובים מתים	80	מערות ערקוב צחבא
122	מערות הגיא	82	נחל תקוע עליון ונחל דרגה עליון
124	צמד מערות אל-עליליאת	84	טראסת אל-ח'יאם
126	נחל מכוכ עליון	86	מערות אום נקוס
128	מערות חוריר הלח	88	מכלול המערה התלויה
130	מערות יזנובים	90	מערות חריטון

220	מערות קומראן 6Q
222	מערות עינוות קומראן
224	מערות עינוות תנור

אזור נחל קדרון תחתון

228	מכלול נקב מזן
230	מערות חג המולד
232	מערות בעלי החיים
234	מכלול המטבע

אזור נחל תמרים

240	מערות אולם תמרים
242	מערות אצות תמרים
244	מערות עינוות קנה

נחל דרגה תחתון

248	צמד מערות מחילתיים
250	מערות שתי קומות
252	מערות בר-אדון
254	מכלול מורבעאית 1,2,3
258	מערות מורבעאית 4
260	מערות אל ח'ב
262	מערות היצ'קוק

אזור נחל חצצון

266	מכלול מצפה שלם
268	מערות ג'סרה
270	מערות אצות מינרל
272	מערות הדינר
274	מערות בית הקברות
276	צמד מערות הקונגלומרט
278	מערות נטיפי מינרל

אזור נחל קדם

282	מכלול הרומח
286	מערות סטרומטוליט
288	מערות החרסים
290	מערות סלודורה
292	מערות נחל קדם
294	מערות מפל קדם
296	מכלול התאנים

אזור נחל דוד

302	מערות המתבודד
304	מערות הברכה
306	מערות הר ישי

132	צמד מערות ניר-קומתיים
134	מערות הכנסייה
136	מערות מדרגות
138	מערות נביעה
140	צמד מערות סרגל-קרציות
142	מערות מכוך
146	מערות בור מכוך

ואדי וחיתה

148	מערות רימונים
150	מערות וחיתה
152	מערות חוצה שלוחה
154	מערות חוצה שלוחה

אזור נחל דלייה

156	עראק א-נעסנה
158	מערות מפל דלייה
162	מערות אבו שנג'י
164	מערות יוגב
166	עראק אבו קטי
168	עראק טי
170	עראק טי

נחל ייטב

172	מערות עטלפי נוביריס
174	מערות ואדי א-נוביריס
176	מערות אמל אל-ואטואט
178	מערות אמל אל-ואטואט

אזור כתף יריחו

180	מערות הלוחם
182	מערות מבוך אבו סרג'
184	צמד מערות הצלבים והקורה
186	מכלול המרגלים-אביאור
188	מערות הסנדל
192	מערות הסנדל

אזור נחל אוג ורכס מונטר

194	מערות אוג 20
196	מערות דיר מוכלך
198	מערות זרניק
200	מערות זרניק

אזור קומראן

202	מערות פכית שמן האפרסמון
204	מערות מגילת הנחושת 3Q
206	מערות קומראן 24
208	מערות קומראן 11Q
210	מכלול התאומות
212	מערות קומראן 1Q
216	מערות קומראן 2Q
218	מערות קומראן 2Q

364	מערת אורידה
366	מערת מפל צפצפה
368	מערת המקווה
370	מכלול צאלים
374	מערת ד'נב חרוף
376	מערת שפן
378	מערת ראשי אלה
380	מערת מעלה נעמה
382	צמד מערות נחל גורני
384	מערת ענבה

386	אזור מצדה
388	מערת נחל מצדה עליון
390	מערת מצדה 2008
392	מכלול מצדה-דרום

394	נחל רחף
396	מערת קנאים
400	מכלול רחף עליון
402	מערת כידוד

406	נחל חמר ויובליו הצפוניים
408	מערת צבוע
412	מערת יהל
414	מערת יהל 5
416	מערת בור יהל
418	מערת יהל 8
420	מערת נחל קינה
424	מערת רדום
426	מערת גבעת סילון
428	מערת נחל חמר

308	מכלול צבר
312	מערת המורינגה

314	נחל ערוגות תחתון
316	מערת ערוגות המשקע הנחלי
318	מכלול ערוגות הנטיפים
320	צמד מערות נחיריים
322	מערת 'לנחמ עבדי'
324	מערת העתק ערוגות
326	מכלול מגילת ויקרא
328	מערת צרויה

330	נחל חבר תחתון
332	מערת באב אל הווא
334	מערת צבוע קטן
336	מערת אהרונים
338	מערת האימה
340	מערת חבר ב
342	מערת חבר א
344	מערת חבר ג
346	מערת האגרות
348	צמד מערות חבר מזרח

350	אזור עשהאל-משמר
352	מערת עשהאל
353	מערת פסח
354	מכלול המטמון
358	מערת פרחי המלח

360	נחל צאלים
362	מערת ביר אורידה

431	רשימת מקורות
447	מילון מונחים
451	מפתח

* * *

אטלס זה נועד לספק מידע על המערות תוך שמירה עליהן ועל תכולתן, ולא להיות מדריך טיולים. כדי לבקר במערות יש להצטייד באישורים הנדרשים על פי החוק. מערות רבות נמצאות בשמורות טבע ומכילות ערכי טבע או ארכיאולוגיה מוגנים, והחוק מחייב קבלת אישור לכניסה לתוכן. חלק מהמערות קשה לגישה וחלקן אינו נגיש ללא אמצעים והכשרה מיוחדים. יש מערות הנגועות בקרציות שעקיצתן גורמת למחלה קשה, המכונה 'קדחת מערות'. בכל מקרה אין לכותבי האטלס ולמו"ל כל אחריות בנוגע לכניסת אנשים למערות.