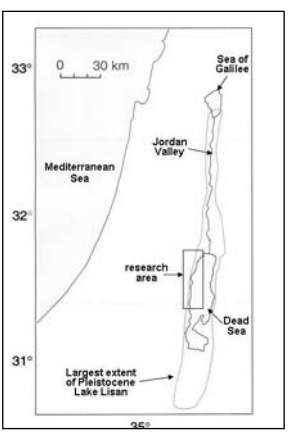
גיאולוגיה ומורפולוגיה של מערות בצפון מצוק ההעתקים של ים המלח

סורין ליסקר, רועי פורת ועמוס פרומקין
היחידה למידע ולחקר מערות (מלח"ם),
המחלקה לגיאוגרפיה, האוניברסיטה העברית בירושלים

א. מבוא

א1. הקדמה

מצוק ההעתקים של ים המלח משופע במערות קרסטיות. המחקר הנוכחי סוקר את מערות חלקו הצפוני של המצוק ושל הקניונים הנלווים בין קומרן לעין גדי (איור 1) תוך התמקדות בשחזור תהליכי היווצרות והתפתחות קרסטית. בעבר נוצרו מערות במדבר יהודה בסביבה פריאטית או כלואה בתוך תצורות חבורת יהודה על ידי זרימת מי תהום באקוויפרים קדומים (Frumkin, 2000). כיום יש הפסקה כמעט מוחלטת של פעילות קרסטית בתוך המערות הנמצאות מעל מפלס מי התהום (Frumkin, 2000). המערות הקרסטיות הגדולות (שאורכן נע בין כמה עשרות מטרים עד כ–200 מ') הידועות עד כה במצוק ההעתקים והקניונים הנלווים, נמצאות ברובן בחלקו הדרומי של האזור בתוך סלעים מגיל טורון. בצפון מדבר יהודה היו ידועות מערות **מורבעת** והמכלול המפורסם של מערות קומרן.



איור 1: מפת מיקום של אזור המחקר.

א2. רקע גיאוגרפי

מצוק ההעתקים הוא יחידת הנוף הבולטת ביותר באזור ים המלח. הוא משתרע בכיוון צפון־דרום במקביל לחוף האגם. גובהו ביחס לבסיס נע בין 250 ל־650 מ' כאשר החלק הגבוה נמצא בין נחל חצצון לנחל קדם. המצוק מתנקז אל ים המלח, והנחלים החוצים אותו יוצרים קניונים תלולים המגיעים לעומקים של מאות מטרים. הוא גובל במערב בשוליה המזרחיים של רמת מדבר יהודה שהיא בעלת נוף של גבעות קירטון המתנשאות עד גובה +250 מ' מעל פני הים התיכון בחלקה המזרחי ו־+450 מ' בחלקה המערבי. חלקה המזרחי של רמה זו מנוקז ישירות אל המצוק על ידי ערוצים קטנים הפזורים לאורכו, בעוד חלקיה המערביים מתנקזים אל ים המלח דרך הקניונים. רצועת חוף משתפלת במתינות מרגלי המצוק אל קו המים, והיא מכוסה לרוב במדרגות חוף שהושקעו תוך כדי ירידת מפלס האגם. רוחבה המרבי של הרצועה עד כ־5 ק"מ באזור נחל צאלים.

צפונה משם היא צרה יותר ובמקומות מסוימים אף כמעט נעלמת והמצוק נוחת כמעט ישירות אל הים.

א3. רקע גיאולוגי

בקע ים המלח הוא שקע טופוגרפי מורפוטקטוני (גרבן) אשר החל את היווצרותו ככל הנראה במיוקן עליון (Steinitz and Bartov, 1991; Garfunkel and Horowitz, 1996;). העתקים נורמליים ו־strike–slip התוחמים את שולי הבקע (Avni, 1998; Frumkin, 2001) ויוצרים (Garfunkel, 1981; Sagy et al., 2003; Ben-Avraham and Lazar, 2006) את מצוק ההעתקים הם האלמנטים הסטרוקטורליים הדומיננטיים. המצוק יורד אל הבקע בסדרת שברי מדרגות תלולים עם נטייה של 75°–85° והעתקה כוללת של מאות מטרים (Agnon, 1981). על פי השחזור של רז (1983), מאמצע הפליוקן התרומם המצוק בכ־330 מ׳: כ־160 מ׳ עד סוף הפליוקן ועוד כ־170 מ׳ נוספים במהלך הפלייסטוקן. העתקים גדולים יותר קבורים מתחת למילוי הסדימנטרי של הגרבן, כך שסך כל ההעתקה האנכית הכוללת גם את החלקים שבתת־הקרקע היא בסדר גודל של קילומטרים. על פי Ben-Avraham and Lazar (2006), עומק אגן ים המלח הוא 6–8 ק״מ בחלק הצפוני ו־12 ק״מ בחלק הדרומי. הפעילות הטקטונית בבקע נמשכה לתוך הפלייסטוקן (Avni, 1998) וההולוקן (Reches and Hoexter, 1981; Niemi and Ben-Avraham, 1997; Ben-Avraham and Lazar, 2006). אומדן כמותי של מידת ההשתפלות הטקטונית של הבקע מאז הפלייסטוקן המאוחר ביותר הוערך על ידי ליסקר (Lisker et al., 2007, 2009).

הגיאולוגיה של התצורות החשופות במצוק ההעתקים תוארה על ידי רוט (1969), רז (1983), מור (1987) ומור וברוג (2000). תצורות קרבונטיות, בעיקר של גיר ודולומיט, מגיל אלביאן־טורון של **חבורת יהודה** בונות את קירות המצוק והקניונים. עוביה המרבי של החבורה החשוף במצוק מגיע לכ־600 מ׳. מעליה מונחים באי־התאמה זוויתית ואירוזיבית סלעים רכים של חבורת הר הצופים מגיל סנון־פאליאוקן הבונים את נופה המתון של רמת מדבר יהודה. תצורות חבורת יהודה המופיעות באזור המחקר הן (בסדר סטרטיגרפי עולה): חביון, עין ירקעם, צפית, אבנון, תמר, שבטה ונצר.

שני טיפוסי דולומיט מופיעים בחבורת יהודה (רז, 1983; מור, 1987): א. דולומיט ״סטרטיגרפי״ דיאגנטי קונקורדנטי בעל השתרעות רחבה מופיע בתצורות חביון, צפית ותמר; ב. דולומיט אפיגנטי דיסקורדנטי מופיע כגופים אי־רגולריים בתצורות שבטה ונצר וגם בתצורת מנוחה של חבורת הר הצופים. על פי רז (1983), הדולומיטיזציה האפיגנטית התרחשה בפליו־פלייסטוקן באופן מקומי וסינטקטוני על ידי תמלחות שתכונותיהן נדונו על ידי Stein et al., (2000, 2002) ו־Gavrieli and Stein (2006). הדולומיטיזציה האפיגנטית מגיעה עד גובה 400+ מ׳ במצוק ומטשטשת לעתים את הגבולות בין התצורות (רז, 1983).

התצורות תמר עד נצר מגיל קנומן עליון־טורון הבונות את החלק העליון של החבורה ושל מצוק ההעתקים, הן בעלות החשיפה המרבית בשטח המחקר. **תצורת תמר** עשויה שני פרטים: **פרט תמר 1** (קנומן עליון) עשוי דולומיט ״סטרטיגרפי״ אפור, אחיד, מסיבי, משוכב רק בחלקו העליון (רז, 1983; מור, 1987; מור וברוג, 2000); נחשף בקניוני הנחלים דרגה וחצצון ולאורך מצוק ההעתקים, פרט לקטע בין נחל צאלים לנחל ערוגות; יוצר מצוק תלול הנבדל היטב מתצורת אבנון הבהירה והרכה שמתחתיו ומהדולומיט המשוכב של

פרט תמר 2 שמעליו. **פרט תמר 2** (קנומן עליון־טורון תחתון) עשוי דולומיט "סטרטיגרפי" אפור־בהיר עד צהוב, משוכב ורך; יוצר נוף מדורג, הנבדל היטב ממצוק הדולומיט הכהה והמסיבי של פרט תמר 1 שמתחתיו ומתצורת שבטה המצוקית שמעליו.

תצורת שבטה (טורון תחתון־עליון) עשויה בעיקר גיר, ובמקומות מסוימים גם גופים דיסקורדנטיים של דולומיט אפיגנטי (רז, 1983; מור, 1987; מור ובורג, 2000). מחשופי הגיר בהירים, בעוד הדולומיט אפור וכהה יותר, קשה יותר, עמיד יותר בפני בלייה, וגס גביש. התצורה נחשפת לכל אורך מצוק ההעתקים והקניונים ונחלקת ליחידה תחתונה מצוקית וליחידה עליונה היוצרת מדרון מתון. גופי הדולומיט מוגבלים לעתים ליחידה התחתונה. בתצורה זו ידועות מערות קרסטיות רבות, מן הגדולות במדבר יהודה, עד כ־324 מ' במערת האגרות (Frumkin, 2001). בחלקן נתגלו בעבר ממצאים ארכיאולוגיים מהתקופה הכלכוליתית וממרד בר־כוכבא (אשל ועמית, 1998): מערות האגרות והאימה בנחל חבר, מערת המטמון בנחל משמר, מערת המקווה בנחל הרדוף, מערת החצים בנחל צאלים, מערות מורבעת בנחל דרגה, מערות כתף יריחו.

תצורת נצר (טורון עליון) עשויה בעיקר גיר ודולומיט אפיגנטי וחשופה לכל אורך החלק העליון של מצוק ההעתקים וקירות הקניונים (רז, 1983; מור, 1987; מור ובורג, 2000). המגע עם תצורת מנוחה שמעליה הוא בדרך כלל באי־התאמה זוויתית ואירוזיבית המתלכדת עם קצהו המורפולוגי של המצוק. חתך התצורה נחלק ליחידות כדלהלן: יחידה של גיר ודולומיט, יחידת גיר, חוואר וקירטון, יחידת גיר משוכב. הגיר ביומיקריטי או ביוספריטי, ומשוכב היטב. הדולומיט בעל צבע בהיר, דק עד בינוני גביש. התצורה קורלטיבית לחלקה העליון של תצורת בע'נה בהרי יהודה.

בתוך הבקע קיים מילוי בעובי עד כ־10 ק"מ (Garfunkel, 1997) של משקעים אוופוריטיים, קלסטיים וקרבונטים (זק, 1967) המרכיבים יחד את **חבורת ים המלח** (מיוקן עליון־פלייסטוקן). רוב משקעים אלה הצטברו בתוך גופי מים למיניהם שמילאו את הבקע. הבולטים שבהם: לגונת סדום מגיל מיוקן מאוחר־פליוקן (זק, 1967; Steinitz and Bartov, 1991); אגם סמרה מגיל פלייסטוקן אמצעי־מאוחר (Kaufman et al., 1992; וולדמן, 2002; Waldmann et al., 2007); אגם הליסאן מגיל פלייסטוקן עליון (Begin et al., 1974, 1980; Kaufman et al., 1992; Schramm et al., 2000; Bartov et al., 2002); ים המלח ההולוקני (Frumkin, 1997; Frumkin et al., 2001; Bookman - Ken-tor et al., 2004). במצוק ההעתקים שבשולי הבקע שקעו סדימנטים שונים על גבי סלעי חבורת יהודה. עובי החתך שם דק בהרבה מזה שבתוך הבקע. Lisker et al., (2009) מדווחים על הימצאות סטרומטוליטים של אגם הליסאן בתוך מערות במצוק ההעתקים, אשר שימשו לשחזור מפלסי האגם, שחזור פליאו־אקלימי ושחזור פליאו־טקטוני (ליסקר, 2007).

קונגלומרט דרגה (פליוקן־פלייסטוקן) שקע לחופי האגם ומצפה את בסיס מצוק ההעתקים במחשופים לא רצופים בעובי 10–15 מ', לאורך קטע של כ־30 ק"מ מנחל קדם צפונה, בין גבהים 390– מ' – 70– מ' (רוט, 1969; רז, 1983; מור, 1987). מחשופים אלה מונחים באי־התאמה מעל תצורות צפית ותמר של חבורת יהודה, ומוסטים לעתים על ידי העתקים. המחברים הנ"ל מבדילים בין שני טיפוסי קונגלומרט: א. הצטבר כדרדרת לאורך המצוק בין פתחי הערוצים הראשיים, ייתכן במנגנון של debris flows (Manspeizer, 1978, 1985); טיפוס זה הוא הנפוץ יותר, עשיר בחלוקי גיר ודולומיט חבורת יהודה, לא ממוין וחסר

שיכוב לרוב. ב. הצטבר כמניפות סחף מול פתחי הערוצים הראשיים; מרכיביו ממוינים וכוללים חלוקי צור רבים וגם חלוקי קירטון ופוספוריט שנגזרו מחבורת הר הצופים. החלק החיצוני החשוף של שכבות הקונגלומרט מלוכד היטב על ידי קרבונט אוטיגני (מור, 1987) ששקע ממי מעיינות (רוט, 1969; Garfunkel, 1978) ומכוסה פטינה כהה (רז, 1983), בעוד החלק הפנימי הצמוד למצוק מלוכד פחות, ולעתים אף אינו מלוכד (מור, 1987).

ב. שיטות עבודה

במסגרת המחקר נערכה עבודת שדה בתוך המערות ובסביבתן הקרובה וניתוח גיאולוגי של הממצאים. בשלב ראשון נערך סקר פוטו־אווירי שבמהלכו צולמו צילומי אוויר בזווית של 45° יחסית למישור האופקי ובהתאם לטופוגרפיה של המצוק. הצילומים בוצעו ועובדו על ידי חברת 'יעף – צילומי אוויר'. נעשה שימוש גם בצילומי אוויר שסופקו על ידי ספריית צילומי האוויר של המחלקה לגיאוגרפיה של האוניברסיטה העברית. הצילומים שימשו לאיתור פתחי מערות, לתכנון עבודת השדה, להזדהות בשטח ולניווט. נעשה שימוש נרחב גם במפות טופוגרפיות וגיאולוגיות.

לאחר מכן נערך סקר מערות מקיף לאורכו של מצוק ההעתקים, בין קומרן לעין גדי. ההגעה לאזור העבודה נעשתה באמצעות רכבי שטח של המחלקה לגיאוגרפיה של האוניברסיטה העברית. ההגעה למערות עצמן התבצעה לרוב בצורה רגלית. המערות שנבדקו מוספרו בסדר רץ. מיקומן סומן על גבי תצלומי אוויר ועל גבי מפות טופוגרפיות (קנ"מ 1:12,500 מוגדל מ־1:50,000). הקואורדינטות (רשת ישראל) והגובה הטופוגרפי (מ' מפני הים) נמדדו על גבי מפה טופוגרפית, ובעזרת מכשיר GPS מדגם Garmin eTrex Summit, בעל דיוק מיקום של 15 מ', דיוק גובה של כ־3 מ' ורזולוציה של כ־0.3 מ'. מכשיר ה־GPS כויל מחדש לפני כל הפעלה בשטח. לצורך הכיול נעשה שימוש בנתונים (קואורדינטות וגובה טופוגרפי) של נקודות ציון באזור ים המלח, שסופקו על ידי מחלקת המדידות. כל מדידה בוצעה כמה פעמים לוידוי אמינות התוצאות. כל מערה תועדה ומופתה בהתאם לשיטות וסטנדרטים מקובלים (פרומקין, 1984). מרחקים בתוך המערה נמדדו בעזרת מד־טווח לייזר מדגם Leica Disto ו/או סרט מדידה; כיוונים נמדדו במצפן ושיפועים נמדדו במד־שיפוע. מפות המערות סורטטו בשלב ראשוני בעזרת תוכנת Limelight לסְרטוט מפות מערות. בשלב הגימור האיורים סורטטו באמצעות תוכנת FreeHand, ביחידה לכרטוגרפיה של המחלקה לגיאוגרפיה של האוניברסיטה העברית. המערות תוארו בהקשר למאפיינים הבאים: מיקומן בחתך הסטרטיגרפי, תפוצה מרחבית ואזורים מועדפים להיווצרות, מורפולוגיה, סלע אם ומאפיינים סדימנטריים, סטרוקטורליים וטקטוניים.

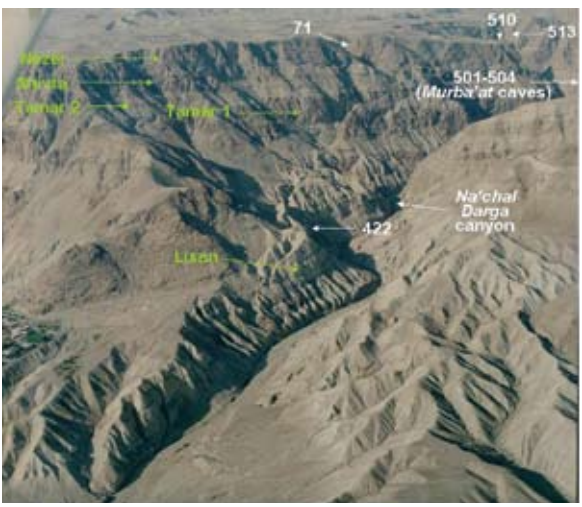
ג. תוצאות

במחקר הנוכחי נסקרו מערות באורך עד כ־90 מ' בתוך חבורת יהודה ובתוך קונגלומרט דרגה, לאורך חלקו הצפוני של מצוק ההעתקים. בטבלה 1 מופיעה סקירה של המערות בחבורת יהודה; מיקומן מופיע באיורים 2–8. מיפוי וניתוח ארכיאולוגי של המערות המכילות ממצא ממרד בר כוכבא מופיע אצל אשל ופורת (2009). רוב המערות התפתחו בתוך התצורות הקרבונטיות ה"קשות" של החבורה: צפית, תמר, שבטה ונצר. המערות

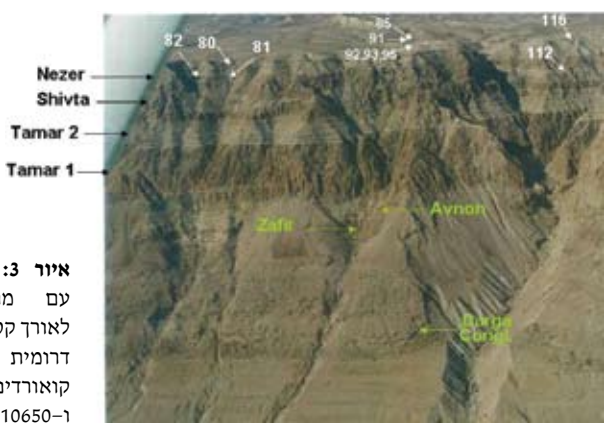
בתוך קונגלומרט דרגה (איורים 9–10) בדרך כלל קטנות, באורך כמה מטרים. בתוך המערות נמצאו סדימנטים מגוונים המשמרים עדויות על התנאים הסביבתיים ששררו באזור מאז היווצרות המערות (Lisker et al., 2007, 2009, 2010a,b).

ג1. סקירת התופעות

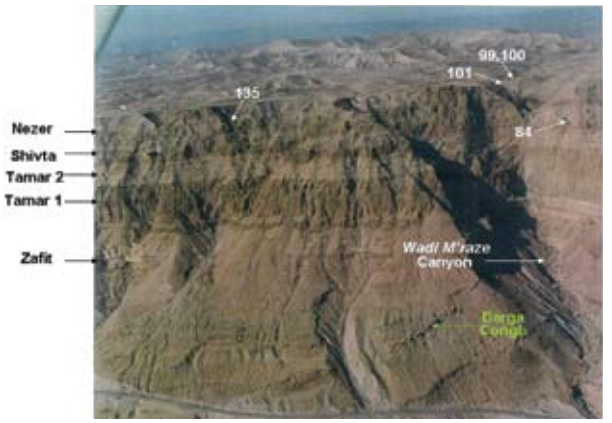
בקרב יותר מ־50 מערות נמצאו עדויות ל'מורפולוגיה פריאטית', שמעידות כי המערות היו מלאות במים בעת היווצרותן, כלומר נוצרו באקוויפר פריאטי או כלוא (פרומקין, 1986; Fischhendler and Frumkin 2008; Lauritzen and Lundberg, 2000). מערות אלו מרוכזות בעיקר בשלושה אזורים עיקריים: א. לאורך קניון נחל דרגה (איור 2); ב. בקטע מצוק בין נחל חצצון לנחל קדם (איורים 3, 4); ג. לאורך קניון נחל ערוגות. מערות ספורות נמצאו גם מחוץ לאזורים הנ"ל.



איור 2: מיקום פתחי מערות עם מורפולוגיה פריאטית לאורך נחל דרגה. מערה 422 היא ואדוסית



איור 3: מיקום פתחי מערות עם מורפולוגיה פריאטית לאורך קטע של מצוק ההעתקים דרומית לנחל חצצון, בין קואורדינטות 10525 דרום ו־10650 צפון (רשת ישראל)



איור 4: מיקום פתחי מערות עם מורפולוגיה פריאטית לאורך קטע של מצוק ההעתקים צפונית לנחל קדם, בין קואורדינטות 10370 דרום ו–10500 צפון (רשת ישראל)

המורפולוגיה הפריאטית כללה: **אולמות** (איור 5), **תקרות שטוחות** (איור 6), **מחילות עם חתכי רוחב אליפטיים** (איור 7), **כיפות המסה** (איור 8), **מחילות עובריות**, **ארובות**, **דפנות מוחלקות**, **כיסי המסה** (איור 6).



איור 5: אולם ראשי של מערה 501 בתוך אבן גיר של תצורת שיבטה



איור 6: מערה 348א׳ בתוך אבן גיר קירטונית ומעליה דולומיט קשה יותר של תצורת אבנון; מאפיינים של מורפולוגיה פריאטית: כיס המסה, תקרה שטוחה



איור 7: מחילה בעלת חתך רוחב אליפטי במערה 135 בתוך אבן גיר קירטונית ודולומיט של תצורת נצר



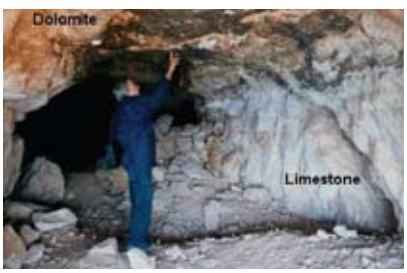
איור 8: זוג כיפות המסה על תקרת מערה 101ב׳ בתוך אבן גיר משוכבת של תצורת נצר

דפורמציה טקטונית, סידוק, פירוק מכני של הסלע ו/או התמוטטויות גרמו לעתים לעיוות המורפולוגיה הפריאטית. להלן כמה דוגמאות: במערה 42 בדולומיט תמר התרחש פירוק רב לאורך מישורי סידוק אנכיים ומישורי שיכוב אופקיים; במערה 502 בתצורת שבטה התנתקו בלוקים מן התקרה לאורך העתקים אנכיים ומישורי שיכוב אופקיים; בגג מערת 85 בתצורת נצר מופיעה מעין "דולינת התמוטטות", כנראה כיפת המסה שהתמוטטה.

מחילות המערות נמצאות לרוב לאורך קווי מפגש בין מישורי חולשה טקטוניים, כגון סדקים או העתקים אנכיים או תת־אנכיים, למישורי שיכוב אופקיים או תת־אופקיים (איור 9). לעתים קרובות לא נמצאו הבדלי קושי בין השכבה שבתוכה התפתח חלל המערה לשכבה הבונה את התקרה. במקומות אחדים מערות התפתחו בתוך יחידות רכות יחסית, בעוד מסלע קשה יותר בונה את תקרתן (איורים 6, 10). ברוב המקרים המסלע הרך הוא גירי, בעוד הקשה דולומיטי. לא נמצא קשר גנטי בין רוב המערות לטופוגרפיה הנוכחית של האזור: המערות נוצרו מתחת לפני השטח, ופתחיהן נחשפו באופן מקרי על ידי הטקטוניקה של הבקע ועל ידי האירוזיה הנלווית. במקומות אחדים נמצאו מחילות ממוצא טקטוני בלי מורפולוגיה פריאטית. ראויות לציון מחילות צרות ואנכיות ממוצא טקטוני במערות 501 (איור 11) ו־502.



איור 9: פתח מערה 51א'. המחילה לאורך מפגש בין מערכת העתקים אנכית בכוון מזרח–מערב ומישורי שיכוב בתוך דולומיט של תצורת שיבטה; כיפת המסה בתוך העתק ראשי על תקרת המערה



איור 10: מחילה ראשית של מערה 160א' בתוך אבן גיר של תצורת שיבטה, ומעליה דולומיט קשה יותר



איור 11: החלק הפנימי הצר ממוצא טקטוני של המחילה הראשית של מערה 501 בתוך אבן גיר של תצורת שיבטה

בטבלה 2 מופיעה חלוקה של המערות עם מורפולוגיה פריאטית בקטע הנחקר על פי התצורות המארחות:

ג1.1 מערות בתצורת אבנון

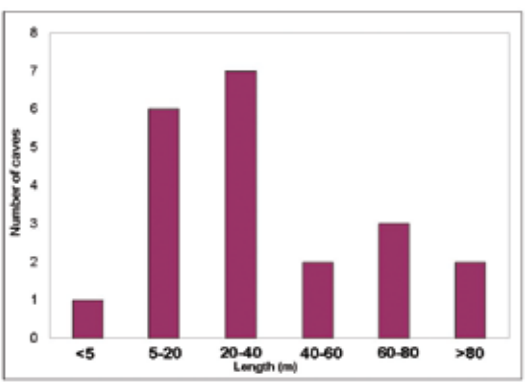
בתוך תצורה זו נמצאו רק 6 מערות עם מורפולוגיה פריאטית באורך 1.5–21 מ', כשאורך המחילות הכולל הוא כ־50 מ', ועוד כמה מערות קטנות (עד מטרים ספורים) בלי מורפולוגיה פריאטית. המערות התפתחו לרוב בתוך מסלע קירטוני או גירי־קירטוני בחלקה העליון של התצורה, לעתים בשילוב מסלע דולומיטי הבונה את תקרת המערה (איור 6).

ג2.1 מערות בתצורת תמר

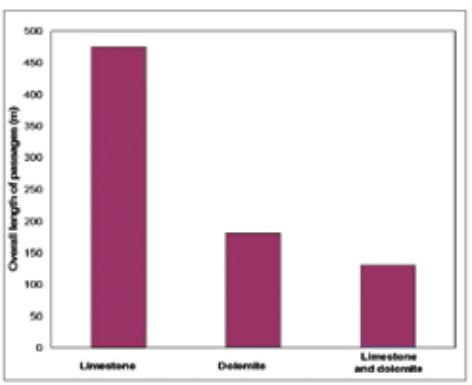
בתוך התצורה נמצאו רק 5 מערות עם מורפולוגיה פריאטית, בבסיס התצורה ובגגה. אורך המערות 2–18 מ', ואורך המחילות הכולל כ־55 מ'. נמצאו עוד כמה מערות קטנות (עד מטרים ספורים) בלי מורפולוגיה פריאטית.

ג3.1 מערות בתצורת שבטה

תצורת שבטה היא העשירה במערות קרסטיות בקטע הנחקר: 21 מערות בעלות מורפולוגיה פריאטית באורך 5–90 מ', כשאורך המחילות הכולל הוא כ־780 מ', ועוד מספר רב של מערות קטנות (עד מטרים ספורים) בלי מורפולוגיה פריאטית. 5 מהמערות בעלי מורפולוגיה פריאטית ארוכות מ־60 מ' (טבלה 2, איור 12). מערות התצורה התפתחו בתוך מסלע גירי (אורך מחילות כולל כ־474 מ'), דולומיטי (אורך מחילות כולל כ־179 מ') או שילוב של שניהם (אורך מחילות כולל כ־128 מ') (איור 13) כאשר הדולומיט הקשה יותר בונה בדרך כלל את התקרה, כגון במערות 160 (איור 10) ו־84ג'.



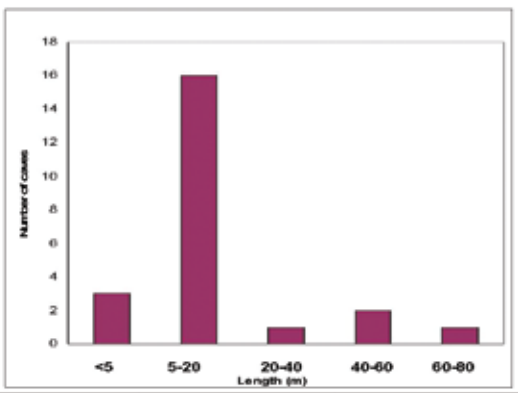
איור 12: אורך מחילות עם מורפולוגיה פריאטית בתוך תצורת שיבטה, לאורך מצוק ההעתקים בין עין גדי לנחל קידרון



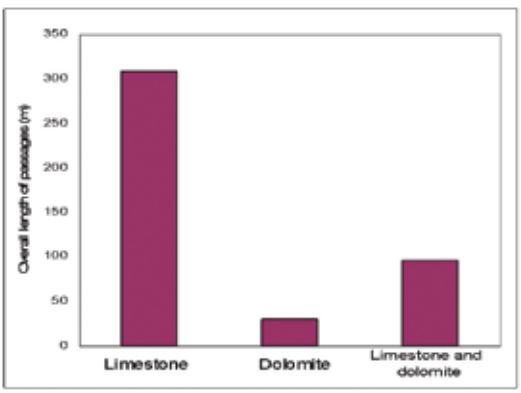
איור 13: ליטולוגיה של סלע האם של מערות עם מורפולוגיה פריאטית בתוך תצורת שיבטה, לאורך מצוק ההעתקים בין עין גדי לנחל קידרון

ג4.1 מערות בתצורת נצר

בתוך התצורה נמצאו 22 מערות בעלות מורפולוגיה פריאטית באורך 5–70 מ׳, כשאורך המחילות הכולל הוא כ־436 מ׳, ועוד כמה מערות קטנות (עד מטרים ספורים) בלי מורפולוגיה פריאטית. אורכן של רוב המערות (כ־16 מהן) בין 5 ל־20 מ׳ (טבלה 2, איור 14), כך שבממוצע מערות תצורת נצר קצרות יותר מאלה של תצורת שבטה. מערות התצורה התפתחו בעיקר בתוך מסלע גירי (אורך מחילות כולל כ־309 מ׳), לעתים דולומיטי (אורך מחילות כולל כ־30 מ׳) או שילוב של שניהם (אורך מחילות כולל כ־97 מ׳) (איור 15). הדולומיט הקשה יותר בונה לרוב את תקרת המערה.



איור 14: אורך מחילות עם מורפולוגיה פריאטית בתוך תצורת נצר, לאורך מצוק ההעתקים בין עין גדי לנחל קידרון



איור 15: ליטולוגיה של סלע האם של מערות עם מורפולוגיה פריאטית בתוך תצורת נצר, לאורך מצוק ההעתקים בין עין גדי לנחל קידרון

ג5.1 מערות בתוך קונגלומרט דרגה

בתוך מחשופי קונגלומרט דרגה נמצאו עשרות מערות, לעתים בצפיפות גדולה. אורכן לרוב בין מטרים ספורים לכ־15 מ׳. לעתים קרובות התפתחו המערות בתוך צנירים, לעתים לאורך מישורי חולשה טקטוניים בין הקונגלומרט לסלעי חבורת יהודה, או בתוך הקונגלומרט עצמו. המערות התפתחו בדרך כלל על ידי בליה, פירוק והתפוררות של החלק הפנימי המלוכד פחות של שכבות הקונגלומרט, בעוד החלק החיצוני המלוכד היטב בונה את התקרה. לא נמצאו עדויות למורפולוגיה פריאטית בתוך מערות קונגלומרט דרגה. במערה אחת באזור עין גדי נמצא משטח זרימה של משקעי מעיינות (טרוורטין), המצפה שרידי קבורה מהתקופה הפרסית (המאה החמישית לפנה״ס) (Shai et al., 2007); תיארוך רדיומטרי בשיטת U-Th של המשקעים הניב תוצאות התואמות את הממצא הארכיאולוגי (Lisker et al., 2007).

ג6.1 מערות בתוך תצורת הליסאן

מערה 422 באורך של כ־80 מ׳ בתוך סלעים רכים של תצורת הליסאן מגיל פלייסטוקן עליון ביותר (Bartov et al., 2002) נמצאה בנחל דרגה (איור 2). מערה זו ייחודית, בהיותה ערוץ תת־קרקעי שהתפתח בשילוב של המסה וסחיפה (piping), בדומה למערת הקמח בנחל פרצים.

ג2. דיון

מחילות קרסטיות נוצרות בדרך כלל לאורך קווי מגע בין מישורי חולשה טקטוניים לבין אופקים בעלי מסיסות גבוהה (Lauritzen and Lundberg, 2000). גם מערות מצוק ההעתקים נוצרו, לרוב, לאורך קווי מפגש מסוג זה, בדומה למודלים של פרומקין (1986), Lauritzen and Lundberg (2000) ו־Lowe (2000). לא נמצא קשר מורפוגנטי בין המערות הקרסטיות בחבורת יהודה במצוק ההעתקים לבין פני השטח הנוכחיים: לא נתגלו בולענים או נביעות שקישרו בין מערכת הניקוז העלית למערכות התת־קרקעיות (מערות קרסטיות שכיחות בעולם הן נחלים תת־קרקעיים עם קשר גנטי אל פני השטח).

המורפולוגיה הפריאטית מעידה שהמערות היו מלאות במים בשעת היווצרותן, כלומר הן נוצרו מתחת למפלס מי התהום. גובהן הטופוגרפי הרב מעל מפלס מי התהום הנוכחי באזור ים המלח, עד כ־250+ מ׳ לעומת כ־400– מ׳ בהתאמה (Laronne and Gvirtzman, 2002; Laronne Ben-Itzhak and Gvirtzman, 2005), מעיד שמדובר במפלס מי תהום קדום של מערכות אקוויפריות רליקטיות שאינן קשורות להידרולוגיה הנוכחית. התצורות אבנון־נצר מגיל קנומן עליון–טורון שבהן התפתחו המערות הפריאטיות, נמצאות בעמדות סטרטיגרפיות קורלטיביות לחתך ורדים־בע׳נה בהרי יהודה, הנושא כיום את התת־אקוויפר העליון של חבורת יהודה. לכן, סביר שתצורות אלה נשאו בעבר אקוויפרים קרסטיים פעילים במדבר יהודה, בעוד מפלס מי התהום באזור נמצא כיום בתוך תצורת צפית מגיל קנומן תחתון־עליון או עמוק יותר (Mazor, 1997; Laronne and Gvirtzman, 2005). המערות נוצרו בתת האקוויפר העליון בזמן כלשהו לאחר הקנומן העליון־טורון.

שלושה ריכוזים עיקריים של מערות נמצאו בקטע הנחקר: בקניוני שני הנחלים העמוקים והארוכים באזור, דרגה וערוגות, כ־4–5 ק״מ מקו החוף, ובקטע מצוק ההעתקים בין נחל חצצון לנחל קדם, שבו עוצמת ההעתקה האנכית והתרוממות המצוק היא מרבית. ייתכן שריכוז רוב המערות בשלושה אזורים אלה נובע מהתנקזות אקוויפרים דרך ״תעלות״ מוגבלות על ידי אלמנטים סטרוקטורליים בתת־הקרקע, בדומה להשערות המועלות על ידי Mazor (1997) ולמודל של לרון־בן יצחק (2003) ושל Larrone-Ben-Itzhak and Gvirtzman (2005) בנוגע לאקוויפר מדבר יהודה כיום.

בטבלה 3 מוצגים משתנים מורפומטריים של מערות בקטע הנחקר במצוק. משתנים אלה הוגדרו על ידי Frumkin and Fischhendler (2005) במערות בתוך החתך עמינדב – בע׳נה משני צדי קו פרשת המים של הרי יהודה. השוואה עם המודל שלהם מראה כי: א. כ־80% מהמערות בקטע הנחקר מציגות יחס אורך/רוחב ממוצע < 20, המגדיר מורפולוגיה של ״מערות אולם״ (chamber caves), העשויה להעיד על היווצרות בתנאים פריאטיים; ב. כ־20% מהמערות מציגות יחס זה > 20, המגדיר מורפולוגיה של ״מערות מבוך״ (maze caves), העשויה להעיד על היווצרות בתוך אקוויפר כלוא (כנראה על ידי חבורת הר הצופים) (Frumkin and Fischhendler, 2005). עם זאת, לא מעט מחילות שעל פי הקריטריון הנ״ל

הוגדרו כ"מערות אולם", הן למעשה בעלות צורה מאורכת עם יחסי אורך/רוחב ממוצע בין 10 ל־20 או יחסים גבוליים קרובים ל־20 (טבלה 3), כגון מערות 71, 348, 501 (איור 5) ו־510.

מורפולוגיה פריאטית, כגון של מחילות בעלות חתך רוחב אליפטי או של כיפות המסה, נמצאה גם במערות שעל פי המשתנה לעיל עונות על ההגדרה של "מערת מבוך", כגון 84ב', 160א' (איור 10) ו־504, בדומה לתצפיות של Frumkin and Fischhendler (2005) במערות הרי יהודה. בקטע הנחקר, מערות המבוך ארוכות בממוצע ממערות האולם (58 לעומת 20 מ'), בעלות כיסוי שטח (areal coverage) ממוצע קטן יותר (0.35 לעומת 0.54) וצפיפות מחילות (passage density) זהה (0.24) (טבלה 3). על פי המחברים הנ"ל, מערות (מבוך) שהתפתחו בתוך אקוויפר כלוא, ארוכות יותר בעקבות זרימת מי תהום בלחץ הידרוסטטי גבוה יותר ולאורך תקופות ארוכות יותר בהשוואה לאקוויפרים פריאטיים.

היווצרות השקע הטופוגרפי של בקע ים המלח החל מהמיוקן עליון־פליוקן תחתון (Steinitz and Bartov, 1991; Garfunkel and Horowitz, 1996; Avni, 1998; Frumkin, 2001) והתרוממות מצוק ההעתקים שבאה בעקבותיה, הביאו לירידת בסיס הניקוז האזורי (Bowman, 1997), לירידת מפלס מי התהום ולהתרוקנות האקוויפר שבטה־נצר ממים. עמו התרוקנו גם המערות ממים. ההעתקה הנורמלית של הבקע וחתירת הקניונים הגדולים הנלווית, "חתכו" דרך חלל המערות ויצרו פתחים שדרכם גופי המים של הבקע עתידים לחדור ולהשקיע את משקעיהם (Lisker et al., 2007, 2009, 2010a,b), בדומה למודל של Frumkin (2001). טקטוניקה זו ו/או קדומה יותר אף יצרה לעתים מערות קטנות בלי עדויות לפעילות קרסטית.

כיום המערות יבשות ונמצאות בגובה של עד כ־650 מ' מעל מפלס מי התהום. פעילות קרסטית ניכרת אינה מתרחשת בהן. המורפולוגיה הפריאטית המקורית עוותה לעתים על ידי פירוק מכני מאוחר של הסלע לאורך מישורי חולשה, ו/או על ידי התמוטטויות בעקבות רעידות אדמה.

ייתכן שדרך היווצרות המערות בקונגלומרט דרגה דומה למנגנון המוצע על ידי זהבי (2006), לגבי צנירים במצוקי הכורכר של מישור החוף: בליה בהשפעת גידול גבישי מלח, עם תרומה אפשרית של בליה מכנית על ידי אנרגיית הגלים. חלל מערות קונגלומרט דרגה התפתח בדרך כלל על ידי פירוק החלק הפנימי של שכבות הקונגלומרט שאינו מלוכד היטב (מור, 1987), בעוד החלק החיצוני המלוכד היטב בונה את התקרה. רק במקרים ספורים נראות עדויות לפעילות טקטונית מעורבת בהיווצרות המערות בקונגלומרט. גיל היווצרות המערות בקונגלומרט דרגה צעיר משל המערות בחבורת יהודה במצוק והן אינן יכולות להיות קדומות לפליו־פלייסטוקן. כיום הפעילות האירוזיבית בתוך מערות קונגלומרט דרגה מעטה, ומתבטאת בעיקר בפירוק מכני של הסלע.

מערות צעירות מאלה שתוארו לעיל, בסלעים רכים של תצורת הליסאן, נוצרו בשילוב בין קרסט לאירוזיה מכנית (piping), על ידי חדירת מים לסלע רך בתחום הוואדוסי, דוגמת מערה 422 בנחל דרגה (איור 2).

ג3. סיכום ומסקנות

מערות קרסטיות במצוק ההעתקים נמצאו בעיקר בתוך התצורות שבטה ונצר הטורוניות; מעל מחציתן נמצאו בתוך מסלע גירי, והשאר בתוך מסלע דולומיטי, או בשילוב של

שניהם, כאשר הדולומיט הקשה יותר בונה בדרך כלל את התקרה. מספר קטן של מערות קרסטיות נמצאו בתוך התצורות הקנומניות צפית, אבנון ותמר. ברבות מהמערות נמצאה מורפולוגיה פריאטית. עשרות מערות אירוזיביות קטנות, לעתים בצפיפות גדולה, נמצאו בתוך קונגלומרט דרגה מגיל פליו־פליסטוקן. להלן נקודות מרכזיות בהתפתחות המערות:

א. מחילות קרסטיות נוצרו לאחר היווצרות חתך חבורת יהודה (קנומן עליון־טורון), בתוך אקוויפרים פעילים במדבר יהודה, לפני תחילת היווצרות הבקע; חלל המחילות התפתח בדרך כלל לאורך קווי מגע בין מישורי חולשה, בלי קשר מורפוגנטי לפני השטח הנוכחיים.

ב. המערות נוצרו מתחת למפלס מי תהום קדום, והיו מלאות במים בזמן היווצרותן, מה שהביא ליצירת מורפולוגיה פריאטית ברבות מהן; התפרוסת המרחבית של המערות בשלושה אזורים עיקריים נובעת, כנראה, מהתנקזות אקוויפרים קרסטיים דרך "תעלות" מוגבלות על ידי אלמנטים סטרוקטורליים.

ג. האקוויפרים התרוקנו ממים לאחר ירידת בסיס הניקוז האזורי בעקבות היווצרות הבקע במיוקן עליון־פליוקן תחתון; המערות הקרסטיות נותרו מעל מפלס מי תהום.

ד. הטקטוניקה והאירוזיה הנלוות להיווצרות הבקע חשפו את פתחי המערות; טקטוניקה זו ו/או קדומה יותר אף יצרה לעתים מערות בלי פעילות גורם קרסטי.

ה. כיום המערות גבוהות עד כ־650 מ׳ מעל מפלס מי תהום, והן יבשות לחלוטין; אין מתרחשת בהן פעילות קרסטית בקנה מידה ניכר.

ו. המורפולוגיה הפריאטית המקורית עוותה לעתים על ידי פירוק מכני מאוחר של הסלע.

ז. מערות בתוך קונגלומרט דרגה התפתחו החל מהפליו־פלייסטוקן, על ידי אירוזיה ופירוק מכני של הסלע, ייתכן בסיוע תהליכי בלייה המושפעים מגידול גבישי מלח.

ח. מערות ואדוסיות צעירות, בסלעים רכים, נוצרו בשילוב בין אירוזיה מכנית להמסה.

דברי תודה

ברצוננו להודות למרכז מחקר ופיתוח (מו"פ) אזורי ים המלח, למשרד המדע ולפרופ׳ עמוס נור מאוניברסיטת סטנפורד (ארה"ב), על התמיכה במחקר זה. אנו מודים גם לצוות המרכז למידע ולחקר מערות (מלח"ם) של המחלקה לגיאוגרפיה באוניברסיטה העברית בירושלים, אשר השתתף בסקר המערות, ולמר אלי רז ממו"פ ים המלח, אשר תרם עצות מועילות למחקר.

טבלה 1: מערות בתוך חבורת יהודה, לאורך מצוק ההעתקים בין עין גדי לנחל קדרון (09500–11800, רשת ישראל)

Cave	Location	Coordinates (Israel Grid)	Altitude (m relative to mean sea level)	Length of passages (m)	Bedrock (Formation; lithology)	Phreatic morphology
10	North bank of Na'chal Tur canyon	18770/11182	-190	4.5	Uppermost Avnon; chalk	Passage with elliptical cross-section
10ב	North bank of Na'chal Tur canyon	18770/11182	-190	2	Base of Tamar; dolomite	Passage with elliptical cross-section
10ג	North bank of Na'chal Tur canyon	18770/11182	-190	1.5	Top of Avnon; chalk	Elliptical cross-section
26	1 km south of Na'chal Ka'ne canyon	18870/11447	-260	18	Tamar; dolomite.	–
42	1.5 km north of Na'chal Ka'ne canyon	18932/11693	-213	15	Upper Tamar; dolomite	Solution domes; chimneys
46	1.5 km north of Na'chal Ka'ne canyon	18930/11680	-260	10	Tamar; dolomite	–
47-48	1.5 km north of Na'chal Ka'ne canyon	18950/11690	-300	25	Tamar; dolomite	Tectonic origin; non-phreatic
51	2 km north of Na'chal Ka'ne canyon	18955/11735	-190	36	Base of Shivta; dolomite	Passages with rounded cross-section; main chamber with elliptical cross-section; chimney
51א	2 km north of Na'chal Ka'ne canyon	18955/11745	-190	20	Base of Shivta; dolomite	Chimney
52	2 km north of Na'chal Ka'ne canyon	18955/11735	-210	10	Top of Tamar; dolomite	Solution domes
62	Rosh Hazazon area	18685/10738	+200	18	Nezer; dolomite	–
71	South bank of Na'chal Darga canyon	18571/10976	+55	51	Nezer; limestone	Smooth walls; main passage with rounded cross-section ; solution domes; "embryonic" side passages with elliptical cross-section

Cave	**Location**	**Coordinates** (Israel Grid)	**Altitude** (m relative to mean sea level)	**Length of passages** (m)	**Bedrock (Formation; lithology)**	**Phreatic morphology**
80א	Top of fault escarpment 2 km south of Rosh Hazazon	18643/10540	+170	5	Nezer; limestone	Solution domes; smooth walls
80ב	Top of fault escarpment 2 km south of Rosh Hazazon	18643/10540	+165	14	Nezer; limestone	Chambers and passages with elliptical cross-section; solution domes
81	Top of fault escarpment 2 km south of Rosh Hazazon	18645/10540	+165	13	Nezer; limestone	Solution domes
82	Top of fault escarpment 2 km south of Rosh Hazazon	18645/10525	+180	8	Nezer; limestone, chalk	Solution dome
84א	North cliff of Wadi M'raze canyon	18652/10495	+50	40	Shivta; limestone	Chambers and passages with elliptical cross-sections; smooth walls; solution domes; flat ceiling
84ב	North cliff of Wadi M'raze canyon	18652/10495	+50	90	Shivta; limestone	Chambers and passages with elliptical cross-sections; solution domes; flat ceiling
84ג	North cliff of Wadi M'raze canyon	18652/10495	+50	30	Shivta; limestone, dolomite	Chambers and passages; elliptical cross-sections; solution domes
85	Head of creek 1.5 km SSW of Rosh Hazazon	18601/10594	+245	14	Upper Nezer; limestone	Collapsed solution-dome; flat ceiling
91	Head of creek 1.5 km SSW of Rosh Hazazon	18616/10589	+235	15	Upper Nezer; limestone	Chambers and passages with elliptical cross-section; smoothed walls; solution domes
92	South bank of creek 1.5 km SSW of Rosh Hatzatzon	18618/10596	+220	17	Upper Nezer; limestone	Solution dome

Cave	Location	Coordinates (Israel Grid)	Altitude (m relative to mean sea level)	Length of passages (m)	Bedrock (Formation; lithology)	Phreatic morphology
93	South bank of creek 1.5 km SSW of Rosh Hatzatzon	18623/10604	+225	13	Upper Nezer; limestone	Solution dome; chimney
95	South bank of creek 1.5 km SSW of Rosh Hatzatzon	18623/10604	+210	13	Nezer; limestone	Elliptical cross-section; solution domes; smooth walls
99ב	West bank of tributary of Wadi M'raze, 0.5 km west of Mizpe Arnon	18591/10483	+245	11.5	Nezer; limestone	Chamber with well preserved solution domes
100א	Head of tributary of Wadi M'raze, 0.5 km west of Mitzpe Arnon	18592/10478	+240	10	Nezer; limestone	Solution domes; flat ceiling
101ב	Head of tributary of Wadi M'raze, 250 m west of Mitzpe Arnon	18605/10465	+250	4	Nezer; limestone	Solution domes
112	20 m below top of fault escarpment, 1 km south of Rosh Hazazon	18635/10628	+135	4.6	Upper Nezer; limestone	Solution domes
116	Head of fault escarpment 750 m south of Rosh Hazazon	18535/10635	+200	9	Nezer; limestone	Solution domes; smooth walls
117	Top of fault escarpment 700 m south of Rosh Hazazon	18634/10641	+140	20	Nezer; chalky limestone, dolomite	–
135	750 m north of Na'chal Salvadora canyon	18652/10392	+150	7	Nezer; limestone, dolomite	Passage with elliptical cross-section and smooth walls
148	South of Na'chal Salvadora canyon	18662/10288	+35	36	Shivta; limestone	Chambers and passages with elliptical cross-section
160א	1.5 km south of Na'chal Ke'dem canyon	18662/10093	+110	62	Shivta; limestone, dolomite	Chambers and passages with elliptical cross-section; embryonic passage

Cave	**Location**	**Coordinates** (Israel Grid)	**Altitude** (m relative to mean sea level)	**Length of passages** (m)	**Bedrock (Formation; lithology)**	**Phreatic morphology**
160ב	1.6 km south of Na'chal Ke'dem canyon	18662/10087	+110	36	Shivta; limestone, dolomite	Phreatic morphology obliterated by extensive collapse
181	Ein-Gedi area	18740/09783	-210	10	Zafit; dolomite	–
301	500 m north of upper Na'chal Arugot canyon	18194/09823	+196	12	Nezer; dolomite	Chambers and passages
302	Upper Na'chal Arugot canyon	18238/09747	+130	7	Shivta; dolomite	Elliptical cross-section
303	North bank of upper Na'chal Arugot canyon	18241/09746	+130	13	Shivta; dolomite	Chambers and passages with elliptical cross-section; solution domes; smooth walls
304א	North bank of upper Na'chal Arugot canyon	18203/09735	+94	12; 8	Shivta; dolomite	Solution domes; smooth walls
304ד	North bank of upper Na'chal Arugot canyon	18203/09735	+100	5	Shivta; dolomite	Solution dome
304א	South bank of upper Na'chal Arugot canyon	18199/09731	+107	10.5	Shivta; dolomite	–
313	North bank of upper Na'chal Arugot canyon	18126/09740	+195	12	Nezer; limestone	Chamber with solution dome
344 א,ב	North bank of Na'chal Arugot canyon	18302/09737	+150	א– 22; ב– 17	Shivta; limestone	–
345	South bank of Na'chal Arugot canyon	18343/09673	0	8	Upper Avnon; chalky limestone, chalk	"Embryonic" passages; elliptical cross-sections
348 א,ב,ג	South bank of Na'chal Arugot canyon	18297/09695	+30	א– 21; ב– 5; ג– 9	Upper Avnon; chalky limestone, dolomite	Flat ceiling, elliptical cross-sections, "embryonic" passages, solution domes
353	South bank of Na'chal Arugot canyon	18465/09530	+105	24.5	Lower Shivta; dolomite	Elliptical cross-sections; solution domes

Cave	Location	Coordinates (Israel Grid)	Altitude (m relative to mean sea level)	Length of passages (m)	Bedrock (Formation; lithology)	Phreatic morphology
361	South bank of Na'chal Arugot canyon	18284/09705	+150	85	Shivta; limestone	Solution dome
422	South bank of Na'chal Darga canyon	18740/10919	-210	80	Lisan; marl	Cave formed by water-induced mechanical weathering of the rock
501	North bank of Wadi Murba'at canyon	18535/11070	+20	70	Shivta; limestone	Chambers and passages; solution domes; flat ceiling
502	North bank of Wadi Murba'at canyon	18535/11070	+20	70	Shivta; limestone	Phreatic morphology mostly obliterated by extensive collapse
503	North bank of Wadi Murba'at canyon	18535/11070	+20	44	Shivta; limestone	-
504	North bank of Wadi Murba'at canyon	18565/11073	+30	54.5	Nezer; limestone	Well-preserved phreatic morphology: chambers and passages with elliptical cross-section; "embryonic" side-passages; solution domes; chimneys; flat ceiling
510	South bank of Na'chal Te'qoa canyon, 150 m west of its confluence with Wadi Ma'shash canyon	18486/11066	+20	40	Nezer; limestone	–
513	South bank of Na'chal Te'qoa canyon, 300 m west of its confluence with Wadi Ma'shash canyon	18466/11079	+30	30; 40	Nezer; limestone, dolomite	–
Cave of the Pool	North bank of upper Na'chal David canyon	18513/09717	0	43	Shivta; dolomite	Solution domes; chimneys

טבלה 2: אורך מחילות עם מורפולוגיה פריאטית בתוך תצורות של חבורת יהודה לאורך מצוק ההעתקים בין קואורדינטות רוחב 09500–11800 (רשת ישראל)

Unit	Num. of caves	Overall length of passages (m)	Caves under 5 m	Caves between 5 and 20 m	Caves between 20 and 40 m	Caves between 40 and 60 m	Caves between 60 and 80 m	Caves over 80 m
Nezer	22	435.6	3	16	1	2	1	-
Shivta	21	781	1	6	7	2	3	2
Tamar	5	55	1	4	-	-	-	-
Avnon	6	49	3	2	1	-	-	-
Zafit	1	10	-	1	-	-	-	-
Judea Gr.	56	1330.6	8	29	9	4	4	2

טבלה 3: גיאומטריה של מערות בתוך חבורת יהודה לאורך מצוק ההעתקים בין עין גדי לנחל קדרון

[בהתבסס על הפרמטרים של Frumkin and Fischhendler (2005):
cave area: plan area of the cave; mean width = cave area/cave length; (length/ mean width<20 – "chamber cave"; length/mean width>20 – "maze cave"); areal coverage = cave area/minimum rectangular area which can contain the cave; passage density = cave length/minimum rectangular area which can contain the cave]

Cave	Length of passages (m)	Cave area (m^2)	Mean width (m)	Length/ mean width (m/m)	Areal coverage (m^2/ m^2)	Passage density (m/ m^2)	Cave geometry according to geometric parameters
10	4.5	4.4	0.98	4.49	0.55	0.56	Chamber
26	18	30	1.67	10.78	0.67	0.4	Chamber
42	15	37.25	2.48	6.05	0.67	0.27	Chamber
46	10	12.25	1.23	8.13	0.53	0.43	Chamber
51	36	155	4.3	8.37	0.48	0.11	Chamber
52	10	21.14	2.1	4.76	0.51	0.24	Chamber
62	18	70.71	3.93	4.58	0.69	0.18	Chamber
71	51	134.04	2.63	19.4	0.46	0.17	Intermediate (chamber – maze)
80a	5	13.92	2.78	1.8	0.57	0.20	Chamber
80b	14	21.33	1.52	9.21	0.25	0.16	Chamber
81	13	13.64	1.05	12.38	0.49	0.47	Chamber

Cave	Length of passages (m)	Cave area (m^2)	Mean width (m)	Length/ mean width (m/m)	Areal coverage (m^2/ m^2)	Passage density (m/ m^2)	Cave geometry according to geometric parameters
82	8	5.5	0.69	11.6	0.41	0.59	Chamber
84a	40	58.88	1.47	27.21	0.29	0.2	Maze
84b	90	265.5	2.95	30.51	0.32	0.11	Maze
84c	30	98.08	3.27	9.17	0.51	0.16	Chamber
85	14	85.07	6.08	2.30	0.80	0.13	Chamber
91	15	34.07	2.27	5.56	0.44	0.19	Chamber
92	17	13.75	0.81	20.99	0.57	0.71	Maze
93	13	25.5	1.96	6.63	0.64	0.33	Chamber
95	13	16.97	1.31	9.92	0.37	0.29	Chamber
99b	11.50	39.55	3.44	3.34	0.52	0.15	Chamber
100a	10	18.75	1.88	5.33	0.55	0.29	Chamber
101b	4	38	9.5	0.4	0.91	0.1	Chamber
112	4.6	9.15	1.99	2.31	0.62	0.31	Chamber
116	9	13.45	1.49	6.04	0.42	0.28	Chamber
117	20	26	1.3	15.38	0.65	0.5	Chamber
135	7	15.3	2.19	3.2	0.64	0.29	Chamber
148	36	112	3.11	11.58	0.31	0.1	Chamber
160a	62	147.5	2.38	26.05	0.26	0.11	Maze
160b	36	142.75	3.97	9.07	0.42	0.11	Chamber
181	10	30	3	3.33	0.61	0.20	Chamber
301	12	51.74	4.31	2.78	0.6	0.14	Chamber
302	7	7	1	7	0.58	0.58	Chamber
303	13	37.63	2.89	4.5	0.55	0.19	Chamber
304a	12; 8	38.81	1.94	10.31	0.61	0.31	Chamber
304d	5	8	1.6	3.13	0.58	0.36	Chamber
304e	10.5	30.38	2.89	3.63	0.71	0.25	Chamber
313	12	168	14	0.86	0.93	0.07	Chamber
344 a,b	a – 22; b – 17.	68.3	1.75	22.29	0.49	0.28	Chamber
345	8	29	3.63	2.20	0.4	0.11	Chamber
348a,b,c	a – 21; b – 5; c – 9.	73.15	2.09	16.75	0.58	0.28	Chamber
353	24.5	92.02	3.83	6.4	0.35	0.09	Chamber
361	85	267	3.14	27	0.37	0.12	Maze
422	80	128.53	1.61	49.69	0.16	0.1	Maze
501	70	364	5.2	13.46	0.71	0.14	Chamber

Cave	Length of passages (m)	Cave area (m^2)	Mean width (m)	Length/ mean width (m/m)	Areal coverage (m^2/ m^2)	Passage density (m/ m^2)	Cave geometry according to geometric parameters
502	70	121.55	1.73	40.46	0.25	0.14	Maze
503	44	111.59	2.54	17.32	0.31	0.12	Chamber
504	54.5	124.25	2.28	23.90	0.29	0.13	Maze
510	40	91.4	2.29	17.47	0.37	0.16	Chamber
513	30; 40	97.95	1.4	50	0.52	0.37	Maze
"Cave of the Pool"	43	205.08	4.76	9.03	0.48	0.1	Chamber

רשימת מקורות

אשל ח', עמית ד', 1998;
מערות המפלט בתקופת מרד בר־כוכבא, אוניברסיטת תל אביב, תל אביב.

אשל ח', פורת ר', 2009;
מערות המפלט בתקופת מרד בר־כוכבא, ב', הוצאת מרכז יסלזון לחקר תולדות ישראל והחברה לחקירת ארץ ישראל ועתיקותיה, ירושלים.

וולדמן נ', 2002;
הגיאולוגיה של תצורת סמרה באגן ים המלח, עבודת גמר לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

זהבי א', 2006;
"תהליכי וקצב עיצוב החוף הסלעי", בתוך: **האגודה הגיאוגרפית הישראלית**, **תקצירים כנס שנתי 47,**ירושלים, עמ' 42.

זק י', 1967;
הגיאולוגיה של הר סדום, עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

ליסקר ס', 2007;
שיחזור פליאו־סביבתי של אזור ים המלח והתפתחות הבקע, על סמך ממצאי מערות, חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

לרון־בן יצחק ל', 2003;
מודל זרימת מי תהום באקוויפר המזרחי של חבורת יהודה, עבודת גמר לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

מור א', 1987;
הגיאולוגיה של מדבר יהודה באזור נחל דרגה, עבודת גמר לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

מור א' ו־בורג א', 2000;
מפה גיאולוגית של ישראל, 1:50,000, גיליון 12־III, מצפה שלם, המכון הגיאולוגי, ירושלים.

פרומקין ע', 1984;
"מיפוי מערות", בתוך: **נקרות צורים**, עלון המרכז לחקר מערות, 10, עמ' 113–124.

פרומקין ע׳, 1986;
"היווצרותן של מערות נחל תקוע", בתוך: **נקרות צורים**, עלון המרכז לחקר מערות, 13, עמ׳ 33–40.
רוט י׳, 1969;
הגיאולוגיה של אזור ואדי אל־קילט, עבודת גמר לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
רז א׳ 1983;
הגיאולוגיה של מדבר יהודה, אזור עין גדי, המכון הגיאולוגי, ירושלים.

Agnon A., 1981;
"Neogene Development of the Western Margin of the Southern Dead Sea Depression", *Geol. Surv. Isr. curr. res.,* pp. 27-29.

Avni Y., 1998;
"Paleogeography and Tectonics of the Central Negev and the Dead Sea Rift Western Margin during the Late Neogene and Quaternary", *Geol. Surv. Isr. rep.* GSI/24/98, Jerusalem.

Bartov Y., Stein M., Enzel Y., Agnon A.& Reches Z., 2002;
"Lake Levels and Sequence Stratigraphy of Lake Lisan, the Late Pleistocene Precursor of the Dead Sea", *Quat. Res.*, vol. 57, pp. 9-21.

Begin Z.B., Ehrlich A. & Nathan Y., 1974;
"The Lisan Lake, the Pleistocene Precursor of the Dead Sea", *Geol. Surv. Isr. Bull.,* p. 63.

Begin Z.B., Nathan Y. & Ehrlich A., 1980;
"Stratigraphy and Facies Distribution in the Lisan Formation – New Evidence from the Area South of the Dead Sea, Israel", *Isr. J. Earth Sci.,* vol. 29, pp. 182-189.

Ben-Avraham Z. & Lazar M., 2006;
"The Structure and Development of the Dead Sea Basin: Recent Studies", in Enzel, Y., Agnon, A. & Stein, M. (eds.), *New Frontiers in Dead Sea Paleoenvironmental Research*, *Geol. Soc. Am.* Special Paper 401, pp. 1-13.

Bookman (Ken-tor) R., Enzel Y., Stein M. & Agnon A., 2004;
"Late Holocene Lake Levels of the Dead Sea", *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 116, 5, pp. 555-571.

Bowman D., 1997;
"Geomorphology of the Dead Sea western margin", in Niemi T.M., Ben-Avraham Z., Gat Y. (eds.), *The Dead Sea – the Lake and its Setting*, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 217-225.

Fischhendler I. & Frumkin A., 2008;
"Distribution, Evolution and Morphology of Caves in South-Western Samaria, Israel", Isr. J. Earth Sci., vol. 57, pp 311-322.

Frumkin A., 1997;
"The Holocene History of the Dead Sea Levels", in Niemi T.M., Ben-Avraham Z. & Gat Y. (eds.), *The Dead Sea – the Lake and its Settings*, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 237-248.

Frumkin A., 2000;
"Karst and Caves of Israel", in Decu V. & Juberthie C. (eds.), *Encyclopedia Biospeologica,* Société de Biospéologie, Bucarest, vol. 3, pp. 1840-1842.
Frumkin A., 2001;
"The Cave of the Letters Sediments – Indication of an Early Phase of the Dead Sea Depression?", *Jour. of Geol.,* vol. 109, pp. 79-90.
Frumkin A., Kadan G., Enzel Y. & Eyal Y., 2001;
"Radiocarbon Chronology of the Holocene Dead Sea: Attempting a Regional Correlation", *Radiocarb.,* vol. 43, 3, pp. 1179-1189.
Frumkin A. & Fischhendler I., 2005;
"Gottingen and Distribution of Isolated Caves as a Guide for Phreatic and Confined Paleohydrological Conditions", *Geomorph.*, vol. 67, pp. 457-471.
Garfunkel Z., 1978;
"The Negev: Regional Synthesis of Sedimentary Basins", 10th Int. Congr. Sediment., p. I, *Precongr., Israel,* pp. 35-110.
Garfunkel Z., 1981;
"Internal Structure of the Dead Sea Leaky Transform (Rift) in Relation to Plate Kinematics", *Tectonophysics*, vol. 80, pp. 81-108.
Garfunkel Z., 1997;
"The History and Formation of the Dead Sea Basin", in Niemi T.M., Ben-Avraham Z. & Gat Y. (eds.), *The Dead Sea – The Lake and its Setting*, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 36-56.
Garfunkel Z. & Horowitz A., 1996;
"The Upper Tertiary and Quaternary Morphology of the Negev, Israel", *Isr. J. Earth Sci.,* vol. 15, pp. 101-117.
Gavrieli I. & Stein M., 2006;
"On the Origin and Fate of the Brines in the Dead Sea Basin", in Enzel Y., Agnon A. & Stein M. (eds.), *New Frontiers in Dead Sea Paleoenvironmental Research*, *Geol. Soc. Am.* Special Paper 401, pp. 183-194.
Kaufman A., Yechieli Y. & Gardosh M., 1992;
"Reevaluation of the Lake-sediment Chronology in the Dead Sea Basin, Israel, Based on New ^{230}Th/U Dates", *Quat. Res.,* vol. 38, pp. 292-304.
Larrone-Ben Itzhak L. & Gvirtzman, H., 2005;
"Groundwater Flow along and across Structural Folding: an Example from the Judean Desert, Israel", *J. Hydr.,* vol. 312, pp. 51-69.
Lauritzen S.E. & Lundberg, J., 2000;
"Solutional and Erosional Morphology", in Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N. & Dreybrodt W. (eds.), *Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers*, Nat. Speol. Soc., Huntsville, Alabama, pp. 408-426.
Lisker S., Porat R., Davidovich U., Eshel H., Lauritzen S.E. & Frumkin A., 2007;
"Late Quaternary Environmental and Human Events at En Gedi, Reflected by the Geology and Archaeology of the Moringa Cave (Dead Sea Area, Israel)", *Quat. Res.,* vol. 68, pp. 203-212.

Lisker S., Vaks A., Bar-Matthews M., Porat R. & Frumkin A., 2009;
"Stromatolites in Caves of the Dead Sea Fault Escarpment: Implications to latest Pleistocene Lake Levels and Tectonic Subsidence", *Quat. Sci. Rev.,* vol. 28/1-2, pp. 80-92.

Lisker S., Porat, R. & Frumkin A., 2010a;
"Late Neogene Rift Valley Fill Sediments Preserved in Caves of the Dead Sea Fault Escarpment (Israel): Palaeogeographic and Morphotectonic Implications", *Sed.,* vol. 57, pp. 429-445.

Lisker, S., Vaks, A., Bar-Matthews, M., Porat, R. & Frumkin A., 2010b;
"Late Pleistocene Palaeoclimatic and Palaeoenvironmental Reconstruction of the Dead Sea Area (Israel), Based on Speleothems and Cave Stromatolites", *Quat. Sci. Rev.,* vol. 29, pp. 1201-1211.

Lowe D.J., 2000;
"Role of Stratigraphic Elements in Speleogenesis: the Speleoinception Concept", in: Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N. & Dreybrodt W. (eds.), *Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers*, Nat. Speol. Soc., Huntsville, Alabama, pp. 65-76.

Manspeizer W., 1978;
"The Dead Sea Marginal Sedimentary Facies", in Schulman N. & Bartov Y. (eds.), *Tectonics and Sedimentation along the Rift Valley*, 10th Int. Cong. Sed., part II: Postcong., Israel, pp. 51-55, 76-79.

Manspeizer W., 1985;
"The Dead Sea Rift: Impact on Climate and Tectonism on Pleistocene and Holocene Sedimentation", in Biddle K.T. & Christie-Black N. (eds.), *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation*, Soc. Econ. Paleont. Miner. Spec. Publ., vol. 37, pp. 143-158.

Mazor E., 1997;
"Groundwaters along the Western Dead Sea Shore", in Niemi T.M., Ben-Avraham Z. & Gat, Y. (eds.), *The Dead Sea – the Lake and its Setting,* Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 265-276.

Niemi T.M. & Ben-Avraham Z., 1997;
"Active Tectonics in the Dead Sea Basin", in: Niemi T.M., Ben-Avraham Z. & Gat Y. (eds.), *The Dead Sea – the Lake and its Setting*, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 73-81.

Picard L., 1931;
Geological researches in the Judean Desert, Ph.D. Thesis, Hebrew University, Jerusalem.

Picard L., 1943;
Structure and Evolution of Palestine, Hebrew University, Jerusalem.

Reches Z. & Hoexter D.F., 1981;
"Holocene Seismic and Tectonic Activity in the Dead Sea Area", *Tectonophysics,* vol. 80, pp. 235-254.

Sagy A., Reches Z. & Agnon A., 2003;
"Hierarchic Three-dimensional Structure and Slip Partitioning in the Western Dead Sea Pull-apart", *Tectonics,* vol. 22/1, pp. 1004.

Schramm A., Stein M. & Goldstein S.L., 2000;
"Calibration of the ^{14}C Time-scale to >40 ka by ^{234}U-^{230}Th Dating of Lake Lisan Sediments (Last Glacial Dead Sea)", *Earth Planet. Sci. Lett.,* vol. 175, pp. 27-40.

Shai, Y., Porat, R. & Eshel, H., 2007;
"Moringa Cave", in Stern E., *En Gedi*, Excavations I, Final Report (1961-1965), *Isr. Explor. Soc.,* Jerusalem, pp. 391-403.

Stein M., Starinsky A., Agnon A., Katz A., Raab M., Spiro B. & Zak I., 2000;
"The Impact of Brine-rock Interaction during Marine Evaporite Formation on the Isotopic Sr Record in the Oceans: Evidence from Mt. Sedom, Israel", *Geochim. et Cosmochim. Acta,* vol. 64/12, pp. 2039-2053.

Stein M., Agnon A., Katz A. & Starinsky A., 2002;
"Strontium Isotopes in Discordant Dolomite Bodies of the Judea Group, Dead Sea Basin", *Isr. J. Earth Sci.,* vol. 51, pp. 219-224.

Steinitz G. & Bartov Y., 1991;
"The Miocene-Pliocene History of the Dead Sea Segment of the Rift in Light of K-Ar Ages of Basalts", *Isr. J. Earth Sci.,* vol. 40, pp. 199-208.

Waldmann N., Starinsky A. & Stein M., 2007;
"Primary Carbonates and Ca-chloride Brines as Monitors of a Paleo-hydrological Regime in the Dead Sea Basin", *Quat. Sci. Rev.,* vol. 26/17-18, pp. 2219-2228.