

מיפוי פוטוגרמטרי ספרתי כאמצעי לשחזור תהליכי סחיפה במערת טבון שבכרמל

צביאלי זב* ורון אברהם**

* החוג לגאוגרפיה ולימודי סביבה, אוניברסיטת חיפה

** המכון לארכיאולוגיה ע"ש זינמן, אוניברסיטת חיפה

בזמן החפירות הארכיאולוגיות שנערכו במערת טבון שבכרמל בשנים 1929-1934, הבחינה החופרת האנגליה דורותי גרוד (Garrod), בכתם קרקע אדמדם בקיר הדרומי של החפירה. קרקע זו הייתה שונה משכבות הסביבה, שצבען חום-אפור. הקרקע נבדלה מסביבתה גם בכך שהכילה כמות גדולה של עצמות, בעוד שמסביב לא השתמרו עצמות כלל. כעבור זמן קצר נפל הגוש האדמדם וחשף מאחוריו חלל מאורך. Garrod סברה שבחלל זה זרמו מי מעיין שנבע בעבר מקיר הסלע של המערה.

כיום נראה כי החלל לא נוצר מזרימת מעיין אלא מניקוז תת-קרקעי שהוליך את מי הגשם שחדרו אל המערה. הקרקע האדמדמה שסתמה את החלל, נסחפה ככל הנראה משכבת החרסית האדומה שבראש המערה. שכבות אלה הורבדו על-ידי מים זורמים לאחר פתיחת הארובה בגג מערת טבון, בתקופת הפליאולית התיכון (מאה ושלושים אלף שנה לערך לפני ימינו). נראה שהניקוז התת-קרקעי במערה התפתח לאחר שהארובה אפשרה כניסת כמויות גדולות של מי גשם למערה. הנחה זו מסבירה את הימצאות כתם הקרקע האדמדמה בגובה של 6 מ' מתחת לשכבת החרסית האדומה בראש המערה.

בסיום חפירות Garrod בשנת 1934, היה שטח הפנים של חלל הניקוז 2.3 מ"ר. מאז ועד 2002 גדל שטח הפנים ל-15.5 מ"ר (פי ששה ויותר). מאמר זה מנתח את שלבי התרחבות חלל הניקוז, ומציג את הגורמים האפשריים לכך.

מבוא

היום מתנהלת החפירה על-ידי אברהם רון (Ronen and Tsatskin 1995; Shifroni and Ronen 2000). במערה הצטבר חתך בעובי 25 מ' בנוי משכבות ארכיאולוגיות, שמעטים כמוהו בעולם כולו (אזור 2). גיל המילוי מוערך בין 800,000 שנה (חגי רון, דברים בע"פ) ל-100,000 שנה (Grün and Stringer 2000). השכבות התחתונות בנויות בעיקר מחול קוורץ אשר חדר למערה על-ידי הרוח, מכון מערב (Jelinek et al. 1973; Ronen and Tsatskin 1995). השליש העליון של המילוי הוא קרקע טרה-רוסה אדומה אשר חדרה למערה דרך הארובה, באמצעות זרימת מי גשם.

מערת טבון נמצאת במדרון המערבי של הכרמל כ-20 ק"מ מדרום לחיפה (איור 1). המערה ממוקמת בצוק הדרומי של נחל מערות בגובה 45-63 מ' מעל פני הים, ופיתחה פונה לצפון-מערב. זוהי מערה קארסטית המורכבת משלושה חדרים. ברצפת כל חדר קיים בולען, ובחדר האחורי קיימת ארובה בקוטר 8 מ' בקירוב. למערת טבון היסטוריה ארוכה של מחקר ארכיאולוגי-פרייסטורית, בו התגלו שלבי ההתיישבות של האדם הקדמון בכרמל מתקופת הפלייסטוקן התיכון עד העליון (מליון עד מאה אלף שנה לערך, לפני ימינו).

פתיחת הארובה לפני כ-130,000 שנה (Grün and Stringer 2000), מהווה אירוע המפריד בין שני סוגי שכבות במערה, החול והקרקע האדומה. אירוע זה מציין שינוי כמו כן בתהליכי ההסעה הדומיננטיים של הסדימנט אל תוך המערה, מהסעה על-ידי רוח מכיוון מערב להסעת סחף חרסיתי (Jelinek et al. 1973).

המחקר הארכיאולוגי במערה החל בשנים 1929-1934, בתקופת המנדט הבריטי בארץ ישראל, בראשותה של החופרת האנגליה דורותי גרוד (Garrod and Bate 1937; Ronen 1982). בשנים 1967-1972 נוהלה במערה חפירה על-ידי ארתור ג'לינק (Jelinek et al. 1973; Jelinek 1977, 1982). משנת 1975 ועד

נמצא כמטר וחצי דרומית לשולי הבולען. בחתך זה הבחינה החוקרת במהלך העבודה בכתם קרקע אדמדם שגובהו כמטר וחצי, בין 8.25 מ' ל-9.75 מ' מתחת לקו תחילת המדידות. הקרקע האדמדמה בלטה בתוך השכבות שסביבה, שצבען חום-אפור. הקרקע האדמדמה גם הכילה כמות גדולה של עצמות, בעוד שבשכבות מסביב לא השתמרו עצמות כלל. לאחר זמן מה ניתקה הקרקע האדמדמה ממקומה ונחשף חלל ריק (Garrod 1937, Plate XXXI, 3) (איורים 2, 3).

Garrod הסיקה כי חלל זה נוצר מזרימת מי מעיין שנבע בעבר מקיר הסלע של המערה. משקע טרורטיני שנמצא בין גובה 6.90 ל-9.00 מ' חיזק לדעתה את סברת המעין. החלל נחשף על-ידי Garrod בשכבה Ed. וגובה משטח הסלע מתחת לחלל הניקוז הוא 12.25 מ' ובגובה זה מתחיל הבולען, כמטר וחצי צפונה לחלל "המעיין".

בשנת 1967 התחדשה החפירה בטבון על-ידי Jelinek. החתך העבה כמעט שלא ניזוק כתוצאה מהחשיפה לגורמי הטבע בשנים 1934-1967. רק השכבות העליונות, B/C (החרסיתיות (איור 2), נסחפו בחלקן על-ידי הגשם אל תוך הבור שיצרה חפירת Garrod בתחתית החדר המרכזי. במאמץ להגן על שכבות המערה מפני סחיפה, כוסה פתח הארובה בשנת 1967 בגג ששטחו כ-65 מ"ר. מאז בניית הגג חדלה למעשה חדירת גשם למערה. הן חפירת גילינק (Jelinek et al. 1973) והן חפירת רוני (Ronen and Tsatskin 1995), נעשו במרחק בטוח מחלל "המעיין", כדי למנוע את התמוטטות החתך הסטריגרפי המרשים שהותירה גרוד בסוף חפירותיה.

חלל ה"מעיין" לא זכה לכל דיון מאז גילויו לפני כ-70 שנה ועד היום. בחורף 1997-1998 צנח גוש גדול מחלקו העליון של החלל ונחת על משטח הסלע בתחתית חתך Garrod, 4.5 מ' נמוך יותר (איור 5). הגוש, שמידותיו הן 0.3X0.6X0.8 מ' בקירוב, הכיל ממצאים ארכיאולוגיים רבים אשר נחפרו בשנים 1998-1999. מכאן עלה הצורך לשחזר את המיקום המדויק של הגוש בטרם הנפילה, כדי לשייך את הממצאים לשכבה הארכיאולוגית המקורית (Ronen et al. in press). מבדיקת העובדות עולה כי



איור 1: מערת טבון, מיקום ומראה כללי

חלל ה"מעיין"

בחפירות 1929-1934 הסירה Garrod חלק מן השכבות בחדר החיצוני (הצפוני), וכמעט את כל המילוי בחדר המרכזי. בחדר הדרומי, חדר הארובה, חפרה Garrod מעט מאד, רק את השכבות האדומות שמילאו את הארובה (קרקע טרה-רוסה שנסחפה מלמעלה). כתוצאה מהיקף החפירה לעיל נותר בגבול שבין החדר המרכזי והדרומי חתך סטריגרפי עבה, החוצה את כל שכבות המערה עד לסלע האם ומשתרע לכל רוחב המערה ממערב למזרח, מרחק של 18 מ' בקירוב. זהו החתך החשוב ביותר שנוטר בטבון מחפירת Garrod (איור 2, 6).

ברצפת החדר המרכזי נחשף על-ידי Garrod בולען שלתוכו צנחו השכבות מכל הכוונים. החתך לעיל

בנוסף מנתח המאמר את הגורמים המורפולוגיים האפשריים להתרחבות החלל.

מיפוי השינויים המורפולוגיים בחלל הניקוז

מיפוי השינויים המורפולוגיים באזור חלל הניקוז, המשתרע כיום בין שכבות Ec (העליונה), F-1 Ed (התחתונה), כלל שני תהליכי מדידה שונים. תחילה נמדדו פיזית באזור חלל הניקוז מספר מידות מרחק מאלמנטים מורפולוגיים בולטים וברורים לעין. לאחר מכן הושוּו בשיטה פוטוגרמטרית ספרתית (Zviely and Klein 2003) מיקום קווי המתאר של פתח חלל הניקוז בשלוש נקודות זמן. על מנת לבצע את ההשוואה נסרקו תחילה התצלומים הגולמיים של השנים 1934 (איור 2) ו-1981 (איור 4), והותמרו לתמונות ספרתיות (התצלום משנת 2002 היה ספרתי במקורו). התצלומים נסרקו ברזולוציה המאפשרת לזהות ברור פרטים קטנים שקוטנם כ-5 ס"מ. בשלב הבא, על מנת להשוות כמותית בין מיקום קווי המתאר של פתח חלל הניקוז, הותמרו התמונות הספרתיות למישור יחוס גאוגרפי אחיד (geo-reference), המתבסס על המדידות הפיזיות שבוצעו במערה.

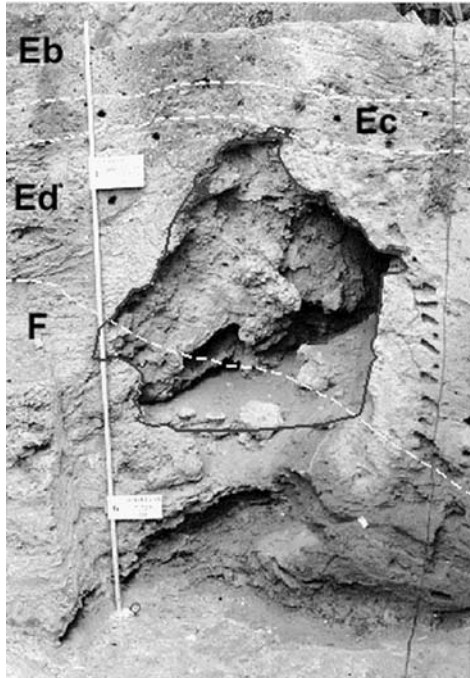
תהליך ההתמרה הושג על-ידי תיקון גיאומטרי (geometric registration) ספרתי שבוצע בנפרד בכל אחת מהתמונות יחסית לתמונה משנת 1981, שנבחרה כתמונת הבסיס אליה הותאמו שאר התמונות. התמונות הספרתיות הועלו על גבי תוכנת המיפוי הפוטוגרמטרי "Microstation Descartes" (Microstation Descartes Users Guide 2000) ועוגנו על-ידי נקודות בקרה (ground control points) שנבחרו כמתאימות לכל תמונה (טבלה 1). מרבית נקודות הבקרה היו נקבים קטנים (קני ציפורים) הפזורים בשכבות הארכיאולוגיות סביב פתח החלל, וכן פינות סלע וצורות מורפולוגיות אחרות בולטות לעין. תהליך התיקון הגיאומטרי בוצע בעזרת מודל טרנספורמציה פולינומיאלי מסדר רביעי (fourth order) בשם "Projective", המבצע הטלה של התמונות הספרתיות על התמונה של שנת 1981 בהתאם לנקודות הבקרה. כתוצאה מתהליך התיקון הגיאומטרי, עוגנו התמונות הגולמיות במערכת קואורדינטות ישרה ו"התיישרו" (warping) במישור יחוס גאוגרפי אחיד בהתאם



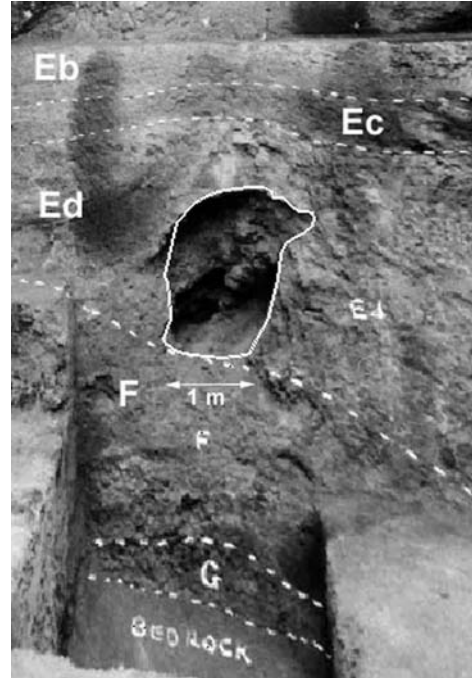
איור 2: החתך העיקרי במערת טבון בסיום חפירת גרוד בשנת 1934. H.L. Hamon from the original. 1934 photograph (Inv. No. 33431), Fonds Suzanne Cassou de Saint Mathurin de la bibliothèque du Musée des Antiquités Nationales de Saint-Germain-en-Laye, France

חלל זה אינו מעייין, אלא אפיק ניקוז תת-קרקעי שניקז את מי הגשמים שחדרו למערה מבעד לארובה (Ronen *et al.* in press). סברת המעיין איננה מסבירה כיצד הגיעו הקרקע האדומה והעצמות לעומק של 6 מ' מתחת לשכבות הטרסה-רוסה הנמצאות בראש החתך. סביר יותר להניח כי מי הגשמים שחדרו למערה דרך הארובה, יצרו לעצמם אפיק ניקוז בדרכם כלפי מטה אל הבולען, וסחפו עימם את הקרקע האדומה ועצמות קטנות. קיר הסלע מגביל את תוואי הניקוז במזרח, ומכאן ברור מדוע התרחב החלל רק לצד מערב וכלפי מעלה ומטה.

מאמר זה מתאר את שיטת המדידה שאפשרה לשחזר במדויק את שלבי התרחבות חלל הניקוז בתחתית המערה מאז סיום חפירות Garrod, וכן את מיקומו המדויק של הגוש שניתק מחלקו העליון של החלל.



איור 4: פתח חלל הניקוז בשנת 1981



איור 3: פתח חלל הניקוז בשנת 1934. (המקור זהה לאיור 2)



איור 6: צילום החתך העיקרי במערת טבון בשנת 2002



איור 5: פתח חלל הניקוז וגוש המפולת שצנח בראשית 1998

טבלה 1 : תוצאות תהליך העיגון הגיאומטרי יחסית לתמונה משנת 1981

שנת התצלום	1934	2002
רזולוציית סריקת התצלומים הגולמיים	300dpi	300dpi
רזולוצייה גיאומטרית (גודל פיקסל) לאחר תיקון גיאומטרי (ס"מ"ר)	0.45	0.45
מספר נקודות הבקרה	17	12
standard Deviation - X (ס"מ)	5	2
standard Deviation - Y (ס"מ)	2	2
standard Deviation - XY (ס"מ)	7	1
Root Mean Square Error - X (ס"מ)	7	3
Root Mean Square Error - Y (ס"מ)	4	3
Root Mean Square Error - XY (ס"מ)	8	4

לממדים הגיאודטיים של התמונה משנת 1981.

בסיום התיקון הגיאומטרי, מופו קווי המתאר של שולי פתח החלל הנראים בתמונות השונות בעזרת תוכנת המיפוי הוקטורית "Microstation Java" (Microstation Java Users Guide 2000) ואוחדו בקובץ גרפי אחד לשם השוואתם. על-ידי יישום "Measure area" שבתוכנת "Microstation Java", נמדד בשיטה פלנימטרית הגידול בשטח הפנים של חזית חלל הניקוז, בין כל שני תצלומים נבחרים וכן שטח הגוש שנפל בשנת 1998. בנוסף לכך חושבה שגיאת המדידה הספרתית של העבודה, על מנת להעריך את הדיוק האופקי של המיפוי. דיוק זה מושפע מכל אחד משלבי המיפוי, ה"תורם" אי-דיוק אופקי מסוים למיקום קו המתאר של שולי פתח החלל. באופן תיאורטי שגיאת המדידה המצטברת המקסימלית היא סכום כל אי הדיוקים עבור נקודה בודדת על קו המתאר וניתן לחשבה על-ידי:

$$E_{max} = \sqrt{(2R+2D)G} = \sqrt{(2 \times 8 + 2 \times 0.45) \times 13.5} = 4.6 \text{ cm}$$

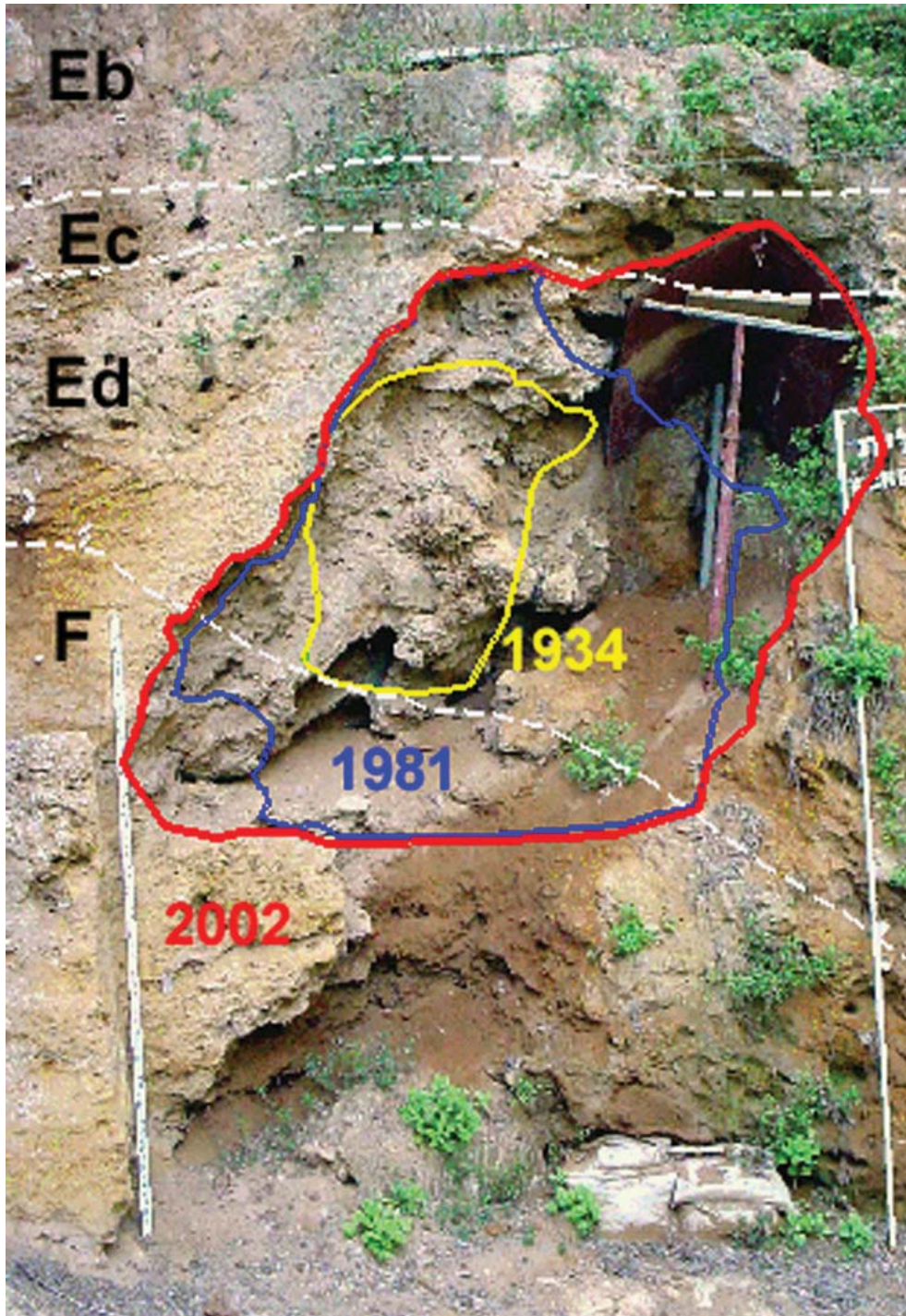
כאשר:

R שגיאה הנובעת מאיכות התיקון הגיאומטרי: לצורך הערכת יתר נכפיל את השגיאה המקסימלית שהתקבלה בתהליך התיקון הגיאומטרי (טבלה 1, $RMS-XY \ 1934 = 8 \text{ cm}$).
D שגיאת הסימון הוקטורי של מיקום קו המתאר של פתח חלל הניקוז. שגיאה זאת מושפעת מאוד מהרזולוציה הגיאומטרית של התמונה שהתקבלה בסיום התיקון הגיאומטרי, ולכן לצורך הערכת יתר נכפיל את הרזולוציה שהתקבלה (טבלה 1, גודל פיקסל = 0.45 cm).
G מספר נקודות הבקרה הממוצע שנבחרו לצורך עיגון התמונות (הממוצע שהתקבל הוא 13.5).

ממצאי המיפוי

ממצאי המיפוי מראים כי בסיום חפירת Garrod בשנת 1934 היו מידות חלל ה"מעייני" כ- $1.3 \times 1.9 \text{ מ'}$, ושיטחו 2.3 מ"ר. במהלך 47 שנה, משנת 1934 ועד שנת 1981, גדל שטח הפנים של חזית החלל ל-7.7 מ"ר. בשנת 1934 היה החלל כולו בשכבה Ed (איורים 2 ו-3). עד 1981 התפתח החלל בעיקר מערבה (ימינה) (איור 4), בתוך שכבה Ed (כ-70% מכלל שטח ההתרחבות), וכלפי מטה אל תוך שכבה F (כ-30% מכלל שטח ההתרחבות). לאחר שנת 1981 המשיך החלל להיפתח לכיוון הפינה המזרחית התחתונה, בשכבה F (כ-17% מכלל שטח ההתרחבות), ומעט מערבה בתוך שכבת Ed. הגידול המשיך ובשנת 2002 הגיע שטח הפנים של חלל הניקוז ל-15.5 מ"ר (איור 7), פי 6 בקירוב משטחו בשנת 1934. עיקר הגידול בשנים האחרונות התרחש בבת אחת בהתמוטטות חורף 1997-1998 (איור 5). במפולת זו התרחב מאוד חלל הניקוז בפינה המערבית העליונה, לתוך שכבה Ed (כ-70% מכלל שטח ההתרחבות), והתפתחה לראשונה חדירה כלפי מעלה לשכבה Ec (כ-13% מכלל שטח ההתרחבות).

כיום נמצא ראש חלל הניקוז בגובה 7.2 מ' מתחת לקו המדידה (כ-1 מ' גבוה יותר מאשר בימי Garrod) (איור 7), ותחתיתו בגובה 10.4 מ' (כ-0.65 מ' נמוך יותר מאשר בימי Garrod). הממצאים הארכיאולוגיים בגוש המפולת שייכים ברובם המכריע לראש שכבה Ed, וחלק קטן מהם יכול להיות משכבה Ec. ברור



איור 7: מיפוי השוואתי של פתח חלל הניקוז בשנים 1934, 1981 ו-2002

במשך הזמן התרחב חלל הניקוז בעיקר לכיוון מערב, למעלה ולמטה. הסיבות לכך הן ככל הנראה תהליכי סחיפה טבעיים בשכבות הרכות באגפו המערבי, בראשו ובבסיסו של החלל. סמני זרימת מים ניכרים בכתמי קרקע אדמדמה הנראים לעיתים על רצפת האפיק. יש להניח כי מים אלה חודרים למערה מתחת לגג המכסה את הארובה מאז שנת 1967.

מיפוי השינויים המורפולוגיים של חלל הניקוז באמצעות פוטוגרמטריה סיפרתית נמצא יעיל, ואפשר ללמוד ממנו על כיווני ההתרחבות של החלל ולשחזר בדיוק רב את מיקומו של הגוש הגדול שצנח מחלקו העליון של החלל בחורף 1997-1998.

תודות

לגבי גיין קלנדר על עזרתה בהשגת איורים 2 ו-3, ולפרופ' מינה וינשטיין-עברון על הערותיה המועילות.

שהממצאים באים מתחת לשכבה Eb (איור 7).

דיון ומסקנות

החלל בתחתית מערת טבון אינו מעיין אלא אפיק ניקוז תת-קרקעי. מי הגשמים שחדרו למערה דרך הארובה, יצרו לעצמם אפיק זה בדרכם כלפי מטה אל הבולען, וסחפו עימם את הקרקע האדומה ותכולת העצמות הקטנות שבתוכה. עצמת הזרימה לא הייתה חזקה דיה כדי לסחוף עצמות יונקים גדולים יותר. המשקע הטרוורטיני שהובחן על-ידי Garrod שקע על גבי קיר הסלע התוחם את האפיק במזרחו. שקיעת הגיר מעידה גם היא על עצמת זרימה נמוכה. זהו ההסבר הסביר ביותר לדעתנו לתצפיותיה של Garrod. אפיק הניקוז נוצר לאורך קיר הסלע המזרחי של המערה, באזור המגע שבין הסלע לשכבות המילוי החוליות.

מקורות

- Garrod, D.A.E. and Bate, D.M.A. 1937: **The Stone Age of Mount Carmel**, Oxford.
- Grün, R. and Stringer, C. 2000: Tabun revisited: revised ES chronology and new ESR and U-series analyses of dental material from Tabun C1. *J. Human Evolution*, **39**, 601-612.
- Jelinek, A.J. 1977: A preliminary study of flakes from the Tabun Cave, Mount Carmel, *Eretz-Israel*, **13**, 87-96.
- Jelinek, A.J. 1982: The Tabun Cave and Palaeolithic man in the Levant. *Science*, **216**/4553, 1369-1375.
- Jelinek, A.J., Farrand, W.R., Haas, G., Horowitz, A. and Goldberg, P. 1973: New excavation at the Tabun Cave, Mount Carmel, Israel, 1967-1972: A preliminary report. *Paleorient*, **1**, 151-183.
- Microstation Descartes Users Guide, 2000: **Version 7.1.210.5, Bentley systems incorporated**, Exton, Pennsylvania.
- Microstation Java Users Guide, 2000: **Version 7.1.1.57, Bentley systems incorporated**, Exton, Pennsylvania.
- Ronen, A. 1982: Mt. Carmel Caves - The first excavations. In Ronen, A., (ed.). **The transition from Lower to Middle Palaeolithic and the origin of Modern Man**. B.A.R. International Series, Oxford.
- Ronen, A. and Tsatskin, A. 1995. New interpretation of the oldest part of the Tabun Cave sequence, Mount Carmel, Israel. In: Ullrich, H (ed.), *E.R.A.U.L.* **62**, Liege, 265-281.
- Ronen, A., Gisis, I. and Safadi, A. in press: **Tabun-Mapolet, a Yabrudian lithic assemblage from Garrod's Layer Ed**.
- Shifroni, A. and Ronen, A. 2000: The "Tabun snap" from the Yabrudian /Acheulean interface at Tabun. *Praehistoria*, **1**, 109-116.
- Zviely, D. and Klein, M. 2003: Coastal cliff retreat rates at Beit-Yannay, Israel, in the 20th Century, *Earth Surface Processes and Landforms*, **28**.