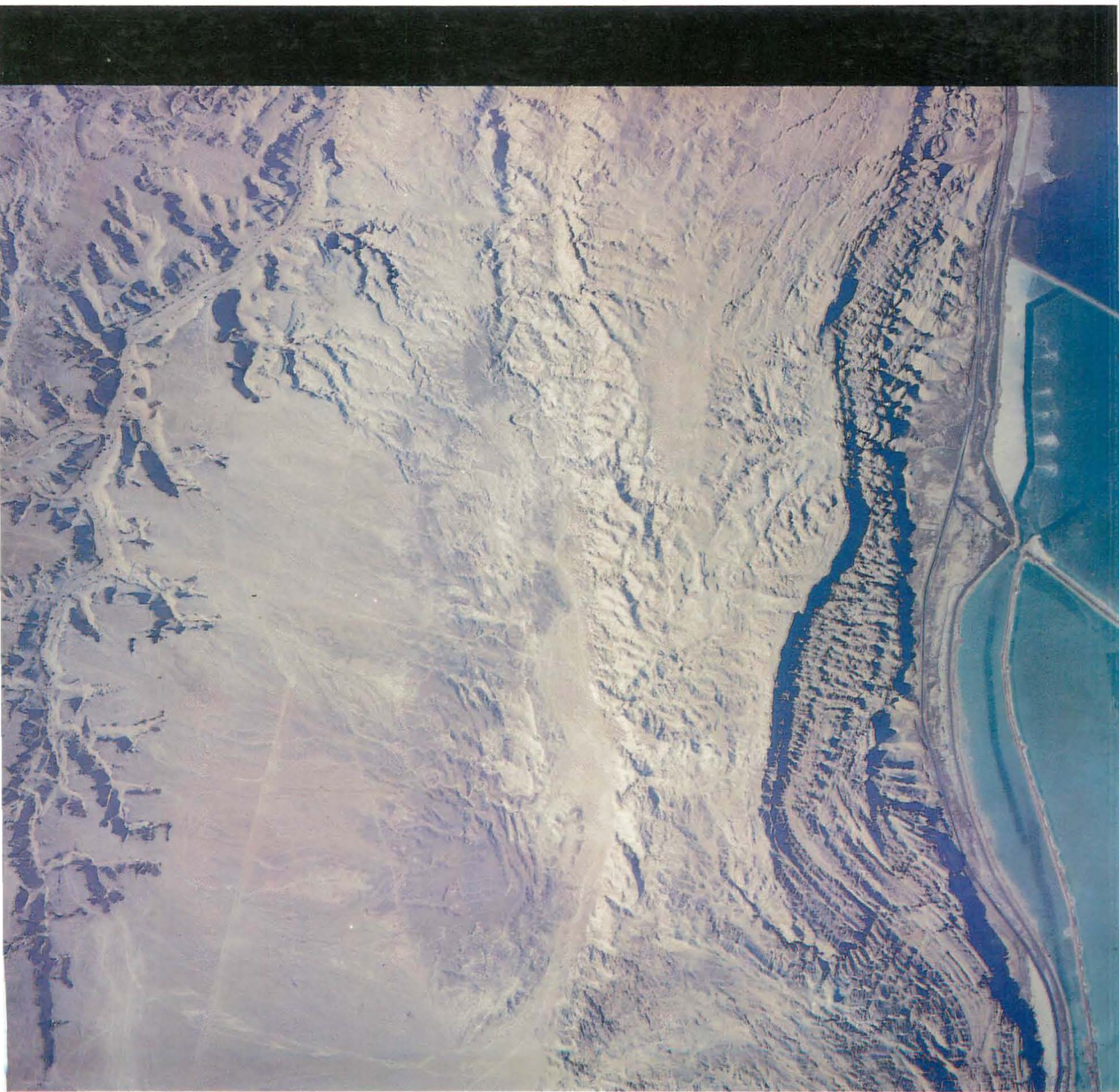




כנס החברה הגיאולוגית בערך 1993
מדריך סיורים





הכנס השנתי
ערד 1993

מדריך סיורים

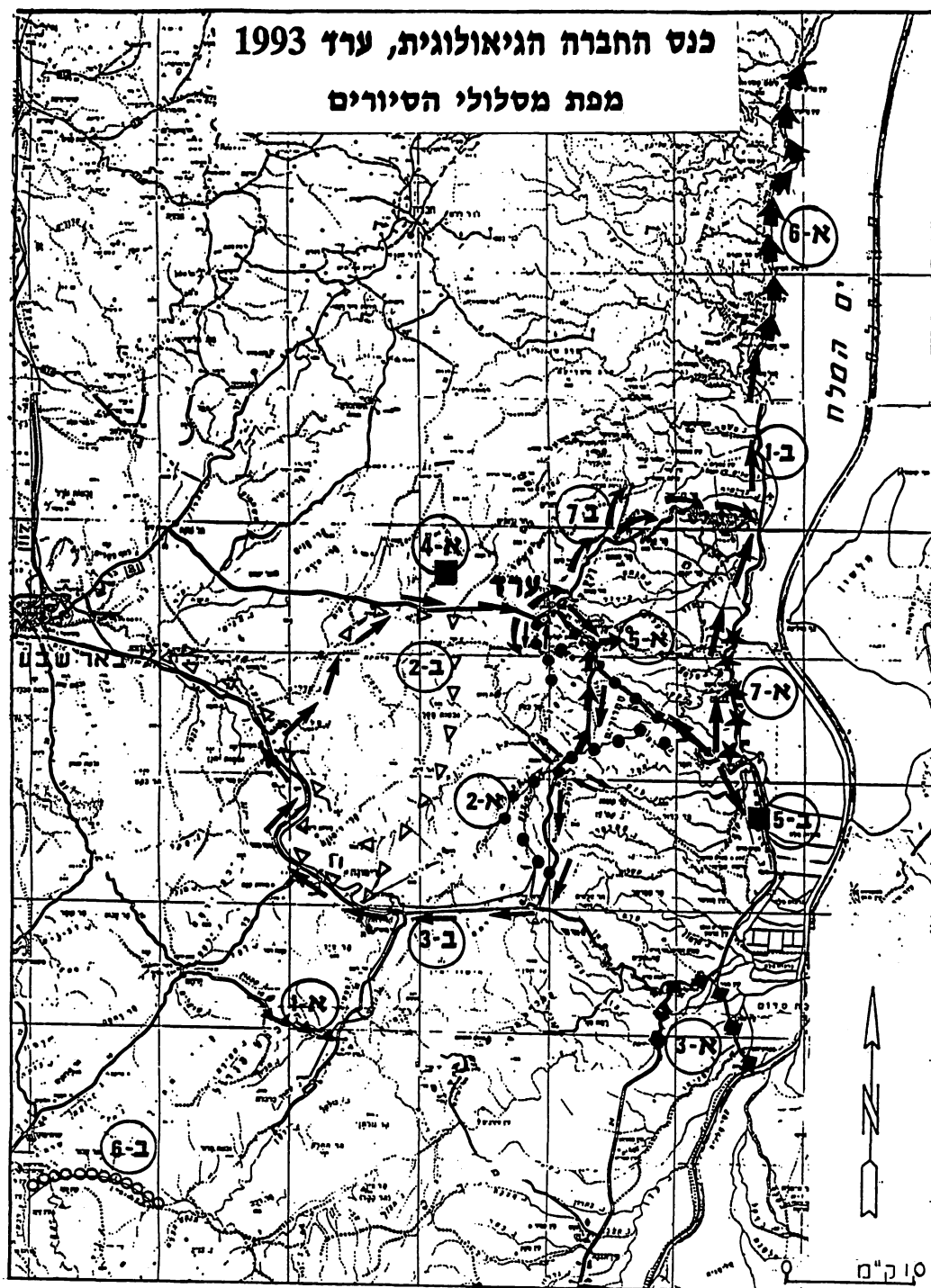
עריכה:
י. מימרן, ח. גבירצמן וא. בורג

15-18 במרס 1993

כ"ב-כ"ה אדר תשנ"ג

כנס החברה הגיאולוגית, ערד 1993

מפת מסלולי הסיורים



מדריך סיורים – תוכן הענינים

סיורי חצי יום – יום ג', 16.3.93

1	א-1	סטרטיגרפיה של הקרטיקון במכתש הגדול ז. לוי, ט. ויסברוד
15	א-2	חלק א. שדות הפוספטים בסינקלינת חתרורים/גורר/אפעה ד. שטרית, י. לוי
26		חלק ב. פצלי השמן באגן רותם-ימין צ. מינסטר, י. נחמיאס
35	א-3	ניאוטקטוניקה בערבה הצפונית ד. באומן
45	א-4	תל ערד ומוזאון ערד ר. עמירן, א. אילן, ר. גיטהרט, ד. אלון, מ. סבן
49	א-5	ה"אזור המגוון" (תצורת חתרורים) בבקעת חתרורים א. בורג
67	א-6	ארועים ותהליכים לחוף ים המלח א. רז
71	א-7	בלועים קרסטיים במניפת שפך זוהר י. ארקין

סיורי יום מלא – יום ד', 17.3.93

81	ב-1	חלק א. מצוק ההעתקים מדרום מערב לים המלח: מסטרטיגרפיה להסטוריה מורפוטקטונית א. עגנון
98		חלק ב. מבנה גוף מלח סדום (תוצאות מחקר פליאומגנטי וסטרוקטורלי) ר. וינברגר, א. עגנון
113	ב-2	החתך היבשתי והימי מגיל נאוגן ופלייסטוקן בבקעת ערד-ערוער – מפתח להבנת הקניון הקדום והמורפולוגיה הנוכחית בבקעת באר שבע ע. זילברמן, ר. רודד, ב. בוכבינדר
133	ב-3	טקטוניקה סנונית וסטרטיגרפיה נאוגנית בזוהר – אפעה פ. הירש, י. שחר
	ב-4	מצוק ההעתקים, נחל רחף, וביקור במפעלי ים המלח ד. מניגר
151	ב-5	לסיור זה אין דברי הסבר בחוברת, ומסלולו אינו מסומן במפה מערת המלח"ם בהר סדום ע. פרומקין (הדרכה: צ. צוק)
155	ב-6	שברי נחל צין ג. שמיר
167	ב-7	מינרליזציה אפיגנטית באזור ערד / וקדוח הגז בהר בן-יאיר א. גילת, ש. אילני, מ. בר-מטיוס, א. אילון / י. גלבוע
181		על נפטא חברה ישראלית לנפט בע"מ

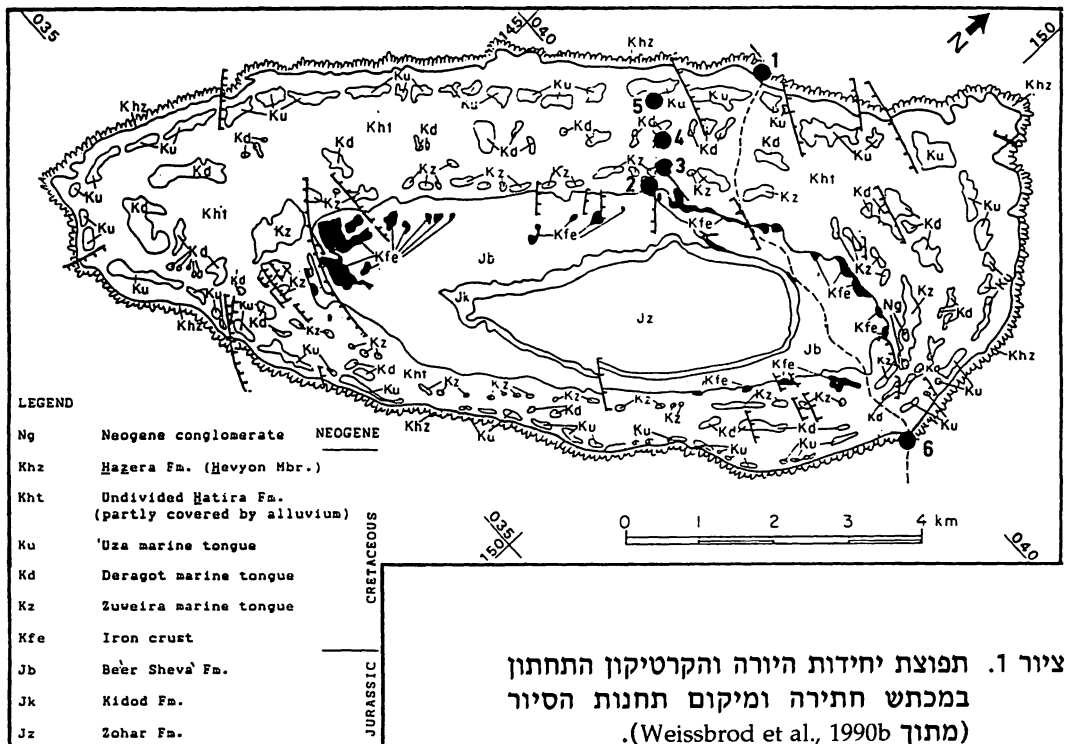
סיור א-1

הסטרטיגרפיה של הקרטיקון במכתש חתירה (המכתש הגדול)

זאב לוי וטוביה ויסברוד, המכון הגיאולוגי

מבוא

החלון הארוזיבי במרכז קמר חתירה (המכתש הגדול) חושף גלעין של משקעים ימיים יורסיים שעליהם מונחים באי-התאמה ארוזיבית משקעים קרטיקוניים. תודות למבנה ולארוזיה הצעירה שחתרה בו חשוף כל החתך הקרטיקוני – יחידות הקרטיקון התחתון בקרקעית המכתש (ציור 1) ויחידות הקרטיקון העליון בצוקי השוליים (ציור 7). החתך המקומי מייצג כ-60 מיליון שנה מתוך 80 מיליון השנים של הקרטיקון, כאשר החלק הקדום ביותר של התור אינו מיוצג ע"י משקעים עד בערך לתקופת הברמיאן העליון. ארוזיה חריפה אחרי פעילות טקטונית בברמיאן או ארוזיה לאורך כל תקופות הקרטיקון התחתון הקודמות, שיטחה את התבליט היבשתי תוך כדי הובלת הדטריטוס הקלסטי אל הים (תצורת חלץ). פני הים היחסיים עלו בהדרגה לאורך הקרטיקון התחתון והציפו בברמיאן את שולי האזור, שהיווה את קצה אדן היבשת היורסי. בהמשך ההצפה שקעו במערב ישראל סלעים קרבוניים, שעצרו את



ציור 1. תפוצת יחידות היורה והקרטיקון התחתון במכתש חתירה ומיקום תחנות הסיור (מתוך Weissbrod et al., 1990b).

הובלת הקלסטים אל הים וצברו אותם בשולי הים ועל היבשה (תצורת חתירה). שינויים במפלס היחסי של הים יחסית לשקיעת התשתית, הצטברות משקעים ושינויי מפלס ים "עולמיים" התבטאו בהצפות עמוקות של הים על גבי היבשה השטוחה, לסירוגין עם נסיגות והמשך הצטברותם של משקעים יבשתיים. בברמיאן העליון ועד האלביאן העליון, בזמן שמפלס הים מעל אזור הנגב היה יחסית נמוך, התבטאו תנודות קלות בפני הים בחילופים קיצוניים בין משטר ימי למשטר יבשתי. מהאלביאן העליון ואילך מכסים שולי ים הטתים את הנגב הצפוני לאורך הקרטיקון כולו (פרט לארוע קצר בטורון התיכון וחשיפות מקומיות בסנון), והתנודות היחסיות במפלס מתבטאות בשינוי אופי הסלעים והמאובנים שבו במחזורים המורים על הרדדה כלפי מעלה. כל מחזור מתחיל עם סלעים סיליסיקלסטים (חרסית או חוואר העוברים דרומה במקומות לחול) ועובר לטיפוסי גיר שונים, לעתים קירטוניים, לרוב בהופעה רכה בנוף, המציניים את ההעמקה המירבית. כלפי מעלה הופך המסלע אחיד למדי, בעיקר גיר ביוקלסטי ודולומיט בעלי הופעה קשה בנוף. בג המחזור יש במקומות רבים עדויות להפסקת סדימנטציה עם חשיפות מקומיות (סדקי התייבשות, קרומים של תחמוצות ברזל, או קדירות של צדפות). במכתש חתירה מתבטאים מחזורים אלה היטב במורפולוגיה של תצורת חצרה, כאשר חתך רך (כמו הפרטים עין ירקעם ואבנון) מציין את ראשית המחזור, ואילו חתך קשה את סיומו (כמו החלק העליון של פרט חביון ופרט תמר).

תחילת מחזור ההשקעה מאופיינת כאמור על ידי הספקה של סיליסיקלסטים מהיבשה לים ועירובם עם חומר דטריטי שהצטבר במקום בזמן ההרדדה והחשיפה הזמנית. אספקה זו מומצת על ידי הרמה קלה של היבשת והטיית אדן היבשת כלפי הים, מה שיוצר בסיכומה של השקעה יחידה סדימנטרית המתעבה כלפי הים. עליה יחסית מהירה של פני הים בעקבות שקיעה יחסית של התשתית, מאפשרת את התפתחותם של מבנים ביוגניים (שוניות ודרגשי אוסטרואידים) מוגבהים כשביניהם אגנים מוגנים ועמוקים יותר, בהם הצטברו משקעים דקי גרגר של סביבות ימיות שקטות ו"עמוקות". עם האטת השקיעה של התשתית התמלאו האגנים והתבליט התת-ימי התיישר תוך הרדדה בכל האזור. לפיכך שררו תנאי השקעה אחידים המתבטאים במסלע אחיד האופייני לסביבות ימיות רדודות עד שההשקעה השיגה את קצב שקיעת התשתית והביאה להפסקת ההשקעה עם מילוי האגן ולחשיפות מקומיות. תוך כדי ההשקעה בים התרחשה בשפלת החוף ארוזיה ויישור האזור כך שלקראת סוף המחזור גרמו תנודות קלות במפלס הים להצפות עמוקות לתוך השפלה. מבחינה גיאוגרפית ההרדדה הכללית לקראת סוף המחזור מציינת הצפה – טרנסגרסיה, ואילו אספקת הקלסטים בראשית המחזור, בו עולה מפלס הים, עשויה להראות במקומות כנסיגה ימית – רגרסיה (בהשוואה לקרבונטים שמתחת באם שוכחים שקיימת אי-התאמה ביניהם; Lewy, 1992). לפיכך החדירות הימיות לתוך סדרת אבני החול של תצורת חתירה יכולות לייצג את החלק העליון של המחזור בו חדר הים עמוק לתוך היבשה, ולא דוקא את מפלס הים היחסי הגבוה באמצע המחזור (ציור 2).

בטורון התרחשו באזור תנועות קימוט שיצרו תבליט תת-ימי ושינויים בעובי ובאופי המסלע וכן ארוע של חשיפה נרחבת בטורון התיכון. לקימוט הטורוני כיוון שונה מהצירים של מערכת הקשת הסורית. בדרום מכתש חתירה מתבטא קימוט זה בצמצום החתך הטורוני ושיכוב צולב בקלקארניט בתצורת שבטה, המורים על השקעה מזרמים, כנראה בים רדוד. תנועות הקימוט של מערכת הקשת הסורית קימרו בהדרגה את האזור מאז הקוניאק המאוחר ועד לאאוקן התיכון. הדבר בא לידי ביטוי בחתך מצומצם של תצורות מנוחה ומישש על המדרון הדרום-מזרחי של הקמר, ההולך ומתעבה באותו כיוון כלפי הסינקלינה של אורון. ייתכן שהים לא

כיסה את שיא הקמר באותה תקופה (קוניאק-סנטון-קמפן). תצורת ע'רב מהמאסטריכט (קרטיקון עליון ביותר) חשופה בשולי הסינקלינה של אורון בעובי של כ-70 מ'. מאזורים סטרוקטורליים דומים לקמר של חתירה ניתן להסיק שגם עוביו של קירטון ע'רב הצטמצם כלפי המבנה, ואילו חלקו התחתון הביטומיני השתנה כלפי המבנה לפוספוריט.

תודות לחשיפה הטובה של הטור הקרטיקוני במכתש חתירה נקבעו שם החתכים הטיפוסיים לתצורת חתירה (Greenberg, 1968) ולפרטים חביון ועין ירקעם של תצורת חצרה (Arkin and Braun, 1965). החשיפה של תצורת חתירה טובה במיוחד במרכז המכתש ובאגף הצפון-מערבי, ואילו תצורות חצרה, דרורים, שבטה, נצר, מנוחה, מישש וע'רב ניתנות לתצפית נוחה באגף הדרום-מזרחי, לאורך תווי קצר של נחל חתירה (כביש היציאה מהמכתש מזרחה).

פרטים גיאולוגיים נוספים מופיעים בדפי סיורים קודמים (ראה Lewy, 1990 – Weissbrod et al., 1990b).

תחנה מס' 1. תצפית על מכתש חתירה (נ.צ. 14802/04200)

המבנה הלא-סימטרי של קמר חתירה, כאשר הנטיית החזקות (20° – 90°) מצויות באגפו הדרום-מזרחי ואילו באגף הצפון-מערבי הנטיות מתונות (5° – 10°), גורם לכך שבקרעית החלק הצפון-מערבי של המכתש משתרעות קווסטות צבעוניות בעלות dipslope מתון בכיוון שולי המכתש ומדרון מורפולוגי תלול לכיוון מרכז המכתש. סלעים קרבונטיים ואבני חול מלוכדות, ולעתים קרומי ברזל, אחראיים לשמירת גב הקווסטות ואילו סלעים קלסטיים פריכים גורמים להוצרות משטחים מתונים מכוסים בסחף בין הקווסטות. האחרונים מייצגים לרוב את החלקים היבשתיים של החתך.

במרכז המכתש בולטות בנוף שתי קווסטות חומות-שחורות. התחתונה (הרחוקה) מייצגת ציפוי לטריטי (תחמוצות ברזל) על גבי המישור הארוזיבי הגודע את החתך היורסי. המשטח הכהה השני מהווה את חלקה העליון של "הקווסטה החומה", המייצגת חדירה ימית לאזור בתקופת האפטיאן התחתון. מימין למשטח הכהה השני מבצבים מתחת לכיסוי אלוביאלי כתמים אדמדמים וכתומים של אבני חול וכן חוואר ודולומיט בצבע אוקר המייצגים בעיקר משקעים חופיים וימיים מהאפטיאן ועד לאלביאן התחתון ("הקווסטה הכתומה"). למרגלות הצוק הצפון-מערבי של המכתש ובתחתיתו חשופות אבני חול מגוונות שמתוכן בולטות יחידות משוכבות בצבע אוקר-צהבהב. יחידות אלה בנויות גיר, חוואר ודולומיט, ומכילות בחלקן מאובנים ימיים מגיל אלביאן תיכון-עליון ("הקווסטה הצהובה"). למעשה ניתן להבחין כאן במספר יחידות משוכבות כשביניהן אבני חול מגוונות, המציינות תנודות במפלס הים היחסי. מאובנים ימיים באבן החול שמעל ליחידות המשוכבות מורים שגם חלק מהחולות שקעו בסביבה ימית או חופית.

האינטרקלציות הימיות שבתצורת חתירה במכתש הגדול מושוות עם החלקים הימיים של תצורת זוזירה, דרגות ועוזה בתת-הקרקע של הנגב הצפוני (Aharoni, 1964).

הצוק הצפון-מערבי של המכתש בנוי שכבות גיר, דולומיט וחוואר של הפרטים חביון עין ירקעם וצפית של תצורת חצרה, המייצגים משטר ימי מאז האלביאן העליון. במעבר בין אבני החול המגוונות של תצורת חתירה והשכבות הקרבונטיות של תצורת חצרה מופיעות אבני חול גלאוקוניטיות אפורות ירקרקות ושכבת גיר גלאוקוניטי בצבע אוקר בהן ניתן להבחין במקומות מתחת לכיסוי הדרדרת.

תחנה מס' 2. בסיס תצורת חתירה (נ.צ. 14802/03983)

תצורת חתירה מונחת באי התאמה אירוזיבית על גבי תצורת באר-שבע מגיל יורה. בבסיס החתך שכבה של אבן חול גסת גרגר וגריט המלוכדת בתחמוצות ברזל, בעובי של 1-2 מ'. התמיסות הברזליות חדרו גם אל הגיר שמתחת. השכבה קשה ובלוטת במרכז המכתש כמשטח שחור נטוי (ציור 2). סטרוקטורות של תרכיזי הברזל ופרגמנטים של צמחים מאובנים מעידים על סביבת השקעה ביצתית. המיקום הסטריטיגרפי והליכוד הברזלי של המרכיבים הקלסטיים מקשרים שכבה זו עם קונגלומרט ערוד שבבסיס החתך הקרטיקוני במכתש רמון.

מעל לשכבה הברזלית מופיעה סדרה חולית, קונטיננטלית, בעובי של כ-50 מ'. היא מורכבת מאבני חול אפורות, סגולות וצהבהבות, בינוניות עד גסות גרגר, פריכות, בשיכוב צולב (לרוב מבנים פלגריים וקעריים), ולסירוגין שכבות דקות של סילט אפור ואדום, במקומות ברזלי. ניתן להבחין במספר רצפים של התדקקות כלפי מעלה (fining upward sequences). באבני החול שרידים של גזעי עצים מבורזלים, הפזורים באקראי או בריכוזים מקומיים. הסדרה מסתיימת במספר קרומים ברזליים.

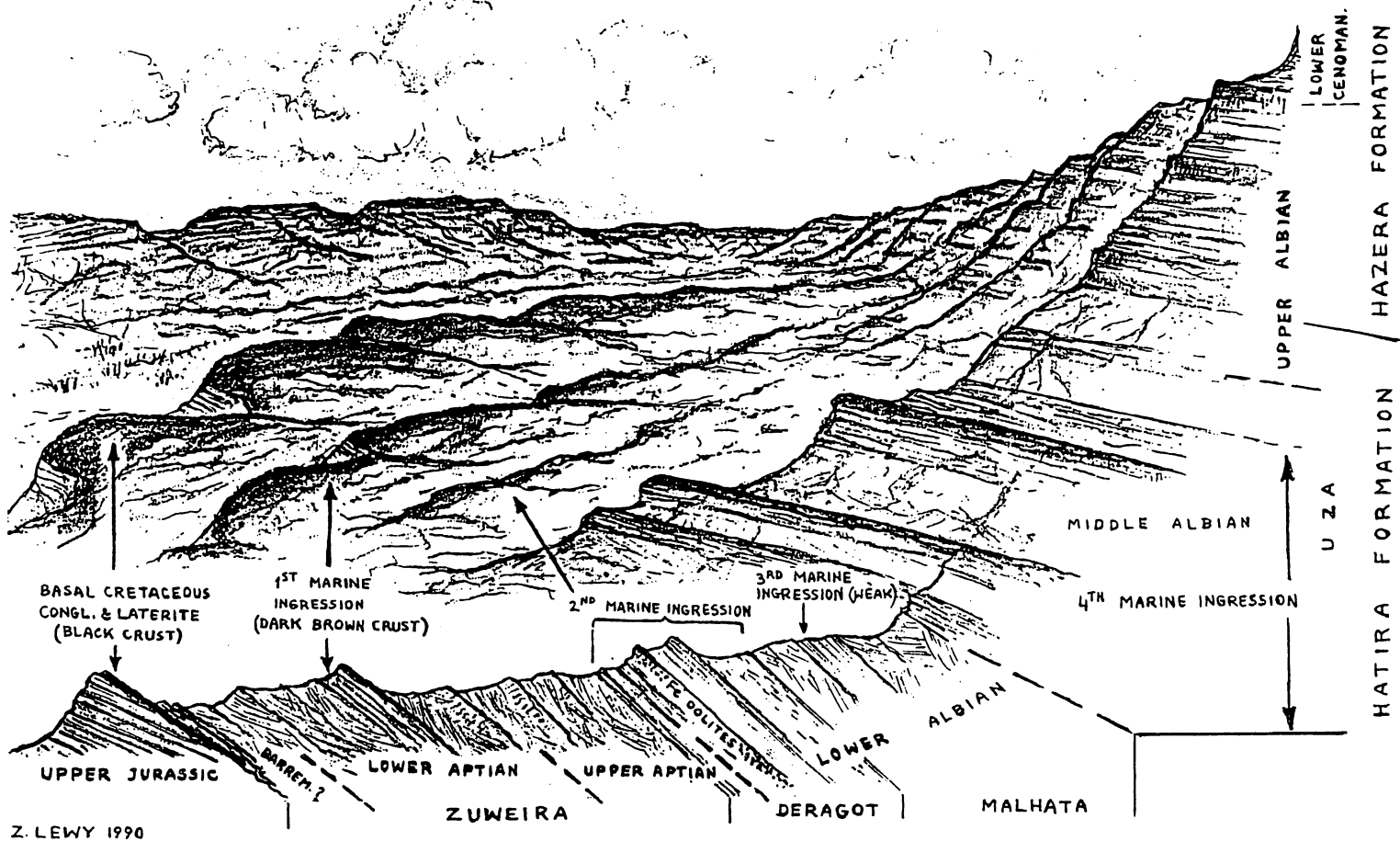
תחנה מס' 3. "הקווסטה החומה" (נ.צ. 14769/04022)

בגבעה חשוף חתך ממוצא ימי בעובי של כ-16 מ', הכולל אבני חול דקות גרגר, אפורות וצהבהבות, סילטים מגוונים עם קרומים ברזליים דקים, ובחלק העליון אופקים של דולומיט חולי בעובי 20-30 ס"מ, שביניהם חוואר חולי (ציור 3). מאובנים נדירים בחלק זה. אחד המיוחדים שביניהם היא הצדפה *Protocardia judaica* (Hamlin) המוכרת מהאפטיאן התחתון בלבנון, מהאפטיאן שבדרום-מערב מצרים (תצורת Abu Ballas) ומשכבה ימית באותו מיקום סטריטיגרפי במכתש רמון (Weissbrod et al., 1990). יחידה ימית זו יחד עם הסדרה החולית שמתחת וסדרה חולית מעל מושוות עם תצורת זוירה (Aharoni, 1964) מתת-הקרקע של הנגב הצפוני. בגג היחידה הימית מופיעים מספר קרומים ברזליים המשווים למשטח העליון ולגבעה כולה צבע חום כהה.

הסדרה החולית שמעל ליחידה הימית דומה בהרכבה ובמוצאה לסדרה החולית התחתונה. עוביה כ-70 מ'. בתוכה מספר שכבות סילטיות ברזליות, לקוסטריות במוצאן, עם ריכוז של שרידי עצים מאובנים, ביניהם נפוץ השרך (*Weichselia reticulata*). עדות אחרת לתפוצת צמחים בחתך הם מבנים גליליים מאונכים וחלולים במרכזם, דמויי צינורות דקים, המייצגים אולי צמנטציה סביב גבעולים. ריבוי של סילטים וקרומים ברזליים בחלק העליון של הסדרה והופעה מקומית של גרגרי גלאוקוניט באבני החול מצביעים כנראה על סביבה ימית קרובה.

תחנה מס' 4. "הקווסטה הכתומה" (נ.צ. 14775/04050)

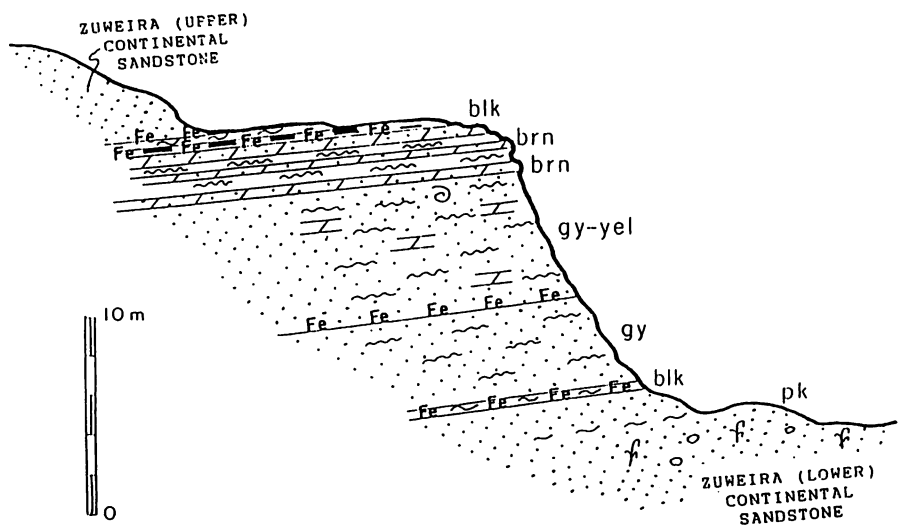
כאן מתחילה סדרה ימית בעובי של 48 מ' המושווית עם תצורת דרגות (Aharoni, 1964) מתת-הקרקע של הנגב הצפוני (ציור 4). מעל לשכבות של סילט אפור ואבני חול אדומות וצהובות מופיעה שכבה של חוואר סילטי עם ליכוד ברזלי שבגגה ריכוז של גלעיני צדפות ומעט חלזונות בשימור טוב ובגיוון מינים רב, המורה על סביבה ימית רדודה נורמלית. חלקים של גזעי עצים באותה שכבה מדגישים את הקרבה לחוף. רבות מהצדפות מוכרות מהאפטיאן של לבנון וביניהן נפוצה *Eomiodon libanotica* (Fraas) (Avnimelech et al., 1954). הופעה של אמוניטים מהסוג *Knemiceras* שגילים אלביאן מוקדם, כ-9 מ' מעל לריכוז הצדפות, מאפשרת לייחס לשכבת הצדפות גיל אפטיאן מאוחר. הגבול בין הדרגות מוצב (בסימן שאלה) לפני שכבה



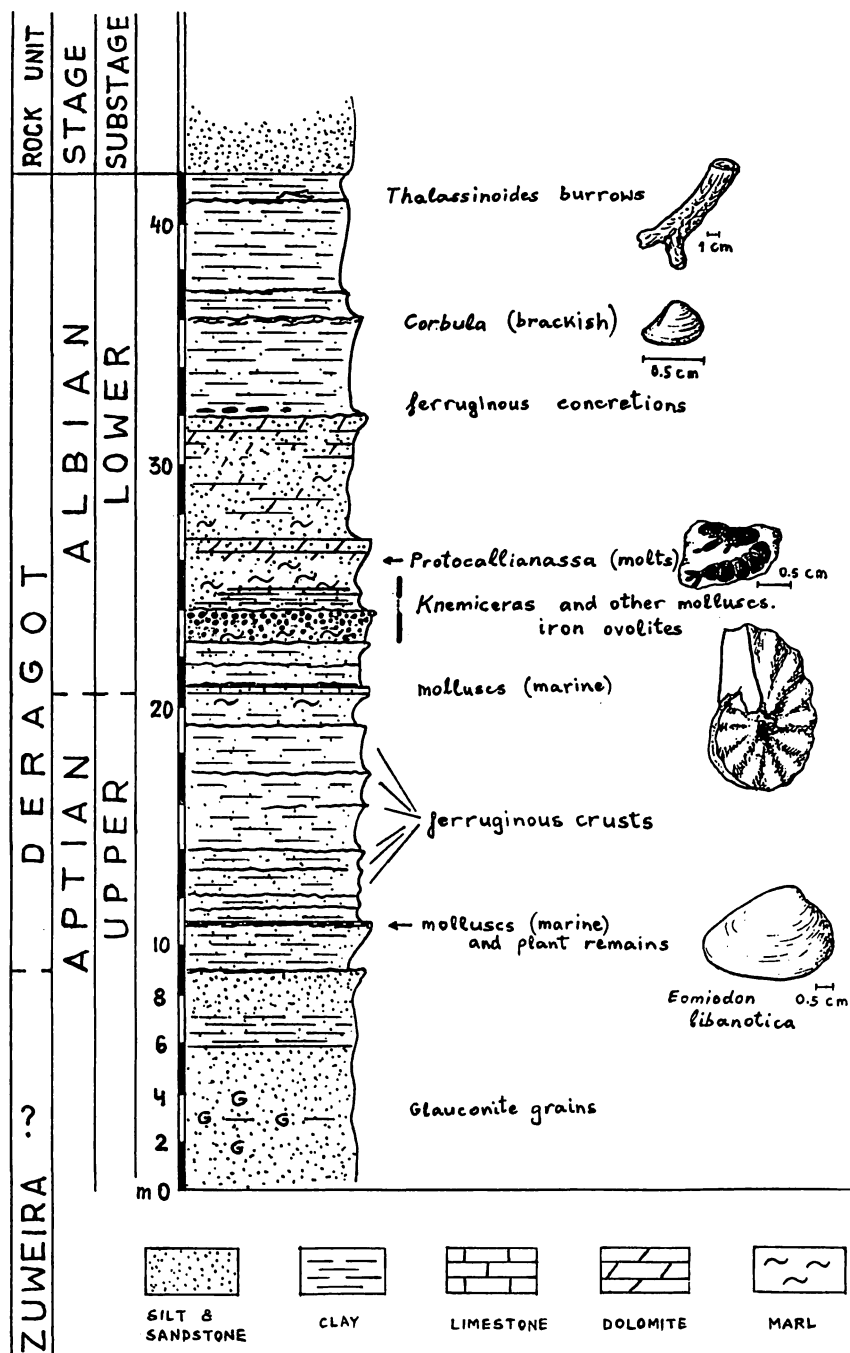
ציור 2. מבט על נוף הקווסטות (דרגשי החדירות הימיות מגיל קרטיקון תחתון) של מכתש חתירה וצוקי השוליים (מתוך Lewy, 1990).

קלקארניטית חומה עם צדפות שחלקן ממשיך להופיע באלביאן (ציור 4). הסדרה הימית בנויה בעיקר משכבות של סילט, חרסית וחואר, שחלקן עשיר במאובנים ימיים, ומספר שכבות של גיר או דולומיט. בולטת במיוחד היא שכבה של גיר חווארי עשיר באואוליטים ברזליים, בעובי של 0.7 מ', עם האמוניטים *Knemiceras syriacum* ו-*K. flexiloculosum* (ציור 4). לשכבה האואוליטית תפוצה נרחבת המעידה על ארוע אקולוגי-סדימנטרי רגיונלי. השכבה מוכרת ממחשופים במכתש הקטן, בצוק רמים שבגליל העליון (תצורת הידרה = Couches à Orbitolines) וכן צפונה יותר בלבנון ודרומה בסיני. מעליה מונח חואר צהבהב עשיר ברכיכות ימיות אשר כלפי מעלה מתעשר בסילט ובליכוד דולומיט. בשכבה זו מופיעים תרכיזים פוספטניים אפורים בגודל 1-2 ס"מ בהם נמצא נשל של סרטן מקבוצת *Protocallianassa* (ציור 4) ומעט שיני דגים. ייתכן ששרידים אלה הם הד חלש של ארוע פוספוגני יותר נרחב מגיל אלביאן תחתון. בהמשך החתך שכבה של חרסית חולית חומה בעובי של כ-7 מ' המחופה בדרגש דולומיט חולי ומעליו סילטים חרסיתיים מגוונים בעובי של כ-12 מ' עם עורקי גבס וקרומים קרבונטיים וברזליים שבהם משתמרים דפוסים ועקבות פעילות ביוגנית (חלקם שרידי צומח). בחלק העליון נמצאו נבירות של סרטנים ובקרום קרבונטי בחלק התחתון נמצאו דפוסי צדפות בשליטת הסוג *Corbula*, המציין במקרה זה תנאים בראקיים. כנראה שכל הרצף הסילטי-חרסיתי מציין ביצות בראקיות בשולי הים לפני המעבר לתנאים קונטיננטליים בחתך החולי שבהמשך.

חתך זה מורכב מאבני חול אפורות וצהבהבות עם שרידי צמחים או "צינורות" המרמזים על התאבנות שורשים או גבעולים ניצבים (ביצות?), ובמקומות שכבות חרסית וסילט חרסיתי וקרומים ברזליים. באלה יש אולי רמז לתצורת מלחתה (Aharoni, 1964) מתת-הקרקע של הנגב הצפוני, שכאן אינה נושאת אופי ימי ברור. עובי הסדרה החולית כ-85 מ', והיא מובילה אותנו לקרבת הצוק הצפוני של המכתש לעבר מחשופים מתלוליים של קווסטות צהבהבות שבגן שכבות קרבונטיות המעידות על השקעה ימית.



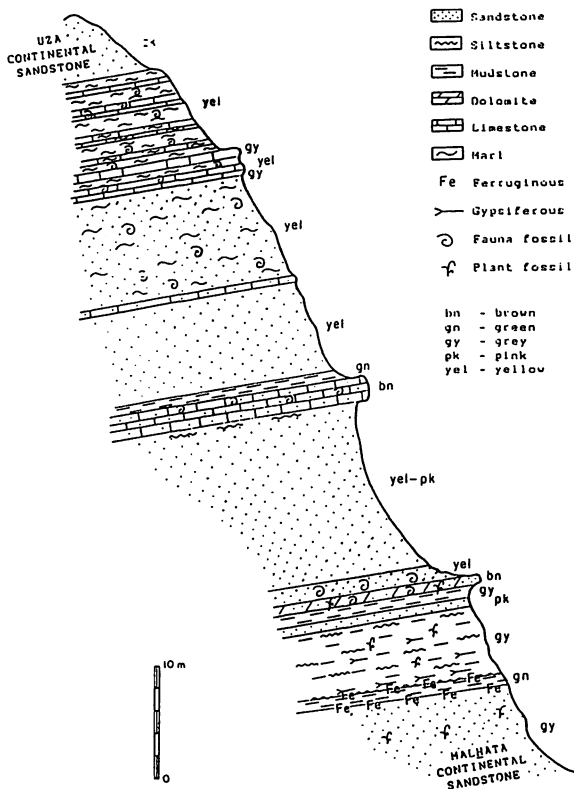
ציור 3. חתך "הקווסטה החומה", המייצג חדירה ימית מגיל אפטיאן תחתון (משווה עם הלשון הימית של תצורת זוירה – Aharoni, 1964).
(מתוך Weissbrod et al., 1990b).



ציור 4. חתך של "הקווסטה הכתומה", המייצג חדירה ימית מגיל אפטיאן עליון – אלביאן תחתון (משווה עם תצורת דרגות – Aharoni, 1964).

תחנה מס' 5. "הקווסטה הצהובה" (נ.צ. 14703/04095)

תתך זה מושווה עם תצורת עוזה (Aharoni, 1964) מתת-הקרקע של הנגב הצפוני. הוא מורכב למעשה מחילופין של יחידות קרבונטיות ימיות ויחידות חוליות ימיות, חופיות או יבשתיות בעובי כולל של 120 מ' (ציור 5). חציו התחתון יותר קרבונטי-ימי ואילו העליון ברובו חולי-יבשתי. החילופין בין השכבות הקרבונטיות המלוכדות והחוואר או החולות שביניהן יוצר נוף מדורג בסמוך לצוק הצפון-מערבי של המכתש. המעבר אל השכבות הימיות המיוחסות לתצורת עוזה הוא הדרגתי ומצוי בתוך חוואר חולי עם גרגרי גלאוקוניט לרגלי קווסטה שבגגה דולומיט חולי חום. בחוואר צהבהב שבאמצע הסדרה הקרבונטית נמצא האמוניט *Knemiceras dubertreti* מהאלביאן התיכון-עליון. לקראת סוף הסדרה הקרבונטית חוזרת ומופיעה שכבה עם אואוליטים ברזליים ומעליה אבן חול עם גרגרי גלאוקוניט בליכוד קרבונטי. כאן מסתיים החלק הימי העיקרי של מקבילת תצורת עוזה, כשבחלק החולי מעל מופיעות במקומות שכבות חרסית או דולומיט חולי עם מעט צדפות ימיות, המציינות תנודות הלוך וחזור בקו החוף עד להצפה הימית הבאה מגיל אלביאן עליון (תצורת חצרה).



יור 5. חתך של "הקווסטה הצהובה", המייצג חדירה ימית מגיל אלביאן תיכון-עליון (משווה עם החלק הימי של תצורת עוזה – Aharoni, 1964)
(מתוך

.(Weissbrod et al., 1990b

תחנה מס' 6. היציאה מהמכתש לכיוון מזרח, לאורך אפיק נחל חתירה (נ.צ. 15251/04010)

המעבר מאבני החול של תצורת חתירה לחולות וגירים גלאוקוניטיים שבבסיס תצורת חצרה חשוף מדרום לכביש. החתך המפורט של תצורת חצרה (ציור 6) תואר על ידי Arkin and Braun (1965). תצורת חצרה חולקה לחמישה פרטים על פי ההרכב ומידת הקושי של המסלע הבונה אותם, ולפיכך הם נבדלים היטב בנוף.

פרט חביון (התחתון) מורכב מחילופין של גיר, חוואר, דולומיט חרסיתי ודולומיט ועוביו 124 מ'. יחידות הגיר והדולומיט בונות דרגשים צוקיים קשים. בולט במיוחד דרגש של גיר רודיסטים, בעובי 10–15 מ', המצוי בגג הפרט (ציור 7). החלק התחתון של פרט חביון משובב היטב ובנוי משכבות גיר וגיר דולומיטי שעוביין סנטימטרים בודדים. במקומות מצויים בהם חלזונות מגדליים, המסודרים לעתים עם צירי אורך מקבילים. שכבות עבות יותר (80–40 ס"מ) של דולומיט חרסיתי חושפות נבירות של סרטנים הממולאות בחומר שצבעו שונה מסלע הסביבה. בחלק התחתון של החתך נמצא האמוניט *Hypenoceras* (ציור 6) שמציין גיל אלביאן מאוחר ואשר נתגלה גם במפלס סטרטיגרפי דומה (שכבת הבנטוניט) בצוק הצפוני של מכתש רמון. בחלקו האמצעי של הפרט, בדרגש דולומיטי, מופיעות לאורך כ-5 מ' נודולות של צור הבולטות בצבען החום. בדרגש העליון ביותר מופיע לראשונה הפורמיניפר *Praealveolina* הנחשב כמציין את תור הקנומן (ציור 7). בגג הדרגש העליון מצויה שכבה של גיר גלאוקוניטי-לימוניטי, בעובי של 20–30 ס"מ העשירה במאובני רכיכות, ביניהן בולטת, *Pycnodonte vesiculosa* (שם רכיכה זו היה בעבר *Gryphaea* והדרגש כונה בהתאם בשם דרגש הגריפאות במקומות שונים בארץ). בשכבה זו נמצאו גם אמוניטים מהקנומן המוקדם ביותר (הסוגים *Graysonites*, *Mhriliceras*, *Mantelliceras* ו-*Utaturiceras*). מעל לשכבת המאובנים מתחיל חתך חווארי, רך בנוף. מסיבה זו שויכה השכבה יחד עם דרגש הרודיסטים הקשה שמתחתה לפרט חביון. מאידך, ריכוז המאובנים בשכבה זו מצביע על שינוי סביבת ההשקעה בינה לבין דרגש הרודיסטים, עם אפשרות להפסקת השקעה ביניהן, כך שלמעשה שכבת המאובנים הגלאוקוניטית מייצגת פעימה טרנסגרסיבית בסיסית בתחילת מחזור סדימנטרי חדש ועדיף אולי לשייכה לבסיס פרט עין ירקעם.

פרט עין ירקעם בנוי ברובו מחוואר וגירים חרסיתיים בעובי של 58 מ', שהופעתם בנוף רכה. בחלקו התחתון סיליסיקלסטים דקים אשר ב-2–3 המטרים הראשונים מכילים צדפות ימיות. בהמשך בנוי החתך מחילופים בין גיר לחוואר בשכבות של 5–10 ס"מ בערך, בהן טבועות גיאודות עם גבישי קוורץ או בעלות מבנה כלייתי של כלקדון. המאקרופאונה אמנם נעלמת, אך נוכחות מיקרופאונה פלנקטונית (Hamaoui, 1965) מציינת סביבה ימית בעומק שמעל כמה עשרות מטרים. לכאורה, הווצרות הגיאודות מיוחסת להחלפה בסיליקה של נודולות אנהידריט ששקעו במים מליחים, רדודים, אולם תופעה דומה שנצפתה בתצורת כפר שאל מהקנומן העליון עשויה להצביע על הווצרות הגיאודות בתהליכים דיאגנטיים גם בתוך סדימנט של הים הפתוח (א. שש, האוניברסיטה העברית). בחלק העליון של הפרט מתעשרים הגירים החרסיתיים והחוואר במאקרופאונה מגוונת של ים רדוד ונורמלי, אך במקומות מופיעות שכבות בהן קיימת שליטה של אוסטראידיים מאותו מין (צדפה קבועת מקום) המורה על מליחות גבוהה או נמוכה מדי, שלא אפשרו תנאי קיום לצורות אחרות. תנודות אקולוגיות אלה מסתיימות בגג הפרט בדרגש גירי עם רודיסטים ופאונה אחרת.

פרט צפית עוביו 57 מ' ומבדילים בו שני חלקים: החלק התחתון בנוי משכבות קשות ועבות של דולומיט וגיר דולומיטי, הבונות נוף צוקי בעוד שבחלק העליון שכבות דקות יותר (כ- 10-15 ס"מ) שבתוכן בולבוסי צור וסטרומטופורואידים מצוררים היוצרות נוף רך ומתון. גג הפרט מצופה בתחמוצות ברזל ובמקומות מתגלים בו סדקי התייבשות העשויים להצביע על סיום מחזור השקעה והפסקה קלה לפני שקיעת מחזור חדש.

פרט אבנון (כ-100 מ') מתחיל עם סיליסיקלסטים (חרסיות וחוארים). בחלקו התחתון נמצאו אמוניטים (*Neolobites fourtaui*) מגיל קנומן עליון ולפיכך המעבר בין הקנומן התחתון לעליון עובר בפרט צפית (ציורים 6 ו-7). בנוסף לאמוניטים נפוצים קפודיים גדולים (*Hemiaster*) הנוברים בטין, צדפות נוברות וצדפות החיות מחוץ לסדימנט (אוסטראידים, *Neithea*). כלפי מעלה פוחת המרכיב החרסיתי והמסלע בעיקרו הוא גיר ודולומיט. גיר דולומיטי המכיל נודולות של צור מופיע מאמצע הפרט ומעלה. בשולי מכתש רמון מופיע בחלק העליון של פרט אבנון האמוניט *Neolobites vibrayeanus* (שמצוי כאן גם בבסיס תצורת דרורים).

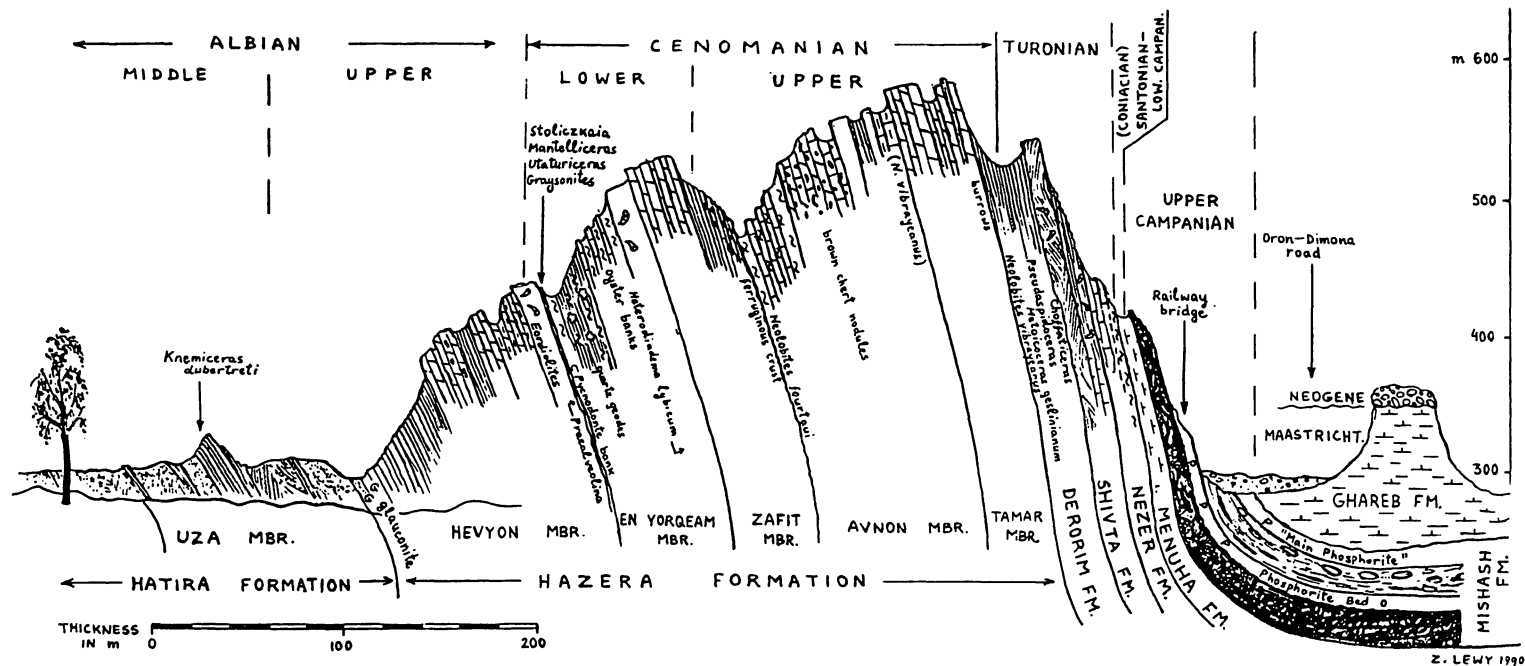
פרט תמר בונה את החלק העליון, הצוקי, של תצורת חצרה ומורכב משכבות עבות של דולומיט, בעובי כולל של כ-40 מ'. הוא מהווה המשך ליתופציאלי של פרט אבנון, שבחלקו העליון כבר החלה הופעה של דולומיט, אך נבדל ממנו בהופעתו המסיבית. בפרט תמר לא נמצאו מאובנים גדולים ברורים, אם כי בחלק מהשכבות נצפו שרידים ועקבות של מאובנים. במקומות מצופה גג הפרט בקרום ברזלי או מועשר בתחמוצות ברזל, המשווים לו גוון ורדרד.

תצורת דרורים בנויה משכבות דקות של דולומיט וגיר פריכים והופעתה בנוף רכה. עובי התצורה משתנה ממקום למקום בהתאם להתפתחות מבנים בטורן שלא בכיוון מבני הקשת הסורית מהקוניאק המאוחר-אוקן תיכון. בשוליים הדרום-מזרחיים של קמר חתירה עוביה אינו עולה על 10-15 מ'. בשכבות הבסיס נמצאים אמוניטים *Métococeras geslinianum*, *Neolobites vibrayeanus* 1-*Exogyra (Costagyra) olisiponensis* מגיל קנומן עליון, ורק כעבור 3-4 מ' מתחילים להופיע אמוניטים מגיל טורן מוקדם בגיר משוכב לסירוגין עם חוואר. כלפי מעלה פוחת המרכיב החווארי ושכבות הגיר בונות רצף קשה למדי, שלעתים לא קל להפרידו מתצורת שבטה שמעל.

תצורת שבטה בנויה מגיר ביוקלסטי לבן עם שרידי רודיסטים, מצוררים בחלקם. עובי התצורה במקום זה כ-12-16 מ'. הבליה מבליטה שיכוב צולב בכמה מהשכבות כתוצאה מהשקעה תחת זרמים. בגג התצורה מצויה שכבה עם רודיסטים שלמים.

תצורת נצר מורכבת מגיר משוכב היטב ומעט דולומיט המסיימים את הליתופציאס הגירי-דולומיטי הקשה של חבורת יהודה. בשליש העליון של החתך מופיעה שכבה חווארית ירקרקה העשויה להשתוות ליחידה החולית-חרסיתית המוכרת מהחלק התחתון של התצורה בנגב הצפוני (Sandler and Zilberman, 1985).

קירטון מגיל סנטון-קמפן מתחיל את חבורת הר הצופים באי רציפות סדימנטרית ההולכת וגוברת כלפי שיא האנטיקלינה. תצורת מנוחה הקירטונית שכנראה לא כיסתה את כל הקמר, מגיעה בפתחו של המכתש לעובי של 15-20 מ'. מעליה מונח פרט הצור של תצורת מישש שהופעתו ברקציוזית בגין שבירה פנימית וקימוט במהלך הסנון. זוהי הופעה אנטיקלינלית



ציור 7. חתך בקיר הדרומי של מכתש חתירה דרך תצורות הקרטיקון העליון (מתוך Lewy, 1990).

(פאציס חרוז) של פרט הצור המצומצם (כ-15 מ'), כשגגו אי-רגולרי בעקבות שברים וארוזיה קדומים (נחשף בשולי הכביש לאורון). הצור מסיים מחזור סדימנטרי עם אי-התאמה בגגו (חשיפה מקומית). מעליו מופיע פוספוריט (שכבה "0" מתחת לגשר הרכבת) ומזרחית למכתש חשובות וצורות מישש וע'רב ומתעבות לכיוון הסינקלינה של אורון.

מקורות

- Aharoni, E., 1964. Litho-electric correlation of the Kurnub Group (Lower Cretaceous) in the northern Negev. *Isr. J. Earth Sci.*, 34: 63–81.
- Arkin, Y. and Braun, M., 1965. Type sections of Upper Cretaceous formations in the northern Negev (southern Israel). *Isr. Geol. Surv. Strat. Sec. 2a*, 19 p.
- Avnimelech, M., Parnes, A. and Reiss, Z., 1954. Mollusca and foraminifera from the Lower Albian of the Negev (southern Israel). *J. Paleont.*, 28: 835–839.
- Greenberg, M., 1968. Type section of the Lower Cretaceous Hatira Formation in the Hamakhtesh Hagadol, northern Negev. *Isr. Geol. Surv. Strat. Sec. 5*, 6 p.
- Hamaoui, M., 1965. Biostratigraphy of the Cenomanian type Hazera Formation. *Isr. Geol. Surv. Strat. Sec. 2b*, 27 p.
- Lewy, Z., 1992. Periodicity of Cretaceous epeirogenic pulses and the disappearance of the carbonate platform facies in Late Cretaceous times (Israel). *Isr. J. Earth Sci.*, 40: 51–58.
- Sandler, A. and Zilberman, E., 1985. Sandstone and shale in the Nezer Formation, northern Negev. *Isr. Geol. Surv. Report GSI/3/85*, 59 p.
- Weissbrod, T., Gvirtzman, G. and Lewy, Z., 1990a. Early Cretaceous marine incursions in the Negev: New findings. *Isr. Geol. Soc. Ann. Meet.*, Elat 1990, pp. 91–92.
- Weissbrod, T., Gvirtzman, G., Weinberger, G. and Sandler, A., 1990b. Interfingering of marine and non-marine Cretaceous in southern Israel. *Cretaceous Field Conf.*, Jerusalem 1990, Guidebook, pp. 65–97.

סיור א-2

חלק א: שדות הפוספטים בסינקלינת חתרורים/גורר/אפעה

דוד שטרית, יאיר לוי – רותם זשנים בע"מ

כללי

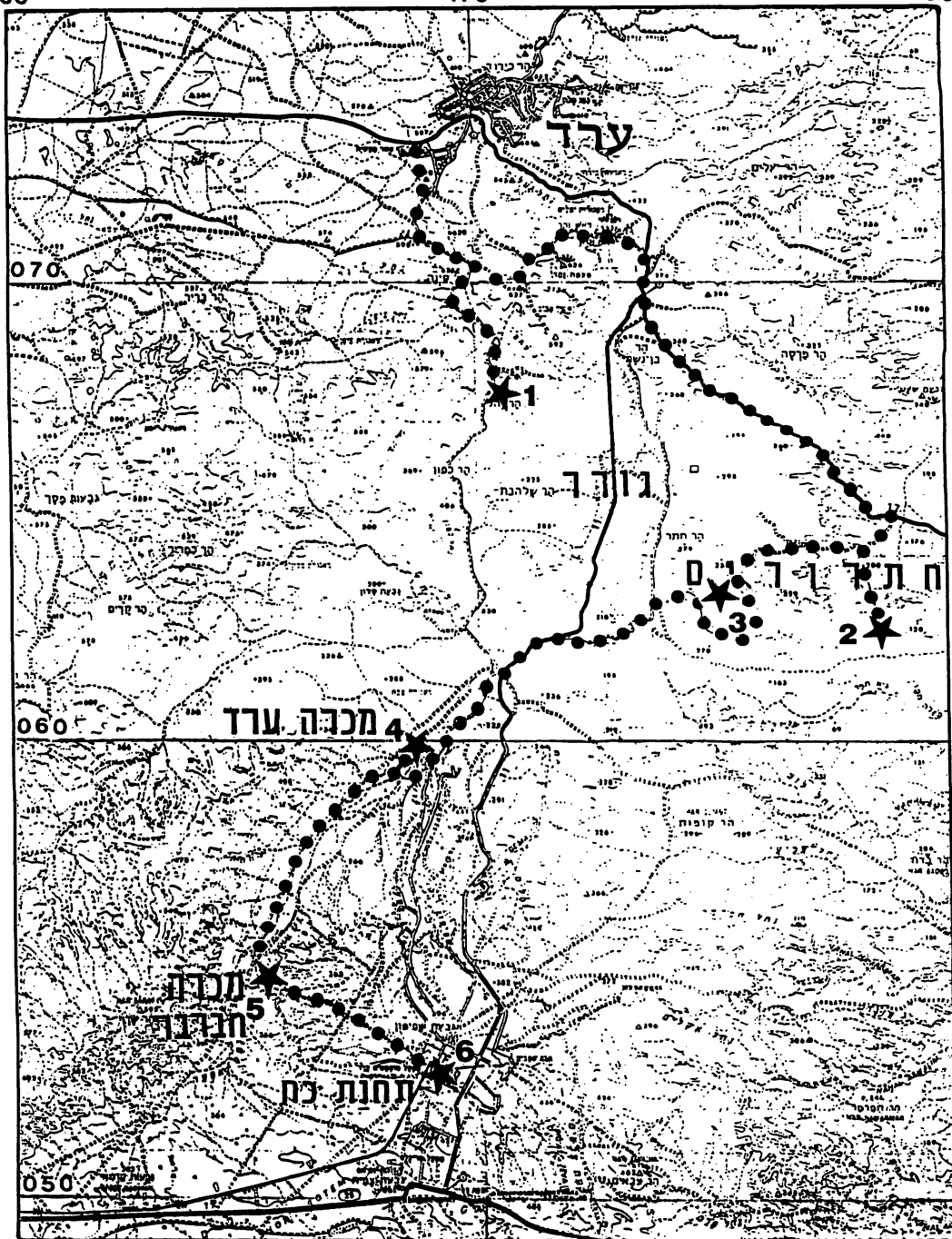
במסגרת סיור זה תערך הכרה עם הגיאולוגיה של מרבצי הפוספט ופצלי השמן מאיזור חתרורים בצפון-מזרח ועד נחל אפעה בדרום-מערב. הסיור יתייחס לגיאולוגיה כללית, מבנה סטרטקטורלי, סטרטיגרפיה של החתך הפוספטי וחתך פצלי השמן וסביבות ההשקעה. במהלך הסיור נערוך תצפיות על איזור חתרורים/גורר, נבחן חתכים של פוספט ופצלי שמן ונדון באספקטים שונים של ניתוח מרבצים מבחינה גיאולוגית וכלכלית. מסלול הסיור מתואר בציור מס' א-1.

נקודה מס' 1 – הר יהל (ציור א-2)

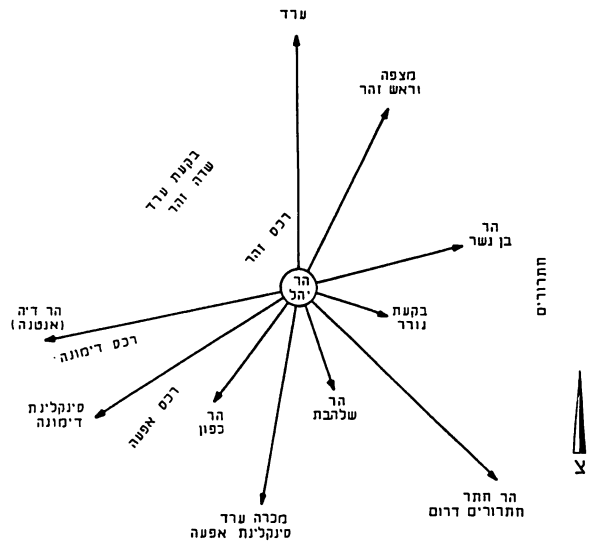
תצפית מנוקדה זו מאפשרת מבט רחב על מספר מבנים גדולים הבונים את האיזור הצפון-מזרחי של הנגב (ציורים א-3, א-4): בכיוון צפון ניתן לראות את רכס כידוד הנמשך דרומה דרך רכס זוהר ובהמשך לרכס דימונה ורכס אפעה אשר ביניהם נמצאת סינקלינת דימונה. כלפי מזרח רואים את איזור חתרורים, שהינו אגן גדול המחולק למבנים משניים הקבורים ברובם תחת מעטה סלעים "מחותרים" (= סלעים קרבונטיים מטמורפיים בפני השטח). בשלשה ממבנים אלו, כפת גורים, כפת חלמיש וכפת יעלים, בוצעו בעבר קידוחי נפט/גז ובראשון אף נמצא נפט קל בכמות מסחרית. במבנה רביעי, הקרוי הר שלהבת, ומצוי מדרום-מזרח למבנים הראשונים, מתוכנן להתבצע קידוח נפט/גז. בכון דרום ומזרח מצוייה בקעת גורר המהווה למעשה איזור מפגש, בחלקו תת-קרקעי, ובחלקו על פני השטח, של שתי סינקלינות: סינקלינת אפעה וסינקלינת דימונה. הסינקלינה של אפעה נמשכת הרחק לדרום-מזרח דרך האגן הגדול של מישור ימין, המשך בסינקלינת אורון, על אגני המשנה שלה ועד בקעת הצין, שם נקברת הסינקלינה תחת מעטה סלעים עבה הבונה את רמת עבדת. בין שתי הסינקלינות נקברת אנטיקלינת אפעה הבולטת שוב על פני השטח באיזור הכיפות. הסינקלינה של דימונה, שהיא צרה וארוכה, ממשיכה לדרום-מזרח דרך סינקלינת ירוחם הרחבה, דרך סינקלינת חלוקים ואף היא נקברת תחת רמת עבדת באיזור שדה בוקר. בכון מערב מצוייה בקעת ערד, שהיא סינקלינוריום רחב (זוהר, 1987) המשתרעת בין רכס כידוד – זוהר – דימונה ורכס דרום הר חברון (דבשת – ציה – עירא – ענים). סינקלינוריום זה מהווה את הגבול בין המבנים של הנגב הצפוני, שכוונם צפון-מזרח – דרום-מערב, ובין המבנים של שדרת ההר המרכזית של יהודה, שכוונם הכללי צפון – דרום. ציור א-4 מציג חתך לרוחב המבנים הגדולים.

נקודה מס' 2

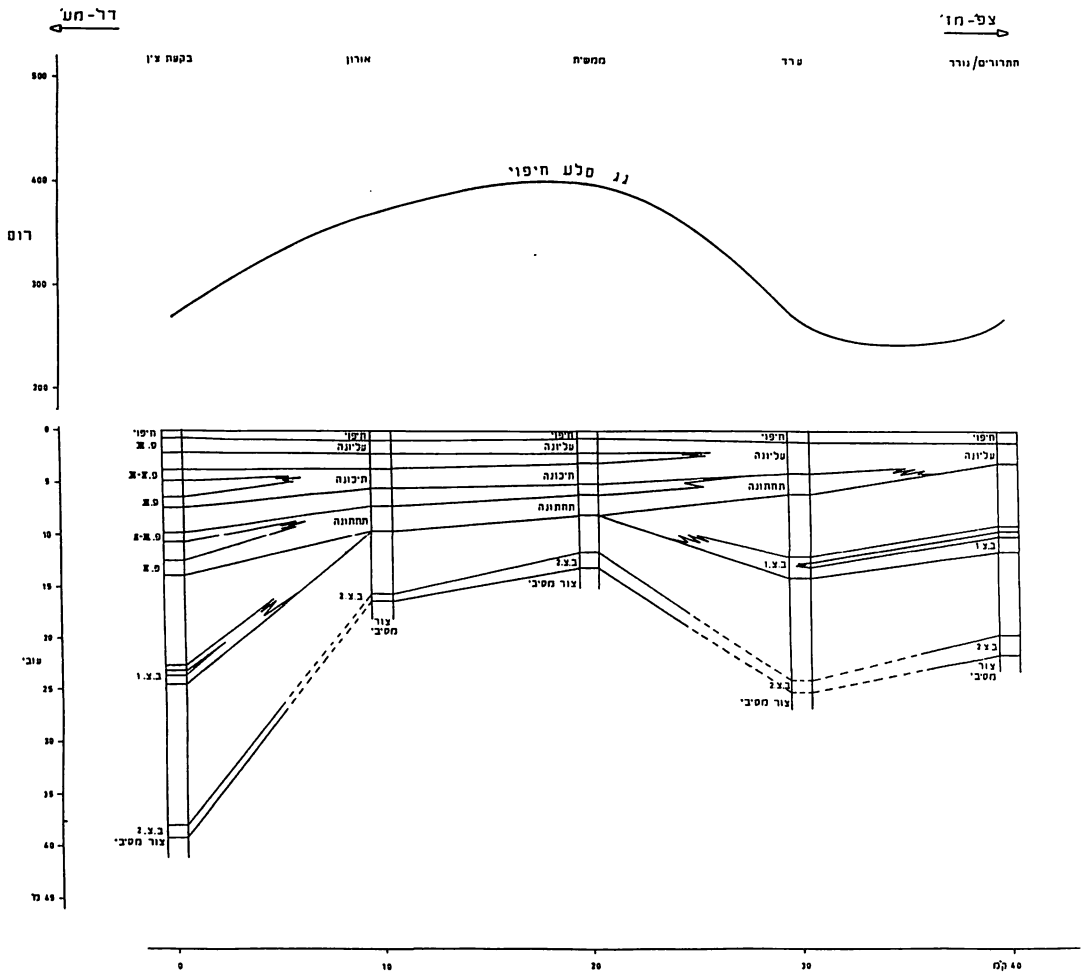
בנקודה זו נערוך מפגש עם תצורת מישאש בפציאס האופייני לאיזור הנגב הצפון מזרחי. השינויים הסטרטיגרפיים בשני הפרטים העליונים של תצורת מישאש לאורך סינקלינת אורון



ציור א-1. מסלול סיור שדות חתורים, גזר, מכרה ערד, מכרה פמ"א.



ציור א-2. נקודה מס' 1 -
תרשים התמצאות.



ציור א-3. חתך לאורך סינקלינת אורון - אפעה - חתורים.

זמן והשקעה	תאור	ליעולוגיה	עובי (עווח) מ'	עומק מ'	גלם/עוצרת P205	שם היצרת	גיל
טפל עליון	גיר סיליקטי קשה מאוד, מטמורפי (ענול' גבוהות לחץ נמוך - כ"מחורר")		6.00	(0-20)		חונדורים (נדיכו) ועיונות	מסטרניכט
	צבעים: חום, צהוב, אדמדם, ירקרק, אפור ולבן.						
	מכיל תרכיזים של גלעות						
	ס. גלויט						
	Si - סיליקטי						
סלע חופי	פוספוריט גירי קשה מאוד, אפור, גס, נרגז, מכיל עצמות, מטמורפי, בדרגה נמוכה עד בינונית בולט בענן בצבעו האפור		0.70		22.4/19.3	מישאש - פרט	קמפן עליון
פוספט עיקרי	פוספוריט גירי בינוני עד קשה, אפור, גס - נרגז, מכיל עצמות, מטמורפי, בדרגה נמוכה עד בינונית בולט בענן בצבעו האפור		1.00		25.4/23.0	העיקרי	
טפל ג.צ. 1	חילופין של גיר, צור, בולבוסין, חומר, אופקי פוספוריט דקיק		3.10				
	חילופין של אופקי פוספוריט עם צור ובולבוסין גיר קטנים		0.50		29.0/23.0	מישאש - פרט	
	פוספט ג.צ. 4 פוספוריט עצמי קושי בינוני צהוב-חום		0.50		19.1/12.5	הקרטון	
	פוספט ג.צ. 4 חומר חרסית צהוב-חום בחלק העליון פורצלניט וצור בחלק התחתון		0.50		30.4/25.7	פורצלניט	
	פוספוריט פריך, עצמי, צבע חום - אדמדם.		0.80				
	חילופין של עכבות גיר צבות עד אופקי צור, פורצלניט, קרטון ובולבוסין גיר גדולים.		6.30				
	במקומות מתפתחת עדשה חרסיתית קרבוניט בעובי של 2-4 מ.						
	בנג העבה ובבסיסה שכבת גיר צבות.						
	פוספוריט גירי קשה צבע חום-אדמדם מכיל שרידי עצמות גדולים		0.60		23.0/18.5		
	פוספט ג.צ. 2 פוספוריט פריך עד בינוני צבע צהוב-חום-אדמדם מכיל שרידי עצמות רבים.		1.60		32.8/28.9		
	פוספוריט גיר קשה צבע חום - אדמדם, מכיל שרידי עצמות		0.40		24.0/19.7		
	צור מסיבי		2.00			מישאש - פרט הצור המסיבי	קמפן תחתון

ציור א-5. שדה חתרונים דרום - חתך עמודי ממוצע.

פרט הפוספוריט העיקרי

פרט הפוספוריט העיקרי (הפוספוריט הכלכלי) מורכב באיזור חתרורים משכבת פוספט אחת המחופה ע"י סלע פוספטי-גירי. עובי הפרט 3-1 מ'. זוהי הצטמצמות ניכרת של פרט זה ביחס לקצה הדרום-מערבי של הסינקלינה (ציור א-3). במרבית איזור חתרורים השכבה "מחותרת" וצבעה האופייני הוא אפור-שחור, המעיד על תהליך קלייה בטמפ' של עד 400°C ועל פירוק חלקי בלבד של החומר האורגני. במקומות מספר, בד"כ באיזורים הגבוהים סטרוקטורלית, צבע הפוספוריט הוא אדמדם/ירקרק והופעתו היא גבישית (ולא גרגרית). הופעה זו מצביעה על שריפה בטמפ' גבוהות יחסית של $700-800^{\circ}\text{C}$.

בהמשך נחצה בנסיעה עם ג'יפים את השדה ממזרח למערב, נחצה את כיפת חלמיש (בצד שמאל קיים משטח של קידוח נפט ובצד ימין סלעים אפורים בתצורת מישאש), נתרשם מאופי הסלעים המחותרים ומן הגוונים הרבים, המשקפים קלייה של סלעים שונים בתנאים משתנים, נחצה סטרוקטורה גדולה (קבורה בתת-הקרקע), ונתקדם לכוון קצה תופעת ה"חתרור".

נקודה מס' 3

בנקודה זו קיים מחשוף מלאכותי של שכבת הפוספט העיקרי האופייני לפציאס של הטמפרטורות הגבוהות. עובי הפוספט, כולל סלע החיפוי, מצטמצם ל-80 ס"מ בלבד לעומת 2 מטרים במכסימום. נראה שתהליך הקלייה גרם להצטמצמותו. במרחק קצר מנקודה זו מצוי הפוספוריט במופע הרגיל. בנקודה זו ניתן לראות, בנוסף, את השפעת תהליך הקלייה על סלעים שונים, כמו בולבוסים, חווארים פוספטיים וצור.

נקודה מס' 4 – מכרה הפוספטים נחל אפעה ("ערד")

1. כללי

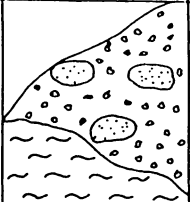
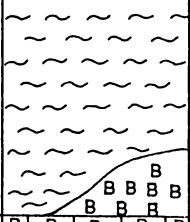
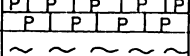
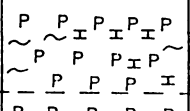
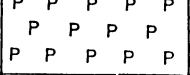
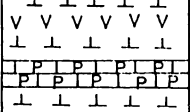
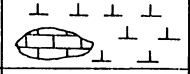
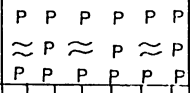
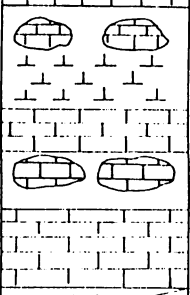
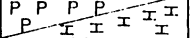
מרבץ הפוספט במישור אפעה (מכרה ערד) מכיל 40-30 מליון טון רזרבות ברות ניצול. הכרה במכרה החלה ב-1972 ונמשכת ברציפות עד היום. המכרה מצוי בצפון-מזרח של סינקלינה אסימטרית מאורכת המשתרעת מאורון בדרום-מערב דרך מישור ימין, רותם ואפעה בצפון-מזרח. הסינקלינה מוגבלת באגפה התלול הצפון-מערבי ברכסי אפעה וחתירה ובדרום-מזרח ברכס חצרה. חתך הפוספט הכלכלי כולל 3 שכבות פוספט בעובי כולל של 10-6 מ'. תחום עובי השכבות נע בין 6.0-1.0 מ'. פירוט השכבות מהגג לבסיס (ציור מס' א-6):

1. שכבת פוספט עיקרית עליונה
2. שכבת פוספט עיקרית תחתונה
3. שכבת פוספט בין-צורנית

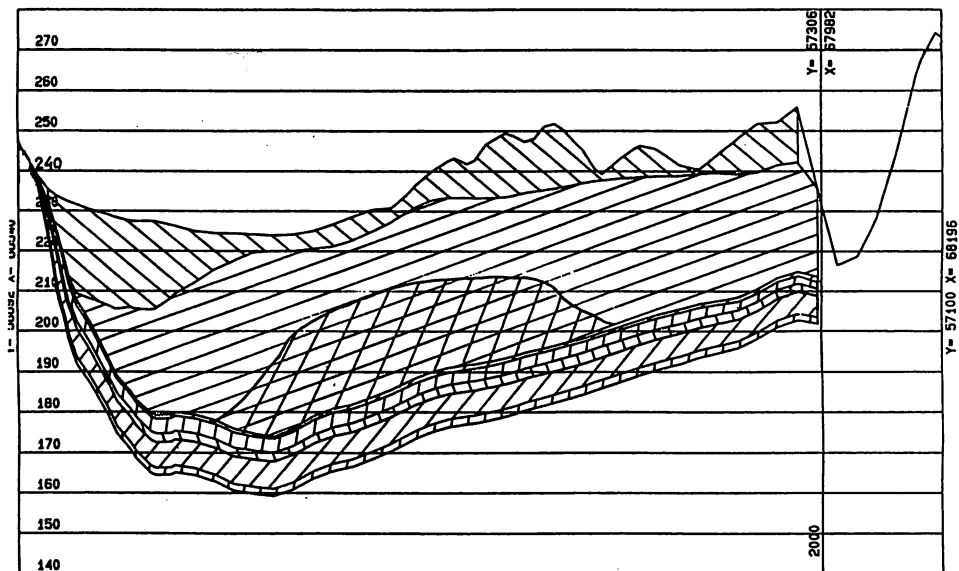
2. תיאור השכבות

עליונה – עוביה נע מ-6.0-1.0 מ' והעובי הולך ופוחת מצפון-מערב לדרום-מזרח (ציור מס' 7). מבחינה פטרוגרפית מורכבת מפוספט אובוליטי-עצמי עם ליכוד קרבונטי. איכות הפוספט 26.0%-24.0% תחמוצת זרחן (ת.ז.) ומשמשת לייצור חומצה זרחתית.

תחתונה – עוביה נע מ-3.0-1.0 מ'. הפוספט עצמי וכמעט ואינו מכיל חומר מלכד בין מרכיבי הפרנקוליט. הפוספט עשיר ומכיל כ-32% ת.ז.; משמשת לייצור דשנים וליישום ישיר.

שכבה	תאור	ליתולוגיה	עובי מ'	עומק מ'	תצורה	גיל
טפל עליון	חול, סחף ניאוגני. סחף צעיר		0-60.0			
	חואר קירטוני חואר/פצלי שמן					
סלע חיפוי	פוספט גירי		0.8	25	ערב	מסטריכט
עליונה	פוספט חוארי		2.5	26-27	מישאש	קמפן
			2.0	28-29		
תחתונה	פוספט			30-31		
טפל בנצורני	גיר, צור. פוספט צור. פורצלניט		5.5	32-35		
	חואר, צור קירטון חוארי			36-37		
בנצורני	פוספט פוספט חוארי פוספט		1.8	38-43	גבול חתך	כלכלי לכריה
טפל בנצורני 2			10.0			
	פוספט/גיר, ונא		0.5-1.5			

ציור א-6. חתך אופייני - מכרה ערד.



מקרא

אלובים, קונגלומרט, סחף ניאוגני רצנטי

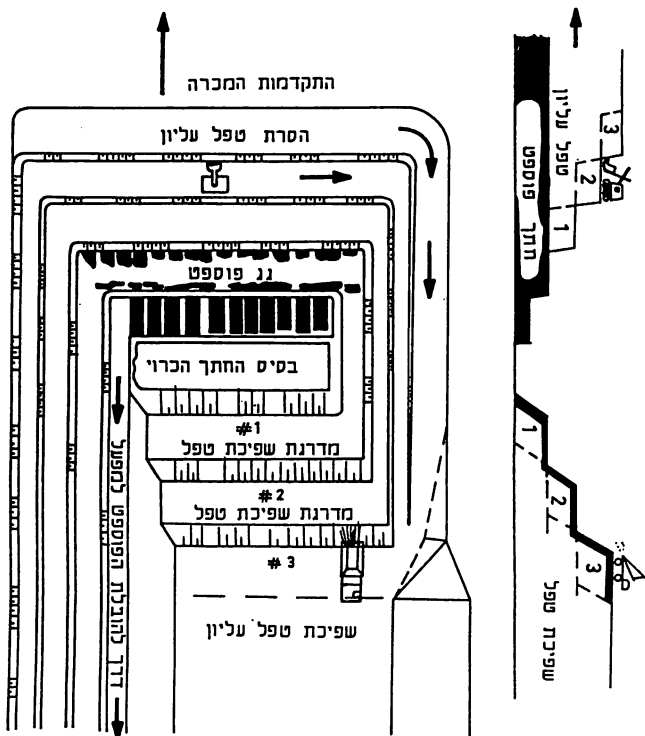
חואר ערב

פצלי שמן

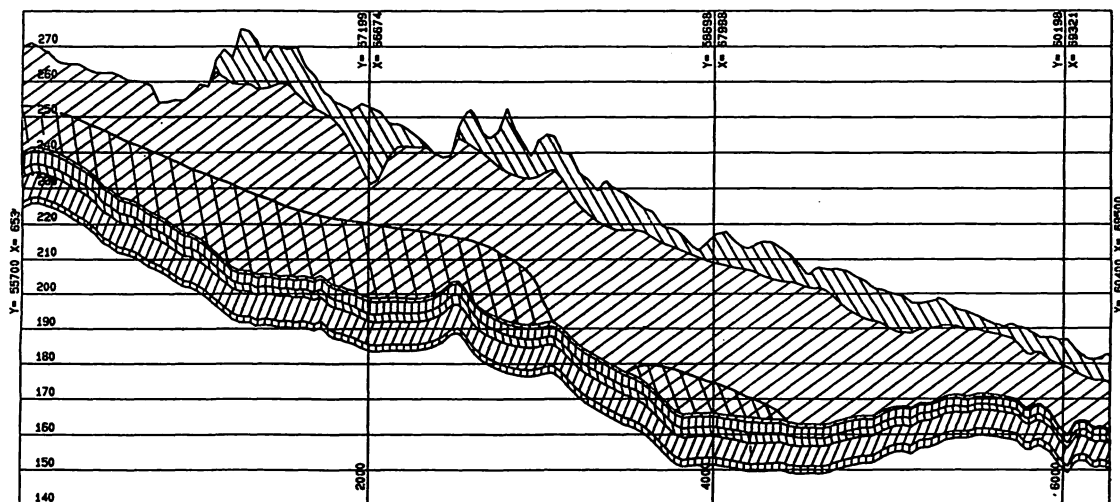
שכבות פוספט

טפל בנוצורי

ציור א-7. חתך רוחב במרבץ ערד מדרום למכרה הקיים.



ציור א-8. שיטת הכריה במכרה
ערד - BOX CUT



מקרא

פצלי שמן

שכבות פוספט

אלוביום, סחף, ניאון, רצנט

טפל בנצורני

חואר ערב

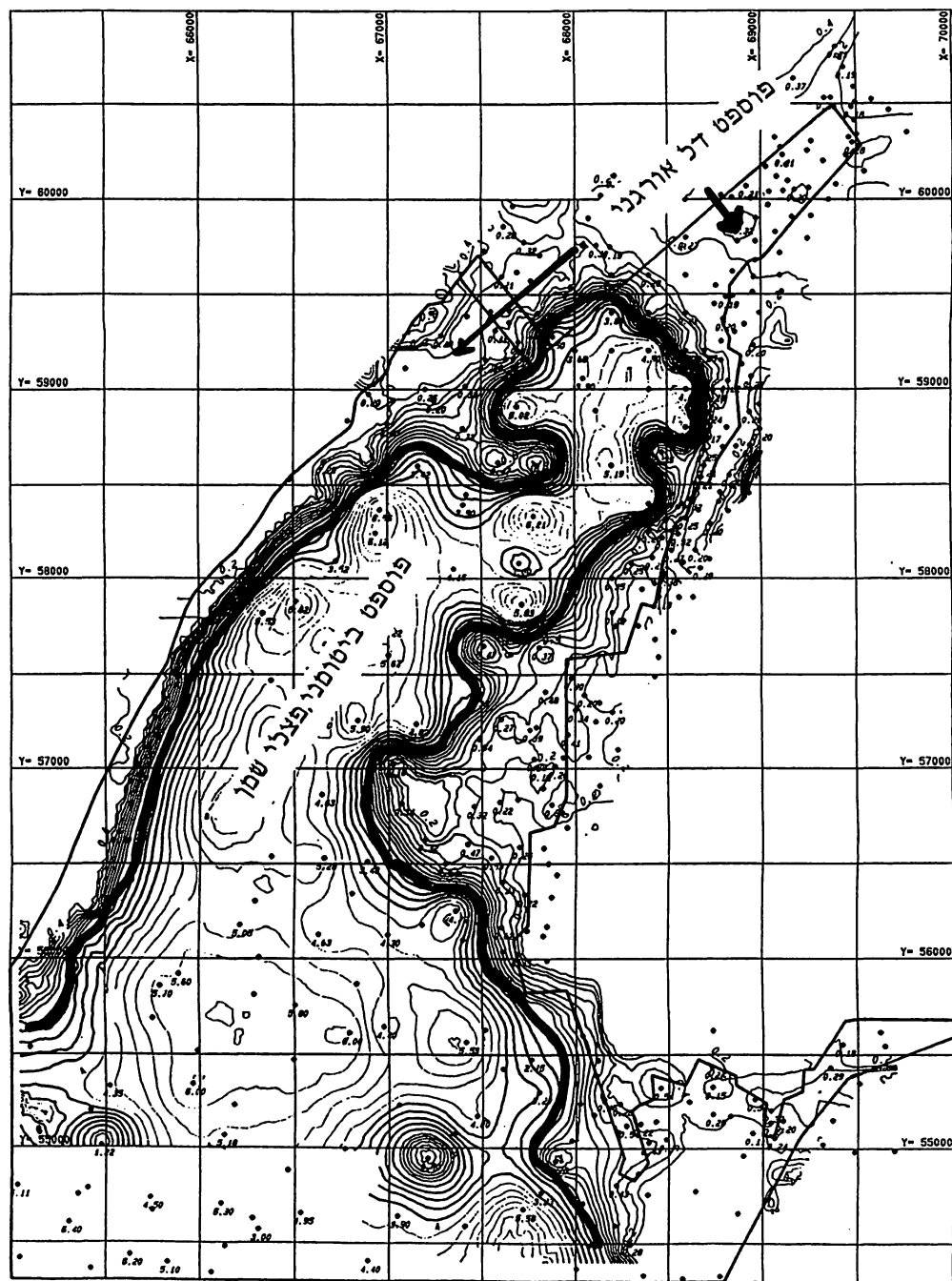
ציור א-9. חתך אורך מרבץ ערד ממכרה פמ"א בדורום ועד לקרבת נחל חימר בצפון מזרח. חתכי רוחב (ציור א-7) ואורך (ציור א-9) מצגים את המבנה הכללי.

בין-צורית – שכבה שעוביה כ-1.8 מ'. במקומות השכבה אחידה ואיכותה 23-26% ת.ז. במקומות, בנויה מ-3 תת-שכבות: שתיים מהן עשירות בתחמוצת זרחן (חלק עליון ותחתון) ושכבה אמצעית עניה בתחמוצת זרחן (טפל). בנויה מפוספט אובוליטי-עצמי. משמשת ליצור חומצה זרחתית.

במקומות מתפתחות שכבות פוספט נוספות: באזור הציר המערבי של המרבץ מתפתחת מתחת לשכבה תחתונה שכבה נוספת בעובי ממוצע של 0.6 מ' ובאיכות של 25% תחמוצת זרחן. שכבה נוספת, שלגביה המידע חלקי, מתפתחת במקומות בחתך ומופיעה כ-5 מ' מעל פרט הצור המסיבי וכ-10 מ' מתחת לשכבת הפוספט הבין-צורנית. איכות שכבה זו בד"כ נמוכה במכרה ועוביה כ-1 מ'. שכבה זו מפותחת בשדות סמוכים: חתרורים, גורר, זוהר ודימונה.

3. שיטת הכריה

תכנון כריה עקרוני מבוסס על כריה במפלסים ומדרגות כריה. מימדי המדרגות 400×400 מ' (ציור מס' א-8). הטפל העליון נכרה באמצעות מחפר חשמלי (BE 295) והובלה במשאיות 170 טון (P-170). מדרגות עבודה בגובה של כ-15 מ' כל אחת. שיטת הכריה הינה בשיטת "הבור המתקדם" (BOX CAT) המבוססת על התקדמות חזית הכריה תוך כדי העברת הטפלים לאחור, לאיזורים כרייים. כרית הפוספט גם כן מבוצעת בשיטת מדרגות כריה, כאשר כל מדרגה מייצגת שכבה שונה החל מסלע חיפוי בגג החתך דרך עליונה, תחתונה, טפל ב.צ. ופוספט בין-צורני. סה"כ ללא טפל עליון – 5 מדרגות כריה לחתך הפוספט. הכריה מתבצעת באמצעות דחפורים, מעמיסים והובלה במשאיות במעמס של 130 טון למפעל.



צור א-10. מפת פיזור חומר אורגני בשכבה עליונה במרבץ פוספט ערד.

4. החומר האורגני במרבץ והיחס בין פצלי השמן לתכולת החומר האורגני בפוספט

פיזור החומר האורגני בשכבות הפוספט בשדה חופף במידה רבה לתפוצת פצלי השמן המונחים מעליו (ציור מס' א-9). באיזור הצפוני (המכרה הנוכחי) רמת החומר האורגני בפוספט נמוכה מ-0.4%. באיזור זה לא מצויים פצלי שמן. בחלק הדרומי של המרבץ (קו רוחב 059), במרכז הסינקלינה, רמת החומר האורגני (ח.א.) בפוספט עולה עד כדי 5-8%, במקביל להתפתחות פצלי השמן המונחים מעליו (ציור מס' א-10 – מפת פיזור חומר אורגני בשכבה עליונה). מספר תופעות ראויות לציון:

- א. באיזור הציר הנוכחי (שוליים צפון-מערביים) ואפיק נחל אפעה לא מופיעים פצלי שמן והפוספט המונח תחת חוואר ע'רב עני בחומר אורגני.
- ב. האיזור העשיר בח.א. ובפצלי השמן הינו מרכז הסינקלינה. איזור זה מאופיין בתכולת חומר אורגני גבוהה בפוספט.
- ג. אין חפיפה בפיזור החומר האורגני בין שכבות הפוספט באגן אשר בו שקע הפוספט הביטומני הבין-צורני והאגן אשר בו שקעו שכבת הפוספט העליונה ופצלי השמן המונחים מעליה.

מקורות

זוהר, א., שילוני, י., 1987. מרבץ הפוספטים בבקעת ערד. דו"ח GSI/19/87, המכון הגיאולוגי, ירושלים.

Bar-Matthews, M., Ayalon, A., 1991. Alternation processes in the basal phosphorite section of the Mishash Formation near the city of Arad, Israel. Israel Journal of Earth Sciences, 40: 65-75.

סיור א-2

חלק ב: פצלי השמן באגן רותם-ימין

צבי מינסטר, המכון הגיאולוגי

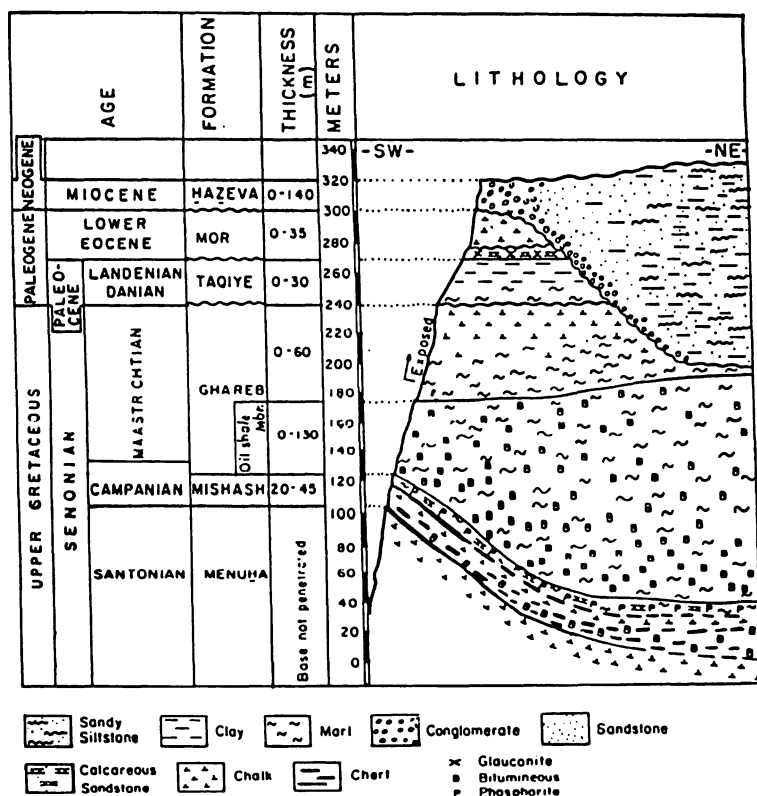
יוסי נחמיאס, פמא (פיתוח משאבי אנרגיה) בע"מ

חתכים עשירים בחומר אורגני מאפיינים יחידות סלע מגיל קרטיקון עליון בסינקלינות בדרום ומרכז ישראל. התופעה היא טיפוסית במיוחד לתצורות מישאש וע'ר'ב מגיל קמפן – מאסטרסכט. הקירטונים (שהם לעתים חוואריים במקצת) של תצורת ע'ר'ב מכונים בספרות "פצלי שמן" אף שהמרכיב האנאורגני העיקרי שבהם הוא קרבונט ולא חרסיות. אנו נמשיך איפוא להתייחס להלן למסלע זה כאל פצלי שמן.

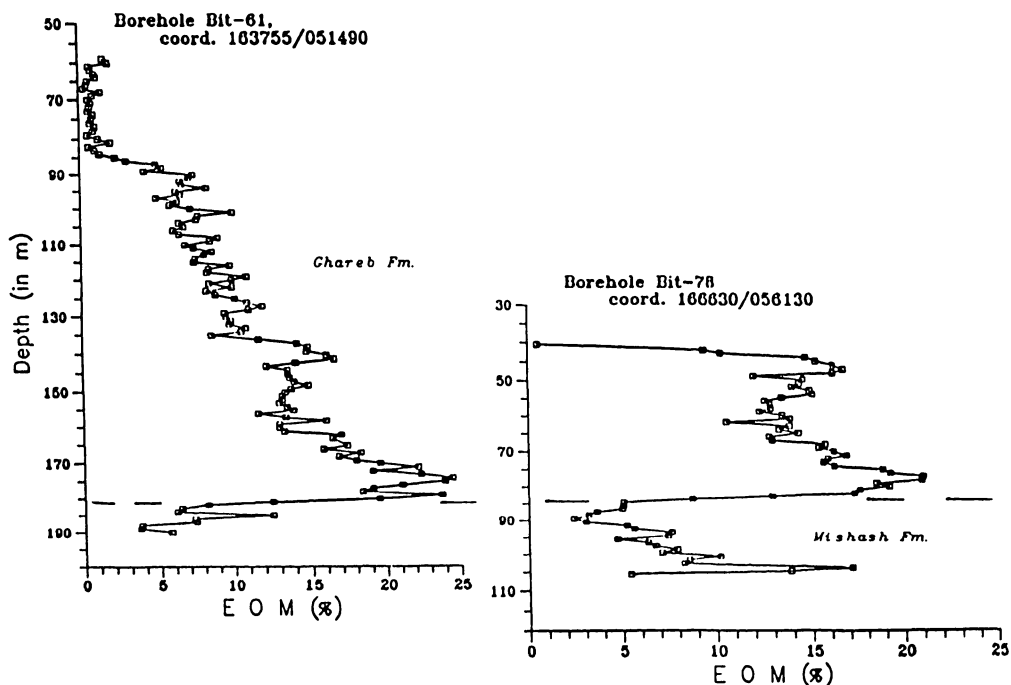
גוף פצלי השמן הגדול ביותר אשר נחקר בנגב הצפוני נמצא באגן רותם – ימין. הוא זוהה לראשונה במהלך קידוחי סקר לפוספטים במחצית שנות ה-60 ובדיקתו המפורטת החלה במחצית שנות ה-70 וממשיכה מאז ברציפות במאות קידוחי רסק וגלעין, במנהרת חקר ובמכרה פתוח. מסתבר כי חתך פצלי השמן מצוי במקומות תחת כיסוי טפל של 10–20 מ' בלבד אך הסווח נע בד"כ בתחום של 30–150 מ'. ככלל, הכיסוי הטפל מתעבה לכוון דרום; בצפון הוא מורכב בעיקר מחווארים לא ביטומיניים ודרומה יותר הוא מכוסה בעיקר על ידי סלעי תצורת חמבה כאשר בדרום-מערב מישור ימין מורכב הכיסוי הטפל גם מתצורת טקיה ומקירטונים איאוקניים; חתך עמודי סכימתי מוצג בציור ב-1. הממצאים אשר נאספו עד היום מצביעים על כך שהתופעה משתרעת על פני שטח של כ-75 קמ"ר, ברצועה שאורכה כ-23 ק"מ ורוחבה 4–2.5 ק"מ; מוערך כי נפחם של הסלעים להם תכולה ממוצעת של כ-14% חומר אורגני הוא כ-5 ביליון מ"ק; כ-40% מכמויות אלה נמצאו מצפון לכביש דימונה – סדום. הנתונים אשר נאספו עד היום מצביעים על כך שעובי החתך אשר נמצא מעל לגג חבורת יהודה באזור ציר הסינקלינה עשוי להגיע לעוצמות של 250–400 מ'.

עובי פצלי השמן מגיע עד ל-130 מ' כאשר החתכים העבים יותר נמצאו בדרום מישור רותם ובמישור ימין, בחלקה המערבי של התופעה (אזור ציר הסינקלינה). ככלל, מתאפיין החתך של פצלי השמן, אשר הופעתו מסיבית ועל פי רוב הוא מחוסר שיכוב ברור, בעליה הדרגתית בתכולת החומר האורגני מגג התופעה ועד לבסיסה, עד לרמות של כ-25%. בחלק הצפוני של המרבץ לפצלי השמן תכולה ממוצעת גבוהה יותר של חומר אורגני וזהו ביטוי לכך שעובי השכבה העליונה, הדלה בתכולת החומר האורגני, מצומצם ולעומת זאת מפותחת שכבה דלה זו בחלק הדרומי, שם היא עשויה לבנות קרוב למחצית מהחתך. באזור מישור ימין מצויה בבסיס החתך יחידה עשירה בחומר אורגני (מעל 20%) אשר עוביה 10–20 מ'. גופים ביטומיניים קטנים יחסית נמצאו בעת פיתוח מכרה הפוספטים, מצפון לתופעה הרציפה של פצלי השמן, וזאת בכל אחת מתצורות ע'ר'ב ומישאש. תפוצת החומר האורגני לאורך החתך הנדון מוצגת בציור ב-2 (לוג של שני קידוחים מייצגים); התפוצה המרחבית ועוביים של פצלי השמן (ממוצע של 14% חומר אורגני) באגן רותם – ימין מוצגת בציור ב-3.

פצלי השמן של תצורת ע'ר'ב נמצאים באסוציאציה קרובה עם הפוספטים של תצורת מישאש. תופעת הפוספטים במישור רותם (שדה ערד) היא מהעשירות הידועות בנגב. בסקרים לפצלי



ציור ב-1. חתך עמודי סכימתי במישור ימין (מתוך Minster & Shirav, 1982).



ציור ב-2. תפוצה של החומר האורגני לאורך החתך של פצלי השמן בשני קידוחים מייצגים ממישור רותם (BIT-61 בדרום ו-BIT-78 בצפון).

שמן נמצא כי חתך הפוספט אשר מתחת לפצלי השמן עשיר אף הוא אך על פי רוב זהו פוספוריט ביטומיני. על אף המגבלות של כיסוי טפל גבוה ותכולת החומר האורגני (המהווה גורם מגביל בתעשיות הפוספט) הרי שמדובר במשאב בעל פוטנציאל כלכלי משמעותי ביותר. נתונים ממספר קטן של קידוחים מצביעים על כך כי מתחת לשכבות הפוספט מצוי, במקומות, חתך נוסף מועשר בחומר אורגני בעובי של כ-15 מ'. אין כמעט מידע מתת-הקרקע על חלקה התחתון של תצורת מישאש ועל תצורת מנוחה בחלקים העמוקים של הסינקלינה.

נתונים רבים נאספו אודות תכונות גיאוכימיות (אורגניות ואיאורגניות) ומינרלוגיות של פצלי השמן, במיוחד בשל החשיבות שלהן לפיתוח של טכנולוגיות לניצולם הכלכלי. החתך מתאפיין בכמה מגמות מינרלוגיות – עלייה בתכולת החרסיות (קאוליניט, סמקטיט, איליט) וגם בנפיצותן היחסית מבסיס החתך לגג; לעומת זאת ניתן לראות ירידה בתכולת הקוורץ והאפטיט בכיוון זה. ריכוז הפיריט הוא נמוך בבסיס החתך ועולה במידה רבה בחלקו העליון. תכולת הקרבונט אינה מראה שינוי של ממש לאורך החתך. ניתן ראשוני של המידע הגיאוכימי, כולל יסודות קורט, מצביע על קיומן של שתי אוכלוסיות שונות כאשר מתייחסים למקטע האיאורגני כאשר האחת מאפינת את השכבות העליונות של החתך (ערלי חומר אורגני גבוהים מ-15%) והשנייה את השכבות התחתונות. יצוין כי נמצאו גם שינויים בפרמטרים גיאוכימיים כאשר נעשה ניתוח מרחבי שלהם. פצלי השמן מאופיינים גם בערכים גבוהים יחסית (יותר מ-20%) של רטיבות.

בפצלי השמן תכולה אנומלית של מספר יסודות קורט כמו כרום, נחושת, ניקל, אבץ וצירקון (עשרות עד מאות חל"מ, כל אחד); לאורגנים ערכים בתחום 25–30 חל"מ כאשר נמצאה בו תכונה של אי-שיווי משקל בין האיזוטופים העיקריים.

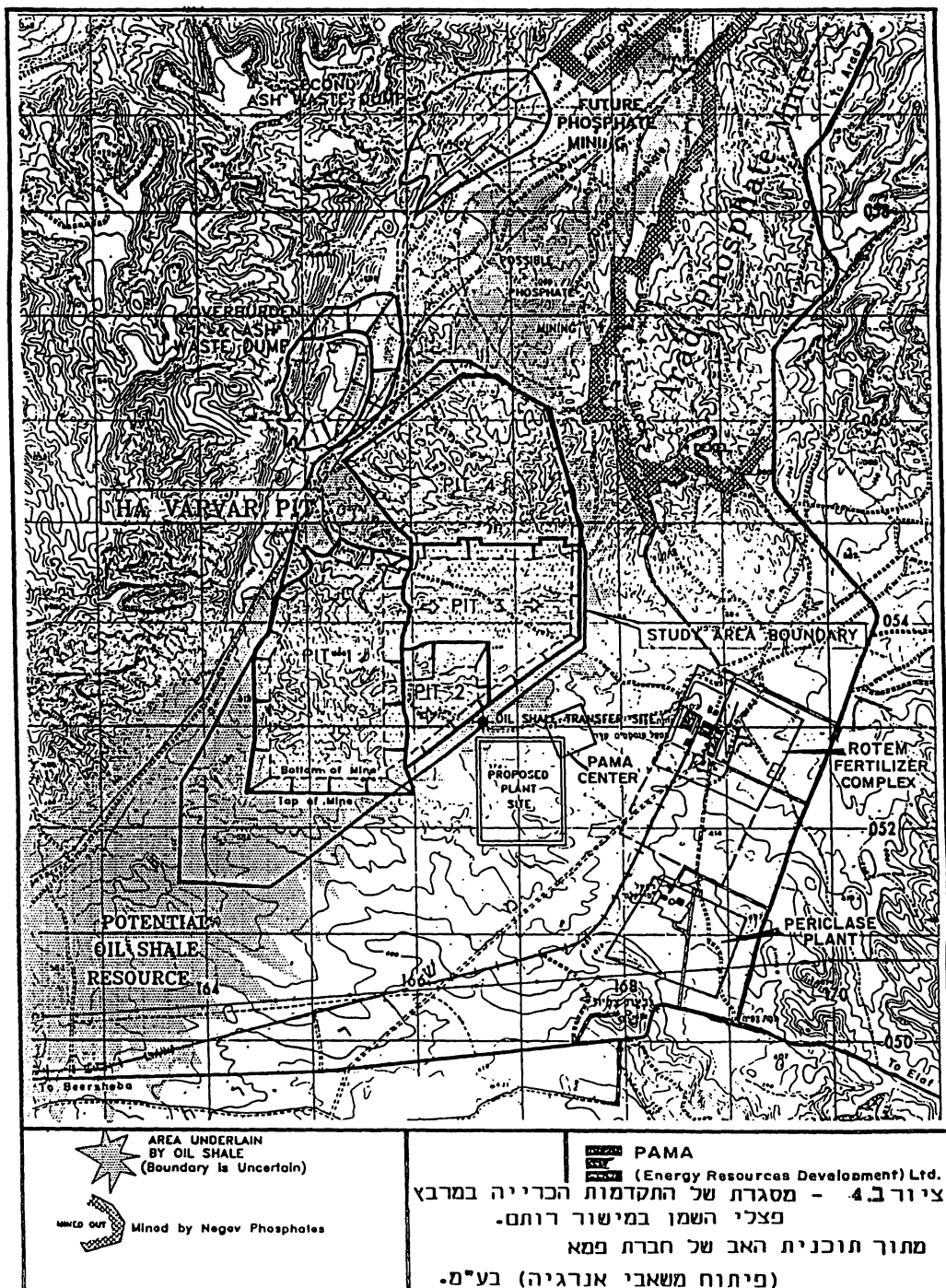
החומר האורגני בפצלי השמן מורכב ברובו מקרוגן (בעיקר מהמקטע האליפטי) דק מאוד (חלקי מיקרון) ומוערך כי מקורו מאצות ימיות, בקטריות וצמחים יבשתיים. דרגת הבגרות התרמית של החומר האורגני היא נמוכה. כעשירית מהחומר האורגני מורכבת מגופרית בתרכובות אורגניות שונות. לתכולת החומר האורגני (אשר היא שיטת הבדיקה הרוטינית) מתאם מצוין עם הפרמטרים הטכנולוגיים הבאים: ערך קלורי (1800–1000 קל/גר') והיפק השמן (ערך פישר – 12–6%).

בחתך של פצלי השמן, תצורת ע'רב, נמצאו מאספים עשירים למדי של מקרו ומיקרומאובנים אך נראה כי ניתן למצוא בו אופקים מנחים מהימנים רק בעזרת ננופלנקטון גירני. בדיקת אוכלוסיות פלינולוגיות לאורך החתך של פצלי השמן, תצורת ע'רב, מרמזת על רמת פוריות בינונית (ביחס לקמפן), כאשר מסתמנת עליה ברמת הפוריות בחלקו העליון (שהוא דווקא דל בתכולת החומר האורגני).

משטח הגג של פצלי השמן הוא אירגולרי; הועלתה אפשרות כי הוא תוצר של חימצון אפיגנטי, ובמקור היו חלקי חתך גבוהים יותר ואזורים נוספים בשולי האגן (אשר אינם מראים כיום ערכים אנומליים של חומר אורגני) ביטומיניים אף הם. אפשר כי לשכבה חרסיתית המצויה מטרים ספורים מעל לגג פצלי השמן היתה חשיבות בשימור החתך העשיר בחומר אורגני.

תחנה 5 – כריית פצלי השמן במכרה חברבר

נצול מרבץ פצלי השמן במישור רותם עבר כמה גלגולים. בשלבי המחקר הראשוניים נבדקו דוגמאות רסק וגלעין מקידוחים. ברמה הטכנולוגית נבדקו בעיקר אופציות השריפה הישירה (להפקת קיטור וחשמל) והניזול (מיצוי השמן וזיקוקו). בהמשך נכרתה מנהרת חקר והוקמו מתקנים הדגמתיים. באמצע שנות ה-80, לקראת הקמת תחנת הכוח הנסיונית, הוחל בפיתוחו



של מכרה פתוח בחלקו הצפוני של מרבץ, באזור המפגש של נחל חברבר עם נחל אפעה; קצב הכרייה בו כיום הוא בהיקף של כ-350,000 טונות לשנה והוא מספק פצלי שמן לתחנת הכוח ההדגמתית (בכוש ייצור של כ-12 מגהוואט) של חברת פמא (פיתוח משאבי אנרגיה) בע"מ הממוקמת בתוך התשלובת הפטרוכימית של "רותם דשנים" המשלבת טכנולוגיות מצע-מרצף ומצע נסחף. בשנת 1992 הגיעה הכרייה לבסיס חתך פצלי השמן ואף נעשתה כרייה נסיונית של שכבות הפוספוריט הביטומיני. כיום גובה הקיר החיצוני של המכרה הוא כ-90 מ', מתוכם כ-30-25 מ' כיסוי טפל (אלוביום וחואר קירטוני), כ-55 מ' פצלי שמן וכ-5 מ' בבסיס – פוספוריט. שיטת הכרייה היא באמצעות ציוד כבד וללא פיצוץ (לבד מגג הפוספוריט). החומר מובל לתחנת הכוח הסמוכה; בעתיד אמור עיקרו של האפר המתקבל בתהליך השריפה לחזור למכרה ולהוות את הבסיס לשיקומו.

תכנון המכרה התחשב בבעיות גיאוטכניות כמו יציבות קירות פצלי השמן, תגובתם לשינויי לחות ומשקעים ומשמעות תופעות סידוק.

מחקרים אחרונים של כמה היבטים סביבתיים בניצול פצלי השמן ממישור רותם מצביעים על כך כי נזקם הסביבתי עשוי להיות מצומצם למדי, והיסודות המשתחררים מהאפר הם בעיקר אלה הקשורים לאנהידריט.

הקמת תחנת כוח גדולה הרבה יותר במישור רותם תצריך הרחבה משמעותית של היקפי הכרייה לרמה של כ-3 מיליון טון/שנה לכל יחידה של 75 מגהוואט. ממדי כרייה אלה יצריכו, כמובן, שימוש בציוד חדשני, בכלים מהגדולים המצויים בשוק, במערכות שינוע (חומם גלם מהמכרה לתחנה ואפר מהתחנה בחזרה למכרה) ובתשתית מתקדמת בשטח. לאחרונה הושלמה תוכנית לפיתוח המכרה לטווח של 30 שנה (תוכנית כללית, ציור ב-4).

נוסף על השימוש העיקרי בפצלי השמן נמשכים מחקרים אשר מטרתם מציאת שימושים נוספים לגלם ולתוצרי עיבודו. כך לדוגמא – שילוב פצלי השמן בייצור צמנט פורטלנד, שימוש באפר למטרות שונות. ניתן לצפות גם כי עם תכנון כרייה בממדים גדולים של פצלי שמן תתבקש במקביל התקדמות בניצול הפוספט הביטומיני ובהחלט ייתכן בעתיד ניצול משולב של השניים.

תחנה 6 – תחנת הכוח ההדגמתית המשולבת בקומפלקס "רותם דשנים"

תצפית על חלקי המתקן והסברים.

מקורות נבחרים אודות תופעת פצלי השמן במישור רותם – מישור ימין

- Eshet, Y., Minster, T. & Almogi-Labin, A. 1992. Palynofacies of the Lower Maastrichtian of Mishor Rotem, Southern Israel. Sub. for Publication.
- Gill, D. & Michel, D., 1984. Geostatistical thickness analysis of the Efe Oil Shale Deposit. Abst., Isr. Geol. Soc. Ann. Meet., Arad.
- Givoni, D., 1991. Production of oil from Israeli oil shale. Israel - USSR Energy Conf., Beer Sheva, May 13-15th., 8 p.
- Heller-Kallai, L., Aizenshtat, Z. & Spiro, B., 1979. Interrelation between mineralogy and structure of Israeli oil shales. Report to Ministry of Commerce. Jerusalem, 49 p. (in both Hebrew & English).

- Hildebrand-Mittlefehldt, N., 1984. The northern part of the Rotem Oil Shale Deposit. PAMA int. rep. no. (in Hebrew).
- Hirsch, F., Minster, T. and Scharf, A. (in publication). Structural Map of Sheet 1:50,000 Makhtesh Qatan. Isr. Geol. Surv.
- Issahary, D., 1982. Measured properties and technological aspects of oil shales. 6th conf. on Mineral Engineering, Arad, pp. (in Hebrew).
- Michaeli, L., 1991. Stability of walls in the open-pit oil shale mine, Mishor Rotem (summary 90/91). Isr. Geol. Surv., Rep. GSI/12/91 (in Hebrew).
- Minster, T., 1983. Rotem oil shale deposit, geological maps and cross-sections; explanatory notes. Isr. Geol. Surv., Rep. ME 11/82, 4p.
- Minster, T., Shirav (Shwartz), M., Shiloni, Y. & Levi, Y., 1986. Oil shale - phosphorite: prospects in the East Mediterranean. Industrial Minerals, No. 222, pp. 47-60.
- Minster, T., Padan, A. & Nathan, Y., 1991. Clays and other silicates in oil shales from Mishor Rotem. Isr. Geol. Surv., Rep. GSI/37/90, 18 p. (in Hebrew).
- Minster, T., Nathan, Y. & Raveh, A., 1992. Carbon and sulfur relationships in marine Senonian organic-rich, iron-poor sediments from Israel - a case study. Chem. Geol., vol. 97, no. 1/2, pp. 145-161.
- Moshkovitz, S., 1984. Late Cretaceous calcareous nannofossil biostratigraphy of the Mount Scopus Group, Israel. GSI, Cur. Res. 1983-84, pp. 46-55.
- Nachmias, Y., 1990. The oil shale open-pit mine in Mishor Rotem. 10th conf. on Mineral Engineering, Ma'aleh Hahamisha, pp. 119-140 (in Hebrew).
- Padan, A. & Leichter, S., 1988. Summary of inorganic parameters in the area of the explanatory mine. PAMA int. rep. no. 5429-7, 5 p., (in Hebrew).
- Padan, A., Minster, T. & Leichter, S., 1988. The transition zone on top of the oil shale sequence - new evidence from the Havarbar mine area. 9th conf. on Mineral Engineering, En Boqeq, p. 45.
- Raveh, A., 1986. Nahal Havarbar - characterizing of the oil shale deposit. 8th conf. on Mineral Engineering, Ashqelon, pp. 207-213 (in Hebrew).
- Raveh, A., 1987. Nahal Havarbar - summary and data processing. Pama int. rep., 50 p. (in Hebrew).
- Reiss, Z., 1988. Assemblages from a Senonian high-productivity sea. Rev. Paleobiol., 2: 323-332.
- Sevton, G. & Raveh, A., 1985. Mineral content in boreholes samples from Nahal Havarbar. PAMA int. rep. no. 17-85 (in Hebrew).
- Shahar, Y., 1965. Oil shales in Efe Area. Isr. Geol. Surv., Rep. MP 152/65.
- Shiloni, Y., 1988. The phosphates of the Mishash Fm. and the yellow marls of the Ghareb Fm. - products of a late epigenetic oxidation of rocks which were originally bituminous. 9th conf. on Mineral Engineering, En Boqeq. (in Hebrew).
- Shiloni, Y. & Minster, T., 1984. The coexistence of oil shales and bituminous phosphate in the Rotem-Yamin area. 7th Conf. on Mineral Engineering, Herzliyya, pp. 200-205 (in Hebrew).
- Shirav (Schwartz), M., 1975. Oil shale deposit in the Efe area (Progress Report). Isr. Geol. Surv., Rep. MPBK 400/75 (in Hebrew).

- Shirav (Schwartz), M., 1978. Location of a site for an experimental quarry in the Efe Deposit. *Isr. Geol. Surv., Rep. MPBK 411/75* (in Hebrew).
- Shirav (Schwartz), M., 1987. Pathway of some major and trace elements during fluidized bed combustion of Israeli oil shales. D.Sc. Thesis, Technion, Inst. Technol., Haifa (unpublished; in Hebrew, with English abstract).
- Shirav (Schwartz), M. & Ginzburg, D., 1978. A Guidebook to the oil shale deposits in Israel. *Int. Symp. on oil shale chem. & Tech., Isr. Geol. Surv., Jerusalem*.
- Shirav (Schwartz), M. & Ginzburg, D., 1983. Geochemistry of Israeli oil shales. *ACS Symposium series 230*, Miknis, F. P. & McKay, J.F. (Eds.) pp. 85-96.
- Slotky, D., Issahary, D., Hildebrand-Mittlefehldt, N. & Minster, T., 1983. Rotem oil shale deposit - computerized geological model (CDC's "Mineval" vs. conventional geological model. *Isr. Geol. Surv. Cur. Res.* 1982, pp. 72-75.
- Soudry, D. & Lewy, Z., 1988. Microbially influenced formation of phosphate nodules and megafossil moulds (Negev, Southern Israel). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 64, pp. 15-34.
- Spectrum Engineering, 1992. Rotem oil shale deposit - Mining method feasibility study - final report.
- Spiro, B., 1980. Geochemistry and mineralogy of bituminous rocks in Israel. Ph. D. Thesis, Hebrew University, Jerusalem. (unpublished; in Hebrew, with English abstract).
- Tosco, 1975. Efe oil shale deposit.
- Yerushalmi, J. & Kaiser, A., 1983. Israeli Oil Shale Activities. *Proc., 1983 Eastern Oil Shale Symp.*, pp. 123-140.

סיור א-3

ניאוטקטוניקה בערבה הצפונית

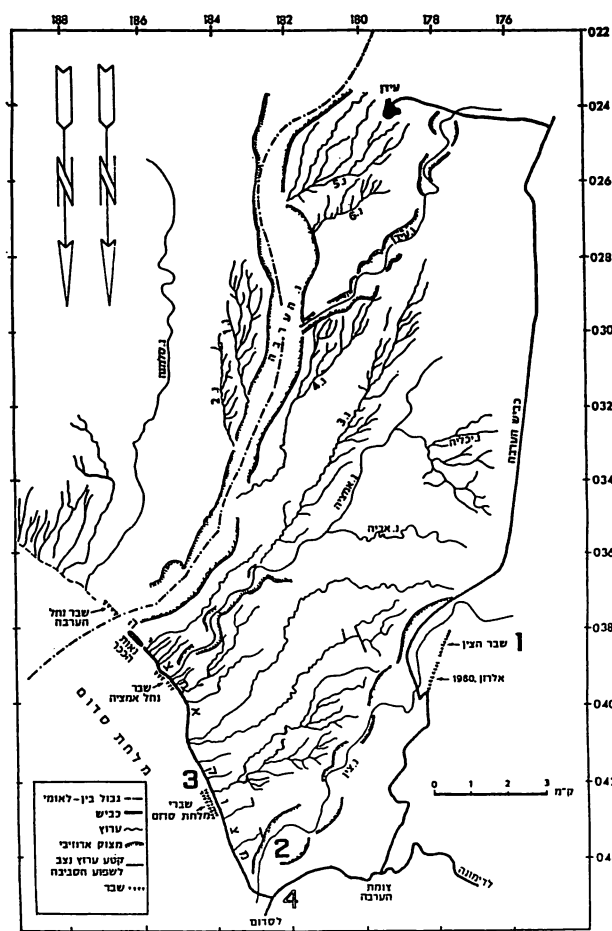
ד. באומן

רקע

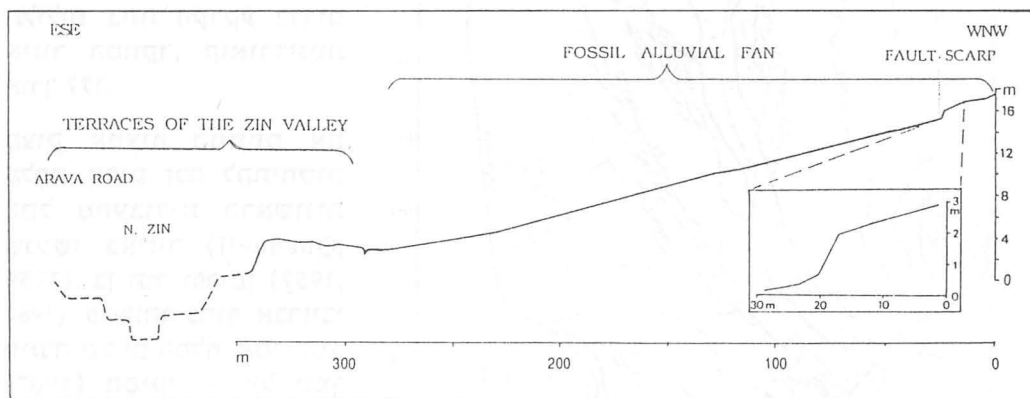
בערבה הצפונית צוינו שברים צעירים מהפליסטוקן העליון ומההווה ע"י ניב ואמרי (1967) כשברי נחל צין ממערב למלחת סדום. אלה מורידים את שולי הבקע ממערב למלחה בבהדרגתיות ומופיעים כמצוקים מורפולוגיים בחוואר הלשון. אלתון (1980) זהה פעילות טקטונית על שבר משני של שולי הבקע באזור נחל צין – כביש הערבה. על סמך הסטות בחלק הגבוה של תצורת הלשון ועל סמך ברקצית שבר עם מרכיבים ליסניים הסיק אלתון כי שבר שולי הבקע פעל כאן במידה מסוימת תוך כדי הרבדת תצורת הלשון אולם לא לאחר מכן. רוזד (1985) סקר את המדרגות לאורך נחל צין. בעיקר מחוץ לבקע, תוך בחינת פרופיל האורך

הקדום של הנחל ללא הסקת
מסקנות טקטוניות. יחיאלי
(1987) שעבד על הקטע
הדרומי, מזכיר שברים צעירים
בבתת הקרקע בין נחל בתרון
לנחל חצבה (1764/0241). May
(1968) מזהה את שבר שולי
הבקע ע"י גרדינטים גרבימטרים
תלולים בתת הקרקע בדרום
איזור המחקר, קואורדינטת
אורך 177.

מצוק אמציה המתחם את
מלחת סדום זכה להתייחסות
החל מהעבודות הראשונות
שנעשו באיזור (Quennell,
1959). בן תור ופרומן (1957,
1961) פרשוהו כחוף אברזיבי
מוגבה של ים המלח. אמרי וניב
(1967) הסיקו – על סמך
הליניאריות הכללית של
המצוק, המעיינות שלאורך
בסיסו וזיהוי תצורת הלשון
בתת הקרקע של מלחת סדום
– כי מדובר בשבר טרנסברסלי
משני במילוי הבקע. גרפונקל
(1981) דן בשבר אמציה
כגבולו הדרומי של גרנן הרומב
של ים המלח ואילו קשאי



שרטוט 1. תחנות הסיום.



שרטוט 2. למעלה: שבר הצין (חיצים מלאים) כליניאנט במניפות פוסט-ליסניות על קו העתק שולי הבקע (מצוק לבן מימין). חלון ארוזיבי מאפשר בחינה סטרטיגרפית. ממזרח מדרגות נחל צין. למטה: חתך דרך שבר הצין.

וקרוקר (1987) הגדירו את שבר אמציה על סמך נתונים סיסמיים כשבר פליסטוקני ליסטרי.

ממכלול העבודות לא ניתן אישור לטקטוניקה פוסט-ליסנית על שבר השוליים המערבי (סנה, 1982) ולא הובאו עדויות לתנועה רצנטית-מודרנית באיזור. מטרת הסיור להציג עדויות מורפולוגיות לניאוטקטניקה הולוקנית-הסטורית בערבה הצפונית. תצורת הלשון והחיפוי המניפתי שמעליה מאפשרים כאן הגדרות גיל. אל קרקעית ימת הלשון ניתן להתייחס כאל מעבדה בגודל טבעי בה נבחנות תגובות מערכות ניקוז הולוקניות על הפרעות ניאוטקטוניות.

תחנות הסיור

תחנה מס' 1 – שבר הצין

שבר הצין נמצא באיזור חצית כביש הערבה את הצין מעל מדרגות הנחל, על תוואי שבר שולי הבקע (שרטוט 1) מדרום לנחל מזר. הטקטוניקה הרצנטית מוסקת כאן על סמך:

א. המורפולוגיה המופרעת המתבטאת במדרגה מורפולוגית על מניפות פוסט-ליסניות פוסיליות. המדרגה משתרעת מאות מטר כליניאמנט בניצב לזרימה בכיוון $N15^\circ E$ (שרטוט 2).

ב. חלון ארוזיבי בניצב לשבר מראה סטריטיגרפיה מופרעת של חוואר הלשון ושל החיפוי המניפתי שמעליו.

האופי הפדוגנטי מלמד כי המשטח השבור הוא צעיר ביותר וחסר למעשה דיפרנציאציה של פרופיל קרקע. מדובר בקרקע רג התחלתית, חלוקית, ללא אופק נקי מאבנים. האופק הוויקולרי הוא ראשוני בלבד, הצבע חום חור $10\text{ YR } 6.5/4 - 10\text{ YR } 7/4$ חסר אופק B ומופיעה אדמומיות ראשונית בלבד. אין סימנים כלשהם לאופק פטרובסי ולא קיימים הבדלי גוונים משמעותיים בחתך. תחילת הצטברות גבישי מלח ושבירת חלוקים בעומק 40–50 ס"מ מציינים את ראשית התפתחות אופק C.

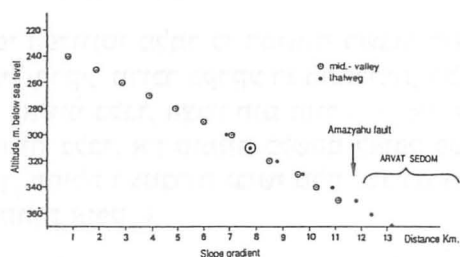
מקומו של שבר הצין על תוואי שבר שולי הבקע מחזק את ההשערה כי מדובר בריאקטיבציה של שבר השוליים ולא בשבר נלווה המסתעף מהראשי. שבירת מניפה פוסט-ליסנית מצביעה בבירור על גיל שבירה הולוקני. חוסר הדיפרנציאציה לאופקים פדוגנטיים, המצריכה סדר גודל של מספר אלפי שנה, מצביעה אף על גיל צעיר מזה, כלומר אפשרי גיל הסטורי. קריטריון מורפולוגי יעיל להערכת גיל השבירה הם שרידי ה-Free Face שקיימים לאורך השבר, דבר המצביע על גיל צעיר מאד, בסדר גודל של עד מספר מאות שנים (Colman & Watson, 1983). חוסר Wash Slope מפותח והשפוע התלול ($21^\circ - 30^\circ$) משלימים את התמונה ומצביעים על סיום התקופה הקצרה של קיום ה-Free Face ותחילת שלב הדגרדציה הבונה בעיקר את ה-Debris Slope, תוך מתון השפוע אל מתחת לסף ההערמות הקריטי. צעירות המשטח השבור מתאשרת גם מבדיקת הכמות הממוצעת של תחמוצת הברזל בפרקציה 0.5–2.0 מ"מ מעומק 15 ס"מ. האחוז המשקלי של Fe_2O_3 על המשטח של המניפה השבורה הוא נמוך ביותר (0.029–0.032).

חישוב גיל השבירה מתאפשר גם ע"י הסתמכות על שיפוע מצוק השבירה והנחת מקדם דגרדציה (K) כלשהו. התחום $0.0004 < k < 0.002$ נראה סביר ביותר מאחר וכל הגילים המתקבלים הם פוסט-ליסניים. תחום זה של מקדמי דגרדציה חופף יפה למקדמים שחושבו עבור שברים בעלי זריקות הקטנות בדרך כלל מ-5 מ' והוא $0.0002 < K < 0.002$ (בגין, 1987).

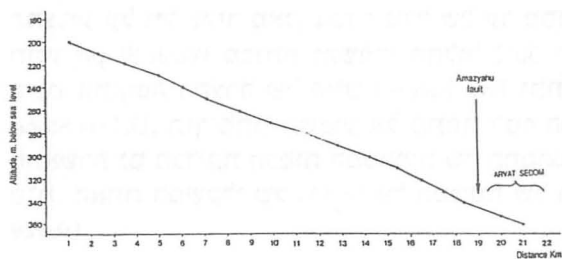
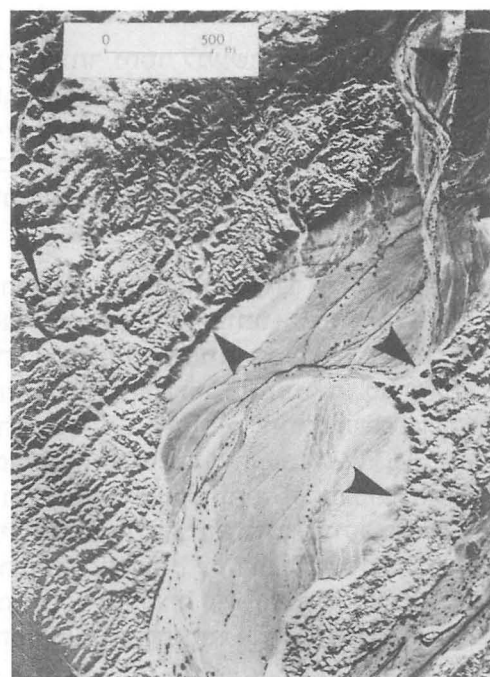
נעשה שמוש בנוסחת Mayer (1984) לקביעת גיל מצוק השבר כתלות בשיפוע ובגובה המצוק,

שם השבר	נ.צ.	סדימנט מופיע	כורר השתרעות הזיכרון	שטח המדרון המאונך פיה שבירה	זרימה מורפולוגית	שטח כספית (θ) של הבזוק	
						טווח שיפוע	בסלע שיפוע
(1) שבר מלחת סדום - דרום	18430424	חרסית	320°	2.5°	6.2 מ'	26° - 38°	$X_{\text{כ}} = 26.7^\circ$
(2) שבר מלחת סדום - צפוני	18430424	חרסית	330°	3.7°	2.5 מ'	26° - 31°	$X_{\text{כ}} = 27.2^\circ$
(3) שבר חצין	17790386	חלוקים	15°	2.9°	1.3 מ'	21° - 30°	$X_{\text{כ}} = 24.3^\circ$

שם השבר	גודל בשנים הנחת שטח פזוק שבר ורטיסלי (Hanks et al., 1984)			חחום הערכת הגודל בשנים (Mayer, 1984)	מגניטודה
	הנחת $X=0.0002$	הנחת $X=0.0004$	הנחת $X=0.002$		
(1) שבר מלחת סדום - דרום	72.531	36.265	7.253	1.616 - 10.000	7.6
(2) שבר מלחת סדום - צפוני	12.309	6.154	1.230	233 - 1434	7.2
(3) שבר חצין	4.184	2.092	0.418	126 - 687	6.9



שרטוט 4. חתך לאורך נחל צין. הצורה קצובה.



שרטוט 5. חתך לאורך נחל הערבה בתחומי
אגם הלשון. הצורה קצובה.

שרטוט 3. נחל צין סמוך למוצאו: עמק
בלתי מפותל עם תעלה המתפתלת
תוך נגיסת המדרונות והרחבת
העמק.

תוך הנחת $k = 0.00044$. כל גילי השברים, המכסימליים והמינימליים, נופלים לפי חישוב זה בתחום ההולוקן (טבלה 1). כמו כן נעשה שימוש בנוסחת Hanks et al. (1984)

$$10 (H/\exp (0.119 \theta - 0.442))^2$$

לחישוב הגיל המינימלי של השבר, כאשר H גובה המצוק במטרים, θ מכסימום תלילות המצוק במעלות. גילי השברים המחושבים לפי Mayer (1984) עם $k = 0.00044$ מ²/שנה מתאימים יפה לגילים המתקבלים בעזרת נוסחת Hanks et al. (1984) עם $k = 0.002$ מ²/שנה. מסקנה אפשרית היא כי קצב הדגרדציה בסדימנט הליסני באזור ים המלח הוא בתחום $0.0004 < k < 0.002$, כלומר גדול מזה שחושב לנגב הצפוני ע"י Begin (1987). שבר הצין מופיע אפוא כצעיר ביותר ואף "מודרני" ממש הן על סמך הממצא המורפולוגי – השתמרות ה-Free Face – והן לפי חישובי הגיל.

תחנה מס' 2 – מערכת הניקוז

דגמי ניקוז של עמקים ודגמי זרימה של תעלות מהווים אינדיקטורים רגישים לשינויי שיפוע ועשויים להיות חיישנים יעילים לתנועות טקטוניות ורטיקליות. קטע נחל מקומי ומוגבל של זרימת פזרות, דגם נפתולי, או פיתולי תעלה, נתפסים כאנומליה פלוביטילית הנובעת מניאוטקטוניקה (Gregory & Schumm, 1987). העמקים הגדולים המתנקזים לערבת סדום: נ. צין, נ. אמציה ונ. הערבה מראים איפיונים הטיפוסיים להתללה טקטונית: הקטע של נחל צין לאורך 4 ק"מ מדרום לשבר אמציה מדגים עמק ישר עם תעלה בודדת המתפתלת בין הגדות תוך נגיסה לטרלית, הרחבת העמק ויצירת מערכת אסימטרית של מדרגות נחל (שרטוט 3). מקדם התפתלות ה-Thalweg הוא כאן גבוה 1.17 והשיפוע 30'–40'. במעלה קטע זה קטנה ההתרחבות הטרלית, אך השרידים לפעילותה ברורים מורפולוגית על סמך המדרגות. ייתכן מאד שפתול תוואי הזרימה לפי המדרגות הנחל הוא תגובה לפעיימה טקטונית בעבר, בעוד שהתעלה המתפתלת כיום מציינת תגובה לפעיימה טקטונית נוספת. נחל צין מראה אפוא באופן מרשים פעילות לטרלית של התעלה, כנראה כתגובה על הרמה טקטונית, כפי שניצפה בניסיונות מעבדה.

נחל אמציה כמו גם הצין מראים נפתוליות הדועכת דרומה. סמוך לשבר אמציה קיים קטע בעל דגם מאנדרי ממש, כלומר נפתוליות של העמק ולא של התעלה. מקדם הנפתוליות הוא 1.16 והשיפוע האורכי 30'–40'. נפתוליות מקומית זו מציינת תגובה חריפה של העמק, ולא של התעלה בלבד, להתללות המקומית. נחל הערבה הוא שונה. באיזור המחקר הוא רחב, בעל דגם פזרות ונתון בעמק בלתי מפותל, אך קיימות עדויות פוסיליות – מדרגות – לפאזה קודמת של נפתוליות תעלתית והרחבת העמק. בעוד שהצין והאמציה נופלים בקטגורית הנפתולים, מציין נחל הערבה מעבר בין הדגם המתפתל לישר. דגם פזרות ותוואי ישר למדי קשורים בהשקעה ובמגמת התללה כתגובה למיתון פרופיל האורך. ההתרחבות הטרלית תוך הרס המדרגות בנחל הערבה מציינת מגמה לאיזון פוסט-טקטוני תוך שימור דגם הפזרות כפי שהוצג מעבדתית ע"י Ouchi (1983).

בחינת פרופיל האורך של אפיקים עשויה לתרום להבנת מידת האיזון המורפולוגי ולרמז על אירועים טקטוניים: תחום שיפועי נחל צין בבקע הוא 30'–40' והפרופיל קצוב לחלוטין (שרטוט 4). שבר אמציה אינו מתבטא כהפרעה בפרופיל האור. השיפוע האורכי של נחל הערבה נמדד לאורך 21 ק"מ (שרטוט 5) בתחומי רצועת הגובה 190 – 370 מ' ונמצא קצוב ללא הפרעה בתחום שיפועים 20'–35'. 31 ק"מ נוספים דרומה תחום השיפועים דומה (18'–34') והפרופיל נשאר קצוב. גם פרופיל האורך של נחל אמציה מצוי בתחום שיפועים 30'–40' וצורתו קצובה ללא נטיה להתקערות כלפי מלחת סדום.

עבודות רבות הראו כי פרופיל אורך הוא בדרך כלל קעור ותואר כפרופיל מעריכי. הקעירות המקסימלית מציינת מצב של איזון. פרופיל אורך קצוב מציין חוסר איזון שעשוי לנבוע מפעילות טקטונית.

תחנה מס' 3 – מצוק אמציה ושברי מלחת סדום

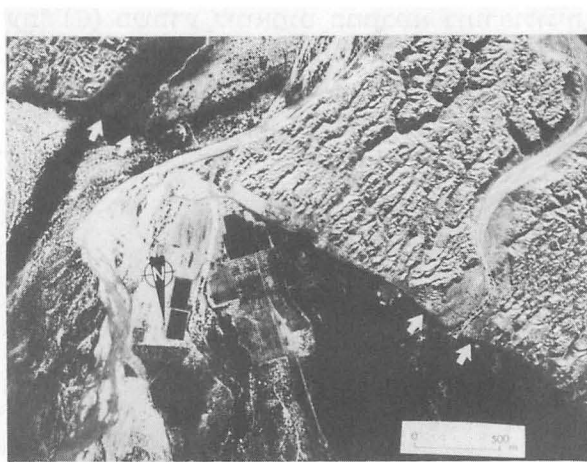
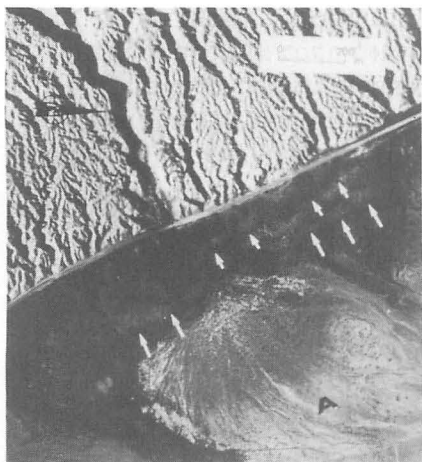
עדות מורפולוגית לריאקטיבציה של שבר אמציה יש לחפש בחזית המצוק ובמוצאי הנחלים המנקזים את רמת החוואר, על תוואי שבר אמציה. רצף מדרגות הנחלים בעמקים מהווה סידרה עתית ומאפשר אבחנת גיל של אירועים טקטוניים פוסט-ליסנים. גיל הריאקטיבציה של שבר אמציה נתן להגדרה על פי מדרגות הנחל שהוסטו על קו המגע שבין רמת החוואר למלחת סדום. מוצא נחל הערבה בצד הירדני בו חסרות המדרגות הנמוכות מעיד על פעימה טקטונית מודרנית. תופעה זו חוזרת כנראה גם במוצא נחל אמציה (שרטוט 6).

מורפולוגיה מדרגתית ברורה וחדה נמצאה במקביל למצוק אמציה במגע עם מלחת סדום. היא מורכבת משני רומים בגובה 6.2 מ' ו-2.5 מ' בעלי שפוע תלול של 32° – 33° , לחילופין עם משטחים סב-הוריזונטליים (שרטוטים 7, 8). בעזרת מחפר בוצעה חפירת תעלות דרך הרומים ודרך חלק מהשלחים, עד לעומק של כ-4 מטר. בכל החפירות נחשפה חרסית אפורה, מסיבית עם עדשות מועטות של חלוקים ושל מלח, אך לא זוהו כל מישורי אי רציפות. חלוקים, האופייניים בדרך כלל לחופי האגם הגבוהים, חסרים על פני המדרגות ובתעלות. גם חוסר משקעי חוואר ואי רציפות מורפולוגית לטרלית, המתבקשת במקרה של מורפולוגיה חופית, מצביעות על כך כי המורפולוגיה אינה של מדרגות חוף מוגבהות, אלא מדובר בהפרעה טקטונית ע"י שני שברים. עדשות המלח בחרסית מעידות על התאידות של גופי מים מצומצמים על הקרקעית החשופה של חוף האגם, ולאחר השקעת המלח קבורתו מחדש בחרסית תוצאת פאזה טרנסגרסיבית.

מניפות סחף הן בדרך כלל גופים סדימנטרים הנוצרים בבסיס גוש המורם טקטונית. נתוח מניפות הוא כלי יעיל לזיהוי ריאקטיבציה של השבר שעליו הן מגשרות. מגע מלחת סדום עם שבר אמציה מאופיין ע"י שורת מניפות בלתי מתמזגות וצמחיה מודגשת במרחב הבין-מניפתי. מצופה כי מניפות מלחת סדום המגשרות על שבר אמציה תהיינה צמודות למצוק השבר. מניפה A שונה ומיוחדת (שרטוט 7) בהיות ראשה בלתי צמוד לשבר אמציה: Apex המניפה הוא כ-150 מ' בתוך המלחה. יחסי שדה חריגים אלה מתבארים ע"י שברי מלחת סדום והתחתרות הנחל דרך השברים ומיקום Apex המניפה צפונה לא צמוד לשבר אמציה. תופעות שברי המלחה והמניפה הבלתי צמודה הן מקומיות בלבד. שברי מלחת סדום קשורים בהנמכת קרקעית הבקע ומתאימים למודל סתימת חלל הדיאפיר של הר סדום כפי שהוצע ע"י Kashai & Crocker (1987).

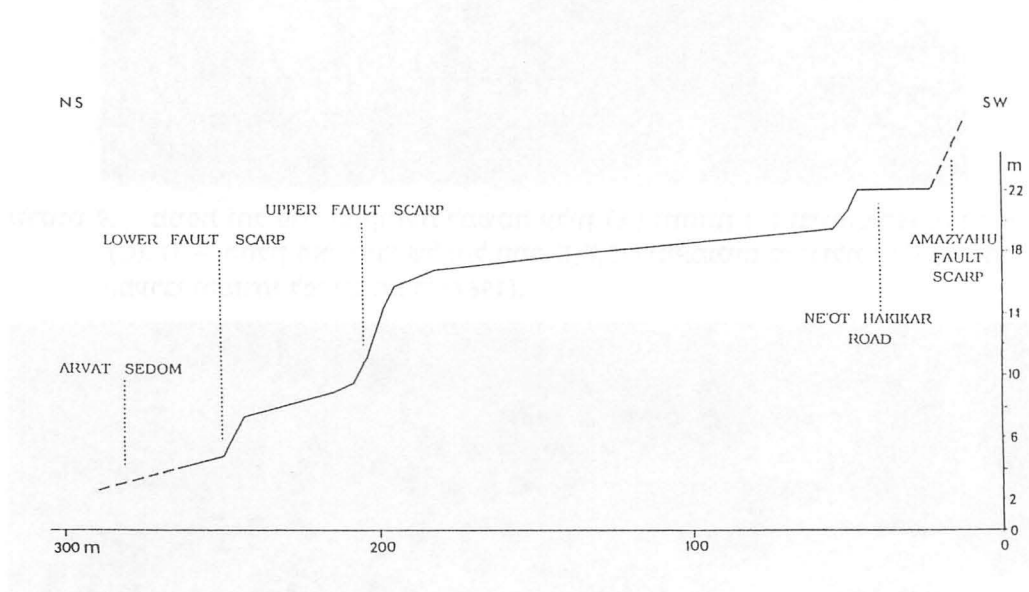
תחנה מס' 4 – מניפת נחל פרס

מניפת נחל פרס מראה מורפולוגיה יוצא דופן: שני משטחים מניפתיים, עליון ותחתון (שרטוט 9 – A, B) וביניהם רצועה הכוללת: דפרסיה מורפולוגית עם מצוקונים אנטיטיים (שרטוט 10), חוואר לשון למינרי מופרע ומעוות הנטוי 30° – 50° ואף ורטיקלית. בקירות נחל תמר, המהווים חלון ארוזיבי, לאורך הכביש לסדום (D), לא נראית כל עדות סטרטיגרפית להעתקה על תוואי הליניאמנט החשוד. הנתונים מצביעים כנראה על גלישה לא עמוקה שיצרה את מפלס הפרס התחתון (B) ולאחר מכן ארע שלב של חיפוי מניפתי מחדש שהוזן מהרס משטח הפרס העליון (C). שיחזור מעין זה הכרחי כדי להסביר באופן א-טקטוני את המורפולוגיה הדו-מפלסית ואת הסטרטיגרפיה המופרעת של חוואר הלשון.



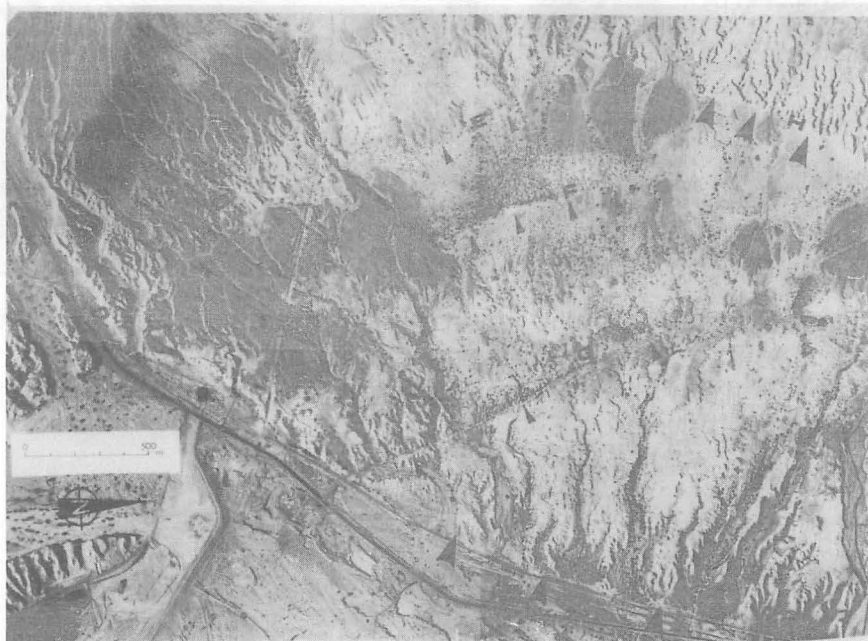
שרטוט 7. שברי מלחת סדום סמוך לכביש נאות הכר: שלחי המדרגות הטקטוניות מופיעים כרצועות בהירות.

שרטוט 6. גדוע טקטוני של מדרגת נחל הערבה על קו שבר אמציה (החיצים משמאל). כנראה שהתופעה קיימת גם במוצא נחל אמציה (החיצים מימין).

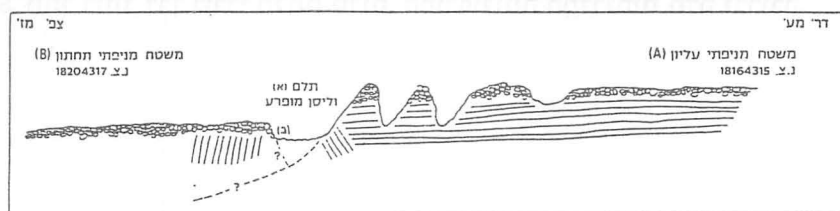


שרטוט 8. חתך רוחב דרך שברי מלחת סדום, המורפולוגיה המדרגתית חדה וברורה.

מערבה לפרס וכהמשך ל"רצועה המופרעת" (C) משתרע ליניאמנט המתבטא במורפולוגיה מדרגתית בלתי חדה (E). במקביל אליו צפונה קיים ליניאמנט מורפולוגי דומה (F). ליניאמנטים אלה מקבילים כולם לסגמנט המערבי של שבר אמציה, בו קיימת דעיכה מורפולוגית מערבה (G). ליניאמנטים I, H המהווים תוואים מצוקיים בליסן, הוגדרו ע"י ניב ואמרי (1967) כשברי הצין המערבי והמזרחי. המערבי עושה רושם צעיר יותר.



שרטוט 9. מניפת נחל פרס המקוטעת למשטח עליון (A) ותחתון (B) וביניהם רצועה ארוזיבית (C). D – החלון האירוזיבי של נחל תמר. G, F, E ליניאמנטים מורפולוגיים. I, H שברי צין המערבי והמזרחי לפי ניב ואמרי (1967).



שרטוט 10. מניפת הפרס: למעלה – מגע המשטח העליון (A) עם המשטח התחתון (B) וביניהם דפרסיה (א) ומצוקונים אנטיסטיים (ב). למטה: חתך סכימתי דרך אותם אלמנטים של מניפת הפרס.

ספרות

- אלרון, א., 1980. הגיאולוגיה של איזור נחל צין התחתון – חצבה, חלק צפוני. המכון הגיאולוגי, דו"ח ממ/79/6, 54 ע"מ.
- בן תור, י. ופרומן, ע., 1957. המפה הגיאולוגית של ישראל 1:100,000 גליון 19: נחל הערבה. המכון הגיאולוגי, ירושלים, 57 ע"מ.
- בן תור, י. ופרומן, ע., 1961. המפה הגיאולוגית של ישראל 1:100,000 גליון 16: הר-סדום. המכון הגיאולוגי, ירושלים, 98 ע"מ.
- גולץ, ס. 1988. אקויפר חצבה ממזרח וממערב לנחל הערבה, שיטות מורפוטקטוניות לאיתור מבנים גיאולוגיים ומנגנוני המלחה. תכנון המים לישראל בע"מ, האגף להידרולוגיה, דו"ח התקדמות 34/88/01, 15 ע"מ.
- יחיאלי, י., 1987. הגיאולוגיה של צפון בקע הערבה ואנטיקלינת מחמל, איזור חצבה. המכון הגיאולוגי, דו"ח GSI/30/87.
- Begin, Z.B., 1987. Quantitative morphologic dating of fault scarps: A review with application to the Northwestern Negev. Geol. Survey of Israel, Report GSI/25/87.
- Colman, S.M. and Watson, K., 1983. Ages estimated from a diffusion equation model for scarp degradation. Science, 221, 263–265.
- Garfunkel, Z., 1981. Internal structure of the Dead Sea Leaky Transform (rift) in relation to plate kinematics. Tectonophysics, 80, 81–108.
- Garfunkel, Z., Zak, I. and Freund, R., 1981. Active faulting in the Dead Sea Rift. Tectonophysics, 80, 1–26.
- Gregory, D.I. and Schumm, S.A., 1987. The effect of active tectonics on alluvial river morphology, in: Richards, K., River Channels: Environment and Process: Basil Blackwell, Oxford, p. 41–68.
- Kashai, E.L. and Croker, P.F., 1987. Structural geometry and evolution of the Dead Sea-Jordan rift system as deduced from new subsurface data. Tectonophysics, 141, 33–60.
- May, P.R., 1968. Gravimetric estimation of the depth of aquifers in the Hazeva area, Arava Valley. Isr. J. Earth Sci., 17, 30–43.
- Neev, D. and Emery, K.O., 1967. The Dead Sea: depositional processes and environments of evaporites, Israel. Isr. Geol. Survey. Bull., 41, 147p.
- Ouchi, S., 1983. Response of alluvial rivers to slow active tectonic movement. Ph.D. dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, Co., 205p.
- Pierce, K.L. and Colman, S.M., 1986. Effect of height and orientation on geomorphic degradation rates and processes: Late glacial terrace scarps in central Idaho. Bull. Geol. Soc. Amer., 97, 869–885.
- Quennell, A.M., 1959. Tectonics of the Dead Sea Rift. 20th Int. Geol. Congr., Mexico, 1956, 385–405.
- Roded, R., 1985. Preliminary observations on Late Quaternary stream terraces along Nahal Zin. Report GSI/45/85.
- Sneh, A., 1982. Quaternary of the N.W. Arava, Israel. Isr. J. of Earth Sci., 31, 9–16.

רות עמירן, אורנית אילן, רולף גיטהרט, דוד אלון, מיכאל סבן

האתר

תל ערד נמצא בסמוך לכביש באר-שבע ערד כ-10 ק"מ מערבית לעיר ערד. מכביש זה פונה דרך סלולה שאורכה 2.5 ק"מ אל התל. ניתן להגיע למקום גם בתחבורה ציבורית (אוטובוסים היוצאים מבאר-שבע לערד ובחזרה), עד לצומת אל התל ומשם ברגל את האתר. שעות הביקור הן 08.00 – 16.00 והכניסה בתשלום.

מאז 1962 חופרת באתר משלחת של מוזיאון ישראל בראשותה של רות עמירן. המשלחת נתמכת כל השנים ע"י רשות העתיקות והחברה לחקירת א"י ועתיקותיה. האתר משוחזר ומוחזק ע"י רשות הגנים הלאומיים, בשיתוף עם המועצה המקומית ערד. במקום מגרש חנייה נרחב, שירותים מסודרים וחורשה.

תולדות האתר

ראשיתו של היישוב במקום בכפר כלקולייתי (האלף הרביעי לפנה"ס) שהיה אחד מכפרים רבים ברחבי צפון הנגב. על שרידיו קם כפר נוסף בעל אופי דומה בתקופה הכנענית הקדומה א' (3150 – 2950 לפנה"ס). תושבי שני הכפרים גרו בבקתות מחומרים מתכלים ובמערות חצובות בסלע, והתפרנסו בעיקר על חקלאות ומרעה.

שיאו של היישוב הוא בתקופה הכנענית הקדומה ב' (2950 – 2650) עם הקמתה של העיר הבצורה בעיצומו של תהליך העיור שהתרחש בכנען. עד נטישתה ב-2650 לפנה"ס היתה ערד העיר היחידה והמרכזית בנגב שקשריה מגיעים עד לדרום סיני ולמצרים.

מסלול הליכה מומלץ למבקר

את הסיור יש להתחיל בתצפית מהמצודה הישראלית (1). מכאן נפרשת לפנינו תמונה מרהיבה של העיר הכנענית כולה. (כמובן שחובה על המבקר להתעכב במצודה הישראלית לפני רדתו אל העיר הכנענית).

מהמצודה מובילה דרך עפר לכיוון המקדשים (2), ומהם דרך הרחוב המוביל אל השער המערבי והחוצה, נעבור על פני הארמון (3) והשווקים (4). מהשער המערבי (5) נצא אל מחוץ לחומת העיר ונסייר לאורכה דרומה עד לשער הדרום-מערבי (6). דרך שביל המסומן באבנים נגיע לאיזור המגורים ב"ברך החומה" ואל הבית המשוחזר (7). באיזור זה כדאי להיכנס לאחד המגדלים (8) ולאורך הרחוב היורד לכיוון מאגר המים להתעכב בשחזור של מבנה מגורים משכבה II על גבי מבנה משכבה III (9). את הביקור נסיים באיזור מאגר המים בו מצויים "בית נציב המים" (10), "מצודת המים" (11) האגפים המערבי (12) והדרומי (13), כולם מתקופת קיום העיר. הבאר והמתקנים שסביבה (14) שייכים לתקופות הישראלית וההרודיאנית.

תיאור האתר

האתר שוכן בשוליה הצפון-מזרחיים של בקעת ערד, על גבעה הנישאת כ-40 מ' מעל למישורי הלס שסביבה. גבעה זו בנויה מסלע קירטון איאוקי וצורתה דמוית קערה ששוליה גבוהים ומרכזה נמוך.

ערד כדוגמה לעיר כנענית

ייחודה וחיבתה של ערד נעוצים בעובדת היותה האתר היחיד הפורש לפנינו תמונה כה רחבה ומלאה של עיר בתקופתה, תקופת ראשית העיור בכנען.

מתוך תמונה זו ניתן ללמוד רבות על אופיו של היישוב, הן מצד התכנון הפנימי-עירוני והן מצד מסכת החיים היומיומית.

תוכנית העיר מצביעה על רמת תכנון עירוני גבוהה, החל מבחירת האתר דרך צורת התפרשות על הגבעה וכלה בחלוקתו הפנימית לרבעים. בחירת הגבעה נבעה משתי סיבות עיקריות:

- א. זמינות של חומר בנייה. הגבעה בנויה מסלע קירטון פריך ונוח לחציבה.
- ב. אל מרכזה הנמוך אפשר להפנות את מי הנגר העיליים ולאגרים. היישוב תחום בחומה עבה (2.5 מ') ולה מגדלים, שערים ופשפשים. עד כה נתגלו 11 מגדלים, 2 שערים ו-2 פשפשים. קו החומה תואם את תוואי פרשת המים. כלומר, מי הנגר העילי מנוצלים ניצול מירבי.

העיר מחולקת לרבעים בעלי תפקידים שונים. בין הרבעים ובתוכם פרושה רשת של רחובות היקפיים (במקביל לחומה) ורחובות רדיאליים (מן החומה לכיוון המאגר). הרחובות הרדיאליים שימשו גם כעורקי תחבורה וגם לניקוז מי הגשמים אל מאגר המים.

המתחם המקודש (2)

איזור זה מורכב מצמד מקדשים גדול, צמד מקדשים קטן ומבנה טקסי שלו חצר גדולה וחדר צדדי.

צמד המקדשים הגדול מורכב משני אולמות רוחב ענקיים זהים בגודלם. האולם הדרומי היה עשיר בכלי חרס ובממצא אחר. בחלקו הדרומי נמצאה תקועה ברצפה אבן מלבנית העשויה מאבן גיר קשה, מסותתת להפליא מכל צדדיה. אפשר ששימשה כמצבה פולחנית.

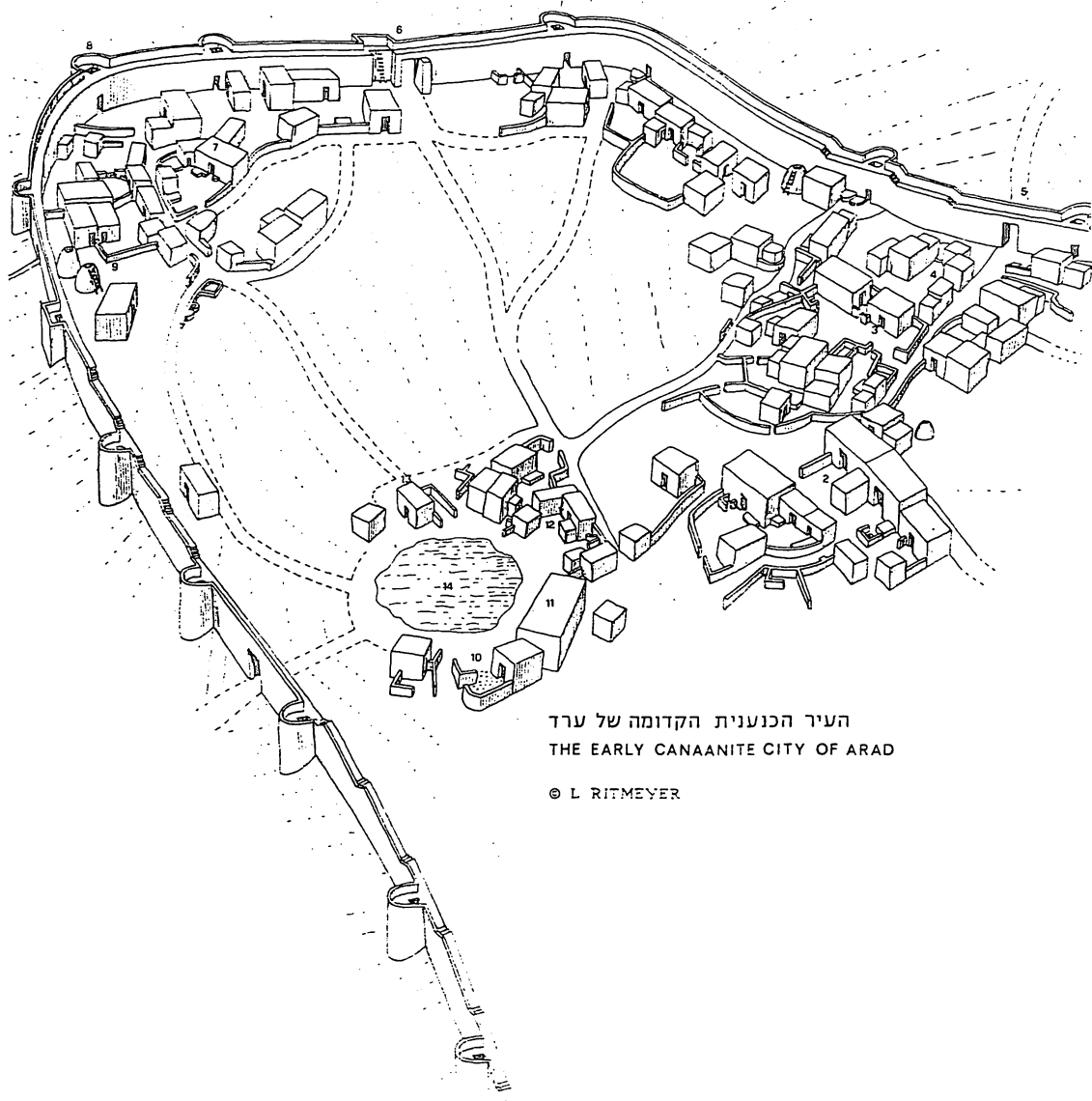
האולם הצפוני מחולק חלוקה פנימית לתאים. בחצרו נמצא מזבח אבן גדול ולידו אגן פולחני. האגן בנוי מלוחות אבן ורצפתו עשויה אבן אחת עגולה ומסותתת.

צמד המקדשים השני – מזרחה – קטן בהרבה. תחת רצפתו של הדרומי מבין החדרים נמצאה מנחת יסוד הכוללת כמה כלי חרס וגוש ביטומן גדול. מנחות יסוד הן מנהג מוכר ונפוץ במקדשים במזרח הקדמון. האולם הענק בדרום שימש אולי כמבנה לטקסים.

חזיתות המקדשים והאולם הטקסי פונים מזרחה לכיוון השמש העולה, תופעה התחזרת על עצמה לאורך אלפי שנים.

"הארמון" (3)

זהו מכלול של חדדים, תאים וחצרות פנימיות הקשורים זה בזה ומבודדים מסביבתם. גרעין המכלול הוא חדר גדול שאליו מוביל חדר מבוא קטן. בחדר נמצאה מצבת אבן קטנה מקירטון



העיר הכנענית הקדומה של ערד
THE EARLY CANAANITE CITY OF ARAD

© L. RITMEYER

מקרא

1. מצודה
2. המקדשים
3. הארמון
4. השווקים והחוצות
5. השער המערבי
6. השער הדרום-מערבי
7. הבית המשוחרר
8. מגדל
9. בית משכבה II על גבי בית משכבה III
10. בית נציב המים
11. מצודת המים
12. הגוש המערבי
13. הגוש הדרומי
14. הבאר הישראלית

שעליה חרותות שתי דמויות אדם, האחת ניצבת והאחרת שרועה (בקבר?) ולהן ראשים דמויי שיבולת. לפנינו תיאור פולחני הלקוח מעולם האלוהות הצמחית: הדמות השרועה מסמלת את הכמילה והמוות והדמות הניצבת את החזרה לעולם החיים. סמיכותם של הארמון והמקדשים זה אל זה ומציאותם של חפצים פולחניים בארמון מלמדת על הקשר בין השניים. ייתכן שהמלך היה גם הכהן הגדול, כמזכיר לנו בעולם הקדום – בשומר.

השווקים והחוצות (4)

בשטח שבין הארמון והשער המערבי מצויים מבנים בעלי קירות דקים וביניהם שטחים פתוחים. קרבתו של האזור אל שער העיר כמו גם תכולתם של המבנים (שפע של קנקני אגירה גדולים), מלמדים על אופיו הציבורי-מסחרי.

רובע המגורים (7,8,9)

לאורך החומה, בין השער המערבי לשער הדרום-מערבי ובאזור "ברך החומה" בדרום העיר, משתרע אזור בתי המגורים הפרטיים. יחידת המגורים הפרטית מורכבת מחדר עיקרי גדול, חדר צדדי קטן וחצר. לפעמים מוקפות היחידות בגדר אבן אך אין זה כלל. דוגמה יפה ליחידת מגורים ערדית טיפוסים היא הבית המשוחזר (7). "הבית הערדי" הוא בית רוחב שהכניסה אליו מצויה בקיר האורך, לאורך קירותיו ספסלי אבן ובמרכזו בסיס אבן לעמוד העץ שתמך את קורות התקרה.

בחדר המשוחזר מצויים העתקים של הכלים המקוריים שהיו בו, והמבקר יכול להתרשם ממגוון כלי החרס שבהם השתמשו, החל מכלי אחסון קטנים דרך כלי בישול וכלה בכלי אגירה גדולים.

דוגמה מאלפת, הממחישה את שני פרקי הזמן שבהם שגשה העיר, באה לידי ביטוי במבנה משכבה II הבנוי על חדר ענק משכבה III (9).

אזור מאגר המים (10 – 14)

כאן, בלב העיר הכנענית היה מאגר המים הפתוח שהוקף בחגורת מבנים, המורכבת מיחידות ארכיטקטוניות השונות באופיין ובייעודן. בקטע הדרום-מזרחי הריק ממבנים הוקם כנראה הסכר שחסם את מהלכם הטבעי של המים לכיוון הבקעה ואיפשר את היקוותם.

"מצודת המים" (11) היא המבנה המסיבי ביותר שנחשף עד כה בערד. היא בנויה אבנים גדולות מאד, קירותיה עבים ותוכניתה מיוחדת: חמישה אולמות צרים וארוכים. אופיו הביצורי של מבנה זה הסמוך למים מתיר להניח שאכן היה קשור בשמירה על המים היקרים מכל יקר. בניין המידות, הסמוך למצודה, בנוי בשכבה III מחדר עיקרי, שני חדרי צדדיים ושלוש חצרות מרוצפות בריצוף אבן יפה. זהו למעשה בית המידות היחיד באזור המאגר ולכן זכה לכינוי "בית נציב המים" (10).

האגפים המערבי (12) והדרומי (13) בנויים מיחידות מגורים קטנות וחצרות, קרוב לוודאי שהתגוררו בהן אומנים שעסקו במלאכות הקשורות במים, כגון בורסקאות.

הבאר והמתקנים שסיבבה (14)

בלב מאגר המים של העיר הכנענית נחפרה בתקופה הישראלית באר עמוקה אל מי התהום העיליים. בתחתיתה חצובה הבאר בסלע הקירטון ודפנותיה מדופנות באבני צור גדולות. מן הבאר הובלו המים על גבי בהמות משא אל הבור שבמצודה.

בתקופה ההרודיאנית שופצה הבאר ונבנו מעל לאבני הצור המקוריות נדבכים מאבן גיר מסותתת. סביבה הוקמו בפרק זמן זה מתקנים לאגירת מים ולהשקיית העדרים.

ה"אזור המגוון" (תצורת חתרורים) בבקעת חתרורים

אבי בורג, המכון הגאולוגי והאוניברסיטה העברית

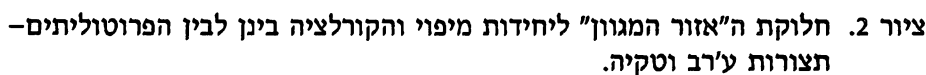
מטרות הסיור:

1. להראות שה"אזור המגוון" בבקעת חתרורים הינו בר חלוקה ליחידות מיפוי למרות היותו יחידה מטמורפית אחת.
2. להציג את יחידות המיפוי השונות, הרכבן הליתולוגי והמינרלוגי ויחסי השדה שלהן.
3. לקבוע את הקורלציה בין יחידות המיפוי השונות לפרוטוליתים (סלעי המקור) – תצורות ע"ב וטאקיה.
4. להציג הוכחות להתמרת גופי קונגלומרט קטנים שגילם סוף מיוקן – פליוקן. לקשור בין גיל הקונגלומרטים לגיל ההתמרה כפי שנקבע בשיטות רדיומטריות.
5. להציג תופעות שהתרחשו בזמן ההתמרה ולאחריה, כגון: גלישות, תופעות בליה ויצירת מינרלים אקזוטיים.
6. להציג הוכחות למסקנות הבאות:
 - א. ההתמרה שנגרמה מבערת החומר הביטומני שהיה ספוג בפרוטוליתים הינה תופעת פני שטח, החודרת לעומק עשרות מטרים בלבד. הגורם העיקרי למגבלה זו הוא הצורך בחמצן אטמוספרי לבערה.
 - ב. הבערה התרחשה במוקדים. חדירת החמצן למוקדים ופליטת הגזים שנוצרו בתהליך הבערה נעשו דרך סדקים רחבים.

מבוא

סלעי ה"אזור המגוון" – "Mottled Zone" (Picard, 1931) נחשפים מעל סלעי תצורת מישאש (ציור 1) בכ-15 מחשופים שונים בישראל ובירדן. צבעוניותם הרבה משכה את עיני החוקרים כבר בסוף המאה הקודמת ומאז הוצעו הסברים שונים לאופן יצירתם, כגון: השפעת גוף בצר ברזלי המצוי בתת הקרקע, מקור וולקני, אלטרציה בנוכחות תמיסות עשירות במרכיבים מתכתיים, פגיעת שביט ותהליכים דיאגנטיים שונים. Lees (1928) היה הראשון שהציע את המנגנון המקובל כיום לאופן יצירתם: שריפת סלעים קרבונטיים ביטומניים.

בשנות השישים זוהו לראשונה מינרלים של טמפרטורה גבוהה בסלעי ה"אזור המגוון": ספוריט, בראונמילריט וגהלניט (Bentor et al., 1963a,b). עבודה מקיפה על המינרלוגיה של סלעי ה"אזור המגוון" נעשתה בשנות השבעים ע"י ש. גרוס. בסיכומה (Gross, 1977) תוארו 123 מינרלים שונים הבונים את סלעי היחידה, מהם שמונה שהיו ידועים רק כתוצרים סינתטיים. בהמשך תארה ש. גרוס שני מינרלים חדשים נוספים: בנתורט ויעלימיט (Gross, 1984, 1980). בעקבות פיענוח המינרלוגיה המורכבת של סלעי ה"אזור המגוון" נערכו מחקרים פטרולוגיים, גאוכימיים ואיזוטופיים של סלעי היחידה, ובהם הוצע מודל לאופן הבערה וההתמרה.



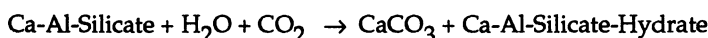
התהליכים העיקריים שהתרחשו בזמן בערת הסלע הקרבונטי הביטומני היו דקרבוניזציה, הידרציה ויצירת מינרלים בהרכב קלציום-סיליקט וקלציום-אלומיניום-סיליקט, השייכים לפצאס המטמורפית הסנידינית והפירוקסן-הורנפלט. פרט לשיחור CO_2 ומים, תהליך ההתמרה בכללו היה איזוכימי.

התהליכים שהתרחשו בזמן ההתמרה ניתנים להצגה בנוסחא הכוללת הבאה:



המינרלים העיקריים שנוצרו בתהליך זה והמופיעים בסלעי ה"אזור המגוון" הם ספוריט, לרניט, גהלניט, בראונמילריט, דיופסיד, וולסטוניט, גרנטים ואנורטיט.

בתום הבערה, וכתוצאה ממגע בין הסלעים המותמרים לאטמוספירה, החל תהליך חוזר של קליטת CO_2 ומים. תהליך זה ניתן להצגה בנוסחא הכוללת הבאה:



בתהליך זה נוצרו מינרלים קרבונטיים כקלצט, ארגוניט, ווטריט ומינרלים שהרכבם הכללי הוא קלציום-סיליקט-הידרט וקלציום-אלומיניום-סיליקט-הידרט, כהידרוגרוסולר, טוברמוריט, ג'ניט, אטרינגיט, אפוויליט, בייריט ופורטלנדיט. מאסף מינרלים זה (מאסף רטורגדי) יוצר גופי סלע אירגולריים, והוא שכיח בעורקים החוצים את הסלעים המותמרים השונים.

בדיקת האיזוטופים היציבים של פחמן וחמצן בסלעי ה"אזור המגוון" (Bentor et al., 1972; Matthews and Kolodny, 1978; Kolodny and Gross, 1974) הראתה הדלדלות באיזוטופים הכבדים C^{13} ו- O^{18} עם העליה בטמפרטורת הבערה ובדרגת ההתמרה, ואישרה שדקרבוניזציה ושיחלוף עם CO_2 ממקור אורגני היו השינויים העיקריים בזמן הבערה. הוצע מודל של זיקוק ריילי עבור ההדלדלות השיטתית באיזוטופ החמצן הכבד עם העליה בדרגת ההתמרה.

נסיון ראשון לחלק את סלעי ה"אזור המגוון" ליחידות מיפוי הוצע ע"י בן-תור ופרומן (1960). בעבודתם, הם חילקו את סלעי ה"אזור המגוון" שבבקעת חתרורים על בסיס ליתולוגי-מורפולוגי לשלש יחידות מיפוי (S_{4m1-3}). בורג (1990) חילק את ה"אזור המגוון" בבקעת חתרורים לחמש יחידות מיפוי (ציור 2). הקריטריון שעל פיו נקבעו יחידות המיפוי הוא הדרגה המטמורפית, החל ביחידה של סלעים קרבונטיים לא מותמרים, וכלה ביחידות של פצאס התמרה גבוהה, בהן תהליך הדקרבוניזציה הושלם או כמעט הושלם. סלעי יחידות המיפוי יוצרים גופי סלע אי-רגולריים המכסים שטח של עשרות מ"ר עד מספר קמ"ר, וביניהם חשופים סלעים של יחידות מיפוי אחרות.

יחידת המיפוי של הסלעים הלא מותמרים מורכבת מקירטונים וחוארים השייכים לתצורות ע'רב וטאקיה (Kug, Tlt). ארבע יחידות המיפוי האחרות מורכבות מסלעים מותמרים. יחידה KuPh1 היא הנפוצה שבהן, בונה 60–70% משטח בקעת חתרורים, ומורכבת בעיקר מסלעים קרבונטיים מגוונים בצבעם. יחידה זו היא תוצר התמרה חלשה (בטמפ' של כ-200°C עד 300°C) של סלעי הפרוטוליטים, התמרה המתבטאת ברקריסטליזציה, העלמות הפאונה, גיוון בצבעים ושיטוש הבדלים בין פרוטוליטים קרבונטיים שונים. סלעי היחידה עשירים בגבס ובעורקים שונים והם מופיעים לכל אורך חתך ה"אזור המגוון" בין סלעים השייכים ליחידות מיפוי אחרות. סלעים רטורגדיים רבים מפזרים אף הם בין סלעי היחידה ושייכים לה. בחלק התחתון של היחידה מצויים גופים מסיביים וקטנים בקוטר מספר מטרים המציניים התמרה

גבוהה. גופים אלו בנויים משני סוגי מסלע, האחד מורכב בעיקר מהמינרל גהלניט והשני – שהוא בעל מבנה של עדשות – בעיקר מהמינרל לרניט. גופים אלו אינם ברי מיפוי בשל גודלם ועל כן הם נכללים בתוך יחידה KuPh1.

שלוש יחידות המיפוי הנוספות (KuPh2-4) מציינות התמרה בינונית עד חזקה, והן שייכות לפציאס ההתמרה הפירוקסן-הורנפלט והסנידיניט. סלעי היחידות מורכבים ממאספי מינרלים קלציום-סיליקטים וקלציום-אלומיניום-סיליקטים, המציינים טמפ' התמרה גבוהות יותר (400°C – 800°C). ההתמרה הבינונית והחזקה מחדדת הבדלים ליתולוגיים בין פרוטוליתים קרבונטיים שונים.

יחידה KuPh2 היא התחתונה והנפוצה מבין יחידות הפציאס הגבוהה. היא מחולקת לשתי תת-יחידות, אשר בשתייהן המינרל השולט הוא בהרכב קלציום-סיליקט: התחתונה מורכבת מגופי שיש ספוריט-קלצט, המכסים שטח של עשרות ומאות מ"ר ויוצרים מצוקים, והעליונה מורכבת בעיקר סלע לרניטי המאופיין במבנה טרשי.

יחידה KuPh3 מונחת מעל ליחידה KuPh2 ואף לטרלית לחלקה העליון. מחשופיה מרוכזים בצפון בקעת חתרורים ומורכבים מסלעים בעלי גוון ירקרק בדומה לצבע זית (ולכן הכינוי סלעי ה"אוליב" שניתן ע"י בן-תור, 1949), עשירים בתרכיזי בריט ומגהמיט. המינרלים העיקריים הבונים את סלעי היחידה הם דיופסיד, אנורתית, גרנטים, גהלניט, זאוליטים, וולסטוניט וקלצט.

יחידה KuPh4 מונחת על גבי יחידה KuPh3. מחשופיה נדירים ומוגבלים למספר ראשי גבעות בצפון בקעת חתרורים. סלעי היחידה משוכבים היטב ומורכבים בעיקר לרניט ושיש ספוריט. נטית השכבות משתנה בכיוונה ובשיפועה בתחומי אותו מחשוף, ומגיעה עד 34° . במספר מקומות השכבות גם מעוותות. תופעות אלו קשורות כנראה לגלישת סלעי הפרוטוליתים החואריים של יחידה KuPh3 בזמן ההתמרה, ובעקבות כך לאבדן התשתית של סלעי יחידה KuPh4.

ההתמרה הבינונית והחזקה מחדדת כאמור הבדלים בין פרוטוליתים קרבונטיים שונים, ומאפשרת קורלציה בין סלעי יחידות ההתמרה הגבוהה לבין הפרוטוליתים (ציור 2). קורלציה זו מתבססת על:

1. השוואת ההרכבים הכימיים.
2. גיל פלאונטולוגי של הסלעים הלא מותמרים המצויים לטרלית לסלעים המותמרים.
3. אלמנטים טקסטורליים וסטרוקטורליים שנשמרו על אף ההתמרה, כגון: שיכוב, תרכיזים שונים, מאובנים גדולים.
4. יחסי שדה בין היחידות השונות.

סלעי הגהלניט והלרניט בחלק התחתון של ה"אזור המגוון" מתאימים לפרט התחתון של תצורת ע'רב המורכב מחואר קירטוני (ציור 2). סלעי שיש הספוריט-קלצט הבונים את רוב יחידה KuPh2 מתאימים לפרט העליון הקירטוני של תצורת ע'רב. סלעי יחידה KuPh3 מתאימים לפרט התחתון החוארי של תצורת טאקיה, והסלעים המשוכבים של יחידה KuPh4 מתאימים לפרט העליון (פרט חפיר) של תצורת טאקיה. הופעת סלעי לרניט השייכים לגג יחידה KuPh2 בין סלעי ה"אוליב", מעידה על השונות הליתולוגית שהיתה בפרט התחתון של תצורת טאקיה בבקעת חתרורים.

הקורלציה בין יחידות המיפוי השייכות לפציאס ההתמרה הגבוהה לבין פרוטולית מסוים מאפשרת להשתמש ביחידות מטמורפיות אלו גם כיחידות סטריטיגרפיות, ובעזרתן לערוך מיפוי סטרוקטורלי. ואכן מיפוי סטרוקטורלי של צפון בקעת חתרורים, שהתבסס על מחשופי יחידה

KuPh₃ והמחשופים הלא מותמרים של בסיס תצורת טאקיה, הראה דמיון רב למפה הסטרוקטורלית של בסיס תצורת מישאש.

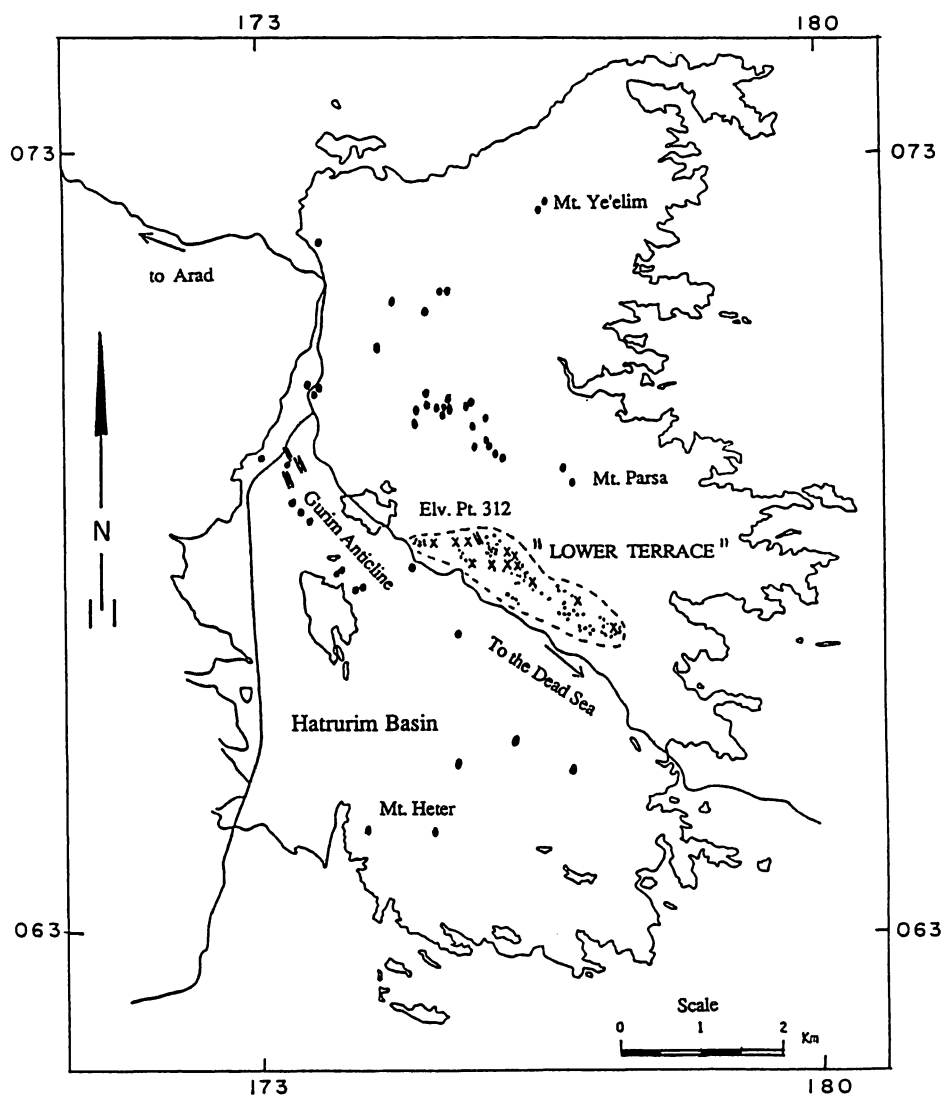
תופעות התמרה קיימות גם בגג תצורת מישאש. כאן קיימים מעברים לטרליים מסלעי פוספוריט לא מותמרים לסלעי פוספוריט מותמרים בעוצמה שונה. בסלעים המותמרים בפציאס נמוכה אין שינוי טקסטורלי, פרט להשחרה ואבדן הריח האופייני, ואילו הסלעים המותמרים בפציאס גבוהה הם אדומים או ירוקים ובעלי מבנה גבישי צפוף. הפרנקוליט המצוי בפוספוריטים הלא מותמרים עובר כתוצאה מההתמרה דקרבוניזציה לפלואור אפטיט (Matthews and Nathan, 1977).

קונגלומרטים שהיו פזורים ברחבי בקעת חתרורים הותמרו כתוצאה מבערת הסלעים הביטומניים שתחתם. קג"ל אלו הם פולימיקטיים, ומכילים חלוקים שונים שמקורם מקמר זוהר שממערב לבקעת חתרורים (חלוקי צור ופוספט של תצורת מישאש, חלוקים קרבוניטיים שמקורם בחבורת יהודה וחלוקי "צור יבוא" שמקורם בתצורת חצבה) וכן חלוקים שנגזרו מסלעי הסביבה הקרובה. גופי הקג"ל המותמר יוצרים מחשופים ששטחם מספר מ"ר עד עשרות מ"ר, למעטים מהם מבנה דמויי דייק רחב שכיוונו שונה מכיוון הסידוק הטקטוני בסלעים הלא מותמרים. ההתמרה גרמה להקשיית הקג"ל, לשינויים טקסטורליים במרכיביהם (התכהות החלוקים וסידוקם – תמונה 1), להופעת מינרלים מטמורפיים במטריקס ובחלוקים ולעליה במידת הגיבוש של חלוקי הצור (גינות, 1990). גופי סחף עבים המצויים במספר מקומות בבקעת חתרורים עברו התמרה חלשה או לא הותמרו כלל כיון שמנעו מעבר חמצן לבערת הסלעים שתחתם.

יחסי השדה והרכב החלוקים הבונים את הקג"ל המותמרים מאפשרים הפרדתם לשתי קבוצות. חלק מגופי הקג"ל המותמר מפוזרים אקרעית ברחבי בקעת חתרורים, אחרים מרוכזים בין הר פרסה לכביש ערד-סדום בין הגבהים 220 עד 312 מ', ובונים טרסה בעלת מפלס ברור הנוטה לדרום מזרח ("הטרסה הנמוכה", ציור 3). נטיה זו והרכב הקג"ל מעידים שמערכת הניקוז שהשקיעה את הקג"ל מאוחרת להשקעת תצורת חצבה וזרמה לבקע ים המלח. פתיחת הבקע התרחשה כנראה בסוף המיוקן-פליוקן (Zak and Freund, 1981); גיל הטרסה הוא על כן לא עתיק מפליוקן.



תמונה 1. חלוק 'צור יבוא' מותמר. ההתמרה מתבטאת בסידוק לאורך למינות הפורמיניפרים.



Legend

- - Cemented Conglomerate; Affected by thermal event.
- x - Uncemented Conglomerate; Not affected or slightly affected by thermal event.
- // - "quartzitic dike". Affected by thermal event.

ציור 3. מפת מחשופי הקונגלומרטים בבקעת חתרורים.

מספר גורמים הביאו לבערה ולהתמרה של סלעי הביטומן ולעיצוב ה"אזור המגוון" במתכונתו הנוכחית:

1. **סלעי המקור.** הרכב הפרוטוליטים קבע את מאספי המינרלים והרכב הסלעים שנוצרו בזמן ההתמרה.

2. **חומר הדלק לבערה.** כדי שתתרחש בערה יש צורך בדלק. החומר האורגני שהיה בסלעי הפרוטוליטים הביטומניים (תכולה של 10–20%) שימש כדלק לבערה. תכולה של 10–20% חומר אורגני היא יותר מהדרוש כדי להעלות את טמפ' הסלעים ל- 400°C – 800°C שהיא הטמפ' שבה נוצרו רוב סלעי ה"אזור המגוון".

בנגב מוכרים חתכים סטרטיגרפיים בהם תצורת ע'רב עשירה בחומר אורגני. לא מוכר בנגב מקום בו תצורת טאקיה עשירה בחומר אורגני. האם יתכן שהתמרת תצורת טאקיה בבקעת חתרורים התרחשה בעקבות בערת סלעי תצורת ע'רב? אפשרות זו לא סבירה מכיון שחום הבערה לא הורגש מעבר למטרים בודדים כפי שמוצג במעבר מסלעים השייכים לפציאס התמרה גבוהה לסלעים שלא הותמרו, וכפי שנראה במספר מחשופי קג"ל. המסקנה מכאן היא שתצורת טאקיה הותמרה מכיון שהיתה ביטומנית. שתי עדויות לכך:

1. בעין בוקק שממזרח לבקעת חתרורים מצוי חתך של תצורת ע'רב וטאקיה ביטומני לכל אורכו. מחשוף זה היה קשור לפני פתיחת בקע ים המלח לבקעת חתרורים.
2. במחשופים לא מותמרים מעטים של תצורת טאקיה בבקעת חתרורים נמצא חומר אורגני שאריתי.

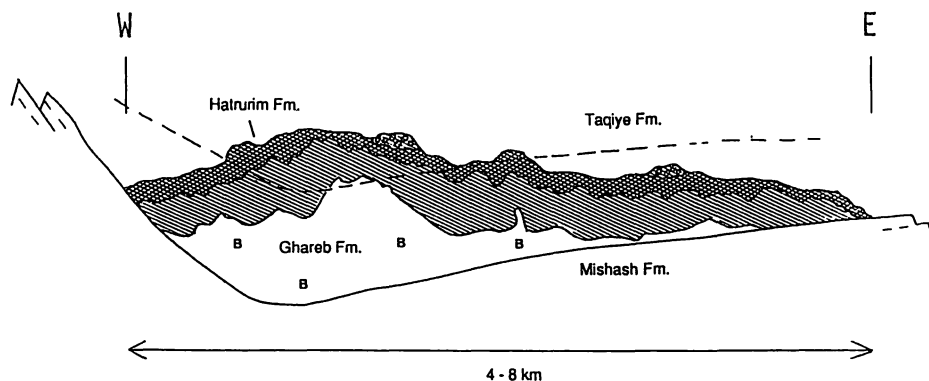
3. **חמצן לבערה.** חשיפת הסלעים הביטומניים לאטמוספירה חיונית כדי לגרום להצתת הביטומן ולבערתו. עומק חדירת החמצן קובע את עומק הבערה ואת עובי החתך שיותמר. ה"אזור המגוון" מהווה על כן "קרום" שעוביו עד עשרות מטרים והוא עוקב אחרי פני השטח כפי שהיו בזמן ההתמרה (ציור 4). עובי הקרום המותמר איננו קבוע אלא משתנה בכל מקום ומקום כפונקציה של עומק הסדקים שהחדירו חמצן. ככל שהסלע הביטומני קרוב יותר לפני השטח, החמצן לבערה זמין יותר והגזים הנפלטים בזמן הבערה משתחררים ממנו מהר יותר. סלעים מטמורפיים של הפציאס הגבוהה צפויים על כן להמצא סמוך יותר לפני השטח.

ערוצים הפורצים כיום את "הקרום" המותמר חושפים סלעים לא מותמרים ואף ביטומניים (ציור 5). כך גם קידוחים שנקדחו במקומות שונים בבקעת חתרורים. במחצבות שיש הקלציטי-ספוריט המפוזרות ברחבי הבקעה הסתבר לחוצבים שהשיש מסתיים בעומק של לא יותר מ-10–20 מ', ומתחתיו מופיעים סלעים של יחידה KuPh1 ובעומק רב יותר אף סלעים לא מותמרים.

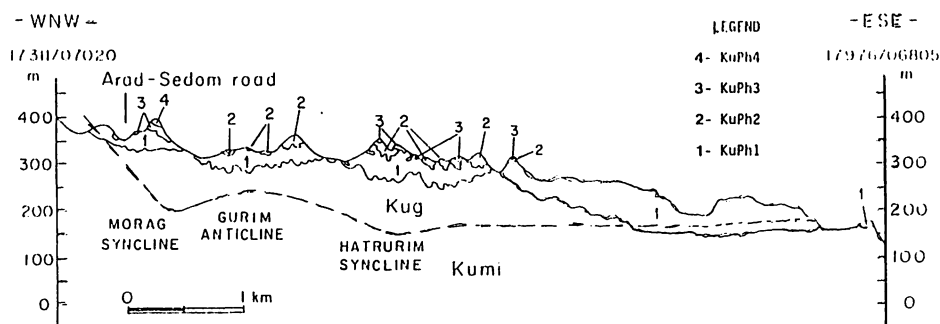
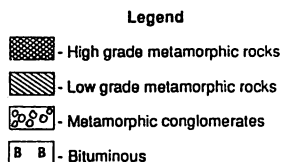
אזורים שהיו מכוסים בסחף (כגון בקעת גורר וראש נחל מורג), אשר מנע פתיחת סדקים וחדירת חמצן לעומק, לא הותמרו כלל.

הבערה התרחשה במוקדים. החמצן הגיע למוקדים דרך סדקים אשר נוצרו בזמן ההתמרה כתוצאה מאבדן נפח בסלע ולחץ הגזים המשתחררים. הסדקים דרכם חדר החמצן לא נשמרו אלא אם נלכד בתוכם סחף, או התרחשה התמרה חזקה לאורכם ונוצרו "דייקי חול", "דייקי קג"ל" ו"דייקי שיש".

חשיפת הסלעים הביטומניים לאטמוספירה והצתתם חייבים להיות מהירים שאם לא כן החומר הביטומני בסלעים שבפני השטח יתחמצן וההתמרה תמנע. בעקבות פתיחת הבקע בסוף



ציור 4. חתך סכמטי דרך בקעת חתרורים כפי שהיתה בזמן ההתמרה. החתך מראה את ה"קרום המותמר" ויחסו לסלעים הלא מותמרים שתחתיו.



ציור 5. חתך גאולוגי דרך צפון בקעת חתרורים. החתך מראה את ה"קרום המותמר" ויחסו לסלעים הלא מותמרים שתחתיו.

המיוקן-פליוקן (Zak and Freund, 1981) החלה ארוזיה אינטנסיבית של קמרי הנגב הצפוני, בה הוסרו הסלעים הפריכים של תצורת חצבה אשר כיסו את בקעת חתרורים ונחשפו הסלעים הביטומניים. מחשופי הקג"ל של ה"טרסה הנמוכה" הם קרוב לודאי שרידים של אחת התעלות שהובילו סחף לבקע. תהליכי חימצון אקזותרמיים של החומר האורגני גרמו מיד לאחר החשיפה להצתת החומר האורגני ולבערתו. על סמך אנליזות אשלגן ארגון ו-ESR (א. היימן, דברים בע"פ; Tzur et al., 1991; Porat et al., 1991) וניתוח כיוונים מגנטיים בסלעים המותמרים (Ron and Kolodny, 1992), נמצא שגיל ההתמרה לא עתיק מפליוקן. גיל זה מחזק את המודל המוצע.

תיארוך מאורע ההתמרה בסלעי ה"אזור המגוון" במעלה אדומים נתן גיל של מיוקן תיכון (Kolodny et al., 1971). יש יסוד להניח שכל מחשוף של סלעי ה"אזור המגוון" נדלק ובער בתקופה אחרת כפונקציה של זמן חשיפת הסלעים הביטומניים לחמצן האטמוספרי.

4. **משך הבערה.** משך הבערה בכל מוקד היה על פי חישוב עשרות או מאות שנים לכל היותר. משך הבערה תלוי גם הוא בזמינות החמצן ובאספקתו הסדירה למוקד. בערה במשך זמן ארוך (כמו למשל בעומק רב יחסית) גורמת להתמרת נפח סלע גדול סביב המוקד, אולם אובדני חום ע"י הולכה יגבילו את אפשרות עלית הטמפ'. משך הבערה הוא על כן אחד הגורמים שקבעו את ההבדל בעצמת ההתמרה ואת נפחי הסלע שהותמרו.

בערת הסלעים הביטומניים לא התרחשה בו זמנית בכל רחבי הבקעה אלא התפשטה כנראה ממוקד למוקד.

5. **סילוק חום ע"י גזים.** כ-60–80% מהחום שנוצר כתוצאה מבערת הסלעים הביטומניים סולק אל מחוץ למערכת ולא שימש להעלאת טמפ' הסלעים. חלק גדול מסילוק החום נעשה ע"י גזים לוחטים שנוצרו תוך כדי תהליך ההתמרה, בעיקר CO_2 שמקורו מפרוק החומר האורגני ומתהליכי דקרבוניזציה. הגזים הלוחטים נעו דרך סדקים וחללים וגרמו תוך כדי כך להתמרת סלעי הסביבה.

6. **תהליכי דקרבוניזציה.** תהליכים אנדותרמיים אלו היו נפוצים בזמן ההתמרה והם אחד הגורמים להורדת טמפ' ההתמרה למאות מעלות בלבד.

7. **לחץ חלקי של CO_2 .** ללחץ החלקי של ה- CO_2 חשיבות בקביעת טמפ' ראקציות הדקרבוניזציה ויצירת מאספי מינרלים מטמורפיים. לחץ חלקי גבוה מסיט את טמפ' ראקציות הדקרבוניזציה לערכים גבוהים יותר. לחץ חלקי נמוך מאפשר יצירת סלעים של פציאס התמרה גבוהה בטמפ' נמוכות יחסית.

תחנות הסיור (ציור 6)

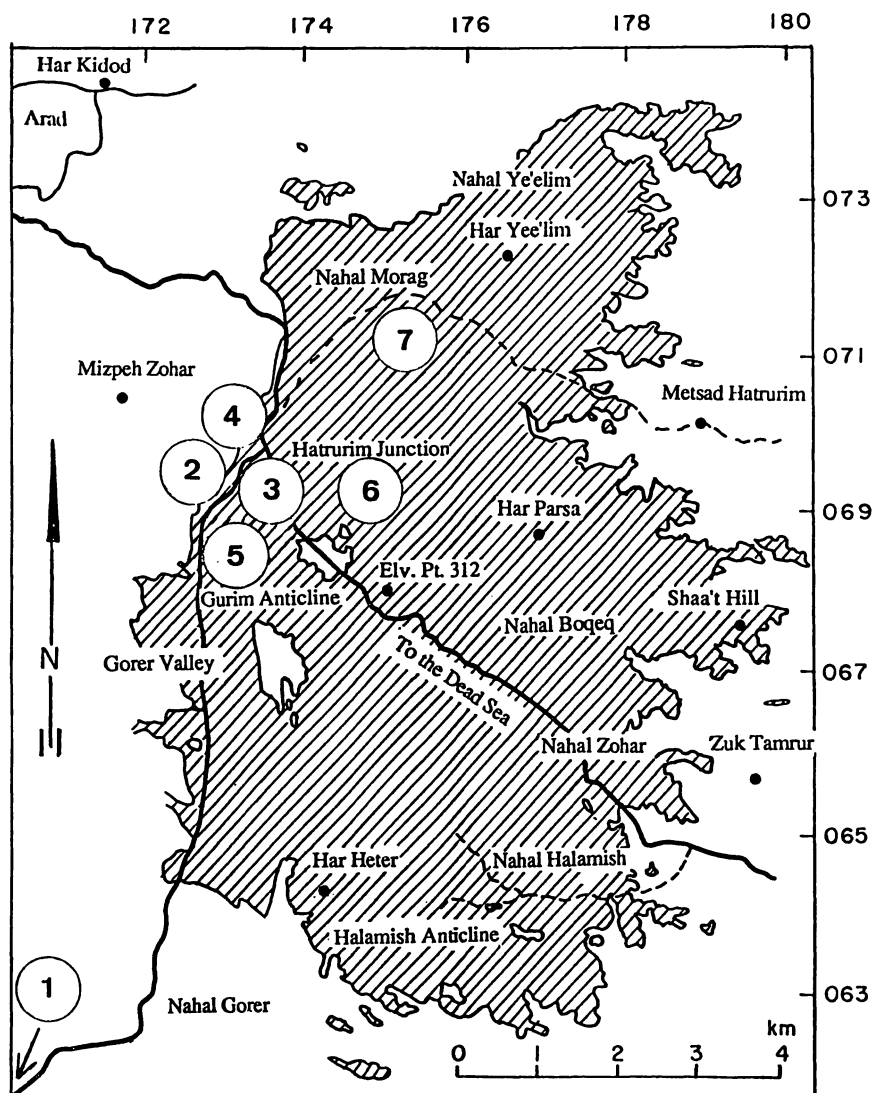
תחנה מספר 1: תצפית על בקעת חתרורים מדרום. נ.צ. 1704/0595.

הגעה: נסיעה על כביש ערד-צומת צפית עד קילומטר 9. תצפית מהכביש.

מצפוננו בקעת חתרורים בה מצוי מחשוף ה"אזור המגוון", הגדול והמפותח שבמחשופים בישראל. שטחו כ-50 קמ"ר.

נזהה את המיקום הסטרטיגרפי של סלעי ה"אזור המגוון". ממערב ומצפון מתנשאות הגבעות השייכות לקמר זוהר. הקמר נוחת לכיוון דרום מזרח לעבר בקעת חתרורים. בולטות בנוף השכבות הכהות של גג תצורת מישאש הנוחתות בתלילות לבקעת חתרורים, ונעלמות מתחת לכיסוי הבהיר של סלעי ה"אזור המגוון". סלעי ה"אזור המגוון" אינם משוככים והנוף שהם יוצרים הוא נוף מבוחר מאוד (badlands). במרכז הסינקלינה בולט קמר גורים. ביטוי הגאולוגי בשכבות הכהות, בעלות המבנה הכיפתי השייכות לגג תצורת מישאש. ציר הקמר הוא בכיוון צפון מזרח – דרום מערב ומתצפית זו אנו רואים חתך בכיוון ניצב לציר. קמר גורים תחום משני צדדיו ע"י שני צירים סינקלינריים מקבילים. המערבי מהווה את סינקלינת מורג, והמזרחי את סינקלינת חתרורים.

מערבה לגבעות ה"אזור המגוון" מצויה בקעה אלוביאלית. קדוחים בבקעה חדרו סלעים לא מותמרים של תצורת ע'רב.



ציור 6. מחשף ה"אזור המגוון" בבקעת חתרורים. המספרים מציינים את תחנות הסיור.

תחנה מספר 2: הליתולוגיה של ה"אזור המגוון"-חלק תחתון. נ.צ. 1732/0695.

הגעה: נסיעה בדרך עפר קצרה היוצאת מכביש ערד-צומת צפית, כק"מ אחד מדרום מערב לצומת חתרורים.

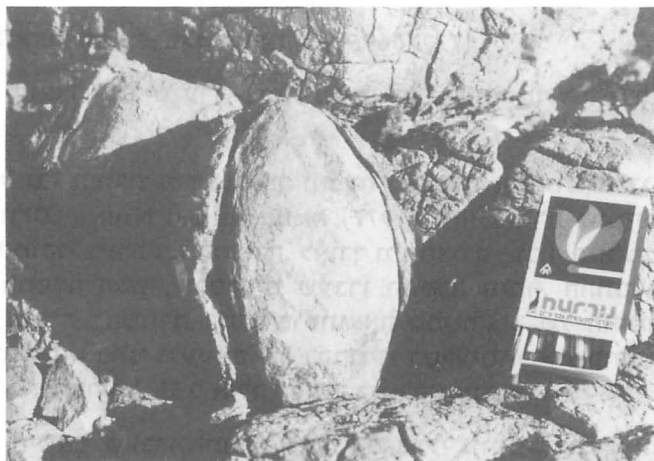
ה"אזור המגוון" מונח כאמור על גבי תצורת מישאש, אך תופעות התמרה קיימות גם בגג תצורת מישאש, בסלעי הפוספוריט. Matthews and Nathan (1977) זיהו בעזרת שינויים בתכולת ה- CO_2 בסלעי הפוספט מוקדי בערה בגג התצורה. לאורך גג התצורה נעבור מסלעים לא מותמרים לסלעים שעברו התמרה חלשה, ולסלעים שעברו התמרה חזקה. ההתמרה החלשה ($300-500^\circ\text{C}$) מתבטאת בשדה בהשחרת הסלעים כתוצאה ממטורציה של החומר האורגני שהיה בסלע, באובדן הריח האופייני ולעיתים אף בהקשית הסלעים. כמות החומר האורגני השארית בסלע המותמר לא עולה על 0.5% אולם די בכך כדי להשחירו.

סלעי הפוספוריט של גג תצורת מישאש שעברו התמרה חזקה הם בעלי גוונים אדומים או ירוקים. הם קשים מאוד, יוצרים מצוקים קטנים בנוף והם בעלי מבנה גבישי המעיד על רקריסטליזציה חזקה של סלע המקור. מינרל האפטיט העיקרי בהם הוא הפלואור-אפטיט, שנוצר בזמן ההתמרה כתוצאה מדקרבוניזציה מלאה של הפרנקוליט. גבישי האפטיט המותמרים הם הנותנים את הגוון הירוק לסלע. המעבר פרנקוליט ---> פלואור-אפטיט מתבצע בטמפ' של $550-600^\circ\text{C}$, וזו גם הטמפ' המינמלית בה נוצרו סלעי הפוספוריט המותמרים חזק בגג תצורת מישאש.

בבסיס ה"אזור המגוון" מצוי מחשוף של עמודונים קרבוניים פריזמתיים קטנים. כיוון העמודונים איננו אחיד וחלקם נראים מעוותים. התופעה תוארה לראשונה ע"י Avnimelech (1964). העמודונים המופיעים רק בבסיס ה"אזור המגוון" נוצרו כנראה בזמן התקררות והתכווצות הסלעים, בתהליך הדומה לאופן הווצרותם של משושי בזלת. הכיוונים השונים הנראים בעמודונים באותו מחשוף מעידים על בערה לא מסודרת אשר כל מוקד בה בער באופן עצמאי.

מאזור מגע סלעי ה"אזור המגוון" עם תצורת מישאש נעבור מזרחה במעלה החתך הסטרטיגרפי. הסלעים בחלק התחתון של ה"אזור המגוון" שייכים ליחידת המיפוי KuPh1. אלו סלעים קרבוניים אשר עברו רקריסטליזציה חריפה. הם עשירים בגבס, מגוונים בצבעם, חסרי שיכוב ויוצרים נוף מבוחר (badlands). סלעים אלו נוצרו בעקבות התמרה חלשה של הפרוטוליט (אשר כאן הוא החלק התחתון של תצורת ע'רב) והם חסרי או כמעט חסרי מינרלים של טמפ' גבוהות (הטמפ' בה ארעה הרקריסטליזציה היתה כ- $200-300^\circ\text{C}$).

בתוך הסלעים הקרבוניים הבהירים והרכים של יחידה KuPh1 בולטים גופי סלע אי-רגולריים שקוטרם מטרים ספורים. נזהה כאן שני סוגי סלעים דקי גביש המציינים פציאס התמרה גבוהה, האחד קשה מאוד, בעל גוון חום או ירוק כהה וחצוי ע"י עורקים בהירים רבים. המינרל העיקרי הבונה אותו הוא גהלניט וכן מצויים בו גרנטים, נגלשמדיטיט או פלואור אפטיט ולעיתים וולסטוניט, רנקיניט ואף פסאודוולסטוניט המציין טמפ' התמרה של מעל 1000°C . הסלע השני מורכב בעיקר מעדשות אליפסואידיות שחורות וקשות מאוד שקוטרן מגיע עד עשרות ס"מ (תמונה 2). הצורה העדשתית היא תוצאת בליה. המינרל העיקרי בסלע הוא הלרניט ומלווים אותו בראונמילריט, מייניט ופלואור אפטיט. לעיתים מופיעים גם יעלימיט, ספינל וגרנטים. הטמפ' בה נוצרו סלעי הגהלניט והלרניט היתה $400-700^\circ\text{C}$. יתכן והם מציינים מוקדי בערה נקודתיים.



תמונה 2. עדשת סלע לרניטי. חלק תחתון של ה"אזור המגוון".



תמונה 3. (ימין) פסאודופוליאציה בסלעי שיש הספוריט-קלציט. פסאודופוליאציה זו היא הגורם לאשלית השיכוב.

תמונה 4. (שמאל) "דייק ספוריט" בסמוך לערוץ נחל מורג.

בהמשך ההליכה מזרחה והעליה בחתך הסטרטיגרפי נראה מולנו מצוק אפור. מצוק זה ודומיו מופו כיחידת מיפוי עצמאית (KuPh2). הסלע הבונה את המצוק מוכר בשמו העממי "שיש ערד", והוא חום או שחור, דק עד בינוני גביש ומציין פציאס התמרה גבוהה (טמפ' התמרה של 600–800°C). השיש אחיד בהרכבו בכל רחבי בקעת חתרורים ומורכב בעיקר מהמינרלים ספוריט וקלציט. מינרלים מישניים הם בראונמילריט, מייניט, אפטיט וגרנטים. שיש הספוריט-קלציט חצוי ע"י עורקים בהירים רבים המורכבים ממינרלים הידרטיים שונים שהם תוצרי בליה של סלע השיש. המינרל האקזוטי בנתורית נמצא במספר מקומות בעורקים אלו. בחזית המצוק ניתן לראות שהעורקים הללו מופיעים במערכת מקבילה וצפופה היוצרת מעין פוליאציה המשוכה עם כיוון המידרון. הדבר גורם לאשליה של שיכוב מקביל למדרון (תמונה 3). בתוך סלעי השיש מפוזרים תרכיזי המטיט קטנים, בחלקם הם פסאודומורפיים אחרי מאובנים, שכן במקומות נמצאה בהם טקסטורת המאובן ואף הוגדרו בהם (ע"י ז. לוי, המכון הגאולוגי) שני סוגים אופייניים למסטריכט תיכון-עליון: *Gyrosoria Gracilis*-1 *Chlamys Farafrensis*.

סלעי שיש הספוריט-קלציט קורלטיביים לפרט העליון הקירטוני של תצורת ע'רב.

תחנה מספר 3: הליתולוגיה של ה"אזור המגוון"-חלק עליון. נ.צ. 1737/0699.

הגעה: הליכה רגלית מתחנה 2 עד צומת חתרורים, עליה לגבעה שממזרח לצומת.

התחנה נמצאת סמוך לציר סינקלינת מורג ומולנו החלק העליון של החתך הסטרטיגרפי. הסלעים הבולטים בנוף בצבעם הכהה הם סלעי יחידת מיפוי KuPh3. שבירת הסלע מראה שהצבע הכהה הוא פטינה, והסלע עצמו הוא בעל גוונים אפורים, צהובים או ירוקים בדומה לצבע זית. בתחנה זו שני סוגים של סלעי "אוליב". האחד קשה מאוד, מסיבי ויוצר מצוק ("אוליב מסיבי"), והשני פורוזי וטרשי ("אוליב נקבובי"). הראשון מורכב בעיקר מהמינרלים גהליט, וולסטוניט, גרנטים וכן דיופסיד, אנורטיט ומעט זאוליטים, השני מהמינרלים דיופסיד, זאוליטים, גרנטים וקלציט. שני הסלעים קורלטיביים לפרט התחתון החוארי של תצורת טאקיה. ה"אוליב המסיבי" מצביע על התמרה חזקה יותר, אולם ההבדל המורפולוגי ביניהם נעוץ בהופעתם של מינרלים זאוליטיים בסלעי ה"אוליב הנקבובי". תהליך יצירתם של הזאוליטים מסובך ולא ברור באיזה שלב משלבי ההתמרה הם נוצרו.

סלעי ה"אוליב" (בעיקר ה"אוליב הנקבובי") עשירים בתרכיזים שונים. התרכיזים השחורים מורכבים מהמינרל מוגהמיט, הם פסאודומורפיים אחרי תרכיזי הפיריט והלימוניט השכיחים בתצורת טאקיה, ובגלל תכונתם המגנטית הם גורמים לאנומליה ארומגנטית חזקה בצפון בקעת חתרורים (Domzalski, 1967; Ron and Kolodny, 1992). התרכיזים הבהירים הם של בריט.

ב"אוליב הנקבובי" שכיחים מבנים דמויי ברקציה. קיים דמיון בין הרכב "שברי הסלע" לבין הרכב ה"מטריקס" ב"ברקציה". הופעת זו קשורה כנראה לגלישות שהתרחשו בסלעי הפרוטוליטים החואריים בזמן ההתמרה: התחממות המים הספוגים בסלעי החואר והפיכתם לאדים גרמה לעליית הלחץ בחללים ולירידת הקוהזיה והעמידות לגזירה. כתוצאה מכך (וגם בגלל משקל הסלעים שמעל), החלה גלישת סלעי החואר במדרון בסגנון *Earth flow*. הגלישה הסתיימה כאשר החלו תהליכי גיבוש בסלעי החואר ויצירת סלעי ה"אוליב", אשר גרמו לאבדן התכונות הפלסטיות, להקשיית הסלע וליצובו במדרון. חומר פריך שהחל להתגבש נקרע במקומות תוך כדי גלישתו ובין השברים חדר חומר פריך חדש שטרם התגבש.

בסלעי ה"אוליב הנקבובי" מצויים במקומות אופקים אדומים דקים המכילים בנוסף למינרלים האופייניים לסלעי ה"אוליב" גם המטיט (המקנה את הצבע האדום) ופלדספר אשלגני. תיארוך מאורע ההתמרה בשיטת K-Ar נעשה בחלקו בסלעים אלו (היימן, דברים בע"פ; Tzur et al., 1991). בראש הגבעה ובגג החתך הסטרטיגרפי מצויה יחידה KuPh4. סלעי היחידה משוכבים היטב (הסלעים היחידים המשוכבים ב"אזור המגוון") ומורכבים מחילופים של סלע לרניטי וסלע ספוריטי (דל קלציט). יחידה זו קורלטיבית לפרט חפיר של תצורת טאקיה. במדרון הפונה צפונה נראה משטח סלע לבן-ורדרד המונח על גבי שכבות היחידה. סלע זה מורכב מפורטלנדיט וקלציט. הפורטלנדיט נוצר מבליה בטמפ' נמוכה של סלעים קלציום-סילקטים שלא בנוכחות CO₂ (Gross, 1977).

מראש הגבעה תצפית על צפון בקעת חתרורים. מתחתינו בקעת ראש נחל מורג. הסלעים בבקעה שייכים לתצורת ע'רב ואין בהם עדויות להתמרה. קידוח של פמ"א במרכז הבקעה (בנצ. 1741/0708) חדר 101 מ' של סלעים לא מותמרים, מהם 60 המטרים התחתונים היו עשירים בחומר אורגני. הסחף הפריך שכיסה את הבקעה בזמן ההתמרה מנע פתיחת סדקים וחדירת חמצן החיוני לבערה. הקשר בין אזורים מכוסים סחף לאי התמרה קיים באופן דומה במקומות נוספים בבקעת חתרורים.

מצפון לבקעת הסחף של ראש נחל מורג נראית אחת ממחצבות שיש ערד הפזורות בבקעת חתרורים. הכריה במחצבות היא לרוחב ולא לעומק מכיון שהשיש מסתיים בעומק של 20-10 מטר לכל היותר. זוהי כאמור אחת העדויות לכך שסלעי ה"אזור המגוון" מהוים "קרום" שעוביו עשרות מטרים. מתחת למחשוף ה"אוליב המסיבי" מצוי אחד ממחשופי הקג"ל המותמר. הסלע קשה, החלוקים בו כהים ולעיתים מרוסקים כתוצאה מהחום הרב ששרר תחתם. גרגרי הקוורץ במטריקס מוחלפים באופן חלקי או מלא ע"י המינרל המטמורפי אפופיליט. הקג"ל הוא פולימיקטי ומכיל כאן חלוקי צור של תצורת מישאש, חלוקי גיר של חבורת יהודה, חלוקי "צור יבוא" של תצורת חצבה וחלוקי "אוליב" שנגזרו לפני ההתמרה מסלעי הסביבה והותמרו כחלוקים.

תחנה מספר 4: תופעות מיוחדות במחשוף קג"ל מותמר. נ.צ. 1736/0700.

הגעה: הליכה קצרה מערבה מתחנה 3. התחנה היא מצפון מערב לצומת חתרורים.

מחשוף קג"ל זה שונה מכל שאר מחשופי הקג"ל המותמר בהיותו בנוי מסלע חום-אדום בו צפים חלוקי צור מרוסקים. הסלע האדום מורכב מקלציט, פלדספר אשלגני, טוברמוריס ואפופיליט. ריכוז האשלגן בו מגיע ל-3% ומקורו לא ידוע. הסלע היה במקורו סחף חולי-חרסיתי, והוא הותמר בנוכחות מים רבים בשלבים הסופיים של ההתמרה (גרס, לא פורסם). חלקו העליון של מחשוף הקג"ל מצוי במגע הדוק עם סלעים של יחידה KuPh3.

ממזרח למחשוף הקג"ל המותמר, כביש ערד-סדום חוצה את סלעי ה"אזור המגוון". במחשוף הכביש נראה סלע דמוי קג"ל. "חלוקי" מכילים מינרלים של טמפ' גבוהות, וה"מטריקס" מינרלים הידרטיים וקרבונוטיים שונים- תוצרי בליה של המינרלים המטמורפיים.

תחנה מספר 5: "דייקי החול" המותמרים. נ.צ. 1734/0687.

הגעה: נסיעה בדרך עפר קצרה היוצאת מכביש ערד-שפך זוהר, כחצי ק"מ מדרום לצומת חתרורים.

בתוך סלעים מותמרים המציינים פציאס התמרה גבוהה מצויים מספר "דייקים" המורכבים מחול מותמר, קשה, אדום-חום או אפור ובעל צמנט קלציטי. גבישי אפופיליט מצויים בין

גרגרי החול ואף מחליפים אותם. ה"דייקים" מכילים במקומות שבירי סלעים מותמרים (בעיקר שבירי "אוליב") שקוטרם מגיע למספר ס"מ. מגע ה"דייקים" עם סלעי הסביבה המותמרים הוא חד, מבנם רגולרי והם מתפצלים ל"עורקים" רבים בכיוונים שונים ולכיסים שקוטרם עשרות ס"מ. הכיוון הכללי של ה"דייקים" הוא 340° ו- 205° . "דייקים" אחרים המצויים בבקעת חתרורים ("דייקי קג"ל" ו"דייקי חול") מראים כיוונים שונים מאלה.

מוצע כאן שה"דייקים" למיניהם מציינים סדקים שנפערו בסלעים בזמן ההתמרה ודרכם חדר חמצן לבערה ונפלטו גזים ממוקדי הבערה. בסדקים נלכד חול או סחף פריך אשר מנע את קריסת הסדקים בסיום הבערה. החול והסחף הותמרו כתוצאה מהחום הרב ששרר באזור. הסדקים בהם נלכד החול או הסחף אינם ככל הנראה סדקים טקטוניים, זאת בשל כיוון שונה מכיוון הסדקים הטקטוניים המצויים בסלעים הלא מותמרים ורוחב הגדול בהרבה מרוחב סדקים אופייניים המצויים בסלעי קירטון וחואר. בזמן הבערה חל אובדן נפח ניכר, אשר הביא להתמוטטויות ולקריסות ובעקבותיהן לפתיחת תעלות דרכן חדר חמצן וליצירת מוקדי בערה חדשים.

תחנה מספר 6: קביעת עובי החתך המותמר בעזרת נתוני שדה. נ.צ. 1748/0695.

הגעה: נסיעה בדרך עפר היוצאת מזרחה בק"מ ה-55 על כביש ערד-שפך זוהר. נסיעה עד מחצבת שיש נטושה והליכה קצרה דרומה.

נתונים מקידוחים (גרוס, דברים בע"פ) והופעת סלעים לא מותמרים בערוצי ואדיות עמוקים מעידים שההתמרה היא תופעת פני שטח של עשרות מטרים. היות סלעי ה"אזור המגוון" כקרום על פני השטח נובע מהתלות של ההתמרה באספקת חמצן. שיחזור עובי החתך שהותמר אפשרי במקומות בהם מצוי מחשוף של קג"ל מותמר המציין את פני השטח כפי שהיו בזמן ההתמרה, ובסמוך לו חשופים – כתוצאה מארוזיה – בסיס "הקרום המותמר" והמגע עם הסלעים הלא מותמרים. מצב כזה קיים בתחנה זו. הפרש הגובה בין בסיס "הקרום המותמר" והקג"ל המותמר הוא 30–50 מ', זהו לכן עובי החתך שהותמר. עובי "הקרום המותמר" איננו קבוע, ויכול להשתנות כפונקציה של עומק הסדקים שהחדירו חמצן למוקדי הבערה.

בסמוך לבקעה מחצבת שיש ספוריט-קלציט. אחד מקירות המחצבה חושף עורק ירוק המורכב מהמינרל וולקונסקואיט שהוא מונטמורילוניט עשיר כרום. עורקים כאלו שכיחים מאוד בסלעי השיש.

תחנה מספר 7: זיהוי גלישות ביחידה KuPh₄, זיהוי מוקדי בערה. נ.צ. 1757/0712.

הגעה: נסיעה מתחנה 6 מערבה עד מפגש עם דרך עפר העוברת לאורך נחל מורג. נסיעה על דרך העפר מזרחה עד המקום בו נחל מורג פונה דרומה. הליכה קצרה לאורך ערוצו.

ממערב לנו נ.ג. 370. פסגתו מורכבת מסלעים משוככים של יחידה KuPh₄. השכבות נוטות לכיוון צפון-מערב אולם מידת נטיתן משתנה והיא הולכת וגדלה במורד מ- 16° ועד 34° . תופעה דומה קיימת ברוב מחשופי יחידה KuPh₄ והיא קשורה כנראה לגלישת החוארים של תצורת טאקיה בזמן ההתמרה. גלישה זו גרמה לאבדן התשתית המוצקה של סלעי יחידה KuPh₄ ולגלישתן במורד תוך כדי קימוטן ואף קריעתן.

ערוץ נחל מורג ממזרח לנ.ג. 370 עובר בתואי רחב, אולם בנ.צ. 1758/0710 הוא פונה חדות מזרחה בעוקפו מצוק של שיש ספוריט-קלציט החוסם אותו. שיש זה מכיל את המינרל גרייגיט (Fe_3S_4) הפולט ריח H_2S רע במגעו עם חומצה. חלוקים לא מותמרים המצויים מספר מטרים

מעל הערוץ הנוכחי ומעל מצוק השיש מעידים שהנחל זרם בעבר (אולם לאחר ההתמרה) בתוואי גבוה יותר ולא מפותל. הסלעים החשופים כיום בערוץ נחל מורג היו קבורים בעומק בזמן ההתמרה. ממזרח לערוץ בנצ. 1758/0711 בולט קונוס סלע המוקף סלעים קרבונטיים לא מותמרים או מותמרים מעט. יתכן וקונוס זה המורכב מסלע שיש ספוריט-קלציט בלוי מציין מוקד בערה נקודתי. מבט צפונה יחשוף בפנינו סוג אחר של מוקד. אנו רואים שיש ספוריט-קלציט בעל מבנה דמוי דייק (תמונה 4). הסלעים סביב "דייק השיש" שייכים לפציאס התמרה נמוכה. יתכן וההתמרה במקרה זה התבצעה בעיקר לאורך סדק שהחדיר חמצן.

מינרלים שכיחים בסלעי ה"אזור המגוון" הנזכרים בסיום זה (ההרכבים נלקחו מ-Gross, 1977)

Afwillite,	אפויליט	— $\text{Ca}_3[\text{SiO}_3\cdot\text{OH}]_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Andradite,	אנדרדיט	— $\text{Ca}_3(\text{Fe,Ti})_2[\text{SiO}_4]_2$
Anorthite,	אנורטיט	— $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$
Apophyllite,	אפופיליט	— $\text{KFCa}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}]_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Bayerite,	בייריט	— $\text{Al}(\text{OH})_3$
Barite,	בריט	— BaSO_4
Bentorite,	בנטוריט	— $\text{Ca}_6(\text{Cr,Al})_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3\cdot 26\text{H}_2\text{O}$
Bredigite,	ברדיגיט	— Ca_2SiO_4
Brownmillerite,	בראונמילריט	— $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$
Chabazite,	כבזיט	— $(\text{Ca,Na}_2)[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}]\cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Diopside—hedenbergite,		— $\text{Ca}(\text{Fe,Mg})[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Ettringite,	אטרינגיט	— $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3\cdot 26\text{H}_2\text{O}$
Fluorapatite,	פלואור אפטיט	— $\text{Ca}_5[\text{F}(\text{PO}_4)_3]$
Francolite,	פרנקוליט	— $\text{Ca}_5[(\text{F,OH})(\text{PO}_4\text{CO}_3)_3]$
Gehlenite,	גהלניט	— $\text{Ca}_2\text{Al}[(\text{Si,Al})_2\text{O}_7]$
Gismondite,	גיסמונדיט	— $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Greigite,	גרייגיט	— Fe_3S_4
Grossular,	גרוסולר	— $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$
Hatrumite,	חטרוריט	— Ca_3SiO_5
Hydrogarnet,	הידרוגרוסולר	— $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}-\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$
Jennite,	ג'ניט	— $\text{Na}_2\text{Ca}_8\text{Si}_3\text{O}_{30}\text{H}_{22}$
Lamite,,	לרניט	— Ca_2SiO_4
Lizardite	ליזרדיט	— $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$
Maghemite,	מגהמיט	— $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Mayenite,	מייניט	— $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$
Merwinite,	מרוויניט	— $\text{Ca}_3\text{Mg}[\text{SiO}_4]_2$
Nagelschmidite,	נגלשמידטיט	— $\text{Ca}_2[\text{SiO}_4]-\text{Ca}_{1.5}(\text{PO}_4)$
Phillipsite,	פיליפסיט	— $\text{KCa}[\text{Al}_3\text{Si}_5\text{O}_{16}]\cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Portlandite,	פורטלנדיט	— $\text{Ca}(\text{OH})_2$
Pseudowollastonite,	פסאודוולסטוניט	— $\alpha\text{-CaSiO}_3$
Rankinite,	רנקיניט	— $\text{Ca}_3[\text{Si}_2\text{O}_7]$
Spurrite,	ספוריט	— $\text{Ca}_5[\text{CO}_3(\text{SiO}_4)_2]$
Thaumasite,	תאומזיט	— $\text{Ca}_6\text{H}_4[(\text{SiO}_4)_2(\text{CO}_3)_2]\cdot 26\text{H}_2\text{O}$
Thomsonite,	תומסוניט	— $\text{NaCa}_2[\text{Al}_2(\text{Al,Si})\text{Si}_2\text{O}_{10}]_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Tobermorite,	טוברמוריט	— $\text{Ca}_5\text{H}_2[\text{Si}_3\text{O}_9]_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Volkonskoite,	וולקונסקוויט	— Cr-Montmorillonite
Wollastonite,	וולסטוניט	— CaSiO_3
Ye'elimit,	יעלימיט	— $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{SO}_4$

ספרות

- Avnimelech, M., 1964. Remarks on the occurrence of unusual high-temperature minerals in the so-called "Mottled Zone" complex of Israel. *Isr. J. Earth Sci.*, 13: 102–110.
- Bentor, Y.K., Gross, S. and Kolodny, Y., 1972. New evidence on the origin of the high temperature mineral assemblage of the "Mottled Zone" (Israel). Montreal, 24th International Geological Congress, Section 2, pp. 265–275.
- Bentor, Y.K., Gross, S. and Heller, L., 1963a, High temperature minerals in non-metamorphosed sediments in Israel. *Nature*, 199, N°. 4892, pp. 478–479.
- Bentor, Y.K., Gross, S. and Heller, L., 1963b. Some unusual minerals from the "Mottled Zone" complex, Israel. *American Mineralogist*, 48: 924–930.
- Domzalski, W., 1967. Aeromagnetic survey of Israel. Israel, The Institute for Petroleum Research and Geophysics, SMA/482/67, 54 p.
- Gross, S., 1977. The mineralogy of the Hatrurim Formation, Israel. *Geol. Surv. Israel, Bull.* 70, 80 p.
- Gross, S., 1980. Bentorite. A new mineral from the Hatrurim area, west of the Dead Sea, Israel. *Isr. J. Earth Sci.*, 29: 81–84.
- Gross, S., 1984. Occurrence of Ye'elimit and Ellestadite in an unusual cobble from the "pseudo-conglomerate" of the Hatrurim basin, Israel. *Geol. Surv. Israel, Current Research*, 1983–84, pp. 1–4.
- Kolodny, Y., Bar, M. and Sass, E., 1971. Fission track age of the "Mottled Zone event" in Israel. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 11: 269–272.
- Kolodny, Y., and Gross, S., 1974. Thermal metamorphism by combustion of organic matter: isotopic and petrological evidence. *J. Geol.*, 82: 489–506.
- Lees, G.M., 1928. The chert beds of Palestine. *Proc. Geol. Assoc., London*, 39, N° 4, pp. 445–462.
- Matthews, A., and Kolodny, Y., 1978. Oxygen isotope fractionation in decarbonation metamorphism: the Mottle Zone event. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 39: 179–192.
- Matthews, A., Nathan, Y., 1977. The decarbonation of carbonate-fluorapatite (Francolite). *American Mineralogist*, 62: 565–573.

- Picard, L., 1931. Geological researches in the Judean Desert. Jerusalem, Goldberg Press, 108 p.
- Porat, N., Kolodny, Y. and Schwarcz, H.P., 1991. Timing of metamorphism in the Hatrurim basin — new evidence from ESR dating. *Isr. Geol. Soc. Annu. Mtg.*, p. 82 (Abstract).
- Ron, H. and Kolodny, Y., 1992. Paleomagnetic and rock magnetic study of combustion metamorphic rocks in Israel. *J. Geophysics. Res.*, 97: 6927–6939.
- Tzur, D., Starinsky, A., Steinitz, G. and Kolodny Y., 1991. K-Ar measurements in the Hatrurim Formation, Arad area. *Isr. Geol. Soc. Annu Mtg.*, p. 111 (Abstract).
- Zak, I. and Freund, R., 1981. Asymmetry and basin migration in the Dead Sea rift. *Tectonophysics*, 80: 27–38.

בורג, א., 1990, הגאולוגיה של תצורת חתרורים. עבודה לקבלת תואר מוסמך במדעי הטבע: ירושלים, האוניברסיטה העברית, 118 עמ'.

בן תור, י., 1949, מיפוי הנגב, 1949, יומני השדה, כרכים א–ב: ירושלים, המכון הגאולוגי, דו"ח , GSI/10/85, 206 עמ'.

בן תור, י., פרומן, ע., 1960, המפה הגאולוגית של ישראל בקנ"מ 1:100,000, גליון 16: הר סדום (עם תאור גאולוגי): ישראל, המכון הגאולוגי.

גרוס, ש., הפטרוגרפיה של תצורת חתרורים + ניספחים (לא פורסם).

גינות, י., 1990, יחסי גומלין צור–פורצלניט ודיאגנזה של סיליקה בקרטיקון המאוחר ובאיאוקן–ישראל. עבודה לקבלת תואר מוסמך במדעי הטבע: ירושלים, האוניברסיטה העברית, 73 עמ'.

ארועים ותהליכים – תצפיות בחוף ים-המלח

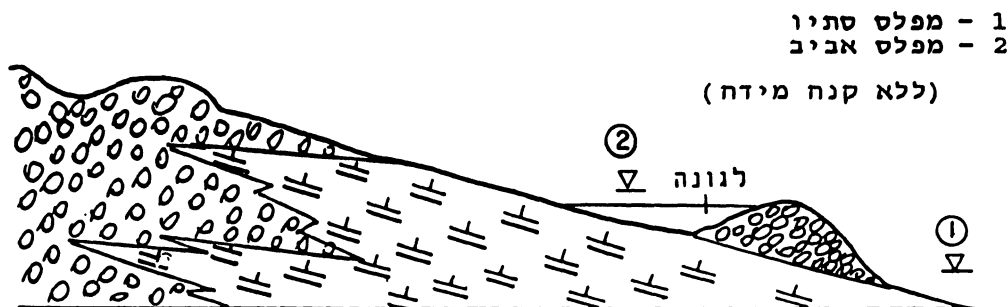
אלי רז

בחורף 1991/92 נמדדו כמויות הגשם הגדולות ביותר מאז החלו במדידות גשם בארץ (1861 בירושלים). מפלס ים-המלח עלה עד סוף מאי בכשני מטרים, שהיא העליה העונתית הגדולה ביותר משנת 1990, בה החלו במדידות מפלס מסודרות. פרוש הדבר, שבעונה זו נוצר עודף של כמיליארד וחצי מ"ק במאוזן המים של ים-המלח (נגר לעומת אידוי).

בשכבות המלח של "דלתת המלח" בדרום האגם, התפתח צנור המסה עמוק, כתוצאה מהמגע עם שכבת המים העליונה המהולה. שכבות מלח גבוהות יותר חוררו בסגנון "גבינה שווצרית" בהשפעת רסס הגלים.

1. חוף עין גדי – סוללות חוף, לגונות ומתלולים

מאז יבש האגם הדרומי, נחשבת הרוח לגורם היחידי להופעת זרמים בים-המלח, כאשר חצי מטר לשניה היא המהירות המירבית שנמדדה, וזאת לאחר נשיבת רוח חזקה וממושכת. הזרמים החזקים ביותר שצפינו בהם מחוף עין גדי מעודנו, התקימו כל עוד נמשכה עליית המפלס.



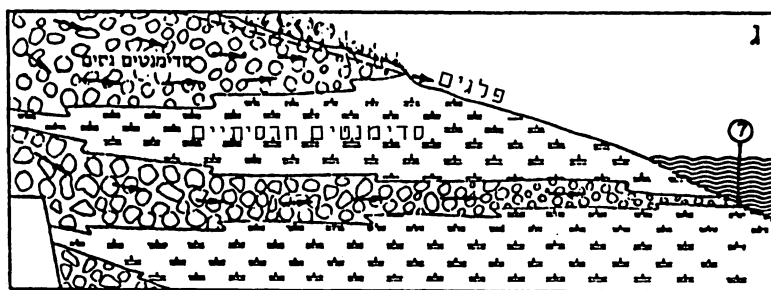
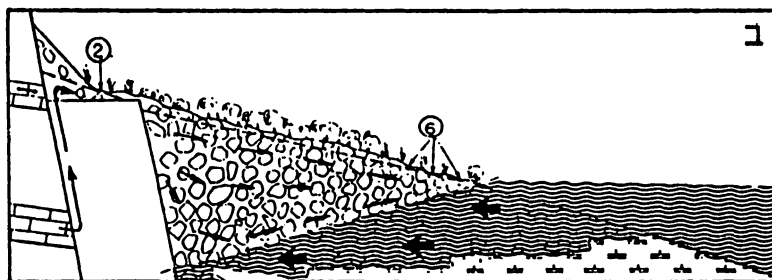
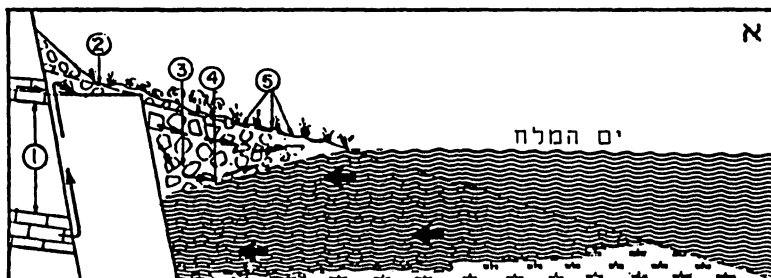
ציור 1-א. תצפית 1, חוף עין גדי: סוללות חלוקים שהובאו ע"י זרמים והוצרות לגונה.



ציור 1-ב. תצפית 1, חוף עין גדי: התפתחות מתלולים כתוצאה מחתירה של זרם החוף.

בעונה 1991/92. מהירות הסחיפה של חומר צף הגיעה, להערכתנו, ל-12 מטר לשנייה לפחות. הזרם הצפוני גרף מתקנים בחוף, יצר צנירים ומפולות בחופים תלולים ונשא איתו דרומה מטעני חלוקים (שנראה כי מקורם במפולות) שהונחו רחוק יותר כסוללות לאורך החוף וגרמו ליצירת לגונות. כל זאת, בפרקי זמן ממושכים בהם שרר מזג אויר שקט ללא רוח וגלים, כשהגורם החריג היחיד הוא זרימה גדולה ונמשכת מהירדן.

דעות הקושרות הוצרות מתלולים וסוללות בחוף ביס-המלח בפעולות גלים, אינן הולמות, במקרה זה, את התצפיות הנוכחיות.



- | | | | |
|----|--------------------|------|--------------------|
| 1. | אקויפרים חב' יהודה | 4. | פן ביני |
| 2. | מעין | 5-6. | מעיינות חוף נודדים |
| 3. | אקויפר החוף | 7. | מעין תת-ימי |

ציור 2. תצפית 2, מעיינות החוף: א-ב - תנודות מפלסי ים המלח בתחום הסדימנטים הגסים; ג - כנ"ל בתחום הסדימנטים החרסיתיים.

2. מניפת הקידרון – תעלות ארוזיביות מצופות קרומי ארגוניט

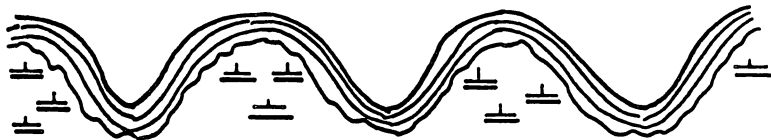
ירידות חריפות במפלס ים־המלח הרחיקו את קו החוף מזרחה וחשפו לאנרגיה הגבוהה של גלי החוף, את הסדימנט העדין ששקע במרחק מהחוף בתנאי אנרגיה נמוכה. בסיסי הגלים ועצמים המתגלגלים או נגררים בהשפעתם, חורצים את הסדימנט הרך וככל שנמשכה ירידת המיפלס, ניקזו דרכם החריצים את מי הגלים, העולים בסערות אל החוף ושבים ממנו, ואגב כך התפתחו לתעלות ארוזיביות של ממש שכוונן הוא הכוון השכיח של הגלים. קרומי ארגוניט מאוחרים, יכולים היו לצפות את פני השטח הארוזיביים האלה במידה שהוצפו מחדש, או לא נחשפו לגמרי.

שריטות קטנות מקבילות בעלות כוון קבוע וזהה לאלה של התעלות הארוזיביות, מצויות על גבי קרומי הארגוניט (התופעה נפוצה מאוד בעין פשחה), הן כנראה עקבות של אבנים קטנות, או עצמים קשים אחרים, שנגררו עם הגלים על פני הקרום המתהווה בעודו רך והנוצחו עם התקשותו.

3. מעיינות סמר וקנה – שינויים הידרולוגיים במעיינות החוף

בשנים האחרונות היינו עדים לגידול בשטח הצומח ההידרופילי הניזון ממעיינות החוף. האקופר הפריאטי של החוף היה שעון על מי ים־המלח, מעיינות רבים נבעו בקרבת קו המים ונדדו אתו מזרחה עם ירידת המיפלס. התרחקות קו החוף מזרחה עמוק לתחום הסדימנטים החרסיטיים, משנה את התמונה. מי התהום אינם שעונים יותר על מי ים־המלח המתרחקים, אלא זורמים בתת־הקרקע, על גבי החרסיות. כאשר המפלס ממשיך לרדת, נחשף לאויר המגע בין הסדימנטים הגסים לעדינים, ומי התהום נובעים לאורכו כמעיינות שכבה.

במקום חזית של מי תהום ומעיינות קטנים העוקבים אחרי קו החוף כבעבר, זורמים עתה מי המעיינות על פני השטח, בעקבות ים־המלח הנסוג, בפלגים המתחתרים לעומק בסדימנט הרך ואינם יכולים להדיח את המלחים בשטח שביניהם. יתר־על־כך, חשיפת השטח גורמת להמלחת יתר המוצאת ביטוייה בהתפתחות נאה של גבישי הליט, ואינה מאפשרת המשך התבססותו של הצומח.



ציור 3. תצפית 3, מניפת הקידרון: תעלות ארוזיביות בסדימנט של ים המלח מצופות בקרומי ארגוניט.

בלועים "קארסטיים" במניפות סחף

יעקב ארקין, המכון הגיאולוגי

הקדמה

יצירת ארובות אנכיות (piping) ושקעים (subsidence) בפני השטח של מניפות סחף היא תופעה שהתרחשה בעבר ומתרחשת בהווה במהלך התפתחות המניפות הנמצאות לאורך חוף ים המלח. תופעות אלו קשורות בתהליכי הבניה וההריסה של המניפות.

ניתן לחלק את מניפות הסחף לשתי קבוצות על בסיס פעילותן:–

1. מניפות צעירות (ציור א1)

מניפות ששיפוען מהקודקוד עד החזית, הוא מעל 15° , ואשר רמת פעילותן בדרך כלל נמוכה. המניפות נבנות על ידי המים הזורמים מפתח הנחל, בחזית ההרים, ומתפזרים על פני השטח מבלי לגרום להריסה משמעותית למניפה. המים מחלחלים לתוך המניפה וזורמים לאורך מסלולים תת-קרקעיים המוגדרים על ידי שכבות חלוקים בלתי מלוכדים עם ציפוי של תחמוצות ברזל (תמונה 1). לאורך מסלולים אלו נוצרים שקעים המאופיינים על ידי סדקים בצורת מעגלים (תמונה 2) שבמשך הזמן מתפתחים לבלועים דמויי משפכים (תמונה 3).

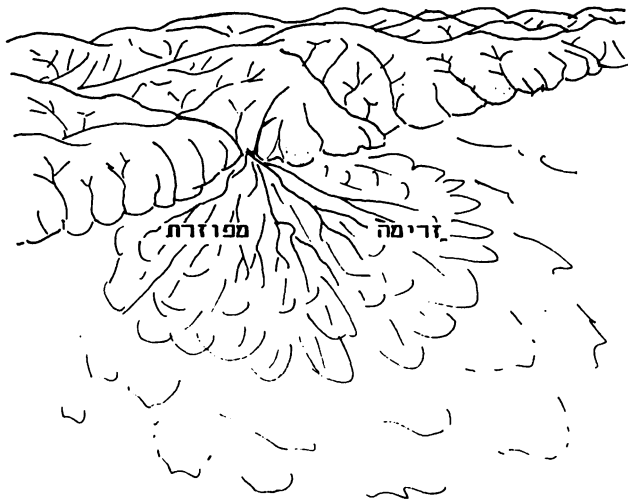
2. מניפות מבוגרות (ציור ב1)

אלו הן מניפות ששיפועיהן נעים בין 15° – 5° ובהן חל תהליך של הריסה בתוך המניפה ושקיעה מחדש בחזיתה וזאת כתוצאה משנוי בסיס הארוזיה או מסיבות טקטוניות כל שהן. המים היוצאים מפתח הנחל בחזית ההרים, חותרים דרך מרכז המניפה ויוצרים תעלה עמוקה. החומר שהוסר בונה מניפה חדשה בחזית המניפה המבוגרת. בדרך כלל מתגלים הבלועים בצורת משפך בתוך קירות התעלה העמוקה (תמונה 3).

תהליך התפתחות הבלועים.

מניפות סחף בנויות מחלקיקים בגדלים שונים המסודרים בשכבות שבעקרון הן אופקיות. תהליך התפתחות בלועים מתחיל בנקודה מסוימת לאורך מסלול הזרימה התת-קרקעית בשכבת חלוקים. בנקודה זו מתרחשת תנועה טורבולנטית הגורמת לערעור יציבות החלקיקים. באזורים צחיחים כמו ים המלח זרימת המים במניפות מתרחשת לסירוגין ובמהירות גבוהה. החדירות האופקית לאורך שכבת החלוקים גבוהה יותר בסדר גודל מהחדירות האנכית. תוספת המים במקומות אלו, בזמן שטפונות וחילחול גבוה, גורמת לפיזור, גזירה והתמוטטות של הציפוי החרסיתי העוטף את החלוקים. תוצאת התהליך היא הגברת הלחץ הנקבובי, איבוד הקוהזיה, שטיפה וסילוק החומר הדק בנקודת הווצרות הבלוע. המשך התהליך גורם להתמוטטות מלמעלה בנקודה זו בשל ירידת לחץ היניקה הקפלארית, אשר היקנתה לסלע את יציבותו. התהליך ממשיך כלפי מעלה בצורת צינור אשר בפני השטח מקבל צורה של משפך (תמונה 2).

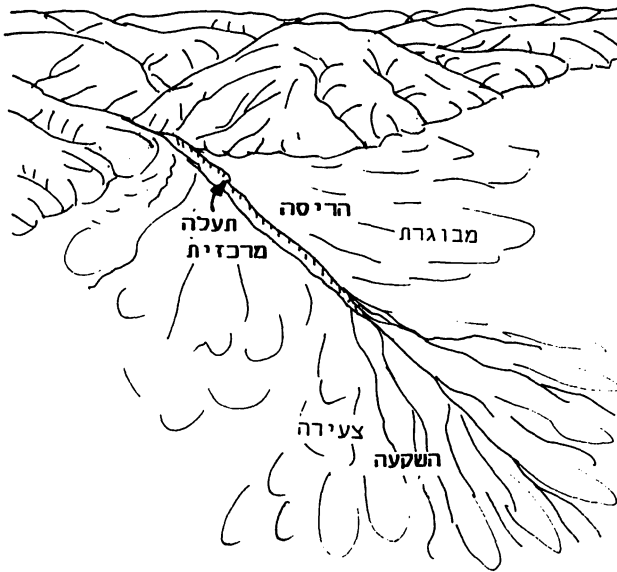
א1. מניפת סחף צעירה



המים מפתח הנחל, בחזית ההרים, מפוזרים על פני שטח המניפה וחודרים דרך מסלולי זרימה בתוך שכבות המורכבות מחלוקים גסים. לאורך מסלולים אלו מתפתחים בורות (בלועים) אנכיים דמויי צינור או משפך.

שפועים של פני שטח מניפות
צעירות בדרך כלל מעל 15°

ב1. מניפת סחף מבוגרת



המים מפתח הנחל, בחזית ההרים, חותרים דרך מרכז המניפה המבוגרת ליצור תעלה עמוקה והחומר שהוסר בונה מניפה חדשה בחזית המניפה המבוגרת. הזרימה מרוכזת בתעלה הראשית ופחות מים זורמים בתוך המניפה. בדרך כלל מתגלים בלועים בקירות התעלה.

שפועים של פני שטח מניפות
מבוגרות יותר, בדרך כלל בין 5°
עד 15°.

ציור 1. הגדרת מניפות הסחף. א1. מניפת סחף צעירה. ב1. מניפת סחף מבוגרת.



תמונה 3. בלוע דמוי משפך בתעלה המרכזית של מניפת שפך זהר.



תמונה 1. מסלול זרימה בשכבת חלוקים מצופים בתחמוצות ברזל.



תמונה 2. שקע עם סדקים בצורת מעגלים במניפת נחל מור.

מסלול הסיוור (ציור 2)

המסלול מתוכנן לנסיעה ברכב קל, נבקר בשלוש תחנות המדגימות את תהליך התפתחות הבלועים במניפות הסחף בעבר ובהווה ואת משמעותם כסכנה גיאולוגית (Geological Hazard).

תחנה מס. 1. בלועים בשלבי התפתחות

בתחנה זו אפשר לעקוב אחר שלבי התפתחותם של הבלועים המודרניים שנוצרו בשנים האחרונות במניפת הסחף של נחל מור (תמונות 2, ו-4).

תחנה מס. 2. בלוע בכביש שפך זהר

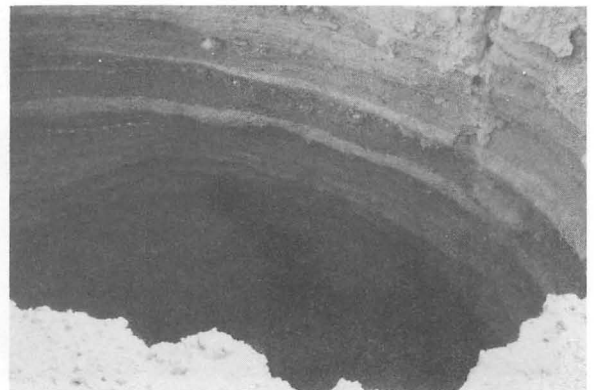
לקראת סוף שנות השמונים התפתח בלוע בכביש החוצה את החזית של מניפת שפך זהר. הבלוע נסתם על ידי מע"ץ עם חומר סחף מהסביבה והכביש שופץ מחדש. התופעה חזרה על עצמה מחדש בכל שנה לאחר השטפונות, עם בלוע רחב עוד יותר וזאת עד שנת 1991 (תמונה 5).

על מנת ללמוד את התופעה החוזרת נערך סקר באזור המניפה במטרה לקבוע את היקף התופעה כדי להמליץ על דרכי הפעולה לשיקום הכביש. מפוי האזור (ציור 3) גילה שורה של 8 בלועים לאורך מסלול מוגדר (תמונה 6). בחלק מהבלועים הובחנה רטיבות ואילו בקרקעית הבלוע שבכביש נראתה זרימת מים. עומק הבלועים נע בין 3-5 מ'.

נקדחו שלושה קדוחי מחקר בסביבות הכביש במטרה לבדוק את הרכב המניפה ואת רוחב ועומק מסלול הזרימה שבתוך שכבת החלוקים (ציור 4). תכונות מסת הסלע והתפלגות גודל הגרגר סייעו בזיהוי שכבת החלוקים מובילת המים. תכונות אלו נמצאו אחידות למדי לאורך מסלול הזרימה (ציורים 5, 6, 7).



תמונה 5. בלוע בכביש שפך זוהר ב-1991.



תמונה 4. יחידות קלסטיות המורכבות מחומר דק וגס גרגר לסירוגין במניפת הסחף של נחל מור.

קדוח ז' 1

גובה טופו: 388.8 - מד'

185000/625630 .Y.]

מטר	מיתפת סחף	הולקו	תיאור ליתולוגי	מיון	מקדח ענברי חידה ב'	דיופון	מפלס מים	פיומטר 2 1	הערות
2					3.00	ספירה 5" עם מים ובנושנים	5.12 1989		צרוורות נחל חשבות חלוקים ביריים וצור, בגודל עד 50-60 מ"מ, חול וחומר דק יבש. מתמוס בזמן קריחה.
4					2.50				חול וחוסית עם צרוורות וחלוקים בגודל עד כ-20 מ"מ נבצע אפור. מתמוס בזמן קריחה
6				CL	1.20				מפלס בקווח
8				CL	0.80				הרסית טינית, פלססיות בינונית אפור בהיר, רדוד מים, מפלס מים המלח
10					2.50	TCV בנושנים			צרוורות נחל חשבות חלוקים ביריים וצור, חול עם חסית רדוד מים, איבוד מים לחץ הידרוסטטי של 1.80 מ'

קדוח ז' 2

גובה טופו: 388.8 - נד'

184999/625631 .Y.]

מסר	תיאור ליתולוגי	מינן	עובי ליחידה	קרח	דיוון	מפלס מים	ציונות	
2			7.00	ספירה 5" עם מים ובנונים	בזוז הקדיחה החומר מתמוטט לתוך הקרום	▼ 7.12 1989	 10.12 1989	
4								
6								
8					0.60			
					2.40			
10								
מניפת סף								
הוילוק								
מעט נושי חרטית אפור								
צורות וחלקים גיריים								
צור בגודל 4-5 מ"מ								
רווי מים.								
לחץ הידרוסטטי של 1.80 מ'								

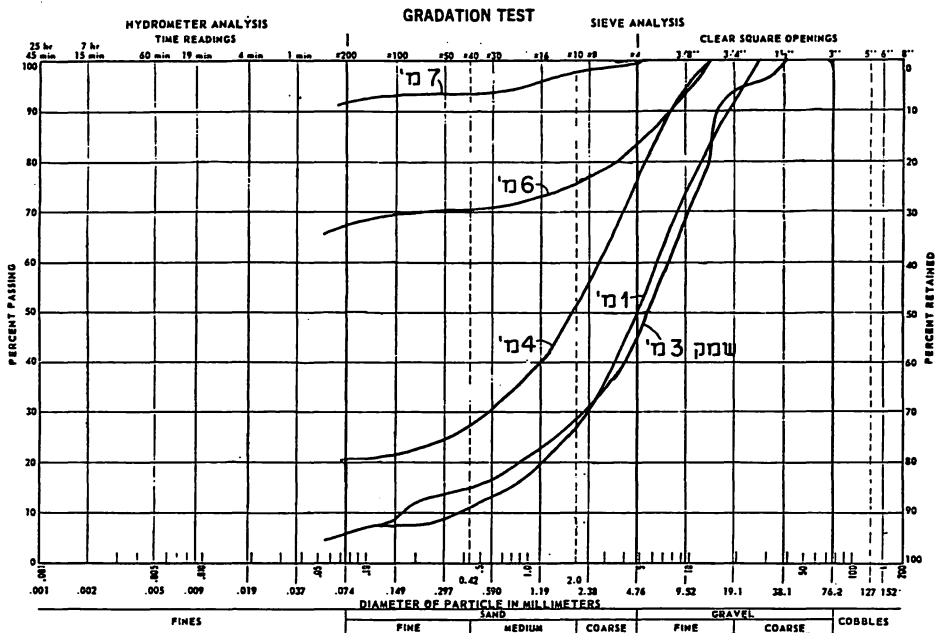
קדוח ז' 3

גובה סופו: 388.8 - נד'

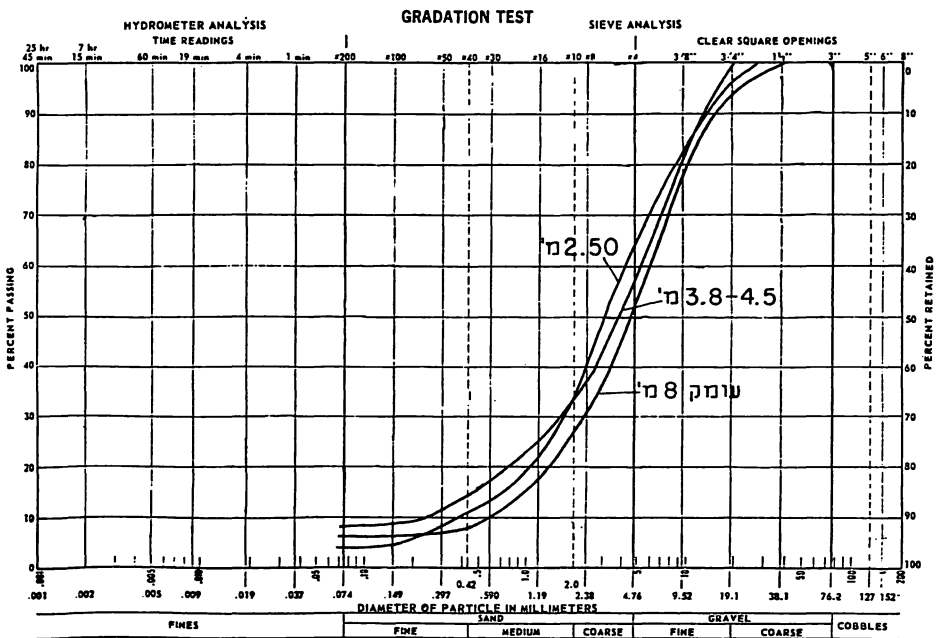
185000/625630 .Y.J

מסר	תיאור ליתולוגי	מיון	עובי מ' יחידה	מקדח	דיון	מפרס מ'ים	ציוןמסר		
2		4.00	0.10 0.70	ספירלה 5"	בזון הקדיחה החומר מתמוסס לתוך הקדוח		אספלט מצע של הכביש		
4									
6		5.20	10.12 1989					צורורות וחלוקים גיריים	
8									
10	הולבון	מניפת סחף	מפרס בקדוח -393.6	מפרס יס'המלח -394.6	צורורות וחלוקים גיריים	צור בנגול 40-50 מ"מ	רורי מים	במקומות נושי חרסית אפור	לחץ הידרוסטטי של 1.00 מ'

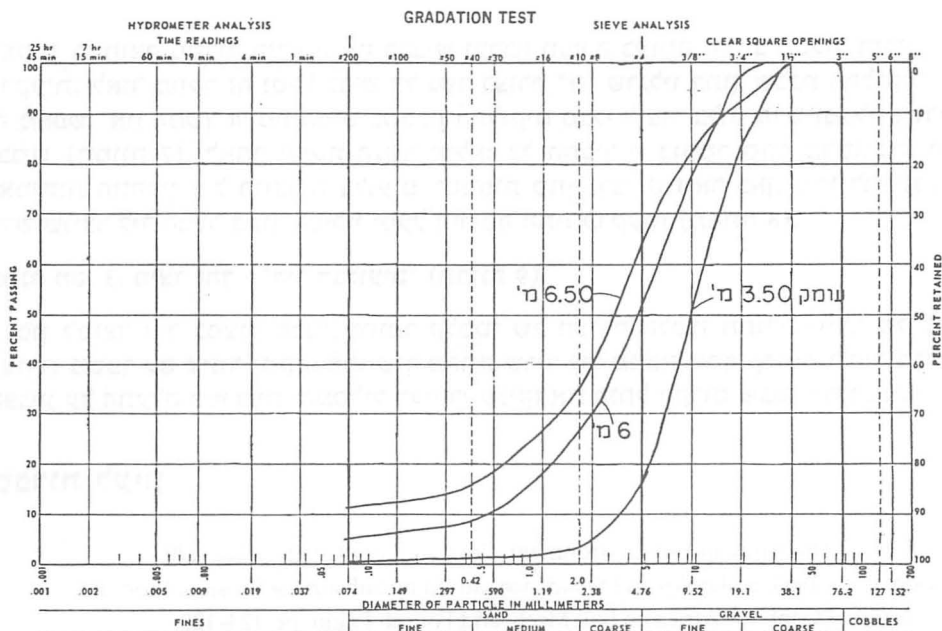
ציור 4. קדוחי המחקר באזור הבלוע בכביש החוצה את מניפת שפך זהר.



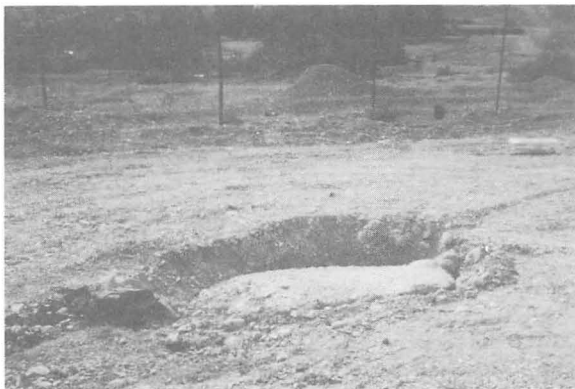
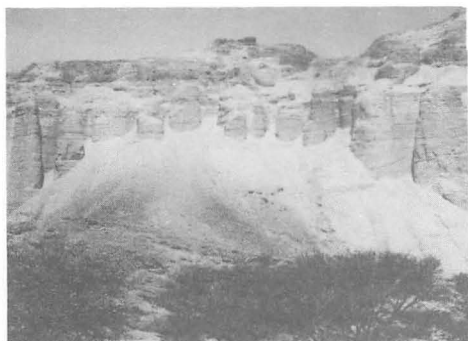
ציור 5. התפלגות גודל גרגר בקדוח ז'1 שפך זהר.



ציור 6. התפלגות גודל גרגר בקדוח ז'2 שפך זהר.



ציור 7. התפלגות גודל גרגר בקדוח ז'3 שפך זהר.



תמונה 8. התפתחות בלוע חדש ליד הגשר, שפך זהר. תמונה 9. "קיר הבלועים" מצפון למיצד זהר.

במקום בו חוצה מסלול הזרימה את הכביש נערכה חפירה בעומק ורוחב מסלול הזרימה התת קרקעית. לאור מחקר זה נסלל כביש על גשר בצורת "ח" שרגליו בתוך שכבת החלוקים. מבנה זה מאפשר את המשך זרימת המים בשכבת החלוקים מבלי ליצור בלוע חדש ומבלי שיגרם נזק לכביש (תמונה 7). לאחר יציקת הגשר מולאו כל החפירות בחומר סחף מהסביבה. הוכחה לאמיתות התהליך של הווצרות בלועים במניפות סחף, כפי שתואר כאן, ניתן לראות בבלוע חדש שנוצר ליד הגשר בתוך המילוי ומעל הזרימה התת קרקעית (תמונה 8).

תחנה מס. 3. מיצד זהר – "קיר הבלועים" (תמונה 9)

מצפון למיצד זהר במצוק הבנוי מחומר קלסטי של תצורת הלשון מתגלה שורה של בלועים בצורת משפך עם צינור יניקה. המחשוף מהווה שריד של מניפת סחף קדומה ו"קיר הבלועים" מצביע על התעלה המרכזית והמסלול העיקרי שניקז את הנחל הקדום שבנה את המניפה.

ספרות לעיון

- Bull, W.B. 1977. The Alluvial Fan Environment. Prog. in Phys. Geogr. 1;222–270.
- Donaldson, C.W. 1963. Sinkholes and Subsidence caused by Subsurface Erosion. Proc. 3rd Regional Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Engin. pp 123–125.
- Hooke, R.Le.B. 1975. Processes on Arid Region Alluvial Fans. J. of Geol. 75: 438–460.
- Moore, Harry L. 1976. The Piping Phenomena. Proc. of 25th Annual Highway Geol. Symp. Orlando, Florida. May pp 112–131.

סיור ב-1

חלק א: מצוק ההעתקים מדרום מערב לים המלח: מסטרטיגרפיה להסטוריה מורפוטקטונית

אמוץ עגנון* - המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית

(* עבודת השדה המוצגת בסיור התבצעה עם המכון הגיאולוגי)

מטרת הסיור היא להכיר את מבנה שולי הבקע מדרום מערב לים המלח (ציור א-1) ולבחון עדויות סטרטיגרפיות לפעילות מורפוטקטונית. הסיור יתמקד בשלושה היבטים בהם מצטיין האזור:

(1) שינויים לטרליים ואי התאמות מקומיות בקרטיקון: נבחן אם שינויי הפאציאס ואי ההתאמות הקרטיקוניים מבוקרים ע"י פעילות טקטונית, ואם יש קשר בין פעילות קדומה זו למבני מצוק ההעתקים.

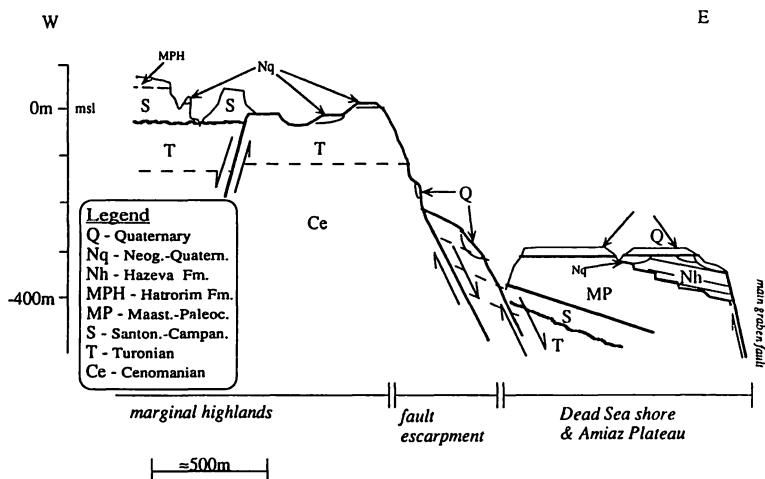
(2) שימור וחשיפה של חתכים ניאוגניים: החתכים הניאוגניים מופיעים בעוביים שונים (עד 1.5 ק"מ, ויתכן שיותר), בהרכבים שונים (משלטון קלסטים ועד שלטון אוופוריתים), ובמצבים טקטוניים שונים. המאחד את החתכים הניאוגניים הקדומים הוא הרכב הקלסטים: חול וסילט קוארץ וחרסיות, ובמקומות חלוקי צור "יבוא". הקלסטים בחתכים הניאוגניים הקדומים הובלו מרחוק, ואין בהם מרכיבים שנגזרו ממצוק ההעתקים. המרכיבים הקלסטיים מאפשרים סטרטיגרפיה של החתכים הניאוגניים, למרות שינויי פאציאס ועובי ניכרים כצפוי בשולי בקע.

(3) עדויות לתזמון הפעילות הטקטונית: הרכבים מיוחדים של טרסות קדומות על במת השוליים מציעים מסגרת סטרטיגרפית. נוכחות חלוקי חתרורים קושרת את גיל ההרבדה לאירוע המטמורפי. נוכחות מוגברת של חלוקים אאוקניים (במיוחד "צור יבוא") ונדירות חלוקים מתצורות קדומות לתצורת נצר קושרות טרסות לנוף שנותר אחרי השקעת תצורת חצבה. ההתפשטות הטרלית של טרסות אלה באזור העתקי השוליים מסייעת לפיענוח תזמון הטקטוניקה. כך ניתן להבחין בין תקופות בהן שלטו מבנים לחיצתיים שקשורים בתנועות אופקיות לתקופות של העתקה נורמלית.

העתקה נורמלית של מדרגות חוף ימת הלשון למרגלות המצוק תואמת התארכות בכיוון מזרח-מערב. פעילות זו, על מישורים הנוטים מזרחה, מעוררת את השאלה: האם פתיחת סדקים ומתיחה בבמת השוליים הן תוצר הטופוגרפיה, או שהן ביטוי למצב המאמצים בעומק. הורסטים וגרבנים בבמת השוליים מראים גם הם התארכות בכיוון מז'–מער', לפחות עד 4 ק"מ ממערב למצוק (ציור א-1). העדויות הגיאולוגיות, בצירוף עם הפעילות הסייסמית, מלמדות על ההתרחבות המתמשכת של הבקע ע"י תנועת חומר מהשוליים אל הבור.

מבנה המצוק ובמת השוליים (ציור א-1)

המבנים הנפוצים באזור הם מישורי העתקים נורמליים שכיוונם (strike) צפ'–מער' עד צפ'–צפ'–מז'. העתקים אלה יוצרים מדרגות בין במת השוליים למרגלות המצוק, עם העתקה מצטברת של עד 400 מ'. במקומות מופיעים העתקים נורמליים אנטיטטים (צד מערב ירוד) הן במצוק והן בבמת השוליים. ההעתקה על המישורים האנטיתטים פחותה לרוב מ-30 מ' (יוצא



ציור א-1. חתך רוחב מוכלל בדרום השוליים המערביים של ים המלח.

מכלל זה הוא הורסט יזרח שההעתקה ממערבו 160 מ'. העתקים אלה יוצרים מערכות הורסטים וגרבינים שכיוונם הכללי צפ'-דר'.

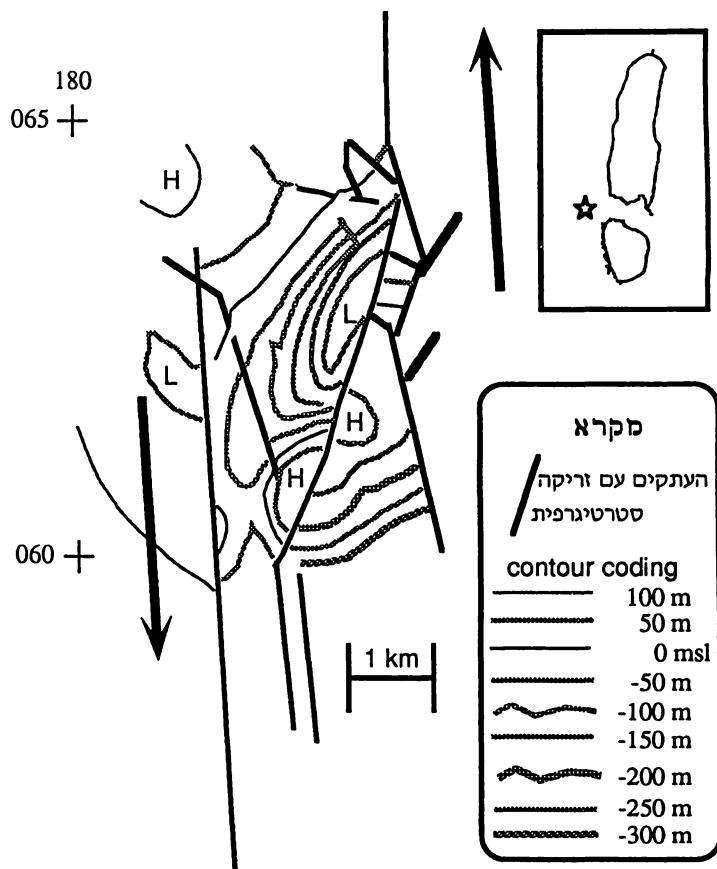
מצוק ההעתקים מורכב מקטעים באורך עד 10 ק"מ בכיוון צפון-דרום, אשר מדורגים ביניהם (ציור א-2). באזור כיפת חמר הדרוג בין הקטעים ימני, ומכאן שתזוזה שמאלית על המצוק יכולה להסביר את חצאי הכיפה (ציור א-3). כל קטע מקטעי המצוק מורכב מהעתקים באורך 1-3 ק"מ. ההעתקה מתרכזת על מישורים שסוטים מערבה מהצפון, ולכן בגושי המדרגות נפוצות נטיות בכיוון דרום מזרח המפצות על סטיה זו מהכיוון הכללי של המצוק (ציורים א-4, א-5).

מבנה נוסף שמאפיין את האזור הוא מונוקלינות שנוטות לדרום מזרח. בולטת ביותר הכפיפה שיורדת מצוק תמרור לעמק זוהר (ציור א-5); גם בגושי מדרגה במצוק ההעתקים נפוצות נטיות לדרום מזרח.

סימני החלקה אופקיים על מישורים בכיוון מז'-מע' נחשפים בקניונים הגדולים ומרמזים על מקור טקטוני לקניונים השומרים על כיוון אחד לאורך מאות מ' (כגון יעלים, רחף, בוקק) ועד קילומטרים (חימר). שני העתקים שחוצים את קניון בוקק מראים דרוג ימני בשיעור דומה של 200 מ, מה שמציע העתקה ימנית בכיוון מז'-מע' (ציור א-5).

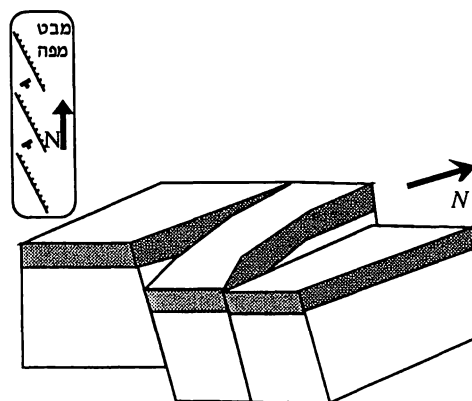
אי התאמות ושינויי פאציאס בקרטיקון

החתך הקרטיקוני הנחשף כולל את תצורת חצרה (פרטים עין יורקעם, צפית, אבנון, ותמר) מגיל קנומן (Arkin & Braun, 1965), דרורים, שבטה, ונצר מגיל טורון (בן-תור ופרומן, 1963), מנוחה, מישאש, וע'ארב מגיל סנון (Shaw, 1947). עובי הפרטים צפית-אבנון-תמר, שמגיע ל-245 מ' בחמי מזור (רז, 1983), מצומצם ל-185 מ' באזור עין בוקק (ציור א-6). אי התאמות מקומיות נמצאו בגג פרט צפית ובגג פרט תמר עם גידוע של החתך כלפי אזור עין בוקק (ציור א-6). גידועים אלה תומכים בהשערה שההשתפלות באזור עין בוקק היתה אטית מבסביבתו



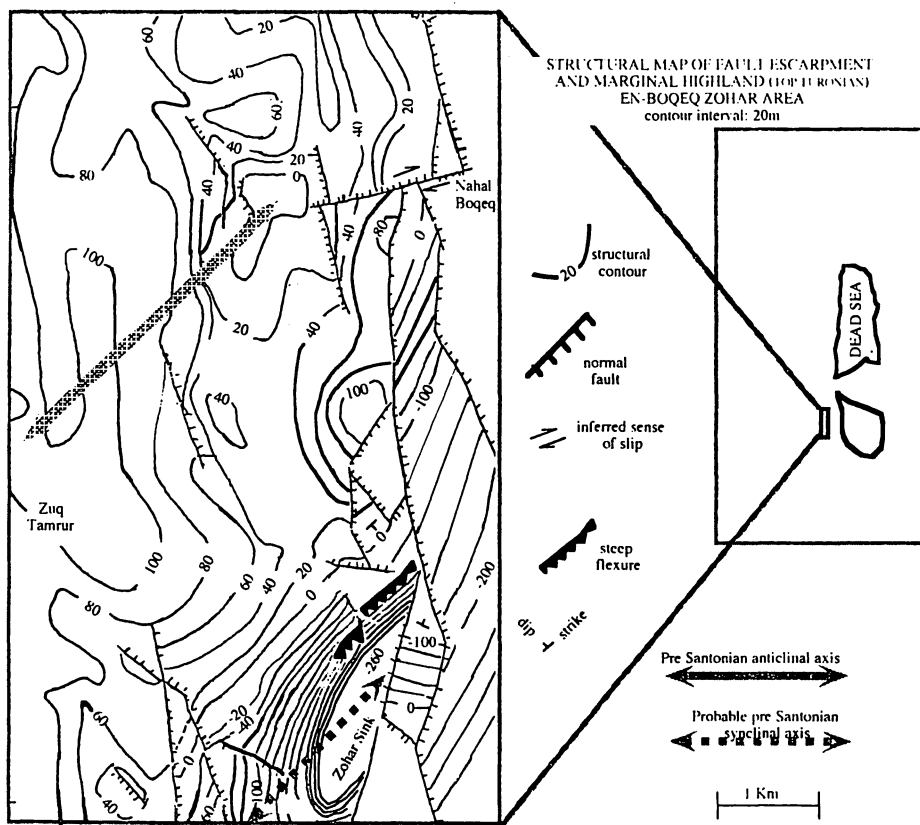
ציור א-3 (למעלה). מנגנון מוצע ליצירת חצאי כיפות בהר חימר ע"י תזוזה שמאלית על העתקי הבקע.

ציור א-4 (למטה). העתקי מדרגה עם גוש נטוי – מבנה אופייני למצוק ההעתקים הדרומי ממערב לים המלח.

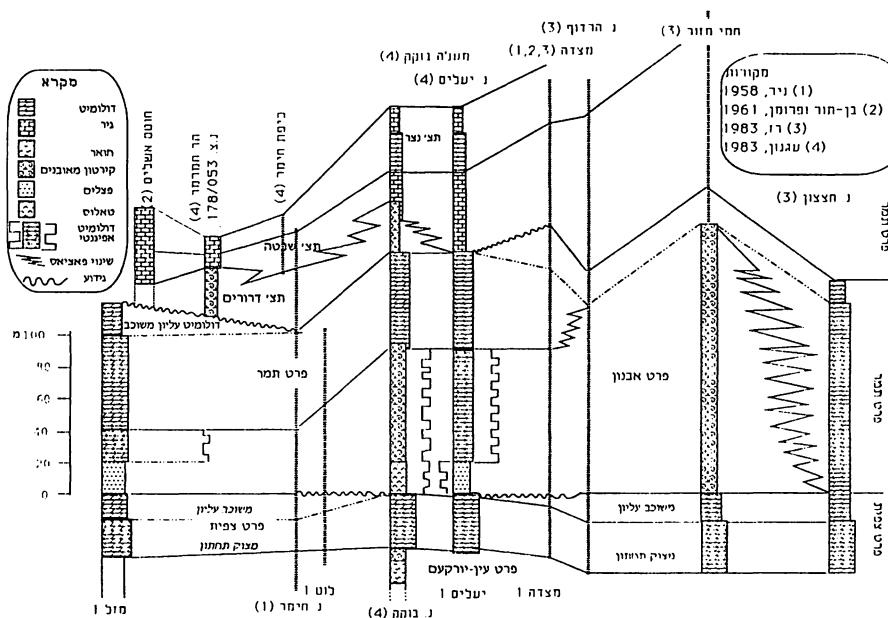


במשך הקנומן. בקנוזאיקון התהפך המבנה ואגן חבר הקנומני שמרכזו בחמי מזור (רז, 1983) מוגבה בכ- 100 מ' לעומת המצוק באזור עין בוקק. תצורות הטורון התחתון מראות מעברים לטרליים וורטיקליים היוצרים את שינויי העובי: תצורת שבטה מתעבה על חשבון תצורת דרורים עד שבמקומות נעלמת תצורת דרורים (ציורים א-6, א-7). לפיכך נראה שהאגנים בהם שקעה תצורת דרורים היו מוגבלים לטרלית, כפי שהציע פרוינד (1962), אך לא נשלטו ע"י טקטוניקה. במקומות יוצרת תצורת דרורים תעלות ברוחב 200 מטר.

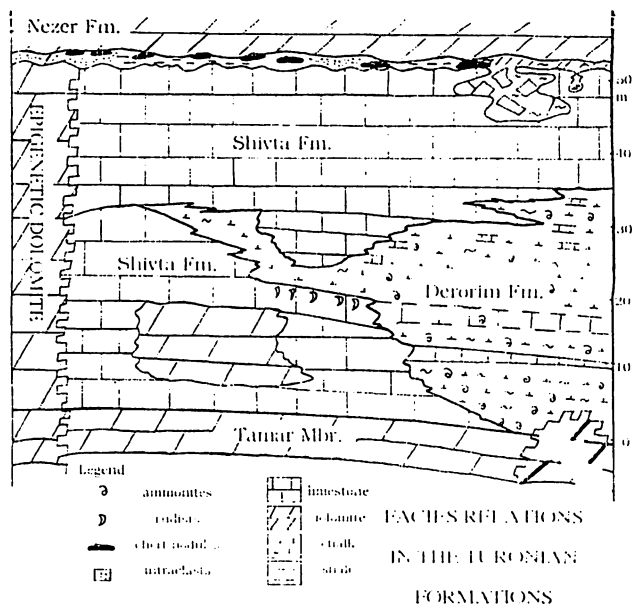
אי התאמה נוספת נמצאה בין גג תצורת נצר ובסיס תצורת מנוחה, כמוכר בנגב (בן-תור



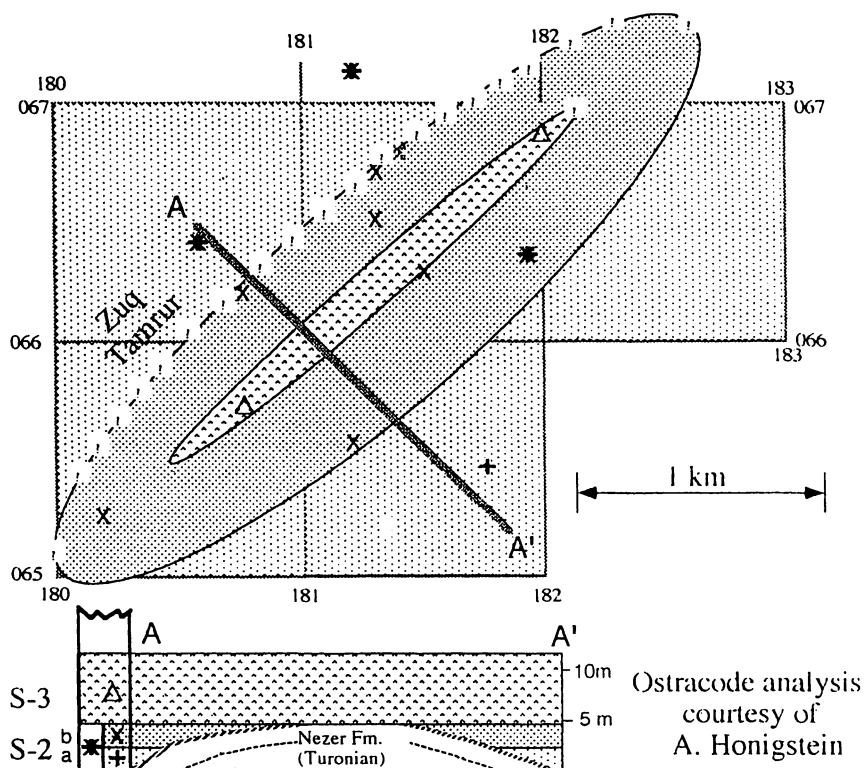
Structural map of fault escarpment and marginal highland (top Turonian), En-Boqeq .5 ציור א-
Zohar area.



ציור א-6. שינויים לטרליים וקורלציות בחבורת יהודה.



צוור א-7. יחסים פציאליים
בתצורות הטורוניות.



S-1 found only at coord. 1818/0616

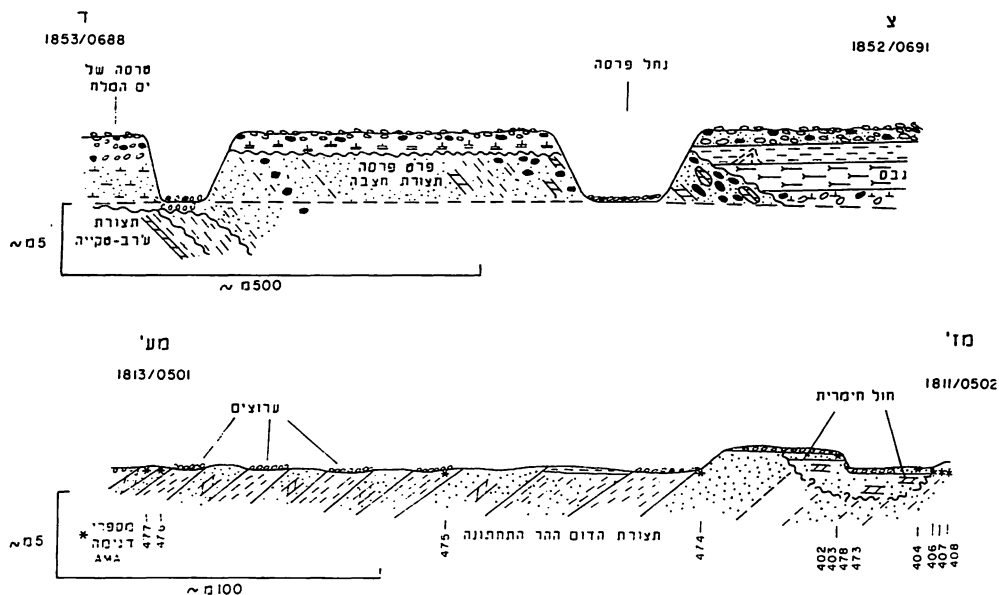
צוור א-8. Distribution of ostracode
assemblage zones at the base of Menuha Fm.

ופרומן, 1957, 1963). ביוסטרטיגרפיה מפורטת של אוסטרקודים בסנטון (Honigstein, 1983) איפשרה מיפוי של אי ההתאמה בבסיס תצורת מנוחה (ציור א-8). לפי האזור הסטרטיגרפי שבבסיס תצורת מנוחה הסיק עגנון (1983 א) שהים הסנטוני כיסה טופוגרפיה על סלעים מתצורת נצר הטורונית ב-onlap. כיון שהנוף הקדם-סנטוני יוצר כיפה מאורכת בכיוון צפ'-מז' (ציור א-8), במקביל למונקלינט עמק זוהר ומבנים קדם סנטוניים בנגב הצפוני (שטייניץ, 1974), נראה שהנוף נוצר ע"י קימוט קדם סנטוני. תמיכה בהשערה זו נתנת ע"י השתרעות אזור האוסטרקודים הקדום ביותר והמוכר רק מסינקלינות בנגב (S-1, הוניגשטיין, בע"פ). בסביבת מצוק ההעתקים נמצא אזור S-1 רק בני"צ 1818/0616, על ציר סינקלינט זוהר (ציור א-5). ציור א-5 מראה שציר המבנה הקדום נחתך ע"י העתקי השוליים של הבקע וכפיפות שמקבילות להם (צפ'-דר'). לכן המבנה הנוכחי מבטא סופרפוזיציה של קימוט והעתקה. מהיחסים האמורים נראה שפעילות העתקי הבקע ושוליו מאוחרת מתחילת פעילות הקימוט בציר צפ' מז' - דר' מע'. כמו כן נראה שהקמטים המתונים בבמת השוליים (משרעת כ-50 מ', אורך גל כ-1 ק"מ, ציור א-5) בכיוון צפון-דרום הם ביטוי להתארכות הקרום בכיוון מז'-מע' בשולי הבקע.

דולומיטיזציה דיסקורדנטית פוגעת בגירים וקירטונים מגיל קרטיקון והיא יוצרת יחסי שדה העלולים להתפרש בטעות כאי התאמות (רז, 1983). הדולומיטיזציה האפיגנטית פוגעת בעיקר באזורי סידוק ושבירה באקויפרים קדומים כתצורת נצר. רז (1983) וגילת (דברים בע"פ) מצאו שגם אקויקלוד כמו תצורת מנוחה הקירטונית-חוארית מוחלפת במקומות בהם היא במגע עם סלעים מתצורת נצר שעברו דולומיטיזציה אינטנסיבית.

חתיכים ניאוגניים

חשיפת חתיכים ניאוגניים קדומים באזור זה מאפשרת שחזור של ההתפתחות הטקטונית של הבקע בצעירותו. החתיכים הניאוגניים מגיעים לעובי חשוף של עשרות עד מאות מטר בבלוקים



ציור א-9. א: יחסי שדה בחתך טיפוסי של פרט פרסה, תצורה חצבה. ב: חול חימרית מרובד באי-התאמה על תצורת הדום ההר התחתונה, דרום מישור עמיעז.

MEDITERRANEAN-DEAD SEA HYDROELECTRIC PROJECT
GEOLOGICAL COLUMNAR SECTION OF THE GRABEN FILL

NAHAL PARSA NEAR THE DEAD SEA

COORD. 1842/0692; ELEVATION OF BASE — 360 m M. S. L.

Prepared by A. Agnon

G.S.I. Map Div. Ref. No.

Measured with tape 1981

STRATIGRAPHY					METERS THICKNESS(m)	REMARKS
SYSTEM	SERIES	STAGE	GROUP	FORMATION		
TERTIARY	QUATERNARY	PLEISTOCENE	UPPER	PLEISTOCENE		
NEOCENE MIOCENE?	DEAD SEA	UNNAMED CLASTIC UNIT	PARSA	LISAN		
PARSA						

צור 10

הנטויים (נ. פרסה ומישור עמיעז), שם הם מונחים באי התאמות זויתיות על סלעים מגיל שלישון (ציור א-9) ומעליהם משקעי מילוי הבקע באי התאמה (ציור א-10). יוצא מכלל זה הוא חתך תצורת סדום (זק, 1967) (לפחות 1.5 ק"מ) הנחשף בדיאפיר המלח של הר סדום, בו לא נשמרו המגעים הסדימנטריים בבסיסו ובגוו. הליתולוגיה בחתך הניאוגני בולטת על רקע החתך המריני שמתחתיו והסדרה הקלסטית בעיקרה שמעליו. הקלסטים בסדרה זו נגזרו מדטריטוס של מצוק ההעתקים לכן הפאליאוגרפיה דומה למצב הנוכחי בבקעת ים המלח.

החתך בנחל פרסה והחתך מדרום לנחל בוקק זוהו עם תצורת חצבה ללא פירוט ע"י ניר (1958). **החתך במישור עמיעז ("תצורת הדום ההר התחתונה")** זוהו כניאוגן ע"י Vroman (1944) שציין את העדר ההורנבלנד במינרלים הכבדים. עגנון (1983, א,ב) זיהה חלוקי צור יבוא השולטים בחתך בנחל פרסה, שם מדד כ 140 מ' מהתצורה (ציור א-9). הוא מדד כ 100 מ' במישור עמיעז (ציור א-9) ואפיין את שני החתכים כדלהלן: (1) שלטון של חול וסילט קוארץ; (2) ליכוד דולומיטי-אוופוריטי (כולל תרכיזי דולומיט נפוצים); (3) העדר של קלציום קרבונט והעדר של מיקרופאונה קרטיקונית מגולגלת ממצוק ההעתקים; (4) כל אחד מהחתכים נחלק לשתי יחידות עם אי התאמה זויתית ביניהן. היחידה התחתונה יוצרת את עיקר החתך, היא נטויה ומונחת באי התאמה על פצלי שמן דולומיטיים (מאסטרית-פאליאוקן). עובי היחידה העליונה מטרים ספורים והיא מרובדת אופקית. היחידה התחתונה שונה מהעליונה בהרכב המינרלים הכבדים: ביחידה התחתונה שולטים המינרלים היציבים (צירקון-תורמלין-רוטיל) בצד דולומיט ברזלי. המינרלים הבלתי יציבים (בעיקר הורנבלנד ואוגיט) השולטים בפרקציה הכבדה של היחידה העליונה נעדרים מהיחידה התחתונה. בנוסף לכך נמצאו ליתוקלסטים המכילים קוארץ ופלדספר ביחידה העליונה בלד.

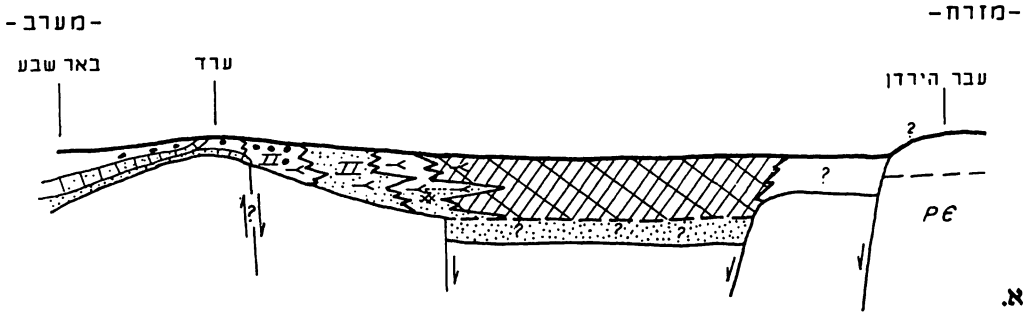
החתך של תצורת סדום (זק, 1967) מיוחד בשלטון האוופוריטים (1000 מ' ויותר). תצורת סדום שקעה באגן טקטוני משתפל במהירות תוך קשר עם הים הפתוח, מה שמסביר את הצטברות החתך האוופוריטי. אולם אם נתרכז במרכיב הדטריטי בחתך (כ-300 מ' מצטבר), הוא דומה לחתכים הניאוגניים הקלסטיים הנחשפים בגושים הנטויים. גם בתצורת סדום נעדרים הורנבלנד ואוגיט, ואילו קלציום קרבונט נדיר. פורמינפריס ממוחזרים שנמצאו בתצורה הם לרוב מגיל שלישון (זק, 1967) ולעומת זאת נעדרים נציגים מהמאסף הסנטוני-קמפני הדומיננטי במחשופים הנוכחיים של הקרטיקון בשולי הבקע ובתצורות מילוי הבקע הצעירות.

וינברגר (1992) ניתח את מבנה הר סדום בעזרת פליאומגנטיות ומצא שהחתך של תצורת סדום עשוי להיות מוכפל בהר ע"י המבנה האנטיקלינלי שלו (ראה וינברגר ועגנון, כך זה).

בסיור זה נראה את עדשת החלוקים הראשונה שנמצאה בתצורת סדום. אלה חלוקי צור בלויים מאוד, ככל הנראה "צור יבוא", המופיעים קרוב לגג החתך של תצורת סדום.

קורלציות עם חתכים מחוץ לבקע הוצעו על בסיס נסיבתי (ציור א-11). בעקבות זק (1967) מקובל שתצורת סדום קורלטיבית לתצורת בירה הבראקית בצפון (או אף צעירה יותר) ולקונגלומרט הערבה בדרום. אלרון (1980) הראה שקונגלומרט הערבה אכן מראה מעבר לטרלי לקרבונטים ימיים של תצורת מזר באזור המכתש הקטן. עגנון (1983, א,ב) חלק על הקורלציה המקובלת בין תצורת סדום לקונגלומרט הערבה לפי שהאחרון ניקז מחשופי סלעים מגמטיים והוא עשיר בהורנבלנד ואוגיט. הופעת ההורנבלנד והאוגיט מציינת חשיפת סלעים מגמטיים בסמוך לבקע ויצירת מערכת ניקוז אל הבקע. (Garfunkel & Horowitz 1966) זיהו את חתירת מערכת הניקוז הזו עם קונגלומרט הערבה העשיר בחלוקים מגמטיים. לפי טיעון זה תצורת סדום קורלטיבית לתצורת חצבה וקונגלומרט הערבה קורלטיבי לתצורה צעירה יותר

פאליאוגאוגרפיה מוצעת



→ תצורת סדום
← תצורת הדום
→ תצורת חצבה

ההר
התחתונה



ציור א-11. א. בזמן השקעת התצורות סדום וחצבה.
ב. בזמן השקעת התצורות עמורה, מזד, ערבה.

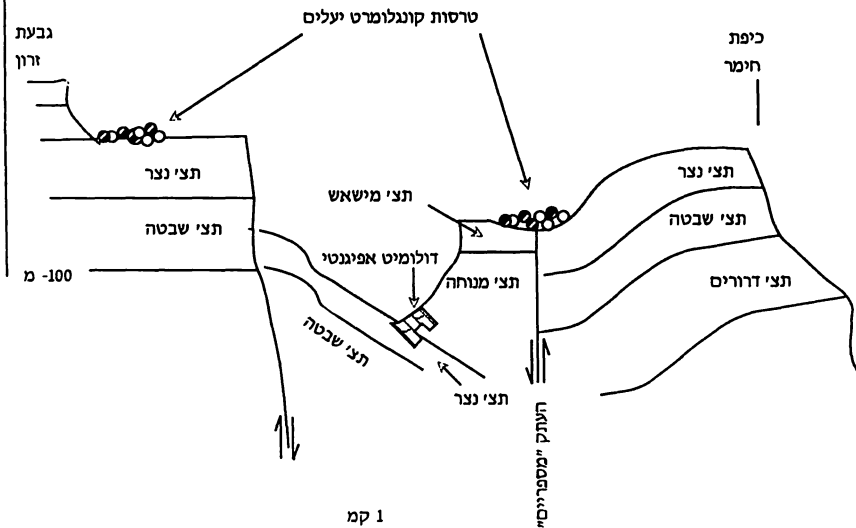
צפי-מעי

דרי-מזי

182/062

183/061

טט ג



ציור א-12. יחסי שדה בין קונגלומרט יעלים למבנים.

(ציור א-11), אולי תצורת עמורה העשירה בהורנבלנד ואוגיט ואשר נמצאו בה חלוקים מגמטיים (זק, 1967). סער (1986) מצא שהקלסטים בחתך הטיפוסי של תצורת חצבה אינם זהים לקלסטים בתצורת סדום בגרנולומטריה ובהרכב המינרלוגי. מכך הסיק ששני חתכים אלה אינם בני גיל אחד. (Steinitz & Bartov (1991 מדדו גילי פלאטו בזלת בעבר הירדן ובזלות שזרמו בקניונים בעבר הירדן. מהגילים הרדיומטריים הם הטילו מגבלות על גיל הבקע ושיחזרו קצבי התחתרות בשולי הבקע.

העדויות המוצגות בסיור זה מציעות שתצורת סדום שקעה בזמן הרבדת חלק מתצורת חצבה (עגנון, 1983 א,ב). לדעתו ההשתפלות הטקטונית המהירה בחלק מהדלתא שכיסה את הבקע הפעיל גרמה לחדירות חוזרות ונשנות של מי ים שהביאו לתנאים של סבחה ולגונה לחילופין (ציור א-11). (Stein et al. (in prep.) מצאו שיחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ שנמדדו בתצורה (0.7086-0.7082) תואמים את היחסים בים המיוקני. לאחר נסיגת הים נוצר בבקע תבליט חשוף עם בסיס ניקוז עמוק וארוזיה מהירה פוגעת בשוליו. כך שוקע בשוליים קונגלומרט ערבה ובמרכז מילוי בקע מקומי (ציור א-11).

מקור החדירה הימית לפי זק (1967) הוא ככל הנראה בעמק יזרעאל. עגנון (1983 א,ב, בעזרת ז. רייס) מצא עדויות פטרוגרפיות לנוכחות ים ניאוגני בגג החתך של תצורת חצבה בערד ובהתאמה לקורלציה שהוא מציע הסיק שהים הגיע ממערב, בטרם התקמרות גב ההר.

טרסות חלוקים על במת השוליים אינן קורלטיביות לחתכים הניאוגניים הקדומים. עגנון (1983 א,ב) ניתח את הסטרטיגרפיה של הטרסות לפי נוכחות חלוקי חתרורים בהן. קונגלומרט יעלים העשיר בחלוקי "צור יבוא" ונעדר חלוקי חתרורים שקע בטרם התמרת החתרורים, ו/או במערכת ניקוז שזרמה מערבה. קונגלומרט זה יוצר את הטרסות הגבוהות ביותר בבמת השוליים (+60 מ' מעל פני הים ומעלה), ומתלכד עם מישור גידוע הנמשך לסינקלינת החתרורים ממערב (ציור א-12). בכיפת חמר מונחת טרסה כזו בגובה 60- (כלומר, מתחת פני הים) והיא מונחת על העתק מספריים אנכי (ציורים א-12, א-5).

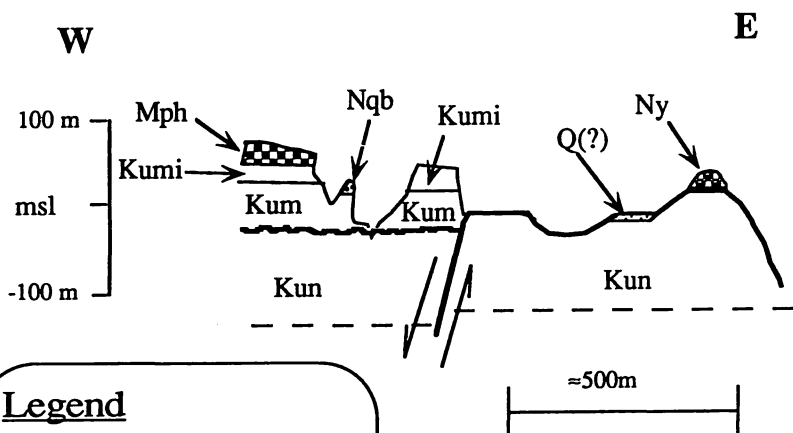
בפתחת נחל חמר מונח קונגלומרט דומה בהרכבו לקונגלומרט יעלים בגובה 300- מ' למרגלות מצוק ההעתקים (תחנה 10 בסיור).

טרסות צעירות יותר מונחות לרוב על גבי תצורת מנוחה ומתעדות מערכת ניקוז שחתרה את מישור הגידוע של קונגלומרט יעלים (ציור א-13). הופעת חלוקי חתרורים בטרסות אלה מעידה על הרבדה אחרי המטמורפיזם, ועל ניקוז מזרחה, לתוך הבקע.

תזמון הפעילות הטקטונית

המצאות תצורת חצבה על מרכיביה האלוכטוניים בבחלקים הירודים ממצוק ההעתקים מעידה שהמצוק נוצר אחרי השקעת התצורה. שיקול דומה תקף גם לתצורת סדום. מצד שני נדרשת פעילות טקטונית ניכרת במשך הרבדת החתך האוופוריטי המצטמצם על פני מרחקים קצרים (זק, 1967). נראה שעיקר הפעילות בזמן הרבדת החתך האוופוריטי התרכזה בסמיכות להעתקים העיקריים של הטרנספורם, במנגנון גראבן דמוי מעוין (Garfunkel, 1981).

באזור צוק תמרור- כיפת חמר נמצאות עדויות לגיל היחסי של מערכות השבירה: תזוזה שמאלית על מערכות בכיוון כללי צפ'-דר' יוצרת מבנה חצאי כיפות בדרוג של נחל חמר (ציור א-3). לפי שהטרסה הירודה של קונגלומרט יעלים נשענת על העתק "מספריים" בעל מישור אנכי (ציור א-12) נראה שהשקעת הקונגלומרט מאוחרת לגזירה. נראה שגם הקימוט של כיפת



Legend

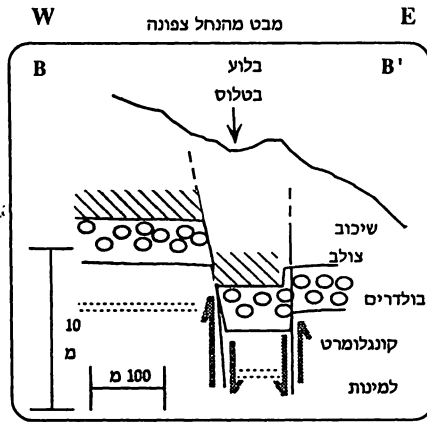
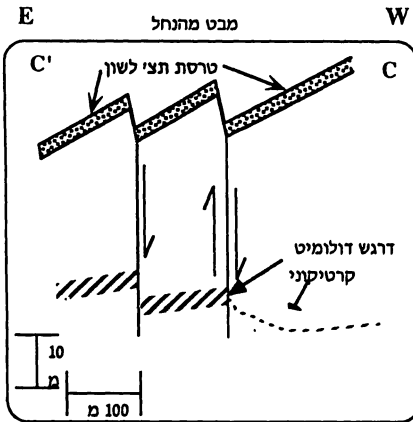
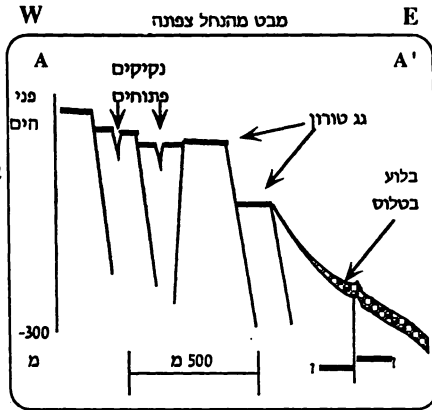
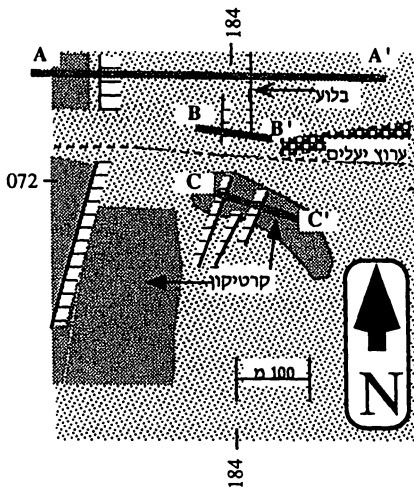
- Q - Quaternary terraces
- Nqb - Boqeq Cgl.
- Ny - Neog. Ye'elim Cgl.
- Mph - Hatnurim Fm.
- Kumi - Camp. Mishash Fm.
- Kum - Sant. Menuha Fm.
- Kun. - Touron. Nezer Fm.

ציור א-13. חתך רוחב מוכלל בדרום במת השוליים המערביים של ים המלח.

חמר קדם לטרסה היושבת באי התאמה על מדרון סטרוקטורלי (ציור א-12). לפי נפיצות חלוקי צור יבוא וחול קוארץ בקונגלומרט יעלים שבשפך נחל חימר, סביר שהורבד לפני ההעתקה הנורמלית (ציור א-12). לאחר השקעת הקונגלומרט מתרחשת העתקה נורמלית וכנראה שבשלב זה מתחיל להוצר מצוק ההעתקים.

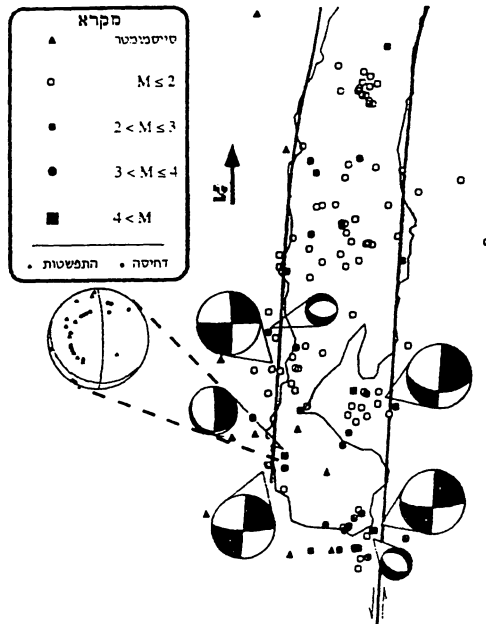
לפיכך נראה שהיו שתי פאזות של העתקה: העתקה בבמת השוליים הנוכחית, עם זריקה סטריטיגרפית קטנה (>20 מ) לפני הרבדת קונגלומרט יעלים, והעתקה נורמלית עם זריקה של מאות מטר אחרי הרבדה. יתכן שהפאזה הראשונה קשורה בגזירה במקביל לבקע, בשלבים הראשונים להוצר.

מדרגות חוף המתעדות את הנסיגה של אגם הלשון מאפשרות תיארוך של הפעילות הצעירה בהעתקי הבקע באזור מעלה יאיר-נחל יעלים (ציור א-14). העתקה נורמלית אנטיטית (צד מערב ירוד) של עד 7 מ' למרגלות המצוק יצרה מתלולים מנוגדים (anti slope facing) וסייעה כנראה לפתיחת נקיקים על במת ההר (Agnon, 1982). העתקה זו מתעדת התארכות בכיוון מז' שאינה תגובה לגרדינט הטופוגרפי (המצוק). יתכן שההעתקה האנטיטית קשורה עם הפרש הצפיפויות בין מילוי הבקע לחתך בשוליו: רעידת אדמה במגניטודה 4.3 ובעומק 1015 ק"מ (Shapira, pers. comm.) מראה מנגנון מוקד של העתק אנכי אנטיטטי או העתק על מישור אופקי ליסטרי (ציור א-15, א-16) (van Eck and Hofstetter, 1989), מה שמחזק את הקביעה של Agnon (1982) שהקרום בשולי הבקע עובר מתיחה בכיוון מזרח-מערב. בשלב זה לא ניתן לקבוע באיזו מידה מייצגים סימני המתיחה הגיאולוגיים והגיאופיסיים את הקרום כולו.



ציור א-14. העתקה נורמלית אנטיטית במצוק ההתקיים.

ציור א-15. פתרון מוקד רעידות עין בוקק (1987) הפעילות הסייסמית בים המלח בשנתיים (1986-1988); בעקבות van Eck & Hofstetter, 1989.



תחנות הסיור

תחנה מס' 1. צוק תמרור: מבנה סנוני; מבנה צעיר

המבנה הסנוני (ציר צפ' מז' – דר' מע', ציור א-8) מטושטש ע"י מבנה צעיר (ציר צפון-דרום, ציור א-5).

תחנה מס' 2. קונגלומרט בוקק: חלוקי חתרורים

הקונגלומרט אינו מלוכד ומכיל חלוקי חתרורים (180/066). הקונגלומרט מונח בראשי גבעות בהורסטים שבשולי הבקע, לרוב על תצורת מנוחה (ציור א-12). נוכחות חלוקי חתרורים מעידה על השקעה אחרי המטמורפיזם של חתרורים במערכת ניקוז מזרחה. לפיכך נראה שקונגלומרט בוקק מאוחר לקונגלומרט יעלים.

תחנה מס' 3. כביש מעלה זוהר: תצפית (צפונית לכביש) וסיור (דרומית לכביש)

תצפית על טרסת קונגלומרט "יעלים" (נ.צ. 1822/0613) מהגבעה שמצפון לכביש: קונגלומרט לא מלוכד של חלוקי צור וקרבוט בקוטר 15-5 ס"מ מונח על גג תצורת נצר הנטויה צפון מערבה (מכיפת חמר) ושעון כנגד העתק המרים את תצורת מישאש (ציור א-11). הקונגלומרט שוייך לקונגלומרט יעלים לפי העדר חלוקים שנגזרו מתצורת חתרורים והנפיצות של חלוקי צור יבוא שמקורם ככל הנראה בגלגול מחודש מתצורת חצבה. חלוקים נוספים נגזרו מגיר, דולומיט, וצור. ציור א-12 מראה שטרסה של הקונגלומרט מונחת על תצורת נצר בבמת השוליים, במרחק 1 ק"מ לצפון מערב ולמעלה מ'100 גבוה יותר. ניתוח מפורט יותר של הרכב החלוקים במחשופים השונים עשוי לתרום להבנת יחסי גיל בין הקונגלומרט להעתק המפריד בין המחשופים.

מדרום לכביש רואים שלבים שונים בדולומיטיזציה דיסקורדנטית של קירטוני תצורת מנוחה. המעברים הלטרליים בין קירטון לדולומיט על פני מטרים ספורים מחזקים את ההערכה שהדולומיט אפיגנטי (בדומה לממצאים של רז, 1983, וגילת, בע"פ). בדוגמה לא דולומיטית נמצאו אוסטרקודים מאזור S-1 (זיהוי – א. הוניגשטיין), מה שמציע פאציאס סינקלינאלי. תצפית זו תואמת את המיקום על ציר סינקלינת זוהר.

תחנה מס' 4. פתחת נחל בוקק: תצפית מערבה לחתך הקרטיקוני

רואים את שינויי הפאציאס בטורון התחתון-אמצעי. תצורת דרורים הבנויה קירטון וחואר ויוצרת מדרון מתחלפת לטרלית וכלפי מעלה בתצורת שבטה הגירית או דולומיטית ויוצרת מצוק (ציור א-7). העובי המצטבר של שתי התצורות, 50 מ', נשמר מעין גדי (רז, 1983) שם בונה תצ' שבטה את כל החתך ותצ' דרורים נעדרת, ועד לשולי המכתש הקטן (אלרון, 1980) שם בונה תצורת דרורים את מרבית החתך. במצוק מעל עין בוקק יוצרת תצורת דרורים עדשות בעובי עד 35 מ', המכילות אמוניטים מאזורים 4-1 של פרוינד (1962) (זיהוי המאובנים באדיבות ז. לוי).

תצורת דרורים, ובמקומות שזו חסרה תצורת שבטה, מונחות ישירות על היחידה המצוקית של פרט תמר, כי היחידה המשוכבת של פרט תמר גדועה (ציור א-6). המגע בין הפרטים אבנון ותמר מלושן (intertongued).

תחנה מס' 5. נחל פרסה: תצורת חצבה

החתך החשוף העבה ביותר (180–120 מ') של התצורה באזור מונח באי התאמה על פצלי שמן דולומיטיים מגיל פאליאוקן (ציור א-9). על החתך מונחת באי התאמה סדרה קלסטית-אופוריתית כולל קירטונים למינריים מתצורת ליסאן (ציור א-10).

החתך הניאוגני בנוי מחול קוארץ, קונגלומרטים, ומעט חרסיות. החולות מלוכדים דולומיט וסולפט, ובמקומות יוצר הליכוד תרכיזים שגדלם עד 30 ס"מ. החלוקים מעוגלים, מיונים גרוע, וגודלם הנפוץ 5–15 ס"מ. המרכיב הבלעדי כמעט של החלוקים הוא צור, בהרבה מהמקרים צור "יבוא". בגג החתך נפוצים שבבי צור, בגודל של עד 1 ס"מ. חרסיות ירקרקות יוצרות שכבות (עד 20 מ' עובי) ועדשות לכל אורך החתך. החרסיות מכילות מיקרופאונה מגיל טרציאר מרובדת מחדש (פ. רייס).

החתך נחלק לשתי יחידות המופרדות ע"י אי התאמה זוויתית:

- (1) יחידה תחתונה נטויה כלפי צפון ($\approx 20^\circ$), יוצרת את עיקר העובי של החתך (ציור א-9א);
- (2) יחידה עליונה אופקית שעוביה הנחשף מטרים ספורים (ציור א-9א, א-10). מלבד השוני בנטיה, יחידות אלה שונות בהרכב המינרליים הכבדים שלהן כמתואר בסקירה לעיל.

תחנה מס' 6. מניפת נחל יעלים: העתקים פעילים

מצפון לנחל רואים בלועים ברוחב מטרים ספורים שהתפתחו על סינור טלוס (ציור א-14, חתכים A-A', B-B') והם ביטוי להעתקה אנטייתית במצוק (צד מערב ירוד). בקיר הערוץ של הנחל נחשפים העתקים שמסיטים קונגלומרטים (ציור א-14). מדרום לנחל נחשפים העתקים אנטייתים בדולומיט קרטיקוני וטרסת חוף של תצורת הלשון מוסטת על ההעתק 7 מ' (ציור א-14, חתך C-C'). הטרסה התפתחה על חתך של 5–20 מ' מילוי בקע בלתי מלוכד. המשך ההעתק לדרום מופה בעבר על סמך הסטה של טרסת החוף שנותרה מנסיגת אגם הלשון (עגנון, 1982) אך כיום פני השטח הקדומים הרוסים עקב עבודות עפר (1983). עגנון (1982) הציע שגיל ההעתקה מאוחר לנסיגת האגם מהמקום (כ-20,000 שנה) כי לו עמד מתלול ההעתק לפני נסיגת האגם היו חופי האגם הנסוג מעבדים מחדש את החומר הבלתי מלוכד שבונה את המתלול. בכך נקבע שההעתק פעיל, קביעה שהתחזקה ע"י מיקום רעידת אדמה ($M > 4$) באתר ב-1987 (van Eck and Hofstetter, 1989, ציור א-15).

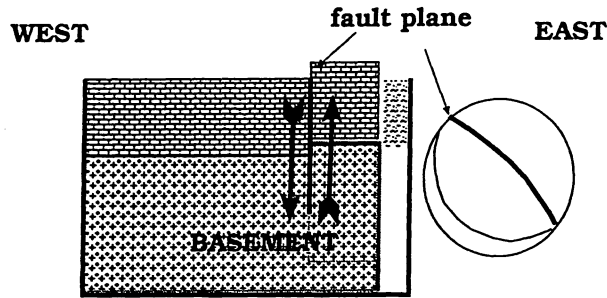
תחנה מס' 7. עין גדי: תצפית על חבורת יהודה

החתך של חבורת יהודה מפותח ביותר (אגן חבר של רז, 1983, ציור א-6). היחידה המשוכבת בפרט צפית מופיעה. היחידה המצוקית בפרט תמר נעדרת עקב השתלטות פציאס אבנון. תצורת דרורים נעדרת עקב השתלטות פציאס שבטה.

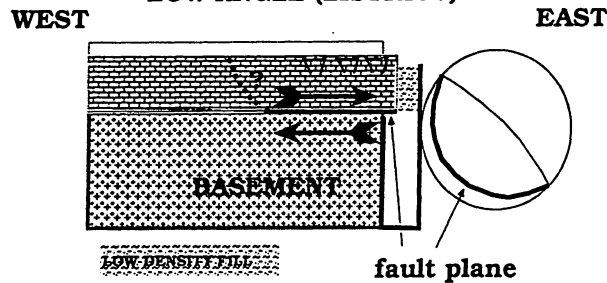
תחנה מס' 8. צואר הר סדום: חתך קלסטי בתצורת סדום

זהו החתך הטיפוסי של פרט פצלים ומלח החוף (זק, 1967) של תצורת סדום. החתך בעל עובי 50 מ' ומורכב מחילופי קלסטים ודולומיט עם שכבת מלח שעוביה 11 מ'. הקלסטים מורכבים בעיקר מחול קוארץ וחרסיות. עדשה של חלוקי צור יבוא בלויים מופיעה בחתך החולי. סידוק, איכול ובליה באתרם הביאו להופעה של חצץ, אולם ניתן להרכיב את החלוקים המקוריים מהחצץ. זה הזיהוי הראשון של חלוקים בתצורת סדום. זק (1967) הצביע על הדמיון הליתולוגי לתצורת הדום ההר התחתונה הנחשפת במישור עמיעז (ציור א-9ב). כאן ניתן להתרשם עד כמה הקלסטים בתצורת סדום דומים בליתולוגיה לתצורת חצבה.

ANTITHETIC NORMAL



LOW ANGLE (LISTRIC?)



ציור א-16.. Alternative interpretation of fault plane mechanism..

En Boqeq, 1987.

בדלומיט נמצאו חללים דמויי קוביה בגודל 2 ס"מ (ר. ויינברגר), ככל הנראה אחרי גבישי מלח.

תחנה מס' 9. "הגבעה הלבנה" על הר סדום: תצפית מערבה על צוקי רום על החתך והמבנה הנחשפים במצוק הדרומי

רק חלקו העליון של החתך מגיל קרטיקון עליון נחשף עקב ריבוי העתקי מדרגות עם גושים נטויים (ציור א-4). בתצפית רואים מעט מפרט אבנון, ואת פרט תמר במלואו, כולל היחידה המשובכת שנגדעת לכיוון צפון (ציור א-6).

תחנה מס' 10. נחל חימר: קונגלומרט יעלים למרגלות מצוק ההעתקים

הקונגלומרט והחתך הקרבוני עליו הוא מונח מועתקים על ידי העתק תלול שכיוונו צפון-דרום. החלוקים מעוגלים היטב וכמחציתם "צור יבוא". המטריקס של החלוקים עשיר בחול קוארץ. זיהוי הקונגלומרט הוא על בסיס ליתולוגי. מיקום המחשוף, במרחק מטרים ספורים למרגלות מצוק העתק, מלמד שהרבדת הקונגלומרט קדומה להעתקה. אילו המצוק עמד בזמן ההרבדה היה הקונגלומרט עשיר במרכיבי טלוס, הנעדרים לחלוטין. העושר בקלסטים אלוכטוניים (צור "יבוא" וחול קוארץ) מחזקים את הטענה שהקונגלומרט קורלטיבי לטרסה מתחנה 3.

בדרך חזרה עוברים במחשוף היחיד של סלעים מגיל אאוקן באזור, במגע עם חתך ניאוגני קדום (גילת ובראון, 1992, כנס אשקלון).

מקורות

- אלרון, א., 1980, הגיאולוגיה של אזור נחל צין (גליון חצבה, חלק צפוני), המכון הגיאולוגי, ירושלים, ד"ח מ.מ. 79/6.
- בן-תור, י.ק., וע. פרומן, 1963, המפה הגיאולוגית של הנגב 1:100,000, גליון ניצנה, המכון הגיאולוגי, ירושלים.
- וינברגר, ר., פליאומגנטיות בהר סדום: שיטה לקביעת מבנה גוף המלח, ושחזור עלייתו מתת הקרקע. עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- זק, י., 1967, הגיאולוגיה של הר סדום, עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- ניר, י., 1958, הגיאולוגיה של מצוק ההעתקים של ים המלח, עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- סער, ח., 1986, עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- עגנון, א., 1982, שברים פוסט ליסאן במצוק ההעתקים, החברה הגיאולוגית הישראלית, כנס אילת ומזרח סיני, עמ' 31.
- עגנון, א., 1983 (א), התפתחות אנגי השקעה ומורפוטקטוניקה באזור דרום מצוק ההעתקים המערבי של ים המלח, עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- עגנון, א., 1983 (ב), נסיון לרביזיה בסטרטיגרפיה של הניאוגן בבקע ים המלח, החברה הגיאולוגית, כנס נצרת.
- פרוינד, ר., 1962, בעיות סטרטיגרפיות של הקנומן-טורון בישראל, עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- רז, א., 1983, הגיאולוגיה של מדבר יהודה – אזור עין גדי, המכון הגיאולוגי, ירושלים, ד"ח ס/83/3.
- שטייניץ, ג., 1974, הסטרוקטורות הדפורמטיביות בשכבות הצור הסנוני של ארץ ישראל, עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

- Arkin, Y., and M. Braun, 1965, Type sections of Upper Cretaceous formations in the Northern Negev (Southern Israel), Strat. Sec. No. 1, Part 1, Lithostratigraphy, Geol. Surv. Israel, Jerusalem.
- Garfunkel, Z., 1981. Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics, Tectonophysics, 80, 81-108.
- Garfunkel, Z., and A. Horowitz, 1966, The Upper Tertiary and Quaternary morphology of the Negev, Israel, Israel Jour. Earth Sci., 15, 101-117.
- Honigstein, A., 1983, Senonian ostracodes from Israel, PhD Thesis (unpubl.), Tel-Aviv University, 352 p.
- Picard, L., and Vroman, A.J., 1950, Geological Report of Jordan Exploration Company Concession, Dead Sea, Israel (Unpubl. Rep.).
- Shaw, S.H., 1947. Southern Palestine. Geological map (sheet 3) on a scale of 1:250,000 with explanatory notes. Govern. of Palestine: 1-42, maps.
- Sneh, A., 1981, The Hazeva Formation in the Northern Arava, Israel, Israel Jour. Earth Sci., 30, 81-92.
- Steinitz, G., and Y. Bartov 1991, The Miocene-Pleistocene history of the Dead Sea segment of the rift in light of K-Ar ages of basalts, Israel Jour. Earth Sci., 40:199-208.
- van Eck, T., and Hofstetter, A., 1989, Microearthquake activity in the Dead Sea Region, Geophys. Jour. Int., 99, 605-620.
- Vroman, J., 1944. The petrology of sandy sediments of Palestine, Bull. Geol. Dept. Heb. Univ. Jerusalem, 1, 1-11.

סיור ב-1

חלק ב: מבנה גוף מלח סדום (תוצאות מחקר פליאומגנטי וסטרקטורלי)

רמי וינברגר^{1,2} ואמוץ עגנון¹

¹ המחלקה לגיאולוגיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים

² המכון למחקרי נפט וגיאופיזיקה, חולון

מטרות הסיור

- א. זיהוי בסיס וגג החתך של תצורת סדום.
- ב. זיהוי ציר אנטיקלינלי בגוף מלח סדום.
- ג. שחזור תלת מימדי של עליית המלח עם הזמן.

רקע

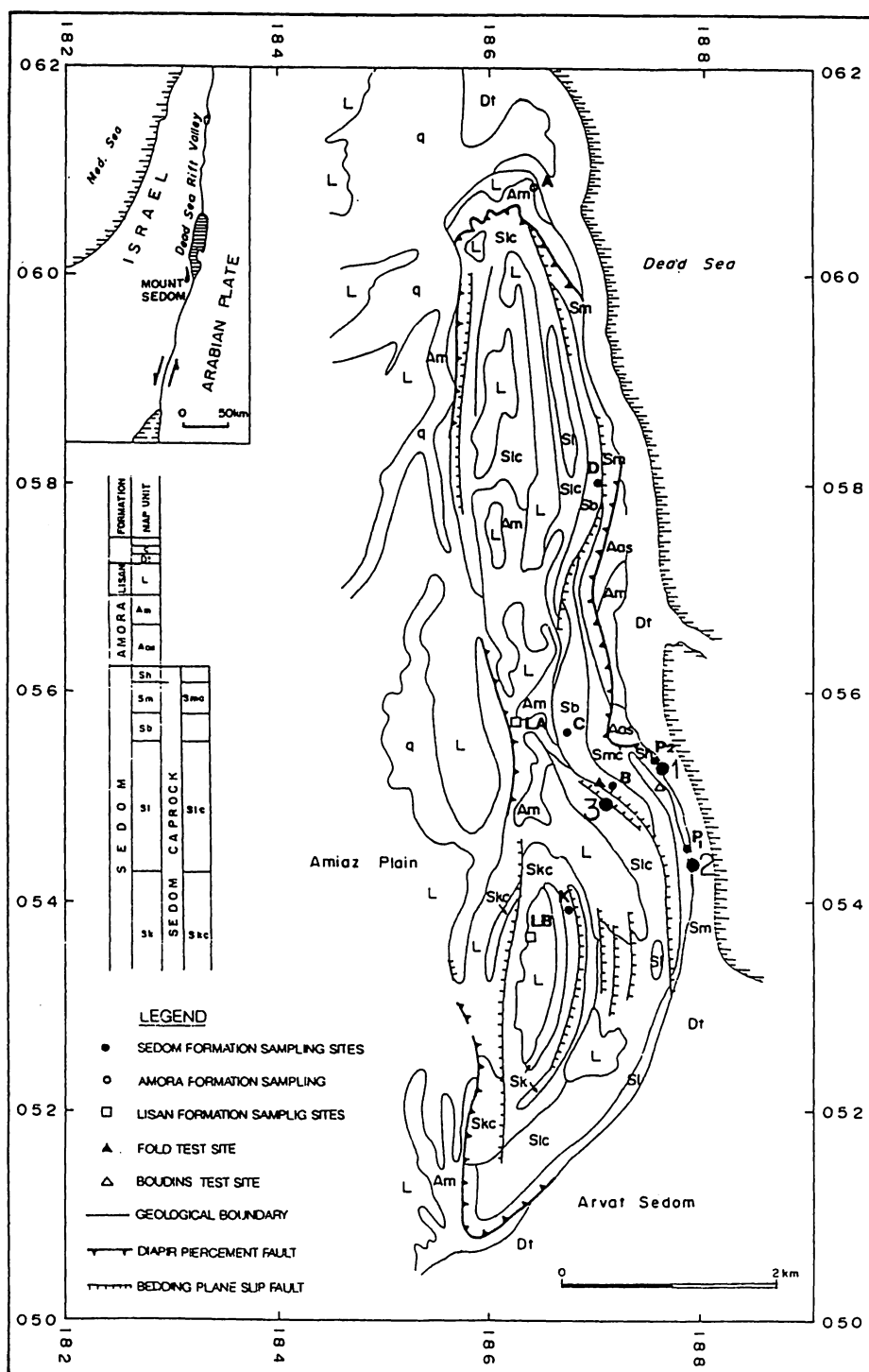
הר סדום הינו ביטוי מורפולוגי למחדר מלח (salt diapir). המחדר מתרומם מתוך אגן סדימנטרי עמוק, ובו סדימנטים של חבורת ים המלח (זק, 1967). ההר הינו רכס מאורך בכיוון צפון-דרום, המורכב משתי כיפות (ציור ב-1). לכיפה הדרומית צורה אליפטית, לכיפה הצפונית צורת מאורכת, וביניהן אזור צר המכונה "צוואר" הר סדום.

לפי זק (1967), נחשפים בהר סדום סלעים מחבורת ים המלח בעובי כולל של כ-2500 מטרים (ציור ב-2).

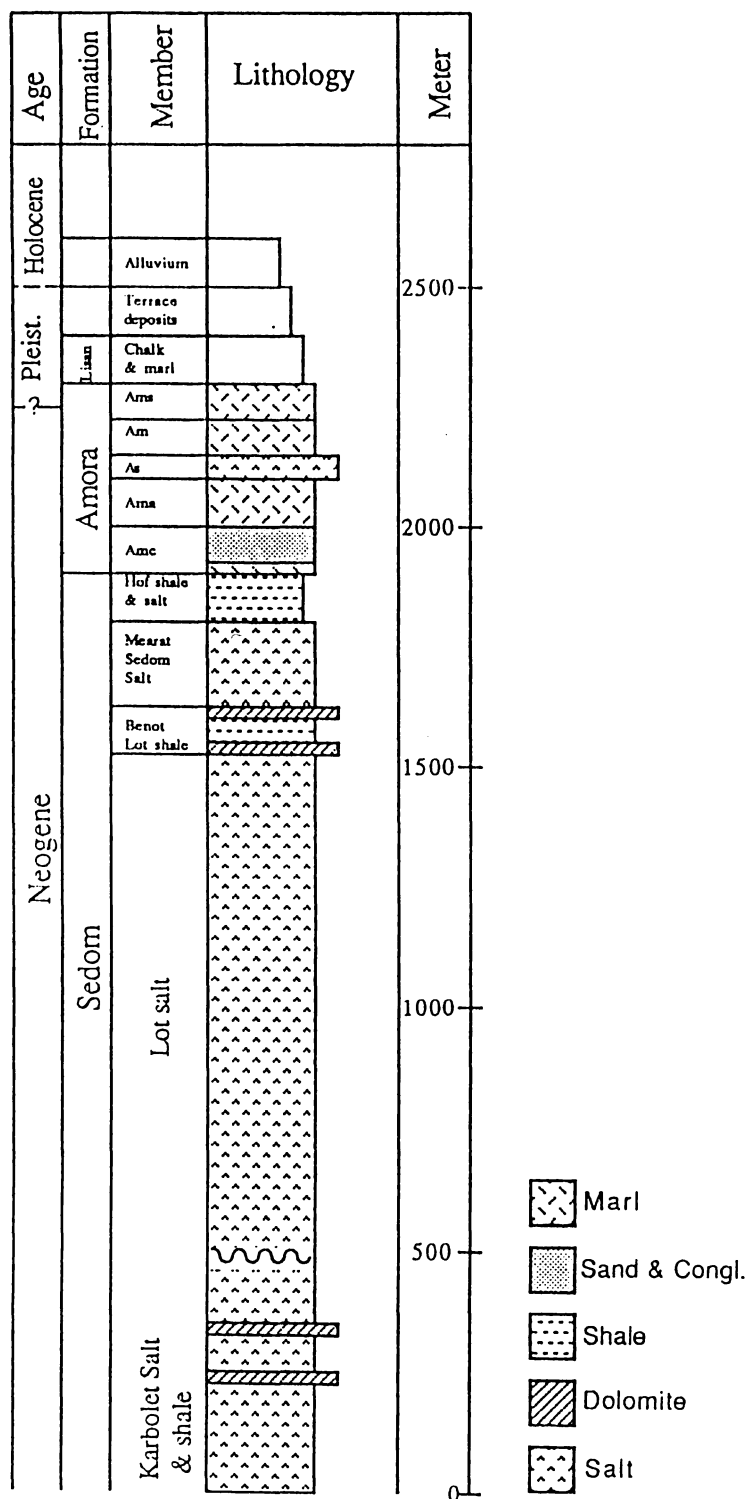
חבורת ים המלח (זק, 1967): סלעי החבורה מורכבים מסדימנטים אבפוריטיים עם אינטרקלציות של סדימנטים קלסטיים דטריטיים. עוביה המשוער במרכז הבקע מעל 6 ק"מ, והיא מצטמצמת לעבר שולי הבקע (זק, 1967). בסיס החבורה נקבע מעל תצורת חצבה. בשולי הבקע מונחת החבורה באי התאמה על גושים שבורים של חבורת יהודה. גיל החבורה נאוגני-פליסטוקני. חבורת ים המלח מתחלקת בהר סדום לתצורות סדום, עמורה והלשון (ציור ב-2).

תצורת סדום (זק, 1967): תצורת סדום מורכבת מיחידות מלח עבות לסירוגין עם יחידות פצלים דקות יותר. יחידות המלח מורכבות בעיקר מהליט והופעות של קרנליט וסילויט עם מעט דולומיט, אנהידריט, חרסית וסילט המורבדים בין שכבות המלח או מפוזרים בתוכן. עובי התצורה כ-2000 מטרים והיא בונה את חלקו העיקרי של הר סדום. בסיס התצורה אינו חשוף. מעל התצורה מונחים באי התאמה סלעי החיפוי (caprock) או סלעי תצורת עמורה. זק (1967) חילק את תצורת סדום לחמישה פרטים: מלח ופצלי הכרבולת, מלח לוט, פצלי בנות לוט, מלח מערת סדום, ופצלים ומלח החוף. הפרטים בני מיפוי ומונחים בהתאמה זה מעל זה.

סלעי החיפוי של תצורת סדום (זק, 1967; Vroman, 1951): השארית הבלתי מסיסה במים של מלח תצורת סדום יוצרת סלע חיפוי (caprock). הסלע מורכב בעיקר מאנהידריט וגבס, עם



ציור ב-1. הר סדום: מפת התמצאות כללית, מפה גאולוגית מוכללת (בעקבות צאק ופרינד, 1980) אתרי דיגימה פליאומגנטיים ותחנות הסיור.



ציור ב-2. חתך עמודי מוכלל של חבורת ים המלח בהר סדום.

מעט חואר, חרסית, דולומיט, גיר, חול וחלוקים. עוביו ממטרים ספורים ועד 40 מטרים. המגע תצורת סדום וסלעי החיפוי הוא בדרך כלל במישור חלק המכונה "ראי המלח" (salt mirror). מעל סלעי החיפוי מונחות באי התאמה תצורות עמורה והלשון.

תצורת עמורה (זק, 1967): תצורת עמורה מורכבת מחואר, קרטון (ארגוניט כימי), אנהידריט, מלח, אבני חול וקונגלומרט. עוביה הכולל בהר סדום כ-450 מטרים. המגע החשוף בין תצורת סדום לתצורת עמורה הוא בהעתק. מעל תצורת עמורה מונחת באי התאמה תצורת הלשון.

תצורת הלשון (Begin et al., 1974): באזור הר סדום מונחת התצורה באי התאמה על גבי חלקים שונים של תצורת סדום, על סלעי חיפוי, ועל סלעי תצורת עמורה.

מבנה גוף מלח סדום

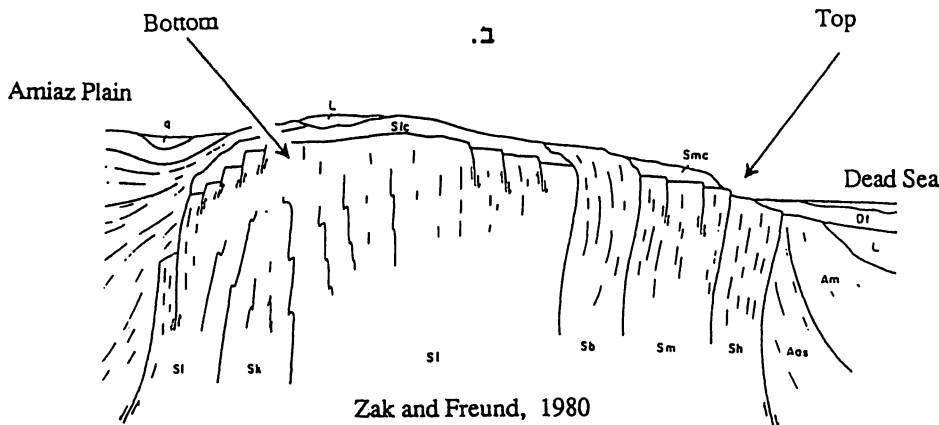
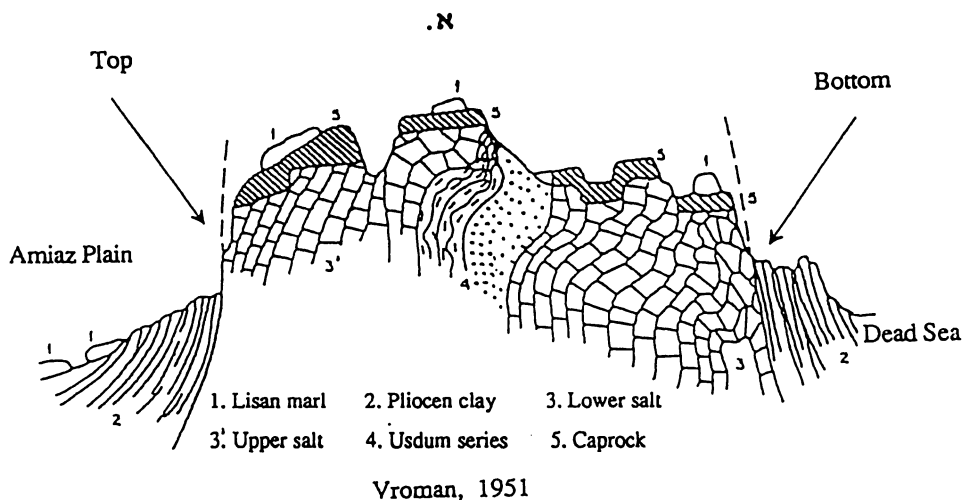
זק (1967), Zak et al. (1968), ו-Zak (1974) הציגו מבנים סדימנטריים מקוריים כגון שיכוב צולב, גלונים ועקבות בעלי חיים, וכן יחס Cl/Br בשכבות המלח, המצביעים על כך שגג השכבות פונה מזרחה. לדעתם השכבות מוטות 70° ועד 180° ממצבן המקורי (כלומר אופקיות אך הפוכות, ציור ב'3). זק (1967) כותב: "גוף מלח סדום הוא כפי הנראה צלעה המזרחית העבה של אנטיקלינה שהתפתחה קרוב לשוליים המערביים של מסת המלח. הצלע המערבית דקה מאוד ומנוונת, ונותרה קבורה מתחת למישור עמיעז". ובהמשך מתואר מחדר מלח סדום כלוח מלח (salt wall) ניצב. אנו מצאנו עדויות שדה שתומכות בשחזור זה בצלע המזרחית של ההר (תחנה 1). בצלע המערבית של ההר העדויות הסדימנטולוגיות אינן חד-משמעיות (זק, 1967; פרומקין, 1992), ורצוי להעזר בשיטה בלתי תלויה בתצפיות השדה. מודל פליאומגנטי חדש שפיתחנו מאפשר לזהות כיוון בסיס וגג של שכבות חריפות נטיה אם כיוון המגנט המקורי בסלעים ידוע. איסוף נתונים פליאומגנטיים, ובחינת התכונות המגנטיות של הסדימנטים הנאוגניים איפשרו ליישם מודל זה בהר סדום, ולתרום להבנת מבנה "גוף המלח", ודרך עלייתו מתת-הקרקע.

א. שיטה: הוקטור הפליאומגנטי כמציינ בסיס וגג של שכבות (וינברגר, 1992; Weinberger et al, 1991, 1992a,b)

ידיעת כיוון המגנט המקורי בשכבות חריפות נטיה מאפשרת לזהות את כיוון מעלה החתך הסטרטיגרפי. שתי הנחות בסיסיות במודל:

- (א) הסלעים נושאים מגנט שנרכש לפני הטית השכבות.
- (ב) הוקטור המגנטי המקורי הוטה עם הטית השכבות.

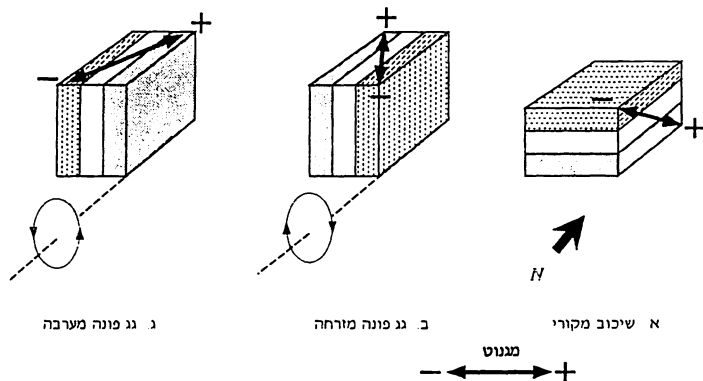
בדוגמא פשוטה (ציור ב-4א), הוקטור המגנטי המקורי נוטה 45° מתחת לאופק בכיוון צפון (שדה נורמלי) או 45° מעל האופק בכיוון דרום (שדה הפוך). גלגול גג השכבות ב- 90° סביב ציר אופקי בכיוון צפון-דרום למפנה מזרחי (ציור ב-4ב) מעתיק את הוקטור המגנטי לכיוון צפון-מערב (שדה נורמלי) או דרום-מזרח (שדה הפוך). לעומת זאת גלגול גג השכבות ב- 90° סביב ציר אופקי בכיוון צפון-דרום למפנה מערבי (ציור ב-4ג) מעתיק את הוקטור המגנטי לכיוון צפון-מזרח (שדה נורמלי) או דרום-מערב (שדה הפוך). כיוון המגנט בשכבות האנכיות שונה בכל אחד משני המצבים, ולכן מדידתו מאפשרת לקבוע באיזה אופן נעשה הגלגול ומהו כיוון החתך הסטרטיגרפי, ללא תלות בקוטביות הוקטור המגנטי המקורי (Weinberger et al., 1991, 1992a,b; וינברגר, 1992).



ציור ב-3. מבנה הר סדום וכיוון החתך הסטריגרפי לפי חוקרים שונים: (א) Vroman (1951).
(ב) Zak and Freund (1980).

הדרך לשחזור שכבות נטויות: מחפשים ציר גלגול שיעתיק את הוקטור המגנטי (מדוד *in situ*) אל המיקום הצפוי של הוקטור המגנטי המקורי באתר הדגימה, וגם יחזיר את השכבה הנטויה למצב אופקי.

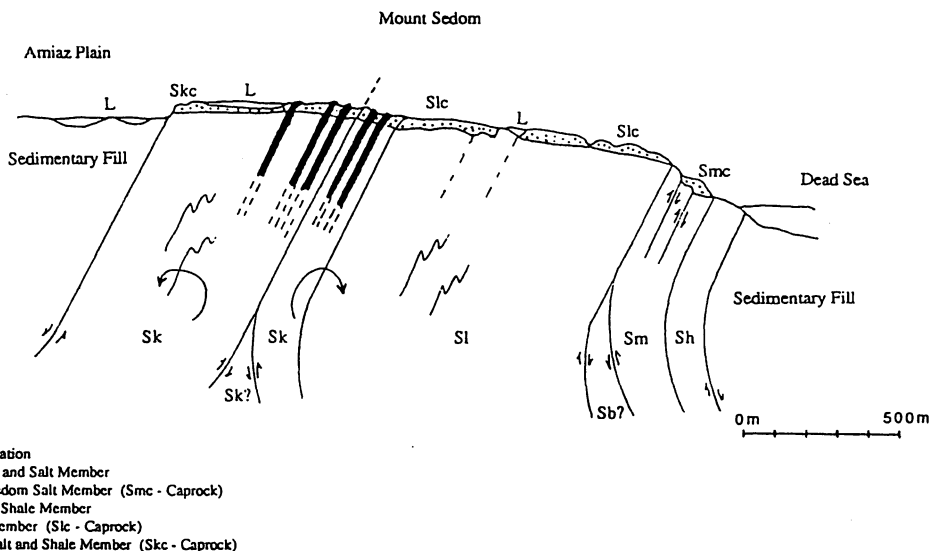
מיקומם של אתרי הדגימה נקבע בנקודות מפתח להבנת מבנה הר סדום. האתרים מפוזרים בחלקו הדרומי של ההר (צלע מזרחית וצלע מערבית), באזור "צוואר" הר סדום, ובחלקו הצפוני של ההר (ציור ב-1). מיקומם הוכתב מהצורך לדגום חתך עבה דיו בכדי למצע את השינויים סקולריים בשדה הגאומגנטי. סך הכל נפרסו 8 אתרי דגימה בתצורת סדום (ציור ב-1), מתוכם נועדו 2 אתרי דגימה לקביעת זמן רכישת המגנט. ניתוח פליאומגנטי נעשה ל-199 דוגמאות מסלעי תצורת סדום. המסלע שנדגם כולל דולומיט, חואר, אנהידריט, אבני סילט, אבני חול ומלח. כמו כן נמדדו 24 דוגמאות מסלעי תצורת עמורה, ו-20 דוגמאות מסלעי תצורת הלשון.



ציור ב-4. וקטור מגנטי מוטה עם הטית השכבות. (א) וקטור מגנטי מקורי נוטה 45° מתחת לאופק בכיוון צפון (שדה נורמלי) או 45° מעל האופק בכיוון דרום (שדה הפוך). (ב) גלגול גג השכבות ב- 90° סביב ציר אופקי בכיוון צפון-דרום למפנה מזרחי מעתיק את הוקטור המגנטי לכיוון צפון-מערב (שדה נורמלי) או דרום-מזרח (שדה הפוך). (ג) גלגול גג השכבות ב- 90° סביב ציר אופקי בכיוון צפון-דרום למפנה מערבי מעתיק את הוקטור המגנטי לכיוון צפון-מזרח (שדה נורמלי) או דרום-מערב (שדה הפוך).

-W-

-E-



ציור ב-5. חתך רוחב גאולוגי בחלקו הדרומי של הר סדום. כיווני עליית השכבות מבוססים על מדידות פליאומגנטיות. מיקומו המשוער של ציר האנטיפורם האנטיקלינלי הוא לאורך העתק ה"כרבולת" המזרחי.

ב. תוצאות: גאומטרית המבנה וסטרטיגרפיה

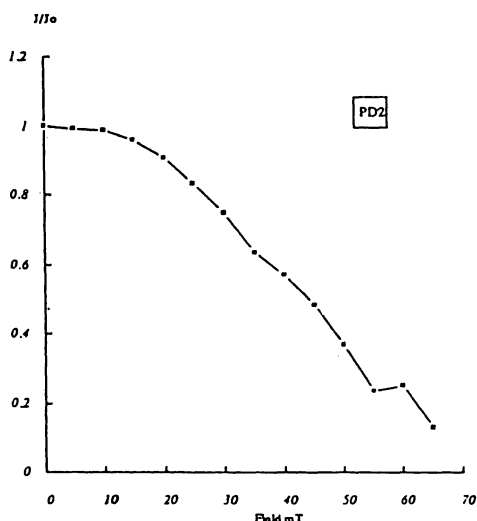
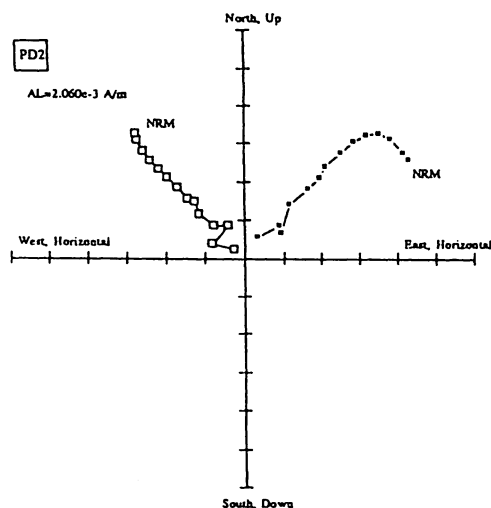
חתך הרוחב בציור ב-5 מסכם את מבנה גוף מלח סדום על פי תוצאות המחקר הפליאומגנטי. בחלקו הצפוני של ההר גג השכבות פונה מזרחה. בחלקו הדרומי של ההר אובחן שוני בין הצלע המזרחית של גוף המלח לצלעו המערבית. בצלע המזרחית גג השכבות פונה מזרחה. השכבות הועתקו בכ- 110° – 120° ממצבן המקורי, והן נוטות בזוית של 60° – 70° מערבה. Strike השכבות משתנה במתינות דרומה מכיוון צפון-דרום לכיוון דרום-מערב ומתקבלת מעין צורת קשת קמורה למזרח. בצלע המערבית גג השכבות פונה מערבה. השכבות הועתקו בכ- 110° – 120° ממצבן המקורי, והן נוטות בכמות הזאת מערבה. המבנה המתקבל בחלקו הדרומי של ההר הוא של אנטיפורם אנטיקלינלי א-סימטרי ובו צלע מערבית דקה המונחת על צלע מזרחית עבה (ציור ב-5). מיקומו של ציר האנטיפורם מתלכד עם מיקומו המשוער של המגע בין קטע חתך שגגו פונה מזרחה, לקטע החתך שגגו פונה מערבה. לפי הנתונים הפליאומגנטיים המגע הינו בין פרט מלח ופצלי הכרבולת לפרט מלח לוט (אינו חשוף), או בתוך פרט מלח ופצלי הכרבולת, לאורך העתק "הכרבולת" המזרחי (ציור ב-5).

ג. דיון: התרוממות גוף מלח סדום

שכבות גוף מלח סדום הנחשפות בפני השטח נטויות חריפות בדרך כלל, וה-strike שלהן צפוני. השכבתיות נשמרת גם בעומק מאות מטרים לפחות. בהסתמך על מקבילות השכבות שנשתמרה, על סימני הזרימה המעטים, ולעומתם ריבוי תופעות ההחלקה על פני מישורי השיכוב הציע זק (1967) כי תנועת גוף מלח סדום הושגה על ידי מסה זורמת של מלח בעומק, והעתקה לאורך מישורי השיכוב בחלקו העליון של הגוף. הסדימנטים הצעירים של תצורת עמורה ותצורת הלשון, שמקיפים את הר סדום, הורמו ונקרעו על ידי מחדר המלח. נטיית הסדימנטים הצעירים חריפה, ובמקומות אחדים השכבות הקרועות הפוכות.

כוחות חיכוך פעלו בשטחי המגע של גוף סדום ועיכבו את תנועת המלח. דפורמציה זו ניכרת בגבולותיו החיצוניים של ההר (Zak and Freund, 1980) ובתוכו. בהשוואה לעוותים המסובכים המצויים בגופי מלח אחרים, הרי שכוחות החכוך בהר סדום גרמו לדפורמציה קלה בלבד, הניכרת באזור ה"צוואר" (זק, 1967). לאזור זה מבנה סטרוקטורלי חריג המתבטא גם בכיווני מגנט מקורי שונים. עדויות פליאומגנטיות וסטרוקטורליות אינן מאפשרות להפריד בין שלבים שונים בהיווצרות ה"צוואר", אולם הן מציעות שהתמקמות השכבות הינה תוצאת סידרת רוטציות סופיות, ולא תנועה סביב ציר נטוי בודד (אם כי גאומטרית הדבר אפשרי).

קיימים קרוב לודאי שני שלבים בהתמקמות השכבות לאורך הצלע המזרחית של הר סדום (למעט אזור ה"צוואר"): בשלב ראשון השכבות עברו גלגול חריף סביב ציר אופקי, שכיוונו צפון-מזרח בכמות של כ- 120° – 180° עם כיוון השעון. תנועה זו פוענחה בעזרת המגנט הקדום שרכשו הסלעים (ציור ב-6). בשלב מאוחר יותר השכבות עברו גלגול סביב ציר אנכי בכמות של 30° – 40° נגד כיוון השעון. תנועה זו פוענחה בעזרת מגנט משני שרכשו הסלעים (ציור ב-6). קרוב לודאי שתנועה מאוחרת זו התרחשה בזמן קצר יחסית, שכן המגנט המשני נרכש אך ורק תחת שדה נורמלי, ורכישתו קשורה לשלבים המאוחרים של עליית גוף המלח והמפגש עם מי תהום. התמקמות השכבות למצבן הנוכחי לאורך הצלע המערבית של הר סדום התרחשה בשלב בודד. השכבות האופקיות עברו גלגול סביב ציר אופקי שכיוונו צפון בכמות של 60° – 90° נגד כיוון השעון. תנועה זו פוענחה בעזרת המגנט הקדום שרכשו הסלעים. בצלע



ציור ב-6. השלכה וקטורית ניצבת של דוגמא אופיינית בעת ניקוי מגנטי בשיטת השדה המתחלף. ריבוע ריק מייצג את מרכיב הדקלינציה; ריבוע מלא מייצג את מרכיב האינקלינציה. לצידה עקום עוצמה מנורמלת (I/I_0) כנגד עוצמת השדה המתחלף.

המערבית אין עדויות לתנועת רוטציה סביב ציר אנכי. שתי סיבות מוצעות לכך:

- (א) מגנט משני נרכש מאוחר לרוטציה,
- (ב) הצלע המערבית, שמקורה במישור עמיעז, התנהגה באופן שונה מהצלע המזרחית, שמקורה בבקע ים המלח.

הנתונים הפליאומגנטיים וניתוח תנאי הזרימה של המלח מציעים את התמונה הבאה לעליית גוף המלח: המלח שקע בנאוגן, על פני תשתית שבורה. קצב ההשקעה מהיר במרכז הבקע גרם להצטברות מהירה יותר של סדימנטים ממזרח להר סדום מאשר ממערב לו (מישור עמיעז). לאחר שהורבדו לפחות כ-2 km של סדימנטים, החל חתך עבה של מלח לנדוד ממזרח מערבה, כשכיווני השבירה מכתיבים את עלייתו. המשך הסדימנטציה לווה בעליה מתמדת של מלח ממזרח ושל מלח שקבור מתחת למישור עמיעז ממערב. שכבות המלח ממזרח וממערב יצרו יחדיו גוף חדירה במבנה אנטיקלינלי שצירו צפון-דרום. גוף המלח האנטיקלינלי בקע דרך הסדימנטים הצעירים של יחידת הכיסוי, ובנה את הר סדום.

תחנות הסיור (ציור ב-1)

תחנה מס' 1 – מחשופים של תצורת סדום ותצורת עמורה (נ.צ.מ. 18737/05552)

נתבונן על התצורות הבונות את הר סדום והיחסים ביניהן. תצורת סדום בונה את גוף המלח. היא חדורה לתוך סלעי תצורת עמורה, שנטייתם החרפה ניכרת במבט צפונה. במבט מערבה נראה חתך עבה של סלע חיפוי המונח מעל "ראי המלח". פרט פצלים ומלח החוף שלפנינו, הינו הפרט הצעיר ביותר בתצורת סדום. לשכבות הפרט strike מזרח-מערב והן אנכיות. גלונים הנחשפים במגע בין אבן חול – חרסית מציינים שגג השכבות פונה צפונה. במקום אחר בחתך נחשפים סלעי דולומיט למינריים המכילים דגים מאובנים מסוג *Mugil priscus* (Bentor and)

Vroman, 1960). צורתם של הדגים נשתמרה, והם אינם מעוותים כלל. סמיכותם של הדולומיטים הלמינריים לסלעי דולומיט חולי ואבני סילט בלתי מקומטים שנידגמו במחקר הנוכחי, מחזקת את ההנחה שהמעוות המקומי בסלעים אילו זניח. לכן ההנחה במודל הפליאומגנטי שהוקטור המגנטי המקורי הוטה עם הטיית השכבות הינה נכונה.

תחנה מס' 2 - מחשוף של פרט פצלים ומלח החוף (נ.צ.מ. 18783/05425)

הפרט העליון של תצורת סדום מורכב בעיקר מפצלים, דולומיט טיני אפור, אבני חול, מלח מאסיבי, ואנהידריט. השכבות נטויות מערבה ($65^\circ/255^\circ$) ולכאורה גגן פונה מערבה (Vroman, 1951, ציור ב-3א). אולם ניתוח פליאומגנטי מלמד שהשכבות הפוכות וגגן פונה מזרחה (בהתאמה לממצאי זק, 1967). הניתוח מבוסס על אבחון 3 קבוצות של וקטורים מגנטיים (מדודים in situ), בעלי כיוונים פליאומגנטיים ממוצעים שונים (ציור ב-7), ותכונות מגנטיות שונות:

קבוצה (א) – וקטורים "אופייניים" בסלעי אנהידריט. כיוונם הממוצע, $360^\circ/55^\circ$ (אינקלינציה/דקלינציה), זהה סטטיסטית לכיוון השדה המגנטי העכשווי באתר. המגנט נישא על ידי מינרלים מסידרת הטיטנומהמיט וגאטית.

קבוצה (ב) – רכיבים "משניים" (overprints) בסלעי דולומיט. נטית הוקטור הממוצע ($329^\circ/44^\circ$) הינה 44° כצפוי לנאוגן, אולם כיוונו (329°) סוטה מהכיוון הפליאומגנטי המתאים לנאוגן ועד ההווה ב- $30^\circ \pm 4^\circ$ נגד כיוון השעון. המגנט נישא על ידי גרגרי טיטנומגנטי בעלי קוארסיביות נמוכה.

קבוצה (ג) – וקטורים "אופייניים" (ChRM) בסלעי דולומיט. כיוונם הפליאומגנטי הממוצע הוא $320^\circ/-28^\circ$. המגנט נישא על ידי גרגרי טיטנומגנטי בעלי קוארסיביות גבוהה.

השיקולים הבאים מלמדים, שהוקטורים מקבוצה ג' מקוריים קרוב לודאי, ולכן נרכשו לפני עליית גוף המלח: כיוונם הפליאומגנטי הממוצע שונה מאוד מהכיוון הפליאומגנטי המתאים לנאוגן ועד להווה; בתהליך הניקוי המגנטי הוקטורים האופייניים שואפים לראשית הצירים, והזוית הנמדדת בין השיכוב ובין כיוון הוקטורים האופייניים היא כ- 33° , כצפוי בשכבות נאוגניות (בעלות "inclination shallowing" או בעלות dip ראשוני מתון).

הכיוונים הפליאומגנטיים השונים נרכשו בזמנים שונים: המגנט האופייני בסלעי אנהידריט (קבוצה א') נרכש בשלב מאוחר, בעת שהשכבות נמצאו במצבן הנוכחי, ובהשפעת השדה המגנטי העכשווי. המגנט המשני בסלעי הדולומיט (קבוצה ב') נרכש בשלב ביניים, בעת שמגמת השכבות היתה צפון-מזרח (כמחושב מסטיית הכיוון הפליאומגנטי הממוצע של קבוצה [ב] מהכיוון הפליאומגנטי הממוצע של קבוצה [א], $30^\circ \pm 4^\circ$). סביר שמגמת שכבות כזו היתה בשלבים האחרונים של עליית גוף המלח. המגנט האופייני בסלעי דולומיט (קבוצה ג') קדום, והוא נרכש לפני עליית גוף המלח.

הנתונים הפליאומגנטיים מחייבים שהשכבות הפוכות. גג השכבות פונה מזרחה. שחזור מצבן ג' המלח. הבדינים של השכבות עם הזמן כפי שנקבע ממיקום הוקטור המגנטי הצמוד להן הוא (ציור ב-8): שכבות נאוגניות אופקיות רכשו מגנט תחת השפעת שדה מגנטי נורמלי. מאוחר יותר השכבות עברו הטיה חריפה של 116° סביב ציר אופקי שכוונו בקרוב צפון-מזרח. לגולל מאוחר סביב ציר אנכי של 30° נגד כיוון השעון מיקם את השכבות במצבן הנוכחי.

במחשוף סמוך מצויים בודינים צפידים המלמדים על המעוות התלת מימדי שספג המלח. הבדינים מורכבים בעיקר מפצלים, שעברו סבוב עם כיוון השעון של $30^\circ-50^\circ$ ביחס לשיכוב

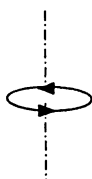
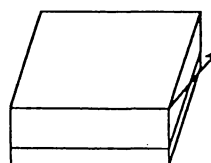
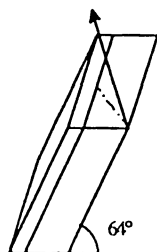
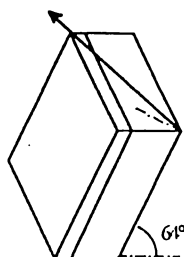
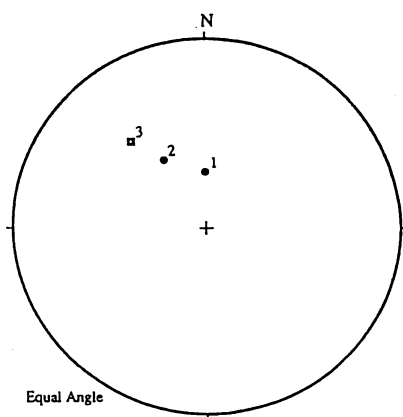
ציור ב-7. כיוונים פליאומגנטיים ממוצעים
(מדודים in situ) בתחנה מס' 2 מושלכים

על גבי רשת שוות זווית:

(1) וקטור מגנטי יציב בסלעי אנהידריט
(declination/inclination) $(360^\circ-55^\circ)$.

(2) וקטור מגנטי משני בסלעי דולומיט
($329^\circ/44^\circ$).

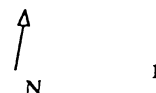
(3) וקטור מגנטי יציב בסלעי דולומיט
($320^\circ/-28^\circ$).



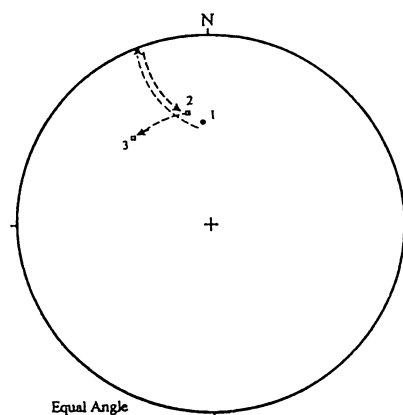
3



2



1



ציור ב-8. השתנות כיוון הוקטור המגנטי ונטיית השכבות עם הזמן בתחנה מס' 2.

(1) שכבות נאוגניות אופקיות רוכשות מגנט תחת השפעת שדה מגנטי נורמלי.

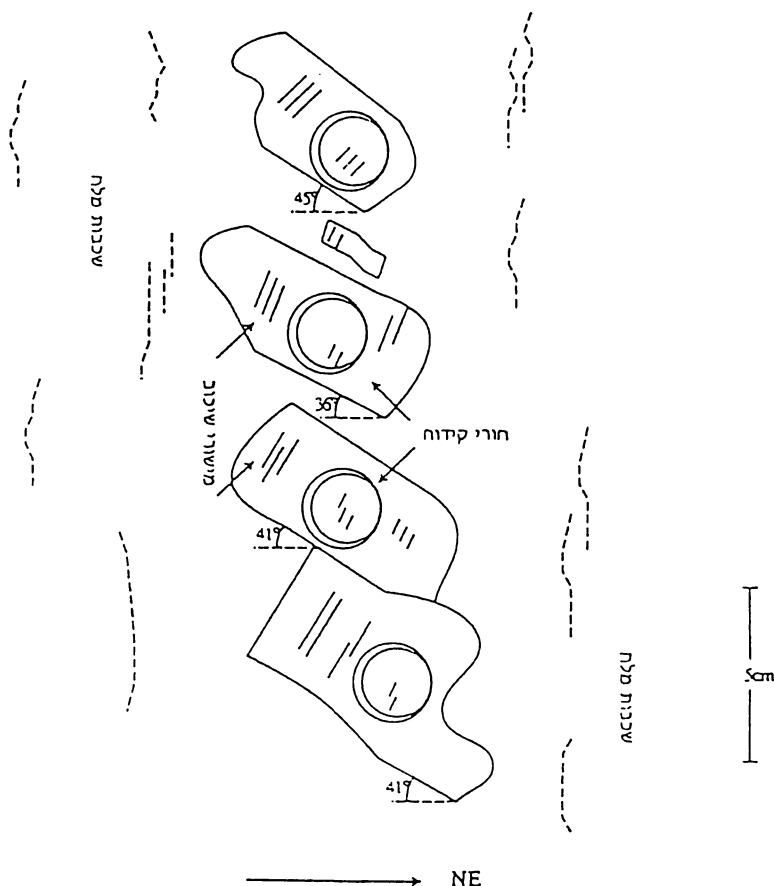
(2) השכבות עוברות הטיה חריפה של 116° סביב ציר אופקי, שכיוונו בקרוב צפון-מזרח.

(3) גלגול מאוחר סביב ציר אנכי של 30° נגד כיוון השעון ממקם את השכבות והוקטור המגנטי הצמוד להן במצבם הנוכחי.

השתנות כיוון הוקטור המגנטי עם הזמן מוצגת גם בהשלכה על גבי רשת שוות זווית.

עיגול מלא מציין כיוון בהמיספרה התחתונה; ריבוע ריק מציין כיוון בהמיספרה העליונה.

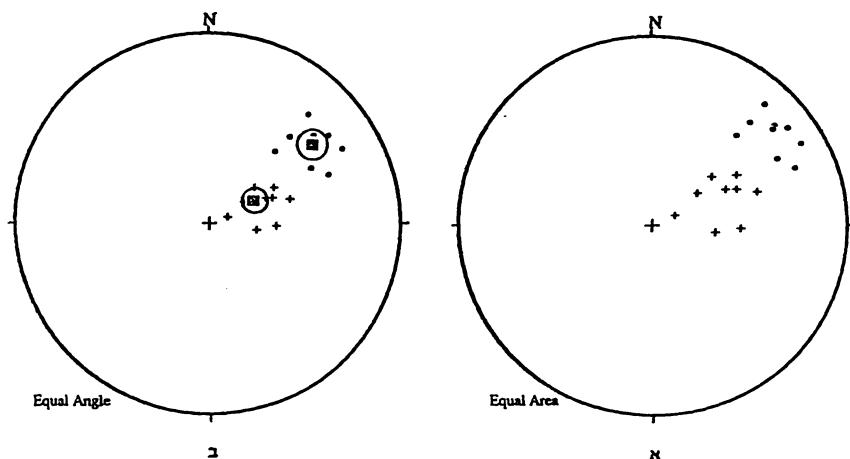
הנטוי (מבט. מדרום לצפון, ציור ב-9). זרימה משיכה (דוקטילית) של מלח מפצה על הרוטציה של הבדינים. במחשוף זה הבדינים מראים מעוות בכיוון ה-strike. הבדינים נוצרו קרוב לודאי בעומק, כאשר המלח היה תחת טמפרטורה ולחץ מקיף גבוהים, ולכן משיך יותר (Zak and Freund, 1980). הפיזור בכמות הסבוב של הבדינים מציע מבחן לקביעת זמן רכישת המגנוט בשכבות הפצלים ("מבחן בודינים", וינברגר, 1992). הרוטציה סביב ה-strike שעבר כל בודין נמדדת בשדה. המבחן בודק את התפלגות הוקטורים הפליאומגנטיים הנמדדים בבדינים in situ, ביחס להתפלגות הוקטורים הפליאומגנטיים לאחר גלגול כל אחד מהם בכמות המדודה בשדה (לאחר שחזור זה שיכוב הבדינים זהה לשיכוב המחשוף); המבחן משמעותי אם כיווני המגנוט מקובצים יותר אחרי השחזור מאשר לפניו. במקרה זה המגנוט נרכש לפני היווצרות הבדינים, ולכן בעומק. אם פיזור כיווני המגנוט רחב יותר אחרי השחזור מאשר לפניו המגנוט נרש לאחר היווצרות הבדינים, קרוב יותר לפני השטח. במחשופים שבמחצבת המלח (נ.צ.מ. 1875/0552) ניכר שיפור בקבוצת הנתונים המגנטיים לאחר השחזור (ציור ב-10), ולכן המגנוט נרכש בעומק.



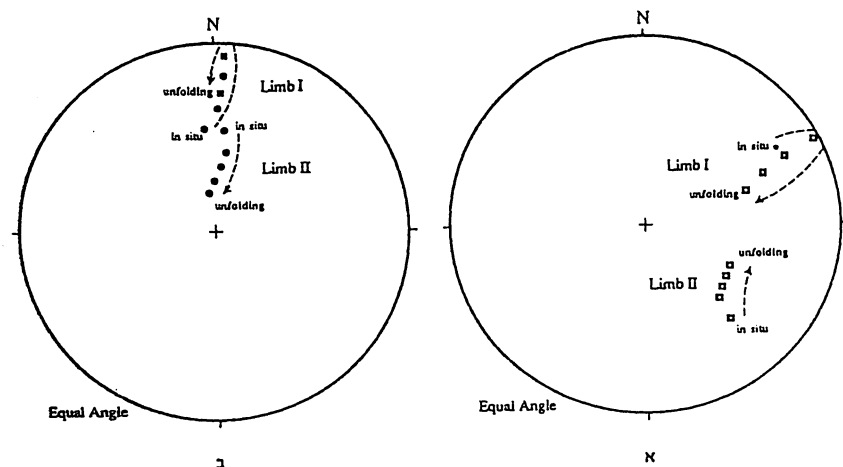
ציור ב-9. בודינים מסובבים בשכבות מלח אנכיות, נצפים מדרום-מזרח.

תחנה מס' 3 – תצפית מ"הגבעה הלבנה" (נ.צ. 1870/0549)

מהגבעה הלבנה נשקיף צפונה לעבר "צוואר" הר סדום. באזור זה של ההר ניכר הקושי שבזהוי בסיס וגג השכבות החשופות (פרט פצלי בנות לוט). מדידות פליאומגנטיות מלמדות ששכבות הפרט למרגלות ה"גבעה הלבנה" נטויות נורמלית וגגן פונה מזרחה (בתמיכה למחקרם של זק, 1967, 1968, Zak et al.). לעבר צפון נטייתן משתנה בהדרגתיות, הן אנכיות וצפונה יותר הפוכות על גבן. בתצפית דרום-מערבה נראה האגף המערבי של גוף המלח האנטיקלינלי. האגף בנוי משכבות פרט מלח ופצלי הכרבולת. התרוממות חלקו העיקרי של חתך זה (כ-400



ציור ב-10. אתר הבדינים: כיוונים פליאומגנטיים מדורים *in situ* ולאחר שחזור מושלכים על גבי רשת שוות שטח. "פלוס" מציין כיוון מדור *in situ*; עיגול מלא מסמן כיוון לאחר שחזור. כל הכיוונים בהמיספרה התחתונה.



ציור 11. תהליך הדרגתי של *unfolding* במבחן הקמט.
 (א) הכיוונים הממוצעים של הוקטורים האופייניים משני אגפי הקמט נעים זה לקראת זה.
 (ב) הכיוונים הממוצעים של הרכיבים המשניים (*overprint*) משני אגפי הקמט מתרחקים זה מזה.
 עיגול מלא מציין כיוון בהמיספרה התחתונה; ריבוע ריק מציין כיוון בהמיספרה העליונה.

מטרים) חלה לאורך העתקים המקבילים ל-strike השכבות, וגובלים את הפרט ממזרח וממערב. צירו המשוער של האנטיפורם האנטיקלינלי עובר לאורך ההעתק המזרחי, וכיוונו צפון-דרום.

ניתן לראות קמטים הדוקים בתצורת סדום הבנויים מחילופין של דולומיט תולי וחרסית. קמטים אלו נוצרו קרוב לדאי בעומק, והם קשורים לתהליכי דפורמציה מוקדמים שחלו בעת עליית גוף מלח סדום מתת הקרקע. לקמטים מעין אילו חשיבות רבה בברור זמן רכישת המגנט. כאן נערך "מבחן קמט" (Graham, 1949), שבו בדקנו האם המגנט נרכש לפני התרחשות הדפורמציה, בזמן התרחשותה או אחריה. השיטה מבוססת על השוואת התפלגות כיווני מגנט מאגפי המבנה המקומט, לבין התפלגותם אחרי שחזור השכבות למצב אופקי (להלן unfolding). קיבוץ טוב יותר של הכיוונים אחרי השחזור מציין שהמגנט נרכש לפני זמן הקימוט; ולהיפך, פזור רחב יותר של הכיוונים אחרי השחזור מציין שהמגנט נרכש אחרי זמן הקימוט. אם הקיבוץ הטוב ביותר של כיווני המגנט משני האגפים מתקיים בשלב כלשהו בתהליך ה-unfolding, אזי ניתן לאמר שמגנט נרכש בעת שלב קימוט זה. זאת בהנחה שכל אגף התנהג כיחידה צפידה עצמאית, ולכן המעוות התוך שכבתי זניח (מעשית יש צורך לבדוק אם השינוי בקיבוץ הוקטורים המגנטיים הוא בעל משמעות סטטיסטית). מסקנות מ"מבחן הקמט" שנערך בהר סדום (ציור ב-11) הינן שוקטורים משניים (overprint) נרכשו לאחר זמן הקימוט, ואילו וקטורים יציבים נרכשו לפני זמן הקימוט. השפעות אפשריות של דחיסה, גזירה, מעוות תוך שכבתי וגאומטרית קמט לא פשוטה גורמות לאוכלוסיה דו-שיאית (bimodal) לאחר שחזור שכבות הקמט למצב אופקי (השפעות אלו אינן מאפשרות להגיע למובהקות סטטיסטית גבוהה).

לפרוט על מבנה ה"הגבעה הלבנה" ראה זק (1988).

נספח: רקע פליאומגנטי קצר

המגנט השאריתי הטבעי (NRM – natural remanent magnetisation) הוא המגנט הנמדד בסלע. ה-NRM יכול להיות מורכב ממספר רכיבים מגנטיים, אשר נרכשו בעת (א) היווצרות הסלע, (ב) ארועים תרמליים, ו (ג) ארועים מאוחרים של החלפה כימית. לכל ארוע רכיב מגנטי אופייני משלו (אם הארועים התרחשו בזמנים שונים). סלעים סדימנטרים רוכשים את המגנט שלהם במספר תהליכים אפשריים:

DRM (detrital remanent magnetisation), PDRM (post depositional remanent magnetisation), CRM (chemical remanent magnetisation).

DRM – בין הגרגרים הקלסטיים המושקעים ישנם גרגרים שבטרם השקעתם רכשו מגנט שאריתי (גרגרים פרומגנטיים). ניתוח תאורטי ונסיונות מעבדה מלמדים שבזמן הסדימנטציה הכוח השולט על גרגרים פרומגנטיים הקטנים מ-20mm וגדולים מ-0.1mm הוא הכוח המגנטי. גרגרים אלו מסתובבים פיזית, כך שהמגנט השאריתי הקבוע שלהם מונח במקביל לשדה הגאומגנטי המקיף.

PDRM – תהליך זה חל לאחר שגרגרים מגנטיים קטנים הושקעו בין גרגרים גדולים אחרים. הגרגרים המגנטיים מסתדרים בכיוון השדה הגאומגנטי המקיף, רק בזמן תהליך סחיטת המים מהסדימנט הרך. תהליך רכישת מגנט באופן זה זוהה בחרסיות ובסילטים.

CRM – שינויים תרמודינמיים (טמפרטורה, לחץ, ואקטיביות כימית) גורמים ליצירת מינרלים

חדשים כתוצאה מהחלפת גבישים אחרים, או מתמיסה רוויה. מינרלים אלו רוכשים מגנוט שאריתי בכיוון השדה הגאומגנטי השורר בעת היווצרותם.

מגנוט שנרכש בעת הסדימנטציה מכונה מגנוט מקורי או "רכיב ראשוני". מגנוט שנרכש בשלבים מאוחרים יותר מכונה "רכיב משני" של ה-NRM (overprint), כדוגמת viscous remanent magnetisation (VRM). זהו מגנוט שנרכש עם הזמן בטמפרטורה נמוכה ותחת שדה מגנטי חלש. דוגמאות רבות רוכשות VRM עקב המצאותן בהשפעת השדה המגנטי של כדור הארץ מאז רכישת המגנוט המקורי. במקרה של תהליכים דיאגנטיים (כגון דהידרציה של גאתיט $(\alpha\text{-FeOOH})$ ליצירת המטיט $(\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3)$) ניתן לכנות גם את ה-CRM כ"רכיב משני" של ה-NRM. המגנוט במקרה זה צעיר מגיל היוצרות הסלע הסדימנטרי המקורי. כאשר פרק הזמן שעבר בין שקיעת הסדימנט לרכישת המגנוט בתהליכים הדיאגנטיים קצר בסדרי גודל יחסית לגיל הסלע, ניתן לאמר שה CRM הוא "רכיב ראשוני" של ה-NRM, ולכן מאפיין את זמן היוצרות הסלע.

מקורות

וינברגר ר., 1992. פליאומגנטיות בהר סדום: שיטה לקביעת מבנה גוף המלח, ושחזור עלייתו מתת הקרקע. עבודת גמר, המחלקה לגיאולוגיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
זק י., 1967. הגיאולוגיה של הר סדום. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
זק י., 1988. הליתוסטרטיגרפיה והמבנה של מחדר מלח סדום. מדריך לסורים גיאולוגיים, כנס החברה הגיאולוגית 1988, אזור ים המלח והערבה הצפונית, עמ' 184-158.
פרומקין ע., 1992. מערכת הקרסט במחדר המלח של הר סדום. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

- Begin, Z. B., Ehrlich, A., & Nathan, Y. (1974). Lake Lisan, The Pleistocene precursor of the Dead Sea. Geol. Survey of Israel Bulletin 63, 60 pp.
- Bentor, Y. K., & Vroman, A. J. (1960). The geological map of Israel, 1:100,000, Sheet 16: Mount Sdom, with Explanatory text. Geol. Survey of Israel, Jerusalem, 117 pp.
- Graham, J. W. (1949). The stability and significance of magnetism in sedimentary rock. Jour. Geophys. Res. 54, pp. 131-167.
- Vroman, A. J. (1951). The movement and solution of salt bodies as applied to Mount Sdom. Israel Explor. Journ. 1, pp. 185-193.
- Weinberger, R., Agnon, A., & Ron, H. (1991). Paleomagnetism of Sdom Formation: Tectonics and Stratigraphy. Isr. Geol. Soc. Annu. Mtg., Akko, pp. 116-117 (Abstract).
- Weinberger, R., Agnon, A., & Ron, H. (1992a). Paleomagnetism of Sdom Formation - Preliminary Result, and Stratigraphic and Tectonic Significance. Isr. Geol. Soc. Annu. Mtg., Ashqelon, pp. 159-161 (Abstract).
- Weinberger, R., Agnon, A., & Ron, H. (1992b). Applying paleomagnetism to identify the sense of steeply inclined stratigraphic sequence: A case study from the Sdom diapir, Israel. AGU. Fall Meeting, pp. 147.
- Zak, I., Karcz, I., & Key, C. A. (1968). Significance of some sedimentary structure from Mount Sdom. Isr. J. Earth Sci. 17, pp. 1-8.
- Zak, I., & Freund, R. (1980). Strain measurements in eastern marginal shear zone of Mount Sdom salt diapir, Israel. A.A.P.G. Bulletin 64, pp. 568-581.

סיור ב-2

החתך היבשתי והימי מגיל נאוגן ופלייסטוקן בבקעת ערד-ערוער – מפתח להבנת הקניון הקדום והמורפולוגיה הנוכחית בבקעת באר שבע

ע. זילברמן, ר. רודד, ב. בוכבינדר, המכון הגיאולוגי

מבוא

בקעת באר שבע התפתחה בין האנטיקלינוריום של הר חברון ומערכת הקמרים של הנגב הצפוני. הבקעה מורכבת ממספר אגני משנה: בקעת ערד-ערוער, בקעת חטיל ופיתחת באר שבע. מערכת הקמרים של עירא ועינים מפרידה בין אגני ערד-ערוער וחטיל ורכס גבעות גורל שהוא משאר טופוגרפי (ראה בוכבינדר וזילברמן, 1992) מפריד את מערכת האגנים הסגורים במזרח מהעמק הרחב של הבקעה במערב הנפתח אל מישורי שפלת הנגב (תרשים 1).

לבקעת באר שבע חשיבות רבה בהבנת ההיסטוריה הנאוגנית של הנגב מאחר והיא המקום הגיאוגרפי היחיד בו נמצאים בסמיכות סדימנטים נאוגניים יבשתיים וימיים (Neev, 1960; Gvirtzman and Buchbinder, 1969; גבירצמן, 1979; Martinoti et al. 1978).

הסיור הנוכחי יתרכז באזור בקעת ערד-ערוער שהוא עמק סינקלינלי התחום על ידי הקמרים של דימונה וראש זהר במזרח וקמר עירא במערב. מטרת הסיור להציג תוצאות ראשונות של עבודה על החתך הנאוגני והרביעוני של הבקעה תוך נסיון לשחזר את סדרת הארועים הארוזיביים והסדימנטריים הקשורים בהרבדתו. במסגרת הסיור תוצג מסגרת כללית לסטרטיגרפיה הנאוגנית ולקורלציה בין יחידות נאוגניות ימיות ויבשתיות בבקעת באר שבע. כן יבדקו היחסים המורפוסטרטיגרפיים של היחידות הנאוגניות והפלייסטוקניות והמשמעות הפלאוגיאוגרפית שלהם להתפתחות בקעת באר שבע.

מתודולוגיה

ניתוח של אגן יבשתי הנמצא בשולי הים מצריך בנוסף ללימוד אופי החתך הסטרטיגרפי, גם אנליזה מורפוסטרטיגרפית של היחידות השונות והמפלסים עליהם הן יושבות. זאת מאחר ובדרך כלל אין היחסים הסטרטיגרפיים באגנים אלה עונים בצורה פשוטה על חוק הסופרפוזיציה. הקירבה של אגן יבשתי אל קו חוף גורמת לזמן תגובה קצר של מערכות הניקוז לכל שינוי במפלס פני הים וכתוצאה מכך לתהליכי התחתרות או השקעה העוקבים אחרי השינויים בגובה בסיס הסחיפה. לפיכך, המגעים בין יחידות מגילים שונים באגן כזה הם בדרך כלל ארוזיביים כאשר יחידות צעירות יכולות להיות מונחות מעל, ליד או אף נמוך יותר מיחידות הקדמות להן.

ניתוח של מפלסים מורפולוגיים בבקעת ערד-ערוער הנו בעייתי מאחר והאגן היה נתון לתהליכים מחזוריים של ארוזיה וסדימנטציה. תהליכים ארוזיביים בסביבה יציבה מבחינת היחס בין אגן הניקוז לבסיס הסחיפה, מותירים מפלסי גידוע המייצגים פני שטח סחופים של נוף מתון המכוסים בדרך כלל בשכבה של סדימנטים פלוביאליים. מפלס סדימנטרי מייצג את

סופו של שלב הצטברות סדימנטים בו עוצב הנוף על ידי גג המילוי הסדימנטרי ולכן הוא בעל טופוגרפיה שטוחה.

כל אחד מהמפלסים ששרידיהם פזורים בבקעת ערד-ערוער מייצג שלב בהתפתחות הנוף של הבקעה. לכן יש חשיבות להבנת הקשר בין כל אחד מהמפלסים ליחידות הסדימנטריות ששקעו באגן וכן להירארכיה המורפוסטריגרפית שלהם, שהיא בטוי למקומם בסולם הזמן.

את שרידי המפלסים הקדומים ניתן למצוא בעיקר לאורך קוי פרשות מים אזוריות ומקומיות, מאחר ואלה הם חלקי האגן שהיו נתונים פחות מכל אזור אחר לתהליכי הסחיפה ולכן הם שימרו את שרידי הנוף הקדומים. לפיכך, ניתן לזהות מפלסים אלה בעזרת אנליזה טופוגרפית-מורפולוגית של קוי פרשות המים של האגן.

בעבודה הנוכחית שולבו קריטריונים מורפוסטריגרפיים וליתולוגיים לצורך שיחזור שלבי התפתחות הנוף והחתך הסדימנטרי באגן ערד-ערוער.

סטרטיגרפיה

אזור הנגב נחסף לסביבה יבשתית עם נסיגת הים לאחר האאוקן המאוחר. ההיסטוריה האוליוקנית של הנגב אינה ברורה כל צורכה מאחר ולא נשמרו בו סדימנטים מתקופה זאת. מקובל כיום לייחס לתקופה זאת את הווצרות מישורי הגידוע הנרחבים בראשי הרי יהודה, קימרי הנגב הצפוני והרמות של הנגב המרכזי, המהווים שרידים של נוף מתון שהשתרע במזרח הים התיכון וכונה על ידי Picard (1951) – הפנפליין האוליוקני.

אין בידינו עדויות לאופי התהליכים שיצרו את הפנפליין ולכן ההיפותזה שהוצגה על ידי פיקרד, שראה במישור זה תוצר של ארוזיה בסביבה יבשתית במשך תקופה ארוכה של יציבות, עדיין מקובלת. עם זאת, קיומם של סדימנטים ימיים אוליוקניים בשולי הרי יהודה, שפלת הנגב, ועבר הירדן, מרמזת על אפשרות שתהליכי גידוד ימיים היו מעורבים בתהליך זה.

תהליכי ארוזיה והשקעה החלו בנגב בתחילת המיוקן ונמשכו לסרוגין לפחות עד המיוקן התיכון. הסדימנטים ששקעו בתקופה זאת כלולים בתצורת חצבה וגילם הוגדר בעיקר על סמך פאונה יבשתית (Tchernov et al., 1987; Goldsmith et al., 1982). סדימנטים ימיים מגיל זה נמצאו בסינקלינת ירוחם במזרח (Picard, 1951; חרש, 1967) ובראש רכס גבעות להב במערב בקעת באר שבע, מקום בו נמצא החתך הטיפוסי של תצורת ציקלג מגיל מיוקן תיכון (Gvirtzman et Buchbinder, 1969; בוכבינדר וחילברמן, 1992; Buchbinder et al., 1993 in press).

סדימנטים ימיים מגיל מיוקן מאוחר נמצאו עד כה בנגב רק בתעלת באר שבע, בה הם ממלאים עמק שהתחתר ככול הנראה בתקופה שבין המיוקן ותחילת המיוקן המאוחר והגיע עד לאזור ערוער (Gvirtzman and Buchbinder, 1969; גבירצמן, 1979). סדימנטים אלה כלולים בתצורות בית אשל, שבע ופטיש (Martinotti et al., 1978; גבירצמן, 1979; בוכבינדר וחילברמן, 1992; Buchbinder et al., 1993).

סדימנטים ימיים מגיל פליוקן מוכרים משפלת הנגב ובקעת באר שבע במערב ומבקע ים המלח במזרח. מעט מאד ידוע על סדימנטים יבשתיים מגיל זה בנגב הצפוני, שהיה בתקופה זאת אזור מורם הנתון לתהליכי סחיפה.

הסדימנטים היבשתיים המוכרים ביותר מתקופת הפלייסטוקן באזור הנגב הצפוני הם יחידות הלס, שרובן מורכבות מסילט וחרסית ממקור אולי שעברו רהדפוזיציה בעימקי הנחלים.

אולם נראה שסדימנטים אלה מייצגים רק חלק קטן מתקופת הפלייסטוקן, ורובם הצטברו בתקופת הפלייסטוקן המאוחר.

בקעת באר שבע היתה בכל תקופת הנאוגן אגן יבשתי הנתון תדירות להצפות ימיות, ולכן קיים בה סיכוי גבוה לשימור החתך היבשתי והיא מהווה אזור מפתח להבנת הקשר בין סביבת ההשקעה היבשתית והימית בנגב בתקופה זאת.

מסלול הסיור יכלול מחשופים של תצורת חצבה, תצורת פטיש, תצורת שבע תצורת פלשת וקונגלומרט אחוזם וכן יחידות של לס. מאחר ובניית המסגרת המורפוסטרוגרפית הכללית לאזור נמצאת עדיין בשלבים ראשוניים, יוצגו גם יחידות שמיקומן הסטרוגרפי עדיין אינו ברור כל צורכו.

תצורת חצבה – מיוקן מוקדם עד תיכון

תצורת חצבה נשמרה לאורך קו פרשת המים הארצי באזור ערד ובבקעת ערוער, מצפון מערב לקמר דימונה. בשני האגנים בנוי החלק התחתון של תצורת חצבה מקונגלומרט בסיס המורכב מחלוקים ממקור מקומי המלוכדים על ידי גיר וגיר חווארי. מעל הקונגלומרט מונחים סדימנטים ששקעו ככול הנראה בתוך גוף מים – אגם או שולי ים. הם מורכבים מחוואר באזור ערד ומשכבות של גיר, חווארי, חולי באזור ערוער. באזור ערד מונח קונגלומרט הבסיס בגובה 600 מ' בעוד שבאזור ערוער גובהו משתנה בין כ-490–500 מ' באזור פרשת המים בין נחל ערוער לנחל סכר בדרום-מערב, לכ-440–450 מ' ליד בארות ערוער בצפון-מזרח.

את עיקר החתך של תצורת חצבה באזור מהווה הפרט העליון המורכב מחול קוורץ וחלוקי צור יבוא. הן באזור ערד והן באגן ערוער ממלא פרט זה תבליט החתור בתוך החלק התחתון של התצורה. עובי באזור ערד וערוער מגיע לכ-60 מ', אך עובי זה מייצג רק חלק מהעובי האמיתי, מאחר וחלקו העליון נסחף ובסיסו באזור ערוער אינו חשוף.

באזור ערד ממלא הפרט העליון עמק החתור בניצב לרכס ראש זהר. בסיס העמק נמצא כ-40 מ' מתחת לקונגלומרט הבסיס וכ-60–70 מ' מתחת לגג יחידת החוואר (ראה תקציר של כדן ועמיתיה בחוברת הכנס). את בסיס העמק, הנמצא סמוך לרכס ראש זהר, ממלאת יחידה של חלוקי צור יבוא ארוזים בצפיפות, שניתן להבחין בה ב-2–3 סדרות של שיכוב צולב פלנרי שעובי כל אחת מהן 1–3 מ'. יחידה זאת שקעה בסביבה פלוביאלית בעלת אנרגית זרימה גבוהה. מעליה יחידה של חול בינוני-גס גרגר עם מעט אופקים של חלוקי צור יבוא, המכילה גם היא סטרקטורות של שיכוב צולב ושל Cut and fill. זוהי היחידה החשופה במחצבת ערד.

החלק העליון של החתך הנמצא בגבהים שמעל 600 מ', מורכב מסדימנטים פלוביאליים משוכבים, בעיקר אבני חול ומעט חלוקים, המכילים פאלאוסולים. סדימנטים אלה שקעו בפישטי הצפה שהתפתחו באזור לאחר מילוי העמק וכיסוי התבליט על ידי הפרט העליון.

באזור ערוער, מורכב הפרט העליון מחלופין של חול, המלוכד בדרגות שונות על ידי קרבונט, ומיחידות של חלוקי צור יבוא. חלוקי הצור מופיעים הן כאופקים דקים בתוך החתך החולי והן כיחידות עבות המורכבות מחלוקי צור ארוזים בצפיפות. הצורה העדשתית של חלק מיחידות החלוקים משקפות ככל הנראה מלוי של אפיק נחל.

סביבת ההשקעה של תצורת חצבה

קיים דמיון רב בין תצורת חצבה בערוער ובערד, ונראה ששני החתכים מייצגים רצף סדימנטרי ששקע בעמק הסינקלינלי שמצפון מערב לקמר דימונה-ראש זהר. עם זאת, אין ודאות ששני רצפים אלה הם שווי זמן, ורמז לאפשרות זאת ניתן למצוא בעובדה שהם מונחים על מפלסים מורפולוגיים שונים שההבדלי הגובה ביניהם עולה על 100 מ' (ראה דיון בתאור תחנה מס 6). החלק התחתון של שני החתכים מייצג הצטברות של סדימנטים אלוביאליים קולוביאליים ששקעו בשולי הקמר באפיקים מקומיים ומניפות סחף קטנות. הליכוד הגירי-חווארי יכול לרמז על סביבה ימית או אגמית רדודה שהייתה בשולי הרכס, אך נקודה זאת עדיין טעונה הבהרה. היחידות החוואריות והגירים החוליים המשובכים הצהבהבים דומים אמנם לסלעים ששקעו בסביבה ימית, אך לא נמצאו בהם מאובנים היכולים לתמוך בסביבת השקעה ימית. יתכן ובסינקלינל ערוער התקיים אגם או מפרץ בו שררה סביבת השקעה ימית, תופעה שאינה יוצאת דופן לאור קיומו של אופק האוסטראות באגן ירוחם. עם זאת, יש להדגיש שהמידע הקיים על אופי יחידות אלה מועט וקיימת אפשרות שאלה סדימנטים של פשט הצפה שלא עברו תהליכים פדוגניים.

המעבר בין החלק התחתון של תצורת חצבה המורכב מסדימנטים ממוצא מקומי, לבין הפרט העליון המורכב מסדימנטים אלוכטוניים, מצביע על שינוי משמעותי הן בסביבת ההשקעה והן בפאליאוגיאוגרפיה של האזור. ארוע טקטוני מלווה בהתחתרות הביא להפסקת הצטברות קונגלומרט הבסיס והחתך שמעליו ולהתחתרות של נחלים הן ברכסים והן בעמקים הסינקלינליים. עמק חוצה רכס התחת ברכס ראש זהר והתחתרות ארעה גם במפער דימונה, שיצירתו הראשונית מיוחסת על ידי Neev (1960) לנחל שזרם כאן כבר באוליגוקן. את מקום הנחלים המקומיים תפסו נהרות גדולים שאגן הניקוז שלהם היה הרחק במזרח או דרום מזרח, אזורים בהם נחשפו בתקופה זאת סלעי המאסיב, מהם נגזר חלק מהחול שהובל לאזור (סער, 1986). עוצמות הזרימה של נחלים אלה היו גבוהות מאד כפי שמשקפים חלוקי הצור המעוגלים שהובלו ממרחקים של מאות קילומטרים.

משטר ההתחתרות שציין את המעבר בין שני חלקי החתך של תצורת חצבה, התחלף בתהליך מתמשך של השקעה והצטברות סדימנטים פלוביאליים שמלאו את התבליט שנוצר בשלב ההתחתרות הקודם. שרידי הפרט העליון של תצורת חצבה נמצאו גם על פני רמת בקע – הרמה של סלעי חבורת עבדת מדרום לבקעת באר שבע ועל פסגות רכס ראש זהר.

ההצטברות של סדימנטים אלה בכל אגני הנגב, עד לכסוי מוחלט של התבליט (זילברמן, 1991), מעיד על מגמה של השתפלות האזור כולו בתהליך טקטוני שיתכן והיה מלווה גם בעלייה אוסטטית של פני הים.

מחזור פטיש – מיוקן מאוחר

השם מחזור פטיש ניתן לחתך של סדימנטים ימיים ששקע בתוך תעלת באר שבע ובמישור החוף במיוקן המאוחר (בוכבינדר וזילברמן, 1992; Buchbinder et al., 1993). בבקעת באר שבע מורכב החלק התחתון של רצף סדימנטים זה מתצורת בית אשל החווארית הממלאת את עיקר נפח תעלת באר שבע, אך היא אינה חשופה כלל. מעליה מונחת תצורת שבע הבנויה מקלקארניט חולי, החשופה במחצבת באר שבע וכן בנחל באר שבע מצפון מזרח לנבטים (ראה בהמשך). בגג החתך של תצורת שבע נמצאים גופים עדשתיים של גירים ביוקלסטיים, חוליים,

חלקם ממוצא שוניתי, המכילים סטרוקטורות המעידות על היותם משקעים של זירמי כובד (Gravity flows) על קרקעית הים. גופים עדשתיים כאלה חשופים במספר מקומות בבקעת באר שבע וכן בין באר שבע לאופקים, בעבר הם כונו לשון ציקלג. במחשוף של מצודת פטיש באופקים, מונחים קלינופורמים של המופע הרדוד של תצורת שבע מגיל מיוקן מאוחר, באי התאמה על תצורת ציקלג מגיל מיוקן תיכון (בוכבינדר וזילברמן, 1992). סדימנטים אלה ששקעו כאן על מדרון תעלת באר שבע, מורכבים משכבות נטויות (נטיה סדימנטרית) של גיר אצות וחואר המכוסות על ידי מעטה דק של אלמוגים ענפיים מטיפוס porites. סדימנטים אלה כונו על ידי בוכבינדר וזילברמן (1992) – תצורת פטיש, אך לאור הידע שהצטבר בשנה האחרונה לא נראה שיש הצדקה להפריד אותם מתצורת שבע.

בבקעת ערוער נחשפת תצורת שבע נחשפת באפיק נחל באר שבע בנצ. 14440/06915 (תרשים 5) ונחל ערוער נצ. 16420/06740.

באזור בקעת באר שבע לא נמצאו בתוך תעלת באר שבע סדימנטים הקדומים למיוקן המאוחר (ביוזונים N16, N17; Martinotti et al., 1978), ולפיכך נראה שקטע זה של התעלה התחתית בסוף המיוקן התיכון או בתחילת המיוקן המאוחר. הטרנסגרסיה שחלה במיוקן המאוחר, בתקופת הטורטוניין והמסיניין, חדרה בעמק שנוצר בבקעת באר שבע עד לקרבת ערוער, אך לא הציפה את האזור כולו.

קיים קושי בשחזור התוואי המזרחי של הנחל שהתחת במיוקן התיכון–מאוחר בבקעת באר שבע ויצר את קניון תעלת באר שבע. באזור מפער דימונה, שהוא התוואי המשוער של הנחל המיוקני, נשמר החתך של הפרט העליון של תצורת חצבה ואין עדויות להתחתרות עמוקה בתוכו. תחתרות כזאת הנה צפויה אם גילו של חתך זה קדום למיוקן התיכון, בדומה לגילים המיוחסים על ידי Tchernov et al. (1987) לתצורת חצבה באגני ירוחם וימין–רותם. יתכן שיש כאן רמז לכך שהחתך היבשתי של תצורת חצבה באזור ערוער הצטבר בזמן ההצפה של המיוקן המאוחר ולכן הוא מאוחר לשלב ההתחתרות שייצר את תעלת באר שבע במיוקן התיכון–מאוחר.

המחזור הפליוקני תצורות פלשת ויפו

תצורת פלשת מגיל פליוקן מאוחר תוארה בעבר ממקומות רבים בבקעת באר שבע (Gvirtzman, 1969; and Buchbinder, 1980; Goldbery), בעיקר ממערב לנבטים. התצורה מורכבת מסדרה של אבני חול גיריות וגירים ביוקלסטיים ששקעו בסביבה ימית רדודה הנתונה להשפעת הגלים (ראה, בוכבינדר וזילברמן, 1992). במרכז תעלת באר שבע היא מונחת על חוארים של תצורת יפו, ששקעו בים עמוק בהצפה מגיל פליוקן מוקדם, ובשוליה על מישור גידוד הגודע את חבורת עבדת מגיל אאוקן. מספר פאלאוסולים ואף קרומי קלקריט שנמצאו בתוך היחידה (בוכבינדר וזילברמן, 1992), מעידים על כמה ארועים של חשיפה שהיו מספיק ארוכים כדי לאפשר התפתחות קרקעות.

המחשוף המזרחי ביותר של סדימנטים ימיים מגיל פליוקן נמצא במחצבת נבטים (תרשים 7). החתך החשוף מבטא שני מחזורי השקעה עיקריים: החלק התחתון מורכב מאבן חול מלוכדת על ידי קרבונט, בעלת הופעה הומוגנית, ששקעה בסביבה ימית, כנראה מתחת לבסיס הגלים והושפעה מתנועות אאוסטטיות מחזוריות קטנות שחשפו אותה לסרוגין להשפעת הגלים, כפי שנתן ללמוד ממבני שיכוב צולב שטוח שנמצאו בה.

היא מופרדת מהחלק העליון של החתך על ידי מישור אי התאמה המאופיין על ידי התפתחות קרקע, התחתרות אפיקי נחלים והשקעת חלוקים. אי התאמה זאת מציינת ארוע גרסיבי

שלווה בהתפתחות מערכת ניקוז וגידוע של החתך הימי הקודם.

החלק העליון של החתך, מורכב בעיקר מפאלאוסולים שהתפתחו באבני חול המכילות אופקי חלוקים, ששקעו ככול הנראה בנחלי פזרות ופישיטי הצפה בקרבת החוף. בבסיס ובגג של החתך היבשתי יש שכבות של חול גירי עשיר באוסטראות וגסטרופודים קטנים (Pirenella) ששקעו בסביבה ימית רדודה או אף לגונרית (Backshore lagoon), המעידות על שתי הצפות ימיות קצרות של האזור.

המרכיב השולט בחתך החשוף במחצבת נבטים, הוא חול-קוורץ, וזאת בניגוד לתצורות שבע ופטיש, בהן המרכיב הדטרטי הוא קרבונטי-סקלטלי.

שני מחזורי ההשקעה במחצבת נבטים מייצגים שתי הצפות ימיות שונות בממדיהן. אבני החול התחתונות שקעו בים עמוק יחסית ואלו החלק העליון של החתך בסביבה יבשתית בקרבת החוף, באזור שהיה נתון להצפות ימיות קצרות. יש הקבלה בין אופי סביבת ההשקעה הימית של שני מחזורי ההצפה הפליוקניים במערב בקעת באר שבע – מחזור יפו (ים עמוק) ותצורת פלשת (ים רדוד), לבין החתך במחצבת נבטים. לפיכך, יתכן ויש לראות באבני החול התחתונות של החתך את הפאציאס המקביל לתצורת יפו החווארית במערב בעוד החלק החתך העליון המייצג סביבת השקעה רדודה מאד, הנו חלק ממחזור ההשקעה של תצורת פלשת. השלב הגרסיבי בין שתי ההצפות הפליוקניות מיוצג על ידי אי ההתאמה בין שני המחזורים.

היחידה האדומה (פציאס יבשתי פליוקני)

בשם "היחידה האדומה", מכונה חתך המורכב מסדרה של קרקעות אדומות, בחלקן קלציות ובחלקן חרסיתיות, שהתפתחו באבני חול או חוואר והמכילות לפעמים אופקי חלוקים. החלק העליון של יחידה זאת בנוי מקונגלומרטים המורכבים מאופקי חלוקים בחילופין עם אבני חול אדומות ומעט קרקעות קלציות לא מפותחות. יתכן שהחתך העליון של היחידה הנו חלק ממחזור ההשקעה של קונגלומרט אחוזם (ראה בהמשך). התפוצה של היחידה האדומה משתרעת על כל בקעת ערד-ערוער מאזור כסייפה במזרח ועד לנבטים במערב.

באזור כסייפה ממלאת היחידה האדומה עמק שקרקעיתו נמצאת בסמוך לגובה האפיקים הנוכחיים (תרשים 3), ואילו באזור ערוער ממלאת יחידה זאת עמק החתור בתוך הפרט העליון של תצורת חצבה. בנחל עדרים, בסמוך לצומת ערוער מורכבת היחידה האדומה מחתך של אבני חול אדומות עם מעט אופקים של חלוקי צור יבוא (תרשים 4). ניתן להבחין בחתך במספר סדרות של קרקעות קלציות מפותחות מאד (דרגה III-IV, לפי הדרוג של Gile et al., 1981), שדרגת התפתחותן יורדת במעלה החתך.

ניתן לעקוב אחרי יחידה זאת למערב עד אזור נבטים, שם מופיעה לראשונה אבן החול האדומה מעל מישור אי ההתאמה המבדיל בין החול המאסיבי (המייצג ככל הנראה את מחזור ההצפה של תצורת יפו) לתצורת פלשת. לפיכך, נראה שבאזור נבטים מייצגת היחידה האדומה את הפאציאס היבשתי של תצורת פלשת ומזרחה יותר אף של תצורת יפו. מכל מקום, היא אינה חלק מתצורת חצבה כפי שסברו בעבר Gvirtzman and Buchbinder (1969), ודובינסקי (1985).

סביבת ההשקעה של יחידה זאת היתה בקרבת החוף בו שקעה תצורת פלשת, באפיקים בעלי אנרגיות זרימה נמוכות וקצב סדימנטציה איטי שיצרו פישיטי הצפה נרחבים. ההשתרעות הרחבה של קרקעות אלה בכל האגן מצביעה על שלב של יציבות באקלים סמי-ארידי.

יחידת הקונגלומרט המלוכד על ידי קלקריט (קונגלומרט אחוזם)

יחידה של קונגלומרט שגגו מלוכד על ידי קלקריט עבה, מכסה את גג החתך הנאוגני בבקעת ערוער. הקונגלומרט מורכב מתערובת של חלוקי צור יבוא שמקורם בתצורת חצבה ומחלוקים שנגזרו מרכס דימונה. במקומות אחדים הוא מכיל בולדרים גדולים (עד מטר) שמצביעים על אנרגיות זרימה גבוהות ואולי על מנגנון הובלה של זירמי בליט (Debris flow).

עובי הקונגלומרט משתנה בין מטרים ספורים לכ-15 מ' והוא מונח באי התאמה על תצורת חצבה, על החלק התחתון דק הגרגר של היחידה האדומה ועל תצורת פלשת. מאחר ובמקומות רבים הוא מעורב באבני חול אדומות, הוא נכלל ביחידה האדומה, ומהווה את חלקה העליון. ניתן לעקוב אחריו ברציפות מאזור ערוער ועד מחצבת נבטים, מאחר והוא בונה את קווי פרשת המים בתוך בקעת באר שבע. השתמרותו הטובה נזקפת לזכות ליכוד הקלקריט שמקנה לו קושי הדומה לזה של סלעי גיר.

דגם התפוצה של משארי הקונגלומרט בבקעת ערד-ערוער מצביע על השתרעות רחבה בכל הבקעה ומעידה על שינוי קיצוני בסביבת ההשקעה, מאגן בו מצטברים סדימנטים דקי גרגר בקצב איטי המאפשר התפתחות קרקעות, להרבה בנחלי פזרות בעלי אנרגיה גבוהה. התבליט בבסיס הקונגלומרט אינו גדול ושיפועו אינו שונה מזה של היחידות שמתחתיו ולכן אין הוא ככול הנראה תוצר של ארוע טקטוני, אלא של שינוי אקלימי בלבד. מיקומו מעל תצורת פלשת והיחידה האדומה מאפשר קורלציה בינו לבין קונגלומרטים המונחים מעל תצורת פלשת באזור באר שבע ואשר נכללו על ידי בוכבינדר וזילברמן (1992) בקונגלומרט אחוזם. קונגלומרט דומה תואר מבקעת חטיל על ידי ודובינסקי (1985) שהציע לראות בו פאציאס של קונגלומרט אחוזם. בעבר זוהה קונגלומרט זה כקונגלומרט הגג של תצורת חצבה (Gvirtzman and Buchbinder, 1969).

הרבדת הקונגלומרט מסמנת את סופו של שלב הסדימנטציה הפליוקנית הקשור להצפה בה שקעה תצורת פלשת, אך יתכן וחלקו העליון המשיך להצטבר גם בחלק מתקופת הפלייסטוקן.

לס פלוביאלי ופאלאוסולים – תקופת הפלייסטוקן

שלב הצטברות הסדימנטים במחזור הפליוקני בא אל סיומו בתהליך התחתרות של כל מערכות הניקוז בבקעת באר שבע. שיעור ההתחתרות באפיקים הראשיים הגיע ל-40-30 מ' מתחת למפלס קונגלומרט אחוזם והיא קשורה ככול הנראה לשינוי אקלימי שהביא לאקלים צחיח יותר.

בתוך מערכת העמקים שנוצרה הצטבר חתך של סדימנטים אאוליים דקי גרגר שמקורם באבק ששקע על פני הנוף ונסחף לאחר מכן אל האפיקים בהם הוא הורבד והצטבר בהדרגה. זהו רצף הסדימנטים של הלס הפלוביאלי המאפיין את תקופת הפלייסטוקן.

בתוך חתך הלס נתן להבחין במספר מישורי גידוע ואופקי פאלאוסולים המעידים על מספר שלבים של הצטברות וארוזיה. הצטברות הלס בתוך מערכת האפיקים נמשכה בפלייסטוקן עד למלוי כמעט מוחלט של העמקים החתורים בחתך הנאוגני ויצירת פישי הצפה נרחבים לאורך הנחלים.

באזורי קוי פרשת המים התפתחו קרקעות קלציות המונחות מעל לקרום הקלקריט המצפה את הסדימנטים הנאוגניים.

המידע הקיים כיום על יחידות הלס באזור ערוער הוא מועט ביותר. באזורים אחרים בנגב הצפוני והצפון מערבי נמצאו בחתכי הלס עד שבעה פאלאוסולים (Bruins and Yaalon, 1979; Goodfriend and Magaritz, 1988) שרובם נוצרו בתקופת הקרח האחרונה. אם נתונים אלה נכונים גם לגבי הלס של בקעת באר שבע, הרי קיים כאן יצוג סדימנטרי רק לתקופת הפלייסטוקן המאוחר ושאלת קיומו של חתך ששקע בפלייסטוקן המוקדם והתיכון נותרה פתוחה. כפי שנאמר בפרק הקודם, יתכן שקונגלומרט אחוזם מייצג גם חלק מתקופת הפלייסטוקן.

מפלסים מורפולוגיים עיקריים בבקעת ערד-ערוער

ניתוח של מפלסים מורפולוגיים בבקעת ערד-ערוער מצביעה על קיומם של מספר מפלסים עיקריים וביניהם מפלסי משנה (תרשים 3).

מפלס חצבה

זה המפלס הגבוה ביותר באזור השוליים המזרחיים של בקעת ערד. הוא מעצב סדרה של שלוחות בעלות גובה דומה, המשתפלות במתינות אל בקעת ערוער, לאורך השוליים הצפון מערביים של קמר דימונה. המפלס מכוסה בדרך כלל בשרידים של תצורת חצבה, בעיקר חלוקי צור יבוא ואבני חול. בדרך כלל הוא נמצא בגבהים של 530–560 מ' ולכן ניתן לפרש אותו כפני השטח עליהם שקעה תצורת חצבה. זאת מאחר ובסיס תצורת חצבה בערד נמצא בגובה מינימלי של 560 מ'.

מפלס כסייפה

המפלס המעצב את חלקה הצפון מזרחי של בקעת ערד. הוא משתפל מגובה של כ-520–510 מ' באזור תל ערד ל-490–480 מ' באזור כסייפה. לרוב הוא מכוסה בחתך חלוקים שעוביו מספר מטרים שרובם ממוצא מקומי, אך חלקם הם חלוקי צור יבוא שנגזרו מתצורת חצבה. מפלס זה מייצג שלב של יציבות בהתפתחות הבקעה המאוחר לשלב ההתחתרות של מערכות הניקוז המקומיות בפני השטח עליהם זרמו הנחלים הגדולים שהשקיעו את תצורת חצבה. שלב היציבות והרחבת העמק לא לווה בהצטברות חתכים עבים של סדימנטים פלוביאליים.

מפלס אחוזם

זהו מפלס סדימנטרי שהתפתח על גג החתך הנאוגני לקראת סוף תקופת הפליוקן (תרשים 3). בינו לבין מפלס כסייפה מפרידים 2–3 מפלסים אלוביאליים ארוזיביים, בעוד הוא מייצג את סוף תקופת הסדימנטציה של המחזור הפליוקני, בו שקע חתך בעובי של כמה עשרות מטרים בעמקים שהתחתרו בסדימנטים המיוקניים. בשולים הדרום-מזרחיים של הבקעה נמצא מפלס אחוזם בגבהים של 440–450 מ' והוא משתפל לגובה 350 מ' באזור נבטים. מפלס זה יוצר את פרשות המים בתוך בקעת באר שבע.

מפלס הלס הפלוביאלי

זה מפלס סדימנטרי המייצג את גג החתך של הלס הפלוביאלי ששקע בפלייסטוקן המאוחר. תפוצתו מצביעה על ממדי פישטי ההצפה שנוצרו באזור עקב מלוי העמקים שנוצרו בחתך הנאוגני בתחילת הפלייסטוקן.

הקלקריט בבקעת ערד-ערוער

קלקריט הנו קרום גירי הנוצר מתחת לכיסוי קרקע באקלים סמי-ארידי. קצב הצטברותו של קרום זה היא איטית ונחוצה תקופה שאורכה מאות אלפי שנה כדי ליצור קרום קלקריט בעובי גדול. מציאת קרום קלקריט על גבי הנוף מעידה על היותו חשוף במשך תקופה ארוכה לתהליכים פדוגניים בסביבה יציבה.

כל מדרגות הנוף הגבוהות ממפלס קונגלומרט אחוזם או שוות לו בגובהן מכוסות בקרום קלקריט עבה (במקומות מעל מטר) המלכד בדרך כלל סדימנטים אלוביאליים או קולוביאליים. קונגלומרט אחוזם הוא היחידה הקלסטית הצעירה ביותר המלוכדת על ידי קלקריט. יחידות הלס מכילות אמנם קרקעות קלציות אך אינן מגיעות לשלב התפתחות קלקריט.

ניתן לפיכך להשתמש בקרום הקלקריט כסמן גיאולוגי ומורפולוגי המבדיל בין מפלסים ויחידות סדימנטריות נאוגניות ובין סדימנטים פלייסטוקניים. השתרעותו הרחבה של קרום הקלקריט המלכד את קונגלומרט אחוזם בכל הבקעה, מצביעה על תקופה ארוכה של יציבות שזמנה מאוחר להרבדת הקונגלומרט ומוקדם להתחתרות העמקים הפלייסטוקניים. יתכן ותקופת היציבות הארוכה בה נוצר קרום הקלקריט, מייצגת את ראשית תקופת הפלייסטוקן.

שלבי התפתחות הנוף של בקעת ערד – ערוער

ניתן להבחין בכמה שלבים עיקריים בהתפתחות בקעת ערד-ערוער, אם כי היחס בין היחידות הסדימנטריות לשלבים אלה אינו תמיד ברור.

1. שלב התחתרות העמקים הסינקלינליים בפנהפליין האוליגוקני. יתכן ובשלב זה כבר היה קיים מפער דימונה, אך מאחר ולא נמצאו בו עדיין סדימנטים של בסיס תצורת חצבה הבעייה עדיין פתוחה.
2. שלב השקעת קונגלומרט הבסיס והחתך הגירי-חווארי-חולי שמעליו. יתכן ובתקופה זאת חדר הים עד שולי קמר דימונה.
3. שלב התחתרות המלווה ככול הנראה בארוע טקטוני, בו התחתר מפער ברכס ראש זהר והתחדשה ההתחתרות גם במפער דימונה. מדת ההתחתרות המשוערת היא כמה עשרות מטרים (40-60 מ') מתחת לגג החתך של בסיס תצורת חצבה.
4. הצטברות מתמשכת של סדימנטים אלוכטוניים של הפרט העליון של תצורת חצבה. נראה שתנועת השתפלות איטית בצרוף מגמה של עליית פני הים גרמה לתהליך זה שבסופו כוסה רוב התבליט או אף כולו על ידי גג החתך של תצורת חצבה.
5. התחתרות שזמנה מאוחר לתחילת המיוקן והמיוקן למיוקן המאוחר (טווח זמן משוער המיוצג על ידי הביזונים N13-N15), שיצרה את החלק המזרחי של תעלת באר שבע במתכונתו הנוכחית. יתכן ובתוואי זה היה עמק קדום יותר, אך פחות עמוק שעדויות לקיומו לא נשמרו עקב ההתחתרות הצעירה יותר.
6. הצפה ימית שחלה במיוקן המאוחר (טורטוניאן-מסיניאן), חדרה דרך העמק שנוצר במיוקן התיכון והגיעה עד לאזור ערוער. לשון ים זאת השקיעה את הסדימנטים של מחזור פטיש (תצורות בית אשל ושבע).
7. נסיגת הים בסוף המיוקן וחדוש ההתחתרות בבקעה.
8. השקעת תצורות יפו ופלשת במשך שני מחזורי הצפה של הים בפליוקן. אין באזור מזרח בקעת באר שבע עדויות לקיומו של החתך החווארי של תצורת יפו, הבונה את בסיס

החתך הפליוקני באזור באר שבע ומערבה, אך יתכן שהחול המאסיבי בבסיס החתך במחצבת נבטים שקע בהצפה זו.

באזור בקעת ערד-ערוער מצטברים בתקופה זאת סדימנטים דקי גרגר של "היחידה האדומה" בפישטי הצפה בקרבת החוף. קצב ההצטברות האיטי מאפשר התפתחות קרקעות המקנות ליחידה זאת את צבעה האופייני.

9. שינוי אקלימי המלווה את נסיגת הים בסוף הפליוקן, מביא להתפתחות מערכת נחלי פזרות המשקיעה שטיח של חלוקים על פני בקעת באר שבע (קונגלומרט אחוזים).

10. התחתרות של מערכת הניקוז במלוי הנאוגני יוצרת מערכת עמקים שעומקם 20-40 מ'.
11. סילט וחרסית אאוליים השוקעים באגן הניקוז של נחל באר שבע בתקופת הפלייסטוקן (כנראה העליון), נסחפים ומצטברים בעימקי הנחלים בתהליך איטי המורכב מכמה מחזורים. עימקי הנחלים מתמלאים בהדרגה ופישטי הצפה נרחבים מתפתחים לאורכם. נראה שאקלים בו קצב אספקת האבק היה גדול ועוצמת סופות הגשם קטנה, גרם להצטברות הלס הפלוביאלי בעמקים.

12. התחתרות נוספת של הנחלים בהולוקן. נראה שמלוי החלוקים באפיקים הנוכחיים שעוביו מגיע למספר מטרים, שקע בחלקו בהולוקן וחלקו שקע עוד לפני הרבדת הלס בפלייסטוקן. פשט ההצפה הנוכחי של הנחלים התפתח על גבי מלוי החלוקים ההולוקני, אך גילו המדויק עדיין אינו ברור.

תאור מסלול הסיוור

מסלול הסיוור יחל בערד, בתצורת חצבה ויחצה את בקעת ערד-ערוער עד לאזור נבטים. במסגרת הסיוור יסקרו מחשופים המייצגים את היחידות הליתולוגיות הנאוגניות ששקעו בבקעה וכן המפלסים המורפולוגיים העיקריים הנמצאים בין ערד לנבטים. יבדק הקשר בין המפלסים השונים ליחידות הסדימנטריות ולהתפתחות הנוף של הבקעה מאז המיוקן וידון הקשר בין בקעת ערד-ערוער לחלק המערבי של בקעת באר שבע.

יוצגו האפשרויות הטמונות בשימוש בקריטריונים מורפולוגיים ופדולוגיים ככלי עזר במפוי גיאולוגי, בקורלציה בין מחשופים מרוחקים ובהבנת היחסים המורפוסטרטיגרפיים באגנים בהם אין החתך הסטרטיגרפי עונה על חוקי הסופר-פוזיציה.

תחנה 1 – בסיס תצורת חצבה בתחנה המרכזית בערד (תרשים 2).

תצפית על החלק התחתון של תצורת חצבה המורכב כאן משלושה פרטים – קונגלומרט ממוצא מקומי בבסיס, מעליו חוואר ומעליהם באי-התאמה הפרט העליון של התצורה. בסיס החתך נמצא בגובה 600 מ' וגגו גדוע ומכוסה בשכבה של חלוקי צור רזידואליים מלוכדים על ידי קלקריט.

תחנה 2 – הפרט העליון של תצורת חצבה במחצבת החול של ערד (תרשים 2).

בתחנה זאת ניתן לראות את אופי החלק העיקרי של הפרט העליון של תצורת חצבה המורכב כאן מחול גס המכיל אופקים של צור יבוא. סטרקטורות של מלוי תעלות ושיכוב צולב מצביעים על השקעה בסביבה נחלית. בסיס החתך של הפרט העליון ממלא כאן עמק החתור כ-40 מ' בפני השטח עליהם שקע קונגלומרט הבסיס.

תחנה 3 – תצפית מרכס ראש זהר על בקעת ערד

תצפית השולטת על בקעת ערד, ממנה אפשר לזהות את תוואי הנוף העיקריים וחלק מהמפלסים המורפולוגיים. נקודת התצפית נמצאת על מפלס תצורת חצבה.

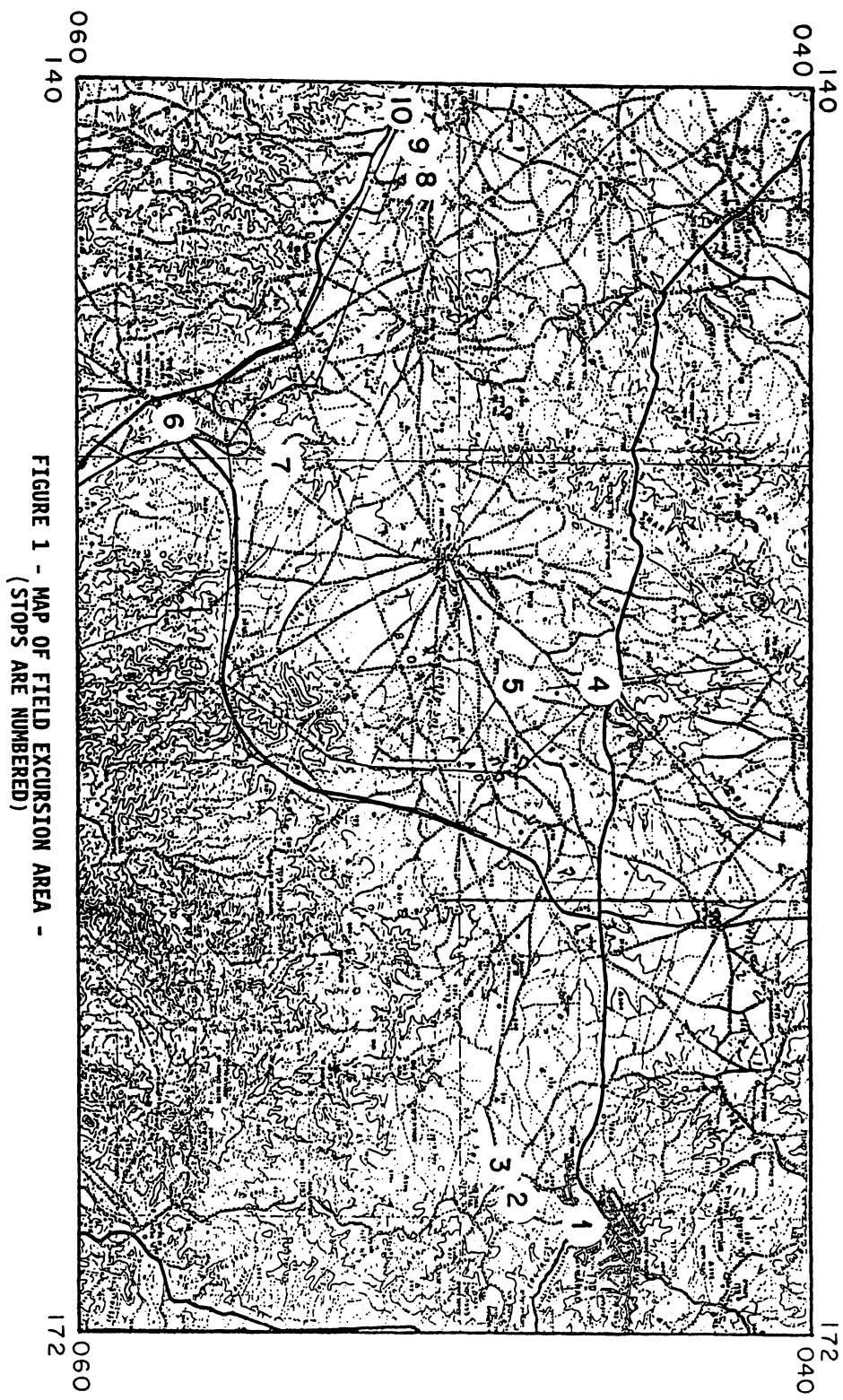


FIGURE 1 - MAP OF FIELD EXCURSION AREA -
(STOPS ARE NUMBERED)

תרשים 1.

תחנה 4 – תצפית ממפלס כסיפה על בקעת ערד-ערוער (תרשים 3)

תצפית מחירבת כסיף על המדרגות המורפולוגיות המפרידות בין מפלס כסיפה לנחל באר שבע. נסיעה דרך מפלסי החלוקים המכסים את המדרגות עד לנחל באר שבע לרגלי הכפר של אבו-רביע, מקום בו מתחתר האפיק ביחידה האדומה. החתך המורפולוגי המופיע בתרשים 3 נמצא ממזרח לנקודת התצפית.

תחנה 5 – היחידה האדומה בנחל באר שבע ליד אבו-רביע (נ.צ. 15610/07135)

היחידה האדומה נמצאת כאן באחד המחשופים הצפוניים ביותר שלה. היא מורכבת בבסיס מחול אדמדם המכיל מעט חלוקים ומעליו קרקע סילטית-חרסיתית, גרומוסולית עבה בעלת גוון אדמדם עם כתמים ירקרקים. מעל הקרקע מונח באי התאמה קונגלומרט שעוביו מספר מטרים. זהו הקונגלומרט אחריו ניתן לעקוב בכל הבקעה והמזווה על ידינו בקונגלומרט אחוזם.

תחנה 6 – תצורת חצבה בצומת ערוער (נ.צ. 14880/06225)

מחשוף של הפרט העליון של תצורת חצבה המורכב מחול קוורץ צהבהב ואופקים של חלוקי צור יבוא. הליתולוגיה של יחידה זאת דומה לזו של הפרט העליון בערד ופרט רותם באגן רותם, ממזרח לקמר אפעה.

למרות הדמיון הרב בין תצורת חצבה בערד ובערוער, קיים ביניהם הבדל טופוגרפי של כ- 150-170 מ' שלא ניתן לגשר עליו בעזרת מעקב אחרי מפלסים לאורך שולי קמר דימונה. למעשה, ניתוח המפלסים מצביע על אפשרות שהנחל שהשקיע את הפרט העליון באזור ערוער היה בשווי משקל עם בסיס ניקוז נמוך מזה של הנחל שהשקיע את הפרט העליון בערד. המשמעות של הבדל זה הוא ששתי היחידות לא הורבדו בו-זמנית והן קשורות לשתי מערכות ניקוז שפעלו בתקופות שונות בתוך המיוקן. ניתן להצביע על קשר אפשרי בין תצורת חצבה בערד לבין הים שהשקיע את תצורת צקלג באזור גבעות להב (בגובה 470-500 מ'). לעומת זאת המפלס של תצורת חצבה בערוער נמצא בהתאמה עם תצורת שבע ששקעה במפרץ שנוצר במיוקן המאוחר בבקעת באר שבע. מאחר ואין בידינו נתונים בלתי תלויים על הגיל של כל אחד ממחשופי תצורת חצבה, נשארת בעיה זאת בלתי פתורה.

גג החתך של תצורת חצבה מלוכד על ידי קלקריט שהתפתח על יחידת חלוקים של קונגלומרט אחוזם, המכסה את פרשת המים הנמשכת בין נחל ערוער לנחל עדרים עד למפגשם עם נחל באר שבע.

בשולי המחשוף של תצורת חצבה נחשפת היחידה האדומה במגע שהוא ככול הנראה ארוזיבי.

תחנה 7 – היחידה האדומה בנחל עדרים (נ.צ. 15020/06430) (תרשימים 4, 4A)

מחשוף הנמצא בסמוך לצומת ערוער בגדה הדרומית של נחל עדרים. היחידה האדומה מורכבת כאן משני חלקים. החלק התחתון מורכב מחתך חולי בו התפתחו פאלאוסולים קלציים והחלק העליון מקונגלומרט המכיל גם הוא שכבות חוליות ומעט פאלאוסולים.

בחלק התחתון ניתן להבחין בשלוש יחידות המופרדות במישורי גידוע. דרגת ההתפתחות של הפאלאוסולים הולכת וקטנה במעלה החתך ונראה שהיא בסוי לקצב הסדימנטציה ההולך ועולה מבסיס החתך אל גגו. מעט אופקי חלוקים הנמצאים בחתך, שרידי סטרוקטורות של שיכוב אופקי והפאלאוסולים, מעידים על השקעה איטית בפשט הצפה של נחל.

LEGEND:

	Redeposited loess		Dyffrows
	Sandstone		Low angle cross stratification
	Conglomerate		Troughs cross stratification
	Aliochthonous chert pebbles		Mass flows and slumps
	Clay		Marine fauna
	Pebbles		Planar bedding
	Pegmatitic nodules		
	Calcrete		

br - Brown
wh - White
y - Yellow
gr - Grey
grn - Green
r - Red

מקרא
50%

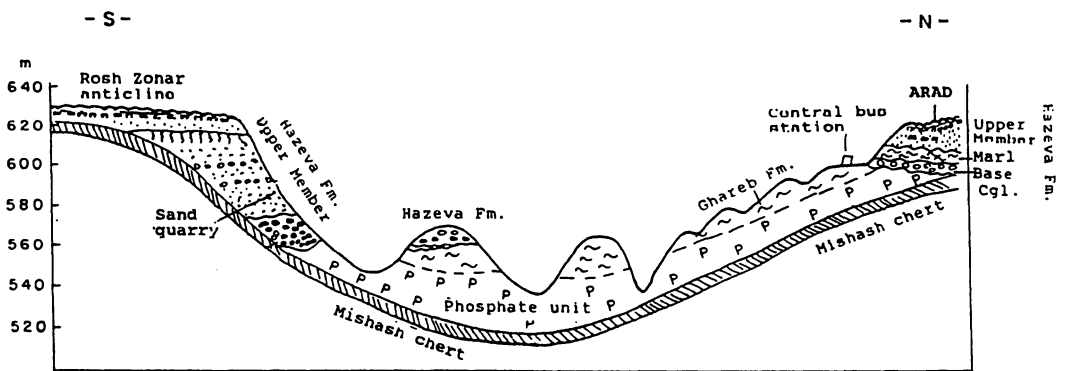


FIGURE 2 - SCHEMATIC CROSS SECTION FROM
ARAD TO THE ROSH ZOAR ANTICLINE

תרשים 2.

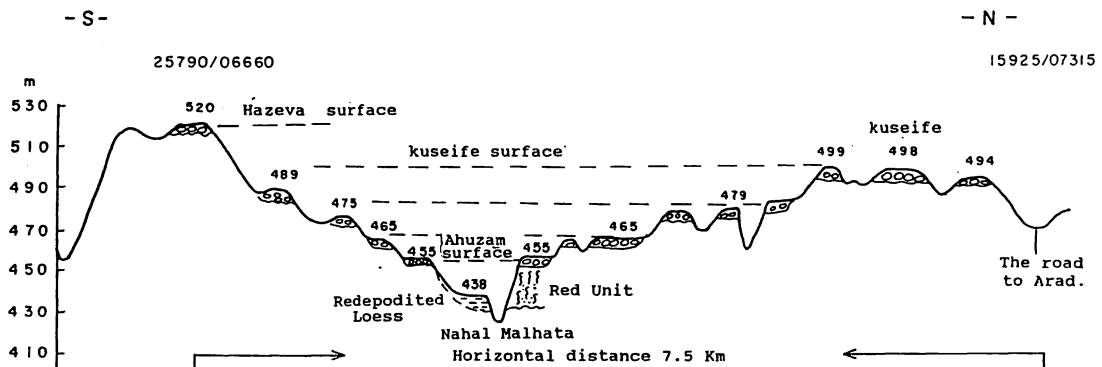


FIGURE 3 - MAIN ALLUVIAL SURFACES IN
THE EASTERN PART OF THE
BIQ'AT ARAD VALLEY

תרשים 3.

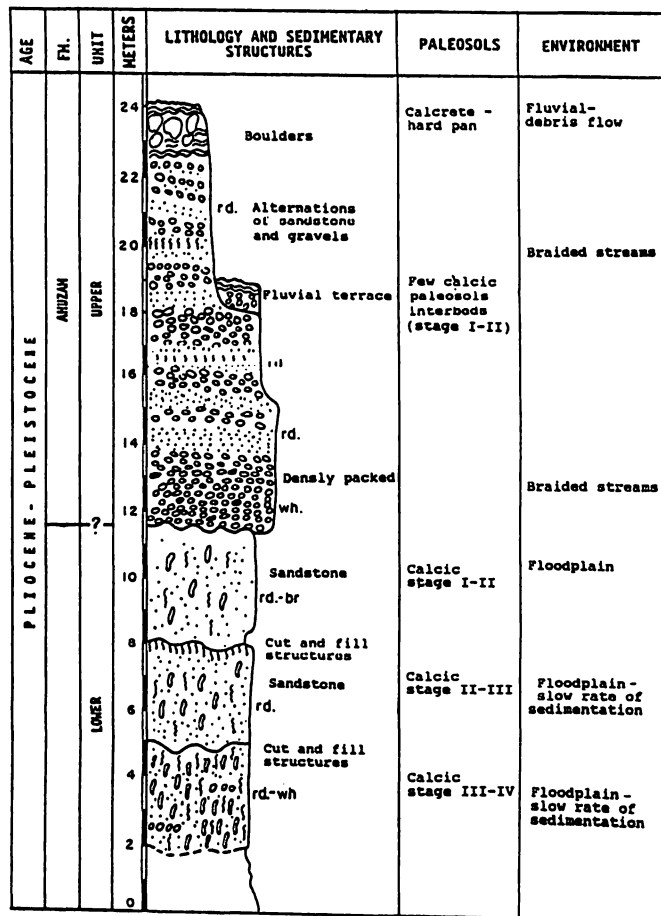


FIGURE 4 - COLUMNAR SECTION OF THE "RED UNIT" IN NAHAL 'ADARIM
Coords 15020/06430

- S -

- N -

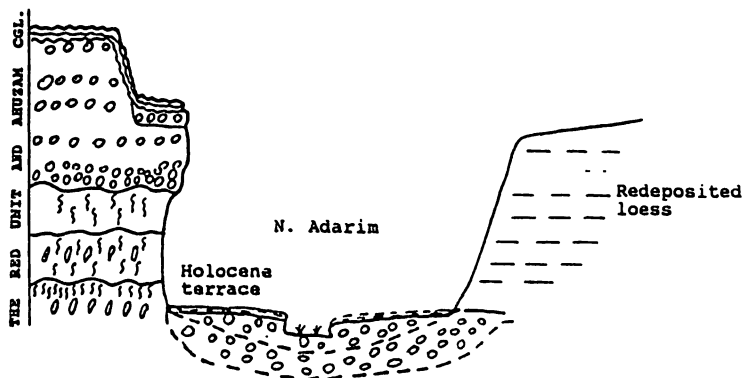


FIGURE 4A - NW-SE SCHEMATIC CROSS SECTION THROUGH N. ADARIM

תרשימים 4, 4A.

הקונגלומרט הנו עבה (מעל 10 מ') והוא מלוכד בחלקו העליון על ידי קלקריט ההולך ומתעבה אל קו פרשת המים. הקונגלומרט הנו חלק רציף של מעטה החלוקים המכסה את תצורת חצבה בצומת ערוער והוא נמשך מערבה עד לנבטים. ניתן להבחין בשני מפלסים בתוך הקונגלומרט כאשר המפלס הנמוך מתחתו בתוך הקונגלומרט הבונה את החלקים הגבוהים של קו פרשת המים לאורך הבקעה. קלקריט עבה מצפה את שני המפלסים וכן את החלק העליון של המדרונות, אך נראה שכולו הוא נמוך יותר בנוף הוא פחות מפותח דבר המעיד על גיל צעיר יותר.

בגדה הצפונית של הנחל ניתן להבחין בטרסה גבוהה הבנויה כולה מלס פלוביאלי. הלס שקע בתוך עמק שהתחתו ביחידה האדומה וגגו מייצג את פשט ההצפה הפלייסטוקני שנוצר באזור לאחר מלוי העמקים בסילט וחרסית, אאוליים במקורם, שנשטפו מאגן הניקוז של נחל עדרים.

האפיק הנוכחי של הנחל מתחתו בתוך פשט הצפה צעיר, ככל הנראה הולוקני, היוצר מדרגה נמוכה, כמטר עד שניים מעל האפיק.

תחנה 8 - תצורת שבע בנחל באר שבע (נ.צ. 14250/06895) (תרשים 5)

תצורת שבע נחשפת בקניון קטן וצר שנוצר על ידי נחל באר שבע בתוך גבעה שנוצרה כתוצאה מקימוט. מחשוף זה תואר בעבר על ידי Gvirtzman and Buchbinder (1969), כפרט העליון של

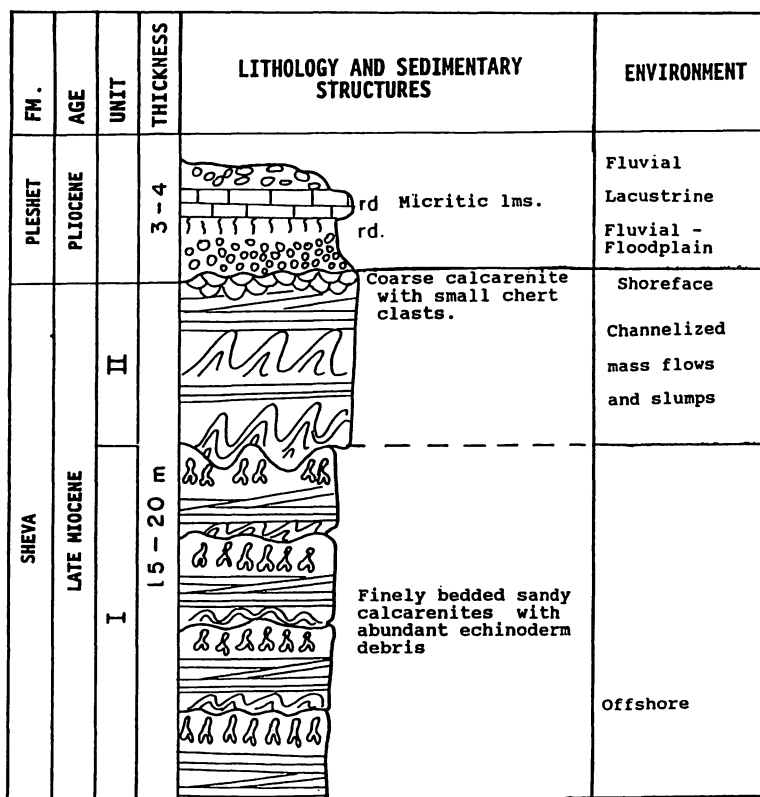


FIGURE 5 - A SCHEMATIC SECTION OF THE SHEVA FORMATION IN NAHAL BE'ER SHEVA
COORDS 14250/06895

תרשים 5.

תצורת שבע שהוגדר מאוחר יותר על ידי גבירצמן (1979) כתצורת פלשת.

תצורת שבע מורכבת כאן מקלקרניט חולי והיא מחולקת לשתי יחידות. היחידה התחתונה מורכבת ממספר שכבות בעובי של 2-3 מ' שבחלקן התחתון ניתן להבחין בסטרוקטורות סדימנטריות ברורות, בעיקר: שיכוב דק (Planar bedding), שיכוב צולב של תעלות רדודות מאד (Shallow troughs cross stratification), ומבני גלישה (Slumping). חלקן העליון של יחידות אלה עבר ביוטורבציה אינטנסיבית שטשטש את הסטרוקטורות הסדימנטריות. היחידה העליונה מונחת על התחתונה במגע המצביע על היותה זרם גרביטציה (Gravity flow / Mass flow). ניתן להבחין בבסיסה בתעלות גדולות שנוצרו על ידי תנועת זרם הסדימנט הבוצי על קרקעית הים וכן בסטרוקטורות גלישה בתוך החלקים העליונים של החתך.

החלק העליון של החתך מורכב מקלקרניט גס גרגר עם שברי מאובנים וחלוקים קטנים עם סטרוקטורות של Trough cross-stratification, המצביע על התרדדות נוספת של הים והרבדה באזור קידמת החוף (Upper shoreface).

היחידה התחתונה של תצורת שבע בבקעת ערוער מייצגת תקופה בה שקע קלקרניט בסביבה ימית במנגנון שכלל גם זירמי גרביטציה. החתך מורכב ממספר מחזורי השקעה המייצגים תנועות אוסטטיות קטנות. חלקו התחתון של כל מחזור משקף סדימנטציה שהתרחשה באזור קידמת החוף (Shoreface) בסביבה רדודה הנתונה להשפעת הגלים, כפי שמעידות הסטרוקטורות הסדימנטריות, בעוד שהחלק העליון מייצג שלב של העמקה אל מתחת לבסיס הגלים (Offshore) בה עובר חלקו העליון של הסדימנט עירבול כתוצאה מביוטורבציה אינטנסיבית. היחידה העליונה שקעה בעיקר בתהליך של זרמי גרביטציה. שימור סטרוקטורות הזרימה מצביע על קצב הצטברות מהיר.

הקורלציה בין החתך החשוף בנחל באר שבע לבין תצורת שבע במחצבה הנמצאת בבאר שבע מסתמכת על שתי הנקודות הבאות:

1. בשני המחשופים מורכבים הקלקרניטים של היחידה בעיקר משברי קיפודים.
2. בשני המחשופים נתן להבחין בחתך בשני מחזורי השקעה.

בבאר שבע מורכב החלק התחתון מקלינופורמים הבנויים משכבות מאסיביות של קאלקרניט, בעוד החלק העליון שקע במערכת תעלות תת-ימיות רדודות שהובילו סדימנטים ימיים בזרמי בוץ (ראה תאור מפורט אצל בוכבינדל וזילברמן, 1992).

בבקעת ערוער שקע החלק התחתון של החתך בסביבה רדודה יותר מאשר זו בה שקעה תצורת שבע בחלק המערבי של הבקעה, כפי שמעידות הסטרוקטורות הסדימנטריות. למרות שקיימות עדויות לזרימות בוץ בקנה מידה קטן גם בחלק התחתון של תצורת שבע, עיקר מבני הגלישה והזרימה מאפיינים את החלק העליון של החתך, בדומה לתצורת שבע במחצבה.

על תצורת שבע מונח באי התאמה ארוזיבית חתך המורכב מקונגלומרט, פלאוסול אדום שהתפתח בתוך אבן חול וגיר מיקריטי ורוד, קארסטי, משוכב, כנראה אגמי. חתך זה קורלטיבי ככל הנראה למחזור של תצורת פלשת והיחידה האדומה.

תחנה 9 – היחידה האדומה בנחל באר שבע (נ.צ. 14190/06780) (תרשימים 6, 6A)

מחשוף בגדה הדרומית של נחל באר שבע המורכב מסדימנטים יבשתיים פלוביאליים וקרקעות. חלקו התחתון של המחשוף הוא בעל גוון לבן-ירקרק והוא מכיל שכבות חול וחול חרסיתי בשילוב עם אופקי חלוקים. החלק העליון מורכב מחול אדום עם אופקי חלוקים המכוסה

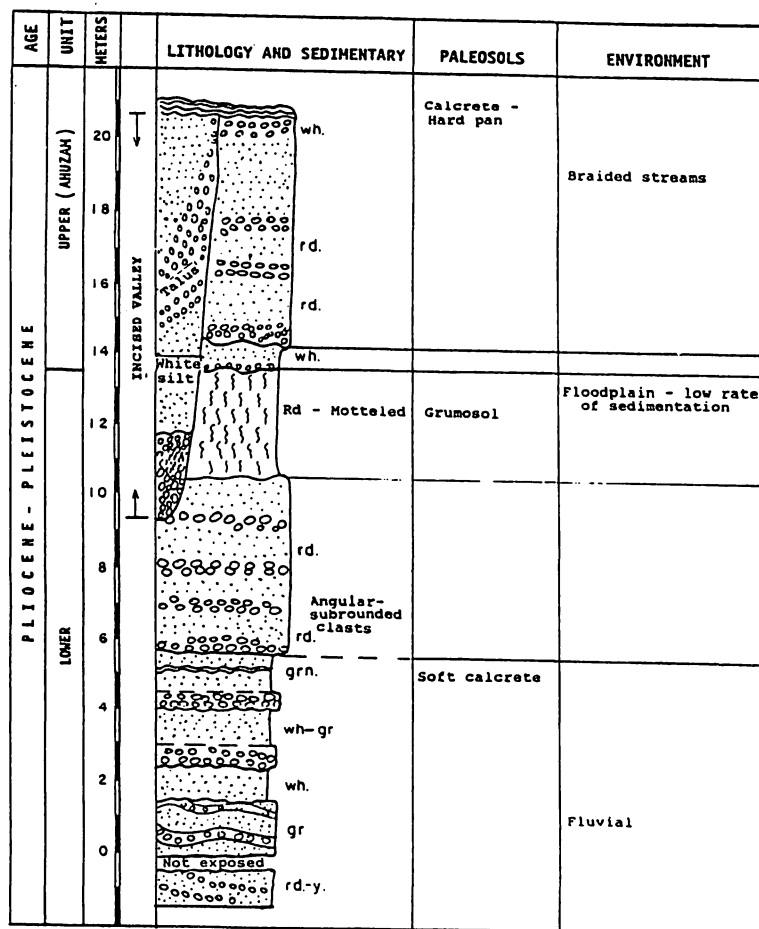


FIGURE 6 - COLUMNAR CROSS SECTION OF THE "RED UNIT" IN NAHAL BE'ER SHEVA
Coords 14190/06870

- SE -

- NW -

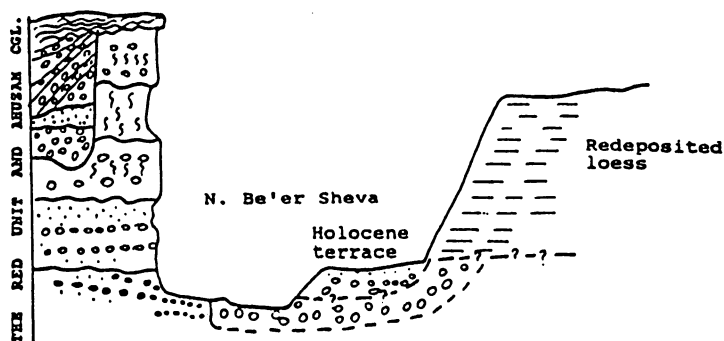


FIGURE 6A - N-S SCHEMATIC CROSS SECTION THROUGH THE RED UNIT, NAHAL BE'ER SHEVA

תרשימים 6A, 6.

בקרקע גרומוסולית אדמדמה, חרסיתית, שעוביה כ-3 מ'. קרקע דומה לה חשופה בתחנה 5, מצפון לשדה התעופה של נבטים. על הקרקע מונח באי התאמה רצף של חלוקים ואבני חול אדומות עם פאלאוסולים קלציים שחלקו העליון מלוכד בקלקריט. יחידה זאת, מהווה חלק מהקונגלומרט הבונה את קוי פרשת המים במערב בקעת ערוער והשייך לדעתנו לקונגלומרט אחוזם. בחלקו המערבי של המצוק ניתן להבחין בתעלה שהתחתרה עד לאמצע החתך האדום והתמלאה בסדימנטים קלסטיים שבבסיסם קונגלומרט היוצר דרגש בולט. ההקשר של החתך הממלא את התעלה למחזורי ההשקעה בבקעה עדיין לא ברור.

המחשוף תואר בעבר על ידי Gvirtzman and Buchbinder (1969), שכללו את חלקו התחתון, המורכב מאבני חול לבנות-ירקרות ואופקי חלוקים, בפרט העליון של תצורת שבע (תצורת פלשת) ואילו החלק העליון שעבר פדוגנזה וצבעו אדום-חום, נכלל על ידם בתצורת חצבה.

הדמיון הפדוגנטי, הליתולוגי והרציפות המורפולוגית מציבות חתך זה בתוך המכלול של היחידה האדומה.

תחנה 10 – מחצבת נבטים (נ.צ. 14150/06820) (תרשים 7)

מחצבת נבטים הנה מחצבת חול, המצויה בסמוך לגדה הדרומית של בקעת באר שבע, ממזרח לנבטים. במחצבה נחשף חתך מורכב של סדימנטים פליוקניים המייצג מספר רב של ארועי

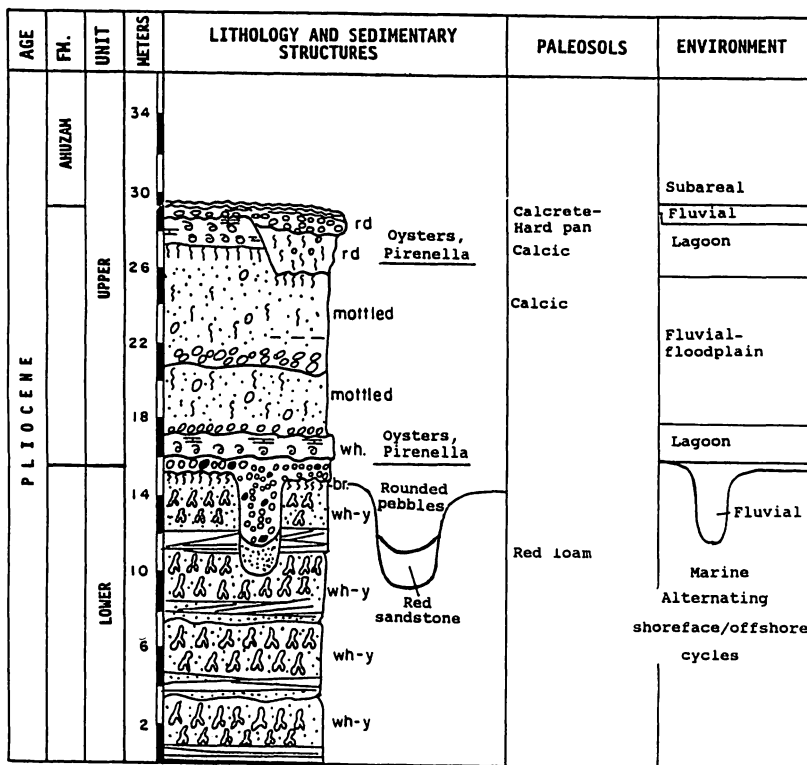


FIGURE 7 - A SCHEMATIC SECTION OF THE PLIOCENE SEQUENCE IN THE NEVATIM QUARRY

תרשים 7.

סדימנטציה וארוזיה בסביבה ימית ויבשתית לסרוגין.

את חלקו התחתון של החתך בונה אבן חול המורכבת ממספר מחזורים ששקעו בסביבה ימית, בדרך כלל מתחת לבסיס הגלים, כפי שניתן ללמוד מסטרוקטורות של שיכוב מטושטש וביטורבציה חזקה.

כל מחזור משמר בחלקו התחתון סטרוקטורות סדימנטריות של שיכוב צולב שטוח בעוד חלקה העליון עבר ביוטורבציה אינטנסיבית. הדבר מצביע על תנודות קטנות בעומק סביבת ההשקעה, כאשר החלק התחתון של כל מחזור שקע בסביבה רדודה באזור קדמת החוף מעל לבסיס הגלים בעוד שחלקו העליון שקע בים עמוק יותר (אזור ה-Offshore) מתחת לבסיס הגלים.

העובי החשוף של אבן החול מגיע לכ-15 מ' והיא מופרדת מהחתך שמעליה על ידי מישור גידוע המייצג שלב של חשיפה והתחתרות בסביבה יבשתית. בשלב החשיפה התחתית אפיק נחל (כנראה נחל נבטים הקדום) בחתך החולי ויצר תעלה צרה בעומק של מספר מטרים. מלוי התעלה מצביע על שני שלבים של השקעה השונים באופיים: בתחילה שקעה בתעלה אבן חול אדומה הדומה לזאת של היחידה האדומה. לאחר מכן היתה התחתרות נוספת בתוך המלוי של אבן החול האדומה והאפיק התמלא בהדרגה בקונגלומרט עם ליכוד קרבוניטי ואבני חול חומות. לאחר מלוי התעלה שקעו חלוקים גם מעבר לשוליה ויצרו אופק קונגלומרט המונח באי התאמה ארוזיבית על גג אבן החול הימית.

מעל הקונגלומרט היבשתי שקע דרגש של אבן חול גירית, ימית, עשירה באוסטראות וגסטרופודים המצביעה על הצפה ימית קצרה. לאחר מכן שוב נחשף האזור לסביבה יבשתית בה שקעה אבן חול המכילה אופקי חלוקים, בפשט הצפה של נחל. קצב ההשקעה האיטי איפשר התפתחות פאלאוסולים קלציים בתוך אבן החול, הדומים לאלה שתוארו מתצורת פלשת באזור באר שבע (בוכבינדר וזילברמן, 1992).

מעל החתך של פשט ההצפה נמצא דרגש נוסף של גיר חולי עשיר באוסטראות וגסטרופודים המייצג הצפה ימית קצרה נוספת.

גג החתך מכוסה בשכבת חלוקים מלוכדת על ידי קלקריט המהווה לדעתנו חלק ממחזור ההשקעה של קונגלומרט אחוזם.

מקורות

בוכבינדר, ב. וזילברמן, ע., 1992. מחזורים סדימנטריים נאוגניים והתפתחות הנוף באזור הנגב הצפוני (גבעות להב, באר שבע ואופקים). מדריך סיור, כנס החברה הגיאולוגית באשקלון, עמ' 1-20.

גבירצמן, ג., 1979. הגיאולוגיה והגיאומורפולוגיה של בקעת באר שבע, עיצוב מורפוטקטוני של אגן בין הררי. מתוך: באר שבע – קובץ מחקרים ומאמרים, בעריכת י. גרדוס, א. שטרן וג. ריבלין.

ודובינסקי, ש., 1985. הגיאולוגיה של דרום הרי חברון. עבודת גמר לתואר מוסמך (M.Sc.), האוניברסיטה העברית, ירושלים, 68 עמ'.

זילברמן, ע., 1991. התפתחות הנוף בנגב המרכזי, הצפוני והצפון מערבי בנאוגן ובקוורטר. המכון הגיאולוגי, ירושלים דו"ח GSI/45/90, 164 עמ'.

חרש, א., 1967. הגיאולוגיה של מישור ירוחם-דימונה. עבודת גמר לתואר מוסמך (M.Sc.), האוניברסיטה העברית, ירושלים, 72 עמ'.

סער, ח., 1986. המקור והסדימנטציה של אבני חול בתצורת המלוי של בקע ים המלח. עבודת גמר לתואר מוסמך (M.Sc.), האוניברסיטה העברית, ירושלים, 80 עמ'.

- Buchbinder, B., Martinotti, G.M., Siman-Tov, R., and Zilberman, D., 1993. Temporal and spatial relationships in Miocene reef carbonates in Israel. *Palaeo. Palaeo. Palaeo.* In press.
- Bruins, H.J. and Yaalon, D., 1979. Stratigraphy of the Netivot section in the desert loess of the Negev (Israel). *Acta Geologica Academiae Hungaricae, Tomus 22(1-4)*: 161-169.
- Gile, L.H., Hawley, J.W. and Grossman, B., 1981. Soils and geomorphology in the Basin and Range area of southern New Mexico — Guidebook to the desert project. New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Mem. 39: 222 pp.
- Goldberg, R., 1980. Use of grain size frequency data to interpret the depositional environment of the Pliocene, Pleshet Formation, Be'er Sheva, Israel. *J. Sediment. Pet.* 50: 843-856.
- Goldsmith, N.F. et al., 1982. Ctenodactylid rodent in the Miocene Negev fauna of Israel. *Nature*, 269 (5858): 645-647.
- Goodfriend, G. and Magaritz, M., 1988. Paleosols and Late Pleistocene rainfall fluctuations in the Negev desert. *Nature*, 332 (6160): 144-146.
- Gvirtzman, G. and Buchbinder, B., 1969. Outcrops of Neogene formations in the central and southern coastal plain, Hashephela and Be'er Sheva regions, *Isr. Geol. Surv. Bull.* 50: 52 p.
- Martinotti, G.M., Gvirtzman, G. and Buchbinder, B., 1978. The Late Miocene transgression in the Be'er Sheva area. *Isr. J. Earth Sci.*, 27: 72-82.
- Neev, D., 1960. A pre-Neogene erosion channel in the southern coastal plain of Israel. *Isr. Geol. Surv. Bull.* 25.
- Picard, L., 1951. Geomorphogeny of Israel, Part I: the Negev. *Bull. Res. Council of Israel*, 8G: 1-30.
- Tchernov, E., Ginsburg, L., Tassy, P., and Goldsmith, N.F., 1987. Miocene mammals of the Negev (Israel). *Jour. of Vert. Paleont.*, 7(3): 284-310.

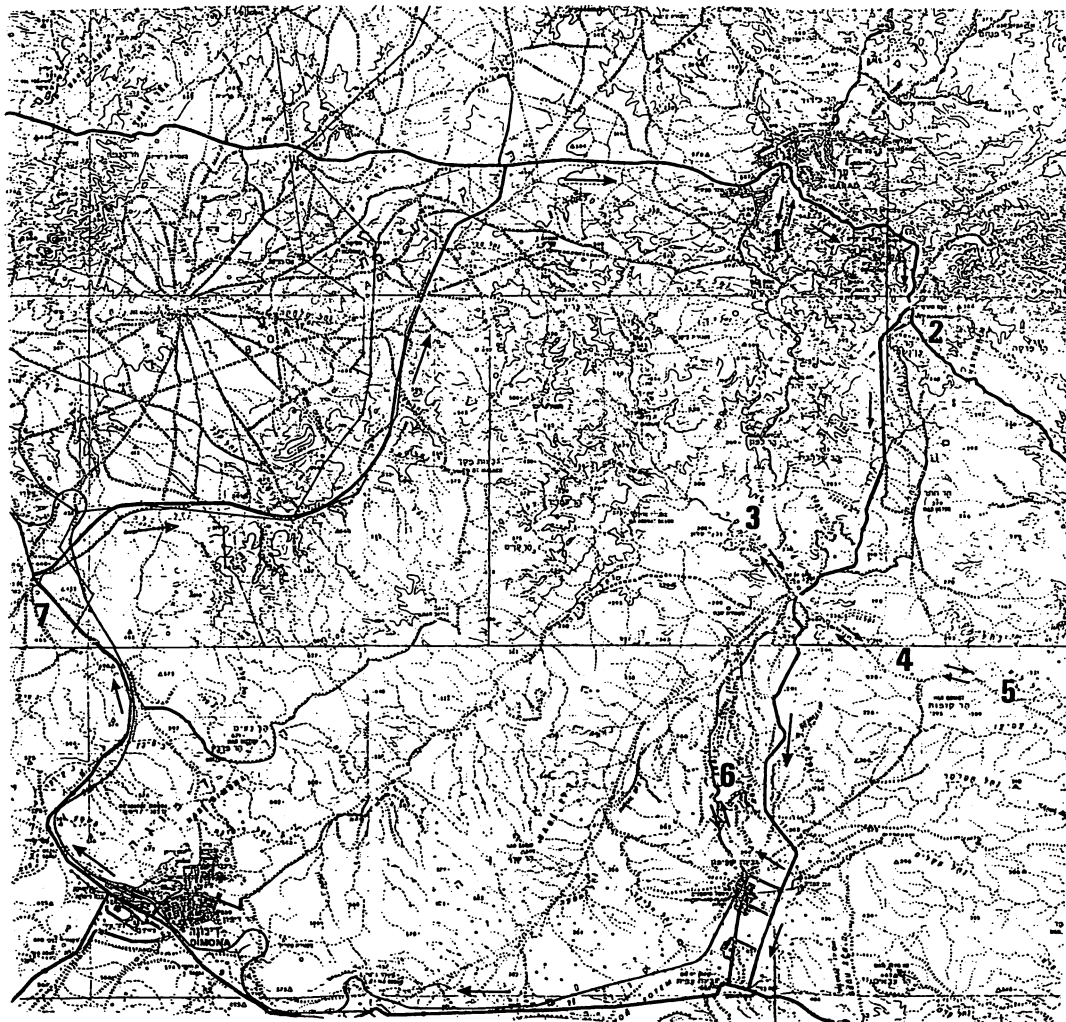
סיור ב-3

ארועים פוסט טורוניים מדרום לערד ופציאסים שונים של תצורת חצבה

פרנסיס הירש ויעקב שחר

הקדמה

הסיור הזה יראה מספר תופעות בסדימנטים שמדרום לערד, מגיל טורון עד רצנט. קמטי הקשת הסורית החלו להתרומם בקוניאק תיכון לפי התוואי של אנטיקלינות הנגב הצפוני. כתוצאה מכך סדימנטים של חבורת הר הצופים (קוניאק מאוחר-סנטון מוקדם) מונחים ב-ONLAP ע"ג רליף שנוצר בגג הסדימנטים של חבורת יהודה.



איור 1. מפת התמצאות ומסלול הסיור.

בניצב למערכת הראשית NE-SW רואים תעלות דמויות V ושברים בכיוון NW-SE הממולאים בקירטון מגיל סנטון מאוחר – קמפן מוקדם (תחנה 3B). המשך הקימוט של אנטיקלינות הנגב היה מלווה בהשקעת סדימנטים מריניים עד סוף הפאליאוגן. באיאוקן הים כיסה את מרבית האזור, אך שיאי האנטיקלינות בלטו כאיים מאורכים.

התרוממות וארוזיה בסוף האיאווקן-אוליגוקן גרמה לתופעות קרסט (תחנה 3C). השיפוע מערבה של משטח הארוזיה החל להתמלא בסחף נחלים (פרט צפץ בתצורת חצבה). יותר מאוחר, התחלת המיוקן, גם נוצר קג"ל הבסיס (פרט שחק – שועלים בתצורת חצבה) כתוצר של בחדות וקג"לים במיון גרוע. בהמשך הגיעו גם חלוקים ממרחק יותר רב (חלוקים אלוכסוניים של צור מעוגל) עד לקניון של באר שבע-כורנוב (פרט רותם). מאובנים בעלי חוליות (פילים, ממותות, צביים, וכו') מגיל מיוקן מוקדם איכלסו את שולי הנחלים או האגמים שבדרך. ההתעמקות של שקע ים המלח ניתקה את האספקה מערבה לים התיכון במיוקן תיכון-עליון (ראה הערה בהמשך). שתי מערכות טרסות נחלים אפשר לזהות כתוצאה מהניקוז מזרחה. האחת נקראת לוט (תחנה 3D) השניה יותר מאוחרת נגרמה עקב שביית הניקוז על ידי נחל חימר (תחנה 5). התרוממות אפירוגנית בפליוקן-פלייסטוקן הרימה כמובן גם טרסות אלו לתנוחתן כיום. השטח הנסקר מתנקז מערבה ע"י נחל באר-שבע ומלחתה. מזרחה מנקזים הנחלים כידוד, יעלים, חימר ולוט.

הסיוור יקיף את אנטיקלינת זוהר, השוליים הצפוניים של חצרה, סינקלינת רותם, ואנטיקלינת חתירה, ירוחם ודיה. האזור הזה ממופה עכשיו בקנה מידה 1:50,000 ע"י רודד (אורון, תל מלחתה) והירש (מכתש קטן, ערד). רוב השטח מופה קודם לכן ע"י בן תור ופרומן בק"מ 1:100,000. קטעים קטנים יותר מופו ע"י איזנברג (1964) שחר (1973) ווידובינסקי (1985).

סטרטיגרפיה וגיאולוגיה הסטורית

קנומן – קוניאק מוקדם (חבורת יהודה)

התצורות הקדומות ביותר החשופות הן צפית, אבנון ותמר בעובי כ-200 מ'. גיר מסיבי של תצורת צפית חשוף רק בקניון של נחל ממשיית (כורנוב), מכתש קטן, והקניונים ממזרח לאנטיקלינת חצרה (נחל צפית). עדשות מסיביות של גיר ריפי בחילופין עם מיקריט קירטוני וחואר ירקרק מאפיינים את תצורת אבנון. תצורה זו עוברת לטרלית וורטיקלית לדולומיט מסיבי של תצורת תמר, שבחלק העליון של הדולומיט הוא יותר משוכב. תצורות תמר ואבנון חשופות ונפוצות באנטיקלינות זוהר, אפעא, חצרה וחתירה.

הגבול בין קנומן לטורון עובר בחלק האמצעי של תצורת דרורים, הבנויה חואר וגיר עם מאובנים. תצורת דרורים מתייחדת לצפון מערב ובאנטיקלינות אפעא, דיה וזוהר חואר דולומיטי וגיר עם מאובנים (לומשל) מופיע בבסיס גיר מסיבי של תצורת שיבטה (תחנה 3A). תצורת דרורים מכסה אדמה פוסילית שבג תצורת תמר והיא חשופה היטב באנטיקלינות חצרה וחתירה. תצורת שבטה הטורונית שמעליה בונה 20-30 מ' של מצוק לבן קלקרניטי עם רודיסטים מצוררים. לכוון צפון מערב נעלם המגע החד בין תצורות שבטה לנצר. אשר בנויה עד 40 מ' של גיר ליטוגרפי משוכב, ביחד עם קירטון דולומיט. גיל תצורת נצר מטורון מאוחר עד קוניאק מוקדם. אינטרקלציות של חול מופיעות לפעמים בקרבת בסיס תצורת נצר. הן הוזכרו ע"י אבנימלך כמייצגות התרוממות לפני 90 MY וכנראה מתאימות להגדרת גיל Zuni A3.1 של Haq et al. (1987) של מפלס ים נמוך. העובי הכולל של החלק העליון החשוף של חבורת יהודה מגיע ל-200 מ'.

תצורה	ליטולוגיה	עובי (מ') (m)	סימול	גיל
קולוביום, אלוביום (פרסות)			Al	הולוקן
לוט			Q	פליסטוקן
			Ni	פליאוקן
תצ. חצבה		5 - 70	Nh	מיאוקן
צפצ			Nze	אוליגוקן
תצ. סור			Em	איוקן
תצ. סקיה		25 - 75	Pt	פליאוקן
תצ. ערב			Ha Kug	מאסטרסכט
תצ. מישאש		20 - 70	Kumi	קמפן
תצ. מנוחה		0 - 40	Kum	סנסון
תצ. נצר			Kun	קוניאק
תצ. שבטה		50 - 80	Kush	טורון
תצ. דרורים			Kud	
תצ. תמר		80 - 50	Kul	קנומן
תצ. אבנון		70 - 100	Kuav	עליון
תצ. צפית		50	Kuza	

איור 2. חתך סטרטיגרפי סכמטי (הירשת 1992).

(1) דרדרת, (2) סחף, (3) חלוקים, (4) חול, (5) גיר, (6) דולומיט, (7) קירטון, (8) חוואר, (9) צור, (10) אי התאמה, (11) חסר, (12) בור, (13) מותמר, (14) שינוי פציאס.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14

איים שנוצרו כתוצאה מהתרוממות האנטיקלינות בקוויאק תיכון, נחשפו לארוזיה יבשתית ונוצר רליף קדום על פני גג חבורת יהודה. ההשקעה המחודשת בקוויאק מאוחר-קמפן קדום נתנה גיר מסיבי, פורצלניט, וגיר ביטומיני של תצורת מנוחה. המשך קימוט הקשת הסורית מסנטון עד מסטריכט הביא לשנויים בעצמת הסדימנטציה ובעובי של תצורות מנוחה ומישש שהן החלק התחתון של חבורת הר הצופים.

מבנים דמויי גרבן בכון $N60^{\circ}W$ התמלאו בקירטון של תצורת מנוחה (S_3). ליניאמנטים בכון NW-SE, ובמקביל למיבנים שלעיל, נראים באוכף המחובר את אנטיקלינות אפעה ודיה וההמשך של אנטיקלינות זוהר צפונה (תחנה 4). אחד מליניאמנטים כאלה כנראה הופעל שוב בקמפן כשבר נורמלי עם העתקה של גג חבורת יהודה ומעליה קוויאק עליון ($S2a$) (הירש והוניגשטיין 1985, תחנה 4).

בקמפן עליון המיבנים כוסו בים רדוד, והסדימנטים ששקעו הם צור משובב פוספוריט, קירטון פוספטי, חרסיות וגיר שכבתי או תרכיזי (רודד ואחרים 1972). תצורת מישש עם הסדימנטים הנ"ל עבה יותר בסינקלינות (70 מ') ודקה באנטיקלינות (20 מ'). לפעמים רואים סימנים של הוצרות קרקעות כתוצאה מחשיפה, מלווה באי התאמות ברציפות ההשקעה. תצורת ע'רב שמעל עשירה בפורמיניפריים פלנקטוניים (רייס, 1962) וננו גיריים (מושקוביץ, 1985), גילה קמפן עליון מסטריכט, עוביה מעל 100 מ', ובנויה פרט פצלי שמן. פרט חווארי ופרט קרטוני מעט דולומיטי. בבסיס מופיע אופק של תרכיזי פוספט וברזל שמתפתח בשולי האנטיקלינות לטריט. הסדימנטציה של התצורה מראה ONLAP ממרכז הסינקלינות כלפי השוליים.

פוסט סנון

תצורת תקיה מגיל פאלאוקן בנויה חוואר וקירטון (תל ערד). בסינקלינות חתרורים הסלעים עברו מטמורפוזת לסלע המכיל דיופסיד, וולסטוניט, גארנט, זאוליט ולאריניט (בורג, 1990). תצורת מור מגיל איאוקן מונחת מעל תצורת תקיה בתל ערד ובקעת הקנאים. ההשקעה הרציפה נפסקה באיאוקן העליון, והסלעים החלו להחשף לארוזיה. בתחנה 3 נראה שרידי מערות קרסט בתוך גיר חבורת יהודה ממולאות בצור מישש מרוסק וגיר וקוורצוליטים שנשטפו מתצורות מנוחה ושבתה. מערכת הנחלים והאגנים בסוף האוליגוקן יצרה מעין פנפליין די שטוח, ועל פניהם החלה ההשקעה של תצורת חצבה.

תצורת חצבה

הוגדרה ע"י Blake (1935), ו-Shaw (1947) באיזור הערבה. בן תור ופרומן (1957) וסנה (1967) חילקו אותה לקג"ל בסיס (שחק), פרט משק קרבונטי, פרט גידרון חולי, ולמעלה קג"ל ערבה. המונח קג"ל "גג" הוכנס ע"י בן תור ופרומן (1960) באיזור רותם, וע"י חרש (1967) כפרט עליון (אשלון) דק (1 מ') בסינקלינות דימונה. זילברמן (1992) משתמש בהגדרות הפרטים שלעיל לאיזור ירוחם-בוקר עם הפירוט הבא: קג"ל בסיס, ומעליו סלעים אגמיים חוליים ולמעלה קג"ל גג (TOP CONGLOMERATE).

בסיוור הזה נבחן את ההתפשטות האפקית והאנכית של ה"צור ייבוא" אשר מאפיין את "קג"ל הגג". נראה שיש לו תפוצה שונה לגמרי מצפון לכביש דימונה צפית ובשולי בקעת ערד, שם הוא מפוזר בכל הסדימנטים של תצורת חצבה. אנחנו מגדירים את הסדימנטים האלה כפציאס-אפעה רותם. שני המאפיינים של פציאס זה הם:

- 1) מחזור מוקדם של חול, חוואר, גיר וצור ייבוא (פרט צפע) בעובי עד 18 מ' מתחת קג"ל הבסיס.
- 2) מחזור עיקרי של כ-100 מ' חול וחוואר עם צור ייבוא בכמויות משתנות לכל אורך החתך (פרט רותם).

פרט צפע (שחר 1973, תחנה 6) מופיע רק בחלק מסינקלינת אפעה. רואים שנויים מהירים במרכיבים הליטולוגיים השונים (Fig. 8). החול הוא לבן דק גרגר. הגיר מכיל אונקוליטים בקוטר כ-2 ס"מ. צור ייבוא מופיע כאופקים דקים בחלקים שונים של הפרט הזה. בבסיס הפרט מונחים בולדרים בקוטר עשרות ס"מ על פני משטח לא רגולרי המכיל גם אדמה פוסילית.

פרט שחק (קג"ל בסיס לפי סנה, 1967) או פרט שועלים לפי חרש (1967). חלוקי צור וגיר מעוגלים למדי עד זויתיים בגודל עד כ-20 ס"מ, מלוכדים בגיר ללא מאובנים כלשהם. בסינקלינת אורון-אפעה הפרט מגיע לעובי 15-5 מ' ומונח במפלס אפקי של 320-340 מ' מעל לפני הים. רציפות התנוחה לאורך 40-20 ק"מ מהווה את הארגומנט העיקרי שזהו מפלס אחד ששקע בזמן אחד לכל אורכו. רודד והירש (1987) משערים שהוא נוצר בסוף האוליגוקן כמניפות אלוביאליות באופי של בחדות. בהערת אגב אנחנו מעלים כאן אפשרות שהקג"ל בערד וביתיר (אהרונז ואיזן 1966, שחר 1973, וידובינסקי 1985) אינו פרט שחק אלא יותר צעיר.

פרט רותם (שחר 1973, תחנות 1, 6, 7) זהו סדימנט קלסטי של חול צהוב, חוואר, וחרסית עם תוספת כמויות משתנות של צור אלוכטוני. אנחנו נראה את פרט רותם בשלושה אגנים. ערד, אפעה וערוער. אספקת החומר היתה בימודלית-מקורב ומרחוק. יחד עם החלוקים המעוגלים שבאו מרחוק מוצאים גם פיסות גיר וקירטון זויתיים אשר נגזרו מסלעים סמוכים מגיל סנון ואיאוקן. בגבעה 383 באגן אפעה נמצאו שרידי בעלי חיים יבשתיים שונים (צ'רנוב ואחרים 1987, גולדשמיט ואחרים 1988) אשר גילם נקבע כמיוקן תחתון (בורדיגל). לא נמצאו באפעה שרידים IN SITU של אופק האוסטריאות כפי שמונח באגן דימונה מעל שרידי בעלי החיים היבשתיים. פרט רותם מונח על גבי קג"ל הבסיס או ישירות ע"ג סלעים של תצורות ע"ב ותקיה.

מדרום לכביש דימונה-צפית כבר לא מוצאים צור אלוכטוני. החתך שם הוא של חולות וחרסיות כמו שבאגן דימונה הסמוך. אנחנו נעבור ליד חתך כזה על הכביש לאורון שבו נמצאו שרידים של בע"ח.

הפרטים מינגר וערוער בסינקלינת דימונה ירוחם (חרש, 1967) מונחים מתחת ומעל אופק האוסטריאות (פרט ירוחם). הסדימנטים הם חוואריים חוליים ואי אפשר להבדיל ביניהם ללא עזרת אופק האוסטריאות שבאמצע. קג"ל הגג (TOP CGL) או פרט אשלון הוגדר ממזרח לדימונה כסחף של פני שטח בעובי כ-1 מ'.

רודד (1982) ורודד והירש (1987) מסבירים את הריכוז הגבוה של החלוקים האלוכטונים כתוצאה מפעילות של רוח או מים, אשר שטפה והרחיקה את החלקיקים הדקים של החול, ולכן זהו רליקט של המשקע המקורי. זילברמן (1992) ממקם חתך חולי, חווארי, פלוביאטילי, לקוסטרי, עד 200 מ' עובי מתחת לקג"ל גג שיכול להגיע עד 700 מ' עובי באגן כרכום. לוי (1992) טוען שיש שני מחזורי חצבה:

- 1) חצבה תחתון במיוקן תחתון, והוא זה שנמצא בדימונה - ירוחם, אפעה - אורון וערוער.
- 2) חצבה עליון הם הסדימנטים בערבה, שלהם הוא נותן גיל מיוקן עליון.

זק ופרוינד (1981) עוסקים בסדימנטים שבתוך אגן ים המלח. יש אצלם מחזור של חצבה תחתונה שהחל במיוקן תחתון ואחריו הצפה של חומר שהגיע ממזרח (צור אלוכטוני) שזרם עם נחלים עד לים התיכון. בשלב שלישי (בפליוקן) אגן ים המלח מהווה שוב אגן פנימי המנקז משקעים ממזרח וממערב. (ראה דיון בתחנה 2).

רודד, הירש ושחר אומרים פשוט שפציאס מינגר ופציאס רותם (עם צור ייבוא) שקעו באותו הזמן, מפני שתחתם מונח קג"ל בסיס אופקי. (ראה טבלה 1).

זק ופרוינד (1981) (FIG. 3B) מניחים שהפסקה של תנועת הגזירה גרמה למלוי אגן ים המלח וזרימה של חלוקים על פני השטח עד הים התיכון. יתר המחברים שלעיל מטפלים רק בשולי אגן ים המלח, ולכן "גזירה", "פתיחה" ו"העמקה" הם מונחים שאינם משפיעים שם ישירות על הסדימנטים של תצורת חצבה. שטייניץ וברטוב (1991) מציעים "פתיחה" של אגן ים המלח לפני 6 מליון שנים, וכך גם זילברמן (1992). לוי (1992) טוען שאגן ים המלח – שנגרם ע"י שבירה טפרוגנית – קיבל משקעים של "חצבה הקדומה" מדימונה ואורון החל מגיל מיוקן תיכון.

העובי של פרט רותם יתכן ועלה על 200 מ', לפי תנוחתו באגן חתרורים (+330) לעומת ערד (+570) (הירש, 1988). זאת בהנחה שההרמה של אנטיקלינת זוהר-ערד הושלמה לפני השקעת פרט רותם (רודד, 1982), ובניגוד לדעת פרוינד וז'ק (1973). חישוב עובי לפי הירש יכול להגיע אפילו ל-300 מ', כי בערד מוצאים סדימנטים עם צור אלוכטוני עד גובה +640. עובי של 300 מ' כבר מתקרב למה שמראה זילברמן (1992). וידובינסקי (1985) מצא ברכס עירא שמעל לבקעת ערד צור אלוכטוני שקרא לו בשם "פציאס ראשי ההרים". ייתכן שאלה הם רליקטים של פרט רותם, אבל באותה מדה יתכן שאלה הם רליקטים של השקעה מישנית.

משקעים פוסט תצורת חצבה (תחנות 3,5).

מערכת הניקוז מערבה לים התיכון (פרתטיס) מגיל אוליגוקן-מיוקן מוקדם נותקה ע"י פתיחה והעמקה של אגן ים המלח במיוקן התיכון, וגרמה ניתוק של הנגב המערבי ממקור הארוזיה שבעבר הירדן. כתוצאה מכך נוצרה מערכת ניקוז חדשה, מגיל מיוקן מאוחר, מפרשת המים מזרחה לים המלח. בגלל ההתרוממות המהירה גם באה התחתרות חזקה מלווה בקרסטיפיקציה, והנחלים שירדו לים המלח השקיעו חלוקים וחולות בלתי ממוינים (עגנון, 1983; הירש, 1988).

הארוזיה חשפה סדימנטים של תצורות ע'רב ותקיה באגן חתרורים, שאפשרה אח"כ בעירה עם אספקה טובה של חמצן. כך נוצרו הסלעים המטמורפיים של חתרורים שהיו במקורם ע'רב ותקיה (בורג, 1990).

השלב האחרון הוא הרמה של כמה מאות מטרים מעל פני הים, של המשקעים האגמיים והיבשתיים של תצורת חצבה. תהליכים סוב רצנטיים של הסרה והשקעת סדימנטים עצבו את פני השטח כפי שמוצאים אותם כיום באפיקי נחלים ועמקים.

תחנות בסיוור

6:45	יציאה מהמלון
7:00	תחנה 1. פציאס רותם במחצבת החול בערד
8:00	תחנה 2. צומת חתרורים
8:30	תחנה 3. הליכה
	(A) סטרטיגרפיה של סלעים מגיל טורון וסנון
	(B) תעלות בסנון
	(C) קרסט מגיל אוליגוקן
	(D) טרסות מגיל ניאוגן (לוט) ליד גבעת סלון (נחל חימר)
11:00	תחנה 4. שבר קמפני בהר קומות
12:00	תחנה 5. מערכת נחלים וטרסות בנחל לוט מגיל ניאוגן מאוחר.
13:00	תחנה 6. מכרה ערד עם הפרטים צפע, שחק ורותם של תצורת חצבה.
	ארוחת צהרים
14:30	תחנה 7. תצורת חצבה בצומת ערוער
16:00	חזרה למלון
	הערה: המשתתפים יבלו בערך שעתיים של הליכה בשטח אבני. נא להצטייד בנעליים מתאימות, כובע, ומים.

תאור מסלול הסיוור

החל מהמלון לכוון העיר ערד ובעיקר ליד ברכת המים (+642) רואים מחשופים של חוואר, חול וחלוקים אלוכטוניים של פרט רותם בתצורת חצבה. בתוך העיר יש כמה מחשופים והטוב שביניהם נראה ליד משטח החניה של אגד וליד בית הספר התיכון. בקרבת פני השטח החלוקים מלוכדים בחומר נארי די קשה.

תחנה מספר 1. (שחר יעקב) מחצבת ערד

תצורת חצבה בעובי כ-40 מ' חשופה עקב כריית חול. חול צהוב אדמדם, חרסיות ואופקי צור אלוכטוני לא רגולריים בונים את כל קיר המחצבה. ערמות של צור אלוכטוני אפשר לראות ליד מקום הנפוי של החול. אפשר למצוא גם חלוקים של גיר וצור מישש. ההבחנה בין צור מישש לצור אלוכטוני היא לפי רצועות דקות של פורמיניפרים מגיל איאוקן. יש הטוענים שלצור האלוכטוני יש פטינה שחורה אפיינית. בסינקלינית ערוער החלוקים מוקפים עטיפות קונצנטריות של משקעים קרבונטים עקב פעילות בקטריות (זילברמן, 1990). בחלק העליון של מחשוף המחצבה בערד החומר מלוכד ע"י נארי קשה. כל החתך מונח באי התאמה על גבי תצורת ע'רב ואין מתחתיו קג"ל בסיס. החול מכיל בתוכו כמות גדולה יחסית של טיטן וברזל.

מעדד לחתרורים הדרך עוברת דרך תצורות מגיל קנומון, טורון, סנטון, וסנון, חלקן מרוסקות עקב פעולת שבר EW שלאורכו עובר הכביש.

תחנה מספר 2. (שחר יעקב) צומת חתרורים

אנחנו עוצרים כאן כדי לדון בגיל של האירוע המטמורפי בסינקלינת חתרורים משיקולים סטריטיגרפיים (בורג ואחרים, 1991). שיקולים גיאוכימיים לקביעת הגיל של המטמורפיזם לא יוזכרו כאן.

בכנס החברה הגיאולוגית בשנת 1975 ביקרנו בגבעה אחת בחתרורים ואז שחר (1975) הציע שתצורת חצבה (פרט רותם) מונחת IN SITU בגובה 320–340 מ' ושרידים ממנה נותרו מקיפים את הגבעה בשטח כ-1 קמ"ר. הנימוק שזו חצבה מקורית היה הגובה $+320$ מ' שהוא בדיוק אותו גובה כמו בסינקלינת אפעה הנמצאת כ-10 ק"מ דרומה. רודד (1982) הניח ששרידי תצורת חצבה אינם מונחים IN SITU אלא הם טרסות נחלים יותר צעירות. בורג ואחרים (1991) מצטטים את ז'ק ופרוינד (1981) כאילו הניקוז הפנימי של אגן ים המלח התחיל בפליקון תחתון ולכן הטרסות נוצרו גם הן בפליקון. ז'ק ופרוינד (1981, FIG. 3A) מראים פתיחה מוקדמת וניקוז פנימי של אגן ים המלח במיקון מוקדם ולא פליקון. שיפוע הטרסות לכוון מזרח בזווית של $2-5^\circ$ יכול היה להגרם תוך כדי השקעת תצורת חצבה המקורית, ששקעה כידוע על גבי רליף. בורג וחבריו (1991) מביאים כנימוק לגיל מטמורפיזם צעיר יחסית את התנאי שתהיה אספקת חמצן סדירה לבעירה – כלומר הסרה של תצורת חצבה המקורית. הסרה כזו יכלה להתרחש החל ממיקון תיכון.

מצומת חתרורים הדרך דרומה חוצה את סינקלינת גורר, כשמערב שכבות נטויות של אנטיקלינת זוהר וממזרח סדימנטים של חתורים. אחרי חציית נחל חימר מוליכה דרך כ-8 ק"מ מערבה, למכרה גיר לבן של חברת "פוליכרום".

תחנה מספר 3. (פ. הירש) גבעת סלון (FIGS. 3,4)

(א) סטריטיגרפיה של הטורון (ב) תעלה סנונית (ג) קרסט אוליגוקני (ד) טרסה ניאוגנית (לוט).

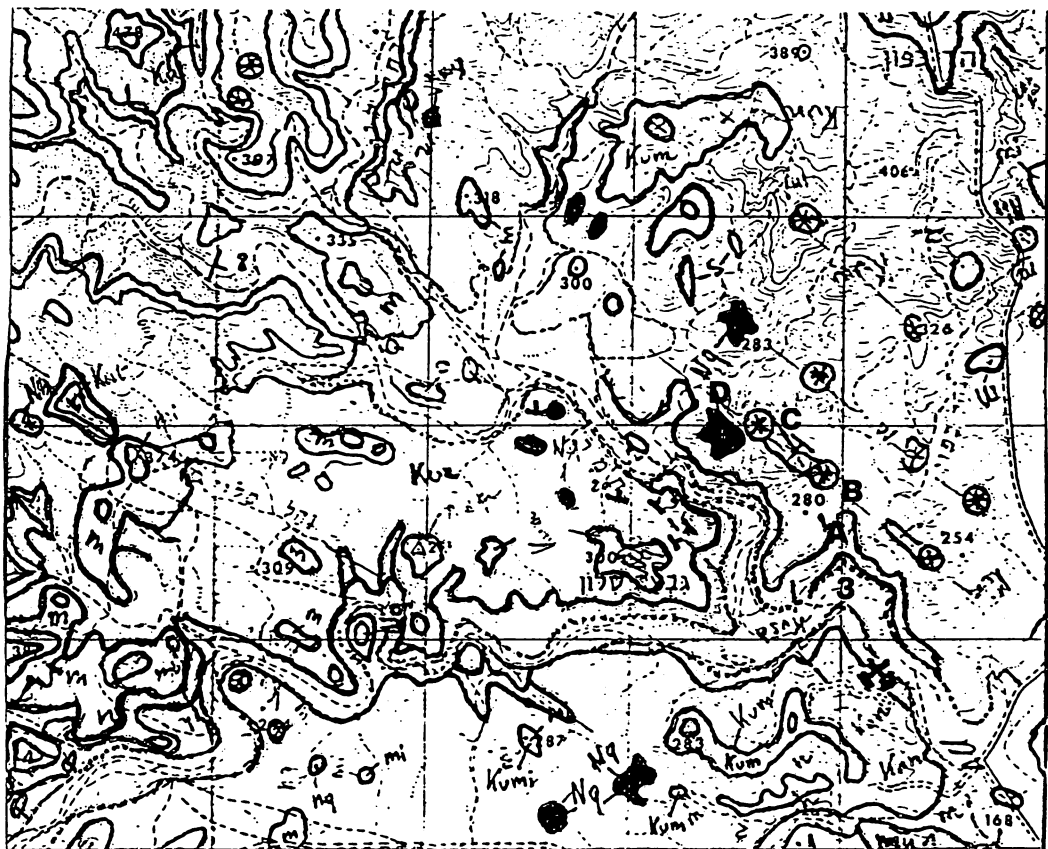
א. נשאר את המכוניות ליד המחצבה, במעלה נחל חימר. מתחילים לטפס צפונה על גבי גיר מסיבי בבסיס תצורת שיבטה, עם הופעות של דולומיט חווארי ואינטרקלציות של מושבות מאובנים. עובי התצורה 20–30 מ'. מעליה תצורת נצר, מגיל טורון מאוחר – קוניאק מוקדם, שמהווה מצוק לבן של קלקרניט עם רודיסטים מצוררים ומעליו גיר משובב.

ב. תעלה של קירטון מנוחה מוקפת בגיר של תצורת נצר. תצורת מנוחה מתחילה מלמטה עם חול, קירטון דולומיטי עם שיני כרישים ואוסטרקודים המציינים גיל קמפן מוקדם (S4, הוניגשטיין PER. COM). כ-1 מ' מהבסיס נמצאו אוסטרקודים של S3 (סנטון מאוחר). ההיפוך הזה מלמד על ההטרוגניות של ה-ONLAP, וצורת הרליף הקדום שעליו שקעה תצורת מנוחה.

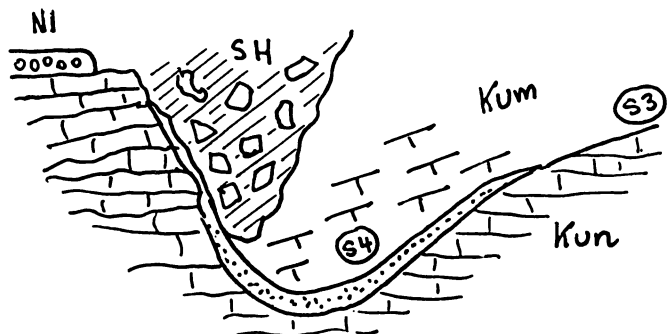
ג. מלוי של תעלה קרסטית עם שרידי צור מישש הקמפני נראה בקרבת מקום.

ד. בסיום הטיפוס נגיע לפלטו בגובה $+280$ מ'. על פני השטח יש קג"ל של פרגמנטים מקומיים וגם שרידים של צור אלוכטוני. אותו צור אלוכטוני מונח גם לאורך נחל לוט, כ-10 ק"מ ל-ESE בגובה $+160$ מ' ושניהם מייצגים רליקטים של מערכת ניקוז מזרחה הנקראית כאן מערכת נחל לוט.

לאחר שנחזור למכוניות נמשיך במורד נחל חימר מזרחית לכביש עד מישור עמיעז שהוא ההמשך הצפוני של אנטיקלינת חצרה.



איור 3. מפה גיאולוגית סכמטית של איזור גבעת סלון (הירש in prep.).



איור 4. התעלה בנצ. E1689/N0638, גובה +280. (N1) טרסת לוט, (SH) בור קרסט, (Kum) קירטון מנוחה, חולי בתשתית, (Kun) גיר נצר, (S3) סנטון, (S4) קמפן.

תחנה מספר 4. (פ. הירש) הר קומות (FIG 5,6)

לאורך דרך המוליכה למחנה הצבאי של עמיעז בקואורדינטות E1723/N0600, נראה שבר נורמלי בקמפן עד זריקה של כ-10 מ' לצפון מזרח. רואים הפרשי עובי של S2a (קוניאק מאוחר), S2b (סנטון מוקדם) ו-S4 (קמפן מוקדם), מונחים ע"ג רליף קדום של גג חבורת יהודה (הירש והוניגשטיין, 1985). השבר ממשיך לצפון מערב עד לגבעת סלון ונחל צמיר שבקרנו בהם קודם.

כ-1 ק"מ מזרחה הדרך חוצה את נחל לוט. עוד 3 ק"מ מזרחה רואים MAMELONS של תצורת מנוחה לאורך נחל לוט.

תחנה מספר 5. (פ. הירש) טרסות נחל לוט

משטח קדום בגובה +160 השתמר לאורך נחל לוט כשהוא מחפה גבנונים קטנים (MAMELONS) של קירטון מנוחה. קג"לים על פני המשטח הזה בנויים גיר וצור מישש וגם צור אלוכטוני מעוגל שמקורו בתצורת רותם. המשטח הזה מייצג מערכת נחלים קדומה לכון הריפט. רליקטים שלה נמצאו הלאה מזרחה בעמקים "תלויים" (עגנון 1983) וכן בנחל בוקק והר פרסה (בורג, 1990). נוכחות חלוקים מטמורפים בטרסה הזו הוא לדעת בורג (1990) הוכחה לגיל פליוקני של המטמורפיזם.

בחזרה לכביש הראשי אנחנו פונים דרומה ונוסעים על גבי שכבת הפוספט שבג תצורת מישש ותצורת ע'רב שמעליה, עד שפוגשים קיר חצוב של כמה מטרים קג"ל בסיס (שחק) של תצורת חצבה. גובה הבסיס של פרט שחק +340 מ'. כל הגבעות ממזרח לכביש לכון נחל חמרמר גם הן מחופות ע"י הקג"ל בגובה +340 מ'.

תחנה מספר 6. מכרה הפוספטים של ערד תעשיות כימיות (יעקב שחר)

כל האזור של המכרה מופה בקפדנות כדי לאתר את קג"ל הבסיס (שחק) של תצורת חצבה, כי הוא יקר מאוד לכרייה. נמצא שהקג"ל מונח בגובה 320–340 מ' מעל פני הים (FIG. 10), אך כלפי ציר סינקלינת אפעה הוא נעלם. השטח המפולס שממערב לכביש הוכן בזמנו לכרייה בעזרת פיצוצים, אך נזנח בגלל היוקר של הנסיון הזה. נמשיך עד למפעל ערד וניכנס לדרך הראשית למכרה בכון צפון. ניסע כ-2 ק"מ צפונה ונעצור בקרבת קידוח F-106 (FIG. 10).

קג"ל בסיס (שחק) מונח על גבי תצורת ע'רב ומעליו פרט רותם עם הרבה מאד צור אלוכטוני מעורב עם חול. נעלה לראש השלוחה ונלך ברגל צפונה לאורכה כ-1 ק"מ (מזרחית לדרך המכרה). הסטרטיגרפיה שרואים זהה לכל הגבעות שמסביב; קג"ל בסיס קשה למטה ומעליו פרט רותם בעובי 20–30 מ'. כאן בדיוק בקרנו בסיור החברה הגיאולוגית בשנת 1964, זה היה המחשוף הטיפוסי של קג"ל הבסיס.

קיר של מחצבה (מזרח מערב) חוסם את ההתקדמות שלנו צפונה. קג"ל הבסיס עכשיו בראש הגבעה (כי המורפולוגיה עם שיפוע צפונה) ואילו קיר המחצבה חושף כ-15 מ' של פרט צפע. מעל פוספט ומעט ע'רב רואים חילופין של חול, חרסיות, ואופקי צור ייבוא. אופק של קרבונט עם אונקוליטים רואים בקרבת גרוטאה של מגרסה ישנה בדרך חזרה למכוניות. פרט צפע משתנה על פני מרחקים קצרים (FIG. 8). הוא תופס בסך הכל שטח של כ-2 קמ"ר. פרט צפע לא מונח מעל ציר סינקלינת אפעה, ויתכן שהדבר מעיד על נדידת ציר הסינקלינה מערבה לאחר השקעת הפרט במיוקן תחתון. המחשופים היפים ביותר מצויים ממערב לדרך המכרה, אך קשה מאד להגיע לשם ברגל בגלל קירות תלולים של מחצבות. הדרך הטובה ביותר היא להתחיל בדרום ולהתקדם צפונה. רואים שם גם בולדרים עד 100 ס"מ על גבי משטח ארזיבי,

WEST

EF'E SYNCLINE

EAST

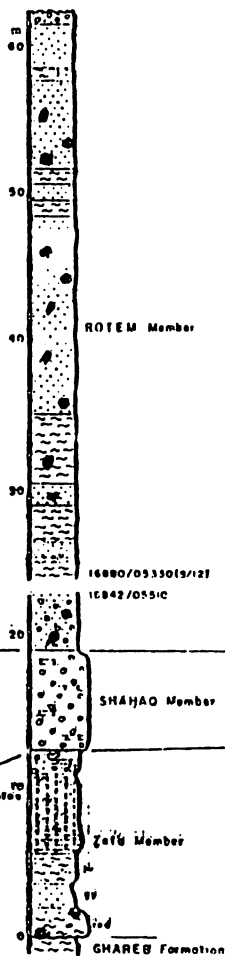
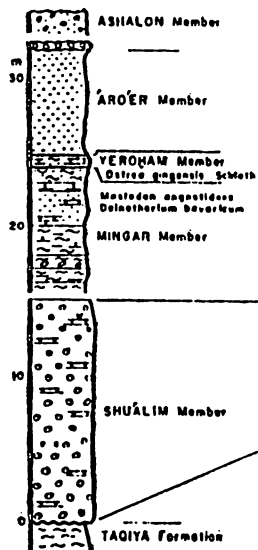
COORD. — Upper part : 16880/05330 15-101
after M. GREENBERG (1967)

Lower part : 16842/05510

YEROHAM SYNCLINE

COORD. — Upper part : section 4-4-66, 14415/04480

Lower part : section 24-1-67, 15520/05240
after A. YARASH (1967)

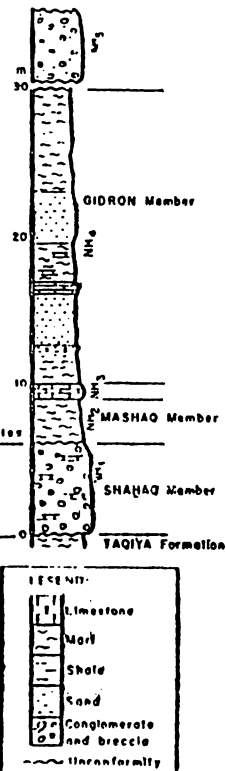


HAZEVA SYNCLINE

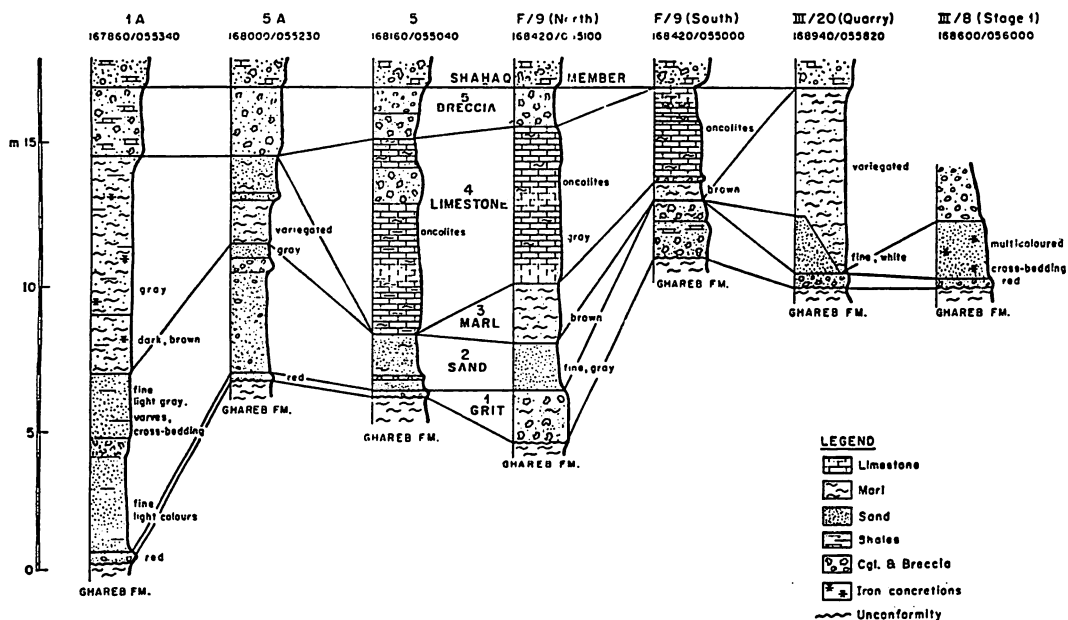
EN OFARM SECTION

COORD. 17362/03272

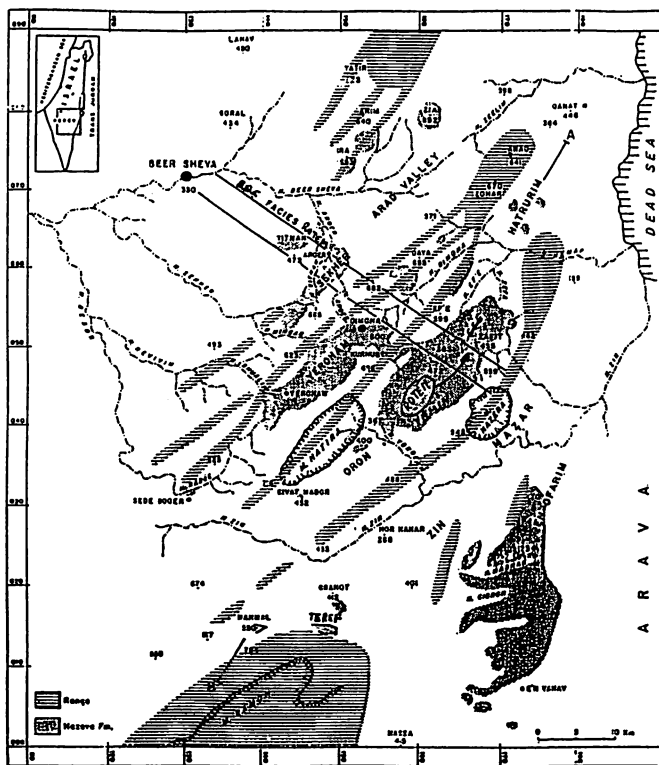
Modified after BEN'OR & YROMAN (1954),
A. SALEM (1967)



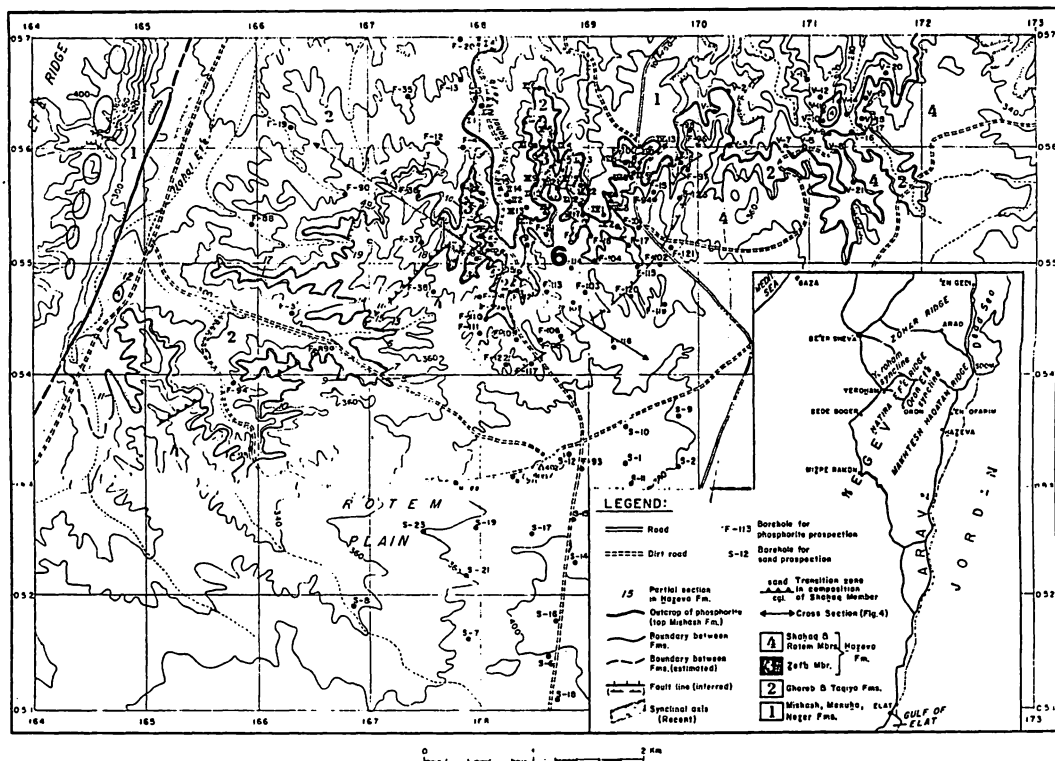
איור 7. חתכים עמודיים של תצורת חצבה בעפרים, אפעה ודימונה (אחרי שחר 1973).



איור 8. חתכים עמודיים בפרט צפע בסינקלינת אפעה (שחר, 1973).



איור 9. תפוצה של חצבה בפציאס אפעה ומינגר (שחר, 1992).



איור 10. מפה גיאולוגית של סינקלינת אפעא (שחר, 1973).

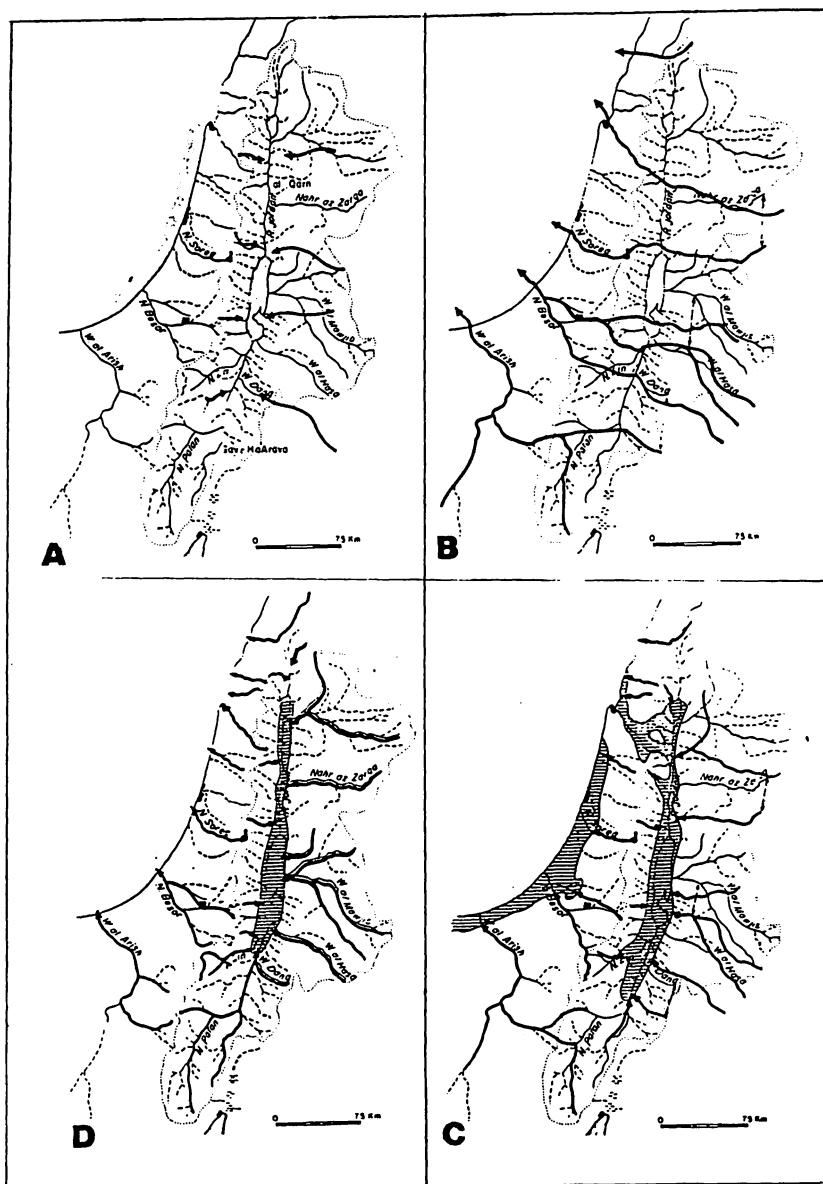
עם אדמה פוסילית בתווך. כל הסכויים שפרט צפע ייעלם לגמרי תוך כמה שנים עקב פעילות הכרייה של הפוספט.

פרט רותם עם צור ייבוא מופיע מלוא כל העין. העובי מחושב כ-100 מ' מגובה +420 מ' על פני מישור רותם עד קג"ל הבסיס בגובה משוער 320+. קידוחי חול שנעשו בשנות ה-60, (גרינברג, 1967) לא הגיעו עד הבסיס.

בדרך לדימונה אנחנו עוברים ליד גבעה 383 ("ANTHACOTHERE HILL"). הכניסה היא בדרך עפר שמתחילה מול הפניה לכור של דימונה. נוסעים כ-1000 מ' צפונה והגבעה ניצבת ממערב. כאן, בפרט רותם נחפרו ונמצאו שרידים רבים של בעלי חוליות שונים, והגדרת גילם נקבעה למיוקן תחתון (גולדשמיט ואחרים 1988; צרנוב ואחרים 1987).

מדרום לכביש דימונה-צפית, לאורך הכביש לאורון, רואים מחשופים רבים של תצורת חצבה ללא צור אלוכטוני. גיבעה 402, במרחק כ-2 ק"מ מהצומת הוא המקום בו נמצאו שרידי חתי פילים בשנות ה-50.

בהמשך הדרך מערבה לדימונה, לאחר הכניסה לעיר הקדומה ממשית מגיעים למחצבה ישנה של חול לבן. זהו חלק מפרט מינגר ועל פני השטח אפשר למצוא שרידים של גיר אוסטריאות (פרט ירותם) המונח מעל פרט מינגר.



- Present-day drainage valleys
- Paleo-drainage channels, and flow direction
- Border of present-day Dead Sea catchment basin
- Amount of northward displacement of paleochannel to its present position
- Present-day sea and lakes
- Pliocene - sea

איור 11. מערכת הניקוז של אגן ים המלח (מתוקן לפי ז'ק ופרוינד 1981, Fig. 3).
 A. ניקוז פנימי באוליגוקן (ראה גם הורביץ 1987).
 B. ניקוז ממואב עד לים התיכון – מיוקן תחתון.
 C. ניקוז פנימי חוזר במיוקן תיכון-פליוקן.
 D. התעמקות אגן ניקוז פנימי בפלייסטוקן.

תחנה מספר 7. (הירש ושחר) צומת ערוער

הכביש לדימונה חותך מספר מטרים בתוך תצורת חצבה, ומגלה חולות, חווארים וצור ייבוא. כל הגבעה החל מבסיסה (נחל דימונה) בנויה אותו חומר בעובי כולל של כ-40 מ'. צור ייבוא לא מונח על פני השטח אלא מפוזר לכל העובי. כ-200 מ' לכוון ערד יש גושים ענקיים של צור ייבוא מלוכד ע"י נארי.

כ-3 ק"מ דרומה, בדרך עפר לאורך נחל סכר פוגשים מחשוף של חול וחוואר של תצורת חצבה, אך ללא שום צור ייבוא. זהו לדעתנו פציאס מינגר כמו בסינקלינת ירוחם. לפי דעתנו שני הפציאסים האלה שקעו בו זמנית מפני ששניהם מונחים מעל קג"ל הבסיס (שחק) האופקי (+320) מאורון ועד צפע.

TABLE I : The Hazeva Events in the view of different authors

AGE	ZAK & FREUND (1981)	ZILBERMAN (1992)	LEWY (1992)	HIRSCH,RODED (87) SHAHAR (1992)
MY				
PLEISTOCENE	Rift			Fluviatile *
- PLIOCENE	drainage	Terraces		Terraces *
5.2				*
LATE MIOCENE	Upper Hazeva drainage from Moab - Med. allocht.flint	Tectonic Phase (DSR) - 6 MY	Arava "Upper Hazeva "	Post Hazeva Redeposition *
10.2				
MIDDLE MIOCENE	(DSR)	"Top Congl". (Rotem)	Dead Sea Rift Opening (DSR)	
16.2				
EARLY MIOCENE	Lower Hazeva Inland Rift drainage Red Beds	" Fluvial- lacustrine " (Mingar) "Base Congl".	" Lower Hazeva" Ashalon Aroer Mingar Shualim	R H R M o a o i t z t n e e e g m v m a a r
25				
LATE OLIGOCENE				Shahaq
30				Zefa

[*Hatrurim Combustion, Burg et al., 1991]

[(DSR) Dead Sea Rift Opening]

- Agnon, A., 1983. Development of sedimentary basins and morphotectonics in the southern sector of the Western Dead Sea Escarpment. M.Sc. Thesis, Hebrew University of Jerusalem (in Hebrew).
- Aharoni, E. and Aizin, B., 1966. Yattir conglomerate — continental Neogene in the Kuseife Area of northern Negev, Israel. *Isr. J. Earth Sci.*, 15: 118–124.
- Bentor, Y.K. and Vroman, A., 1957. The Geological Map of the Negev, sheet 19, Arava Valley, 1:100,000, with explanatory notes. *Isr. Geol. Surv.* 66 p.
- Bentor, Y.K. and Vroman, A., 1960. The Geological Map of Israel, 1:100,000, sheet 16, Mount Sdom. *Isr. Geol. Surv.* 117 p.
- Blake, G.S., 1935. The stratigraphy of Palestine and its building stones. *Govt. of Palestine, Jerusalem*, No. 3, p. 1–138.
- Burg, A., 1990. The Geology of the Hatrurim formation. *Isr. Geol. Surv. Rep.* /18/91: 118 p.
- Burg, A., Starinsky, A., Bartov, Y. and Kolodny, Y., 1991. Geology of the Hatrurim ("Mottled Zone") in the Hatrurim basin. *Isr. J. Earth Sci.*, 40: 107–124.
- Garfunkel, Z. and Horowitz, A., 1966. The upper Tertiary and Quaternary morphology of the Negev, Israel. *Isr. J. Earth Sci.* 15: 101–117.
- Goldsmith, N.F., Tchernov, E., Ginsburg, L., Tassy, P. and Van Couverning, J.A., 1982. Ctenodactyl rodents in the Miocene Negev fauna of Israel. *Nature* 296, (5858) 645–647.
- Harash, A., 1967. The Geology of the Yeroham–Dimona plain. M.Sc. Thesis, (in Hebrew).
- Haq, V., Hardenbol, J. and Vail, P., 1988. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. In: *Sea Level Changes. SEPM Spec. Publ.* 42; 71–108.
- Hirsch, F., 1988. Geology of the northern plunge of the Hazera anticline, NE Negev, Israel. *Isr. Geol. Surv. Current Res.* 6: 41–46.
- Hirsch, F. and Honigstein, A., 1985. Pre-Santonian and Campanian events during the formation of the Hazera Anticline, NE Negev, controlled by Ostracode biostratigraphy. *GSI Curr. Res.* 5, p. 34–39.
- Honigstein, A., 1983. Senonian Ostracodes from Israel. *Isr. Geol. Surv., Bull.* 78, 48 p.
- Lewy, Z., 1992. Miocene Sedimentary and Tectonic Settings in Israel. *Isr. Geol. Soc. Annu. Meet.*: 92–94.
- Moshkovitz, S., 1984. Late Cretaceous Calcareous Nannofossil Biostratigraphy of the Mount Scopus Group, Israel. *GSI Curr. Res.* 1983–4, 46–55.
- Reiss, Z., 1962. Stratigraphy of phosphate deposits in Israel. *Isr. Geol. Surv. Bull.*, 34, pp. 1–23.
- Roded, R., 1982. On the ahe of folding of the Ef'e Anticline. *Isr. Geol. Surv., Rep.* S/3/82, 21 p.
- Roded, R. and Hirsch, F., 1987. Geomorphological History of the Rotem–Yamin basin in Neogene "Hazeva" time, *Isr. Geol. Soc. Ann. Meet.* p. 105.
- Roded, R., Shiloni, Y., Cook, P.M. and Ginzburg, D., 1972. The phosphate fields along Nahal Zin (general report). *Isr. Geol. Surv. Rep.* MP/530/72, 42 p. (in Hebrew).
- Shahar, Y., 1973. The Hazeva Formation in the Oron–Ef'e syncline. *Isr. J. Earth Sci.*, 22: 31–49.
- Shahar, Y., 1975. Hatrurim. *Isr. Geol. Soc. Ann. Meeting, Abstracts.*
- Shaw, S.H., 1947. Geological Map on a scale of 1/250,000 southern Palestine, with explanatory notes. *Gov. Palestine Press, Jerusalem*, 42 p.

- Sneh, A., 1967. The Hazeva Formation, semi-annual progress report on the geological research project. Isr. Geol. Surv. Rep., OD/6/67: 7-10.
- Tchernow, E., Ginsburg, L., Tassy, P. and Goldsmith, N., 1987. Miocene mammals of the Negev (Israel). Jour. of Vert. Paleont. 7 (3): 284-310.
- Wdowinski, S., 1985. The Geology of the southern Hebron mountains. Isrl. Geol. Surv. Rep. 25, 68 p.
- Zak, I. and Freund, R., 1981. Assymetry and Basin migration in the Dead Sea Rift. Tectonophysics 80:27-38.
- Zilberman, E., 1992. Remnants of Miocene Landscape in the Central and Northern Negev and their palaeogeographical implications. Isr. Geol. Surv., Bull. 83: 54 p.

סיור ב-5

מערכת הקרסט במחדר 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 בחילחול בלבד. אגן ניקוז גדול מאפשר התפתחות חלל תת קרקעי שממדיו גדולים יותר, ובמקרים רבים יש לו מוצא פתוח אל בסיס הניקוז. בולענים מרוחקים מבסיס הניקוז מפתחים בדרך כלל מערות בעלות מוצא בחילחול.

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 חלקי 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- ^{18}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 חרותים והזרימה סטתה 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 (בשוליו המזרחיים) ב-9 מ"מ לשנה בקירוב בשנים 1990–1992. הרכיב הסיבובי של התרוממות דיאפיר סדום הוערך לפי מידת הטייתם 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 הוטח 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 וקרבוניטים, 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.

סיור ב-6 שברי נחל צין

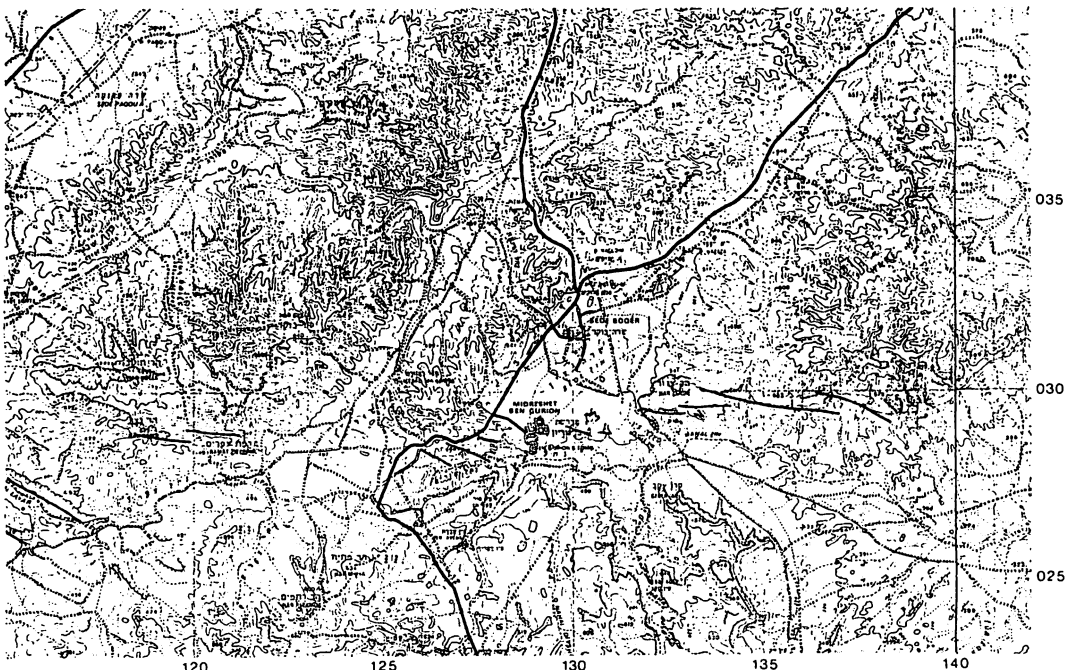
גדי שמיר, המכון למחקרי נפט וגיאופיסיקה

רקע

המונח "קו הצין" (או "שברי הצין") מתייחס לשברים המופיעים לאורך רצועה צרה יחסית שכוונה הכללי מזרח-מערב בשוליים הדרום-מערביים של מבני חתירה, חלוקים ובוקר בנגב הצפוני (ציור 1). מטרות הסיור הן להציג:

- (א) את האופי הגיאומטרי והמכני של מערך השברים המגביל את מבנה חתירה ולהסיק מכך על "קו הצין" ככלל;
- (ב) עדויות לגיל הפלייסטוקני (או צעיר יותר) של הפעילות על שברי הצין;
- (ג) תופעות דפורמציה בסלעי קרטון מנוחה ומשמעותן.

שברי "קו הצין" חשופים לאורך אזור שאורכו כ-25 ק"מ וכוונו הכללי 080° , מנחל זקוף במזרח עד נחל בתרן במערב. ה"קו" כולל שברים בודדים, שאורכם החשוף מגיע עד לכ-3 ק"מ, והם בעלי סטרייק בכוון מזרח-מערב עד צפון מערב-דרום מזרח. ההתייחסות המסורתית אל שברי



איור 1. שברי נחל צין – מפת מיקום.

"קו הצין", בעקבות Shaw (1947) ו-Bentor and Vroman (1951), היתה כאל קו שבירה מרכזי בנגב הצפוני. חוקרים אלה ואחרים (Bentor and Vroman, 1954; De Sitter, 1962; פרוינד, 1962; ברטוב, 1974) ייחסו לו תזוזה אופקית ימנית, לאורך קו שבר ממקור עתיק שהופעל מחדש בסנון. פרוינד (1962) מצא שחתך תצורת דורות בגבעות כבודה אינו דומה לחתך שמצפון לשברי דרום הר בוקר אלא למספר חתכים בצפון סיני. הסטה אופקית לאורך "קו הצין" יכולה היתה להסביר הבדלים אלו, אילו נמצא פציאס גבעות כבודה אי שם מזרחה במבני הנגב הצפוני (מעברו הצפוני של "קו צין"), מה שלא נמצא. מסקנתו היתה שתזוזה ימנית, אם היתה כזו, היתה קטנה ביותר, מסקנה המתאשרת על ידי מחקרים חדשים יותר. ברטוב (1974) כלל את "קו צין" במערך שברי הרוחב של הנגב אולם הבחין באופיו השונה, המתבטא בכך שאיננו נמשך מערבה אל צפון סיני. כיום ידועים הבדלים נוספים, כגון אי המשכו מזרחה מציר מבנה חתירה אל עבר בקע ים המלח והעובדה שמבנה חצרה איננו מושפע משברי הצין, חוסר תזוזה אופקית משמעותית והיעדר ביטוי אירומגנטי או גרבימטרי ברור. מבחינה גיאומטרית, השברים בשולי מבני חתירה וחלוקים אכן מופיעים ברצועה צרה (ציור 1). מאידך, בשולי מבנה בוקר קיים אזור שבירה רחב יותר ועדיין לא ברור אופיים המכני של השברים השונים, והקשר שלהם הן למבנה בוקר והן לשברים האחרים, מזרחה משם. הפעילות לאורך שברי "קו הצין" בשולי מבנה חתירה החלה בסנון (Bartov et al., 1976) ונמשכה לפחות עד הפלייסטוקן התיכון (Goring-Morris and Rosen, 1988; קפלן, 1988; זילברמן, 1991).

שברי "קו הצין" מפותחים במיוחד, מבחינת כמות הזריקה והחשיפה, לאורך השוליים הדרום מערביים של מבנה חתירה, שהוא גם בעל הרום הסטרוקטורלי הגבוה ביותר בין מבני הקימוט של הנגב הצפוני. רצועת השברים קוטעת את המונוקלינה בכוון כללי 085° (קרי בזוית של כ- 45° לציר המונוקלינלי), בין נחל זקוף במזרח לראש נחל חוארים (סינקלינת חלוקים) במערב. לאורך החתך, בגבול הבלוק המורם של חתירה, חשופות תופעות השבירה והקימוט המוצגות בסיוור.

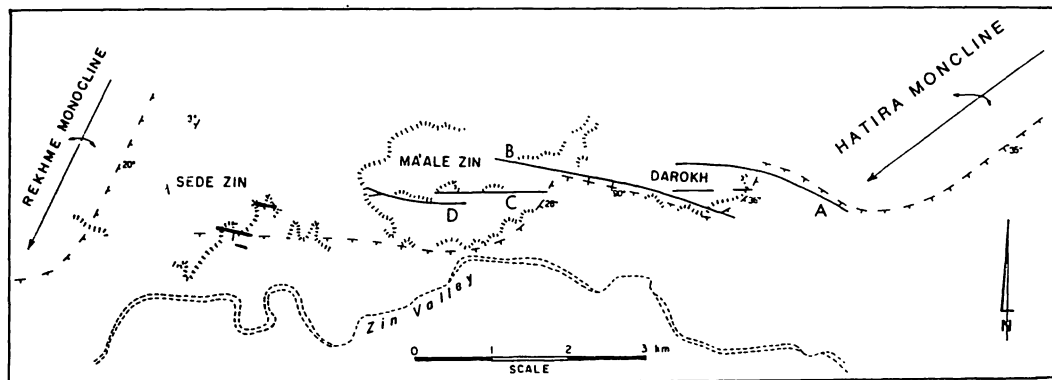
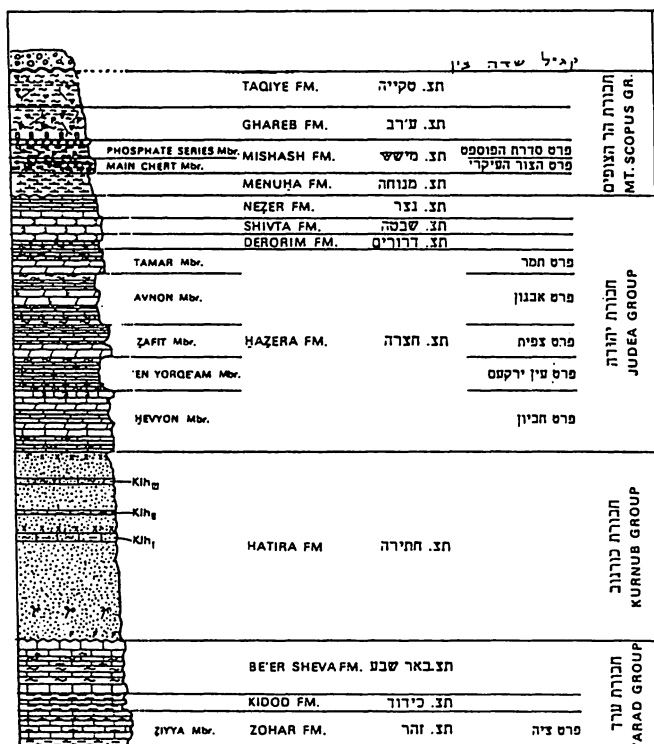
העמודה הסטרטיגרפית החשופה באזור הסיור (ציור 2) כוללת את תצורות חצרה (קנומן) עד טקיה (פליאוקן) ומעליהם, באי התאמה זוויתית, קונגלומרט שדה צין שגילו פליסטוקן-הולוקן.

תחנה מס' 1: תצפית כללית מדרום (נ.צ. 12785/02760) על שולי מבנה חתירה.

במבט צפונה מכוון רמת עבדת נראים שולי מבנה חתירה הנוחתים בחריפות דרומה לאורך נחלי צין וחוארים. במבט זה נראה אופי מבנה חתירה כבלוק נטוי מערבה, גדוע בראשו, עם חשיפה סטרטיגרפית הולכת ומעמיקה ממערב למזרח. נחיתת השולים אל נחלי צין וחוארים מלווה בכפיפה של השכבות דרומה, בעוצמה ההולכת ודועכת ממזרח למערב, יחד עם הזריקה הסטרוקטורלית הכללית של המבנה. תופעות הדפורמציה החשופות ברמות סטרטיגרפיות שונות תלויות באופי המכני של הסלעים. על בסיס זה ניתן לחלק את אזור שולי מבנה חתירה לשני קטעים:

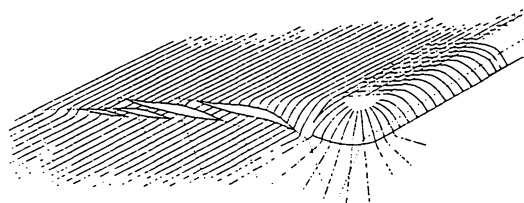
(א) מנחל זקוף (אזור נחיתת ציר המונוקלינה לדרום מערב) במזרח עד מעלה צין במערב: המסלע כולל תשתית של סלעי חבורת יהודה (גירים ודולומיטים) ומעליה תצורות מנוחה (קרטון) ומישש (צור ופוספוריט). בקטע זה חשופים ארבעה שברים באורך 3.0–1.5 ק"מ וסטרייק 120° – 090° (מסומנים A עד D בציור 3) המדורגים במגמה שמאלית. הזריקה על השברים פוחתת כלפי מע'–צפ'–מע', אל הבלוק המורם של חתירה, וכלפי דר'–דר'–מז' אל בקעת צין. צידם הדרומי של השברים ירוד, אולם אופי השבירה (נורמלי, הפוך) משתנה, עם

איור 2. הסטרטיגרפיה באזור
הסיור (על פי רודד,
1982)



איור 3. מפת מבנים כללית לאורך השוליים הדרום מערביים של מונוקלינת חתירה. השברים מסומנים בקו רציף וחשופים במפלס גג חבורת יהודה. סימני נטית שכבות מתיחסים לפרט הצור העיקרי של תצורת מישש.

איור 4. ציור סכמטי של מבנה השולים הדרומיים של בלוק חתירה במפלס גג חבורת יהודה והגבולות המשוערים של מישורי השבר בעומק (קוים מרוסקים דקים).



תלות ברורה הן במיקום לאורך הקו והן במיקום לאורך כל שבר. הזריקה על השברים המדורגים, שהיא בעיקרה אנכית, מתרכזת ברובה בסלעי חבורת יהודה ופוחתת למערב, קרי במורד הבלוק הנטוי של חתירה. באותה מגמה גם פוחתת מידת ההשתתפות של סלעי חבורת יהודה בכפיפת השכבות דרומה. תאור סכמטי של מבנה שולי בלוק חתירה במפלס גג חבורת יהודה ניתן בציר 4.

תמונת המעוות של תצורות מנוחה ומישש לאורך קטע זה שונה. במפלס בסיס צור מישש קיימים שני חצאי כיפות א-סימטריות: המערבית, כיפת מעלה צין, רוכבת על אזור דירוג השברים B/C, והמזרחית, כיפת דרוך, על אזור דירוג השברים C/D (ציר 3). האופי השונה של המעוות במפלס צור מישש לעומת זה שבמפלס גג חבורת יהודה, בפרט באזור כיפת מעלה צין, מסתכם בדיסהרמוניה של המבנה, כאשר השינוי מתמקד בתצורת מנוחה הקרטונית.

(ב) ממעלה צין עד לשולי מונוקלינית חלוקים (שדה צין) חשופות תצורות ע'רב (קרטון) וטקיה (פצלים) וכן קונגלומרט שדה צין. בקטע זה לא חשוף המשך מסודר למערך השברים הנראה ב"תשתית" של חבורת יהודה שממזרח. שולי מבנה חתירה מאופיינים כאן על ידי נטיות מתונות של סלעי תצ' ע'רב לדרום-דרום-מערב ומספר שברים, שמופו ונבדקו במסגרת פרויקט תג"ר, מסיטים את הכיסוי הפלייסטוקני של קג"ל שדה צין.

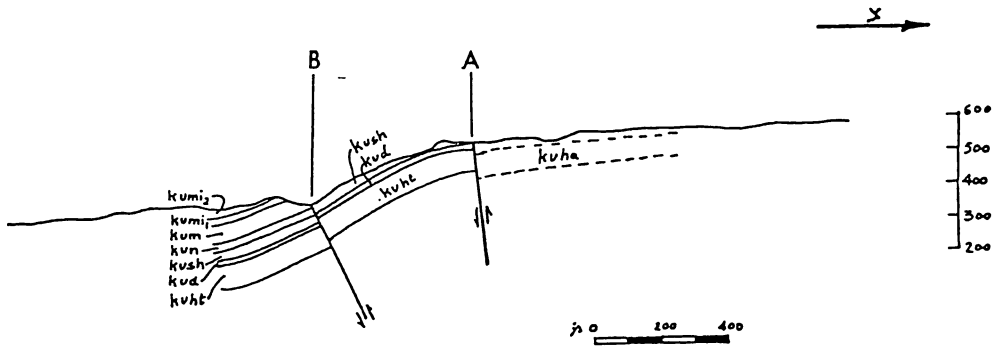
הסיור יתקדם ממזרח למערב, קרי במורד האגף המתון של בלוק חתירה, ובמעלה החתך הסטרטיגרפי, מכיפת דרוך אל כיפת מעלה צין ולבסוף אל שדה צין.

תחנה מס' 2: כיפת דרוך, סביבות נצ. 13630/02980.

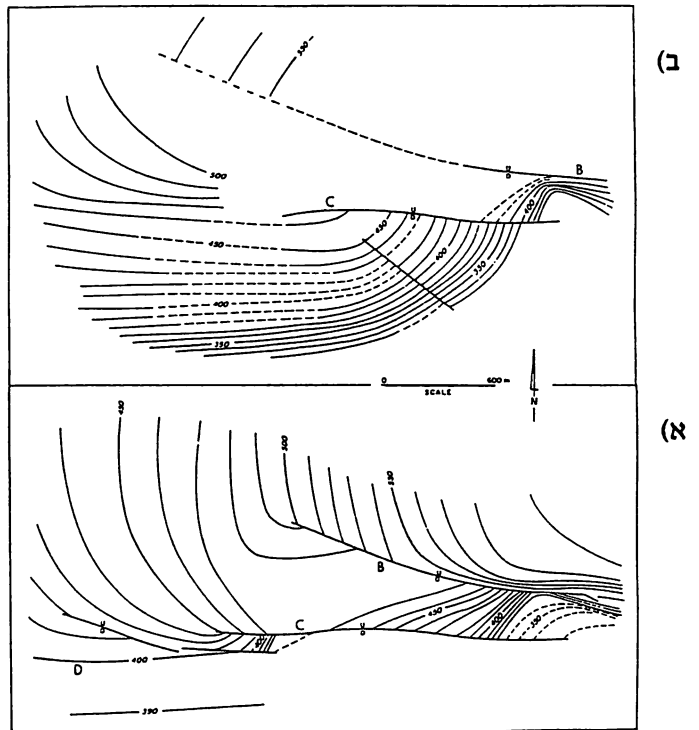
כיפת דרוך הינה מבנה חצי כיפתי א-סימטרי, קמור בחריפות באגפו המזרחי ונשען, מדרום, על דירוג השברים A/B (ציר 3). במבנה דרוך קיימת התאמה בין נטיות חבורות יהודה והר הצופים (ציר 5). בשבר A הזריקה הסטרטיגרפית מעתיקה את פרט תמר (תצ' חצרה) מול גג תצ' מישש, הסטה אנכית המוערכת בכ-200 מ'. זו החשיפה המזרחית ביותר של "קו הצין" וההסטה הגדולה ביותר במערך השברים המדורגים שבשולי מבנה חתירה וכנראה שלכל אורך הקו. השבר הוא הפוך, עם סימני החלקה (striations) הנוטים 70° – 50° מערבה, ומכאן שקיים רכיב קטן של תזוזה אופקית ימנית. ממזרח לשבר זה נוחת ציר מונוקלינית חתירה לכוון דר'-מע'. שבר B באזור כיפת דרוך גם הוא הפוך ועובר בתוך תצ' מנוחה שעוביה הצטמצם למספר מטרים. צור מישש נטוי 90° ויותר. גם סימני החלקה על מישור שבר B בתצ' נצר מצביעים על רכיב הסטה אופקי ימני. השילוב של רכיב הסטה ימני (קטן) ודרוג שמאלי בין השברים מחייב שכוון ההתקצרות המירבית המקומית באזור הדירוג הוא בזוית חדה לסטרייק השברים (דירוג לחיצתי), כפי שאכן בא לידי ביטוי בקימור החריף של חצי הכיפה במזרחה. תופעה זו נמצאת בחפיפה (סופרפוזיציה) על התקצרות בכוון בללי צפון-דרום הבאה לידי ביטוי במגמה ההפוכה של השברים הראשיים (A, B) בשברים הפוכים קטנים יותר וכן בקימוט של כלל החתך כלפי דרום. בסך הכל מתחלקת הזריקה הסטרוקטורלית ברמת גג חבורת יהודה בין שבירה לבין קימוט במידה פחות או יותר שווה, ושיעורה יורד ממזרח למערב.

תחנה מס' 3: כיפת מעלה צין.

אזור כיפת מעלה צין מתאפיין כאמור בדיסהרמוניה של המבנה: כפיפת סלעי חבורת יהודה דרומה, שעוצמתה היתה מקסימלית במזרח שבר A ודעכה מערבה, נעלמת באזור זה. במפלס גג חבורת יהודה מוגבל הבלוק הנטוי של חתירה על ידי שברים (ציר 6) ואילו במפלס צור

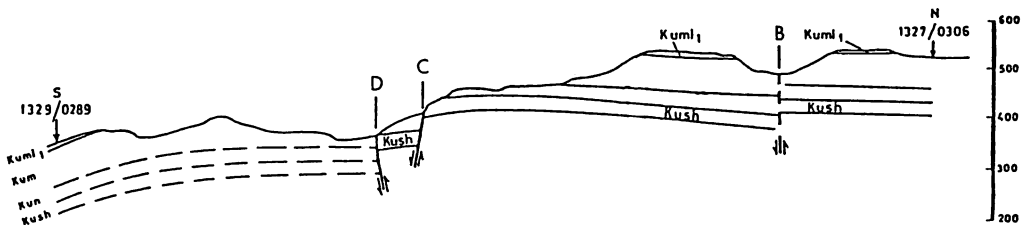


איור 5. חתך בכיוון צפון-דרום בכיפת דרוך. נראית התאמה בין חבורות יהודה והר הצופים.



איור 6.

מפות סטרוקטורליות של כיפת מעלה צין (א) גג חבורת יהודה, תצ' נצור; (ב) בסיס צור מישש. ניתן לראות כי השברים B ו-C נמשכים מערבה במפלס חבורת יהודה אך לא מגיעים למפלס צור מישש, בגלל ספיגת חלק מן המעוות בתצורת מנוחה.



איור 7. חתך בכיוון צפון-דרום בכיפת מעלה צין. באזור החפיפה שבר C נורמלי ואילו D הפוך.

מישש נוצר קימוט חצי כיפתי אסימטרי (ציור ב6). מבנה קימוט זה – כיפת מעלה צין – נשען על דירוג השברים B/C, תוך יצירת קימור חריף מזרחה בדומה לכיפת דרוך. גם כאן אזור הקימור ממוקם באזור ההסטה הסטרטיגרפית המקסימלית, המוערכת בכ-150 מ' (פרט אבנון של תצ' חצרה מול תצ' מנוחה), על שבר B.

ביטוי להתקצרות הכללית בכוון צפון-דרום הוא החלקה במגמה הפוכה בין שכבות גיר של תצורת נצר (נ.צ. 13412/02962). בקנה המידה המזוסקופי של עובי השכבות, ההחלקה הבין-שכבתית גרמה לרוטציה של בלוקים תוך-שכבתיים מאורכים, מוגבלים על ידי סידוק ומסובבים על ציר אופקי בכוון הסטרייק. התהליך מסתכם בהידקקות השכבות והוא אנלוגי למנגנון של הידקקות הקרום על ידי רוטציה של בלוקים מוגבלים על ידי שברים נורמליים.

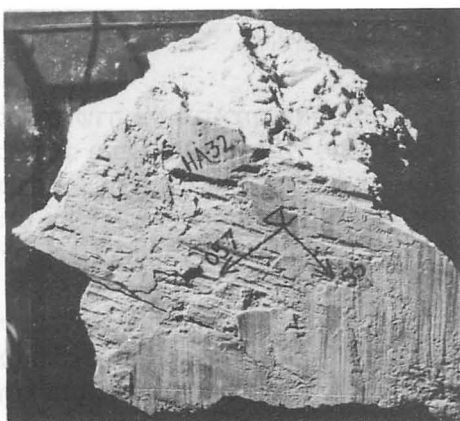
בכיפת מעלה צין הופך שבר B לנורמלי, וכך גם שני השברים הראשיים הנוספים (C, D). יחד עם זאת, באזור הדירוג C/D נראה שינוי של שבר D להפוך בגלל שינוי כוון נטית השבר לצפון (ציור 7). כמו הקימוט החריף באזורי הדירוג B/C ו-A/B, זוהי עדות נוספת להתקצרות מקומית מוגברת באזורי דירוג השברים.

יחד עם דעיכת הקימוט במפלס חב"י ממזרח למערב נכרת גם דעיכה, באותה מגמה, של השבירה במפלס צור מישש (ציור א6). במערב הכיפה, במקום בו שבר D מגיע אל מצוק שדה צין (נ.צ. 13180/02960), נראית פלכסורה של צור מישש מעל קצה השבר. גיל תחילת הפעילות של שברי הצין נקבע על ידי Bartov et al. (1976) כתוך-סנוני, על פי שינויי העובי של תצורת מנוחה מצפון ומדרום לשברי כיפת מעלה צין.

תחנה מס' 4: תופעות דפורמציה של קרטון מנוחה באזור הר צרור (סביבות נ.צ. 13260/03030).

השוואת המפה הסטרוקטורלית של גג חבורת יהודה עם זו של בסיס צור מישש מראה כי השינוי באופי הדפורמציה עם העליה בחתך הסטרטיגרפי מרוכז למעשה בתצורת מנוחה הקרטונית. מעקב אחרי המשכם של קוי השבר לתוך הקרטון בקצוות המערביים של השברים B ו-D מאפשר להבין את הגורמים לשינוי זה. שתי תופעות מאפיינות אזורים אלו: (1) גופים בולטים של קרטון גירי קשה, (2) נוכחות עורקי קלציט בעובי של עד מספר עשרות ס"מ. מערבה לקצהו החשוף של שבר B בתצורת נצר, בערוץ שמצפון להר צרור, ניתן לזהות שני טיפוסים עורקים:

- (1) עורקים דקים (0.1–1.0 ס"מ), תלולים, עם טכסטורות אופייניות לסדקי מתיחה (plumose textures) על פניהם. עורקים אלה מישוריים, כוונם הממוצע 160° ואופיני גם לסדקי מתיחה בנגב הצפוני, והם אינם מופרעים על ידי קימוט או סידוק מקומיים.
- (2) עורקים מסיביים, בעובי של עד כ-50 ס"מ, עם שיכוב פנימי המצביע על מספר מחזורי השקעה. התעבויות מקומיות, לעיתים מעוינות, נצפו במקומות בהם הסדקים מדורגים ועל דפנות הסדקים מופיעים לעיתים קרובות סימני החלקה (striations) (ציור א8). בתוך אזורי ההתעבות נראית לעיתים טכסטורה קטקלסטית בה מעורבים גבישי הקלציט עם פרגמנטים מזוותים של קרטון. בקנה מידה מיקרוסקופי, ובפרט בהתעבויות הסדקים, נראה מעוות אינטנסיבי של גבישי הקלציט על ידי תאום (ציור ב8), כפיפה של המבנה הגבישי וסידוק (ציור ג8). תוצאות מדידת כוון העורקים וכוון סימני ההחלקה עליהם באזור הר צרור מראים (ציור 9) כי כוון העורקים הדקים צפון מערב ואילו הכוון הכללי של העורקים המסיביים מזרח-מערב, וסימני ההחלקה עליהם מעידים לרוב על תזוזות במגמה של שבירה נורמלית.

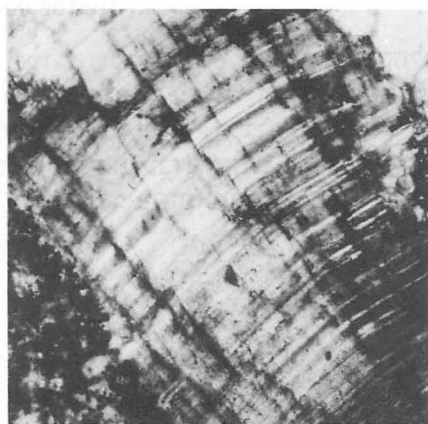


(ב)

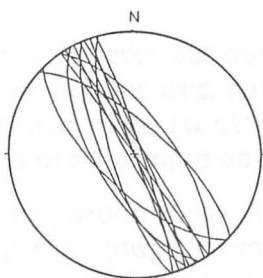
(א)

איור 8. מעוות פריך (brittle) ומשיך (ductile) בעורקי קלציט מסיביים, כיפת מעלה צין:

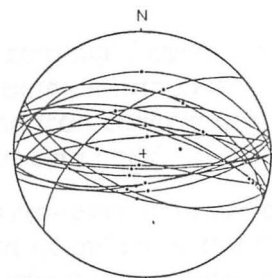
- (א) שתי מערכות מצטלבות של סימני החלקה על דפנות עורק.
- (ב) שני דורות תאומים בגביש קלציט מאזור התעבויות עורקים.
- (ג) תאום, סידוק וכפיפה של הסריג בגבישי קלציט.



(ג)



(ב)



(א)

איור 9. השלכה סטיראוגרפית (המיספרה תחתונה) של כווני עורקי קלציט בתצורת מנוחה, הר צרור (קצה המערבי של שבר D):

- (א) עורקים מסיביים וכווני החלקה עליהם.
- (ב) עורקים דקים עם טכסטורות מתיחה.

תחנה מס' 5: קונגלומרט שדה צין סמוך למעלה צין.

הסטרטיגרפיה וההסטוריה הגיאולוגית של קונגלומרט שדה צין מסוכמת כאן על פי זילברמן (1991), המתבסס גם על Issar et al. (1984), אנוז, שליב וקפלן (1988), קפלן (1988), Goring-Morris & Rosen (1988). האגן הסדימנטרי של שדה צין נוצר בעקבות התחתרות נחל בשור הקדום בתוך פני השטח של סוף הפליוקן, המיוצגים על ידי שרידי המפלסים של קג"ל אחוזם. בפלייסטוקן קלט אגן זה משקעים נחליים שהובלו על ידי נחל בשור הקדום. חתך קג"ל שדה צין על שפת נחל צין מכיל שתי יחידות עיקריות:

(א) קונגלומרט גס, בדרגות ליכוד שונות, עם חלוקי צור יבוא וגיר איאוקני ומטריקס סילטי-חולי אדמדם. ביחידה זו נמצאו כלי צור (choppers) אופייניים לתקופה האשליית הקדומה (פליסטוקן מוקדם). עובי היחידה לאורך מצוק נחל צין מגיע עד כ-25 מ'.

(ב) יחידת סילט חולי וחרסית (5-2 מ') עם אופקי חלוקים קטנים, בעיקר של גיר איאוקני. גילה פליסטוקן תיכון (500,000-100,000 שנה).

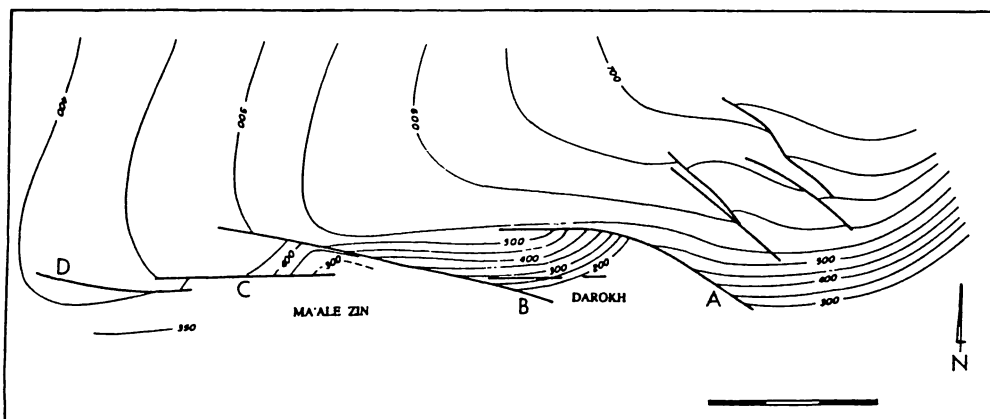
יחידה שלישית, של סילט, לס וקרקות עתיקות בעובי של עד כ-6 מ', נחשפת בחלקיו הצפוניים של שדה צין. גילו הפלייסטוקני של קג"ל שדה צין נתמך גם על ידי (א) גובה מפלס האגן, הנמוך מזה של תצורת חצבה ומזה של תצורת אחוזם; (ב) על ידי ערבוב חלוקי צור יבוא עם חלוקים איאוקניים, המצביע על סחיפת תצ' חצבה מרמת עבדת קודם להרבדת הקג"ל. קג"ל שדה צין מונח, לאורך הגדה הצפונית של נחל חוארים, באי התאמה זוויתית על תצורות טקיה וע'רב.

תחנה מס' 6: שבירה בקג"ל שדה צין

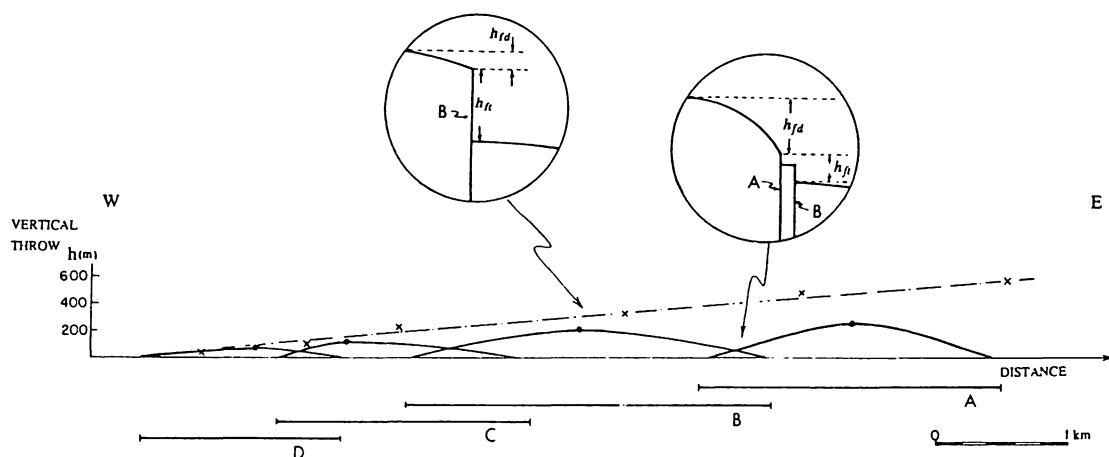
במסגרת מחקרי פרויקט תג"ר מופו ונבדקו מספר שברים המסיטים את קונגלומרט הבסיס של שדה צין (Shaliv and Baram, 1986; Shamir, 1991). היחידה מונחת באי התאמה זוויתית על תצורות ע'רב (מסטריכט) וטקיה (פלאוקן) אשר המגע בינהן אירוזיבי והן נוטות דרומה בשיעור של עד כ-20°. באזור שדה צין אין כל שיטתיות בהופעת השברים, להוציא את העובדה שצדם הדרומי בד"כ ירוד, בניגוד למערך המסודר של שברים מדורגים המאפין את חבורת יהודה מזרחה מכאן.

אתר 1 (נ.צ. 13000/02915): שבר שכוונו הכללי 080° מסיט את בסיס הקג"ל בשיעור של כ-2 מ'. השבר תת-אנכי ומתפצל במעלה חתך תצ' ע'רב, רמז לכך שעיקר התזוזה לאורכו היתה אופקית, בשיעור בלתי ידוע. בסמוך נראה תבליט בג תצ' ע'רב, המתבטא בהתעבות קג"ל שדה צין, אשר נוצר על ידי סידרת שברים נורמליים שאינם מסיטים את בסיס הקג"ל.

אתר 2 (02984/12983): שבר נורמלי, שנטיתו כ-60° לדרום-דרום-מערב מביא פצלים של תצ' טקיה מול קרטון של תצ' ע'רב. השבר נחשף בשלוחה היורדת אל נחל צין אך ניתן לעקוב אחריו לכיוון מערב-צפון-מערב אל מתחת ולתוך הכיסוי של קונגלומרט הבסיס של שדה צין. שתי תעלות שנחפרו במסגרת פרויקט תג"ר בניצב לשבר אישרו שהוא אכן ממשיך לכיוון זה. ההסטה של בסיס קג"ל שדה צין היא כ-2.5 מ', בעוד הסטת תצורת ע'רב ביחס לתצורת טקיה היא בשיעור של 15-20 מ'.



- איור 10. מפה סטרוקטורלית של השולים הדרום מערביים של מונקלינת חתירה במפלס גג חבורת יהודה (ללא אזור שדה צין). במפה נראית
- (1) נטית האגף המתון של מונקלינת חתירה מצפון לקו צין;
 - (2) ההסטה הסטרוקטורלית הכוללת בין בלוק חתירה לבין אזור בקעת צין, המושגת על ידי קימוט (גרדיינטים חריפים) ושבירה (אי רציפויות);
 - (3) הדעיכה מערבה של הזריקה הסטרוקטורלית, מכ-400 מ' במזרח לכ-50 מ' במערב.



איור 11. חלוקת הזריקה הסטרוקטורלית האנכית הכללית (h ; קו מרוסק) בין שבירה (h_{ft} ; עקומות רצופות) לבין קימוט (h_{fd}) לאורך שברי צין בשולי מבנה חתירה. ההפרש בין שתי העקומות מבטא, עבור כל נקודה לאורך מערך השברים A-D, את הזריקה המושגת על ידי קימוט. זריקה זו גדלה באזורי החפיפה בגלל התרומה של שני השברים. החלוקה המשתנה של הזריקה בין שבירה וקימוט מצוירת באופן סכמטי (ראה מעגלים) עבור אזור מרכז שבר B (בעיקר שבירה) ועבור אזור הדירוג A/B (בעיקר קימוט). קו הזריקה הסטרוקטורלית הכוללת משקף את נטית האגף המתון של המונקלינה.

סיכום

(א) המפה הסטרוקטורלית של מפלס גג חבורת יהודה כאופק מנחה (ציור 10) מראה את היחס בין שברי "קו הצין" לבין מבנה חתירה. השברים חוצים את שולי המבנה בזוית חדה, בניגוד לשברים המוכרים משיאי המונוקלינות, המוגבלים לאזור הכפיפה המקסימלית ואשר כוונם תת ניצב לצירי הקימוט. ציור 11 מראה את הגידול בזריקה האנכית של שברי הצין ממערב למזרח, ואת התרומה הגדלה והולכת של הקימוט באותה מגמה. הגידול הקבוע של ההסטה הסטרוקטורלית הכללית לכוון מזרח, ללא שינויים מקומיים, מחייב כי:

- (1) במקומות בהם ההסטה על ידי שבירה קטנה, כגון בקצוות שברים, ההסטה על ידי קימוט גדולה;
- (2) במקומות בהם ההסטה על ידי שבירה גדולה, כמו במרכזי שברים, ההסטה על ידי קימוט קטנה. שברי הצין שבשולי מבנה חתירה הם אם כן ביטוי להתרוממות והטית המונוקלינה, ולא לקו שבירה ראשי הנמשך מעבר לשולי המבנה. תוצאה זו מביאה למסקנה שמבנה חתירה התרומם במהלך הפלייסטוקן, אך לכך עדיין לא נמצאו עדויות לאורך האגף התלול של המבנה.
- (ב) הופעה של שברים מדורגים, בזוית חדה לכוון אזור השבירה, תוארה במקומות רבים בעולם ובקני מידה שונים. השברים החשופים במפלס גג חבורת יהודה לאורך שולי מבנה חתירה הם דוגמא להופעה כזו כאשר רכיב התזוזה העיקרי אנכי וניתן לראות לאורכם את הביטוי לשינויים המקומיים בשדה המעוות, ובפרט את ההתקצרות בניצב לשברים באזורי הדירוג.
- (ג) קיומה או חסרונה של דיסהרמוניה בין מעוות חבורת יהודה למעוות תצורות מנוחה ומישש, כתוצאה מפזור המעוות בקרטון, תלוי בגודל הזריקה על השברים בחבורת יהודה מחד ובעובי תצורת מנוחה מאידך. כאשר ההסטות במפלס חבורת יהודה גדולות יחסית לעובי מנוחה, השברים חוצים את החתך כולו והמבנה הרמוני (כיפת דרוך). כאשר ההסטות קטנות יחסית, מתפזר המעוות בנפח גדול של תצורת מנוחה והמבנה דיסהרמוני (כיפת מעלה צין). באזור שדה צין מוחרפת התופעה על ידי תצורות ע'רב וטקיה, והשבירה הנראית ביחידות אלו איננה משקפת ככל הנראה את הגיאומטריה והעוצמה של השבירה במפלס גג חבורת יהודה.
- (ד) המעוות בקרטון מנוחה בא לידי ביטוי בהופעת עורקי קלציט מסיביים, בהמשך ובמקביל לשברים ב"תשתית", ועם סימני החלקה על דפנותיהם. העורקים מצביעים על כך שנפחים גדולים של מים עברו בקרטון באזור השבר בזמן פעילות השבירה; שכמויות ניכרות של קלציט משני, ממקור פנימי או חיצוני, הושקעו בתוך סדקי מתיחה בקרטון, וכנראה גם בגוף הסלע, ויצרו קרטון מוקשה ורווי עורקים; ושמאחר יותר היוו עורקי הקלציט מישורי גזירה ואתרים של ריכוז המעוות (strain localization). בסך הכל מראה הקרטון התנהגות של strain hardening מקרוסקופי, אשר ידוע לגבי סלע זה גם מנסיונות מעבדה.

ספרות

בן תור, י., וע. פרומן, 1951, המפה הגיאולוגית של ישראל, 1:100,000. גליון 18: עבדת, ת"א, 98 ע'.

ברטוב, י., 1974, השברים ומבני הכיפות של מרכז סיני, בעיות סטרוקטורליות ופליאוגיאוגרפיות, עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

- זילברמן, ע., 1991, התפתחות הנוף בנגב המרכזי, הצפוני והצפון מערבי בנאוגן ובקוורטר, עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- פרוינד, ר., 1962, בעיות סטרטיגרפיות של הקנומן-טורון בישראל, עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- רודד, ר., 1982, מפה גיאולוגית 1:50000, גליון אורון, המכון הגיאולוגי, ירושלים.
- שמיר, ג., 1983, בעיות סטרוקטורליות לאורך קו נחל צין, עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- Bartov, Y., Y. Arkin and G. Steinitz, 1976, The Zin fault - an example of Senonian faulting, *Isr. J. Earth Sci.*, 25, 40-44.
- Bentor, Y. and A. Vroman, 1954, A structural contour map of Israel (1:250000) with remarks on its dynamic interpretation, *Bull. Res. Council. Isr.*, 4, 125-135.
- De Sitter, U., 1962, Structural development of the Arabian shield in Palestine, *Geol. in Minj.*, 41, 116-124.
- Issar, A., H. Karnieli, H.J. Bruins and I. Gilad, 1984, The Quarternary geology and hydrology of Sede Zin, Negev, Israel, *Isr. J. Earth Sci.*, 33, 34-42.
- Shaliv, G. and G. Baram, 1986, Site area fault investigation along the Zin Line, PSAR App. 2.5D, The Israel Electric Corporation.
- Shamir, G., 1991, Zin project - fault mapping, unpublished report, The Israel Electric Corporation.
- Shaw, S.H., 1947, Geological map on a scale of 1:250000 of southern Palestine, with explanatory notes, Gov. Palestine Press Jerusalem, 42 pp.

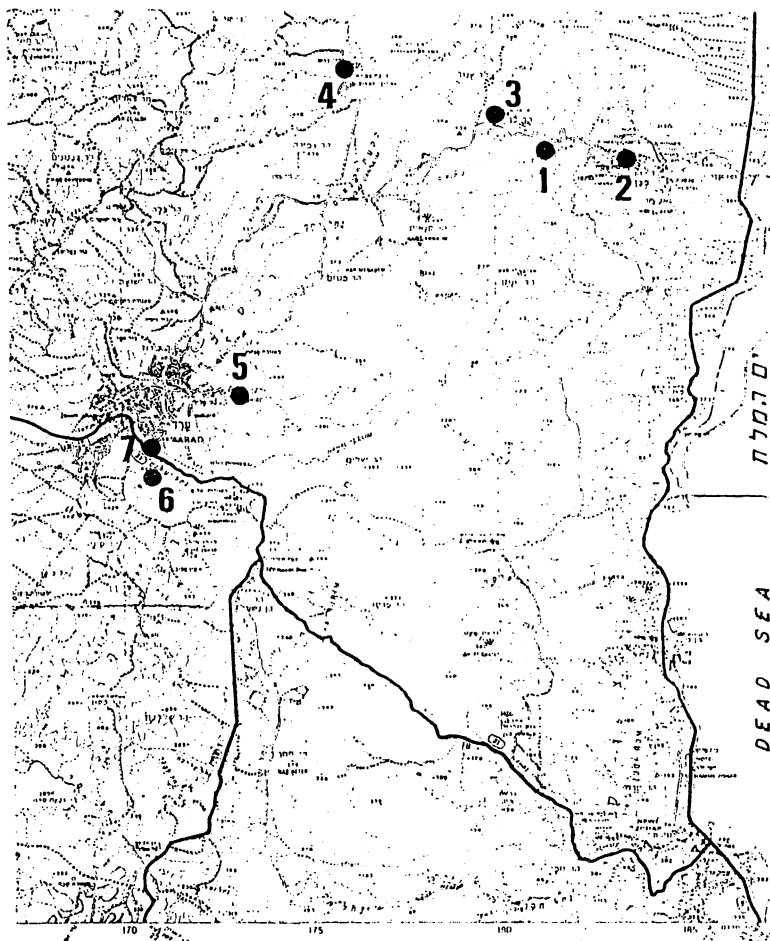
מינרליזציות אפיגנטיות באזור ערד וקידוח הגז בהר בן יאיר

גילת, א.¹ אילני, ש.¹ בר-מטוס, מ.¹ אילון, א.¹ גלבו, י.²

¹ המכון הגיאולוגי, ירושלים; ² חברת נפטא

הקדמה

הסיור יערך בשוליים המערביים של בקע ים המלח בסביבה הקרובה ביותר לשבר טרנספורמי. הסיור יכלול מספר נקודות תצפית ומחשופים (איור 1) המייצגים את סלעי המשקע הימיים מגיל קרטיקון עליון. רוב הסלעים הינם קרבונטים שבחלקם עברו דולומיטיזציה ותהליכי מינרליזציה אחרים. מטרת הסיור הינה להכיר את הסטרויגרפיה, טקטוניקה ותופעות מינרליזציה אפיגנטיות ולנסות לראות את הקשר ביניהם. תאור גיאולוגי ורשימת ספרות רלוונטית מפורטת נמצאים אצל גילת (1992).



איור 1. מפת
מסלול הסיור.

AGE	גיל	SYMBOL	סימול	THICKNESS	עובי (מ')	LITHOLOGY	ליטולוגיה	MEMBER / FORMATION	חבורה / פרט	GROUP	חבורה
NEOGENE-QUATERNARY	HOLOCENE	Q	הולוקן	10-100				Alluvium	אוליביט		
	MIOCENE-PLEISTOCENE	Nh	מיוקן-פלייסטוקן	100-180				Lison Fm.	לוצ'ליסון		
UPPER CRETACEOUS	PALEOCENE (?)	Kuhr	פלאוקן (?)	20-180				Mafrurim Fm.	חצ' טקיה	MT. SCOPUS GROUP	חבורת הר הצופים
	MAASTRICHTIAN	Kug	מאסטרכט					Ghareb Fm.	חצ' טרב		
	CAMPANIAN	Kumi	קמפן	30-50				Mishash Fm.	חצ' מ'שש		
	SANTONIAN	Kum	סנטון	6-40				Menuha Fm.	חצ' מנוחה		
	Turonian	Kun	טורון	20-40				Neger Fm.	חצ' נצר		
		Kush		16-50				Shivta Fm.	חצ' ש'כטה		
	UPPER CENOMANIAN	Kud	קנומן עליון	0-35				Derarim Fm.	חצ' דרורים		
		Kuhl		60-70				TAMAR Mbr.	פרט תמר		
		Kuha		50-90				AVNON Mbr.	פרט אבנון		
		Kuhz		35-50				Zafit Mbr.	פרט צפית		
		Kuhe		40				EN YONAS'AM Mbr.	פרט ע'ן י'קעם		

Base untoposed
בסיס לא מושוף



Alluvium
אוליביט



Clay
חרסית



Sandstone
אבן-חול



Limestone
גיר



Dolomite
דולומיט



Chalk
קירטון



Marl
חולמר



Microporous limestone (Marl)
גיר מיקרופורוס (חולמר)



Dolomitic marl
חולמר דולומיטי



Chert
צור



Igneous contact
קוויטת יג'ית

פ Fossiliferous פוסיליפ'ר
 °°° Carbonate pebbles חר'וקי ק'נונים ט'ש'ט פ'אט'ונים
 . Chert pebbles חר'וקי צור
 < Sphagnum ספ'גנום
 P Phosphorite פוספוריט
 S Siluminous סילומינוס

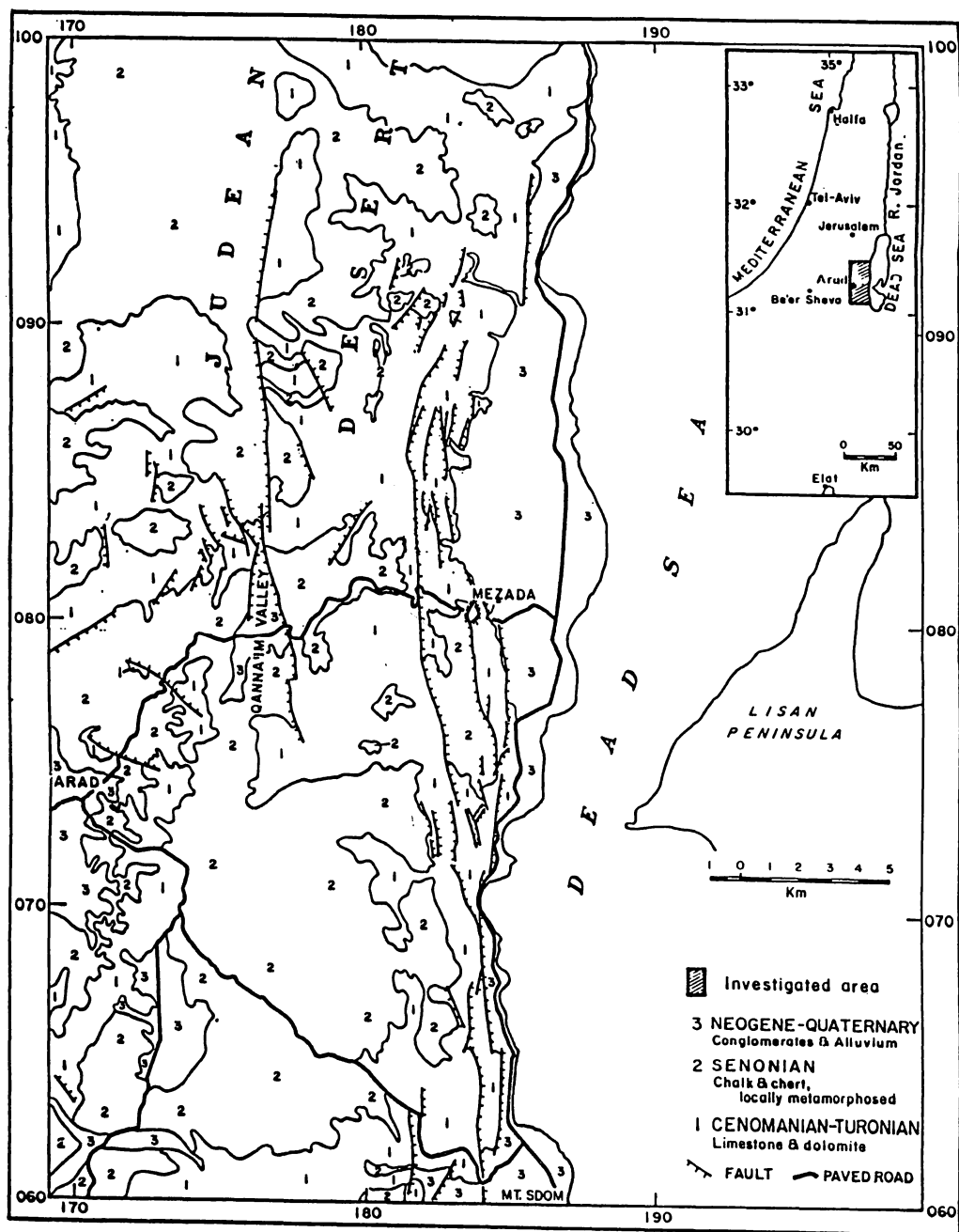
איור 2. חתך גיאולוגי של המרווח קרטיקון עליון - פלייסטוקן בשוליים המערביים של בקע ים המלח (לפי עגנון, 1983).

רקע סטריגרפי

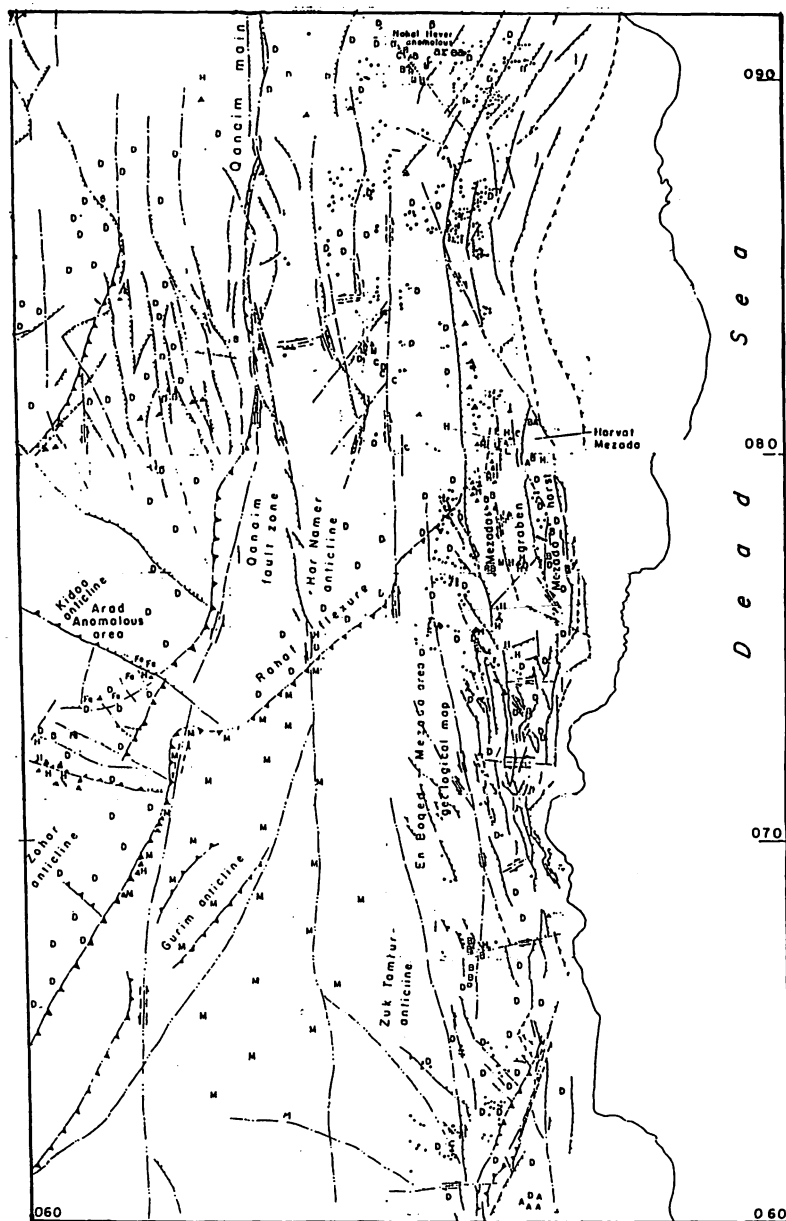
החתך הגיאולוגי של האזור מוצג באיור 2. הסלעים העתיקים ביותר חשופים באזור בתוך הקניונים העמוקים והם שייכים לפרט עין ירקעם (תצורת חצבה) מגיל קנומן עליון ומיוצגים ע"י קרטון וחואר. עליהם מונחים קרבונטים שונים: בחלקם דולומיט משוכב (השייך לפרטים צפית ותמר של תצורת חצבה), בחלקם גיר, קרטון וחואר שעברו דולומיטיזציה במדה זו או אחרת יחד עם צור, חרסית, פוספוריט, אבן-חול וקונגלומרט. החתך כולל את תופעות החרתורים. דולומיטיזציה ותופעות מינרליזציה אחרות הם לדעת גילת (1992) תוצאה של תהליך הידרותרמלי-מטסומטי שמתרחש מסוף המיוקן (איורים 4,3).

H.Y.	Epoch	Formations	Tectonic events	Geochemistry
0	Holocene (Chellian)	Same' Fin. Lisan Fin.		
1	(Oldovan) Pliocene	Golan - Jordan valley and transjordan volcanics. 'Amra Fin. Arava conglomerate	faulting. Valleys of 3 - 4 order displaced Forming the northern Dead Sea graben.	Halite. Gypsum. Asphalt. Carnotite. H ₂ S Metallicization: U, Th, V, Cr, Ni, Fe, As, Mo, Hg, Cu, Sr, Cd, Tl, Nb, Zr, Pb, Zn, Ba, Ti, Ag, Au and Rare Earth elements
2	Pliocene	Sedom Fin.		
3		Zemach - 'En Yehav volcanics Cover basalt		
4		National Park Volcanics Hazar Fin.	Valleys of 4 - 6 order displaced	Dolomitization - silicification - Sr, Mg, Cr, Co, Al, Fe, Si
5	Miocene	Zinlag Fin. in the west of Judea	Additional uplift and thrusting in southern Judean Mountains (Tortonian ?)	
6		Ilazeva conglomerate	Strike - slip movements along Qana'im wrench fault and its branches of N and NNW trend. Forming the northern Arava depression and the southern Dead Sea graben.	Matruhim metamorphism
20	Neogene		Transform (Rift), strike - slip movement and secondary normal faulting.	
	Paleogene			
		Zora Fin. Taqlye Fin. Gharab Fin.	Senonian faulting - Thrusting - folding of the Syrian Arc structures, - mainly NE and of mostly N - S trend. Faulting - folding along Sinai - Negev zone. Forming of the N - S trending depressions (Mezada and Qana'im grabens, possible - also Rift - valley). Rifting in the Red Sea.	Silicification
70	Mastricht			
	Campian	Mishash Fin. Menula Fin.		
88	Coniac			
	Turon	Gin'a Fin.	N - S trending Intra - Turonian reverse faulting	

אור 3. לוח זמנים של ארועים גיאולוגיים, טקטוניים ותופעות מניירות, אור יהודה.



איור 4-א'. מפה גיאולוגית של דרום מדבר יהודה.



LEGEND

— shear zone.	M - metamorphism of Haturim type.
--- shear zone, inferred.	B - barite mineralization.
== shear zone with horizontal slickensides.	Z - celestite mineralization.
— strike slip fault (shear zone).	II - halite mineralization.
— lineament exhibiting downfaulting.	▲ distinctive uranium mineralization of "yellow" type (mostly carnotite).
▲ flexure, arrows indicating downslip.	Fe - breccia cemented by iron minerals together with calcite, barite and halite
D - dolomitization.	A - asphalt seepages.
o circular dolomite bodies ("bowls").	
C - calcitization and recrystallization of limestone, development of sublithographic "marble".	

איור 4-ב'. מפה סטרוקטורלית ותופעות מינרליזציה עיקריות, דרום מדבר יהודה.

רקע סטרוקטורלי

המבנה של אזור ערד מאופיין על ידי שני טיפוסים סטרוקטורליים:

- (1) מונוקלינות השייכות למערכת הקשת הסורית הכוללת את קמטי הנגב הצפוני ומדבר יהודה. אלה מוגבלים באגפים הדרום-מזרחיים ע"י כפיפות חריפות שכיוון השלט הוא צפון מזרח – דרום מערב (איור 4). מתחת לכפיפות העיקריות נמצאים שברי תשתית שלדעת גילת (1992) הם אופקיים מעיקרם.
- (2) בצד הצפון מזרחי נמצאת מערכת שברים אופקיים השייכים למערכת של בקע ים המלח וכיוונם צפון-צפון-מערב, ומערב-מזרח. מערבה לשברים אלה קיימת מערכת העתקים שכיוונה צפון-דרום והבולט ביניהם הוא העתק בקעת קנאים אשר בתצלומי לוויין ניתן לעקוב אחריו ממכתש חצרה בנגב ועד לבקעת הורקניה בצפון מדבר יהודה. מהעתק זה מסתעפים שברים קטנים בכיוון צפ'-צפ'-מז' (איור 4) היוצרים מדרגות וכפיפות מקומיות (כמו בבקעת קנאים), קעררים דמויי "V" והעתקים אנכיים בהם הזריקה מגיעה לכדי 300 מ' (נ.צ. 177/078). אורכם של כמה משברים אלה מגיע עד 15 ק"מ. מזרחה מבקעת קנאים ניתן לראות לפחות 4 העתקים ארוכים שכיוונם צפון-דרום (איור 4) המחוברים למערכת שלמה בעזרת שברים קצרים יחסית שכיוונם מערב-מזרח. הבולקים שביניהם מסתובבים בכיוון דומיננטי נגד השעון (גילת, 1992).

תחנות הסיוור

1. תצפית לגרנן מצדה (נ.צ. 1814/0807) (איור 1)

ממרומי המצוק נצפה לגרנן ולהורסט מצדה. ניתן יהיה להבחין בסטרוטיגרפיה, טקטוניקה, בגופים דולומיטיים מעוגלים ("צלחות") ותופעות של דולומיטיזציה מסיבית.

הדולומיטיזציה מתבטאת במחיקה של סטרוקטורות ראשוניות והופעה מסיבית של החתך שקודם לכן היה משוכב. עוצמת הדולומיטיזציה גוברת בדרך כלל ממערב למזרח ומגיעה לשיא בשטח הצוקים העיקרי של ים המלח. באזור ערד (איור 4) מתפתחת דולומיטיזציה כמעט על כל אזור גזירה בכיוונים צפ'-דר' וצפ'-צפ'-מז' ולאורך רוב השברים הנמצאים בנטיה זהה. גם רוב הכפיפות של אזור מדבר יהודה עברו דולומיטיזציה. בקרבת גרנן מצדה התפתחה דולומיטיזציה מסיבית בכל חתכי אבן הגיר של חבורת יהודה.

תופעת הדולומיטיזציה מתבטאת גם ביצירת גופים דולומיטיים מעוגלים ("קערות") המתפתחים בתוך החתך מגיל קנומן עליון (פרט אבנון, אזור נחל חמר), טורון ובבסיס של החתך הסנטוני לאורך צוקי ים המלח מערבה משבר בקעת קנאים. במקרים מסוימים ניתן לראות את התפתחותם על הגוש הירוד לאורך קו השבר. Gilat et al. (1978), Friedman et al. (1979) ורז (1983) דנו בגנזה של תופעות אלה. לדעת Friedman et al. (1979) ה"קערות" הן ביטוי לבליה דיפרנציאלית של שונות טורוניות בעלות גלעין פנימי רך. Gilat et al. (1978) ורז (1983) מצביעים על קשר בין שברים וסדקים לבין דולומיטיזציה הקשורה בגידול בנפח הסלע. עיבוי מבטא התפתחות סביב מפגשי סדקים שכן אזורים כאלה זכו להספקה הטובה ביותר של תמיסות מדלמטות ואילו המרכז הנמוך של ה"קערה" מבטא דרגת התפתחות נמוכה בהיותו מרוחק ממקור הספקת התמיסות. לדעתם הדולומיטיזציה התרחשה כתוצאה מחדירת תמיסות חמות בעלות יחסי Mg/Ca גבוהים. תופעה אחרת היא עורקים של דולומיט בעובי

0.2 ס"מ עד 15 מ' או גופים שטוחים דיסקורדנטיים ברוחב של עד 50 מ' ובאורך של עד 4 ק"מ (מעלה יאיר).

2. הסוללה הרומית במצדה (נ.צ. 1834/0805) (איור 1).

בתחנה זו נצפה בשבר המערבי של הורסט מצדה (כפף מול בלוק מורס), בדולומיטיזציה, במינרליזציות של קלציט כאשר גבישי הקלציט מגיעים לגודל של מספר מ"ק. במרחק של מספר מאות מטרים לכיוון דרום מערב רואים תופעות של מינרליזציות בריט ובריט עם קלציט, הנפוצות מאד באזור. תופעות אלה נמצאות בתוך סלעי דולומיט אפיגנטי. Gilat and Lang (1985) וגילת (1992) מתארים תופעות אלה על פי אינקלוזיות נוזליות כתופעות הידרותרמליות מטסומטיות. מינרליזציה נוספת מאוחרת יותר היא של הליט וגבס בעיקר בתוך שכבות חרסית של החתך הסנוני מתחת לצור הכפול, לפעמים עם מינרלי אורניום משניים צהובים (בעיקר קרנוטיט). לפי גילת (1992) המינרליזציה גבס-הליט-קרנוטיט (יחד עם התעשרות ביסודות קורט, ביניהם בולטים T1 ועד חצי אחוז Mo) נוצרה מתמלחות שפעלו יותר גבוה מפני מי תהום או ממפלס שאליו יכולים להגיע מים ארטזיים (איור 5). מנגנון אפשרי ליצירתם הוא הוצאת נוזלים בכח הדחיסה בעת סדימנטציה מהירה בתוך שקע ים המלח, שנוצר במשך מליון השנים האחרונות. בתוך גרבן מצדה מפוזרות בכמות רבה מאד תתיכות ובלוקים של דולומיט מכל סלעי הסביבה על פני סלע אלוביאלי חולי-חרסיתי דק. גושי דולומיט אלה מתמעטים מתחת לפני השטח, הם אכולים ומלאים בחללי המסה שבתוכם נמצאים גבס, הליט וקרנוטיט. את המסת הדולומיט והשקעת מאסף מינרלים זה ניתן להסביר בהמסה ע"י תמיסות רצנטיות או סב-רצנטיות.

3. הר בן-יאיר (נ.צ. 1730/0742) (איור 1)

בתחנה זו נעשה תצפית מראש גבעה קטנה בנויה מעורקי קלציט על גופים דולומיטים מעגליים ("צלחות"). תינתן אפשרות לבדוק דולומיטים אפיגנטיים שנוצרו כתוצאה מהחלפה של גיר טורוני ושל קרטון סנוני.

קידוח הר בן-יאיר ממוקם בתוך חזקת ערד, כ-4 ק"מ צפונית מזרחית משדה הגז הקנאים. הקידוח ממוקם במבנה, בו הסגירה היא תוצאה של:

1. הצטמצמות בעובי החתך בין גג חבורת יהודה לגג תצורת זוהר.
2. פזת קמוט של אנטיקלינה אסימטרית עם שבר הפוך "קבור" בשוליה הדרום מזרחיים.
3. תזוזה של כ-2.5 ק"מ, לאורך קווי שבירה שכיוונם צפון-דרום (Strike Slip) שהעמידה חתך גג חבורת יהודה – גג זוהר עבה יותר ממערב לשבר מול חתך דק יותר מצדו המזרחי, באנטיקלינת הר בן-יאיר. שכבת המטרה – גיר זוהר.

השטח הסגור במבנה הר בן-יאיר משתרע על כ-10 קמ"ר, כשגובה הסגירה מגיע ל-55 מ'.

תחזית תפוקה 6.7 ביליון רגל מעוקב גז.

עלות קדיחה של הקידוח, המתוכנן לעומק 1,300 מ', כ-1.25 מיליון דולר ועם השלמתו מחירו עשוי להגיע ל-1.5 מיליון דולר.

החתך הסטרטיגרפי הצפוי בקידוח הר בן-יאיר:

קיימת אפשרות שלחלופין, בעת הסיוור, יתבצע קידוח שלהבת הממוקם כ-2.8 ק"מ דרומית מזרחית מקידוח הגז זוהר 5.

בגיר זוהר - גז.

4. תצפית לקניון צאלים (נ.צ.0832/1763) (אזור 1)

נתבונן בטיפוסי מבנה עיקריים שהתפתחו לאורך השבר האופקי של בקעת קנאים

1. סינקלינה דמוית V הבנויה ממספר בלוקים נטויים;
2. בלוק תלוי ונטוי שעלה מול הכפף;
3. שברים הפוכים;
4. גזירה.

ממצוק קניון צאלים נתבונן בחתך הסטרטיגרפי החל מפרט צפית של תצורת חצרה ועד לתצורת מישאש, וכן נראה את התפתחות הדולומיטיזציה בסלעים השונים.

5. אנדרטה, אזור בתי המלון (נ.צ. 1730/0742) (איור 1)

ממרומי ההר (כ-600 מ' מעל פני הים) הנמצא בקרבת הר כידוד, ניתן לראות את כפף זוהר, את אחד מהשברים השייכים למערכת בקעת קנאים שכיוונו מע'-צפ'-מע' (בלוק שעלה מול הכפף

צפונה לו), וסימני גרירה אופקית לכיוון צפ'-צפ'-מז'. סלעי המשקע החשופים שייכים לחבורות יהודה, הר הצופים וסקייה, גילם נע בין קנומן תחתון לניאוגן.

באזור זה נראה תופעות מינרליזציה בחלק התחתון של תצורת מישאש. המינרלים העיקריים הם פוספטים של אלומיניום וברזל וסולפטים ברזליים. הצבע הירוק של הסלעים נובע מקיומו של המינרל מיטרידטיט (mitridatite), $[\text{Ca}_2\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 1.55\text{H}_2\text{O}]$, תוצר אלטרציה של אפטיט.

המינרל העיקרי של אלומיניום-פוספט הוא גויזיט (goyazite) שהרכבו: $(\text{Sr}, \text{Ca})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5\text{H}_2\text{O}$. הצבע הצהוב-כתום נובע מנוכחות המינרל ג'רוסיט (jarosite) $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$. יחד עם מאסף מינרלים זה נפוצות גם תחמוצות ברזל וקרומי מלח. האנומליות הגיאוכימיות הבולטות הן של Sr, U, V, Mo, Cr, Y, Cd. ריכוזי יסודות אלה עשויים להגיע לכמה אלפי ppm.

6. נחל רוגם (נ.צ. 1707/1719) (איור 1).

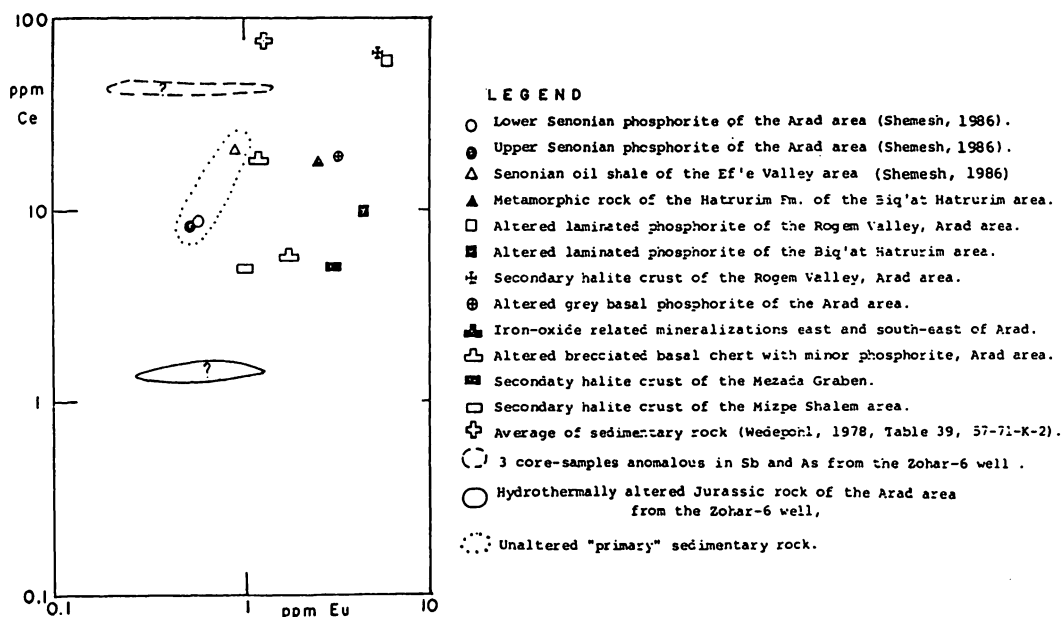
יובל דרומי קטן (נחל רוגם) של נחל יעלים חותך דרך הצור העיקרי של תצורת מישאש ודרך קרטון מנוחה (איור 6). כאן בבסיס תצורת מישאש נתבונן בחתך פוספטי בעובי 0.5–1.0 מ', הנחשף מתחת למצוק הצור, בקרבת המגע עם תצורת מנוחה. לחתך הופעה אופינית רכה, צבעו לבן-אפור והוא מאופיין ע"י מגוון תהליכי אלטרציה ומינרליזציה משניים. הופעתו לא רגולרית ובלתי רציפה והוא נחשף על שטח של מספר מאות מ"ר. יתכן שהחתך המקביל לשכבה זו באזורים אחרים היא אחת משכבות הפורצלניט. ניתן להבחין בשתי שכבות: שכבת פוספט מסיבי ומעליו שכבת פוספט למינרי עשיר במינרלי חרסית. ההרכב המינרלוגי של הפוספט שונה מזה של הפוספט הכלכלי המופיע בחלקים העליונים של תצורת מישאש בבקעת ערד. בחתך זה, יחד עם הפרנקוליט נפוצים מינרלים משניים של פוספט: פלואור-אפטיט, קרבונט-אפטיט, קלציט, סטרונציום-, ומגנזיום-אלומיניום-פוספטים. כמו כן מופיעים מינרלים מחומצנים של אורניום, חרסיות, קוורץ, קלציט, תחמוצות ברזל, ומגוון מלחים (כלורידים, סולפטים, ניטרטים). אלה מלווים בריכוזים אנומליים גבוהים של יסודות קורט, הקשורים בעיקר עם המינרלים המשניים. Sr ו-Mg קשורים עם האלומיניום-פוספטים; Ti, Mg, Cr, Ni, V, Zn קשורים עם מינרלי חרסית ותחמוצות ברזל; U מופיע במינרלי אורניום משניים ובשריג האפטיט; Cd קשור לפרנקוליט. בבדיקות באמצעות מיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM) נמצאו חלקיקים קטנים של זהב (1–5 מיקרון) בריכוזים נמוכים מאד (עד ל-0.1 ppm). הזהב קשור בעיקר למלחים המסיסיים (Gilat, 1987).

מאסף המינרלים המשניים נוצר לפי Bar-Matthews and Ayalon (1991) כתוצאה מריאקציות בין אפטיט לחרסיות בתנאים מחמצנים. בלית הפוספוריט החלה בתנאי pH נמוכים שלוו בהמסת הקלציט ובעקבותיה המסה של פרנקוליט והתגבשות פלואור-אפטיט. ריאקציות בין מינרלי חרסית ופרנקוליט, הביאו ליצירת מאסף של מינרלים אלומינו-פוספטיים. חלק מהמינרלים המשניים עשירים בכלור, אולי בגלל שתהליכי האלטרציה התרחשו בנוכחות תמלחות כלורידיות. במהלך תהליכי האלטרציה, יסודות קורט נשטפו והושקעו מחדש בפאזות האותיגניות. תהליכי האלטרציה נפוצים בחתך זה בעוד שהם זניחים בחתך של הפוספוריט הכלכלי, מכיוון שאופק זה מהווה תעלת הובלה יעילה לתמיסות הנוודות בחתך, ונחסמות מלמעלה בחתך עבה של צור מסיבי בעל חדירות נמוכה. זמן היווצרות תהליכי האלטרציה לפי Bar-Matthews and Ayalon (1991) אינו ברור, בעוד שלפי גילת (1992) הוא פלייסטוקני. מאסף זה חודר במקומות כעורקים לצור המסיבי ולכן סביר להניח שתהליכי האלטרציה מאוחרים ליצירת הצור הסנוני.

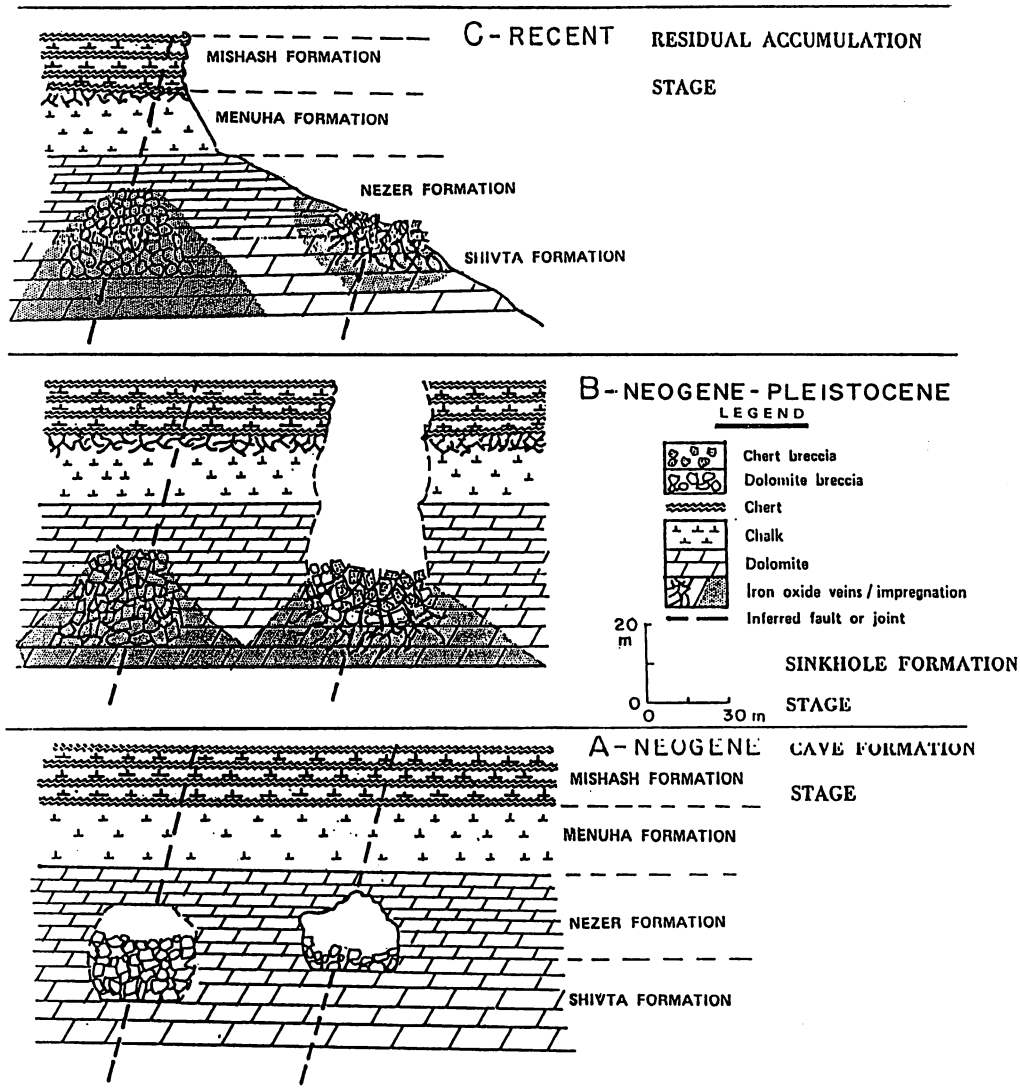
תופעות המינרליזציה מכילות גם ריכוזים אנומליים של עפרות נדירות. במיוחד מענינת העשרה סלקטיבית ב-Eu ו-Ce (איור 7). על פי ההסבר המקובל בספרות על נפיצות עפרות נדירות, טוען גילת (1992) כי זוהי מינרליזציה הידרותרמלית. השברים, אזורי הגזירה וסלעי הסביבה הם לדעת Gilat and Nathan (1988) וגילת (1992) המזינים העיקריים למקורות השונים של תופעות המינרליזציה.

7. נחל יעלים (נ.צ. 1705/0732) (איור 1)

בתחנה זו נראה גופי ברקציה בתוך דולומיטים אפיגנטיים מתצורות שבטה ונצר המלוכדים על ידי תחמוצות ברזל. נתבונן במינרליזציה ברזלית בעורקים וסדקים החודרים את סלעי הסביבה (איור 8). המימדים של גופי הברקציה הם עד 60 מ' במימד הרוחב ועד 30 מ' במימד האנכי החשוף. גודל גושי הדולומיט בגופי הברקציה הוא מספר ס"מ עד כ-1 מ'. הם מלוכדים על ידי תחמוצות ברזל ומינרלים נלווים בעיקר קלציט, בריט, גבס וקוורץ. המינרליזציה הברזלית בצמנט ובעורקים מורכבת בעיקר מהמטיט וגאית המועשרים ביסודות קורט כמו Mo, As, Zn, V, U, Ni, Cr עד לשלושה סדרי גודל יותר מריכוזם בסלעי הסביבה: מינרל הברזל הראשוני הוא המטיט שעבר אלטרציה בשלבים מוקדמים של המינרליזציה לגאית. האורניום קשור בעיקר להמטיט וספוח אליו. נמצא שווי משקל בין האורניום לבנותיו ולכן סביר שגיל הצבת המינרליזציה הברזלית בגופי הברקציה קדום למליון שנה.



איור 7. גרף המתאר את ריכוזי Ce כנגד Eu (סקלה לוגריתמית) בסלעים פוספטניים, פצלי שמן וסלעים טורוניים וסנוניים שעברו אלטרציה מאזור מדבר יהודה.



איור 8. שלבים אפשריים בהצבה של מינרליזציה ברזלית ליד ערד.

- אילני (1989) מציע מספר שלבים בהתפתחות גופי הברקציה והמינרליזציה הברזלית:
1. חדירה של תמיסות עשירות במגנזיום לאורך אזורי סדוק והצבה של דולומיטיזציה אפיגנטית בסלעים מגיל קנומן וטורון.
 2. המסת הדולומיט האפיגנטי, יצירת סדקים אנכיים. החללים מולאו בגושי דולומיט אפיגנטיים מסלעי הסביבה.
 3. במקומות, קרטון מנוחה וצור מישאש התמוטטו לתוך שקעים אלה. מים מטאורים חדרו לתוך חללי ההמסה ושטפו את הקרטון והמסלע הפריך והשאירו את הגושים של הצור והדולומיט.
 4. תמיסות נושאות מינרליזציה חדרו אל משור הברקציה והשקיעו בחללים מינרלי ברזל, קוורץ, קלציט וגבס. התמיסות היו מועשרות בקלציום ולכן חלק משולי הגושים הדולומיטים עברו דהדולומיטיזציה.

ספרות

- אילני, א., 1989. מינרליזציה מתכתית אפיגנטית לאורך אלמנטים טקטוניים בישראל. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה, אוניברסיטת תל אביב.
- גילת, א., 1992. תופעות טקטוניות ומינרליזציה נלווית בדרום יהודה, ישראל. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב.
- עגנון, א., 1983. התפתחות אגני השקעה ומורפוטקטוניקה באזור דרום מצוק העתקים המערבי של ים המלח. חיבור לשם קבלת תואר מוסמך במדעי הטבע, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- רז, א., 1983. הגיאולוגיה של מדבר יהודה. חיבור לשם קבלת תואר מוסמך במדעי הטבע, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- Bar-Matthews, M. and Ayalon, A., 1991. Alteration processes in the basal phosphorite section of the Mishash Formation, near the city of Arad, Israel. *Isr. J. Earth Sci.*, Vol. 40, p. 65–75.
- Friedman, G.M., Arkin, Y. and Aharoni, E., 1979. Patch or pinnacle reefs of Western Margin of Dead Sea (Israel). *Sediment.*, Vol. 26, p. 143–149.
- Gilat, A., 1987. Gold-uranium bearing mineralization related to halite in the Ro'gem Valley, Arad area, Israel. *Israel Geol. Surv., Rep GSI/3/87*, 20 pp.
- Gilat, A. and Lang, B., 1985. Fluid inclusions in barite megacrystals from Nahal Boqeq (southern Judean Desert). *Israel Geol. Soc. Ann. Meet.* p. 29.
- Gilat, A., Mimran, Y., Bogoch, R. and Roth, Y., 1978. Circular and tabular (discordant) dolomite bodies in the South Judean Desert, Israel. *Jour. Sed. Pet.*, Vol. 48, p. 1159–1166.
- Gilat, A. and Nathan, Y., 1988. Hydrothermal-metasomatic activity in the Judean Desert. 9th Conf. on Min. Engin., Proc. pp. E-31–E-38.
- Mimran, Y. and Michaeli, L., 1986. The transition of a major fault into secondary faults in chalk and its effects on the mechanics of the host rock. *Isr. J. Earth Sci.*, Vol. 35, p. 114–123.

רקע

נפטא חברה ישראלית לנפט בע"מ, נוסדה בשנת 1956, כדי לעסוק בחיפוש, בקידוח, בפיתוח ובהפקה של נפט, גז ומחצבים אחרים. החל ב-1969 עברה השליטה בחברה מידי המדינה לחברת "לפידות". בתקופה שבין הקמתה להפיכתה לחברה-בת של "לפידות", ביצעה החברה סקרים סייסמיים, קידוחי מבנה ואיסוף מידע גיאולוגי, ו-38 קידוחי בוחן ופיתוח. כן השתתפה החברה בשישה קידוחי בוחן נוספים של חברות אחרות. בפעילות זו נכללו תגליות הגז בשדה זוהר.

מאז השינויים בבעלות על החברה, ב-1969, השתתפה "נפטא" בשעור של 2%-10% ב-100 קידוחי בוחן ופיתוח, שבוצעו על-ידי חברות אחרות. הקידוחים שהניבו תגליות נפט בוצעו במובלעת חוף אשדוד ובמובלעת שקמה שבחזקת אשדוד, על-ידי חברת "חיפושי נפט" (השקעות) ובכוכב 26 שבחזקת חלץ, על-ידי חברת "דלק". החברה עצמה החלה בביצוע קידוחים ב-1985 ועד סוף 1991 בצעה שמונה קידוחים, מהם שבעה בחזקת חלץ ואחד באזור ערד.

החברה הינה חברה ציבורית בשליטת המדינה מניותיה נסחרות בבורסה לניירות-ערך בתל-אביב. ופעילותה העיקרית ייזום והשתתפות בחיפושי נפט וגז.

מדיניות החברה לפזר סיכונים בהשקעותיה מתבטא בפעילותה כמפעיל עצמאי, וכשותפה בפרוייקטים המופעלים ע"י גורמים אחרים. לצורך הרחבת השקעותיה, גייסה ב-1992 החברה כ-20 מיליון ש"ח מהציבור בהקימה שותפות מוגבלת - "נפטא חיפושים" המשקיעה בסל פרוייקטים של חיפושי נפט.

לחברה זכויות נפט בחזקת ערד, מובלעות עם קידוחים מפיקים והסכם עם חברת לפידות בחזקת חלץ, רשיון ערד מזרח, והיתר נחל תנינים וכמו כן שותפות בחזקת אשדוד; רשיונות תמר, מצדה, נגב-נירים, נגב-אשקלון; היתרים נגב מד ומודיעין ומובלעות שקמה וחוף אשדוד.

הפקת גז

החברה מחזיקה בבעלותה זכויות נפט בחזקת ערד, הכוללות שלושה שדות גז מפיקים; זוהר, כידוד וקנאים שהתגלו בשנים 1958-1961. במשך 31 שנה הפיקה "נפטא" כ-50 ביליון רגל מעוקב גז טבעי. כיום ממשיכים להפיק משדות זוהר וכידוד. (שלושה קידוחים בשדה זוהר וקידוח אחד בכידוד).

על פי חוות דעתם של יועצי החברה להנדסת מאגרים מגיעה כמות הגז בת הפקה במאגרי החברה, ל-7.5 ביליון רגל מעוקבים נוספים. הגז שגילתה החברה מכיל בעיקר מתן (97.5%), אתן (1.8%), ופחמן דו-חמצני (0.3%). ערכו הקלורי של הגז נע בין 7,200 ל-8,600 קלוריות לכל ק"ג גז בקירוב, ושווה לערך ההיסק העליון של ק"ג מזוט כבד.

בארות הגז שבשדות מחוברים למתקן איסוף המצוי בשדה זוהר. כאן מופרדים מהגז נוזלים שונים הנלווים אליו בעת ההפקה. לאחר הפרדת הנוזלים, מוזרם הגז לתחנת מדידה ונמכר לחברת מג"ל. חברה זו משווקת אותו לצרכנים שונים, באמצעות מערכת צינורות המפוצלת לשתי שלוחות עיקריות – האחת למפעלים במישור רותם, והשנייה למפעלי תעשייה באזורי דימונה וירוחם. כמות קטנה משווקת גם לצריכה ביתית ולתעשייה בערד.

ההכנסה השנתית של החברה מהפקת גז נאמדת בשניים וחצי מיליון דולר לשנה.

כמות ההפקה השנתית הנוכחית כ-0.8 בליון רגל מעוקב גז.

הפקת נפט

החברה מפיקה כ-70 חביות נפט ליום מקידוחי כוכב 29 ו-30 שבחזקת חלץ, החברה שותפה בשיעורים קטנים בהפקת נפט בכוכב 26, עם חברות "לפידות" ו"דלק", ובהפקת גז ונפט מקידוחי שקמה ואשדוד, עם חברת הנפט הלאומית ושותפיה.

חיפושי נפט וגז

חלץ

החל מ-1984 החליטה החברה לקיים פעילות עצמית של חיפושי נפט בחזקת חלץ על-פי ההסכם עם חברת "לפידות" – בעלת החזקה. במסגרת פעילות זו בוצעו עבור החברה, על-ידי המכון למחקרי נפט וגיאופיזיקה, סקרים סייסמיים מקיפים ב-1984 – אליהם נוספו סקרים משלימים לאיתור קידוחים.

בשדה חלץ הופקו עד היום כ-17 מיליון חביות.

בהסתמך על המידע הגיאולוגי והנתונים הסייסמיים החדשים המצביעים על אפשרות של הפקה ראשונית נוספת של שני מיליון חביות נפט ביצעה החברה, החל מ-1985, יחד עם שותפים, שבעה קידוחים שעומקם נע בין 1,600 ל-2,200 מ'.

שניים מקידוחים אלה: כוכב 29 וכוכב 30 החלו להפיק ב-1987, כ-230 חביות/יום. בכוכב 28 ובכוכב 32 נתגלה נפט שאינו ניתן להפקה עדיין בגלל סיבות טכניות. התגלית בכוכב 28 מצביעה על השתרעות מעבר לגבולות המוגדרים של שדה כוכב – בכיוון צפון.

במשך חמש השנים האחרונות השקיעה החברה, כשישה מיליון דולר בסקרים ובקידוחים בחזקת חלץ. החברה מתכוונת להמשיך ולהשקיע באיזור – על מנת לאתר מלכודות נפט נוספות.

ערד

עם התדלדלות המאגרים בשדות הגז (זוהר, כידוד והקנאים) שבחזקת ערד ביצעה החברה סקרים גיאולוגיים וסייסמיים שונים – במטרה לאתר מאגרים נוספים, של נפט וגז. ב-1990 נקדח קידוח הר יעלים. בתחילת 1993 יבוצעו שני קידוחים נוספים: הר בן יאיר ושלחבת, ומתוכננים שני קידוחים אופקיים מתוך שני קידוחים קיימים; גורים וקנאים 1.

השתתפות בפרוייקטים של אחרים

החברה שותפה ומפעילה של עסקת מודיעין, המבוססת על רעיון של ד"ר ב. דרין. במסגרת העיסקה יבוצע קידוח לעומק של 5-6 ק"מ באיזור השפלה למציאת גז.

החברה משתתפת בפרוייקטים של יזמים אחרים, כשהבולטים ביניהם:

עסקות ההמשך לעסקת הנגב – שעיקר תכליתן חיפושי נפט ימיים במדף היבשתי וקידוח עמוק באזור הבשור, ועסקת ים המלח שבמסגרתה בוצעו שלושה קידוחים בהשקעה של 30 מיליון דולר, ביניהם קידוח סדום עמוק הנמצא בשלבים מתקדמים של קדיחה.

על מנת להגדיל את סל הפרוייקטים שלה מזמינה החברה פרוספקטים אצל גיאולוגים יזמים מהקהילה הגיאולוגית בארץ (קדוחי הר בן יאיר ושלחבת מבוססים על רעיונות ממקור זה).

כמו כן, בוחנת החברה אפשרות להשתתף ביחד עם גורמים נוספים בפיתוח שדות נפט ברוסיה.

רשימות

רשימות

החברה הגיאולוגית הישראלית מודה:

לנפטא חברה ישראלית לנפט בע"מ

עבור הסיוע בהוצאה לאור של חוברת זו

למכון הגיאולוגי

על עזרתו בארגון הכנס

לחברת פנטומפ

עבור תצלום השער הקדמי

לס. לוי, א. פאר ונ. שרגאי

על עבודות השרטוט

ואחרונים חביבים

– למדריכי הסיוע

שער קדמי: תצלום אוויר של החלק המרכזי של הר סדום, מישור עמיעז ונחל פרצים. ניתן באדיבות ע"י חברת פנטומפ.
שער אחורי: מגדל קידוח לגז, מופעל ע"י חברת נפטא חברה ישראלית לנפט בע"מ.

עיצוב סמל הכנס: תמנת ירון, יהודה הלוי 36, הרצליה
סדר צילום והפקה: דפי לייזר הוצאה לאור (1992) בע"מ 02-829770



ANNUAL MEETING
ARAD 1993

FIELD TRIPS GUIDEBOOK

EDITORS:

Y. Mimran, H. Gvirtzman, A. Burg

15–18 March 1993



Israel Geological Society Annual Meeting — Arad, 1993

FIELD TRIPS GUIDEBOOK

