



מדריך סיור מהר עריף להר כרכום:

התפתחות המבנה והנוף של הנגב המרכזי

יואב אבני

המכון הגיאולוגי לישראל



צוות הסיור של החברה הגיאולוגית:

יהודית הרלבן, יהל אשד, רלי ולד, יעל אברט, נטע זכות, איתמר קרן, אורי דור

3	מבוא
3	השחקנים הראשיים הבונים את האזור
4	היסטוריה גיאולוגית
5	מבני הקשת הסורית בנגב המרכזי מאז ראשית התפתחותם
7	מערב קמר רמון
10	קמר עריף – בדד
11	קער עבדת
12	קער לויץ - נקרות
13	קער הנגב הדרומי
15	העתקי רצועת הגזירה נגב – מרכז סיני בחלקו המערבי של הנגב המרכזי
15	קו רמון
16	קו עריף-בתור
17	קו פארן
18	הפאזות המורפוטקטוניות
18	יצירת מישור הגידוע הרגינולי (אוליגוקן מוקדם – מיוקן מוקדם)
20	הפעילות הטקטונית המאוחרת להשקעת תצורת חצבה (מיוקן תיכון – הווה),
22	מסלול הסיור
22	יום 1: ממצפה רמון אל הר עריף
26	יום 1: מנחל לויץ למצוקי לויץ - מסלול אלטרנטיבי
26	כיפת נחל לויץ
28	נחל לויץ ונחל אליאב
29	הר לויץ ומצוקי לויץ
35	יום 2: מהר עריף להר חספס ולבאר כרכום
35	הר חיסון
36	הר חספס
37	חצאי הכיפות של הר חספס שמצפון להעתק פארן
37	המבנה הקערי של הר חספס
39	אי התאמות בחתך חבורת הר הצופים ועבדת בהר חספס
39	הגידוע האוליגוקני של הר חספס
40	הפעילות הטקטונית המאוחרת להשקעת תצורת חצבה
40	המנירליזציה הברזלית - דולומיטית ויחסה להתפתחות המבנה
41	תופעות אחרות במהלך ההליכה
43	יום 3: מבאר כרכום אל הר כרכום דרך שלוחת כרכום הצפונית
43	באר כרכום
45	השלוחה הצפונית של הר כרכום
49	הרמה של הר כרכום

50	החתך הגיאולוגי של הר כרכום
51	דיון ביניים
52	טקטוניקה צעירה סביב הר כרכום
53	קטע לסיום: גיאולוגיה ושאלת "קדושתו" של הר כרכום
54	סיכום הסיור
55	ספרות נבחרת:

מבוא

הסיור מוקדש לחלקו המערבי של הנגב המרכזי התחום בין רמת עבדת בצפון והאגן העילי של נחל פארן בדרום ובין הגבול עם סיני במערב ואזור אגן כרכום ובקעת המישר במזרח (איור 1). באזור זה מגיעים המבנים הראשיים בנגב הכוללים את מבני הקימוט של "הקשת הסורית", העתקי רצועת הגזירה סיני – נגב ומערכת מפותחת של מפלסים מורפוסטרטיגרפיים היוצרים את הנוף הנוכחי - לאחד משיאי התפתחותם. ניתוח היחסים ושלבי ההתפתחות של המבנים הללו מלמד על השלבים והתהליכים המלווים את התפתחות חלקו הפנימי של לוח ישראל – סיני מאז ראשית השקעת חתך הסלעים ועד לימנו אנו. בשל גובהו הטופוגרפי הנישא – קרוב ל-1000 מ' מעל לפני הים - ובידודו היחסי, מהווה אזור זה שבין העריף והכרכום יעד לסיורים גיאולוגיים מיוחדים כדוגמת הסיור המפורט כאן.

השאלות העיקריות שישאלו במהלך הסיור, ועליהם ננסה לתת תשובה במהלכו, הם:

1. כיצד באים המבנים הגיאולוגיים הראשיים הבונים את האזור, שחלקם הם עתיקים מאוד, לידי ביטוי במבנה ובנוף הנוכחי של הנגב המרכזי?
2. מה הם התהליכים המרכזיים המעצבים את נופו של האזור ומה החשיבות המורפוטקטונית שלהם?
3. כיצד משפיעה הפעילות הטקטונית העיקרית המתרחשת לאורך גבולו המזרחי של לוח ישראל סיני על המבנה הגיאולוגי והנוף בחלקו המערבי של הנגב המרכזי, המרוחק כדי 50-60 ק"מ מזירת הפעילות הראשית?

לשאלות אלה ולאחרות, שיעלו במהלך ימי הסיור, ננסה לתת תשובה בדרך של הצגת הנתונים וקיום דיון קולקטיבי המשתף את כלל חברי החברה הגיאולוגית.

השחקנים הראשיים הבונים את האזור

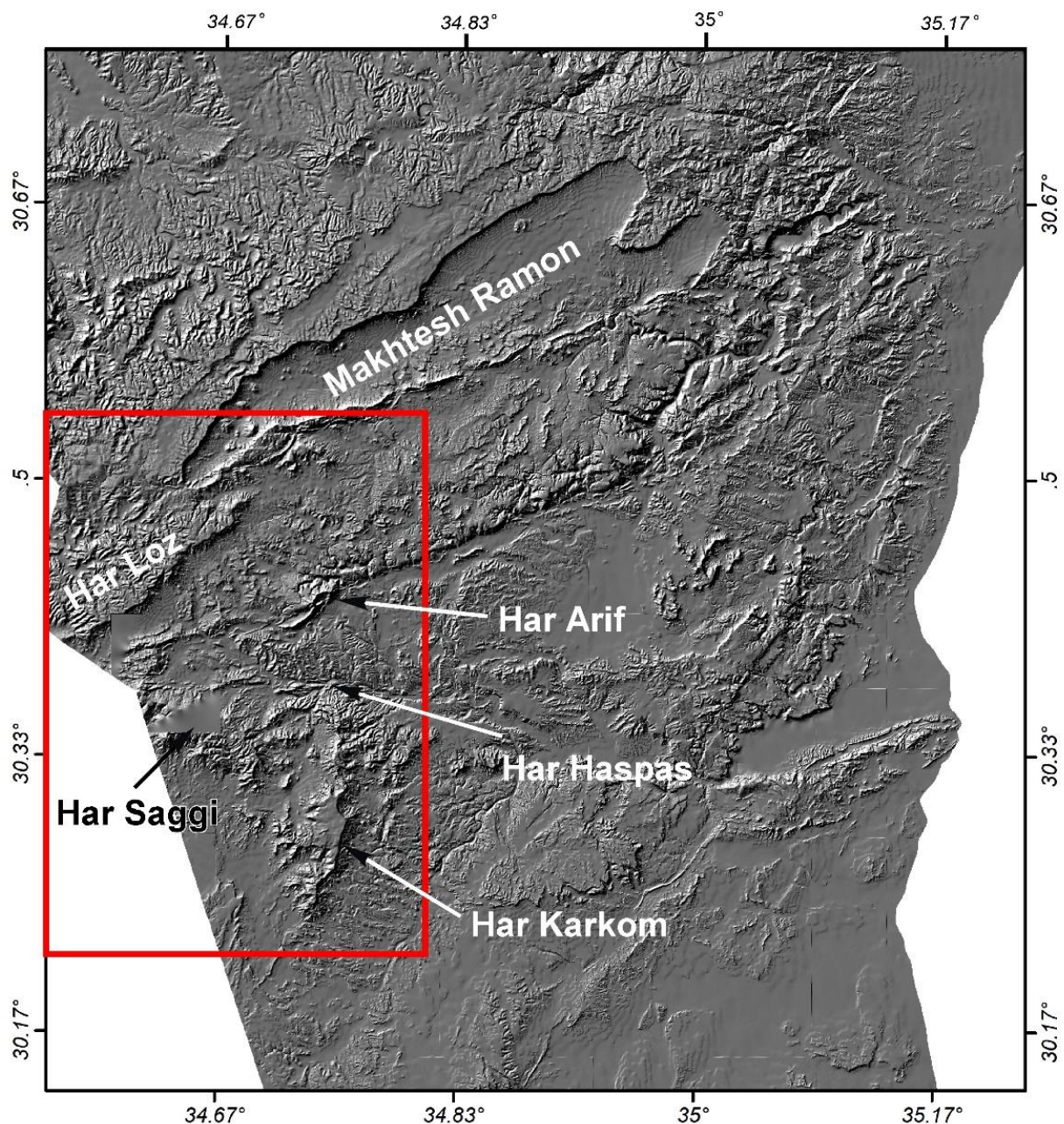
האזור בנוי משני מבנים קימרוניים גדולים – המונוקלינות של רמון ושל עריף-בדד - ומשלושה מבנים קעריים הגובלים בהם: קער עבדת שהתפתח ממצפון לקמר רמון, קער לויץ-נקרות שהתפתח בין המבנים הקימרוניים וקער הנגב הדרומי שהתפתח מדרום לקמר עריף-בדד והכולל בחלקו הצפוני את הרי המשאר של שגיא וכרכום (איורים 1 ו-2). העתקי הגזירה רמון, עריף-בתור ופארן חוצים את האזור הזה בקירוב מזרח – מערב (איור 2). העתקים אלה יוצרים לאורכם מבני לחיצה ומתיחה מקומיים. על מבני הלחיצה הגדולים נמנים הכיפות וחצאי הכיפות המלווים את חלקו המערבי של העתק רמון בין מכתש רמון וגבול סיני, המבנים הקימרוניים של הר עריף והר בתור שהתפתחו לאורך חלקו המערבי של העתק עריף-בתור, והמבנה הייחודי של הר חספס שהתפתח לאורך חלקו המערבי של העתק פארן. מבני המתיחה הגדולים לאורך העתקים אלה כוללים את גרבן ואדי לוצאן שהתפתח לאורך חלקו המערבי של העתק רמון מעבר לגבול סיני, את גרבן ביר מעין שהתפתח לאורך העתק עריף-בתור ממערב להר בתור ואת גרבן כרכום שהתפתח לאורך העתק פארן (איורים 1 ו-2).

מזה כ-30 מיליון שנה לנגב בהתפתחות טקטונית נמרצת המלווה את ביקוע הלוחות שבין יבשת אפריקה והלוח הערבי. פעילות זו הביאה ליצירת לוח ישראל-סיני שגבולו המזרחי עובר בערבה. שלב טקטוני זה התקיים כשבאזור שלט משטר יבשתי של ארוזיה המלווה את התפתחות האזורים המורמים והבקועים. בנגב המרכזי

נשמרו שרידים גדולים של מישורי גידוע ויחידות סדימנטאריות יבשתיות שהתפתחו החל מהאוליגוקן ועד לימנו ומציינים שלבים חשובים בהתפתחות האזור.

היסטוריה גיאולוגית

ההיסטוריה הגיאולוגית של אזור הנגב המרכזי ניתנת לשחזור בהתבסס על חתך הסלעים החשוף בו (איור 3). היסטוריה זו כוללת השקעת חתך סלעים מגוון הכולל סלעים קרבונטיים ימיים לחילופין עם יחידות קלסטיות יבשתיות ששקעו באזור במהלך הטריאס והיורה. במעבר לקרטיקון המוקדם מוכרת באזור פעילות געשית אינטנסיבית שיצרה הרמה נרחבת וארוזיה רגיונלית הגודעת עמוקות את החתך הגיאולוגי. מישור אי התאמה זה מתכסה במהלך הקרטיקון המוקדם בחתך ימי רדוד וביחידות יבשתיות של קונגלומרט ואבני חול

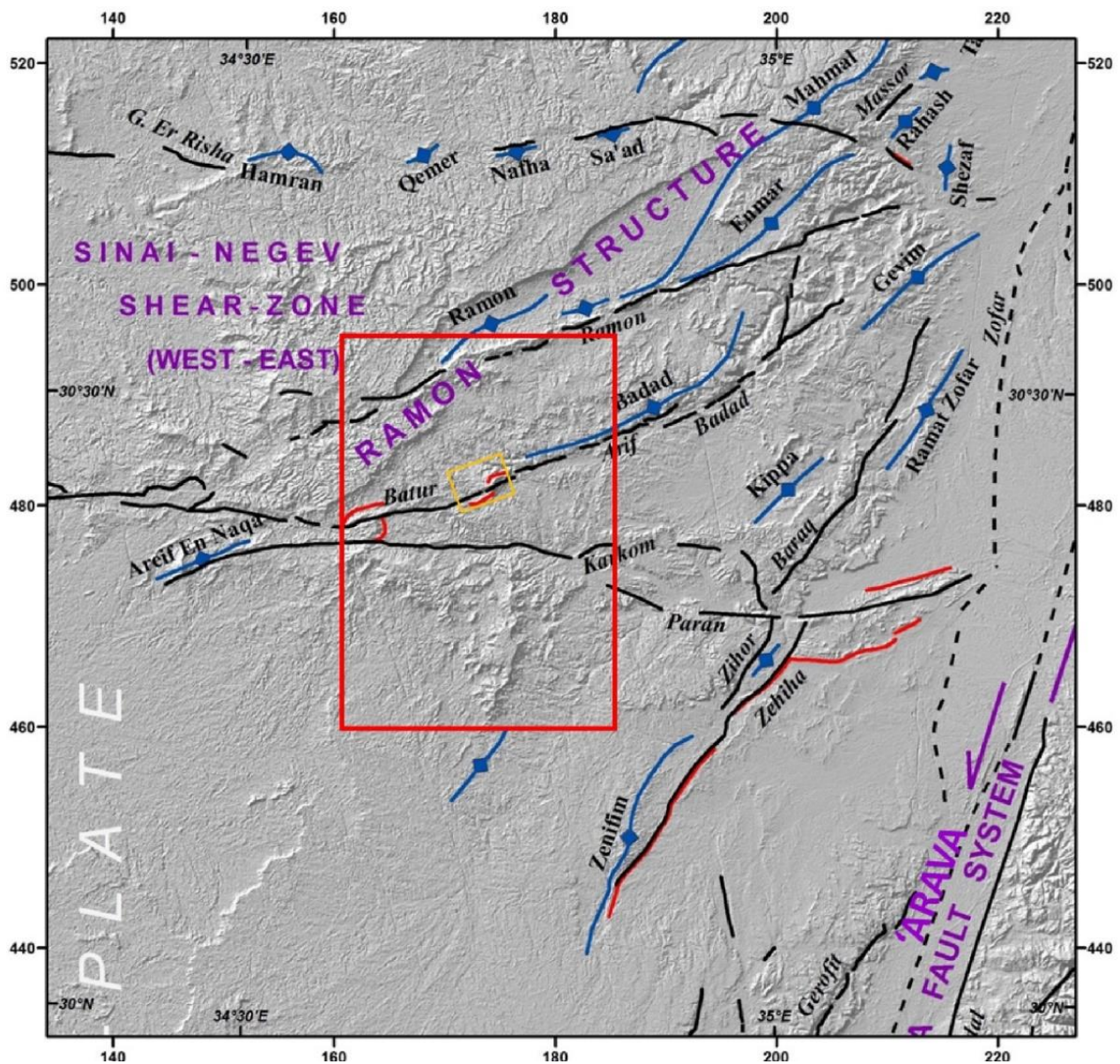


איור 1: אזור הסיור (במלבן אדום) על גבי מפת תבליט של הנגב. (מפת תבליט: ג'ון הול, 1994, המכון הגיאולוגי)

המלווים בפעילות מגמטית אינטנסיבית. בשלב זה נוצרו מחדרים שהתמקמו בתת הקרקע הרדוד, לצד מוקדי התפרצות וולקנית שיצרו הרי געש ושפכי בזלת. במהלך הקרטיקון המאוחר הצטבר באזור חתך סלעים עבה שמורכב מסלעים קרבונטיים ימיים – בעיקר גיר ודולומיט – הכלולים בחבורת יהודה. בחתכים אלה יש נוכחות בולטת למאובנים של ים רדוד המלווים מדי פעם במושבות של אלמוגים ורודיסטים (בעיקר בתצורת אבנון ושיבטה) ובריכוזים של עצים מצוררים שנמצאו בתצורות צפית, אבנון, תמר ונצר. החל מהסנטון ובעיקר במהלך הקמפאן-מאסטריכט התפתחו באזור מבני קימוט – קמרים וקערים – המוכרים כמבני ה"קשת הסורית". מבנים אלה התפתחו במקביל לפעולתם של קווי העתקה גדולים החוצים את האזור לרוחבו בכיוון מקורב מזרח – מערב (איור 2). הצפה ימית נרחבת במהלך האיאווקן הביאה להטבעת במבנים הללו בתוך אגן השקעה ימי נרחב. הרמה איטית שלוותה בפעילות ארוזיבית נמרצת שהחלה בסוף האיאווקן ונמשכה במהלך האוליגוקן ובמיוקן המוקדם הביאה לחשיפת המבנים שהיו קבורים בתוך המשקעים של חבורת עבדת ולגידוע עמוק ונרחב של האזור. הנוף הנוכחי התפתח מאז המיוקן התיכון במספר שלבים של שבירה והרמה מהירה. השלבים האחרונים בהתפתחות האזור משולבים בהתפתחות טקטונית נמרצת של אזור נרחב הנמצא מצפון לים סוף כתוצאה מתהליך ביקוע היבשת האפרו-ערבית ומהתמקמות טרנספורם ים המלח בגבולו המזרחי של לוח ישראל-סיני. לאתרים המדגימים היסטוריה מורכבת זו מוקדש הסיור הנוכחי.

מבני הקשת הסורית בנגב המרכזי מאז ראשית התפתחותם

אזור הסיור כולל את מבני הקשת הסורית – קמרים וקערים – הכוללים את חלקו המערבי של קער עבדת, חלקו המערבי של קמר רמון, קער לוז – נקרות, חלקו המערבי של קמר עריף-בדד וחלקו הצפוני של קער הנגב הדרומי (איור 2). הקמרים רמון ועריף-בדד נמשכים לאורך 60-80 ק"מ ומכוונים למזרח – צפון-מזרח. מבנים אלה התפתחו במספר שלבים החל מסוף הטורון ועד לאחר האיאווקן והם יוצרים מבני קימוט א-סימטריים שלהם אגף צפון-מערבי מתון ואגף דרום-מזרחי תלול השעון על קווי העתקים. בראשי הקמרים חשופות יחידות של חבורת יהודה ולעיתים גם של חבורות קורנוב, ערד ורמון מגיל קרטיקון מוקדם, יורה וטריאס, בעוד שבקערים המקיפים אותם חשוף חתך גיאולוגי עבה הכולל את סלעי חבורות הר הצופים ועבדת מגיל קרטיקון מאוחר, פלאוקן ואיאווקן (איור 3). בזמן השקעת חבורת הר הצופים יצרו המבנים הקימורניים בלטים תת-ימיים רדודים וקמר רמון אף היה מורם מעל למפלס הים בחלק מן התקופות. כתוצאה מכך נוצרו אי התאמות חריפות בחתכים הסטרטיגרפיים של חבורת הר הצופים שהצטברו על אגפי המבנים. ברצף הסלעים ניכרים שינויים פאציאליים מחתכים עבים של קירטון, צור וחוואר ששקעו במרכזי הקערים לחתכים דקים אשר מצטמצמים עד להיעלמותם המוחלטת אל מעלה הקמרים. החתכים המצומצמים ששקעו על גבי החלקים הגבוהים של הקמרים מכילים מרכיבים קלסטיים – חלוקי נחל ואבני חול – המבטאים ארוזיה מקומית שפעלה על המבנים המורמים כבר בקרטיקון המאוחר. תופעה זו מודגשת בעיקר בחלקו המערבי של קמר רמון ותוצרי הארוזיה נקלטו בקערים שמשני צידי המבנה המורם – בחלקו המערבי של קער עבדת ובשוליו הצפוניים של קער הר לוז-נחל נקרות (אבני, 1991). במקביל הורם גם קמר עריף-בדד ובחתכי חבורת הר הצופים התפתחו שינויי פאציאס ועובי ניכרים. הבדלים אלה בולטים במעבר מקמר עריף-בדד אל האגן הקערי של הנגב הדרומי שבו עובי תצורת משאש לבדה עולה על 100 מ', בעוד שעובי התצורה על גבי קמר עריף-בדד – כמו בהר גזם למשל – מגיע לכ- 15 מ' בלבד (בר, 1981).



איור 2: אזור הסיור (מסומן במלבן אדום) על רקע מפת המבנים העיקריים בנגב. קו כחול – ציר קמר, קו אדום – עקבה רציפה של שכבות נטיות בפני השטח, וקו שחור – קווי העתק בפני השטח. מלבן קטן בצבע צהוב מציין את מיקומו של הר עריף. (מתוך: Sneh et al., 2014)

הצפה ימית נרחבת בתקופת האיאוקן קברה את כל מבני הקשת הסורית תחת מעטה של סדימנטים קרבונוטיים ימיים של קירטון וגיר. על מורדות הקמרים נמצאו עדויות ליחסי on-lap של היחידות התחתונות בחתך – תצורות מור וניצנה – המעידים כי ההצפה בזמן האיאוקן המוקדם עלתה בהדרגה במעלה הקמרים. גלישות תת ימיות הנפוצות בחתך של תצורת ניצנה ומתרבות עוד יותר בזמן השקעת תצורת מטרד (קורנגרין, 1993) מעידות על אי היציבות של סביבת ההשקעה. מכלול העדויות שנאספו מחתכי הסלעים של תקופת האיאוקן שסביב קמר רמון מעידות על עמדתו המורמת של הקמר אשר תפקד כשרטון תת ימי ראשי באזור, שממנו גלשו סדימנטים קרבונוטיים מוקשים למחצה שהצטברו באגני ההשקעה העמוקים שסביבו.

לאחר האיאוקן התחדשו תהליכי הקימוט שקימוט את סלעי חבורת עבדת והדגישו שוב את מבני הקשת הסורית. רוב הקימוט הושלם במהלך האוליגוקן שכן הסלעים האיאוקנים המקומטים גדועים באופן אופקי על ידי מישור הגידוע הרגיונלי (ה- Regional Truncation Surface אצל Avni et al., 2012) שהתפתח במהלך האוליגוקן ובתחילת המיוקן המוקדם ועליו הושקעה תצורת חצבה שגילה מיוקן מוקדם (Zilberman, 1992; קלבו, 2002). גידוע נרחב זה גדע עמוקות את מבנה רמון עד לחשיפת החתך היוראסי וככל הנראה גם הטריאסי במרכז המבנה הקמרוני (אבני, 1991). באופן מתון יותר נגדע קמר עריף – בדד עד לחשיפת תצורת תמר לאורך מרבית ציר הקמר. במקביל נגדעו באופן מתון גם הקערים אשר איבדו בשלב הזה חלקים מהחתך האיאוקני שכיסה אותם – בעיקר את סלעי האיאוקן המאוחר (תצורות קציעות והר עקרב) שעוביים במערב הנגב המרכזי מגיע לכ- 200 מ'.

מישור הגידוע הרגיונלי שהתפתח במהלך האוליגוקן ביטל למעשה את העמדה הטופוגרפית המורמת של קמר רמון, שהתקיימה במרבית התקופות הגיאולוגיות הקודמות, והשווה אותו לזה של הקערים שסביבו. יחד עם זאת, מעקב אחרי מישור הגידוע באגפו המערבי של קמר רמון באזור שבין הר נפחה, הר חמת והר חריף מראה שמישור הגידוע עצמו נטוי בשיעור של כ-2 מעלות אל מעלה קמר רמון, בשעה שהוא נותר כמעט אופקי בתחומי קער עבדת. תצפית זו מעידה על התרוממות נוספת של מבנה רמון לאחר האוליגוקן, ככל הנראה במהלך המיוקן התיכון, כחלק מהדפורמציה הכוללת המוכרת ממבני הקשת הסורית בתקופה זו כמו ממבני הפלמיירים בסוריה (Walley, 1988) ומהמבנים הקימרוניים שהתפתחו במזרח אגן הים התיכון המכילים את מרבצי הגז (Sagy et al., 2018).

מערב קמר רמון

חלקו המערבי של הר הנגב המרכזי, הידוע כ"הר הנגב הגבוה" מהווה אזור מפתח בהבנת תהליכי התפתחות המבנה הגיאולוגי ועיצוב הנוף המורפוטקטוני של הנגב המרכזי כולו. אזור זה היה נתון מאז הסנטון לתהליכי לחיצה אשר הרימו את קמר רמון לאורך העתק רמון (בן-תור ופרומן, 1951; גרפונקל, 1964). הרמת קמר רמון מעל למפלס הים במהלך הסנטון – קמפאן הביאה ליצירת אי א-סימטרי מאורך אשר נתקף מיד עם הרמתו על ידי פעילות אירוזיבית נמרצת. תוצרי הארוזיה - קונגלומרטים יבשתיים ואבני חול - הובלו אל שולי האי על ידי מערכת ערוצים ונפלטו אל החופים. ניתוח תוצרי הארוזיה ומיקום קווי החוף בתקופות השונות מאפשרים בירור שלבי התפתחות קמר רמון והתבליט הארוזיבי שהתפתח על גביו במהלך הקרטיקון והאיאוקן. ניתוח זה הראה כי בשלב הראשון נהרסו הסלעים הימיים הקשים של חבורת יהודה מעל לציר הקמר, בעובי כולל של כ-500 מ, עד לחשיפת אבני החול הפריכות של תצורת חתירה. תהליך זה התרחש בכמה שלבים בפרק הזמן שבין הטורון המאוחר והמאסטריכט. (אבני, 1991).

בחתך תצורת ע'רב במצוקי לוח נמצאה עדשת קונגלומרט וחול קורץ גס גרגר ובה נמצאו שיניים של דגי מים מתוקים מהסוג אמנון (Zaslavsky and Avni, 1994). ממצאים אלה מעידים כי כבר במאסטריכט התפתח מכתש ארוזיבי ראשוני בחלקו המערבי של קמר רמון (אבני, 1991). ממדיו של המכתש היו קטנים מן המכתש הנוכחי והוא נוקז לדרום אל קער הר לוח ויצר בו מניפת סחף תת ימית. בדרך דומה התפתח בסוף הקמפאן מכתש קדום בג'בל עריף א-נאקה שבסיני המתועד על ידי סלעי תצורת ע'רב ששקעו על גבי סלעי קונגלומרט ערוד מגיל קרטיקון מוקדם ונמצאו בתוך המכתש הנוכחי (Bartov et al., 1980). מכתשים קדומים אלה נקברו בהמשך על ידי הסדימנטציה הימית שהתרחשה במהלך ההצפה הנרחבת של האזור בתקופות המאסטריכט

סטרטיגרפיה STRATIGRAPHY

SYSTEM תקופה	SERIES - STAGE סדרה - דרגה	SYMBOL סימן	THICK. מ. עובי מ'	LITHOLOGY מסלע	LITHOSTRATIGRAPHY ליטוסטרטיגרפיה	
					MAPPING UNITS יחידות מפות	GROUP חבורה
QUATERNARY קוורטר	HOLOCENE הולוקן	Al	0-10		Alluvium, colluvium, soil Low wadi terraces High wadi terraces & Pediments	DEAD SEA - TIBERIAS טבריה - ים המלח
	PLEISTOCENE פליסטוקן	Q ₁ , Q ₂ , Q ₃	10-20		Loess Tuff	
TERTIARY טרטייר	NEOGENE נאוגן	Na	10-30		Arava Formation Hazeva Fm.	AVEDAT עבדת
	MIOCENE מיוקן	Nh	0-10		Matred Formation	
	MIDDLE EOCENE אוקן תיכון	Emf	40-60		Horsha Formation	MOUNT SCOPUS הר הצופים
	LOWER EOCENE אוקן תחתון	En	20-50		Nizzana Formation	
	PALEOCENE פלאוקן	Emm	20-70		Mor Formation	JUDEA יהודה
		Em	20-70		Taqiye Formation	
	CRETACEOUS קרטיקון	Tit	0-50		Ghareb Formation	KURNUB כורנוב
		Kug	0-70		Mishash Formation	
		Kum	0-100		Menaha Formation	ARAD ערד
		Kuz	20-50		Zihor Formation	
		Kuge	50-100		Gerofit Formation	RAMON רמון
		Kuo	50-100		Ora Formation	
		Kut	40-60		Tamar Formation	RAJON רמון
		Kuav	50-70		Avnon Formation	
		Kuza	50-70		Zafit Formation	KURNUB כורנוב
		Kuey	20		En Yaqe'am Fm*	
JURASSIC יורא	UPPER עליון	Kilh	120		Hevion Formation	KURNUB כורנוב
		Kilh	160		Marine Intercalation Hatira Formation	
	MIDDLE אמצע	Kilh	160		Ramon Volcanics אגני רמון 109-116 Ma [2]	ARAD ערד
		Klar	0-30		Marine Intercalation Arod Conglomerate	
	LOWER תחתון	Kilh	160		Mahmal Formation	RAMON רמון
		Kilh	160		138 Ma [1]	
	BAJOCIAN בג'וסיאן	Jmn	0-65		Inmar Formation	RAMON רמון
		Jli	300		Ardon & Mish'hor fms.	
	HETTANGIAN (?) - AALENIAN הטנג'יאן (?) - אאלניאן	Jli	300		'first clay' 138 Ma [1]	RAMON רמון
		Jlam	40-70		Mahla Formation	
TRIASSIC טריאס	CARNIAN קרניאן	Trum	65-110		Saharonim Formation	RAMON רמון
		Trms	150		Gevanim Formation (Maktesh Ramon)	
	LADINIAN לדיניאן	Trms	150		Gevanim Formation (Arif Mt.)	RAMON רמון
		Trmg	150		Ra'af Formation	
	ANISIAN אניסיאן	Trmg	150			RAMON רמון
		Trmg	150			
	SCYTHIAN סקיטיאן	Trk	35+			RAMON רמון
		Trk	35+			
	TRIASSIC טריאס	Trk	35+			RAMON רמון
		Trk	35+			

Limestone גיר	Dolomite דולומיט	Chalk קרית	Marl חור	Chert צור	Clay חרסית	Sandstone (cross beds) אבן חול ריבוד צלב	Gravel חלקים	Conglomerate קונגלומרט	Fossils מאובנים	Phosphorite פוספוריט	Tuff & Basalt טוף וזבלת	Gypsum גבס	Igneous אגני	Pyroclastic פיזולטי	Quartzite קוורציט	Loess לס	Tufa טפה

איור 3: חתך סטרטיגרפי מייצג של אזור הסיור. המקור: אבני וחבריו, 2017, מפת בארות עודד.

המאוחר, הפלאוקן והאיאוקן. בתקופות אלה המשיך קמר רמון להוות מבנה תת ימי מורם המשפיע על הפאציאסים של הסלעים האיאוקניים ששקעו על גביו – בעיקר סלעי גיר שמרובים בהם הגלישות התת ימיות והאופקים המצוררים.

השקעת הסלעים על גבי קמר רמון ובקער עבדת נמשכה עד לאיאוקן המאוחר שבמהלכו שקעו בחלקו המערבי של קער עבדת תצורות קציעות והר עקרב הבנויות מסלעים קרבונטים ימיים – חוואר וגיר – בעובי של כ-200 מטרים. סלעים אלה שקעו גם על גבי קמר רמון עצמו, אם כי בעובי מצומצם יותר.

לאחר האיאוקן המאוחר התחדשו במבנה רמון וסביבתו תהליכי קימוט והרמה ששולבו בפעולה נמרצת של גידוע אזורי נרחב שיצר את מישור הגידוע הרגינולי מגיל אוליגוקן-מיוקן מוקדם (Avni et al., 2012). קמר רמון, שהיה המבנה הגדול באזור, נגדע עמוקות ונחשף בו מחשוף רחב של תצורת חתירה התואם בקירוב את צורתו ומימדיו של המכתש הנוכחי. שיחזור מישור הגידוע המקורי מתקופה זו מראה כי הוא חשף סלעים מחבורת קורנוב מגיל קרטיקון מוקדם, ערד מגיל יורה וסלעים מחבורת רמון מגיל טריאס (אבני, 1991). הסרת החתך הכולל מעל לציר קמר רמון הגיע בשלב זה לכדי 1200 מ' (אבני, 1991), אך יש לקחת בחשבון שחלק מהארוזיה שהסירה את עמודת הסלעים התבצעה כבר בזמן השקעת חבורת הר הצופים בקרטיקון המאוחר, כך שההסרה במהלך יצירת מישור הגידוע הרגינולי האוליגוקני היתה בסדר גודל של כ-500-600 מ'. קו החיתוך בין מישור הגידוע ובין היחידה המצוקית המאסיבית של תצורת חביון קבע בקירוב רב את מימדיו של המכתש העתיד להתפתח, אף כי המכתש עצמו לא התפתח בשלב זה בהעדר שיפועים מקומיים ובסיס ניקוז עמוק שיאפשרו את התרוקנותו כבר בשלב מוקדם זה (אוליגוקן).

לאחר עיצובו של מישור הגידוע במיוקן המוקדם כוסה הנגב כולו על ידי סדימנטים יבשתיים ואגמיים של תצורת חצבה (קלבו, 2002). שרידי התצורה נמצאו על גבי הפסגות הגבוהות של הנגב המרכזי כמו בהר חריף ובהר ארדון (אבני, 1991). סלעים חוליים וחרסייתיים בגוון אדום המשויכים לפרט גידרון של תצורת חצבה נמצאו גם בתוך חללים קארסטיים שהתגלו במהלך הכרייה במחצבות הגיר המאסיבי שמצפון למצפה רמון. השקעת תצורה חצבה על גבי היחידות השונות של חבורת יהודה מלווה באלטרציה מאסיבית של סלעי הדולומיט לדה-דולומיט, המאופיין ברה-קריסטליזציה של גבישי קלציט ספארי על חשבון סלעי בדולומיט. האלטרציה מקנה לסלעים מראה מפורר ובלוי שזכה לכינוי המקומי "הגיר הרקוב". התופעה נגרמה ככל הנראה בשל חלחול כמויות גדולות של מים מ"נהר חצבה" אל תת הקרקע אשר פגעו בסלעי הדולומיט. תפוצתם של הסלעים מן הטיפוס הזה על גבי קמר רמון עוזרת בזיהוי המיקום של מחשופי תצורת חצבה שהיו באזור – גם לאחר שתצורת חצבה עצמה נשטפה ונעלמה בגלל תהליכים ארוזיביים מאוחרים. מחשופי תצורת חצבה והתופעות המלוות אותה מעידים כי בשלב זה – במיוקן המוקדם – האזור היה שטוח למדי ונמוך וכי קמר רמון הגדוע לא הווה מחסום בדרכו של "נהר חצבה" אל מוצא הנהר במזרח הים התיכון שהיה ממוקם בשפלת הנגב (Zilberman and Calvo, 2013).

התפתחות מכתש רמון במתכונתו המוכרת לנו היום קשורה בהרמת הר הנגב כולו, ובכלל זה קמר רמון, במהלך המיוקן התיכון ביחס לאזור הערבה. תהליך זה מסמן את תחילת השפעתו של טרנספורם ים המלח על שוליו המזרחיים של לוח ישראל – סיני והוא התרחש ככל הנראה לפני כ-14-16 מיליון שנה (אבני, 2021). בשלב זה נוצר בנגב המרכזי מבנה כיפתי גדול הכולל גם את קמר רמון שהשתפל למזרח אל הערבה ולמערב אל אגן מרכז סיני. ציר ההרמה היה ממוקם במערב קמר רמון בקרבת הר רמון. מתאם הכיוונים שבין ציר קמר רמון ובין כיוון ההטיה למזרח של המבנה הקימרוני החדש – שכלל בנוסף לקמר רמון גם את הקערים שסביבו – הביא להתחלת נחל רמון אל תוך המחשופים של אבני החול שנחשפו על ידי מישור הגידוע הרגינולי. מכאן היתה

קצרה הדרך לריקון לב הקמר הגדוע מהיחידות החוליות הפירות של תצורות חתירה ואינמר וליצירתו של מכתש רמון שנוקז מזרחה אל הערבה באמצעות הנקז האזורי - נחל פארן-נקרות. ההרמה וההטיה למזרח של מערב קמר רמון הודגשה בשנית לפני כ- 1.5-1 מיליוני שנה במהלך הפאזה הטקטונית המסיימת את מחזור ההשקעה של תצורת הערבה (אבני, 1998).

קמר עריף - בדד

קמר מונוקלינלי זה שאורכו כ-60 ק"מ ממוקם במרחק של כ-10 ק"מ מדרום לקמר רמון ובמקביל לו (איור 2). אגפו הצפון מערבי נטוי כ-10-5 מעלות, בעוד שאגפו הדרומי תלול ולעיתים שבור והתפתח בצמוד ולאורך העתק עריף-בתור (ראה להלן). חתך הסלעים החשוף בקמר עריף-בדד כולל ברובו סלעים מחבורת יהודה הדומים בהרכבם לסלעים החשופים בקמר רמון. בגלל הרמה וארוזיה מוגבלים וקטנים בהרבה של קמר עריף-בדד בהשוואה לקמר רמון, יחידות הסלעים מגיל טריאס, יורה, וקרטיקון מוקדם חשופות במספר אתרים קטנים ומבודדים כמו במכתשי הר עריף, בחלקיו העמוקים של הר בתור ובמבתרים עמוקים שלאורך קניון נחל מישר-נקרות. על גבי הקמר נמצאו חתכים מדוקקים של סלעי חבורת הר הצופים המעידים כי הקמר היה מבנה תת ימי שקוע בזמן השקעת החבורה. גם חתכי חבורת עבדת ששקעו בקרבת המבנה – כמו במצוקי לוף הסמוכים לחלקו המערבי, בהר קירטון הנמצא מעט מדרום למרכזו ובהר משא שבחלקו המזרחי - מציגים חתכים של סלעי גיר וקירטון המעידים כי קמר עריף-בדד היה מוצף בתקופת האיאוקן.

מישור הגידוע הרגינולי – ה-RTS – גדע את חתך הסלעים של חבורות עבדת והר הצופים שהיו על ציר הקמר ואף העמיק לתוך תצורות אורה וגרופית (מגיל טורון) כשהוא חושף באופן נרחב את גג תצורת תמר מגיל קנומן. באזורים מודגשים ומורמים כמו הר עריף והר בתור נגדעו בשלב זה באופן עמוק יותר עד לחשיפת תצורת חביון. הסרת החתך בשלב זה מעל מרכזו של קמר עריף-בדד הגיעה לכדי 300-350 מ' בקירוב (70 מ' של תצורת אורה, 80 מ' של תצורת גרופית, כ-20 מ' של תצורת ציחור, 80 מ' של סלעי חבורת הר הצופים, 50-100 מ' של סלעי חבורת עבדת. עובי החתכים המחושבים על פי אבני (1991), וזאת לעומת הסרה של כ-500-600 מ' בקמר רמון הסמוך. הפרשים אלה מראים על יחסי הגובה בין המבנים ועל בכירותו של קמר רמון ביחס לקמר עריף-בתור שמדרום לו.

תצורת חצבה שקעה על גבי מישור הגידוע שהתפתח בראש קמר עריף – בדד ומחשופים שלה נמצאו במספר אתרים כמו בהר בדד ובהר משא משני עברי קניון נחל נקרות (Zilberman, 1992). מחשופים אלה הינם שריד לכיסוי נרחב של תצורת חצבה שהתקיים בעבר על גבי המבנים הקימרוניים ושנישטף ברובו במהלך השנים (קלבו, 2002).

עם תחילת הרמת האזור במיוקן התיכון, כחלק מהיצירה של המבנה הקימרוני הגדול של הנגב המרכזי, החלה באזור התחתות נמרצת שיצרה במספר שלבים את מערכת הניקוז הנוכחית. הרמה זו מתועדת באזור מעלה המישר על ידי התפתחות מערות קארסטיות ובהם ספלאוטמים פריאטיים וואדוזיים שגילם נע בין 10 ל-5 מיליון שנה (Chaldekas et al., 2021). הרמה משמעותית נוספת של קמר עריף – בדד לאורך העתק עריף-בתור מתועדת לפני 2.5 מיליון שנה כאשר קניון נחל מישר-נקרות התחתר לעומקו הנוכחי באירוע שהתרחש בין השקעת שני הפרטים של תצורת הערבה, שגיא וכוונתילה (אבני, 1998).

קער עבדת

קער נרחב זה תחום בין המבנה הקימוני המורכב של הר הנגב הצפוני – קמרי חתירה, חלוקים, בוקר וכבודה – ובין מורדותיו הצפון-מערביים של קמר רמון (איור 2). רוחב הקער כ- 30 ק"מ והוא פתוח למזרח אל בקעת צין ולמערב אל הקער הגדול של מרכז סיני. באזור חשוף חתך עבה של חבורת הר הצפונים ועבדת. חתך זה מגיע לעובי מצטבר של כ- 600 מ' המתדקק ממרכז הקער אל שוליו הצפון-מערביים של קמר רמון. החתכים של חבורת הר הצופים בנויים מתצורות מנוחה, משאש, ע'רב וטאקיה כשכל אחד מהם מגיע לעובי של עשרות מטרים, כפי שנראה במחשופים הגדולים של בקעת צין במזרח ובאזור נחל לבן במערב. סלעי חבורת הר הצופים מתכסים על ידי סלעי חבורת עבדת.

בחבורת עבדת שגילה איאוקן מופיעות שכבות קירטוניות עבות לסירוגין עם שכבות שעיקרם סלעי גיר. הקירטון מאפיין את חתכי תצורות מור וחורשה והגיר את תצורות ניצנה ומטרד. ביחידות השונות – למעט בתצורת חורשה – נפוצים סלעי צור וסלעים גירים מצוררים חלקית. גלישות תת ימיות רבות מאפיינות את סלעי תצורות ניצנה ומטרד והם יוצרות הפרעות ברצף השכבות. למרות האופי הדומה של חתכי חבורת עבדת, הרצפים הליטולוגיים שונים ממקום למקום ומעידים על גיוון בתנאי ההשקעה ועל קיומם של תתי-אגנים שונים שהתקיימו בתוך קער עבדת. אחת הדוגמאות המובהקות לכך היא ההפרדה הטובה שבין סלעי הקירטון של תצורת חורשה לסלעי הגיר המאסיבי של תצורת מטרד, כפי שמתקיימת בסמוך לעיר עבדת, הנעלמת בחלקו המערבי של קער עבדת והופכת לערבוב של מרכיבי הגיר והקירטון לאורך החתך כולו. מסיבה זו (Benjamini, 1979) קבע את השם "תצורת נחל יתר" למכלול הסלעים שמעל לתצורת ניצנה ועד לגג תצורת מטרד במערב קער עבדת.

שינויים פאציאליים מוכרים גם מחלקו המזרחי והדרומי של קער עבדת בעיקר בקרבת קמר רמון. בחלקו המערבי של קער עבדת מופיע על גבי החתך של חבורת עבדת חתך עבה של סלעים מגיל איאוקן מאוחר הבנויים משכבות עבות של חוואר ומעליו מופיע גיר משוכב באופקים מאסיביים. רצף הסלעים שייך לתצורות קציעות והר עקרב (Benjamini, 1980) ומגיע לעובי מצטבר של כ- 150-200 מ'. תצורת קציעות מופיעה בתעלות תת-ימיות רדודות החתורות בגג תצורת מטרד. בחלקו התחתון של רצף סלעי תצורת קציעות מופיע דרגש גירי ובו ריפי אלמוגים מצוררים המעידים על קיום תנאים ימיים רדודים שהתקיימו בתחילת האיאוקן המאוחר בתחומי קער עבדת. שכבות הגיר המאסיבי הבונים את תצורת הר עקרב מעידים אף הם על הרדדת הים במהלך האיאוקן המאוחר לפני נסיגתו הסופית מן האזור.

כל היחידות ששקעו במהלך האיאוקן על אגפו הצפון-מערבי של קמר רמון מתדקקות אל מעלה המבנה. הדבר מסומן על ידי העלמותה ההדרגתית של תצורת מור אל מעלה קמר רמון ובהופעת ביוהרמים של נומוליטים גדולים, אצות גירניות, צדפות וקיפודי ים, רובם מצוררים, המופיעים בעיקר בתצורות מטרד. לעיתים מופיעים בתצורה זו גם מושבות של אלמוגים.

לאחר האיאוקן התקמט חלקו המערבי של קער עבדת באופן שהקנה לסלעים שיפוע לצפון מערב בשיעור משתנה של 17-2 מעלות (אבני, 1991) בטרם נגדעו הסלעים באופן כמעט אופקי על ידי התפתחות מישור הגידוע הרגינולי. השיפועים החרפים ביותר נוצרו לאורך כפיפה המלווה את המעבר מקמר רמון למרכז הקער של עבדת. קו זה ממוקם במרחק של כ- 10 ק"מ מצפון מערב לציר המבנה של קמר רמון. מישור הגידוע הרגינולי שהתפתח במהלך האוליגוקן גדע את סלעי חבורת עבדת באופן מתון במרכז קער עבדת כשהוא מותיר חתך עבה של סלעים מתצורת מטרד היוצרים היום את גג החתך במרבית שיטחה של רמת עבדת. עוצמת הגידוע הולכת ועולה דרומה אל שולי קער עבדת עד לגידוע מוחלט של חתך הסלעים של חבורת

עבדת לאורך קו המכונה "מצוק אי ההתאמות" המלווה את מהלכו העילי של נחל ניצנה, בין מישור הרוחות והר חריף. על גבי מישור הגידוע נמצאו שרידים של תצורת חצבה – בעיקר מחשופים של קונגלומרט הבסיס, אבני חול אדומות וריכוזים של חלוקי "צור יבוא" במספר אתרים ובהם בהר גיזרון, במורדות הר חריף, באזור נחל ניצנה, מדרום לרכס נפחה ובאזור נחל חווה (אבני, 1991; Zilberman, 1992). על פי מחשופים עבים של תצורת חצבה שנשמרו באגנים שבורים ונמוכים שנוצרו לאורך קו השבירה סעד – נפחה החוצה את קער עובדת – כמו בנחל חווה ובנחל טרף - נראה שתצורת חצבה כיסתה את רמת עבדת בכיסוי נרחב וכי היא הוסרה ממנו לאחר המיוקן המוקדם, עם התגברות תהליכי ההרמה והסחיפה של הנגב המרכזי כולו (קלבו, 2002). תהליכים אלה הביאו, במספר שלבים, להתפתחות רשת הניקוז המוכרת לנו היום. לאורך מערכת זו שקעו מספר מפלסים של תלכיד נחלים הכלולים בתצורת אחוזם שגילה פליוקן מאוחר-פלייסטוקן מוקדם. מפלסי נחלים צעירים יותר מלווים את רשת הניקוז הנמצאת בהתחתרות הדרגתית. התפתחות זו מלווה בשינויי כיוון וארגון מחדש בתגובה לאירועים טקטוניים, כמו למשל אירוע השינוי שחל בכיוונו של נחל בשור עליון באזור עין עבדת (Avni and Zilberman, 1997).

קער לוח - נקרות

קער זה מצוי בין קמרי רמון ועריף-בדד (איורים 1 ו-2 וראה להלן, איור 11). אורכו כ- 50 ק"מ ורוחבו כ- 10 ק"מ והוא הולך ומצטמצם לכיוון מזרח עד להיעלמותו ההדרגתית באזור שממזרח להר מרפק שמדרום למכתש רמון. לכיוון דרום מערב פתוח קער זה אל האגן הקערי הגדול של מרכז סיני. התעבות החתכים של חבורות הר הצופים ועבדת מתבצעת בסמוך ומדרום לאגפו הדרומי של קמר רמון והחתכים הולכים ומתדקקים בהדרגה דרומה אל מעלה קמר עריף-בדד.

הביטוי המובהק של קער זה הינו ברמה הנרחבת של הר לוח והר המערה הבנויים מסלעי חבורת עבדת המכסים על חתכים עבים של סלעי חבורת הר הצופים. החתך המצטבר של שתי החבורות מגיע לעובי של כ- 350 מ' (אבני, 1991). עובי סלעי חבורת הר הצופים מגיע עד ל- 200 מ' והחתך כולל את ארבעת היחידות המוכרות – תצורות מנוחה, משאש, ע'רב וטאקיה כשעוביה של כל יחידה מגיע לעשרות מטרים. חתכים עבים אלה חשופים במספר מחשופים לאורך נחל לוח שממערב למכתש רמון ולאורך מצוקי לוח שבאגפם הדרומי של הר לוח והר המערה (ראה להלן, איור 12).

בחלק העליון של חתך תצורת ע'רב שבמצוקי לוח (נ.צ. 16595/48530) מופיעה עדשות קלסטיות המכילות אבני חול גסות גרגר של גרגירי קוורץ גס (עד 1 מ"מ), כדוריות ברזל וגלאוקוניט המופיעות במשולב עם חלוקים קטנים של גיר וקירטון. נוכחים גם שברי צדפות, שיני כרישים ושיניים וקשקשי דגים השייכים למיני דגים ממשפחת האמנונים החיים במים מתוקים (Zaslavsky and Avni, 1994). עדשה זו מעידה על סחיפה של מרכיבים קלסטיים יבשתיים אל תוך קער הר לוח ממקום שהיה מוגבה, חשוף ויבשתי. שילובם של מרכיבים אלה כעדשות בסלעים של תצורת ע'רב מעידה שבו-זמנית לקיומו של אגן השקעה ימי שהביא לשקיעת תצורת ע'רב, התקיים בקרבתו אזור יבשתי וחשוף שבו זרם נחל ובו חיו דגים. מכלול העדויות מצביע על אפשרות סבירה שהחומרים הללו נתרמו מחלקו המערבי של קמר רמון שהוא המבנה הקימרוני המוגבה הקרוב ביותר לקער הר לוח. האפשרות שמרכיבים אלה עברו הובלה ימית ארוכת טווח מגוף יבשתי גדול אחר נשללת לאור העובדה שההצפה שבמהלכה שקעה תצורת ע'רב הגיעה למרחק של מאות ק"מ כלפי דרום ומזרח ביחס לאזור שבו נמצאו העדשות שבהר לוח, בעוד שהמרחק אל קמר רמון עומד על 5 ק"מ בלבד.

סלעי תצורת ע'רב מכוסים בסלעי החוואר הירוק של תצורת טאקיה המגיעים לעובי של כמה עשרות מטרים. גג התצורה גדוע בכל המחשופים שנבדקו ומעל להם שקעו בכל האזור סלעי חבורת עבדת המפתחים באזור הר לוץ מופעים ליתולוגים מיוחדים הכוללים גירים מאסיביים עשירים באצות גיריות העוברים רה-קריסטליזציה לגירים דמויי שיש. אופקים מצוררים – בעיקר עדשות צור גדולות – וגלישות תת-ימיות נפוצים בחתך. מופעים אלה מעידים אגן השקעה שונה שהתקיים בקער לוץ-נקרות בהשוואה לאגני ההשקעה שבקער עבדת. מעניינת העובדה שבניגוד לחתכים עבים של תצורות קציעות והר עקרב – עד 200 מ' – שנשמרו באגפו המערבי של קער עבדת, בקער הר לוץ חתכים אלה אינם מוכרים, ככל הנראה בגלל גידוע מאוחר. הסלעים הבונים את הר לוץ נטויים מעט לצפון מערב בשיעור של כ- 1-2 מעלות כתוצאה מקימוט קל המאוחר להשקעתם. גג החתך של חבורת עבדת בהר לוץ ובהר עודד הסמוך לו ממזרח גדוע על ידי מישור הגידוע הרגיונלי אשר הסיר חתך המוערך בכ- 250-300 מ' (חלק עיקרי של תצורת נחל יתר, תצורות קציעות והר עקרב במצטבר). על גבי מישור הגידוע נמצאו משארים של תצורת חצבה המופיעים בעיקר כסדרה של חללים קארסטיים המלאים באבני חול אדומות שנשמרו מתחת למפלס הגידוע המעצב עד היום את פסגת הר לוץ (ראה להלן, איור 14). מערות דומות נמצאו על ידי רמי בן דויד בהר עודד הסמוך (בן דויד, 1987). משארים אלה, ביחד עם החתכים העבים של תצורת חצבה שנשמרו בגרבן ואדי לוצאן ובגרבן ביר מעין שנמצאים משני עברי קער לוץ-נקרות בתחומי סיני מעידים על כיסוי מלא של האזור על ידי הסדימנטים היבשתיים של תצורת חצבה (קלבו, 2002). לאחר השקעת תצורת חצבה במיוקן המוקדם עבר קער לוץ-נקרות הרמה כחלק מהתפתחות הקימרון הגדול של הנגב המרכזי. כתגובה התחתרה בו מערכת הניקוז הנוכחית הנחלקת בין יובלי נחל לוץ הזורם למערב אל אגן ואדי אל עריש וליובלי נחל ערוד, נחל קציעה, נחל מעזר ונחל ברוקה הזורמים אל נחל פארן ודרכו לים המלח. ההתחתרות של הנוף אל מתחת למפלס מישור הגידוע הרגיונלי הביאה להתפתחות מצוקי לוץ, והר עודד קיבל את צורתו כהר מבודד ומורם מעל לסביבתו. לאורך מערכות הניקוז ולאחר התייצבות העמקים שקעה בתוכם תצורת הערבה שגילה פליוקן מאוחר – פלייסטוקן מוקדם (אבני, 1998). במהלך הפלייסטוקן נמשכו באזור תהליכי ההתחתרות של מערכות הניקוז ולאורכם שקעה סידרה של טראסות נחלים המבטאים הפסקות זמניות בתהליכי החתירה, בעיקר בשל אירועים אקלימיים המשפיעים על יחסי הסדימנטציה – ארוזיה באגני הניקוז.

קער הנגב הדרומי

זהו קער נרחב שאגפו הצפוני שעון על מורדות קמר עריף-בדד והוא פתוח דרומה ומערבה אל האזור הקערי הנרחב של מרכז סיני (איורים 1 ו-2). כלפי דרום נמשך האזור הקערי של הנגב הדרומי עד להרי אילת, מרחק של כ- 100 ק"מ. באזור זה מצויים חתכים עבים של חבורות הר הצופים ועבדת היוצרים אזורי חשיפה נרחבים של בתרונות בסלעים רכים הנתונים לארוזיה נמרצת, לצד אזורי גבעות ומצוקים שבהם נשמר גג החתך של חבורת עבדת היוצר רמות מבוטרות והרי בדד. בצפון-מערבו של קער הנגב הדרומי, באזור שלו מוקדש הסיור, מצויים הרי המישאר הגדולים של שגיא וכרכום השומרים על חתך כמעט מלא של חבורת עבדת ומשמרים את מפלס המילוי המקורי של הסדימנטים שמילאו בעבר את קער הנגב הדרומי. בקער הנגב הדרומי חשוף חתך עבה של חבורת הר הצופים – עד כ- 300-400 מ', שבו מיוצגים כל היחידות של החבורה. תצורת מנוחה ומישאש מופעים בחתכים עבים במיוחד – יותר מ- 100 מ' כל אחד – כשבתצורת מנוחה מופיעה יחידה חרסיתית עבה במרכז החתך ותצורת מישאש מופיעה בפאציאס עשוש. תצורות ע'רב

וטאקיה מופיעות בעובי של כ- 70-80 מ' כל אחת כשהעוצמות הגדולות ביותר מופיעות במורדות הרי שגיא וכרכום.

חבורת עבדת מיוצגת באזור בחתכים עבים הבונים את החלקים הגבוהים של הרי המישאר. תצורות מור, ניצנה, חורשה ומטרד בונות את עיקר האזור בחתכים התואמים במידה רבה את האופי ואת החלוקה המקובלת באגנים אחרים בנגב, אך שונה ממנו פאציאלית. כך לדוגמא, תצורת מור מופיעה בכל באזור כיחידה קירטונית עבה - עד כ- 30-50 מ' - שמועטות בה שכבות הצור, עובדה העומדת בניגוד למופע של תצורת מור בחלקו המזרחי של הנגב כמו באזור רמת ברק - גבעות לובן. תצורת ניצנה מכילה רצף של סלעי גיר המשתנים מהופעה משוכבת היטב בהר קירטון, בשולי המישור ובהר שגיא לעומת הופעתה כיחידות מאסיביות יוצרות מצוקים בהר כרכום. תצורת חורשה דקה באופן מודגש בכל האזור שסמוך להר כרכום, בעוד שתצורת מטרד מתעבה מאוד במדרונות הצפוניים של הר שגיא והר כרכום הגובלים בהעתק פארן. בתצורת מטרד מופיעים גם ריפים של אלמוגים שגדלו באתרם על גג של גלישות תת ימיות, כמו למשל בשוליים הצפוניים של אגן כרכום. ריבוי המופעים השונים של סלעי חבורת עבדת מדגישים את האופי המקומי של אגני ההשקעה שהתקיימו במקביל במרחב הנגב המרכזי במהלך האיזוקן. זאת בנוסף למרכיב בולט של גלישות תת ימיות המשתתפות בעיצוב האופי הסדימנטארי של החתך, והם בולטים במיוחד בתצורות ניצנה ומטרד.

מישור הגידוע הרגיונלי מעצב את ראשי ההרים במרחב כשהוא גודע חלקים מהחתך של חבורת עבדת. העדרם של מחשופים מתצורות קציעות והר עקרב, כמו עוביו הדק של החתך של תצורת מטרד על פסגות הר שגיא והר כרכום, מעידים שעוצמת הגידוע בקער הנגב המרכזי הגיע לכמה עשרות מטרים עד ל- 300 מ'. הגידוע הולך ומעמיק כלפי דרום והעדר מחשופים משמעותיים של סלעים איזוקניים מדרום להר כרכום מעיד ככל הנראה על הסרה כמעט מלאה של חתכי חבורת עבדת מאזור זה כבר במהלך האוליגוקן.

על גבי מישור הגידוע נמצאו סדימנטים של תצורת חצבה - חתכים מלאים בגרן כרכום שבמרכז הקער וחתכים חלקיים למרגלות הר שגיא. בפסגת הר כרכום מופיע מילוי של בורות קארסטיים ובהם אבני חול אדומות וחלוקי "צור יבוא" המייצגים חתך חלקי של פרט רותם שמצוי בחלקים הגבוהים של חתך תצורת חצבה (ראה להלן, תיאור הביקור בפסגת הר כרכום).

לאחר המיוקן המוקדם הורם האזור כחלק מיצירת הקמרון הנרחב של הנגב המרכזי. האזורים המורמים נוקזו באמצעות רשת הניקוז האזורית שנחלקה לניקוז מזרחי אל אגן ים המלח והערבה באמצעות יובלי נחל פארן-נקרות וניקוז מערבי אל הים התיכון באמצעות יובלי ואדי אל עריש. לאורך מערכות הניקוז הללו שקעה במהלך הפליוקן המאוחר והפלייסטוקן המוקדם תצורת ערבה (אבני, 1998). באזור פרשת המים המבדילה בין אגני הניקוז התרחשה במהלך הפלייסטוקן פעילות טקטונית שיצרה שינויים טופוגרפיים ושינויי ניקוז בין האגנים. כך למשל, ובאופן מפתיע, משתלטים יובליו של ואדי אל עריש הזורם לים התיכון על שטחים הולכים וגדלים של אגן נחל פארן הזורם לאגן ים המלח. מדרום להר שגיא ולהר כרכום אותרו שינויים משמעותיים בתוואי הניקוז שהתפתחו במהלך הפלייסטוקן המאוחר. שינויים גיאומורפולוגיים אלה מלווים במקבץ של מוקדי רעידות אדמה שנרשמו בעשרות השנים האחרונות על ידי הרשת הארצית, והם מסמנים אזור טקטוני פעיל הממוקם לאורך פרשת המים הראשית הנמשכת בין אגני הפארן והאל-עריש. פעילות טקטונית זו פגעה בדגם הניקוז של תצורת הערבה והביאו לשינויים בנופו של האזור (אבני, 1998), כפי שיודגם במהלך הסיום.

העתקי רצועת הגזירה נגב – מרכז סיני בחלקו המערבי של הנגב המרכזי

רצועת הגזירה נגב – מרכז סיני הינה רצועת השבירה הדומיננטית ביותר החוצה את הנגב המרכזי והדרומי בכוון כללי מזרח – מערב (איור 2). קווים אלה פזורים בין אזור שדה בוקר בצפון ואזור בקעת הירח בדרום והם נמשכים לכיוון מערב אל תוך חצי האי סיני לאורך של מאות ק"מ. המשכם של הקווים הטקטוניים הללו לכיוון מזרח מוסט על ידי טרנספורם ים המלח לצפון בשיעור 100-105 ק"מ והם נמשכים מזרחה בפלטה הערבית (ברטוב, 1974). קווי ההעתקה הללו, המבטאים שבירה עמוקה בתשתית, פעלו במספר שלבים מאז הטריאס (גרפונקל, 1964) ומאז סוף הטורון הם פעלו בשילוב עם מבני הקשת הסורית (Weinberger et al., 2020). העתקים והמבנים הגיאולוגיים שהתפתחו לאורכם מראים על מרכיב של לחיצה המלווה במרכיב של הסטה אופקית ימנית. עוצמת הפעילות הטקטונית משתנה בזמן בין הקווים הטקטוניים השונים ואף בין סגמנטים שונים של אותו הקו. כך למשל הפעילות הטקטונית לאורך העתק רמון חזקה בקרטיקון המאוחר וחלשה יחסית בזמן הנאוגן, בעוד שתיזמון הפוך נרשם לאורך העתק פארן. במסלול הסיור אנו חוצים את הקווים רמון, עריף-בתור ופארן. נציין בקצרה כמה מאפיינים של קווים אלה:

קו רמון

קו זה חוצה את הנגב מאזור עין יהב במזרח ועד למערבו של מכתש רמון ונחל לויץ במערב (איור 2). הקו נמשך אל תוך סיני ויוצר בחלקו המערבי את גרוב ואדי לוצאן (ברטוב, 1974). התופעות הסטרוקטורליות שלאורכו מוכרות היטב בזכות החשיפה העמוקה של החתך המועתק בשל התפתחותו של מכתש רמון שמלווה את קו רמון לאורך כ- 40 ק"מ.

עיקר הדפורמציה שלאורך הקו מרוכזת בפס שרוחבו 2-3 ק"מ המכוון למזרח-צפון מזרח. הקו מלווה על ידי שברים כמעט אנכים, כפיפות חריפות, חצאי כיפות וכיפות. השבירה יוצרת מדרגה סטרוקטורלית עמוקה בתשתית המפרידה בין אזור גבוה מצפון לאזור מונמך מדרומו. באזור המורם התפתח קמר רמון ובמונמך – קער לויץ-נקרות. ניתוח המבנה הכולל מחייב גזירה ימנית בשיעור משתנה – עד למאות מטרים בתחומי הנגב ועד כדי 2.5 ק"מ בגב'ל מינשארה בסיני (ברטוב, 1974).

הפעילות הטקטונית לאורך הקו נלמדה בפירוט ונמצא כי התקיימה כבר בטריאס ונמשכה בקרטיקון המאוחר (גרפונקל, 1964). פעילות זו מתועדת היטב בשל הופעת סידרה של אי התאמות בחתך של חבורת הר הצופים (אבני, 1991). על-פי הניתוח נראה שכמחצית מהתבליט הסטרוקטורלי של מערב קמר רמון התפתח עד לאיאוקן, כפי שנלמד מסדרה של אי התאמות חריפות, יחידות יבשתיות של קונגלומרט וקרקות ברזליות המעידות על התפתחות תבליט יבשתי במרומי האגף המורם של קו השבירה בעקבות התפתחותו של קמר רמון השעון על קו ההעתקה. פעילות קו השבירה במהלך האוליגוקן נלמדת מהגידוע הדיפרנציאלי של האזור שמדרום לקו ההעתק בהשוואה לאגפו הצפוני. בעוד שבאזור גרוב לויץ – נקרות הגידוע מותיר את עיקר החתך של חבורת עבדת, הרי שהגידוע מצפון לקו ההעתק גודע את האזור עד לחשיפת סלעי חבורת רמון מגיל טריאס. כפי שנדון להלן לגבי התפתחות קמר רמון, הגידוע בשלב זה של הבלוק שמצפון להעתק רמון הגיע לכ- 600 מ', וזאת לעומת גידוע קל יותר בקער הר לויץ העומד על 200-300 מ' בלבד. הפרשים אלה מלמדים כי במהלך האוליגוקן לבדו העתק רמון הרים את הבלוק שמצפון בשיעור 300-400 מ' ביחס לבלוק שמדרומו. פעילות טקטונית לאורך הקו נמשכה גם לאחר המיוקן המוקדם כאשר אזור מעבר ערוד שמדרום לקו השבירה הונמך בשיעור של כ- 50 מ' ביחס להתרוממות הר רמון שמצפון (אבני, 1991). במקביל התפתח במרכז נחל

לוח גרובן שבו נשמר חתך של תצורת חצבה שהונמך אל תוכו (ראה להלן, איור 10; אבני, 1991). באזור זה הקו מתפצל למספר העתקים תת-מקבילים שחלקם נספג בחלקו המערבי של קמר רמון סביב הר עריף (רון, 2007). המשך הקו לכיוון סיני יוצר סידרת מבני לחיצה ומתיחה קטנים הנמשכת אל גרובן ואדי לוצאן שבו נשמר חתך עבה של תצורת חצבה (ברטוב, 1974). מבנה הלחיצה שבו נבקר (על-פי מתווה החלופה ליום הראשון בסיור) מכונה כיפת נחל לוח (אבני, 1991) והוא דומה במאפייניו המבניים למבנה הגדול של הר עריף, אם כי הוא קטן בהרבה: אורכו כקילומטר וחצי ורוחבו כקילומטר אחד וחשופות בו יחידות שונות של חבורת יהודה, בשונה מהחשיפה העמוקה, עד לסלעי חבורת רמון מגיל טריאס, במבנה הר עריף (ראה להלן, פרק תחנות הסיור).

הערכת ההעתקה האופקית על העתק רמון נתונה למחלוקת בין החוקרים. בעוד שגרפונקל (1964) העריך שהזריקה האופקית נספגת במבנים מקומיים, רון (2007) שביצע אנליזה סטרוקטורלית מפורטת במקטע שממערב למעלה ערוד העריך את כמות התנועה האופקית על חלקו המערבי של העתק רמון ב-160 עד 540 מ'.

קו עריף-בתור

קו זה נמשך מאזור נחל אשבורן במזרח, עובר למרגלות מצוקי עריף ונמשך מערבה אל הר עריף, הר בתור ואל גרובן ביר מעין שמעבר לגבול סיני לאורך כ-85 ק"מ (איור 2). בדרך כלל הצד הדרומי של ההעתק ירוד בשיעור של מאות מטרים ביחס לבלוק שמצפון (בר, 1981; Zilberman, 1983) מגמה זו מתהפכת באוכף שבהר עריף המפריד בין שני חצאי הכיפות הבונות את ההר ובהם התפתחו המכתשים המזרחי והמערבי. חצי הכיפה המזרחית של הר עריף מועתקת בשיעור אנכי של כ-320 מ' כשהעתק עובר בין גוף מגמטי אינטרוזיבי מגיל קרטיקון מוקדם מצפון לקו ההעתק ובין תצורת צפית מגיל קנומן החשופה מדרום לקו ההעתק. במעבר של אוכף הר עריף מתהפכת מגמת השבירה. בחצי הכיפה המערבית היוצרת את המכתש המערבי הארוך של הר עריף מונחות תצורות רעף וגוונים מגיל טריאס מדרום לקו ההעתק מול תצורת אבנון מגיל קנומן המצויה מצפון. יחסים אלה מעידים על הרמת האגף הדרומי בשיעור של כ-500 מ' ביחס לחלקה הצפוני הנוחת של חצי הכיפה. מערבה יותר נמשך קו השבירה אל הר בתור ביוצרו לאורכו מספר חצאי כיפות ומבנים מונמכים בהם נשמרו חתכים של חבורת עבדת. במבנה הכיפתי השבור של הר בתור נחשפת תצורת חתירה מצפון לקו ההעתק המועתקת מול תצורת תמר מדרומו – העתקה אנכית של כ-300 מ', המלווה בהעתקה אופקית ימנית בשיעור של כ-150 מ' (Zilberman, 1983). מכאן נמשך קו השבירה אל גרובן ביר מעין.

בזמן השקעת חבורת הר הצופים מהווה קו עריף-בתור גבול סטרוקטורלי ראשי כשהוא מבדיל בין חתך עבה (מעל 100 מ') של תצורת משאש מפאציאס עשוי שהתפתח מדרום לקו לעומת חתכים דקים של תצורת מישאש בפאציאס חרוז (עד 15-20 מ') ששקעו מצפון לו. על הקו עצמו התפתחה עדשה ביוקלסטית עשירה באוסטריאות המעידה על קיום מגבהים בתימטרים לאורך הקו במהלך הקמפאן המאוחר (ברטוב, 1974).

בהתבסס על עורקי קלציט שהושקעו לאורך הקו במהלך הפעילות הטקטונית (Weinberger et al., 2020) מצא עדויות לפעילות מתמשכת על הקו החל מתקופת המאסטיכט, לפני כ-70 מיליון שנה שנמשכה גם בתקופת האיאווקן. מישור הגידוע הרגיונלי מראה על גידוע דיפרנציאלי של שני הבלוקים המותווים על ידי קו עריף-בתור. הגידוע מצפון לקו חושף יחידות שונות של חבורת יהודה – בעיקר את סלעי תצורת תמר מגיל קנומן מאוחר, אך במרכזי הכיפות השבורות של הר עריף והר בתור הגידוע גודע עמוקות את המבנים עד

לחשיפת תצורת חביון - לעומת שימור מרבית החתך של חבורת עבדת מדרום לקו השבירה. הפרשי הגידוע עומדים על כ- 300-500 מ' והם מבטאים את השבירה וההרמה של הבלוק הצפוני ביחס לדרומי במהלך האוליגוקן לבדו.

שבירה מאוחרת למיוקן המוקדם בשיעור נוסף של כ- 100-150 מ' מתבררת על פי הפרשי הגובה הטופוגרפיים שנמדדים בין משארי מישור הגידוע ששרדו בראש הר קירטון והרי המישור שמדרום לקו השבירה לעומת האזור שמעל לצוקי עריף שמצפון לקו. בשלב זה – ככל הנראה במיוקן התיכון - מופעל הקו כולו ובקצהו המערבי נוצר גרן ביר מעין השומר בתוכו חתכים עבים של תצורת חצבה (Zilberman, 1983). הרמה זו מתרחשת גם במהלך המיוקן המאוחר – פליוקן והיא מסומנת על ידי התפתחות מערות קארסטיות כפי שתואר על ידי Chaldek et al., (2021). בשלב טקטוני זה מודגשים גם המבנים הקימוניים של הר עריף והר בתור.

קו פארן

הקו נמשך מאזור כיפת עשת במזרח ועד למבנה הקמוני של ג'בל עריף-א נאקה במערב לאורך כ- 75 ק"מ (איור 2). לכל אורכו מהווה העתק פארן העתק רציף המלווה במבני שבירה ומקומיים, כיפות שבורות ושקעים סטרוקטורליים. המבנים הגדולים לאורכו הם כיפת עשת, רכס מנוחה, גרן כרכום, הר חספס, אגפו הדרומי של הר בתור והמבנה הקימוני של ג'בל עריף-א-נאקה שבסיני. החתך הסטרוטיגרפי החשוף לאורכו כולל יחידות מגיל טריאס החשופות במבנה ג'בל עריף-א-נאקה ועד ליחידות צעירות מגיל פליו-פלייסטוקן כמו תצורת הערבה ומספר מפלסי קונגלומרט מגיל פלייסטוקן תיכון ומאוחר ששקעו לאורך מערכות הניקוז הנוכחיות. לאורך קטעים רבים של קו השבירה מוכרת מנרליזציה ברזלית שגילה אוליגוקן ומיוקן תיכון (4.6 ± 31 ו- 14.5 מיליוני שנה, בהתאמה (שטרן, 2006; Ryb et al., 2021).

באזור שמדרום להר בתור ובהר חספס ההעתקה מלווה ביצירת אי התאמות חריפות בין יחידות של חבורת הר הצופים ועבדת. אי ההתאמות מעידות שבין הסנטון והאיאוקן התיכון התפתח מצפון להעתק פארן בלוק מורם ביחס לבלוק שמדרום לקו השבירה. שינויי פאציאס ועובי שנמצאו בחתכי חבורת עבדת בקרבת ההעתק מעידים כי ההעתק היה פעיל במהלך האיאוקן. הרמת הבלוק שמצפון להעתק ממשיכה להתקיים גם בזמן עיצובו של מישור הגידוע הרגינולי כאשר המבנים המצויים מצפון לקו ההעתק, בין גרן כרכום להר בתור, גדועים עמוקות עד לחשיפת תצורת תמר בהר חספס וסלעי תצורות חביון – אבנון בהר בתור. זאת בניגוד לשימור כמעט מלא של סלעי חבורת עבדת מדרום לקו השבירה. מצב זה מעיד על הפרשי גידוע המגיעים לכ- 450 מ' משני עברי הקו שהתפתחו במהלך האוליגוקן. ואכן, עדויות לפעילות אולגוקנית לאורך הקו נמצאו על ידי Weinberger et al., (2020) בהתבסס על גילי אורניום – עופרת של עורקי קלציט שהתפתחו על מישור ההעתק. עדויות להמשך הפעילות לאורך הקו במהלך המיוקן נמצאו בגרן כרכום, והם מעידות על השקעה סינ-טקטונית של תצורת חצבה בתוך המבנה השבור (Weinberger et al., 2020).

לאחר המיוקן המוקדם מתהפכת במגמת השבירה לאורך הקו כשהבלוק הדרומי מורם לאורך קו השבירה. הר שגיא והר כרכום המצויים מדרום לקו השבירה הופכים למבנים ההרריים הגבוהים במרחב. בשלב זה – ככל הנראה במיוקן התיכון (Weinberger et al., 2020) מתפתח גרן כרכום שלתוכו נופלת תצורת חצבה, ומודגשים המבנים של הר חספס והר בתור. כיסוי הקונגלומרט של תצורת הערבה ששקע לאורך נחל כרכום שבור באופן מקומי על ידי המשך הפעילות שלאורך העתק פארן, אם כי השבירה הולכת ודועכת בעוצמתה במעבר מהפליוקן לפלייסטוקן המוקדם.

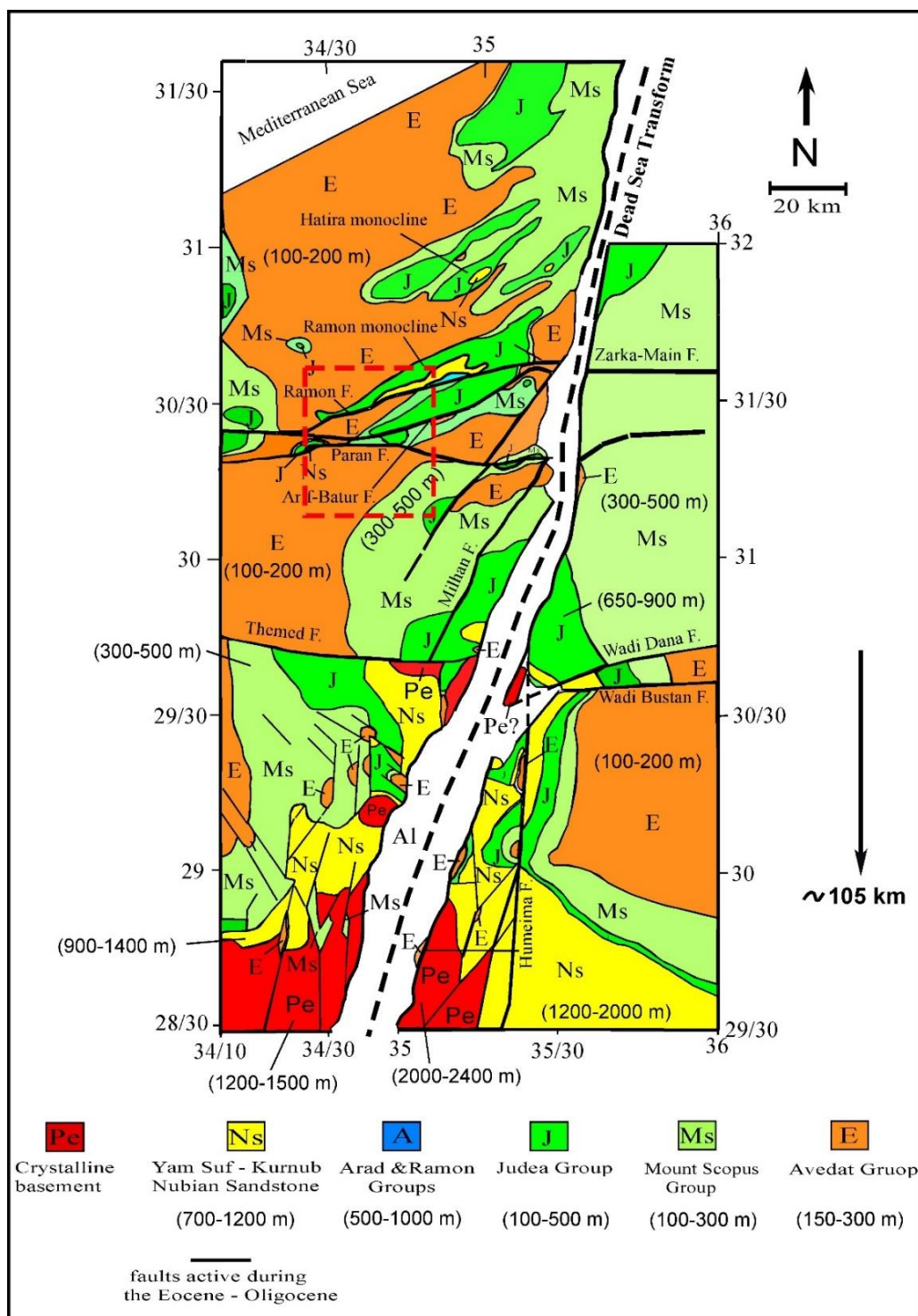
השבירה האופקית לאורך העתק פארן במבנה הר חספס הוערכה על ידי Zilberman, (1983) לכ- 50 מ'.

הפאזות המורפוטקטוניות

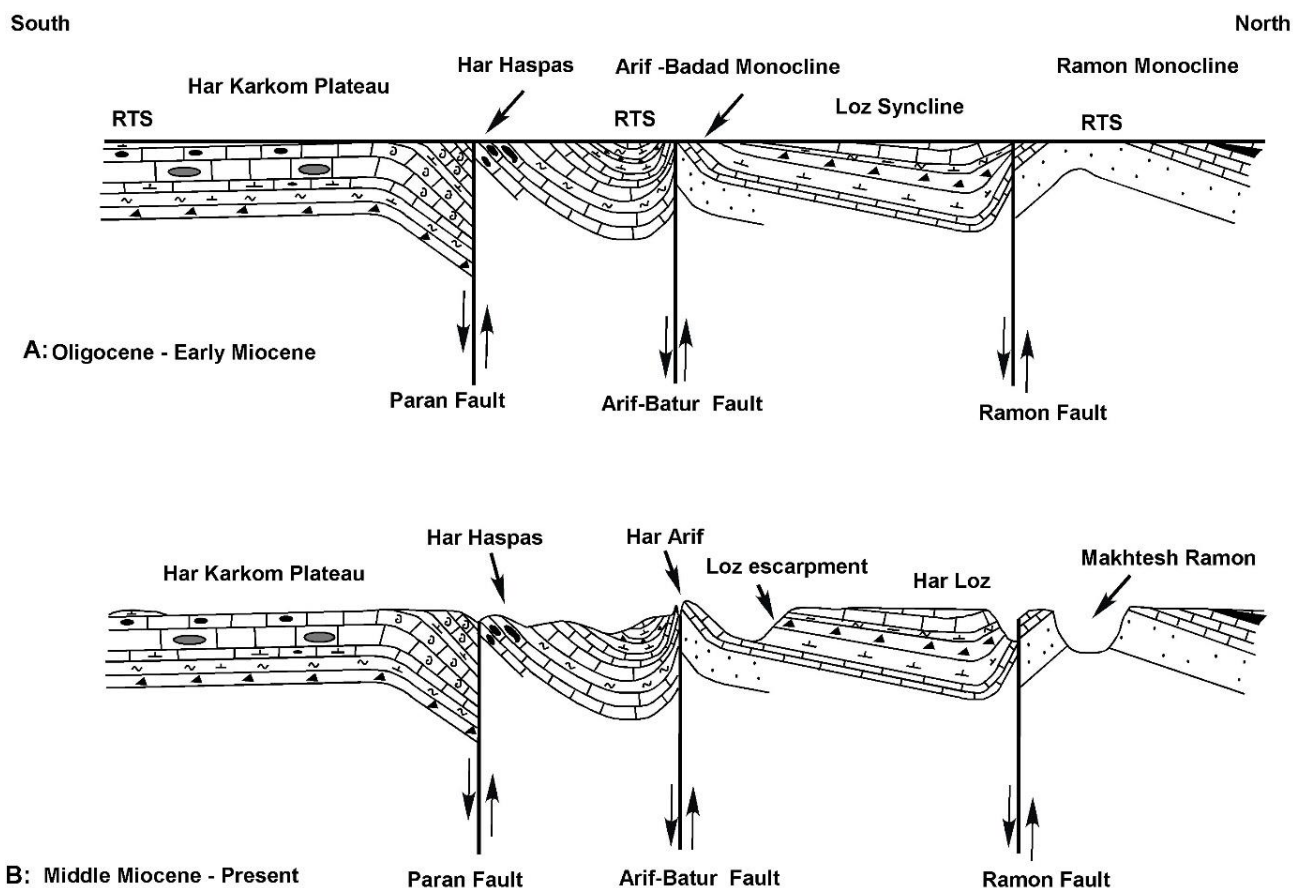
בנוסף למבנים שנזכרו, באזור הנגב המרכזי יש ייצוג נכבד לשתי פאזות מורפוטקטוניות עיקריות שיוצרות שני מפלסי נוף שלהם משמעות אזורית:

יצירת מישור הגידוע הרגינולי (אוליגוקן מוקדם – מיוקן מוקדם)

כבר ב- 1943 קבע פיקארד את המושג "מישור הגידוע האוליגוקני" ככינוי למישור גידוע רחב מימדים הגודע את חתכי הסלעים מעל למבנים המורמים במזרח התיכון, ובכלל זה בהרי יהודה וברמת עבר הירדן. מישור זה זוהה בעבודות רבות שנעשו בנגב בעשרות השנים האחרונות אך משמעותו הטקטונית נותרה שנויה במחלוקת. עבודה מסכמת העוקבת אחרי התפתחות מישור הגידוע, חשיבותו הטקטונית והמנגנון הגיאודינמי היוצר אותו בראיה אזורית פורסמה על ידי Avni et al., (2012). עבודה זו קשרה את התפתחות מישור הגידוע האוליגוקני, או בשמו המעודכן "מישור הגידוע הרגינולי" - **RTS – Regional Truncation Surface**, לאירוע נרחב של הרמה טקטונית איטית ומתמשכת המלווה בשבירה של כל המרחב שסביב ים סוף ובכלל זה של אזורים נרחבים במזרח הים התיכון ובלוח הערבי. אירוע זה שהחל לפני כ- 35 מיליון שנה נמשך כ- 10 מיליון שנה (בין 35 ל- 25 מיליון שנה בקרוב) מקדים את ביקוע היבשת האפריקאית-ערבית ואת פעילות טרנספורם ים המלח שבאו בשני שלבים עוקבים לאחריו (Avni et al, 2012). במהלך אירוע מתמשך זה הורמו ונגדעו באופן דיפרנציאלי בלוקים טקטוניים שונים שהיו מופרדים זה מזה על ידי קווי העתקה קדומים, ובהם מערכת הקמטים של הקשת הסורית וקווי השבירה נגב – מרכז סיני. לאחרונה נמצאו עדויות ישירות לפעילות טקטונית בתקופת האוליגוקן לאורך קווי השבירה ערף-בתור ופארן על ידי Weinberger et al (2020) בהתבסס על תיארוך בשיטת אורניום-עופרת של עורקי קלציט שנוצרו במהלך הפעילות הטקטונית. הפעילות הארוזיבית הנמרצת הביאה לחשיפת סלעי התשתית הפרה-קמברית במרחב אילת, בדרום סיני, בדרום ירדן ומשני עברי ים סוף בעוד שבבלוקים ירודים נישמר כמעט כל החתך הסדימנטארי ובכלל זה מרבית החתך האיאווקני (Avni et al, 2012; אבני, 2016). בחינת מיקומם וסידורם המרחבי של בלוקים אלה לאורך הערבה וים המלח מעידה כי באזור זה התקיימה כבר באוליגוקן המוקדם מערכת העתקה מפותחת שלתוכה התמקם במיוקן המוקדם והתיכון טרנספורם ים המלח (Avni et al, 2012; איור 4). לקראת סופו של האירוע עוצב באזור כולו מישור גידוע רגינולי הקובע עד היום את היחידות הסטרטגרפיות החשופות במפלס הפסגות והרמות הגבוהות בנגב. תוצרי הארוזיה הובלו אל הים והצטברו באגן הלבנט, שהווה את בסיס ההשקעה למערכת הניקוז האזורית ששורשיה היו בצפון-מזרח אפריקה וערב. במיוקן המוקדם מכסים את חלקו הצפוני-מערבי של מישור הגידוע הרגינולי סדימנטים של תצורת חצבה (קלבו, Zilberman; 2002) and Calvo, 2013 ושגילה המקורב 16-20 מיליון שנה. שיחזור של מישור הגידוע בחתך צפון – דרום החוצה את אזור הסיור מוצג באיור 5A.



איור 4: מפת שיחזור של מישור הגידוע הרגיונלי הקובע את רמת החשיפה של יחידות הסלע השונות במרחב הנגב ומזרח סיני בסוף האוליגוקן. הצבעים השונים שבמפה מתייחסים ליחידות הסטרטיגרפיות השונות ואת עובי עמודת הסלעים שהם מייצגים. הריבוע אדום מראה את אזור הסיור. המספרים במפה מציינים את עובי החתך שהוסר בכל תא שטח במהלך האוליגוקן. שים לב שהאזור שממזרח לטרנספורם ים המלח הוסט חזרה בשיעור 105 ק"מ למצבו באוליגוקן וכי מתקיימת התאמה טובה יחסית בין שני החלקים שהופרדו על ידי הטרנספורם. השינויים אחרי (Avni et al., 2012).



איור 5: חתכים סכמטיים, ללא קנה מידה, של הנגב המרכזי מקמר רמון בצפון ועד להר כרכום בצפון. A: חתך במהלך התפתחות מישור הגידוע הרגיוני (RTS) שהתפתח באזורינו באוליגוקן ובמיוקן המוקדם, בטרם התכסה על ידי הסדימנטים של תצורת חצבה. B: מראה אותו האזור לאחר אירוע ההרמה והארוזיה שהחל במיוקן התיכון ונמשך בהפסקות עד לימנו. שים לב לדמיון הרב שבין החתכים המבטא את העובדה שמערכות הניקוז התחתרו לעומק אבל האזור נשאר בעל אופי רמתי שמקורו באוליגוקן.

הפעילות הטקטונית המאוחרת להשקעת תצורת חצבה (מיוקן תיכון – הווה)

לאחר השקעת תצורת חצבה מתרחשת באזור הנגב ובאזורים הסמוכים פעילות טקטונית נרחבת הקשורה להתמקמות טרנספורם ים המלח בגבולו המזרחי של לוח ישראל-סיני (Nuriel et al., 2007). הדבר מביא לשינוי גיאודינמי אזורי כשהמשטר הטקטוני שיצר הרמות נרחבות בקצב טקטוני הנמוך מהקצב הארוזיבי, משטר שאפיין את הפעילות הטקטונית – ארוזיבית במהלך האוליגוקן והמיוקן המוקדם, מוחלף במשטר של שבירה טקטונית נמרצת שלווה בהרמה אזורית של בלוקים נפרדים כשהקצב הטקטוני עולה משמעותית על הקצב הארוזיבי. בשלב זה נוצרה לוקליזציה של המאמצים הטקטוניים לאורך קווי ההעתקים בצד התכנסות של הפעילות הארוזיבית שיוצרת התחתרות אינטנסיבית לאורך מערכות הניקוז החדשות, בשעה שהשטחים הרמתיים הגבוהים שבין האפיקים נשארו מעל למערכת הארוזיבית הפעילה ונשמרו במידה רבה במתכונתם המקורית כפי שעוצבו במהלך האוליגוקן (איור 5B).

בשלב זה (מיוקן תיכון) מתפתח בנגב המרכזי כיפה סטרוקטורלית א-סימטרית שצירה מצוי בחלקו המערבי, בציר העובר ממערב קמר רמון באזור הר רמון דרך מצוקי לוץ להר בתור ולהר שגיא. ממזרח לקו זה נטוי האזור למזרח אל בקע הערבה ההולך ומתפתח, וממערב לקו הקימרון נוחת אל אגן מרכז סיני. בהתאמה לכיפה זו התפתחו מערכות הניקוז הנחלקות לאלה המתנקזות מזרחה אל בקע ים המלח ומערבה אל אגן ואדי אל עריש ואל הים התיכון. לאורך אגני הניקוז המזרחיים שוקעת בפליוקן המאוחר ובפלייסטוקן המוקדם תצורת הערבה ובמפנים המתנקזים אל הים התיכון תצורת אחוזם המתאצבעת עם תצורת פלשת הימית.

אירוע של הרמה נוספת המלווה בשבירה נורמלית אינטנסיבית מתרחש לאחר השקעת תצורת הערבה בפלייסטוקן המוקדם, לפני כ- 1.5-1 מיליון שנה. עיקר הדפורמציה מרוכזת לאורך קווים המכוונים לצפון – מזרח המשולבת בהטיה של מרבית הנגב לכיוון מזרח אל בקע הערבה. ההרמה הנוספת של קימרון הנגב המרכזי מביאה את האזור לגובה הנוכחי כשהפסגות הגבוהות מצויות בתחום הגבהים 850-1000 מ מעל לפני הים. ההטיה והשבירה מאיצה את התחתרות מערכות הניקוז שבהם חלים שינויים מקומיים בשל התאמת רשת הניקוז למשטר השיפועים והגבהים החדש. במסגרת זו נקטע מהלכו של נחל פארן – נקרות באזור גרבן כרכום ונחל פארן פרץ בדרכו מזרחה אל הערבה ביוצרו את צוואר הבקבוק. במקביל חלו שינויי ניקוז ניכרים לאורך פרשת המים העילית שבין אגן נחל פארן לאגן ואדי אל-עריש המבטאים טקטוניקה מקומית הפועלת לאורך הגבול שבין האגנים והיא נמשכת במהלך כל הפלייסטוקן.

מסלול הסיור

יום 1: ממצפה רמון אל הר עריף

יום זה מוקדש כולו לביקור במבנה הגיאולוגי המיוחד של הר עריף. יוצאים ממצפה רמון צפונה אל מישור הרוחות ונוסעים בכביש 171 מערבה אל מפגש הדרכים שמדרום לבורות לוז. בדרך נוסעים לאורך התפר שבין מורדותיו הצפון-מערביים של קמר רמון ובין שוליו הדרומיים של קער עבדת. מפגש זה יוצר את "מצוק אי ההתאמות" הנראה לאורך רכס הגבעות המלווה את הכביש מצפון. במפגש הדרכים יורדים דרומה ונוסעים בדרך עפר קשה העבירה לרכב רב-מינוע אל מעבר ערוד, נחל ערוד, מרגלות מצוקי לוז ואל נחל מעזר. הדרך חוצה את חלקו המערבי של קמר רמון, את העתק רמון העובר בראש נחל לוז ובמעבר ערוד ואת קער הר לוז. הנסיעה לאורך נחל מעזר מעמיקה אל תוך קמר עריף-בדד עד להגעה לחניון הלילה של נחל מעזר. משך הנסיעה מאז היציאה ממצפה רמון – בין שתיים ל-3 שעות. עולים אל פסגת הר עריף בשביל המסומן ויורדים דרך המכתש המערבי אל חניון הלילה (איורים 6 ו-7). אורך מסלול ההליכה כ- 10-12 ק"מ.



איור 6: הר עריף – מראה כללי במבט ממערב.

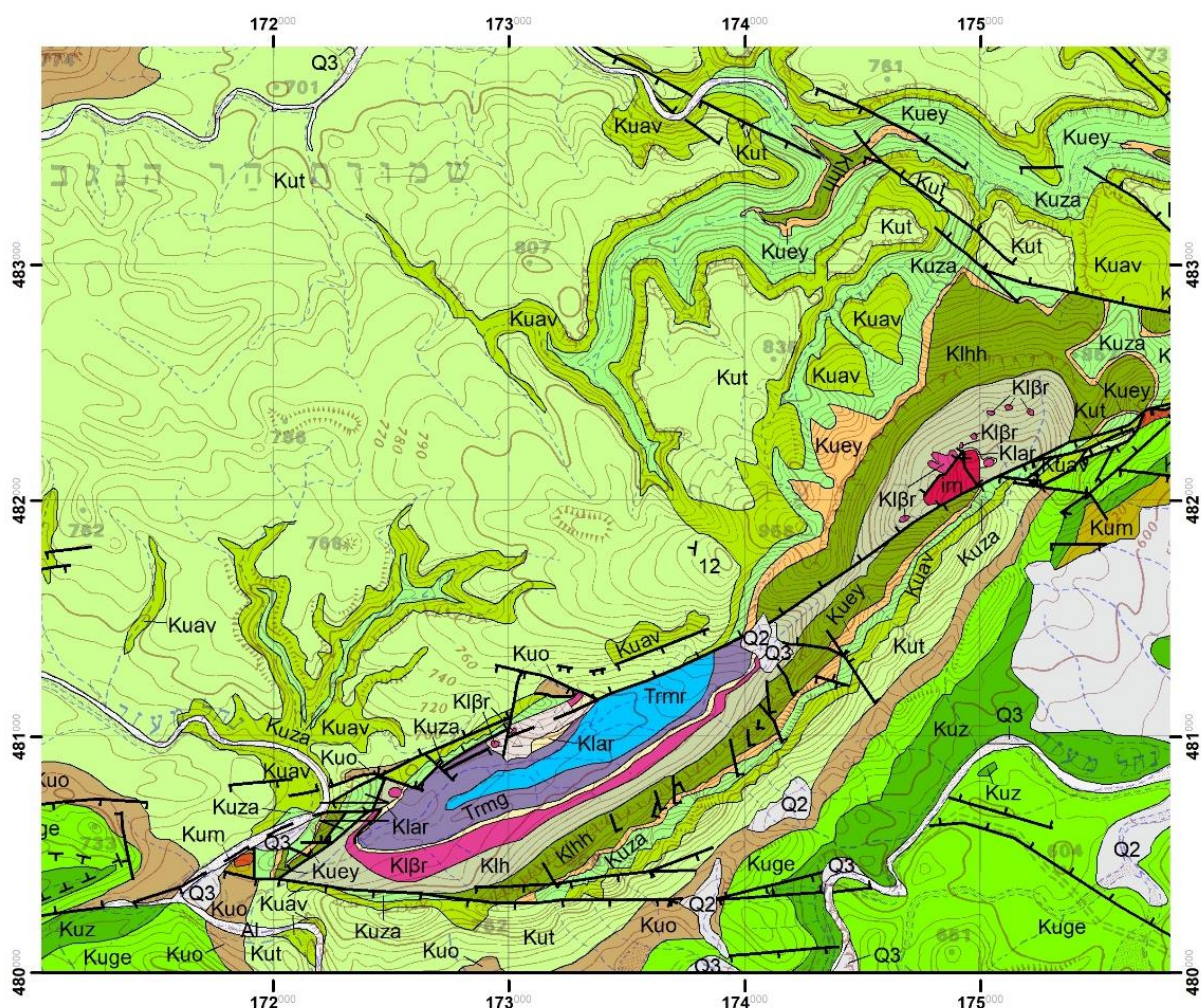


איור 7: מבט מפסגת הר עריף אל המכתש המערבי. קו המתאר של הצוקים המקיפים את המכתש מצפון בנוי על בסיס תצורת חביון שחלקה התחתון מכיל שכבות חרסית וחואר וחלקה העליון בנוי מדרגשים קשים של גיר ודולומיט היוצרים מצוק. העתק עריף-בתור חוצה את המכתש בצמוד לדופן הימנית ונמשך מזרחה כשהוא יוצר את המדרגה הסטרוקטורלית של מצוקי עריף.

המדריך הגיאולוגי לסיור בהר עריף נכתב על ידי עזרא זילברמן ודורית קורנגרין ופורסם בחוברת הסיורים של כנס החברה הגיאולוגית שהתכנס במצפה רמון ב-2017. מדריך הסיור המקורי מצורף בסוף החוברת כנספח מס' 1. כהשלמה למכלול הנושאים שתוארו ונדונו אצל זילברמן וקורנגרין (2017) נביא כאן כמה נושאים נבחרים.

דיון בהתפתחות המכתשים בהר עריף

הר עריף הוא מבנה לחיצה מורם שבנוי משתי חצאי כיפות החופפות בחלקם. המבנה התפתח בסופרפוזיציה על חלקו המערבי של קמר עריף-בדד. את המבנה חוצה העתק עריף-בתור המחליף את כיוון העתקה בין שני אגפי המבנה. ההרמה והארוזיה חשפו חתך סלעים מגוון מחבורת רמון מגיל טריאס, חבורת כורנוב מגיל קרטיקון מוקדם וחבורת יהודה מגיל קרטיקון מאוחר.



איור 8: מפה גיאולוגית של הר עריף (אבני וחוברין, 2017). מקרא המפה מופיע באיור 3.

שלבי התפתחותו של הר עריף נידונו בעבר אצל Zilberman, 1983 ואצל זילברמן וקורנגרין, 2017. המבנה המורם יושב בלב אזור חשיפה נרחב של סלעי חבורת יהודה (איור 8). בגלל מיעוט המחשופים של סלעי חבורת הר הצופים שנשמרו בקרבתו, קשה לברר האם המבנה כבר היה קיים כמבנה ייחודי בזמן הקרטיקון המאוחר – פלאוקן, וזאת בתוספת להיותו ממוקם בחלקו המערבי של קמר עריף-בדד. מחשופים בודדים של תצורות מנוחה ומישאש נמצאו בצמוד לדופן הדרומית של המכתש המזרחי ובפתח המכתש המערבי של הר עריף. מחשופים אלה מציגים חתך מצומצם של תצורות מנוחה ומשאש המעיד על מיקומו באגף המוגבה של קמר עריף-בדד. אין במחשופים בודדים אלה כדי להעיד על התפתחות מיוחדת של הר עריף עצמו במהלך הקרטיקון המאוחר – פלאוקן. גם סלעי חבורת עבדת כמעט שנעדרים מן האזור ונשמרו רק במספר משארים קטנים המצויים בין הר עריף להר בתור (גבעות נ.ג. 731 ו-727), המצויות במרחק של 3 ו-4 ק"מ ממערב לפתח המכתש המערבי. למרות העדר העדויות הישירות לקיומו של מבנה הר עריף בזמן הקרטיקון המאוחר – איאוקן, התפתחות המבנה הנראה היום ניתנת לבחינה על פי יחסו להתפתחות מישור הגידוע הגדול שהתפתח במהלך האוליגוקן בכל המרחב והמשפיע עד היום על מבנה הנוף של הנגב ובכלל זה בהר עריף. בחינת שרידי מישור הגידוע הרגינולי בשולי הר עריף ולאורך קו הפסגות של ההר מראה על הסרת החלקים הגבוהים של חתך חבורת יהודה – תצורות ציחור, גרופית ואורה, עד לחשיפה נרחבת של תצורת תמר בקרבה לפסגת הר עריף (איורים 3 ו-8).

חצי הכיפה המזרחית אף גדועה הרבה יותר, עד לחשיפת תצורת חביון (איור 7). חסר זה בחתך זה מסתכם לעובי של כ- 280 מ', ואם נוסיף לו את חתך חבורות הר הצופים ועבדת, שכלל הנראה שקעו בקרטיקון המאוחר ובאיאוקן באזור כולו ובכלל זה על קמר עריף-בדד, נקבל חתך משולב העולה על 450 מ' שהוסרו על ידי מישור הגידוע הרגיונלי במהלך האוליגוקן.

כאשר בוחנים את מבנה הר בתור הנמצא במרחק של כ- 7 ק"מ ממערב להר עריף רואים שגם מבנה כיפתי זה, שהתפתח גם הוא כמבנה לחיצה לאורך העתק עריף-בתור (Zilberman, 1983), גדוע עמוקות ובאופן נרחב על ידי מישור הגידוע הרגיונלי, עד לחשיפה נרחבת של סלעי תצורת חביון, צפית ואבנון, בעיקר מדרום לקו ההעתק. גידוע עמוק זה התקרב מאוד לחשיפת תצורת חתירה החולית.

לפיכך, ניתן ליחס את התפתחות שני המכתשים של הר עריף למערך של גידועים והרמות קדומים. הדבר מחייב קימוט וארוזיה שפעלו על הר עריף במהלך האוליגוקן, בדומה למתואר עבור התפתחות המבנה הגדוע של הר בתור. למעשה, קמר עריף-בדד כולו מגיע באוליגוקן לאחד משלבי ההרמה והגידוע העיקריים שלו ופעילות זו מתועדת על ידי השקעת עורקי קלציט לאורך מישורי ההעתק באזור מעלה המישור שגילה נקבע בשיטת האורניום – עופרת ל- 29 מיליון שנה (Weinberger et al., 2020). בשלב זה נגדעו הכיפות עד לחשיפת תצורת חתירה מתחת למישור הגידוע, אך מבלי שהמכתשים עצמם התפתחו בהם. המשך הפעילות של ההעתק במהלך המיוקן מביאה להזדקרות הפסגה של ההר בשיפוע חריף (כ- 25 מעלות) אל מעל לקווי המתאר השטוחים של מישור הגידוע עצמו, כפי ששרדו במרומי הר לוח שמצפון להר עריף ובהר שגיא – הר כרכום שמדרום לו. הרמת מיוחדת זו, תוספת לאזורים המורמים והגדועים, התרחשה לאחר השקעת תצורת חצבה, שמחשופיה מוכרים באזור המקיף את הר עריף (כמו בגרבן כרכום, בגרבן ביר מעין, ובמחשופים קטנים מתחת למישור הגידוע באזור הר הנגב כולו, ראה אבני, 1991). פעילות זו של העתק עריף-בתור במהלך המיוקן התיכון משולבת בהרמת הר הנגב המרכזי כולו והיא שהביאה להתחתרות מערכות הניקוז האזוריות ולריקון הכיפות הגדועות ולהתפתחות המכתשים, בדומה למתואר ממכתש רמון.

אפשרות שניה היא לאחר את התפתחות הכיפות למיוקן התיכון, לפני כ- 15 מיליון שנה, בשלב הפעלת כל העתקי מערכת הגזירה נגב – מרכז סיני (Weinberger et al., 2020). במקרה זה, כל התפתחות המבנה של הר עריף קשורה ביצירת מבנה לחיצה הדוק ושבור הנתקף ארוזיבית באופן המסיר את הסלעים הקשים של חבורת יהודה מתצורת תמר ועד לבסיס תצורת חביון, (כ- 230 מ') המכסים על אבני החול של תצורת חתירה, והפעילות הארוזיבית בשלב הזה מעמיקה לחדור אל תוך חתכי תצורת חתירה וחבורת רמון. לפי תרחיש זה, שני המכתשים נוצרו כחלק מהפעילות הארוזיבית הכוללת מאז המיוקן התיכון בדרך של הסרת הכיפה ונסיגת מדרונות, שהביאה אותם לרוחבם הנוכחי העומד על 500-700 מ'.

בתצפית מפסגת הר עריף ניתן לראות את הקיר הדרומי של המכתש הארוך (המערבי) הבנוי מתצורת חביון, בעוד שהקיר הצפוני בנוי מתצורת אבנון (איורים 6 ו- 8). מבנה זה מראה שבזמן יצירת מישור הגידוע הרגיונלי, חצי הכיפה הדרומית היתה גבוהה מהצפונית ונגדעה עמוקות, וזה בשונה מהמצב הטופוגרפי הנוכחי. בדומה לכך נגדעה הכיפה המזרחית עד לחשיפת תצורת חביון לאורך שרשרת המצוקים המלווה את האגף הצפוני של הכיפה (איור 7). היפוך טופוגרפי המוריד את האגף הדרומי של הר עריף בהשוואה לאגפו הצפוני נוצר ככל הנראה בשלב הפעילות הטקטונית לאורך ההעתק במיוקן התיכון (Weinberger et al., 2020). תצורת הערבה שגילה פליוקן – פלייסטוקן מוקדם מכירה כבר את המבנה המורם של הר עריף, וסלעי הקונגלומרט שלה המונחים בגובה של 30-50 מ' מול פתח המכתש המזרחי כשהם מכילים סלעים של תצורת חתירה שהובלו מתוך המכתש אל מערכת הניקוז הקדומה של נחל פארן-נקרות.

לאחר התצפית מפסגת הר עריף יורדים אל המכתש המערבי ודרכו חוזרים לחניון הלילה של נחל מעזר ללינה. קטע זה בסיור מוסבר, בכיוון הפוך לכיוון הסיור שלנו, אצל זילברמן וקורנגרין, 2017.

יום 1: מנחל לז' למצוקי לז' - מסלול אלטרנטיבי

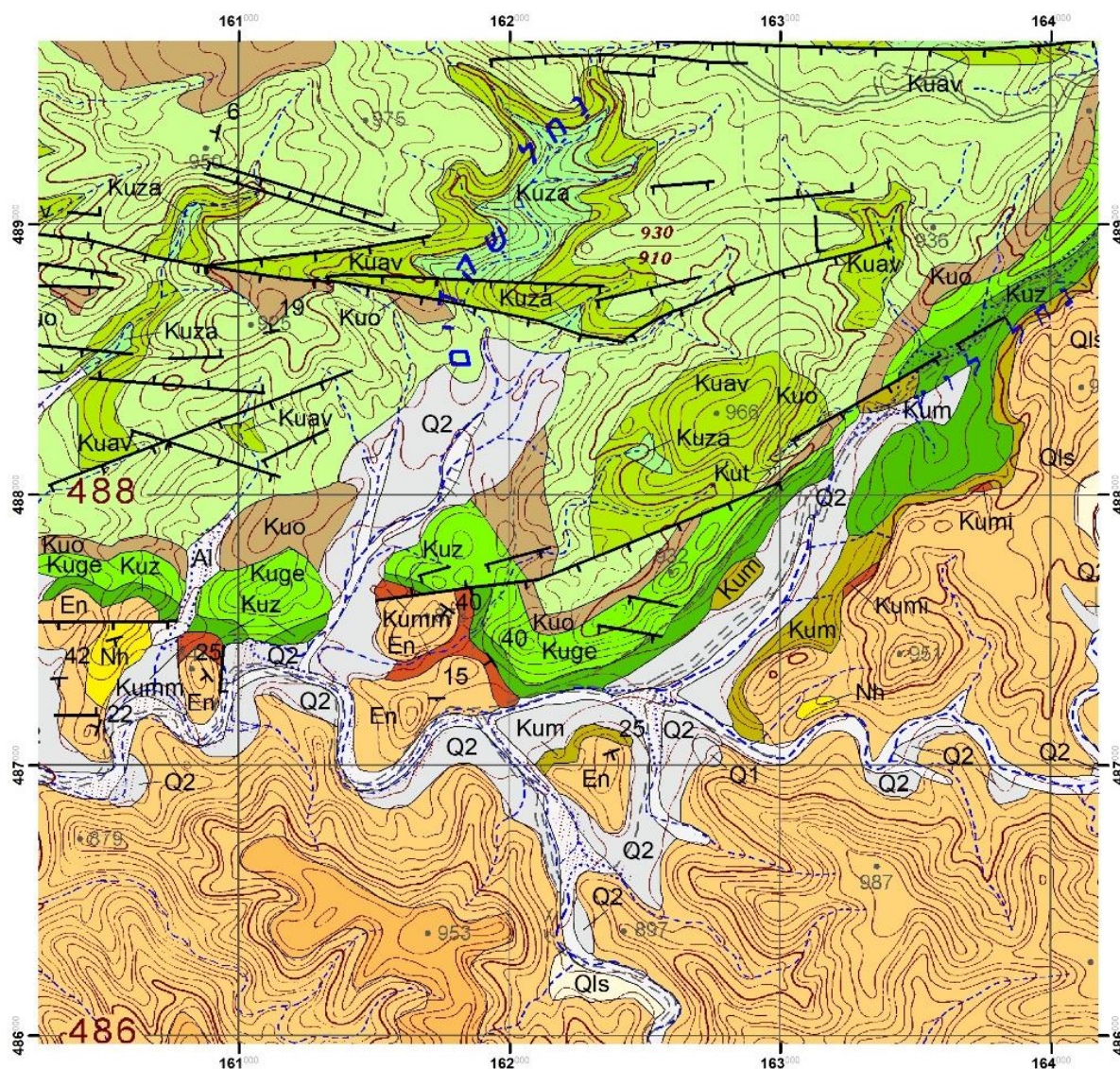
במידה ולא יתאפשר להגיע להר עריף בגלל פעילות צבאית בשטח האש, מסלול היום הראשון של הסיור ישונה לאזור נחל לז' - הר לז' - מצוקי לז' ונחל ערוד על פי התוכנית הבאה:
נסיעה ממצפה רמון מערבה בכביש 171. ירידה מהכביש לדרך העפר היוצאת דרומה ומזרחה אל מעבר ערוד. נסיעה עם המשאית כ- 2 ק"מ בדרך העפר לכיוון מעבר ערוד. מול כיפת נחל לז' המסתמנת מדרום לדרך, יורדים מן הרכב ומתחילים את המסלול הרגלי. הולכים כקילומטר וחצי בכיוון דרום אל ראש כיפת נחל לז' (נ.ג. 966) (איור 9 ו- 10).

כיפת נחל לז' (על פי אבני, 1991) ורון (2007).

זהו מבנה לחיצה שהתפתח לאורך הסגמנט הדרומי של העתק רמון ממערב למעבר ערוד. אורכו כ- 1.5 ק"מ ורוחבו 1 ק"מ. צירו מכוון לצפון מזרח (אזימוט 45 מעלות). החתך הבונה אותו כולל יחידות מתצורת צפית עד לתצורת ניצנה (איור 10). נטיית השכבות מגיעה לכ- 55-70 מעלות ושיאן נמצא באגפו הדרומי-מערבי של המבנה הגובל באפיק נחל לז'. רון (2007) מצא ששני העתקים עיקריים חוצים את כיפת נחל לז': העתק ראשי החוצה את המבנה לאורכו כשמידת ההסטה האנכית לאורכו מגיעה ל- 95 מ' והבלוק הדרומי הוא הירוד. הסטה אופקית ימנית בשיעור 200 מ' נמדדה על מישור ההעתק זה על ידי רון (2007). העתק משני בכיוון מקורב מזרח-מערב ובאורך 400 מ' מתפצל מן ההעתק הראשי מדרום לפסגת המבנה. ההסטה האנכית לאורכו מגיעה ל- 100 מ' וההסטה האופקית ימנית לאורכו מגיעה ל- 60-100 מ'.



איור 9: מראה האגף הדרומי - מערבי של כיפת נחל לז'. מבט מדרום מערב.



איור 10. מפה גיאולוגית של כיפת נחל לוי (אבני, 2001). הכיפה חצויה על ידי העתק רמון הדרומי. קילומטר ממערב לכיפה מתפתח גרוב נחל לוי ובו נשמר חתך של תצורת חצבה.

מבנה כיפת נחל לוי תואם בצורתו הסטרוקטורלית את מבנה הר עריף הגדול והמפותח ממנו (איורים 6 ו-8). שני המבנים דומים בנקודות הבאות:

1. כיפת נחל לוי בנויה בעיקר מתצורת אבנון ותמר עם חשיפה מקומית עמוקה יותר של תצורת צפית. המבנה הכיפתי מתון והשיפועים השכיחים הם בגבולות ה- 20-50 מעלות. לעומת זאת, בהר עריף הכיפה בנויה מיחידות עמוקות יותר של חבורת יהודה עד לחשיפת תצורות חביון, עין ירקעם וצפית. הכיפה נוחתת בתלילות לדרום כשיפועי השכבות מגיעים לכ- 70 מעלות ויותר. ראש הכיפה שבור ומזדקר בשיפוע של 15-25 מעלות.
2. לכיפת נחל לוי עמק מערבי מאורך החושף יחידות עליונות בחתך חבורת יהודה כמו תמר, אורה וגרופית (איור 10). בהר עריף התפתח במיקום זה המכתש המערבי החושף סלעים מגיל טריאס וקרטיקון מוקדם.

3. בכיפת נחל לוך התפתח עמק מעוגל אך רדוד ממזרח לשיא הכיפה וחושף את סלעי תצורת אבנון ותמר. בהר עריף נמצא במיקום זהה המכתש העגול המזרחי החושף חתך עמוק מגיל קרטיקון מוקדם ובכלל זה גוף מגמטי אינטרוזיבי המשפיע ככל הנראה על צורת המכתש (זילברמן וקורנגרין, 2017, ראה נספח 1).

מלבד הדמיון הצורני, התחתרות העמקים בכיפת נחל לוך מוגבלת בהתאם לגודל המבנה (1.5×1 ק"מ) ומידת הרמתו מעל לאגני הניקוז המקיפים אותו (120 מ'). לעומת זאת, מבנה הר עריף גדול באופן משמעותי (5×1 ק"מ) וגובהו מעל לסביבה מגיע עד ל-350 מ'. שני המבנים הינם נציגים מובהקים של מבני הלחיצה שנוצרו לאורך מערכת הגזירה נגב – מרכז סיני (איור 2). ההבדל המהותי בין המבנים הוא בגודלם הסטרוקטורלי, בעוצמת החשיפה של החתך המתגלה בהם ובגובהם היחסי מעל לפני השטח. שלושת הפרמטרים הללו קשורים זה לזה באופן הדוק.

נחל לוך ונחל אליאב

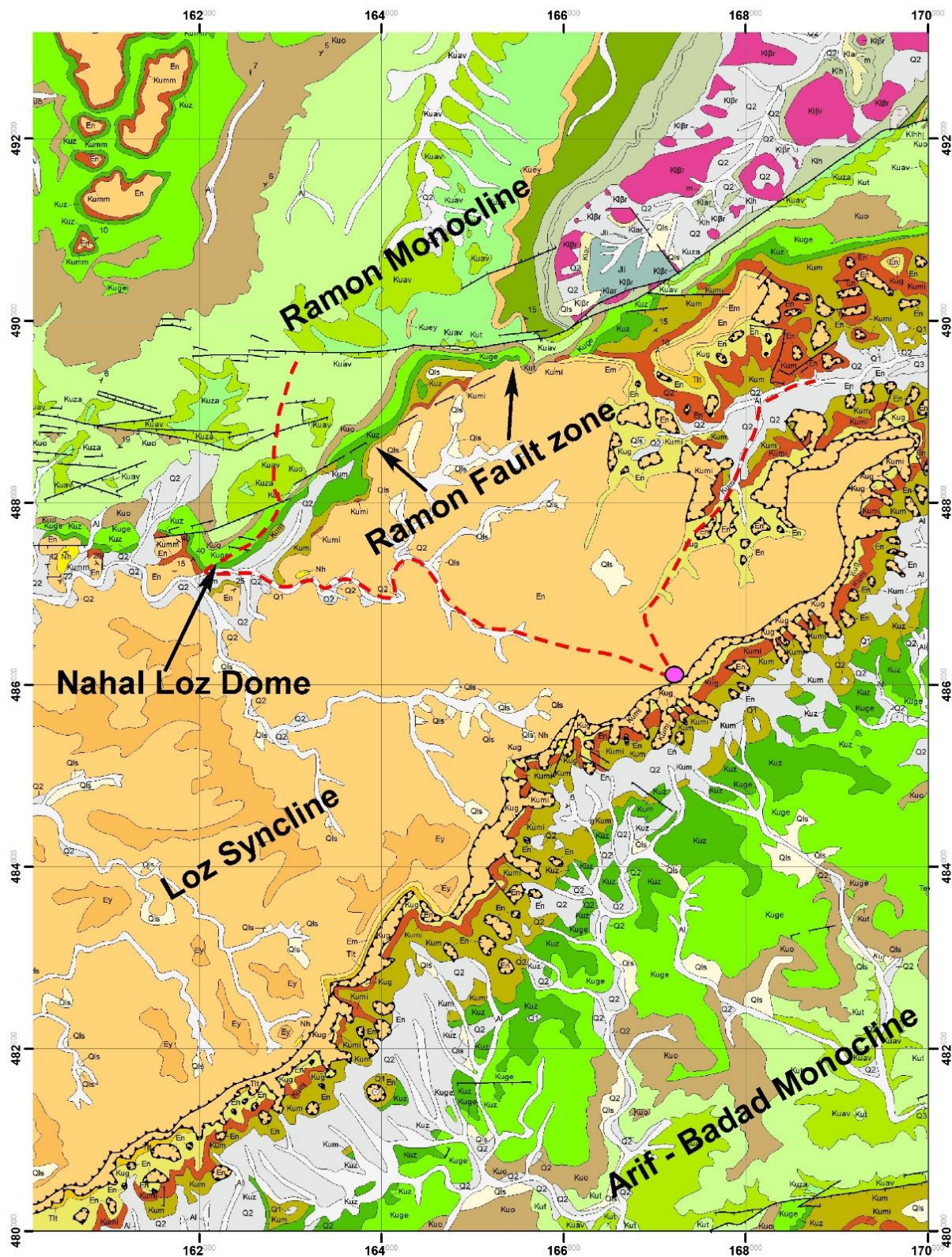
יורדים אל אפיק נחל לוך המתחתר על קו המגע שבין מורדותיו השבורים של קמר רמון ושיפוליו הצפוניים של קער לוך – נקרות (איור 11). לאורך הנחל וביובלים שמסביבו יש ריכוז גדול של עצי אלה אטלנטית גדולים ועתיקים (איור 9). בדיקת עובי הטבעות השנתיות של עץ מנחל לוך הראה שגזעי העצים הללו מוסיפים מידי שנה טבעת ברוחב ממוצע של 0.7 מ"מ, כך שעצים עבי-גזע, שלהם קוטר העולה על 1.5 מ', מגיעים לגיל של יותר מ-1000 שנה.

עולים במעלה נחל אליאב שהוא יובל גדול של נחל לוך המנקז את חלקו המזרחי של הר לוך אל נחל לוך ודרכו אל ואדי אל עריש ואל הים התיכון. נחל אליאב שאורכו כ-7 ק"מ מתחתר עמוקות בחתך הסלעים של חבורת עבדת הבונה את הר לוך (איורים 11 ו-12). בפתח הואדי ניתן לראות את מגע אי-ההתאמה בין תצורת מנוחה מבסיס חבורת הר הצופים לבין תצורת ניצנה מחבורת עבדת המבטא גידוע של חתך בעובי מצטבר של כ-250 מ' הכולל את החלק העליון של תצורת מנוחה, את כל תצורות מישאש, ע'רב, טאקיה ומור. חתכים חסרים אלה נמצאים במקומות סמוכים לאורך נחל לוך והם מבטאים את ההיסטוריה הגיאולוגית המורכבת של המעבר מקמר רמון אל קער לוך-נקרות כשבאזור המעבר מצויה המדרגה הסטרוקטורלית של העתק רמון (אבני, 1991). בעליה מזרחה לאורך נחל אליאב חוצים חתך עבה של גיר מאסיבי העשיר במאובני אצות גירניות ונומוליטים. לסלע מופע של "גיר שיישי" לבן ומרובים בו מבנים אינטרא-פורמציונליים של גלישות תת-מימיות. אופקים מצוררים ועדשות צור מופיעות מדי פעם בחתך. חתך מיוחד זה של תצורת ניצנה זכה לכינוי "תצורת ניצנה בפאציאס הר לוך" אצל אבני (1991). מעלה נחל אליאב מציג נוף האופייני להר הנגב הגבוה שבו מרובים עצי האלה אטלנטית, עצי שקד הרמון, שיחי אשחר וקרקש צהוב. לאורך הדרך פזורות מטליות גדולות של משקעי לס המעורבים בחצצים ששקעו באזור משילוב של אבק איאולי ובליה מקומית של סלעי חבורת עבדת. לחתכים אלה, המגיעים לעובי של 5-8 מ', נקבע גיל השקעה של 20-73 אלף שנה בקירוב, שהם גיל תקופת הקרח האחרונה (Faershtein et al., 2016; Avni et al., 2017).

הר לוח ומצוקי לוח

עולים במעלה היובלים העליונים של נחל אליאב ומגיעים אל ראש הרכס של הר לוח ואל ראש מערכת המצוקים של מצוקי לוח (איורים 11, 12 ו-13). מערכת המצוקים הזו, שראשה מצוי בגובה של מעל ל-1000 מ' מעל לפני הים, יושבת בקצהו הדרומי – מזרחי של הרמה השטוחה של הר לוח. אורך מערכת המצוקים כ-14 ק"מ, גובהם כ-200-250 מ' והם מכוונים בהתאמה לשיפוליו הצפוניים-מערביים של קמר עריף-בדד הנראה מקצה המצוק. 9 ק"מ בכיוון דרום-מזרח נראית הכיפה הסטרוקטורלית של הר עריף הרוכבת על קמר עריף-בדד. נקודת התצפית בראש מעלה לוח (נ.צ. 1672/4861) ממוקמת בראש מצוקי לוח על סלעי תצורת ניצנה המונחים על גבי הסלעים של חבורת הר הצופים המופיעים כאן במופעם האופייני לקעים (איור 11). במצוק מופיעות על פי הסדר תצורות מנוחה, משאש, ע'רב וטאקיה כשכל תצורה מגיעה לעובי של עשרות מטרים וביחד לחתך שעוביו כ-200 מ'. לשכבות של חבורת עבדת היוצרות את ראש המצוק שיפוע של כ-2 מעלות לצפון מערב, ושיפוע זה מבטא את הקימוט שהתרחש באזור קמר לוח – נקרות לאחר השקעת סלעי חבורת עבדת באיזון התיכון (איור 14). גג החתך של הר לוח גדוע על ידי מישור הגידוע הרגיונלי (RTS) שהתפתח בכל מרחב הנגב ובאזורים שסביבו במהלך האוליגוקן (איור 14). על גבי מישור הגידוע נמצאו משארים של תצורת חצבה – בעיקר כיסים קארסטיים המלאים בסלעי חול אדום – המעידים על השקעה נרחבת של התצורה בכל המרחב במהלך המיוקן המוקדם.

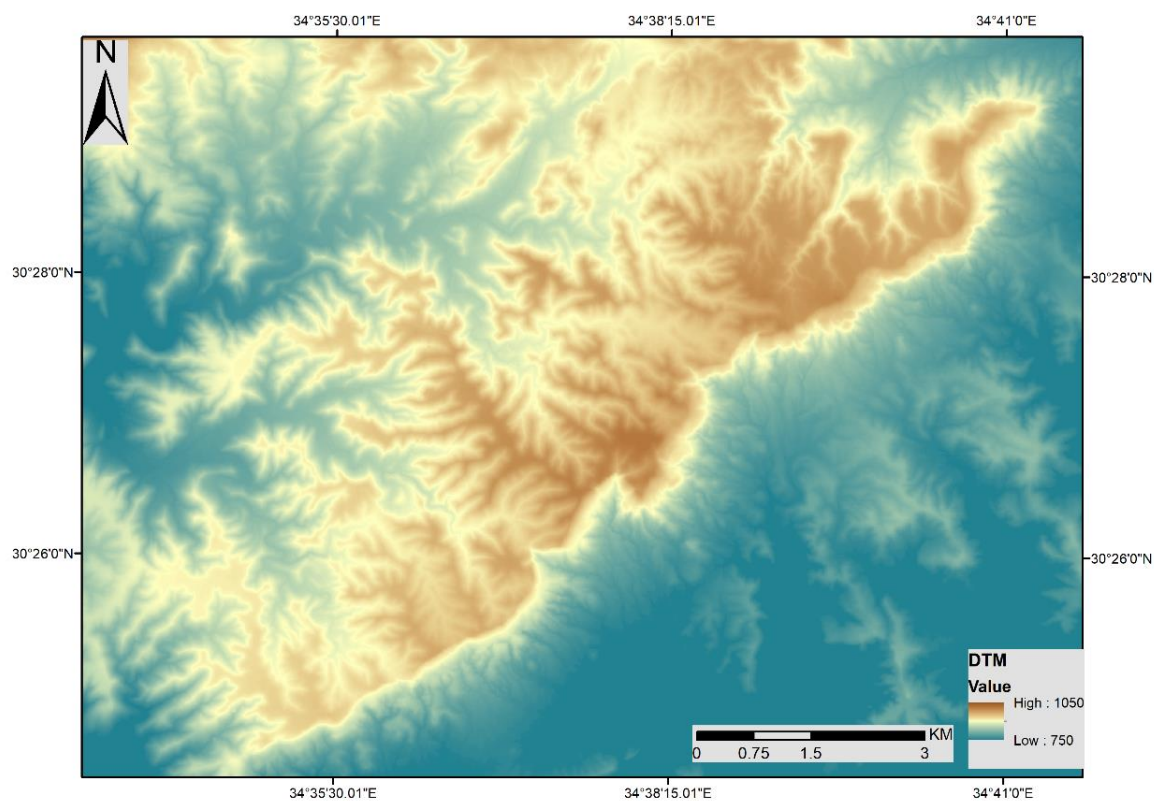
נקודת התצפית שבה אנו עומדים ממוקמת על בפרשת המים הארצית החוצה את חלקו המזרחי של הר לוח והיא נמשכת צפונה אל מעבר ערוד ופסגת הר רמון הנראית מן התצפית לכיוון צפון (איור 13). לאורך קו זה מתפצל הניקוז למערב – אל הים התיכון באמצעות היובלים של נחל לוח, ומזרחה אל ים המלח באמצעות יובלי נחל ערוד. המצוק עצמו מהווה נקודת מפגש ליובלים העליונים של מערכת הניקוז של נחל לוח עם הנחלים המנקזים את מורדות מצוקי לוח אל ים המלח באמצעות יובלי נחל פארן – נחל קציעה, נחל מעזר ונחל ברוקה. היות ומערכת הניקוז הזו מצויה משני עברי קו המצוק, ניתן לבחון בעזרתה את שאלת נסיגת המצוקים מאז שהוגדרה כאן המערכת המורפולוגית של מצוקי לוח (איורים 13 ו-14).



איור 11: מפה גיאולוגית של אזור הסיור (אבני, 2001). בקו אדום מרוסק – מסלול ההליכה. נקודת התצפית מראש מצוקי לוז מסומנת בסגול.



איור 12: מצוקי לוך. חתך חבורת עבדת מתצורת ניצנה מסתיים במצוק ומדרון תלול שבו מתגלות יחידות של חבורת הר הצופים. רוב המדרון מכוסה בגלישות גדולות של שלעי תצורת ניצנה על גבי סלעי החוואר והחרסית של תצורות ע'רב וטאקיה באופן המגן על המצוק מארזיה.



איור 13: הדמיית DTM של מצוקי לוך. פרשת המים הארצית עוברת בחלק המזרחי של הרמה.



איור 14: מישור הגידוע הרגיונלי (RTS) שהתפתח בראש הר לוף, כמו באזור כולו, במהלך האוליגוקן גודע את חתך חבורת עבדת הנטוי כ- 2 מעלות לצפון. המישור המקורי שמור למדי ולא מוכרת כאן התפתחות של רשת ניקוז בקרבת המצוק, דבר המעיד על קצבי נסיגה נמוכים של חזית מצוקי לוף מאז ראשית התפתחותם במיוקן התיכון.

1. על פי העדויות שנאספו בכל הנגב, התפתחות מצוקי לוף קשורה בהרמה הכללית של הנגב המרכזי שהחלה במיוקן התיכון אחרי גמר השקעת תצורת חצבה. שתי תצורות מאוחרות לתצורת חצבה נמצאו בנגב המסמנות את ראשית תהליך ההרמה של האזור וראשית התחתרות מערכות הניקוז – אותו שלב היוצר גם את מצוקי לוף: תצורת עין יהב (לשעבר פרט חופירה של תצורת חצבה לפי קלבו, 2002) המסמנת את ראשית יצירתם של אגנים שבורים לאורך בקע הערבה כתוצאה מפעילותו המוקדמת של טרנספורם ים המלח ואת ראשית חשיפת חתך הסלעים שהיה קבור מתחת למשקעים של תצורת חצבה. גילה המשוער של תצורת עין יהב הוא כ- 14-16 מיליון שנה (אבני, 2021).
2. קונגלומרט חימר (זילברמן ואבני, 2007) שמחשופים שלו נמצאו בעיקר לאורך נחל חימר הקדום והוא מבטא הרמה של הר הנגב והתחתרות של מערכת הניקוז הנוכחית. גילו של הקונגלומרט נקבע ל- 12-14 מיליון שנה. לפני 12 מיליון שנה קונגלומרט חימר הפסיק לשקוע בשל מעוותים טקטוניים והתחתרות נחלים (אבני, 2021).

בהנחה שמצוקי לוף החלו להתפתח עם תחילת תהליך ההרמה הכללי של הנגב המרכזי שהתרחש במיוקן התיכון, לפני כ- 14-16 מיליון שנה, הרי שניתן לאמוד את קצב הנסיגה לאחר של המצוקים ואת מידת יציבותם בהתבסס על הפרמטרים הבאים:

1. מערכת הערוצים המנקזת את מצוקי לוף החלה להתפתח במקביל להרמת האזור. לכן גיל הנחלים כגיל המצוק. היות ומצוקי לוף צפויים לסגת לאחר על ציר הזמן, הרי שהערוצים העליונים של נחל לוף ויובליו, כמו נחל אליאב, אמורים בתהליך זה להתקצר ולאבד את חלקיהם העליונים ככל שהתהליך מתקדם. במקביל אמורים

הנחלים המנקזים את מורדות מצוקי לוח לכיוון דרום להתאריך ככל שהתהליך מתקדם. ניתן לפיכך למדוד את סידרי הנחלים המצויים מעל למצוק על פי הטרימינולוגיה המקובלת של (Straler 1957) שעל פיה קטעי היובלים העליונים ביותר מכונים "נחלים מסדר 1" ומפגש של שני יובלים מסדר 1 יוצר נחל מסדר 2 וכן הלאה במדרג. על פי מתודולוגיה זו, ריבוי של נחלים מסדרים גבוהים (3,4 ואף יותר) על שפת המצוק יהווה עדות להרס מתקדם של מערכת הניקוז המקורית בשל נסיגה משמעותית של מערכת המצוקים, בעוד שריבוי נחלים מסדרים של 1 ו-2 יעיד על שימור של מערכת הניקוז המקורית ועל קצבי נסיגה נמוכים של המצוק.

2. למרגלות מצוקי לוח מוכרים מחשופים של תצורת הערבה המצויים בראשי גבעות נמוכות בגובה של 30-40 מ' מעל לערוצים הפעילים (איור 15). גילה של תצורת הערבה 2-3 מיליוני שנים (אבני, 1998 ; Matmon et al., 2009) והמחשופים במיקומם הזה מעידים על קיומה של מערכת ניקוז למרגלות מצוקי לוח. המרחק שבין מחשופים אלה ובין שפת המצוק הנוכחית מהווה אומדן מקסימלי לנסיגת המצוקים ב- 2-3 מיליוני השנים האחרונות, אם כי הנסיגה בפועל קטנה בהרבה מערך זה.

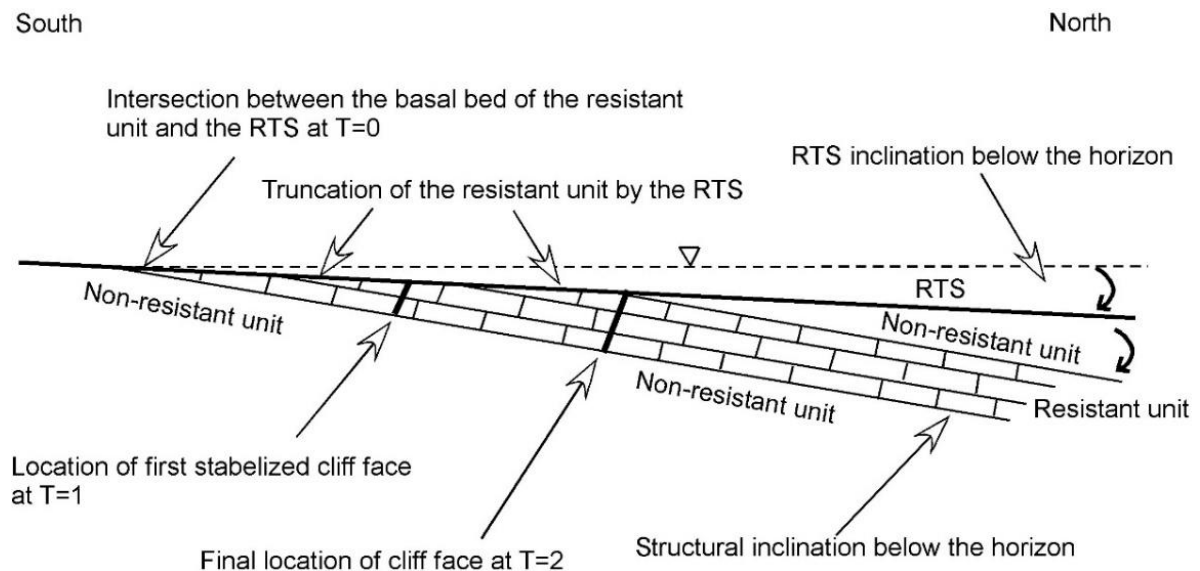


איור 15: מחשף של תצורת הערבה למרגלות מצוקי לוח. התצורה בנויה מסחף נחלים ששקע בתוך עמק קדום לפני כ- 2-3 מיליוני שנים שהתפתח למרגלות מצוקי לוח. מיקומו קובע את הנסיגה המקסימלית האפשרית של מערכת המצוקים מאז השקעת התצורה.

בחינת הפרמטרים הללו לאורך מצוקי לוח העלתה שמתוך 93 נחלים שנסקרו בקרבת שפת המצוק המתנקזים את שפת המצוק לכיוון צפון מערב והיו אמורים להיגדע בתהליך נסיגת המצוקים, 90% מהם (84 נחלים) הם מקטגוריה מסדר 1 ועוד 7% (6 נחלים) הם נחלים מסדר 2 וביחד 97% מן הנחלים כולם. נחלים אלה כוללים עדיין את חלקיהם העליונים ביותר, מבלי שחלקים אלה נגדעו משמעותית בשל נסיגת מצוקי לוח המתקיים זה 15 מיליון שנה. עוד נמצא כי מחשופי תצורת הערבה מצויים במרחק של 700-800 מ' מראש המצוק (איור 14) באופן הקובע שכבר לפני 2-3 מיליוני שנה התייצבו מצוקי לוח במקומם הכמעט נוכחי. הדבר מעיד כי מערכת המצוקים של מצוקי לוח היא כמעט יציבה על ציר הזמן הגיאולוגי.

המנגנון המוצע לקביעת מיקומם של מצוקי לוץ מאז ראשית התפתחותם לפני כ- 14-16 מיליוני שנה הוא כדלהלן (איור 16):

1. יצירה ראשונית של מצוקי לוץ בשל גידוע היחידה הקשה של תצורת ניצנה הנטויה קלות לצפון על ידי מישור הגידוע הרגיונלי שזמנו המקורב אוליגוקן (מסומן כ- RTS באיור 16). היחסים הגיאומטריים בין היחידה הגיאולוגית הנטויה כ- 2 מעלות לצפון מערב, ובין נטיית מישור הגידוע כמעט לאותו כיוון בשיעור קטן בהרבה הנאמד בפחות ממעלה אחת, יוצר טריז דמוי משולש דק ההולך ומתדקק לכיוון דרום מזרח (איור 16). הרמת הר הנגב לפני 14-16 מיליון שנה הביאה לסחיפת סלעי חבורת הר הצופים ולהתמוטטות הטריז הדק של סלעי תצורת ניצנה עד להתייצבות ראשונית של המצוק ברגע שהטריז המתמוטט בהדרגה הגיע ליציבות מכאנית ראשונית (שלב T-1 באיור 16).
2. ממקום ראשוני זה ממשיכה נסיגה קלה לאחר המאונת על ידי גלישות סלע גדולות של סלעי תצורת ניצנה הגולשות מראש מצוקי לוץ על סלעי תצורת ע'רב וטאקיה שבנויות מחרסית וקירטון חווארי. הגלישות הגדולות, שהם מטיפוס גלישות רוטציוניות בעלות עובי חתך של כ- 15-20 מ' ומכסות שטח של מאות מ"ר לכל גלישה, יוצרות כיסוי כמעט מלא של המדרונות, והן גורמות להתייצבות המדרון ולהפחתה משמעותית בקצב הארוזיה. הדור האחרון של הגלישות מתאצבע עם מחשופי תצורת הערבה שגילה כ- 2-3 מיליוני שנה (שלב T-2 באיור 16).
3. המדרונות של מצוקי לוץ מכוסים בהווה בגלישות פוסיליות (איור 12) המעידות שבמהלך 2 מיליוני השנים האחרונות כמעט ואין מתבצע תהליך של נסיגת מצוקים במצוקי לוץ, והדבר נכון גם למצב רוב רובם של המצוקים והגלישות בנגב ובאזורים המדבריים הסמוכים לו.



איור 16: דגם קונצפטואלי לשלבי התפתחות מצוקים כדוגמת מצוקי לוץ.

עוזבים את התצפית שבראש מצוקי לוץ ויורדים כ- 4 ק"מ בערוצו העליון של נחל ערוד (איור 11). הערוץ מתחת בסלעי תצורת ניצנה מחבורת עבדת ולאחר מכן בתצורות טאקיה וע'רב עד לחשיפת תצורת מישאש במורד הנחל. בקטע זה הנחל מרופד בגלישות גדולות היוצרות מפולות סלע גדולות באפיק. במורד הנחל

נפגשים עם ערוצו המרכזי של נחל ערוד שלאורכו שדרה יפה של עצי אלה אטלנטית, חלקם עתיקים וחלקם צעירים מאוד. העצים הצעירים מראים על התחדשות מתמדת באוכלוסיית עצי האלה האטלנטית גם באקלים המדברי הנוכחי. כקילומטר אחד במורד נחל ערוד לכיוון מזרח מגיעים אל חניון הלילה של הר עידו שבו מסתיים יום הסיור הראשון.

יום 2: מהר עריף להר חספס ולבאר כרכום

הנושאים העיקריים שידונו ביום זה הם:

1. מבנה האזור שמדרום להר עריף בהדגשת המבנים של הר חיסון, הר חספס והעתק פארן.
2. שיחזור מישור הגידוע הרגינולי באזור שבין הר עריף והר כרכום ובחינת תרומתו להבנת המבנה הגיאולוגי וזמן הדפורמציה הטקטונית באזור.
3. הכרת תופעת המינרליזציה הברזלית של הר חספס.
4. הכרת החתך המיוחד של סלעי חבורת עבדת מדרום להעתק פארן.

יוצאים מחניון הלילה ופונים דרומה-מזרחה במורד נחל מעזר אל פתח המכתש המערבי של הר עריף. בדרך חוצים את העתק עריף-בתור העובר במוצא המכתש (איור 6) ונמשך מערבה אל מבנה קערי השעון על ההעתק שבו נשמר חתך עבה של תצורת מנוחה. עולים על השביל הירוק (דרך עפר) הנמשך במורד נחל מעזר ואחרי כ-2.5 ק"מ פונים דרומה אל שביל רגלי העולה אל מורדות הר חיסון (מסומן בשחור).

הר חיסון

הר חיסון הינו מבנה כיפתי נרחב ושטוח שאורכו בציר צפון מערב – דרום מזרח כ-9 ק"מ ורוחבו בכיוון ניצב כ-4-3 ק"מ. הכיפה מתרוממת כ-100-150 מ' מעל לעמקי הנחלים המקיפים אותה והיא בנויה מחתך עבה של תצורת גרופית המונח מעל לתצורת אורה הנחשפת בוואדיות העמוקים המקיפים את ההר. פסגת ההר השטוחה מציגה חוסר גדול בחתך הסטריגרפי האזורי הכולל את תצורת ציחור, את כל חבורת הר הצופים וכל חבורת עבדת בעובי מצטבר של כ-300-350 מ' (איור 17). הופעת היחידות הללו במרחב שסביב הר חיסון מלמדים שיחידות אלה אכן שקעו גם על מבנה הר חיסון וכי חוסר זה בחתך הסלעים מקורו בגידוע עמוק. גידוע זה הוא חלק ממערך הגידועים האזורי שתואר גם מקמר עריף-בדד וממבני הר עריף והר בתור (איור 5A).

העובדה שהחתך הכמעט אופקי הזה חסר את המשך החתך – תצורת ציחור, כל חתך חבורת הר הצופים וכל חתך חבורת עבדת, ביחד כ-300-350 מ', הם עוד ביטוי לחשיבותו של מישור הגידוע הרגינולי כגורם מורפוטקטוני מרכזי המסיר את חתכי הסלעים מעל לפסגות ההרים בנגב המרכזי. הולכים דרומה כ-4 ק"מ ובאים אל קער רדוד המפריד את המורדות הדרומיים של הר חיסון מהמבנה הבולט של הר חספס הנמצא מדרום לו. לאורך הקער הזה ובצמוד למורד הצפוני של הר חספס, בתחום החשיפה של תצורות אורה וגרופית, מצויים אתרים ארכיאולוגיים רבים שרובם הינם אתרי חנייה ומאהלי נוודים מהתקופה המוסלמית הקדומה (המאות ה-7-9 לספירה).

הר חספס

המבנה של הר חספס (איורים 18 ו-19) הוא המזרחי ביותר בשרשרת המבנים הלחיצתיים שנוצרו לאורך החלק המערבי של העתק פארן (איור 2). מזרחה יותר משטר המאמצים שלאורך תוואי ההעתק משתנה למתיחתו, ומעבר זה מתבטא ביצירת בלוקים נטויים וגרביים התחומים על ידי העתקים נורמליים. מבנים אלה הולכים ומתפתחים לכיוון מזרח ויוצרים בסופו של דבר את גרעין כרכום, שהוא מבנה המתיחה הגדול ביותר שנוצר לאורך העתק פארן (ברטוב, 1974; איור 2).

אזור הר חספס תואר בפירוט על ידי Zilberman (1985). להלן יובאו עיקרי הדברים. המבנה המורם של הר חספס הוא אחד המבנים המיוחדים שנוצרו לאורך חלקו המערבי של העתק פארן. אורכו כ-3 ק"מ בציר מזרח-מערב ורוחבו כקילומטר אחד. העתק פארן עובר במרכזו של המבנה (איור 18). מצפון להעתק מצויים שני חצאי כיפות של סלע בגוון חום כהה הבנויים מתצורות אבנון ותמר הרוויים בתרכיזי ברזל שמקורם בתמיסות הידרו-טרמליות שעלו לאורך מישור ההעתק (איור 19). מדרום למישור ההעתק התפתח מצוק בגובה 100 מ' הבנוי מסלעי חבורת עבדת הנטויים בשיפוע כמעט אנכי (איור 18). סלעים אלה שקעו במבנה קערי השעון על העתק פארן מצדו הדרומי. הסלעים החשופים במבנה הקערי הזה הם סלעי קירטון וגיר השייכים לתצורת מור עד מטרד. ההעתקה האנכית המרבית בין שני חלקי המבנה המופרדים על ידי העתק פארן מגיעה לכ-500 מ'.



איור 17: הר עריף המקומט על רקע הר חיסון הכמעט אופקי. הר חיסון בנוי מחתך כמעט שלם של תצורת גרופית.



איור 18: מבט אל הר חספס ממערב. העתק פארן עובר למרגלות המצוק הבנוי מסלעי חבורת עבדת השעונים על ההעתק. מצפון למצוק (בחלק השמאלי של התמונה) התפתחה חצי כיפה הבנויה מסלעי תצורות תמר ואבנון העשירים בתרכיזי ברזל כתוצאה מעליה של תמיסות חמות לאורך מישור ההעתק. בחזית התמונה נראית תצורת מישאש ומעליה במגע ישיר סלעים של תצורת ניצנה מגיל איאוקן תחתון – ביטוי לאי ההתאמות שנוצרו בחתכי חבורות הר הצופים ועבדת לאורך העתק פארן באזור זה.

חצאי הכיפות של הר חספס שמצפון להעתק פארן

שני חצאי כיפות הבונות את המבנה המורם של הר חספס שעונות על העתק פארן והם מופרדות זו מזו על ידי קו העתק מקומי המכוון לצפון מערב (איור 19). שתיהם בנויות מחתך של תצורות אבנון ותמר המועשר בדולומיט וברזל. כלפי שולי הכיפות בכיוון צפון, מערב ומזרח, המבנים הכיפתיים נוחתים ומתכסים בחתכי סלעים מתצורת אורה וגרופית הבונים את המעטפת החיצונית של המבנים. בחלק המזרחי ביותר של הכיפה המזרחית משתתפות במבנה הכיפה כל היחידות מתצורת אבנון מגיל קנומן ועד לתצורת מטרד מגיל איאוקן תיכון, באופן המעיד שכל המבנה הכיפתי של הר חספס נוצר לאחר האיאוקן התיכון.

המבנה הקערי של הר חספס

מבנה זה שעון על העתק פארן מצידו הדרומי והוא יוצר קער הדוק הנטוי בשיעור ההולך וגדל מדרום לצפון עד ליצירת שכבות אנכיות בצמוד להעתק (איור 18). כמה מחשופים של תצורת טאקיה נמצאים בשולי המבנה

מתחת לסלעי חבורת עבדת, והם חשופים לאורך העמק של נחל ברוקה הגובל בהר חספס ממערב ומדרום. החתך של חבורת עבדת החשוף בהר חספס בנוי מ-35 מ' של סלעי קירטון וקירטון גירי משוכב של תצורת מור המופיעה כמעט ללא צור ו-180 מ' של המשך החתך הבנוי מתצורות ניצנה, חורשה ומטרד. חתכי תצורות ניצנה ומטרד כוללים מבנים סדימנטאריים מופרעים בעובי כמה עשרות מטרים כל אחד, היוצרים שכבות מאסיביות עם מגעים דיסקורדנטיים. מבנים אלה נוצרו בגלישות תת-ימית שבהם מרחבים הקונגלומרטים האינטרא-פורמציונליים שהם למעשה מבני גלישה מטיפוס Debris flow הדומים בהרכבם ובמופעם לתופעות המוכרות מחתכי תצורות ניצנה ומטרד שסביב קמר רמון, בהר לוץ ובאזור רמת ברק והר כיפה. בקרבת ההעתק השכבות הללו הם אנכיות ואפילו מעט הפוכות כתוצאה מסחיבה גדולה של הבלוק הירוד על גבי המישור הכמעט אנכי של העתק פארן (איורים 18 ו-20).



איור 19: העתק פארן באגפו המזרחי של הר חספס. בין שני חצאי הכיפות המסומנות על ידי הסלעים הכהים של תצורת תמר העשירים בעורקי ברזל מופיע עמק המכוסה בסלעי קונגלומרט של תצורת הערבה. התצורה שגילה פליוקן מאוחר – פלייסטוקן מוקדם (2-3 מיליוני שנה) מכירה את המבנה החשוף שכל התפתחותו מוקדמת לפליוקן והיא מצטברת מעל לאפיק נחל ברוקה לעובי 50-60 מ'.



איור 20: מבט מהר חספס לדרום אל מעבר לאפיק נחל ברוקה. במורדות הר מיכאל שבחלקה השמאלי של התמונה נחשף חתך של חבורת עבדת האופייני לקער הנגב הדרומי. עובי החתך כ- 200 מ' והוא כולל את תצורות מור, ניצנה, חורשה ומטרד. הדרך העולה על הגבעות מסמנת את מיקומו של מעלה שגיא המוביל לבאר כרכום.

אי התאמות בחתך חבורת הר הצופים ועבדת בהר חספס

במורדות הכיפות הבונות את הר חספס מופיעות אי התאמות חריפות בחתכי חבורת הר הצופים והם מעידות על דפורמציה טקטונית שהתפתחה לאורך העתק פארן באזור זה כבר בקרטיקון המאוחר. מצפון להעתק פארן הדפורמציה באה לידי ביטוי בעובי מופחת של תצורת מישאש ועליו חתך דק של תצורת ניצנה של חבורת עבדת (איור 18). תופעות אלה מעידות על קיומו של בלוק מורם השעון על אגפו הצפוני של ההעתק כבר בקמפאן – איאוקן. Zilberman (1985) השווה את עובי החתכים של תצורות ע'רב, טאקיה וחבורת עבדת משני צידי העתק פארן. העובי המצטבר של החתך ששקע מצפון לקו ההעתק מגיע ל- 63 מ' לעומת 222 מ' מדרום לקו. הדבר מעיד על פעילות מתמשכת לאורך העתק פארן בזמן המאסטריכט - איאוקן שיצרה הבדל סטרוקטורלי ניכר משני עברי העתק פארן שעיקרו בלוק מורם מצפון להעתק ובלוק ירוד מדרומו.

הגידוע האוליגוקני של הר חספס

חשיפת תצורות אבנון ותמר בכיפות הצפוניות של הר חספס מראה על גידוע עמוק של המבנה תוך הסרת חתך של כ- 300 מ' לאחר האיאוקן התיכון (מספר מחושב זה לוקח בחשבון את הצטמצמות החתכים בזמן הקמפאן – איאוקן תיכון כפי שפורט בסעיף הקודם). הדבר מעיד על פעילות אזורית של הרמה וגידוע מאוחרים לאיאוקן, כפי שתואר מהר חיסון והר עריף ותואר באיור 5A. גילי אורניום – עופרת שנעשו על עורקי קלציט לאורך מישור

העתק פארן באזור גרבן כרכום (Weinberger et al., 2020) מעידים על פעילות של העתק פארן כבר לפני 25.5 מיליון שנה (אוליגוקן מאוחר), ונראה שפאזה טקטונית זו היא שהביאה להתפתחות המיוחדת של הר חספס כבר בתקופה זו. המשך הפעילות הארוזיבית במהלך האוליגוקן הביאה לגידוע העמוק של הר חספס על ידי מישור הגידוע הרגיונלי שהמשיך להתפתח עד לתחילת המיוקן המוקדם, בטרם כוסה על ידי הסדימנטים הנחליים – אגמים של תצורת חצבה.

הפעילות הטקטונית המאוחרת להשקעת תצורת חצבה

הפעילות הטקטונית המאוחרת להשקעת תצורת חצבה הפכה את כיווני השבירה לאורך העתק פארן כך שהמבנה שהיה גבוהה מצפון להעתק ועליו התפתחו חתכים מדוקקים של סלעים בין הקמפאן לאיאוקן הפך את כיוונו. כתוצאה מכך חלו שינויים בעוצמת הזריקה האנכית לאורך העתק פארן והם נעשו קטנים יותר לאורך מבנים שקודם היו מורמים יותר. על פי זה הסיק Zilberman (1985) שהפאזה הטקטונית של המיוקן התיכון שלווה בהעתק ימנית לאורך העתקי הרוחב, היתה פאזה חזקה ושונה במהותה מהפאזות המוקדמות יותר. בהתבסס על גילי אורניום – עופרת שנלקחו ממספר מקומות בתחומי גרבן כרכום קבע Weinberger et al., (2020) כי הפעילות הטקטונית לאורך העתק פארן נמשכה במספר מחזורים לאורך המיוקן המוקדם והתיכון כאשר מקבצים של תאריכי פעילות נרשמו לפני 20, 14, 11 ו-10 מיליוני שנים. השפעת ההעתק דועכת אל שולי המבנה של הר חספס אבל תופעות של דפורמציה צעירה כמו חתכים נטויים ושבירים קלות של תצורת הערבה שגילה פליוקן עד פלייסטוקן מוקדם מופיעות במספר אתרים בשוליו. נראה שהפעילות הכללית לאורך העתק פארן נמצאת בדעיכה מאז המיוקן המאוחר. במקביל להעתקה האנכית המגיעה לשיעור מקסימלי של כ- 500 מ' בלב מבנה הר חספס, ההעתקה האופקית הימנית שחושבה על ידי Zilberman, (1985) מגיעה לכ- 50 מ', בעוד שבחצי הכיפה של נ.ג. 778 שמצויה במרחק של כ- 4 ק"מ ממערב להר חספס על המשכו המערבי של העתק פארן היא מגיעה לכ- 500 מ'. המספרים המחושבים הללו מצטרפים לעדויות על העתקת דייקים מיוקניים בסיני שהוסטו בשיעור של עד 4 ק"מ על המשכי מערכת הגזירה נגב – מרכז סיני בסיני (ברטוב, 1974). הערכות השונות של כמות ההעתקה האופקית שלאורך העתקי המערכת מעידים על הסטות מקומיות לאורך קטעי העתק הנספגים בחלקם בתוך המבנים המקומיים שהתפתחו לאורכם כדוגמת הר חספס, הר בתור והר עריף.

המנירליזציה הברזלית - דולומיטית ויחסה להתפתחות המבנה

המנירליזציה הברזלית – דולומיטית בהר חספס נחקרה בפירוט על ידי דרור שטרן בעבודת המאסטר שלו (2006) וסוכמה לאחרונה על ידי Ryb et al., (Submitted). עבודות אלה הראו כי התמיסות ההידרו-טרמליות שהביאו את האלטרציה הברזלית – דולומיטית עלו לאורך מישור העתק פארן אך לא נשפכו על פני מישור החשיפה הנוכחיונראה שחדרו בשלבים מוקדמים של התרוממות ושבירת האזור והתגלו לאחר מכן עם העמקת הארוזיה אל תוך מבנה הר חספס. בהתבסס על גילי אורניום – עופרת, עבודות אלה מצאו כי המנירליזציה חדרה לסלעי הר חספס במהלך האוליגוקן (31.4 ± 4.6 Ma) והציעו כי היא נגרמה בשל עליית תימלחות חמות שמקורם במקווי מים מלוחים שהתפתחו באזור שלאורך ים סוף ואולי גם בפרוטו מפרץ סואץ. לפיכך נראה שהמנירליזציה קשורה לפעילות מוקדמת על העתק פארן בשלב הדפורמציה, ההתרוממות והארוזיה שהתרחשו באוליגוקן

כחלק מיצירת מישור הגידוע הרגינולי שנידון כאן בהרחבה. הגידוע והחשיפה של המנרליזציה הברזלית הושלם במהלך האוליגוקן המאוחר, אבל עבר מודיפיקציה מאוחרת במיוקן המוקדם והתיכון כחלק מיצירת הגרביים של כרכום, ברוקה וביר מעין (ברטוב, 1974; Zilberman, 1985).

תופעות אחרות במהלך ההליכה

יורדים מהר חספס דרומה אל נחל ברוקה. מכאן נמשכת הדרך במקביל לאפיק נחל ברוקה אל מפגש הנחלים ברוקה – כרכום, מהלך כ-3 ק"מ למזרח. בדרך עוברים באפיקו הצר של נחל ברוקה המתחת עמוקות לתוך החתך של סלעי חבורת עבדת. בחתך החשוף המורכב בעיקר מסלעי תצורת מטרד מצויים בורות קארסטיים ובהם נשמר חתך של חול אדום השייך לפרט רותם של תצורת חצבה – עדות לכיסוי האזור כולו על ידי סלעי התצורה (קלבו, 2002; איור 21). תצורת חצבה הוסרה כמעט באופן מלא עוד טרם השקעת תצורת הערבה.



איור 21: חללים קארסטיים שהתפתחו בסלעי חבורת עבדת ובהם נשמר חתך חולי של תצורת חצבה. נחל ברוקה למרגלות הר חספס.

תצורת הערבה שגילה פליוקן – פלייסטוקן מוקדם מופיעה כאן כשהיא מכסה על החתך הנטוי ובמקומות אחדים גם שבור של חבורת עבדת (איור 19). תצורת ערבה הושקעה באי התאמה מעל לכל החתכים הקודמים אחרי האירוע הטקטוני החריף הפוגע באזור אחרי השקעת תצורת חצבה. לאורך נחל ברוקה ובמורדות הר חספס התצורה בנויה כבולדר קונגלומרט גס המכיל בעיקר מרכיבים של סלעי גיר וצור שניגזרו מסלעי חבורת יהודה, הר הצופים ועבדת. בפניה דרומה אל נחל כרכום הרכב זה משתנה וכולל מרכיבים של חבורת עבדת בלבד. עובי התצורה כ-30 עד 60 מ'. בחלק התחתון של החתך של תצורת הערבה ניכרים סימנים לפעילות טקטונית השוברת ומטה את מחשופי התצורה. התופעה נעלמת אל מעלה החתך.

עולים במעלה אפיק נחל כרכום כ- 3 ק"מ המתחתך בחתך הנטוי לצפון של חבורת עבדת. שיפוע השכבות משתנה מכ- 40 מעלות והוא מתמתן כלפי דרום עד לכדי 20 מעלות במחצית הדרך אל באר כרכום. החתך העבה הנחשף בערוץ הנחל מציג את כל יחידות חבורת עבדת המוכרות לנו מהאזור, החל מתצורת מטרד הנחשפת באזור מפגש הנחלים ולאורך חלקו התחתון של נחל כרכום, דרך תצורות חורשה וניצנה ועד לתצורת מור הנחשפת כלפי דרום, בקרבת מורדות הר מיכאל (איור 20) ובאזור באר כרכום. יש להדגיש כי החלוקה הסטריגרפית של חתך חבורת עבדת לצרכי המיפוי הגיאולוגי של מרכז הנגב מתבסס על החלוקה המקובלת של חבורת עבדת באזור רמת עבדת וכי השימוש בחלוקה סטריגרפית זו עבר אישוש בהתבסס על בדיקות פלאונטולוגיות של סלעי הסביבה שאישרו את הסדר הסטריגרפי ואת הקורלציה העקרונית לחתכי רמת עבדת. הדבר נעשה במטרה לצמצם במידת האפשר את השימוש בשמות של תצורות מקומיות, המקשות על ההבנה המרחבית ומחייבות קורלציות מייגעות ולעיתים מבלבלות. יחד עם זאת, השימוש בטרמינולוגיה אחידה מלווה לעיתים בטשטוש העובדה שיש במרחב הנגב המרכזי לא מעט שינויים פאציאליים ויחידות דיאכרוניות, והדבר נובע בין השאר מהיסטוריה דיפרנציאלית של אגנים מקומיים ומריבוי גלישות אינטרא-פורמציונליות היוצרות לעיתים ערבוב סטריגרפי והמקשות על קביעת הגיל ועל קורלציות בין חתכים סמוכים (איור 22).



איור 22: התעבות חתך חבורת עבדת בקער הנגב הדרומי בסמוך להעתק פארן. ברקע – המורד הצפון-מזרחי של הר שגיא.

החתך של חבורת עבדת המופיע מדרום להעתק פארן מציג התעבות גדולה של סלעי החבורה ששקעה בקרבת ההעתק (איור 22). ההתעבות ניכרת בעיקר בחתכי תצורות ניצנה ומטרד, כשכל אחת משתי התצורות הללו מגיעה לעובי של כ- 100-150 מ'. בין שתי התצורות המאסיביות מפרידה תצורת חורשה הבנויה מקירטון ועוביה אינו עולה על 20-30 מ'. ביחידות המאסיביות של ניצנה ומטרד מופיעות גלישות גדולות, תת ימיות, המתרבות בסמיכות להעתק פארן, עובדה המרמזת על פעילות טקטונית נמרצת שהתרחשה לאורך ההעתק במהלך

האיאוקן. עדויות לפעילות טקטונית זו נמצאה על ידי Weinberger et al., (2020) לאורך העתק עריף-בתור הסמוך להעתק פארן מצפון, בהתבסס על גילי אורניום-עופרת. נמצא כי הפעילות התרחשה לפני 47-54 מיליון שנה, בזמן האיאוקן התחתון ובתחילת האיאוקן התיכון. עולים במעלה אפיקו הצר והעמוק של נחל כרכום ובאים אל באר כרכום. כאן נחשפת תצורת טאקיה היושבת מתחת לחתך חבורת עבדת. באר כרכום עצמה נחפרה על המגע שבין בסיס חבורת עבדת העשיר בגלישות תת-ימיות אינטרא-פורמציונליות ובין גג תצורת טאקיה. במקום זה ממוקמת הבאר ולידה חניון הלילה.

יום 3: מבאר כרכום אל הר כרכום דרך שלוחת כרכום הצפונית

באר כרכום

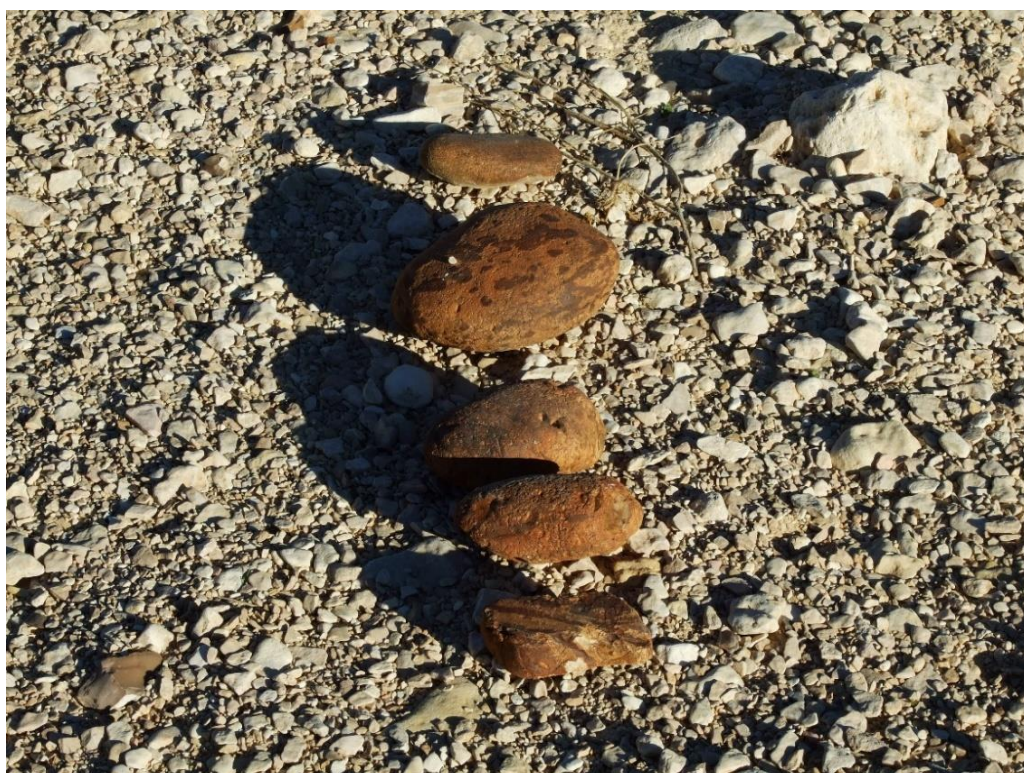
ביום זה עולים על שלוחת כרכום הצפונית בדרך לביקור בפסגת הר כרכום. הנושאים שידונו ביום זה כוללים:

1. הכרת החתך הגיאולוגי הבונה את הר כרכום והאזור שסביבו.
2. דיון בעיצוב הנוף האזורי ויחסו למישור הגידוע הרגיונלי, לזמן השקעת תצורת חצבה במיוקן המוקדם ולמערכת הניקוז הקדומה של תצורת הערבה בפליו-פלייסטוקן.
3. הבנת תפקידם של גלישות המדרון המעצבות את מורדות רכס הר כרכום ותרומתם לתהליכי ארוזיה, לנסיגת מדרונות ולהרס מול שימור של פרשת המים האזוריות העוברת על שלוחת סכין צרה.

חניון הלילה של באר כרכום ממוקם בסמוך לבאר קדומה היושבת על המגע שבין תצורת טאקיה וסלעי חבורת עבדת. המגעים בין היחידות השונות של חבורת עבדת הבונות את החתך משובשים לעיתים קרובות בגלל גלישות מדרון צעירות שגלשו על תצורת טאקיה הנחשפת בבסיס המדרונות ובמרכז עמק נחל כרכום. חוצים את אפיק נחל כרכום לכיוון מזרח בשביל הולכי רגל המסומן בשחור. הגבעה הסמוכה לשביל מצפון היא גבעה גלושה שבה מונחת תצורת ניצנה ישירות על גבי תצורת טאקיה, וזאת כתוצאה מכשל מדרוני שהתרחש לאחר חשיפת האזור והתחתרות עמק נחל כרכום במיליוני השנים האחרונות. על גבי הגלישה מופיע חתך של תצורת ערבה המכיל בולדר-קונגלומרט גס של סלעים מחבורת עבדת שהגיע לכאן בהובלה מדרונית ונחלית מאגן נחל כרכום לפני כ- 2-3 מיליוני שנים (אבני, 1998 איור 23). במאסף החלוקים של תצורת הערבה יש ייצוג גם לחלוקי "צור היבוא" שמאפיינים את תצורת חצבה ואשר משארים שלה מצויים עד היום על פני הפסגות הסובבות את נחל כרכום (איור 24). מתנוחת שכבות החלוקים של תצורת הערבה על גבי הגלישה ניתן לקבוע כי השקעת תצורת הערבה התרחשה לאחר שהגלישה המדרונית כבר היתה מיוצבת במקומה



איור 23: גבעה גלושה של תצורת ניצנה על גבי תצורת טאקיה. הגלישה מכוסה על ידי חלוקי נחל מלוכדים בקרבונט של תצורת הערבה המעידים על העדר תנועה של הגלישה לאחר שהתמקמה בעמק נחל כרכום.



איור 24: חלוקי "צור יבוא" שמקורם בתצורת חצבה ונאספו מתוך חתך תצורת הערבה בגבעת הגלישה.

במרכז עמק נחל כרכום. שכבות החלוקים עברו צמנטציה קרבונטית נוקשה על ידי קלקריט (או "נארי" על פי המינוח המקומי) וצמנטציה זו אינה מופרעת בשל המשך הגלישה, דבר המרמז על תנאי היציבות של הגלישה המדרונית מאז השקעת תצורת הערבה.

השלוחה הצפונית של הר כרכום

עולים במעלה המדרון המכוסה בטראסות נחלים ובמניפות סחף המסתירים תחתם את מחשופי תצורת טאקיה ועולים אל שלוחת כרכום הצפונית (איור 25). העלייה היא דרך מחשופים של תצורת מור הקירטונית שבאזור זה מעטים בה שכבות הצור. בהמשך עוברים את המגע שבין תצורת מור וניצנה ועולים אל האוכף תוך הסתייעות בקו העתק שכיוונו צפון-מערב – דרום מזרח החוצה באלכסון את השלוחה ומאפשר עליה נוחה בשביל קדום. לאורך ההעתק מופיעה מינרליזציה ברזלית – מנגנית הצובעת את המדרון באפור-שחור ומקורה בתמיסות הידרו-טרמליות. תופעה זו מלווה בעורקי קלציט עבים ונראה שהיא קשורה לשלב שבו מים היו נוכחים בפני השטח הגבוהים של הנגב עוד לפני התחתרות מערכות הניקוז והעמקים הנוכחיים. ניתן להקדים את שלב יצירת המינרליזציה הברזלית לאוליגוקן או למיוקן המוקדם, כאשר מים שמקורם בשלב יצירת מישור הגידוע הרגיונלי, או בשלב השקעת תצורת חצבה ששקעה עליו, חלחלו לתת-הקרקע ויצרו אלטרציות בסלעי הסביבה. מראש האוכף ממשיכים עוד כחצי קילומטר דרומה ובאים אל ראש השלוחה לתצפית על הסביבה. עד עתה הלכנו כ- 3 ק"מ.



איור 25: העליה אל שלוחת כרכום הצפונית במבט לדרום. מורדות השלוחה מרופדים בגלישות סלע רוטציוניות הממסכים את מחשופי תצורת טאקיה ומור הבונות את החלק התחתון של המדרונות. כיסוי היחידות הסחיפות מאיט באופן משמעותי את קצבי הבליה של המדרונות.

מראש השלוחה ניתן לראות את המבנה הגיאולוגי האזורי ואת הנוף שהתפתח באזור. במבט לצפון רואים את אזור באר כרכום ואת כניסת נחל כרכום אל המייצר ההררי בדרכו להר חספס המסתמן במרחק, מעבר לכתף של הר מיכאל. במרחק הגדול ניתן לראות את פסגת הר עריף ואת שולי מכתש רמון ומצוקי לוץ. לכיוון מזרח רואים את מערכת היובלים של נחל כרכום, נחל שזר ונחל פארן המתכנסים אל גרבן כרכום. במבט דרומה נראית שלוחת כרכום הצפונית הנמשכת כסכין סלע צרה המתפתלת בכיוון דרום בדרכה אל הר כרכום המרכזי (לשעבר כונה אזור זה "הר גשור" וזאת בגלל צורתו כגשר צר על פי תהום). המדרונות התלולים היורדים אל נחל כרכום מזה ואל המפנה המזרחי של הר כרכום מזה משופעים בגלישות סלע המורידים את כל החתך של חבורת עבדת ממפלס הפסגות אל העמקים כשהגלישות "רוכבות" על גבי תצורות טאקיה ומור במורדות הרחוקים גם על תצורת ע'רב. רוב הסלעים הרכים במרחב המזרחי של הר כרכום מכוסים בגלישות הסלע ולעובדה זו משמעות גדולה בהגנה על המדרונות מהמשך הארוזיה המאיימת למוטט את הגשר הצר שנותר משלוחת כרכום הצפונית (איור 25).

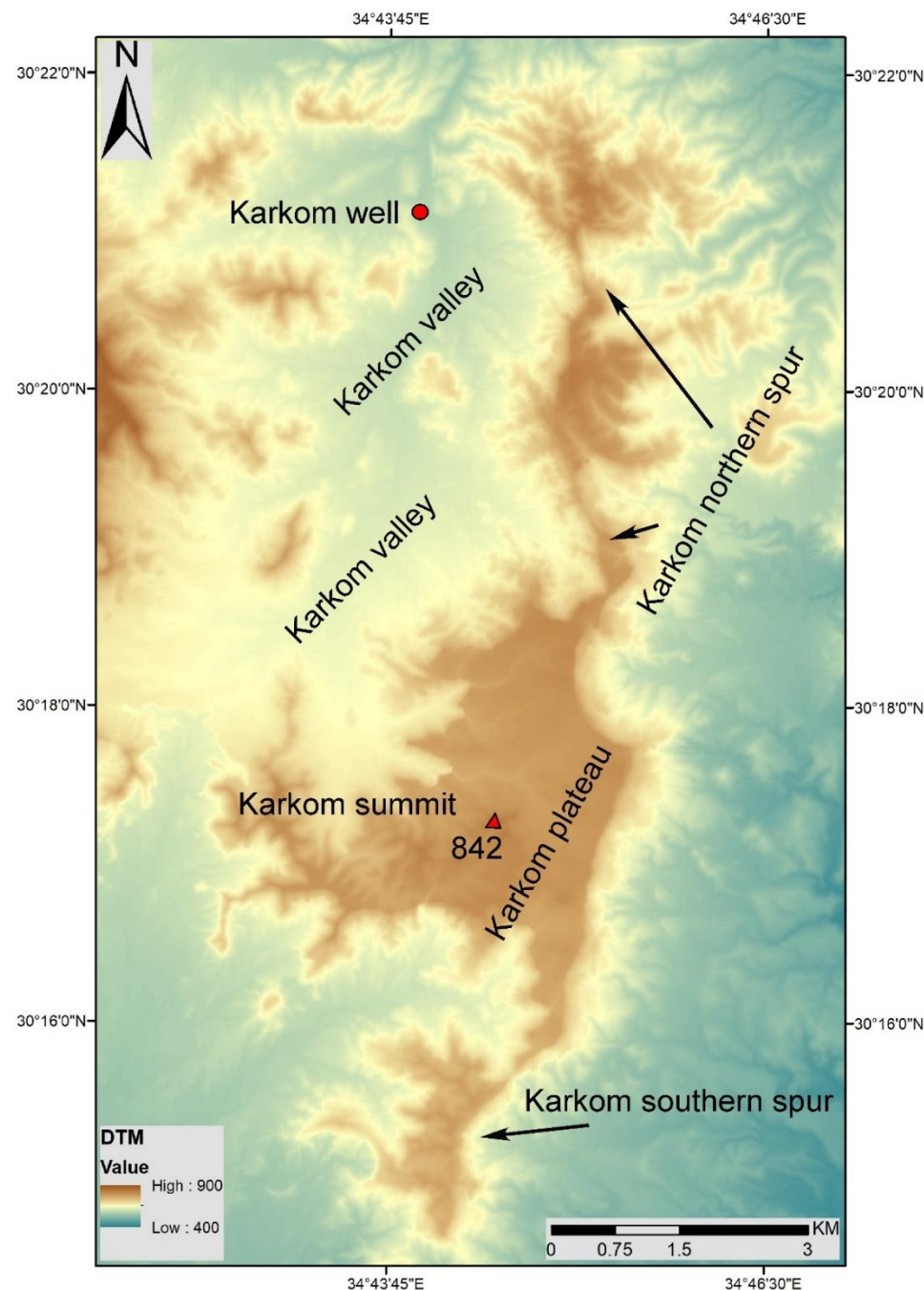
במבט למערב רואים את מורדות הר שגיא ואת מערכת היובלים של נחל כרכום היוצרת עמק רחב שהתפתח בין הר שגיא להר כרכום (איור 26). הרכס הגדול של הר שגיא גבוה טופוגרפית מעל לפסגות השלוחה הצפונית של הר כרכום בשיעור של כ- 200 מ', וזאת למרות שהחתך הגיאולוגי הנחשף בשני האזורים כמעט זהה – שניהם בנויים במתך עבה של חבורת עבדת. בשני האזורים – בהר כרכום ובהר שגיא – פני השטח העליונים של ההרים מעוצבים על ידי מישור הגידוע הרגיוני (איור 26), הגודע במידה כמעט שווה את החתך הסטרטיגרפי המקורי. עובדה זו מעידה שהפרשי הגובה בין הר שגיא להר כרכום נוצרו אחרי האוליגוקן וככל הנראה גם לאחר השקעת תצורת חצבה במיוקן המוקדם, שמחשופים שלה מצויים על גבי מישור הגידוע בכל האזור ובכלל זה על פסגת הר כרכום הנמצא במרחק של כ- 6 ק"מ מדרום לנו (ראה להלן). הפרשי הגובה בין הר שגיא להר כרכום מעידים על הטיה נרחבת של כל האזור לכיוון מזרח בשיעור של כ- 2% (מעט יותר ממעלה) שהתרחשה לאחר המיוקן המוקדם. הטיה זו מתגברת עד כדי 2.5% ממזרח להר כרכום והיא נמשכת אל שולי הערבה הנראית במרחק. ההטיה הכללית משולבת בכמה העתקים שכיוונם בכיוון צפון-צפון מזרח – דרום-דרום מערב ואשר מנמיכים בלוקים שבזורים במרחב, באופן המתגבר את ההטיה הכללית. העובדה שרשת הניקוז האזורית מנקזת את כל האזור אל בקע ים המלח שבמזרח באמצעות עמקים רחבים מעידה על כך שהשיפוע הטקטוני למזרח היה מוכר למערכות הניקוז כבר בזמן יצירתה הראשונית, כלומר לאחר הרמת הר הנגב במיוקן התיכון. יחד עם זאת, שינויי ניקוז, תוואי ניקוז קדומים ועמקים נטושים שנמצאו באזור שסביב הר כרכום (אבני, 1998; Avni et al., 2000) מעידים על המשך התהליכים טקטוניים של שבירה והטיה גם במהלך הפליוקן והפלייסטוקן המוקדם, ואלה השפיעו על הנוף הצעיר של האזור כפי שהוא ממשיך להיווצר היום.

מנקודת התצפית ממשיכים ללכת דרומה בשביל המסומן. בדרך הנמשכת לאורך כ- 5 ק"מ עוברים לאורך פסגת שלוחת כרכום הצפונית כשפני השטח העליונים שלה צרים ויוצרים שלוחת סכין מתפתלת (איור 27). הסלעים הבונים את השלוחה הצרה נתונים לסידוק אינטנסיבי היוצר בלוקים גדולים המתמוטטים אל המורדות התלולים. יש לציין כי הסידוק שונה במהותו מן הגלישות הגדולות היות והוא מתפתח כתוצאה מתהליכים גרביטטיביים **יבשים** המנצלים את הסידוק הטקטוני והטופוגרפיה המורמת של השלוחה ביחס למדרונות ולעמקים, בעוד שגלישות הסלע הגדולות זקוקות ל**רטיבות** של סלעי תצורת טאקיה על מנת ליצור תזוזה במאסת הסלע הגדולה שמעליה. נפחי הגלישות הנפוצות במורדות הר כרכום עומדים על מאות אלפים עד למיליוני מ"ק לגלישה בודדת, בעוד שהסידוק יוצר מפולות הסלע בנפחים קטנים בהרבה הנאמדים בכמה עשרות מ"ק בלבד. כפי שראינו באזור באר כרכום, הגלישות הגדולות התייצבו במקומם כבר לפני השקעת תצורת הערבה על גבי הגלישות.

מעדויות שנאספו באזורים רבים בנגב (אבני, 2021) נראה שיחסי שדה אלה בין הגלישות ומחשופי תצורת הערבה מייצגת את המרחב כולו. הואיל וגיל תצורת הערבה נקבע בקירוב לכ- 2-3 מיליוני שנה (אבני, 1998; Matmon et al., 2009), הרי שהגלישות אינן פעילות בשני מיליוני השנים האחרונות וזאת בהתאמה להתייבשות הדרגתית של הנגב המתבטאת בין השאר בהעלמות גופי המים הגדולים שאפיינו את האזור בזמן השקעת תצורת הערבה (אבני, 1998). התייבשות זאת מתועדת גם על ידי צימצום שקיעתם של ספלאוטמים כפי שנמצאו במעלה המישר (Chaldekas, 2021) ובנגב בכלל וגם באופי הקרקעות ששקעו בנגב בשני מיליוני השנים האחרונות (Amit et al., 2006). יחד עם זאת, פעילות המשכית של גלישות סלע גדולות מוכרת בקרבת מעיינות שופעי מים היוצרים הרטבה מקומית של המגע שבין תצורת טאקיה לסלעי חבורת עבדת, כמו למשל בגלישת עין מור הנמצאת במוצא קניון עין עבדת באזור שדה בוקר. מעניינת העובדה שבמשך הזמן הארוך שאפשר את פעילות מנגנון גלישות הסלע בנגב, הנמשך ככל הנראה מהמיוקן התיכון – מאוחר ועד לפליוקן המוקדם, הגלישות ותהליכים מדרוניים אחרים לא השלימו את הרס שדרת הסלע הצרה של שלוחת כרכום (איור 27). אזור זה נותר עד היום כגשר סלעי צר שעליו ממוקמת פרשת המים המקומית בין יובלי נחל כרכום במזרח ויובלי נחל שזר, נחל אשל ונחל חרוז במזרח – כולם יובלים של נחל פארן הגדול. עובדה זו מעלה את הסברה ששימור פרשת המים במקומה הנוכחי מאז חציבת מערכת



איור 26: מבט מפסגת שלוחת כרכום הצפונית אל עמק נחל כרכום. ברקע נראה הרכס השטוח של הר שגיא שראשו מעוצב על ידי מישור הגידוע הרגיונלי. גלישות סלע גדולות מרפדות את המורד המזרחי של הר שגיא במורד הטופוגרפי אל עמק נחל כרכום שהתפתח בין הר שגיא להר כרכום. מבט למערב.



איור 27: הדמיית DTM של הר כרכום על שתי שלוחותיו – שלוחת כרכום הצפונית ושלוחת כרכום הדרומית.

הנחלים במיוקן התיכון קשורה בהתפתחות מנגנון המדכא את יצירת הגלישות על ציר הזמן. ניתן לשער שכל שהשטח המועמד לגלישות יורד בשל התרחשותם של גלישות קודמות, המדרונות מתקרבים לציר הרכס ולפרשת המים שעליו, ובמצב כזה הגודל והמאסה של הגלישות צפוי לרדת. מנגנון זה, בתוספת להתייבשות האזור במהלך הפלייסטוקן המוקדם, הביא להאטה, ואולי גם לעצירה מוחלטת, של מנגנון הגלישות. בפועל, בשטח נותרו שלוחות צרות דמויות סכין השורדות לזמן ארוך, כפי שאכן הם מתקיימות במקומות רבים בנגב כמו בהר בדד, בהר גיזרון, וגם כאן בהר כרכום. יחד עם זאת, שילוב של מפולות סלע שמקורם בסידוק הטקטוני ובגרביטציה בתהליכי הארוזיה, הממשיכים להתקיים גם אחרי התייבשות האזור או הקטנת שטח הרמות

הסלעיות, יכול בסופו של דבר להכריע את שלוחות הסכין, אם כי קצב התהליכים ונפחי הסלע המסולקים במנגנון זה קטן בהרבה. ולכן, בסופו של דבר, פרשות המים ושלוחות הסכין שורדות לאורך זמן על ציר הזמן הגיאולוגי.

הרמה של הר כרכום

בסוף ההליכה על שלוחת כרכום הצפונית מתחברים אל הרמה הרחבה שיוצרת את החלק המרכזי של הר כרכום. אזור זה נושא עליו את שתי הפסגות של ההר המגיעות לגובה 842 מ' והמורמות כדי 40-50 מ' מעל למפלס במת ההר. אורכו של הר כרכום בציר צפון – דרום עד לשלוחת כרכום הדרומית הוא כ- 4 ק"מ ורוחבו בציר מזרח-מערב כ- 3 ק"מ (איור 27). ההר יוצר מצוק כמעט רצוף במזרח, בעוד שהמפנה המערבי שלו גזור לשלוחות על ידי יובלי נחל כרכום. באזור זה חשוף החתך המלא של ההר הבנוי מיחידות שונות של חבורת עבדת (איורים 28 ו- 29).



איור 28: החלק התחתון של חתך חבורת עבדת בהר כרכום. בתחתית המדרון בנמצאת תצורת מור המוסתרת ברובה על ידי מדרונות דרדרת. מעליה מתנשא המצוק הגדול של הר כרכום הבנוי מהחלק התחתון של תצורת ניצנה שרובו בנוי מגלישות תת ימיות היוצרות ריבוד מופרע. מבט לדרום.



איור 29: החלק העליון של חתך חבורת עבדת בהר כרכום. השכבות המצוררות בחלק התחתון של התמונה בונות את החלק העליון של תצורת ניצנה. באזור זה מרובים בולבוסים הצור . מעליהם שקעו שכבות אופקיות של קירטון וקירטון גירי רך של תצורת חורשה מגיל איאוקן תיכון. פסגת ההר בנויה משכבות גיר מצוקי של בסיס תצורת מטרד מגיל איאוקן תיכון. מבט לדרום.

החתך הגיאולוגי של הר כרכום

החתך הגיאולוגי המלא של הר כרכום בנוי מגג חבורת הר הצופים ויחידות של מחבורת עבדת ששקעו במרכז הקער של הנגב הדרומי. החתך כולל את היחידות הבאות:

1. בבסיס ההר חשוף החלק העליון של תצורת טאקיה שעוביה המלא מגיע לכ- 80 מ'.
2. תצורת מור: בנויה מחתך של קירטון וקירטון מוקשה עם אופקי צור אחדים (איור 28). עובי החתך כ- 30-40 מ'. אופקי הצור הולכים ומתרבים לכיוון החלק הדרומי של הר כרכום.
3. תצורת ניצנה: בנויה משכבות גיר וגיר קירטוני. בחתך מרובות הגלישות האינטרא-פורמציונליות של סדימנט מעורב הבנוי מקירטון מוקשה וגיר היוצרים מצוק בולט בעובי 60-80 מ' (איור 28). בגג שכבה זו מופיעים כמה דרגשים עבים המכילים עדשות בקוטר של כמה מטרים של גיר מצורר חלקית (על שכבות אלה נפוצים ציורי סלע שהקנו להר כרכום את פרסומו). בגג החתך המצוקי מופיע חתך נוסף בעובי של כ- 20-30 מ' הבנוי משכבות מצוררות המכילות עדשות צור ובולבוסים גיר מצוררים חלקית. לחלק מן העדשות יש מבנה מאורך והם יוצרים מעין עמודים מאורכים. שברי העדשות והסלעים המצוררים יוצרים את נוף הרג הצורני המצפה חלקים נרחבים מבמת הר כרכום (איור 29). בחלקו הדרומי של הר כרכום ובשלוחת כרכום הדרומית מופיעות בחתך תצורת ניצנה שכבות של צור מפוספס העשיר בלמינות צפופות בגוון לבן-שחור הדומה לסלעי המקור של

"צור היבוא" המוכר מהחלקים העליונים של תצורת חצבה (ראה להלן – נספח מס' 2). על דמיון זה עמד כבר גרפונקל (1970).

4. תצורת חורשה: בנויה מקירטון וקירטון גירי המופיעים בשכבות משוכבות היטב (איור 29). עובי החתך כ- 30-40 מ' והוא בונה את המדרונות בעלי הטופוגרפיה המתונה מתחת לפסגת הר כרכום וכן מספר גבעות מעוגלות המונחות על גבי הבמה המישורית של ההר.
5. תצורת מטרד: בנויה מסלעי גיר ביוקלסטי של שברי מאובנים ונומוליטים גדולים ועשיר בתרכיזי גיר ועדשות מצוררות חלקית. חתך זה בונה את הפסגות של הר כרכום (איור 29) והוא גדוע בגגו על ידי מישור הארוזיה הרגינולי באופן שאינו מאפשר לאמוד את עוביו המקורי של החתך. עוביו החשוף מגיע ל- 20-30 מ'.
6. בתוך גג החתך של תצורת מטרד שבפסגת הר כרכום מופיעים בורות קארסטיים המלאים בחול אדום ובחלוקי "צור יבוא" של תצורת חצבה בקוטר של עד 20-30 ס"מ. קוטר הבורות כ- 2-3 מ' ועומקם כ- 3-5 מ' (איור 30).



איור 30: פסגת הר כרכום (נ.ג. 842) ובו מופיע בור קארסטי (מסומן באדום) ובו מילוי של חלוקי "צור היבוא" וחול אדום של תצורת חצבה.

דיון ביניים

חתך חבורת עבדת הבונה את הר כרכום הוא חתך בעל אופי פאציאלי הדומה במאפייניו הכלליים לחתכים אחרים של חבורת עבדת במרחב הנגב. יחד עם זאת, הבדיקות הפלאונטולוגיות המסתמכות על ננו-פלנגטון

קובעות שבהר מתקיימת אי התאמה בין החלק התחתון של תצורת מור, שגילו איאוקן מוקדם, ובין החלקים העליונים יותר ובכלל זה של החלק העליון של תצורת מור ושל תצורת ניצנה שגילם איאוקן תיכון. המשך החתך של תצורת חורשה ומטרד הוא מגיל איאוקן תיכון, וגיל זה תואם את מופעי התצורות בקער עבדת. ייתכן שהעובדה שחתך תצורת ניצנה באזור הר כרכום מכיל ריבוי של גלישות אינטרא-פורמציונליות יוצר את אי ההתאמה ואת עירוב הגילים, והדבר תואם לגיל הפעילות הטקטונית בזמן האיאוקן המוקדם ותחילת האיאוקן התיכון שמצא Weinberger et al., (2020) בהעתק עריף-בתור. בכל מקרה, השינויים הפאציאליים והחתך הייחודי של הר כרכום – ובמידה רבה גם של הר שגיא הסמוך – הם ביטוי נוסף לקיומם של אגנים שונים בזמן האיאוקן באזור הנגב המרכזי, ככל הנראה בגלל השליטה שהיתה בקרקעית הים האיאוקני למבני הקשת הסורית ולקווי השבירה של רצועת הגזירה סיני-נגב, ואלה השפיעו מקומית על טיב הסדימנטים ששקעו בקרקעית הים שבחלק מן הזמנים היה רדוד מספיק על מנת לגדל אלמוגים ואצות גירניות. בהקשר זה מעניין לציין כי קורנגרין (1993) זיהתה בגג תצורת מטרד במזרח הנגב ובשולי הערבה פאציאס רדוד במיוחד המלווה בצירור אינטנסיבי של גג תצורת מטרד.

הבורות הקארסטיים שנמצאו בפסגת הר כרכום בתצורת מטרד והמלאים במילוי של תצורת חצבה מציבים בפנינו שאלה מעניינת. הבורות משמרים סלעי חול וחולקים שמקורם בפרט רותם של תצורת חצבה, בדומה לבורות קארסטיים אחרים שנמצאו באזור (איור 21). אבל היכן הוא בסיס החתך של התצורה? האמנם כיסתה תצורת חצבה את כל הנגב בחתך עבה וכמעט אחיד, או שיש כאן עדות לכיסוי נרחב של הפרטים העליונים של תצורת חצבה בשעה שהחתך המלא של התצורה הצטבר רק בגרביים ובמבנים שקועים סטרוקטורלית כמו בגרין כרכום?

לשאלה זו התייחס גם Weinberger et al., (2020) כאשר הראה על המתאם שבין תקופת הפעילות של העתק פארן וזמן הצטברות תצורת חצבה במיוקן המוקדם. תצפיות השדה והתוצאות שהתקבלו במחקר זה מלמדים על אפשרות סבירה שתצורת חצבה הצטברה באופן סיני-טקטוני בעובי ובמופע משתנה במרחב הנגב המרכזי כאשר החתכים המלאים והעבים ביותר הצטברו באגן כרכום ובשקע הערבה בשעה שחתכים דקים וחלקיים הצטברו באזורים אחרים בנגב שהיו גבוהים יותר במהלך המיוקן המוקדם.

טקטוניקה צעירה סביב הר כרכום

כאשר עולים במעלה העמק הרחב של נחל כרכום המצוי בין הר כרכום להר שגיא (נ.צ.מ. 1717/4678, רשת ישראל חדשה) רואים כי הגבול הדרומי של נחל כרכום פרוץ ופרשת המים שבין נחל כרכום ויובלי נחל שגיא עוברת בעמק פתוח ושטוח על גבי מחשופים של תצורת הערבה הבנויה מתלכיד נחלים. מצב זה מעיד על שינויי ניקוז שחלו באזור לאחר השקעת תצורת ערבה והם מסוכמים אצל אבני (1998). על פי ניתוח מורפוטקטוני אזורי נמצא כי בזמן השקעת תצורת הערבה היה נחל שגיא של היום יובל עליון של נחל כרכום וכי פרשת המים המקורית עברה מדרום להר דלעת. הנחלים שהגיעו מאזורים אלה השקיעו את מרבד החלוקים המצפה היום את העמק העליון והרחב של נחל כרכום שרוחבו הגיע אז לכ- 1.5 ק"מ.

לאחר השקעת תצורת הערבה התרחשו באזור הנגב כולו שינויים טקטוניים שהשפיעו על משטר השיפועים האזורי. בפלייסטוקן המוקדם, לפני כ- 1.5-1 מיליוני שנים, הוטה הנגב כולו למזרח, והדבר הביא לפריצת נחל שגיא לכיוון דרום בנתיב העוקף את העמק הקדום של נחל כרכום וחובר לנחל פארן מדרום להר שגיא וכרכום במהלך שיצר את "הקניון הלבן" של נחל שגיא. באופן מפתיע, המשך הפעילות הטקטונית במהלך הפלייסטוקן

התיכון והמאוזר הביאה לסיפוח מרבית האזור שמדרום להר שגיא למערכת הניקוז של ואדי אל עריש. סיפוח זה מפתיע לאור העובדה שאגן הניקוז של נחל פארן והשיפועים הטקטוניים - ארוזיביים הפועלים בו הולכים ומתחזקים עם המשך התעמקות בקע הערבה וים המלח, בעוד שאגן ואדי אל עריש זורם אל הים התיכון שמפלסו נשאר כמעט יציב בזמנים אלה (למעט שינויים מחזוריים במפלס הים הנובעים משינויי אקלים). מבדיקה אזורית מתברר ששינויים במערכי הניקוז באופן שבו אגן ואדי אל עריש גדל על חשבון אגן נחל פארן מתקיימים לאורך כל פרשת המים שבין יובליו המזרחיים של ואדי אל עריש ואגן נחל פארן והם קשורים ככל הנראה בפעילות טקטונית צעירה הפועלת באזור (אבני, 1998). לפעילות זו יש הד ברור ברישום מוקדי רעידות אדמה על ידי הרשת הארצית במהלך העשורים האחרונים.

קטע לסיום: גיאולוגיה ושאלת "קדושתו" של הר כרכום

הר כרכום מצטיין בריבוי של סלעים מצוררים המהווים את התשתית הגיאולוגית לציורי הסלע הרבים היוצרים את יחודו של הר זה ביחס להרים שכנים. אם נסיף לכך את קיומם של גבי המים הגדולים המצויים על במת ההר לאורך חלקו העליון של נחל כרכום, הבולטים על רקע צחיחותו הכמעט מוחלטת של האזור, הרי שניתן להעריך כי ההר היווה מוקד משיכה לשבטי הנוודים שחיו באזור לאורך ההיסטוריה. נוודים אלה השאירו את רישומיהם בציור של מחזות צייד וסמלים שנחקקו על סלעי ההר (איור 31)



איור 31: ציורי סלע שנחקקו על עדשות של גיר מצורר.

הקביעה המופצת היום כי ההר הווה אתר קדוש וכי הוקם בו אתר פולחן קדום מתבססת במידה רבה על העדשות הצורניות המאורכות הנפוצות בתצורת ניצנה, והנחשפות בצורה יפה בחלקו המזרחי של ההר (איור 32). חניכי חוגי הסיירות מירושלים שביקרו בהר בפסח 1984 הציבו במקום "גן פסלים" הבנוי מהעדשות המצורות אשר הועמדו על ראשם (איור 32). "גיליון" של אתר הגן בשנות ה-90 הביאה להכרזת המקום כ"מקדש הפלאוליתי של הר כרכום" ועל ההר כולו כ-"הר קדוש".



איור 32: "גן פסלים" שהוקם על ידי חניכי חוגי הסיירות מירושלים בשנת 1984. צד ימין: תמונה משנת 1984 בשלבי בניית הגן. צד שמאל: אותו המקום בשנת 2013. היום המקום מכונה "המקדש הפלאוליתי של הר כרכום".

רשת השבילים המצויה בהר כרכום מאפשרת ביקור במרבית האתרים הגיאולוגיים והארכיאולוגיים המצויים בהר ובהם פסגת הר כרכום, אפיק נחל כרכום על גבי המים שבו ואתרים רבים של ציורי הסלע. הדרכים מתכנסים אל חניון הרכב שבתחתית ההר, שם מסתיים הסיור הרגלי.

סיכום הסיור

בסיור זה הקפנו שטח גדול בנגב המרכזי. התחלנו בהר עריף שהוא מבנה קימרוני מקומי ובוטל שהתפתח בחלקו המערבי של קמר עריף – בדד ולאורך העתק עריף-בתור התוחם את הקמר מדרום. המשכנו דרך הר חיסון אל הר חספס שבו ראינו כיצד העתק פארן יוצר את המבנה המיוחד, כשהוא מצמיד שתי כיפות מורמות וגדועות אל שוליים סחובים של קער הנגב הדרומי ומעשיר את המבנה כולו במינרליזציה ברזלית ודולומיטית כתוצאה מעליה של תמיסות הידרו-טרמליות לאורך מישור ההעתק. הגיל המפתיע של המינרליזציה – אוליגוקן מוקדם – משתלב עם עדויות לפעילות אוליגוקנית מאוחרת על מישור העתק פארן שהתגלו לאחרונה על ידי Weinberger et al., (2020), וביחד הם מבססים את הפאזה הטקטונית האוליגוקנית ההולכת ומתבררת בשנים האחרונות כדומיננטית בעיצוב המרחב של המזרח התיכון כולו והנגב בפרט. ראינו את התעבות החתך של חבורת עבדת בקרבת העתק פארן מדרום להר חספס. עדויות לפעילות טקטונית בזמן האיאווקן המוקדם והתיכון מאירות פרק עלום בהיסטוריה הגיאולוגית של הנגב. האם הפעילות הטקטונית הזו היא המקור לגלישות הרבות שנמצאו בסלעי תצורות ניצנה ומטרד בקרבת העתק פארן? ומה מקור

הגלישות – מהאגנים המקומיים של הנגב או ממרחקים של מאות קילומטרים, משולי הפלטה האפריקאית המוצפת ?

באזור באר כרכום ראינו את תצורת הערבה מונחת על גבי גלישות סלע גדולות שירדו במורדות הר כרכום והר שגיא אל עמק נחל כרכום. ראינו בכך סימן לקדמות הגלישות שהתקיימו במהלך המיוקן המאוחר והפליוקן בנגב, בשעה שמזה 1.5-2 מיליוני שנים אין עוד פעילות של גלישות ענק בממדים שכאלה. האם הגלישות קשורות באקלים גשום המתועד גם ממקווי המים והאגמים בתצורת הערבה, במשקעי המערות בנגב ומקרקות קלציות קדומות ? והאם הפסקת פעילות הגלישות מצטרפת לסמנים אחרים המעידים על התייבשות האקלים האזורי ? בהליכה לאורך שלוחת כרכום הצפונית בחנו את השפעת הסידוק והגלישות על עיצוב שלוחת הסכין הצרה. האם התופעות הללו מעידות על התמתנות התהליך הארוזיבי הפועל על המדרונות בנגב, והמכתיב את היציבות היחסית של פרשות המים במרחב הזה ? או שאולי אנו מצויים בעיצומה של פעילות ארוזיבית נמרצת אשר תכריע את שלוחות הר כרכום בזמן הקרוב ?

ולמרות המרחק מגבולו המזרחי של לוח ישראל סיני המגיע לכ- 50-60 ק"מ, מתקיימת באזור פעילות טקטונית צעירה הנמשכת עד לימנו בגבול אגן נחל פארן ואגן ואדי אל עריש, שלה השפעה חשובה על עיצוב הנוף הנוכחי.

נוסעים במשאית אל כביש הגבול (כביש 10) ונוסעים בו צפונה אל הר חריף ומערבה למצפה רמון. כאן מסתיים הסיוור.

ספרות נבחרת:

- אבני, י., 1991. הגיאולוגיה, הפלאוגיאוגרפיה והתפתחות הנוף של הר הנגב הגבוה ומערב קמר רמון. דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/6/9
- אבני, י., 1998. ההתפתחות הגיאולוגית של הנגב הדרומי והמאכזי כעדות להתפתחות שולי טרנספורם ים המלח הסוף הנאוגן וברביעון. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים, דו"ח מכון גיאולוגי GSI\24\98
- אבני, י., 2001. המפה הגיאולוגית של ישראל בקנה"מ 1:50,000 גיליון הר לוף. הוצאת המכון הגיאולוגי.
- אבני, י., 2016. המורפוטקטוניקה של אזור אילת מאז האיאוקן: עדויות לדפורמציה טקטונית אוליגוקנית המקדימה את טרנספורם ים המלח. הכנס השנתי של החברה הגיאולוגית הישראלית, חוברת הסיוורים עמ' 64-84.
- אבני, י., 2021. המשמעות הטקטונית של מערכות המצוקים הגדולות בלוח ישראל-סיני: הדגמה ממצוקי מכתש חתירה וממערכת המצוקים של רמת בקע – מצפה שיבטה. החברה הגיאולוגית הישראלית, חוברת הסיוורים. עמודים 5-42.
- אבני, י., בקר, א., וזילברמן, ע., 2017. המפה הגיאולוגית של ישראל בקנה"מ 1:50,000 גיליון בארות עודד. בן דוד, ר., 1987. התפתחות הנוף במערב הרמון. מדריך לסיוורים גיאולוגיים במכתש רמון. החברה הגיאולוגית הישראלית, חוברת הסיוורים, עמודים 90-94.
- בן תור, י.ק. ופרומן, ע. 1951. המפה הגיאולוגית של הנגב, 1:100,000 גיליון עבדת.
- בר, ג. 1981. הגיאולוגיה של קו עריף-בתור, אזור מעלה המישר. עבודת גמר, האוניברסיטה העברית בירושלים.

- ברטוב, י., 1974. השברים ומבני הכיפות של מרכז סיני, בעיות סטרוקטורליות ופלאו-גיאוגרפיות. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- גרפונקל, 1964. בעיות טקטוניות בקו רמון. עבודת גמר, המחלקה לגיאולוגיה, האוניברסיטה העברית.
- גרפונקל, צ., 1970. הטקטוניקה של השוליים המערביים של הערבה הדרומית. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- זילברמן, ע., 1991. התפתחות הנוף בנגב המרכזי, הצפוני והצפון מערבי בנאוגן ובקוורטר. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים. דו"ח מכון גיאולוגי GSI\45\90
- זילברמן, ע., אבני, י., 2007. קונגלומרט חימר – שרידי נחל שניקז רת עבר הירדן אל תעלת באר שבע במיוקן התיכון. סיור לרכס דימונה ובקעת ערד. הכנס השנתי של החברה הגיאולוגית הישראלית, חוברת הסיורים, עמודים 37-53.
- זילברמן, ע., קורנגרין, ד., 2017. הר עריף – טקטוניקה, ארוזיה והצצה נדירה בחתך טריאסי יחודי. כנס החברה הגיאולוגית במצפה רמון, חוברת הסיורים, עמודים 41-62.
- קורנגרין, ד., 1993. נסיגת הים האיאוני מאזור הערבה. עבודת גמר, אוניברסיטת בן גוריון בנגב.
- קלבו, ר., 2002. הסטרטיגרפיה והפטרולוגיה של תצורת חצבה בערבה ובנגב. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים. דו"ח מכון גיאולוגי GSI\22\
- רון, א., 2007. בעיות סטרוקטורליות וטקטוניות במערב הרמון. עבודת גמר, אוניברסיטת בן גוריון בנגב.
- שטרן, ד., 2006. דולמיטיזציה וברזול לאורך העתק פארן בהר חספס. הצעת מחקר לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית.
- Amit, R., Enzel, Y., Sharon, D., 2006. Permanent Quaternary hyperaridity in the Negev, Israel, resulting from regional tectonics blocking Mediterranean frontal systems. *Geology* 34, 509 – 512.
- Avni, Y., Bartov, Y., Garfunkel, Z and Ginat, H., 2000. The evolution of the Paran drainage basin and its relation to the Plio- Pleistocene history of the Arava Rift western margin, Israel. *Isr. J. Earth Sci.* 49: 215-238
- Avni, Y., Faershtein, G., Porat, N. 2017. Studies of stream terraces in the Negev Highlands and their relationship with the Levant alluvial chronologist. In: Y. Enzel and O. Bar-Yosef (eds.) *Quaternary of the Levant (Environment, Climate change and Humans)*. PP 457-469. Cambridge University Press.
- Avni, Y., Segev, A., Ginat H., 2012. Oligocene regional denudation of the northern Afar dome: pre and syn-breakup stages of the Afro-Arabian plate. *GSA Bulletin*, 124: 1871-1897.
- Avni, Y., and Zilberman, E., 1997. Landscape evolution triggered by neotectonics in the Sede Zin region, Central Negev, Israel. *Isr. J. Earth Sci.* 55: 189-208
- Bartov, Y., Lewy, Z., Steinitz, G., Zak, I., 1980. Mesozoic and Tertiary stratigraphy, paleogeography and structural history of the Gebel Arif a-Naga area, Eastern Sinai. *Israel Journal of Earth Sciences*, 29: 114-139.
- Benjamini, H., 1979. The Nahal Yeter Formation – a new formation from the northern Negev. *Israel Journal of Earth Sciences*, 28: 164-166.

- BenJamini, H., 1980. Stratigraphy and foraminifera of the Qezi'ot and Har Agrav formations of the western Negev. *Israel Journal of Earth Sciences*, 29: 227-244.
- Chaldekas, O., Vaks, A., Haviv, I., Gerdes, A., Albert, R., 2021. U-Pb speleothem geochronology reveals a major 6 Ma uplift phase along the western margin of Dead Sea Transform. *GSA Bulletin* 2021; doi: <https://doi.org/10.1130/B36051.1>
- Faershtein, G., Porat N., Avni Y., Matmon A., 2016. Aggradation–incision transition in arid environments at the end of the Pleistocene: An example from the Negev Highlands, southern Israel. *Geomorphology* 253 (2016) 289–304
- Matmon, A., Simhai, O., Amit, R., Haviv, I., Enzel, Y., Porat, N., McDonald, E.V., Benedetti, L., Finkel, R.C., 2009. Desert pavement coated surfaces in extreme deserts present the longest-lived landforms on Earth. *Geol. Soc. Am. Bull.* 121, 688-697.
- Nuriel, P., Weinberger, R., Kylander-Clark, A.R.C., Hacker, B.R., Craddock, J.P., 2017. The onset of the Dead Sea transform based on calcite age-strain analyses. *Geology* 45, 587–590.
- Ryb U., Erel Y., Matthews A., Avni Y., and Stern D., 2021. Sources, timing, environmental and tectonic implications of epigenetic mineralization along the Cenozoic Arabian-African plate boundary. Submitted to *Journal of Geophysical Research*.
- Sagy, Y., Gvirtzman, Z., & Reshef, M. 2018. 80 m.y. of folding migration: New perspective on the Syrian arc from Levant Basin analysis. *Geology*, 46(2), 175–178.
<https://doi.org/10.1130/g39654.1>
- Straler, N.S. 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* Volume 38, Issue 6; p- 913-920
- Walley, C. D. 1988. A braided strike-slip model for the northern continuation of the Dead Sea Fault and its implications for Levantine tectonics. *Tectonophysics*, 145 (1–2), 63–72.
- Weinberger, R., Nuriel, P., Kylander-Clark, A.R.C., Craddock, J.P., 2020. Temporal and spatial relations between large-scale fault systems: Evidence from the Sinai-Negev shear zone and the Dead Sea Fault. *Earth-Science Reviews* 211, 103377.
- Zaslavsky, N., and Avni, Y., 1994. Freshwater Fauna in a Clastic Lens within the Ghareb Formation: Implications for a "Ramon Island". The Israel Geological society annual meeting, Abstract volume, p. 121.
- Zilberman, E., 1983. The geology of the central Sinai-Negev Shear Zone, central Negev. Part B: the Arif-Bature Lineament. *Isr. Geol. Survey Reo.* EG/6/83
- Zilberman, E., 1985. The geology of the central Sinai-Negev Shear Zone, central Negev. Part C: the Paran Lineament. *Isr. Geol. Survey Reo.* GSI/38/85
- Zilberman, E., 1992. Remnants of Miocene landscape in the central and northern Negev and their paleogeographical implications. *Geo. Surv. Isr. Bull.* 83: 54 pp.

Zilberman, E., Calvo, R., 2013. Remnants of Miocene fluvial sediments in the Negev Desert, Israel, and the Jordanian Plateau: Evidence for an extensive subsiding basin in the northwestern margins of the Arabian plate. *Journal of African Earth Science* 82: 33-53.