

# ההיסטוריה של התפתחות המכתשים בנגב והגורמים שהביאו ליצירתם

עזרא זילברמן\*

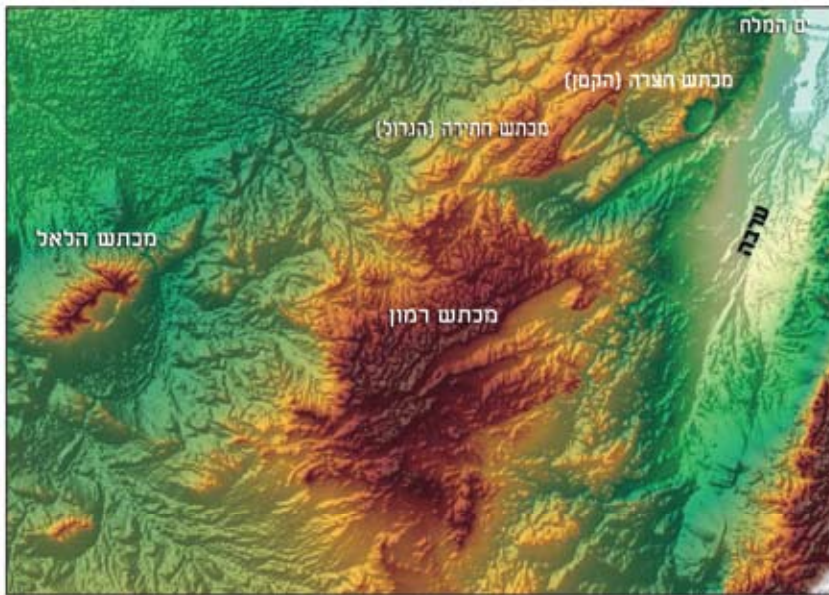
## מבוא

השם 'מכתש' ניתן בישראל לעמק מוקף צוקים שהתפתח במרכזו של קמר גאולוגי ואשר מנוקז בדרך כלל על ידי נחל אחד. אף על פי שקמרים הם מהמבנים הגאולוגיים הנפוצים בעולם, מספר העמקים שהתפתחו בהם ועונים על התיאור המתאים למכתש אינו רב.

שלושה מכתשים מוכרים בנגב ואחד בסיני (איור 1): מכתש רמון, הגדול שבמכתשים, שהתפתח בקמר רמון בנגב המרכזי, מכתש חתירה (המכתש הגדול), שהתפתח בקמר חתירה בנגב הצפוני, מכתש חצרה (המכתש הקטן), שהתפתח בקמר חצרה ממזרח למכתש חתירה ועמק קטן דמוי מכתש שנוצר בהר עריף מדרום למכתש רמון. בסיני התפתח בג'בל הלאל מכתש הדומה בממדיו למכתש חצרה.

בעבר הוצעו כמה הסברים להיווצרות המכתשים. את ההסבר הידוע ביניהם הציג ליאו פיקרד (Picard, 1951). על פי מודל זה נוצרים המכתשים בשלושה שלבים עיקריים (א) חשיפת הקמר; (ב) התפתחות מערכת ערוצים קצרים על פני אגפי הקמר (התלול והמתון), כאשר הערוצים הזורמים על גבי האגף התלול מתחתרים במהירות עקב השיפועים הגדולים; (ג) אחד הערוצים על גבי האגף התלול מגיע ראשון לאבן החול הפריכה שבליבת הקמר, ובתהליכי סחיפה מהירים

\* ד"ר עזרא זילברמן הוא חוקר בתחום הגאומורפולוגיה במכון הגאולוגי לישראל, משרד התשתיות.



איור 1: המכתשים על מפת תבליט (ג'ון הול, המכון הגאולוגי)

יוצר במרכזו עמק הגדל לאורך ציר הקמר ומנתק את יתר הערוצים מאגני הניקוז שלהם, ובכך הופך לנקז היחיד של המכתש. לדעתו, ממדי המכתשים משקפים את זמן יצירתם ובהתאם לכך מכתש רמון הוא העתיק ביותר ומכתש חצירה הצעיר ביותר.

שינויים שחלו בהבנתנו באשר לשלבי התפתחות הנוף בנגב, בצירוף עדויות חדשות שלא היו ידועות בימיו של פיקרד, גובשו לכדי מודל חדש ליצירת תוואי נוף מרשימים אלה בנגב.

המאמר יסקור את שרשרת התהליכים הגאולוגיים והמורפולוגיים שהביאו ליצירת המכתשים בנגב ויעמוד על מורכבותם הרבה המסבירה מדוע מספר המכתשים ה'קלסיים' בעולם אינו רב.

תהליך התפתחות המכתשים והגורמים להיווצרותם ייבחנו לאור הבנתנו באשר להרכב החתך הגאולוגי החשוף בהם, המבנה וההיסטוריה הגאולוגית של קמרי

הקשת הסורית<sup>1</sup> שבהם התפתחו ושלבי התפתחות הנוף והפעילות הטקטונית בנגב מאז נסיגת הים בסוף תקופת האיאווקן.<sup>2</sup> לפיכך, חלקו הראשון של המאמר יסכם את הידוע לנו על השלבים העיקריים של התפתחות קמטי הקשת הסורית והנוף בנגב.

## ההיסטוריה הגאולוגית של הקמרים

במשך רוב התקופה הפנארוזואית, שנמשכה החל מלפני כ-550 מיליון שנה ועד ימינו, שכן אזורנו לחופי אוקיינוסים, שהידוע שבהם הוא התטיס, והיה מוצף לסירוגין בים רדוד.

רוב סלעי המשקע הבונים את נוף ישראל הורבדו בים שכיסה את הנגב החל מסוף תקופת הקרטיקון התחתון<sup>3</sup> ועד סוף תקופת האיאווקן. במשך פרק זמן שנמשך בין 100 מיליון שנה ל-89 מיליון שנה לפני זמננו (פרק זמן הכולל את החלק העליון של תקופת הקרטיקון התחתון וכן את תקופות הקנומן<sup>4</sup> והטורון<sup>5</sup>) השתרע באזורנו ים רדוד מאוד המכונה ים אפיקונטיננטלי<sup>6</sup> או ים אפירי, שבו הורבדו סלעי גיר,<sup>7</sup> דולומיט<sup>8</sup> וחואר.<sup>9</sup> רצף סלעים זה כלול בחבורת<sup>10</sup> יהודה.

רצף סלעים זה מונח על חתך עבה של אבני חול צבעוניות המכונות גם 'אבן חול נובית', שהורבדו באזורנו בחלקה האמצעי של תקופת הקרטיקון התחתון בסביבה יבשתית. אבני חול אלה כלולות בתצורת<sup>11</sup> חתירה.

1 הקשת הסורית – מערכת קמרים המשתרעת מסיני דרך שדרת ההר של ישראל אל סוריה. הקמרים בנגב הם אסימטריים; אנפם הדרום-מזרחי תלול והצפון-מערבי מתון. קמרי הקשת הסורית בונים את רוב רכסי צפון סיני והר הנגב, ואת הרי יהודה והשומרון.

2 תקופת האיאווקן נמשכה בין 55 ל-34.5 מיליון שנה לפני זמננו.

3 תקופת הקרטיקון התחתון נמשכה בין 144 ל-99 מיליון שנה לפני זמננו.

4 תקופת הקנומן נמשכה בין 98.9 ועד 93.5 מיליון שנה לפני זמננו.

5 תקופת הטורון נמשכה בין 93.5 ועד 89 מיליון שנה לפני זמננו.

6 ים אפיקונטיננטלי – ים רדוד מאוד (מטרים ספורים) המשתרע על שטחים גדולים בשולי היבשות. אין כיום ימים מסוג זה.

7 סלע גיר – סלע המורכב בעיקר מהמינרל קלציט –  $\text{CaCO}_3$ .

8 סלע דולומיט – סלע המורכב בעיקר מהמינרל דולומיט –  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

9 חואר – סלע המורכב מתערובת של שלדי מאובנים ימיים חד-תאיים (פלנקטון) וחרסית.

10 חבורה – יחידה גאולוגית המורכבת ממספר תצורות שהן יחידות המיפוי הבסיסיות בגאולוגיה (ראו הערה הבאה).

11 תצורה – יחידת המיפוי הבסיסית בגאולוגיה. כל תצורה מורכבת מסלעים בעלי מאפיינים דומים, יש לה גבולות ברורים והופעה מורפולוגית טיפוסית המאפשרת לזהותה בנף.

החל מלפני כ-89 מיליון שנה השתפל אזורנו והוצף בים פתוח יותר, שבו הורבדו בעיקר סלעי קרטון<sup>12</sup> וחורואר, אך גם סלעי צור<sup>13</sup> ופוספט.<sup>14</sup> סלעים אלה כלולים בחבורות הר הצופים (מגיל סנטון<sup>15</sup>-פאלאוקן<sup>16</sup>) ועבדת (מגיל איאוקן).

מערכת הקמרים של הקשת הסורית החלה להתפתח על קרקעית ים רדוד שכיסה את אזורנו בתחילת תקופת הסנטון, ותהליך הקימוט נמשך לסירוגין עד סוף תקופת האיאוקן התחתון (לפני כ-51 מיליון שנה). במשך תקופה זאת, שנמשכה כמעט 40 מיליון שנה, יצרו הקמרים תבליט על קרקעית הים וראשיהם בלטו מדי פעם מעל פני הים ונגדעו על ידי פעולת הגלים בשוליהם ותהליכי בליה בסביבה יבשתית במרכזם (איור 2). סלעי המשקע שהצטברו בתקופה זאת על קרקעית הים יצרו רצפים עבים בעמקי הקערים שבין רכסי הקמרים התתימיים, ועוביים הצטמצם כלפי ראשי הקמרים שבלטו לסירוגין מעל פני הים. הבדלי העובי של היחידות הגאולוגיות השונות, מבסיסי הקערים אל ראשי הקמרים, משקפים את ממדי התבליט שיצר הקימוט על קרקעית הים בכל אחד משלביו. לפיכך השינוי בעובי סלעי המשקע הוא מדד מינימלי להערכת השיעור וקצב הקימוט בתקופות השונות. על מנת להעריך את ממדי הקימוט בצורה מדויקת יש להתחשב גם בגידוע המתמשך של ראשי הקמרים שבלטו מעל פני הים.

בשולי הקמרים, בתוך סלעי המשקע הימיים, מופיעים חלוקים ושרידי קרקעות שמקורם בבליה וסחיפה של סלעים קדומים יותר שנחשפו באיים. מערכות נחלים הובילו את חומרי הסחף הובלו אל שולי האיים, שם הם התערבבו במשקעים הימיים, והם מהווים מעין בתי קברות גאולוגיים שמהם ניתן ללמוד על הסביבה שהתקיימה באיים ובים הרדוד שהקיף אותם.

העדויות שנאספו מסלעי המשקע הימיים שהצטברו בזמן התפתחותה של מערכת הקמרים מצביעות על קיומה של רצועת איים ארוכה (ארכיפלג), שכיוונה דרום-מערב-צפון-מזרח, שהפרידה בין ים עמוק ופתוח בצפון-מערב לים רדוד במזרח ודרום-מזרח. איים אלה היו הפסגות של רכסי הקמרים התתימיים של

12 קרטון – סלע גיר לבן ורך המורכב בעיקר משלדים של יצורים חד-תאיים ימיים הצפים בגוף המים (פלנקטון).

13 צור – סלע משקע קשה המורכב מתחמוצות צורן.

14 סלע פוספט – סלע משקע המכיל ריכוז גבוה של המינרל אפטיט, המכיל זרחן. מלחי הפוספט והחומצה הורחטית המופקים מהסלע משמשים כדשן.

15 תקופת הסנטון נמשכה בין 85.8 ל-83.5 מיליון שנה לפני זמננו. היא מהווה חלק מתקופת הסנטון, שנמשכה מלפני 89 ועד 65 מיליון שנה לפני זמננו.

16 תקופת הפאלאוקן נמשכה בין 65 ל-55 מיליון שנה לפני זמננו.

הקשת הסורית, אשר בלטו מעל פני המים, וממדיהם נקבעו בתהליך של 'תחרות' בין ארבעה גורמים: (א) כוחות טקטוניים שקימטו והרימו את הקמרים; (ב) תנודות במפלס הים העולמי שגרמו להצפות ולחשיפות של ראשי הקמרים; (ג) תהליכי הבליה והסחיפה שגדעו את ראשי הקמרים שנחשפו. תהליכים אלה יצרו מישורי גידוע תת־אופקיים בראשי הקמרים, שעליהם נחשפו שכבות עתיקות שהיו חבויות בליבת הקמר; (ד) תהליכי ההרבדה והצטברות סדימנטים עבים בקערים, שגרמו ל'טשטוש' התבליט שיצר תהליך הקימוט על קרקעית הים.

לקראת אמצע תקופת האיאווקן הוצפו האיים על ידי הים, אך רצועת הקמרים של הקשת הסורית עדין יצרה רכסים תת־ימיים, ואלה הפרידו בין הים הפתוח בצפון־מערב לאגן סגור למחצה שהשתרע מדרום־מזרח לנגב המרכזי והצפוני. לקראת סוף תקופת האיאווקן התיכון כוסה התבליט התת־ימי של רכסי הקשת הסורית על ידי סלעי משקע ימיים (איור 22), ובזאת נחתם הפרק העיקרי של התהוות קמטי הקשת הסורית הנגב.

## שלבי התפתחות הנוף העיקריים בנגב בתקופת הניאווקן<sup>17</sup>

התפתחות הנוף בנגב החלה לאחר נסיגת הים בסוף תקופת האיאווקן. למרות מורכבות התהליך ניתן לזהות בו כמה שלבים עיקריים:

- נסיגת הים לאחר תקופת האיאווקן לא לוותה בפעילות טקטונית בנגב. על פני קרקעית הים שנחשפה התפתחו מערכות ניקוז שזרמו מחצי האי ערב דרך הנגב אל הים בשיפועים קטנים, ללא התחתרות משמעותית. בתקופה זאת, תקופת האוליגוקן,<sup>18</sup> עבר החתך האיאווקני גידוע בשיעור של מספר עשרות מטרים, ונוצר נוף מתון שהשתרע על פני כל האגן המזרחי של הים התיכון (נוף המכונה 'פנפליין' – כמעט מישור). הגידוע הסיר את כיסוי סלעי המשקע האיאווקנים שהורבדו על מישורי הגידוע בראשי הקמרים ואף העמיק את הגידוע בראשיהם. אבני החול הצבעוניות מגיל קרטיקון תחתון נחשפו על פני מישורי הגידוע בראשי קמר רמון וקמר חתירה, שהיוו בתקופה זאת חלק

17 תקופת הניאווקן נמשכה החל מלפני 23.5 מיליון שנה ועד ימינו. בתוכה נכללות תקופות המיוקן, הפליוקן, הפלייסטוקן וההולוקן.

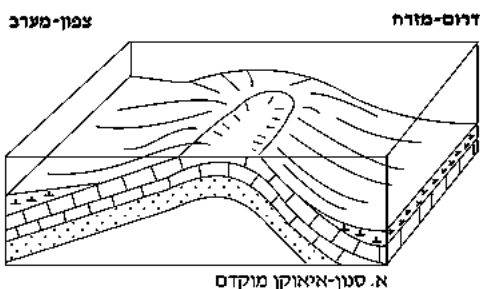
18 תקופת האוליגוקן נמשכה בין 34.5 ל־23.5 מיליון שנה לפני זמננו.

- מהנוף המתון שהשתרע על פני כל האגן המזרחי של הים התיכון (איור 12).
- פעילות טקטונית קצרה בתחילת תקופת המיוקן<sup>19</sup> הרימה את הנגב הצפוני וגרמה להתחתרות הנחלים ולחשיפת ראשי הקמרים. קמר חתירה נחשף במידה הרבה ביותר ויצר תבליט של כ-150-200 מ' מעל סביבתו. הנחלים שזרמו אל הים בצפון-מערב על פני הנוף המתון התחתרו בקמרים שהלכו והתרוממו ויצרו מִפְעָרִים בקמרי חצרה וחתירה (איור 12). הנגב המרכזי התרומם בשיעור קטן והתחתרות הנחלים במפלס הגידוע בראש קמר רמון לא עלתה על 30-40 מ'. תוצרי הבליה שהוסרו מראשי הקמרים הצטברו בעמקי הקערים ויצרו קונגלומרטים<sup>20</sup> המהווים כיום את הבסיס של רצף עבה של סלעי משקע נחליים שהורבד בנגב בתקופת המיוקן המוקדם וכלול בתצורת חצבה.
  - בהמשך תקופת המיוקן המוקדם חלה השתפלות אטית של הנגב, שהביאה להצטברות אטית של סלעי משקע אגמיים ונחליים במערכות ניקוז מקומיות שזרמו בקערים ולהתמתנות הנוף. חתך זה מהווה את החלק התחתון של תצורת חצבה.
  - אירוע טקטוני קצר במהלך המיוקן המוקדם גרם לחידוש ההרמה ולהתחתרות של הנחלים בנגב הצפוני ושולי הערבה. קמר חתירה עבר שלב קימוט נוסף שהדגיש את האגף הדרום-מזרחי התלול. הסחף שהורבד בעמקים שנוצרו בשלב זה מכיל לראשונה חלוקים מעוגלים של צור המכונה 'צור יבוא', שמקורם בעבר הירדן. הדבר מצביע על כך שמערכות ניקוז שמקורן בחצי האי ערב התנקזו אל הים, שחופו השתרע לאורך השוליים הצפון-מערביים של רכסי הנגב הצפוני.
  - בהמשך עבר הנגב למשטר של השתפלות מהירה ומתמשכת ביחס לפני הים, וכתוצאה מכך הצטבר בו חתך של סלעי משקע יבשתיים נחליים-אגמיים, שעוביו באזור אגן כרכום הגיע לכ-1,000 מ'. רצף סלעים אלה מורכב מסחף שרובו חול וחלוקי 'צור יבוא' שמקורם בחצי האי ערב, והם הובלו לנגב במערכות ניקוז גדולות שאגניהן כללו את השוליים המורמים של ים סוף, שהחל להיפתח בין יבשת אפריקה לחצי האי ערב וסיני. בבסיס החתך נמצאו מאובני יונקים

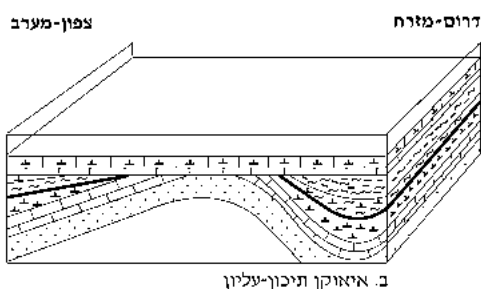
19 תקופת המיוקן נמשכה בין 23.5 ל-5.3 מיליון שנה לפני זמננו.  
20 קונגלומרט – סלע הבנוי מחלוקי נחל.

איור 2: שלבים בהתפתחות מישורי הגידוע בראשי הקמרים ויצירת מפערי הנחלים בראשם:

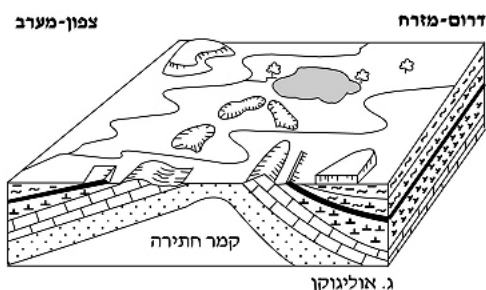
א. סנון-איאוקן מוקדם: ראשי הקמרים יוצרים איים המבצבצים מעל פני הים. תהליכי בליה וסחיפה בסביבה יבשתית ותהליכי גידוד ימיים גודעים את ראשי הקמרים



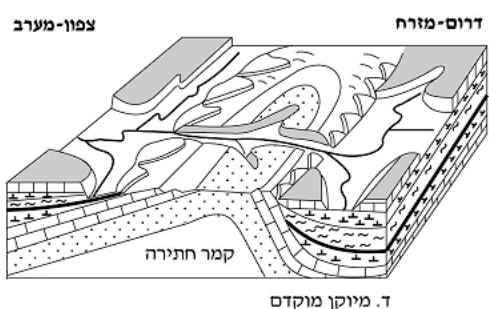
ב. איאוקן תיכון-עליון: לקראת אמצע תקופת האיאוקן מציף הים את הקמרים והם מכוסים בסלעי משקע ימיים



ג. אוליגוקן: בתקופת האוליגוקן חשוף הנגב לתהליכי בליה וסחיפה בסביבה יבשתית. ראשי הקמרים מהווים חלק מהנוף השטוח (פנפליין) שנוצר באזור ועוברים גידוע נוסף. אבני החול של חברת כורנוב נחשפות בקמרים חתירה ורמון

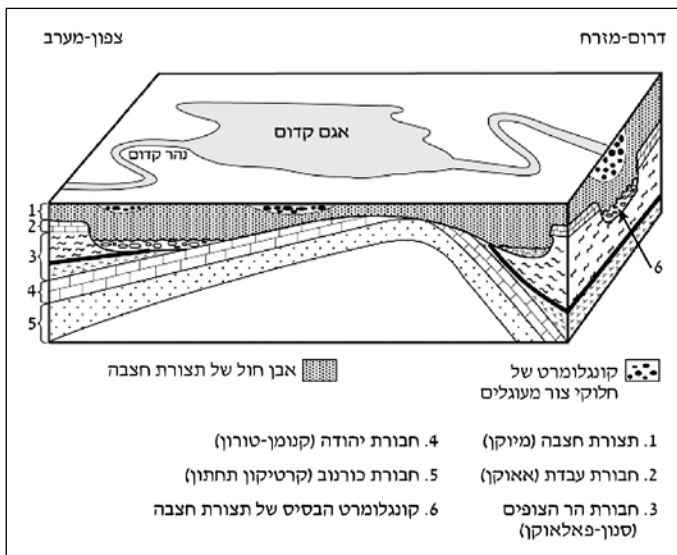


ד. מיוקן מוקדם: הרמה של הנגב הצפוני בתחילת המיוקן גורמת להתחתרות הנחלים באזור המתרום ויצירת מפערים בקמרים. הנחלים זורמים לצפון-מערב אל הים התיכון



שגילם מיוקן מוקדם. אלה מייצגים הן סביבות מחיה נחליות-אגמיות ויערות המלווים אותן והן סביבות מחיה פתוחות של סוואנות, שהשתרעו ככל הנראה בשוליהם של עמקי הנחלים. רצף סלעים עבה זה, המהווה את החלק העליון של תצורת חצבה, כיסה בהדרגה את כל נוף הנגב שהלך והשתפל, וקבר כליל את מערכת רכסי הקמרים של הנגב הצפוני (איור 3).

• תהליך ההשתפלות הגיע אל קצו במיוקן התיכון עם הופעתו של שבר ים המלח (לפני כ־14–15 מיליון שנה), שהפריד בין לוח חצי האי ערב ללוח ישראל וסיני. בעקבות תהליך הביקוע הורם האזור ותצורת חצבה החלה להיסחף מרוב חלקי הנגב פרט לחלק מהקערים בנגב הצפוני (קער אורון, קער אפעז, קער ירוחם) והאגנים הקטנים שנוצרו לאורך מערכת שברי הרוחב<sup>21</sup> (אגן מחמל, אגן נחל טרף, אגן כרכום, אגן מעין בסיני). כתוצאה מכך נחשף הנוף של קמרי הקשת הסורית, שהיה קבור עד כה, לתהליכי בליה וסחיפה.



איור 3: כיסוי הנוף בנגב הצפוני על ידי הסדימנטים של תצורת חצבה במיוקן המוקדם

<sup>21</sup> מערכת שברי הרוחב – מערכת שברים שכיוונה מזרח-מערב, החוצה את מרכז הנגב וסיני. לאורכה התפתחו חלק מהמבנים הגאולוגיים הבולטים בנגב: הר נפחא, הר סעד, הר חמרן, הר עריף, הר בתור, אגן כרכום ואגן מחמל (מכתש החול).



- במהלך המיוקן המאוחר<sup>22</sup> החל להיווצר לאורך שבר ים המלח בקע, שהיווה אגן ניקוז פנים־יבשתי לאזורים שבשוליו. שולי הבקע המזרחיים הורמו וחסמו את מערכות הנחלים שזרמו במיוקן הקדום אל הים התיכון; הורמה שדרת ההר של ישראל והחל תהליך של עיצוב מערכת הניקוז הנוכחית ויצירת קו פרשת מים ארצי המקביל לבקע ים המלח. הנגב המרכזי והצפוני הורמו בשיעור של מספר מאות מטרים ויצרו מבנה קימור רחב. קמרי רמון, חתירה וחצרה מצאו עצמם על האגף המזרחי של הקימור הרחב המשתפל לעבר בקע ים המלח.
- התחתרות הנחלים בנוף המורם יצרה את מערכת הצוקים המקיפה את הרמות של הנגב המרכזי, שהן שרידי הנוף שעליו הורבדה תצורת חצבה. ממערב לקימור הרחב חדר הים בפליוקן<sup>23</sup> עד גבעות גורל מצפון לבקעת באר שבע ושולי הרכס של הר קרן בנגב המערבי, ויצר את משטח הגידוד<sup>24</sup> הנרחב של שפלת הנגב. ממזרח לקו פרשת המים התפתח נחל פארן הקדום, שניקז את כל הנגב הדרומי, מזרח סיני וגב הערבה אל אגן כרכום, ומשם לערבה הצפונית דרך המישר וקניון נקרות, שהלך והתחתר בעקבות הרמת רמת נקרות לאורך קו עריף־בתור, השייך למערכת שברי הרוחב.
- את תהליך התייצבות הנוף לאחר שלב הרמה וההתחתרות מייצגת תצורת ערבה,<sup>25</sup> שהורבדה על פני כל אגן הניקוז של נחל פארן הקדום בפליוקן.
- שלב ההרמה וההתחתרות שהחל במיוקן התיכון והגיע לסיומו בפליוקן, עיצב חלקים ניכרים מנוף הנגב ובמהלכו התפתחו גם עמקי המכתשים.

ההיסטוריה הגאולוגית ושלבי התפתחות הנוף בנגב שהוצגו כאן ישמשו רקע לשחזור שלבי ההתפתחות של המכתשים, ודרכם ננסה להבין את התנאים שהביאו להתפתחות תצורות נוף ייחודיות אלה בנגב. את התהליך אבחן במכתש חתירה, שהוא הראשון שהתפתח בנגב.

22 מיוקן מאוחר (עליון) – 11.2–5.3 מיליון שנה לפני זמננו.

23 תקופת הפליוקן נמשכה בין 5.3 ל־1.8 מיליון שנה לפני זמננו.

24 גידוד – שם כולל לתהליכי גידוע שנוצרים על ידי הגלים בקו החוף. כאשר הים מתקדם אל תוך היבשה, יוצרים תהליכי גידוד משטחים נרחבים, המכוסים עם המשך ההצפה הימית בסלעי משקע ימיים.

25 תצורת ערבה – יחידה של סלעי משקע יבשתיים, נחליים ואגמיים, שהורבדה על פני הנגב הדרומי והערבה הצפונית בתקופת הפליוקן.

## היווצרות מכתש חתירה (המכתש הגדול) – דגם להתפתחות המכתשים בנגב

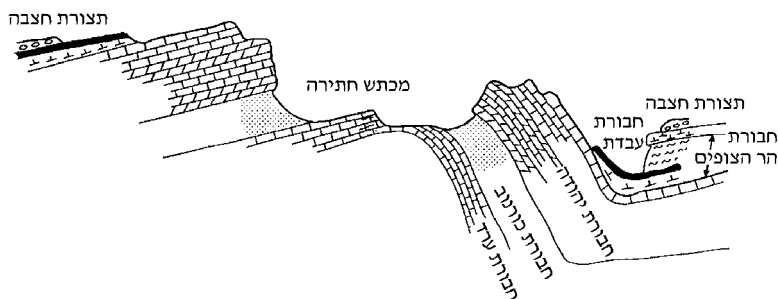
מכתש חתירה מייצג את המורפולוגיה והמבנה הגאולוגי המאפיינים את מכתשי הנגב וצפון סיני (איורים 4-8).

- המכתש נמצא במרכזו של קמר לא סימטרי שהוא רכס מתנשא מעל סביבתו.
- ראש הקמר גדוע, והשכבות הקשות של חבורת יהודה נסחפו והוסרו מאזור ציר הקימור.
- המכתש מוקף צוקים תלולים שגובהם עד 400 מ'.
- צוקי המכתש בנויים בבסיסים שכבות של אבן חול פריכה של תצורת חתירה וחואר רך של תצורת חביון (שתיהן מגיל קרטיקון תחתון), ואילו חלקיהם העליונים בנויים משכבות קשות של גיר ודולומיט קשים מחבורת יהודה (מתקופות הקרטיקון התחתון, הקנומן והטורון).
- המכתש מנוקז על ידי נחל אחד החוצה את האגף הדרומי-מזרחי והתלול של הקמר בקניון צר ועמוק.
- בקיר הצפוני-מערבי של המכתש נמצא עמק נטוש של נחל הזורם לצפון-מערב (נחל אבנון), ה"תלוי" מעל צוקי המכתש. העמק הנטוש נמצא מול פתח הניקוז הנוכחי של המכתש.

**מישור הגידוע**, בחלק העליון של הקמר, נוצר בהדרגה מאז תחילת התפתחות קמר חתירה על קרקעית הים הסנוני ועד שנקבר באיזוקן. הגידוע התחדש לאחר נסיגת הים בסוף האיזוקן ונמשך לאורך תקופת האוליגוקן, עת ראש הקמר הגדוע היה חלק מנוף מתון של פנפליין אזורי (איור 12). במרכז מישור הגידוע נחשפו אבני החול של תצורת חתירה ויצרו מחשוף אליפטי, שעקב אחרי קווי המתאר של הקמר (איור 12). שרידי מישור הגידוע מיוצגים כיום על ידי שורה של פסגות בעלות גובה דומה המקיפות את המכתש בצפון ובמערב (איור 8). במיוקן המוקדם הורם קמר חתירה מעל הפנפליין האזורי ונוצר רכס בגובה של כ-150 עד 200 מ', שהתנשא מעל קער אורון וקער ירוחם.

**העמק הנטוש**, בקיר הצפוני-מערבי של המכתש, הנו הקצה המזרחי של העמק של נחל אבנון הזורם לירוחם, ולאורכו עובר הכביש המוביל למכתש. העמק יוצר

מפער עמוק בקיר המכתש, ובו נשמרו שרידים של קונגלומרט ומעליו אבני חול של תצורת חצבה, ה'תלויים' כיום מעל צוקי המכתש (איור 5). עמק זה הנו שריד של נחל קדום שזרם על פני הפנפליין האוליגוקני ממזרח למערב. כאשר החל קמר חתירה להתרומם ולהיחשף במיוקן המוקדם, התחתר הנחל לרוחב הרכס ויצר מפער שאת חלקו הצפוני-מערבי מייצג נחל אבנון (איור 2ד).



| גיל           | חבורה     | מסלע                | דרגת קושי (עמידות לבליה) |
|---------------|-----------|---------------------|--------------------------|
| מיוקן         | ים המלח   | אבן חול וקונגלומרט  |                          |
| אאוקן         | עבדת      | קרטון וגיר          | קשה                      |
| סנון-פאלאוקן  | הר הצופים | חוואר               | רך מאוד                  |
|               |           | צור קרטון           | קשה                      |
| קנומן-טורון   | יהודה     | דולומיט, גיר וחוואר | קשה מאוד                 |
| קרטיקון תחתון | כרמל      | אבן חול             | רך מאוד                  |
| יורה          | ערד       | גיר                 | קשה                      |

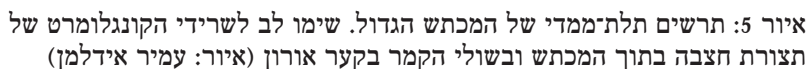
איור 4: חתך רוחב דרך קמר ומכתש חתירה המראה את המבנה הגאולוגי והמורפולוגי בצירוף החתך הגאולוגי החשוף במכתש ובשולי הקמר

המפער הנטוש של נחל אבנון היה פעיל בתחילת המיוקן בזמן הרבדת חלקה התחתון של תצורת חצבה. המשכו המזרחי עבר ככל הנראה בתוואי שבו נמצא המוצא הנוכחי של המכתש, אך במפלס גבוה בהרבה מהנוכחי. משלב ראשוני זה שקדם להתפתחות המכתש לא נותרו שרידים בצידו הדרום מזרחי של המכתש.

העדויות הראשונות לקיומו של עמק במרכז קמר חתירה בתחילת המיוקן היא גבעה בחלקו הצפוני-מזרחי של המכתש, ברום טופוגרפי של 398 מ' מעל פני הים, שבראשה נמצאים שרידים של קונגלומרט מלוכד היטב. הקונגלומרט גבוה בכ-70 מ' מעל האפיקים המנקזים כיום חלק זה של המכתש (איור 5). דרגת העיגוליות<sup>26</sup> של החלוקים שנמצאו בקונגלומרט בתוך המכתש דומה לזו של החלוקים המובלים כיום על ידי נחל חתירה. הדבר מלמד על קיומו של עמק מיוקני שממדיו דומים למכתש הגדול אך קרקעיתו גבוהה בכ-70 מ' מעל קרקעית המכתש הנוכחי. בקער אורון, במוצא המכתש, על גבי מפלס הגבוה בכמה עשרות מטרים מעל אפיק הזרימה הנוכחי, נמצא קונגלומרט המכיל חלוקים מסלעי היורה והקרטיקון התחתון, שכנראה היו חשופים כבר אז בלב עמק שנפער בקמר חתירה. חלוקים אלה הובלו לקער אורון בנחל שניקז את המכתש לכיוון מזרח דרך המפער בקיר הדרום-מזרחי של המכתש שבו זורם כיום נחל חתירה.

אם מחברים בקו דמיוני את הקונגלומרט שבתוך המכתש עם הקונגלומרט שבמוצא המכתש, מתקבל מפלס משופע לדרום-מזרח המייצג את מערכת הניקוז הקדומה של העמק המיוקני, מערכת שזרמה על גבי קרקעית עמק שהייתה גבוהה בכמה עשרות מטרים מזו הנוכחית. בסיס הניקוז של העמק המיוקני היה קער אורון, שבו זרם הנחל לצפון-מזרח לאורך שולי הקמר עד לאזור ממשית, ושם פנה לצפון-מערב והתנקז לנחל באר שבע הקדום, שזרם לבקעת באר שבע דרך מפער ממשית-דימונה-ערוער. במפער זה עוברים כיום הכביש ומסילת הרכבת (איור 6).

26 דרגת עיגוליות – דרגת השחיקה של החלוקים עקב ההובלה בנחל, הגורמת ליצירת צורה מעוגלת. דרגת העיגוליות מצביעה על מרחקי ההובלה שעברו מסלע המקור: ככל שמרחק ההובלה גדל, כך גדלה דרגת העיגוליות.

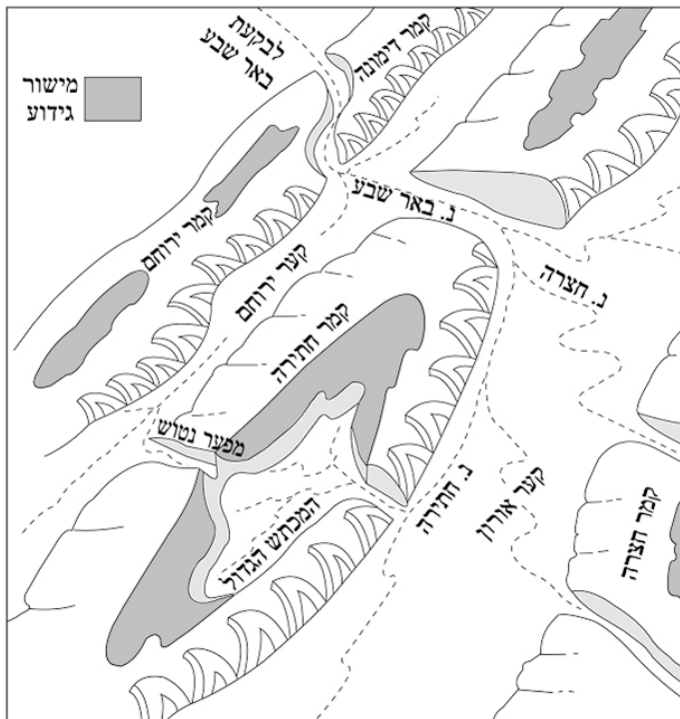


תהליך התחתרות המכתש החל עם היפוך כיוון הזרימה של חלקו המזרחי של אפיק נחל אבנון הקדום, שחצה את קמר חתירה ממזרח למערב בתחילת המימון. הגורם להיפוך היה ככל הנראה חידוש הקימוט של הקמר על ידי פעילות טקטונית במהלך המימון המוקדם. הרכס הורם בקצב גדול יותר מיכולת ההתחתרות של הנחל שזרם במפער, והוא נחסם בשולי הקמר והחל לזרום לאורך שוליו לצפון-מזרח.

עקב חידוש הקימוט של קמר חתירה הוטה חלקו המזרחי של המפעל לדרום-מזרח והחל לנקז את חלקיו הגבוהים של הקמר אל קער אורון דרך הפרצה שכבר הייתה קיימת בקיר המכתש. אבני החול הפריכות, שהיו חשופות על פני מישור הגידוע במרכז הקמר, נסחפו במהירות ונוצר עמק מוקף בצוקים הבנויים מהסלעים

הקרבונוטיים הקשים של חבורת יהודה. חלקו הצפוני-מערבי של המפער המיוקני נותק מאגן הניקוז הקודם שלו ונותר כעמק נטוש היוצר מפער בקיר המכתש. הנחל החדש – 'נחל חתירה הקדום' הפך להיות חלק ממערכת הניקוז של מישור ימין ומישור רותם שורמה לבקעת באר שבע (איור 6).

תהליך היווצרות המכתש במיוקן פסק עם חידוש ההשתפלות של האזור וקבורתו על ידי מעטה עבה של סלעי משקע נחליים של תצורת חצבה. תהליך ההתחתרות התחדש במהלך המיוקן המאוחר, כאשר הורמה שדרת ההר של ישראל ונוצר הקימור הרחב ממערב לבקע ים המלח. רכס חתירה, הנמצא על האגף המזרחי של הקימור הרחב, הורם והוטה מזרחה. תצורת חצבה נסחפה מהאזור, והחל תהליך של ניקוי העמק המיוקני מהסחף שמילא אותו לאחר יצירתו וחשיפת



איור 6: שחזור מכתש חתירה ומערכת הניקוז של הנגב הצפוני בתחילת תקופת מיוקן. שימו לב למערכת המפערים שדרכה חוצה הנחל את מערכת הקמרים בדרכו לבקעת באר שבע

התבליט הקדום. ייתכן שבשלב החשיפה הראשון ניקזו מספר נחלים את הקמר ההולך ונחשף, אך בהמשך התהליך, הנחל, שתוואי זרימתו חפף למוצא המכתש המיוקני, התחתר במהירות ושבה את מערכות הניקוז האחרות. נחל זה הפך לנקז היחיד של המכתש, שהתעמק בשיעור של 70 מ' מאז חשיפתו ועד היום.

### התפתחות מכתש חצרה (המכתש הקטן)

ההיסטוריה של מכתש חצרה שונה מזו של מכתש חתירה אף על פי שהתנאים הגאולוגיים בשניהם דומים. הניתוח של המבנה המורפולוגי של שיא הקמר מראה שגם כאן קיים מישור גידוע, ששרידיו מיוצגים על ידי הפסגות המקיפות את המכתש מצפון-מערב. בקיר הצפוני-מערבי של המכתש מצוי מפער עמוק שדרכו זורם כיום נחל חתירה ממישור ימין אל תוך המכתש. מפער זה, שבו נמצאים שרידים של תצורת חצבה, נמצא מול הפתח הניקוז הנוכחי של המכתש (איורים 7, 8) והוא שריד, כמו בקמר חתירה, של מפער נחל מיוקני שחצה את שיא הקמר.

שיעור הגידוע של פסגת קמר חצרה לפני הרבדת תצורת חצבה היה מועט באופן יחסי, ונראה שאבני החול של תצורת חתירה לא נחשפו על פני מישור הגידוע שבראשו. עם זאת שחזור של המפער המיוקני מצביע על אפשרות שעל קרקעיתו אכן נחשפו אבני החול בשיא הקמר.

אין בידינו עדויות להתפתחות מכתש ראשוני בקמר חצרה במיוקן, והסיבה לכך היא שהקמר נשאר נמוך ביחס לסביבתו ולא עבר הרמה או קימוט ניכרים ולכן לא נוצר בסיס ניקוז נמוך בשוליו שאפשר יצירת עמק במרכזו. מצב זה השתנה כאשר הורמה שדרת ההר ונוצר הקימור הרחב במיוקן המאוחר. בדומה לקמר חתירה, גם קמר חצרה נמצא היום על אגפו המזרחי של הקימור הרחב המשתפל אל הערבה. נוסף על הטיית הקמר מזרחה קיימות עדויות לחידוש הקימוט של הקמר לאחר הרבדת תצורת חצבה. תהליך הקימוט גרם להדגשת האגף הדרומי-מזרחי התלול של הקמר, היוצר היום מדרגה מורפולוגית וגאולוגית גבוהה מעל הקער שמדרום מזרח לו, שבו זורם נחל צין.

עקב סחיפתה של תצורת חצבה משדרת ההר המורמת של הנגב הצפוני הלך ונחשף מישור הגידוע בראש קמר חצרה והמפער שבמרכזו, שהיה כבר נטוי



איור 7: מכתש חצרה. שימו לב לעמק הנטוש, הנמצא מול המוצא הנוכחי של המכתש

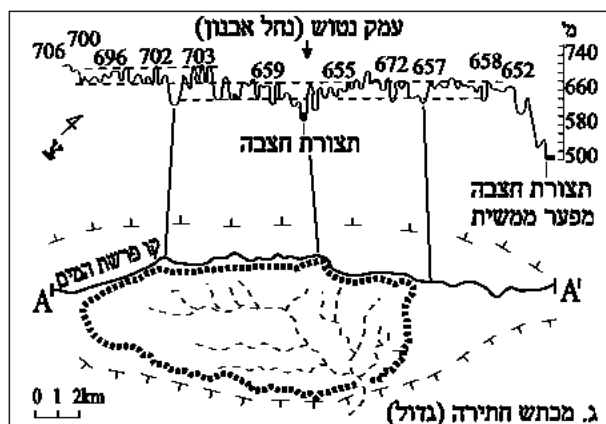
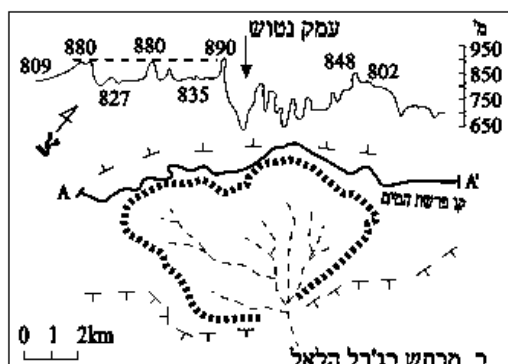
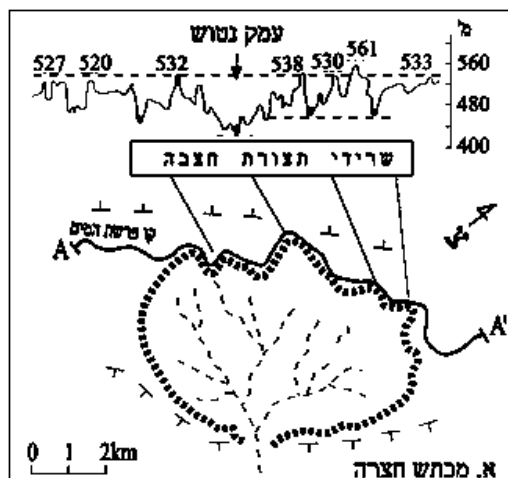
למזרח. אחד מהנחלים שניקזו את האזור המורם למזרח בתוואי של המפער המיוקני (נחל חצרה) התחתך במהירות בליבת הקמר תוך כדי סחיפת אבני החול ממרכזו ויצירת המכתש. המוצא של נחל חצרה מהמכתש הנו שריד למפער המיוקני, שחלקו הצפוני נותר נטוש במצוק הצפוני-מערבי של המכתש. ההטיה מזרחה של האזור כולו גרמה לכך שחלק ממישור ימין מתנקז היום אל המכתש דרך המפער הנטוש שהותיר הנחל המיוקני בקיר הצפון-מערבי של המכתש.

### המכתש בג'בל הלאל בסיני

בג'בל הלאל בסיני קיים מכתש הדומה בממדיו למכתש חצרה. גם כאן ניתן להבחין בשרידי מישור גידוע בחלקיו הגבוהים של הקמר ובמפער עמוק של עמק נטוש בקיר הצפוני של המכתש, ממול לפתח הניקוז הנוכחי (איור 8).



איור 8: פרופילים טופוגרפיים של פרשות המים לאורך צירי הקמרים חתירה, חצרה והלאל. ניתן לראות את העמקים הנטושים הנמצאים בקירות המכתש ממול למוצאם הנוכחי. בקמרי חתירה וחצרה נמצאו שרידים של תצורת חצבה בתוך עמקים אלה, ה'תלויים' מעל שפת המכתשים



- מקרא:
- ..... מצוק
  - חתך טופוגרפי
  - - - - - אפיק
  - 722 נקודת גובה
  - - - - - מפלס גידוע
  - + כיוון גשית השכבות

אין בידינו נתונים מדויקים על שלבי התפתחות הנוף בצפון סיני, אך ייתכן שניתן לקשור את התפתחות המכתש כאן לפעילות טקטונית לאורך שבר סעדי-נפחא (ממערכת שברי הרוחב), העובר לאורך השוליים הדרומיים של קמר הלאל, מוריד את הקער שמדרומו ביחס לקמר הלאל וייתכן שאף גורם להטיה קלה של הקמר לדרום.

### מכתש רמון

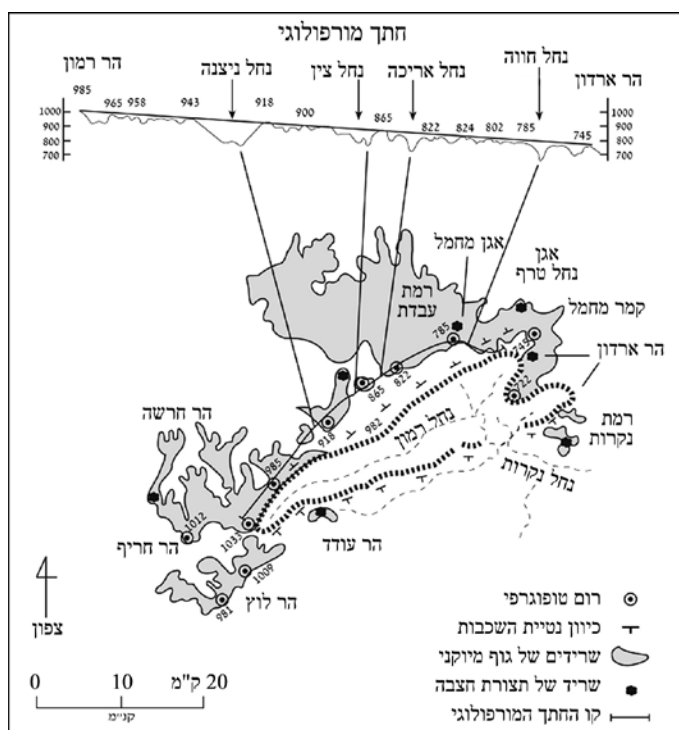
מכתש רמון התפתח במרכז הרמה של הנגב המרכזי, בלבו של קמר רמון. לקמר רמון אין ביטוי מורפולוגי בולט בנוף למעט חלקים מאגפיו הדרומיים-מזרחיים התלול, שנחשפו עקב ההתחתרות של נחל נקרות (שנוצר רק בסוף המיוקן) לאורך ציר קער נקרות שבין קמר רמון לקמר חדב. הסיבה לכך היא הגידוע העמוק של ראש הקמר בשיעור של מספר מאות מטרים.

באוליגוקן ובמיוקן המוקדם היו הנגב המרכזי ומישור הגידוע בראש קמר רמון חלק מנוף מתון שעליו זרמו הנחלים מדרום-מזרח לצפון-מערב (איור 9). עקב ממדיו הגדולים של קמר רמון נראה שמספר נחלים זרמו על פני מישור הגידוע שבגגו, בדרכם לים התיכון. אחד מנחלים אלה היה ככל הנראה נחל מחמל, שהוביל את החלוקים של קונגלומרט הבסיס של תצורת חצבה שהצטברו במיוקן המוקדם בשקע הטקטוני שנוצר באגן מחמל (מכתש החול), לאורך שבר סעדי-נפחא. הנחל



איור 9: שחזור הנוף בהר ארדון בתקופת האוליגוקן ותחילת המיוקן

יצר עמק שהתחתר במפלס הגידוע בראש קמר רמון, שבו זורם היום נחל חווה לצפון מערב תוך חציית צוק אי־ההתאמות,<sup>27</sup> המקיף את מכתש רמון. מפערים נוספים חוצים את צוק אי־ההתאמות (איור 10), ובהם זורמים נחל אריכא (שהוא בעל אגן ניקוז קטן ביותר אך מפער רחב), נחל צין ונחל ניצנה. ייתכן שמפערים אלה עוקבים אחרי התוואי של נחלים מיוקנים שהתחתרו במפלס הגידוע בראש קמר רמון.



איור 10: מכתש רמון וסביבו שרידי מישור הגידוע הבונה את רמת הר הנגב הגבוה. מישור זה הנו שריד לנוף האוליגוקני-מיוקני המתון, שעליו הורבדה תצורת חצבה. דרך המפערים החוצים את השוליים הצפון-מזרחיים של קמר רמון עוברים הנחלים הגדולים המנקזים את שולי הקמר: נחל ניצנה, נחל צין, נחל אריכא ונחל חווה. שימו לב לנטייה של הרמה לצפון-מזרח

27 צוק אי־ההתאמות – כינוי לרצועה המקיפה את קמר רמון שלאורכה מצטמצם עובי סלעי המשקע הימיים מגיל סנון עד איאוקן כלפי ציר הקמר. הצטמצמות זאת היא ביטוי להיותו של קמר רמון מבנה בולט מעל קרקעית הים בתקופה זאת.

מאחר שקמר רמון לא יצר רכס הבולט מעל סביבתו, לא נוצרו התנאים להתחתרות הנחלים בליבת הקמר וליצירת מכתש עד לאחר הרמת שדרת ההר והסחיפה של המעטה העבה של סלעי תצורת חצבה, שקברה את התבליט בנגב.

תהליך יצירת המכתש החל בעקבות הרמת שדרת ההר ויצירת הקימור הגדול שבמהלכן הוטא האזור הרמתי של הר הנגב לצפון-מזרח. הטיה זאת באה כיום לידי ביטוי בהשתפלות הרמה של הר הנגב הגבוה, מגובה של כ-1,000 מ' בהר חריף לכ-700 מ' בהר ארדון (איור 10).

עקב ההרמה התפתחה מערכת ניקוז חדשה, שזרמה מזרחה אל נחל פארן הקדום על גבי האגף המזרחי של הקימור הגדול. מדרום לקמר רמון וקמר בדד החל נחל פארן הקדום להתחתר ברמת נקרות, שהלכה והורמה – תהליך שיצר את קניון מישר-נקרות, שהוא הגדול בקניוני הארץ (איור 11).

מערכת הניקוז שהתפתחה על גבי הרמה הנטייה של הר הנגב הגבוה סחפה את הכיסוי של תצורת חצבה, חשפה את מישור הגידוע הקדום בראש קמר רמון והחלה להתחתר במהירות באבני החול הפריכות של הקרטיקון התחתון והיורה, שהיו חשופות על פני מישור הגידוע הקדום שהיה בראשו. שני גורמים הכתיבו את כיוון הזרימה של מערכת הניקוז: (א) ההטיה לצפון-מזרח של מישור הגידוע; (ב) היווצרות מבנה קימוט דמוי חצי כיפה ששיאו בהר גוונים (כיפת גוונים), זאת עקב תזוזה אופקית לאורך שבר רמון (השייך למערכת שביר הרוחב). הביטוי של מבנה זה בנוף הן הנטיות התלולות של סלעי תקופת הטריאס<sup>28</sup> בין עין סהרונים לשן רמון.

מערכת הניקוז שזרמה לצפון-מזרח עקפה מצפון-מערב ומצפון את כיפת גוונים וחצתה את האגף התלול של הקמר באזור עין סהרונים. גם נחל רמון וגם נחל ארדון חוצים את הקיר הדרום-מזרחי של המכתש דרך פרצות הנמצאות באזור שבו חוצה שבר רמון את האגף התלול של הקמר. הפרצות נמצאות ממול למפער של נחל מחמל בצדו הצפוני-מערבי של המכתש, וייתכן שהם עוקבים אחרי עמק מיוקני קדום שיצר נחל מחמל בקמר רמון.

במקביל להתחתרות המכתש בקמר רמון התפתח בבקעת ארדון (השלוחה הצפונית-מזרחית של מכתש רמון) מכתש קטן המנוקז על ידי נחל חולית. הגבול המורפולוגי שהפריד בין מכתש ארדון למכתש רמון הלך ונסחף ככל שנמשכה

28 תקופת הטריאס נמשכה בין 250 ל-200 מיליון שנה לפני זמננו.

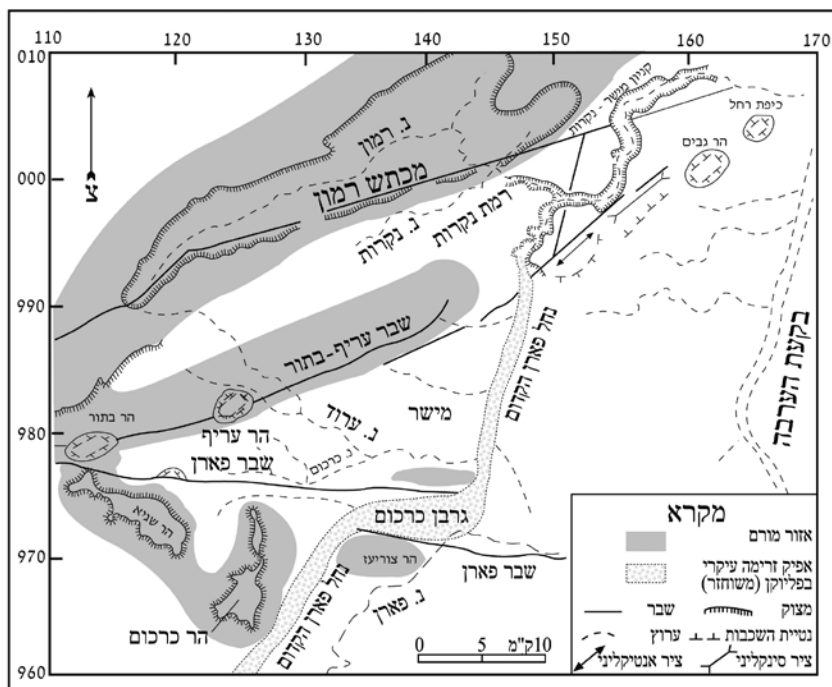
התפתחות שני העמקים, וכיום מפריד ביניהם רכס נמוך, המבדיל בין אגני הניקוז של נחל ארדון ונחל חולית (בן דוד, 1992).

נחל פארן הקדום, שזרם בקניון של מִישַׁר־נְקוּרוֹת, היה בסיס הניקוז של הנחלים שזרמו על פני הרמה הנטויה של הר הנגב הגבוה (איור 11). קצב התחתרותו ברמת נקרות הכתיב את הקצב של תהליכי יצירת הנוף באזור ואת שיעור התחתרות הנחלים המתנקזים אליו, כולל נחל רמון המנקז את מכתש רמון. חלוקי בזלת ממכתש רמון שנמצאו בתצורת ערבה במוצא של קניון נקרות לערבה הצפונית, מעידים על ההתפתחות הברוֹז־מִנִּית של מערכות הניקוז של נחל נקרות ונחל רמון.

השרידים הקדומים ביותר של קרקעית מכתש רמון נשמרו לאורך נחל רמון, בקרבת מוצאו מהמכתש. אלה הם מפלסי קונגלומרט המתנשאים כ־40 מ' מעל לקרקעית הנוכחית של המכתש. גם בקניון נחל נקרות נמצאו מפלסי חלוקים בגובה דומה מעל קרקעית הנחל, ועליהם חלוקי בזלת שמקורם במכתש רמון. נראה שמפלסים אלה מייצגים האטה בהתחתרות קניון מִישַׁר־נְקוּרוֹת, שגרמה להאטת התחתרות המכתש וליצירת שיווי משקל בין קצב ההתחתרות של נחל נקרות ונחל רמון. עם זאת נמשכה התרחבות המכתש על ידי תהליך של נסיגת מדרונות, זאת גם כאשר תהליך העמקתו הואט.

נראה ששלב ההעמקה העיקרי של המכתש התרחש כבר בפליוקן, וקרקעיתו התייצבה לראשונה כאשר הורבד חלקה העליון של תצורת ערבה. שלב הסחיפה הראשוני היה מהיר, ובמהלכו התרחשה התחתרות של כ־200–300 מ' מתחת למפלס הגידוע המיוקני המורם בראש הקמר. סדרות נמוכות יותר של מפלסי חלוקים, הפזורות במכתש רמון, מייצגות מספר שלבי התחתרות צעירים יותר, אך שיעור ההעמקה של המכתש בתקופת הפלייסטוקן לא עלה ככל הנראה על כ־40 מ'.

עקב הפעילות של שבר רמון, העובר לאורך השוליים הדרום־מזרחיים של המכתש, וכן מערכת שברים שכיוונה צפון־מערב, נשבר האגף התלול של הקמר ונוצרו מספר פרצות שבהן התפתחו ערוצים קטנים. ערוצים אלה הצליחו להתחתר לאחר אל תוך המכתש, כמו נחל גלד, המנקז שטח קטן בבקעת ארדון, ויובל קטן של נחל נקרות, המנקז את שולי שן רמון, אך רוב המכתש עדיין מנוקז על ידי נחל רמון.



איור 11: תוואי נחל פארן הקדום בזמן יצירת מכתש רמון בפליקן. קניון נקרות היווה את בסיס הניקוז של מכתש רמון, וקצב התחתרותו קבע את קצב העמקת המכתש

## סיכום: התנאים שהביאו להתפתחות מכתשים בנגב

הודות לנתונים הגאולוגיים והמורפולוגיים שנאספו מהנגב ניתן להגדיר את צירוף התנאים המיוחדים שאפשרו את התפתחות המכתשים בנגב:

**חתך גאולוגי המורכב מיחידה פריכה ומעליה יחידה קשה:** בנגב מהווה אבן החול של תצורת חתירה מגיל קרטיקון תחתון את היחידה הפריכה, וסלעי הגיר והדולומיט של חבורת יהודה מגיל קנומן-טורון את היחידה הקשה (איור 4). באקלים מדברי נסחפת אבן החול הפריכה במהירות מליבת הקמר, וכתוצאה מכך מתערערת היציבות של בסיס הצוקים הבנויים אבני גיר ודולומיט המקיפים את העמק ההולך ומתחתר. התמוטטות שולי הצוקים אל תוך המכתש מרחיבה

את שטח העמק אך יוצרת דרדרות לרגליהם (קולוביום<sup>29</sup>). מעטה הדרדרות מגן לזמן קצר על בסיס הצוק ומאט את תהליך הסחיפה של אבני החול. ואולם, לאחר שהדרדרות מתבלות ונסחפות, מתחדשת סחיפת אבני החול מבסיס הצוקים ומתחיל מחזור חדש של נסיגת מדרונות.

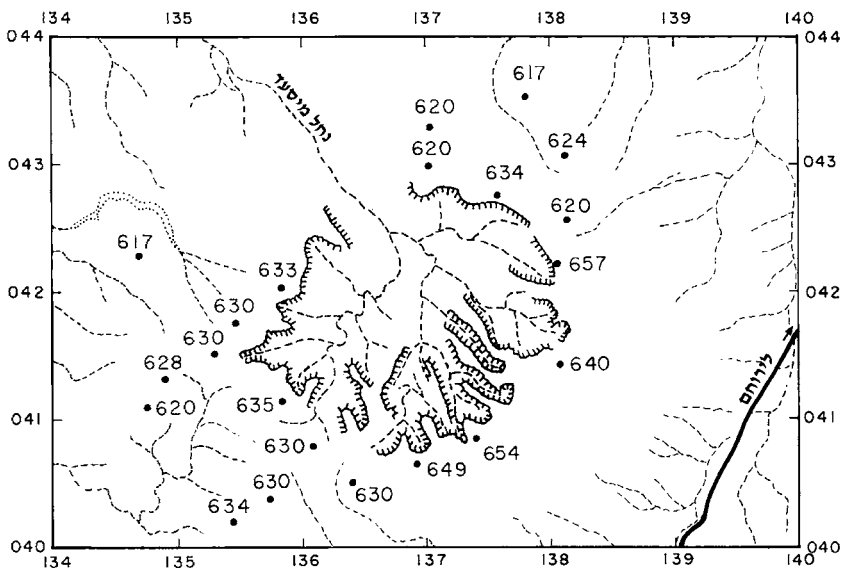
ההבדלים הגדולים בקצב ובאופי של הבליה והסחיפה של אבני החול והסלעים הקרבונוטיים הקשים הם ששומרים על קיומם של הצוקים התלולים המקיפים את המכתשים לכל אורך תקופת היווצרותם.

**תהליך קימוט:** יצר קמר שליבתו מורכבת מאבני חול פריכות וחלקו החיצוני מסלעים קשים. תהליך זה החל בנגב בסנון ונמשך לסירוגין לתוך הניאוגן. תהליך הקימוט גרם לכך שאבני החול הפריכות הורמו אל אזור שיא הקמר והיוו חלק מהרכס שבלט מעל בסיס הניקוז שבשוליו. הרמת אבני החול על ידי הקימוט אל מעל בסיס הניקוז יצרה את התנאים המאפשרים את סחיפתם מראש הקמר ויצירת עמק במרכזו.

את החשיבות של ממדי הקימוט ניתן לראות בקמר ירוחם, שם החלה להתפתח מערכת ניקוז הדומה לזו של מכתש חצרה על גבי מישור הגידוע שבראשו (מערכת ניקוז כזו מכונה 'דנטריטית', והיא דומה לעורקי עלה). ואולם, מאחר שהקמר קטן ואבני החול אינן נחשפות בעמקי הערוצים של מערכת הניקוז, התהליך אינו מתקדם לכדי יצירת מכתש (איור 12).

**היווצרות מישור גידוע בשיא הקמר:** תהליכי בליה וסחיפה של שיאי הקמרים החלו כאשר ראשיהם בצבצו כאיים על פני הים בתקופות הסנון והפאלאוקן (איור 2). בראשי הקמרים הגדולים (רמון וחתירה) נחשפו אבני החול של תצורת חתירה על פני מישור הגידוע. את מחשופי אבן החול הקיפו מחשופים של שכבות שבעיקרן הן שכבות קשות של גיר ודולומיט (ניתן להשוות את הגאומטריה שנוצרה לאבטיח 'על הסכין', שבו מוסר חלק מן הקליפה ונחשפת הליבה האדומה של הפרי, מוקפת בקליפה ירוקה). תהליך הגידוע של ראשי הקמרים התחדש במהלך האוליגוקן, כאשר ראשי הקמרים היוו חלק מהנוף המתון של הפנפליין שנוצר באזורנו. מישורי הגידוע הם שקבעו את המתאר הראשוני של העמקים שהתחתרו בראשי הקמרים.

29 קולוביום: סדימנט מדרוני. מורכב ממערכת דרדרות של תוצרי הבליה שמקורם בסלעים הבונים את המדרונות.



איור 12: מפלס הגידוע בראש קמר ירוחם – שימו לב לגובה הדומה של הפסגות – ומערכת הניקוז שהתפתחה על פניו

**התחתרות מפערים בראשי הקמרים:** המפערים נוצרו על ידי נחלים שזרמו מדרום-מזרח לצפון-מערב על פני הנוף האוליגוקני המתון והתחתרו בקמרים שהורמו בתחילת המיוקן. בשלב פתיחת המכתשים אפשרו מפערים אלה, שיצרו עמקים בסלעי חבורת יהודה הקשים, להשיג יתרון לנחלים שזרמו בהם מזרחה. נחלים אלה התחתרו במהירות בעמקים הקדומים שהוטו למזרח, סחפו את המילוי של תצורת חצבה שהיה בהם והשתלטו בתהליכי 'שביית נחלים' על מערכת הניקוז של המכתש. קיומם של מפערים אלה היא כנראה הסיבה לכך שהמכתשים מנוקזים על ידי נחל אחד בלבד.

**התפתחות הבקע והרמת שדרת ההר:** התפתחות הבקע במיוקן המאוחר ניתקה את הנחלים בנגב מראש אגן ההיקוות בחצי האי ערב. במקביל להשתפלות הבקע הורמה שדרת ההר ממערב לו ונוצר מבנה קימור רחב. החלה להתפתח מערכת נחלים חדשה שניקזה את מזרח הנגב וחלקים ממרכזו אל הבקע, כשחלקם זורם בעמקים של הנחלים הקדומים ששיפועם התהפך למזרח. על האגף המערבי של שדרת ההר התפתחה מערכת ניקוז שזרמה לים התיכון, כשחלק מהנחלים זורמים



בעמקים שנוצרו על ידי קודמיהם המיוקניים. פרשת מים חדשה הפרידה מעתה בין הנחלים היורדים לים המלח לבין הנחלים היורדים לים התיכון – זו פרשת המים הארצית.

הקמרים רמון, חתירה וחצרה 'מצאו את עצמם' על האגף המזרחי של הקימור הרחב. כתוצאה מתהליך זה הוטו קמרי חתירה וחצרה למזרח וקמר רמון הוטח לצפון-מזרח. לעומת זאת, מערכת הניקוז של מישור הגידוע בראש קמר ירוחם, הנמצאת על האגף המערבי של הקימור הרחב, מתנקזת מערבה.

כתוצאה מהטיה זאת התנתק נחל חתירה הקדום מנחל באר שבע שזרם לים התיכון והישיר את מהלכו מזרחה, לבסיס הניקוז שבקער צין, תוך חציית קמר חצרה. גם נחל חצרה החל לזרום אל בקעת צין והתנקז אל נחל צין היורד לים המלח. מערכת הניקוז של נחל רמון הזורמת לצפון מזרח משקפת את מגמת הנטייה של רמת הר הנגב.

תהליכי ההרמה והקימור יצרו את התנאים שהביאו להתפתחות מערכות הניקוז, שהחלו ביצירת המכתשים והכתיבו את כיווני הניקוז שלהן.

**היווצרות בסיס סחיפה בסמוך לקמר:** על מנת שעמק ייווצר במרכזו של קמר עליו להיות גבוה מבסיס ניקוז סמוך, שאליו ישאו הנחלים את הסחף מליבתו. לכן, אף על פי שבסיס הניקוז הסופי של מכתשי הנגב הוא בקע ים המלח, שהלך והשתפל מאז המיוקן המאוחר, מידת התחתרותם נקבעה בתחילה על ידי הבדלי הגובה שבין מישורי הגידוע בשיאי הקמרים לבין עומקי קערים הסמוכים להם מדרום-מזרח. בהמשך התפתחותם היה קצב התעמקותם תלוי במידת ההתחתרות של הנחלים המנקזים אותם ברצף הסלעים שבנה את הקערים הסמוכים.

בקמר חתירה נוצר בסיס ניקוז מתאים במישור ימין כבר במיוקן המוקדם ולכן נוצר בו מכתש ראשוני. יתר המכתשים, כולל מכתש חתירה הצעיר, נוצרו כאמור לאחר ההרמה של שדרת ההר ויצירת הקימור הרחב.

במכתש חתירה נקבע קצב ההעמקה על ידי מידת ההתחתרות של נחל חתירה בחתך הסלעים בקער אורון. מידת העמקתו של המכתש מאז חשיפתו מחדש היא כ-70 מ' בלבד, מאחר שהתחתרות נחל חתירה נעצרה על גג סלעי חבורת יהודה מעל המפל של עין יורקעם. כאשר המפל יתחתר לאחור עד למחשופי תצורת חתירה בשולי המכתש, יחל בו מחזור חדש של תהליך התחתרות מהירה.

במכתש חצרה יצר חידוש הקימוט, שהתרחש ככל הנראה לאחר המיוקן, מדרגה מורפולוגית מעל קער צין, שאפשרה התחתרות מהירה של המכתש. לאחר שלב הפתיחה הראשוני נקבע קצב ההעמקה של המכתש על ידי התחתרות נחל חצרה בחתך שבקער צין, מדרום-מזרח למוצא המכתש. כיום נעצרה התחתרות הנחל על גג סלעי חבורת יהודה, באזור המפל הסמוך למפגש עם נחל צין. גורם נוסף שהכתיב את קצב התחתרות המכתש בשלבי הצעירים הוא מחסום של שכבת סלע גירי עבה במוצא נחל חצרה מהמכתש. שכבה זאת, השייכת לתצורת שבטה מגיל טורון, נטויה בתלילות לדרום-מזרח כחלק מהאגף הדרום-מזרחי של הקמר, והיא יוצרת סכר במוצא המכתש, שעליו ניתן לראות מספר מדרגות גידוע המייצגות את שלבי ההתחתרות של נחל חצרה במחסום.

במכתש רמון נקבע קצב ההעמקה הראשוני על ידי התחתרות קניון מישר-נקרות, שאליו מתנקז נחל רמון (איור 11). תהליך התחתרותו של הקניון היה מהיר בפליוקן, כאשר נחל פארן הקדום, שניקז את כל הנגב הדרומי, מזרח סיני וחלקים מעבר הירדן, זרם דרכו לערבה הצפונית. אגן הניקוז הגדול שהיה אז לנחל פארן אפשר העמקה מהירה של הקניון ובעקבותיו של המכתש. לאחר שנחל פארן הצעיר שינה את תוואי זרימתו למזרח בתחילת הפלייסטוקן<sup>30</sup> ונטש את הקניון, הוא קצב התחתרותו (כ-40 מ' בלבד במהלך הפלייסטוקן) וכך גם קצב התחתרותו של המכתש.

מכתש הלאל מתנקז לנחל אל-עריש ולכן ניתן לשער שההיסטוריה שלו קשורה להתפתחות מערכת הניקוז של נחל אל-עריש במרכז וצפון סיני.

**השפעת מבנה הקמר על מיקום מוצא המכתש:** בקמר לא סימטרי יש יתרון רב לנחלים המתחתרים על פני האגף התלול לעומת האגף המתון. באגף התלול על הנחל לחצות מחסום של סלעים קשים (סלעי חבורת יהודה) שרוחבו כמה מאות מטרים בלבד ומשני עבריו סלעים רכים – אבני חול של תצורת חתירה בליבת הקמר, וסלעים של קרטון וחואר של חבורת הר הצופים ועבדת בשוליו. מחסום זה הולך ונעשה צר ככל שהנטיות תלולות יותר, וחוזקו המכני נחלש ככל שהוא סדוק יותר. לעומת זאת על גבי האגף המתון של הקמר יורמו הנחלים לכל אורכם על גבי השכבות הקשות, הנטויות במתינות לצפון-מערב, של חבורת יהודה ולכן ההתחתרות תהיה אטית. לכן סביר להניח כי בקמר לא סימטרי שלא עבר הטיה

30 תקופת הפלייסטוקן – נמשכה בין 1.8 מיליון שנה ועד 10,000 שנה (תקופת ההולוקן) לפני זמננו.

יהיה יתרון לנחל הזורם דרך המפער שהתחתר באגף התלול על זה שזורם על גבי המפער באגף המתון, וייתכן שזה המצב במכתש הלאל בסיני. ניתן אם כן לראות במכתשים תוצר סופי של סדרת תהליכים גאולוגיים ומורפולוגיים שהחלו עוד בקרטיקון התחתון, עם הרבדת אבני החול של תצורת חתירה, והגיעו להבשלה עם יצירת בקע ים המלח והרמת שדרת ההר בסוף המיוקן.

### רשימת מקורות וקריאה נוספת

בן דוד, ר'. 1992. הגאולוגיה של אזור בארות עודד ומערב מכתש רמון ושלבים בהתפתחות הנוף מסוף המיוקן ועד להווה. עבודת גמר, אוניברסיטת בן גוריון, באר שבע.

Ben David, R., Eyal, Y., Zilberman, E. & Bowman, D. 2002. 'Fluvial Systems Response to Rift Margin Tectonics: Makhtesh Ramon, Southern Israel', *Geomorphology* 45(1-2): 147-163.

Picard, L. 1951. 'Geomorphology of Israel' Part 1: The Negev: Bull. Res. Council, Israel, 8G: 1-30.

Zilberman, E., Baer, G., Avni, Y. & Feigin, D. 1996. 'Pliocene Fluvial Systems and Tectonics in the Central Negev, southern Israel', *Israel Journal of Earth Science* 45: 113-126.