



מכתשים בארץ ובעולם: עיון מחודש בתופעה נדירה אך מגוונת

י' פינצי*, א' רבקין

מרכז מדע ים המלח והערבה, שלוחת מצפה רמון

* פרטי התקשרות: yaron.finzi@adssc.org 6683430 55 972+

ת ק צ י ר

מכתש, אותה תופעת טבע ייחודית של עמק מוקף מצוקים גבוהים בראש קמר א-סימטרי, הוגדר על פי מאפייני מכתשי הנגב (מכתש רמון, המכתש הגדול והמכתש הקטן) בהתאם לידע המדעי שרווח בשנות הארבעים והחמישים של המאה ה-20. במאמר הנוכחי נסקרים כמה מכתשים ומבנים דמויי מכתש בארץ ובעולם במטרה לבחון מחדש את ההגדרה הזו. המכתשים והמבנים השונים שנבחנו הם אלה: (1) מכתשים, שבדומה למכתשים הגדולים בנגב, נוצרו לאורך הקשת הסורית (מכתשי עריף, עריף א-נאקה, ג'בל מע'רה, ג'בל הלאל, צוילה); (2) מבנים בארץ שעצם הגדרתם כמכתש מוטלת בספק, וחלקם אינם שייכים למבנה הקשת הסורית (קמר ירוחם, כיפת עשת, בקעת צחיחה); ו-(3) מבנים מכתשיים בעולם (תאילנד, קולורדו, אנגליה). בסקירת המבנים נתייחס לסטרטיגרפיה ולמנגנון ההיווצרות, כאשר המורפולוגיה המכתשית מומחשת על ידי חתכי אורך ורוחב. מקצת מהמכתשים מתוארים גם באמצעות חתך רוחב גיאולוגי סכמתי, שמציג את הקשר בין המורפולוגיה לבין הליתולוגיה. כל מבנה נבחן על פי קווי הדמיון והשוני שלו למאפייני מכתשי הנגב הגדולים. סקירת המכתשים מראה כי הרבגוניות של מאפייני המכתשים חורגת הרבה מעבר למוכר ממכתשי הנגב ולמאפיינים שעמדו לנגד עיני החוקרים בעת שהגדירו את המכתשים ואת התנאים להיווצרותם. על כן עולה הצורך להרחיב את הגדרת המכתשים ולחדד את התנאים ההכרחיים להיווצרותם. את המאמר חותמת הצעת הגדרה מחודשת המתייחסת למכתשים בארץ ובעולם.

מילות מפתח:

מכתש

ארץ המכתשים

הקשת הסורית

כיפת עשת

מכתש ירוחם

מכתשי סיני

מכתשי תאילנד

מכתש סינבאד בקולורדו ארה"ב

The erosional crater (makhtesh): A rare but diverse phenomenon¹

Y. Finzi*, I. Ryvkin

Dead Sea and Arava Science Center, Mitzpe Ramon Branch

* Corresponding author: yaron.finzi@adssc.org +972 55 6683430

ABSTRACT

Keywords:

Makhtesh

Erosion crater

Breached anticline

The Syrian Arc

Makhtesh Yeruham

Sinai craters

Thailand craters

Sinbad Valley Colorado

The erosional crater (makhtesh) is a unique natural phenomenon in which a valley surrounded by cliffs forms at the crest of an anticline. The term makhtesh was introduced in the mid-20th century and was developed since then primarily based on the characteristics of the three largest erosional craters of the Negev desert in Israel. In this article, we review craters and crater-like structures in Israel and around the world in order to challenge the existing definition. We show that the diversity and richness of the characteristics of erosional craters extend far beyond those observed in the Negev, and therefore we propose that the definition of the term 'makhtesh' should be revised and updated.

An extended abstract in English is available here: .1

http://www.adssc.org/sites/default/files/Finzi_Y_and_I.Ryvkin2016The_erosional_crater.pdf

סקירת המכתשים השונים והשוואתם למכתשי הנגב היא עדות לקושי שמעוררת ההגדרה המקובלת לתופעת המכתש ולכך שחלק מהתנאים הנחשבים כיום הכרחיים ליצירת מכתשים הם תנאים מאפשרים בלבד ולא הכרחיים.



איור 1: מכתשי הנגב. אב-טיפוס להגדרת תהליכי היווצרות מכתשים ולהבנתם

2. מכתשי הנגב: אב-טיפוס להגדרת תהליכי היווצרות מכתשים ולהבנתם

למכתשי הנגב יש כמה מאפיינים גיאולוגיים ומורפולוגיים ייחודיים: (1) הם ממוקמים בציר אנטיקלינה, היוצרת רכס בולט בפני השטח, (2) האנטיקלינות הן א-סימטריות, ובעלות אגף דרומי-מזרחי תלול (60° – 90°) ואגף צפוני-מערבי מתון יותר (6° – 15°), (3) המצוקים שמקיפים את המכתשים בנויים מסלע קשה (גיר ודולומיט מתקופת הקרטיקון העליון), ותחתיו אבן חול רכה מתקופת הקרטיקון התחתון, ו-(4) כל מכתש מנוקז על ידי מערכת ניקוז ראשית אחת בלבד עם מוצא יחיד דרך מפער באגף הדרומי-מזרחי (זילברמן, 2009).

חוקרים גיבשו תאוריות שונות להיווצרותם של מכתשי הנגב. המודל הראשון הוצע על ידי פיקארד (Picard, 1951), והוא דומה למודל העמקים הפרוצים (breached valleys) בהרי היורא של פון אנגלן (Von Engeln, 1942). במודל של פיקארד שלושה שלבים: חשיפה של קמט א-סימטרי כרכס טופוגרפי; התחתרות נחלים באגף התלול של האנטיקלינה ויצירת מעוק (נקיק צר ועמוק) שחושף את אבן החול הפריכה; ובליה מהירה של אבן החול והתמוטטות המצוק מעליה יוצרים עמק עמוק לאורך ציר הקמט, ובתהליך מקביל שאר הנחלים על הרכס נשבים על ידי העמק המתפתח.

ניר (Nir, 1958) הציע שגידוע שיא הקמר באמצעות ארוזיה קדם להתחתרות, והניח שהגאומטריה של חשיפת אבן החול במרכז מישור הגידוע קבעה את גבולות העמק המתפתח. ערן (Eran, 1982) הציע כי באנטיקלינות חצרה והתירה החלה התחתרות הנחל לאחר אירוע טקטוני

1. מהו מכתש ומהם סוגי המכתשים העיקריים?

בנגב ובצפון סיני ניתן למצוא בראשי הקמרים העיקריים תופעת טבע ייחודית: עמק מוקף מצוקים גבוהים. עמקים ייחודיים אלו נחקרו כבר בשנות הארבעים והחמישים (Amiran, 1951; Picard, 1951) של המאה ה-20, והוגדרו כמכתשים בשל הדמיון החזותי בינם לבין המכתש, הוא הכלי המשמש לכתישת תבלינים ומוזכר במקרא. המונח העברי מכתש (makhtesh) התקבל על ידי הקהילה המדעית העולמית (Ben-David et al., 2002) כמייצג מכתשים שאינם תוצרים של פגיעת מטאור או של קריסת הר געש, אלא כאלה שנוצרו בתהליך סחיפה של שכבות סלע רכות במרכז המכתש, הנסחפות מהר יותר משכבות הסלע המקיפות את העמק.

לפני הטבעת המונח מכתש תוארו תופעות דמויות מכתש במגוון מונחים כגון steephead (blind) valley – עמקים התחומים משלושה כיוונים, שבראשם נביעה ובסיסים שכבה לא חדירה למים; erosional cirque, corrie – עמקים דמויי אמפיטאטרון, שנוצרו מפעולת קרחונים; box canyons – קניוני נחל קצרים עם מצוקים תלולים בראשם ובאגפיהם; ו-breached valleys – עמקים בראשי קמרים (Von Engeln, 1942). הגדרת המכתש ייחודית בכך שהיא מייחסת חשיבות לשלבי היווצרות העמק, החל מהקימוט הא-סימטרי וגידוע ראשי הרכסים, וכלה בבליה ובניקוז הסחף מהמכתש על ידי נחל שפורץ דרך מפער בין מצוקי המכתש (זילברמן, 2009). הגדרת התופעה נגזרה בעיקר ממחקרים על שלושת מכתשי הנגב הראשיים: מכתש חצרה (המכתש הקטן), מכתש חתירה (המכתש הגדול) ומכתש רמון, שהם מוקד עניין למטיילים ולמדענים מהארץ ומהעולם (איור 1).

למרות קיומה של הגדרה מפורטת לתופעה, המכתשים נקראים כיום בפי ציבור הגיאולוגים, הגאוגרפים, המחנכים והתיירים במונחים שונים, למשל: מכתשי בליה, מכתשי סחיפה ומכתשי שחיקה. יתר על כן, מבנים דמויי מכתש שעדיין לא קיבלו הכרה ולא נחקרו דיים, נקראים בשפת העם מכתשים עובריים (ראו סעיף 3). חוסר הבהירות לגבי הגדרת המכתש נובע מהעובדה שכמה ממאפייני המכתש מתקיימים באופן חלקי בלבד במכתשי הנגב: במכתש רמון הנחלים מנקזים חומרי סחף מן המכתש החוצה; כמה מקטעים מהמצוק הדרומי נסחפו ויצרו מפעים (זילברמן, 2009); ובשלושת המכתשים יש נחלים קצרים שמתנקזים לתוך המכתש (זילברמן, 2009).

מאפייני מכתשי הנגב ודרך היווצרותם הביאו לניסוח הגדרה צרה של המונח מכתש ולהתקבעות הנחות יסוד אחדות בנוגע לתנאים ההכרחיים להיווצרות מכתשים. ההגדרה הקיימת למכתש מתעלמת מהאפשרות של היווצרות מכתש על ידי מנגנון סחיפתי שונה, ולכן היא כוללת תנאים מאפשרים, שנחשבו עד היום תנאים הכרחיים. דוגמאות לתנאים אלה הן היווצרות המכתש בציר הרכס, א-סימטריה של הרכס שבו נמצא המכתש, גידוע מרחבי כשלב הכרחי בחשיפת שכבת אבן חול רכה בלב המכתש, ניקוז על ידי נחל יחיד שמתחת באגף התלול של הרכס ועוד.

במאמר זה יוצגו מגוון מכתשים מהידועים בארץ ובעולם, ובתוכם גם מכתשים ומבנים דמויי מכתש בישראל שאינם מוכרים לקהל הרחב או שלא הוגדרו כמכתש על ידי מחקר גיאולוגי (איור 1).

הייחודית של כל מכתש, כולל לדוגמה התפתחותו של מכתש קטן וקדום בחלקה המערבי של אנטיקלינת מחמל (מכתש רמון) בתקופת הסנטון-מאסטרית (אבני, 1990).³ מכתש קדום זה נוצר בתהליך התפתחות דומה לתהליך המתואר, אם כי ללא הגידוע האוליגוקני ולפני הטיית הנגב מזרחה. מכך עולה כי קיימות אפשרויות שונות לתהליך היווצרות מכתש. כתוצאה מההתמקדות במכתשי הנגב יש בארץ מחנכים, תיירנים ואף מדענים הסבורים שמכתשים יש רק בנגב ובסיני, וכי רק באזורים אלה מתקיימים תנאים מתאימים ליצירת מכתש. בסעיפים הבאים יסקרו כמה מכתשים ומבנים דמויי מכתש ממקומות שונים בעולם בתקווה שישמשו בסיס לדיון מחודש בהגדרה המקובלת של תופעת המכתשים ובתנאים ההכרחיים להיווצרותם.

3. מכתשים נוספים ומבנים דמויי מכתש בארץ ובעולם

בסעיף זה נתמקד במכתשים מובהקים בצורתם, אך בעלי מאפיין אחד לפחות שנבדל ממאפייני מכתשי הנגב העיקריים. עוד נעסוק במבנים דמויי מכתש, שעצם הגדרתם כמכתש מוטלת בספק. סקירת המכתשים הראתה כי הרבגוניות והעושר של מאפייני תופעת המכתש חורגים הרבה מעבר למוכר ממכתשי הנגב ומהמאפיינים שעמדו לנגד עיני החוקרים בעת שהגדירו את המכתשים ואת התנאים להיווצרותם.

3.1 מכתשים בקשת הסורית (נגב, סיני וירדן)

נוסף לשלושת מכתשי הנגב הפופולריים, יש עוד שבעה מכתשים ומבנים דמויי מכתש ברכסי הקשת הסורית, ובהם יעסוק סעיף זה של המאמר (איור 1).

מכתשי עריף, ישראל

תיאור כללי. הר עריף נמצא בדרום ישראל. בהר שנוצר על העתק עריף-בתור (אחד משברי הרוחב), יש זוג מכתשים, צפוני-מזרחי ודרומי-מערבי, ומפריד ביניהם אוכף מורפולוגי (זק ונבו, 1955). שני מכתשי עריף מתאפיינים בצורת קערה נטויה (אמפיאטרון) עם מדרונות הגולשים ממצוקי המכתש פנימה וללא בסיס מישורי במרכז המכתש.

המכתש הצפוני-מזרחי (איור 2) ($N34^{\circ}43' E30^{\circ}25'$) הוא עמק עגלגל, שמידותיו 0.4×1 ק"מ, גובה המצוקים הוא כ-120 מטרים מעל לבסיס המכתש ומדרונותיו תלולים למדי, מכוסים דרדרת (טלוס) ומעוטי מחשופים. למכתש מוצא יחיד בגובה 680 מטרים מעל פני הים, ובמרכזו גוף מגמתי כהה (זק ונבו, 1955). המכתש הדרומי-מערבי (איור 2) ($N34^{\circ}44' E30^{\circ}25'$) הוא עמק מוארך, מידותיו 0.6×2.5 ק"מ, והמצוקים מתנוססים לגובה של כ-100 מטרים מעל לבסיסו. המצוק המקיף את המכתש לאורך הצלע המזרחית גבוה, אולם בצלע המערבית הוא נמוך יחסית עקב העתקים החוצים אותה. בתוך המכתש מתגלים מחשופי בזלת, אבני חול ודולומיט. למכתש מוצא יחיד שמתנקז בגובה 680 מטרים (זק ונבו, 1955).

שהיטה את מישור הגידוע. זילברמן (Zilberman, 2000), בהסתמכו על עדויות לכך שיש ערוצי נחל באנטיקלינות הנגב שאינם חודרים את השכבות הקרבונטיות הקשות, העלה את האפשרות שהתפתחות מערכת הנחלים המיוקנית הייתה תנאי מקדים להיווצרות המכתשים בנגב. ואכן, כשמבינים את ההיסטוריה הגיאולוגית המקומית של המכתשים הקטן והגדול רואים כי כאשר הנחלים המיוקניים הפונים לצפון-מערב שינו את כיוון זרימתם לדרום-מזרח, הם כבר היו חתורים בתוך האנטיקלינה, ולכן הפכו במהרה לניקוז העיקרי של העמקים המתפתחים.

בהתבסס על מחקרים אלו ניתן כיום לתאר את התנאים העיקריים שהביאו להתפתחות מכתשי הנגב. להלן תיאור מתומצת של השלבים העיקריים בהתפתחות מכתשי הנגב, בהתבסס על מאמרו של זילברמן (2009).

1. **השקעת שכבת סלע קשה מעל סלע רך.** הרבדת אבני חול רכות בקריטיקון התחתון ומעליהן סלע גירני קשה של חבורת יהודה מגיל קנומן-טורון.
2. **קימוט ויצירת קמר עם ליבת סלע רך ושכבה עליונה קשה.** במהלך תקופת הסנון (לפני 70–85 מיליון שנים) בשל מאמצי לחיצה טקטוניים התפתחה הקשת הסורית (סדרת קמרים מאורכים), הכוללת בין היתר גם את רכסי הנגב.
3. **גידוע ראש הקמר על ידי נחלים וחשיפת אבן החול הרכה.** במהלך האוליגוקן, בעקבות הרמה של צפון-מזרח יבשת אפריקה ועָרָב וחשיפה של האזור לבליה נרחבת, עבר המזרח התיכון כולו גידוע. כתוצאה נחשפו אבני החול מתקופת הקרטיקון ומסביבו מחשופים של גיר ודולומיט קשים מתקופת הקנומן. מישורי הגידוע הכתיבו את המתאר הראשוני של העמקים שיתחתרו בראשי הקמרים.
4. **יצירת מפערים בראשי הקמרים.** בתקופת המיוקן התרחשה הרבדה נרחבת של חול וחלוקים (תצורת חצבה) על גבי הקמרים הגדועים. נחלים שזרמו מדרום-מזרח לצפון-מערב התחתרו בקמרים הקבורים, יצרו מפערים באגפי הרכס וחשפו מחדש את אבני החול שבליבת הרכסים.
5. **התפתחות בקע ים המלח בתקופת המיוקן המאוחר.** התפתחות השקע המורפולוגי לאורך הערבה והטיית הנגב מזרחה שינו את מערכת הניקוז האזורית, ולכן נחלי מזרח הנגב ומרכזו החלו להתנקז אל הערבה תוך היפוך כיוון הזרימה בעמקי הנחלים המיוקניים. בסיס סחיפה נמוך ושיפוע גדול בין מישור הגידוע בשיאי הקמרים לעמקי הקערות הסמוכים מדרום-מזרח אפשרו סחיפה של אבני החול מתוך ליבת הקמרים דרך המפערים. בליה וסחיפה של שכבת החול מליבת הקמר הותירו מצוקי סלע מסביב לעמק החולי, ובכך יצרו את המכתש. האקלים הצחיח בנגב גורם לקצב בליית המצוקים להיות אטית יחסית, ועל כן נחשב לגורם מסייע בשימור מורפולוגיית המכתש.

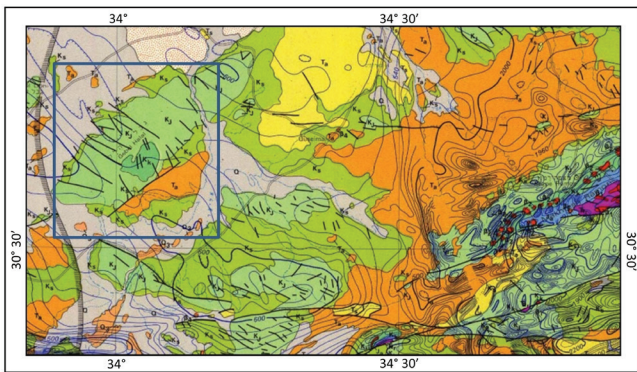
שלבי ההתפתחות שתוארו לעיל תקפים לגבי שלושת מכתשי הנגב המפורסמים, והם השלבים העיקריים בהיסטוריה הגיאולוגית של האזור כולו.² עם זאת כיום ידועים פרטים נוספים על ההתפתחות

3. קובץ נלווה 2: שלבי התפתחות מכתש רמון
http://www.adssc.org/sites/default/files/Finzi_Y8.pdf

2. קובץ נלווה 1: ארבעה שלבי התפתחות מכתש
http://www.adssc.org/sites/default/files/Finzi_Y4.pdf

מכתש בג'בל הלאל, סיני, מצרים

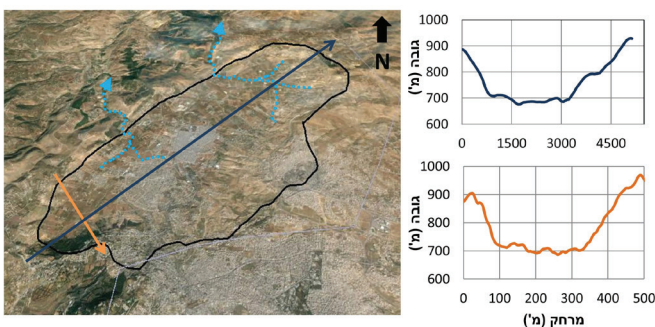
המכתש בג'בל הלאל ($N34^{\circ}03' E30^{\circ}37'$) (איור 1) הוא חלק מהקשת הסורית ודומה בממדיו למכתש חצרה (הקטן). את התפתחות המכתש ניתן לייחס לפעילות טקטונית של העתק העובר בשוליו הדרומיים של הקמר (זילברמן, 2009). המבנה שנוצר הוא בעל צורה מעגלית בקירוב, ומצוקיו מתנשאים לגובה 200 מטרים מעל למוצא המכתש, שגובהו 300 מטרים מעל פני הים. היחידות העתיקות ביותר שנחשפו במרכז המבנה הן מחבורת כורנוב המורכבת מסלעי חול, חוואר וגיר מגיל קרטיקון תחתון (Bentor et al., 1980) (איור 5).



איור 5: מפה גיאולוגית של סיני. מיקומו של מכתש ג'בל הלאל מסומן בריבוע ואפשר לראות כי אגפו הדרומי של הקמר נחצה על ידי העתק סעד נפחא. מתוך מפה גיאולוגית של סיני (Bentor et al., 1980)

מכתש צוילח, ירדן

זהו מכתש אשר אין עליו מידע רב ($N32^{\circ}02' E35^{\circ}48'$) (איור 1). גם הוא נוצר בתוך קמר שהוא חלק מהקשת הסורית (איור 1). גודלו של המכתש 13×5 ק"מ, הוא נמצא בחלקה הצפוני של עמאן באזור מיושב ומעובד, ולכן עיצוב פני השטח בו מושפע מאוד מהתערבות האדם (איור 6). קירות המכתש מורכבים מגיר מתקופת הקרטיקון העליון, והם נישאים לגובה של כ-250–300 מטרים מעל בסיסו (Sneh and Rosensaft, 2014). במרכז המכתש נחשפות שכבות אבן חול מתקופת הקרטיקון התחתון, ונראה כי ניקוזה נעשה על ידי שני נחלים מקבילים, הזורמים לכיוון צפון-מערב ולבקעת הירדן (איור 6).

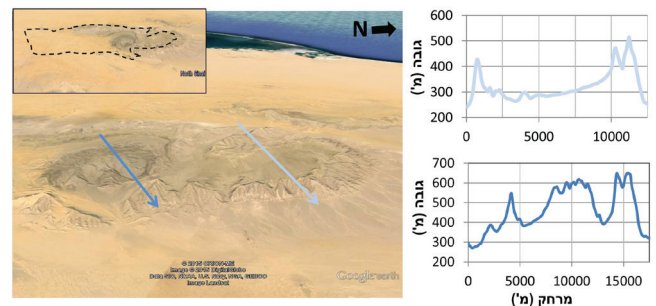


איור 6: מכתש צוילח בעמאן, ירדן. בתרשימים מוצגים חתך אורך (עליון) וחתך רוחב (תחתון), המראים כי לעמק מורפולוגיה של מכתש, וקירותיו מתנשאים לגובה 200–300 מטרים מעל הבסיס. בתמונת המכתש קו המתאר (שחור) מראה את תוואי מצוקי המכתש, קווי תכלת מנוקדים מראים את תוואי הנחלים המנקזים אותו

אחרי הגידוע האוליגוקני המשיך המכתש להתפתח עם ניקוז דרומה. קימוט פוסט-איאוקני תרם למבנה הא-סימטרי המוכר לנו כיום, ובניאוגן המאוחר הובילה הרמה ריגולית לסחיפה חזקה. פעילות של העתקים באגף הדרומי תרמה להסטה אופקית ימנית של 600 מטרים לאורך ההעתק (Bartov et al., 1980). בשל הפעילות על העתק פארן, האגף הדרומי שבור וחלקו מנוקז דרומה, בעוד רוב המכתש כיום מנוקז לכיוון צפון-מערב, בשונה ממכתשי הנגב, אשר מתנקזים למזרח.

מכתש ג'בל מע'רה, סיני, מצרים

תיאור כללי. מיקומו של ההר בצפון-מרכז סיני ($N30^{\circ}39' E33^{\circ}29'$). ההר הוא אנטיקלינה א-סימטרית, ששטחה 1,200 קמ"ר, והיא שייכת לקימוטי הקשת הסורית (איור 1). המערך הסטרוקטורלי מורכב משני צירי רכס, אחד בכיוון צפון-מזרח והאחר בכיוון צפון-צפון-מערב. נוסף על כך, חלקו העליון של ההר נחצה על ידי העתקים נורמליים והפוכים (גולדנברג וראב, 1987). מאפייני המבנה משווים לו מראה דמוי מכתש עם מאפיינים של מצוקים ובקעה, אך ללא עמק מוקף מצוקים. **סטריגרפיה.** מוקד התיאור שלהלן הוא הרכס שכיוונו צפון-מזרח-דרום-מערב, ובו שני מבני מכתשים (איור 4). במרכז המכתש נחשפות שכבות מתקופת היורה: תצורת אנמר, המורכבת משלושה פרטים: אנמר תחתון בנוי מאבני חול, קרן עשוי אבן גיר ופצלים ואנמר עליון בנוי אבני חול ופצלים. קירות המכתש בנויים מסלעי תצורת דיה, המורכבת מסלעי גיר, גיר חרסיתי וחוואר (מקבילה לתצורת מחמל ששקעה בהר הנגב) (שפרן ומזור, 1987). מעליה היא תצורת שריף, העשויה מחילופי פצלים ואבני גיר עם אופקי חול ופחם (גולדנברג וראב, 1987) וחרסית בחלקה העליון (שפרן ומזור, 1987), מעליה נמצאים הסלעים הקרבונטיים של תצורת זוהר (גולדנברג וראב, 1987).



איור 4: מכתש בג'בל מע'רה, סיני, מצרים. בתרשימים מוצגים חתך רוחב צפוני (עליון) וחתך רוחב דרומי (תחתון). גודל העמק באנטיקלינה הוא 20×60 ק"מ, ועומקו המרבי כ-200 מטרים. בחתך הדרומי אפשר לראות שבמרכזו של המבנה יש מעין הר, המורכב מסלעים קשים. במסגרת – קו מתאר מקווקו המסמן את המבנה הכללי של המכתש, שחלקו הדרומי קבור תחת דיונות חול

מנגנון ההיווצרות. מנגנון היווצרותו של המכתש בג'בל מע'רה

דומה למנגנון ההתפתחות של המכתשים בנגב (גולדנברג וראב, 1987), אך לא נמצא בספרות פירוט רב על שלבי היווצרותו. מאפיין משותף למכתש בג'בל מע'רה ולמכתש רמון הוא מבנה מוגבה הנמצא בתוך המכתש. המבנה דמוי הר, מורכב מסלעי יורה קשים, אשר קצב סחיפתם אטי יותר, בדומה להר גוונים, המורכב מסלעים קשים מגיל טריאס ונמצא בתוך מכתש רמון.

3.2 מבנים דמויי מכתש

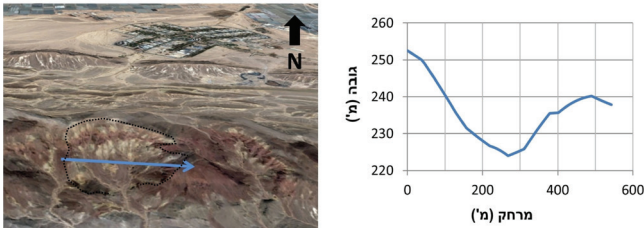
בארץ נמצאים כמה מבנים בעלי מאפיינים דומים למכתשי הנגב המוכרים. ניתוח המאפיינים של שלושה מבנים מתוכם מאפשר לדון בהגדרה מחודשת ומכלילה לתופעת המכתש.

בקעה ארוזיבית ברכס ירוחם, ישראל

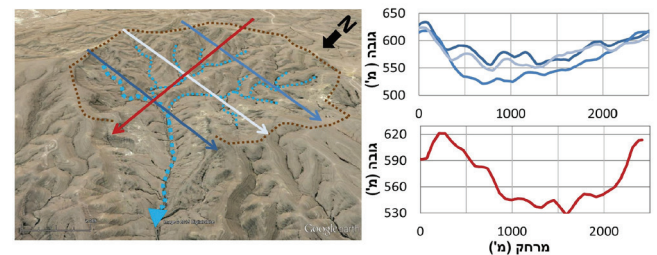
תיאור כללי. סמוך לכביש ירוחם-שדה בוקר ($N34^{\circ}51' E30^{\circ}57'$) (איור 1), בראש קמר ירוחם (השייך למבני הקשת הסורית), נמצאת בקעה ארוזיבית שגודלה 5.1x3.1 ק"מ, והיא מוקפת בשני קווי מצוק לא רצופים הנישאים לגובה שנע ממטרים אחדים עד עשרות מטרים. לבקעה מערכת ניקוז (נחל מסעד) המנוקזת דרך מפער אחד, משם היא זורמת לנחל מסעד ולים התיכון (איור 7).

בקעה ארוזיבית בכיפת עשת, ישראל

סמוך למושב פארן בערבה נמצאת כיפת עשת ($N30^{\circ}20' E35^{\circ}09'$) (איור 1), מבנה קמרוני קטן בקצה המזרחי של השיא הסטרוקטורלי של רכס מנוחה. העתק עשת שובר את האגף הדרומי של האנטיקלינה, ובסמוך לשיא המבנה נחשפות יחידות רכות של תצורת מנוחה (סקל, 1967). מתקבל עמק שגודלו 0.5x0.25 ק"מ, וגובה קירותיו כמה עשרות מטרים מעל לבסיס (איור 8).



איור 8: מבנה דמוי מכתש כיפת עשת, ישראל. בתרשים מוצג חתך רוחב טופוגרפי. אפשר לראות כי לעמק מורפולוגיה של מכתש, מידותיו 0.25x0.5 ק"מ, וגובה המצוקים המקיפים אותו כ-40 מטרים מעל לבסיס המכתש. העתק עשת חוצה את המבנה במקביל למיקום החתך המסומן. קו מתאר שחור (מנוקד) מציין את תוואי המצוק סביב למכתש



איור 7: מבנה דמוי מכתש בקמר ירוחם. מבנה מעודן של קמר, שבמרכזו מתפתחת מערכת נחלית המתנקזת למוצא אחד (קווקו תכלת). בחתכים הטופוגרפיים (מימין) רואים כי הגובה הכולל של המצוקים ושל המדרונות התלולים המקיפים את העמק הוא עד 100 מטרים מעל לבסיס המכתש. קו השיאים המקיף את המכתש מסומן בקו מנוקד חום

סטרטיגרפיה. בדומה לחתך שנחשף במכתשי הנגב, במרכז המבנה נחשפות היחידות העתיקות: תצורת חתירה – חולות מגיל קרטיקון תחתון. הקירות מעליה בנויים מסלעי חבורת יהודה, בעיקר סלעי גיר ודולומיט, ובראש החתך נמצאת תצורת ציחור.

מנגנון ההיווצרות. כיפת עשת נמצאת בשיאה של אנטיקלינה המשתרעת מנחל הערבה ועד הציחור, והיא איננה מבנה מבודד. הכיפה מוגבהת בכ-200 מטרים מהציר הראשי, ויש לה מראה של בליטה סטרוקטורלית, תופעה דומה לקמר הכיפתי של אנטיקלינת חצרה, שבמרכזו התפתח המכתש הקטן (בן-תור ופרומן, 1961). ייתכן שכיפת עשת היא תוצר הצטלבות של שני קווים סטרוקטורליים: קו חבל הכיפות של שולי הערבה (בן-תור ופרומן, 1957) ואנטיקלינת עשת. שבר עשת שובר את האגף הדרומי סמוך מאוד לצייר האנטיקלינה, וגורם לחשיפת השכבות הרכות של גג תצורת חתירה שנמצאת במרכז (סקל, 1967). למבנה המכתשי המתקבל יש מאפיינים דומים למאפייני מכתשי עריף: מבנה בצורת קערה נטויה (אמפיתטרון), מדרונות תלולים הפונים ממצוקי המבנה פנימה וללא בסיס מישורי רחב במרכזו. כפי שרואים באיור 8, המבנה המכתשי מנוקז לכיוון דרום-מזרח אל הערבה.

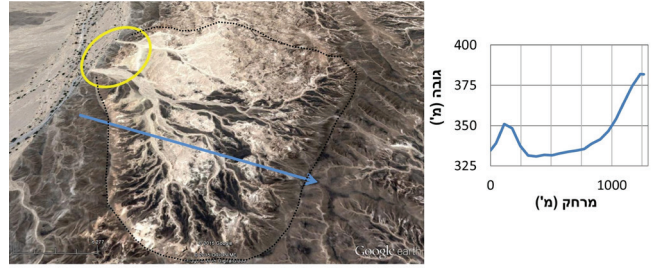
סטרטיגרפיה. היחידות החשופות הן מחבורת יהודה, אבני גיר ודולומיט מגיל טורון, תצורת תמר הבונה את החלק הקשה והמצוקי (העליון), תצורת אבנון היוצרת את המדרון העיקרי (העליון), תצורת צפית הנמצאת בבסיס מרבית שטח המכתש ותצורת עין ירקעם, הנחשפת בערוצים שהתחתרו בבסיס המבנה (Starinsky et al., 2010). ניתן לראות באיור 7 כי המכתש מוקף במדרונות סלע ובמצוקים הנישאים לגובה של כמה עשרות מטרים. מוצא המכתש (נחל מסעד) בצדו הצפוני-מערבי נמצא בגובה 530 מטרים מעל פני הים.

מנגנון ההיווצרות. קמר ירוחם הוא חלק מרכסי הקשת הסורית אך הוא קמר קטן יחסית. בדומה לשאר מכתשי הנגב, על גבי מישור הגידוע שבראש הקמר החלה להתפתח מערכת ניקוז דנדריטית (דמויית ענפי עץ) (זילברמן, 2009). אולם במיוקן המוקדם, בד בבד עם השתפלות הבקע והרמת שדרת ההר, נוצר מבנה קימוט רחב, וכך מכתשי הנגב הגדולים נמצאים באגפו המזרחי המתנקז לבקע, ואילו קמר ירוחם נמצא באגפו המערבי המתנקז לים התיכון (זילברמן, 2009). הבדלי הגודל של הקמרים, מיקומם באגפי הקימוט השונים ואנרגיית הסחיפה האטית יותר באגף המערבי הם הסיבה להיווצרות מבנה ארוזיבי רדוד יותר, החושף במרכזו שכבות עתיקות מתצורת צפית ועין ירקעם. התמונה המורפולוגית המתקבלת היא של מכתש רדוד שהתפתחותו נעצרה או טרם הושלמה, ושהסלעים הרכים במרכזו (חווארי תצורת עין ירקעם) עדיין לא נחשפו במלואם.

בקעה ארוזיבית בנחל צחיחה, ישראל

תיאור כללי. בקעת צחיחה הממוקמת בגדה המזרחית של נחל ציחור ($N30^{\circ}13' E34^{\circ}57'$) (איור 1). צדה המערבי נחצה על ידי העתק ברק-ציחור, וחלקה הדרומי יוצר מבנה דמוי מכתש (איור 9). הבקעה הטופוגרפית התפתחה בשיא קמר שגודלו 0.8x0.8 ק"מ וצירו בכיוון צפון-מזרח-דרום-מערב. מבנה הבקעה אינו סימטרי, כך שהנטייה באגף הדרומי-מערבי תלולה יותר. בצד הדרומי גובה הקירות נע בין 20 לבין 50 מטרים, ואילו בצד הצפוני גובהם 10 מטרים. ניתן לראות כי הבקעה מתנקזת לנחל ציחור דרך שני פתחים בקיר המערבי.

המכתש הדרומי-מזרחי נמצא במחוז קאלאסין ($N104^{\circ}03' W16^{\circ}41'$). ככנס של החברה הגיאולוגית הישראלית שהתקיים אשתקד הציג אותו פרופ' דן גיל בשם מכתש קוצ'נראי (Gill, 2015). באיור 11 נראה המכתש, שמידותיו 15×31 ק"מ, כעמק אליפטי בציר האנטיקלינה פו פאן. הנטיות בשני אגפי המכתש אינן שוות, מכאן שזהו קמט א-סימטרי, אך ההבדל בין הנטיות קטן במידה ניכרת מההבדל בין הנטיות באגפי המכתשים בארץ. שולי המצוק נישאים כ-200 מ' מעל לבסיס, והם מורכבים ממצוק קרוב לאנכי שגובהו כמה עשרות מטרים בחלק העליון, ומתחתיו מדרון תלול מאוד המתמתן לכיוון הבסיס. בסיס המכתש כמעט שטוח, ובו מערכת נחלים מפותלת המתנקזת לאגן חוראט דרך הקיר הדרומי-מערבי. המוצא העיקרי מהמכתש הוא בגובה 180 מטרים מעל פני הים (איור 11א).



איור 9: מכתש צחיחה, ישראל. בתרשים מוצג חתך טופוגרפי, ואפשר לראות בו מורפולוגיה של מכתש. מידות העמק המכתשי 0.8×0.8 ק"מ, והמצוקים המקיפים אותו נישאים כ-50 מטרים מעל לבסיסו. המבנה נמצא בחלקה הדרומי של בקעת צחיחה, וחוצה אותו העתק ברק-ציחור. ניקוז העמק הוא לנחל ציחור דרך שני מפערים בקיר המערבי (עיגול צהוב). קו מתאר שחור (מנוקד) מציין את תוואי המצוק סביב למכתש

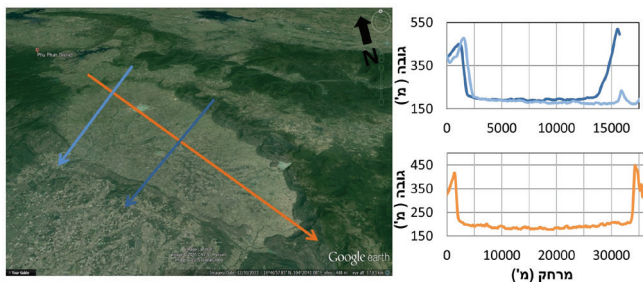
סטרטיגרפיה. בבסיס הבקעה חשופה תצורת טקיה המורכבת מחווארים רכים, ומעליה תצורת מור, שבנויה משכבות של קרטון וצור. סלעי תצורת מור מכוסים שכבה בת מטרים אחדים של תצורת ערבה, הבנויה בעיקר מחלוקי גיר ומצור (גינת, 1997).

מנגנון ההיווצרות. בתחילה שקעו תצורות טקיה החווארית ומור הקרטונית, ומעליהן הושקעה תצורת ערבה. תנועה לאורך העתק ציחור-ברק גרמה לקימוט ולאחר מכן להטיה נוספת של האגף הצפוני-מזרחי. בהמשך התהליך, עקב גידוע אזורי שבו נסחפו היחידות הקשות של תצורות ערבה ומור ונחשפו היחידות הרכות בתצורת טקיה, נוצר עמק בשיא הגובה (גינת, 1997). סלע החוואר הרך של תצורת טקיה נסחף מהשוליים בקצב מהיר יותר, וכך נוצר מבנה מכתשי. שני הפתחים של הבקעה מתנקזים לנחל ציחור וסמוכים זה לזה (איור 9).

3.3 מכתשים בעולם (תאילנד, קולורדו, אנגליה)

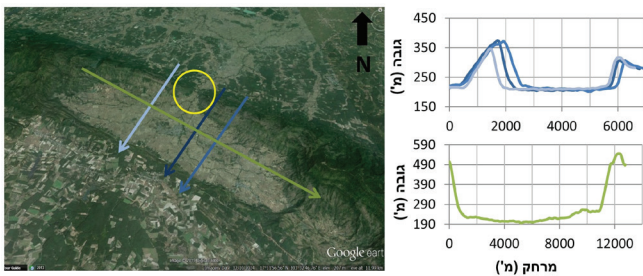
צמד מכתשים בתאילנד

תיאור כללי. בצפון-מזרח תאילנד נחצה מישור חוראט (Khorat) על ידי רכס פו פאן (אנטיקלינוריום) לשני אגנים: האגן הצפוני סאקון נחון, והאגן הדרומי חוראט. ברכס פו פאן נראים שני מבני מכתש (איור 10). האזור כולו מכוסה יער, הוא מיושב ונעשה בו עיבוד חקלאי. האקלים מאופיין בשלוש עונות: עונה חמה, עונה קרה ועונה רטובה (עונת המונסון). הטמפרטורה הממוצעת היא 26° , וכמות המשקעים השנתית הממוצעת עומדת על 1,150 מ"מ גשם.⁵



איור 11: מכתש במחוז קאלאסין, תאילנד. בתרשימים מוצגים חתך רוחב (עליון) וחתך אורך (תחתון). אפשר לראות כי לעמק מורפולוגיה של מכתש: מידותיו 15×31 ק"מ, והמצוקים נישאים לגובה 250-300 מטרים מעל לבסיס המכתש. ניכר כי בסיס המכתש שטוח מאוד, וכי הקיר הדרומי אינו רציף (אם כי רוב שטח המכתש מנוקד דרך המפער שבפינתו הדרומית)

המכתש הצפוני-מערבי נמצא במחוז סאקון נחון ($N103^{\circ}32' W17^{\circ}13'$) בחלקה הצפוני של האנטיקלינה. מראהו מזכיר את מכתש חצרה (המכתש הקטן), אם כי הוא בעל מבנה מאורך שמידותיו 13×5 ק"מ (איור 11ב, 11ג). למכתש מוצא יחיד בקיר הצפוני-מזרחי. המצוקים המקיפים אותו נישאים כ-150 מטרים מעל לבסיסו, ובדומה למצוקי מכתש קאלאסין החלק התחתון של המצוקים מדרוני, ובסיס המכתש שטוח לחלוטין. מוצא המכתש בגובה 200 מטרים מעל פני הים, והוא מתנקז לאגן סאקון נחון שמצפון לאנטיקלינת פו פאן, בניגוד למכתש במחוז קאלאסין המתנקז לאגן שמדרום לאנטיקלינה.



איור 11ב: מכתש במחוז סאקון נחון, תאילנד. בתרשימים מוצגים חתך רוחב (עליון) וחתך אורך (תחתון). אפשר לראות כי לעמק מורפולוגיה של מכתש שמידותיו 13×5 ק"מ. המצוקים נישאים לגובה 150-400 מטרים מעל לבסיס המכתש השטוח, שבבסיסו נמצאת מערכת נחלים המצטרפים למוצא אחד שמסומן בעיגול צהוב



איור 10: צמד מכתשי תאילנד. משמאל - מפה מדינית של תאילנד. בצפון-מזרח המדינה אפשר לראות את מיקום Khorat Plateau (מישור חוראט). בהגדלה מימין - צילום לוויין ובו מסומן בקו מתאר צהוב מכתש קאלאסין (איור 11א) ובקו מתאר כתום מכתש סאקון נחון (איור 11ב)

אפסי, ואינו מאפשר הסעה של תוצרי בליה גדולים אל מחוץ למכתש. מורפולוגיה זו שונה באורח ניכר מהמורפולוגיה של מכתשי הארץ, והיא משפיעה על התפתחות המכתש.

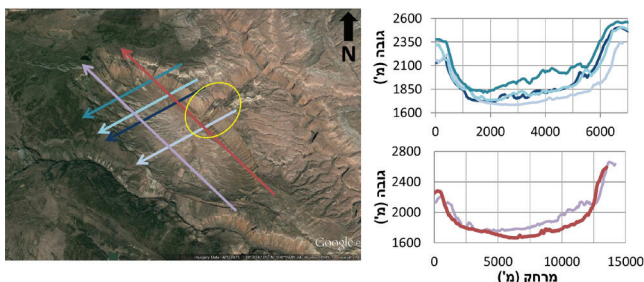
השוואת מכתשי תאילנד למכתשי הארץ מדגישה כי התנאים הליתולוגיים להיווצרות מכתשים, מגוונים יותר מהידע שנצבר בנגב. מההשוואה עולה כי המכנה המשותף הכללי הוא בתכונות המכניות של השכבות, כלומר דרוש רצף של שתי שכבות, שהעליונה קשה ועמידה לבליה, והתחתונה שבליבת הקמר רכה ממנה ומתבלה מהר יותר. נוסף על כך העמידות המורפולוגית של המכתשים אינה תלויה רק בתנאי האקלים, אלא גם בשיפוע בסיס המכתש ובגובה המפער. בתאילנד הגשם אמנם מגביר את קצב הבליה הכללי, אך כיוון שהמפער המנקז אינו ממשיך להתחתר ובסיס המכתש שטוח ומלא בסדימנטים, הסרת חומרי הבליה מהמכתש החוצה אינה יעילה כלל, ולכן קצב נסיגת המצוקים וקצב התפתחות המכתש אטיים (Finzi and Harlev, 2016).

מכתשים במישורי קולורדו

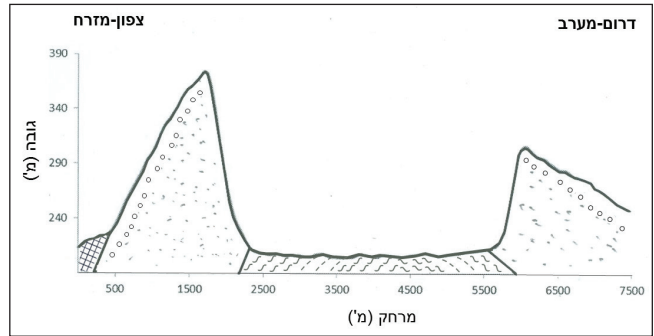
תיאור כללי. בדרום-מערב קולורדו, באזור מישורי שבו חתורים קניונים עמוקים, נמצאות אנטיקלינות שבמרכזן מחדרי מלח ובחלקן יש מבנים דמויי מכתש (Cater, 1970). האזור ניהן באקלים של מדבר גבוה עם טמפרטורה ממוצעת של 10° וממוצע משקעים שנתי של 340 מ"מ⁶.

מכתש עמק סינבד (30°W 59°N108). מהתבוננות בתמונת הלווין ובחתך הטופוגרפי (איור 12א, מקרא בנספח 1) ניתן לראות בבירור מורפולוגיה של מכתש כפי שהיא מוכרת לנו ממכתשי הנגב, כלומר עמק אירוויבי (20x8 ק"מ) בשיא אנטיקלינה (Sinbad Valley anticline) מוקף מצוקים תלולים שמתנשאים לגובה כ-500 מטרים מעל לבסיס המכתש. המצוק מבוטר על ידי נחלים תלולים חתורים באבני חול ומתנקזים אל נחל יחיד (Salt creek) הנשפך לנהר דולורס (Maret and Coe, 1960). מוצא המכתש נמצא בגובה 1,660 מטרים מעל פני הים (איורים 12א, 12ב).

עמק פרדוקס (19°W 51°N108) הוא עמק מאורך דמוי מכתש (7x40 ק"מ). הרכס והעמק בתוכו נחצים לרוחבם על ידי נהר הדולורס במהלך של נחל חוצה רכס, התופעה שבגינה נתנו התושבים לעמק את שמו (Barrs, 2000). בסיס העמק נמצא בגובה 1,500–1,600 מטרים, ובכל אגפיו יש מצוקי אבן חול המתנשאים לגובה 350–400 מטרים מעל לבסיס העמק (איור 12ג).



איור 12: מכתש עמק סינבד, קולורדו. בתרשימים מוצגים חתך רוחב (עליון) וחתך אורך (תחתון). אפשר לראות כי לעמק מורפולוגיה של מכתש. מידותיו 20x8 ק"מ, גובה המצוקים 500–700 מטרים מעל לבסיס המכתש, שמנוקז על ידי מוצא אחד המסומן בעיגול צהוב



איור 11: חתך רוחב סכמתי של מכתש סאקון נחון. החתך מציג את הסטרטיגרפיה של היחידות היוצרות את המבנה (מקרא מופיע בנספח 1): השכבה הרכה בבסיס המכתש היא תצורת פו קרדונג המורכבת מחוואר ומחרסיות. המצוקים והשכבה הקשה המקיפה את המכתש הם תצורת פרה ויהאן הבנויה אבן חול מסיבית עם חלוקים בחלקה העליון. מעל מבנה המכתש נראית תצורת מהא סרקם האופורייטית (מלח)

סטרטיגרפיה. השכבה החשופה במרכז המבנה (השכבה הרכה)

היא תצורת פו קרדונג (Jpk) המורכבת מחרסית וחוואר וממעט אבן חול. השכבה המצוקית היא תצורת פרה ויהאן (Jpw) העשויה אבן חול מסיבית וחלוקים בחלקה העליון. גילן של שתי השכבות משתרע מהיורא התחתון ועד היורא התיכון, והן שייכות לחבורת חוראט. מעל שתי היחידות האלה הושקעה תצורת מהא-סרקם מהקרטקון העליון, והיא מורכבת בעיקר מהליט וממעט גבס ואנהידריט (Vimuktanadana, 1999; Wannakomol, 2005). את המבנה הכללי של החבורות ניתן לראות בחתך הסכמתי (איור 11ג, מקרא בנספח 1).

מנגנון ההיווצרות. בספרות יש שני הסברים אפשריים לתופעת

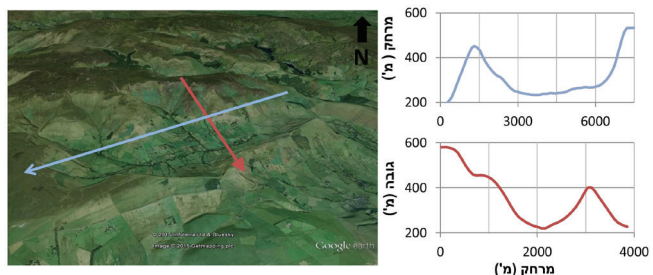
המכתשים בצפון-מזרח תאילנד. החוקרים Pitchai ו-Furukawa (1989) רואים בתופעת כיפות המלח, בהמסתן ובקריסתן את הגורם שהוביל ליצירת בולענים ונוסף להם – מכתשים. עם זאת השקעת המלח המרחבית באזור אירעה לאחר השקעת שכבות המכתש ולאחר הקימוט, ולכן לא ברור איך גרמה המסת המלח להיווצרות המכתשים. ההסבר האחר הוא כי גם בבסיס תצורת פרה ויהאן, הגורם לנוף המצוקי שנראה היום, היו סלעי אידוי (אופורייטים) – הליט, גבס ואנהידריט, ועל כן ייתכן שהמסתם היא הסיבה ליצירת המבנה. ואולם אין להשערה זאת ביטוי במפות הגיאולוגיות של תאילנד (Vimuktanadana, 1999). על פי הסבר זה יש בהתפתחות המכתשים כמה שלבים עיקריים: (1) התרוממות אנטיקלינוריום פו פאן לאחר ההשקעה של תצורת מהא סרקם, (2) התפתחות כיפות מלח באנטיקלינות ובאגנים, (3) המסת שכבות המלח בתת-הקרקע, (4) יצירת בולענים באגנים הנמוכים, (5) בליה מואצת והתפתחות מערכת הניקוז על הקמר ו- (6) קריסת שכבות ואיחוד אגנים מקומיים על הקמר לכדי יצירת מבנה דמוי מכתש. על פי הצעת דן גיל (Gill, 2015), סחיפה נחלית בקרטקון חשפה את הסלעים הרכים, שקצב בלייתם היה מהיר מקצב הבליה של הסלעים הקשים שמעליהם. בד בבד נוצרה מערכת נחלים דנדריטית שהתנקזה למוצא יחיד, שהתחתר באגף התלול של האנטיקלינה (נטיית של 19°). אם כן על פי גיל (Gill, 2015), התהליך דומה לתהליך המוכר ממכתשי הנגב. אף על פי שמנגנון היווצרות זה מסביר את התפתחות רוב המכתשים הידועים בארץ, עדיין דרושה עבודה נוספת כדי לבסס את הטענה שכל שלבי ההתפתחות המוכרים מהנגב התקיימו גם במכתשי תאילנד. מעניין לציין, כי כיום שיפוע הנחלים במכתשי תאילנד

וגרמו לקריסת החתך שנמצא מעליהם לתוך ארבעת עמקי המלח: עמק הפרדוקס, עמק סינבד, עמק מואב ועמק גיפסום. תהליך התרוממות שכבות הסלע וקריסתן מעל מקדר המלח נמשך כ-150 מיליון שנה. באותו פרק זמן התחתר נהר הדולורוס לרוחב הרכס המתרומם, והתוצאה הייתה תופעת נהר חוצה רכס המוכרת לנו מהנגב. בתהליך זה קצב ההתחתרות של הנחל מהיר או שווה לקצב ההתרוממות, כך שהנחל חוצה את הרכס. לאחר קריסת הרכס ויצירת המורפולוגיה דמויית המכתש המשיך הנחל לזרום ולהתחתר לרוחב העמק ולא במקביל לו. תהליך זה התרחש גם בעמק מואב עם נהר הקולורדו החוצה אותו.

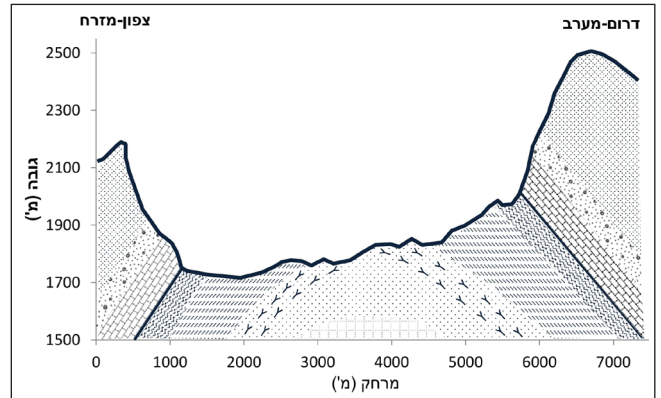
חשוב לציין, כי בשונה מהמכתשים בנגב אנטיקלינת סינבד היא קמט סימטרי. את השכבה הקשה והמצוקית יוצרת אבן חול, ואילו את השכבה הרכה יוצרים גוף מלח ושכבות של גבס, אנהידריט וחרסיות. אין ספק שהיווצרות מבני המכתשים בקולורדו היא הוכחה לכך שהשכבות החלשות והקשות במכתש יכולות להיות שונות מאלו שבמכתשי הנגב. עוד אפשר ללמוד מהיווצרות מכתשי קולורדו, שתהליך החשיפה והבליה של ליבת הקמר אינו צריך להיות קשור לגידוע מרחבי, אלא הוא יכול להיעזר בתהליכים שונים כגון המסה והתמוטטות או שבירה (כמו במקרה של מכתש עשת). חשוב להבהיר שעמק פרדוקס, למרות המראה המכתשי שלו, אינו אגן ניקוז סגור שכן הוא נחצה על ידי נחל, ומסיבה זו הוא אינו מתאים להגדרה המקובלת של מכתש.

מכתש באנגליה – פיק דיסטריקט (Peak District)

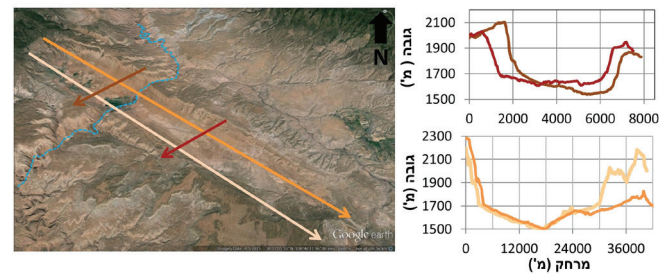
תיאור כללי. בחלקה הצפוני של אנגליה, צפונית לדרבישייר, משתרע אזור פיק דיסטריקט על פני 1,437 קמ"ר. האזור הוא חלקו הדרומי של רכס הפנינס, המפריד בין צפון-מערב אנגליה לבין צפון-מזרח אנגליה. הנוף הכללי באזור מתאפיין בגבעות נמוכות שגובהן אינו עולה על עשרות מטרים, והן מרכיבות מתאר של כיפה רחבה ששוליה המערביים עברו שבירה. בעמק רחב לאורך ציר הרכס נחשפות שכבות סלע עתיקות המוקפות באופן חלקי במצוקים ובמדרונות. אף על פי כן הנוף ברובו אינו דומה למכתש, הן משום שהאזור כולו מכוסה צמחייה והן בשל בליית המצוקים המקיפים את העמק. בחלקו הצפוני של המחוז יש מבנה קטן יחסית שעדיין נראה כמכתש רדוד ($N1^{\circ}48' W21^{\circ}53'$). שטחו 24 קמ"ר וגובה המדרונות/מצוקים המקיפים אותו כ-200 מטרים (איור 13).



איור 13: מבנה מכתשי בפיק דיסטריקט, אנגליה. בתרשימים מוצגים חתך אורך (עליון) וחתך רוחב (תחתון). המבנה המכתשי הקטן נמצא בשולי רכס גדוע (איור 14). החתכים מעידים על מורפולוגיה דמויית מכתש. המבנה מוקף מדרונות מצוקיים הנישאים לגובה 250–350 מטרים מעל הבסיס



איור 11: חתך סכמתי לרוחב מכתש עמק סינבד. החתך ממחיש את הסטריגורפיה ואת הרכב השכבות של אנטיקלינת סינבד (קמט סימטרי): במרכז נראית השכבה הרכה עם סלעים אוופוריטיים וקלסטיים מחבורת הרמוסה (Hermosa). המצוקים – השכבה הקשה – הם סלעי גיר קשה, קונגלומרט ואבן חול מחבורת גלן קניון (Glen Canyon). מקרא לכל חתכי הרוחב מופיע בנספח 1

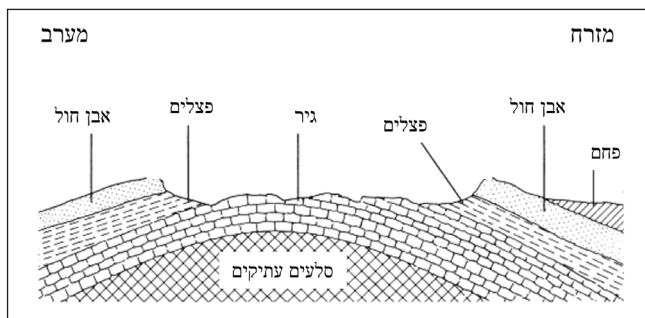


איור 12: מכתש בעמק פרדוקס, קולורדו. בתרשימים מוצגים חתך רוחב (עליון) וחתך אורך (תחתון). לעמק מורפולוגיה של מכתש. מידותיו 7x40 ק"מ וגובה המצוקים 300–750 מטרים מעל לבסיס המכתש המנוקז על ידי מוצא אחד, שהוא נחל אשר חוצה את כל המבנה (כחול מקווקו)

סטריגורפיה. השכבה העתיקה ביותר בעמק סינבד ובעמק פרדוקס היא תצורת פרדוקס מחבורת הרמוסה. לתצורה ליתולוגיה רכה המורכבת בעיקר מאופוריטים: גבס, אנהידריט והליט עם מעט אבן חול, חרסיות וגיר (Wengard and Matheny, 1958). היחידות הקשות מעל תצורת פרדוקס כוללות אבן גיר קשה מגיל פנסילבניאן (קונגלומרט, ארקוזה, מעט חרסיות ואבן חול), ותצורת נַכְחו ווינגייט מגיל טריאס (Harshbarger et al., 1957), המשתייכות לחבורת גלן קניון ומורכבות מאבן חול אפרפרה עם שיכוב צולב ואבן חול אדמדמה-חומה ומסיבית היוצרת נוף מצוקי (Maret and Coe, 1960). המבנה הכללי של החבורות הבונות את המבנה נראה בחתך הסכמתי המצורף (איור 12, מקרא בנספח 1).

מנגנון ההיווצרות. תהליך היווצרותו של הנוף מתואר בספרו של בארס (Baars, 2000) באופן זה: לפני כ-300 מיליון שנה (פנסילבניאן) הוצף האזור, ונוצר אגן שהושקע בו מלח. בו-בזמן החלה התרוממות ובעקבותיה בליה והשקעה של סדימנטים קלסטיים בשולי האגן. עקב עומס הסדימנטים החל המלח לנוע כמסה פלסטית לכיוון דרום-מזרח, וכאשר אותו זרם מלח נתקל בהעתקים הוא שינה את כיוון זרימתו והחל לעלות כמחדר מלח (דיאפיר) עד שהגיע קרוב לפני השטח בצירי הרכסים.

תנועת המלח, שיצרה כיפות מלח, פסקה בקרטיקון המאוחר. מי תהום המיסו את גופי המלח בחלקים העליונים של האנטיקלינות,



איור 15: חתך באזור שבו נמצא המבנה דמוי המכתש. אפשר לראות את יחידות הסלע העיקריות המרכיבות את החתך, את הסטריטיגרפיה ואת המורפולוגיה שנוצרה עקב הבליה. מבנה של עמק במרכז האנטיקלינה (מתוך https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_District)

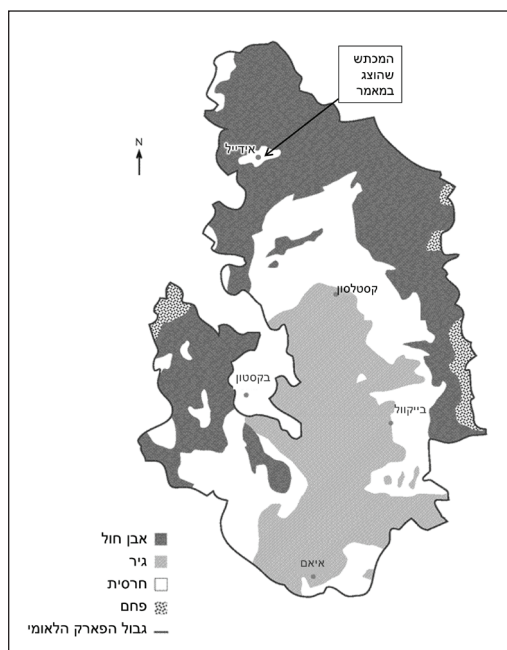
חשוב לציין את ההבדלים בין המבנה שנוצר באנגליה לבין המכתשים המוכרים בנגב. ראשית לכול הוא ההבדל הסטריטיגרפי: באנגליה המבנה מורכב משלוש יחידות: קשה-רכה-קשה. עובי השכבה הרכה קטן יחסית, וברוב המקומות היא הוסרה במלואה. בארץ יש רק שתי יחידות סלע עבות, שכבת סלע קשה ושכבת סלע רכה, ומעטים המחשופים בארץ שהשכבה הרכה הוסרה בהם לחלוטין. כיפת גוונים במכתש רמון היא דוגמה לאתר שבו השכבה הרכה הוסרה לחלוטין, ומתחתיה נחשף רכס המורכב מסלע גיר מתקופת הטריאס.

ההבדל הסטריטיגרפי הזה משפיע על המאפיינים המורפולוגיים. בעוד בארץ נוצר נוף דרמטי עם מצוקים גבוהים מעל עמק מישורי, באנגליה המצוקים נמוכים ולנוף מראה רך ומעוגל. סיבה אחת להבדל המורפולוגי היא האקלים. באנגליה האקלים לח בהרבה, כמות המשקעים השנתית הממוצעת היא 1,025 מ"מ, והטמפרטורה הממוצעת היא 10.3° .¹⁰ סיבה נוספת היא שוני ליתולוגי ניכר. השכבות הקשות באנגליה מורכבות מאבן חול והשכבות הרכות עשויות פצלים, בעוד שבנגב השכבות הקשות עשויות מאבן גיר והרכות מאבן חול. מכך ניתן ללמוד כי מבנה מכתשי יכול להתפתח גם בתנאי ליתולוגיה שונים מהמוכר בארץ, וכי הקושי היחסי בין השכבות הוא שישפיע על היווצרות המבנה והנוף שיתפתח.

3.4 מבנים שאינם מכתשים: דיון בתנאי סף להכרה במבנה דמוי מכתש
יש מבנים רבים דמויי מכתשים כגון קניונים מוקפי מצוקים, שלא ניתן להגדירם כמכתשים הן בשל מאפיינים מורפולוגיים שונים והן בשל הבדלים מהותיים בתהליך ההיווצרות. דוגמה לכך הוא קניון נחל צפית, שאפשר לראות בו עמק אליפטי מוקף ברובו מצוקים ומנוקז על ידי נחל בודד. העמק של קניון צפית ($N30^{\circ}96' E35^{\circ}21'$) חוצה את אנטיקלינת חצרה לרוחבה והוא נוצר על ידי התחתרות נחל צפית. כיוון שהעמק אינו אגן סגור ונחל חצרה זורם לתוכו ולאורכו ויוצא דרך מפער באגף התלול של האנטיקלינה, העמק אינו נחשב למכתש.

מבנה נוסף שנוצר בתהליך בליה ומתאפיין במצוקים היקפיים ולעתים גם בניקוז בודד דרך מפער, הוא הבולען המוכר מחופי ים המלח. מובן שבולענים אינם נחשבים למכתשים: הם אינם עמק בראש קמר, בליית השכבה הרכה קשורה בזרימת מי תהום והניקוז שלהם הוא

סטריטיגרפיה. האזור מורכב משלוש יחידות סלע עיקריות (איור 14): (1) תצורות מתקופת הקרבון המורכבות מאבן גיר ומאובנים שעברה דולומיטיזציה חלקית. בתוכה ניתן למצוא מהדרים וולקניים מקומיים (בזלות המכונות toadstone)⁷; (2) שכבת פצלים ומעליה שכבת אבן חול קשה (gritstone). שתי השכבות האלה הן מחברות MILSTONE מגיל קרבון עליון; (3) מעל כל זאת יש שכבות המכילות פחם (coal measures) (Highley and Cameron, 1995). מבחינה מורפולוגית המחוז כולו אינו דומה למכתש: יש בו הפרשי גובה קטנים, בליה ניכרת של המצוקים, הסרה מלאה של שכבת הפצלים הרכה מתחתית המכתש וחשיפה של שכבת הגיר הקשה מתחתיה. אך כפי שצוין לעיל, בחלקה הצפוני של האנטיקלינה ישנו מבנה מכתשי קטן ששכבת הגיר בו טרם נחשפה.⁸



איור 14: איור סכמתי של הגיאולוגיה של אזור פיק דיסטריקט. המפה ממחישה את חשיפת שלוש יחידות הסלע שנמצאות באזור (מבוסס על מפה גיאולוגית מתוך <http://resources.peakdistrict.gov.uk/pubs/lp/diagrams/d2.htm>)

מנגנון ההיווצרות. לאחר ההשקעה של יחידות הסלע שתוארו לעיל, עבר האזור קימוט א-סימטרי. במהלכו עברו הסלעים הנמצאים במזרח הטיה גדולה יותר מאשר הסלעים שבמערב, ואילו הסלעים שבראש המבנה נחשפו לבליה.⁹ בליית ראש הקמר חוללה שלושה תהליכים: (1) הפצלים ואבן החול במרכז הקמר התבלו וכך נחשפה שכבת הגיר הקשה שמתחתם; (2) במהלך הקימוט נסדקה אבן הגיר ונשברה ועורקים עשירים במינרלים חדרו לתוכה (Gray, 2012); ו- (3) בדומה לדרך ההיווצרות של מכתשי הנגב, חשיפת השכבה הרכה גרמה לה לבליה ולהסרה וגם לאי-יציבות של השכבה הקשה יותר של אבני החול שמעליה. בדרך זו נוצר מבנה של עמק מוקף מצוקים ומדרונות תלולים בראש אנטיקלינה (איור 15).

7. peaks.freeuk.com 20.4.2016

8. bigmoor.co.uk 20.4.2016

9. peakdistrictinformation.com 20.4.2016

10. en.climate-data.org 20.4.2016

בקריטריונים הגיאולוגיים שבהגדרת המכתש (מצוקים היקפיים, ניקוז בודד, אגן סגור וכדומה). יתר על כן מכתשים מסוימים, למשל מכתשי תאילנד ומכתש סינבד בקולורדו, מציגים שלבי התפתחות שחורגים מההגדרות המקובלות כיום. אי-לכך הגדרה מחודשת של מונח המכתש צריכה להרחיב את המאפיינים המורפולוגיים שמתארים את תופעת המכתש וגם לחדד את הגדרת התנאים להיווצרות מכתש. להלן השינויים המוצעים בהגדרת מאפייני המכתש:

1. **מאפיין מורפולוגי 1.** ניקוז המכתש על ידי נחל עיקרי (ולאו דווקא יחיד).
2. **מאפיין מורפולוגי 2.** בקעה ארוזיבית מוקפת מצוקים (רציפים או מקוטעים במפערים), שהיא אגן סגור ברובו. זרימת מי הנגר לתוכו זניחה יחסית לנגר המתנקז ממנו.
3. **מאפיין מורפולוגי 3.** המכתש נוצר בראש קמר, אך הקמר אינו א-סימטרי בהכרח (אם כי א-סימטריות מסייעת לתהליך). המכתש יכול להתפתח גם שלא בשיא הרכס אלא באגפו, למשל בסיוע העתקים המזרזים את חשיפת השכבות הרכות או מאפשרים אותה.
4. **מאפיין ליתולוגי.** המכתש בנוי ממצוקים שחייבים להיות עמידים לבליה יותר מאשר הסלע המרכיב את ליבת המכתש. טעות לחשוב ששכבות גיר וחול הן תנאי הכרחי, הרי ישנם מכתשים עם מצוקי אבן חול המיתרים מעל חרסיות וסלעים אוופוריים (סלעי משקע כימיים, סלעי התאדות).
5. **מאפיין גנטי הקשור בתהליך היווצרות המכתש.** חשוב להבין שחשיפת הליבה הרכה של הרכס יכולה להתרחש באמצעות מנגנונים שונים ולא דווקא באמצעות גידוע אזורי.

ולבסוף, למכתשים נודעת חשיבות רבה בקידום תיירות, בחינוך ובמודעות לערכי הטבע. להגדרתם יש אפוא היבט גאוגרפי-חברתי. מסיבה זו בדיון שעוסק בהרחבת מונח המכתש ראוי להתייחס גם למאפיינים הנופיים באופן שיאפשר זיהוי מכתש גם על ידי מי שאינם גיאולוגים.

לרוב תת-קרקעי. אולם מנגנון המסת מלח כשלב ראשון בהיווצרות מכתש הוא מאפיין קביל, כל עוד לאחר קריסת השכבות הקשות שמעליו מתקיימים התהליכים האופייניים לכל מכתש, כמו בליה נחלית והיווצרות מפער המנקז חומרי בליה מהעמק האירוזיבי. מכתש סינבד בקולורדו הוא דוגמה למבנה שתהליך ההתפתחות שלו לאחר המסת שכבת המלח ועיצוב הנוף בו דומים מאוד לתהליכים במכתשי הנגב אך שונים מאוד מתהליכי הבליה של הבולען.

ניתן להציע אפוא שהגדרת המכתש תכלול מנגנוני בליה מגוונים (כולל המסה) כל עוד המורפולוגיה הסופית תדמה למכתש ולא לבולען או לעמק. הגדרה כזאת יכולה לכלול תנאי סף כגון גודל מינימלי, הפרש גבהים מינימלי או תנאים שונים ביחס לסכיבה ולתהליכי עיצוב הנוף בתוך המכתשים. לחילופין ניתן לאמץ למבנים דמויי מכתש הגדרה מכילה, נופית במהותה, שתתבסס על קריטריונים נופיים ותוכל להתאים למבנים מכל גודל וסוג שיוצרים מורפולוגיה דומה למכתש. היתרון בהגדרה נופית נעוץ בפשטותה וביכולתו של המטייל להבין את ההגדרה במלואה; החיסרון בהגדרה נופית הוא הקושי להתייחס במסגרתה למבנה הגיאולוגי התת-קרקעי, למשל לקיום המכתש על גבי קמר, תופעה שכמעט אין לה ביטוי במכתש באנגליה, אך יש לה ביטוי בולט במכתשי קולורדו ותאילנד.

4. סיכום

במאמר הוצגו מגוון מכתשים מהארץ ומהעולם, המעידים על הצורך בהרחבה ובחידוד של הגדרת המונח מכתש. השוואה בין מאפייני המכתשים בארץ ובעולם (טבלה 1) לבין מאפייני מכתשי הנגב הידועים מראה שהנחות יסוד השגורות כיום בארץ לגבי תנאים הכרחיים להיווצרות מכתש נכונות רק עבור חלק מהמכתשים. התנאים אינם הכרחיים אלא הם בבחינת גורם מזרז או גורם מאפשר בלבד. עולה מכך שהגדרת המכתש שגובשה על פי מאפייני מכתשי הנגב ובהתאם לידע המדעי בעת הטבעת המונח אינה מתאימה לתיאור כלל מכתשי העולם. אפילו מכתש רמון ומכתשי הנגב הקטנים אינם עומדים באופן מוחלט

טבלה 1: סיכום פרטי המכתשים שהוצגו במאמר

שם	מיקום	אורך (ק"מ)	רוחב (ק"מ)	עומק (מ')	מסלע עיקרי	הערות
מכתש רמון המכתש הגדול המכתש הקטן	רכס מחמל/רמון רכס חתירה רכס חצרה	40 14 8	9 6 6	350 410 400	סלעי גיר ודולומיט מעל אבן חול	קיימים מפערים אחדים במצוקי המכתשים. הניקוז במכתש רמון נעשה לא ממוצא אחד, אלא יש גם כניסת נחלים קטנים (למשל בבקעת ארדון).
עריף (צ-מז) עריף (דר-מע)	קשת סורית, הר עריף, ישראל	4 2.5	1 0.6	120 100	סלעי גיר ודולומיט מעל אבן חול	המכתשים אינם נמצאים בשיא הרכס, נחצים על ידי העתק.
עריף א-נאקה*	קשת סורית, סיני, מצרים	4	2	200-60	סלעי גיר ופצלים מעל חוואר ופצלים	נחצה על ידי העתק שגרם לשבירה של האגף הדרומי.
גיבל מעירה	קשת סורית, סיני, מצרים	60	20	200	גיר ודולומיט מעל אבן חול, גיר ופצלים	במרכז המכתש יש מעין הר מורכב מסלעים קשים יותר, שקצב בלייתם איטי. חלקים נרחבים מהקמר ומקירות המכתש מכוסים בדיונות חול.
גיבל הלאל	קשת סורית, סיני, מצרים	8	6	200	סלעי גיר מעל סלעי חול חוואר וגיר	נחצה על ידי העתק בשוליו הדרומיים.
צווילח #	קשת סורית, ירדן	13	5	250	סלעי דולומיט/גיר מעל אבן חול	מנוקז על ידי שני נחלים מקבילים, דרך שני מפערים.

שם	מיקום	אורך (ק"מ)	רוחב (ק"מ)	עומק (מ')	מסלע עיקרי	הערות
קמר ירוחם	קשת סורית, רכס ירוחם, ישראל	5	3	100	סלעי גיר ודולומיט מעל חוואר	אין חשיפה של אבן חול - אלא של שתי מדרגות דולומיט מעל סלע חווארי (תצורת תמר מעל אבנון וצפית מעל עין ירקעם).
כיפת עשת	רכס מנוחה, ישראל	0.5	0.25	30	סלעי גיר ודולומיט מעל אבני חול	הכיפה והמכתש נחצים על ידי העתק עשת. המכתש אינו בשיא הרכס ואגפו הדרומי-מזרחי בלוי מאד.
בקעת צחיחה*#	נחל ציחור, ישראל	0.8	0.8	20–50	סלעי קרטון וצור מעל חוואר	מנוקז על ידי שני נחלים מקבילים, דרך שני מפערים.
קאלאסין (קוצ'נראי)	מישור חוראט, תאילנד	31	15	200	אבן חול מעל חרסיות וחוארים	היווצרות כיפות מלח והמסתן אפשרו את היווצרות המכתש. הקמר בו נמצאים המכתשים א-סימטרי אך עם הבדלי נטייה קטנים (7°-19°)
עמק סינבד	קולורדו	20	8	500	אבן גיר וחול מסיבית מעל אוופורטים וחרסיות	המסה של דיאפיר מלח כחלק מתהליך היווצרות המכתש. עמק פרדוקס נחצה על ידי נחל בתהליך של נחל חוצה רכס.
עמק פרדוקס*		40	7	1500		
רכס פנינס	פיק דיסטריקט, צפון אנגליה	8	3	200	אבן חול מעל פצלים (ומתחתם סלע גיר)	קימוט א-סימטרי מתון. המכתש מוקף מדרונות תלולים עם מצוקים מקומיים.

עמקים שאינם נחשבים מכתשים עקב ניקוז על ידי כמה נחלים (סעיף א' בהגדרה המוצעת).

* עמקים שאינם נחשבים למכתשים עקב היעדר מצוקים המקיפים אותם או עקב נגר ניכר שמתנקז לתוכם (סעיף ב' בהגדרה המוצעת).

Amiran, D. H. K., 1951. Geomorphology of the central Negev highlands, Israel. Israel Exploration Journal 1, 107–120.

Baars, D., 2000. The Colorado Plateau: A geologic history revised and updated. UNM Press. Albuquerque. pp 63–67.

Bartov, Y., Lewy, Z., Steinitz, G., Zak, I., 1980. Mesozoic and Tertiary stratigraphy, paleogeography and structural history of the Gebel Areif en Naqa Area, Eastern Sinai. Israel Journal Of Earth Sciences 29, 114–139.

Ben David, R., Eyal, Y., Zilberman, E., Bowman, D., 2002. Fluvial systems response to rift margin tectonics: Makhtesh Ramon area. Geomorphology, Drainage Basin Dynamics and Morphology 45 (1–2), 147–163.

Bentor, Y. K., Shimron, A. E., Eyal, M., Bartov, Y., 1980. Geological Map. Aeromagnetic Map. Sinai. 1:500,000, Survey of Israel.

Cater, F., 1970. Geology of the salt anticline region in southwestern Colorado. United States Government Printing Office. Washington. pp. 50–71.

Department of Mineral Resources, 2014. Geology of Thailand. Department of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources and Environment, Bangkok. pp. 508

Ernan, G., 1982. Erosion surfaces in Israel. Unpublished report. Geol. Dept., Hebrew University. Jerusalem. pp. 17 [in Hebrew]

5. מקורות

אבני, י', 1990. הפלאוגאוגרפיה והתפתחות הנוף במערב הנגב המרכזי וזיקתם לשלבי התפתחות מכתש רמון. אופקים בגאוגרפיה 31, 67–83.

בן-תור, י"ק, פרומן, ע', 1957. המפה הגיאולוגית של ישראל 1:100,000 גיליון 19, נחל ערבה, ירושלים. עמ' 57.

בן-תור, י"ק, פרומן, ע', 1961. המפה הגיאולוגית של ישראל 1:100,000 גיליון 17, ניצנה, ירושלים.

גולדנברג, מ', ראב מ', 1987. תצפיות והארות על היווצרות בגבל אל-מע'רה – צפון סיני (היבטים כלליים וכלכליים והשלכות ליורא בישראל). בתוך: גבירצמן, ג', שמואלי, א', גרדן, י', בית אריה, א', הראל, ב' (עורכים). חלק א', סיני, גאוגרפיה פיסית. משרד הביטחון ההוצאה לאור. עמ' 8–71.

גינת, ח', 1997. הפליאו-גאוגרפיה ושלבי התפתחות הנוף באגני הנחלים חיון וציחור (היבטים סדימנטולוגיים, אקלימיים וטקטוניים). דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/19/97. הוצאת משרד התשתיות הלאומיות. ירושלים.

זילברמן, ע', 2009. ההיסטוריה של התפתחות המכתשים בנגב והגורמים שהביאו ליצירתם. מלח הארץ 4, 77–103.

זק, י', נבו, א', 1955. סקר גיאולוגי במכתשי עריף. הוצאת המכון הגיאולוגי. ירושלים.

סקל, ע', 1967. הגיאולוגיה של רכס מנוחה. עבודה לקבלת תואר מוסמך למדעי הטבע. האוניברסיטה העברית בירושלים.

שפרן, נ', מזור, ע', 1987. נדבכים בגיאולוגיה של ארץ ישראל. הוצאת האוניברסיטה הפתוחה. עמ' 136–137.

Starinsky, A., Zilberman, E., Braun, M., Sneh, A., 2010. Geological map of Israel 1:50000. Revivim sheet 18-II. Geological Survey of Israel.

Thai Meteorological Department. <http://tmd.go.th/en/climate.php?FileID=7>

The Peak District is a very interesting area geologically. <http://www.peakdistrictinformation.com/features/geology.php>

US Data. Climate Bedrock – Colorado and Bedrock weather averages. <http://www.usclimatedata.com/climate/bedrock/colorado/united-states/usco0445>

Vimuktanadana, S., 1999. Geological map of Thailand Scale 1:2,500,000. Geological Survey Division Department of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources and the Environment, Bangkok Thailand.

Von Engel, O. D., 1942. Geomorphology. Macmillan. New York.

Wannakomol, A., 2005. Soil and groundwater salinization problems in the Khorat Plateau, NE Thailand (Doctorate thesis). Department of Earth Sciences, Freie University. Berlin.

Wengerd, S. A., Matheny, M. L., 1958. Pennsylvanian system of the Four Corners region. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 42 (9), 2048–2106.

Zilberman, E., 2000. Formation of makhteshim unique erosion cirques in the Negev, southern Israel. Israel Journal of Earth Sciences 49 (3), 127–141.

Finzi, Y., Harlev, N., 2016. A regional approach for modeling cliff retreat rate: The Makhteshim Country as a case study. Geomorphology, in review, revision submitted.

Furukawa, H., Pitchai, W., 1989. Salt and sinkhole: Corrosion as a principal factor governing topography and mass movement in northeast Thailand. Southeast Asian Studies 27 (I), 3–33.

Geology. <http://bigmoor.co.uk/geology>

Gill, D., 2015. The Kuchinarai erosional cirque – a genuine makhtesh in the Phu Phan Range of northeast Thailand. Geological Society of Israel Meeting. Abstracts, pp. 53.

Gray, A., 2012. Introduction to the geology of the Peak District. Lecture presented at Buxton UK.

Harshberger, J., Repenning, C., Irwin, J., 1957. Stratigraphy of the Uppermost Triassic and the Jurassic rocks of the Navajo Country. Geological Survey Professional Paper 291. U. S. Government Printing Office. Washington.

Highley, E. D., Cameron, D. G., 1995. Mineral resource information for development plans Peak District National Park: Resources and constraints. British Geological Survey Technical Report WF/95/5.

Maret, R. E., Coe, A. V. R., 1960. Geology of Sinbad Valley Anticline, Geology of the Paradox Basin Fold and fault belt. Third Field Conference. Four Corners Geological Society. Durango. pp. 43–46.

Nir, D., 1958. Les pays de bray el les makhteshimes en Negev: Un cas de geomorphologie comparative. Rev. Geomorph. Dynam. 9, 112–118.

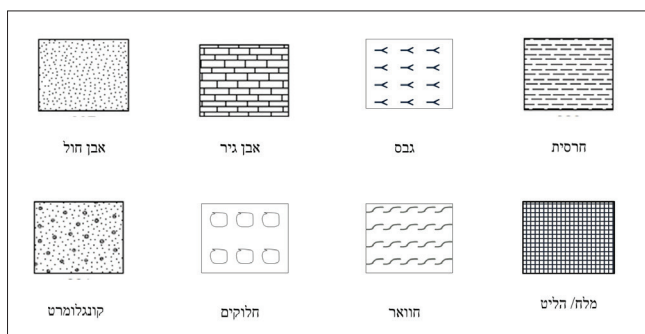
Peak District. https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_District

Peak District Geology. http://www.peakscan.freeuk.com/peak_district_geology.htm

Picard, L., 1951. Geomorphology of Israel Part 1: The Negev: Bulletin of the Research Council of Israel 8G, pp.1–30.

Sneh, A., Rosensaft, M., 2014. Major exposed lithologic units of Israel and environs. Digital shaded relief map Hall, J. K., 1:500,000, Geological survey of Israel. Jerusalem.

נספח 1: מקרא



מקרא ליתולוגיות עבור החתכים המצורפים למכתש ערף, סאקון נחון בתאילנד ועמק סינבד בקולורדו

