

משקעים נחליים ואגמיים בתקופה שלפני 20-8 מיליוני שנים בדרום ישראל ויחסם להתפתחות בקע ים המלח

רני קלבו

הקדמה

אוקיינוס התטיס, שהציף את אזורנו ברציפות קרוב למאה מיליון שנים, החל לסגת בשלהי תקופת האיאוקן (לפני כ-30 מיליון שנים), כחלק מתהליך הרמה נרחב של שוליה הצפוניים של יבשת אפריקה. עד אז הורבדו בקרקעית האוקיינוס שכבות עבות של משקעים ימיים, שהפכו מאוחר יותר לסלעי גיר, קרטון, דולומיט וצור, הבונים כיום את מרבית שדרת ההר המרכזית של ישראל. בתחילה נתונה הייתה היבשה, שנחשפה עם נסיגת הים, לתהליכי בליה נרחבים. מאוחר יותר החלו גם תהליכי הרבדה יבשתיים. על פני היבשה שנחשפה נוצרו אגמים, שנהרות ונחלים זרמו אליהם ודרכם אל בסיס הניקוז הסופי – הים. חומרי הסחף שהובלו במערכות הנחלים הנרחבות, שזרמו ממרכז אפריקה צפונה (כדוגמת נהר הנילוס של ימינו) אל עבר אוקיינוס התטיס המצטמק, החלו להצטבר ולקבור תחתיהם את הנוף העתיק.

מאמר זה עוסק בעיקרו בתקופה שלאחר נסיגת הים האיאוקני. בקע ים המלח, כפי שאנו מכירים אותו כיום, לא היה קיים, ומרבית התנועה האופקית והפתיחה הרוחבית של בקע הים האדום טרם החלו להתפתח. לפיכך, מערכות הנחלים הללו, שהחלו את דרכן משולי אפריקה, חצו במהלכן את אזור ערב הסעודית וירדן

* רני קלבו, דוקטור לגאולוגיה, עובד כחוקר במכון הגאולוגי ומתגורר ביישוב אלון, על דרך יארץ המרדפים.

הלוח הערבי) ואת ישראל (תת־הלוח של סיני), וסיימו את מסלולן באוקיינוס התטיס, שהשתרע מצפון ליבשת וממערבה.

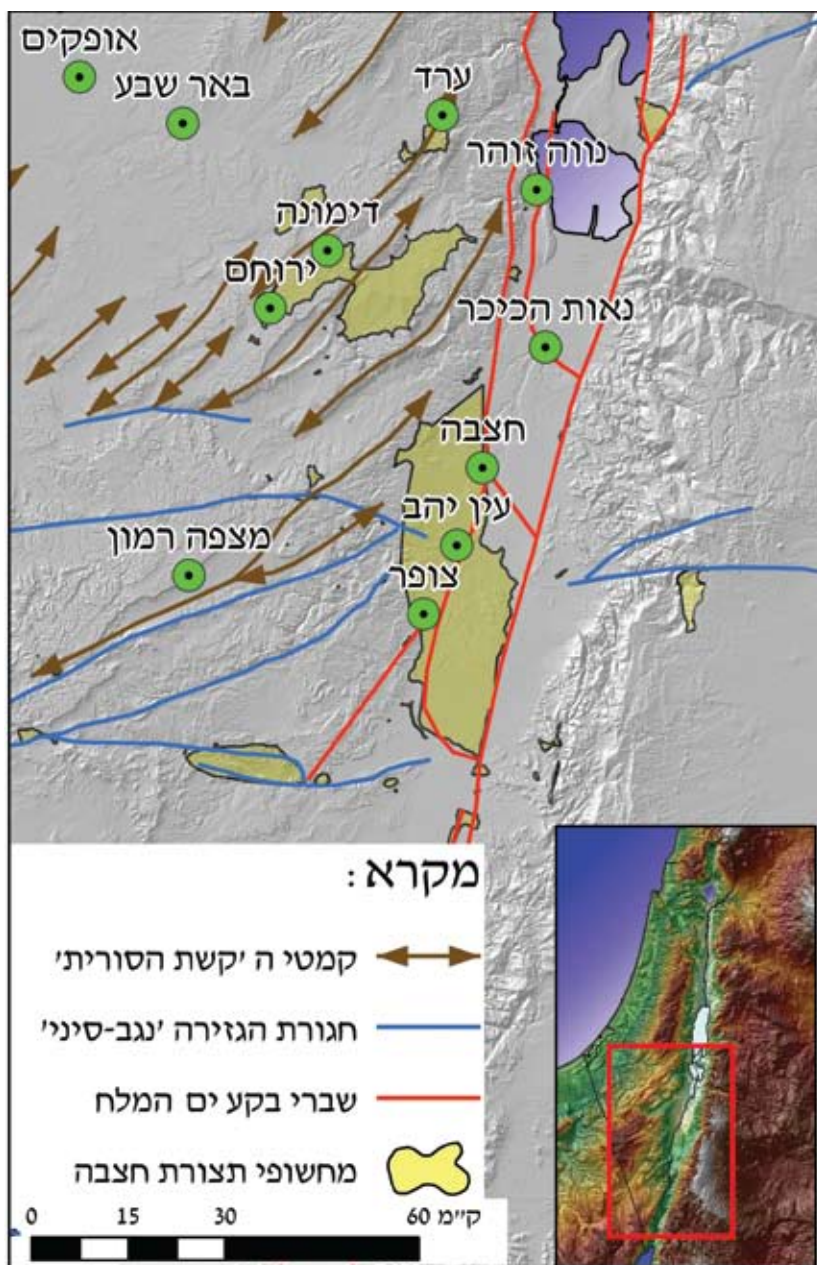
בתחילתה של תקופה זו פעלה ארוזיה נרחבת על הסלעים שנחשפו כתוצאה מנסוגת הים, ופני השטח יושרו על ידי הסרתם של האזורים שהיו מוגבהים באופן יחסי. תוצר הארוזיה, הנראה כיום בנוף כמשטח גידוע רציף, אופקי ברובו, עשוי סלעים מגילים שונים ומכונה 'משטח הגידוע העליון' (או בשמו המקובל יותר בקרב קהילת הגאולוגים בישראל, 'הפנפליין האוליגוקני'). הוא מוכר היטב לכל נוסע מתל אביב בואכה ירושלים כמשטח אופקי רחב המציין את שדרת ההר המרכזית של ישראל. התואר 'העליון' מובא כאן על מנת להבחין בינו ובין משטח גידוע אחר, עתיק יותר (מגיל פרה־קמבריום, לפני 550 מיליוני שנים בקירוב), הנחשף היטב בסביבות הרי אילת והמכונה 'הפנפליין הפרה־קמברי'.

הרבדת חומרי הסחף במערכות הנחלים התקיימה לאורך רוב תקופת המיוקן. סלעים אלו מקובצים כיום ליחידת מסלע אחת, המכונה 'תצורת חצבה'. תנועות העתקה אנכיות לאורך שבריו של בקע ים המלח הובילו מאוחר יותר לכך שסלעים אלו נמצאים ברובם בעומקי קבורה גדולים (עד עשרה ק"מ מתחת לים המלח) וכן להתפתחות הנוף כפי שהוא מוכר כיום בבקע ים המלח.

סלעי תצורת חצבה נחשפים היטב במספר רב של אתרים במרחבי הנגב, לאורך הערבה ובקע ים המלח, במזרח סיני וכן בעבר הירדן המזרחי. הנוסעים דרך הגבעות האדומות המפוזרות לאורך כביש הערבה, בעיקר באזור שבין חצבה לעין יהב, חוצים בדרכם את אזור החשיפה הגדול ביותר של תצורת חצבה בדרום ישראל. מחשופים אלו ועוד רבים אחרים נלמדו ונחקרו, החל משנות השלושים של המאה הקודמת, על ידי חוקרים רבים. בסוף שנות התשעים שימשו סלעי התצורה נושא למחקר בעבודת הדוקטור שלי, שמאמר זה מסתמך עליה.

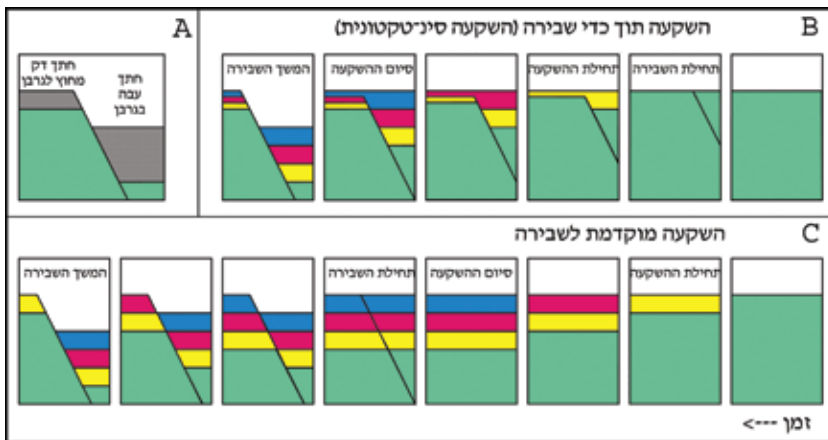
רוב האתרים שבהם תצורת חצבה נחשפת היטב מצויים לאורכו של בקע ים המלח. מחשופים נוספים נמצאים באזור הנגב הצפוני והמרכזי (איור 1). התצורה נחדרה גם במספר קידוחים בדרום ישראל, והיא מוכרת בשטח המשתרע על פני כמה אלפי קמ"ר.

סלעי תצורת חצבה הורבדו בדרך כלל באי־התאמה מעל סלעים של חבורת עבדת (איאוקון) או על גבי יחידות עתיקות ממנה. גיל ההשקעה של התצורה נקבע בעקיפין על ידי סדרה של תצפיות שדה. בסיני ובעבר הירדן המזרחי הורבדה התצורה על גבי דייקים בולתיים המתוארכים לתקופה שלפני 25-19 מיליוני



איור 1: מפת מיקום למחשופי תצורת חצבה בדרום ישראל.

שנים. באזור שבין ירוחם לדימונה נמצאו בין שכבות התצורה עצמות של בעלי חיים חולייתנים, שגילן המוערך הוא כ-17 מיליוני שנים. לאורך הערבה ובמרחבי הנגב הורבדו מעל לתצורת חצבה, בדרך כלל באי-התאמה ניכרת (זוויתית וארוזיבית נרחבת המעידה על פרקי זמן ארוכים של ארוזיה), סלעים של תצורת ערבה (חבורת ים המלח), שגילה פליוקן-פלייסטוקן (תחילתה לפני כ-5.3 מיליון שנה). בעבר הירדן המזרחי נמצאו שפכי בזלת שגילם בין שישה לשמונה מיליוני שנים המונחים ישירות על גבי סלעי התצורה. אוסף היחסים הללו הוביל את רוב החוקרים לקבוע שתקופת ההרבדה העיקרית של תצורת חצבה החלה לפני כ-20 מיליוני שנים והסתיימה לפני כשמונה מיליוני שנים.



איור 2: קורלציה סטרטיגרפית בין חתכי תצורת חצבה בדרום ישראל. (a) חתכים באזור הנגב הצפוני והמרכזי; (b) חתכים באזור גרן כרכום ובערבה; (c) חתך עמודי מוכלל של תצורת חצבה בדרום ישראל.

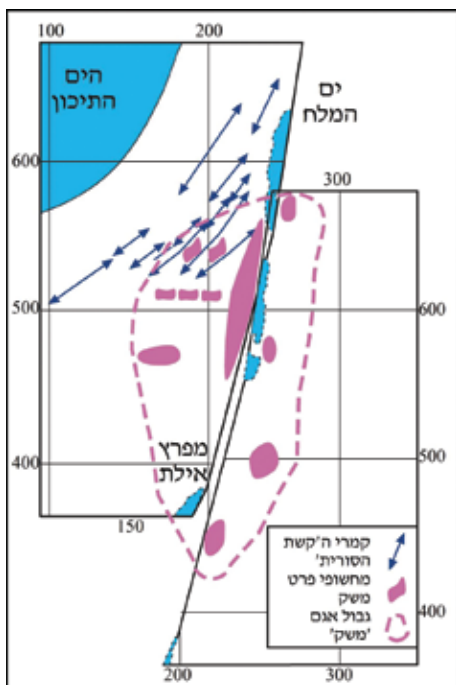
המחשופים הרציפים העבים ביותר של תצורת חצבה מוכרים בבקע הערבה (ממזרח לנחל הערבה) ובגרן כרכום (נחל פארן), שם הם כוללים יחידות מסלע נחליות-יבשתיות (אבן חול, חרסית, סילט וקונגלומרט) וכן יחידות מסלע אגמיות, גיר וחוואר (איור 2). על בסיס החתכים בבקע הערבה ובגרן כרכום חולקה התצורה לפרטים המרחביים הבאים: שחק, משק, גדרון, צפע, רותם וכרכום (איור 2c). החתכים העבים מעל ל-1,000 מטרים בבקע הערבה ובגרן כרכום מעלים את השאלה הבאה (איור 3): האם הרבדת התצורה הייתה בריזמנית לתנועת

תצורת חצבה: תיאור פרטי התצורה ופלאו־גאוגרפיה

השלבים העיקריים בהתפתחות מערכות הניקוז שבהן הורבדה תצורת חצבה הם: (א) הרבדת קונגלומרט, שמרכיביו נגזרו ממקורות מקומיים, במערכות נחלים בעלי אנרגיית זרימה גבוהה (פרט שחק); (ב) הצטברות משקעים אנמיים (פרט משק) ונחליים דקי־גרגיר (פרט גדרון) במערכות ניקוז נרחבות של אנרגיית זרימה נמוכה. מקור הגרגירים בשלב זה כבר לא היה מקומי בלבד; (ג) הרבדה של חתך עבה מאוד, שעיקרו חולות קוורץ וחלוקי 'צור יבוא' (ראו להלן) במערכות נחלים בעלי אנרגיית זרימה גבוהה (פרט רותם). אגן הניקוז של מערכות אלו נמצא הרחק במזרח או בדרום מזרח; (ד) הרבדה של חתך המורכב מחומר סחף שהובל מרחוק יחד עם מרכיבים מקומיים (פרט כרכום), עדות להשתפלות המבנים הטקטוניים ולהתחלת הבליה מחוץ לגרביים.

פרט שחק (כונה בעבר 'קונגלומרט הבסיס') עשוי קונגלומרט גס־גרגיר שמרכיביו בדרך כלל מזויתים ומקור הספקתם קרוב. החלוקים הם בעיקרם חלוקי גיר שנגזרו מיחידות מסלע מחבורות יהודה עד עבדת. פרט שחק מונח באי־התאמה ארוזיבית חווייתית קלה על גבי חבורת עבדת. עוביו של פרט שחק תלוי במבנה התבליט הטופוגרפי שאותו הוא ממלא, ובדרך כלל הוא דק מ־22 מטרים. פרט שחק מייצג את השלבים הראשונים של הרבדת חומרי הסחף על גבי מישור הגידוע העליון, שהיה מישורי ברובו.

פרט משק מאופיין בבסיסו בחילופי שכבות של חרסית וחואר, ובחלקו העליון בשכבות גיר מסיביות היוצרות מצוק. עוביו של פרט משק כ־25 מטרים. הפרט הורבד בקרקעית של אגמי מים מתוקים שהתקיימו בדרום ישראל לאחר מילוי חלק מהתבליט הטופוגרפי על ידי פרט שחק. השכבות הבודדות בפרט משק שומרות על הופעתן (סדר השכבות ועוביין) וכן על הרכבן (הכימי והליתולוגי) על פני מרחקים גדולים (כמה עשרות ק"מ), עדות אפשרית להמשכיותו ואחידותו של גוף מים אחד נרחב שממנו שקעו הסלעים. איור 4 מציג את המחשופים הידועים של פרט משק וכן שחזור משוער של השתרעות האגם ('אגם משק'). אגם כזה מחייב תקופה לחה מאוד בעלת כמות משקעים מקומית גדולה בהרבה מזו של היום או כזו המביאה את מי הנגר ממרחק.

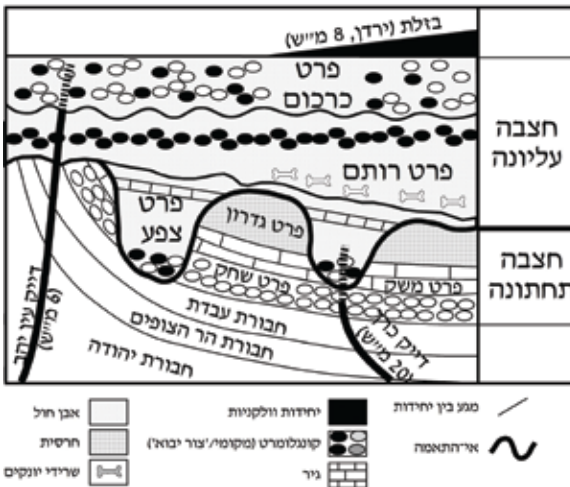
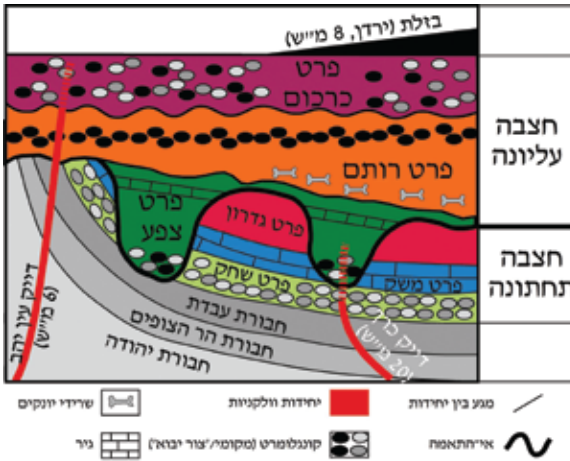


איור 4: מפה פלאוגאוגרפית של מחשופי פרט משק וגבולותיו האפשריים של אגם 'משק', שהשתרע על פני רוב דרום הארץ. המפה מציגה את בקעי ים המלח כשהוא משוחזר לפני תחילת התנועה האופקית (105 ק"מ) לאורך הבקע.

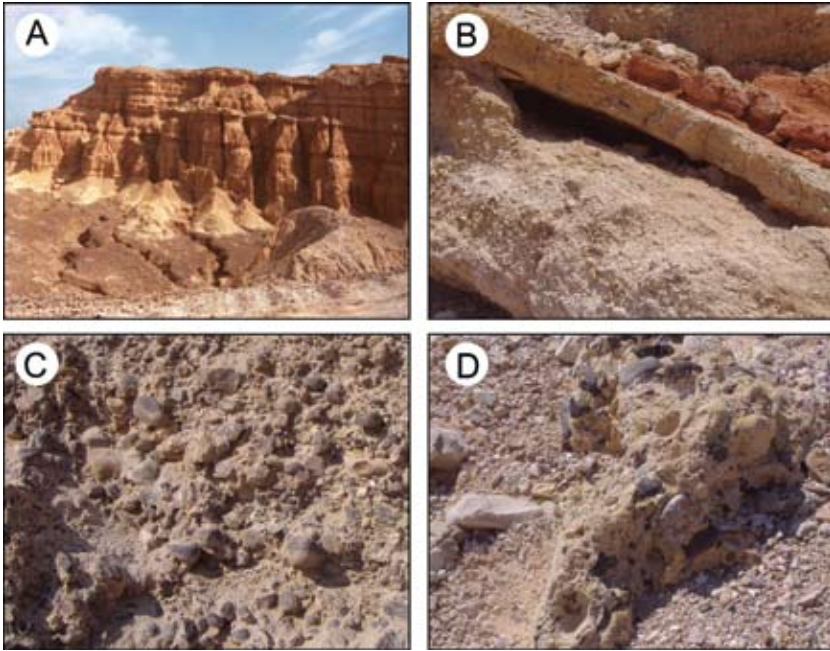
פרט גדרון, המונח בהתאמה על גבי פרט משק, מאופיין בחילופי שכבות עבות של חרסית אדומה (כנראה קרקע) ושכבות דקות של אבן חול דקת־גרגיר. סלעים אלו הורבדו בקרקעית ובשוליים של מערכות נחלים בעלי אנרגיות זרימה נמוכות. עוביו של פרט גדרון במחשופים הנו כ־30 מטרים, אך בקידוחי מים לאורך הערבה תוארו חתכים עבים מ־100 מטרים. פרט גדרון מייצג תקופה ארוכה ויציבה שבה מערכות נחלים הובילו חומרי סחף ממקור מרוחק, דרך אזורנו, אל עבר אוקיינוס התטיס.

בשלב זה של ההיסטוריה חל מפנה ביציבות היחסית של האזור. תנועות הרמה, שמקורן כנראה בקימוט נוסף של ה'קשת הסורית', עודדו שלב בליה נוסף. רצף הפרטים שחק־משק־גדרון גדוע, ועל גבי מישור אי־ההתאמה הארוזיבית והזוויתית שנוצר הורבדו בהמשך הסלעים של בסיס פרט צפע (איור 5). במקומות אחדים אי־ההתאמה כה נרחבת ומהותית עד שכל החתך הקדום של תצורת חצבה וכן מספר תצורות עתיקות ממנה הוסרו, ופרט צפע מונח ישירות על שכבות מגיל קרטיקון.

איור 5: יחסי שדה בין פרטי תצורת חצבה. מוצגות שלוש אי־התאמות: רוחבית בבסיס פרט צפע, בבסיס פרט רותם, והעליונה בבסיס פרט כרכום.

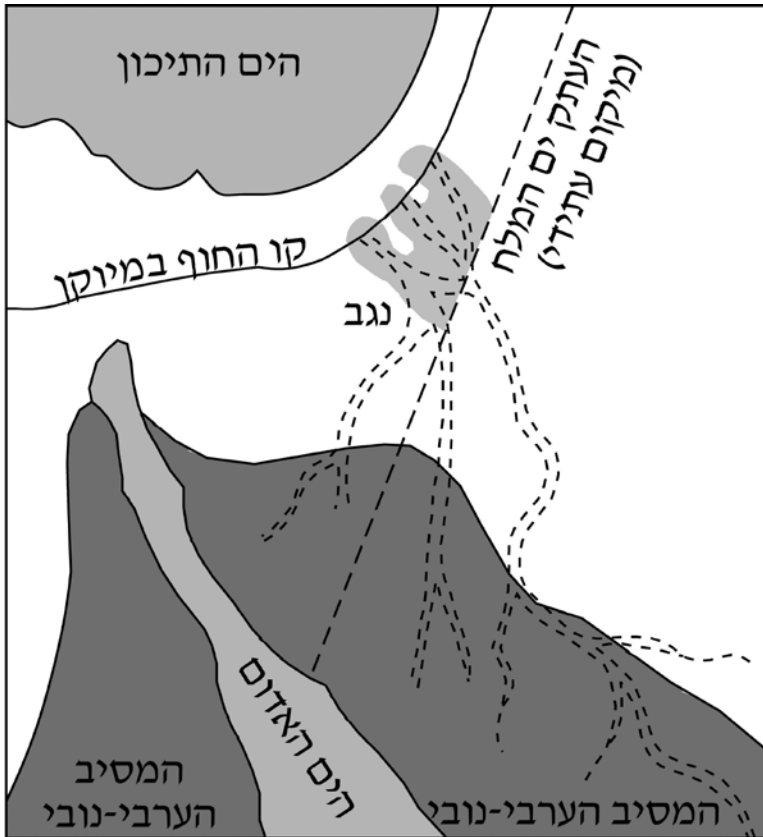


פרט צפע, המונח מעל לא־ההתאמה, מורכב מיחידות המסלע הבאות: בבסיסן שכבות קונגלומרט ומעליהן חילופי חרסית ואבן חול. בחלקו העליון ביותר של פרט צפע מופיע אופק גירי אגמי דק (עד מטר אחד), המשתנה מגיר מסיבי ומצוקי, דרך תרכיזי גיר בתוך חוואר ומסתיים כלפי מעלה בחוואר קשה. רצף השכבות בפרט צפע דומה בחלקו לרצף השכבות של הפרטים שחק-משק-גדרון. ההבדלים ביניהם גאוכימיים ומינרלוגיים בלבד.



איור 6: (a) מחזורי קונגלומרט-חול-סילט-חרסית בגרבן כרכום; (b) מחשוף נחל חימר (נצ"מ 183/060). בסיס החתך החשוף, המונח בהתאמה על גבי סלעי איאוקן, מורכב מפרט שחק, פרט משק ופרט גדרון; (c) מחשוף נחל לוט (נצ"מ 184/060), המציג חלקי חתך גבוהים של תצורת חצבה (פרט כרכום); (d) אבני חול צהובות, גסות-גרגר, וקונגלומרט 'צור יבוא' במחשוף נחל פרסה שלאורך חופי האגן הדרומי של ים המלח (נצ"מ 184/069).

אירוע טקטוני נוסף, חלש בעוצמתו מזה שבבסיס פרט צפע, הוביל להתפתחותו של שלב בליה מחודש. על גבי משטח בליה זה הורבדו סלעי **פרט רותם**. החתך הלייתולוגי של פרט רותם מורכב ממחזורים רבים של רצפי קונגלומרט-חול-סילט-חרסית (איור 6) ועוביו המדוד כ-1,000 מטרים (איור 2b). החלוקים בפרט רותם הם בעלי קטרים שונים ומגיעים עד קוטר של כמה עשרות סנטימטרים. הם מאופיינים בלמינות דקיקות, שאינן נמצאות בטיפוסי הצור האחרים המוכרים בארץ. לסלע כזה אין מקור ידוע בתחומי ישראל, וכבר בשנת 1965 הוצע אפוא לכנותם 'חלוקי צור יבוא'. הלמינות הדקיקות בצור מכילות מאובנים חד-תאיים (פורמניפרים) מגיל אאוקן. מקורם הוגדר על סמך מחשופים של סלעי צור דומים בדרום מזרח ירדן.



איור 7: מפה פלאוגאוגרפית של תקופת פרט רותם. הנחלים הגדולים זורמים מדרום מזרח לצפון מערב וחוצים את האזור המהווה היום את בקע ים המלח.

פרט רותם מתעד לפיכך מערכות זרימה נרחבות, שהובילו חלקיקים גסי-גרגיר ממרחק רב בתקופה שבקע ים המלח לא היה קיים (איור 7).

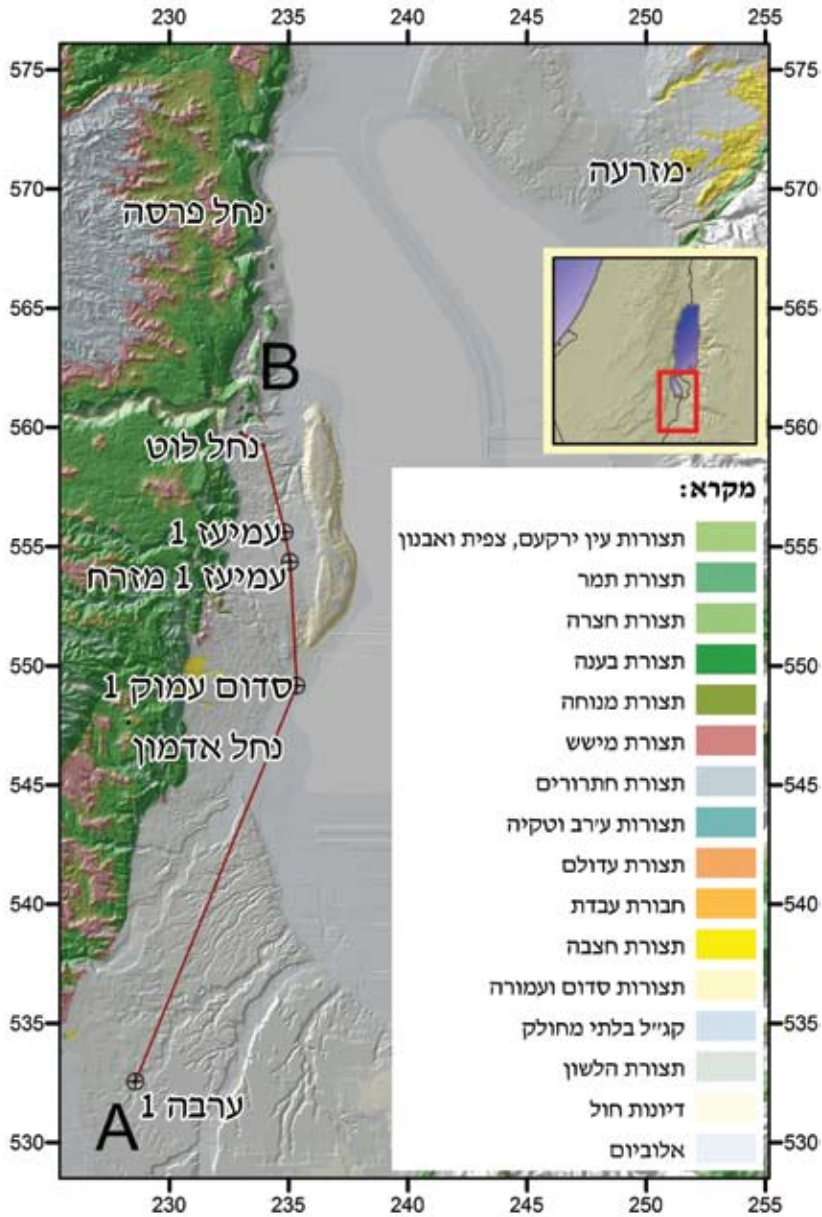
פרט כרכום מורכב מרצפים מחזוריים של חול גסי-גרגיר וקונגלומרט בהרכב מגוון, חלוקי יצור יבוא, חלוקי צור אחרים (כגון צור מישאש), חלוקי פוספוריט וגיר וכן מספר חלוקים ממקור גרניטי (כנראה מהרי אילת). הוא כונה בעבר 'קונגלומרט הגג'. השונות בהרכב הליתולוגי ובגודל הגרגיר של המרכיב החולי בפרט כרכום מעידה על מחזור של מקטעי חתך קדומים, עדות אפשרית לתחילתה של ההשתפלות באגנים השונים ולתחילתה של הבליה החריפה בשוליהם.

תצורת חצבה בדרום ים המלח

באזור החוף הדרום מערבי של ים המלח נמצאה תצורת חצבה במספר מחשופים מבודדים (נחל פרסה, נחל חימר, נחל לוט ונחל אדמון), והיא נחדרה במספר קידוחי נפט עמוקים (קידוח עמיעז 1, קידוח עמיעז 1 מזרח, קידוח סדום עמוק 1 וקידוח ערבה 1) (איורים 8 ו-9). כל המחשופים שיתוארו וכן קידוחי עמיעז (עמיעז 1 ועמיעז 1 מזרח) מצויים במבנה ביניים של בקע ים המלח (בלוק עמיעז), התחום בין ההעתק הראשי של הבקע במערב להעתק השוליים המשני במזרח (העתק סדום). בבלוק עמיעז חשופים בדרך כלל על פני השטח סלעים מחבורות הר הצופים ועבדת, ומחשופים מבודדים של תצורת חצבה מצויים בחלקו המערבי ביותר. הבלוק המרכזי של הבקע, שבו מצוי קידוח סדום עמוק 1, השתפל לעומקים גדולים יותר, ותצורת חצבה מצויה שם לפחות 4,700 מטרים מתחת לפני השטח (איור 9). קידוח ערבה 1 מצוי בבלוק אמציה, שאף הוא בלוק ביניים המורם יחסית לבלוק המרכזי של הבקע. החתכים שנחדרו בבלוקים אלו מייצגים כולם אזורים שעברו הנמכה טקטונית על גבי העתקי הבקע (הראשי או משני), ולפיכך משמשים כמציינים חשובים ביותר לתיעודם של שלבי השתפלות בבקע.

מחשופים

בחלק הדרום מערבי של מישור עמיעז (באזור נחל אדמון ונחל חימרית, איור 8) נמצאו מחשופים עבים של תצורת חצבה שכונו בתחילה תצורת 'הדום' ההר התחתונה, ומאוחר יותר שויכו לפרט גדרון בתצורת חצבה. לאחרונה הוצע לחדד את הזיהוי במחשופי נחל חימרית ובסביבותיו לפרטים הבאים: החלק העליון ביותר של פרט צפע והחלק התחתון ביותר של פרט רותם (בעובי של כ-30 מטרים). במחשוף זה לא ניתן לזהות את היחידות המונחות בבסיס תצורת חצבה. בנחל חימר ונחל לוט, הנמצאים מדרום לנווה זוהר, נמצאו מספר מחשופים מבודדים של התצורה (איור 8), וזאת החל מבסיסה, המונח בנחל חימר בהתאמה על גבי סלעים מחבורת עבדת והכולל שם את הפרטים שחק, משק וגדרון (איור 6b), ועד לחלקיה הגבוהים יותר, החשופים בנחל לוט, והכוללים שכבות מהפרטים רותם וכרכום (איור 6c). ממדידות שדה עולה כי עובי החתך הכולל המצוי שם



איור 8: מפה גאולוגית של דרום ים המלח (Sneh et al., 1998) ומיקומם של מחשופי תצורת חצבה וקידוחי הנפט העמוקים.

עולה על 500 מטרים, עובי דומה לזה שנחדר בקידוחי עמיעז הסמוכים, המצויים באותו הבלוק. בין מחשופי נחל לוט וחימר לקידוחי עמיעז נשמרת נטיית השכבות גם בתת־הקרקע, ולפיכך הם מהווים כולם רצף שכבות אחד.

בין נחל פרסה לנווה זוהר (איור 8) נמצאו מחשופים מבודדים של שכבות אבן חול צהובה גסת־גרגיר וכן קונגלומרט עשיר בחלוקי 'צור יבוא' (איור 6d), בעובי כולל של כמה עשרות מטרים. המחשופים הללו זוהו מלכתחילה כשייכים לתצורת חצבה, אך המיקום המרחבי שלהם הובילו להגדרת פרט חדש בתצורה (פרט פרסה). מאוחר יותר, על בסיס החלוקה המחודשת של התצורה במרחב, ניתן היה לזהות באתרים אלו את הפרטים רותם וכרכום. גם במחשוף זה לא היה אפשר לזהות את היחידות המונחות בבסיס התצורה. בנחל פרסה מצוי המחשוף במרחק של עשרות מטרים מההעתק הראשי של הבקע, ומאסף החלוקים שם אינו כולל מרכיבים שנגזרו מהיחידות הבונות את קיר ההעתק (חבורת יהודה), עדות להרבדת החתך ללא קשר ליצירת המצוק ולפעילות הטקטונית לאורך השבר הראשי של הבקע.

במספר מקומות מצדו המזרחי של ים המלח (בשטח ירדן), למשל באזור העיירה מזרעה (Mazra'a) שבסמוך ללשון ים המלח (איור 8), חשופה תצורת דנה (Dana), התואמת בגילה את תצורת חצבה. הפרט התחתון בתצורת דנה מונח בהתאמה על גבי סלעים מגיל איאוקן. החתך כולו מצוי שם בתוך קער רחב הנשען על הקמר של אד דירה (Adh Dhira). בחלק המערבי ביותר של הקער נמצא חתך רציף של התצורה, המורכב מחילופי קונגלומרט ואבן חול וכן משכבות של גיר, ועוביו הכולל כ־130 מטרים. דייק בזלתי חדור אל תוך החלקים הנמוכים של התצורה, והוא תוארך בשיטת K-Ar לתקופה שלפני כ־20.3 מיליוני שנים. יחסי שדה אלו היו הבסיס לקביעה שתצורת חצבה החלה להצטבר לפני מעט יותר מ־20 מיליוני שנים.

כל המחשופים שתוארו לעיל מציגים תמונה זהה לזו שנמצאה במרחב הנגב והערבה, המתעדת את הרבדת החתך באופן אחיד במרחב, ללא קשר ישיר להעתקי הבקע ולפעילות על גביהם.

קידוחים עמוקים

קידוח ערבה 1 נקדח בשנת 1959 לעומק של למעלה מ־2,700 מטרים מתחת לפני השטח, ובמשך למעלה מעשור היה היחיד שחדר את סלעי המילוי של הבקע. קידוח זה היה כר נרחב לסדרת עבודות שתיארו את החתך בקידוח, ועד היום הדעות חלוקות באשר לעובייה של תצורת חצבה בקידוח זה. בשנת 1976 נקדח קידוח עמיעז 1, שחצה את שכבות תצורת חצבה מעומק 2,695 מטרים ועד לעומק 3,390 מטרים מפני השטח (איור 9). על סמך הכרת החתך בקידוח עמיעז 1 הוצע בעבר שתצורת חצבה לא נחדרה כלל בקידוח ערבה 1 וכי כל החתך שייך לתצורות צעירות ממנה. הכרה מפורטת יותר של היחידות הצעירות מתצורת חצבה הובילה להצעה כי בקידוח ערבה 1 נחדרו למעלה מ־2,200 מטרים של סלעי תצורת חצבה (מעומק של 538 מטרים ומטה). עבודה מפורטת המשווה בין מאסף המינרלים הכבדים (מינרלים כדוגמת ציקרון, רוטיל, טורמלין ועוד, שכולם קשי תמס ולפיכך הנם כלי נוח להשוואה בין דוגמאות) לבין המינרלוגיה הכללית של דוגמאות מקידוח ערבה 1 (מעומק 450 מטרים ומטה) מצאה שהם דומים באופן מובהק לסלעי תצורת חצבה במחשופים, ושונים באופן מהותי מתצורות צעירות ממנה. בכך קיבעה עבודה זו את ההכרה שקידוח ערבה 1 אכן חודר אלפי מטרים של תצורת חצבה, ושבסיס הקידוח אינו חוצה את בסיס התצורה. מחקר שבדק את גלעיני הקידוח שהוצאו מקידוח ערבה 1 מלמד במפורש שקידוח זה חודר את השכבות של תצורת חצבה כבר מעומק 253 מתחת לפני השטח. לפיכך עובי תצורת חצבה בקידוח הנו לפחות 2,485 מטרים, מתוכם 1,650 מטרים של פרט כרכום וכ־835 מטרים של פרט רותם (איור 9). זוהי אפוא העדות הישירה שהביאה למסקנה כי קיימת השתפלות מובדלת במהלך הרבדתו של פרט כרכום, לאורך שבריו של בקע ים המלח.

בתחילת שנות התשעים נקדחו שני קידוחים נוספים במרחב של דרום ים המלח. הקידוח הראשון, קידוח עמיעז 1 מזרח (איור 8), חודר את תצורת חצבה מעומק 3,032 ועד לעומק 3,633 מטרים (איור 9). בדומה לקידוח עמיעז 1, גם כאן מונחת תצורת חצבה על גבי תצורות מחבורת הר הצופים, ונמצאו שכבות קונגלומרט, אבן חול, חוואר וחרסית הדומים בהופעתם לסלעים החשופים בנחלים לוט וחרמר. הקידוח השני, קידוח סדום עמוק 1, חודר את תצורת חצבה מעומק 4,735 ועד

לבסיס הקידוח בעומק 6,448 מטרים. על בסיס דוגמאות הגלעין שהוצאו מהקידוח נקבע כי החלק העליון בחתך התצורה הנו פרט רותם, ואילו החלק התחתון הנו פרט גדרון. לפי מיטב הבנתנו כיום, הקידוח לא חדר אל מתחת לבסיס תצורת חצבה, אך הוא אינו מצוי עמוק מתחתיו. בדומה לתיאור המחשופים, גם נתוני הקידוחים לא העלו תצפיות שאינן מתיישבות עם התמונה המרחבית שתוארה לעיל, להפך – הם תומכים במודל המרחבי שהוצע ואף מרחיבים אותו.

מאספים של אבקני פרחים (פולן) בקידוחים בדרום ים המלח: גיל, אקלים וקצבי סדימנטציה

בקידוחים ערבה 1, עמיעז 1 וסדום עמוק 1 זוהו מאספי פולן ייחודיים המאפשרים קביעת גיל ושחזור תנאים אקלימיים. לוח 1 מציג את חלוקת החתך למאספי הפולן וכן את חלוקת התצורה לפרטיה. החלוקה לפי הפולן מאשרת את חלוקת החתך לפרטים בתצורה, שהתבססה על זיהוי המסלע בלבד. היחס שבין פרטי התצורה לבין האקלים המשוחזר עבור כל אחת מתקופות מאספי הפולן מלמד כי במהלך הרבדת הפרטים שחק, משק וגדרון התקיים באזורנו אקלים סוב־טרופי יבש, בתקופת ההרבדה של פרט רותם השתנה האקלים לסוב־טרופי רטוב עם יערות ואילו בתקופת פרט כרכום היה האקלים בעיקרו חם ויבש. לפי גילם של מאספי הפולן ועובי החתך בקידוחים השונים חושב קצב ההרבדה של חלקי החתך השונים באזור ים המלח. בתקופת המיוקן המוקדם עד למחצית המיוקן התיכון קצב ההרבדה אינו עולה על 0.1 מטרים לכל 1,000 שנים, ואילו לאחר מכן, עד המיוקן המאוחר, קצב ההרבדה גבוה יותר והוא מגיע עד ל-0.5 מטר לכל 1,000 שנים. קצבי ההרבדה הללו, המתארים במישרין את קצב השקיעה היחסית של הבקע, דומים לאלו של אגן יבשתי. הם נמוכים מהמצופה מקצב הרבדה בבקע המשתפל כתוצאה מפעילות טקטונית ('הרבדה סינ־טקטונית'), כלומר עיקר ההרבדה של תצורת חצבה לא הוכתב על ידי השתפלות טקטונית של בקע הערבה, שנוצר לאחר הרבדת תצורת חצבה.

לוח 1: פלינוזונים אקלימיים

על בסיס הופעתם של חלקיקי פולן (אבקני פריחה) בסלעי חתך המילוי של בקע ים המלח הוגדרו באזורנו שלוש תקופות אקלימיות שונות עבור תקופת המיוקן (Horowitz, 1992).

תקופה	צמחייה ואקלים	פלינוזון
מיוקן מאוחר (Tortonian - Messinian); לפני 10-5.3 מיליוני שנים)	צמחייה חסרת עצים של אקלים מדברי, חם ויבש	Mc
מיוקן תיכון (Langhian - Serravalian); לפני 16-10 מיליוני שנים)	צמחיית יערות לחים באקלים סוב־טרופי רטוב	Mb
אוליגוקן מאוחר עד מיוקן מוקדם (Aquitanian - Burdigalian); לפני 25-16 מיליוני שנים)	צמחיית סוואנה באקלים סוב־טרופי יבש	Ma

סיכום

תצורת חצבה, החשופה על פני רוב הנגב והערבה, מופיעה בדרום ים המלח בסדרה של מחשופים מבודדים ונחדרה במספר קידוחי נפט עמוקים. על בסיס הרכב המסלע ואי־התאמות בחתך, התצורה מחולקת לשישה פרטים (שחק, משק, גדרון, צפע, רותם וכרום). כל מחשוף התצורה בדרום ים המלח מצויים במבני ביניים של הבקע, השייכים למכלול שבירת השוליים של בקע ים המלח. החתך החשוף בדרום ים המלח, וכן זה שנחדר בקידוחים העמוקים, זהים לחלוטין לזה שהוגדר ותואר במחשוף הערבה והנגב. דמיון זה הנו עדות להרבדה הרציפה והאחידה במרחב של תצורת חצבה, לכל פרטיה, כולל במרחב של דרום ים המלח. היא גם מעידה על כך שההשתפלות בבקע החלה רק לאחר הרבדת מרביתו של חתך התצורה (לפחות עד לחלקים הגבוהים ביותר של פרט רותם), וייתכן שאף לאחר הרבדת כלל התצורה.

לאחר נסיגת הים האיאוני התפתח באזורנו משטח גידוע נרחב, שעליו הורבדו החלקים התחתונים של תצורת חצבה (הפרטים שחק, משק וגדרון). פרטים אלו מציינים שקט יחסי שבמהלכו התקיים ברוב הנגב והערבה נוף מתון באופן יחסי. מילוי התבליט הטופוגרפי הוביל לתחילתה של הובלה במערכות נחלים נרחבות ולהיווצרותם של גופי מים עומדים (אגמים), שבהם שקעו סלעי הפרטים משק וגדרון. אירוע טקטוני מהותי הוביל להסרה החלקית של החתך העתיק ולהתפתחותו של משטח גידוע נוסף, שעליו הורבדו סלעי פרט צפע. אירוע טקטוני שלישי, חלש יותר באופיו, התרחש במעבר מפרט צפע לפרט רותם. מרכיביו של פרט רותם מעידים במפורש על מקורות הגרירים והחלוקים בחתך, מקורות מרוחקים שמרכיביו עברו מרחקי הובלה גדולים במערכות ערוצים בעלי אנרגיית זרימה חזקה. פרט כרום מתעד (דרך מרכיביו) את תחילתה של פעילות אנכית על שברי הבקע ותחילת ההשתפלות של החתך כולו אל תוך הבקע המתפתח.

רשימת מקורות וקריאה נוספת

- זילברמן, ע'. 1991. 'התפתחות הנוף בנגב המרכזי, הצפוני והצפון מערבי בניאוגן ובקוורטר', עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים; המכון הגאולוגי, דו"ח GSI/45/90.
- עגנון, א'. 1983. 'התפתחות אגני השקעה באזור דרום מצוק ההעתקים המערבי של ים המלח', עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית בירושלים.
- קלבו, ר'. 2000. 'סטרטיגרפיה ופטרולוגיה של תצורת חצבה בערבה ובנגב: השלכות לגבי התפתחות אגני ההשקעה והמורפוטקטוניקה של בקע ים המלח', עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים; המכון הגאולוגי, דו"ח GSI/22/02.
- Gardosh, M. 1991. 'The Hazeva Formation in the Dead Sea basin', *The Israel National Oil Co., LTD, Doc. 32*.
- Garfunkel, Z. & Horowitz, A. 1966. 'The Upper Tertiary and Quaternary Morphology of the Negev, Israel', *Israel Journal of Earth Sciences* 15: 101-117.
- Horowitz, A. 1992. *Palynology of Arid Lands*. Amsterdam: Elsevier.