

# המדידה המדויקת של ההסטה השמאלית לאורך בקע ים המלח

## בערבה

מיכאל בייט<sup>(1)</sup>, אמיר שגיא<sup>(1)</sup>, עמית מושקין<sup>(1)</sup> וחנון גינת<sup>(2)</sup>

המאמר מוקדש לזכרו של מורנו ד"ר נחמן שולמן אשר ביקש למצוא את הדייק המוסט על ידי העתק בקע ים המלח כדי לאמת את ההסטה השמאלית.

### תקציר

בקע ים המלח (Dead Sea Transform) מהווה את הגבול בין הלוח האפריקאי ללוח הערבי. ההסטה לאורכו שמאלית, כלומר הצד המזרחי מוסט צפונה לעומת הצד המערבי. עבודה זאת התמקדה במקטע של העתק הבקע שנמצא בערבה מדרום לים המלח. העבודה מתייחסת לשני העתקים: העתק הערבה או העתק ים המלח, המערבי, והעתק פינן או העתק אל-קוויארה, המזרחי. מסקנה זו התבססה בעיקרה על שלוש השוואות: (1) דמיון של ממצאי הנחשת בבקעת תמנע ובפינן בירדן; (2) המשכיות של העתק תמד המופיע בנגב להעתק דנה בירדן. (3) אי-התאמה הדרגתית של התצורות הקמבריות (לפני 485–541 מיליון שנה). במאמר זה אנחנו מציעים כי המשכו של דייק דולריטי שמופה ותוארך בהר עמרם ובבקעת תמנע מגיל קמבריון מוקדם (532 מיליוני שנים) נמצא גם בג'בל סומר אל-טייבה בדרום-מערב ירדן, כפי שעולה מעבודת מחקר של המחברים. דייק זה עשוי לשמש סמן מדויק לכמות ההסטה השמאלית לאורך העתק הערבה. עוביו של הדייק הדולריטי בירדן כ-20 מטר, והוא חדור בסלעים הוולקניים הריוליטיים של תצורת איאמיר בג'בל סומר אל-טייבה. מהבחינה הגיאוכימית והגיאוכרונולוגית הוא זהה לדייק הדולריטי בהר עמרם, החדור בריוליט עמרם, ומהווה את המשכו המזרחי ללוח הערבי. מכאן, שההסטה האופקית לאורך העתק הערבה היא 85 ק"מ. נוסף על כך, קיימת הסטה של הר תמנע לאורך העתק פינן ממערב לג'בל חנה בירדן ב-24 ק"מ נוספים. ההסטה בין הר תמנע לג'בל חנה מתבססת על הדמיון בין הסלעים הנחשפים בהם. מכאן, שההסטה של הר תמנע בבקע ים המלח בקטע בין ים המלח למפרץ אילת לאורך שני ההעתקים היא 109 ק"מ.

---

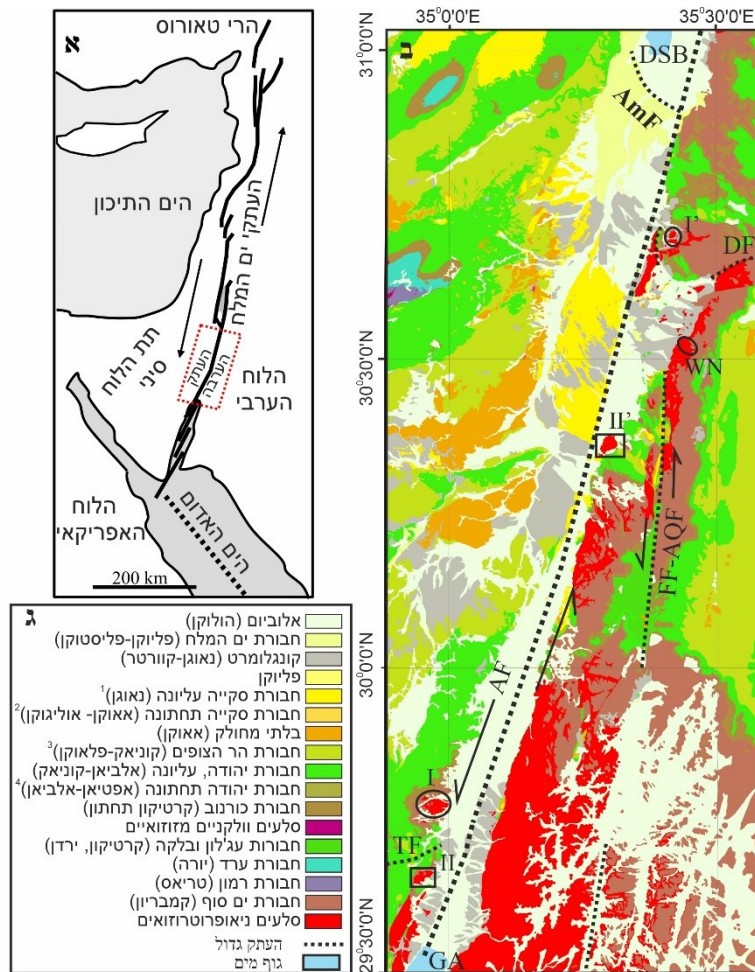
1 - המכון הגיאולוגי

2 - מו"פ מדבר ים המלח

## מבוא

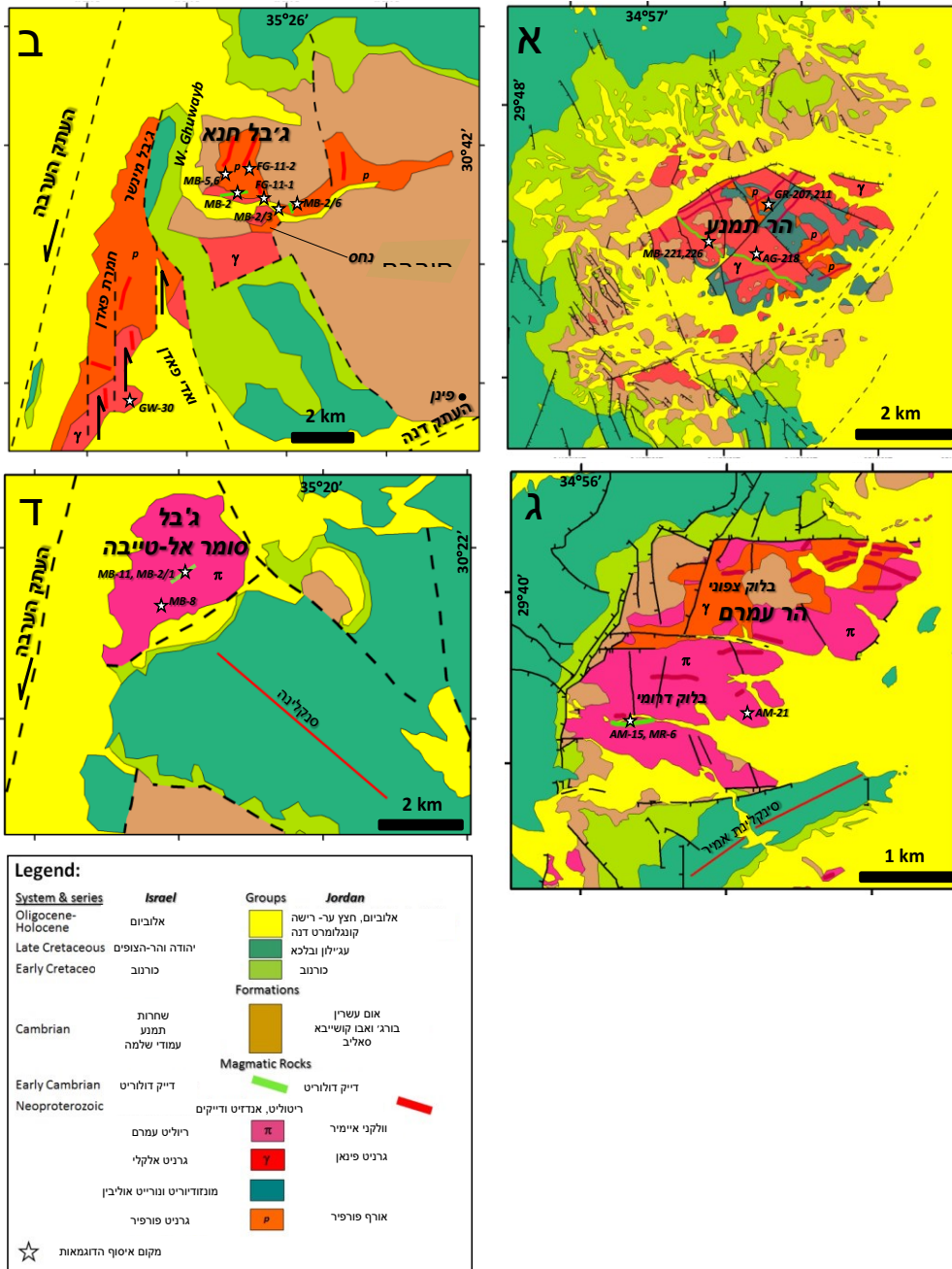
המערכת של בקע ים המלח (Dead Sea Transform), שהיא הגבול בין הלוח הערבי ללוח האפריקאי (תת-לוח סיני), משתרעת לאורך כ-1,000 ק"מ, מים סוף בדרום להעתק המזרח אנטולי בהרי הטאורוס בצפון (איור 1א) (Quennell, 1958; Garfunkel, 1981). המסקנה כי ההסטה האופקית השמאלית בין שני הלוחות לאורך בקע ים המלח היא מעל ל-100 ק"מ מתבססת על ניתוח של נתונים גיאולוגיים וגיאופיזיים. עד כה לא מופו גופי סלע משני צידי הבקע שיכולים לשמש סמן מדויק להסטה האופקית הכוללת.

מספר חוקרים (למשל: Quennell 1958; Freund et al., 1970; Garfunkel, 1981) הציעו הסטה אופקית שמאלית לאורך בקע ים המלח מהרי הטאורוס בטורקיה עד למפרץ אילת (איור 1א), והתבססו על הסטרטיגרפיה של סלעי המשקע ועל שיקולים שקשורים למבנה, כמו המשכיות העתקים קדומים שכיוונם מערב-מזרח משני צידי הבקע, כדוגמת העתק תמד בישראל והעתק ואדי דנה בירדן. על סמך זה העריכו החוקרים הסטה אופקית כוללת של כ-105 ק"מ בקטע של הבקע מדרום ללבנון, שמתחלקת בין מספר העתקים עם הסטות שונות. בשוליים המערביים של דרום בקע ים המלח, למשל במזרח סיני, נמדדה הסטה אופקית שמאלית מצטברת של 24 ק"מ על בסיס העתקה של דייקים שתוארכו כמיוקניים (Baldrige et al., 1991) וגופי מחדר עתיקים (Bartov et al., 1980). תארוך הדייקים כמיוקניים (22 מיליון שנה) הוביל למסקנה כי פעילות ההעתקה לאורך בקע ים המלח תחילתה במיוקן המוקדם לאחר חדירת דייקים אלה. הוצע (Segev, 1984) כי בערבה ההסטה השמאלית מתחלקת בין שני אזורי העתקה, העתק הערבה או העתק ים המלח והעתק פינן (איור 1ב), אולם הכמות המדויקת של ההסטה לאורך כל אחד מההעתקים טרם נמדדה.



איור 1. בקע ים המלח ומקטעי באזור הערבה. (א) קונפיגורציה טקטונית באזור הלבנט. הלוח הערבי נע צפונה יחסית לתת-הלוח של סיני, והתנועה מתבטאת בגזירה אופקית שמאלית על מערכת העתקי ים המלח; (ב) מפה גיאולוגית של המקטע הדרומי של בקע ים המלח, המבוססת על המיפוי של Sneh ואחרים (1998). AF. העתק הערבה, FF-AQF העתק פינן, TF העתק תמד, DF העתק דנה, GA מפרץ עקבה/אילת, DSB אגן ים המלח, AmF העתק אמציהו, WN ואדי נמלה, II הר עמרם, III סומר אל-טייבה, I הר תמנע, I' ג'בל חנה.

הודות להסכמי השלום בין ישראל לירדן (26 באוקטובר 1994) התאפשר לעבוד על סלעי המסד העתיקים משני צידי הבקע במטרה לבצע מדידות מדויקות של ההסטות המצטברות בערבה. בעבודה הנוכחית אנו מציגים ניסיון למדידה של ההסטה השמאלית המצטברת לאורך שני ההעתקים, המתבססת בעיקר על הזריקה השמאלית של דייק דולריטי מהקמבריון המוקדם החודר לסלעי התשתית הקודמים לו, שגילם 814–580 מיליון שנה. הר עמרם והר תמנע בשולי הבקע המערביים (איור 1) בישראל קורלטיביים לג'בל סומר אל-טייבה ולג'בל חנה בשוליים המזרחיים, בירדן. מיפוי גיאולוגי מפורט משני צידי הבקע (איור 2, Beyth et al., 1999, 2012; Barjous, 1995; Rabba', 1994) ומתאמים פטרולוגיים וגיאוכרונולוגיים של סלעי המגמה אפשרו את ביצוע מדידת ההסטה.



איור 1. מפות גיאולוגיות מוכללות המתבססות על מפות הרפנס. הכוכבים מציינים נקודות דגימת הסלעים. (א) בקעת תמנע (Beyth et al., 1999); (ב) ג'בל חנה (Rabba', 1994); (ג) הר עמרם (Beyth et al., 1999); (ד) ג'בל סומר-אל טייבה (Barjous, 1995); (et al., 2012).

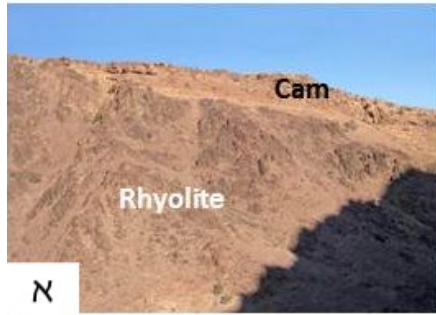
## הדייקים הדולריטים והסלעים המגמטיים הפרהקמבריים בהר תמנע ובהר עמרם

הסלעים הפלוטוניים החשופים בהר תמנע הם הקצה הצפוני של המסיב הערבי-נובי בשולי הבקע המערביים. קיים כאן מגוון רחב של טיפוסים סלע מגמטיים בתא מגמטי שנוצרו בהתגבשות הדרגתית של מגמת אם, שמקורה במעטפת (Beyth et al., 1994a). תא מגמטי זה נוצר לפני כ-610 מיליוני שנים. דייק דולריטי, יחיד בהר תמנע, שעוביו 30 מטר בכיוון צפון-מערב, אלכסוני לבקע, שגילו 532 מיליוני שנים, קמבריון מוקדם (Beyth and Heimann, 1999), חדר לגרניט שהיה סדוק וחדור בין הדייקים העתיקים ממנו (Beyth et al., 1994b). הדייק הדולריטי איננו חודר לתצורת עמודי שלמה, הקמברית העתיקה ביותר, והוא גדוע על ידי מישור הגידוע (peneplain). דייק דולריטי בכון מערב-מזרח מופה גם בגוש הדרומי של הר עמרם חדור בריוליט עמרם (איור 2; Beyth et al., 1994a, 2012; Be'eri-2003). הריוליט בהר עמרם תוארך ל-606 מיליוני שנים (Be'eri-2003; Kessel et al., 1998; Mushkin et al., 2003). הר עמרם נמצא 12 ק"מ דרומה להר תמנע (איור 1ב). גם בדרום-מערב ירדן תוארו דייקים דולריטיים, ותוארכה דוגמה אחת מוואדי רמה באשלגן-ארגון ל-545±13 מיליוני שנים (Jarrar, 2001).

## המתאם בין הקומפלקס המגמטי בהר עמרם לג'בל סומר אל-טייבה והקומפלקס

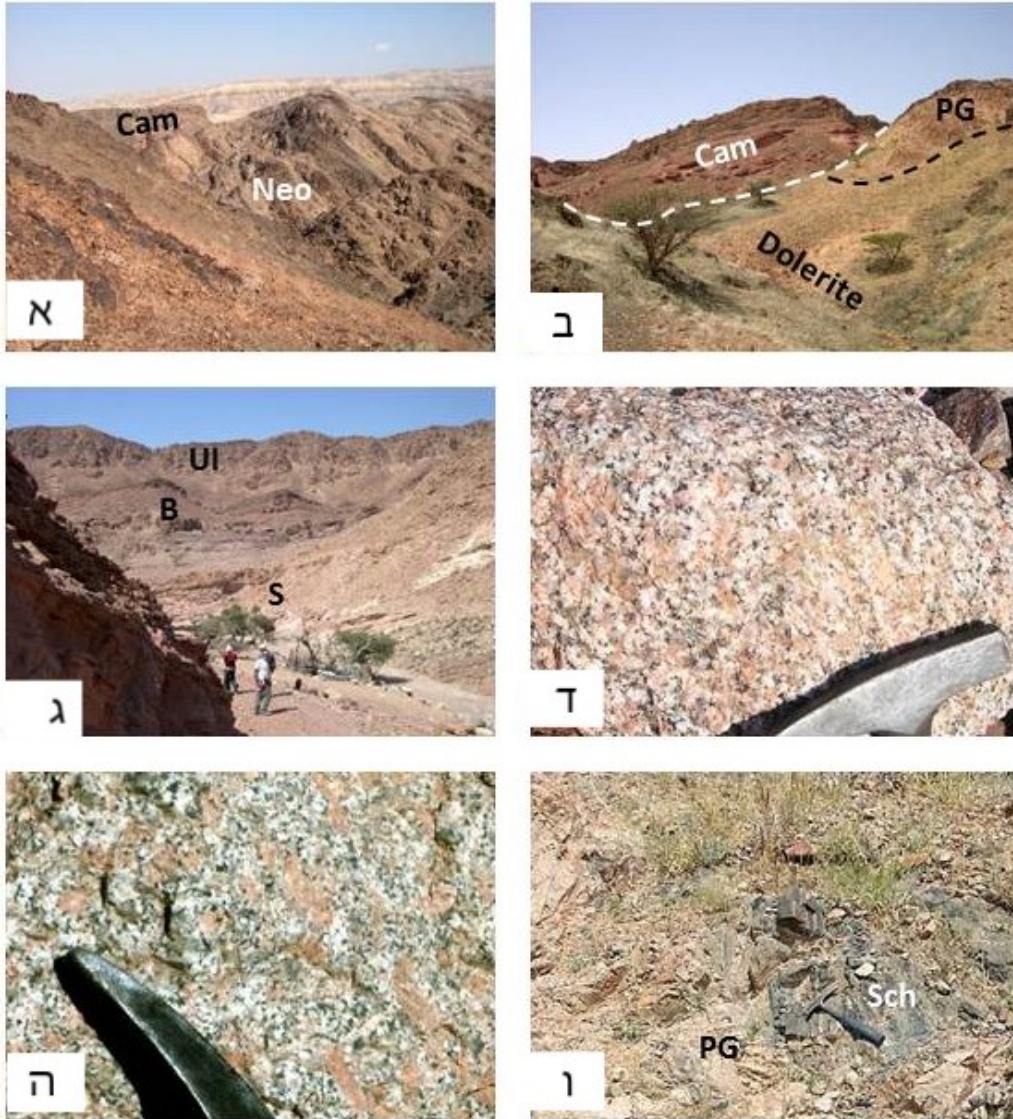
### המגמטי בתמנע לג'בל חנה

ג'בל סומר אל-טייבה (איורים 1ב ו-2ד) הוא מחשוף מעוין ששטחו 8 קמ"ר. הוא נמצא 412 מטר מעל לפני הים ובמרחק של 1.5 ק"מ מזרחית להעתק הערבה, ובנוי מזרמי ריוליט בצבע ורוד (איורים 3ב ו-3ג) של יחידת איאמיר. המחשוף מוקף במניפות אלוביאליות מלבד מדרום, שם מופו קערים (סינקלינות) של אבני החול של חבורת כורנוב ואבני גיר, קירטון, חוואר וצור של חבורות עג'לון ובלקה (Barjous, 1995). קערים אלה דומים לקער אמיר מדרום להר עמרם (Beyth et al., 2012). חדירות של דייקים בג'בל טייבה נדירות, למעט דייק דולריטי בלוי בעובי של כ-20 מטר בכיוון צפון 50° מזרח, שמופה במסגרת העבודה הנוכחית. המתאם בין הדייק הדולריטי בג'בל סומר אל-טייבה לדייק הדולריטי בהר עמרם (איורים 3ד ו-3ה) משמש במחקר זה למדידה מדויקת של ההסטה האופקית לאורך העתק הערבה בבקעים המלח באזור העבודה.



איור 32. תמונות מייצגות מאזור בעבודה. (א) אי-התאמה הדרגתית (onlap) של סדימנטים מגיל קמבריון (cam) על איאמיר ריוליט (Rhyolite), ואדי נמלה, דרום-מערב ירדן, מבט ממזרח; (ב) ריוליט איאמיר בג'בל סומר אל-טייבה, דרום-מערב ירדן; (ג) "פסי זרימה" בריוליט איאמיר, ג'בל סומר אל-טייבה; (ד) דייק דולריטי מהקמבריון המוקדם חדור בריוליט עמרם, הר עמרם; (ה) דייק דולריטי מהקמבריון המוקדם חדור בריוליט איאמיר, ג'בל סומר אל-טייבה.

ג'בל חנה (איורים 11 ו-12) נמצא במרחק של 36 ק"מ צפונה לג'בל סומר אל-טייבה ובמרחק של 2 ק"מ מזרחית לאזור הגזירה של העתק פינן שכיוונו צפון-מערב. המבנה של ג'בל חנה הוא מבנה של דום בגובה של 140 מטר מעל לפני הים, והוא מנוקז מערבה על ידי ואדי גוואיב. הגוש המזרחי של העתק פינן באזור זה מורכב מאבני החול של חבורת כורנוב, ומעליהן אבני הגיר והדולומיט של תצורת נאור מהקרטיקון. המתאם בין ג'בל חנה להר תמנע נסמך על הסלעים המרכיבים אותם. דייק דולריטי בעובי של כ-50 מטר שכיוונו צפון-דרום החדור לגרניט פורפיר של ג'בל חנה מופה צפונה לחירבת נוחס (איור 14). בדומה לדייק הדולריטי בהר תמנע, גם כאן הדייק הדולריטי גדוע על ידי מישור הגידוע מהקמבריון המוקדם, ומעליו משוכבות אבני החול הארקוזיות של תצורת סליב, הזזה לתצורת עמודי שלמה. בסך הכול מתקבלת תמונה גיאולוגית זזה לתצורת עמודי שלמה, תמנע ושחרת הקמבריות ולחבורות כורנוב ויהודה מגיל קרטיקון בבקעת תמנע.



איור 43. תמונות מייצגות מאזור העבודה. (א) ג'בל חנה, דרום-מערב ירדן, מבט מדרום. גרניט פורפירי חדור בנחילי דייקים ריוליטיים, אנדסיטיים ומורכבים בכיוון כללי צפון. בג החתך תצורת סליב ובורג', סלעים סדימנטריים מגיל קמבריון (Cam); (ב) דייק דולריטי (Dolerite) חדור בגרניט פורפיר (PG) ומעליו סלעי תצורת סליב (Cam). ג'בל חנה צפונה לחירבת נוחס, מבט מדרום; (ג) חתך מתצורת סליב (S) בבסיס החתך, תצורת בורג' (B) במרכז, ואום אישרין (UI) בג החתך בפיו; (ד) חתך מלוטש של גרניט פורפירי מג'בל חנה; (ה) חתך מלוטש של גרניט פורפירי מהר תמנע; (ו) קסנוליט של שיסט (Sch) בגרניט פורפיר (PG) בג'בל חנה מצפון לחירבת נוחס.

## המתאם הפטרולוגי והגיאוכרונולוגי בין סלעי המחדר בהר עמרם לאלה שבג'בל סומר אל-טייבה ובהר תמנע וג'בל חנה

המאסף של סלעי המחדר העתיקים ובעיקר הדייקים הדולריטיים מהקמבריון המוקדם מאפשר מדידה מדויקת של מידת הסטה האופקית לאורך בקע ים המלח בערבה. דיאגרמות תאימות (compatibility) מנורמלות לכונדריטים (chondrite) של הדייק הדולריטי החדור בריוליט עמרם ושל הדייק בג'בל סומר אל-טייבה מוכיחים כי שני הדייקים זהים מהבחינה הפטרולוגית כמו גם סלעי הסביבה הריוליטיים בהר עמרם ובג'בל טייבה. גילם של דייקים אלה הנחשפים משני צידי

הערבה הוא קמבריון מוקדם. לפיכך, ניתן לקבוע שהדייק הדולריטי בג'בל סומר אל-טייבה הוא המשכו של הדייק הדולריטי בהר עמרם, ממזרח לבקע ים המלח. קיים דמיון בהרכב הכימי בין הדייק הדולריטי בג'בל חנה (סיליקה 47%,  $\text{TiO}_2$  4.34%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  14.9% ו- $\text{Mg}\# \sim 42$ ) לדייק הדולריטי בהר תמנע (Beyth et al., 1994b). בעקומות המנורמלות של יסודות הקורט אין התאמה מלאה מפאת חוסר נתונים. התאמה גיאוכימית מלאה קיימת בין העקומות המנורמלות של גרניט פינן והאלקלי גרניט של תמנע. לא נמצא מתאם מובהק בין חלוקי הגרניט פורפיר שנדגמו במערב ג'בל חנה לגרניט פורפיר בהר תמנע. הסיבה לכך עשויה להיות ההטרוגניות האופיינית למחדרים קלק-אלקליניים גדולים.

## סיכום ומסקנות

בעבודה הנוכחית אנחנו מציגים מדידה מדויקת של ההסטה השמאלית (sinistral) המצטברת של 109 ק"מ בערבה לאורך בקע ים המלח, בין הלוח האפריקאי ללוח הערבי בקטע שבין ים המלח למפרץ אילת. הסטה זו היא לאורך שני העתקים:

1. הסטה של 85 ק"מ לאורך העתק הערבה על בסיס הגידוע של הדייק הדולריטי מהקמבריון המוקדם בין הר עמרם בדרום ישראל לג'בל סומר אל-טייבה בדרום-מערב ירדן.
2. הסטה של 24 ק"מ לאורך העתק פינן המבוססת על מתאם בין הסלעים בהר תמנע בישראל ובג'בל חנה בירדן. שני תימוכין בלתי תלויים למתאם זה הם: (א) המרחק בין ג'בל טייבה לג'בל חנה בירדן הוא 36 ק"מ, וזהה למרחק מהר עמרם להר תמנע בישראל (12 ק"מ) בניקוי ההסטה של 24 ק"מ לאורך העתק פינן. (ב) מרחק זהה של 8 ק"מ בין הר תמנע להעתק התמד בישראל (איור 1ב) ובין ג'בל חנה להעתק דנה בירדן (איור 2ב), שהוא המשכו המזרחי של העתק תמד בירדן.

בעבודות קודמות הוצע כי בקטע דרומי של בקע ים המלח ההסטה האופקית מתחלקת על מספר העתקים ברצועה רחבה, בין 50 ל-60 ק"מ, וכי ההסטה העכשווית עשויה להתמקד לאורך ציר הבקע. העבודה הנוכחית מראה כי העתק הערבה מרכז כ-80% מההסטה של 109 ק"מ ברצועה ברוחב של עד 10 ק"מ. 20% הנותרים של ההסטה המצטברת בבקע ים המלח בערבה הדרומית הם לאורך העתק פינן. מסקנות אלה תואמות למסקנות מעבודות סייסמיות מפורטות על מבנה הקרום במקטע הערבה של בקע ים המלח, כי ההסטה האופקית מתרכזת בהעתק אחד או בשני העתקים ברצועה ברוחב של 20 עד 40 ק"מ בקרום העליון. המסקנות מהעבודה הנוכחית מאששות את הטענה שההסטה לאורך ההיסטוריה של בקע ים המלח בערבה הייתה ועודנה ממוקדת מאוד (Weber et al., 2009). חשוב לציין שהדייק הדולריטי מופיע משני צידי הבקע והוא מגיל קמבריון מוקדם היא ההוכחה העיקרית במאמר זה למידת ההסטה.



## המאמר הנוכחי הוא סיכום בעברית של המאמר:

Beyth M, Sagy A, Hajazi S, Alkhraisha A, Mushkin A, and Ginat H. 2017. New evidence on the accurate displacement along the Arava/Araba segment of the Dead Sea Transform. *International Journal of Earth Sciences* **107**(4): 1431–1443.

התארוך של דוגמת הדייק מסומר אל-טייבה בדרום מערב ירדן נעשה על ידי Matt Heizler, Geochronology Research Laboratory New Mexico.

## מקורות

Baldrige S, Eyal Y, Bartov Y, Steinitz G, and Eyal M. 1991. Miocene magmatism of Sinai related to the opening of the Red Sea. *Tectonophysics* 197: 181–201.

Barjous MO. 1995. Petra & Wadi Al Lahyana, geological map, 3050I & 3050IV sheets, scale 1:50,000: Natural Resources Authority, Hashemitic Kingdom of Jordan.

Bartov Y, Steinitz G, Eyal M, and Eyal Y. 1980. Sinistral movement along the Gulf of Aqaba- its age and relation to the opening of the Red Sea. *Nature* 265: 220–222.

Be'eri-Shlevin Y. 2008. The origin and evolution of Neoproterozoic magmatism in the northern Arabian-Nubian Shield (Sinai Peninsula, Egypt and southern Israel): Evidence from stable and radiogenic isotope record (Unpublished Ph.D. dissertation). Beer Sheva: Ben-Gurion University.

Beyth M, Stern RJ, Altherr R, and Kroener A. 1994a. The late precambrian Timna igneous complex, southern Israel: Evidence for comagmatic type sanukitoid monzodiorite and alkali granite magma. *Lithos* 31: 103–124.

Beyth M, Stern R, Altherr R, Peltz S, and Heimann A. 1994b. Petrochemistry of dolerite dykes from Mt. Timna, southern Israel: Implications for plate tectonic setting. *GSI Current Research* 9: 24–26.

Beyth M and Heimann A. 1999. The youngest igneous event in the crystalline basement of the Arabian-Nubian Shield, Timna igneous complex. *Israel Journal of Earth Sciences* 48: 113–120.

Beyth M, Segev A, and Bartov Y. 1999. The Geological Map of Be'er Ora, 1:50,000 Sheet 25-IV Geological Survey of Israel.

Beyth M, Eyal Y, and Garfunkel Z. 2012. The Geology of the Elat Sheet, Explanatory Notes: Geological Survey of Israel. Report GSI/22/2011, updated March 2013, 13 pp.

- Freund R, Garfunkel Z, Zak I, Goldberg M, Weissbrod T, and Derin B. 1970. A shear along the Dead Sea Rift. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 267: 107–130.
- Garfunkel Z. 1981. Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics. *Tectonophysics* 80: 81–108.
- Jarrar G. 2001. The youngest Neoproterozoic mafic dyke suite in the Arabian Shield: Mildly alkaline dolerite from south Jordan – Their geochemistry and petrogenesis. *Geological Magazine* 138: 309–323.
- Kessel R, Stein M, and Navon O. 1998. Petrogenesis of the neoproterozoic dikes in northern Arabian-NubianShield implications for the origin of A-type granites. *Precambrian Research* 92: 195–213.
- Mushkin A, Navon O, Halicz L, Hartmann G, and Stein M. 2003. The petrogenesis of A-type magmas from the Amram Massif, southern Israel. *Journal of Petrology* 44: 815–832.
- Quennel AM. 1958. The structural and geomorphic evolution of the Dead Sea rift. *Quarterly Journal of the Geological Society* 114: 1–24.
- Rabba' I. 1994. The geology of the Al Qurayqira (Jabal Hamra Faddan), map sheet No. 3051 II: Natural Resources Authority, Ministry of Energy and Mineral Resources, The Hashemite Kingdom of Jordan: Bulletin 28, 60 pp.
- Segev A. 1984. Lithostratigraphy and paleogeography of the marine cambrian sequence in southern Israel and southern Jordan. *Israel Journal of Earth Sciences* 33: 26–33.
- Sneh A, Ibrahim K, Bartov Y, Rabba' I, Weissbrod T, Tarawneh K, and Rosensaft M. 1998. Compilation of Earth science data Dead Sea-Wadi Araba. Geological Survey of Israel, State of Israel; Natural Resources Authority, the Hashemite Kingdom of Jordan.
- Weber M, Abu-Ayyash K, Abueladas A, Agnon A, Alasonati-Tašárová Z, Al-Zubi H, Babeyko A, Bartov Y, Bauer K, Becken M, and Bedrosian PA. 2009. Anatomy of the Dead Sea transform from lithospheric to microscopic scale. *Reviews of Geophysics* 47(2): 1–44.