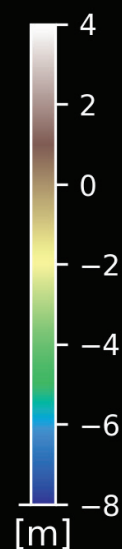




המכון הגיאולוגי לישראל
משרד האנרגיה

תגובת התשתית באגן ים המלח
לשינויים הטבעיים ומעשה ידי אדם:
מסגרת רב שנתית לניטור ומחקר 2018-2028
דו"ח מסכם לשנת 2023

עורך: רם וינברגר



תמונת שער:

תמונת הפחתה בין מדידות לייזר (Lidar) של השנים 2005 ו-2023 באזור עין גדי המראה שינויים טופוגרפיים בולטים בפרק זמן זה. **התמונה הוכנה על ידי גדעון בר ורן נוף**, ומוצגת בפרק 8: סיכומי בולענים ושקיעות קרקע על כביש "עוקף הבולענים" (כביש 90) באזור שמורת עין-גדי, עמודים 97-105.

עיצוב: תרצה צוברי

תוכן עניינים

8.....	הקדמה.....
9.....	1. ניטור הפעילות המיקרוסיסמית על העתק יריחו ומצפון לים המלח.....
9.....	1.1 רקע.....
11.....	1.2 בסיס נתונים.....
12.....	1.3 תוצאות.....
12.....	1.4 תוכניות להמשך.....
15.....	1.5 מקורות.....
16.....	2. הערכת הנזק המצטבר למבנים באזור ים המלח כתוצאה מרצף של רעידות אדמה.....
16.....	2.1 רקע.....
17.....	2.2 מטרת העבודה.....
18.....	2.3 גישת ה-Simplified State Dependent.....
21.....	2.4 הדמיית הנזק המצטבר ביישובי ים המלח.....
24.....	2.5 תוצאות.....
27.....	2.6 דיון ומסקנות.....
29.....	2.7 מקורות.....
31.....	3. מעקב אחר תנועות קרום במרכז אגן ים המלח באמצעות שיטות גיאודטיות.....
31.....	3.1 רקע.....
31.....	3.2 שיטות.....
35.....	3.3 תוצאות עיבוד הנתונים הגיאודטיים.....
37.....	3.4 דיון ומסקנות.....
38.....	3.5 מקורות.....
39.....	4. הגיאומטריה והקינמטיקה של סייסמיטים בתצורת הלשון.....
39.....	4.1 מבוא.....
40.....	4.2 רקע גיאולוגי.....
41.....	4.3 שיטות עבודה.....
41.....	4.3.1 TriShear.....
41.....	4.3.2 AMS.....

42	4.3.3 מדידות סטרוקטורליות ודיגום
42	4.4 תוצאות
42	4.4.1 מדידות סטרוקטורליות
42	4.4.2 מודל TriShear
43	4.4.3 AMS
45	4.5 דיון
45	4.5.1 המבנה
47	4.5.2 מארגי ה AMS במבנה
49	4.5.3 סידור מחדש של החלקיקים בעת קימוט וההעתקה
49	4.6 סיכום ומסקנות
50	4.7 מקורות
52	5. בחינת הקשר בין שינויי עובי לאורך שכבה מקומטת לבין שינויים בצפיפות הסדימנט, תצורת הלשון בנחל פרחים
52	5.1 רקע
55	5.2 מטרות העבודה
55	5.3 שיטות עבודה
56	5.4 מדידת צפיפות
56	5.5 דיגום בשדה
58	5.6 עבודת מעבדה
58	5.6.1 מדידת נפח ישירה
58	5.6.2 מדידת נפח עקיפה
59	5.7 תוצאות
64	5.8 מסקנות והמשך מחקר
65	5.9 מקורות
67	6. אי-יציבות המדרון באזור מצוק ההעתקים : (1) תוצאות בדיקה ראשונית בנוגע למפולת הסלעים שארעה בנחל דוד ; (2) סקירה של התקנת אמצעי מדידה ואיסוף נתונים לצורך מחקר רב שנתי
67	6.1 רקע
67	6.2 מטרות העבודה
67	6.3 אירוע נפילת סלעים בנחל דוד
67	6.3.1 תיאור האירוע

6.3.2	ממצאים מסיור השדה	69
6.3.3	ממצאים מנתונים סייסמולוגים	72
6.3.4	ממצאים מנתוני לוויין (INSAR)	73
6.3.5	סיכום	74
6.4	הקמת מערך לאיסוף נתונים כחלק ממחקר רב שנתי בנושא השפעת סופות גשם על יציבות המדרון	76
6.4.1	אזור המחקר ושיטות עבודה	76
6.4.2	התקנת מדי הגשם ותוצאות מדידה ראשוניות	78
6.4.3	מדי גשם זעירים	79
6.4.4	מדי גשם רושמים	80
6.4.5	התקנת מצלמות	81
6.5	מקורות	83
7	מיפוי יחידות סלע צעירות שנחשפות כתוצאה מנסיגת ים המלח בעשרות השנים האחרונות	85
7.1	תקציר	85
7.2	רקע	85
7.3	משקעי הרביעון בשולי האגן	86
7.4	עקרונות המיפוי	87
7.5	תוצאות	89
7.5.1	יחידות הסדימנט באזור נחל תמרים	89
7.5.2	מיפוי ראשוני	92
7.5.3	אסוציאציה אפשרית בין מעוותים לגעשי בוץ	92
7.6	סיכום ותכנון המשך המחקר	93
7.7	מקורות	94
8	סיכוני בולענים ושקיעות קרקע על כביש "עוקף הבולענים" (כביש 90) באזור שמורת עין-גדי	97
8.1	מבוא	97
8.2	נתונים ושיטות	98
8.2.1	ליידר מוטס	98
8.2.2	אינטרפרומטריה של רדאר מלוויינים	98
8.3	תוצאות	98

8.3.1	שינויים טופוגרפיים רב שנתיים	98
8.3.2	שינויים עכשוויים בפני השטח	102
8.4	סיכום והמלצות	104
8.4.1	השוואה בין מדידות הלייזר והרדאר	104
8.4.2	משמעות התוצאות והמלצות להמשך	105
8.5	מקורות	105
9	השפעת מאפיינים הידרולוגיים של אירועי שיטפונות בדידים על התגובה הגיאומורפולוגית של נחלים לירידת מפלס ים המלח	106
9.1	רקע	106
9.1.1	שיווי משקל דינמי של נחלים אלוביאליים	107
9.1.2	ירידת מפלס אגם וההשלכות הגיאומורפולוגיות על נחלים אלוביאליים לחופו	108
9.1.3	אזור המחקר	109
9.2	שיטות	113
9.2.1	רקורד השיטפונות	113
9.2.2	מיפוי	113
9.2.3	חישוב התגובות הגיאומורפולוגיות	114
9.2.4	ניתוח סטטיסטי	114
9.3	תוצאות	114
9.3.1	רקורד השיטפונות	114
9.3.2	שינויים גיאומורפולוגיים	116
9.3.3	ניתוח סטטיסטי	124
9.4	דיון	125
9.4.1	הגורמים המשפיעים על מאזן הסדימנט בשיטפון	126
9.4.2	הגורמים המשפיעים על ההתחתרות בשיטפון	128
9.4.3	משמעות הממצאים בהקשר של שינויי אקלים ושינויים מלאכותיים בנגר עילי	129
9.4.4	פוטוגרמטריה באמצעות רחפן ככלי פורץ דרך לעבודה גיאומורפולוגית	129
9.5	מקורות	130
10	הרחפת סדימנט על ידי גלים וזרמים מונעי רוח לאורך חופי ים המלח	133
10.1	תקציר	133

10.2 הקדמה	133
10.3 שיטות	136
10.3.1 מדידות שדה (איור 10.1c-g)	136
10.3.2 פיתוח מודל פיסיקלי עם פתרון נומרי	136
10.4 תצפיות ישירות של רוחות, גלים, זרמים והרחפת סדימנט	136
10.5 ניתוח פיסיקלי של הקשר בין זרמים להרחפת סדימנט	139
10.5.1 מידול התפתחות פרופיל הזרם עם העומק	139
10.5.2 מידול הרחפת הסדימנט על קרקעית האגם	142
10.6 דיון, מסקנות וצעדים להמשך	143
10.7 מקורות	144
11. שיטה חדשה למדידת איזוטופים יציבים של חמצן ומימן בדגימות מים מתוקים, תמלחות רוויות ולחות אוויר בנפחים מזעריים	147
11.1 רקע	147
11.2 שיטות	149
11.2.1 מכשור	149
11.2.2 הגדרה טכנית	149
11.2.3 פרוטוקול מדידה	150
11.3 תוצאות	151
11.4 מסקנות	152
11.5 מקורות	152
12. בחינת הקשר בין האוכלוסיות המיקרוביאליות לבין כימיית המים בבולעני ים המלח - שנת מחקר שלישית	153
12.1 רקע	153
12.2 מטרות העבודה	154
12.3 שיטות	154
12.4 תוצאות ודיון	155
12.5 סיכום והמשך עבודה	166
12.6 מקורות	167
13. כרונולוגיה של שלבי התפתחות בקע ים המלח על פי תיארוך U-Pb של משקעי קלציט פריאטי	169
13.1 תקציר	169

170	13.2 מבוא
172	13.3 שיטת עבודה
176	13.4 תוצאות
186	13.5 דיון
188	13.6 מסקנות ביניים
189	13.7 תכניות להמשך
189	13.8 מקורות
192	14. תוצאות ראשונות של תיארוך קרבונט בשיטת U-Th לתיחום גילי פעילות העתקים צעירים באזור עין פשחה
192	14.1 תקציר
192	14.2 מבוא
193	14.3 שיטות
194	14.4 תוצאות
194	14.4.1 ניתוח העתקי השוליים באזור עין פשחה
197	14.4.2 תיארוך
199	14.5 סיכום ומסקנות
200	14.6 מקורות
202	15. התפתחות בולענים באירוזיית פייפינג ותיארוך העתקה צעירה בדרום ים המלח
202	15.1 רקע
203	15.2 מטרות המחקר
204	15.3 שיטות מחקר
204	15.3.1 עבודת שדה
207	15.3.2 מעבדה
207	15.4 תוצאות
208	15.5 סיכום
216	15.6 מקורות
218	16. תהליך ריסוק סלעים על ידי מלחים בשטחים שנחשפו כתוצאה מירידת מפלס ים המלח
218	16.1 רקע
218	16.2 מטרות

219	16.3 שיטות.....
220	16.5 תוצאות.....
220	16.5.1 מיפוי מורפולוגי של המפלסים השונים במרחב ובזמן (איור 16.1).....
220	16.5.2 מדידות של כמות וכיווני הסדקים על מפלסים נטושים (איור 16.2).....
221	16.5.3 מדידה רציפה של הטמפרטורה והלחות היחסית.....
221	16.5.4 צילומי Time Lapse (איור 16.3).....
222	16.5.5 פליטות אקוסטיות (AE) (איור 16.4).....
222	16.6 סיכום.....
223	16.7 מקורות.....
224	17. האבולוציה הכימית של מלחת סדום, נאות הכיכר.....
224	17.1 מבוא.....
225	17.2 מטרות העבודה.....
225	17.3 שיטות העבודה.....
227	17.4 תוצאות העבודה.....
228	17.4.1 תוצאות הסקר הגיאופיסי גיאוכימי :.....
232	17.4.2 תוצאות הסקר הגיאוכימי.....
238	17.5 סיכום.....
239	17.6 מקורות.....

הקדמה

בסדרת החלטות ממשלה מהשנים 2006 ועד 2018 הוטל על המכון הגיאולוגי לבצע מחקר וניטור של אזור ים המלח במטרה לזהות את השטחים שבהם קיימת סכנה לקריסת תשתיות, לסיכון מבנים או לאוכלוסייה, ולהעריך את ההשפעות הצפויות של "תעלת הימים" ים סוף - ים המלח וקציר המלח בבריכות האידוי על גוף המים וסביבתו. המחקר והניטור מתבצעים בחמישה תחומים עיקריים: סיכוני רעידות אדמה, תהליכים בגוף המים, קריסת התשתית ויצירת בולענים, והתפתחות דינמית של הסביבה היבשתית והחופית. המכון הגיאולוגי שואף לכך שממצאי המחקר והניטור יהיו בעלי משמעויות יישומיות ככל האפשר וישמשו בסיס לתכניות הפיתוח באזור. המחקר החל בתחילת שנת 2008 בדגש על אי-יציבות התשתית, הוארך בשנת 2012 בחמש שנים נוספות והורחב בתחומי ניטור שונים של גוף המים, ובשנת 2018 הוארך בעשר שנים נוספות. דו"ח זה מסכם את תוצאות המחקר בשנת 2023.

הפרק הראשון בדו"ח מציג ניטור של הפעילות המיקרוסיסטמית על העתק יריחו; הפרק השני דן בהערכת הנזק המצטבר למבנים באזור ים המלח כתוצאה מרצף של רעידות אדמה; הפרק השלישי עוקב אחר תנועות קרום כדור הארץ במרכז אגן ים המלח באמצעות שיטות גיאודטיות; הפרקים הרביעי והחמישי דנים בסייסמיטים בתצורת הלשון; הפרק השישי דן באספקטים שונים של אי-יציבות המדרון במצוק ההעתקים; הפרק השביעי מציג מיפוי של היחידות הצעירות הנחשפות לאורך חופי ים המלח כתוצאה מנסיגתו; הפרק השמיני מציג את סיכוני הבולענים ושקיעות הקרקע לאורך כביש 90 באזור עין גדי; הפרק התשיעי דן בהשפעת המאפיינים ההידרולוגיים של ארועי שיטפונות בדידים על התגובה הגיאומורפולוגית של הנחלים לירידת מפלס ים המלח; הפרק העשירי דן בגוף המים ומנתח את הרחפתו של הסדימנט על ידי גלים וזרמים שכוחם מגיע מהרוח הנעה לאורך חופי ים המלח; הפרק האחד עשר מציג שיטה חדשה למדידת איזוטופים של חמצן ומימן בדגימות של מים מתוקים, תמלחות רוויות ולחות אוויר; הפרק השני עשר בוחן את הקשר בין אוכלוסיות מיקרוביאליות לבין כימיית המים בבולענים; הפרק השלושה עשר מנתח את הכרונולוגיה של שלבי התפתחות בקע ים המלח בעזרת גילי אורניום-עופרת ממשקעי קלציט פריאטי; הפרק הארבע עשר מציג תוצאות ראשוניות של תיארוך משקעי קלציט בשיטת האורניום-תוריום בכדי לקבוע גילי פעילות של העתקים צעירים באזור עין פשחה; הפרק החמישה עשר דן התפתחות בולענים במנגנון של "פיפינג" וכן תארוך מפלסי זרימה בהם והקשר להעתקה צעירה; הפרק השישה עשר עוסק בתהליך הריסוק של סלעים על ידי מלחים באזורים שנחשפים כתוצאה מירידת המפלס; הפרק השבעה עשר והאחרון דן באבולוציה הגיאוכימית של מלחת סדום.

הדו"ח, כמו גם סדרת הדו"חות הקודמים מהשנים 2008 עד 2022, ונספחים הכוללים מאמרים ודו"חות מורחבים של נושאי הניטור והמחקר, זמינים באתר המכון הגיאולוגי או אצל המחברים.

רם וינברגר
המכון הגיאולוגי

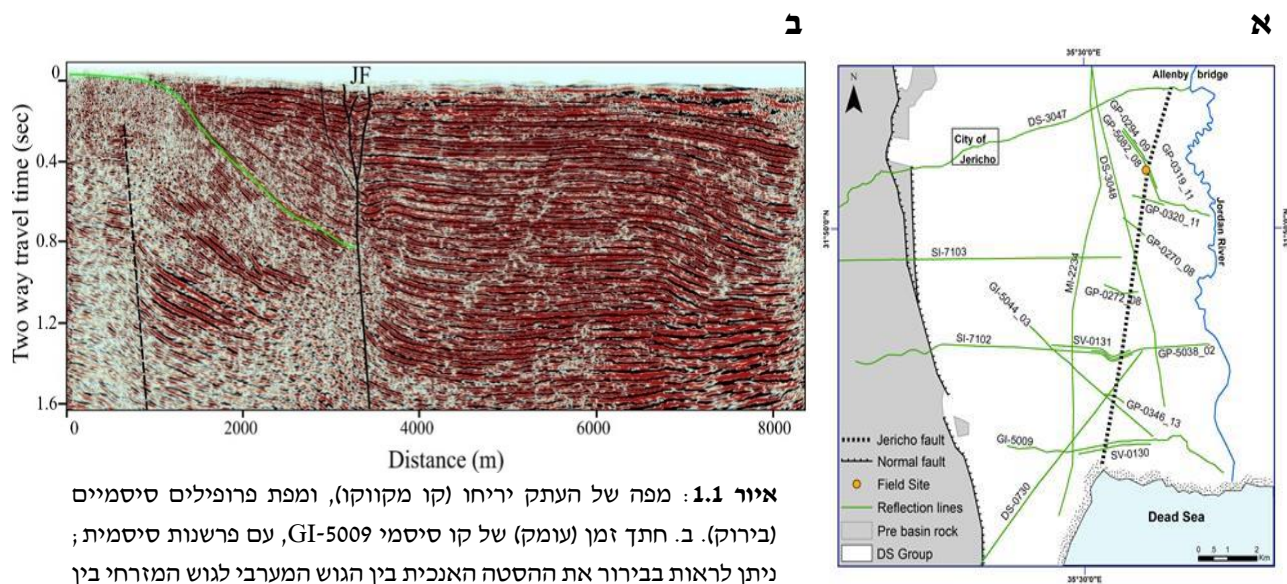
1. ניטור הפעילות המיקרוסיסמית על העתק יריחו ומצפון לים המלח

קורזון, א., קלינגר, א., שגיא, א.

המכון הגיאולוגי

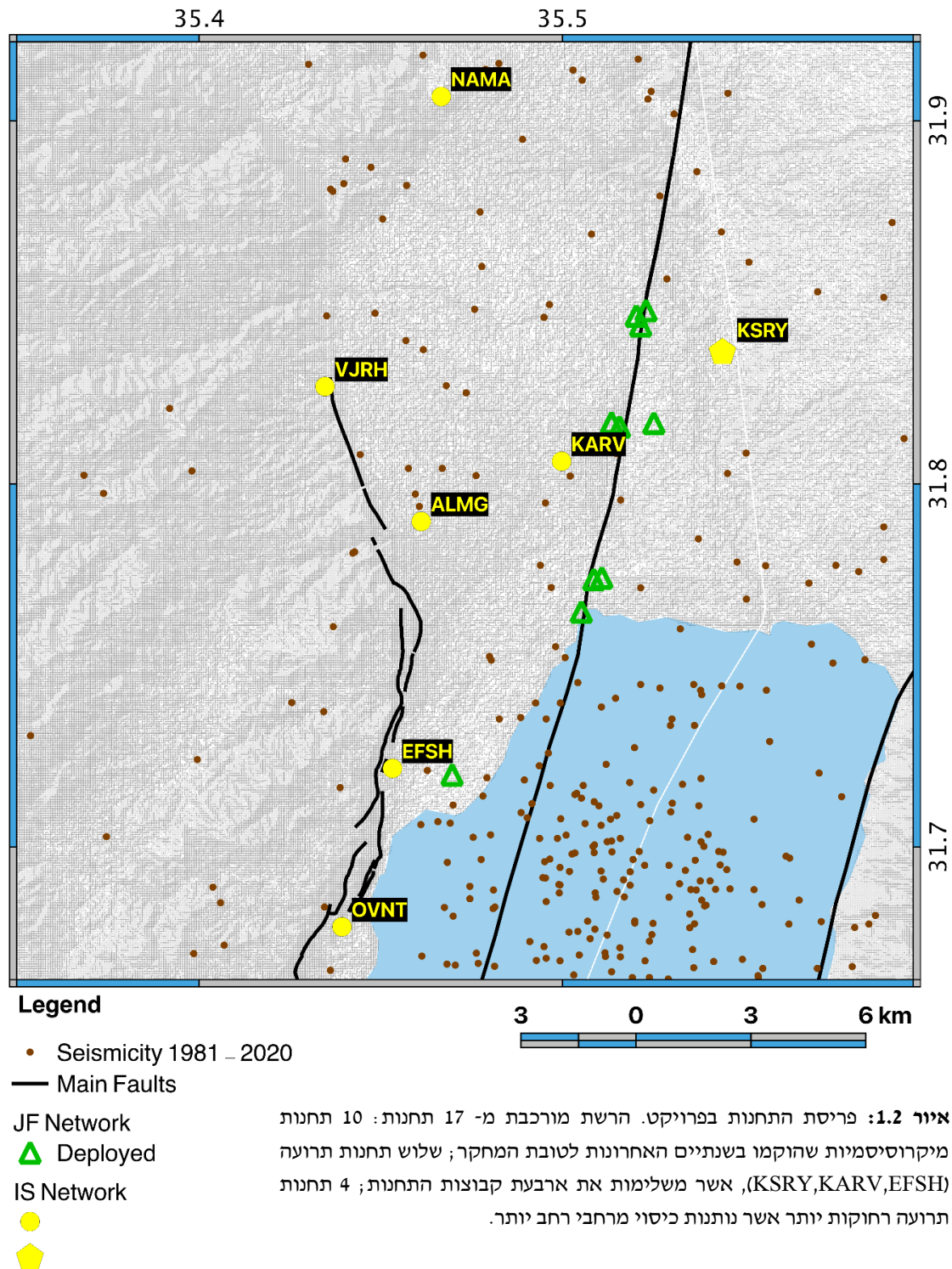
1.1 רקע

על העתק יריחו, מקטעו העיקרי של העתק ים המלח צפונית לאגם ים המלח, התרחשו רעידות הרסניות, כולל רעידת האדמה בעוצמה $M_w 6.25$ שהתרחשה בשנת 1927 (שפירא וחוב' 1993). כיום, ההעתק נחשב נעול ועל-פי חישני הניטור של הרשת הסיסמית של ישראל הוא מייצר פעילות סיסמית נמוכה מאוד, בעוד שחלק מהמעוות על ההעתק מתרחש על-ידי זחילה. שגיא וחובריו (2014) ניתחו מחדש פרופילים סיסמיים ישנים באזור ההעתק שנעשו החל משנת 1980, ופרופילים חדשים יותר בוצעו שנים 2008-2013. המחקר שלהם הצביע על אזור מעוות ברוחב 100-300 מ', המצביע על העתקה אנכית, בה צידו המזרחי נמוך סטרטיגרפית ביחס לצידו המערבי (איור 1.1). מחקר זה תומך בהנחה שהעתק יריחו הוא אכן העתק פעיל עם רכיב העתקה אנכי משמעותי. אולם, למרות ריבוי מחקרים גיאולוגיים, פליאוסיסמולוגיים, גיאודטיים וגיאופיזיים לאורך העתק יריחו, שאלות רבות לגבי פעילותו עדיין נותרו פתוחות: האם ההעתק נעול לעומק של 7.8 ± 16.6 ק"מ, כפי שהוסק על ידי חמיאל וחוב' (2018), וכיצד זה קשור לפעילות המיקרוסיסמית הדלילה שנצפתה בהעתק יריחו? מהו מבנה ההעתק המתגלה על ידי הפעילות המיקרוסיסמית והאם הוא תואם את הפרשנויות הגיאופיזיות הקודמות? מהו מבנה המהירויות הסיסמיות בתת-הקרקע בקרבת העתק יריחו? מהי חלוקת המעוות בין זחילה א-סיסמית לבין העתקה באירועים סיסמיים? לצורך התמודדות עם שאלות אלה, ועל מנת להאיר נושאים אלה מזוויות חדשות, פרסנו רשת סייסמית ייעודית שמטרתה לחשוף את הפעילות ה מיקרוסיסמית לאורך העתק. יחד עם תחנות רשת הסיסמית של ישראל, הקרובות להעתק יריחו, אספנו נתונים החל מסוף 2021, וביצענו עיבוד וניתוח



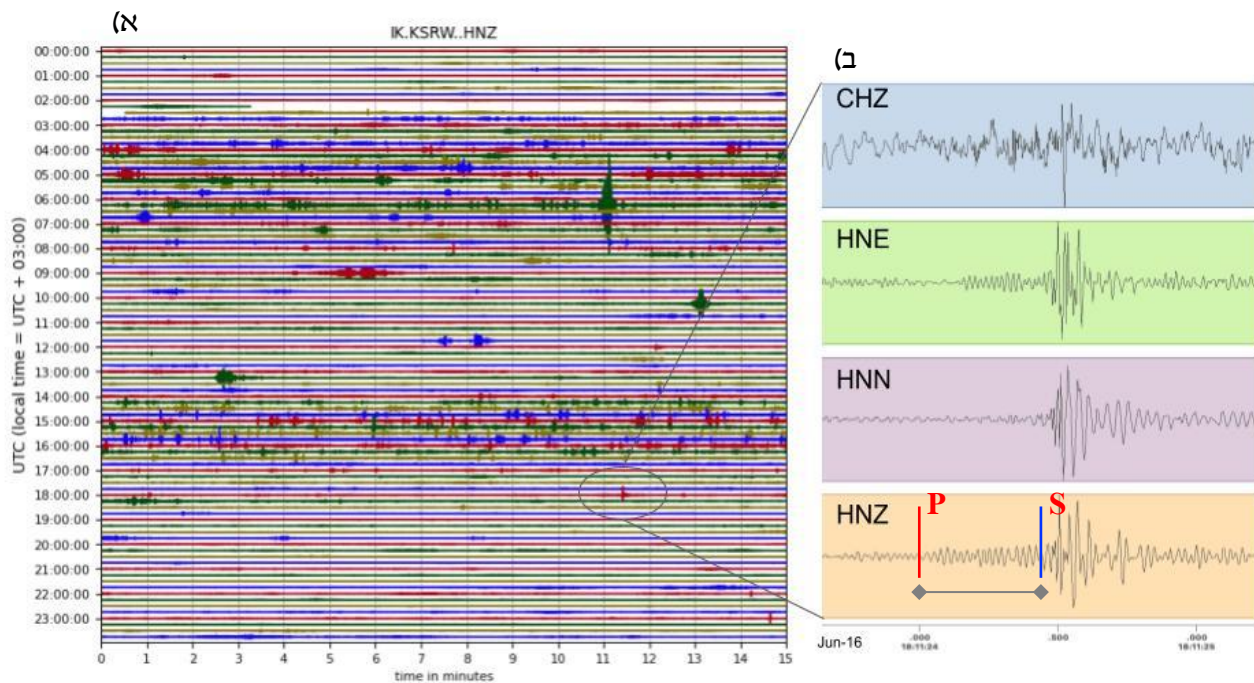
איור 1.1: מפה של העתק יריחו (קו מקווקו), ומפת פרופילים סיסמיים (בירוק). ב. חתך זמן (עומק) של קו סיסמי GI-5009, עם פרשנות סיסמית; ניתן לראות בבירור את ההסטה האנכית בין הגוש המערבי לגוש המזרחי בין שני צידי ההעתק.

הסיסמית באזור. מטרות דו"ח זה הן לספק: א. את תיאור התשתית המחקרית שנבנתה לטובת ביצוע המחקר
 ב. מיפוי, ואפיון של הפעילות הסיסמית לאורך ובסביבה הקרובה של העתק יריחו; ג. מה ניתן ללמוד מקטלוג
 האירועים המיקרוסיסמיים שהתגלו במסגרת המחקר?



1.2 בסיס נתונים

בסיס הנתונים מסתמך על: א. 10 תחנות מיקרוסיסמיות חדשות אשר הוקמו החל מסוף 2021 ועד מרץ 2023, ו- ב. 7 תחנות "תרועה" המשויכות לרשת הסיסמית הישראלית (קורזון וחובריו, 2020). התחנות המיקרוסיסמיות (איור 1.2) הן בעלות המפרט הבא: (1) רושם נתונים מסוג אובסידיאן (Obsidian) של חברת קינמטריקס (Kinemetrics); (2) מד-תאוצה, המורכב בתוך רושם הנתונים, עם רגישות גבוהה ($\pm 1g$), ועם 3 ערוצים: שניים אופקיים ואחד אנכי, (3) חיישן מיקרוסיסמי, עם ערוץ יחיד, אנכי, של חברת גאוספייס (GeoSpace); קצב הדגימה של מד התאוצה הוא 200 דגימות לשנייה, ושל החיישן המיקרוסיסמי 500 דגימות לשנייה. המידע הסיסמי נאסף פעם ביום באופן אוטומטי, נאגר בשרתי המכון הגאולוגי בתיקייה ייחודית ונרשם לתוך בסיס נתונים סיסמי מסוג CSS3.0. סה"כ, לטובת עיבוד מדעי ישנן 17 תחנות ברשת הסיסמית. התחנות שהוקמו (איור 1.2) משדרות את הנתונים פעם ביום למרכז האיסוף במכון הגאולוגי, ומגובים במספר שרתים במכון הגאולוגי.



איור 1.3: דוגמא לרעידת אדמה קטנה מאחת מהתחנות המיקרוסיסמיות. (א) תרשים יומי של אחד הערוצים, HNZ, תרשים מסוג זה עוזר לנו לזהות אירועים מסוגים שונים ולקטלג אותם, כמו גם, לזהות את האירועים המתרחשים בשעות השקטות בלילה – בזמן שיש פחות רעש וסיכוי טוב יותר למצוא אירועים מיקרוסיסמיים. (ב) דוגמא לאירועי מיקרוסיסמי הנצפה בכל ארבעת ערוצי התחנה, KSRW. הפרש הזמנים בין גל ה-P לגל ה-S מספר לנו על אירוע במרחק של כ- 3 ק"מ מהתחנה.

1.3 תוצאות

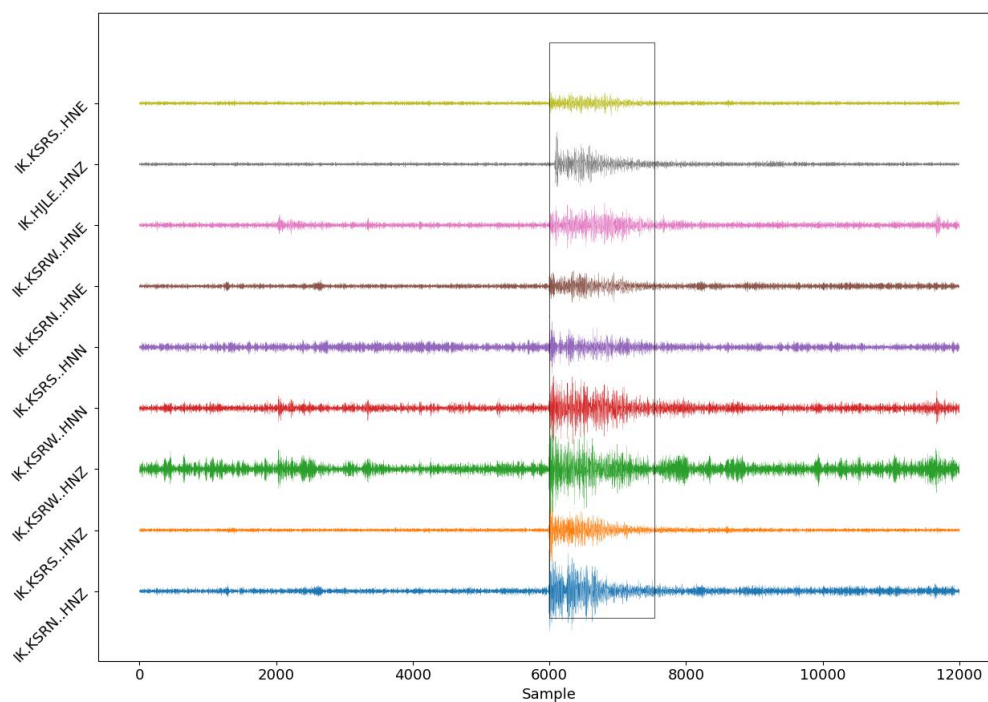
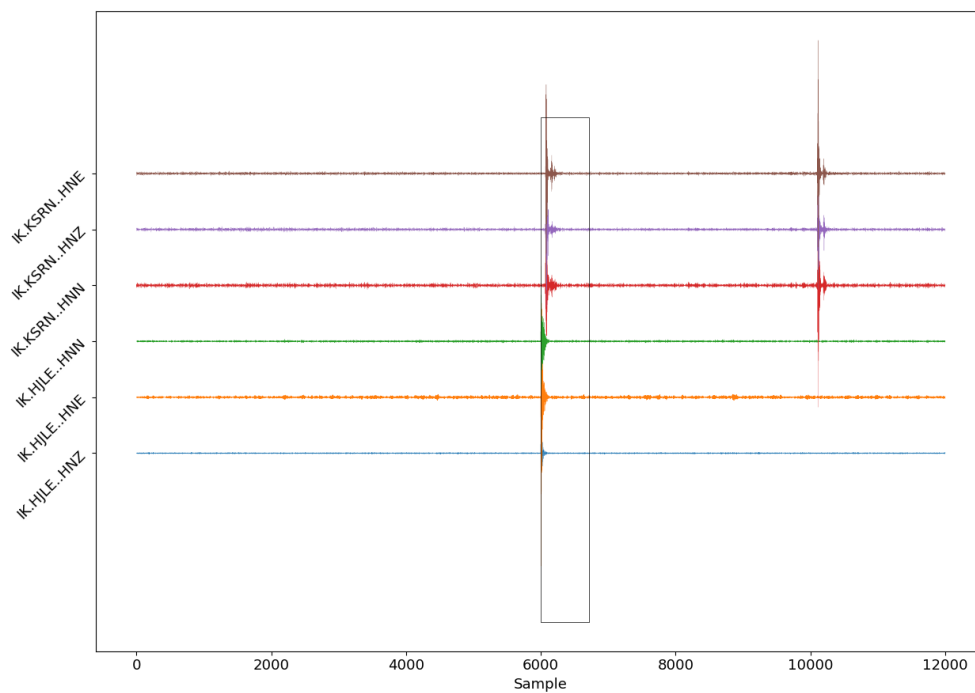
מאחר שמגניטודת השלמות של הרשת הסיסמית הישראלית היא סביב מגניטודה של 2, הרעיון היה לשים את התחנות ממש על ההעתק, בהנחה שאם ההעתק לא נעול, נוהה פעילות מיקרוסיסמית על ההעתק שלא נצפתה בעבר. יתרה מזו, בהנחה של התפלגות גוטנברג-ריכטר, עם b -value של בערך 1, על רעידה אחת של $M 2$ בשנה היינו מצפים לראות כ- 10 רעידות של $M 1$ וכ- 100 רעידות $M 0$. כלומר, זו רמת הפעילות שהיינו מצפים במידה וההעתק לא היה נעול, אלא פשוט בעל פעילות סיסמית נמוכה. לשם כך, האתגר הראשוני היה לזהות אירועים מיקרוסיסמיים, ולבנות את קטלוג האירועים הסיסמיים. לאחר ניסויים באלגוריתמים שונים, נמצא שמענה טוב למציאת אירועים חלשים ניתן ע"י אלגוריתם גילוי ושיוך (association). דוגמא לפעילות מיקרוסיסמית ניתנת באיור 1.3. דוגמאות לאלגוריתם הגילוי והשיוך מצורפות באיור 1.4.

בסך הכל על טווח זמן של כשנה, תקופה בה מרבית תחנות הרשת היו פעילות, התגלו 63 אירועים סיסמיים קטנים מסף הגילוי של הרשת הסיסמית הישראלית. פתרונות האירועים מצורפים באיור 1.5, ומראים שמרבית הפעילות המיקרוסיסמית לא מתרחשת על העתק יריחו (JF) כי אם באזור העתק הגבול המערבי (WTF). תוצאות אלה מראות מגמה דומה לתוצאות עבודת המאסטר של אסף ענבל, אשר גילה פעילות סיסמית בתחומי מגניטודות דומים על העתק הגבול המערבי. תחום המגניטודות הוא $(+1) - (-0.5)$, M_w , ומשקף את העובדה שהרשת רגישה לרעידות בתחום מגניטודות זה במרחק של עד 20 ק"מ מהמקור. כלומר, במידה והייתה מתרחשת רעידה בסדר גודל זה על העתק יריחו, סביר להניח שהיא הייתה נקלטת על ידי הרשת הסיסמית, אשר מרכז משקלה הוא 9 התחנות המיקרוסיסמיות היושבות לאורך העתק יריחו.

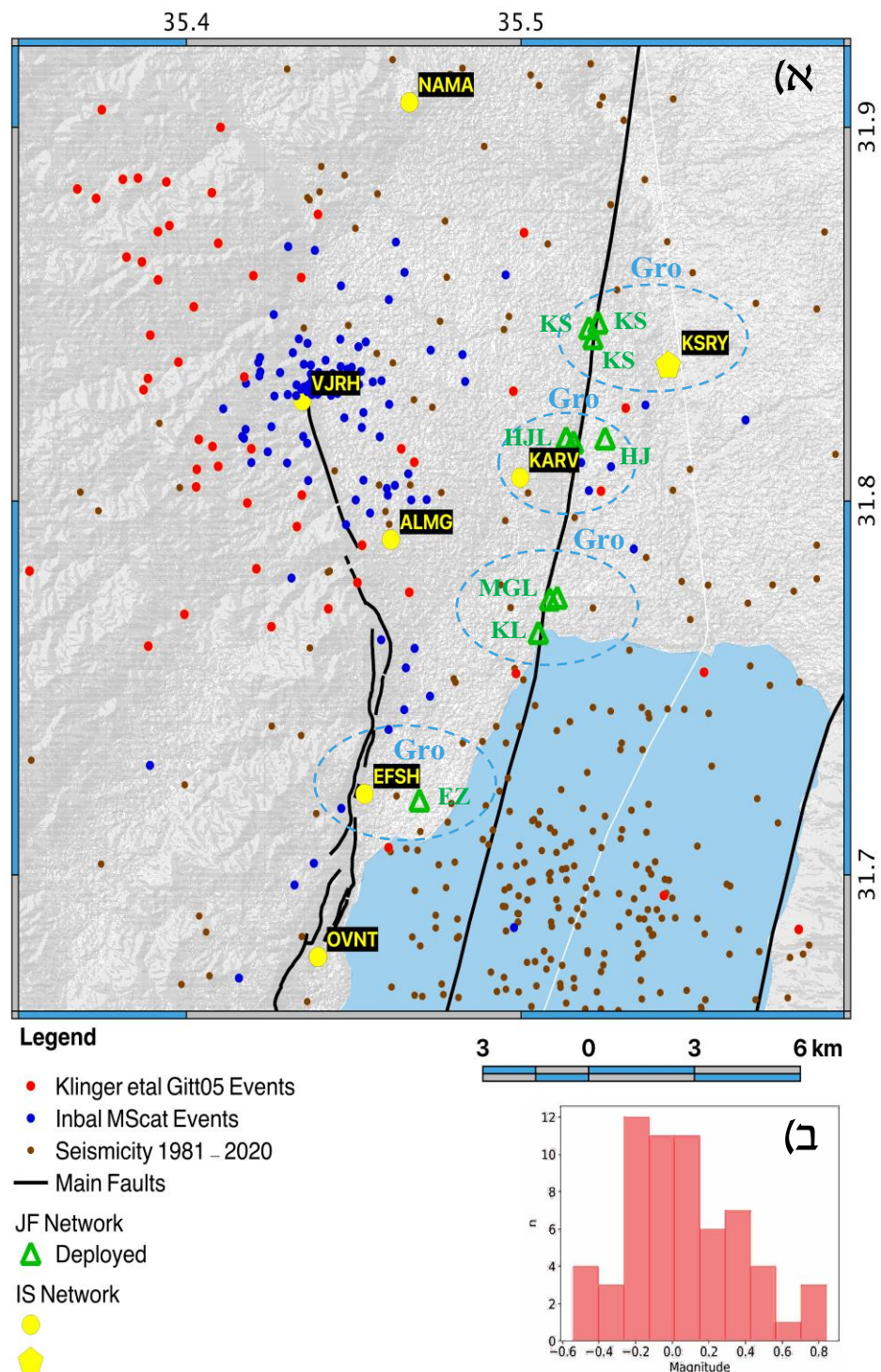
1.4 תוכניות להמשך

המיקוד בו אנו עוסקים כרגע הוא איפיון של אזור ההעתק ע"י שתי שיטות:

1. שימוש בגלים כלואים (Trapped Waves) – גלים הנוצרים ע"י גלי S אשר עוברים דרך אזור הנזק של ההעתק. גלים אילו נושאים איתם מידע ייחודי לגבי מאפיינים גאומטריים וריאולוגיים של ההעתק. כמו-כן, בעזרת גלים אילו, ניתן לייצר הדמיה של אזור ההעתק.
2. שימוש בשיטות קורלציה של רעש שבעזרתן ניתן לעשות הדמיה של תווח תת-הקרקע הרדוד. הוספת שיטות אילו לכלל האנליזה של אזור העתק יריחו תספק תמונה מלאה של הפעילות הסיסמית באזור, מבנה ההעתק והמהירויות הסיסמיות בתווח הרדוד.



איור 1.4: שתי דוגמאות מאלגוריתם הגילוי והשייך (association) המשמש למציאת אותות חלשים בתונים הסיסיים על-פני מספר תחנות מהרשת בו-זמנית



איור 1.5: א) רעידות אדמה מיקרוסיסמיות שנמצאו במחקר הנוכחי (עיגולים אדומים). הרעידות ממוקמות באזור העתק השוליים המערבי, ולא על העתק יריחו. הממצאים הזה מאששים את הממצאים של ענבל (2011), שגם מצא רעידות אדמה מיקרוסיסמיות באזור זה; ב) התפלגות המגניטודות של הרעידות.

- Hamiel, Y., Piatibratova, O., Mizrahi, Y., Nahmias, Y., Sagy, A. (2018). Crustal deformation across the Jericho Valley section of the Dead Sea Fault as resolved by detailed field and geodetic observations. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 3043-3050.
- Inbal, A. (2010). Research proposal: Monitoring microseismicity in the northern Dead Sea basin. [Ben-Gurion University of the Negev].
- Inbal, A., A Ziv, HG Wust-Bloch, Z Ben-Avraham, (2010). Monitoring microseismicity in the northern Dead Sea basin using portable small-aperture seismic mini-arrays. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Kurzon, I., R. N. Nof, M. Laporte, H. Lutzky, A. Polozov, D. Zakosky, H. Shulman, A. Goldenberg, B. Tatham, and Y. Hamiel (2020). The “TRUAA” Seismic Network: Upgrading the Israel Seismic Network—Toward National Earthquake Early Warning System, *Seismol. Res. Lett.* 91 (6): 3236–3255, doi: 10.1785/0220200169.
- Sagy, A., Wetzler, N., Yael Sagy, Y., Nahmias, Y. and Lyakhovsky, V. (2014). The subsurface structure of the Jericho Fault and the associated deformation: geophysical observations and mechanical model. GSI Report GSI/23/2014.
- Shapira, A., R. Avni, and A. Nur (1993), A new estimate for the epicenter of the Jericho earthquake of 11 July 1927, *Isr. J. Earth Sci.*, 42, 93– 96.

2. הערכת הנזק המצטבר למבנים באזור ים המלח כתוצאה מרצף של רעידות אדמה

פרוכט ע., קלבו ר., לוי צ., סלמון ע., אבירב ו.

המכון הגיאולוגי

2.1 רקע

מערכת העתקי ים-המלח העוברת באגן ים המלח מהווה את המקור העיקרי לרעידות אדמה חזקות באזור. הניסיון ההיסטורי והמידע המחקרי מלמדים שרעידת אדמה חזקה יכולה להתרחש בישראל בכל עת (למשל, Hamiel et al., 2009 and references therein). בעבר כבר אירעו מספר רעידות אדמה חזקות לאורך המערכת והן הסבו נזקים קשים משני עברי ים המלח, הירדן והערבה, כדוגמת רעידת האדמה שהייתה בצפון ים המלח בשנת 1927 במגניטודה $M_{6.2}$ (Shapira et al., 1993). רעידות אדמה מלוות במגוון תגובות ותופעות של כשל קרקע אשר עלולות לגרום לנזקים משמעותיים למבנים שונים ותשתיות חיוניות. בישראל, גורם הנזק החמור ביותר הוא תנודות קרקע והגברה שלהן הנגרמת עקב תנאים ייחודיים של התשתית הגיאולוגית. גורמים נוספים העלולים לגרום לנזק כבד הם קריעת פני שטח (Sagy et al., 2013), כשל במדרונות (כץ וחובריו 2008 א, ב), התנזלות (סלמון וחובריו, 2008) וצונאמי (סלמון וחובריו, 2009). רעידת אדמה חזקה באזור ים-המלח עלולה לגרום לנזק רב במבנים שונים ובמתקני התשתיות שממוקמים לאורכו, בעיקר משום קרבתם למוקד הרעידה והתשתית הגיאולוגית הרגישה באזור. בהתאם לתובנות אלו, מדינת ישראל ומערכותיה נערכים לקראת רעידת אדמה.

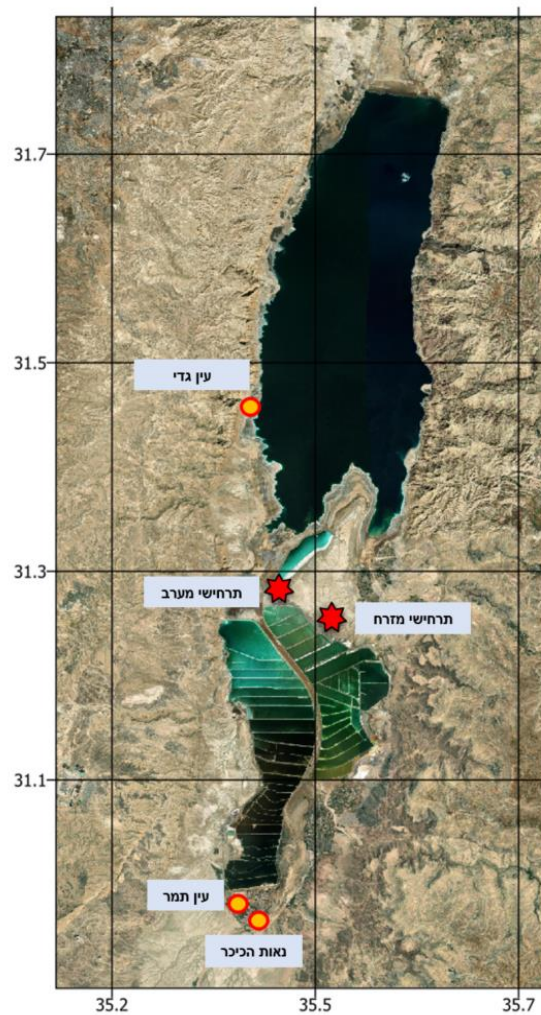
חשוב לציין כי חלק מהותי בהיערכות ובהכנות לקראת אירועים עתידיים כולל פיתוח שיטות עבודה למזעור כמות הנפגעים והנזק במבנים ובתשתיות, והרחבת מודעות הציבור לסכנה באזור זה. אחת הדרכים היעילות ביותר כיום למזער את כמות הנפגעים והנזקים כתוצאה מרעידת אדמה חזקה, היא פיתוח תרחישי נזק להערכות מיטבית מבעוד מועד. כך ניתן להצביע מראש על האזורים המועדים לפורענות, ולמקד בהם את פעולות המניעה ומזעור הנזק. פיתוח תרחישים מיד לאחר הרעידה יעזור לגורמי החרום, לרבות אלה הפועלים באזור ים המלח ומחוצה לו, לקבל החלטות מיטביות לגבי המענה הנדרש בימים הראשונים שלאחר האירוע. התרחשותו של רצף סיסמי כדוגמת זה שהיה בקנטרברי, ניו זילנד, בשנים 2010-2012 (רעידת אדמה עיקרית במגניטודה $M_w = 7.2$ ואחריה שלוש רעידות משנה, $M_w \geq 5.9$, בתקופה של 15 חודשים), משמשת דוגמה לתופעת הנזק מצטבר והשפעתו על עמידות מבנה נתון. מחקרים הוכיחו כי להשפעות המשולבות של שלוש רעידות המשנה הייתה השפעה רבה יותר על ההפסד הכלכלי הכולל בהשוואה לאירוע העיקרי (Moon et. al., 2014, Kam et. al., 2010, Bradley et al. 2014). דוגמא נוספת היא רצף הסייסמי שהתרחש במרכז איטליה, בשנת 1996, אשר החל ברעידת אדמה $M_w = 6.2$, ובעקבותיה היו שתי רעידות נוספות בעוצמה $M_w = 5.9$ ו- $M_w = 6.5$ במרווח של חודשיים אשר תרמו משמעותית למספר הכולל של הבניינים שקרסו (Stewart et. al., 2017, Mildon et. al., 2017).

השיטות המקובלות כיום בעולם להערכת סיכוני רעידות אדמה, מתבססות על שלושת רכיבי הסיכון הבאים:

(1) הסכנה (Hazard) – מאפייני רעידת האדמה והתופעות שהיא מחוללת, בעיקר תנודות הקרקע הצפויות; (2) מצאי המבנים והאוכלוסייה (Exposure) במרחב הסיכון; (3) פגיעות (Vulnerability) – עמידות המבנה אשר תלויה בקשר שבין גודל הסכנה ומאפייניו ההנדסיים של המבנה לנזק הצפוי לו. אחד הכלים המרכזיים לייצוג רכיב הפגיעות של המבנה הוא עקומת שבירות "fragility curve" (FC) המשמש להערכת נזקי מבנה כתוצאה מתנודות הקרקע. פיתוח עקומת שבירות מקומית, תלויה באיכות המידע המתאר את הבניינים על מאפייניהם ההנדסיים. בנוסף, מדובר במשימה תובענית, הדורשת כוח חישוב רב ומומחיות במודלים דינמיים מבניים והפעלת כלים סטטיסטיים מתקדמים. המורכבות והאתגרים גדלים באופן משמעותי, כאשר עוסקים בעקומות שבירות המיועדות להעריך את הנזק כתלות בנזק מקדים "state dependent fragility curves" (SDTF). עקומות אלו לוקחות בחשבון את רמת הנזק המצטבר במבנה כתוצאה מרצף של תנודות קרקע. נכון לעכשיו, בישראל ובמבנים בים המלח בפרט, טרם פותחו עקומות שבירות מקומיות להערכת נזק מבני והערכות הנזק מבוססות על עקומות שבירות שאומצו מתוך ההיצע של מתודולוגית "האזוס" בארה"ב (FEMA, 2020, Technical Manual). בהתאם, גם עקומות המתארות נזק מצטבר כתוצאה מפגיעה של מספר רעידות אדמה עוקבות טרם פותחו ומכאן הצורך לגיבוש גישה פשוטה להערכת הצטברות הנזקים. בעבודה זו מוצגת גישה חדשה המכונה "Simplified State Dependent" (SSD) אשר מאפשרת להתגבר על חלק מהאתגרים שהוצגו לעיל.

2.2 מטרת העבודה

הפרויקט הנוכחי הנו חלק מהמאמץ הלאומי למזעור סיכוני רעידות אדמה בישראל בכלל ומזעור סיכונים הנובעים מרצף רעידות אדמה באזור ים המלח בפרט. במסגרת הפרויקט הנוכחי פותחה גישה "Simplified State Dependent" להערכת נזקים מרצף רעידות אדמה ויושמה באזור ים המלח. הישובים עין גדי, עין תמר ונאות הכיכר שימושו כמקרה בוחן. תרחישי הנזק בחנו סדרת תרחישים המתארים רצף של שתי רעידות אדמה באגן הדרומי של ים המלח (איור 2.1) במגוון של מגניטודות, תוך התחשבות בתנאים הגיאולוגיים המקומיים ואופי המבנים שבאזור הנבחן.

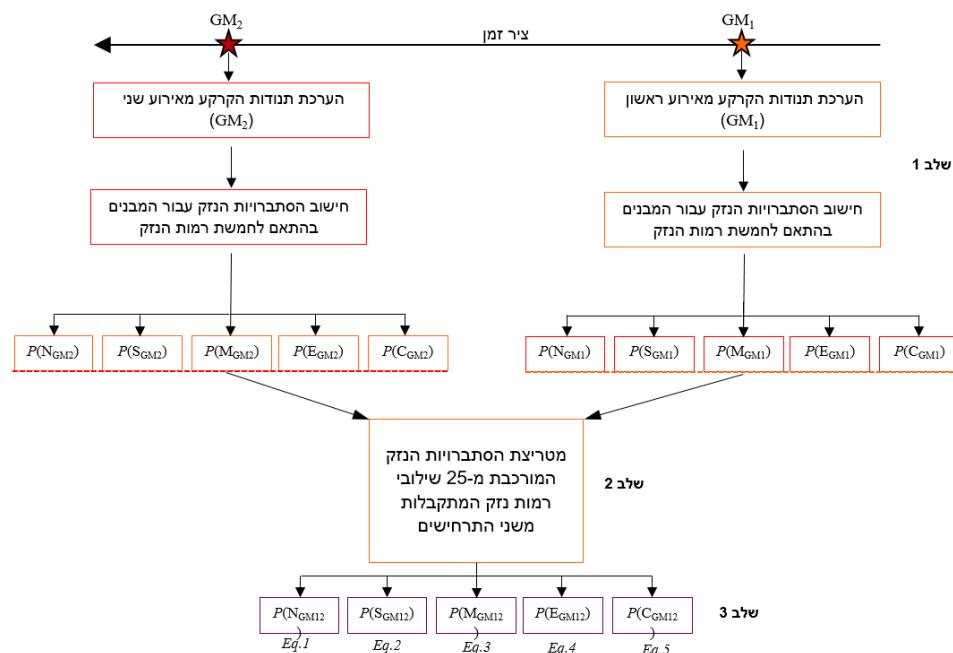


איור 2.1: אזור הסיכון הנבחן בעבודה. מוקדי רעידות האדמה מסומנות בכוכב אדום הישבים הנבדקים בעיגול כתום.

2.3 גישת ה-Simplified State Dependent

מטרת גישת Simplified State Dependent (SSD) היא להעריך את ההסתברויות של דרגות נזק במבנים כתוצאה מרצף של תנודות קרקע (איור 2.2). לפי גישת ה-SSD, רמות הנזק הנגרמות מתנודות הקרקע של הרעידה הראשונה, מוערכות באמצעות עקומת שבירות המתארת את עמידות המבנה טרם התרחשה הרעידה (intact) (איור 2.2, שלב 1). רמות הנזק הנגרמות מתנודות הקרקע של האירוע השני יחושבו, תחילה, בהנחה שהן בלתי תלויות באירוע הראשון ומוערכות באמצעות עקומת השבירות אשר שימשה להערכת הנזק מהאירוע הראשון. ההשפעה המצטברת של רצף האירועים על הנזק המבני תחושב בהמשך (ראה/י מטה).

עקומות שבירות, מתארות בדרך כלל חמש דרגות נזק: 1) "ללא", 2) "קל", 3) "בינוני", 4) "מתקדם" ו 5) "מוחלט". סטטיסטית, בשילוב של שני אירועים עוקבים, מתקבלים 25 זוגות אפשריים של נזק אשר ההסתברויות שלהם מסתכמות ל-1. ההסתברות של כל זוג מחושבת מתוך המכפלה של שתי הסתברויות הנזק של שני האירועים (איור 2.2, חלק 2). לאחר מכן, מיושם תהליך של סיכום 25 שילובי הסתברויות הנזק להסתברויות נזק מצטברות (איור 2.2, חלק 3). ההנחה היא שבמידה ומבנה מסווג בדרגת נזק מסוימת כתוצאה מתנודות הקרקע של האירוע הראשון, דרגת הנזק לאחר האירוע השני תוכל רק לעלות במידה והאירוע העוקב יהיה בעוצמה חזקה, בינונית וחלשה. לעומת זאת, במידה ועוצמת האירוע העוקב תהיה חלשה במיוחד, רמת הנזק המקורית של האירוע הראשון לא תשתנה. לדוגמה, אם לבניין נגרם נזק בדרגה "מתקדם" כתוצאה מתנודות הקרקע של האירוע הראשון, תנודת קרקע יחסית חלשה כתוצאה מהאירוע העוקב עלולה להסיט את המבנה לדרגת נזק מוחלט. כל תהליך החישוב בגישת ה- SSD מתואר בתרשים הזרימה בשלושה שלבים עיקריים באיור 2.2. חישוב עשרים וחמש שילובי דרגות הנזק האפשריים, ביחס לשני אירועי רעידת אדמה, וסכימתם להסתברויות רמות הנזק הסופיות, ניתנים לתיאור באמצעות מטריצה המופיעה באיור 2.2. התאים במטריצה מקודדים בצבעים בהתאם לרמת הנזק המצטבר והסופי לה הם תורמים ותואמים למשוואות 1-5 (ראה/י בהמשך).



איור 2.2: שלבים ליישום גישת Simplified State Dependent שלב 1 – הערכת תנודות הקרקע וחישוב הסתברויות רמות הנזק המתקבלות עבור כל מבנה בעקבות שני תרחישי רעידות אדמה עוקבים. שלב 2 – חישוב עשרים וחמש קומבינציות הנזק (ראה/י איור 2.3). שלב 3 – סיכום קומבינציות הנזק להסתברויות הנזק המצטברות, לפי משוואות 1-5 (ראה/י מטה). ביאור הסימנים ראה/י בהמשך

		Ground Motion 2 - Damage States				
		$P(N_{GM2})$	$P(S_{GM2})$	$P(M_{GM2})$	$P(E_{GM2})$	$P(C_{GM2})$
Ground Motion 1 - Damage States	$P(N_{GM1})$	$P(N_{GM1}) \cap P(N_{GM2})$	$P(N_{GM1}) \cap P(S_{GM2})$	$P(N_{GM1}) \cap P(M_{GM2})$	$P(N_{GM1}) \cap P(E_{GM2})$	$P(N_{GM1}) \cap P(C_{GM2})$
	$P(S_{GM1})$	$P(S_{GM1}) \cap P(N_{GM2})$	$P(S_{GM1}) \cap P(S_{GM2})$	$P(S_{GM1}) \cap P(M_{GM2})$	$P(S_{GM1}) \cap P(E_{GM2})$	$P(S_{GM1}) \cap P(C_{GM2})$
	$P(M_{GM1})$	$P(M_{GM1}) \cap P(N_{GM2})$	$P(M_{GM1}) \cap P(S_{GM2})$	$P(M_{GM1}) \cap P(M_{GM2})$	$P(M_{GM1}) \cap P(E_{GM2})$	$P(M_{GM1}) \cap P(C_{GM2})$
	$P(E_{GM1})$	$P(E_{GM1}) \cap P(N_{GM2})$	$P(E_{GM1}) \cap P(S_{GM2})$	$P(E_{GM1}) \cap P(M_{GM2})$	$P(E_{GM1}) \cap P(E_{GM2})$	$P(E_{GM1}) \cap P(C_{GM2})$
	$P(C_{GM1})$	$P(C_{GM1}) \cap P(N_{GM2})$	$P(C_{GM1}) \cap P(S_{GM2})$	$P(C_{GM1}) \cap P(M_{GM2})$	$P(C_{GM1}) \cap P(E_{GM2})$	$P(C_{GM1}) \cap P(C_{GM2})$

איור 2.3: שלב 2 המתואר על ידי מטריצה של 25 שילובים בין שתי קבוצות של חמש הסתברויות נזק. התאים במטריצה מקודדים בצבעים לפי דרגת הנזק המצטברת הסופית, בעקבות משוואות 1-5 (אדום - מוחלט; כתום-נרחב, צהוב - בינוני, כחול - קל וללא נזק בירוק).

כאמור, תהליך הסכימה של הסתברויות הנזק עבור חמש דרגות הנזק בשלב 3 (איור 2.2) מתואר על ידי חמש משוואות (ראה/י מטה) עבור ההסתברות הנצברת לנזק בדרגה "מוחלט", $P(C_{GM12})$ (משוואה 1); ההסתברות הנצברת לנזק בדרגה "מתקדם", $P(E_{GM12})$ (משוואה 2); ההסתברות הנצברת לנזק בדרגה "בינוני", $P(M_{GM12})$ (משוואה 3); ההסתברות הנצברת לנזק בדרגה "קל", $P(S_{GM12})$ (משוואה 4) וההסתברות הנצברת לנזק בדרגה "ללא נזק" $P(N_{GM12})$ (משוואה 5). בסדרת המשוואות "GM1" ו-"GM2" מציינים את אירוע תנודות הקרקע הראשון והשני בהתאמה. הסימנים, C, E, M, S, N הם דרגות הנזק "ללא נזק", "נזק קל", "נזק בינוני", "נזק מתקדם" ו "נזק מוחלט", בהתאמה.

$$\begin{aligned}
 (1) \quad P(C_{GM12}) = & P(C_{GM1}) \cap P(N_{GM2}) + P(C_{GM1}) \cap P(S_{GM2}) + P(C_{GM1}) \cap P(M_{GM2}) + P(C_{GM1}) \cap P(E_{GM2}) + P(C_{GM1}) \\
 & \cap P(C_{GM2}) + P(N_{GM1}) \cap P(C_{GM2}) + P(S_{GM1}) \cap P(C_{GM2}) + P(M_{GM1}) \cap P(C_{GM2}) + P(E_{GM1}) \\
 & \cap P(C_{GM2}) + P(E_{GM1}) \cap P(E_{GM2})
 \end{aligned}$$

$$(2) P(E_{GM12}) = P(E_{GM1}) \cap P(N_{GM2}) + P(E_{GM1}) \cap P(S_{GM2}) + P(E_{GM1}) \cap P(M_{GM2}) + P(N_{GM1}) \cap P(E_{GM2}) + P(S_{GM1}) \cap P(E_{GM2}) + P(M_{GM1}) \cap P(E_{GM2}) + P(M_{GM1}) \cap P(M_{GM2})$$

$$(3) P(M_{GM12}) = P(M_{GM1}) \cap P(N_{GM2}) + P(M_{GM1}) \cap P(S_{GM2}) + P(N_{GM1}) \cap P(M_{GM2}) + P(S_{GM1}) \cap P(M_{GM2})$$

$$(4) P(S_{GM12}) = P(S_{GM1}) \cap P(N_{GM2}) + P(S_{GM1}) \cap P(S_{GM2}) + P(N_{GM1}) \cap P(S_{GM2})$$

$$(5) P(N_{GM12}) = P(N_{GM1}) \cap P(N_{GM2})$$

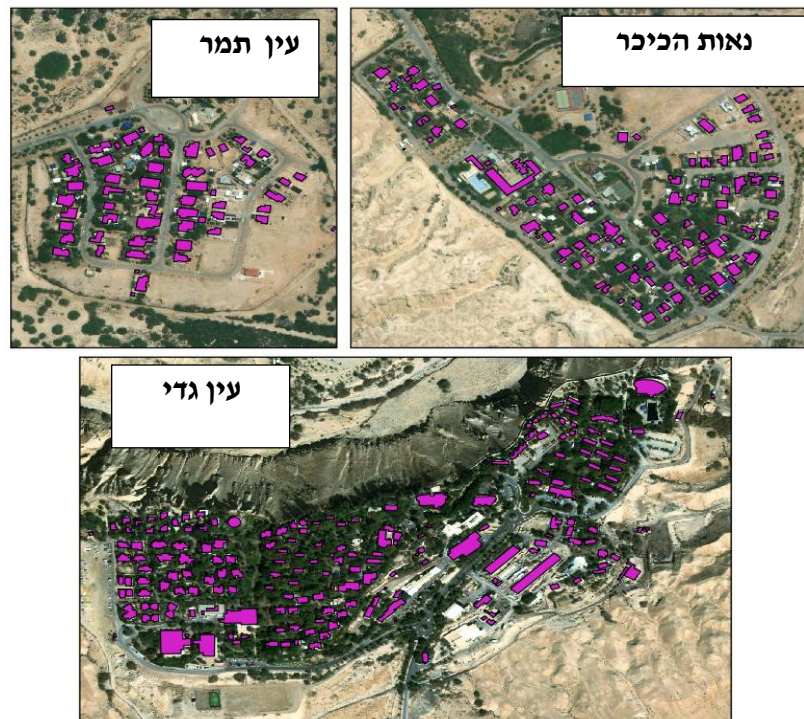
2.4 הדמיית הנזק המצטבר ביישובי ים המלח

תרחישי הנזק בעבודה הנוכחית התבססו על שלושת רכיבי הסיכון הבאים: (1) הסכנה (Hazard) – תרחיש רעידת האדמה ותנודות הקרקע הצפויים; (2) מצאי המבנים (Exposure) – הנכסים במרחב הסיכון ו-(3) פגיעות (Vulnerability). להלן פירוט לפי שלושת רכיבי הסיכון הללו.

1. מצאי המבנים (Exposure):

א) עבודה זו נסמכת על מצאי המבנים של מפ"י, מעודכן לשנת 2021. מידע זה כלל את המיקום הגאוגרפי של המבנים, הגאומטריה, שנת הקמה, גובה וייעוד המבנה. לצורך פשטות, בפרויקט הנוכחי נכללו מבני מגורים בלבד.

ב) סינון וטיפול במבנים חריגים ובמידע חסר. בשלב זה בוצע סינון ראשוני ברשומת המבנים בהתאם לקריטריונים הבאים: (1) במידה ושנת הבנייה של מבנה מסוים אינה ידועה, שנת הקמת המבנה נקבעה ל-1980 (כלומר, המבנה עם עמידות סיסמית נמוכה) ומטה; ו-(2) מבנים עם מאפיינים חריגים (למשל, מבני מגורים עם שטח וגאומטריה גדולים מאד המרמזים על שגיאה בסיווג הייעוד) הוסרו מרשומת המבנים. לאחר קליטה ועיבוד המידע של רשומת המבנים המתוקנת, הוכנה טבלה סופית הכוללת את מצאי המבנים והפרמטרים המאפיינים שלהם. מצאי המבנים בו נעשה שימוש בעבודה זו מוצג באיור 2.4.



איור 2.4: מפה המתארת את מצאי המבנים (פוליגונים סגולים), בנאות הכיכר, עין תמר ועין גדי, אשר שימש לתרחישי הערכת הנזק.

2. פגיעות (Vulnerability): בתהליך הכנת מצאי המבנים יש להגדיר שני גורמים מרכזיים שמשפיעים על רכיב הפגיעות המתגלם כפונקציית הנזק הייחודית של המבנה (הקשר בין רמת הסכנה, תכונות המבנה והנזק הצפוי). הפרמטר הראשון, "Bldg. Type", מתאר את סוג המבנה (בטון מזוין, גרעיני הקשחה, פלדה וכו'). הפרמטר השני, "Design Level", מאפיין את רמת התקן הסיסמי המתאים למבנה. כידוע, תקן 413 החל להיות מיושם מתחילת שנות ה-80 והתעדכן במשך השנים (Israel Standard 413, 2009). בהתאמה, ניתן להיעזר בשנת הבנייה כגורם אפשרי לקביעת סוג המבנה ורמת התקן הסיסמי שלו.

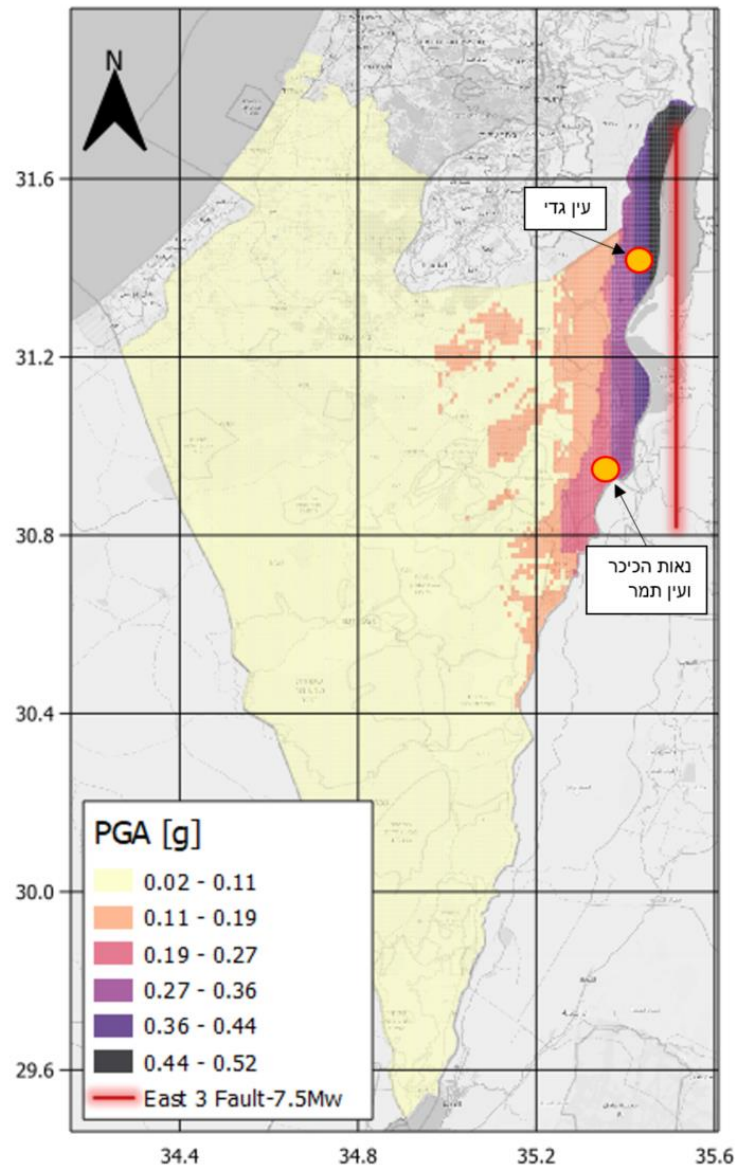
3. סכנה (Hazard): רכיב הסכנה המתאר את תנודות הקרקע הצפויות באזור ים המלח, התבסס על ארבעה תרחישים (טבלה 2.1) הכוללים תרחיש רעידה ראשית (Main shock) ושלושה תרחישי רעידות משנה (After shocks). תרחיש הרעידה הראשית במגניטודה $M_w = 7.5$ ותרחיש רעידת משנה במגניטודה $M_w = 6.5$ (E6.5 ו-E7.5 בהתאמה) מוקמו בסמוך לצד המזרחי של ים-המלח (קואורדינטות: 35.514/31.265, איור 1.2) אשר לאורכו עובר העתק הגבול המזרחי של אגן ים המלח (Sneh and Weinberger, 2014) (איור 2.1). שני תרחישי רעידות המשנה הנוספים, במגניטודה $M_w = 6.0$ ובמגניטודה $M_w = 6.5$ (תרחיש W6 ו-W6.5 בהתאמה) מוקמו קרוב להמשכו הדרומי המשווער של העתק יריחו (קואורדינטות: 35.451/31.298, איור 2.1).

כיוון העתק (סטרייק)	עומק העתק	נטיית העתק	קו אורך	קו רוחב	מגניטודה (Mw)	תרחיש
0°	10 [km]	90°	35.514	31.265	7.5	E 7.5 (Main Shock)
					6.5	E 6.5 (After Shock)
			35.451	31.298	6	W 6 (After Shock)
					6.5	W 6.5 (After Shock)

טבלה 2.1: מאפייני ארבעת תרחישי רעידות האדמה

תנודות הקרקע של תרחישי הסכנה חושבו בהתבסס על משוואת הניחות של Campbell and Bozorgnia, (2008) עבור תנועה אופקית שמתרחשת לאורך העתק סיסמי (איור 2.4), ואשר עליה מתבסס תיקון 5 לת"י 413 הנוכחי. אורך ההעתק שחושב התבסס על המשוואה האמפירית של Wells and Coppersmith (1994) המתארת את היחס שבין מגניטודה של רעידת אדמה לאורך העתק והתזוזה לאורכו. תנודות הקרקע חושבו באמצעות תוכנת "Hazardus". הגברות הנובעות מתת הקרקע נלקחו בחשבון, בהתאם לתקן הישראלי (Israel Standard, 413,) 2009 המתייחס לשינוי התכונות הגיאוטכניות של המסלע במרחב ישראל (כץ וחובי, 2008) ב-30 המטרים העליונים של הקרקע, בהתאם למהירות גל הגזירה הממוצעת (Vs30) בעומק זה.

לאחר הגדרת רכיבי הסיכון הורצו ארבעת התרחישים וחושבו דרגות הנזק במבנים עבור כל אחד מארבעת התרחישים הבודדים בהתאם. לאחר מכן חושב הנזק המצטבר המתקבל משילוב זוגות של אירועים, המורכבים מאירוע ה-E 7.5 , main Shock בצירוף כל אחד מאירועי ה-after shock, באמצעות גישת Simplified State Dependent. בסיום ההרצות סוכמו תוצאות התרחישים ונותחו בעזרת כלי GIS ובאמצעות כלים נוספים שתוכנתו במיוחד לפרויקט זה.



איור 2.4: דוגמא למפת תאוצת קרקע מרבית המתקבלת מתרחיש (E 7.5) Mw 7.5.

2.5 תוצאות

תוצאות הנזק של התרחישים מתקבלות לפי חמש דרגות נזק עבור כל מבנה: (1) אין נזק (None); (2) נזק קל (Slight); (3) נזק בינוני (Moderate); (4) נזק מתקדם (Extensive) ו- (5) נזק מוחלט (Complete). סכימה של ההסתברויות בכל עמודה של דרגת נזק מייצגת את סכום המבנים שנפגעו, לפי כל דרגת נזק. סיכום תוצאות ארבעת תרחישי הנזק המדמים אירועים בדידים של רעידות אדמה ליישובי ים המלח (W6, W6.5, E6.5, E7.5) מוצג בטבלה 2.2. תוצאות הנזק מעלות כי התרחיש החמור ביותר, הוא "E7.5" (Mw=7.5). עבור תרחיש זה מספר המבנים שצפויים להינזק בכל דרגת נזק: 75 מבנים (15.6% מכלל המבנים) עם דרגת נזק, "אין נזק"; 81

מבנים (16.9% מכלל המבנים) עם דרגת נזק, "קל"; 110 מבנים (22.9% מכלל המבנים) עם דרגת נזק, "בינוני"; 96 מבנים (20% מכלל המבנים) עם דרגת נזק "מתקדם" ו-118 מבנים (24.6% מכלל המבנים) עם דרגת נזק "מוחלט". הנזק הנמוך ביותר התקבל עבור תרחיש "W6" ($M_w=6$), עם המגניטודה הנמוכה ביותר מבין ארבעת התרחישים. בתרחיש זה מספר המבנים שצפויים להינזק הינו: 329 (68.5% מכלל המבנים) עם דרגת נזק "אין נזק"; 72 (15% מכלל המבנים) עם דרגת נזק "קל"; 54 (11.3% מכלל המבנים) עם דרגת נזק "בינוני"; 20 (4.2% מכלל המבנים) עם דרגת נזק "מתקדם" ו-5 מבנים (1% מכלל המבנים) עם דרגת נזק "מוחלט". בכל התרחישים שנבדקו צפוי שבעין גדי יהיה נזק משמעותי בהשוואה לעין תמר ונאות הכיכר. ביטוי לכך ניתן לראות בתוצאות של תרחישים E6.5, W6, W6.5 בהם מספר המבנים הצפוי לנזק מוחלט (Complete) או נזק מתקדם (Extensive) גבוה בעין גדי לעומת יתר הישובים. בתרחיש E7.5 מספר המבנים בעין גדי שצפויים להיות בדרגת נזק "מוחלט" הוא 89 (35.7% מכלל המבנים ביישוב). לעומת זאת בתרחיש זה מספר המבנים בעין תמר ונאות הכיכר, שצפויים להיות בדרגת נזק "מוחלט" הוא ~15 (16.2%-10.4%, בהתאמה).

scenario	Settlement	None		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
		#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
W6	All	329	68.5	72	15.0	54	11.3	20	4.2	5	1.0
W6	Ein Gedi	123	49.4	56	22.5	47	18.9	18	7.2	5	2.0
W6	Ein Tamar	85	86.7	8	8.2	4	4.1	1	1.0	0	0.0
W6	Neot Ha-Kikar	121	91.0	8	6.0	3	2.3	1	0.8	0	0.0
W6.5	All	225	46.9	82	17.1	87	18.1	54	11.3	32	6.7
W6.5	Ein Gedi	47	18.8	51	20.4	71	28.4	50	20.0	31	12.4
W6.5	Ein Tamar	73	75.3	14	14.4	8	8.2	2	2.1	0	0.0
W6.5	Neot Ha-Kikar	105	79.5	17	12.9	8	6.1	2	1.5	0	0.0
E6.5	All	278	57.8	91	18.9	73	15.2	30	6.2	9	1.9
E6.5	Ein Gedi	101	40.6	58	23.3	56	22.5	25	10.0	9	3.6
E6.5	Ein Tamar	72	74.2	15	15.5	8	8.2	2	2.1	0	0.0
E6.5	Neot Ha-Kikar	105	78.9	18	13.5	8	6.0	2	1.5	0	0.0
E7.5	All	75	15.6	81	16.9	110	22.9	96	20.0	118	24.6
E7.5	Ein Gedi	17	6.8	27	10.8	54	21.7	62	24.9	89	35.7
E7.5	Ein Tamar	23	23.2	21	21.2	23	23.2	16	16.2	16	16.2
E7.5	Neot Ha-Kikar	36	26.9	33	24.6	33	24.6	18	13.4	14	10.4

טבלה 2.2: סיכום תוצאות הנזקים עבור תרחישים המדמים אירוע יחיד. המספרים בטבלה מציגים את מספר ואחוזי המבנים לפי דרגת נזק

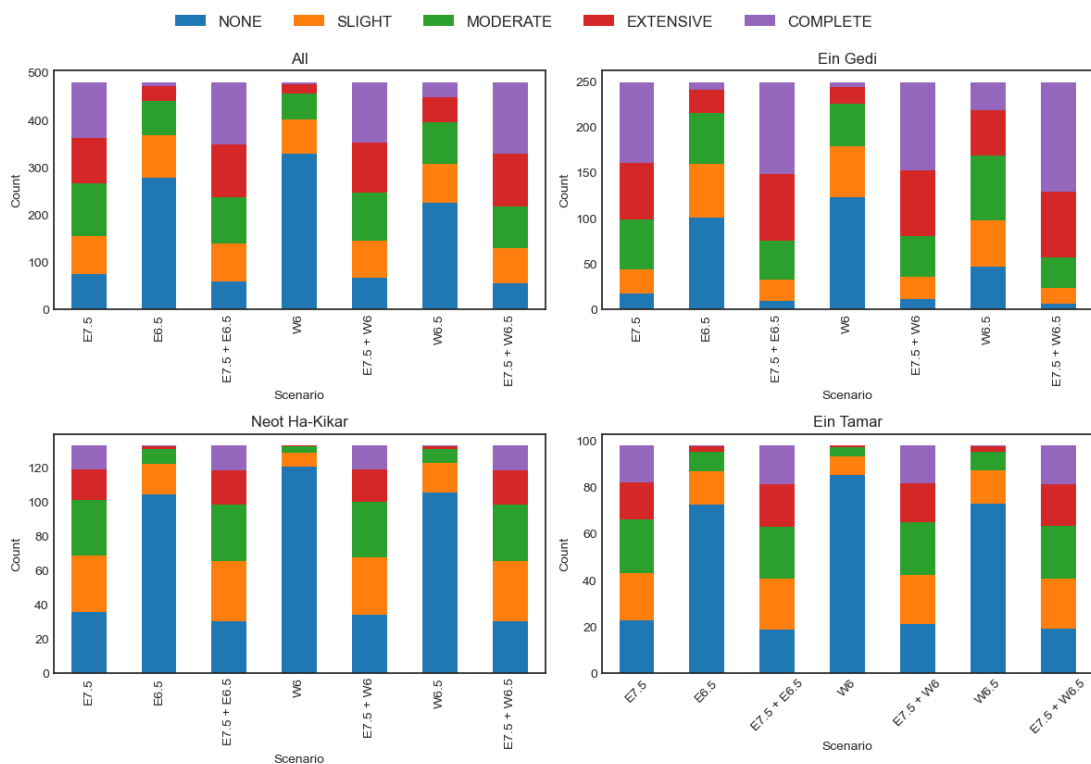
טבלה 2.3 מציגה את סיכום תוצאות הנזק המצטבר הנגרם מהתרחשויות של שני תרחישים עוקבים (E7.5+E6, E7.5+W6.5, E7.5+E6.5). תוצאות הנזק מראות כי בתרחיש המשלב את שני האירועים העוקבים: E7.5 + W6.5 צפוי להיות בו הנזק החמור ביותר בו יהיו 152 מבנים (31.7% מסך כל המבנים) אשר צפויים לחוות נזק מוחלט, 110 מבנים (22.9% מסך כל המבנים) עם נזק מתקדם, 88 מבנים (18.3% מכלל המבנים) עם נזק בינוני, 75 מבנים (15.6% מכלל המבנים) עם נזק קל ו-55 מבנים (11.5% מסך כל המבנים) ללא נזק. לעומת זאת, בתרחישים E7.5 + W6 וב- E7.5 + E6.5 מספר המבנים שצפויים לנזק מוחלט הוא 127 ו-132 (26.5%-10.4%)

27.6% מסך כל המבנים), בהתאמה. עבור התרחישים שנבחנו אשר משלבים שני אירועים ברצף, כמו בתרחישים המדמים אירוע יחיד, מספר המבנים עם נזק משמעותי בעין גדי הוא הגבוה ביותר וכולל 120 מבנים עם נזק מוחלט המהווים 48.5% מכלל המבנים ביישוב. עין תמר ונאות הכיכר מציגות תוצאות נזק דומות ונמוכות יותר מהמקרה של עין גדי, בהם מספר המבנים שצפויים להיות בדרגת נזק מוחלט הם 17 ו-15 מבנים, בהתאמה המהווים מתחת ל- 20% מסך כל המבנים שבכל יישוב.

Scenario	settlements	None		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
		#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
E7.5 + W6	All	66	13.8	79	16.5	101	21.0	107	22.3	127	26.5
E7.5 + W6	Ein Gedi	11	4.4	24	9.6	46	18.5	72	28.9	96	38.6
E7.5 + W6	Ein Tamar	21	21.4	21	21.4	23	23.5	17	17.3	16	16.3
E7.5 + W6	Neot Ha-Kikar	34	25.4	34	25.4	33	24.6	19	14.2	14	10.4
E7.5 + W6.5	All	55	11.5	75	15.6	88	18.3	110	22.9	152	31.7
E7.5 + W6.5	Ein Gedi	6	2.4	18	7.2	33	13.3	72	28.9	120	48.2
E7.5 + W6.5	Ein Tamar	19	19.2	22	22.2	23	23.2	18	18.2	17	17.2
E7.5 + W6.5	Neot Ha-Kikar	30	22.6	35	26.3	33	24.8	20	15.0	15	11.3
E7.5 + E6.5	All	58	12.1	80	16.7	98	20.5	111	23.2	132	27.6
E7.5 + E6.5	Ein Gedi	10	4.0	23	9.2	43	17.3	73	29.3	100	40.2
E7.5 + E6.5	Ein Tamar	19	19.2	22	22.2	23	23.2	18	18.2	17	17.2
E7.5 + W6.5	Neot Ha-Kikar	15	15.3	22	22.4	22	22.4	20	20.4	19	19.4

טבלה 2.3: סיכום תוצאות של הנזקים המצטברים עבור תרחישים המשלבים שני אירועי רעידות אדמה ברצף. המספרים בטבלה מציגים את מספר המבנים ואחוז המבנים לפי דרגת הנזק.

סיכום התוצאות של כל התרחישים שנבחנו בפרויקט מוצג באיור 2.5, המתאר את מספר המבנים המסווגים לפי דרגות נזק והיישובים הנבחנו.



איור 2.5: סיכום תוצאות תרחישי הנזק המתארים את מספר המבנים לפי חמש דרגות נזק עבור סך כל המבנים (All) ולפי יישוב.

2.6 דיון ומסקנות

יישובי ים המלח מצויים בסיכון גיאולוגי-סיימי גבוהים במיוחד עקב קרבתם למערכת העתקי ים-המלח המהווה את המקור לרעידות אדמה חזקות באזור. עבודה זו התמקדה בסיכון מרצף של אירועי תנודות קרקע אשר נגרמות מרעידה עיקרית ומרעידת משנה ובפיתוח תרחישי הערכת הנזק המצטבר בבייניים ממספר אירועי רעידות אדמה עוקבות. מחקרים שנעשו בעבר בעולם הצביעו על הנזק הרב של תרחישים אלו ובנוסף, הדגישו את המשמעות של התחשבות בהשפעות המצטברות שלהן בנוגע להערכות סיכוני רעידות אדמה.

תרחיש המשלב רצף של רעידות אדמה הנו תרחיש "מרובה סיכונים" (פרוכט וחוב', 2022). האתגר בתרחיש שכזה הוא העדכון של רכיב הפגיעות של מבנה שחוה את האירוע הראשון, חישוב של הנזק במבנה באירוע השני ולבסוף חישוב של הנזק הנצבר במבנה כתוצאה של שני האירועים העוקבים ביחד. מקובל כי תרחישי הערכת נזקים למבנים כתוצאה מרעידות אדמה יתבצעו באמצעות עקומות שבירות, אשר פיתוחן הינה משימה תובענית, הדורשת כוח חישוב רב ומומחיות בהפעלת מודלים דינמיים מבניים ומודלים סטטיסטיים. לאור אתגרים אלו בישראל בכלל ועבור מבנים של יישובי ים המלח בפרט טרם פותחו עקומות שבירות ובהתאם גם טרם נעשו הערכות נזקים המבוססות על עקומות שבירות שאומצו מהספרות. הערכת נזק מבני כתוצאה מרצף של רעידות קרקע הינה משימה מורכבת ומאתגרת אף יותר, וזאת בשל הצורך לפתח בנוסף לעקומת השבירות למבנה היציב

(intact) גם עקומות שבירות נוספות המתארות את רכיב הנזק המצטבר (State Dependent fragility curves). במסגרת הפרויקט הנוכחי פותחה גישה עדכנית המאפשרת להעריך את הנזק המצטבר תוך שימוש בגישה חדשה בשם "Simplified State Dependent". באמצעות גישה זו נערכו שלושה תרחישים להערכת נזק המשלבים שני אירועים של רעידות אדמה.

כחלק מהערכת הנזק המצטבר, חושבו תחילה הסתברויות לרמות הנזק השונות עבור כל רעידת אדמה בנפרד. סיכום תוצאות התרחישים הבודדים מראה כי תוצאות הנזק של תרחיש "W6.5" ($M_w=6.5$) גדולות יותר מאשר תרחיש "E6.5" ($M_w=6.5$). ממצא זה מצביע על כך כי הסיכון הצפוי מהתרחישים המערביים לשובים הנבדקים גדול יותר לעומת הסיכון מהתרחישים המזרחיים. מגמה זו אינה מפתיעה בשל המרחק הקצר של המבנים שנבדקו מהעתקים המערביים. מבין שלושת הישובים שנבדקו בארבעת התרחישים המדמים אירוע יחיד (טבלה 2.2), בעין גדי הנזקים המבניים צפויים להיות הגבוהים ביותר ולכן עין גדי נמצאת תחת הסיכון הגבוה ביותר. תוצאות אלו נובעות מתנודות קרקע שצפויות להיות גבוהות יותר בעין גדי (14 ק"מ מהעתקים המזרחיים) בהשוואה לנאות הכיכר (15 ק"מ מהעתקים המזרחיים) ועין תמר (16 ק"מ מהעתקים המזרחיים), עקב הקרבה להעתק הסיסמי שנבחן בעבודה זו. מניתוח התוצאות מסתבר שתרחיש "E7.5" ($M_w=7.5$) הנו המסוכן ביותר כאשר בתרחישים "W6.5" ו-"W6" (מרחקים מהעתקים מערביים: עין גדי 18 ק"מ, עין תמר ונאות הכיכר 31 ק"מ), מתקבל נזק רב, במיוחד בעין גדי. הנזקים הנמוכים ביותר מתקבלים עבור תרחיש "E6.5".

סיכום תוצאות הנזק המצטבר של שלושת התרחישים המשולבים שנבחנו מראה כי בתרחיש "E7.5 + W6.5" צפוי להיות הנזק הגבוה ביותר. ממצא זה אינו מפתיע מאחר ובתרחישים "E7.5" ו-"W6.5" נמצא שהם המסוכנים ביותר גם כתרחישים בודדים. התוצאות של התרחישים הבודדים מראות כי בעקבות האירוע הראשון (E7.5) צפויים 118 מבנים להיות עם נזק מוחלט ובעקבות האירוע השני (W6.5) צפויים 84 מבנים להיות עם נזק מוחלט. תוצאות הנזק המצטבר של שני תרחישים אלו מראה כי 132 מבנים צפויים להיות עם נזק מוחלט, כלומר האירוע השני הוסיף "רק" 14 מבנים שצפויים להיות עם נזק מוחלט. ניתן לקשור את ההתוספות של מספר היחסי המועט של המבנים לדרגת נזק מוחלט לאחר האירוע השני לשני גורמים עיקריים: 1) מבנים שסווגו בדרגת נזק מוחלט לאחר האירוע הראשון יהיו באותה דרגת נזק גם לאחר האירוע השני ו-2) התוספות של מבנים לדרגת נזק "מוחלט" כתוצאה של נזק מצטבר של דרגות נזק נמוכות יותר. ניתן לראות שעבור דרגות הנזק None-Moderate מספר המבנים נמוך יותר בתרחיש המצטבר בהשוואה למספר המבנים שניזוקו לאחר האירוע הראשון (E7.5). למעשה, מבנים שסווגו בדרגות הנזק הנמוכות יותר לאחר הרעידה הראשונה חוו נזק נוסף מהרעידה השנייה (W6.5) ו"הוסטו" לדרגות הנזק הגבוהות יותר.

אנו מקווים שתוצאות עבודה זו הכוללות את הפיתוח של גישת "Simplified State Dependent" ויישומה לבחינת תרחישי נזק מצטברים יתרמו לשיפור בהערכת הסיכונים הסיסמיים וההיערכות של מדינת ישראל בכלל וביישובי ים המלח בפרט. בנוסף, שימוש בגישה החדשה והפיתוחים בעבודה הנוכחית עשויים לעזור למקבלי

ההחלטות להבין את היקף הנזק המצטבר, שיגרם מרצף של אירועי רעידות אדמה בסמוך לישובים הממוקמים במרכז ובדרום ים המלח, ויעזרו להם להיערך בצורה מיטבית לקראתם.

2.7 מקורות

- כץ, ע., הכט, ה., אלמוג, ע., 2008. מפת סכנה ארצית לגלישות-מדרון בישראל; גיליון מרכז, קני"מ 1:200,000 המכון הגיאולוגי, דוח GSI/07/2008.
- כץ, ע., הכט, ה., אלמוג, ע., 2008. בסיס נתונים עבור תכנת HAZUS לתרחישי רעידות אדמה בישראל: מפה גיאוטכנית ומפה של רגישות המדרונות לכשל. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/08/2008.
- סלמון, ע., צביאלי, ד., רוזנפוט, מ., להמן, ט., היימן, א., אברמוב, ר., 2008. האזורים במישור החוף של ישראל בהם נדרשת חקירת הסיכון להתנולות. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/34/2008.
- סלמון, ע., 2009. מפת האזורים המועדים להצפה מצונאמי לאורך חופי הים התיכון של ישראל במפרץ חיפה, גוש דן, אשדוד ואשקלון. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/24/2009, מוגש לוועדת ההיגוי הממשלתית להיערכות לרעידות אדמה בישראל, http://www.gsi.gov.il/_Uploads/744GSI-24-2009.pdf.
- פרוכט, ע., לוי, צ., אבירב, ו., סלמון, ע., קלבו'ר, ר., 2022. גישה חדשה להערכת נזקים במבנים בודדים כתוצאה מרעידת אדמה, אזור מרכז-דרום ים המלח. פרק 2.1 ב תגובת התשתית באגן ים המלח לשינויים הטבעיים ומעשה ידי אדם: מסגרת רב שנתית לניטור ומחקר 2018-2028 דו"ח מסכם לשנת 2022, עורך אייל, ש. המכון הגיאולוגי דוח GSI/16/2022
- Bradley BA, Quigley MC, Van Dissen RJ, Litchfield NJ. Ground Motion and Seismic Source Aspects of the Canterbury Earthquake Sequence. Earthquake Spectra. 2014; 30(1):1-15. doi:10.1193/030113EQS060M
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2008, October). Empirical ground motion model for shallow crustal earthquakes in active tectonic environments developed for the NGA project. In Proceedings of fourteenth world conference on earthquake engineering.
- Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, Amendment No. 3. The Standards Institution of Israel (2013), <http://www.sii.org.il/1039-he/SII.aspx>
- FEMA (2020), Hazus Earthquake Model Technical Manual.
- Hamiel Y, Amit R, Begin ZB, Marco S, Katz O, Salamon A, Zilberman E, Porat N (2009) The seismicity along the Dead Sea fault during the last 60,000 years. Bull Seismol Soc Am 99:2020–2026
- Kam, W. Y., Pampanin, S., Dhakal, R., Gavin, H. P., & Roeder, C. (2010). Seismic performance of reinforced concrete buildings in the September 2010 Darfield (Canterbury) earthquake. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 43(4), 340-350.
- Mildon, Z. K., Roberts, G. P., Faure Walker, J. P., & Iezzi, F. (2017). Coulomb stress transfer and fault interaction over millennia on non-planar active normal faults: The M_w 6.5–5.0 seismic sequence of 2016–2017, central Italy. Geophysical Journal International, 210(2), 1206-1218.

Moon, L., Dizhur, D., Senaldi, I., Derakhshan, H., Griffith, M., Magenes, G., & Ingham, J. (2014). The demise of the URM building stock in Christchurch during the 2010–2011 Canterbury earthquake sequence. *Earthquake Spectra*, 30(1), 253-276.

Papadopoulos, A. N., Bazzurro, P., & Marzocchi, W. (2021). Exploring probabilistic seismic risk assessment accounting for seismicity clustering and damage accumulation: Part I. Hazard analysis. *Earthquake Spectra*, 37(2), 803-826.

Papadopoulos, A. N., Bazzurro, P., & Marzocchi, W. (2021). Exploring probabilistic seismic risk assessment accounting for seismicity clustering and damage accumulation: Part II. Hazard analysis. *Earthquake Spectra*, 37(2), 803-826.

Sagy A, A Sneh, Rosenshaft M, Bartov Y (2013) Map of 'Active' and 'Potentially Active' Faults that Rupture the Surface in Israel. Updates 2013 for Israel Standard 413: Definitions, comments and clarifications. Final Report, Isr. Geol. Surv. Report # GSI/02/2013 (in Hebrew).

Shapira., A., Avni, R., Nur, A., 1993. New estimate of the Jericho earthquake epicenter of July 11, 1927. *Israel Journal of Earth Sciences*, v. 42, p. 93-96.

Sneh A, Weinberger R (2014). Major Structures of Israel and Environs, scale 1:500,000. Geological Survey of Israel.

Stewart, J. P., Lanzo, G., Ausilio, E., Cairo, R., Bozzoni, F., Capatti, M. C., & Zimmaro, P. (2017). Engineering Reconnaissance following the October 2016 Central Italy Earthquakes-Version 2.

Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.

3. מעקב אחר תנועות קרום במרכז אגן ים המלח באמצעות שיטות גיאודטיות

חמיהל, י., פיאטיברטוב, א.

המכון הגיאולוגי

3.1 רקע

מחקר זה מתמקד בתנועות קרום כדור הארץ באזור מרכז אגן ים המלח (איור 3.1). אגן ים המלח נמצא בחלקו הדרומי של העתק ים המלח. העתק זה הוא המבנה הטקטוני הפעיל ביותר והגורם המרכזי לרעידות אדמה חזקות באזורנו. ההעתק ממוקם לאורך הגבול בין הלוח הטקטוני של סיני והלוח הערבי. התנועה השמאלית היחסית בין שני לוחות טקטוניים אלו מתבטאת במעוות שמצטבר עם הזמן, מרוכז בעיקר בשולי הלוחות, ומשתחרר ברעידות אדמה. כפי שיפורט בהמשך, במחקר הנוכחי השתמשנו במדידות גיאודטיות של GNSS (Global Navigation Satellite System) ו-InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) לצורך הבנת אופי וקצב התנועה באזור מרכז אגן ים המלח.

סקרי GNSS לאורך העתק ים המלח מסייעים בהערכת קצבי התנועה, שדה המאמצים התכונות והמכאניקות של ההעתק. נתונים אלו הכרחיים בכדי להעריך את הסיכוי לרעידת אדמה במקטע מסוים של ההעתק. מדידות GNSS קודמות קבעו שיעור תנועה של כ-5 מ"מ לשנה באזור הערבה, דרומית לאגן ים המלח (Masson et al., 2015; Hamiel et al., 2018a). שיעורים דומים התקבלו צפונה לאגן, לאורך העתק יריחו (Hamiel et al., 2018b). בדרום אגן ים המלח, Hamiel and Piatibratova, 2019 הראו כי התנועה מתחלקת לשניים בין שני צידי האגן, המזרחי והמערבי.

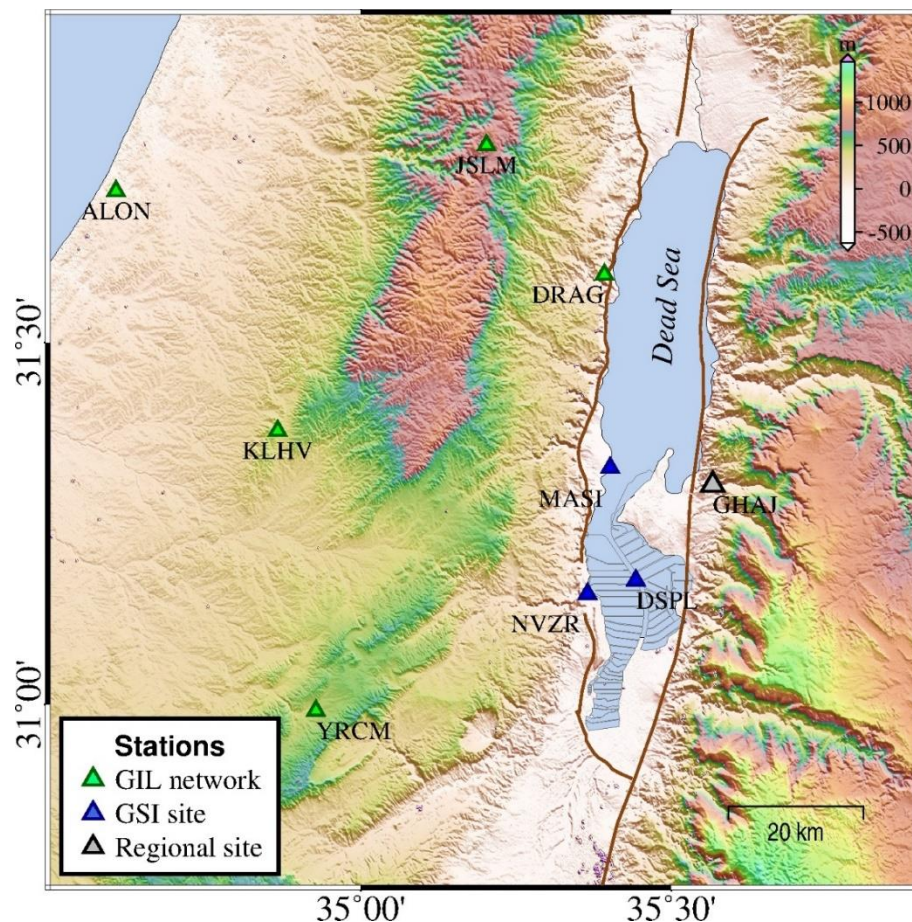
במסגרת המחקר הנוכחי ביצענו מדידות של תחנות GNSS, עיבדנו נתוני InSAR והשוואנו בין סטי נתונים אלו עבור אזור מרכז אגן ים המלח וזאת לצורך קביעת שיעור התנועה האופקית והאנכית באזור זה. במחקר שולבו נתונים ממספר תחנות GNSS קבועות של מספר רשתות ונעשה עיבוד וניתוח משותף של כלל תחנות המדידה באזור.

3.2 שיטות

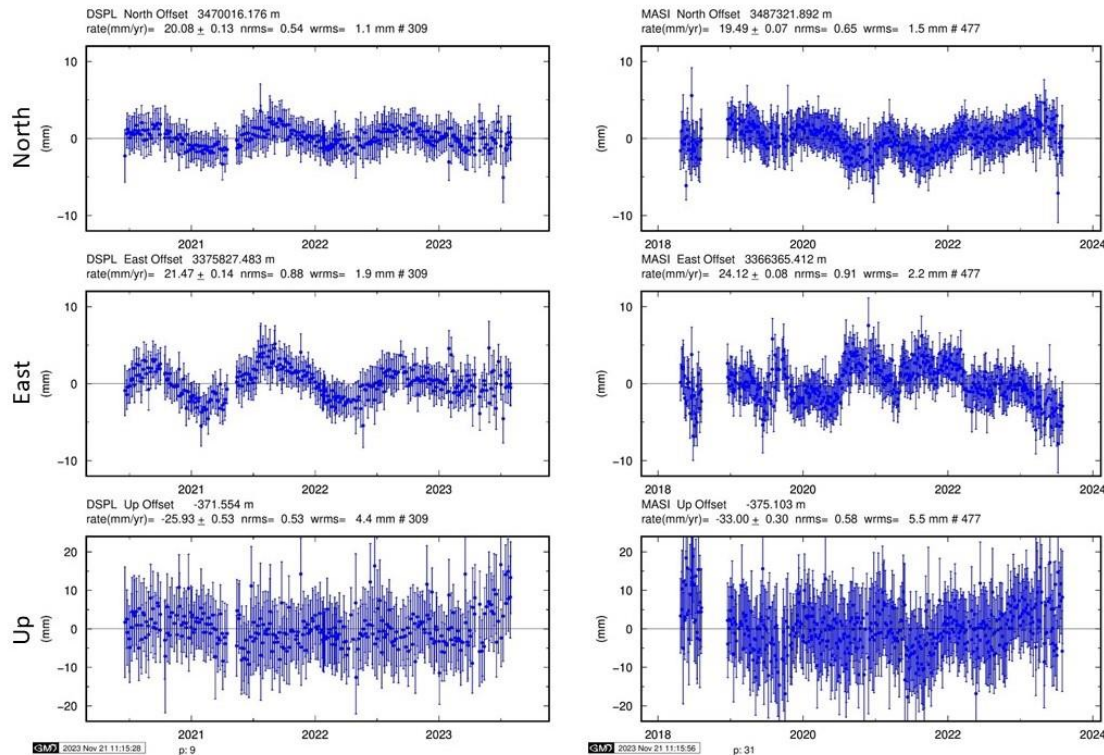
א. מדידה ועיבוד של נתוני GNSS

נתוני GNSS גולמיים מ-37 תחנות קבועות (איור 3.1) שנמדדו בין השנים 2018 ל-2023 עובדו ונותחו במחקר זה. המחקר כולל נתונים משתי רשתות של תחנות קבועות בישראל ועוד נתונים מתחנות קבועות נוספות באזורינו. לצורך המחקר השתמשנו בנתונים גולמיים מ-18 תחנות GNSS קבועות בישראל שהן חלק מהרשת הגיאודטית של ישראל, רשת GIL (משולשים ירוקים באיור 3.1), 10 תחנות GNSS שהן חלק מרשת תחנות הקבע של המכון הגיאולוגי (משולשים כחולים באיור 3.1). 3 תחנות מרשת זו נמצאים בתוך אגן ים המלח. בנוסף, השתמשנו בנתונים מ-9 תחנות קבע אזוריות, כאשר תחנה אחת ממוקמת בירדן ממזרח לים המלח (משולש אפור באיור 3.1). השימוש בנתוני תחנות קבע מאפשר מדידה ברזולוציה יומית ובדיוק גבוה. הנתונים הגולמיים מכלל תחנות ה-GNSS הקבועות עובדו יחד באמצעות תוכנת GAMIT/GLOBK, גרסה 10.7 (Herring et al., 2018). רכיב ה-GAMIT בתוכנה משתמש בנתוני המדידה, בנתוני המיקום של לווייני ה-

GNSS ופרמטרים נוספים הקשורים לסיבוב כדור הארץ ועיכובים אטמוספריים ומייצר מטריצת מיקומים יומיים של התחנות ומרחקים ביניהם. GLOBK משלב את כלל הנתונים היומיים ויוצר פתרון רב שנתי למיקום ולמהירויות של תחנות. הליך העיבוד שלנו כלל שתי הרצות של GAMIT ו-GLOBK. בתום ההרצה הראשונה, מתקבלים מיקומים ומהירויות ראשוניות. מיקומים ומהירויות אלו משמשים לאחר מכן כערכים א-פריוריים עבור הרצה נוספת של GAMIT ו-GLOBK. התוצאות הסופיות כוללות את קואורדינטות, מהירויות וסדרות זמן של כלל התחנות ביחס למערכת יחוס גלובלית- ITRF2014. איור 3.2 מציג את סדרות הזמן ביחס למערכת היחוס הגלובלית (ITRF2014) של תחנות MASI ו- DSPL שנמצאות בתוך אגן ים המלח. כדי להבין את הדפורמציה המקומית בקרבת העתק ים המלח המרנו את כלל המהירויות ממערכת היחוס הגלובלית (ITRF2014) למערכת ייחוס מקומית. בחרנו להמיר את מהירות התחנות למערכת היחוס של לוח סיני. עשינו זאת תוך שימוש בנתוני קוטב אוילר של לוח סיני כפי שהתקבלו ממחקרים קודמים שלנו (Hamiel et al., 2018a,b; Hamiel and Piatibratova, 2019; Hamiel and Piatibratova, 2021). התוצאה הסופית היא מהירות התחנות ביחס ללוח סיני (איור 3.3).



איור 3.1: מפה המציגה את מיקום תחנות ה GNSS באזור ים המלח. משולשים ירוקים מציינים מיקום תחנות הקבע של הרשת הגיאודטית של ישראל, רשת GIL. משולשים כחולים מציינים את מיקום תחנות הקבע של רשת המכון הגיאולוגי, רשת GSI, באזור ים המלח. משולש אפור מציין את המיקום של תחנת קבע באזור ים המלח. קוים חומים מציינים את מיקום ההתקנים העיקריים באזור אגן ים המלח.



איור 3.2: סדרות זמן של תחנות MASI (ימין) ו-DSPL (שמאל) ביחס למערכת יחוס גלובלית (ITRF2014). הציר האנכי מציג העתקה מנורמלת במילימטרים לפי מהירויות התחנה, כך ששינוי המיקום כתוצאה מהירות התחנה הופחת מן ההעתקה המוצגת. הציר האופקי הוא זמן בשנים. פאנלים עליונים מציגים את ההעתקה המנורמלת בכוון צפון, פאנלים אמצעיים מציגים העתקה בכוון מזרח ופאנלים תחתונים מציגים העתקה אנכית.

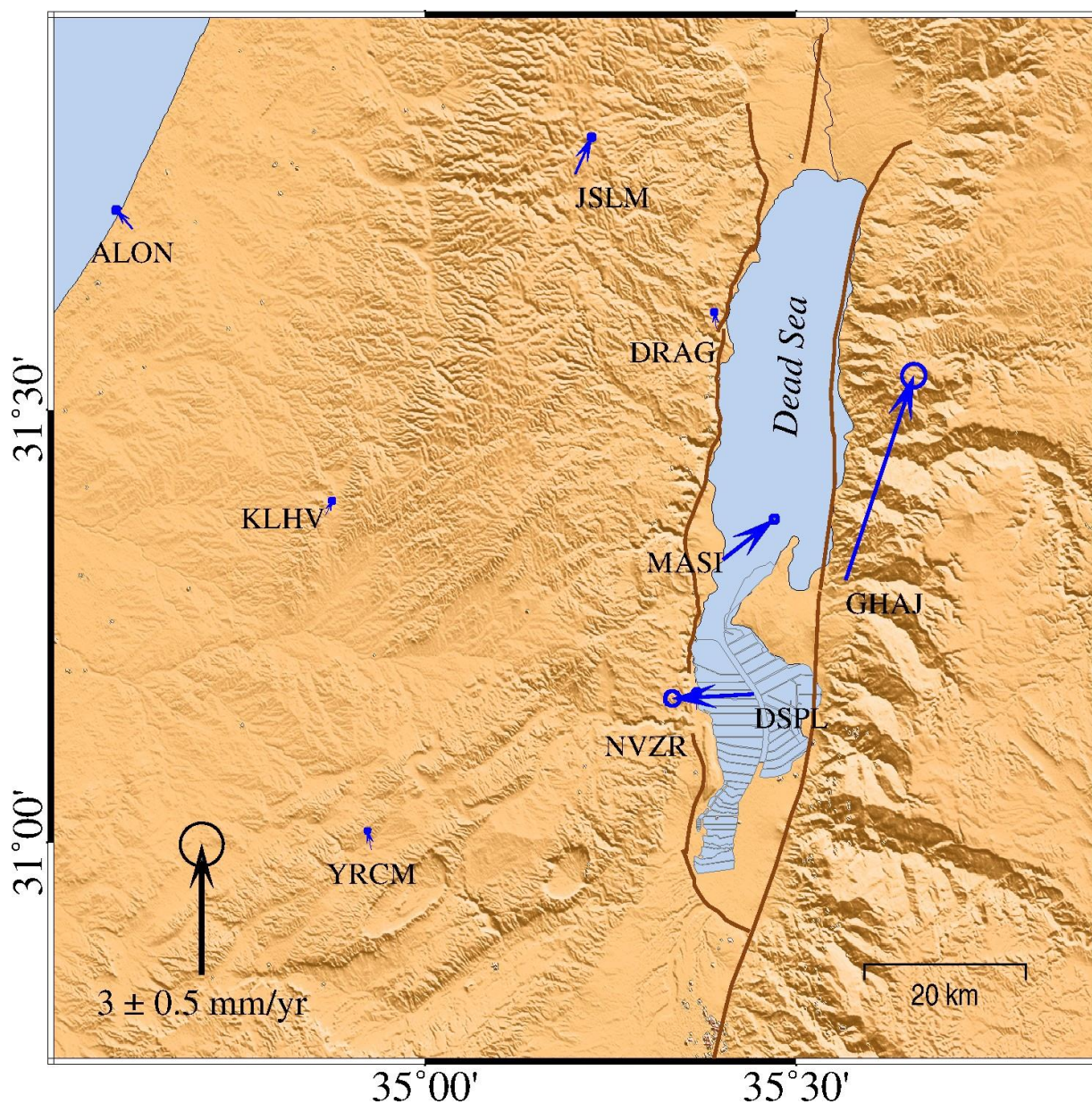
ב. עיבוד נתוני InSAR ויצירת סדרות זמן

במחקר זה השתמשנו בנתוני InSAR מלוויין Sentinel-1 של סוכנות החלל הארופאית. כל הנתוני InSAR הגולמיים שעובדו ומוצגים במחקר זה זמינים באופן חופשי בארכיון נתוני הלוויין של סוכנות החלל הארופאית (<https://dataspace.copernicus.eu>).

עיבוד נתוני ה-InSAR בוצע בעזרת תוכנת GMTSAR (Sandwell et al., 2011). תוכנת GMTSAR המבוססת על כלי מיפוי גנריים (GMT; Wessel et al., 2019) היא מערכת קוד פתוח של עיבוד והצגה של נתוני InSAR. למערכת שלושה מרכיבים עיקריים עבור עיבוד סטנדרטי של נתוני InSAR: (1) שלב מקדים הכולל שינוי כלל נתוני לווינים שונים ונתוני מסלולם לפורמט אחיד וגנרי; (2) עיבוד נתוני InSAR ויצירת אינטרפרוגרמות תוך כדי מיקוד גיאוגרפי והתחשבות במודל הטופוגרפי מדויק; (3) שלב פוסט-עיבוד, המבוסס בעיקר על כלי ה-GMT, כדי לסנן את האינטרפרוגרמות, בניית תוצרים אינטרפרומטריים של הפאזה, הקוהרנטיות, שיפוע הפאזה, ותזוזות בכוון הלוויין בקואורדינטות גיאוגרפיות.

בנוסף לעיבוד הסטנדרטי של אינטרפרוגרמות, ביצענו יישום של כלי ה-SBAS (Small Baseline Subset) לצורך ניתוח אבולוציית הדפורמציה של פני השטח ויצירת סדרות זמן מתוך כלל האינטרפרוגרמות שייצרנו עבור מרכז אגן ים המלח (איורים 3.4, 3.5). שיטת SBAS (Berardino et al., 2002) היא אחת מהשיטות הנפוצות ליצירת סטי נתונים של InSAR דיפרנציאלי (DIFSAR), קצב הדפורמציה בכוון הלוויין (איור 3.4) ויצירת סדרות זמן

של שינוי הדפורמציה של פני השטח (איור 3.5). השיטה מתבססת על מעקב אחר ההבדלים המתקבלים בין אינטרפרוגרמות שונות שהן בעלי הפרשי קו-בסיס (Baseline) קטנים ולכן גם דיוק גבוה. במחקר זה ייצרנו 108 אינטרפרוגרמות שונות מ-28 סטי דימות לוויין שונים לצורך בחינת הדפורמציה המתקבלת מנתוני ה-InSAR החל מאוגוסט 2022 (איור 3.5).



איור 3.3: מפת מהירות תחנות ה-GNSS ביחס ללוח סיני.

3.3 תוצאות עיבוד הנתונים הגיאודטיים

פיזורן הגיאוגרפי תחנות המדידה והעובדה שחלקן מחוץ לאגן ים המלח וחלקן בתוכו מאפשר בחינה מפורטת של קצבי התנועה לאורך גבול הלוחות באזור אגן ים המלח. איור 3.3 מציג את המהירויות של תחנות ה-GNSS ביחס ללוח סיני. בחינת התנועה היחסית של תחנות ממערב וממזרח לים המלח מצביע על תנועה שמאלית כוללת בסדר גודל של 5 מ"מ לשנה בין הלוח הערבי ולוח סיני. באיור זה מוצגת גם אי הוודאות הקטנה יחסית של המהירות (>0.3 מ"מ/שנה) בכלל התחנות, דבר המצביע על דיוק רב של המדידה. בתוך לוח סיני ובקרבת אגן ים המלח מהירות התחנות קרובה לאפס. לעומת זאת, ממש ממזרח לאגן ים המלח בתחנת GHAI המהירות היא גבוהה יחסית בעוצמה של 4.7 ± 0.3 מ"מ לשנה (איור 3.3). שינוי חד זה ממהירות אפסית ממערב לאגן ים המלח למהירות של כמה מילימטרים בשנה ממזרח לאגן מרמז על זחילה בחלקו הרדוד של ההעתק באזור אגן ים המלח. עקב מיעוט התחנות הקבועות ממזרח להעתק לא ניתן לקבוע באופן וודאי מהו עומק הזחילה במרכז ים המלח. אולם מידת הזחילה הרדודה באזור זה היא בסדר גודל כ- 4.7 מ"מ לשנה, כפי שנמדד בהפרש המהירויות בין תחנות ממזרח ומערב בקירבת אגן ים המלח.

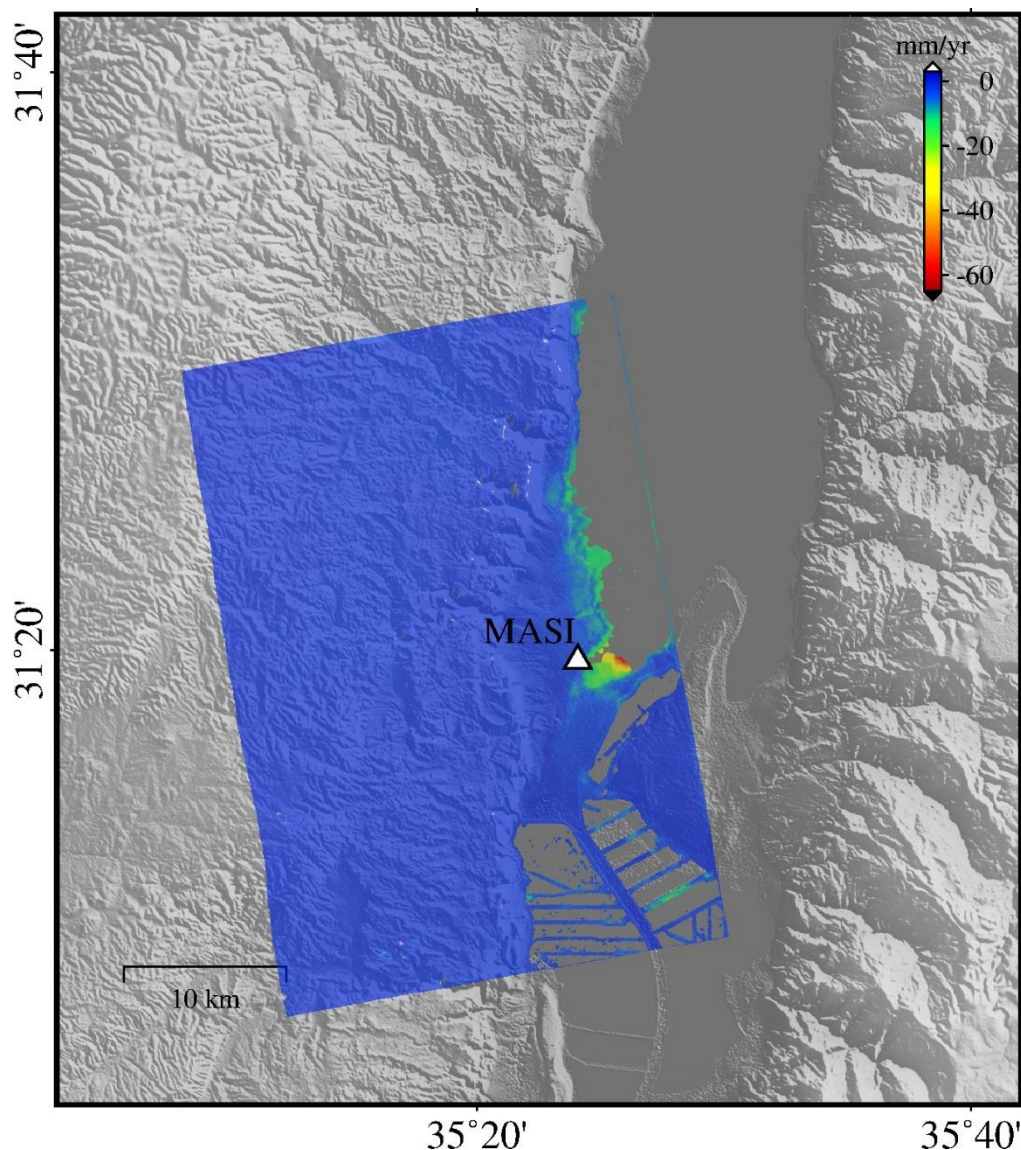
תחנות MASI ו-DSPL נמצאות בתוך אגן ים המלח ומצביעות על תנועה אנומלית גבוהה (איור 3.2). תחנת MASI הנמצאת ממערב לחוף ים המלח ובקירבתו מצביעה על רכיב תנועה גדול בכיוון מזרח, לכיוון ים המלח. לעומת זאת, תחנת DSPL הממוקמת על סוללה ממזרח לבריכות האידוי של מפעלי ים המלח מצביעה על רכיב תנועה גדול בכיוון מערב, לכיוון בריכות האידוי. נתוני ה-GNSS של תחנות MASI ו-DSPL מציגים גם רכיב שקיעה משמעותי ביותר של כ- 33 מ"מ לשנה עבור תחנת MASI וכ- 26 מ"מ לשנה עבור תחנת DSPL (איור 3.2). למרות שתחנות אלו מוקמו בקצה של קונסטרוקציית מתכת עמוקה וגדולה שמגיעה לעומק של 12 מטרים, מקורן של תנועות אנומליות אלו הוא ככל הנראה בתנועת שכבות רדודות, שקיעה וקומפקציה של סדימנטים בקרבת גופי המים, ואינן מצביעות על תנועות טקטוניות.

איור 3.4 מציג את אזורי השקיעה לאורך חופי ים המלח במרכז האגן כפי שהתקבלו מנתוני ה-InSAR. איור זה מציג את קצב הדפורמציה בכיוון הלוויין כפי שהתקבל מניתוח כלל 108 האינטרפרוגרמות בעזרת שיטת ה-SBAS ועבור תקופה של כשנה ורבע, בין אוגוסט 2022 ואוקטובר 2023. באיור זה ניתן לראות אזורים (ירוקים) בהם ישנה שקיעה מוגברת, בין 10-35 מ"מ לשנה, לאורך חופי הדרום מערבי של ים המלח באגן הצפוני. באזור שפך נחל הערבה (תעלת ההחזרים מבריכות האידוי) בדרום ים המלח, השקיעה היא אף גבוהה יותר, בסדר גודל של 30-50 מ"מ לשנה. איור 3.5 מראה את סדרת הזמן של דפורמציה פני השטח באזור תחנת MASI כפי שמתקבל מנתוני ה-InSAR. הקו הכחול המקווקו באיור 3.5 מציין את ההתאמה הליניארית הטובה ביותר עבור נתוני ה-InSAR. שיפוע הקו המקווקו באיור המייצג את מהירות פני השטח בכיוון לווין ה-SAR באזור של תחנת MASI, מצביע על קצב התרחקות מהלוויין של 29.3 ± 3.1 מ"מ לשנה. איור זה מראה גם השוואה לנתוני ה-GNSS בכיוון לווין ה-SAR. לצורך השוואה בין נתוני ה-InSAR ונתוני ה-GNSS המרנו את מהירויות ה-GNSS של תחנת MASI לכיוון לווין ה-SAR. עשינו זאת בעזרת הנוסחה הבאה (Fialko et al., 2001):

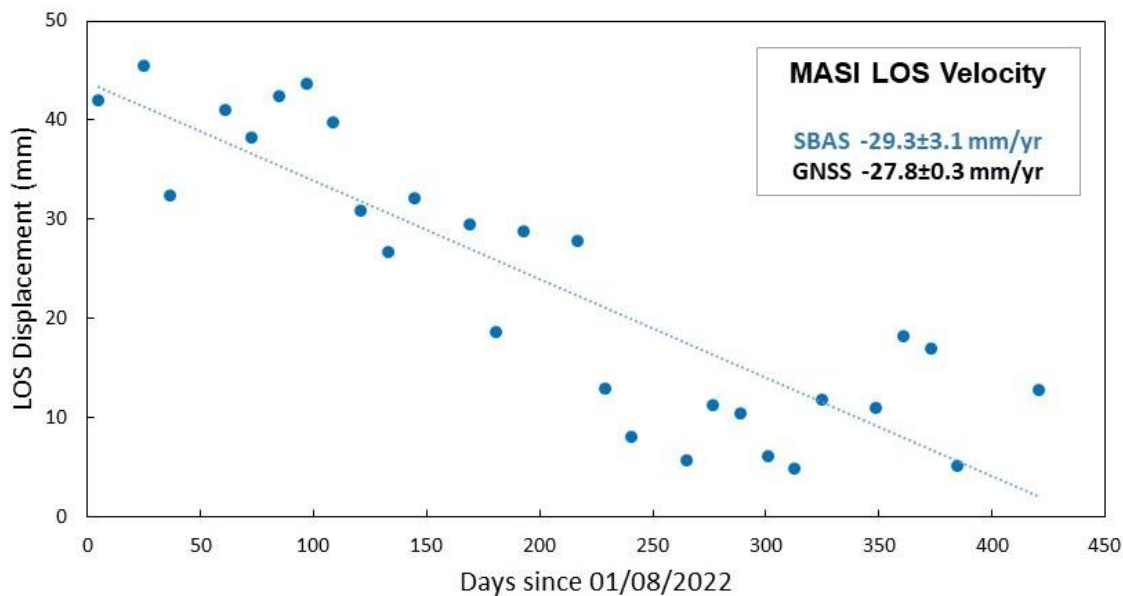
$$V_{los} = V_n \sin \varphi \sin \lambda - V_e \cos \varphi \sin \lambda + V_u \cos \lambda \quad (1)$$

כאשר V_{los} היא המהירות בכיוון לווין ה-SAR (los- line of sight). $V_{n,e,u}$ הם רכיבי מהירות תחנת ה-GNSS בכיוון צפון (n), מזרח (e) והאנכי (u). זווית ϕ מייצגת את אזימוט כוון ההתקדמות של הלוויין ו- λ היא זווית קרן

רדאר ה SAR ביחס לאנך בנקודת הפגיעה. מנוסחה (1) קיבלנו את מהירות תחנת MASI בכוון לוויין ה SAR. את מהירות התנועה של אזור תחנת MASI מתוך נתוני ה-InSAR קיבלנו מתוך השיפוע של הנתוני ההעתקה עם הזמן המוצגים באיור 3.5. כפי שניתן לראות באיור יש התאמה בין נתוני ה-InSAR ונתוני ה-GNSS באזור תחנת MASI שנמצאת בדרום מערב האגן הצפוני של ים המלח. שני סטי נתונים בלתי תלויים אלו מצביעים על כך כי אזור זה מתרחק מלוויין ה-SAR בקצב של כ- 28 מ"מ לשנה (איור 3.5) ושוקע בקצב של כ- 33 מ"מ לשנה (איור 3.2).



איור 3.4: מפת מהירויות בכוון לוויין ה-SAR של אזור מרכז ים המלח כפי שהתקבל מעיבוד 108 אינטרפרוגרמות שונות בין אוגוסט 2022 ואוקטובר 2023. כחול מציינ תנועה אפסית ואדום מציינ תנועה של כ- 50 מ"מ בשנה של התרחקות מלוויין ה-SAR. ניתן לראות כי אזורים שונים לאורך חוף ים המלח שוקעים או מתרחקים מהלוויין עד מהירות של כ 50 מ"מ בשנה כפי שקורה באזור שפך נחל הערבה בקצהו הדרומי של ים המלח. עוד ניתן לראות באיור את מיקום תחנת MASI.



איור 3.5: סדרת זמן של ההתקפה בכוון לווין ה-SAR עבור המיקום של תחנת MASI, בין אוגוסט 2022 ואוקטובר 2023, כפי שהתקבלה בעזרת נתוני ה-InSAR ושיטת SBAS. הקו הכחול המקווקו מציין את ההתאמה הליניארית הטובה ביותר עבור סט נתונים זה. שיפוע הקו המקווקו (-29.3 מ"מ לשנה) מייצג את מהירות פני השטח בכוון לווין ה-SAR. עוד מוצגת באיור מהירות תחנת MASI בכוון לווין ה-SAR (-27.8 מ"מ לשנה) כפי שהתקבלה מנתוני ה-GNSS ושימוש בנוסחה (1).

3.4 דיון ומסקנות

המחקר הנוכחי עוסק בניטור תנועות קרקע באזור מרכז אגן ים המלח תוך שימוש בנתוני גיאודזיה לוויינית. במסגרת מחקר זה נעשה שימוש בנתוני GNSS נאספו מתחנות קבע ובנתוני InSAR. כמו כן, נעשתה השוואה בין שני סטי נתונים אלו ונמצאה התאמה טובה באזור שנבדק.

תוצאות המחקר מצביעות על תנועה שמאלית, בסדר גודל של 4.7 ± 0.3 מ"מ לשנה, לאורך העתק ים המלח באזור מרכז אגן ים המלח. התוצאות מרמזות גם כי ישנה זחילה רדודה באזור זה בסדר גודל של הקצב הכללי של תנועת הלוחות. מחקרים קודמים שלנו (Hamiel and Piatibratova, 2019; Hamiel and Piatibratova, 2021) הראו כי עומקה של הזחילה הרדודה נמצא בהתאמה טובה לעומקם של שכבות מלח עבות בחלק הרדוד של החתך הסדימנטרי בתוך אגן ים המלח.

גם נתוני ה-GNSS וגם סדרות הזמן שעובדו מתוך נתוני ה-InSAR מצביעים על קצב שקיעה גבוה מאוד לאורך החופים הדרומיים והדרום מערביים של ים המלח באגן הצפוני. קצב שקיעה זה מגיעה למקסימום של 50 מ"מ לשנה באזור שפך נחל הערבה בחופו הדרומי של ים המלח באגן הצפוני. שקיעה זו איננה טקטונית במקורה אלא קשורה לקומפקציה ולתנועת הסדימנטים בקרבת גוף המים.

- Berardino P., G. Fornaro, R. Lanari and E. Sansosti (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR Interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 11, pp. 2375-2383.
- Fialko, Y., Simons, M., and D. Agnew (2001). The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7. 1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations. *Geophysical research letters*, 28(16), 3063-3066.
- Hamiel Y., Masson, F., Piatibratova, O., and Y. Mizrahi (2018a), GPS measurements of crustal deformation across the southern Arava Valley section of the Dead Sea Fault and implications to regional seismic hazard assessment. *Tectonophysics*, 724–725, 171–178.
- Hamiel, Y. and Piatibratova, O. (2019). Style and Distribution of Slip at the Margin of a Pull-Apart Structure: Geodetic Investigation of the Southern Dead Sea Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 12023–12033. <https://doi.org/10.1029/2019JB018456>.
- Hamiel, Y. and Piatibratova, O. (2021). Spatial variations of slip and creep rates along the southern and central Dead Sea Fault and the Carmel-Gilboa Fault System. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JB021585>
- Hamiel, Y., Piatibratova, O., Mizrahi, Y., Nahmias, Y., and A. Sagy (2018b). Crustal deformation across the Jericho Valley section of the Dead Sea Fault as resolved by detailed field and geodetic observations. *Geophysical Research Letters*, 45, 3043–3050. <https://doi.org/10.1002/2018GL077547>.
- Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A., and S.C. McCluskey (2018), Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.7, 54 pp., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Masson, F., Hamiel, Y., Agnon, A., Klinger Y., and A. Deprez (2015), Variable behavior of the Dead Sea Fault Along the southern Arava segment from GPS measurements. *Comptes Rendus Geoscience*, 347, 161-169.
- Sandwell, D., R. Mellors, X. Tong, M. Wei, and P. Wessel (2011), Open radar interferometry software for mapping surface deformation, *Eos Trans. AGU*, 92(28), doi:10.1029/2011EO280002.
- Wessel, P., Luis, J.F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W.H.F., and Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>

4. הגיאומטריה והקינמטיקה של סייסמיטים בתצורת הלשון

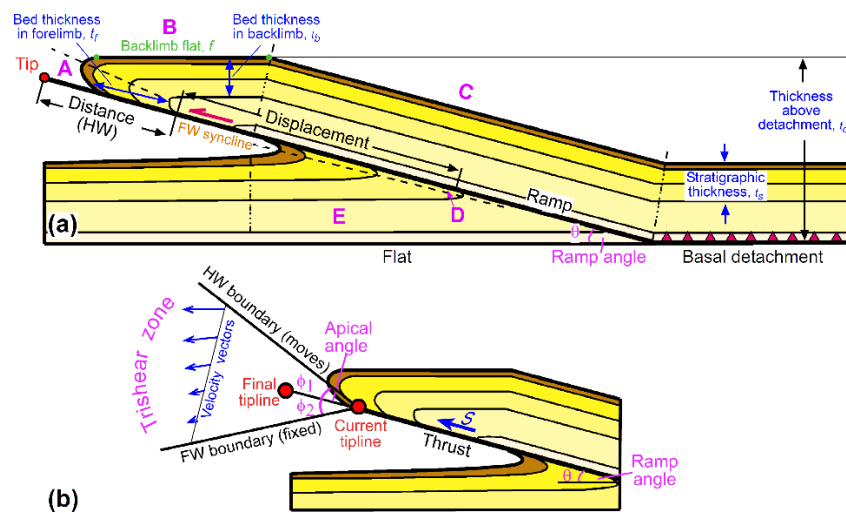
וינברגר, ר.¹, לוי, צ.¹, אלסופ, א.²

¹ המכון הגיאולוגי

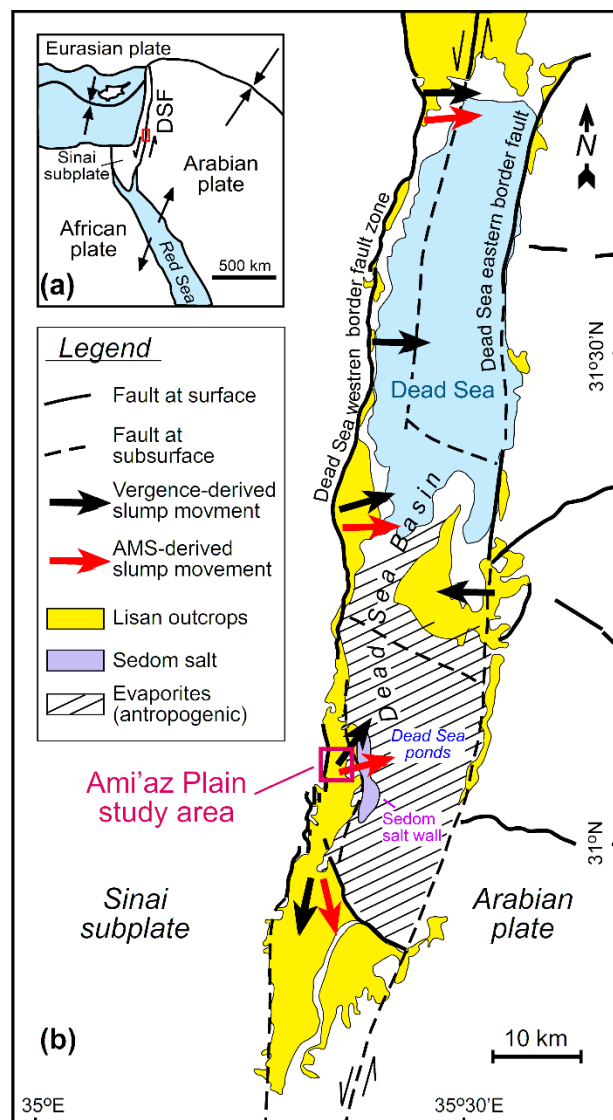
² School of Geosciences, University of Aberdeen

4.1 מבוא

קמטים הנוצרים בעת התקדמות העתקים הפוכים מכונים Fault-Propagation Folds (FPF) (איור 4.1). מבנים גיאולוגיים אלו שכיחים באזורי התנגשות ולחיצה (Fossen, 2016), והם יכולים להתפתח גם בסלע רך העובר מעוות בעת רעידת אדמה ולאחריה. מבנים כאלה מכונים סייסמיטים והם אוצרים בקרבם מידע חשוב על המעוות שהתפתח בסלע הרך בעת רעידת האדמה. בעזרתם ניתן להעריך את מנגנון הרעידה ואף את עוצמתה. מאחר שמבני ה-FPF מייצגים את המעוות הסופי בסלע ישנה חשיבות רבה להתחקות אחר השלבים השונים בתהליך היווצרותם. מבני ה-FPF נפוצים מאוד בתצורת הלשון בנחל פרצים. במחקר הנוכחי אנו בוחנים את הגיאומטריה והקינמטיקה של מבני ה-FPF כנדבך נוסף בניתוח ופענוח ארכיב רעידות האדמה האצור בסלעים מתקופת הפלייסטוקן המאוחר באגן ים המלח. מבני ה-FPF הנבחנו בעבודה הנוכחית הם מסדר גודל מזוסקופי (מטרים), אך הם משקפים תהליכים המתרחשים גם בקמטים מסדר גודל מקרוסקופי (עשרות עד מאות מטרים). שיטות העבודה וצורות הניתוח שפותחו במסגרת העבודה הנוכחית ניתנים ליישום בניתוח של חבילות קמטים והעתקים הפוכים מסדרי גודל שונים, ובסלעים וסדימנטים מסביבות גיאולוגיות שונות.



איור 4.1: א) גאומטריה של מבנה מסוג Fault-Propagation Fold (FPF). המרחק נמדד מקצה ההעתק המשמש כנקודת ראשית אל סמן שכתתי (marker) בגוש הרוכב. התזוזה (העתקה) של הסמן נמדדת לאורך עקבת ההעתק. A-E מסמנים תת-אזורים שונים במבנה. ב. גיאומטריה והגדרות של מודל ה-TriShear.



איור 4.2: (א) מפה טקטונית כללית של המזרח התיכון ומערכת העתק ים המלח (DSF). אזור העבודה מסומן בריבוע אדום. חיצים מסמנים את כיווני התנועה היחסיים של הלוחות הטקטוניים במרחב. (ב) מפה גיאולוגית מוכללת של אגן ים המלח ואזור העבודה בנחל פרצים. כיווני הגלישות סביב האגן מסומנים בחצים אדומים ושחורים.

4.2 רקע גיאולוגי

אגן ים המלח הינו אחד מסדרה של אגנים הערוכים לאורך מערכת העתק ים המלח (איור 4.2). באגן זה התקיימו מאז תקופת המיוקן המאוחר רצף של לגונות ואגמים, ובהם אגם הלשון, "האב הקדמון" של ים המלח. מגוף המים של אגם הלשון שקעו לחילופין למינות של מחטי ארגוניט לבנים שמקורם בהשקעה כימית, ולמינות של חלקיקים דטריטיים כהים שמקורם בשחך סלעי הסביבה ובאבק. למינות אלו הצטברו לכדי עובי כולל של 30-40 מטרים, והן מרכיבות את תצורת הלשון. התצורה נחשפת בקניונים של נחל פרצים המבתרים את מישור

עמיצו. העבודה הנוכחית התמקדה במבני ה-FPF בתצורת הלשון החשופים לאורך ערוץ קטן המכונה "ערוץ הגדר" (איור 4.3a).

4.3 שיטות עבודה

לאור חשיבותם של מבני ה-FPF, פותחו מספר שיטות לניתוח הגיאומטריה והקינמטיקה שלהם ובהן שיטת ה-TriShear (Erslev, 1991) וניתוח של AMS (Anisotropy of Magnetic Susceptibility).

TriShear 4.3.1

במודל הדו-ממדי של TriShear (Erslev, 1991; Allmendinger et al, 2011) התוזה לאורך ההעתק ההפוך נספגת על ידי דפורמציה באזור גזירה דמוי משולש הנמשך מקצה ההעתק המתקדם (איור 4.1). במודל זה הגוש השוכב הוא קבוע והגוש הרוכב זו לאורך עקבת ההעתק ב"קצב" תוזה s ("קצב" הוא מרחק ליחידת אֵיטְרָץִיָה במודל). שדה המהירויות נקבע על ידי היחס p/s , כאשר p הינו ה"קצב" בו קצה ההעתק מתקדם. עבור $p/s > 1$ קצה ההעתק מתקדם בקצב גדול יותר מקצב התוזה של ההעתק. באזור קצה העתק התחום על ידי המשולש מתפתח מעוות אנאלסטי המתבטא בקימוט אסימטרי וביצירת מבנה ה-FPF (איור 4.1). המעוות והגזירה באזור המשולש הם הטרוגניים, כיוון שבקצה ההעתק הדפורמציה חריפה יותר מאשר הרחק ממנו. לכן, כתלות במרחק מהקצה, הרוטציה של השכבות הנלכדות באזור המשולש משתנה מנקודה אחת לרעותה, ובהתאם שכבות אלו יכולות להתארך או להתקצר. שני המשתנים ϕ , זווית הראש של המשולש, והיחס p/s , מאפשרים היווצרות מגוון רחב של גאומטריות מסוג FPF. עבור ϕ קטן הגזירה ממוקדת יותר, והרוטציה של חזית הקמט גדולה יותר. היחס p/s שולט על כמות החומר ש"נכנס ויוצא" מאזור המשולש ועובר דפורמציה. ככל שחומר נמצא "זמן" רב יותר (יותר איטרציות) בתוך אזור המשולש כך הוא מתעוות יותר.

AMS 4.3.2

ניתוח AMS מאפשר לקבוע את הסידור הפנימי של חלקיקי החומר כתוצאה מדפורמציה, ולשחזר את המעוות התלת-ממדי שהתפתח בחומר (Weinberger et al., 2017). ה-AMS מתואר כאליפסואיד בעל שלושה צירים ניצבים המכוונים K_1, K_2, K_3 , כאשר לכל ציר משויכת עוצמה של סספטביליות מגנטית $k_1 \geq k_2 \geq k_3$, בהתאמה. מבחינה מתמטית אליפסואיד ה-AMS ואליפסואיד המעוות הם ישויות מתמטיות דומות (טנזורים מן המעלה שנייה) (Borradaile and Henry 1997). לפיכך, צירי ה-AMS הראשיים מקבילים לכיוון צירי המעוות הראשיים, ובהתאם צורת אליפסואיד ה-AMS יכולה לדמות את צורת אליפסואיד המעוות (Borradaile and Jackson, 2004). סדימנט רוכש AMS בזמן הצטברותו, והמארג שנרכש בתהליך הסדימנטציה הוא בעל דפוס אופייני המכונה "מארג סדימנטרי". במארג זה צירי K_1 ו K_2 הם אופקיים ומקבילים לשיכוב ואינם ניתנים להפרדה זה מזה, ואלו צירי K_3 הם אנכיים ומקובצים היטב. במקרה זה ערכי ה-AMS יוצרים צורה אופיינית של oblate ("פיתה"), שביטוייה המתמטי הוא $k_3 < k_1, k_2$. בתהליכים מאוחרים של מעוות, חלקיקי החומר נעים זה ביחס לזה ומסתדרים מחדש, והמארג המגנטי משנה את תכונותיו ואת דפוסו וצורתו מכונה "מארג של דפורמציה". כתוצאה מהמעוות צירי K_1 ו K_2 מקובצים ומופרדים זה מזה, ואליפסואיד ה-AMS משנה את צורתו ל prolate ("סיגר"), שביטוייה המתמטי הוא $k_3, k_2 < k_1$. בעבודות קודמות הראינו כיצד שינויים החלים במארג המגנטי בסלע הרך של תצורת הלשון מתעדים תהליכים המתרחשים באזור ההעתקה בעת רעידת אדמה

(Levi et al., 2018, Elhanati et al., 2020, Weinberger et al., 2016), בהנלה (Levi et al., 2006), ובעת תנועות מדרוניות וגלישות בקרקעית אגם הלשון (Weinberger et al., 2017).

4.3.3 מדידות סטרוקטורליות ודיגום

מבנה ה-FPF ב"ערוץ הגדר" תועד וצולם בשלמותו (איור 4.3b) והמידע שנאסף נקלט בתוכנת TriShear. המדידות הסטרוקטורליות כללו את אורך עכבת ההעתק, כמות ההעתק, נטיית ההעתק (זווית הרמפה), נטיית מישור הצירים ואת ציר הקמט. כמות התזוזה (העתקה) נמדדה בעשרה מקומות שונים לאורך ההעתק כיוון שגורם זה משתנה כתלות במרחק מקצה ההעתק. הקמט בקצה ההעתק אופיין בעזרת איזוגונים (Ramsay, 1967). הדיגום בשדה לצורך מדידות ה-AMS נעשה באמצעות גלילי פלסטיק מכוונים שגודלם 25 על 20 מ"מ. באזורים בהם תועד מעוות יחסית גבוה, בעיקר באזור קצה ההעתק, הדיגום היה צפוף יותר. נדגמו 183 דוגמאות ממבנה ה-FPF 221 דוגמאות מאזור מרוחק מהמבנה המייצג שכבת סלע רך שלא עבר מעוות (שכבת ביקורת). מדידות ה-AMS בוצעו במכשיר מסוג Kappabridge KLY5 במעבדה המגנטית במכון הגיאולוגי וניתוח שלהן התבצע בעזרת תוכנת Anisoft 4.2 שחישבה את הפרמטרים הבאים:

Mean susceptibility	$k_m = (k_1 + k_2 + k_3)/3$
Magnetic lineation	$L = k_1/k_2$
Magnetic foliation	$F = k_2/k_3$
Degree of anisotropy or eccentricity	$P = k_1/k_3$
Shape of the AMS ellipsoid	$T = 2\ln(k_2/k_3)/\ln(k_1/k_3) - 1$

הפיזור המרחבי של הפרמטרים הללו במבנה ה-FPF נותח והוצג בעזרת מערכת מידע גיאוגרפית (ממ"ג).

4.4 תוצאות

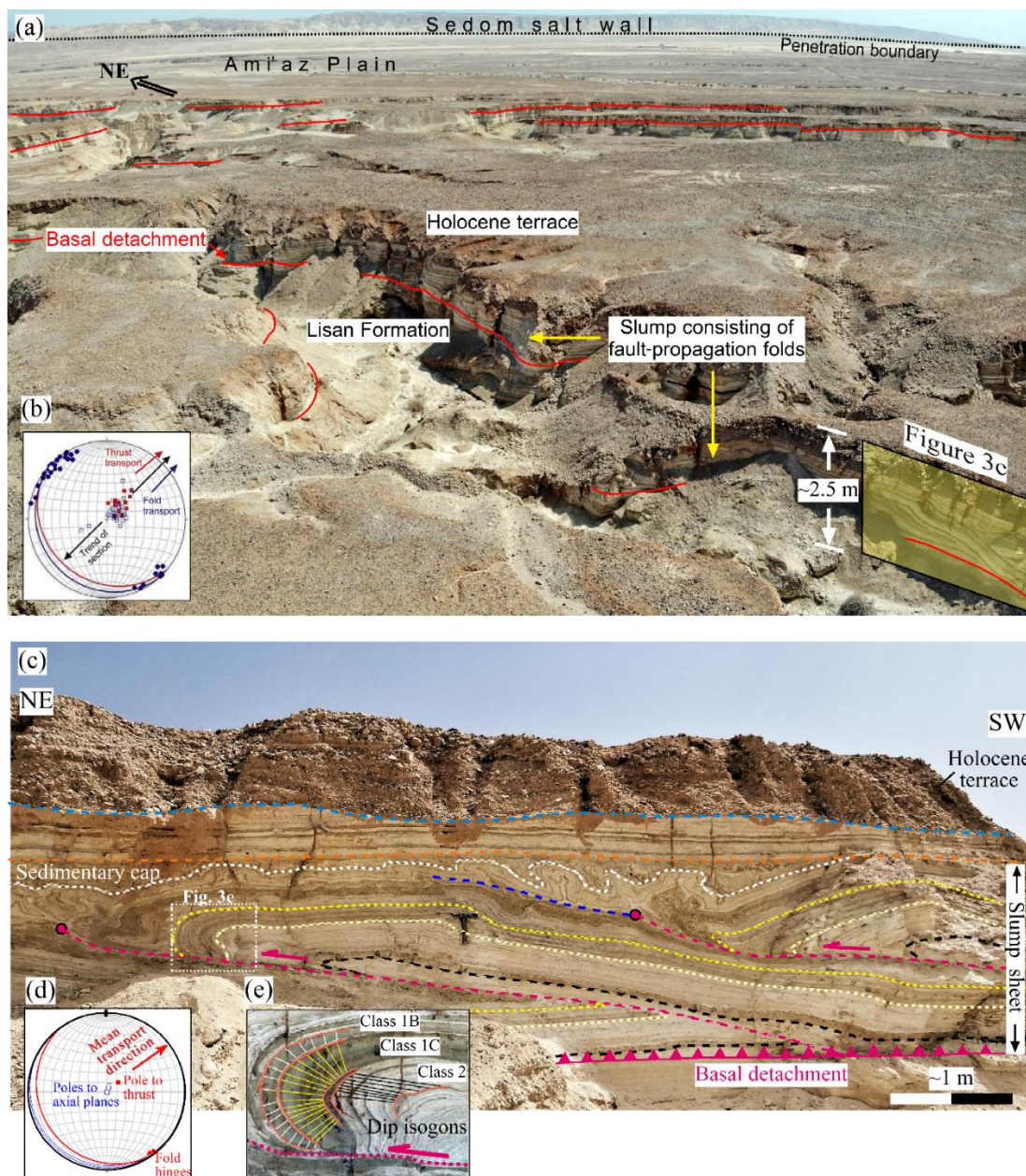
4.4.1 מדידות סטרוקטורליות

כיוון ההובלה הכללי של הגלישות נחל פרצים נקבע על ידי מדידת Vergences וצירי קמטים רבים (איור 4.3b) ונמצא שהוא מדרום-מערב לצפון-מזרח, כלומר ממצוק ההעתקים לכיוון מרכז אגן ים המלח. מדידות של מבנה ה-FPF בערוץ הגדר מראה כיוון הובלה דומה (איור 4.3d). ניתוח של קמט החזית בשיטת האיזוגונים מצביע על הבדלים בתוך הקמט הבאים לידי ביטוי במעבר מ-Class1 בלמינות עשירות בדטריטוס ל-Class2 בלמינות עשירות בארגוניט. איור 4.4a מציג את פרופיל התזוזה לאורך ההעתק הנבחן. כמות התזוזה משתנה לאורך ההעתק והיא חריפה יותר קרוב לקצהו ומתמתנת במרחק שני מטרים ממנו. במרחק זה מנקודת הייחוס, ההסטה היא מירבית ומגיעה לכשלושה מטרים.

4.4.2 מודל TriShear

המודל הראשוני התבסס על מדידות השדה. למודל זה הוזנו משרעת של ערכים של המשתנים ϕ ו p/s . הורצו מספר מודלים עד שהתקבלה ההתאמה הטובה ביותר בין צורת המבנה בשדה ובמודל (איור 4.5a). איור 4.5b מציג את פזור המעוות הסופי עבור המודל הנבחר. כמו כן נבחנה מידת ההתאמה בין פרופיל התזוזה המדוד

לפרופיל התזוזה המחושב (איור 4.b4). הנתונים המדודים וערכי המשתנים במודלים השונים מופיעים בטבלה 4.1.

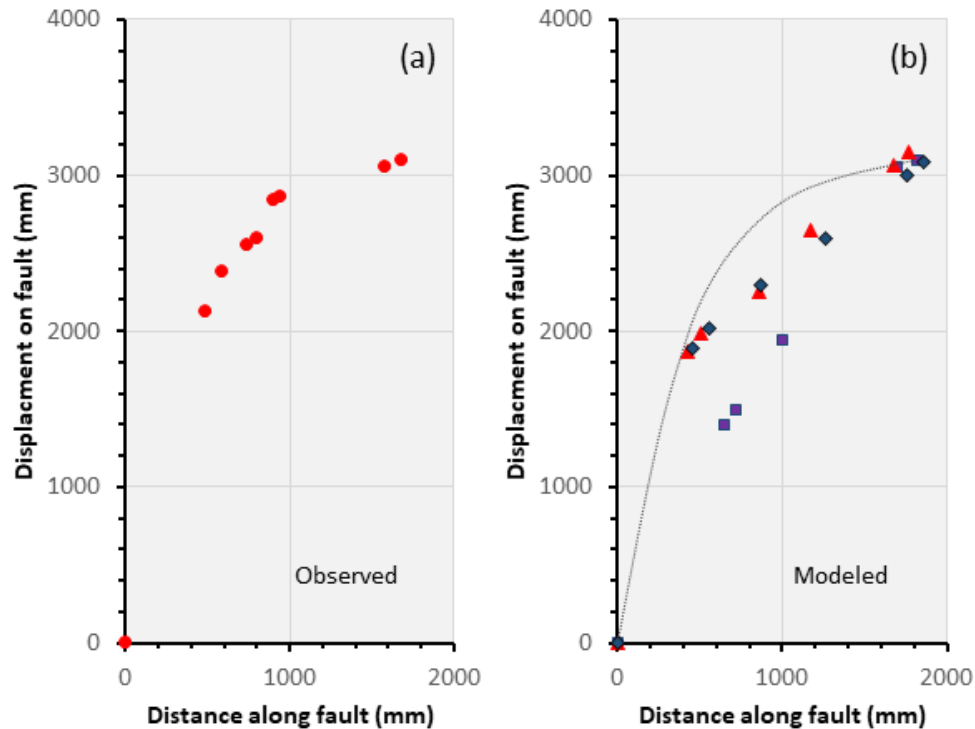


איור 4.3: (א) אזור העבודה ב"ערץ הגדר", מבט אלכסוני לכיוון צפון-מזרח. (ב) נתונים סטרוקטורליים של כלל הגלישות בנחל פרצים המראים על הובלה לכיוון צפון-מזרח (Alsop et al., 2017). (ג) תמונה מפוענחת של מבנה ה-FPF. (ד) נתונים סטרוקטורליים של מבנה ה-FPF. (ה) ניתוח של איזוגונים.

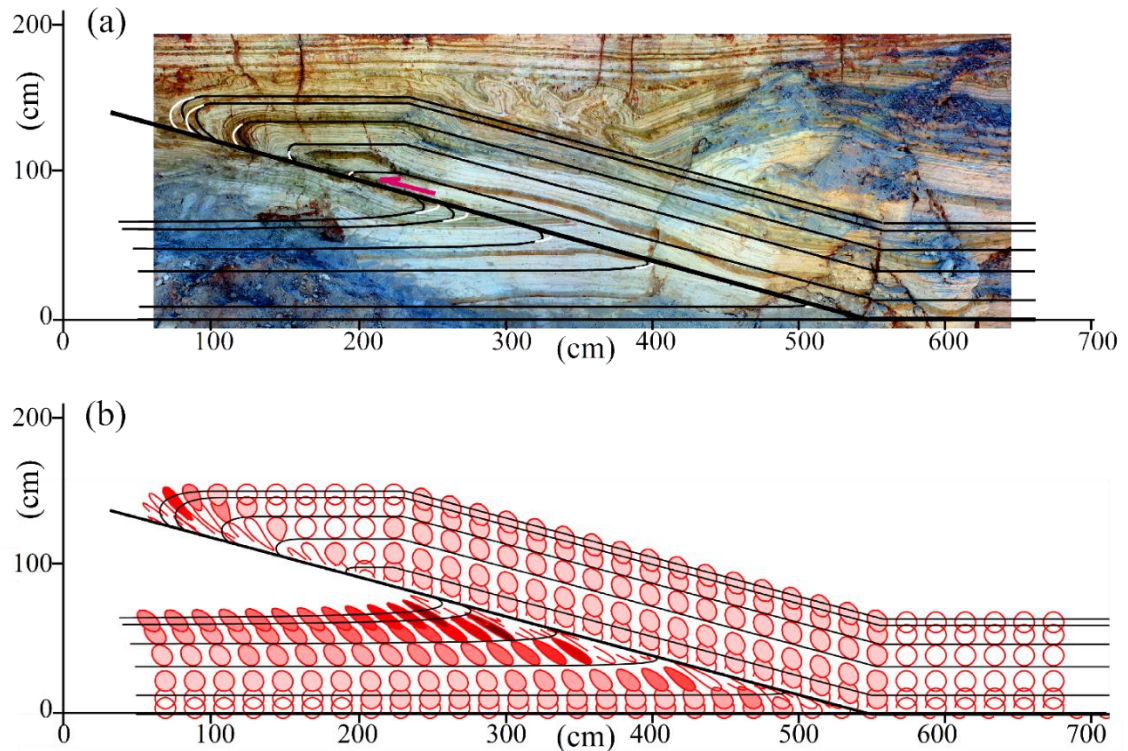
AMS 4.4.3

כל הדוגמאות הן פרהמגנטיות עם ערכים חיוביים של K_m הנעים בטווח של 10^{-6} SI 40-5 (איור 4.6a). הצבת K_m כנגד P מצביעה על כך שקיימת תלות הפוכה בין שני המשתנים בטווח הערכים 10^{-6} SI 15-5 (איור 4.6b) והיא נובעת, לפחות בחלקה, מהקשר המתמטי בין שני משתנים אלו ולא כעדות לתופעה פיסיקלית (סעיף 3.3). איור

4.6c מציג את צורת האליפסואיד של ה AMS מול דרגת האנאיזוטרופיה (גרף T-P). מגרף ה T-P נראה שמרבית הדוגמאות הן בעלות צורה של oblate ("פיתה"), אך ישנן דוגמאות אחדות בעלות צורת של prolate ("סיגר") האופיינית לאזור הקימוט בחזית המבנה. ככלל, התלות בין שני המשתנים T ו P היא יחסית נמוכה, אם כי נראה שככל שערכי P גבוהים יותר הדוגמאות נוטות להיות בעלות צורה של oblate, וככל שערכי P נמוכים הדוגמאות מתאפיינות ב prolate. המארג המגנטי של שכבת הביקורת הרחוקה מחבילת הקמטים והעתקים אופייני למארג סדימנטרי. לעומת זאת, המארג המגנטי של מבנה ה- FPF אופייני למארג של דפורמציה. במארג זה קיים קיבוץ של שלושת הצירים הראשיים עם "שובל" בולט של K_3 המצביע על כיוון ההובלה של הסדימנט לצפון-מזרח.



איור 4.4: (א) פרופיל תזוזה של מבנה ה FPF ב "ערוץ הגדר". (ב) פרופיל תזוזה של מבנה ה- FPF במודל ה TriShear. הקו המקווקו הוא קו מתאם משוער לפי הנתונים המדודים. ריבועים מייצגים מודל של $\phi=25^\circ$, $s=267$, $p/s=1.6$. משולשים מייצגים מודל דו-שלבי של $\phi=25^\circ$, $s=200$, $p/s=2.0$ ואז $\phi=25^\circ$, $s=136$, $p/s=1.0$. מעוינים מייצגים מודל דו-שלבי של $\phi=25^\circ$, $s=175$, $p/s=2.2$ ואז $\phi=25^\circ$, $s=151$, $p/s=1.0$.



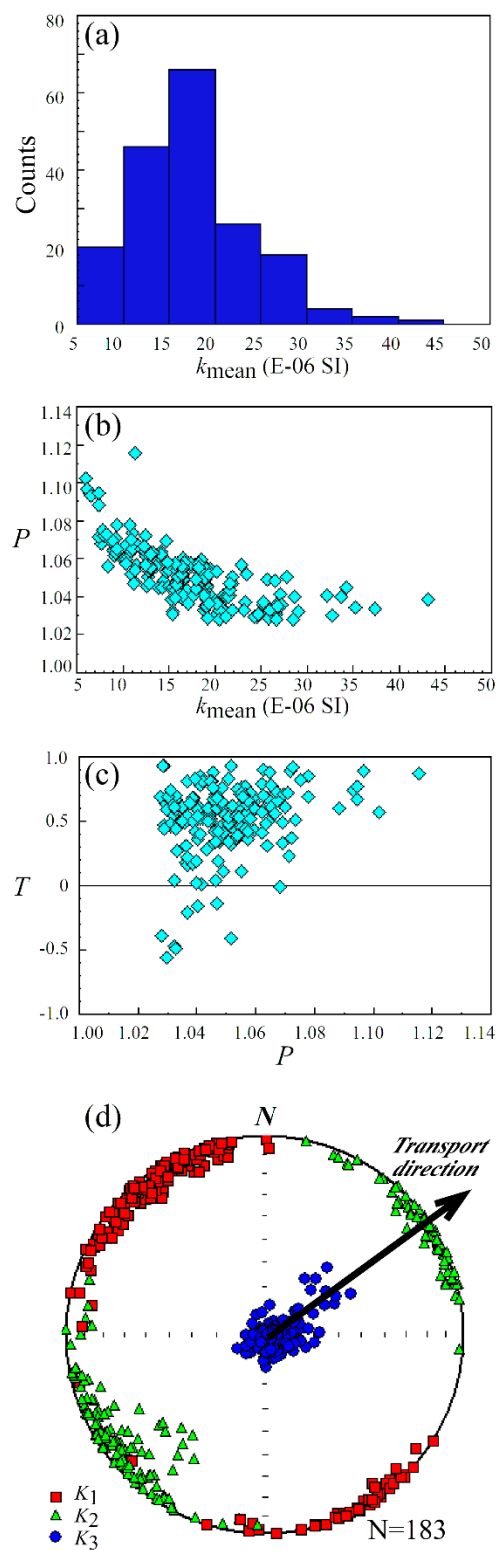
איור 4.5: מודל TriShear של מבנה ה-FPF ב"ערוץ הגדר". הצירים נתונים בסנטימטרים. א. המודל מוצג על רקע תמונת המחשוף. קווים שחורים הם עבור $p/s=1.6$ קבוע (מודל I, בטבלה 4.1). קווים לבנים מתייחסים למודל III בטבלה 4.1, והם מראים רק את השינוי באזור חזית הקמט. ב. אליפסות מעוות במודל III, הצבעים מתכונתיים למגניטודת המעוות.

4.5 דיון

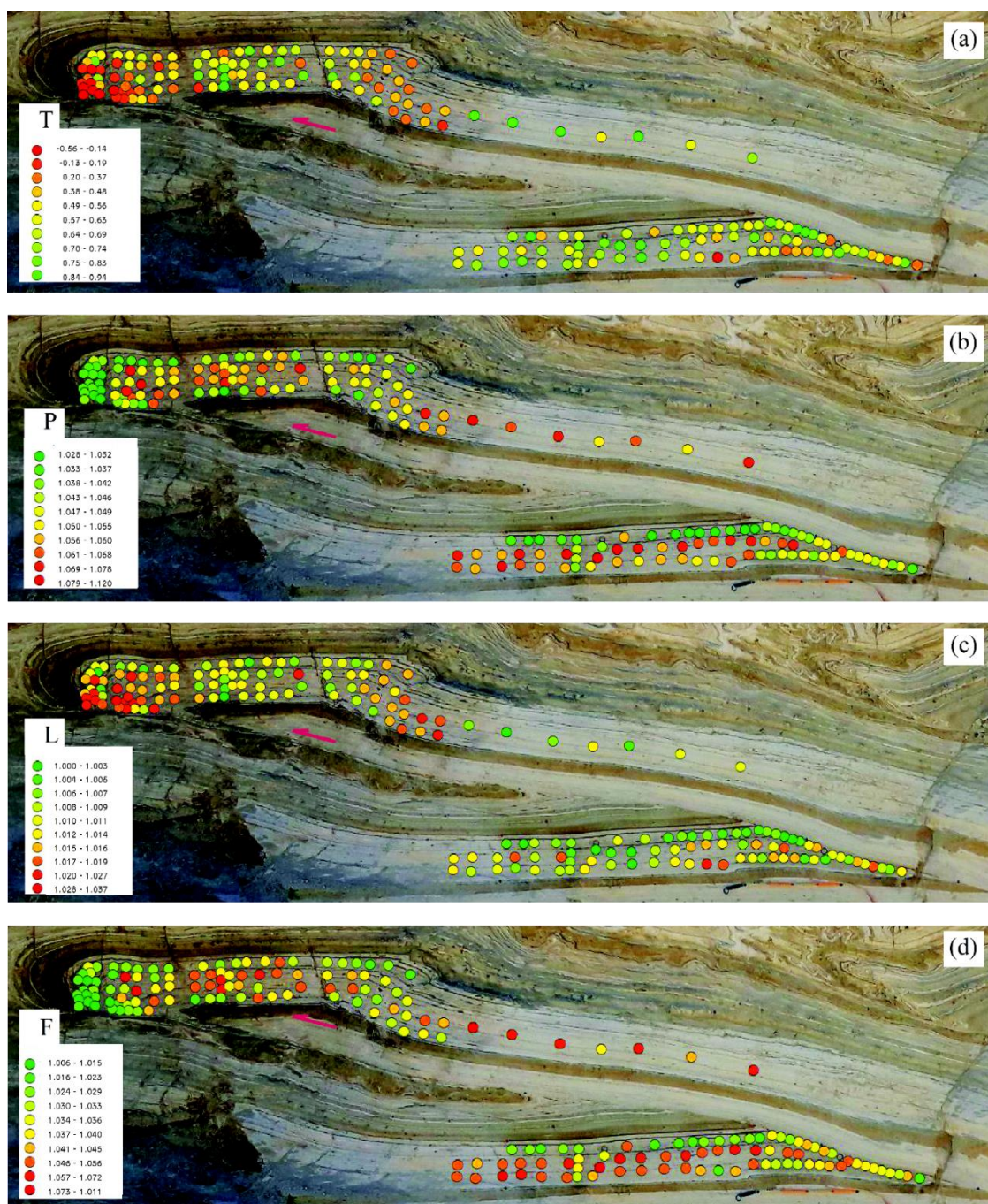
4.5.1 המבנה

לחבילת השכבות המקומטת-מועתקת בתצורת הלשון יש מבנה "קלאסי" של Fault-Propagation Folds. מבנים מסוג זה נפוצים בנחל פרצים ונוצרו כתוצאה מתנועת חומר וגלישות בעת רעידות אדמה לאורך משטח ניתוק בעל שיפוע מתון ביותר (Alsop and Marco, 2013; Alsop et al., 2017). הרכינה של הקמטים מכוונת למרכז אגן ים המלח ומעידה, כך נראה, שהובלת החומר נשלטה גם על ידי כוח הכבידה.

פרופיל התזוזה המדוד בשדה מראה שקיים יחס לא-לינארי בין מידת ההעתקה למרחק מקצה ההעתק, ובולטת דעיכה חריפה מאוד בתזוזה לקראת קצה זה (איור 4.4a). מודל ה-TriShear אינו מצליח לשחזר פרופיל תזוזה דומה לזה שנמדד בשדה, אם כי ניתן להגיע לפרופיל מקורב כאשר מניחים שהתזוזות התרחשו בשלבים, ולכל שלב היה ערך p/s שונה מחברו (איור 4.4b). קירוב זה מציע, אם כי לא בביטחון מוחלט, שמבנה ה-FPF מייצג מספר אירועי רעידות אדמה עוקבים. אחד מהתרחישים האפשריים של התפתחות מבנה FPF בשלבים הוא, למשל, התרחשות של רעידת אדמה חזקה (mainshock) שגרמה לתחילת תנועת החומר והיווצרות הסייסמיט, ובהמשך סדרה של רעידות משנה (aftershocks) בעלות מאפיינים מעט שונים שגרמו לתזוזות נוספות לאורך ההעתק ההפוך. תנועות אלו גרמו להמשך תנועת החומר ולהתפתחות המעוות הסופי במבנה ה-FPF.



איור 4.6: נתוני AMS של דוגמאות ממבנה ה-FPF. א. התפלגות ערכי k_{m} . ב. ערכי P כנגד ערכי k_{m} . ג. ערכי P כנגד ערכי T . ד. מארג מגנטי של כלל הדוגמאות ופענוח כיוון ההובלה לצפון-מזרח (חץ שחור).



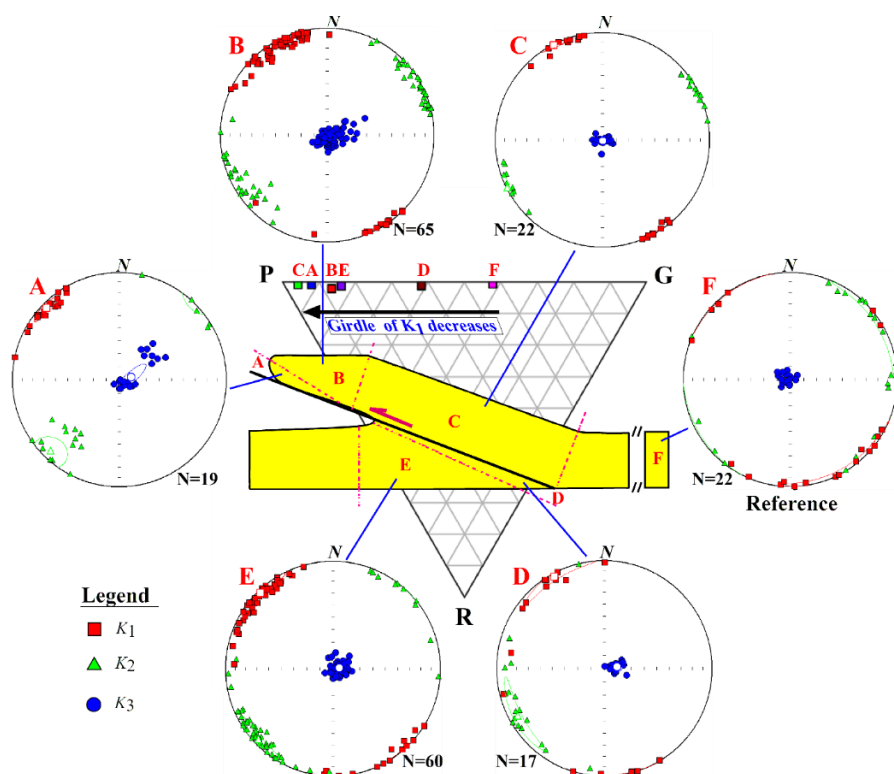
איור 4.7: (א-ד) מפות מבוססות ממ"ג המציגות פיזור מרחבי של מדדי ה AMS במבנה ה-FPF.

4.5.2 מארגי ה AMS במבנה

ניתוח תוצאות ה AMS מוסיף נדבך חשוב להבנת תהליך הדפורמציה בקנה המידה המיקרוסקופי הנסתר מן העין. ה AMS מדמה את גאומטרית המעוות אך אינו מתיימר לקבוע את ערכי המעוות הסופי. עבודות קודמות שנערכו בקמטי תצורת הלשון הראו כיצד ניתן לקבוע את כיוון הובלת הסלע הרך בעזרת כיווני הצירים

הראשיים של הספטבוליות המגנטית (למשל, Weinberger et al., 2017). בפרט, נעשה שימוש בצירי K_3 החורגים מנטייה אנכית ובאמצעותם ניתן היה להצביע על כיוון ההובלה המוחלט של החומר. באופן דומה, ניתוח כיווני הצירים הראשיים של הספטבוליות המגנטית במבנה ה-FPF מצביע על הובלה לכיוון צפון-מזרח, בהתאמה לנטיית מישורי הצירים של הקמטים. הפיזור המרחבי של המשתנים L, P, T ו- F מוצג באיור 4.7. ניתן לראות שאזור קצה הקמט מתאפיין בערכים גבוהים של L ובערכים נמוכים יחסית של T דבר המרמז על המעוות הגבוה שהתפתח באזור זה (Levi et al., 2018). באיור 4.8 מוצגת חלוקה של מבנה ה-FPF לחמישה תת-אזורים שונים. חלוקה זו נועדה לעמוד על הבדלים אפשריים בחלוקת המעוות הפנימי בתוך המבנה. עיקר השינויים ניכרים במארגים המגנטיים של תת-אזורים A ו-B המאפיינים את הקמט בגוש הרוכב. במארגים מגנטיים אלו בולט שובל של צירי K_3 המצביע לכיוון צפון-מזרח, ועלייה בקיבוץ הערכים של צירי K_1 בדיאגרמת משולש PGR (Vollmer, 2015) ביחס למארג הסדימנטרי (מחוז F). המארגים המגנטיים של מחוזות C ו-E מתאפיינים אף הם בקיבוץ של צירי ה-AMS, אך בהם צירי K_3 נותרים אנכיים. לעומת מחוזות אלו, מחוז D מתאפיין במארג מגנטי תת-סדימנטרי אשר לא ניכר בו מעוות בולט.

ככלל, אליפסואיד ה-AMS הופך להיות יותר אקסנטרי במעבר ממצב של סלע רך בלתי מופרע למצב של סלע מופרע אחרי דפורמציה חזקה עקב רעידת האדמה ותנועת החומר. הקימוט בגוש הרוכב משנה את המארג המגנטי מצורת "פיתה" לצורת "סיגר" ומגדיל את ערך הלינאציה המגנטית באזור צירי הקמטים. אנו משערים ששינויים אלו משקפים גם את השינויים החלים באליפסואיד המעוות.



איור 4.8: נתוני AMS של דוגמאות ממבנה ה-FPF מפולחים לפי תת-אזורים (ראו טקסט). דיאגרמת PGR מציגה את פזור כיווני K_1 לפי המחוזות הסטרוקטורליים. P – קיבוץ נקודה; G – פיזור היקפי (girdle); R – פיזור אקראי.

4.5.3 סידור מחדש של החלקיקים בעת קימוט וההעתקה

שינוי של ה AMS הוא תוצאה ישירה של תנועת חלקיקי החומר ברמה המיקרוסקופית. בזמן הדפורמציה החלקיקים (או צבר חלקיקים) מתגלגלים פיזית ועוברים סיבוב כך שצירם הקצר מקביל לכיוון ההובלה הכללי של הסלע הרך, וצירם הארוך מונח במקביל לצירי הקמטים. בהתאם לתנאים הקיימים באגן ים המלח, צירי K_3 של הדוגמאות מנחל פרצים מצביעים על כיוון ההובלה לצפון-מזרח ואילו צירי K_1 מצביעים על כיוון הניצב לכיוון ההובלה ומקביל לצירי הקמטים. שינוי בכיוון של צירי K_3 בעת הגלישה מלווה גם בשינוי של צורת אליפסואיד ה AMS, שנגרם כתוצאה מעיוות מישורי הריבוד המקורים. בתהליך זה החלקיקים נעים לאזור ציר הקמטים ולאזור האגף הקדמי (forelimb) של הקמט, והם מסתדרים במקביל למישור הצירים. סידור מחדש זה מעניק לצורת ה AMS צורת "סיגר". התרומה העיקרית לצורת אליפסואיד ה AMS היא ממינרלים פרהמגנטיים חרסיתיים שצורתם דמוית לוח, והתרומה המשנית היא ממחטי ארגוניט דיאמגנטיים. השפעתם של המינרלים הפרהמגנטיים רבה יותר באזורי ציר הקמט ואגפו הקדמי, שכן באזורים אלו ישנה התעבות ניכרת של חומר ולכן תכולת החרסיות באזורים אלו רבה פי כמה מזו הקיימת באגף העורפי (backlimb).

4.6 סיכום ומסקנות

המדידות הסטרוקטורליות, המידול באמצעות TriShear ומדידת המארגים המגנטיים כולם כאחד משקפים סידור פנימי מועדף של החומר הבונה את ה-FPF. ארגון מחדש זה של החומר נובע מדפורמציה בעת רעידות אדמה. מנייתח הנתונים עולה אפשרות שמבנה בודד של FPF אינו מייצג בהכרח רעידת אדמה אחת, ויתכן שהוא נוצר עקב מספר רעידות עוקבות. לכך יש השפעה חשובה על ניתוח ארכיב הסייסמיטים באגן ים המלח. העבודה הנוכחית מצביעה על מארגים מגנטיים שמקורם בדפורמציה. הספטביליות המגנטית המירבית המיוצגת על ידי צירי K_1 מקבילה לכיוון ציר הקמט במבנה ה-FPF ואילו הספטביליות המגנטית המזערית המיוצגת על ידי צירי K_3 מראה שובל של כיוונים המצביעים לצפון-מזרח, לעבר מרכז האגן שאליו נע החומר. צורת אליפסואיד ה AMS של השכבה הבלתי מופרעת דומה ל"פיתה" (הערכים של $k_1=k_2$ ואילו הערך של k_3 קטן בהרבה. לעומת זאת, מרבית הדוגמאות שנלקחו מאזור שיא הקימוט הן בעלות צורה של "סיגר" (הערכים של $k_2=k_3$ ואילו הערך של k_1 גדול בהרבה). תוצאות אלו מצביעות על סידור מחדש של חלקיקי הסלע הרך בעת הדפורמציה. הניתוח מראה שאליפסואיד ה AMS מהווה סמן מדויק למעוות שעובר הסלע הרך אף שמעוות זה אינו תמיד ניכר בעין. החלקיקים נעים זה ביחס לזה ומסתדרים בצורה מועדפת בעיקר באזור ציר הקימוט, כך שהתוצאה הכוללת מתבטאת בארגון מחדש של החלקיקים באזור זה היוצר תבנית דמוית "סיגר". הממצאים בעבודה זו ניתנים ליישום במבנים של סדימנטים וסלעים אחרים, גם כאלו שאינם חשופים בשלמותם וכן בגלעינים שנלקחו מקידוחים. אנו מציעים ששיטות העבודה שפותחו בעבודה זו והקשרים שנמצאו בין המשתנים של ה AMS למשתנים הסטרוקטורליים תקפים גם לקמטים ארוכי-גל בעלי קנה מידה מקרוסקופי (עשרות עד מאות מטרים), למשל באורוגנים. תוצאות העבודה מראות שמארגים מגנטיים מאפשרים מעקב נוח ויעיל אחרי תהליכי דפורמציה בחומר הרך ומגדירים היטב את גיאומטריית המעוות ואת עוצמתו היחסית. התובנות מהמחקר הנוכחי מועילות בחקר סלעים חשופים אשר אין בהם מציני מעוות ברורים, וכן בניתוח גלעיני קידוח שבהם המידע המרחבי על הסלע הרך מוגבל.

טבלה 4.1: ערכי קלט-פלט של ארבעה מודלים ב TriShear וערכים מדודים בשדה של מבנה ה-FPF

Variable	Symbol	Model I	Model II	Model III	Model IV	Measured
Input						
Stratigraphic thickness	t_s (m)	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Ramp angle	θ (°)	15	15	15	15	15
Fault length*	l (m)	5.36	5.36	5.36	5.36	5.36
Propagation to slip	p/s	1.6	1.6	2.0 ($s=2.00$) and 1.0 ($s=1.36$)	2.2 ($s=1.75$) and 1.0 ($s=1.51$)	
Slip	s (m)	constant	constant	varied	varied	
Apical angle	ϕ (°)	25	30	25	25	
Folding style		parallel	parallel	parallel	parallel	Parallel to Similar
Output						
Thickness above detachment	t_d (m)	1.51	1.53	1.51	1.49	1.45
Maximum displacement	D_{max} (m)	3.12	3.12	3.17	3.08	3.17
Displacement-distance profile	D - D plot	Quasi-linear (Fig. 4b; Rectan.)	Quasi-linear (Fig. 4b; star)	Non-linear (Fig. 4b; triangle)	Non-linear (Fig. 4b; diamond)	Non-linear (Fig. 4a; circle)
Backlimb flat	f (m)	1.37	1.30	1.51	1.45	1.40
Forelimb thickness to Backlimb thickness	t_f/t_b	2.14	2.02	2.45	2.51	2.0

*Fault length (l) is equal to the distance the fault tip propagates (p).

4.7 מקורות

Alsop, G. I., and Marco, S. 2013. Seismogenic slump folds formed by gravity-driven tectonics down a negligible subaqueous slope. *Tectonophysics*, 605, 48-69.

Alsop, G. I., Marco, S., Levi, T., & Weinberger, R. 2017. Fold and thrust systems in Mass Transport Deposits. *Journal of Structural Geology*, 94, 98-115.

- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., and Fisher, D. M. 2011. Structural geology algorithms: Vectors and tensors. Cambridge University Press.
- Borradaile, G.J., Jackson, M. 2004. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS): Magnetic petrofabrics of deformed rocks, *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 238(1), 299–360.
- Borradaile, G.J., Henry, B., 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Sci. Rev.* 42, 49–93.
- Elhanati, D., Levi, T., Marco, S., Weinberger, R. 2020. Zones of inelastic deformation around surface ruptures detected by magnetic fabrics. *Tectonophysics*, 788, 228502.
- Erslev, E. A. 1991. Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19, 617-620.
- Fossen, H. 2016. *Structural Geology*, 463 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Levi, T., Weinberger, R., Aïfa, T. Eyal, Y., Marco, S., 2006. Injection mechanism of clay-rich sediments into dikes during earthquakes, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q12009, doi:10.1029/2006GC001410.
- Levi, T., Weinberger, R., Marco, S., 2014. Magnetic fabrics induced by dynamic faulting reveal damage zone sizes in soft rocks, Dead Sea basin, *Geophys. J. Int.*, 199(2), 1214–1229.
- Levi, T., Weinberger, R., Alsop, G.I., Marco, S., 2018. Characterizing seismites with anisotropy of magnetic susceptibility. *Geology* 46, 827–830. <https://doi.org/10.1130/G45120.1>
- Ramsay, J. G., 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw Hill Book Company, 568.
- Vollmer, F. W. 2015. Orient 3: Spherical projection and orientation data analysis program. Retrieved from www.frederickvollmer.com/orient.
- Weinberger, R., Levi, T., Alsop, G. I. Eyal, Y., 2016. Coseismic horizontal slip revealed by sheared clastic dikes in the Dead Sea Basin, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 128(7–8), 1193–1206.
- Weinberger, R., Levi, T., Alsop, G.I., Marco, S., 2017. Kinematics of Mass Transport Deposits revealed by magnetic fabrics. *Geophys. Res. Lett.* 5807–58

5. בחינת הקשר בין שינויי עובי לאורך שכבה מקומטת לבין שינויים בצפיפות הסדימנט, תצורת הלשון בנחל פרצים

קבטני, מ.^{1,2}, סימן-טוב, ש.¹, מרקו, ש.²

¹ המכון הגיאולוגי

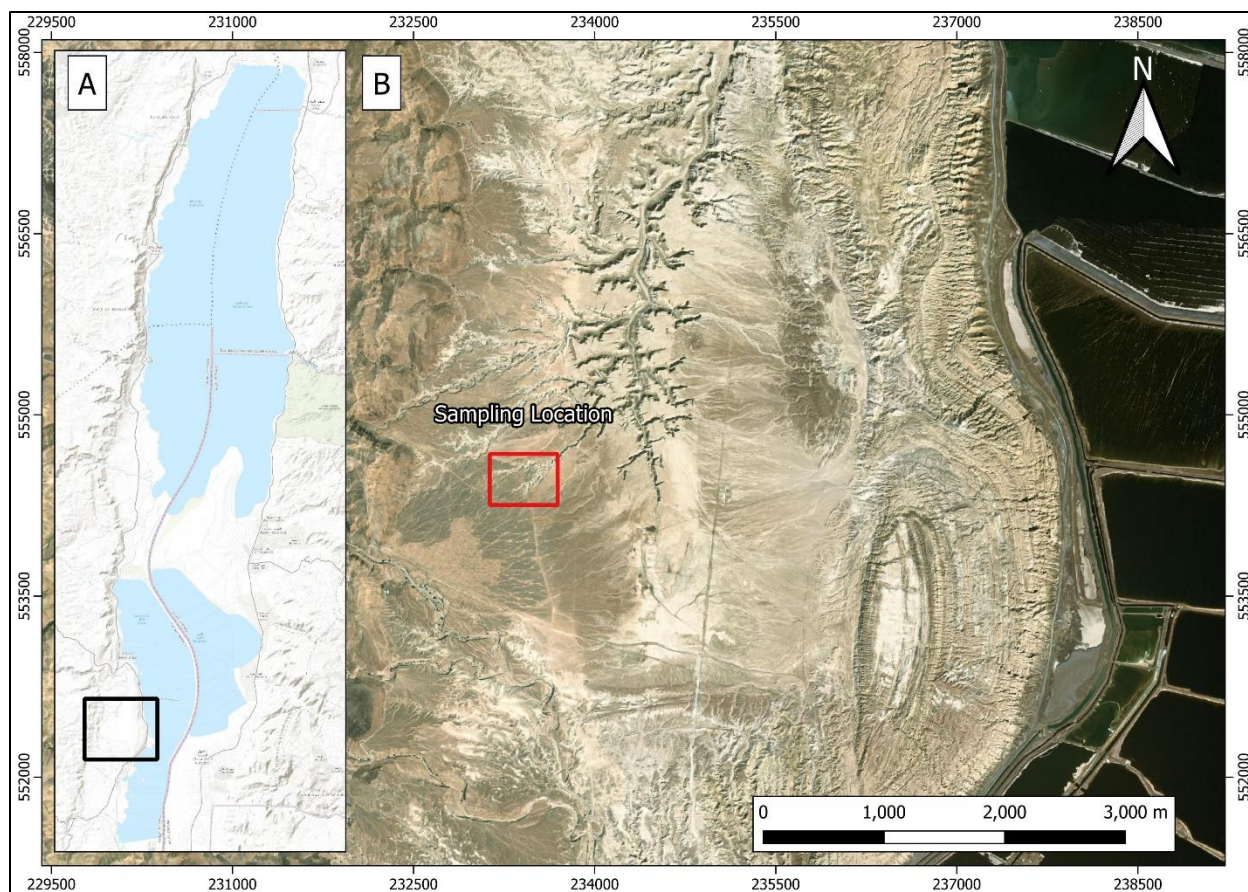
² אוניברסיטת תל אביב

5.1 רקע

קמטים בסלעים ובסדימנטים רכים הם תופעה גיאולוגית נפוצה המהווה עדות למעוות החומר מאז היווצרותו. קמטים נוצרים בחומרים המאופיינים בטקסטורה מקורית של מישורים מקבילים עד תת מקבילים כגון מישורי שכוב בסלעים סדימנטריים, מישורי פצילות בסלעים מותמרים כמו בצפחות (Schist) ובגנייס (Gneiss) (Ramsay & Huber, 1987). קימוט הוא תהליך מגוון שעשוי להתרחש בשכבה אחת או במספר שכבות (מערכת רב-שכבתית) ותלוי בגורמים רבים, ביניהם הלחץ וטמפרטורת הסביבה, קצב המעוות, ואינטראקציות כימיות (Ramsay John G., 1967). בסלעי משקע ניתן להבחין במגוון רחב של מבנים סדימנטריים אשר נוצרו כתוצאה מתהליך המעוות. כאשר התהליך מתרחש בסדימנט הרך טרם הפיכתו לסלע קשה, מבנים אלו מכונים מבני דפורמציה רכים (Soft sediment deformation structures – SSDSs) (John R.L. Allen, 1982; Maltman, 1984). כאשר המנגנון אשר יוצר את ה- SSDSs הינו אירוע סייסמי (רעידת אדמה), מבני המעוות מוגדרים כסייסמיים (Seilacher, 1984). תצורת הלשון אשר שקעה באגן ים המלח במהלך תקופת הפלייסטוקן, מספקת מחשופים בהם מגוון רב של סייסמיים שנחקרו רבות בעבר ובפרויקט הנוכחי (Alsop et al., 2022; Alsop & Marco, 2011, 2012, 2013; Arkin, 1988; Balaban-Fradkin et al., 2022; Heifetz et al., 2005; Katz et al., 2009; Wetzler et al., 2010).

אגן ים המלח הינו עמק ביקוע אשר נוצר כתוצאה מתנועה שמאלית עם דירוג שמאלי (pull-apart) על גבי העתק ים המלח. ההעתק החל לפעול בתקופת המיוקן כשמשקעים החלו למלא את אגן ים המלח, וכך נמשך עד ימינו, כולל השקעה של תצורת הלשון בתקופת הפלייסטוקן (Bartov et al., 1980; Garfunkel, 1981). הסטריגרפיה באזור אגן ים המלח חולקה לחמש תצורות עיקריות: סדום, עמורה, סמרה, הלשון וצאלים (Zak, 1967). תצורת הלשון שקעה בימת הלשון (אשר קדמה לים המלח) בפרק זמן שבין 70,000 ~ ל- 15,000 שנים לפני זמנינו. מפלס המים בימת הלשון לא היה קבוע ונע בין 340 ~ ל- 160 מ' מתחת למפלס מי הים בתקופה שבין 55,000 ~ ל- 15,000 שנים לפני זמנינו (Bartov et al., 2002). מחשופי התצורה בנויים ברובם מרצף של שכבות דקות, חילופין של שכבות ארגוניט ודטריטוס המייצגים שינויים עונתיים של קיץ וחורף בהתאמה (Begin et al., 1974).

אזור המחקר נמצא בחלקו הדרום מערבי של אגן ים המלח המודרני, ביובלי נחל פרצים (איור 5.1) לאורכו נצפים מחשופים רבים של תצורת הלשון הכוללות לעיתים מבנים סדימנטריים בהם קמטים בצורות וגדלים שונים (איור 5.2).



איור 5.1: אזור המחקר. (A) מפה של ים המלח, כשבחלקו הדרום מערבי מסומן אזור המחקר (מסגרת שחורה). (B) אורתופוטו של אזור המחקר (האזור המסומן ב-A), במסגרת האדומה מסומן אזור הדיגום ביובליו הדרום מערביים של נחל פרצים.

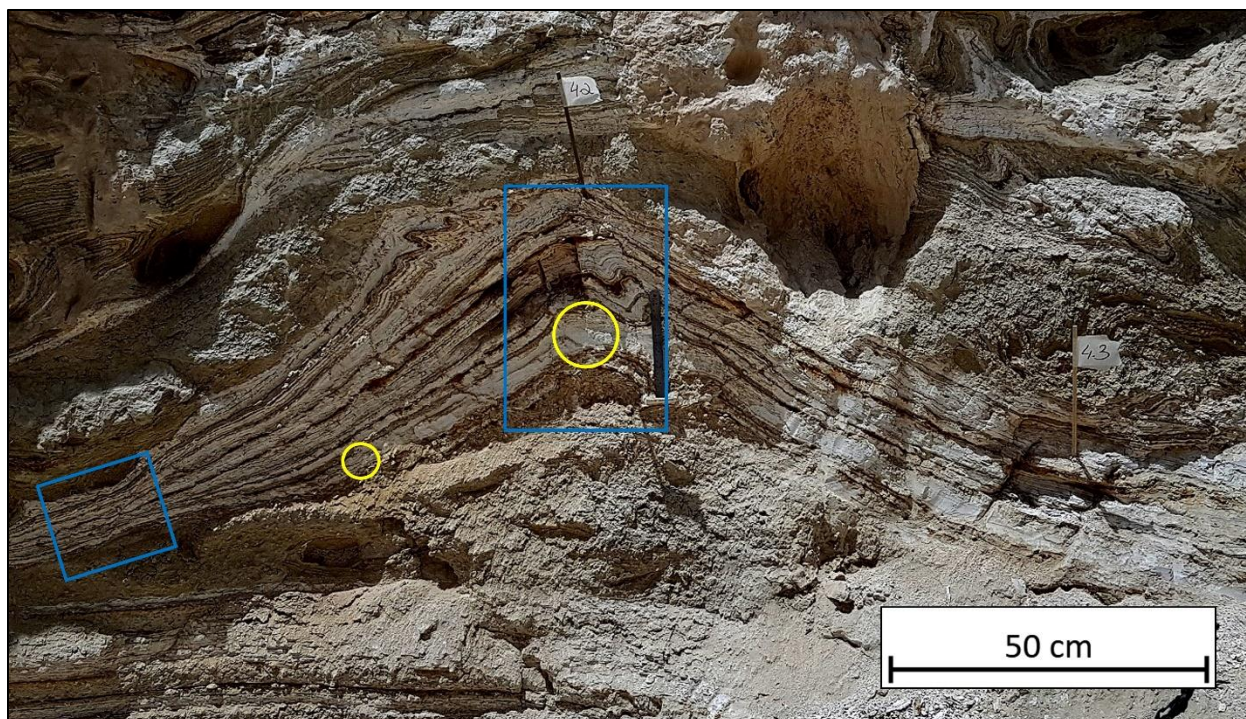


איור 5.2: צילום של שכבות ארגוניט (בהיר) ודטריטוס (כהה) אשר עברו דפורמציה בתצורת הלשון, נחל פרצים.

במהלך השנים הוצעו מנגנונים פיסיקליים שונים להיווצרות הקמטים בתצורת הלשון. גישה אחת מתייחסת אל התהליך כאל תנועת חומר במורד מדרון (Slumping), כלומר, גלישת שכבות בקרקעית האגם כתוצאה מרעידת אדמה (Alsop & Marco, 2011, 2013). על פי מנגנון זה, השכבות גולשות על גבי משטח ניתוק והן נעות במורד על פי הגרדיאנט המקומי ובאופן כללי לכיוון האזור הנמוך באגן ים המלח. תנועת המדרון התרחשה ככל הנראה בשיפועים מתונים באזור זה (כ- 1°) וכיוון הדיפ הממוצע הוא לכיוון הנקודה הנמוכה באזור האגן (Alsop & Marco, 2012). כיווניות זו אומתה במחקרים נוספים באמצעות אנאיזוטרופיה של רגישות מגנטית (ANS - anisotropy of magnetic susceptibility) (Weinberger et al., 2017) ומצביעה למעשה על כיוון המדרון של קרקעית אגם הלשון באזור המחקר. תנועה זו של הסדימנטים, יוצרת באזורים מסוימים מעוות פנימי אשר יוצר מבנים סדימנטריים שונים וביניהם גם קמטים שנוצרים מדחיסה של הסדימנטים (Maltman, 1994). הגישה השנייה מציעה כי תהליך של גזירה בין שכבות זורמים יוצר קמטים כתוצאה מאי יציבות מסוג קלווין-הלמהולץ (Kelvin-Helmholtz instability) (Heifetz et al., 2005; Wetzler et al., 2010). על פי גישה זאת, בעת רעידת אדמה השכבות מתנהגות כזורם וכתנאים מסוימים נוצרת גזירה יחסית בין השכבות שנועות במהירויות שונות וכתוצאה מכך נוצרת אי יציבות שבעקבותיה השכבות מתקמטות, מתערבלות, ונוצרים המבנים הסדימנטריים שנצפים כיום במחשופי התצורה.

מהתבוננות בקמטים עולה כי ברובם קיימים שינויי עובי מקומיים. השינויים ניכרים אם עוקבים אחר עובייה של שכבה בודדת (או חבילת שכבות) לכל אורכה, כך שנצפית הידקקות בנקודה אחת והתעבות בנקודה אחרת לאורך אותה שכבה (איור 5.3). שינוי עובי של שכבה עשוי להתרחש עקב מספר מנגנונים. שכבת הסדימנט עשויה לשנות את נפחה בעקבות שינוי בנקבוביות החומר כתוצאה מדחיסת סדימנטים, ושינוי בנקבוביות החומר משפיע באופן ישיר על צפיפותו. במקרה זה, ניתן יהיה לזהות שינוי עובי במידה ולא מתרחש שינוי בממד העומק של השכבה (כפי שנצפה בשדה) וצפוי שיהיה שינוי בצפיפות החומר בין האזורים השונים. שינוי זה במבנה החומר בעקבות שינוי בגודל הנקבים צפוי שיהיה ניתן גם לזהות בסקלה המיקרוסקופית (בדיקה שכלולה במחקר אך לא נכללת בדו"ח זה).

לעומת זאת, על פי הגישה השנייה שעל פיה הקמטים נוצרים כתוצאה מגזירה בין זורמים בעלי תכונות מכאניות שונות, אם שכבות הסדימנט אכן מתנהגות כנוזל, עובי השכבות עשוי היה להשתנות כתוצאה משינויים במהירות הזרימה של הנוזל לאורך השכבה. שינוי בעובי הזורם כתלות במהירותו ניתן לראות בתופעה יומיומית, כשמים זורמים מטה מברז. בתחילת דרכם, בפתח הברז, המים מתחילים בעובי מסוים והזרם מדקק ככל שהמים מתרחקים מפתח הברז ומהירותם עולה (Grubelnik & Marhl, 2005). תצפית זו נכונה למים, הנחשבים לנוזל בלתי דחיס ולכן על אף שינוי העובי בזרם לא צפויים לזהות שינוי בצפיפות החומר. אם זהו המצב לאורך שכבה שזרמה ועברה קימוט, למרות השינוי בעובי אנו לא צפויים לזהות שינוי בצפיפות הסדימנט.



איור 5.3: צילום אתר PZ04 המציג דוגמה לשינויי עובי לאורך השכבה. מסגרת כחולה מצביעה על שינויי עובי של חבילת שכבות, עיגול צהוב מסמן שינוי עובי לאורך אותה שכבה.

5.2 מטרות העבודה

ככל הידוע לנו, אין הסבר ברור לשינויי העובי הנצפים בקמטי תצורת הלשון. בעבודה זו אנו בוחנים האם קיים שינוי בצפיפות החומר לאורך שכבה המשנה את עובייה והאם שינוי זה קורלטיבי לאזורים בהם חל השינוי בעובי. באמצעות התוצאות ננסה לקשור בין שינויי עובי וצפיפות לאורך השכבות המקומטות לבין מנגנון היצירה שלהן (מעוות בעת גלישת החומר בקרקעית האגם או אי יציבות הנוצרת מגזירה בין זורמים בעלי תכונות מכאניות שונות).

5.3 שיטות עבודה

כאשר חל שינוי בנפח של חומר ניתן לקשר אותו לשינוי במסה או בצפיפות. גבולות השכבה נשמרים ברציפות לאורך מספר מטרים, כך שלא נצפו עדויות למעבר חומר בין שכבות (איור ו-איור 5.3). בהנחה שאין שינוי משמעותי במסת הסדימנט לאורך שכבה, בחבילת חומר בעלת נפח מוגדר צפיפות החומר צריכה להשתנות כדי לקיים את משוואה (1). על כן, בחרנו בצפיפות כפרמטר הפיסיקלי שיש לבחון אל מול שינויי העובי.

בשלב ראשון אנו מתעדים את האזורים בהם חל השינוי בעובי ומציגים אותו באופן כמותי ובשלב שני אנו בודקים האם באזורים בהם חלו שינויי עובי, הם גם מתבטאים בשינוי עקבי בצפיפות הסדימנט. כלומר, בכל אתר שבחרנו לחקור בדקנו האם חל שינוי בצפיפות החומר לאורך שכבה מסוימת, תוך מתן דגש על נקודות לאורך השכבה בהן השינוי בעובי משמעותי.

צפיפות של חומר (ρ) מוגדרת כמסה (m) ליחידת נפח (V):

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{gram}}{\text{cm}^3} \right] \quad (1)$$

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{particle}} \cdot 100 \quad (2)$$

ממשוואה (2) המתארת את הקשר בין צפיפות החלקיק ($\rho_{particle}$), צפיפות נפחית (ρ_{bulk}), ונקבוביות החומר (φ) ניתן להסיק כי סלע בעל צפיפות נפחית נמוכה, צפוי להיות בעל נקבוביות גבוהה. שינוי בנקבוביות החומר יכול להעיד על שינוי נפח מקומי שעשוי להתבטא בשינויי העובי אשר נצפים בקמטים.

5.4 מדידת צפיפות

הדרך הישירה למדוד צפיפות של גוף מסוים היא על ידי מדידת מסתו וחלוקה בנפחו (משוואה 1).

כאשר לגוף יש צורה גיאומטרית אי רגולרית אשר לא מאפשרת את מדידת הנפח באופן פשוט, יש להשתמש בשיטה שונה למדידת הנפח. במחקר הנוכחי, מדדנו את הצפיפות תוך שימוש בשתי שיטות שונות להערכת נפח הדוגמה:

1. מדידת נפח ישירה – מדידת נפח הדוגמא מתוך צורה גיאומטרית פשוטה. דגמנו את הסדימנט באמצעות צינור נירוסטה שקוטרו הפנימי 2.98 סנטימטרים וכפלנו בגובה הדוגמה הגלילית שנמדדה בשטח באמצעות סרגל.
2. מדידת נפח עקיפה - מדידה זו מתבססת על עקרון ארכימדס. אספנו בשדה דוגמה שצורתה אי רגולרית ובמעבדה מדדנו את נפח המים שנדחקו במהלך הטבעתה של הדוגמה בכוס מדידה.

5.5 דיגום בשדה

הדיגום בשדה נערך במספר אתרים לאורך היובלים הדרומיים המתנקזים אל נחל פרצים (איור 5.1). בכל אתר דיגום, נבחר אזור בו ניתן לזהות מספר שכבות אשר עברו דפורמציה. מתוך שכבות אלו נדגמה שכבה בודדת או אוסף מוגדר של שכבות שלאורכן ניתן לזהות התעבות, הידקקות ואזור בו העובי לא השתנה. בנוסף, נדגמה שכבה אשר לא עברה דפורמציה ומשמשת כשכבת ביקורת. השכבות בכל אחד מאתרי הדיגום צולמו לפחות פעמיים, צילום טרם הדיגום (עבור ניתוח גיאומטרי של שינויי העובי) וצילום לאחר הדיגום (הכולל סימון של מיקום הדוגמאות לאורך השכבה).

העבודה בשדה הותאמה לאופן מדידת נפח הדוגמה:

1. מדידת נפח ישירה – בשלב ראשון, לחצנו את הצינור אל המיקום הרצוי לדיגום לאורך השכבה כך שניתן יהיה לזהות את היקף הצינור בסדימנט. לאחר מכן, גילפנו באמצעות סכין את הסדימנט שמסביב לסימון על מנת לאפשר החדרה נוחה של הצינור לתוך הסדימנט. הגילוף נעשה במרחק מהסימון על מנת לא לפגוע או לשנות את מבנה הסדימנט. לדיגום מיטבי, הקפדנו ללחוץ את הצינור

לסדימנט כך שכל נפח הצינור יהיה מלא בחומר. בשלב האחרון, נותק הצינור ובתוכו הדוגמה מהשכבה, פילסנו את בסיסי הגליל שהתקבל כך שגובה הדוגמה יהיה מוגדר היטב. מדדנו את הגובה החסר בין גליל הדוגמא לצינור הנירוסטה ולבסוף רוקנו את הדוגמה בצינור לתוך שקית אטומה שנלקחה להמשך מדידות במעבדה.

2. מדידת נפח עקיפה – בדיגום בשדה, בשלב ראשון גולף באמצעות סכין הסדימנט שמקיף את הדוגמה הרצויה. בשונה מהדוגמאות שצורתן גליל (הסבר לעיל), גודל הדוגמאות וצורתן אינו קבוע אלא משתנה כתלות במיקומן לאורך השכבה (כך למשל, מאזור בו השכבה עבה יחסית ניתן להוציא דוגמה גדולה יותר). כל דוגמה נשמרה בתוך שקית אטומה שהונחה בתוך קופסה עם ריפוד כדי למנוע שבירה של הדוגמה העדינה בשלבי ההובלה למעבדה.



איור 5.4: דוגמה לדיגום בשדה (אתר PZ09) עבור מדידת נפח ישירה באמצעות צינור נירוסטה. A. תמונה של המחשוף שנדגם. B. צינור נירוסטה מוחדר לתוך סדימנט בשכבה שנדגמת. C. צינור נירוסטה כאשר כל נפחו מלא בסדימנט לאחר חילוץ מהשכבה.

5.6 עבודת מעבדה

5.6.1 מדידת נפח ישירה

דוגמאות הסדימנט שנשמרו בשקיות אטומות, נשקלו לפני ולאחר ייבוש החומר בתנור בטמפרטורה של 50°C למשך 24 שעות לפחות. למדידת נפח הדוגמה השתמשנו בנפח גליל שקוטרו 2.98 סנטימטרים וגובהו משתנה בהתאם לגובה הדוגמה. את המסה היבשה של הדוגמה חילקנו בנפח המחושב לקבלת הצפיפות הנפחית.

5.6.2 מדידת נפח עקיפה

גוף כלשהו השוקע בנוזל, דוחק אותו כך שנפח הגוף שווה לנפח הנוזל שנדחק. נפח זה ניתן להערכה על ידי מדידת שינוי מפלס הנוזל בכלי מדידה. במקרה של גוף ששקוע לגמרי בנוזל, נפח הגוף שווה לנפח הנוזל שנדחק. לעומת זאת, במקרה בו הגוף צף בנוזל, מאחר שצפיפותו קטנה מצפיפות הנוזל (למשל עבור ארגוניט), יש לגרום לגוף כולו לשקוע על מנת למדוד את נפחו הכולל.

הדוגמאות נשקלו ולאחר מכן הוכנסו לייבוש בתנור (50°C) למשך 24 שעות לפחות, שבסופן נשקלו פעם נוספת.

לאחר תהליך הייבוש, ניסוי דחיקת הנוזל התבצע ב- 3 גרסאות:

1. דוגמאות הארגוניט והדטריטוס נעטפו בסרט פרפין כדי למנוע חדירת נוזלים לתוך הסדימנט ונשקלו פעם נוספת.
2. דוגמאות הארגוניט צופו בשעווה מומסת על מנת לצמצם את השגיאה במדידת המסה והנפח (כפי שלהערכתנו קרה בעת השימוש בסרט פרפין).
3. דוגמאות דטריטוס שנבדקו ללא ציפוי כלל והושקעו בתוך שעווה נוזלית.

עבור גרסאות 2&1, כל דוגמה הונחה בכוס כימית אך חלקן שקעו חלקית בלבד (במקרה של ארגוניט) מאחר וצפיפות הסדימנט קטנה מזו של המים (לצורך הניסוי השתמשנו במים מזוקקים). כדי להטביע את הדוגמאות שצפו במים נעזרנו במשקולת בעלת מסה ידועה ונפח שחושב בנפרד. נפח זה הוחסר מנפח הנוזל שנדחק במדידה כדי לקבל את נפח הדוגמה. לבסוף חילקנו את מסתה של כל דוגמה בנפחה לקבלת הצפיפות. באופן דומה, גם נפח סרט הפרפין והשעווה חושבו והוחסרו מנפח הנוזל שנדחק כדי לקבל את נפח הדוגמה.

עבור שכבת הדטריטוס שהיא פחות פריכה ובעלת נקבוביות נמוכה יותר (ביחס לארגוניט), ביצענו ניסוי בו דחיקת נוזל מתרחשת בתוך שעווה מומסת כאשר הדוגמה ללא ציפוי (גרסה 3).

כדי לבדוק את מהימנות השיטה השנייה המוזכרת לעיל, מדדנו את צפיפותם של גירי לוח ובלוק איטונג באמצעות ציפוי שעווה והשווינו את התוצאות לצפיפות שחושבה באמצעות מדידה גיאומטרית ישירה של גופים אלו.



איור 5.5: דגימות (מאתר PZ01) מצופות בשעווה עבור ניסוי דחיקת נוזל. הדגימות בגדלים שונים וצורות גיאומטריות אשר לא מאפשרות מדידה נפח פשוטה.

5.7 תוצאות

בשלב הראשון ניתחנו את שינוי הצפיפות התיאורטי הצפוי לאורך שכבה על בסיס שינוי העובי. הניתוח בוצע על תמונות של המחשופים השונים לפני שהופרו במהלך הדגימה. הבדיקה התמקדה במדידת שינוי צורת השכבה בממד אחד, העובי, כאשר שני הממדים האחרים נחשבו לקבועים (אורך ועומק). מתצפיות בשטח הבחנו שאין שינוי בצורת השכבה בממד העומק. בנוסף, לצורך החישוב התיאורטי הנחנו שאין שינוי במסת הסדימנט ליחידת אורך. הבסיס להנחה זו נובע מכך שלא נצפה מעבר חומר בין שכבות מקבילות. הצפיפות התיאורטית חושבה על ידי חלוקה של יחידת מסה במכפלת יחידת אורך, עומק והעובי המדוד ונורמלה לאחר מכן. באיורים 5.6-5.8 נתונות תוצאות החישוב התיאורטי אל מול מדידות הצפיפות עבור שניים מהמחשופים שנחקרו בשדה.

ממדידת הצפיפות מתקבלות התוצאות הבאות, ראשית, הצפיפות הנפחית (bulk density) של הארגוניט והדטריטוס שחושבו מכלל השיטות היא כ- 0.85 גרם/סמ"ק עבור ארגוניט ו- 1.58 גרם/סמ"ק עבור דטריטוס כפי שמפורט ב

טבלה 5. תוצאות אלו שונות מתוצאות שדווחו בעבר לגבי הסדימנטים של תצורת הלשון (Arkin & Michaeli, 1986) שצפיפותן בטווח 1.74-1.96 גרם/סמ"ק. יש לציין ש- (Arkin & Michaeli, 1986) לא מציגים באופן מפורש מאיזה אזור נלקחו הדגימות, מה השיטות בהן השתמשו למדידת הצפיפות והאם נדגמה שכבה נקיה או מעורבת של ארגוניט ודטריטוס.

הצפיפות הממוצעת המוזכרת לעיל התקבלה על ידי חישוב ממוצע משוקלל (משוואה 3), כאשר סדרת הערכים (x_i) הם ערכי הממוצע שחושבו עבור כל אתר, לפי סוג הניסוי, וערך המשקולת (w_i) הינו ערך מספר הדגימות שנלקחו בכל אתר (טבלה 5.2).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

מתוך מדידת הצפיפות בשתי שיטות מדידה שונות (דחיקת נוזל ומדידה גיאומטרית) ניתן לזהות מגמות דומות בתוצאות, על אף ששיטת דחיקת המים מורכבת לביצוע עבור הדוגמאות שנבחנו. מאחר וגודל הדגימה אינו אחיד, מתקבלת תוצאה בדיוק שונה עבור דגימה גדולה מול דגימה קטנה.

באיור 5.6-5.6, בפנל העליון (A) מוצגת האנליזה שנעשתה על גבי צילום המחשוף, בעוד שבפנל התחתון (B) מוצגת השוואה בין תוצאות מדידת הצפיפות לבין החישוב התיאורטי שנעשה על בסיס הצילום.

באיור 5.6B מוצגת מדידת הצפיפות של שכבת הביקורת – שכבה ישרה אשר לא עברה דפורמציה. ניתן לראות שבניתוח התיאורטי (כתום) קיבלנו תנודתיות בערכי הצפיפות ואין קורלציה ברורה אל מול תוצאות המדידה (כחול).

באיור 5.7B נתונות תוצאות מדידת הצפיפות (בירוק) אל מול החישוב התיאורטי (בכתום) של שכבה אשר עברה דפורמציה. ניתן לראות שעבור נקודות 2.3 – 2.6 השינוי בערכי הצפיפות שנמדדו במעבדה דומה לשינוי בערכים שהתקבלו מתוך הניתוח התיאורטי (עליה בערך הצפיפות באזורי הידקקות וירידה בצפיפות באזורי התרחבות). לעומת זאת, נקודות 2.7 ו- 2.8 מראות התנהגות הפוכה מהמצופה, בניתוח התיאורטי נקודות אלו מציגות את ערך הצפיפות הגבוה ביותר, אך על פי המדידות במעבדה צפיפות הסדימנט בנקודות אלו היא הנמוכה ביותר.

בניתוח התיאורטי שמוצג באיור 5.8B ניתן לזהות שאין מגמה דומה בין הגרף התיאורטי לזה של המדידות. יתר על כן, ניתן לראות שנקודה 2.5 אשר נאספה מהאזור העבה ביותר לאורך השכבה אינה מציגה את ערך הצפיפות הנמוך ביותר (כפי שהיינו מצפים), בעוד שעבור נקודה 2.4 אשר נאספה מאזור דק יותר ערך הצפיפות נמוך מזה שנמדד עבור דוגמה 2.5.

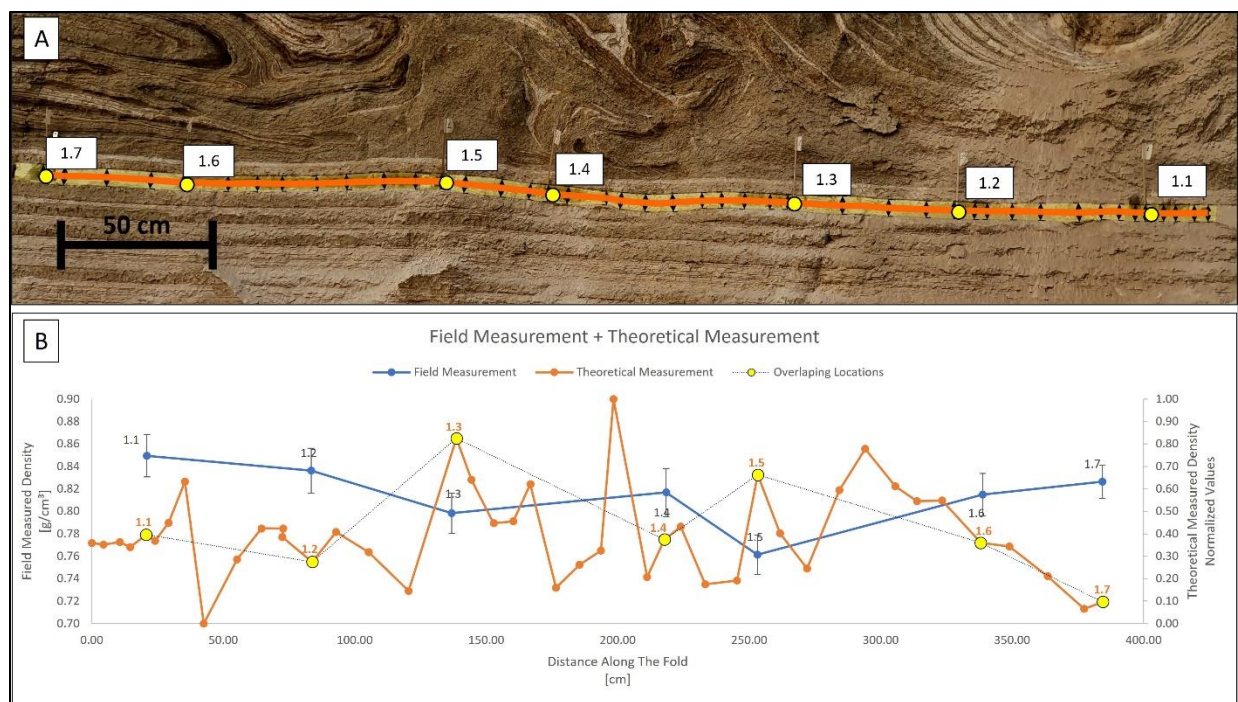
טבלה 5.1 : תוצאות מדידת הצפיפות מכלל השיטות

סה"כ דגימות	שונות ממוצעת [גרם/סמ"ק] ²	סטיית תקן של הממוצע [גרם/סמ"ק]	ממוצע משוקלל של הממוצעים [גרם/סמ"ק]	
76	0.01	0.09	0.85	ארגוניט
13	0.04	0.19	1.58	דטריטוס

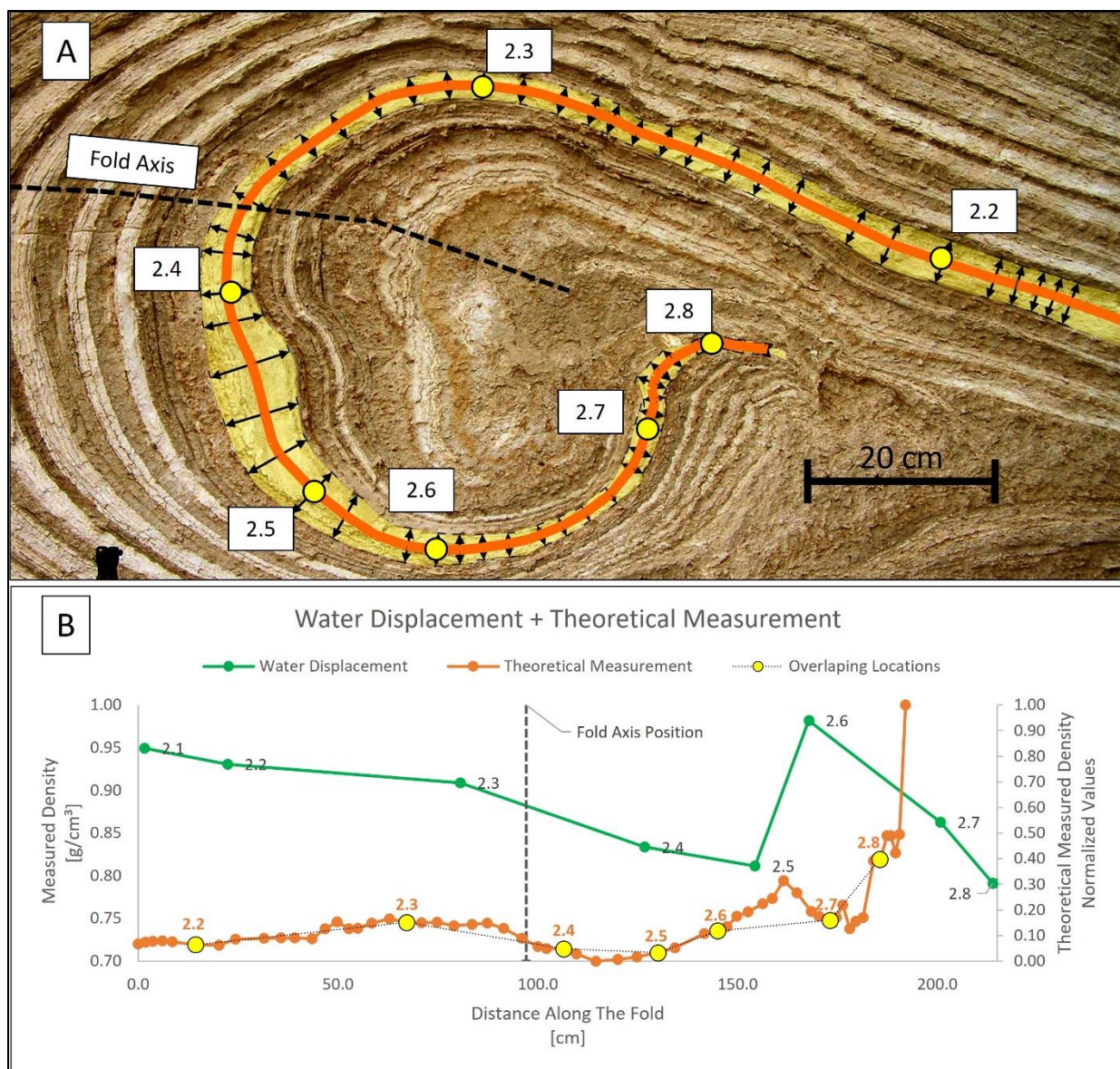
טבלה 5.2 : תוצאות מדידת הצפיפות בהתאם לסוג הניסוי : A. דחיקת מים כאשר הדוגמה עטופה בסרט פרפין ; B. דחיקת מים כאשר הדוגמה מצופה בשעווה ; C. דחיקת שעווה נוזלית עבור דוגמאות דטריטוס ; D. מדידת נפח גיאומטרית.

מספר דגימות	סטיית תקן [גרם/סמ"ק]	ממוצע [גרם/סמ"ק]	טווח ערכי צפיפות [גרם/סמ"ק]	סוג ניסוי	שם אתר	סוג הסדימנט
3	0.15	0.77	0.61 - 0.97	A	PZ01	ארגוניט
8	0.063	0.87	0.78 - 0.97	B		
7	0.056	0.79	0.7 - 0.87	D		
3	0.15	1.03	0.8 - 1.18	A	PZ03	
3	0.17	0.76	0.6 - 1	A	PZ04	
7	0.033	0.89	0.85 - 0.94	B		
3	0.0083	0.79	0.78 - 0.8	D		
7	0.075	0.98	0.88 - 1.07	B	PZ05	
6	0.028	0.81	0.76 - 0.85	D	*PZ06	
9	0.038	0.82	0.76 - 0.89	D	PZ07	
7	0.021	0.85	0.8 - 0.87	D	PZ08	
5	0.04	0.75	0.69 - 0.79	D	PZ09	
8	0.065	0.84	0.77 - 0.99	D	PZ11	
3	0.16	1.03	1.1 - 1.14	A	PZ02	דטריטוס
10	0.22	1.75	1.29 - 2.11	C	PZ10	

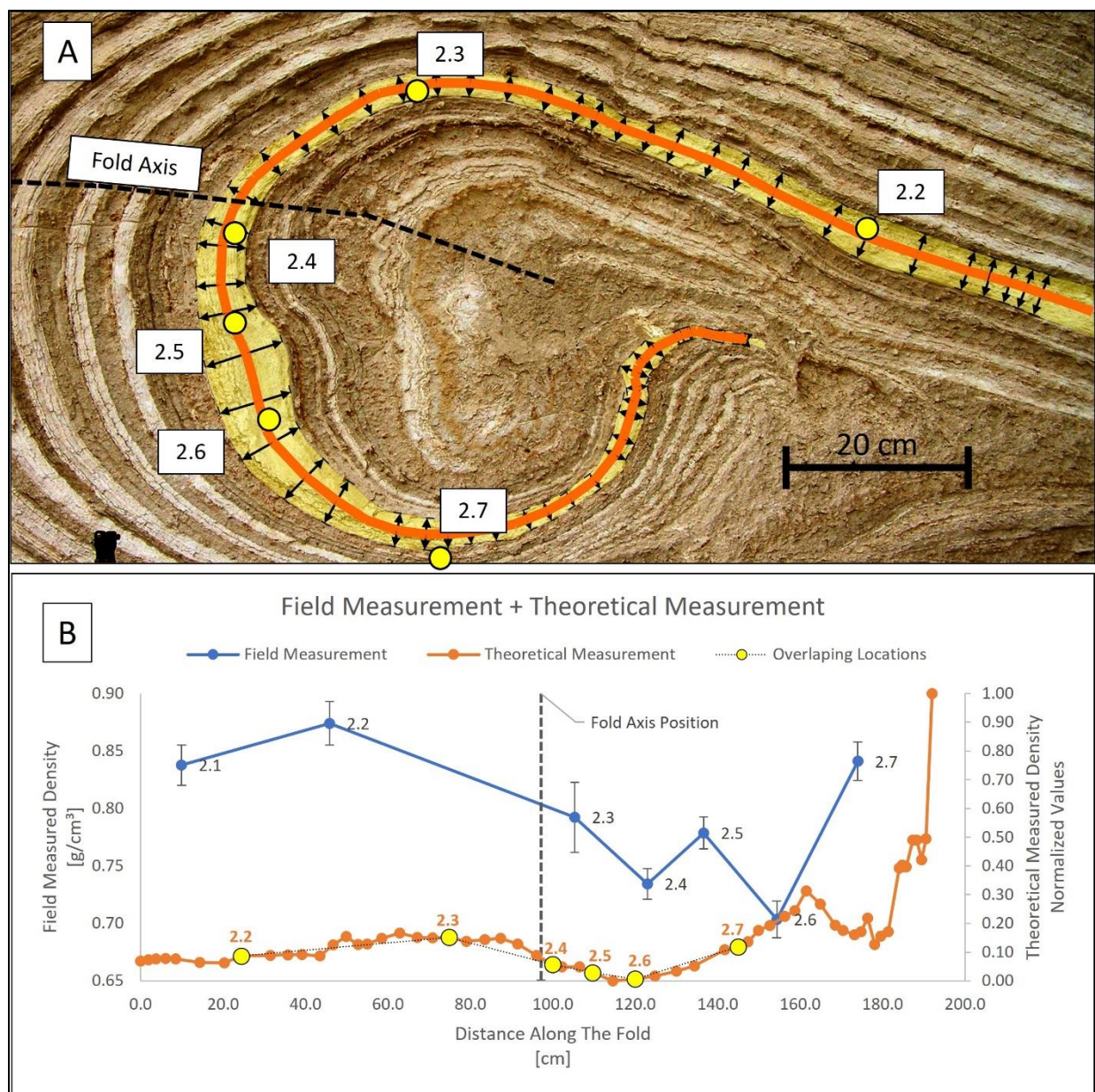
* שכבת הביקורת (שאינה מקומטת) המוצגת באיור 5.6.



איור 5.6: תוצאות מדידת הצפיפות (באמצעות מדידה גיאומטרית) ושינויי העובי מדוגמאות שנאספו באתר PZ06. (A) בצילום מסומנת השכבה ממנה נאספו הדוגמאות (בכתום) וחצים שחורים מסמנים את עובי השכבה (שנמדד אנכית לגבולות השכבה) בנקודות שונות לאורכה. בנוסף מסומן מיקום הדגימות אשר נלקחו בשטח 1.1 – 1.7. (B) גרף המציג תוצאות של הניתוח התיאורטי (בכתום), תוצאות של מדידת צפיפות על ידי מדידה גיאומטרית (בכחול), ומספר נקודות אשר נמצאות במיקום חופף בין הניתוח התיאורטי למיקום של הדגימה שנלקחה (נקודות צהובות וקו מקווקו שמחבר ביניהן).



איור 5.7 : תוצאות מדידת הצפיפות (באמצעות דחיקת נוזל) ושינויי העובי מדוגמאות שנאספו באתר PZ01. (A) בצילום מסומנת השכבה המקומטת ממנה נאספו דוגמאות (בכתום) עם חצים שחורים המסמנים את עובי השכבה המשתנה לאורכה. העובי נמדד אנכית לגבולות השכבה. בנוסף מסומן מיקום הדגימות אשר נלקח בשטח 2.1 – 2.8 (נקודה 2.1 מחוץ לגבול התמונה המוצגת), וכן מסומן מיקום ציר הקמט (קווקו שחור). (B) גרף התוצאות, אשר מציג תוצאות של הניתוח התיאורטי (בכתום), תוצאות של מדידת צפיפות על ידי דחיקת נוזל (בירוק), ומספר נקודות אשר נמצאות במיקום חופף בין הניתוח התיאורטי למיקום של הדגימה שנלקחה (עיגול צהוב וקו מקווקו).



איור 5.8: תוצאות מדידת הצפיפות (באמצעות מדידה גיאומטרית) ושינויי העובי מדוגמאות שנאספו באתר PZ01. (A) בצילום מסומנת השכבה המקומטת ממנה נאספו דוגמאות (בכתום) עם חצים שחורים המסמנים את עובי השכבה המשתנה לאורכה. העובי נמדד אנכית לגבולות השכבה. בנוסף מסומן מיקום הדגימות אשר נאספו בשטח 2.1 – 2.7 (נקודה 2.1 מחוץ לגבול התמונה המוצגת), וכן מסומן מיקום ציר הקמט (קווקו שחור). (B) גרף התוצאות, אשר מציג תוצאות של הניתוח התיאורטי (בכתום), תוצאות של מדידת צפיפות על ידי מדידה גיאומטרית (בכחול), ומספר נקודות אשר נמצאות במיקום חופף בין הניתוח התיאורטי למיקום של הדגימה שנאספה (עיגול צהוב וקו מקווקו).

5.8 מסקנות והמשך מחקר

בדו"ח זה מוצגות תוצאות ראשוניות ממדידת צפיפות בשלש שיטות שונות בשכבות שעברו דפורמציה וכן מדידות בשכבת ביקורת שלא ניכרים בה קימוט ושינויי עובי משמעותיים. מהתוצאות עולה כי הצפיפות הנפחית

של שכבות הארגוניט היא 0.85 גרם לסמ"ק בעוד ששכבות הדטריטוס צפופות יותר עם ערך ממוצע של 1.58 גרם לסמ"ק.

בשלב זה לא ניתן לקבוע באופן ודאי מהו הגורם לשינויים המדודים בצפיפות הנפחית של הסדימנט לאורך שכבה והאם שינוי זה קשור לשינוי בעובי השכבה. ישנן מגמות דומות בתוצאות שהוצגו עבור הגרף התיאורטי ביחס לזה המדוד, אך יחד עם זאת ישנן נקודות שמראות מגמה הפוכה. השינויים המדודים בצפיפות עשויים למשל לנבוע מאי הומוגניות בהרכב השכבות לאורכן ואכן, מהתצפיות בשטח עולה כי קיימת אי הומוגניות לאורך שכבה מסוימת. כך למשל, בשכבת ארגוניט מסוימת ניתן לעיתים למצוא תרכיזי גבס ותחמוצות ברזל רק באזורים מסוימים לאורך השכבה, השינוי המינרלוגי שמשפיע על מסת החומר עשוי לגרום לשינויים מקומיים בצפיפות. כך גם קרה עבור דוגמאות ששילבו שכבות ארגוניט עבות ומספר שכבות דטריטוס דקות ביניהן. הדטריטוס מופיע באחוזים משתנים בין הדוגמאות ומאחר והמצאות דטריטוס בדגימה מעלה את הצפיפות הנפחית שלה, נקבל שינויים בצפיפות שאינם נובעים שינויי העובי.

בשלב הזה של העבודה התבוננו ברמת המקרו על הדוגמאות שנאספו בשדה ועל הצילומים. לאור התוצאות שהתקבלו, לא ניתן לקבוע שהשינויים שנמדדו בצפיפות החומר לאורך השכבות תואמים לשינויי העובי. אחת השיטות המוצעות להמשך המחקר היא התבוננות ברמת המיקרו על הדגימות שנאספו. בכל דוגמה ניתן לבדוק האם ישנו שינוי מינרלוגי משמעותי שעשוי להשפיע על מדידת הצפיפות או לחליפין האם נקבוביות הדוגמה משתנה.

5.9 מקורות

- Alsop, G. I., & Marco, S. (2011). Soft-sediment deformation within seismogenic slumps of the Dead Sea Basin. *Journal of Structural Geology*, 33(4), 433–457. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2011.02.003>
- Alsop, G. I., & Marco, S. (2012). A large-scale radial pattern of seismogenic slumping towards the Dead Sea Basin [Article]. *Journal of the Geological Society*, 169(1), 99–110. <https://doi.org/10.1144/0016-76492011-032>
- Alsop, G. I., & Marco, S. (2013). Seismogenic slump folds formed by gravity-driven tectonics down a negligible subaqueous slope. *Tectonophysics*, 605, 48–69. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.004>
- Alsop, G. I., Marco, S., & Levi, T. (2022). Recognising surface versus sub-surface deformation of soft-sediments: Consequences and considerations for palaeoseismic studies. *Journal of Structural Geology*, 154, 104493. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104493>
- Arkin, Y. (1988). Deformation of laminated lacustrine sediments of the Dead Sea. In N. Cristescu & H. I. Ene (Eds.), *Rock and Soil Rheology* (pp. 273–277). Springer Berlin Heidelberg.
- Arkin, Y., & Michaeli, L. (1986). The significance of shear strength in the deformation of laminated sediments in the Dead Sea area. *Israel Journal of Earth Sciences*, 35, 61–72.
- Balaban-Fradkin, A., Siman-Tov, S., Marco, S., & Heifetz, E. (2022). Determining the microstructure of soft sediments by automatic analysis of scanning electron microscope images of the Dead Sea fault seismites. *The Depositional Record*, 8(3), 1093–1106. <https://doi.org/10.1002/dep2.206>

- Bartov, Y., Stein, M., Enzel, Y., Agnon, A., & Reches, Z. (2002). Lake Levels and Sequence Stratigraphy of Lake Lisan, the Late Pleistocene Precursor of the Dead Sea. *Quaternary Research*, 57(1), 9–21. <https://doi.org/DOI:10.1006/qres.2001.2284>
- Bartov, Y., Steinitz, G., Eyal, M., & Eyal, Y. (1980). Sinistral movement along the Gulf of Aqaba - Its age and relation to the opening of the Red Sea. *Nature*, 285, 220–222. <https://doi.org/10.1038/285220a0>
- Begin, Z. B., Ehrlich, A. (Aline), & Nathan, Y. (1974). Lake Lisan: the Pleistocene precursor of the Dead Sea. In *Lake Lisan: the Pleistocene precursor of the Dead Sea*. Ministry of Commerce and Industry, Geological Survey.
- Garfunkel, Z. (1981). Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics. *Tectonophysics*, 80(1), 81–108. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90143-8)
- Grubelnik, V., & Marhl, M. (2005). Drop formation in a falling stream of liquid. *American Journal of Physics - AMER J PHYS*, 73. <https://doi.org/10.1119/1.1866100>
- Heifetz, E., Agnon, A., & Marco, S. (2005). Soft sediment deformation by Kelvin Helmholtz Instability: A case from Dead Sea earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1), 497–504. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.019>
- John R.L. Allen. (1982). Sedimentary structures, their character and physical basis Volume II. *Elsevier Scientific Publishing Company*.
- Katz, A., Agnon, A., & Marco, S. (2009). Earthquake-induced barium anomalies in the Lisan Formation, Dead Sea Rift valley, Israel. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1), 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.06.031>
- Maltman, A. (1984). On the term “soft-sediment deformation.” *Journal of Structural Geology*, 6(5), 589–592. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(84\)90069-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(84)90069-5)
- Maltman, A. (1994). *The Geological Deformation of Sediments* (A. Maltman, Ed.). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0731-0>
- Ramsay, J. G., & Huber, M. I. (1987). *The Techniques of Modern Structural Geology Volume 2: Vol.2: Folds and Fractures*. Academic Press.
- Seilacher, A. (1984). Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events. *Marine Geology*, 55(1), 1–12. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90129-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90129-4)
- Weinberger, R., Levi, T., Alsop, G. I., & Marco, S. (2017). Kinematics of Mass Transport Deposits revealed by magnetic fabrics. *Geophysical Research Letters*, 44(15), 7743–7749. <https://doi.org/10.1002/2017GL074471>
- Wetzler, N., Marco, S., & Heifetz, E. (2010). Quantitative analysis of seismogenic shear-induced turbulence in lake sediments. *Geology*, 38(4), 303–306. <https://doi.org/10.1130/G30685.1>
- Zak, I. (1967). *The geology of Mount Sedom* [Ph.D. Thesis]. The Hebrew University.

6. אי-יציבות המדרון באזור מצוק ההעתקים: (1) תוצאות בדיקה ראשונית בנוגע למפולת הסלעים שארעה בנחל דוד; (2) סקירה של התקנת אמצעי מדידה ואיסוף נתונים לצורך מחקר רב שנתי

סימן-טוב, ש., כץ, ע., נוף, ר., וקראט, א., לוצקי, ה., משה, א., בלמס, א., מליק, א.

המכון הגיאולוגי

6.1 רקע

פרויקט רב שנתי זה עוסק באי-יציבות המדרון לאורך מצוק ההעתקים ומתמקד בהשפעתם של אירועי גשם חריגים על גלישות מדרון. החל מסוף שנת 2022 ולתוך שנת 2023 התמקדנו בבניית מערך איסוף נתונים לצורך בחינת אירועי הגשם והגלישות כחלק ממחקר רב שנתי. לשם כך, בשנה החולפת הצבנו כעשרה מדי גשם וחמש מצלמות בשטח הפרויקט. כמו כן, כמדי שנה מאז שנת 2020 נערך סקר ליידר, באמצעותו מופק מודל גבהים טופוגרפי ברזולוציה גבוהה המאפשר זיהוי גלישות מדרון המתרחשות לאורך מצוק ההעתקים. במקביל להתקדמות המחקר, אנו מקפידים לצאת לשטח לאחר אירועים חריגים הקשורים לגלישת מדרונות. במסגרת זו, יוצא לשטח צוות הסוקר את האירוע ובוחן אותו במטרה לתעד וללמוד ממנו לגבי התהליכים המעצבים את המדרון ואשר מהווים גורם סיכון משמעותי לשמורות טבע, יישובים ועורקי חיים. כך עשינו לאחר התרחשותה של מפולת הסלעים בנחל דוד שאירע בסוף חודש אוגוסט 2023. לאור האמור לעיל, בדו"ח הנוכחי נתחיל בסקירת האירוע בנחל דוד ונמשיך בתיאור עבודת השטח שנעשתה בשנה החולפת לשם איסוף נתונים חדשים במסגרת הפרויקט.

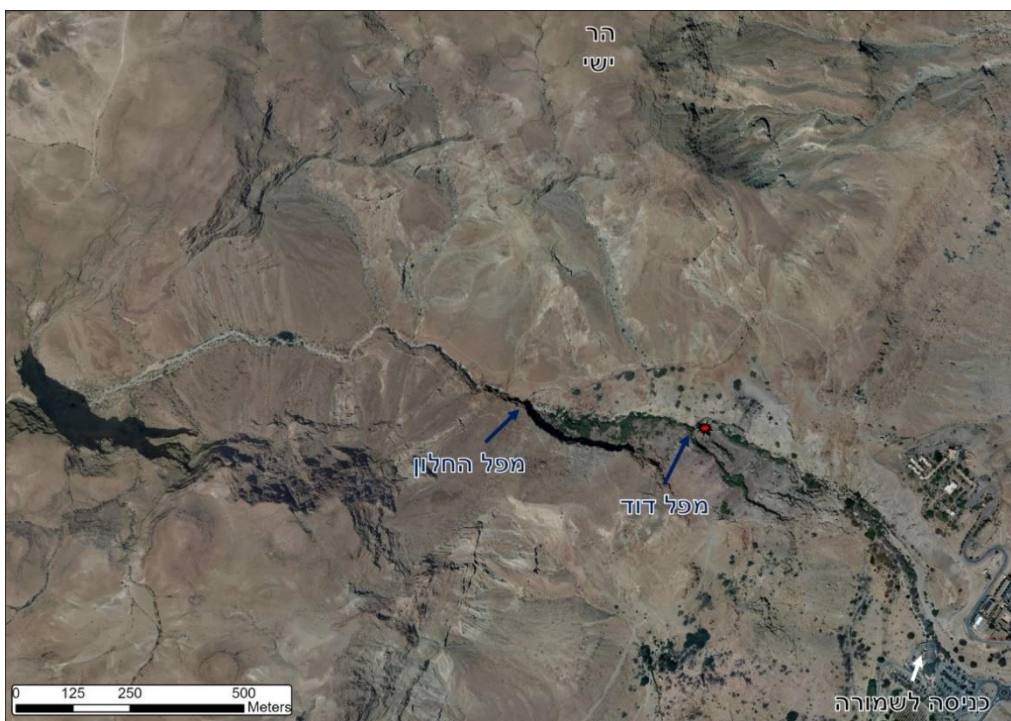
6.2 מטרות העבודה

1. בחינה ראשונית של אירוע מפולת הסלעים בנחל דוד שגרם לנפגעים בנפש.
2. סקירת מערך איסוף הנתונים שהוקם בשנה האחרונה והצגת תוצאות ראשוניות.

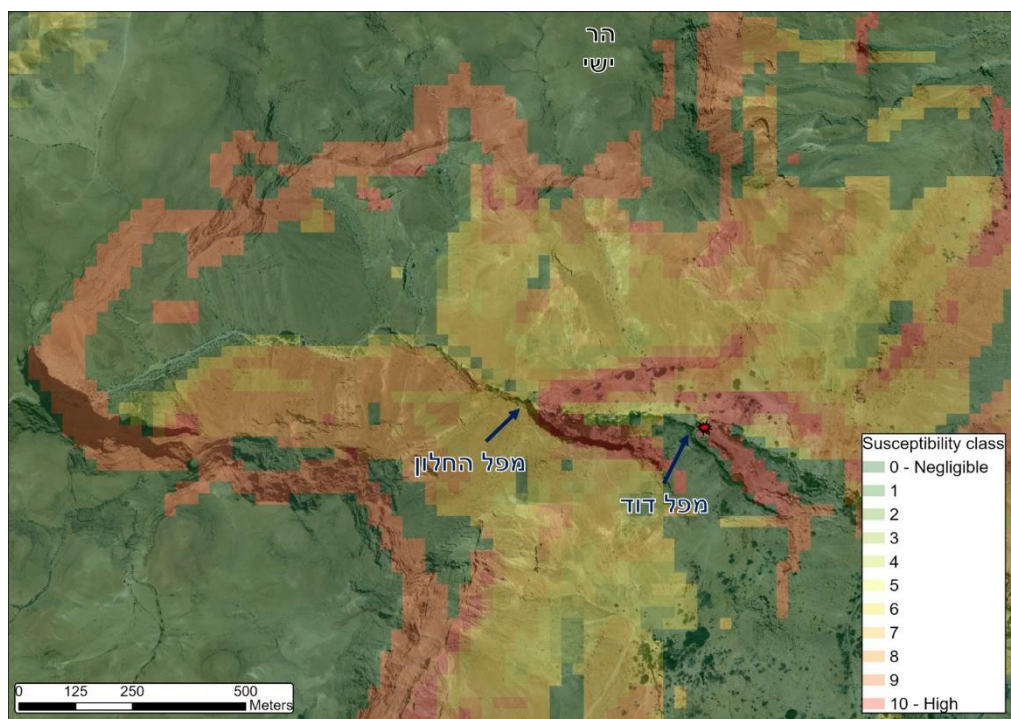
6.3 אירוע נפילת סלעים בנחל דוד

6.3.1 תיאור האירוע

ביום חמישי 24/8/2023 בסביבות השעה 09:00 התרחשה נפילת סלעים (Rockfall) בנחל דוד שבשמורת עין גדי אשר פגעה בכעשרה מטיילים שצעדו בשבילי השמורה. על פי דיווחי כוחות ההצלה, באסון נהרג ילד בן שמונה ונפגעו תשעה אנשים נוספים בדרגות פציעה שונות. האירוע התרחש באזור בסיס מפל דוד ובקטע שביל של כחמישים מטרים בגדה הדרומית של הערוץ המוביל למפל (איור 6.1). אתר הפגיעה במטיילים ממוקם במרחק של כ- 750 מטרים מהכניסה לאתר ונמצא באחד מהמקומות המטוילים ביותר בשמורה. נדגיש שהאזור מועד לגלישות מדרון מסוגים שונים ועל כך יעידו גושי הסלע הגדולים המפוזרים לאורך הנחל ומדרונותיו. כמו כן, במפת הרגישות לכשל מדרונות בקני"מ 1:200,000 שהופקה במכון הגיאולוגי (Katz et al., 2008; <https://www.gov.il/he/departments/general/danger-of-sliding-slopes-map>), כל האזור התלול והמצוקי של הנחל מאופיין ברגישות יחסית גבוהה לכשל מדרון (איור 6.2).



איור 6.1: מיקום אזור הפגיעה במטיילים (באדום) על גבי אורתופוטו של אזור נחל דוד.



איור 6.2: אזור נחל דוד מתוך מפת הרגישות הארצית לכשל מדרון (Katz et al., 2008). מצוק הצפית ומצוק הפרסה של מפל דוד מסומנים כאזורים בעלי רגישות יחסית גבוהה לכשל (דרגה 10 – צבע אדום). אזורים בהם הרגישות לכשל נמוכה עד זניחה מסומנים בגוני ירוק. מעל אזור הפגיעה מסומנות שלש מדרגות בהן הרגישות לכשל היא הגבוהה ביותר ולכן כל אחת מהן עשויה להוות מקור לסלעים שנפלו.

צוות מהמכון הגיאולוגי הגיע לשטח שעות ספורות לאחר האירוע ולהלן ממצאיו. במקביל נבדקו נתונים סייסמים ותצלומי לוויין (InSAR) בניסיון לבחון האם מקור נפילת הסלעים הוא באירוע סייסמי או גלישת קרקע נרחבת, בהתאמה. נדגיש כי בדו"ח זה מוצגים ממצאי שדה ראשוניים המבוססים על תצפיות מיום האירוע, המשך המחקר בשטח נמנע מאתנו על אף פניות חוזרות ונשנות מצדנו לגורמים השונים ברשות הטבע והגנים הלאומיים.

6.3.2 ממצאים מסיור השדה

מעדויות שאספנו באזור הפגיעה עולה כי סלע או קבוצת סלעים הידרדרו מגובה רב בגדתו הצפונית של הערוץ ולאחר פגיעה במצוק שגובהו כ- 35 מ' מעל הערוץ, לפחות חלק מהסלעים נתרו לבסיס הגדה הדרומית שם זוהו מספר פגיעות ושברי סלע רבים (איור 6.3). מבדיקה ראשונית של שברי הסלע שהיו פזורים באתר עולה כי הסלע שנפל הוא סלע קשה מגיל קרטיקון, צבעו אפור, נראים בו נקבובים רבים שגודלם עד כמילימטר אחד, הסלע תסס מעט בחומצה ולכן על פי הגדרת שדה נקבע כי הסלע הוא דולומיט-גירי.



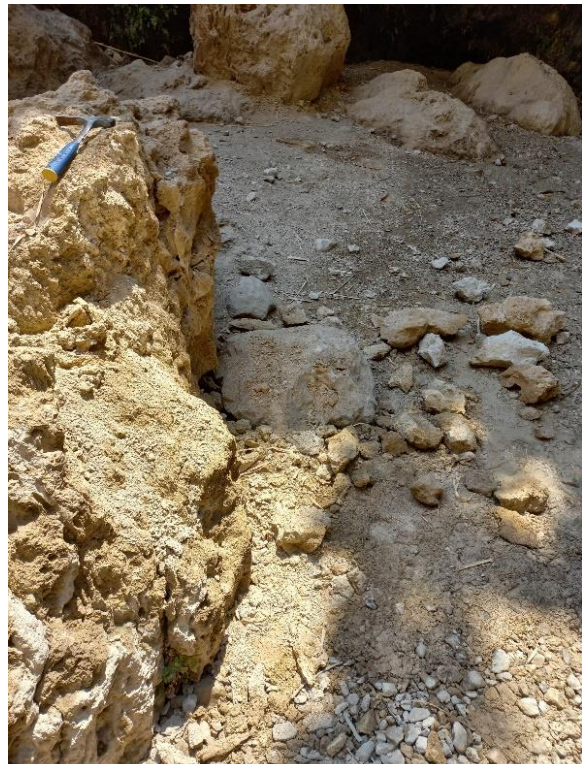
איור 6.3: סימון אזור הפגיעה העיקרי באירוע נפילת הסלעים בבסיס מפל דוד (באדום), כמו כן מסומן קטע השביל שלאורכו נמצאו שברי סלע טריים, תוצרי התפרקות הסלעים הנופלים (אדום מקווקו). הסלעים שנפלו דילגו במורד גדתו הצפונית של הנחל, כשבדרכם הם פוגעים מספר פעמים בבולדרים גדולים ובדרגשי המצוק (סימוני נקודות הפגיעה בצבע כתום).

אזור הפגיעה של שברי הסלע מתמשך לאורך כ- 50 מ' מבסיס מפל דוד ולאורך שביל המטיילים בגדתו הדרומית של הנחל (איור 6.3). בשלש נקודות לאורך תוואי זה, זיהינו כי הסלעים שנפלו פגעו בגושי סלע גדולים שהיו פזורים בקרבת השביל טרם האירוע. פגיעות אלו ניכרות בצבע הבהיר ורסק הסלע שנצפה בנקודת הפגיעה, סדקים פתוחים בסלעים הגדולים שנפגעו, וכן המצאות פרגמנטים בגודל של עד חצי מטר של הסלע הפוגע והסלע שנפגע מסביב לאתר הריסוק (איורים 6.4-6.5). זיהינו שבירה טרייה של ענפי עצי האשל הגדלים בערוץ, בגובה של 2-3 מ' מהקרקע המעידים על מסלול תעופת הסלעים לפני הפגיעה בגדת הנחל (איור 6.6). על הקרקע נמצאו ענפי אשל שבורים עליהם נחתו שברי סלע טריים (איור 6.7).

כשלושים וחמישה מטרים מעל הערוץ, בגדתו הצפונית, נצפו בעת הסיור וכן לאחר התבוננות בצילומי רחפן (באדיבות יחידת החילוץ עין גדי), מספר נקודות פגיעה של הסלעים שהידרדרו (איור 6.8). אזורים אלו מאופיינים בצבע בהיר הנובע מריסוק הסלע וכן מאבק שהורחף בזמן הפגיעה ושקע לאחר מכן. מהתצפיות הראשוניות עולה כי נקודות פגיעה ברורות זוהו עד לגובה של כ- 70 מ' מעל הערוץ, כלומר, ככל הנראה הסלעים התגלגלו מגובה רב יותר.



איור 6.5: בולדר המשולב במדרגות השביל אשר נשבר לאחר פגיעת אחד מסלעי המפולת.



איור 6.4: בולדר טרוונטין באזור השביל אשר נשבר לאחר פגיעת אחד מסלעי המפולת.



איור 6.7: שבירי סלע טריים המכסים ענפי אשל שבורים.



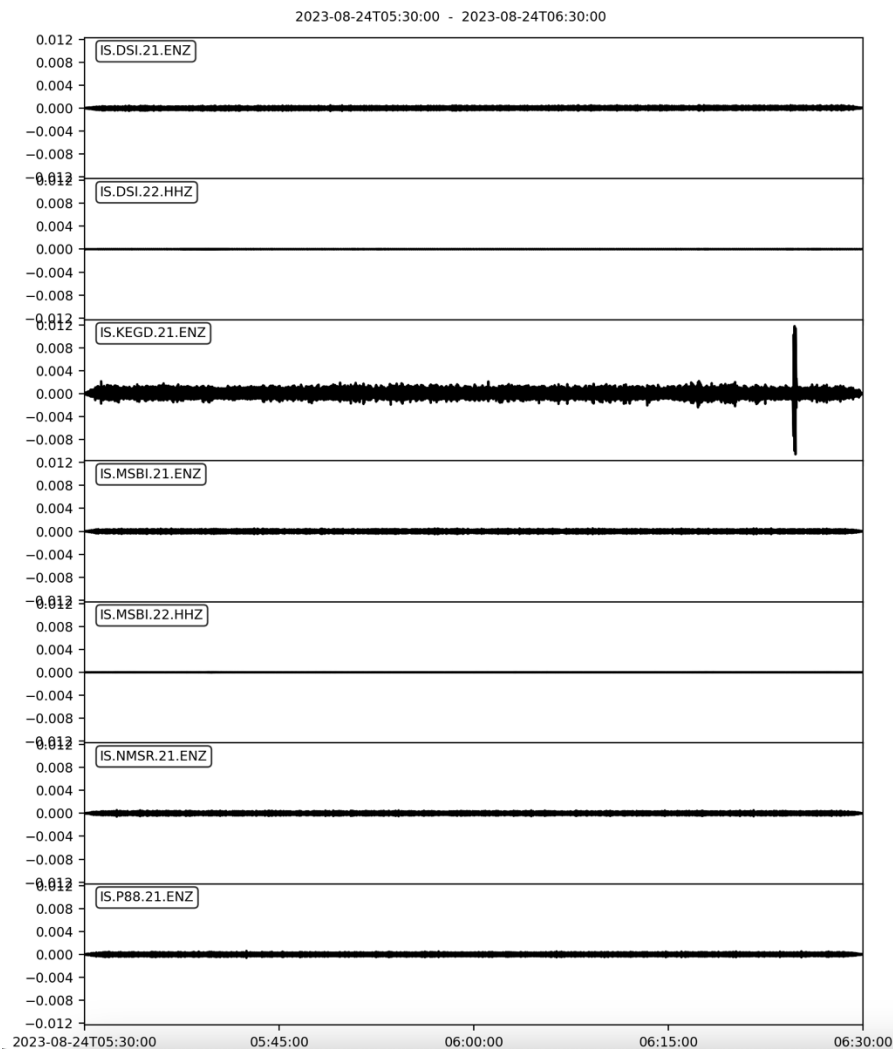
איור 6.6: שבירה של ענפי עצי האשל, ככל הנראה כתוצאה ממעופם של סלעים ממצוק בגדה הצפונית לשביל בגדתו הדרומית של הנחל.

איור 6.8: מסלול נפילת הסלעים בגדה הצפונית של הנחל כפי שתועד באמצעות תצלומי רחפן מיום האירוע (באדיבות אלון שחל, יחידת חילוץ עין גדי). נקודות הפגיעה של הסלעים הנופלים מסומנות במורד המדרון (חצים צהובים), מהאזור הגבוה (1) לנמוך (5). נקודה 4, משותפת לשני הצילומים, ובה תועדה פגיעה בחלק העליון של בולדר גדול השעון על המדרון. (א) צילום רחפן כלפי מטה. בפינה השמאלית עליונה של הצילום נצפה האזור הגבוה בתמונה, בעוד שהחלק הנמוך ביותר נראה בפינה הימנית תחתונה. אזורי הפגיעה מרוסקים ונראים בהירים ביחס לסביבתם. (ב) תצלום צד של חלק ממסלול הנפילה. בצילום ניתן לראות את האזור הנמוך ביותר במתלול הגדה הצפונית בו נראו סימני פגיעה (5), ממנו ככל הנראה נתרו הסלעים והתפזרו לאורך אפיק הנחל.



6.3.3 ממצאים מנתונים סייסמולוגיים

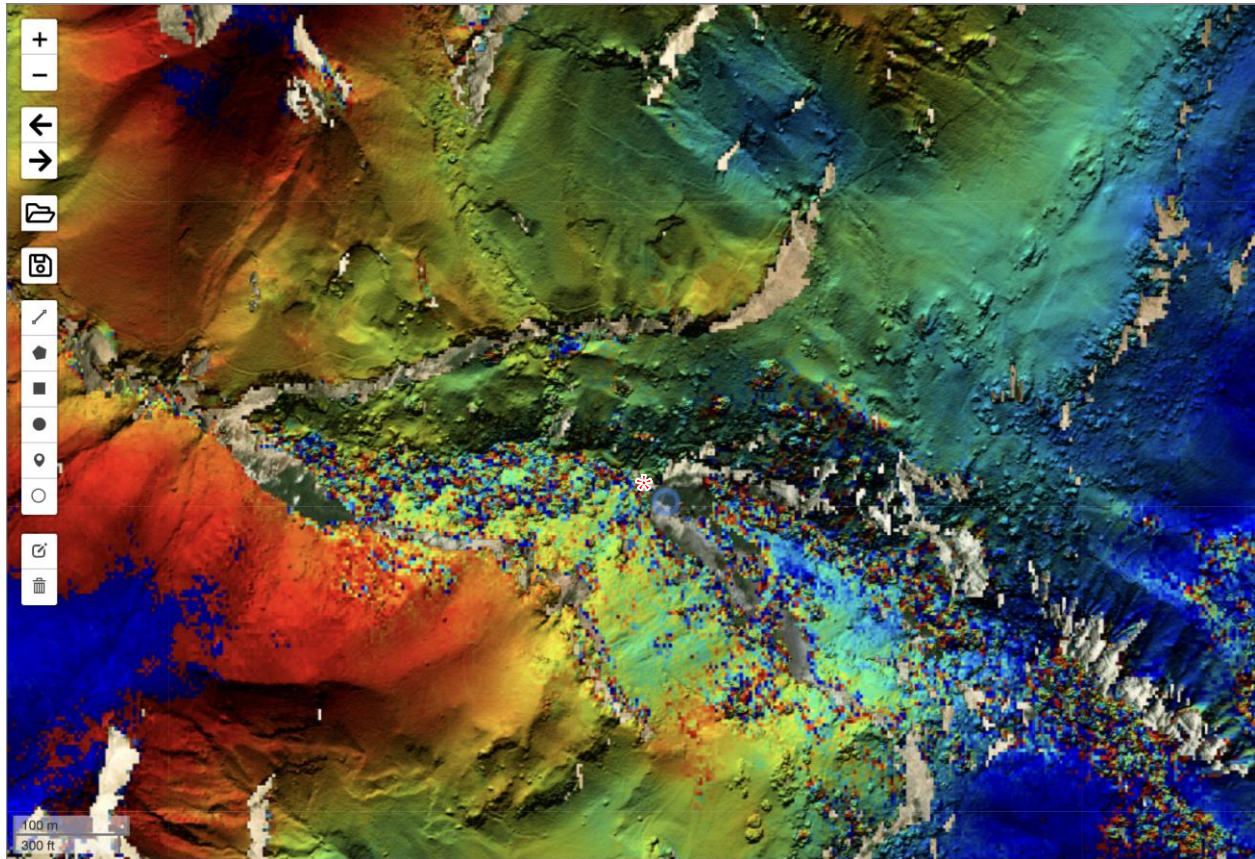
נתונים סייסמולוגיים הנאספים באופן רציף מתחנות באזור, נבדקו עבור חלון זמן של כשעה לפני וכשעה אחרי זמן האירוע המשוער (08:00 – 10:00). התחנות כוללות מדי תאוצה ובחלקן מדי מהירות. לא נמצאה עדות לאירוע סייסמי מקומי שגרם לתאוצות משמעותיות באזור בזמן האירוע המדווח 09:00 (איור 6.9). אירוע מרוחק במגניטודה 4.8 על פי המכון הסייסמולוגי הטורקי, התרחש בטורקיה ומועד הגעת הגלים הסייסמיים לאזור הוא 08:30. תאוצות הגלים שנמדדו בזמן זה בתחנות הרשת הסייסמית של ישראל זניחות באזור האירוע.



איור 6.9: ימין: מפת מיקום התחנות. כוכב אדום מציין את מיקום האירוע; שמאל: סייסמוגרמות מומרות לערכים של תאוצה (מטר לשנייה בריבוע). חלון הזמן המוצג הוא כחצי שעה לפני וחצי שעה אחרי זמן האירוע המשוער (08:30 – 09:30). הזמנים מצויינים בזמן גרינץ' (הפרש של 3 שעות). שמות התחנות המסתיימות ב- ENZ מציינות מדי תאוצה. שמות התחנות המסתיימות ב- HHZ מציינות מדי מהירות. ניתן לראות כי תחנת עין-גדי (IS.KEGD) רועשת ביחס לתחנות אחרות בסביבה (רעש סביבתי המעיד על איכות מדידה נמוכה). לא נמצאה עדות לאירוע סייסמי מקומי העשוי לגרום לתאוצות מקומיות גבוהות המסוגלות לגרום לתזוזות סלעים.

6.3.4 ממצאים מנתוני לוויין (INSAR)

נתוני הלוויין (דוגמה באיור 6.10) מאפשרים זיהוי תזוזות נרחבות באזורים בהם אין שינויים מקומיים חדים. הנתונים ברזולוציה של 3×3 מטר לפיקסל. ניתוח ראשוני של הנתונים מזמנים שונים באזור אינו מצביע על גלישה רחבת היקף מצפון או מדרום לנחל דוד. יחד עם זאת, חשוב להדגיש כי לא בוצע חישוב ייעודי של ניתוח סדרת זמן ועל כן לא נשללת אפשרות לגלישה איטית, נרחבת או מצומצמת. כמו כן, השיטה אינה מסוגלת למדוד תזוזות ברמת הפיקסלים הבודדים. פרטים נוספים לגבי עיבוד נתוני InSAR ניתן למצוא ב- Nof et al., 2019.



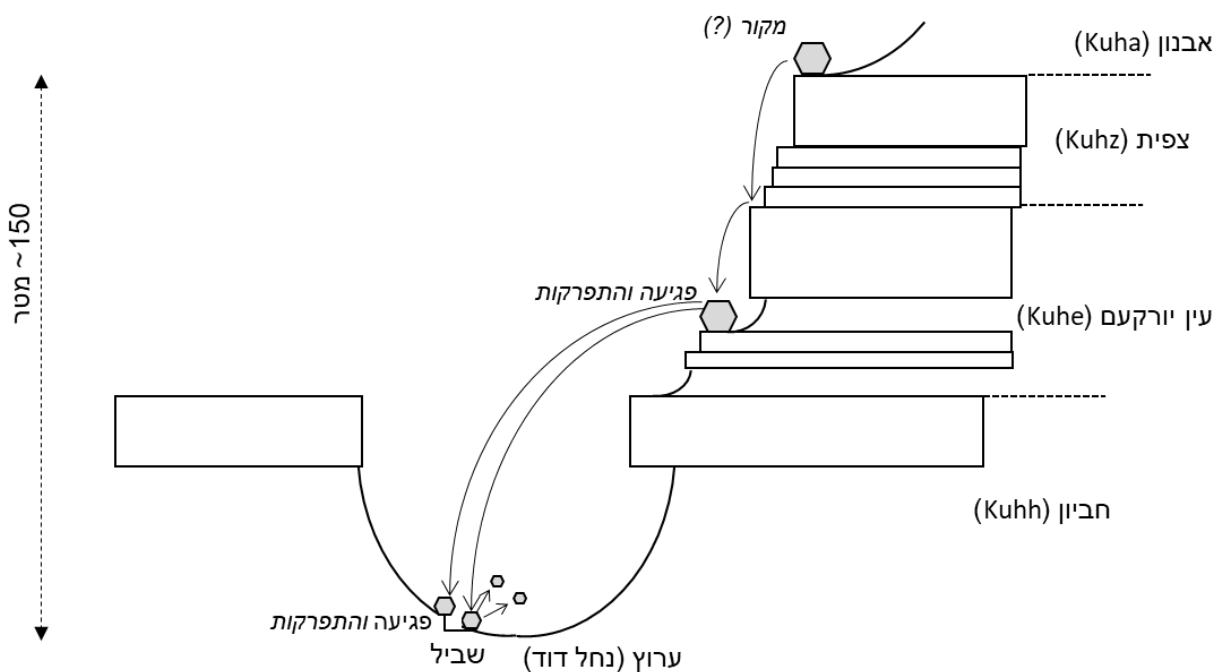
איור 6.10: דוגמה של אינטרפרוגרמה של עיבוד InSAR בין התאריכים 13-24 באוגוסט 2023. תמונות הלוויין נלקחו 11 יום לפני ובחצות לאחר האירוע. מחזור צבעים (כחול-ירוק-צהוב-כתום-אדום) מראה על תזוזה יחסית של 1.6 ס"מ בכיוון הסתכלות הלוויין. כוכב אדום מראה את מיקום האירוע. לא ניתן להבחין בדגם תזוזות משמעותי מצפון ומדרום לאירוע.

6.3.5 סיכום

נפילת סלעים היא תופעה טבעית המתרחשת באתרים בהם חשופים סלעים קשים במדרון תלול. התופעה מוכרת ואף נחקרה על ידי חוקרי המכון הגיאולוגי באזורים רבים בשטח מדינת ישראל, למשל: אזור קריית שמונה (Kanari et al., 2019), מתלול צורים (Siman-Tov et al., 2017), הגלבוע (Levi, 2014), הרי יהודה (Katz et al., 2011) ועוד.

לאור הממצאים הראשוניים בשטח ומצילומי הרחפן, להלן סיכום ביניים של אירוע נפילת הסלעים בנחל דוד המלווה גם בחתך סכמטי לרוחב הקניון (איור 6.11). אנו משערים שסלע או מספר סלעי דולומיט קשים נתקו ממצוק הנמצא בגובה של כמה עשרות מטרים מעל ערוץ הנחל בגדה הצפונית (מהדרגשים התלולים של בסיס תצורת עין ירקעם או חלקה העליון של תצורת חביון, או לחילופין ממקור גבוה יותר כמו מצוק תצורת צפית). סלעים אלו הידרדרו מטה במורד, תוך דילוגים (פגיעה חוזרת במדרון וניתור מעלה), כפי שמסתמן ממספר פגיעות שזוהו לאורך מסלולם בגדה הצפונית. במהלך פגיעתם בסלעים קשים, הם נשברו ככל הנראה למספר חלקים שהמשיכו את מעופם מטה. ככל הנראה, באחת הפגיעות הללו בגובה של כ- 35 מטרים מעל הערוץ, חלקי סלע ניתרו לבסיס הגדה הדרומית לאורכה עובר שביל המטיילים. ניתור כזה לרוחב הערוץ מחייב הגעה של הסלע לנקודת הניתור במהירות גבוהה, כפי הנראה בקפיצה ולא בגלגול על המדרון. במעופם לרוחב הערוץ שברו הסלעים מספר ענפי אשל. בנוסף, סלעים שנפלו ופגעו בסלעים קשים שהיו במקום קודם לכן, גרמו לשבירה נוספת ופיזור רסיסי סלע. ככל הנראה, הפגיעות במטיילים היו משברי הסלע שעפו לכל עבר על פני מרחק של כחמישים מטר מבסיס המפל.

בשלב זה המיקום המדויק של מקור הסלעים שהיידדרו אינו ידוע וכן הסיבה להיידדרותם. מדובר בבוקרו של יום קיץ חם ולכן לא מדובר במפולת כתוצאה של אירוע גשם. לאחר בדיקה של האגף לסיסמולוגיה, דווח כי לא ידוע על רעידת אדמה שהתרחשה באזור במועד זה. בניתוח הדמאות InSAR (מלפני ולאחר האירוע) לא ניתן לזהות את מקור המפולת. עבודת שדה נוספת נדרשת על מנת לדייק את תוצאות בחינת האירוע הנוכחי ועל מנת לאפשר הבנה טובה יותר של תופעת נפילת הסלעים במדבר יהודה בכללותה.



הגזמה אנכית ~2:1

איור 6.11: חתך סכמטי של המדרון באזור נפילת הסלעים בנחל דוד. מפל דוד ודרגשי הסלע בסביבתו בנויים מסלעי תצורת חביון שעליהם נצפו מספר פגיעות מהסלעים שהידדרו. מקור אפשרי לגושי הסלע שנפלו הוא מצוק שבנוי מסלעי תצורת צפית ומצוי בגובה של כ- 150 מ' מעל אפיק הנחל.

6.4 הקמת מערך לאיסוף נתונים כחלק ממחקר רב שנתי בנושא השפעת סופות גשם על יציבות המדרון

6.4.1 אזור המחקר ושיטות עבודה

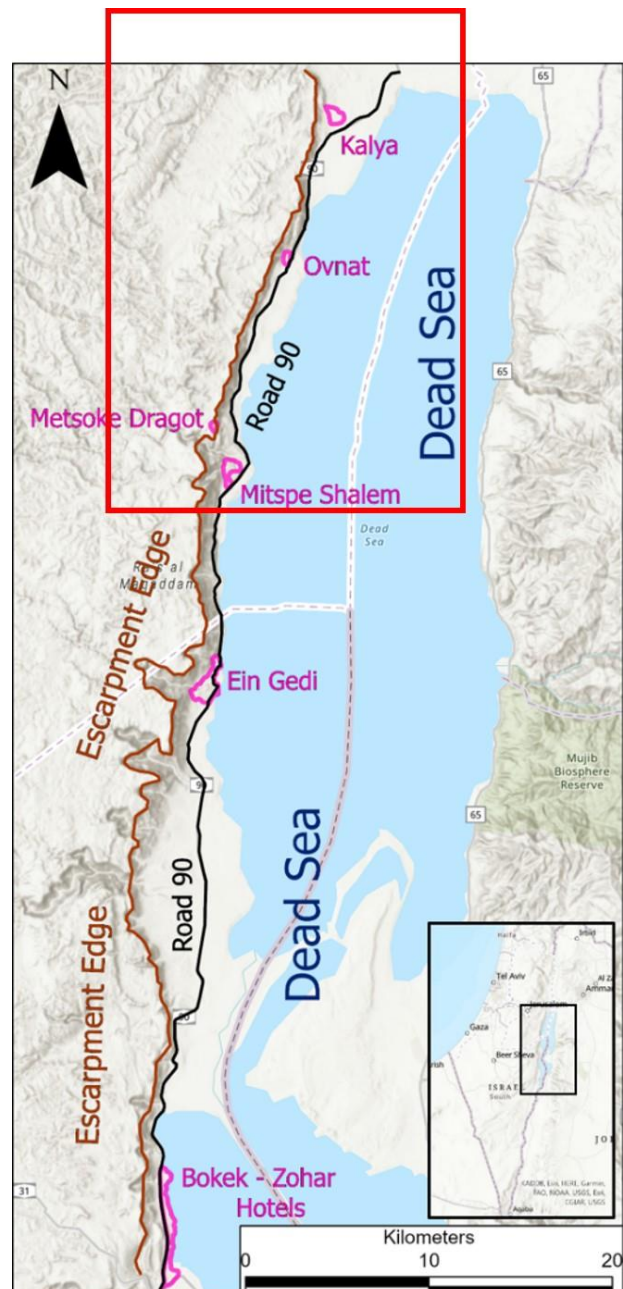
המחקר נערך לאורך מצוק ההעתקים, שוליו המערביים של אגן ים המלח וחלקו המזרחי של מדבר יהודה, במקטע שבין נחל אוג בצפון לנחל זוהר בדרום (איור 6.12). באזור זה, המדרונות תלולים עד מצוקיים ובנויים בעיקר מסלעים קרבונטיים (גיר, דולומיט וחואר) של חבורת יהודה. מאז תחילת הפרויקט בשנת 2020, נערך מידי שנה סקר מוטס אשר מתעד באמצעות לייזר (LiDAR) את אזור מצוק ההעתקים ובמסגרתו מופק מודל טופוגרפי ברזולוציה גבוהה. האזור תועד ברובו גם בשנים שקדמו לתחילת הפרויקט, בכל שנה שניה בלבד בין 2013 ל-2019. באמצעות השוואה בין מודלים טופוגרפיים עוקבים, ניתן לזהות שינויים במדרונות התלולים שבשטח המחקר הנובעים מאי יציבות המדרון (Williams, 2012; Morino et al., 2019). בשיטה זו, זיהינו כי במהלך השנים 2013-2019 אירעו במקטע שבין נחל חבר לנחל אוג למעלה מ-50 גלישות מדרון מסוג debris flows (DFs) ועוד שני אירועים שסווגו כמפולות סלעים (Siman-Tov and Marra, 2021, 2023). המשך ניתור גלישות המדרון לאורך מצוק ההעתקים בשיטה זו, העלה כי בין השנים 2019-2021 לא זוהו אירועי גלישות מדרון בסדר הגודל שניתן למפות בשיטה זו (Siman-Tov and Vakrat, 2022). נדגיש, כי בשיטה הידנית (הלא אוטומטית) המשמשת אותנו לסריקת השינויים הטבעיים לאורך מצוק ההעתקים, קיימים שני גורמים עיקריים המשפיעים על נפח הגלישה המינימלי שניתן לזהות: (1) רזולוציית המודל, חצי מטר לפיקסל; (2) שטח גלישה מינימלי של למעלה מ-50 מ"ר שניתן לזהות בתהליך הניתור (מספר מוערך שנקבע על בסיס ניסיונו). בעוד שהתנאי הראשון מגביל את האפשרות לזהות של גלישות הקרובות בגודלן או קטנות מרזולוציית המודל, התנאי השני גמיש יותר וניתן לשיפור על ידי שדרוג שיטות הניתור או מיקוד הסריקה בתא שטח מצומצם.

לאור תוצאות המיפוי הראשוני, המחקר התמקד בקשר בין סופות גשם לגלישות מדרון מסוג DFs. Debris flow או בעברית זרימת בליט, היא זרימה של מים וסדימנט מעורבים זה בזה במורד מדרונות (Iverson, 1997; Takahashi, 2014). על אף הדמיון ביניהם, DFs מובדלים משיטפונות בגלל כמות הסדימנט הרבה במים (למעלה מ-50%) ובכך שהחומר מתנהג כפאזת זורם אחת (Ancey, 2013). DFs נחשבים כסוג של גלישת מדרון (Landslide) ומאופיינים בכך שלרוב הם נוצרים לאורך ערוצים המנקזים מדרונות תלולים ובכך שהזרימות חוזרות על עצמן באותו ערוץ, כך שעם הזמן נוצרת מניפה – DF fan (Varnes, 1978; Hung et al., 2014). ידועים כאחד מגורמי הסכנה המשמעותיים ביותר באזורים הרריים ועשויים לגרום נזק כבד לנפש ולרכוש. באזור מצוק ההעתקים נערכו בעבר מספר מחקרים העוסקים בהיבטים אקלימיים וגיאומורפולוגיים של DFs (Ben David-Novak, 1998; Enzel, 2001; Ben David-Novak et al., 2004; Ahlborn et al., 2018), הפרויקט הנוכחי מתבסס על תוצאותיהם של מחקרים אלו ועל נתונים חדשים שנאספו בעשור האחרון.

מאחר ולהבנתנו הגשם הינו הגורם המרכזי בהתפתחות DFs באזור המחקר, בפרויקט זה ניתן דגש על מחקר אופי הגשם שיוצר את האירועים. באמצעות הנתונים שהיו קיימים ברשותנו בזמן תחילת הפרויקט, מודלים טופוגרפיים מהשנים 2013-2019, נתוני מכ"ם גשם ומדידות מהשירות המטאורולוגי, הצבענו על קשר אפשרי בין אירועי גשם משמעותיים באזור המצוק לבין ה-DFs שמופו. כמו כן הצענו כי גשם מקדים במהלך הסופה עשוי להוות תנאי קריטי ליצירתם של אירועים נדירים אלו (Siman-Tov and Marra, 2021, 2023). עם זאת, חשוב לציין כי קיימת אי וודאות לגבי מסקנות המחקר משני טעמים מרכזיים: (1) מהמידע שהיה קיים ברשותנו לא ניתן היה לקבוע באופן חד משמעי את מועד התרחשותם של ה-DFs ולכן לא ניתן היה לקבוע בוודאות איזה

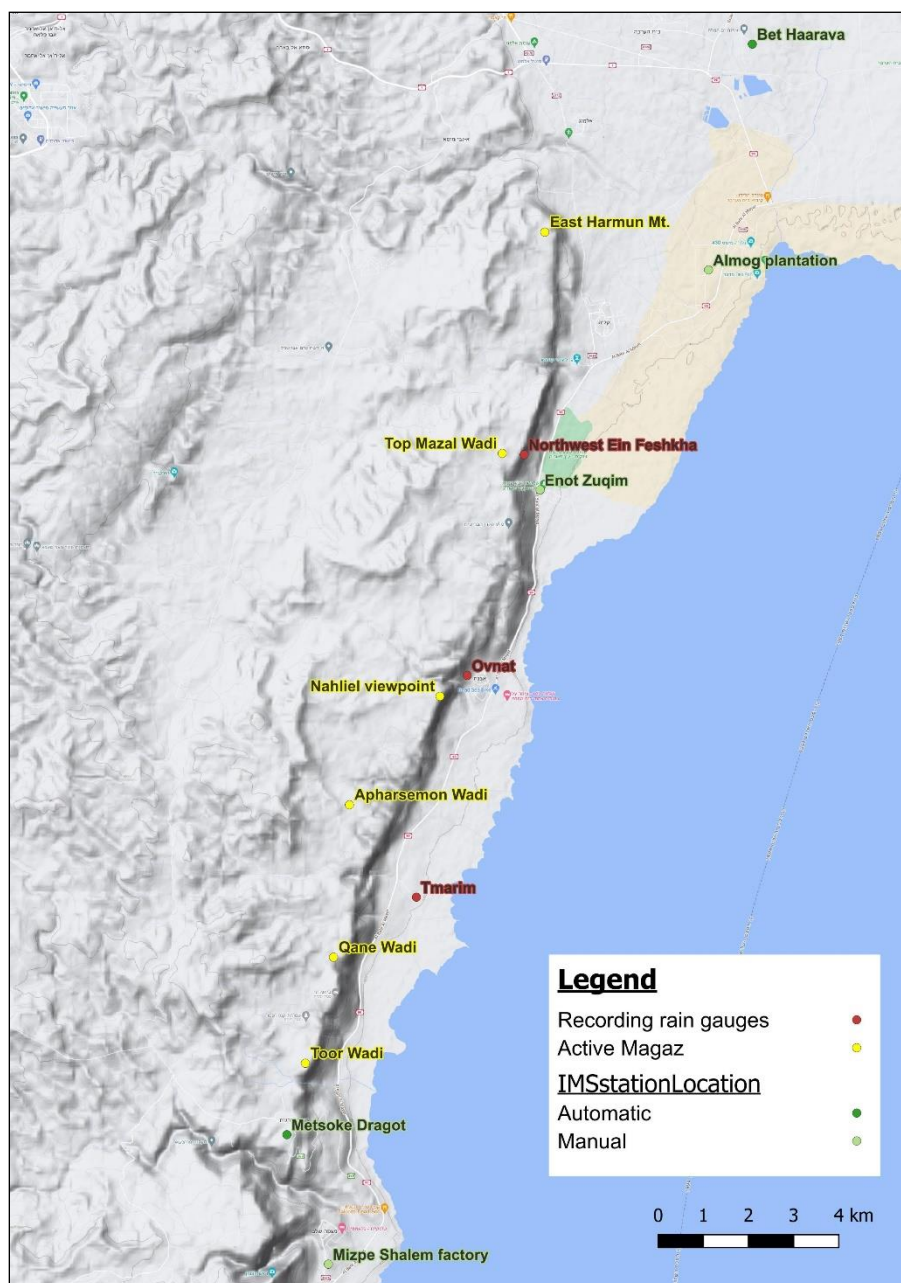
אירוע גשם יצר את הזרימות. (2) המידע העיקרי לגבי אופי הגשם הופק מנתוני המכ"ם. על מנת לדייק את הנתונים יש להשתמש במדי גשם רבים, שלא היו קיימים בשטח בתקופה זו. בנוסף, תצפית ישירה על המצוק בעת אירועי גשם הינה קריטית להבנת התהליכים הנחקרים. לאור זאת, החלטנו בשלב השני של הפרויקט לרכוש ולהציב בשטח מצלמות ומדי גשם, זאת בנוסף למעקב רציף אחר אירועי הגשם במצוק באמצעות רשתות חברתיות וקשר שיצרנו עם תושבים המתגוררים ועובדים באזור המחקר. הצבת הצידוד החדש מוגבלת לאזור שבין מצוקי דרגות בדרום לנחל אוג בצפון ונובעת משיקולי עלויות וכוח אדם. ההחלטה להציב את הצידוד במקטע הצפוני של מצוק ההעתקים נובעת בעיקר מההנחה שהסיכוי גדול יותר להתרחשותם של אירועים שיטפוניים ובמיוחד DFs באזור זה. בהמשך הדו"ח מתוארים פרטים לגבי הצידוד שהותקן בשטח ומוצגים נתונים ראשוניים שנאספו.

איור 6.12: מפת אזור המחקר. ניתור גלישות מדרון באמצעות מודלים טופוגרפיים ברזולוציה גבוהה נעשה לאורך מצוק ההעתקים בין ראש המצוק במערב (קו חום) לכביש ים המלח במזרח (קו שחור) ובין הנחלים אוג בצפון לזוהר בדרום. התקנת מדי הגשם והמצלמות התמקדה בצפון השטח (מסגרת אדומה מציינת את גבולות המפה המוצגת באיור 6.13).



6.4.2 התקנת מדי הגשם ותוצאות מדידה ראשוניות

טרם עונת הגשמים 2022-2023 הותקנו 11 מדי גשם משני סוגים עיקריים: (1) מדי גשם זעירים (מג"זים); (2) מדי גשם רושמים מסוג tipping bucket. המג"זים הותקנו ממערב לראש מצוק ההעתקים, לאורך דרך העפר המזרחית של רמת המדבר, במקטע שבין נחל אוג למצוקי דרגות. מדי הגשם הרושמים הותקנו מזרחית למצוק. באיור 6.13 מסומנים המיקומים של מדי הגשם הפעילים שהותקנו וכן מדי גשם שנתוניהם מפורסמים על ידי השירות המטאורולוגי (<https://ims.gov.il/he/stations>).



איור 6.13: מפת המיקומים של מדי הגשם. מדי הגשם הזעירים (נקודות צהובות) מוקמו בראש מצוק ההעתקים. מדי גשם אוטומטיים חדשים מוקמו בשלש נקודות בבסיס המצוק (נקודות אדומות): במורד נחל תמר, מעל היישוב אבנת ובמדרון שמצפון מערב לשמורת עין פשחה. מדי גשם נוספים שהתוניהם שלהם מפורסמים באתר השמי"ט מסומנים בנקודות ירוקות.

6.4.3 מדי גשם זעירים

באמצעות מדים אלו ניתן למדוד באופן ידני את סך כל הגשם שירד והצטבר בכלי המדידה בין שתי מדידות עוקבות. המג"זים נמסרו לידי המכון הגיאולוגי מהתחנה לחקר הסחף לצורכי המחקר הנוכחי. המג"זים הותקנו בקרבת ולאורך דרך העפר שממערב למצוק ההעתקים, כשהמרחק ביניהם הוא בין 3 ל- 5 ק"מ. בסך הכל מוקמו 8 מג"זים בתחילת העונה, מתוכם רק שישה שרדו (נקודות צהובות באיור 6.13). כל מג"ז מורכב מצינור ברזל באורך של מטר אחד, בתוכו מונחת מבחנה עם שנתות, כשמלמעלה ראש המד מוברג אל צינור הברזל (איור 6.14). צינורות הברזל הונחו ופולסו בתוך בור שקדחנו בקרקע באמצעות מקדח גלעין ידני, וקובעו באמצעות תערובת בטון. גובה פתח המדים מהקרקע נע בין 0.74 ל- 0.8 מ'. המג"זים נדגמו לאחר כל סופת גשם משמעותית באזור המחקר, במטרה למדוד את סך הגשם שירד בסופה מסוימת, נתון זה עשוי לתרום לכיול נתוני מכ"ם הגשם. בכל דיגום הוצאנו את המבחנה, כמות הגשם שהצטברה נרשמה, רוקנו את המים, הוספנו מעט שמן שמונע את אידוי המים שהצטברו מהמד, והחזרנו את המבחנה למקומה.

בטבלה 6.1 מרוכזות מדידות המג"זים עבור עונת הגשמים 2022-2023. כמויות הגשם שנמדדו תואמות לאלו שנמדדו על ידי השירות המטאורולוגי בתחנות הממוקמות באזור המחקר או בקרבתו (נקודות ירוקות באיור 6.13). באופן כללי ניתן לראות שכמות המשקעים העונתית הולכת וקטנה מצפון לדרום כפי שנמדד בתחנות לאורך ים המלח גם בשנים עברו (<https://ims.gov.il/he/ClimateAtlas>).



איור 6.14: מדי גשם זעירים (מג"זים). (א) המג"ז הצפוני ביותר הוצב ממזרח לג'בל חרמון. ראש המג"ז (חצים כחולים) מוברג אל צינור הברזל, כשפתחו העליון ממוקם כ- 0.8 מ' מעל הקרקע. (ב) צילום מלמעלה של פתח איסוף הגשם במג"ז. (ג) המג"ז במצבו הפתוח בזמן מדידה. אנו מוסיפים שמן על מנת למנוע אידוי מים מהמבחנה. (ד) תמונת מג"ז נוסף שמוקם בראש המצוק באזור נחל קנה.

טבלה 6.1: נתוני גשם שנאספו באמצעות ששת המג"זים שהיו פעילים בעונת הגשמים 2022-2023 (מיקומי התחנות מופיעים באיור 6.13). הקיצור NM (Not Measured) משמעו שבאותו תאריך לא נבדק המד. הקיצור BT (Broken Tube), מתייחס למקרה בודד שבו בעת בדיקת המד נמצאה מבחנה שבורה בצינור הברזל. כלומר, במקרה זה אבדה כמות משמעותית של מים שהצטברה במבחנה בין התאריכים 14/2-16/3/2023, זו גם הסיבה שסך הכמות העונתית בתחנה זו לא ידועה וניתן רק לומר שהיא גדולה מ- 79.5 מ"מ גשם.

Measuring date	East Harmun Mt.	Top Mazal wadi	Nahliel viewpoint	Apharsemon wadi	Qane wadi	Toor wadi
07/11/2022	0	0	1	5	4	0.5
28/11/2022	17	NM	4	3.5	4	2.5
02/01/2023	31	NM	25	20	21	19
11/01/2023	0	37	NM	NM	NM	NM
14/02/2003	26	16	23.5	20	14	15
16/03/2023	12	BT	14	10	10	9.5
23/03/2023	6.5	7.5	9	6	8	10
20/04/2023	18	16	18	17	10	8
05/06/2023	8	3	0	3.5	10	7
Sum of 2022-2023	118.5	>79.5	94.5	85	81	71.5

6.4.4 מדי גשם רושמים

מדי הגשם הרושמים הוצבו בבסיס מצוק ההעתקים, באזורים בהם כמות הנתונים הייתה דלילה באופן יחסי במקטע שבין נחל אוג למצוקי דרגות (איורים 6.13 ו- 6.15). שניים מהמדים הם מדי גשם אוטומטיים של חברת Rain Wise אליהם מחוברים אוגרי נתונים מסוג RainLog™ 2.0. מדים אלו הוצבו בתוך מתחמי תחנות תרועה (תחנות המערך הסיסמי של ישראל), האחד מעל היישוב אבנת והשני במורד נחל תמרים (איור 6.15 ב'ג'). מד גשם אוטומטי נוסף מסוג tipping bucket של חברת HyQuest Solutions, הוצב כחלק מתחנת מדידה המשרתת בזמן אמת תמונות ונתוני גשם מאזור המצוק מצפון מערב לעין פשחה (איור 6.15 א'). מדים אלו מאפשרים מדידה של עוצמת הגשם על ידי רישום הנתונים כל דקה וברזולוציה של 0.2 מ"מ.

בעונת הגשמים 2022-2023 הכמות הכוללת של גשם שנמדדה בתחנת תמרים היא 93 מ"מ, באבנת 94 מ"מ ומעל עין פשחה >108 מ"מ גשם (נציין כי התחנה האחרונה הוקמה רק בתאריך ה- 24/11/2022 ולכן חסרים מספר ימי גשם במדידות). כמויות אלו דומות לאלו שנמדדו במג"זים ובתחנות השמ"ט באזור המחקר. עוצמות הגשם המקסימאליות (ביחידות של מ"מ לשעה) שנמדדו בתחנות אלו הן: 137, 76, ו- 36, בהתאמה. ערכים אלו אמנם נתונים ביחידות של מ"מ לשעה אך הם מחושבים על בסיס כמות הגשם שירדה בדקה אחת בלבד (מוכפלת בשישים). עוצמות השיא נמשכו על פי המדידות לא יותר מדקה או שתיים. עבור מיצוע עוצמות הגשם על פני פרק זמן של חמש דקות (הניתן להשוואה עם תמונות המכ"ם), כצפוי מתקבלות עוצמות שיא נמוכות יותר אך עדיין משמעותיות: 104, 43 ו- 22 מ"מ לשעה, בהתאמה.

עוצמות השיא המוזכרות מעלה אירעו בשני אירועי גשם שונים. העוצמות החריגות, נמדדו בתחנת נחל תמרים בסוף עונת הגשמים, בבוקר ה- 29/5/2023. הגשם באירוע זה נקלט בכל המצלמות שהצבנו, אך רק במצלמה הממוקמת מדרום לנחל קדרון נצפתה זרימה קלה במצוק. בשעות אחר הצהריים של אותו יום הגענו לשטח וראינו סחף רב על הכביש בעיקר באזור שבין נחל תמרים ומצוקי דרגות, כנראה עדות לזרימות משמעותיות. בנוסף, על פי השוואת המודלים הטופוגרפיים (כולל זה של קיץ 2023) לא הופיעו משקעי DF חדשים באזור זה,

כלומר, אירוע הגשם יצר אירועים שיטפוניים אך לא DFs. עוצמות הגשם הגבוהות ביותר בתחנות אבנת ועין פשחה נמדדו בתאריך 14/3/2023 בשעות הצהריים. זרימות בערוצי המצוק תועדו במצלמות שהוצבו באזור עין פשחה, אבנת ומדרום לנחל קדרון, אך גם במקרה זה לא זוהו באמצעות המודלים הטופוגרפיים משקעי DF חדשים.



איור 6.15: מדי גשם אוטומטיים. (א) תחנה המשדרת נתוני גשם וצילומים מבסיס מצוק ההעתקים וממוקמת מצפון מערב לשמורת עין פשחה. (ב) מדי גשם (חץ אדום) בתחום תחנת תרועה במורד נחל תמרים. (ג) מדי גשם (חץ אדום) בתחום תחנת תרועה שמעל היישוב אבנת. (ד) הגדלה של מדי הגשם המצולם ב- ג', בראשו דוקרנים להרחקת ציפורים.

6.4.5 התקנת מצלמות

חמש מצלמות מוקמו באזור המחקר, כולן מכוונות למצב של סרטון בהילוך מהיר (Time Lapse), כשמטעמי חיסכון באנרגיה בחרנו שתמונה תצולם בכל שתי דקות. ארבע מהמצלמות הן מסוג BCC2000 by Brinno (איור 6.16), מצלמה נוספת נרכשה כחלק מהמערכת המשדרת שהורכבה על ידי חברת ימה פתרונות הידרומטריים (איור 6.15 א'). ארבעת המצלמות מסוג Brinno מוקמו בעונת 2022-2023 בבסיס המצוק (מדרום לצפון): בדרך העולה למצוקי דרגות, בבסיס ערוץ קטן שמנקז את המצוק מדרום לנחל קדרון, ביישוב אבנת (איור 6.16), ובמצוק שמצפון מערב לשמורת עין פשחה. למצלמות אלו (בשונה מהמצלמה בתחנה המשדרת) אין יכולת צילום בשעות החשיכה ולכן לא ניתן לקבוע אם היו זרימות בערוצים בשעות הלילה.

במהלך עונת הגשמים החולפת, המצלמות תיעדו מספר פעמים זרימות בערוצים המנקזים את המצוק. הזרימות צולמו במהלך ארבע מתוך כעשר סופות גשם שפקדו את אזור המחקר. מטרת הצבת המצלמות בשטח היא לזהות זרימות שיטפוניות ושינויים במיקום של הסדימנט המדרוני בערוצים המנקזים את המצוק. צילומים אלו, הם הדרך הטובה ביותר להצביע על הקשר (בזמן ובמרחב) בין אירועי הגשם המתועדים באמצעות המכ"ם ומדי הגשם לבין הזרימות בערוצים. המשך איסוף הנתונים באזור המחקר יאפשר לקשור בין מאפייני הגשם להתרחשותם של אירועי DFs ושיטפונות באזורים מדבריים.



איור 6.16 : מצלמה לתיעוד המצוק שממערב ליישוב אבנת. (א+ב) המצלמה מוקמה על עמוד המחובר לקרוואן ביישוב אבנת, ומכוונת מערבה לצילום המצוק והמדרון התלול שמעל היישוב. (ג) צילום של זרימה בערוצים (חצים כחולים) מיד לאחר אירוע גשם בתאריך 26/12/2022. המקטע המצולם של המתלול תחום בין הגדה הדרומית של נחל קדרון (משמאל) לגדה הצפונית של נחל מזין (מימין). בערוץ, שראשו מסומן בחץ סגול ומהווה כמקור ל- DFs קדומים בטאלוס שמעל היישוב אבנת, לא נצפתה זרימת מים במהלך עונת הגשמים האחרונה.

- Ahlborn, M., Armon, M., Ben Dor, Y., Neugebauer, I., Schwab, M.J., Tjallingii, R., Shoqair, J.H., Morin, E., Enzel, Y., and Brauer, A., 2018, Increased frequency of torrential rainstorms during a regional late Holocene eastern Mediterranean drought: Quaternary Research (United States), v. 89, p. 425–431, doi:10.1017/qua.2018.9.
- Ancey, C., 2013, Debris Flows, in *Environmental Geomechanics*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 1–37, doi:<https://doi.org/10.1002/9781118619834.ch1>.
- Ben David-Novak, H., 1998, Modern and Holocene debris flows along the western escarpment of the Dead-Sea (in Hebrew): The Hebrew University of Jerusalem, 129 p.
- Ben David-Novak, H., Morin, E., and Enzel, Y., 2004, Modern extreme storms and the rainfall thresholds for initiating debris flow on the hyperarid western escarpment of the Dead Sea, Israel: *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 116, p. 718–728, doi:10.1130/B25403.2.
- Enzel, Y., 2001, Holocene debris flows along the western escarpment of the Dead Sea basin: Israel Ministry of Infrastructure, Earth Sciences Administration Report ES-53-2001 (in Hebrew):.
- Hungr, O., Leroueil, S., and Picarelli, L., 2014, The Varnes classification of landslide types, an update: *Landslides*, v. 11, p. 167–194, doi:10.1007/s10346-013-0436-y.
- Iverson, R.M., 1997, The physics of debris flows: *Reviews of Geophysics*, v. 35, p. 245–296, doi:10.1029/97RG00426.
- Kanari, M., Katz, O., Weinberger, R., Porat, N., and Marco, S., 2019, Evaluating earthquake-induced rockfall hazard near the Dead Sea Transform: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 19, p. 889–906, doi:10.5194/nhess-19-889-2019.
- Katz, O., Hecht, H., and Almog, E., 2008, Israeli National landslide hazard map; Central sheet, Scale 1:200000 (in Hebrew), Geological Survey of Israel, Report GSI/08/2008:.
- Katz, O., Reichenbach, P., and Guzzetti, F., 2011, Rock fall hazard along the railway corridor to Jerusalem, Israel, in the Soreq and Refaim valleys: *Natural Hazards*, v. 56, p. 649–665.
- Levi, Y., 2014, Rock fall trajectories on a slope: Rock fall hazard evaluation down the Gilboa fault slope: Hefziba and Beit-alfa (In Hebrew), *Isr. Geol. Surv., Rep. GSI/04/2014*: 95 p.
- Morino, C., Conway, S.J., Balme, M.R., Hillier, J., Jordan, C., Sæmundsson, P., and Argles, T., 2019, Debris-flow release processes investigated through the analysis of multi-temporal LiDAR datasets in north-western Iceland: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 44, p. 144–159, doi:10.1002/esp.4488.

- Nof, R.N., Abelson, M., Raz, E., Magen, Y., Atzori, S., Salvi, S., and Baer, G., 2019, SAR interferometry for sinkhole early warning and susceptibility assessment along the Dead Sea, Israel: *Remote Sensing*, v. 11, p. 1–19, doi:10.3390/rs11010089.
- Siman-Tov, S., Katz, O., and Matmon, A., 2017, Examining the effects of ground motion and rock strength on the size of boulders falling from an overhanging cliff: *Engineering Geology*, v. 220, p. 164–174, doi:10.1016/j.enggeo.2017.02.008.
- Siman-Tov, S., and Marra, F., 2023, Antecedent rainfall as a critical factor for the triggering of debris flows in arid regions: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 23, p. 1079–1093, doi:10.5194/nhess-23-1079-2023.
- Siman-Tov, S., and Marra, F., 2021, Examining the hypothesis that antecedent rainfall could be a critical prerequisite for debris-flow triggering in arid regions, the Dead Sea Fault Escarpment, Dead Sea basin (In Hebrew): In: *Infrastructural response of the Dead Sea basin to natural and anthropogenic changes: a multi-annual monitoring and research program, 2018-2028. Summary report for 2021 year*, ed. by E. Shalev. Isr. Geol. Surv., Rep. GSI/19/2021, p. 102–211.
- Siman-Tov, S., and Vakrat, E., 2022, Identification, mapping, and morphometric analysis of debris flows along the Dead Sea Fault Escarpment (In Hebrew): In: *Infrastructural Response of the Dead Sea Basin to Natural and Anthropogenic Changes: A Multi-Annual Monitoring and Research Program, 2018-2028. Summary Report for 2022 Year*, Isr. Geol. Surv., Rep. GSI/16/2022, p. 106–118.
- Takahashi, T., 2014, *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*, 2nd edition: CRC Press, Balkema-proceedings and monographs in engineering, water and earth sciences, 572 p., <https://books.google.co.il/books?id=rh1DuzNJqHAC>.
- Varnes, D., 1978, Slope movement types and processes: *Transportation Research Board Special Report*, p. 11–33.
- Williams, R.D., 2012, DEMs of Difference: *Geomorphological Techniques*, v. 2, p. 1–17.

7. מיפוי יחידות סלע צעירות שנחשפות כתוצאה מנסיגת ים המלח בעשרות השנים האחרונות

שגיא, א.¹, בן משה, ל.¹, לנסקי, נ.^{1,2}

¹ המכון הגיאולוגי

² המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים

7.1 תקציר

בעשרות שנים האחרונות נחשפו באגן ים המלח אזורים רבים שהיו מכוסים במי האגם הנסוג. כיום, שטחים שמופו בעבר בגליונות נווה זהר, עין גדי, מצפה שלם וקליה נחשפים ומחקר רב נערך בהם בהקשר לשקיעות קרקע ובולענים, העתקה פעילה, שקיעת גופי מלח והתגבשותם, גלישות, התפתחות ערוצים וסדימנטציה. בשל הדינאמיות הרבה של האזור ובשל חשיבותו בהיבטים של סיכונים גיאולוגיים וניצול משאבים, בפרט: א. העברת תשתיות (תחבורה, מים חשמל תקשורת), ב. תיירות ג. סביבה, ו- ד. ניצול משאבי טבע, נדרש המשך מיפוי גיאולוגי של אזורים חשופים אלו. בדוח זה מוצגים ניתוח ראשוני של מטרות ועקרונות המיפוי, תוך הצגה של תוצאות ראשוניות והגדרת המשך העבודה. אנו מציעים כאן הגדרה של תצורה חדשה, יחידת המלח הרצנטית העומדת בהגדרה "ברת מיפוי" במיפוי ליתוסטריגרפי. לאיפיון מרחבי של יחידה זו, מבוצעים חתכים סטריגרפים במספר מקומות נבחרים. בנוסף, מנוצלים הגדרת יחידות הסדימנט והמיפוי לניתוח תופעות פני שטח ותופעות מעוות הקרובות לפני בשטח. התוצאות המובאות בדוח זה הינן ראשוניות בלבד ואין לראות בהן תוצר סופי, כיון שהשלמת המיפוי תיערך במהלך שנת 2024.

7.2 רקע

ים המלח הוא אגם היפרסליני עמוק יחסית, שמפלסו יורד מאז שנות החמישים של המאה שעברה, כאשר בעשורים האחרונים קצב ירידת המפלס הממוצע הוא כמטר לשנה. ירידה זו מתרחשת כתוצאה ממאזן מים שלילי שנוצר בשל התערבות חיצונית ממושכת (Lensky et al. 2005), הן בהפחתת הזרימה בירדן ובמקורות הזנה נוספים והן בפעילות מפעלי האשלג הירדניים והישראליים (לנסקי ודנטה 2015). במקביל לירידת המפלס, עלתה המליחות של מי האגם, ומשנת 1983 מושקע בו הליט (Steinhorn, 1983). השילוב של ירידת המפלס והשקעת המלח יוצר מחשופים חדשים של שכבת מלח שהצטברה בעשורים האחרונים (Sirota et al., 2020), מטרת הפרוייקט הנוכחי היא מיפוי ואפיון גיאולוגי של המחשופים החדשים, בעקב של יחידת המלח לאורך כל החוף המערבי של האגן הצפוני של ים המלח כולל מיצרי לינץ' (המרחב שבין האגן הצפוני לדרומי) (איור 7.1).

אגן ים המלח נמצא על גבול פעיל בין לוחות טקטוניים שנוצר מאז המיוקן כחלק מתנועה שמאלית על שני מקטעים מדורגים של העתק ים המלח (Quennell, 1958). השקיעה המתמדת של אגן ים המלח היא ביטוי לרכיב תנועה טקטונית של מתיחה אופקית עיקרית של הקרום בכיוון כללי צפון-דרום ומתיחה משנית בכיוון כללי מזרח-מערב (Garfunkel, 1981; Gabrieli et al., 2023). האגן הוא ייחודי בעולם הן בדינאמיקה הטקטונית המתבטאת בהתפתחותו של אגן יבשתי צר וארוך תוך שקיעה מהירה (Garfunkel and Ben Avraham, 1997;)

(Ten Brink and Florence, 2012) והן בהתפתחות הטופוגרפית שביטויה בשקע היבשתי העמוק ביותר בעולם. כיסוי האגן במים החל ככל הנראה במיוקן העליון כתוצאה ממספר חדירות של מי ים ובמשך כל תקופת הרביעון ועד היום האגן הכיל שרשרת אגמים סגורים שנבדלו בפריסתם המרחבית ובתכונות הכימיות שלהם (Torfstein et al., 2009; Garfunkel, 1997; Bartov et al., 2002; Stein, 2001). ים המלח הוא הביטוי בן זמננו לאגמים אלו וגם הוא עבר שינויים במפלס שהתבטאו בשקיעות של מלחים שונים וביחסים שונים בין שקיעת מלחים ומשקעי גר עילי (Stein et al., 2010; Sirota et al., 2023).

7.3 משקעי הרביעון בשולי האגן

לטופוגרפיה ולהשקעה הרביעונית בשולי אגן תפקיד חשוב בהנעת תהליכים בכלל ובהתפתחות הסדימנטציה באגם פרט. בהקשר לנסיגת האגם הרצנטית, הטופוגרפיה משפיעה בצורה קריטית על המרחב הנחשף וגם על סגנון ההשקעה וההסרה של הסדימנט (Bartov et al., 2007). ממערב לאזור החוף, נמצא מצוק ההעתקים הנחצה על ידי נחלים שחלקם יוצרים מעוקים תלולים. המצוק מורכב ברובו מסלעי חבורת יהודה וחבורת הר הצופים, המועתקים אל מול יחידות סלע צעירות יותר. משקעים אגמיים חוואריים ומשקעי שוליים קלסטיים בעקר מתצורת הלשון מגיל פלייסטוקן עליון נשענים על חלק מהמצוק ומשוכבים בצורה לא רציפה במעוקים ובחלק מהאזור מזרחה להם (Bartov et al., 2002). משקעים אלו הם בדרך כלל מלוכדים חלקית ולכן רגישים לתהליכים ארוזיוניים. מזרחה, מתחת לגובה של 390- מ', חלקים נכבדים באזור מאופיינים במישור בעל נטייה מתונה וברוחב משתנה (0-3 ק"מ) בו נחשפת תצורת צאלים ההולוקנית, עשויה בעיקר מלמינות של סילט, חרסיות ושכבות מלח (Bookman et al., 2006; Bartov et al., 2007; Stein et al., 2011; Enzel et al., 2006). נסיגת הים והמעבר ממשטח בעל שיפוע נמוך מאוד למשטח מדרוני גרם להתחתרות מהירה של חלק מהנחלים בקרבת החוף ולהשפעה מיידית גם על הטופוגרפיה המקומית וגם על מאזן ההשקעה – ארוזיה (Moran et al., 2023). משנת 1983 החלה שקעת הליט באגן שעוביה גדל ככל שמתקדמים בשנים. שכבה זו לא מופתה והיא מהווה ותהווה גוף סדימנט חדש שמוערך כאן שהינו בר מיפוי.



איור 7.1: מפת מיקום של אזור המחקר (תצלום לוויין משנת 2022). בפוליגון אפור – אזור השתרעות השכבות המודרניות, אותן אנו ממפים בעבודה זו.

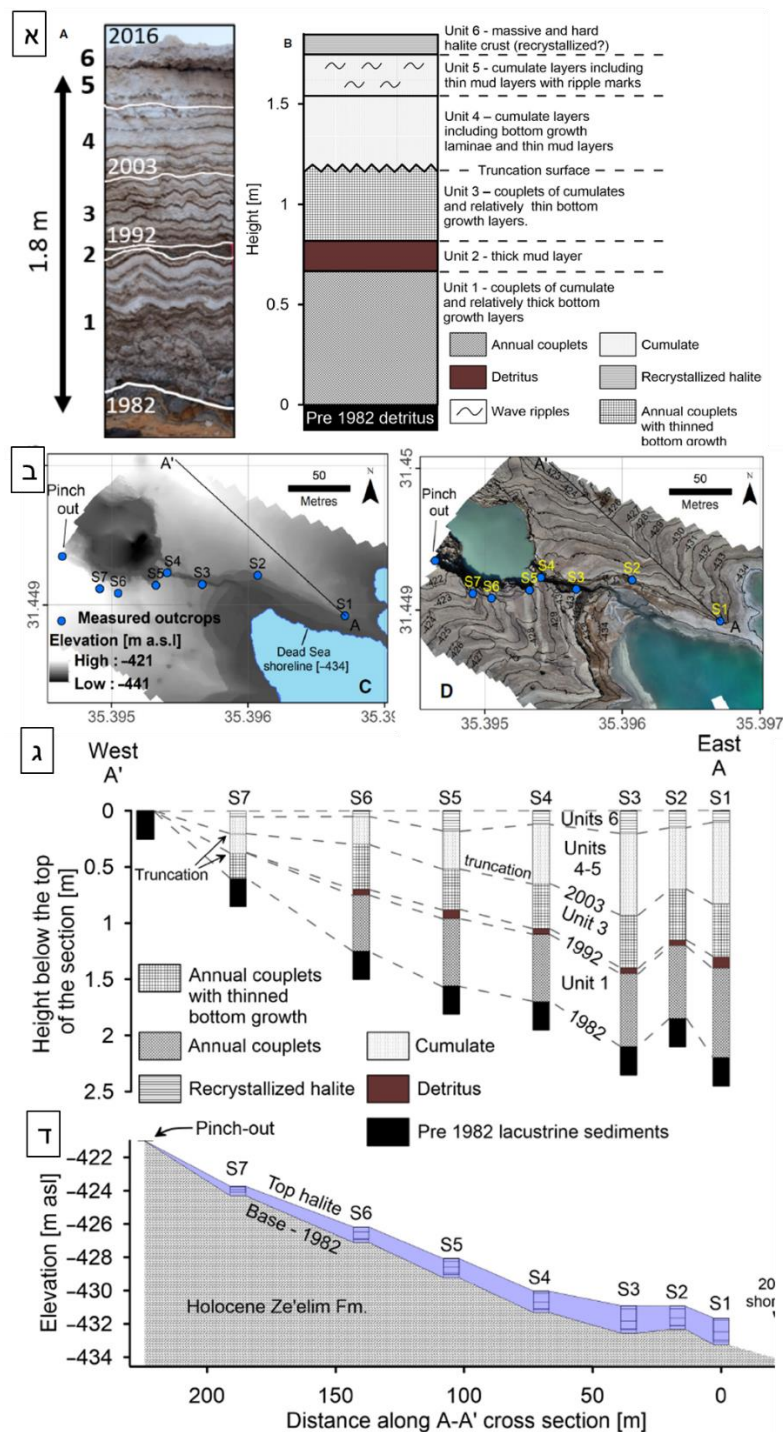
7.4 עקרונות המיפוי

יחידה ברת מיפוי ליתוסטרטיגרפי היא יחידת סלע עם גבולות ליתולוגיים ברורים הניתנים לזיהוי בקנה-מידה מסויים או לרוחב אזור גיאוגרפי מסוים. בישראל, מיפוי 1: 50,000 מגדיר בדרך כלל את הקנה הרלוונטי להגדרת תצורה. למרות זאת, היחידות הרביעוניות באגן ים המלח מוגדרות לעיתים בצורה כרונוסטרטיגרפית, ז"א כאלו שהוגדרו במספר מחקרים על ידי גבולות זמן מדודים ולא דווקא כברות מיפוי ליתולוגי. כך למשל, גבולות תצורת עמורה הפליסטוקנית שכוללת משקעים מהתקופה הקרחונית הלפני אחרונה, אינם מוגדרים היטב באגן. לעומת זאת, תצורת הלשון מגיל פלייסטוקן עליון ותצורת צאלים ההולוקנית הינן ברות מיפוי ליתוסטרטיגרפי, כיון שהשינויים הליתולוגיים בגבולותיהן חדשים. ירידת מפלס ים המלח בעשרות השנים האחרונות מייצרת יחידות סדימנטריות של הסביבה האגמית-חופית המחולקת כאן לארבעה סוגי מחשופים חדשים עקריים:

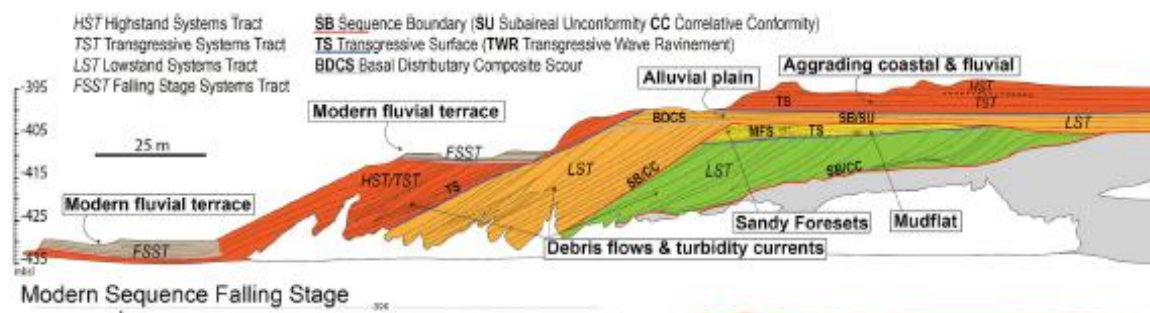
1. יחידת מלח הליט שמושקע מאז שנת 1983 ומוצע כאן לראשונה שתכונה יחידת המלח האנתרופוסנית. המלח מצטבר כשכבות עונתיות שנתיות (varve), היחידה נחלקת לפציאסי קיץ וחורף, כתלות בעומק המים בעת השקעת אותה שכבה (Sirota et al., 2017, 2021). החתכים מתעבים לכיוון מזרח, כשעובי החתך מגיע במקומות למעל ל-3 מטר (איור 7.2). בסיס החתך, כאמור, הוא המעבר בין גג תצורת צאלים, המורכבת מחרסית וסילט למינרי, למלח המודרני, ומתוארך לשנת 3-1982. גג היחידה נהיה יותר צעיר מזרחה, והיחידה ממשיכה להיבנות מתחת למים וכל שנה נחשפת עוד שכבה. בתוך יחידת המלח המודרנית יש שכבות של חומר דטריטי דק, החל מלמינות בתוך וורות המלח, דרך שכבות בעובי עשרות סנטימטר, למשל, באירוע של שנת 2-1991. בקרבה לשפכי נחלים, הרכיבים הדטריטיים הולכים ומתעבים, וגודל הגרגר הולך ונהיה גס (Eyal et al. 2021). המעבר בין יחידת המלח לדלתאות החומר הדטריטי הגס בשפכי הנחלים יתואר בפירוט במיפוי. תוצאות ראשונות מעבודה זו ומעבודות קודמות (Sirota et al., 2021) מצביעות על כך שיחידה זו הינה ברת מיפוי.

2. נחלים ודלתאות בשפכי הנחלים: עם ירידת המפלס, נחלים באגן מתחתרים, והקניונים שהם חותרים הולכים ומתרחבים תוך השארת טרסות נטושות בגדות (Ben Moshe et al 2008, Dente 2017, 2018,). בן משה ולנסקי (2021, 2022, 2023). בטרסות הנחל ובעיקר בשפך הנחל לים המלח – ישנן יחידות של חומר דלתאי, שהצטבר בו-זמנית ליחידת המלח (Moran et al., 2023). מבנה הדלתא של מניפת נחל דרגה, שנבנה במאות השנים האחרונות, כולל הרכיבים שנוצרו בעשרות השנים האחרונות (איור 7.3).

3. בולענים ונחילי בולענים נוצרו וממשיכים להיווצר ולהתפתח כתוצאה מהמסת שכבת מלח הולוקנית בעומק עשרות מטרים (להבדיל מיחידת המלח האנתרופוסנית). הופעת בולענים הינם אחת התופעות הבולטות בעיצוב הדינאמי של הנוף שאירעו כתוצאה מנסיגת האגם והשפעותיה רבות. התופעה נחקרה רבות במכון הגיאולוגי וכאן אנו מצעים להשתמש במיפוי הקיים כשכבה במפה (Abelson, et al., 2003,). יש לציין, שלתופעה משמעות רבה גם בהשפעתה על יחידת המלח האנתרופוסני, למשל, בחלק מהמחשופים צבירי בולענים הם באסוציאציה עם המסה של שכבת המלח.



איור 7.2: יחידת המלח המודרנית, שהצטברה מתחת למים בים המלח, ונחשפה לאחרונה (Sirota et al. 2021). א. חתך עמודי טיפוס, באזור עין גדי. בסיס יחידת המלח במגע בוץ ומעליו מלח, מתוארך לשנת 1982-3. כאן נגדיר 3 פרטים: הפרט הראשון, יחידות 1-2, כשהבסיס הוא בסיס המלח וגם היחידה בג הבוץ של שטפונות 1991-2. הפרט התיכון – יחידה 3, שהג שלה הוא משטח גידוע תת ימי של המלח, מתוארך לשנת 2003. הפרט העליון – ממשטח הגידוע עד גג המלח, שהולך ונבנה. ב. מפה מקומית של חוף עין גדי, עליו מסומנים אתרים בהם נמדדו חתכים עמודיים. ג. חתך מזרח מערב, המדגים את התעבות יחידת המלח מזרחה. החלק המערבי מתדקק ונעלם בגובה -421 מ'.



איור 7.3: מניפה-דלתא של נחל דרגה, בין כביש 90 לחוף הים (מתוך Moran et al 2023). רוב מסת הדלתא היא מגיל הולוקן, והחלק המזרחי והנמוך כולל משקעי נחל וחוף מעשרות השנים האחרונות, בו זמנית לשקיעת שכבת המלח המודרני.

4. הסביבה החופית - אירוזה והשקעה. קו החוף באגם הנסוג הוא סמן כרונולוגי מאוד מדויק. במהלך ירידת מפלס ים המלח נוצרו מדרגות חוף שבעיקרן אירוזיביות (Enzel et al 2022) וכן החומר מדלתאות המלח הולך ומוסע ומתמין לאורך החופים בהשפעת הגלים והזרמים מונעי הרוחות (Eyal et al. 2021, 2023). כרגע נראה שיחידה זו אינה בררת מיפוי ליתוסטריגרפי ומדרגות חוף עיקריות, כגון המדרגה של החורף הגשום של 2003, ימופו בעתיד על גבי גליון גיאומורפולוגי.

7.5 תוצאות

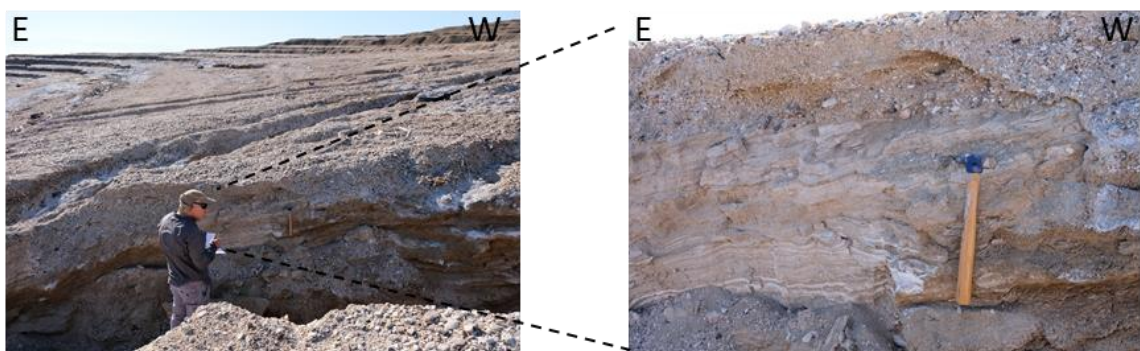
בחלקה הראשון של העבודה הנוכחית נבדק האם ארבעת סוגי המכשופים השונים המייצגים את השטחים שנחשפו מאז נסיגת הים יכולים להיחשב כברי מיפוי. נמצא כי שכבת המלח עונה על הקריטריונים של שכבה ליתוסטריגרפית בררת מיפוי המייצגת את התקופה האנטרופוסנית (Anthropocene) של אגן ים המלח. היחידות האחרות אמנם עומדות בהגדרה הכרונו-סטריגרפית אולם אינן בהכרח ברות מיפוי ליתוסטריגרפי. לכן, בשלב הנוכחי לחלקן (למשל למניפות הסחף הצעירות) אנו מתייחסים כפציאסים ולחלקן אנו מתייחסים כאובייקטים במיפוי (למשל הבולענים).

7.5.1 יחידות הסדימנט באזור נחל תמרים

דרומית לנחל תמרים נחשף מישור מתון מאוד המשתרע ממצוק ההעתקים במערב ועד לקרבת הים במזרח. באזור זה נצפים רכסי חוף וקווי חוף תת-מקבילים על תצורת צאלים הנחשפת. כ-200 מ' מקו החוף הנוכחית הטופוגרפיה הופכת תלולה יותר ומאופיינת במדרגות חוף המבטרות את גג תצורת צאלים (איור 7.3). יחידת המלח האנטרופוסנית שוקעת כאן על המדרון והופכת עבה יותר מזרחה. המלח שוקע בנטיית בהתאם לטופוגרפיה המקורית ולגובה פני המים (draping). החלק המערבי של שכבת המלח מצטמצם ונעלם בגובה 425-מ', בערך, אולם באזורים בהם המלח דק או באזורי בולענים הוא עבר בליה חלקית כתוצאה משיטה ולכן המיפוי אינו יכול להיות להישען במידה מוחלטת על גובה זה (איורים 7.4-7.7).



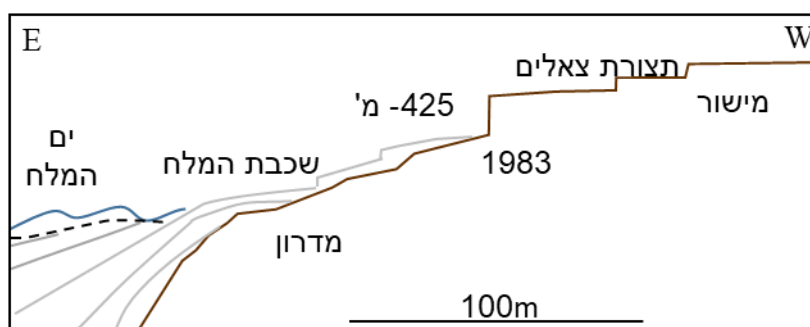
איור 7.4: מדרגות חוף שנתיות שנוצרו כתוצאה מנסיגת האגם דרומית למניפת נחל תמרים.



איור 7.5: מניפת נחל תמרים (תמונה שמאלית) וקצה שכבת המלח הרצנית בתוכה (תמונה מוגדלת בצד ימין).



איור 7.6: יחסי השדה בין תצורת צאלים לתצורת המלח האנטרופוגנית. שמאל: מבט מהים על משקעי המלח מעל למדרגות החוף. חתך של תצורת המלח האנטרופוגנית המצטבעת מזרחה.



איור 7.7: חתך סכמתי אנכי מוגזם של יחסי השדה באזור הדרומי לנחל תמרים. מדרגות החוף של הים הנסוג נוצרות הן על גבי תצורת צאלים והן על גבי יחידת המלח. באיור לא תוארו רכסי החוף.

חתך המלח העבה ביותר באזור זה נמדד מבסיסו בתצורת צאלים. ניתן לחלק את החתך ל- 3 פרטים שונים בעקבות Sirota et al. (2021) כאשר חלקו האמצעי מאופיין בהרכב קלאסטי כתוצאה מחורף 1991-1992.

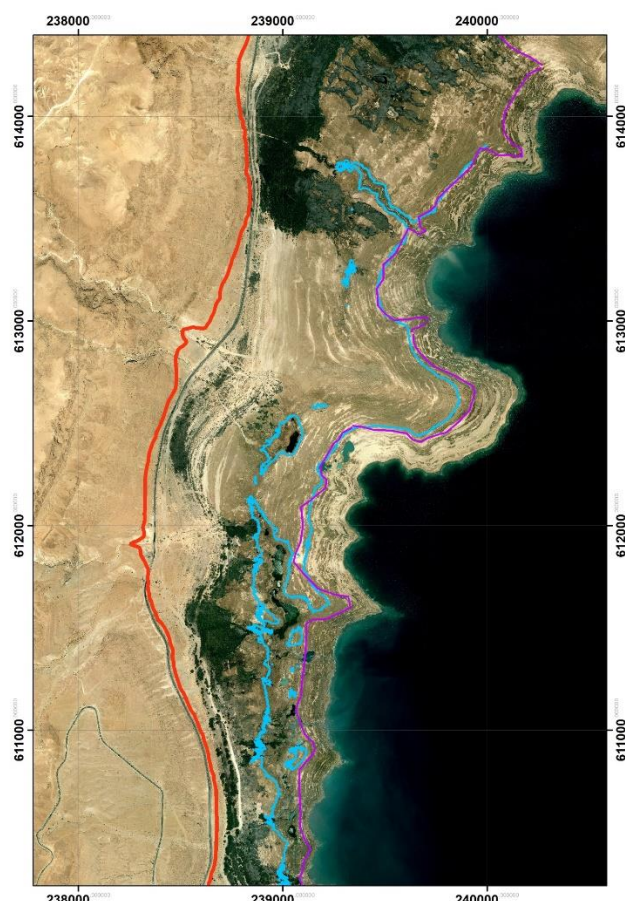


איור 7.8: חלקו העליון של חתך יחידת המלח כקילומטר דרומית לשפך נחל תמרים. היחידה החומה המסומנת ב-I היא היחידה הקלסטית של חורף 1991-2

חתך דומה של תצורת המלח נמדד גם כ- 2 קמ' דרומית לנחל ערוגות. בסיס חתך זה הוא ככל הנראה מספר סמ' מעל גג תצורת צאלים, אם כי לא ברור במחשוף בדיוק כמה. הפרט התחתון בעובי של 80 ס"מ בנוי משכבות מלח קשות בעובי משתנה של מספר סנטימטרים ושכבות בוץ רכות ובדרך כלל דקות יותר. מעל גג הפרט התחתון מופיעה יחידה כהה של בוץ עם מלח גס בעובי של 13 ס"מ. הפרט השלישי בעובי של 60 ס"מ מאופיין שוב בלמינריות של מלח ובוץ אולם הוא פחות גלי.

7.5.2 מיפוי ראשוני

בשלב זה, מופה בצורה פוטו-גיאולוגית הגבול המערבי של יחידת המלח בין נחל תמרים לנחל צאלים על גבי אורתופוטו. המיפוי נעזר במאגר האורתופוטו של ישראל, בהדמיות ליידר של אזור החוף ובתצלומי לוויין. איור 7.7 מציג את הגבול המערבי של יחידת המלח (קו סגול). בנוסף, ציינו את הקו הטופוגרפי של גובה 425- מ' שחופף בחלקו לגבול המערבי של יחידת המלח והקו שמייצג את הגובה הטופוגרפי 390- מ' המייצג את הגבול המערבי של משקעי תצורת צאלים ברוב האגן. ניתן לזהות שמיחידת המלח משתרעת ברציפות על פני מרחב גדול ולכן אנו מכלילים אותה כתצורה שתכנס למיפוי 1: 50,000.



איור 7.9: גבול יחידת המלח באזור סמר-צמת מעלה דרגות (קו סגול) על גבי תמונת אורתופוטו. הקו הכחול מהווה מדידת ליידר של הגובה הטופוגרפי 425- מ' שמהווה את הגבול המערבי של השקעת יחידת המלח, והקו האדום הוא גובה טופוגרפי 390- מ' שמהווה את הגבול המערבי של משקעי תצורת צאלים ברוב האגן

7.5.3 אסוציאציה אפשרית בין מעוותים לגעשי בוצ

מעוותים מוגבלי שכבה או מוגבלי מספר שכבות נפוצים במחשופי משקעי האגמים הפלייסטוקנים וההולוקנים באגן ים המלח. מעוותים אלו התרחשו ככל הנראה קרוב לפני השטח ופורשו כמבטאים הרחפה של גופי סדימנט או זרימה של חלקו העליון כתוצאה מגלישה או הרעדה (e.g. Kagan et al., 2011; Marco et al., 1996; Aslop and Marco, 2012). באזור שבין אגם ים המלח לבריכות מפעלי האשלג הישראליים נצפו מבני דפורמציה מוגבלי שכבה בתעלה (תעלת הים) ולצידם על פני השטח מבני געשי בוצ (Mud volcanos) רדודים בקוטר של עד מאות מטרים,

הנראים מסודרים בצורה קווית בתצלומי אוויר. געשי בוץ, מתוארים בספרות כתופעה נלווה לרעידות אדמה ונשאלת השאלה האם שני מבני הדפורמציה השונים נוצרו באירוע אחד. שלב זה של המחקר נלקחו דוגמאות לתיארוך פחמן 14 ואורניום/תוריום מהשכבה שבג המעוות בתעלה על מנת לדעת את גילו של המעוות ועד כמה הוא צעיר.



איור 7.10: תמונת לוין (למעלה) של מבני בוץ חרוטיים עגולים דרומית לים המלח וצפונית לברכות המפעלים. תמונת מחשוף (למטה) של השכבה מעוותת. גג התעלה באזור זה הוא כמטר מתחת לגג החתך. מיקום המחשוף מסומן בחץ בתמונה העליונה.

7.6 סיכום ותכנון המשך המחקר

הדוח שהוצג מסכם את העבודה שנערכה בשנת 2023 כחלק ממפוי יחידות צעירות שנחשפות עם נסיגת ים המלח. הוגדרו מטרות המיפוי, תוארו יחידות הסדימנט העיקריות הנחשפות באזור והוגדרו שיטות המיפוי. מניתוח התצפיות הראשונות מוערך שהיחידה ברת המיפוי העיקרית היא יחידת המלח האנטרופוסני, כאשר פציאס משני שלה הוא הפציאס הקלאסטי בן זמנה שנוצר במניפות הנחלים ובפתחיהם. מוצע שכבת הבולענים שממופת על ידי קבוצה אחרת במכון תוסף כשכבה למפה. בנוסף ימופו

מבני הבוץ החרוטיים ויבדק הקשר שלהם לשכבת מעוות צעירה. רכסי החוף כרגע אינם בתכניות מיפוי אולם הם מומלצים למיפוי גאומורפולוגי בפרוייקט המשך.

תכנית המיפוי לשנת 2024 היא כדלהלן:

- א. סיום מיפוי פוטו-גיאולוגי של יחידת המלח.
- ב. אימות מיפוי באזורים נבחרים בשדה.
- ג. מיפוי געשי בוץ ויחידות מלח דרומית לים המלח ועד לבריכות המפעלים.
- ד. כתיבת דוח והצעת יחידת המלח האנטרופוסני כתצורה לאגף המיפוי במכון.

7.7 מקורות

לנסקי, נ. ודנטה, א., 2015. הגורמים לירידה המואצת של מפלס ים המלח בעשרות השנים האחרונות. דוח המכון הגאולוגי GSI/16/2015.

Abelson, M., Baer, G., Shtivelman, V., Wachs, D., Raz, E., Crouvi, O., Kurzton, I. and Yechieli, Y., 2003. Collapse-sinkholes and radar interferometry reveal neotectonics concealed within the Dead Sea basin. *Geophysical Research Letters*, 30(10).

Abelson, M.; Yechieli, Y.; Crouvi, O.; Baer, G.; Wachs, D.; Bein, A.; Shtivelman, V. Evolution of the Dead Sea Sinkholes. In *New Frontiers in Dead Sea Paleoenvironmental Research*; Enzel, Y., Agnon, A., Stein, M., Eds.; Geological Society of America: Boulder, CO, USA, 2006; Volume 401, ISBN 9780813724010.

Alsop, G.I. and Marco, S., 2012. A large-scale radial pattern of seismogenic slumping towards the Dead Sea Basin. *Journal of the Geological Society*, 169(1), pp.99-110.

Baer, G., Magen, Y., Nof, R.N., Raz, E., Lyakhovsky, V. and Shalev, E., 2018. InSAR measurements and viscoelastic modeling of sinkhole precursory subsidence: Implications for sinkhole formation, early warning, and sediment properties. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(4), pp.678-693.

Bartov, Y., Enzel, Y., Porat, N. and Stein, M., 2007. Evolution of the Late Pleistocene–Holocene Dead Sea basin from sequence stratigraphy of fan deltas and lake-level reconstruction. *Journal of Sedimentary Research*, 77(9), pp.680-692.

Bartov, Y., Stein, M., Enzel, Y., Agnon, A. and Reches, Z.E., 2002. Lake levels and sequence stratigraphy of Lake Lisan, the late Pleistocene precursor of the Dead Sea. *Quaternary Research*, 57(1), pp.9-21.

Bookman, R., Bartov, Y., Enzel, Y. and Stein, M., 2006. Quaternary lake levels in the Dead Sea basin: two centuries of research.

Dente E., Lensky N.G., Morin E., Grodek T., Sheffer N., Enzel Y. (2017). Geomorphic response of a long channel to a modern, decades-long, continuous base-level lowering: Nahal HaArava, the Dead Sea Temperature seasonality control modern halite layers in the Dead Sea: In situ observations. *J. Geophysical Research - Earth Surface*, 122, <https://doi.org/10.1002/2016JF004081>.

- Dente, E., Lensky, N.G., Morin, E., Enzel, Y. (2021). From Straight to Deeply Incised Meandering Channels: Slope Impact on Sinuosity of Confined Streams. *Earth Surface Processes and Landforms*.
<https://doi.org/10.1002/esp.5085>. *Earth Surface Dynamics* <https://doi.org/10.5194/esurf-2022-59>.
- Enzel, Y., Agnon, A. and Stein, M. (Eds), 2006. New frontiers in Dead Sea paleoenvironmental research. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*, 401, 261.
- Enzel, Y., Bookman (Ken Tor), R., Sharon, D., Gvirtzman, H., Dayan, U., Ziv, B. and Stein, M., 2003. Late Holocene climates of the Near East deduced from Dead Sea level variations and modern regional winter rainfall. *Quatern. Res.*, 60, 263–273.
- Enzel, Y., Mushkin, A., Groisman, A., Calvo, R., Eyal, H., Lensky N.G. (2022). The modern wave-induced staircase morphology of the coastal cliffs along the western Dead Sea. *Geomorphology*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108237>.
- Eyal H., Armon, M., Enzel, Y., Lensky, N.G. (2023)
- Eyal, H., Dente, H., Haviv, I., Enzel, Y., Dunne, T., and Lensky, N.G. (2019). Fluvial incision and coarse gravel redistribution across the modern Dead Sea shelf as a result of base-level fall. *Earth Surface Processes and Landforms*. 44, <https://doi.org/10.1002/esp.4640>.
- Eyal, H., Enzel, Y., Meiburg, E., Vowinckel, B., Lensky, N.G. (2021). How does coastal gravel get sorted under stormy longshore transport? *Geophysical Research Letters*, 48. <https://doi.org/10.1029/2021GL095082>.
- Gabrieli, T., Hatzor, Y.H. and Sagy, A., 2023. Kinematics and geometry of normal faults at the margins of pull-apart basins: An example from the Dead Sea Basin. *Tectonophysics*, p.230156.
- Garfunkel, Z., 1981. Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics. *Tectonophysics* 80, 81–108.
- Garfunkel, Z., Ben-Avraham, Z., 1996. The structure of the Dead Sea basin. *Tectonophysics* 266, 155–176.
- Hall, J.K. & Neev D. 1978. 'The Dead Sea geophysical survey', Geological Survey of Israel Report MG/1/78
- Kagan, E., Stein, M., Agnon, A. and Neumann, F., 2011. Intrabasin paleoearthquake and quiescence correlation of the late Holocene Dead Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B4).
- Lensky N.G., Dvorkin Y., Lyakhovsky V., Gertman I., Gavrieli I. (2005). Water, salt and energy balances of the Dead Sea. *Water Resour. Res.*, 41, <https://doi.org/10.1029/2005WR004084>.
- Marco, S., Stein, M., Agnon, A. and Ron, H., 1996. Long-term earthquake clustering: A 50,000-year paleoseismic record in the Dead Sea Graben. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B3), pp.6179–6191.
- Moran, M.G., Holbrook, J., Lensky, N.G., Ben Moshe, L., Mor, Z., Eyal, H. and Enzel, Y., 2023. Century-scale sequences and density-flow deltas of the late Holocene and modern Dead Sea coast, Israel. *Sedimentology*,

70(6), pp.1945-1980. Quennell, A.M., 1958. The structural and geomorphic evolution of the Dead Sea Rift. Q. J. Geol. Soc. 114, 1–24.

Sirota, I., Armon, M., Ben Dor, Y., Morin, E., Lensky, N.G., Enzel, Y., 2023. A mechanistic approach for interpreting hydroclimate from halite-bearing sediments. *Sedimentology* <https://doi.org/10.1111/sed.13114>.

Sirota, I., Enzel, Y. and Lensky, N.G., 2017. Temperature seasonality control on modern halite layers in the Dead Sea: In situ observations. *GSA Bulletin*, 129(9-10), pp.1181-1194.

Sirota, I., Enzel, Y., Mor, Z., Ben Moshe, L., Eyal, H., Lowenstein, T.K. and Lensky, N.G., 2021. Sedimentology and stratigraphy of a modern halite sequence formed under Dead Sea level fall. *Sedimentology*, 68(3), pp.1069-1090.

Sirota, I., Ouillon, R., Mor, Z., Meiburg, E., Enzel, Y., Arnon, A., Lensky, N.G., 2020. Hydroclimatic Controls on Salt Fluxes and Halite Deposition in the Dead Sea and the Shaping of "Salt Giants". *Geophysical Research Letters*, 47. <https://doi.org/10.1029/2020GL090836>.

Stein, M., 2001. The sedimentary and geochemical record of Neogene-Quaternary water bodies in the Dead Sea Basin-inferences for the regional paleoclimatic history. *Journal of Paleolimnology*, 26, pp.271-282.

Stein, M., Torfstein, A., Gavrieli, I. and Yechieli, Y., 2010. Abrupt aridities and salt deposition in the post-glacial Dead Sea and their North Atlantic connection. *Quaternary Science Reviews*, 29(3-4), pp.567-575.

Steinhorn, I., 1983. In situ salt precipitation at the Dead Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 28, 580–583.

Synoptic- to meso-scale circulation connects fluvial and coastal gravel conveyors and directional deposition of coastal landforms in the Dead Sea basin.

ten Brink, U.S. and Flores, C.H., 2012. Geometry and subsidence history of the Dead Sea basin: A case for fluid-induced mid-crustal shear zone?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1).

Torfstein, A., Haase-Schramm, A., Waldmann, N., Kolodny, Y., Stein, M., 2009. U-series and oxygen isotope chronology of the mid-Pleistocene Lake Amora (Dead Sea basin). *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 2603–2630.

Tsabar, A., Shalev, E., Sagy, A. and Makovsky, Y., 2023. Drainage Mechanisms of Submerged Sinkholes. *Remote Sensing*, 15(18), p.4384.

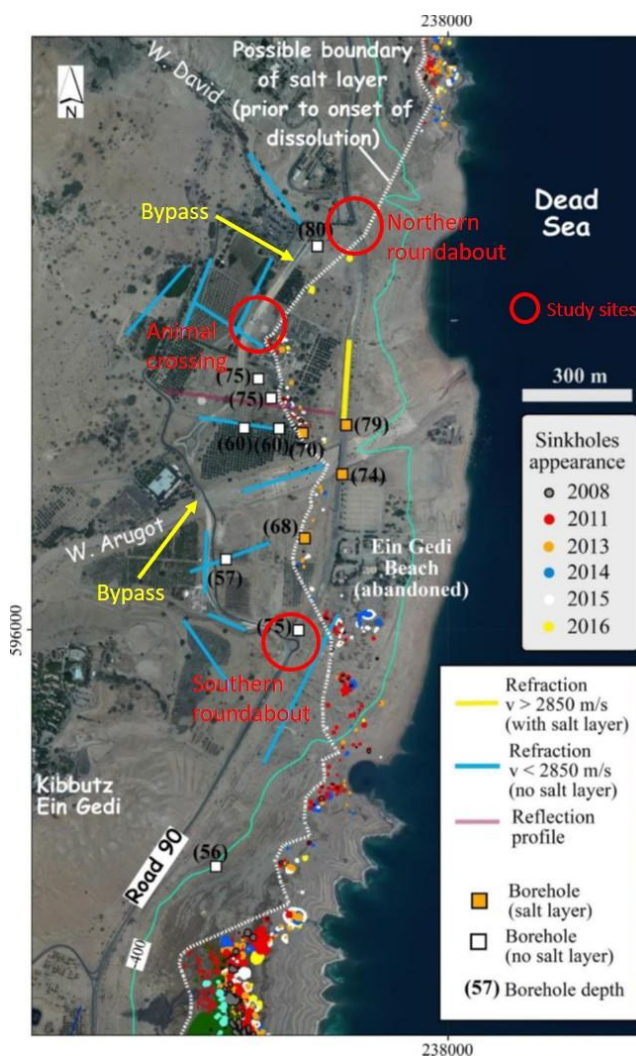
8. סיכוני בולענים ושקיעות קרקע על כביש "עוקף הבולענים" (כביש 90) באזור שמורת עין-גדי

בר, ג., נוף, ר.

המכון הגיאולוגי

8.1 מבוא

עקב התגברות שקיעות הקרקע על כביש 90 מדרום לנחל ערוגות בשנים 2012-2015, נסלל כביש "עוקף הבולענים" מערבית לתוואי הכביש הישן. המעקף ומעגלי התנועה מצפונו ומדרומו הושלמו בשנת 2016 אך הנתיב העוקף נמצא עדיין קרוב לכמה מקבצים של בולענים ואזורי שקיעה ליד מעגלי התנועה ומעבר בעלי החיים שבמרכזו (איור 8.1). כאשר נסלל המעקף הוא הוגדר כזמני, ולאחר כמה שנים החל מהלך להגדירו כקבוע. לשם כך נתבקש המכון הגיאולוגי להעריך האם המעקף אכן נמצא מחוץ לאזור סכנת הבולענים או שיש צורך לשנותו.



איור 8.1: מיקום אתרי הסקר הנוכחי על רקע מפת קומפליציה של בולענים, קידוחים, סקרים סייסמיים, והגבול המערבי המשוער של שכבת המלח באזור עין גדי (מתוך: Abelson et al., 2020).

מדידת שקיעות הקרקע לאורך כביש "עוקף הבולענים" בוצעו בשתי שיטות: 1. לייזר מוטס (LIDAR). 2. אינטרפרומטריה של רדאר מלוויינים (InSAR). במקביל למדידות שערכנו, ביצעו נתיבי ישראל, באמצעות גופי ייעוץ ומדידה, סקרים קרקעיים תקופתיים לבדיקת שקיעות הקרקע ותופעות סידוק שונות שנלוות אליהן. את תוצאות המדידות הראשוניות הצגנו במספר מפגשים עם נתיבי ישראל בשנת 2021 ובהמשך השתתפנו בתכנון קידוחים משלימים לאורך הכביש. עד כה בוצע רק חלק מהקידוחים.

8.2 נתונים ושיטות

8.2.1 לייזר מוטס

מדידת שינויים טופוגרפיים שנתיים לאורך הכביש נעשתה באמצעות הפחתת מודלים טופוגרפיים שהוכנו ממדידות לייזר מוטס. עקב הגובה היחסי השונה במקצת של המטוס בכל טיסה, רמת הדיוק האנכית של נתוני הלייזר הוגדרה כעד 20 ס"מ. לאחר שקבענו גובה ייחוס שווה לכל הטיסות על ידי איפוס ההפרשים בנקודות שאנו מניחים שלא עברו כל שינוי – רחוק מאזור השפעת הבולענים, רמת הדיוק היחסית בין נתוני השנים השונות השתפרה בהרבה והגיעה לרמה של ס"מ בודדים, אך קשה עדיין לקבוע אותה בוודאות. לכן, על מנת למזער טעויות במדידת התזוזות בחרנו להפחית מודלים טופוגרפיים בפרקי זמן גדולים של 6 שנים, ממדידות שבוצעו בשנים 2005, 2011, 2017, ו-2023. בתחילה יצרנו מודלים טופוגרפיים של כלל אזור עין גדי עבור כל אחת מהשנים הללו ברזולוציה של 0.5 מ' לפיקסל. לאחר מכן הפחתנו כל אחד מהמודלים העוקבים מהמודל של שנת 2005.

8.2.2 אינטרפרומטריה של רדאר מלוויינים

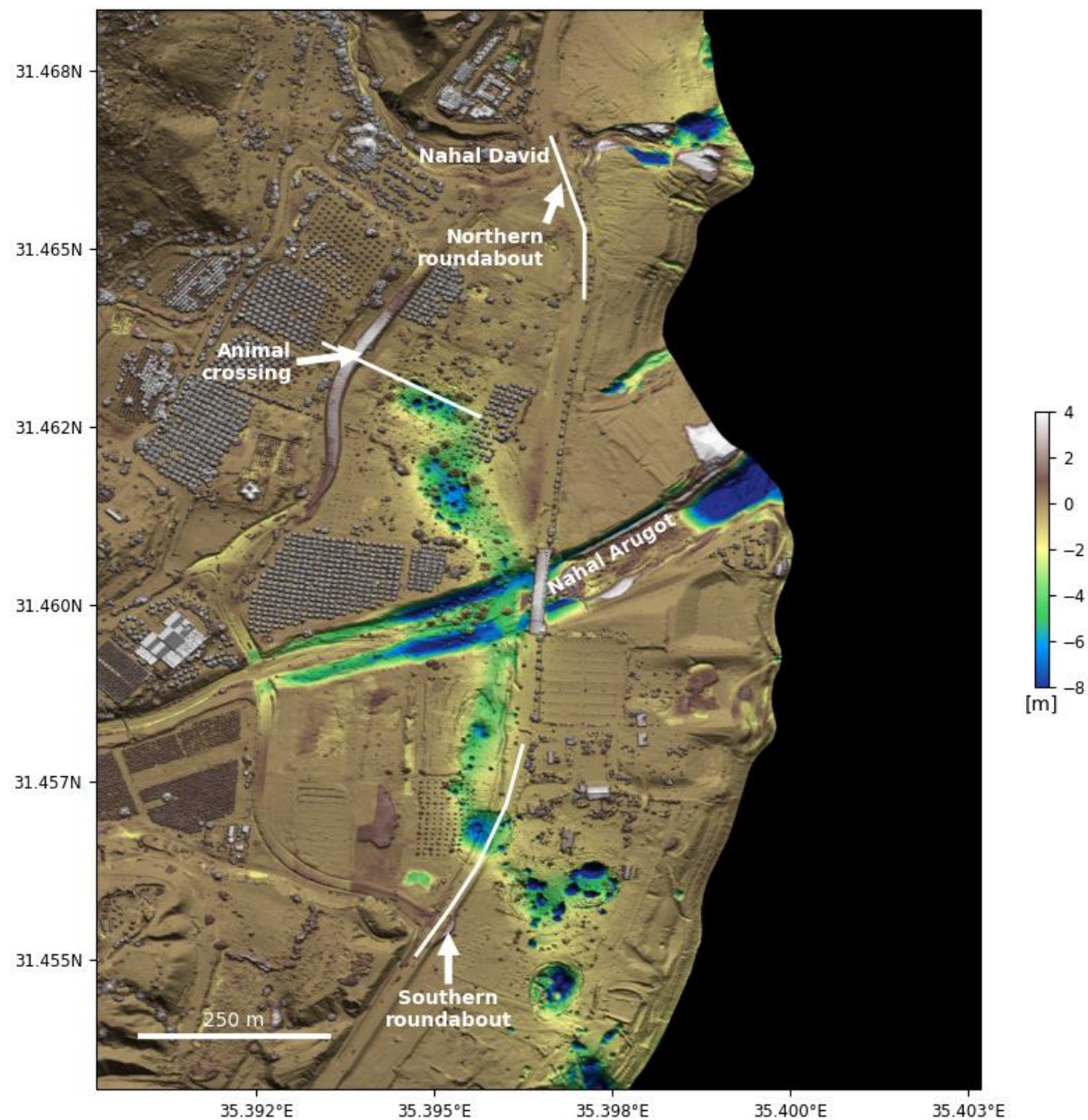
מעקב אחר שינויים עכשוויים בפני השטח וזיהוי שקיעות קרקע מקדימות לבולענים מתבצעים לאורך כל חוף ים המלח החל משנת 2012 באמצעות אינטרפרומטריה של רדאר מלוויינים (InSAR) (Nof et al., 2013). בעקבות החלטת ממשלת ישראל מיום 15.4.2018, הקים המכון הגיאולוגי מערכת התרעה לבולענים שמסתמכת על הטכנולוגיה הזו ומאז שנת 2019 המערכת פועלת ופתוחה לכלל הציבור ולגורמי התכנון https://egozi.gsi.gov.il/webapps/hazards/sinkholes_subsidence/ (Nof et al., 2019). הדמאות רדאר של הלויין הגרמני TerraSAR-X מתקבלות כל 11 יום ברזולוציה של 3 מ' לפיקסל, ומעובדות באופן אוטומטי. תמונות שינויים בין ההדמאות (אינטרפרוגרמות) ברמת דיוק אנכית של 1-2 מ"מ מחושבות עבור פרקי זמן של 11, 44, ו-77 ימים. ככל שפרק הזמן ארוך יותר מוגבר האות לעומת הרעש וניתן לזהות שינויים איטיים יותר. לצורך בדיקת סיכוני הבולענים לאורך תוואי הכביש בדקנו את השינויים לאורכו באמצעות אינטרפרוגרמות של 77 יום. חשוב לציין שהמדידה היא בכיוון הסתכלות הלויין, בין 20° - 45° מהאנך, ולכן היא עשויה לכלול רכיבים של תזוזה אופקית במידה והם קיימים. יחד עם זאת, בעבודה זו אנו מניחים כי התזוזות הנמדדות הן בעיקר אנכיות.

8.3 תוצאות

8.3.1 שינויים טופוגרפיים רב שנתיים

בתמונות ההפחתה של מדידות הלייזר עבור כלל האזור ניתן לזהות בברור רצועת שקיעה ברוחב של כ-150 מ' שכיוונה הכללי צפון-דרום, בעיקר בחלק הדרומי של האזור, ועדויות להתחתרות בנחלים דוד וערוגות (איור 8.2).

עבור כל אחד מאזורי הבדיקה (מעגלי התנועה ואזור מעבר בעלי החיים) יצרנו פרופילים של השתנות ההפרשים הטופוגרפיים (כלומר התזוזות האנכיות) בפרקי הזמן השונים (איורים 8.3 – 8.5).

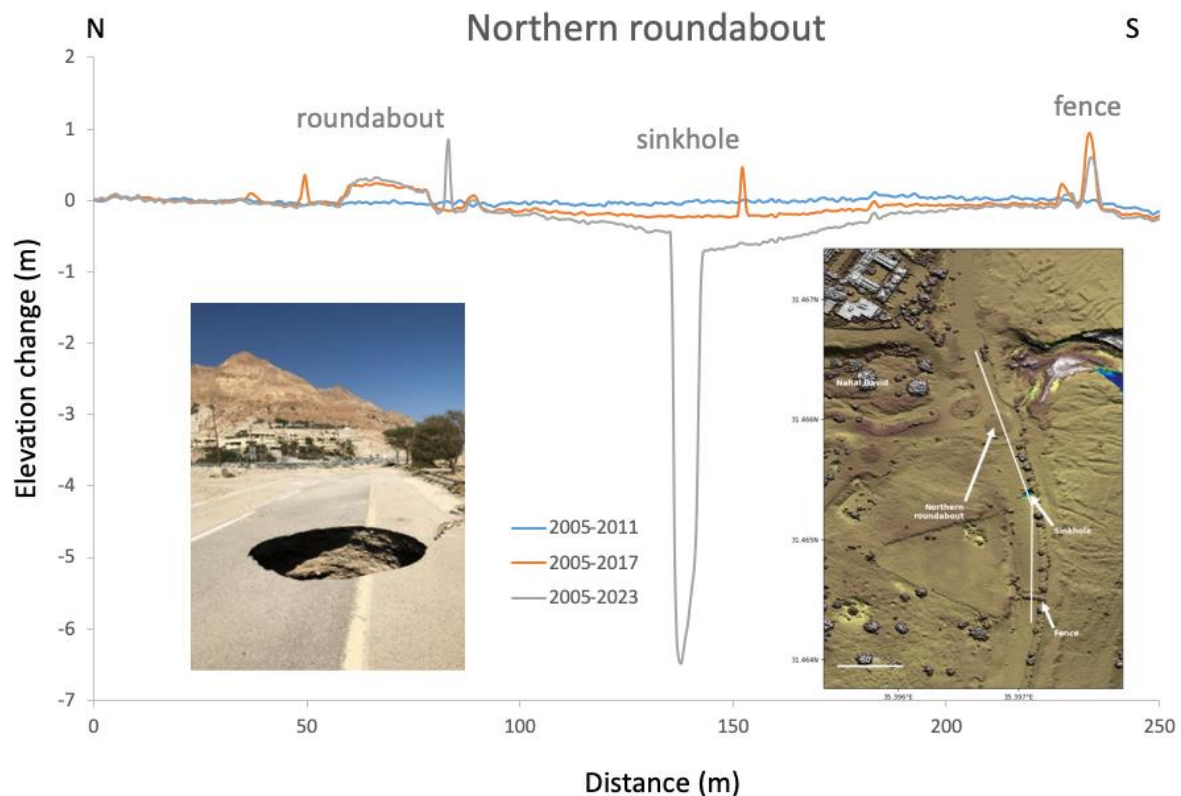


איור 8.2: תמונת הפחתה בין מדידות ליידר של השנים 2005 ו-2023 באזור עין גדי שמראה את השינויים הטופוגרפיים בפרק זמן זה. מיקום הפרופילים של תזוזת הקרקע בין השנים השונות (איורים 8.3-8.5) מסומן בקווים לבנים.

מעגל התנועה הצפוני (איור 8.3)

עד שנת 2011 לא התרחשה כל שקיעת קרקע על כביש 90 הישן באזור זה. במשך השנים 2011 עד 2017 התרחשה שקיעה של עד כ-25 ס"מ שגבולה הצפוני בדרום מעגל התנועה ושיאה כ-60 מ' מדרום למעגל. במשך השנים 2017 עד 2023 התגברה השקיעה מדרום למעגל ובשנת 2021 נפתח בולען על הכביש הישן באזור שיא השקיעה (איור

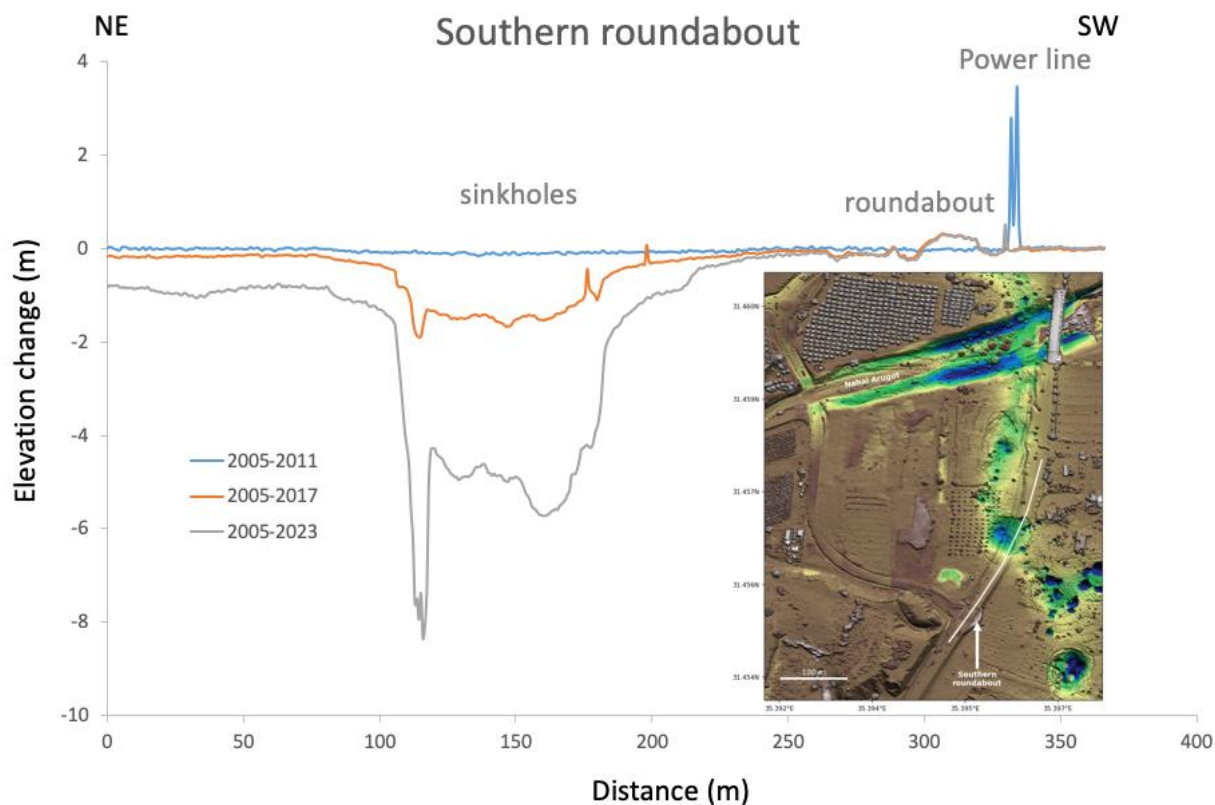
8.3). מאז התרחב הבולען מזרחה. קטע הכביש ב-10 המטרים הקרובים למעגל מדרומו מראה התנהגות דומה בין 2005 ל-2017 לזו שבין 2005 ל-2023, ומכך ניתן להסיק שלא התרחשה בו שקיעת קרקע ברת זיהוי באמצעות הלייזר מאז 2017.



איור 8.3: פרופילים של תזוזות הקרקע בין השנים 2005-2011, 2005-2017, ו-2005-2023 במעגל התנועה הצפוני. מיקום הפרופיל מימין ובאיור 8.2. הבולען שבתמונה נוצר על הכביש בשנת 2021 במקום המסומן על גבי הפרופיל.

מעגל התנועה הדרומי (איור 8.4)

עד שנת 2011 לא התרחשה כל שקיעת קרקע על כביש 90 הישן באזור זה. במהלך השנים 2011 עד 2017 התפתח אזור שקיעה לרוחב הכביש ומידת השקיעה המרבית בו הגיעה לכ-1.8 מ'. הגבול הדרומי של אזור השקיעה נמצא כ-25 מ' מצפון למעגל התנועה הדרומי. בשנת 2015 נסגר הכביש והתנועה הופנתה לכביש העוקף. במשך השנים 2017 עד 2023 התגברה השקיעה מצפון למעגל והגיעה לעומק ממוצע של כ-5 מ'. החל משנת 2017 נוצרו במקום כמה בולענים. בדומה למצב מדרום למעגל הצפוני, גם קטע הכביש ב-25 המטרים שמצפון למעגל הדרומי מראה התנהגות דומה בין 2005 ל-2017 ובין 2005 ל-2023, ומכך אפשר להסיק שגם כאן לא התרחשה שקיעת קרקע ברת זיהוי באמצעות הלייזר מאז 2017.

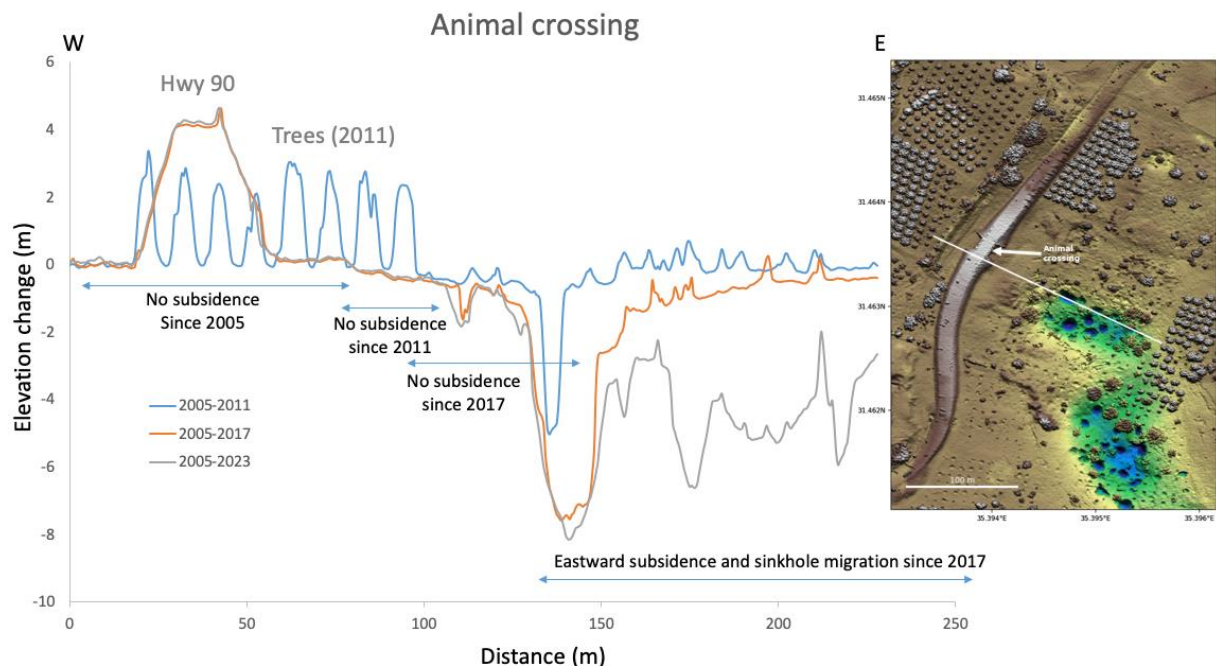


איור 8.4: פרופילים של תזוזות הקרקע בין השנים 2005-2011, 2005-2017, ו-2005-2023 במעגל התנועה הדרומי. מיקום הפרופיל מימין ובאיור 8.2.

מעבר בעלי החיים (איור 8.5)

זהו הקטע בו תוואי הכביש העוקף קרוב לאתר בולענים פעיל ולכן הועלה ספק בדבר המשך תפקודו הבטוח. אתר הבולענים החל לפעול עוד לפני שנת 2005. בין השנים 2005 ו-2011 התרחשה באתר שקיעת קרקע של עד כ-1 מטר יחד עם התפתחות מספר בולענים. הגבול המערבי של אזור השקיעה נמצא אז כ-20 מ' מזרחית למיקומו הנוכחי של הכביש העוקף (איור 8.5). מטע צעיר של קיבוץ עין גדי שהיה באזור תוואי הכביש העוקף העתידי בשנת 2011 נגדע בשנת 2012 עקב התפתחות בולענים בחלקו המזרחי. השקיעה באזור התגברה בין השנים 2011 ו-2017

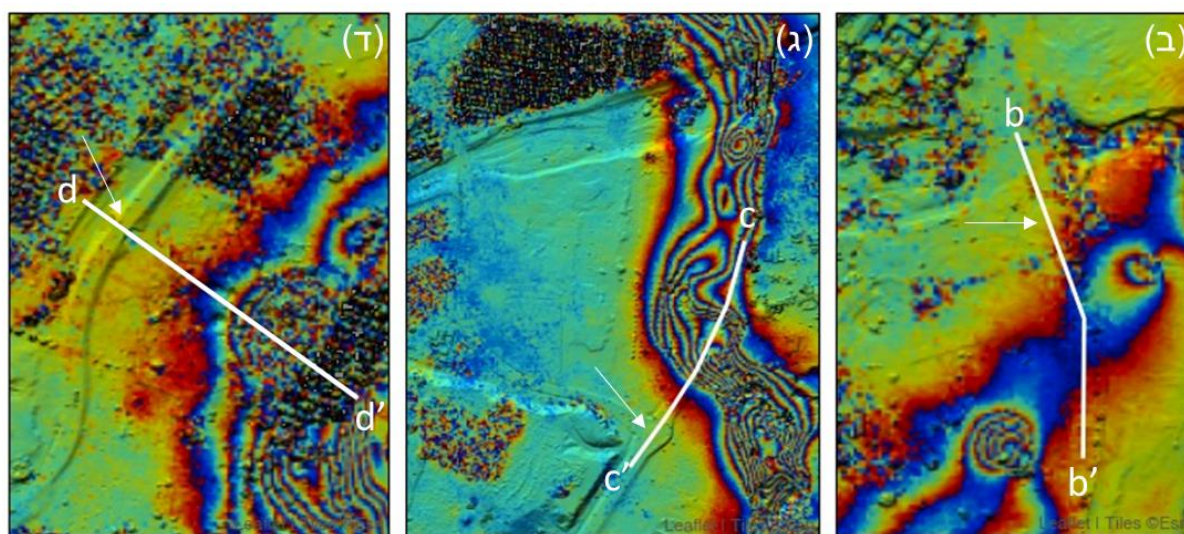
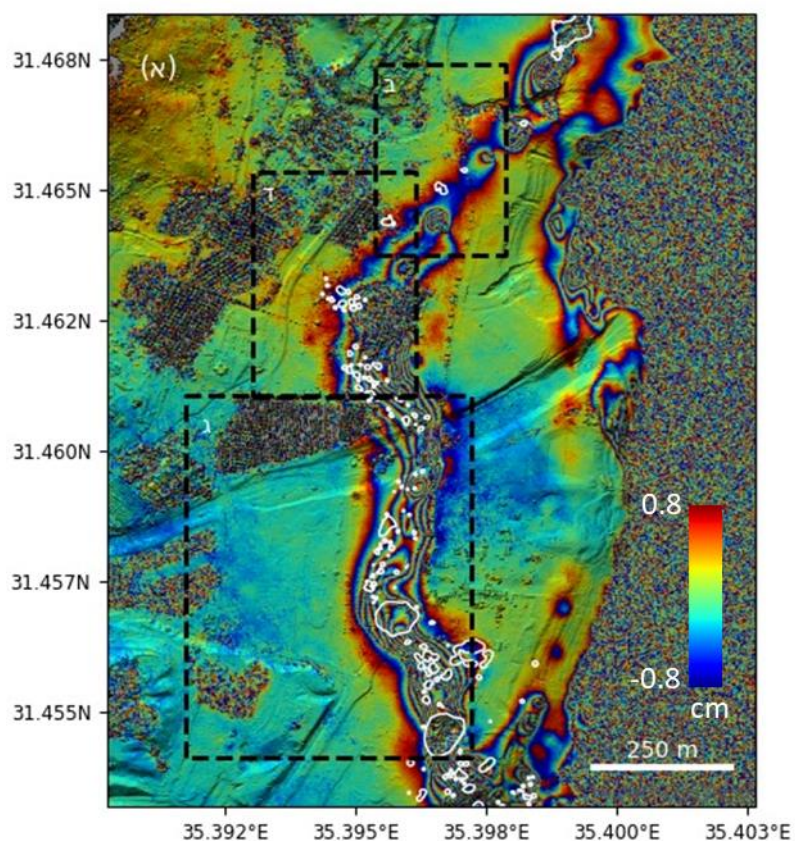
וגבולה המערבי נדד בכ-20 מ' מזרחה (איור 8.5) ועומד מאז על כ-40 מ' מזרחית לכביש. בין השנים 2017 ו-2023 המשיכו שקיעות הקרקע באתר להתגבר ולנדוד מזרחה יחד עם התפתחות והעמקה נוספת של הבולענים.



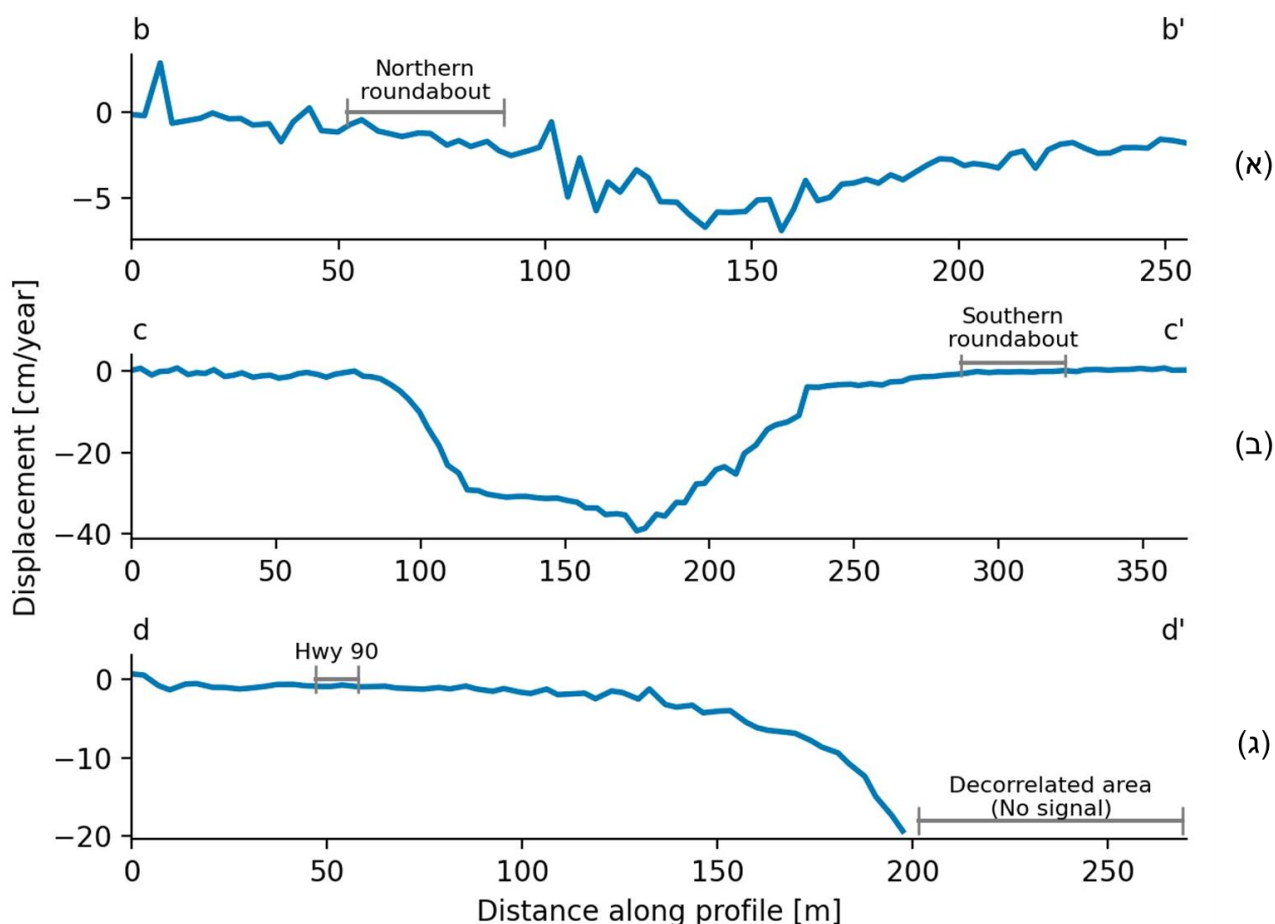
איור 8.5: פרופילים של תזוזות הקרקע בין השנים 2005-2011, 2005-2017, ו-2005-2023 במעבר בעלי החיים. מיקום הפרופיל מימין ובאיור 8.2.

8.3.2 שינויים עכשוויים בפני השטח

תזוזות הקרקע בפרק הזמן שבין ההדמאות באות לידי ביטוי בשינויי פאזה שנראים כטבעות צבעוניות על גבי האינטרפרוגרמה, כאשר כל מחזור צבעים מציין שינוי מרחק מהלוויין בשיעור של כ-1.6 ס"מ. התופעה הבולטת ביותר באינטרפרוגרמה של כלל האזור היא רצועה בכיוון צפון-דרום ברוחב של 100 עד 200 מטרים בת מספר מחזורים של שינויי פאזה (איור 8.6א). זו רצועת הבולענים ושקיעות הקרקע שחצתה את הכביש הישן וגרמה לסגירתו בשנת 2015. בדיקה פרטנית של 3 האזורים שבסיכון עבור הכביש העוקף מאפשרת לזהות את מידת הקרבה של אזורי השקיעה העכשווית למעגלי התנועה ומעבר בעלי החיים (איור 8.6). לצורך זה אנו מניחים שגבול אזור השקיעה נמצא במקום שבו גרדיאנט השינוי בין הפאזה באזורים היציבים לפאזה באזור השוקע (צפיפות מחזורי הפאזה) מתגבר באופן משמעותי. המעגל הצפוני נמצא על גבול אזור השקיעה, כאשר מידת השקיעה בחלק זה אינה עולה על 5 מ"מ לשנה (איורים 8.6ב, 7א). לעומת זאת, המעגל הדרומי נמצא כולו מחוץ לאזור השקיעה והגבול הדרומי של השקיעה נמצא כ-20 מ' מצפון לחלק הצפוני של המעגל (איורים 8.6ג, 8.7ב). מעבר בעלי החיים נמצא אף הוא מעבר לגבול אזור השקיעה, כ-50 מ' צפונית-מערבית לו (איורים 8.6ד, 8.7ג).



איור 8.6: (א) מפת שינויי פאזה (אינטרפרוגרמה) של אזור הסקר עבור פרק זמן של 77 יום בין 24.8-9.11.2023. כל מחזור צבעים מציין התרחקות מהלוויין בכ-1.6 ס"מ. פוליגונים לבנים מציינים בולענים (נכון לסוף 2022). (ב) אזור מעגל התנועה הצפוני (מסומן בחץ לבן). (ג) מעגל התנועה הדרומי. (ד) מעבר בעלי החיים. מיקום הפרופילים של (איורים 8.5-8.3, 8.7) מסומן בקווים לבנים.



איור 8.7: פרופילים של תזוזות הקרקע על פי אינטרפרומטריה של רדאר, בין התאריכים 24.8-9.11.2023. מיקום הפרופילים באיור 8.6. (א) מעגל התנועה הצפוני. (ב) מעגל התנועה הדרומי. (ג) מעבר בעלי החיים על הכביש העוקף.

8.4 דיון, סיכום והמלצות

8.4.1 השוואה בין מדידות הליידר והרדאר

הרזולוציה האופקית של הליידר היא 0.5 מ' ושל הרדאר 3 מ'. הדיוק האנכי של הליידר הוא כמה ס"מ, בעוד הדיוק האנכי של הרדאר הוא 1-2 מ"מ. בנוסף לכך, כאשר משווים בין התוצאות בשתי השיטות יש לקחת בחשבון גם את האפשרות לתזוזות אופקיות שתורמות לשינויים קלים במיקום רצועות שינויי הפאזה ברדאר, בעוד הליידר מראה רק מדידה אנכית, ואת קיומם של רעשים אטמוספריים ואחרים במדידות הרדאר. לכן כאשר מנתחים את התוצאות שלפנינו וכאשר משווים אותם למדידות בשיטות נוספות יש לזכור את כל המגבלות הללו. מדידות הליידר באזור המעגל הצפוני מצביעות על כך שהגבול הצפוני של אזור השקיעה מאז 2017 נמצא כ-10 מ' מדרום למעגל התנועה (איור 8.3), בעוד שמדידות הרדאר מראות שהמעגל כולו נמצא על קצה אזור השקיעה (איור 8.6, 8.7). באזור המעגל הדרומי מצביעות שתי השיטות על כך שגבול אזור השקיעה נמצא כ-25 מ' צפונית למעגל (איורים 8.4, 8.6, 8.7).

8.7ב). באזור מעבר בעלי החיים מצביעות שתי השיטות על מרחק גדול מ-40 מ' בין הכביש והגבול המערבי של אזור השקיעה (איורים 8.5, 8.6, 8.7ג). ככלל, ניתן לומר שעם כל המגבלות ישנה התאמה טובה בין התוצאות בשתי השיטות וההבדלים המזעריים ביניהם (בעיקר במעגל התנועה הצפוני) עשויים לנבוע מאחת הסיבות שפורטו לעיל.

8.4.2 משמעות התוצאות והמלצות להמשך

התוצאות שלפנינו מצביעות על מרחק של כמה עשרות מטרים בין הכביש העוקף ואזור השקיעה הפעיל באזור מעבר בעלי החיים, ועל נדידה מזרחה של האזור הפעיל מאז 2017. משמעות הדבר היא שבאזור זה הכביש אינו נמצא כרגע בסכנת שקיעה או בולענים. מעגל התנועה הצפוני נמצא על גבול אזור השקיעה ואין לשלול את האפשרות שלאורך הזמן יהיה בלתי יציב. מעגל התנועה הדרומי נמצא מעט רחוק יותר מאזור השקיעה. על מנת לשלול תזוזות עתידיות של הכביש או קריסת בולענים לאורכו המליץ המכון הגיאולוגי על ביצוע קידוחים משלימים בקרבה למעגלי התנועה ומעבר בעלי החיים. במידה ולא ימצא מלח בקידוחים הללו תפחת מאד הסכנה לבולענים. יחד עם זאת, קיימת אפשרות של גלישת קרקע אל חללים שנוצרים בתהליך יצירת הבולענים. אפשרות זו תיבחן על פי הליתולוגיה של טור הסדימנטים בקידוחים והיא תגדל ככל שהמרכיב החרסיתי בחתך יגדל. על פי הנתונים שהצגנו אין בשלב זה צורך בפעולת מניעה כלשהי (כגון הזזת הכביש) באזור מעבר בעלי החיים בשל איום מקריסת בולענים. לגבי מעגלי התנועה, נתיבי ישראל, בשיתוף עם גורמים אחרים החליטו זה מכבר על הזזה של המעגל הצפוני צפונה על מנת להסדיר את הזרימה בנחל דוד ובכך גם להרחיקו באופן משמעותי מאזור השקיעה. משיקולים תכנוניים ובעקבות סקרים קרקעיים, הוחלט גם על הזזה של המעגל הדרומי דרומה, ובכך להרחיק אותו דרומה יותר מאזור השקיעה.

8.5 מקורות

נוף, ר.ג., רוזנפוט, מ., ברנשטיין, מ., בר, ג., 2019. מערכת התרעה לבולענים - מתודולוגיה וממשק, מתוך: בר, ג. (עורך), תגובת התשתית באגן ים המלח לשינויים הטבעיים ומעשה ידי אדם, מסגרת רב שנתית לניטור ומחקר 2018-2028, דו"ח מכון גיאולוגי GSI/17/2019, עמ' 53-57.

Abelson, M., Yechieli, Y., Nof, R. Baer, G., 2020. Levels of sinkhole susceptibility along the western coast of the Dead Sea. Geological Survey of Israel Report, GSI/04/2020.

Nof, R. N., Baer, G., Ziv, A., Raz, E., Atzori, S., & Salvi, S., 2013. Sinkhole precursors along the Dead Sea, Israel, revealed by SAR interferometry. *Geology*, 41(9), 1019-1022.

Nof, R.N., Abelson, M., Raz, E., Magen, Y., Atzori, S., Salvi, S. & Baer, G., 2019. SAR interferometry for sinkhole early warning and susceptibility assessment along the Dead Sea, Israel. *Remote Sensing*, 11(1), p. 89.

9. השפעת מאפיינים הידרולוגיים של אירועי שיטפונות בדידים על התגובה הגיאומורפולוגית של נחלים לירידת מפלס ים המלח

בן משה, ל.¹, לנסקי, נ.²

¹ המכון הגיאולוגי

² המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים

9.1 רקע

במהלך העשורים האחרונים, חלק ניכר מהאגמים בעולם חווים הפחתה ניכרת בנפח המים שלהם, בעיקר בשל הטיית המים לשימושי האדם (Yao et al., 2023). הירידה בנפחים גורמת לירידה בגובה מפלס המים, המשמש כבסיס הסחיפה לנחלים ולנהרות הזורמים לאגמים. במקביל, נסיגת קווי החוף מובילה לחשיפה של קרקעית האגם לתהליכים גיאומורפולוגיים כגון בלייה נחלית והשקעת סדימנטים יבשתיים (Posamentier et al., 1992). תהליכים אלה, שמקורם באזור שפכי הנחלים, מתפשטים במעלה אגן הניקוז (למשל; Adams, 2012; Dente et al., 2017, 2021; Eyal et al., 2019). הבלייה וההשקעה יכולים להיות מהירים במיוחד בנחלים אלוביאליים שהינם נחלים 'מוגבלי הובלה' (transport limited), ועיצובם תלוי ביכולת של הזרימה להוביל את הגרופת במורד הנחל; זאת בניגוד לנחלים הזורמים על תשתית סלעית (bedrock), שהינם נחלים 'מוגבלי בלייה' (detachment limited), ועיצובם איטי ומוגבל ע"י התנגדות הקרקעית והגדות לבלייה. מסיבות אלו, שינויים גיאומורפולוגיים בעקבות ירידת מפלס אגם הינם מהירים בשפכי נחלים היוצרים מניפות דלתאיות מסוג Gilbert, בשל הליכודיות הנמוכה יחסית של החומר האלוביאלי הבונה את קרקעית וגדות הערוצים (Bowman et al., 2010), והחזיתות התלולות יחסית של דלתאות אלו (למשל Nemec, 1990). תהליכים אלו מביאים לשינוי מתמיד ומהיר לאורך הנחלים בקרבת האגמים הנסוגים, מה שמציב אתגרים חדשים לתכנון תשתיות חוצות נחלים באזורי החוף של גופי מים אלו. ים המלח הוא הדוגמה המוחשית ביותר למגמות אלו, כיוון שקצב ירידת המפלס עולה על 1 מ' לשנה (Lensky et al. 2005) ורצועת תשתיות מקבילה לחוף חוצה מעל עשרה נחלים המתחתרים ומתרחבים כתגובה לירידת המפלס (Ben Moshe et al. 2008); חקר ים המלח יכול לעזור בהבנת מערכות דומות אם כי יותר מתונות בעולם.

ההשפעה הגיאומורפולוגית של ירידת מפלס ים או אגם על נחלים אלוביאליים הזורמים לתוך גופי מים אלה נחקרה בעבר בהרחבה באמצעות שילוב של עבודות שדה, ניסויים ומידול, תוך שימוש במגוון מתודולוגיות אמפיריות ופיזיקליות (למשל, Born and Ritter, 1970; Gardner, 1983; Schumm et al., 1987; Bonneau, 1992; Schumm, 1993; Shachanovitz-Firtel and Bowman, 1998; Posamentier and Allen, 2000; Autin and Aslan, 2001; Muto and Steel, 2004; Ben Moshe et al., 2008; Salomon, 2019; Eyal et al., 2017, 2019; Dente et al., 2016). למרות זאת, ההבנה לגבי הקצב שבו מתרחשים הבליה והשקעת הסדימנט, כמו גם הפרמטרים הבסיסיים השולטים בתהליכים אלו, לוקה בחסר בהקשר של אירועים בדידים או שנים ספורות. מחקרים מבוססים על ממצאים מהשטח מבוססים על תהליכים שמשכם נע בין עשורים לאלפי שנים. תגובות מהירות של אירועים בדידים נחקרו בניסויי מעבדה במזרמים

(flume), גישה המאפשרת מעקב מפורט בסקאלת המזרם, אך מוגבלת בשל ההקטנה הפיזית של מרכיבי המערכת הנחלית (למשל גדלי גרגר, ספיקות מים וסדימנט) ומרכיבים של הפישוט הגלומים בניסויים אלו. המחקר המוצג כאן מתייחס לפער הידע הזה על ידי זיהוי קשרים כמותיים בין שינויים גיאומורפולוגיים בסקאלת השדה ובהקשר של כימות העבודה הגיאומורפולוגית המתרחשת בזמן אירועים שיטפוניים בדידים. בעבודה זו התמקדנו בתגובה הגיאומורפולוגית בשני נחלים אלוביאליים הזורמים לים המלח בהשוואה למאפיינים ההידרולוגיים של 25 אירועי שיטפונות שונים שהתרחשו במשך ארבע שנים רצופות.

9.1.1 שיווי משקל דינמי של נחלים אלוביאליים

כאשר לאורך תקופה ניכרת קיימת יציבות טקטונית ואקלימית באגן ניקוז של נחל אלוביאלי, ערוץ הנחל יכולים להגיע למצב של שיווי משקל (איור 9.1A). בנחלים אלו, נפח הסדימנט המגיע ממעלה הנחל כגרופת, שווה לנפח המובל לבסיס הסחיפה (למשל Leopold and Bull, 1979). בדרך כלל, המורכבות של מערכות ניקוז טבעיות מונעת השגת שיווי משקל סטטי (Schumm, 1977; Whipple, 1998), והנחלים מגיעים למצב של שיווי משקל דינמי; במצב זה המערכת הגיאומורפולוגית מתגברת על סטיות זמניות באמצעות מנגנון משוב בו שינוי באחד המשתנים הגיאומורפולוגיים או ההידרולוגיים של הנחל מוביל לתגובת שרשרת שבסיומה הנחל חוזר לשיווי משקל (Chorley and Kennedy, 1971; Schumm, 1977). התנהגות זו בולטת במיוחד בנחלי אכזב, שבהם קיימים הבדלים משמעותיים בין אירועי שיטפון שונים במשתנים ההידרולוגיים המפורטים להלן.

היכולת של נחל להוביל סדימנט כגרופת נובעת מהפיכת האנרגיה הפוטנציאלית של המים לאנרגיה קינטית (Gomez, 2022). המרה זו באה לידי ביטוי בכוח הזרם (stream power) המופעל על קרקעית וצדי ערוץ הנחל (Bagnold, 1977); כוח הזרם תלוי במשתנים ההידרולוגיים כגון המשקל הסגולי של המים, הספיקה ושיפוע האנרגיה של המים (Bagnold, 1960, כפי שצוטט ב-Gomez, 2022). יתר על כן, הובלת הגרופת, יחד עם יכולתו של הנחל לנתק חלקי נחל מקרקעית וגדות הערוץ, תלויים במשתנים סדימנטולוגיים וגיאומורפולוגיים שונים (למשל, Gomez and Church, 1989). משתנים אלה כוללים גורמים כמו גודל גרגר ומשקל סגולי של הסדימנט, ליכודיות וחסיפוס של קרקעית תעלת הזרימה והגדות, ורוחב התעלה (Bagnold, 1973, 1977; Begin et al., 1981; Gardner, 1983; Montgomery and Buffington, 1997). לאור אלו, מקובל לנסח את משוואת הובלת הסדימנט, למקרה שכמות הסדימנט הזמין לסחיפה אינה מוגבלת:

$$q_s = KS \quad (\text{Begin, 1978}) \quad (1)$$

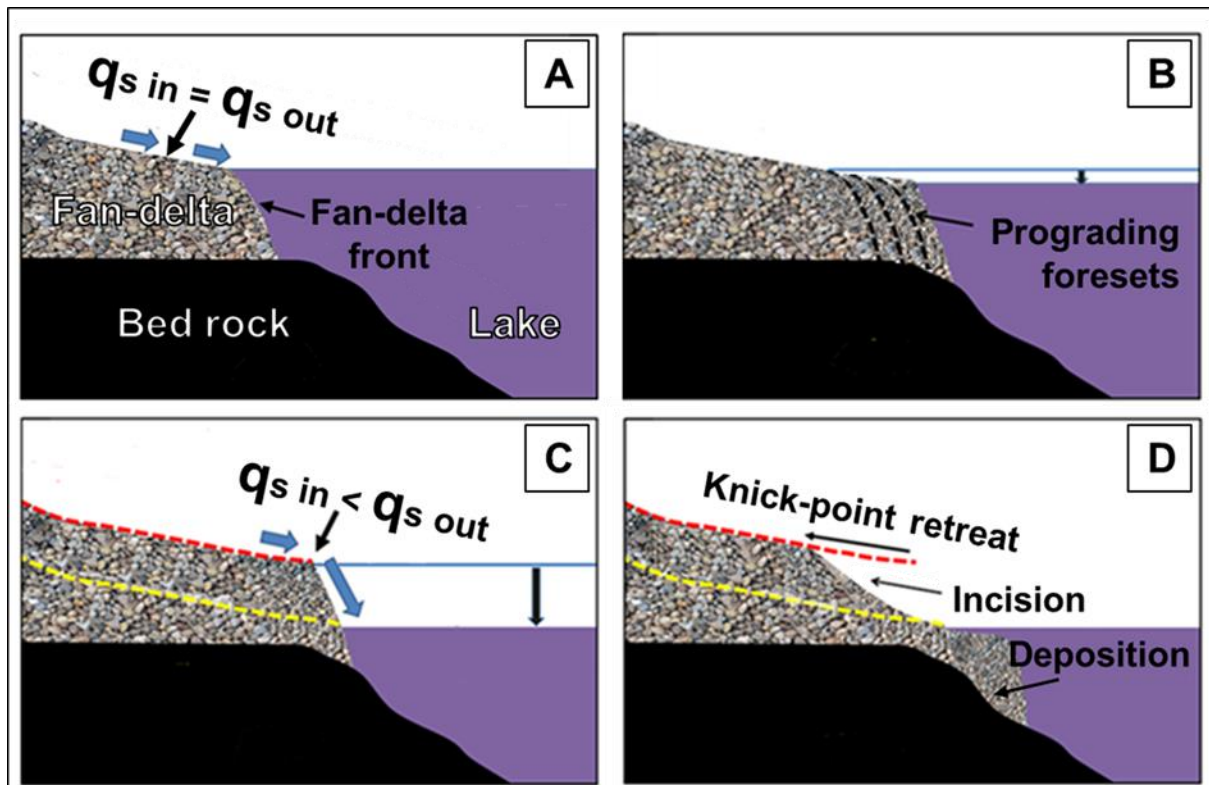
כאשר q_s הוא שטף הגרופת (ספיקת גרופת ליחידת רוחב של הערוץ) בנקודה נתונה לאורך הערוץ, K הוא מקדם התלוי בתכונות ההידרולוגיות, סדימנטולוגיות והגיאומורפולוגיות מלבד שיפוע האנרגיה של המים, ו- S הוא שיפוע זה בכיוון מורד הזרימה.

במצב של שיווי משקל, לנחל אלוביאלי יש ספיקת סדימנט, יחד עם ערכים אופייניים לרוחב התעלה והמקדם K ממשוואה 1. כתוצאה מכך, לנחל יש שיפוע אנרגיה אופייני המשקף את ההתנהגות הממושכת של הנחל, ולא ערכים זמניים הקשורים לאירועי שיטפון בודדים (למשל Whipple et al., 1998). שיפוע קרקעית הנחל מייצגת בקירוב רב את שיפוע האנרגיה (Begin, 1981); לפיכך כל שינוי שיכפה על שיפוע זה, תוך שמירה על שאר המשתנים במשוואה 1 ללא שינוי, יוציא את הנחל ממצב של שיווי המשקל ויגרום לתגובה גיאומורפולוגית 'השוואת' להחזיר את השיפוע המקורי (Gardner, 1983; Ben Moshe et al., 2008; Bowman, 2023).

9.1.2 ירידת מפלס אגם וההשלכות הגיאומורפולוגיות על נחלים אלוביאליים לחופו

כאשר נחל יוצא מבין גדות מגבילות של קניון אל מרחב פתוח הנמצא סמוך לחוף אגם, הוא יוצר לעתים קרובות דלתא בצורת מניפה באזור כניסתו לגוף המים, הנקראת מניפה-דלתאית (Nemec, 1988). חלק מהסדימנט המובל על ידי הנחל שוקע על פני הקרקע, בעוד שאר החומר מועבר לאגם, וגורם לפרוגרדציה של המניפה לכיוון האגם (McPherson et al., 1987). הפרוגרדציה כרוכה בהשקעת יחידות סדימנטריות תלולות (נקראות foreset) בחזית המניפה שנמצאת מתחת לפני המים (איור 9.1B). בעוד שיפוע קרקעית הנחל על גבי המניפה שמעל לפני המים נקבע על ידי שיפוע שיווי המשקל של הנחל (Bowman, 1988; Harvey, 2002), שיפוע חזית המניפה נשלט על ידי הזווית הקריטית של הסדימנט האלוביאלי הבלתי מלוכד (Kleinhaus, 2005). במקרה של ירידת מפלס האגם, אם קצב גרסיית קו החוף עולה על קצב פרוגרדציית המניפה הדלתאית, החזית התלולה הופכת לחשופה מעל פני המים במורד שפך הנחל. כתוצאה מכך, נוצר בנחל פרופיל אורך קמור, המאופיין בנקודת נקע בנקודת הפיתול.

במקרים של ירידת מפלס כפויה (forced regression), השינוי היחיד במערכת הנחלית הינו העלייה בשיפוע ערוץ הנחל בחלקו התחתון (למקרה טיפוסי שקרקעית האגם תלולה מזו של הנחל המתנקז אל האגם), ללא שינוי בפרמטרים הידרו-גיאומורפולוגיים אחרים (איור 9.1C). בתרחישים אלה, מאמץ הגזירה הגבוה יחסית בנקודת הנקע יכול לגרום להתחתרות שתוביל לנדידת נקודת הנקע במעלה הזרם והקטנת השיפוע של האזור התלול שבמורדה (Schumm, 1977, 93; Gardner, 1983; Bull, 1991). תהליך זה עשוי להוביל גם לעלייה בפיתוליות של הערוץ (Dente et al., 2019). הירידה בשיפוע במורד נקודת הנקע מובילה לירידה ביכולת הובלת הסדימנט באותו מקטע נחל. תהליך ההתחתרות מסתיים כאשר בכל נקודה לאורך הערוץ יכולת הובלת הסדימנט אינה עולה עוד על ספיקת הסדימנט המגיעה ממעלה הזרם. פרופיל האורך החדש של שיווי המשקל יהיה מקביל או זהה לפרופיל שיווי המשקל ההתחלתי (איור 9.1D). קצבי ההתחתרות ונסיגת נקודת הנקע, במקרה של אירוע חד פעמי של ירידת בסיס הסחיפה, דועכים מעריכית עם הזמן ועם המרחק (Begin et al., 1981). מסיבה זו קצב ההתחתרות במורד הערוץ גבוה יותר מאשר במעלה הזרם. כתוצאה מכך, כאשר הורדת בסיס הסחיפה הינה תהליך מתמשך הגורם לחשיפת מקטעים תלולים נוספים במוצא הנחל, השיפוע והקמירות של פרופיל האורך עשויים לגדול עם הזמן ומעידים על התרחקות הנחל ממצב של שיווי משקל (בן משה ולנסקי, 2020).

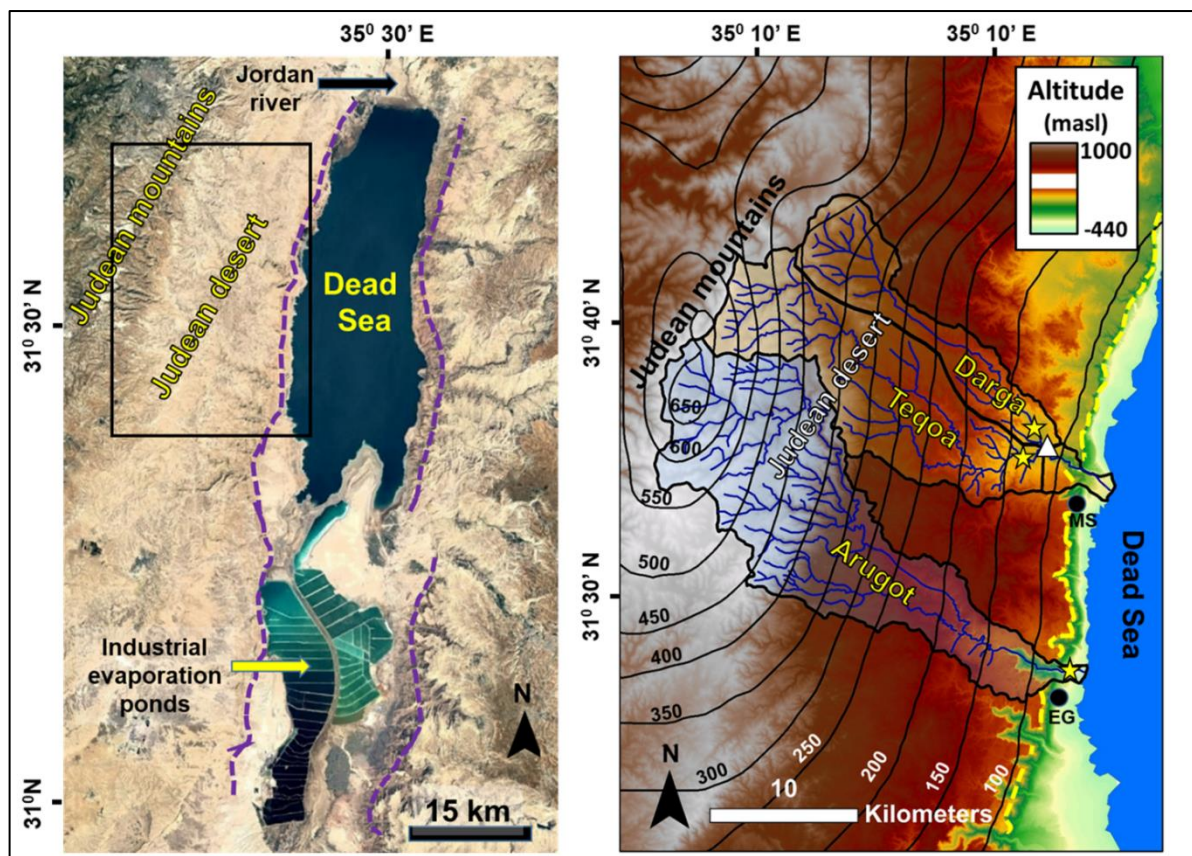


איור 9.1. התחזרות נחל אלוביאל בעקבות ירידה כפויה במפלס גוף מים אליו הוא מתנקז. **A.** מצב של שיווי משקל, בו שטף הסדימנט המגיע ממעלה האגן שווה לשטף הסדימנט היוצא במורד הזרימה. **B.** פרוגרדציה של foresets בעקבות ירידת מפלס איטית. **C.** ירידת מפלס מהירה הגורמת לחשיפת מדרון חזית המניפה וליצירת נקודת נקע. שטף הסדימנט היוצא מנקודת הנקע למורד גדול משטף הסדימנט המגיע מהמעלה ולא השתנה. הקו המקוטע האדום מציין את פרופיל האורך המקורי של הנחל. הקו המקוטע הצהוב מייצג את פרופיל שיווי המשקל החדש של הנחל. **D.** התחזרות בנחל המלווה בנסיגת נקודת הנקע לאחור ולירידה בשיפוע במורד נקודת הנקע. פרופיל האורך של הנחל 'שואף' להגיע לפרופיל שיווי משקל חדש (קו מקוטע צהוב) שהינו מקביל לפרופיל האורך המקורי.

9.1.3 אזור המחקר

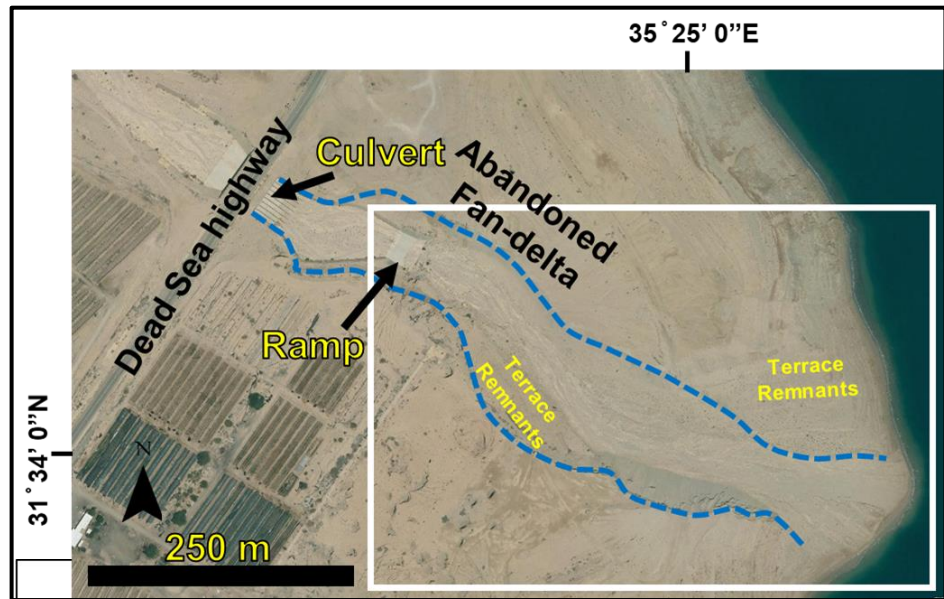
שאיתב מים נרחבת מאגן הניקוז של ים המלח, שהחלה באמצע המאה ה-20, הביאה לירידת מפלס האגם בשיעור של למעלה מ-35 מטרים (Lensky et al., 2005). בעוד שתנודות טבעיות במפלס ים המלח התרחשו לאורך ההולוקן עקב שינויים אקלימיים (Bookman et al., 2004; Goldsmith et al., 2023), קצב הירידה העכשווי (כיום 1.2 מ' לשנה) הינו חסר תקדים במיוחד. כתוצאה מכך, נסיגת קו החוף המהירה חשפה את החזיתות התלולות של מניפת-דלתאיות רבות במוצא הנחלים הנשפכים לאגם (Eyal et al., 2019). הטופוגרפיה התלולה שנחשפה, בשילוב עם בלייה של הגלים הנשברים על החוף, יצרה מדרגות חוף (Enzel et al., 2022), שמהוות נקודות נקע בשפכי הנחלים. כתוצאה, הנחלים התחזרו לתוך המשטח האלוביאל של פני המניפה (בן משה וחב', 2008), ויצרו תעלות דמויות קניונים המגיעות כעת לעומקים של עד 30 מטר ולרוחב של 100 מטר. ההתחזרות, המלווה בהתרחבות של תעלות האפיק, מתרחשת במהלך שיטפונות בעיקר בין החודשים אוקטובר למאי. בהתחשב בכך שהירידה העכשווית במפלס האגם אינה תלויה בשינויים הידרו-אקלימיים באגן הניקוז של ים המלח של ים המלח (Ben Moshe et al., 2008), התעלות החדשות שנוצרו מספקות הזדמנות לבחינת התפתחות הגיאומטריה של נחלים אלוביאליים בעקבות ירידה מתמשכת בבסיס הסחיפה שלהם.

המחקר המוצג כאן מתמקד בשני נחלי אכזב, נחל דרגה ונחל ערוגות, המתנקזים לים המלח מהרי ומדבר יהודה (ראה מיקום באיור 9.2). אורכם של נחל דרגה ונחל ערוגות הוא 43 ק"מ ו-46 ק"מ, בהתאמה, ושטח אגן ההיקוות של נחלים אלו הוא כ-230 קמ"ר כל אחד. עם זאת, עקב הבדלים בכמות המשקעים באגני הניקוז שלהם, נפח הגשם השנתי הממוצע בכל אחד מהאגנים שונה. מעל אגן נחל דרגה יורדים בממוצע 74 מלמ"ק גשם בשנה, בעוד מעל אגן נחל ערוגות יורדים 100 מלמ"ק. נחלים אלו החלו להתחרר במוצאם במהלך שנות ה-70, בעקבות ירידת מפלס ים המלח שקדמה לכך. אפיקי שני הערוצים מגיעים כיום לעומק התחתרות מקסימלי של כ-30 מטרים (איורים 9.3-9.6). הרחוב המירבי של תעלת נחל דרגה ונחל ערוגות הוא 120 מטר ו-90 מטר בהתאמה; האפיקים הפעילים צרים יותר, בהתחשב בנוכחותן של שרידי טרסות שארתיות לאורך גדות הערוצים (איורים 9.3-9.6). כביש ים המלח חוצה את הנחלים מספר מאות מטרים במעלה הזרם מהשפך שלהם לאגם; בשתי התעלות נבנו רמפות בטון במורד הזרם מהכביש על מנת להגן עליו מפני ההתחתרות (איורים 9.4 ו-9.6). הנחלים במורד הזרימה מהרמפות מגיבים מבחינה גיאומורפולוגית לירידת האגם, בעוד שמעלה הזרם אינו מושפע מתנודות כלשהן במפלס האגם עקב הרמפות המשמשות בסיס סחיפה מקומי יציב. מסיבה זו, שטח המחקר בשני הנחלים כלל רק את המקטעים הטבעיים במורד הזרימה מהרמפות.

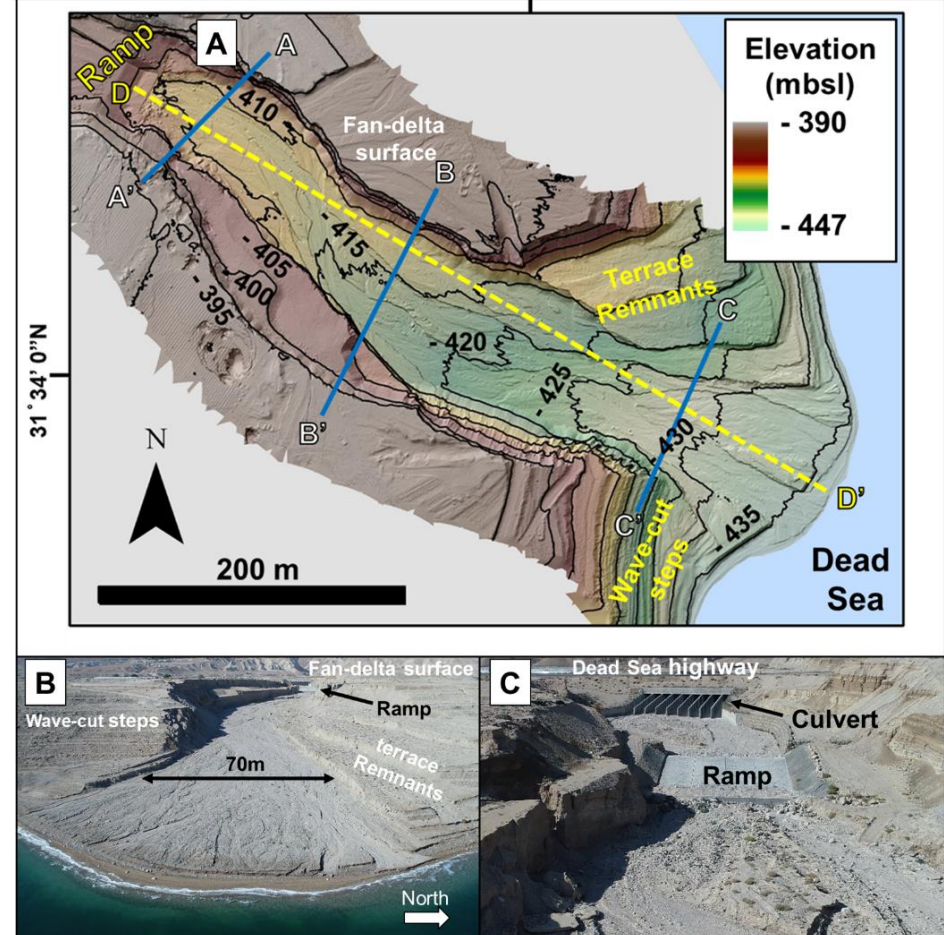


איור 9.2. A. צילום לוויין של בקע ים המלח, ים המלח מדבר יהודה והרי יהודה. קו מקוטע סגול מייצג את מיקום המתלול הטקטוני התוחם את הבקע. המלבן השחור מציין את מיקום המפה שבאיור B. B. מפת גבהים של מדבר יהודה באזור אגני הניקוז של הנחלים דרגה וערוגות. הקונטורים הם קווים שווי משקעים. קווים כחולים מסמנים את ערוצי היובלים העיקריים. אגן הניקוז של נחל דרגה צבוע בכתום חצי שקוף ומחולק לשלושה אגני משנה - אגן יובל דרגה, אגן יובל תקוע, ואגן נחל דרגה המאוחד במורד שני האגנים הללו. משולש לבן מסמן את נקודת חיבור היובלים דרגה ותקוע. אגן הניקוז של נחל ערוגות צבוע בלבן חצי שקוף. התחנות ההידרומטריות מהן נלקחו הנתונים בעבודה זו מסומנות בכוכבים צהובים.

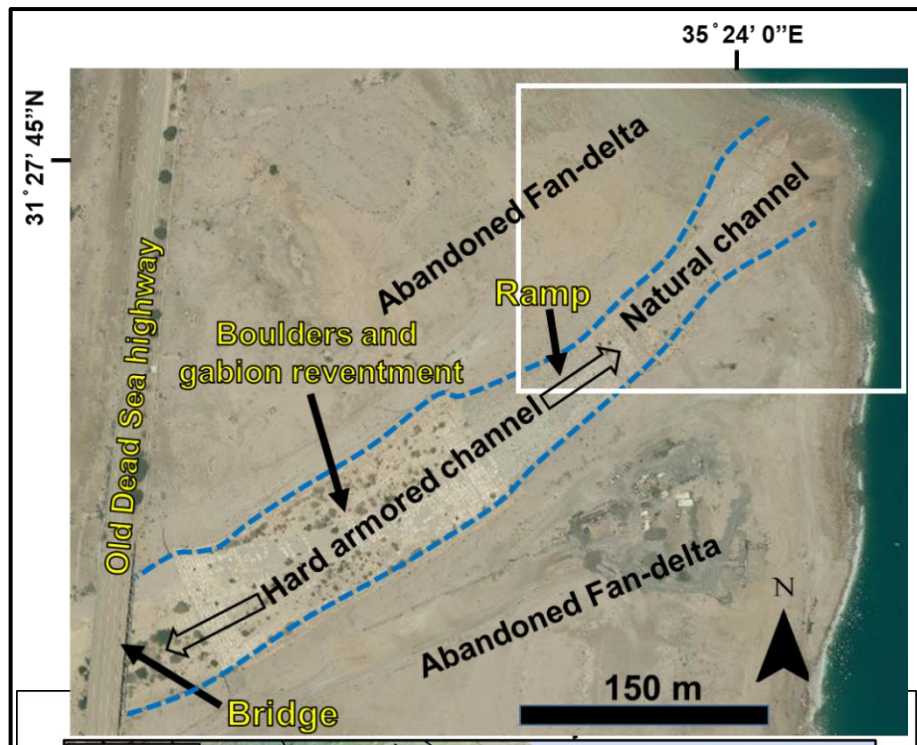
איור 9.3. אורתופוטו של נחל דרגה בין כביש ים המלח לים המלח. הקו המקוטע הכחול מסמן את הקצה העליון של גדות תעלת הנחל, שהתחברה לתוך המניפה הדלתאית שנטשה מבחינה הידרולוגית. המלבן הלבן מציין את האזור המופיע באיורים 1.1.4 ו-1.1.9. בחלק הנחל שנמצא במורד הכביש ניתן לראות את מקטע הנחל שעבר התאמות הנדסיות ובמורדו הרמפה המלאכותית.



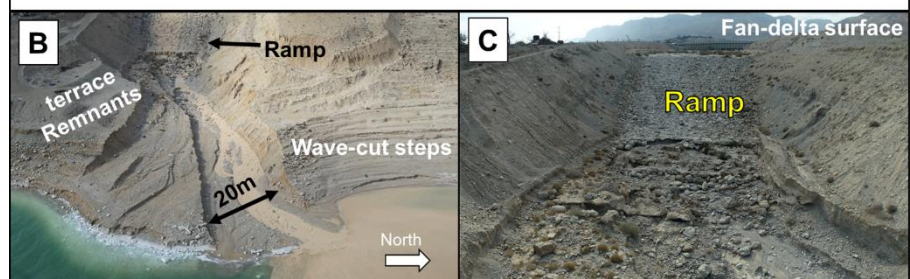
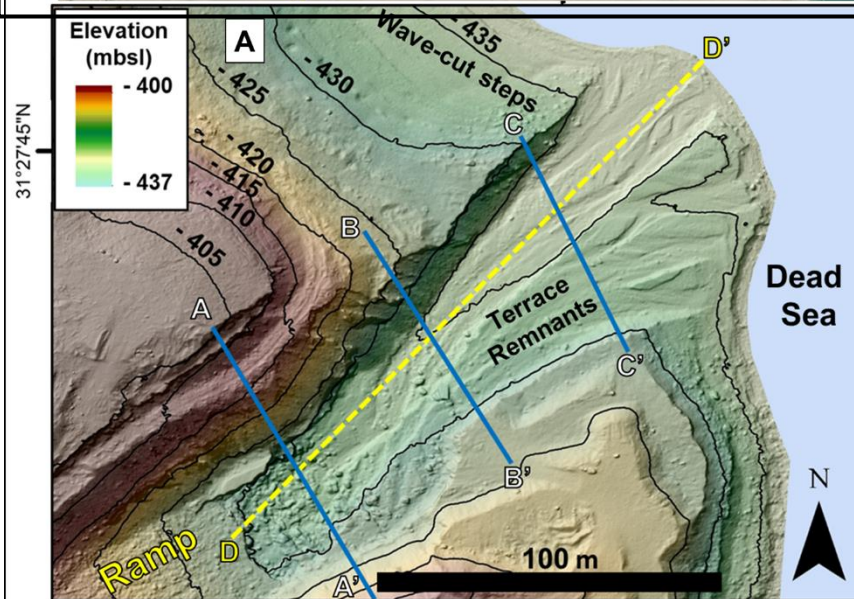
איור 9.4. A. מפת גבהים של נחל דרגה, מבוססת על סקר פוטוגרמטרי בחודש יולי 2023. מיקום חתכי הרוחב המופיעים באיור 9.7 מסומנים בכחול. מיקום קו ההשלכה של פרופילי האורך מסומן בקו מקוטע צהוב. B. צילום אוויר אלכסוני של נחל דרגה מהשפך לכיוון המעלה. C. צילום אוויר אלכסוני של הרמפה המהווה את הקצה העליון של מקטע הנחל הנחקר.



איור 9.5. אורתופוטו של נחל ערוגות בין כביש ים המלח (היום נטוש) לחוף ים המלח. הקו המקוטע הכחול מסמן את הקצה העליון של גדות תעלת הנחל, שהתחברה לתוך המניפה הדלתאית שננטשה מבחינה הידרולוגית. המלבן הלבן מציין את האזור המופיע באיורים 9.6 ו-9.10. ניתן לראות את מקטע הנחל שעבר התאמות הנדסיות ובמורדו הרמפה המלאכותית, ואת מקטע הנחל הטבעי שבמורדו, בו נערך המחקר.



איור 9.6. A. מפת גבהים של נחל דרגה, מבוססת על סקר פוטוגרמטרי בחודש יוני 2023. מיקום חתכי הרוחב המופיעים באיור 9.8 מסומנים בכחול. מיקום קו ההשלכה של פרופילי האורך מסומן בקו מקוטע צהוב. B. צילום אוויר אלכסוני של נחל ערוגות בזמן שיטפון, מהשפך לכיוון המעלה. C. צילום אוויר אלכסוני של הרמפה המהווה את הקצה העליון של מקטע הנחל הנחקר.



9.2 שיטות

9.2.1 רקורד השיטפונות

נבדקה ההשפעה של ארבעה משתנים הידרולוגיים, טמפורליים ומרחביים על התגובות הגיאומורפולוגיות הנחלים לאירועי שיטפון: (1) ספיקת שיא בשיטפון, (2) נפח המים הכולל בשיטפון, (3) העיתוי היחסי של האירוע בתוך עונת השיטפונות (שיטפון ראשון או מאוחר יותר), ו-(4) זכות הנחל הספציפי (דרגה או ערוגות). במקרים בהם התרחשו מספר שיטפונות בין סקרים עוקבים, השיטפונות טופלו כאירוע בודד עם מספר גלים. נעשה שימוש בספיקה הגבוהה ביותר מבין השיטפונות הללו ובנפח המים המצטבר באירועים, על מנת לייצג את מאפייני השיטפונות בין הסקרים.

ההידרוגרפים של השיטפונות נמדדו על ידי השירות ההידרולוגי. נתוני השיטפונות בהם השתמשנו עבור נחל דרגה, התקבלו משתי תחנות מדידה הממוקמות לאורך שני יובלי הנחל הראשיים (דרגה ו-תקוע), המתחברים 6 ק"מ במעלה הזרם מאזור המחקר (איור 9.2B). תחנת המדידה הראשונה, הממוקמת על יובל דרגה, נמצאת במרחק של 1.5 ק"מ במעלה הזרם מנקודת החיבור (איור 9.2B) ומודדת אגן ניקוז ששטחו 75 קמ"ר. התחנה השנייה, הממוקמת על יובל תקוע, ממוקמת 2.5 ק"מ במעלה הזרם מנקודת החיבור (איור 9.2B) ומודדת אגן ניקוז ששטחו 139 קמ"ר. באמצעות מידול בתוכנת Hec-Ras, יוצר ההידרוגרף זרימה משולב, המשלב נתונים משתי תחנות המדידה. חשוב לציין כי קיים שטח של 23 קמ"ר במורד הזרימה מהתחנות, המתנקז לאזור המחקר. שטח זה הינו הצחיח ביותר באגן הניקוז של נחל דרגה, ומאופיין בכמות משקעים שנתית של 70 מ"מ. עם זאת, אזור זה יכול לחוות גשמים עזים. מסיבה זו, ספיקות השיא ונפח המים הכולל באזור המחקר עשויים להיות לעיתים גבוהים יותר מהערכים שחושבו, בשל אי הכללת זרימות שמקורן בגשם במורד האגן מהתחנות ההידרוטריות. במקרה של נחל ערוגות, תחנת המדידה ממוקמת במרחק של 900 מ' בלבד במעלה הנחל ממקטע הערוץ הנחקר (איור 9.2B), ולכן ניתן להניח שההידרוגרף הזרימה שנמדד בתחנה זו משקף את הזרימה באזור העבודה.

9.2.2 מיפוי

במחקר נעשה שימוש במפות אורתופוטו ומפות גבהים (DEM) של האפיקים האלוביאליים בנחלים דרגה, שעודכנו לאחר אירועים שיטפוניים. המיפוי נערך באמצעות סקרים פוטוגרמטריים שבוצעו ע"י רחפן, והתמקד במקטעי הערוצים מרמפות הבטון המלאכותיות עד לחוף ים המלח; אורכם של מקטעים אלו הוא כ-450 מטר ו-250 מטר לנחל דרגה ולנחל ערוגות, בהתאמה (איורים 9.3 ו-9.5). סקרים אלו נערכו לאחר רוב השיטפונות במשך תקופה של ארבע שנים עוקבות (2019-2023). סקר נוסף בוצע בתחילת המחקר באוקטובר 2019. שני סוגים של רחפנים שימשו לאורך כל תקופת המחקר: מאוקטובר 2019 עד מרץ 2021, נעשה שימוש ב-DJI Phantom 4, לאחר מכן ב-DJI Phantom 4 RTK. התמונות צולמו במנח נאדיר, עם חפיפת תמונות קדמית וצידית של 75%, וגובה טיסה 40 מ' מעל גובה הקרקע במקום ההמראה. מפות האורתופוטו והגבהים יוצרו באמצעות תוכנת Agisoft Photoscan Professional. הרזולוציה של האורתופוטו היתה 1.5-2 ס"מ לפיקסל, ושל ה-DEM 5-8 ס"מ לפיקסל. הדיוק היה 2-5 ס"מ למיקום ו-2.5-5 ס"מ לגובה. במקרים בהם היה הפרש קבוע בגבהים בין שני DEM עוקבים, הטעות תוקנה ע"י מציאת הפרשי הגבהים באזורים שבהם לא היו צפויים להיות הבדלים טופוגרפיים בין שני הסקרים.

9.2.3 חישוב התגובות הגיאומורפולוגיות

על מנת לכמת את השינויים הגיאומורפולוגיים הנובעים מאירועי השיטפון, נעשה שימוש בשני משתנים: כמות הסדימנט שהושקע או הוסרה ממקטע הנחל, ושינוי הגובה הממוצע לאורך ה-thalweg (השיעור של ההתחתרות או ההשקעה). החישובים בוצעו באמצעות תוכנת ArcMap. חישוב מאזן הסדימנט נעשה באמצעות הפחתת הגובה בין זוגות עוקבים של סריקות DEM, כדי לקבוע את שינוי הגובה בכל פיקסל. ערך השינוי הוכפל בשטח הפיקסל וסכימת התוצאות על פני כל אזור המחקר נתנה את מאזן הסדימנט. מיקומי ה-thalweg מופו באמצעות ה-ArcMap hydrology toolset. חושבו פרופילי האורך של הנחלים בסקרים השונים, ופרופילים אלו הושלכו על קו משותף על מנת למזער את ההשפעה של שינויים בפיתוליות (ראה מיקומי קווי ההשלכה באיורים 9.4 ו-9.6). לאחר מכן חושבו גבהים של נקודות במרווחים של 1 מטר לאורך הפרופיל המושלך, והשינוי בגובה שלהן בין שני סקרים עוקבים. ערכי השינוי בגובה הנקודות מוצעו על מנת לכמת את שיעור ההתחתרות או ההשקעה לאורך ה-thalweg.

9.2.4 ניתוח סטטיסטי

לצורך הניתוח הסטטיסטי הוערכה מידת המולטי-קוליניאריות בעזרת (variance inflation factor (VIF). לאחר שנמצא שאין מולטי-קוליניאריות נעשה שימוש במודל GLMM עם הסתברות גמא ופונקציית לוג. המשתנים התלויים היו מאזן הסדימנט או השינוי בגובה ה-thalweg, עם זהות הנחל כסובייקט. ספיקת השיא, התזמון היחסי של השיטפון ונפח המים הכולל היו המשתנים הבלתי תלויים.

9.3 תוצאות

9.3.1 רקורד השיטפונות

במהלך ארבע שנות המחקר (תאריכים) ארעו בנחלים דרגה וערוגות 15 ו-20 שיטפונות, בהתאמה. בתקופה זו, בוצעו 16 סקרים פוטוגרמטריים בנחל דרגה (טבלה 9.1) ו-15 בנחל ערוגות (טבלה 9.2). היו שני מקרים בנחל דרגה וחמישה בנחל ערוגות, בהם התרחשו מספר שיטפונות בין שני סקרים עוקבים. במהלך תקופת המחקר היתה שונות גדולה בעוצמת השיטפונות, עם ספיקות שיא שנעו בין 0.1 ל-43.6 מ"ק לשנייה בנחל דרגה ובין 0.1 ל-76 מ"ק לשנייה בנחל ערוגות. ערכי החציון, הבין-רבעוני התחתון והבין-רבעוני העליון עבור נחל דרגה היו 3.4, 2.2, 6.9 מ"ק לשנייה, בהתאמה; בנחל ערוגות ערכים אלו היו 21.5, 4.7, 37.0 מ"ק לשנייה, בהתאמה. סך נפחי המים שזרמו בנחל בין סקרים עוקבים היו בין 2,000 ל-118,000 מ"ק בנחל דרגה ובין 3,000 ל-419,000 מ"ק בנחל ערוגות. ערכי החציון, הבין-רבעוני התחתון והבין-רבעוני העליון עבור נחל דרגה היו 68,000, 10,000 ו-100,000 מ"ק, בהתאמה; בנחל ערוגות ערכים אלו היו 132,000, 62,000 ו-243,000 מ"ק, בהתאמה. תוצאות מפורטות, כולל ספיקות השיא ונפח המים שעבר בכל שיטפון, מאזן הסדימנט ושינוי הגובה הממוצע לאורך ה-thalwegs, מוצגים בטבלאות 9.1 ו-9.2.

Season	Date	Peak discharge (m ³ /sec)	Total water volume (10 ³ m ³)	Evacuated sediment volume (10 ³ m ³)	Average thalweg incision (m)
2019-2020	01/10/2019	New flood season survey			
	09/12/2019	0.4	4		
	23/12/2019			0.3	0.11
	27/12/2019	0.9	8		
	01/01/2020			0	0.02
	09/01/2020	7.2	109		
	16/01/2020			4.6	0.02
	06/03/2020	26.3	97		
2020 - 2021	12/03/2020			19.9	0.18
	01/12/2020	New flood season survey			
	18/02/2021	6.3	94		
2021-2022	01/03/2021			1.8	0.37
	25/01/2022	New flood season survey			
	27/01/2022	1.8	55		
	31/01/2022			1.1	0.18
	05/02/2022	2.9	2		
	08/02/2022			1.9	0.45
	19/02/2022	2.7	11		
	22/02/2022			-0.1	-0.1
2022-2023	26/10/2022	New flood season survey			
	01/11/2022	43.6 *	118		
	16/11/2022	0.1	2		
	21/11/2022			11.2	0.53
	26/12/2022	3.8	80		
	03/01/2023			0.3	0.04
	07/02/2023	7.7	116		
	09/02/2023			11.8	0.52
	14/03/2023	0.4	9		
	20/03/2023	0.4	6		
	29/05/2023	2.3 *	17		
	20/07/2023			3.9	0.02

טבלה 9.1. תוצאות המחקר בנחל דרגה. השיטפונות מסומנים בכחול והסקרים הפוטוגרמטריים באפור. לכל אירוע שיטפון מוצגים ספיקת השיא ונפח המים הכולל שזרמו בו. כאשר אירעו מספר שיטפונות בין שני סקרים עוקבים נעשה בעבודה זו שימוש בספיקת השיא הגבוהה ביותר שארעה בין הסקרים (מסומנת בכוכבית). לכל סקר פוטוגרמטרי (למעט סקר שנערך לפני תחילת עונת השיטפונות) מוצגים מאזן הסדימנט והתחתרות ממוצעת לאורך ה-thalweg מאז הסקר הקודם.

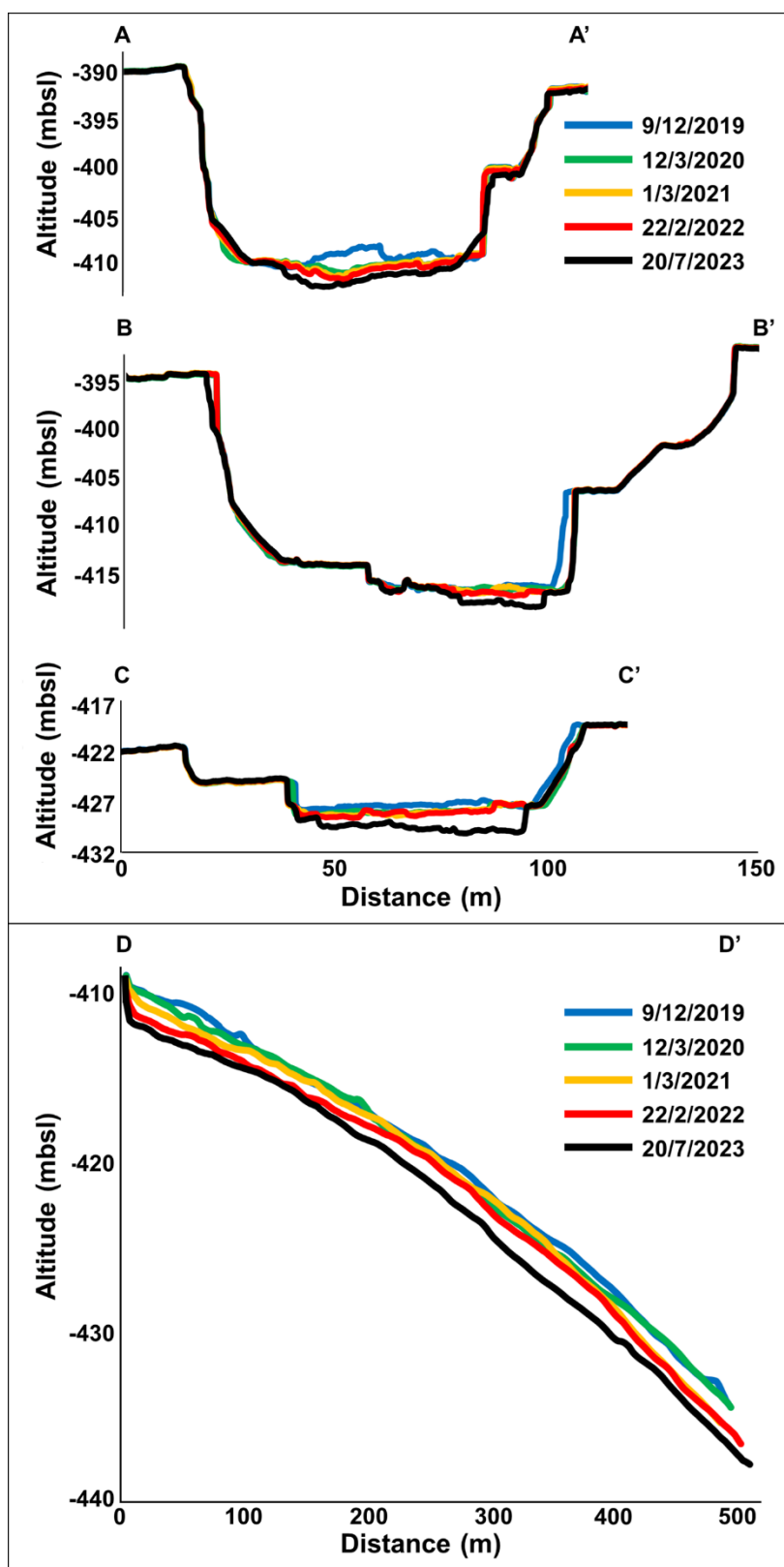
Season	Date	Peak discharge (m ³ /sec)	Flood water volume (10 ³ m ³)	Evacuated sediment volume (10 ³ m ³)	Average thalweg incision (m)
2019-2020	28/10/2019	New flood season survey			
	09/12/2019	1.3	8		
	18/12/2019			0.47	0.23
	05/01/2020	1.3	14		
	09/01/2020	4.9 *	118		
	12/01/2020			0.1	0.08
	18/01/2020	0.1	4		
	24/01/2020	1.8 *	16		
	05/02/2020			0	0.02
	25/02/2020	9.9	76		
	06/03/2020	64.8 *	228		
	13/03/2020	3.7	137		
	17/03/2020			4.18	0.11
2020-2021	05/12/2020	44.3	145		
	13/12/2020			3.35	0.74
	17/12/2020	0.2	3		
	04/02/2021	4.9	56		
	18/02/2021	27.8 *	419		
	01/03/2021			1.02	0.26
2021-2022	21/11/2021	37.0	171		
	23/12/2021			2.36	0.58
	27/01/2022	4.7	62		
	31/01/2022			0	0.06
	05/02/2022	0.4	5		
	08/02/2022			0	0
	19/02/2022	21.5	122		
	22/02/2022			0.11	0.17
2022-2023	26/10/2022	New flood season survey			
	02/11/2022	75.9	243		
	16/11/2022			3.45	0.52
	07/02/2023	7.7	122		
	09/02/2023			0.14	0.21
	14/03/2023	1.5	19		
	12/04/2023	3.1	62		
	28/05/2023	24.8 *	205		
	26/06/2023			0.49	0.17

טבלה 9.2. תוצאות המחקר בנחל ערוגות. השיטפונות מסומנים בכחול והסקרים הפוטוגרמטריים באפור. לכל אירוע שיטפון מוצגים ספיקת השיא ונפח המים הכולל שזרמו בו. כאשר אירעו מספר שיטפונות בין שני סקרים עוקבים נעשה בעבודה זו שימוש בספיקת השיא הגבוהה ביותר שארעה בין הסקרים (מסומנת בכוכבית). לכל סקר פוטוגרמטרי (למעט סקר שנערך לפני תחילת עונת השיטפונות) מוצגים מאזן הסדימנט והתחתרות ממוצעת לאורך ה-thalweg מאז הסקר הקודם.

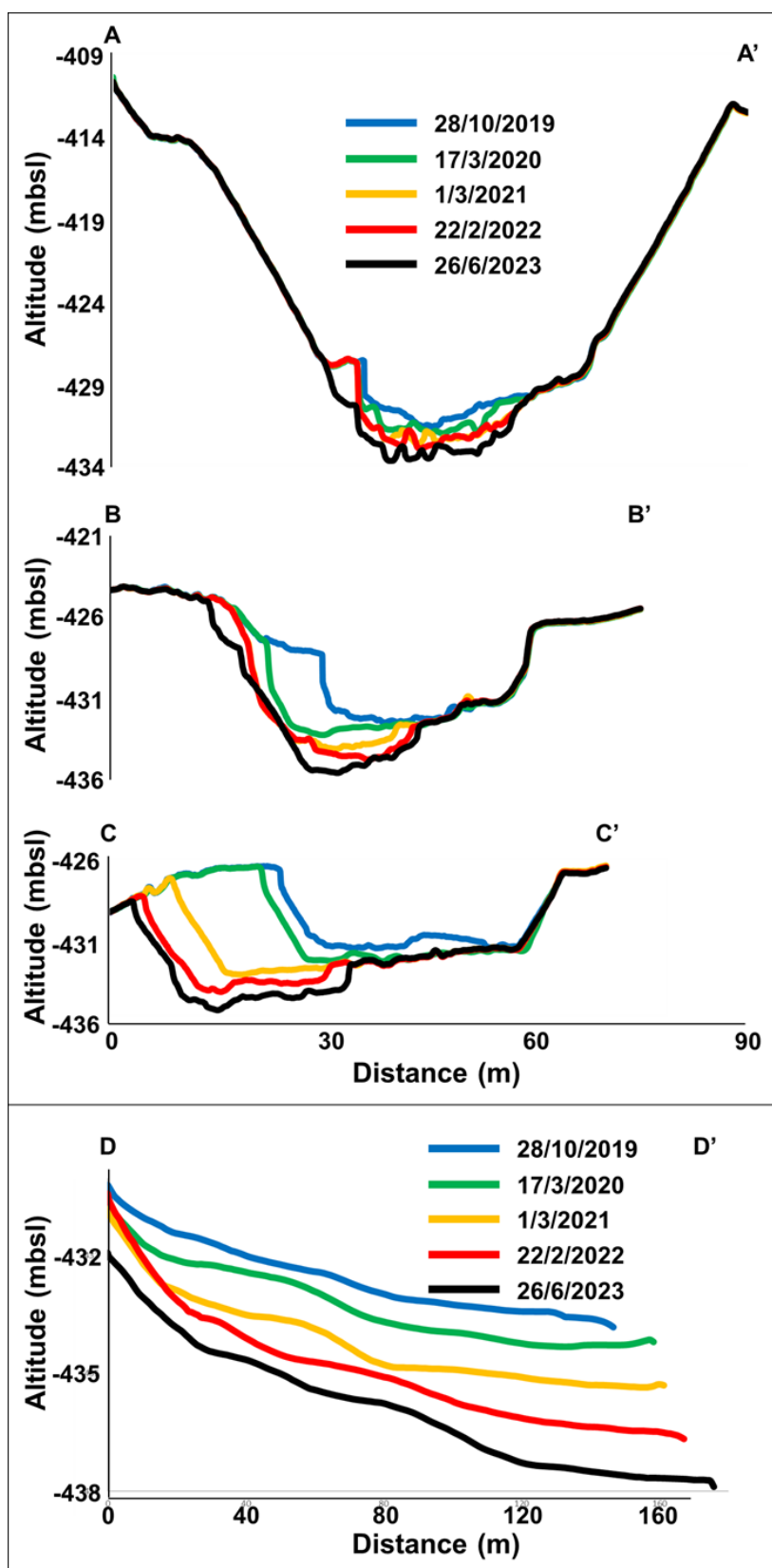
9.3.2 שינויים גיאומורפולוגיים

במהלך המחקר, נחל דרגה חווה מאזן סדימנט שלילי, עם 56,900 מ"ק סדימנט שהוסרו מקרקעית הנחל וגדותיו והועברו לים המלח. במקביל, גובה ה-thalweg של נחל דרגה ירד במוצע בכ-2.3 מ', בין חוף האגם לרמפה, מרחק של כ-510 מ' (איור 9.7) על מנת להשוות בין שני הנחלים חושבה גם ההתחתרות ב-125 המטרים התחתונים של נחל דרגה (המרחק בין שפך נחל ערוגות לרמפה שלו), ושיעורה בשנות המחקר היה 2.5 מ'. במהלך שנים אלו, שיפוע ה-thalweg הממוצע בנחל דרגה השתנה והיה בין הערכים 5.0-5.3%. פרופיל האורך של הנחל היה קמור (איור 9.7) ושיפועו ב-125 המטרים התחתונים היה בין הערכים 6.3-7.4%. בנחל ערוגות, מאזן הסדימנט בתקופת המחקר היה שלילי, עם 15,700 מ"ק שנלקחו לאגם, וגובה ה-thalweg ירד במוצע בכ-3.2 מ' (איור 9.8), בין השפך לרמפה (מרחק של כ-125 מ' כפי שצויין למעלה). שיפוע ה-thalweg הממוצע של נחל ערוגות היה 1.6-2.4%, ופרופיל האורך היה קעור (איור 9.8).

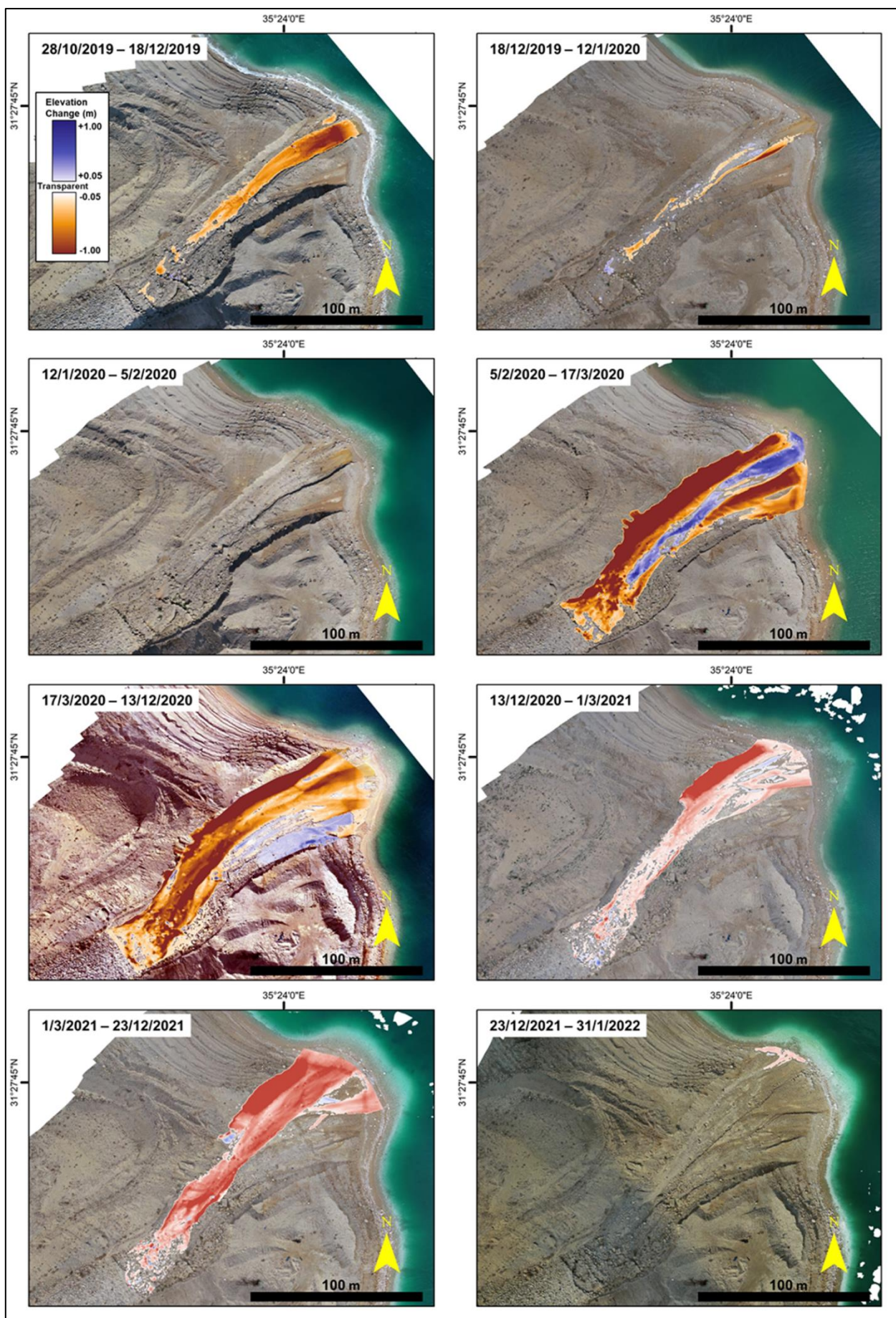
נפח הסדימנט שהוסר מקרקעית וגדות האפיק בנחל דרגה בין סקרים עוקבים נע בין אפס ל-19,900 מ"ק ; בנחל ערוגות הוסרו בין הסקרים אפס עד 4,180 מ"ק (טבלאות 9.1 ו-9.2, איורים 9.9 ו-9.10). ככלל, בנחל דרגה פונו נפחים גדולים משמעותית של סדימנט (חציון, בין-רבעון תחתון ובין-רבעון עליון של 1,900, 300 ו-6,300 מ"ק בהתאמה) מאשר בנחל ערוגות (חציון, בין-רבעון תחתון ובין-רבעון עליון של 100, 470 ו-2,360 מ"ק בהתאמה), (GLMM, $F_{(16)} = 54.921$, $P < 0.0001$). מעניין לציין שאירוע שיטפון אחד בנחל דרגה ב-19/2/2022 הסתיים במאזן סדימנט חיובי של 100 מ"ק. ירידת הגובה הממוצעת של thalweg נחל דרגה בין סקרים עוקבים היתה בין 0.02 ל-0.53 מ', בעוד שבנחל ערוגות שיעור הירידה נע בין אפס ל-0.74 מ' (טבלאות 9.1 ו-9.2, איורים 9.7 ו-9.8). ערכי הירידה בגובה החציוני, הבין-רבעוני התחתון והבין-רבעוני העליון עבור נחלי דרגה וערוגות היו 0.15, 0.02, 0.39 מ' ו-0.17, 0.08, 0.26 מ' בהתאמה. גם במשתנה זה השיטפון של ה-19/2/2022 בנחל דרגה הינו חריג – בסופו של שיטפון זה עלה הגובה הממוצע של ה-thalweg ב 0.1 מ'.

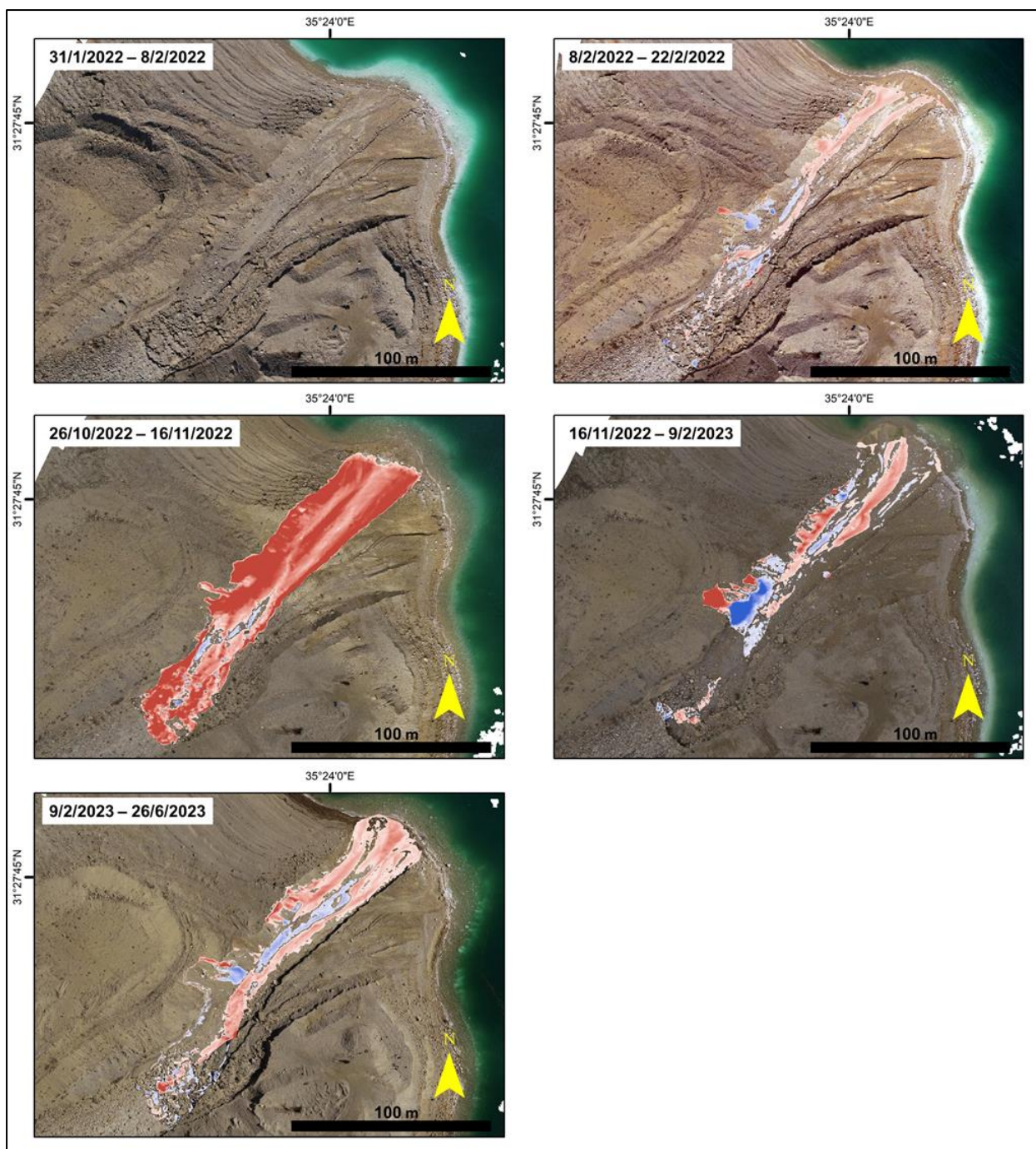


איור 9.7. חתכי רוחב (A-C) ופרופילי אורך (D) בנחל דרגה בסקרים שנערכו בתחילת המחקר ובסוף כל עונת שיטפונות. מיקום החתכים מסומן באיור 9.4.

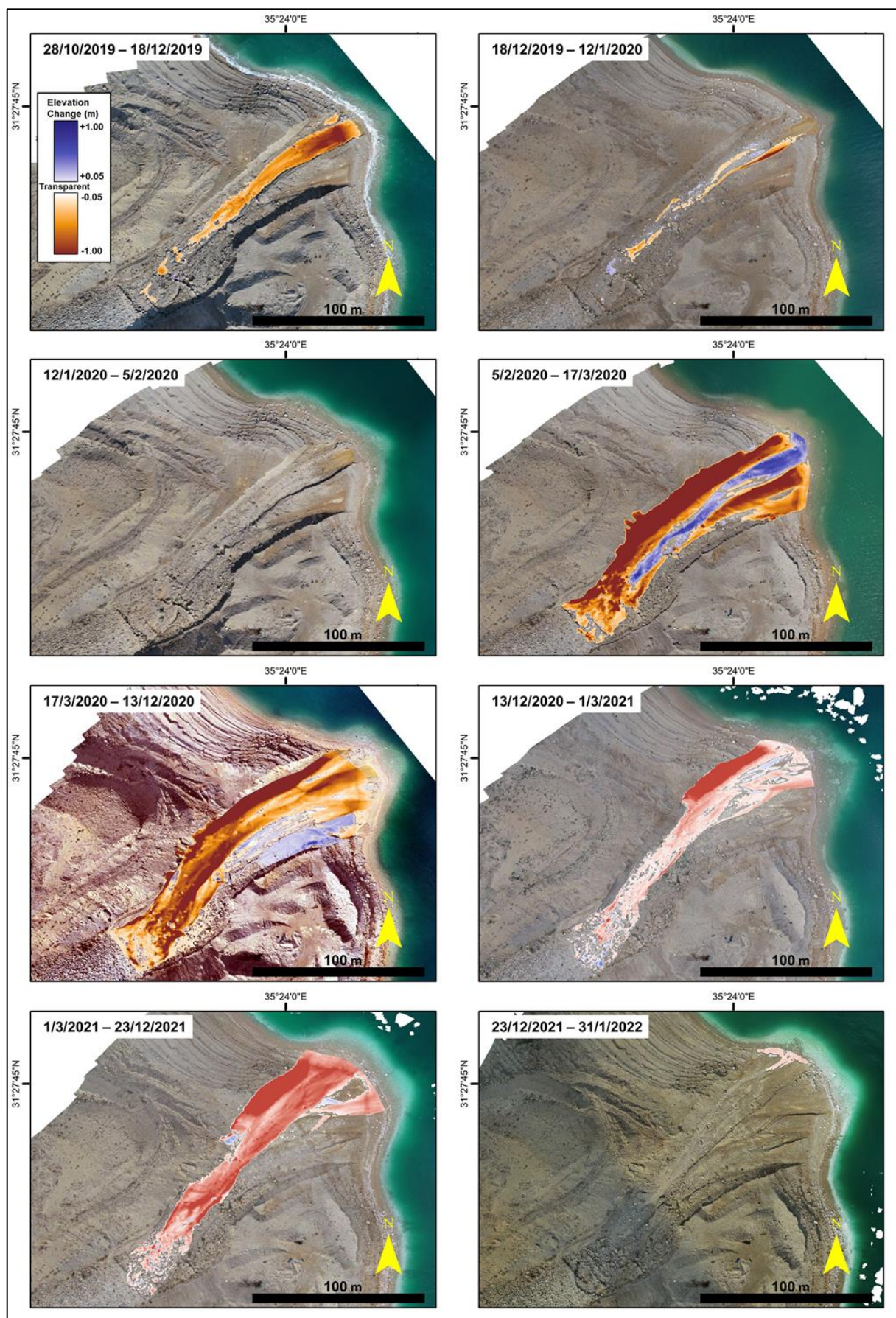


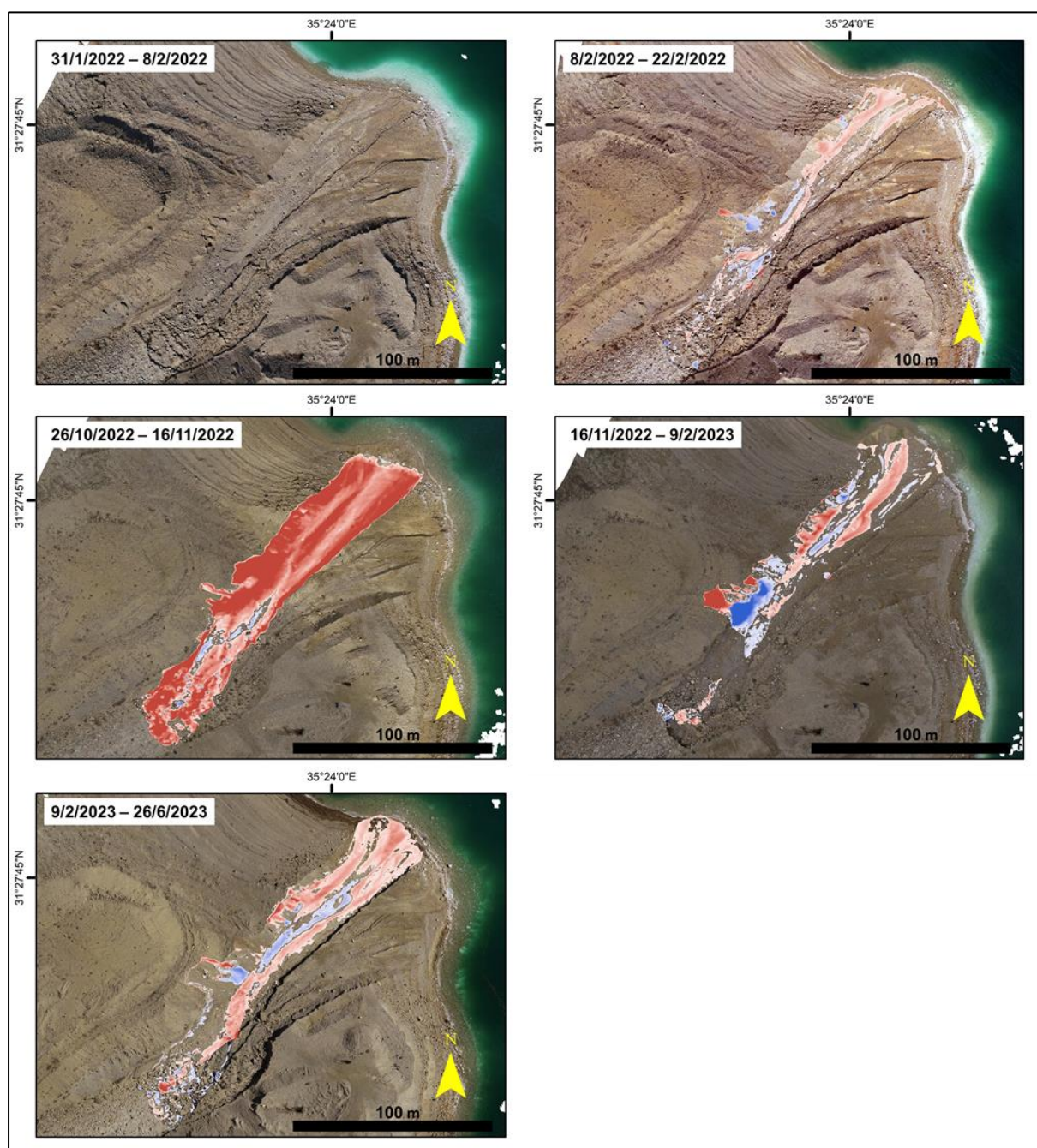
איור 9.8. חתכי רוחב (A-C) ופרופילי אורך (D) בנחל ערוגות בסקרים שנערכו בתחילת המחקר ובסוף כל עונת שיטפונות. מיקום החתכים מסומן באיור 9.6.





איור 9.9. מפות אורתופוטו של נחל דרגה, ועליהן שינוי הגובה בין סקרים עוקבים. מיקום המפה מסומן באיור 9.3. סקלת הצבעים מופיעה על גבי המפה הראשונה. תאריכי הסקרים כתובים על גבי המפות. מפת האורתופוטו היא מהסקר האחרון מבין השניים. צבע אדום מציין ירידה בגובה (התחתרות או קריסת גדות); צבע כחול מציין עלייה בגובה (השקעת סדימנט).





איור 9.10. מפות אורתופוטו של נחל ערוגות, ועליהן שינוי הגובה בין סקרים עוקבים. מיקום המפה מסומן באיור 9.5. סקלת הצבעים מופיעה על גבי המפה הראשונה. תאריכי הסקרים כתובים על גבי המפות. מפת האורתופוטו היא מהסקר האחרון מבין השניים. צבע אדום מציין ירידה בגובה (התחתרות או קריסת גדות); צבע כחול מציין עלייה בגובה (השקעת סדימנט).

9.3.3 ניתוח סטטיסטי

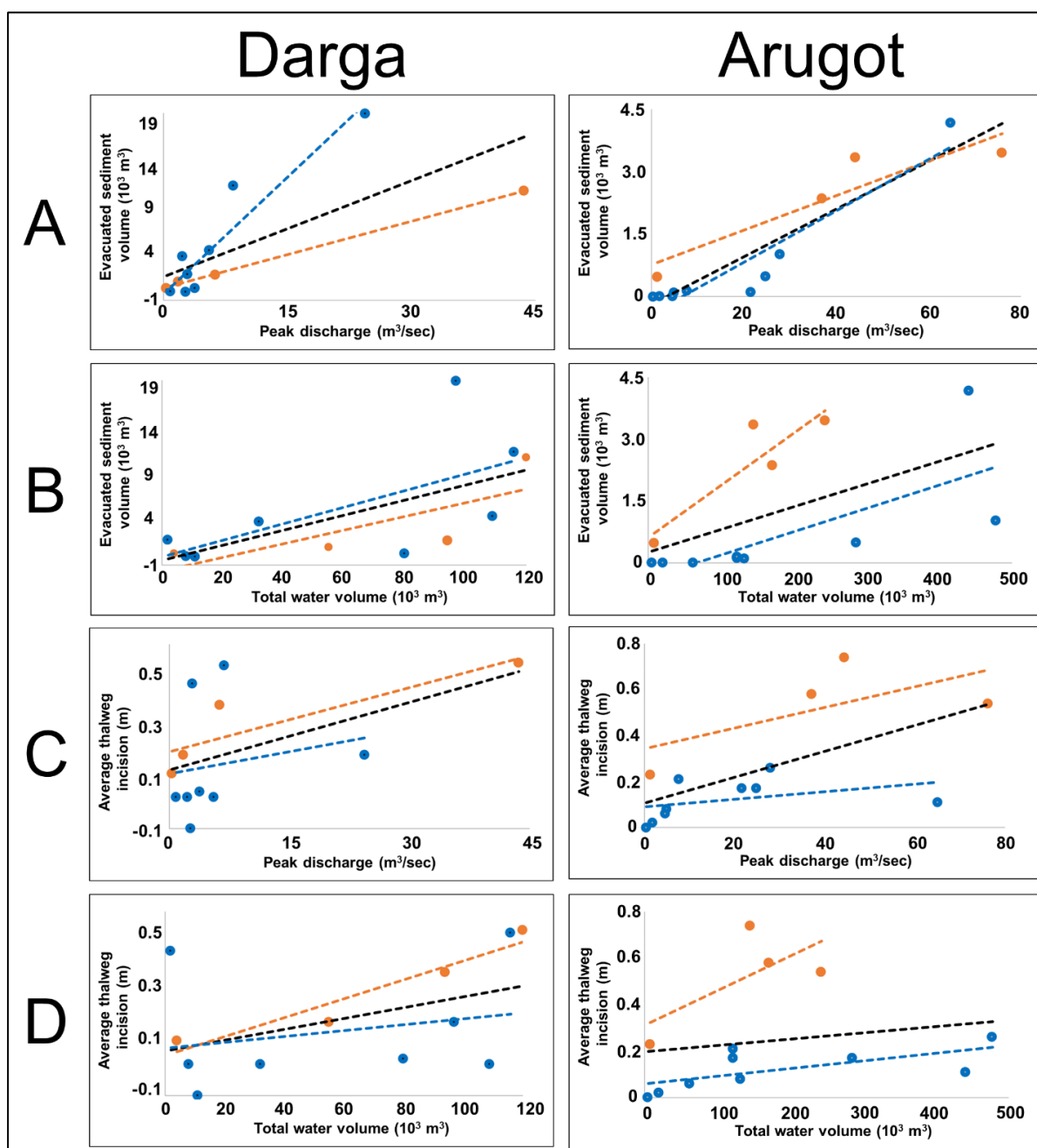
בניתוח הסטטיסטי נמצא כי ערך הטולרנטיות לספיקת השיא ולנפח המים הוא 0.594, וערכי ה-VIF הם 1.684, מה שמצביע על היעדר מולטי-קולינאריות משמעותית בין המשתנים במודל, כלומר העדר תלות בין ספיקת השיא ונפח המים. כתוצאה מכך, המודל הליניארי הכללי (GLM) שילב את שני המשתנים הללו.

הגורמים המשפיעים על מאזן הסדימנט בשיטפון

נמצא השפעה חיובית משמעותית וחזקה של ספיקת השיא על מאזן הסדימנט ($GLMM, F_{(16)} = 18.767, P = 0.001$), בעוד שלנפח המים הייתה השפעה, אם כי יחסית שולית ($GLMM, F_{(16)} = 4.416, P = 0.052$). ניתן לראות את הקשר בין עליה בספיקת השיא ונפח המים לבין מאזן הסדימנט באיור 9.11. תזמון השיטפונות לא השפיע באופן אחיד על שני הנחלים ($GLMM, F_{(16)} = 0.635, P = 0.437$); מאזן הסדימנט בנחל דרגה הושפע מעיתוי השיטפונות באופן משמעותי יותר מאשר נחל ערוגות (בחינת אינטראקציה בין נחל לתזמון, $GLMM, F_{(16)} = 18.732, P < 0.001$). בנחל דרגה השיטפונות המאוחרים בעונה היו מקושרים בפינוי מוגבר של סדימנט, בעוד בנחל ערוגות לא ניכר הבדל במאזן הסדימנט בין שיטפונות ראשונים למאוחרים יותר בעונה (איור 9.11).

הגורמים המשפיעים על ההתחתרות לעומק

תזמון השיטפון השפיע בצורה הבולטת ביותר על שיעור ההתחתרות בנחל ($GLMM, F_{(17)} = 4.928, P = 0.040$). בשיטפונות ראשונים ארעה התחתרות רבה יותר באופן משמעותי (חציון, בין-רבעוני תחתון ובין-רבעון עליון של 0.45, 0.22 ו-0.55 מ' התחתרות בין סקרים עוקבים, בהתאמה) מאשר מאוחרים יותר (0.08, 0.02 ו-0.18 מ', בהתאמה). בשני הנחלים (איור 9.11). לא נמצאה אינטראקציה בין התזמון לזהות הנחל ($F_{(17)} = 1.928, P = 0.183$), כלומר, בשני הזרמים הייתה אותה מגמה של התחתרות רבה יותר במהלך השיטפונות הראשונים. למרות שנראה שקיים קשר חיובי בין שיא הספיקה ונפח המים לשיעור התחתרות (איור 9.11), השפעה זו אינה מובהקת סטטיסטית (שיא ספיקה $GLMM, F_{(17)} = 0.238, P = 0.632$; נפח מים $GLM, F_{(17)} = 1.614, P = 0.221$).



איור 9.11. הקשרים בין המאפיינים של השיטפונות לבין התגובות הגיאומורפולוגיות בנחלים דרגה (עמודה שמאלית) וערוגות (עמודה ימנית). הקווים הכתום, כחול, ושחור הינם קווי מגמה המייצגים את האירועים השיטפוניים הראשוניים, והמאוחרים בכל עונה, ואת כלל האירועים בעונה. בהתאמה. בשורה A מוצג הקשר בין ספיקת שיא (ציר X) לבין נפח הסדימנט שפונה בין סקרים עוקבים (ציר Y); הנפח שפונה מוצג כערך חיובי ומציין למעשה מאזן סדימנט שלילי. בשורה B מוצג הקשר בין נפח המים שזרמו בנחל (ציר X) לבין לנפח הסדימנט שפונה בין סקרים עוקבים (ציר Y); גם כאן ערך חיובי מציין מאזן סדימנט שלילי. בשורה C מוצג הקשר בין ספיקת שיא (ציר X) לבין ההתחתרות הממוצעת ב *thalweg* בין סקרים עוקבים (ציר Y); מידת ההתחתרות מוצגת כערך חיובי, השקעה כערך שלילי. בשורה D מוצג הקשר בין נפח המים שזרמו בנחל (ציר X) לבין ההתחתרות הממוצעת ב *thalweg* בין סקרים עוקבים (ציר Y); גם כאן ערך חיובי מייצג תחתרות.

9.4 דיון

מחקר זה בחן את התגובה הגיאומורפולוגית של שני נחלי אכזב אלוביאליים, דרגה וערוגות, לירידת בסיס סחיפה מתמשכת במהלך ארבע שנים בהן מפלס ים המלח ירד בשיעור של מעל ארבעה וחצי מטרים. לנחלים אלו מאפיינים משותפים: תנאי הגבול התחתונים של שניהם משתנים בשיעור וקצב דומים, מכיוון שהם מתנקזים לאותו בסיס סחיפה יורד, ושיפוע הבתימטריה הנחשפת במורד שניהם הוא 15-20% (בן משה ולנסקי, 2020; 2022). יתרה מכך, שיפוע שיווי המשקל של שני הנחלים הוא 2-2.5%, וקרעיותם וגדותיהם

מורכבים מחומר אלוביאלי בעל לכידות, גודל גרגר והרכב ליתולוגי דומה (בן משה ולנסקי, 2020 ; 2022). הנחלים נבדלים זה מזה בתנאי הגבול העליונים, במיוחד בתכונות ההידרולוגיות של השיטפונות ותדירותם. הבדלים ברוחבי האפיק ובהתאמות הנדסיות שנעשו בהם, תורמים גם הם לשונות בין הנחלים. כתוצאה מכך, הנתונים שנאספו משני הנחלים מספקים תובנות לגבי הגורמים המשותפים המשפיעים על תגובתם הגיאומורפולוגית לירידת בסיס הסחיפה, ומצד שני מדגישים את הגורמים התלויים במאפיינים הייחודיים של כל נחל, ובתזמון השיטפונות בהם.

9.4.1 הגורמים המשפיעים על מאזן הסדימנט בשיטפון

ספיקת השיא בשיטפון

מצאנו שספיקת השיא היא המשתנה העיקרי שמשפיע על מאזן הסדימנט בשיטפון. עלייה בספיקה גורמת לעלייה בכוח הזרם (Petit et al., 2005) ולכן בעליה ביכולת הבלייה של הנחל (Dubinski and Wohl, 2013). הסיבה לכך היא שהעלייה בכוח הזרם מלווה בהגדלת מאמץ הגזירה שהמים מפעילים על קרקעית הנחל וגדותיו (לדוגמא; Talling and Sowter, 1998) כאשר מאמץ זה עולה על מאמץ הגזירה הקריטי הנחוץ לניתוק חלק מהקרקעית או גדות הנחל, מתרחשת בליה. מכאן, עלייה בספיקת השיא מקושרת ליעילות רבה יותר בהסרת סדימנט מקרקעית הנחל וגדותיו ביחס לשיטפונות עם ספיקות שיא נמוכות יותר, ולעליה ביכולת הובלת הסדימנט שהוסר אל בסיס הניקוז במורד. מצד שני, ברגע שחלוק התנתק מהקרקעית או הגדה, נדרש כוח זרם נמוך יותר על מנת להמשיך להוביל אותו בגרופת; מסיבה זו גם לאחר שיא הספיקה, כאשר מתרחשת ירידה בגל השיטפון, תרד אמנם יכולת הבליה של הנחל, אך לא תגרם בהכרח השקעה של הסדימנט המובל בערוץ והוא ימשיך להיות מפונה לים המלח (Hassan and Church (1991). מצאו במקטעי נחלים שאורכם מספר מאות מ' קורלציה בין ספיקת שיא של אירועים שיטפוניים לבין מרחק ההובלה של חלקים. אורך מקטעי הנחלים שנחקרו בעבודה הנוכחית מתאים לקטגוריה זו, ולכן בספיקות גבוהות גדלים הסיכויים שחלוק שנמצא בגרופת יובל עד לאגם.

על מנת שמאזן הסדימנט במקטע נחל מסוים יהיה שלילי, כמות החומר האלוביאלי שנלקחת מקרקעית הערוץ וגדותיו צריכה להיות גבוהה יותר מכמות החומר שמגיעה אל המקטע ממעלה האגן ומושקעת על גבי קרקעיתו. העובדה שרובם המוחלט של השיטפונות הסתיימו במאזן סדימנט שלילי מצביעה על כך שכמות הגרופת שהגיעה ממעלה אגני הניקוז של הנחלים הייתה נמוכה מקיבולת ההובלה של ספיקות השיא באירועים אלו (לדוגמא (Gao, 2011) והן יכלו להוביל סדימנט נוסף. למאזן שלילי זה יש שתי סיבות עיקריות, הגורמות להגדלת ה'גרעון' עם העלייה בספיקה:

(1) שיפוע קרקעית מקטעי הנחלים שנחקרו גבוה מהשיפוע במעלה הנחל. חשיפת הבתימטריה התלולה במוצא הנחלים, גרמה לעלייה בכוח הזרם, שהובילה לעלייה מקומית ביכולת המים לגרוף סדימנט ולכן לעלייה בקיבולת ההובלה. שיפוע הנחל, ובהתאמה קיבולת ההובלה, לא השתנו באזור שבמעלה הזרימה מהרמפות המלאכותיות, המהוות את הקצה העליון של אזור המחקר (בן משה ולנסקי, 2020). המשמעות היא שבלי קשר לגודל הספיקה, במקטע שמתחת לרמפות המים יכולים לגרוף יותר חומר אלוביאלי יחסית לכמות החומר המגיעה מהמעלה, ונגרמת התחתרות. על פי משוואה 1, ההשפעה של עלייה בשיפוע הנחל על כוח ההובלה בנחל הינה פרופורציונלית לספיקה) המגולמת במשתנה K במשוואה. (לכן, לספיקה גבוהה יותר יש קשר חיובי עם העלייה בהתחתרות הנגרמת עקב השיפוע המוגבר.

(2) תיעול הנחלים עקב ההתחתרות במניפות הדלתאיות. במקטעים שנחקרו, הנחלים דרגה וערוגות הינם נחלים מוגבלי הובלה; לעומת זאת כמעט כל אגן הניקוז במעלה הזרימה מאופיין בקניונים החתורים ב bedrock והנחלים הינם מוגבלי בלייה. נפח הגרופת באזורים מוגבלי הבלייה אינו תלוי ביכולת ההובלה של המים, אלא בכמות החומר האלוביאלי הזמין לסחיפה. בנחלים טבעיים, כאשר נחל יוצא מקניון bedrock אל אזור פתוח, שיווי המשקל בו נשמר עקב התפרסות הזרימה לצדדים, שגורמת לירידה בעומק המים ולכן לירידה בכוח הזרם. במקרים אלו קיבולת ההובלה יורדת בחדות (ראו משוואה 1) והופכת לנמוכה מהקיבולת במעלה הזרימה, ומתרחשת השקעה של מניפת סחף. ההשקעה גורמת לעלייה בשיפוע הערוץ, ולעלייה בקיבולת ההובלה של המים (משוואה 1), עד שהנחל מגיע לשיווי משקל. (Parker et al. 1988) טענו שתיעול ערוצי מניפות סחף גורם להתחתרות באפיקים. במקרה של המחקר הנוכחי, ההתחתרות שנבעה מחשיפת הבתימטריה יצרה תעלות חדשות החתורות בתשתית האלוביאלית של המניפה הדלתאית. רוחב הזרימה מוגבל בין גדות התעלות, שרוחבן דומה לרוחב הקניון באזור שהינו מוגבל בלייה, והזרימה אינה יכולה להתפרס לצדדים מעבר לגדות אלו; בהתאמה, כוח הזרם נשאר דומה לערכו באזור מוגבל הבלייה, אך מכיוון שהנחל הופך למוגבל הובלה ואין מחסור בחומר זמין לסחיפה מהקרעית והגדות מאזן הסדימנט הופך להיות שלילי. למעשה יש פה מנגנון משותף חיובי בו ההתחתרות ראשונית עקב ירידת בסיס סחיפה יוצרת גורם נוסף להתחתרות עקב תיעול הנחל. עלייה בספיקת המים לא תגדיל את כמות הסדימנט המגיעה מהאזור מוגבל הבלייה (מכיוון שלא תגדיל את כמות הגרופת), אך תגדיל את יכולת ההובלה באזור מוגבל ההובלה ולכן תגדיל את ה'גרעון' במאזן הסדימנט.

בנוסף להתחתרות, קריסת גדות תורמת חומר רב לגרופת בנחלים. קריסה זו יכולה להתרחש מגדות הנחל שבשוליו, אך גם משולי שרטונות במרכז הזרימה או מהקירות הגובלים בטרסות שאריות. כפי שתואר לעיל, על מנת להתחיל סחיפה של חומר אלוביאלי כגרופת, מאמץ הגזירה המופעל על החלוק צריך להיות גבוה מערך קריטי מסוים. כאשר מתרחשת קריסה של חומר אלוביאלי ישירות אל תוך הזרימה השיטפנית, מאמץ הגזירה הנדרש להובלת החלוקים במורד הנחל נמוך מהמאמץ הקריטי מכיוון שאין צורך לנתק את החלוק מן המצע בו היה מונח (Hooke 1979). תיאור שני תהליכים עיקריים האחראים לקריסה של גדות נחלים אלוביאליים - שחיקה ישירה של הגדות ע"י המים או הסדימנט שנסחף בהם, וגלישה עקב קריסה גרביטציונית. על פי מחברים אלו, השחיקה נשלטה בייחוד ע"י התכונות ההידרולוגיות של השיטפונות שהעיקרית בהן היא ספיקת השיא. קשר זה, בין ספיקת שיא לקריסת גדות תואם את ממצאי המחקר הנוכחי. במקביל, המשתנה העיקרי שמשפיע על הגלישות הוא תכולת הלחות בגדות, כאשר לחות גבוהה קושרת לגלישות רבות יותר. (Hooke, 1979) ישנה השפעה עקיפה של גובה המים בשיטפון, שהוא נגזרת של הספיקה, על תכולת הלחות בגדות; עליה בספיקה גורמת לעלייה בשטח החתך הרטוב. כתוצאה מכך תכולת הלחות עולה על פני שטח גדול יותר בגדות הנחלים, דבר שמעלה את ההסתברות שלאורך הנחל תתרחש קריסה.

נפח המים בשיטפון

ממצאים חשובים נוספים במחקר זה הם קיומו של קשר חיובי בין נפח המים בשיטפון לבין מאזן הסדימנט, אך גם העובדה שקשר זה שולי יחסית להשפעה של ספיקות השיא. בהעדר קשר מובהק בין נפח המים לבין ספיקות השיא, נפח המים בשיטפון מושפע ממשך האירוע. מכיוון שהשינויים הגיאומורפולוגיים במקטעי הנחלים הנחקרים מתרחשים כתוצאה מירידת בסיס הסחיפה הגורמת ליציאה של הנחל ממצב של שיווי משקל, ככל שהאירוע השיטפוני יותר ארוך לנחל יש יותר זמן להתחתר ו'לנסות' להתקרב למצב של שיווי

משקל חדש. בנוסף, ככל שגדות הנחל והשרטונות נמצאים במגע עם מי השיטפונות במשך פרק זמן ארוך יותר, יש למים זמן רב יותר לחדור אל הנקבובים שבין החלוקים בגדות, ותכולת הלחות בתוך הקירות האנכיים בנחל גדלה. כפי שהוסבר לעיל, העלייה בתכולת הלחות יכולה לגרום לקריסת גדות. בשיטפונות ארוכים קיימת אפשרות רבה יותר שקריסות אלו יתרחשו כאשר עדיין יש בנחל זרימה בעלת כוח זרם מספיק לגריפת החלוקים שנופלים מהגדה הקורסת. אם קריסת גדות מתרחשת כאשר הזרימה חלשה מכדי לגרוף את הסדימנט, או לאחר תום השיטפון, החלוקים מצטברים על גבי קרקעית הנחל ואינם משנים את מאזן הסדימנט באירוע.

תזמון השיטפון

העובדה שלנפח המים ולמשך השיטפון ישנה השפעה משנית על מאזן הסדימנט ביחס להשפעה של ספיקת השיא מצביעה על כך שעיצוב הגיאומטריה של הנחלים מושפע במיוחד ע"י אירועי קיצון, גם אם הם קצרים יחסית ובעלי זמן חזרה ארוך יחסית. במקרה של ים המלח, שיטפונות שמקורם בסופות טרופיות נוטים להיות בעלי ספיקות גבוהות יותר, בעוד שיטפונות שמקורם בשקעים ים תיכוניים נוטים להיות ארוכים יותר אך עם ספיקות נמוכות יותר (Dayan and Morin, 2006; Armon et al., 2019). אם כך, נראה שההשפעה של סופה טרופית על מאזן הסדימנט השלילי בנחלים גדולה מהשפעה של סופה שמקורה בשקע ים תיכוני. מכיוון שסופות מן הסוג הראשון מתרחשות בייחוד בחודשי המעבר בעוד סופות מן הסוג השני מתרחשות בייחוד בחודשי החורף (Armon et al., 2019) ניתן להניח שרוב פינוי הסדימנט מתרחש בחודשי הסתיו והאביב. אגני הניקוז של הנחלים דרגה וערוגות מאופיינים בשונות שנתית רבה באופי המשקעים. אמנם משך המחקר של ארבע שנים לא יכול לספק נתונים מספקים להוכחת קשר נסיבתי בין עונתיות למאזן הסדימנט, אולם גם בפרק זמן קצר זה ניתן להבחין במגמה זו. בנחל דרגה, שני השיטפונות בעלי ספיקת השיא הגבוהה ביותר אירעו בעונות המעבר – מרץ 2020 ונובמבר 2022. שני שיטפונות אלו, ביחד עם שיטפון שארע בעונת החורף (פברואר 2023) הם שלושת האירועים בהם מאזן הסדימנט היה השלילי ביותר. באופן דומה, ארבעת השיטפונות בעלי ספיקת השיא הגבוהה ביותר בנחל ערוגות אירעו בעונות המעבר – מרץ 2020, דצמבר 2020, נובמבר 2021 ונובמבר 2022. אלו הם גם האירועים בהם מאזן הסדימנט היה השלילי ביותר. ככל הנראה מכיוון שסופות טרופיות יכולות להתרחש גם בתחילת עונת השיטפונות וגם בסופה, לא נמצא קשר ברור בין מאזן הסדימנט לבין תזמון השיטפונות – האם השיטפון היה הראשון בעונה.

9.4.2 הגורמים המשפיעים על ההתחתרות בשיטפון

בניגוד למאזן הסדימנט, נמצא שהמשתנה העיקרי שהשפיע על ההתחתרות הוא התזמון. ההסבר לכך טמון בפרופיל האורך של הנחל בתחילת העונה השיטפנית. רוב ירידת מפלס ים המלח מתרחשת בתקופה היבשה והחמה שבין העונות השיטפניות) לנסקי ודנטה 2015. (Enzel et al., 2022, במהלך תקופה זו מתרחשת מירב הנסיגה של קו החוף ונחשפת הבתימטריה התלולה במוצא הנחלים. שיפוע בתימטריה זו מכתוב למעשה את שיפוע מקטע הנחל החדש שנוצר באזור השפך לאגם, ויוצר נקודת נקע עליה יזרום השיטפון הראשון בעונת השיטפונות. כפי שהוסבר בסעיף 1.2, נקודת הנקע נסוגה במעלה הזרימה, תוך כדי הקטנת השיפוע התלול במורד; קצבי ההתחתרות ונסיגת נקודת הנקע דועכים מעריכית עם הזמן (Begin et al., 1981). מסיבות אלו, שיעור ירידת גובה הקרקעית בשיטפון הראשון הינו גדול יחסית לשיטפונות מאוחרים יותר בעונה. ניתן לראות שקיים קשר חיובי בין ספיקות השיא ונפחי המים בשיטפונות לשיעור ההתחתרות, אך קשר זה אינו מובהק. ייתכן שמאגר נתונים גדול יותר היה מאפשר למצוא קשר כזה, אך נראה שלאירועים סטוכסטיים כתזוזת שרטונות וקריסת גדות יש השפעה רבה על פרופיל האורך של הthalweg

שהינו דו מימדי. בשונה מכך, מאזן הסדימנט הוא משתנה תלת מימדי, לכן תנועה לטרלית של סדימנט לא משנה אותו וה'רעש' שנגרם ע"י אותם ארועים סטוכסטיים לא מפריע למציאת הקשר בין ספיקות שיא, נפח מים, ומאזן הסדימנט.

9.4.3 משמעות הממצאים בהקשר של שינויי אקלים ושינויים מלאכותיים בנגר עילי

למסקנות המחקר המוצג כאן יש השלכות חשובות על תכנון תשתיות בנחלים אלוביאליים בהקשר של שינויי אקלים ו/או כיסוי הקרקע בחומרים אטימים (גגות, אספלט), גם בנחלים אשר אינם מתנקזים לבסיס סחיפה יורד. בתרחיש בו שינוי אקלים בישראל יכלול ירידה בכמות המשקעים ואירועי הגשם, אך עלייה בעוצמות הגשם, (Armon et al., 2022) ישנה סבירות גבוהה שספיקות השיא השיטפוניות יגדלו, ועל כך מצטרפת המגמה של הגדלת שטחים תורמי – נגר (גגות, אספלט). במקרים אלו, הנחלים יעברו התאמה גיאומורפולוגית; שיפוע שיווי המשקל של הנחלים ירד והם יתחתרו) לדוגמא (Wang et al., 2018) במקביל, מאמצי הגזירה המוגברים שיופעלו על הגדות, יובילו לקריסת גדות ולהתרחבות האפיקים, (Inoue et al., 2020) שינויים אלו יגרמו לתגובה מורכבת מכיוון שקריסת הגדות יכולה לגרום לשינויים בפיתוליות, וליצירת שרטונות שישנו את אופי הזרימה ובכך למשוב חיובי להמשך שינויים בנחל. (Zhao et al., 2021) בסופו של דבר העלייה ברוחב הזרימה תוביל לירידה בגובה המים ולכן לירידה בכוח הזרם ומאמצי הגזירה, עד שהנחל יגיע למצב של שיווי משקל חדש.

שינויים ביחס בין ספיקת המים לספיקת הסדימנט המגיעות ממעלה האגן יכולים לגרום לתגובות גיאומורפולוגיות מורכבות נוספות. אספקת הסדימנט לגרופת בנחלים מוגבלי בלייה מגיעה ברובה מהמדרונות שמעל האפיקים, והיא גורם המגביל את כמות החומר הזמין לגריפה, ובהתאמה את ספיקת הסדימנט. בנחל מסוג זה ספיקת הגרופת היא לעיתים רבות נמוכה מקיבולת ההובלה של המים. מסיבה זו, עלייה בספיקת המים בנחלים מוגבלי בלייה לא תוביל בהכרח לעלייה דומה בספיקת הסדימנט המובל למורד הזרימה. כאשר במורד הנחל קיים מקטע מוגבל הובלה, קיבולת ההובלה המוגדלת של המים תגרום לגריפת סדימנט מהקרקעית והגדות של מקטע זה, דהיינו להתחתרות והתרחבות הערוצים. מצד שני, בנחלים מוגבלי בלייה שתחומים בין גדות תלולות, עלייה בעוצמות הגשם יכולה לגרום לעלייה ניכרת באספקת הסדימנט עקב התגברות עוצמת ותדירות אירועי גלישות (DeLisle, and Yanites, 2023) ולהשקעתו במורד. מהסיבות המוצגות לעיל, יש לקחת בחשבון ההתכנות של שינויים גיאומורפולוגיים עתידיים גם בנחלים שאינם מתנקזים לים המלח, כאשר עוסקים בתכנון תשתיות בנחלים אלוביאליים בארץ.

9.4.4 פוטוגרמטריה באמצעות רחפן ככלי פורץ דרך לעבודה גיאומורפולוגית

בנוסף לתרומת המחקר הנוכחי להבנת ההשפעות הגיאומורפולוגיות של ירידת בסיס סחיפה על נחלים אלוביאליים, עבודה זו הראתה את היעילות של פוטוגרמטריה המבוססת על מיפוי באמצעות רחפן, והדגישה את היתרונות שלה מבחינת זמן ועלות. היכולת ליצור במהירות אורתופוטו ומפות גבהים ברזולוציה גבוהה זמן קצר לאחר אירוע שיטפוני, ללא צורך בסיוע מקצועי חיצוני, סיפקה את הגמישות החיונית למחקר שטח מסוג זה. המחקר הנמוך יחסית של רחפנים ותוכנות לעיבוד המידע הינו פריצת דרך המאפשרת ביצוע משימות שבעבר דרשו משאבים גדולים יותר באופן משמעותי.

- בן משה, ל., לנסקי, נ., 2020, התרחקות מתגברת של נחלי ים המלח משיווי משקל והמלצות לתכנון תשתיות בתנאים משתנים, דוח מכון גיאולוגי GSI/27/2020.
- בן משה, ל., לנסקי, נ., 2022, עקרונות גיאומורפולוגיים בסיסיים להתערבות הנדסית בשיפוע נחלים אלוביאליים : דוגמאות מאזור ים המלח, דוח מכון גיאולוגי GSI-12-2022.
- Adams, K.D., 2012. Response of the Truckee River to lowering base level at Pyramid Lake, Nevada, based on historical air photos and LiDAR data. *Geosphere*, 8(3), pp.607-627.
- Armon, M., Marra, F., Enzel, Y., Rostkier-Edelstein, D., Garfinkel, C.I., Adam, O., Dayan, U. and Morin, E., 2022. Reduced rainfall in future heavy precipitation events related to contracted rain area despite increased rain rate. *Earth's Future*, 10(1), p.e2021EF002397.
- Armon, M., Morin, E., Enzel, Y., 2019, Overview of modern atmospheric patterns controlling rainfall and floods into the Dead Sea: Implications for the lake's sedimentology and paleohydrology, *Quaternary Science Reviews*, 216, pp.58-73.
- Autin, W.J., Aslan, A., 2001. Alluvial pedogenesis in Pleistocene and Holocene Mississippi River deposits: effects of relative sea-level change. *Geological Society of America Bulletin* 113, 1456–1466.
- Bagnold, R.A., 1973. The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 332(1591), pp.473-504.
- Bagnold, R.A., 1977. Bed load transport by natural rivers. *Water resources research*, 13(2), pp.303-312.
- Begin, Z. E. B., 1978, Application of a diffusion-erosion model to alluvial channels which degrade due to base-level lowering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13(6), 487-500.
- Begin, Z.B., Meyer, D.F., Schumm, S.A., 1981, Development of longitudinal profiles of alluvial channels in response to base-level lowering, *Earth Surface Processes and Landforms*, 6, 49-68.
- Ben Moshe, L., Haviv, I., Enzel, Y., Zilberman, E., Matmon, A., 2008, Incision of alluvial channels in response to a continuous base level fall: field characterization, modeling, and validation along the Dead Sea, *Geomorphology*, 93(3-4), 524-536.
- Bookman, R., Enzel, Y., Agnon, A., Stein, M., 2004, Late Holocene lake levels of the Dead Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 116(5-6), 555-571.
- Bonneau, P.R., Snow, R.S., 1992. Character of headwaters adjustment to base level drop investigated by digital modeling. *Geomorphology* 5, 475–487.
- Born, S.M., Ritter, D.F., 1970. Modern terrace development near Pyramid Lake, Nevada, and its geological implication. *Geological Society of America Bulletin* 81, 1233–1242.
- Bowman, D., 1988, The declining but non-rejuvenating base level- the Lisan lake, the Dead Sea area, Israel, *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 239-249.
- Bowman, D., 2023. Base-level Impact: A Geomorphic Approach. Springer Nature, 154p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-24994-5>.
- Bowman, D., Svoray, T., Devora, S., Shapira, I., Laronne, J.B., 2010. Extreme rates of channel incision and shape evolution in response to a continuous, rapid base-level fall, the Dead Sea, Israel. *Geomorphology*, 114(3), pp.227-237.
- Dayan, U., Morin, E., 2006, Flash flood-producing rainstorms over the Dead Sea: A review, in Enzel, Y., Agnon, A., and Stein, M., eds., *New frontiers in Dead Sea paleoenvironmental research: Geological Society of America Special Paper* 401, p. 53–62, doi: 10.1130/2006.2401(04).

- Dente, E., Lensky, N.G., Morin, E., Enzel, Y., 2021. From straight to deeply incised meandering channels: Slope impact on sinuosity of confined streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(5), pp.1041-1054.
- Dente, E., Lensky, N.G., Morin, E., Grodek, T., Sheffer, N.A., Enzel, Y., 2017, Geomorphic response of a low-gradient channel to modern, progressive base-level lowering: Nahal HaArava, the Dead Sea. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(12), pp.2468-2487.
- Dubinski, I.M., Wohl, E., 2013, Relationships between block quarrying, bed shear stress, and stream power: A physical model of block quarrying of a jointed bedrock channel, *Geomorphology*, 180, pp.66-81.
- Eyal, H., Dente, E., Haviv, I., Enzel, Y., Dunne, T., Lensky, N. G., 2019, Fluvial incision and coarse gravel redistribution across the modern Dead Sea shelf as a result of base-level fall. *Earth Surf. Process. Landforms*, 44: 2170–2185. <https://doi.org/10.1002/esp.4640>.
- Enzel, Y., Mushkin, A., Groisman, M., Calvo, R., Eyal, H., Lensky, N., 2022, The modern wave-induced coastal staircase morphology along the western shores of the Dead Sea, *Geomorphology*, 408, 108237.
- Gao, P., 2011, An equation for bed-load transport capacities in gravel-bed rivers, *Journal of Hydrology*, 402(3-4), pp.297-305.
- Gardner, T.W., 1983. Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive, homogeneous material. *Geological Society of America Bulletin*, 94(5), pp.664-672.
- Goldsmith, Y., Cohen, O., Stein, M., Torfstein, A., Kiro, Y., Kushnir, Y., Bartov, Y., Ben Moshe, L., Frumkin, A., Lensky, N., Keinan, J., Gonen, L., Enzel, Y., 2023, Holocene humid periods of the Levant—evidence from Dead Sea lake-levels, *Quaternary Science Reviews*, 318, 108312.
- Gomez, B., Church, M., 1989. An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 25(6), pp.1161-1186.
- Gomez, B., 2022. The efficiency of the river machine. *Geomorphology*, 410, p.108271.
- Harvey, A.M., 2002, The role of base-level change in the dissection of alluvial fans: case studies from southeast Spain and Nevada, *Geomorphology*, 5, 67-87.
- Hooke, J.M., 1979, An analysis of the processes of river bank erosion. *Journal of hydrology*, 42(1-2), pp.39-62.
- Kleinbans, M.G., 2005. Autogenic cyclicity of foreset sorting in experimental Gilbert-type deltas. *Sedimentary Geology*, 181(3-4), pp.215-224.
- Lensky NG, Dvorkin Y, Lyakhovsky V, Gertman I, Gavrieli I, 2005, Water, salt, and energy balances of the Dead Sea, *Water Resources Research* 41: 1–13. <https://doi.org/10.1029/2005WR004084>.
- Lensky, N., Dente, E., 2015, The hydrological processes driving the accelerated Dead Sea level decline in the past decades, *Geological Survey of Israel Report*.
- McPherson, J. G., Shanmugam, G., Moiola, R. J., 1987, Fan-deltas and braid deltas: varieties of coarse-grained deltas, *Geological Society of America Bulletin*, 99(3), 331-340.
- Montgomery, D.R., Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), pp.596-611.
- Muto, T., Steel, R.J., 2004. Autogenic response of fluvial deltas to steady sea level fall: implications from flume-tank experiments. *Geology* 32, 401–404.
- Nemec, W., 1990, Aspects of sediment movement on steep delta slopes, In: *Coarse-Grained Deltas* (Ed. by A. Colella and D. B. Prior), Spec. Publ. int. Ass. Sediment., 10 , 29-73.
- Nemec, W., Steel, R. J., 1988, What is a fan delta and how do we recognize it, *Fan Deltas: sedimentology and tectonic settings*, 3(13), 231-248.

- Parker, G., Paola, C., Whipple, K.X., Mohrig, D., 1998, Alluvial fans formed by channelized fluvial and sheet flow. I: Theory, *Journal of Hydraulic engineering*, 124(10), pp.985-995.
- Petit, F., Gob, F., Houbrechts, G., Assani, A.A., 2005, Critical specific stream power in gravel-bed rivers, *Geomorphology*, 69(1-4), pp.92-101.
- Posamentier, H.W., Allen, G.P., 2000. Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications. Society for Sedimentary Geology (SEPM). *Concepts in Sedimentology and Paleontology* 7.
- Posamentier, H.W., Allen, G.P., James, D.P., Tesson, M., 1992, Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance, *AAPG bulletin*, 76(11), pp.1687-1709.
- Salomon, R., 2016. Evolution of longitudinal profiles of gravel-bed channels in response to non-steady flow regime. MSc thesis, Institute of Earth Sciences, Program of Hydrology and water resources, The Hebrew University of Jerusalem (In Hebrew).
- Schumm, S.A., Mosley, M.P., Weaver, W.E., 1987, *Experimental Fluvial Geomorphology*. Wiley, New York. 413 pp.
- Schumm, S.A., 1993. River response to base level change: implication for sequence stratigraphy. *Journal of Geology* 101, 279–294.
- Shachanovitz-Firtel, Y., Bowman, D., 1998. The morphologic effectiveness of the Dead Sea base level fall. Israel Ministry of Infrastructure. Earth Sciences Administration Report. (in Hebrew) 60 pp.
- Talling, P.J., Sowter, M.J., 1998, Erosion, deposition and basin-wide variations in stream power and bed shear stress, *Basin Research*, 10(1), pp.87-108.
- Wang, J., Song, C., Reager, J.T., Yao, F., Famiglietti, J.S., Sheng, Y., MacDonald, G.M., Brun, F., Schmied, H.M., Marston, R.A., Wada, Y., 2018, Recent global decline in endorheic basin water storages, *Nature geoscience*, 11(12), pp.926-932.
- Whipple, K.X., Parker, G., Paola, C., Mohrig, D., 1998, Channel dynamics, sediment transport, and the slope of alluvial fans: experimental study, *The Journal of geology*, 106(6), pp.677-694.
- Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., Wang, J., Crétaux, J.F., Wada, Y., Berge-Nguyen, M., 2023, Satellites reveal widespread decline in global lake water storage, *Science*, 380(6646), pp.743-749.

10. הרחפת סדימנט על ידי גלים וזרמים מונעי רוח לאורך חופי ים המלח

איל, ח.^{1,2}, יואב, ס.¹, אקרמ, מ.³, אנזל, י.², לנסקי, נ.^{1,2}

¹ המכון הגיאולוגי

² המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים

³ המחלקה להנדסת מכונות, אוניברסיטת קליפורניה בסנטה ברברה, ארה"ב

10.1 תקציר

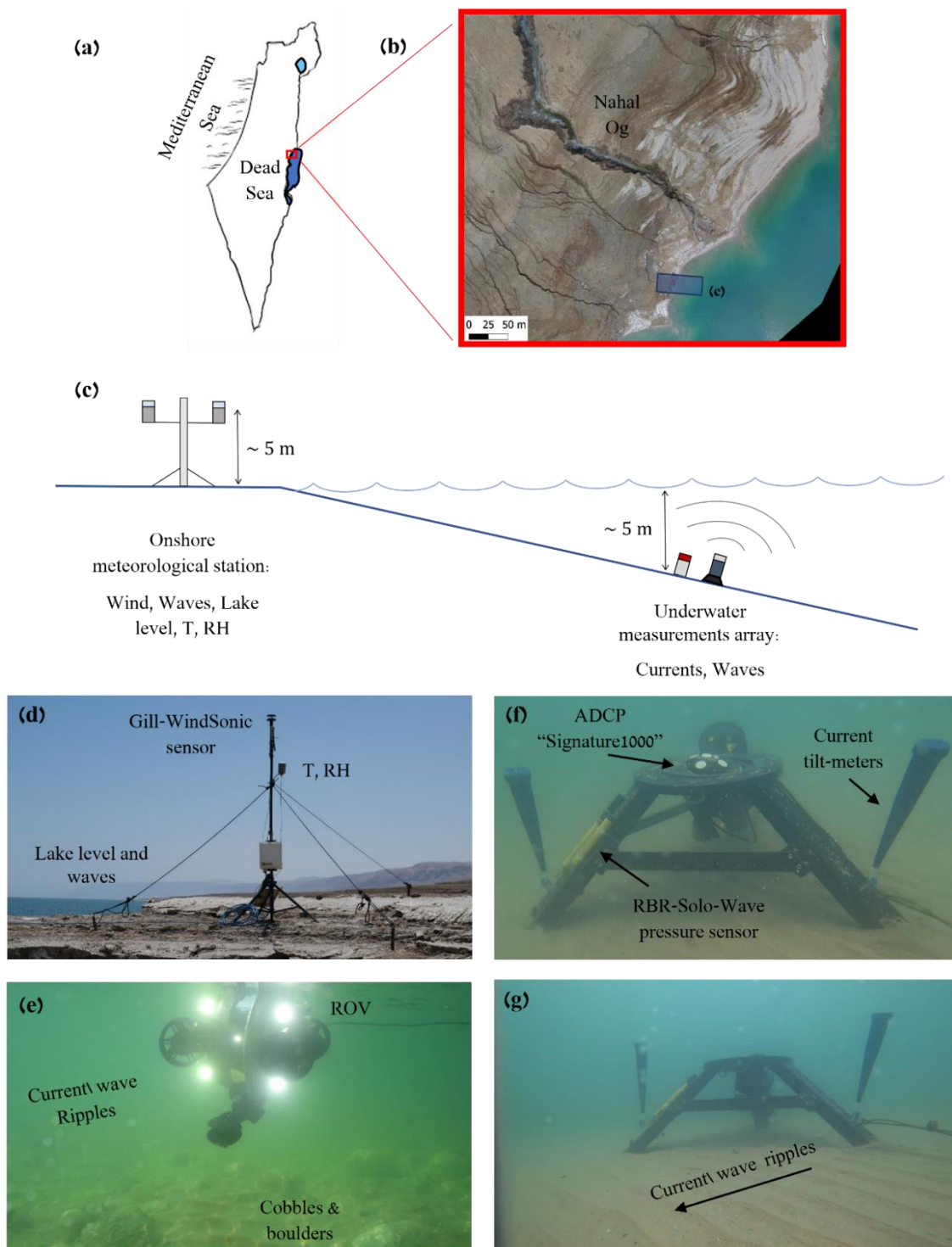
עבודה זו מציגה מחקר ראשוני בנושא הרחפת סדימנט דק-גרגר על ידי גלים וזרמים תחת משטר רוח מדוד ברזולוציה גבוהה, על בסיס תצפיות ישירות באזור החופי של ים המלח, לצד ניתוח פיזיקלי. הקמנו מערך מדידה שלם, שמודד את מעבר התנע מהמחולל, היא הרוח, דרך יצירת גלים וזרמים, כולל פרופיל אנכי של הזרמים ועכירות המים, וכלה בתצפיות על הסדימנטציה הפעילה של הגרגרים הדקים באמצעות רובוט תת ימי. את התצפיות ניתחנו במסגרת של משוואות שימור המסה והתנע, משוואות נאוויה-סטוקס והרציפות, ומשוואות ההובלה (דיפוזיה-אדווקציה). הניתוח הוא עדיין ראשוני, אך מציג את המשוואות ופתרוןן; הייתרון בגישה זו הוא האפשרות להכללה והבנה עמוקה של התהליכים שמובילים מנשיבת הרוח במהלך מערכות מזג אויר אנרגטיות, דרך מעבר התנע בעמודת המים עד הרחפת הסדימנט בקרקעית.

10.2 הקדמה

זרמים וגלים מונעי רוח נוצרים בגופי מים על ידי כוחות גזירה שמפעילה הרוח הנושבת על פני המים. תהליך זה מיצר מעבר אנכי של תנע ואנרגיה (Witten and Thomas, 1976), שדועך עם עומק המים (Jalil et al., 2019). זרמים המגיעים לקרקעית מפעילים כוחות גזירה על הסדימנט הדק (סילט וחרסית), מרחיפים את הסדימנט המוסע עם הזרמים, תוך נטיית החלקיקים לשקוע חזרה לקרקעית. הרחפת סדימנט באופן זה דומיננטית בסביבות מים רדודות ($<15\text{m}$) (Qin et al., 2006; Stone, 2011). הבנת המעבר של התנע מהרוח לעמודת המים עד להרחפת והשקעת הסדימנט בקרקעית, היא קריטית בהבנת הדינמיקה של תהליכים סדימנטריים, גיאומורפיים ואקולוגיים בסובב החופי (Arfi et al., 1993; Bloesch, 1995).

מחקרים קודמים הראו קשר ישיר בין מהירות וכיוון הרוח לבין יצירת גלים עבור רוחות במהירות $>4\text{ m s}^{-1}$ (Jalil et al., 2019).¹ זרמים שנוצרו בפני המים הראו כיווניות התואמת את כיווניות הרוח וכן התאמה לשינויי עוצמת הרוח ולעוצמת הזרם שנמדד. לעומת זאת, זרמים בעומק גדול יותר לא בהכרח תאמו את משטר הרוחות בפני המים הן בעוצמה והן בכיוון (Li et al., 2017). למרות שקיימים מספר מחקרים בתחום שבוצעו באגמים רדודים ומתוקים, התפתחות זרמים והרחפת סדימנט בזמן סופה עם עומק עמודת המים בהשפעת רוחות עוצמתיות ($>10\text{ m s}^{-1}$), לא נחקרה. בנוסף, התרומה של הזרמים להרחפת סדימנט הנח על הקרקעית לא כומתה, ובוודאי שלא בגופי מים היפר-סליניים שצפיפותם וצמיגותם גבוהה מאד. בים המלח, Nehorai et al. (2013) הראו באמצעות חישה מרחוק ומדידות בקרבת החוף את הקשר בין רוח וגלים לעכירות בפני המים. עבודתם מראה שבעזרת תצפיות נוספות, יש סיכוי לכימות טוב יותר. יחד עם זאת הם לא מדדו זרמים ולא קישרו מכנית בין הרוח המחוללת למעברי התנע בעמודת המים והרחפת הסדימנט בקרקעית.

בעבודה זו, אנו משתמשים במדידות ישירות של רוח, גלים וזרמים שנמדדו בזמן סופות חורף בים המלח (איור 10.1) במטרה (1) לכמת את הקשר ומעברי התנע בין רוחות, גלים, זרמים והרחפת הסדימנט באגם ההיפר סליני, ובהמשך (2) לקשור את הבנת התהליכים הללו לפיענוח חתך הסדימנטים הרגרסיבי המצטבר באגן ים המלח בהשפעת ירידת המפלס המהירה בקצב של $>1\text{m y}^{-1}$ בעשורים האחרונים (Lensky et al., 2005). תצפיות השדה נאספו בשפך נחל אוג לים המלח (איור 10.1a-b) בזמן סופות חורף שהן משמעותיות ביותר ביצירת זרמים וגלים עוצמתיים באגם (Eyal et al., 2023). הנתונים מתבססים על עבודת מחקר שבחנה את התפתחות הנחל והובלת הסדימנט הגס בו (חלוקי נחל) בתגובה לירידת מפלס (Eyal et al., 2019) וכן את ההובלה והמיון של החלוקים לאורך חופי האגם נסוג (Eyal et al., 2021), תחת המאלצים ההידרו-אקלימיים המקשרים בין שני מסועי הסדימנט הללו (Eyal et al., 2023). דינמיקת הזרמים בסביבה החופית והרחפה והובלה של הסדימנטים הדקים כמו סילטים וחרסיות לא נבחנה במסגרת העבודות הקודמות ומהווה השלמה של הבנה וכימות התהליכים הסדימנטריים הבסיסיים במערכת הנחלית, החופית והלימנולוגית ובמיוחד פיזור ומיון של סדימנט באגן ההשקעה. לתובנות הללו חשיבות רבה בפיענוח והבנה של ממצאים פליאולימנולוגיים ושל מחשופים וחתכים סדימנטריים הנחשפים בים המלח בסביבה העכשווית (e.g., Sirota et al., 2021) והקדומה יותר (e.g., Neugebauer et al., 2016), עבורם אין מידע מתצפיות ישירות לגבי התהליכים שיוצרים את הלמינות הדטריטיות (Ben Dor et al., 2019) הנפוצות בחתכים הללו.



איור 10.1: אתר המחקר, מערך המחקר ומכשור המדידה. (a) מפת מיקום של ים המלח. (b) תצלום אוויר של אתר המחקר בשפך נחל אוג ים המלח. (c) איור סכמטי של מערך המחקר שהוצב במיקום המסומן ב b. (d) התחנה המטאורולוגית שהצבנו בשפך נחל אוג לחוף ים המלח. התחנה מודדת כיוון ועוצמת רוח, גלים ומפלס על ידי מד לחץ שנמצא על קרקעית האגם, טמפרטורת אוויר ומים, לחות אוויר ולחץ ברומטרי. (e) רובוט הצילום התת-ימי (ROV) איו תיעדנו את הסדימנטציה הפעילה על קרקעית האגם. ניתן לראות את המעבר מקרקעית רדודה בעומקים 0-3 מ' המכוסה חלוקים גסים לאזור עמוק יותר המאופיין בגלונים הנוצרים על ידי זרמים וגלים בסילטים והחרסיות. (f) תחנת מדידה תת-ימית שהוצבה למדידות בזמן סופות רוח-גלים. על גבי החצובה מותקן מד זרם אקוסטי המודד את הזרימה על ידי החזרי דופלר מעמודת המים ומספק פרופיל אנכי של הזרם ואינדיקציה לעכירות המים (ראה פירוט בשיטות), וכן עוצמה וכיווני גלים. בנוסף, מותקנים שני מדי זרם-הטייה, ומד לחץ למדידת גלים באופן בלתי תלוי לזה המחובר לתחנה המטאורולוגית שעל החוף. (g) החצובה תועדה על ידי הרובוט וניתן לראות את הקרקעית מכוסת הגלונים עליה היא מוצבת בעומק של 5 מטרים. הגלונים ניצבים לכיוון החוף ומלמדים על כיוון הזרימה בזמן סופות החורף.

10.3 שיטות

10.3.1 מדידות שדה (איור 10.1c-g)

מדידות הרוח, הגלים והזרמים המוצגות בעבודה זו נמדדו במהלך פברואר 2020 כחלק ממערך מדידות המוצג ברובו ב (Eyal et al., 2021, 2023). עוצמה וכיוון רוח נמדדו בתדירות 10-דקתית מאז דצמבר 2017 על ידי חיישן Gill-WindSonic המחובר לתחנה מטאורולוגית שמוצבת על חוף האגם (איור 10.1c). מאפייני הגלים עובדו מנתוני לחץ שנמדד בתדירות של 4 הרץ באמצעות חיישן Keller-PAA 36 Xi W המוצב בעומק של כ-10 מטר ומחובר לתחנה המטאורולוגית. העיבוד נעשה על ידי קוד Karimpour and MATLAB (Chen, 2017). באופן בלתי תלוי, בסופות ספציפיות, הגלים נמדדו גם על ידי מד גלים מסוג RBR-solo Wave המודד לחץ בתדירות 16 הרץ. בסופות הללו, כמו זו שתועדה בפברואר 2020, הצבנו על קרקעית האגם בעומק של כ-5 מטרים מערך מכשור מורחב למדידת זרמים, גלים ועכירות המים (איור 10.1c-e). על גבי חצובה תת ימית הותקן חיישן המודד את פרופיל הזרמים על ידי החזרי קול מעמודת המים (דופלר-אקוסטי), ADCP, מסוג Signature1000 של חברת Nortek. עיבוד הנתונים נעשה בתכנת Ocean Contour ומניב את רכיבי הזרם בעומקים שונים מפני המים ועד לקרקעית. מעל החיישן עצמו ובפני המים המכשיר אינו מקליט בצורה מהימנה ולכן בעומק רדוד רק כ-50% מהפרופיל האנכי מיוצג. מד הזרם-גלים Signature1000 מספק גם את כיוון התקדמות הגלים, וכן את הפרופיל האנכי של עכירות המים, באופן עקיף, דרך מדידת פרמטר אקוסטי של עצמת ההחזרה של גלי הקול מעמודת המים (Amplitude). ה Amplitude משמש כמדד לעכירות המים כתוצאה מהרחפה של סדימנט. גם בועות אוויר יוקלטו כערכים גבוהים של Amplitude אך אלו מופיעות בעיקר בקרבת פני המים שממילא איננו משתמשים בנתונים משם. בנוסף, חשוב לציין, בים המלח אין החזרות גבוהות הנובעות מתנועת מסה ביולוגית כמו פלנקטון בגוף המים ולכן הייצוג לעכירות כתוצאה מהרחפת סדימנט היא טובה. כדי לתעד את תהליכי הסדימנטציה הפעילה על קרקעית האגם ואת מכשירי המדידה השתמשנו ברובוט תת ימי (ROV) של חברת Deep-Trekker, דגמי DTX2 ו-Revolution, וכן בצילומים תת מימיים עם מצלמת Nikon-D810 ועיבוד התמונות לכדי אורטופוטו ומודל גבהים באמצעות Structure from motion.

10.3.2 פיתוח מודל פיסיקלי עם פתרון נומרי

כדי להסביר את התצפיות מהסביבה העכשווית בים המלח הכוללות התפתחות זרמים עם עומק עמודת המים והרחפת סדימנט בזמן סופה, פיתחנו מודל המבוסס על עקרונות פיסיקליים; אנו מציגים כאן את המשוואות המקיימות שימור מסה ותנע, אלו משוואות הזרימה (נאויה-סטוקס, רציפות ודיפוזיה-אדווקציה). פיתוח המודל מפורט בפרק 4.

10.4 תצפיות ישירות של רוחות, גלים, זרמים והרחפת סדימנט

בפרק זה מתואר מערך הנתונים המפורט משתי סופות שהתרחשו בפברואר, חורף 2020.

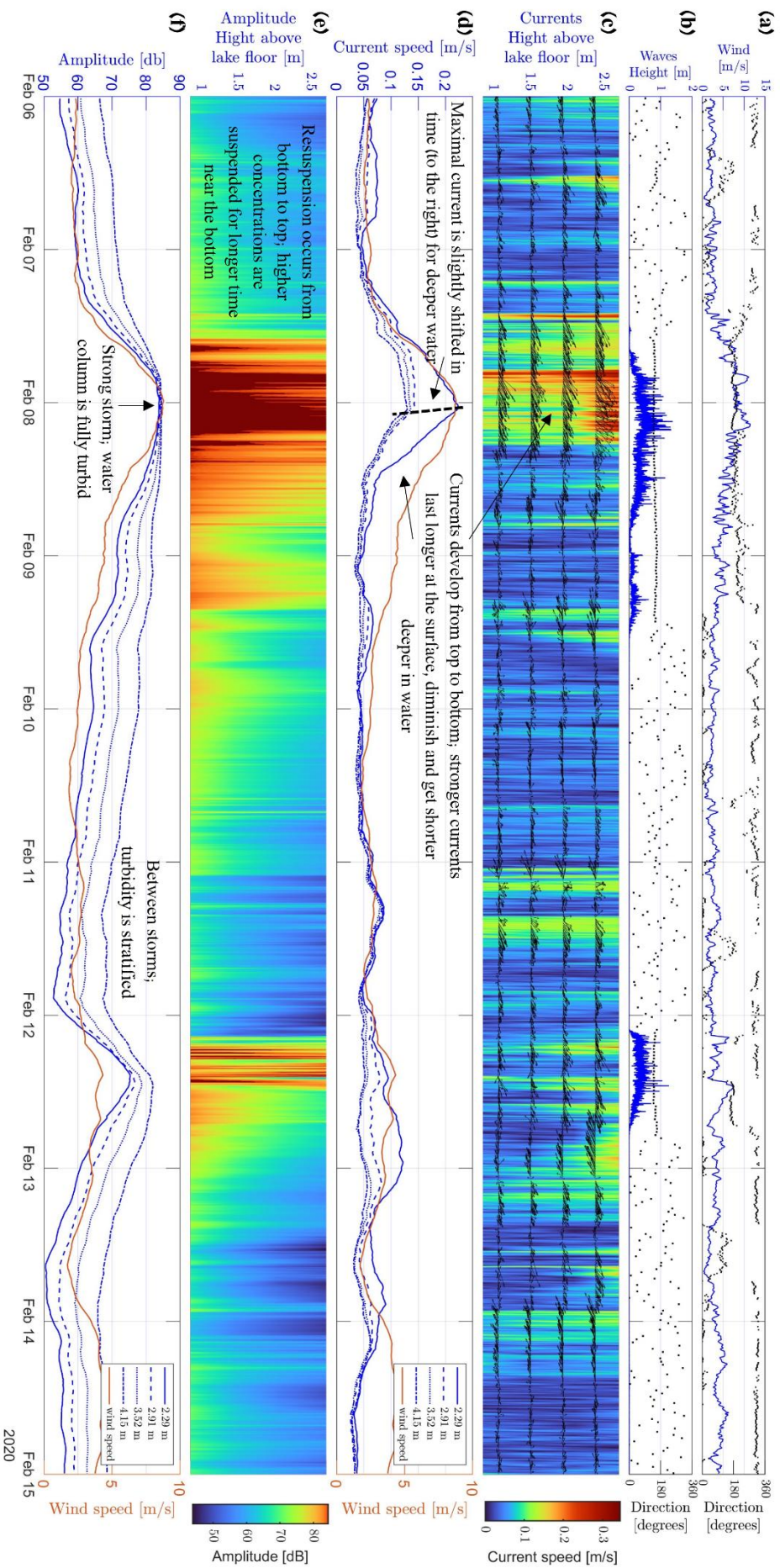
סדרת הזמן של עוצמת וכיוון הרוח כפי שמוצגת באיור 10.2a מראה שבזמן סופת רוח, כשהעוצמות עולות מעל כ- 5 m s^{-1} , הרוחות הן דרומיות, נושבות מדרום לצפון. בזמן שבין הסופות עוצמת הרוח נמוכה יותר וכיווניות הנשיבה היא בעיקר צפונית. זהו משטר הנשיבה המייצג את סופות החורף בצפון ים המלח (Eyal et al., 2023). הרוח שמגיעה מדרום, נושבת על פני האגם לאורך כ-40 ק"מ ומפעילה כוחות גזירה על פני המים שגורמים ליצירת גלים (איור 10.2b) וזרמים (איור 10.2c).

הגלים מתפתחים בהתאם לרוח; עם עליית עוצמת הרוח מתרוממים גלים לגבהים של עד כ-1.5 מ' בסופה המתוארת באיור 10.2, אך גובה הגלים יכול להגיע גם עד לכ-4 מטרים בסופות העוצמתיות ביותר (Eyal et al., 2023). עם דעיכת הרוח ובעיקוב קל דועכים גם הגלים. הגלים, כמצופה, מתקדמים במקביל לכיוון הרוח, מדרום לצפון וכשאלו מתקרבים לחוף בשפך נחל אוג, שכיוונו הוא 45 מעלות ביחס לכיוון התקדמותם, הם יוצרים רכיב הובלה לאורך החוף המניע חלוקים גסים ובולדרים המובלים ומתמיינים לאורך החוף (Eyal et al., 2021). בזמן שבין סופות הגלים פני המים שקטים ולכן גם אין כיוונויות סדורה להתקדמות הגלים (איור 10.2b).

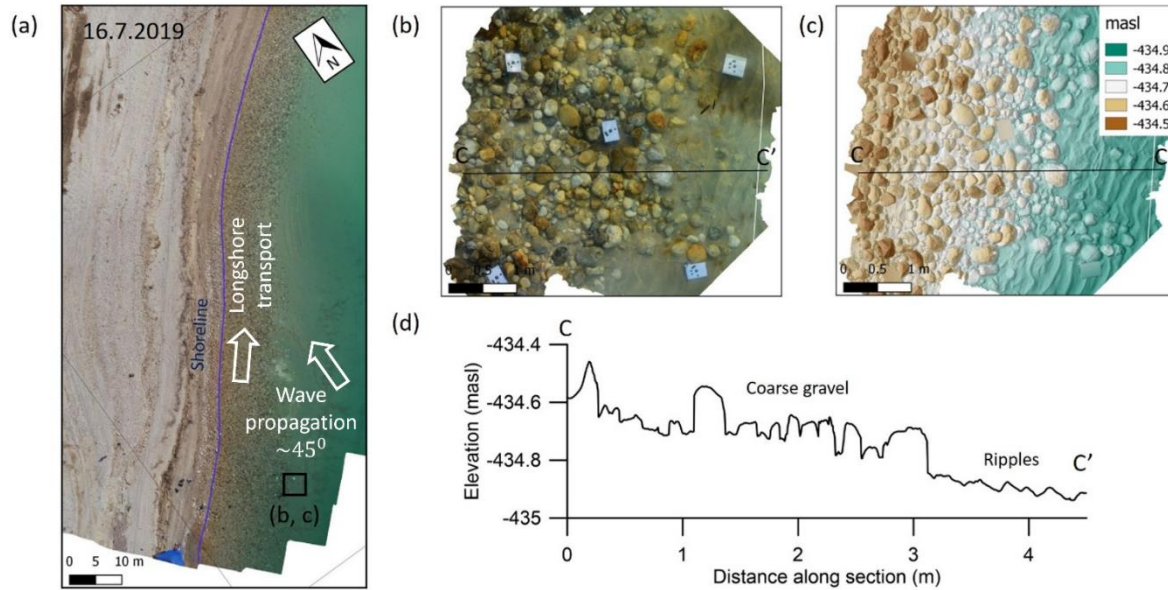
הזרמים בזמן הסופה מציגים התנהגות מעט מורכבת יותר; עוצמות הזרימה הגבוהות (כתום-אדום באיור 10.2c) תואמות את זמן סופת הרוח והגלים אך ישנם גם אירועי זרימה חלשים יותר מעבר למשך הסופה כאשר פני המים שקטים לפי רישום הרוח והגלים (ירוק-צהוב-כתום באיור 10.2c). בנוסף, כיוונויות הזרם בזמן הסופה תואמות את כיוונויות הרוח והגלים בזרימה מדרום לצפון כפי שמודגם בווקטורים השחורים המצביעים מעלה/צפונה בזמן הסופה באיור 10.2c (בזרמים קונבנצית הכיוונים הפוכה לזו של הרוח והגלים).

העוצמות הגבוהות ביותר והממושכות ביותר של זרם נרשמות בפני המים בעוד שעם עומק המים עוצמת הזרם דועכת ומשך האירוע מתקצר (איור 10.2c-d). תצפית זו באה לידי ביטוי בדיאגרמה של פרופיל הזרם האנכי מול זמן (איור 10.2c) כמעין משולשים שבסיסם הרחב נמצא בפני המים וקודקודם מצביע אל הקרקעית. מבנה זה מייצג את מעבר האנרגיה מהרוח לזרמים בפני המים ואז את חדירת האנרגיה ודעיכתה עם העומק. בנוסף, ניתן לראות כי עם הירידה לעומק העיתוי של שיא הזרם שנמדד בפני המים מתאחר מעט ומוסט ימינה בהצגה הגרפית. ככל שהאנרגיה שמועברת בפני המים לכדי יצירת זרמים גבוהה יותר, זרמים עוצמתיים יותר מצליחים להגיע את קרקעית האגם.

עכירות המים (Amplitude, ראה פרק שיטות) משתנה עם העומק והזמן; מתגלה תמונה עקבית של עכירות גבוהה סמוך לקרקעית שהולכת וקטנה כלפי מעלה בעמודת המים. בעת סופות רוח-זרמים-גלים ישנה עליה בערכי העכירות (איור 10.1e-f2), עד לכדי עכירות גבוהה של כל עמודת המים, תהליך המיצג ערבול מלא מהקרקעית ועד פני המים; כאשר זרם במהירות של $>0.1 \text{ m s}^{-1}$ מגיע אל הקרקעית בעומק של כ-5 מ' המכוסה בסילטים וחרסיות (איור 10.1g), כוחות גזירה של הזרם מופעלים על הסדימנט ומתחילה הרחפה של החומר הדק. בין הסופות ישנה שכבתיות של עכירות לאורך עמודת המים. ככלל, כיוון שמקור הסדימנט המורחף הוא מהקרקעית, עכירות המים הגבוהה ביותר היא סמוך לקרקעית, ושם גם משך הזמן שהמים נשארים עכורים ממושך יותר משכבות המים שמעל. ככל שעולים לעמקים רדודים יותר, המים צלולים יותר ומשך הזמן של ההרחפה מתקצר. בנוסף, נראה שישנה א-סימטריה בזמן בין הזרמים/גלים לבין העכירות. בעוד שהעכירות עולה מיד עם חדירת הזרמים לקרקעית האגם, הרי שמשך דעיכת ההרחפה ארוך יותר ומגיע לשעות ולימים עד שהמים חוזרים להיות צלולים. תופעות אלו מודגמות בדיאגרמת פרופיל העומק כנגד זמן (איור 2e) כמשולשים שבסיסם הרחב צמוד לקרקעית באזור ההרחפה משמעותי והם הולכים ונהיים צרים עם הקרבה לפני המים שם הריכוזים נמוכים יותר ומשך ההרחפה קצר יותר. מבחינה גיאומורפית/סדימנטולוגית רצועת ההובלה של הסדימנט הדק נצפית מעומק של 2-3 מטרים ועד לעומק של 15 מטר. טקסטורה של גלונים נצפית על הקרקעית במעבר מרצועת ההובלה של החלוקים הגסים לאורך החוף לרצועת הובלה של חומרים דקים יותר המכונים בניצב לכיוון התקדמות הזרם (איור 10.3).



איור 10.2: סדרות זמן של רוחות, גלים, זרמים ועכירות כפי שתועדו בשתי סופות חורף בפברואר 2020. (a) עוצמת רוח משורטטת בקו כחול וכיוון הרוח בנקודות השחרות, (b) גובה גלים משועמתי משורטט בקו כחול וכיוון הגלים בנקודות השחרות, (c) שטח המציג את עוצמת הזרם עם העומק ולאורך זמן. השטח מציג אינטרפולציה בין ארבעה עומקים בהם נמדד הזרם כפי שמופיע על ציר ה-y הימני. עוצמת הזרם מופיעה בסרגל מופיע במיקר בצד שמאל. העוצמה והכיוון של הזרמים בכל עומק מיוצגים גם באופן וקטורי (וקטורי זרם בצבע שחור). (d) עוצמת הזרם חמוגות על ציר ה-y הימני. עוצמת הזרם מופיעה בסרגל מופיע במיקר בצד שמאל. הרוח, מוחלקת על ידי ממוצע רץ יומי משורטטת בבתים. (e) שטח המציג את מידת העכירות לפי מידת החזרה של גלי הקו מחלקיקים מורחפים בעמוד המיל. השטח מציג אינטרפולציה בין ארבעה עומקים בהם נמדדה מידת העכירות כפי שמופיע לאורך ציר ה-y הימני. מידת העכירות מופיעה בסרגל האבנים שבצד שמאל. (f) מידת העכירות Amplitude המוצגת בצ משורטטת כסדרת זמן בכל עומק כפי שמופיע במיקר בצד שמאל. הרוח, מוחלקת על ידי ממוצע רץ יומי משורטטת בבתים.



איור 10.3: מאפייני החוף והקרקעית הרדודה באזור במחקר. (a) צילום אורטופוטו של החוף בנחל אוג. החוף מסומן בקו כחול ורצועת ההובלה של חלוקים גסים נפרסת 20-30 מטר מזרחית לחוף עד לעומק מים של 2-3 מטרים. הריבוע השחור מסמן את המיקום בו יצרנו אורטופוטו ומודל גבהים ברזולוציה גבוהה המופיעים ב b ו c, בהתאמה. (d) חתך C-C' (מיקום ב b ו c), ניתן להבחין במעבר מכיסוי הקרקעית בחלוקים גסים לגלונים המלמדים על הסעת חומר דק על הקרקעית. האיור עובד מתוך Eyal et al. (2021).

10.5 ניתוח פיסיקלי של הקשר בין זרימים להרחפת סדימנט

בפרק זה נשתמש בעקרונות פיסיקליים בסיסיים של זרימה ומעבר תנע על מנת להסביר את תצפיות התפתחות פרופיל הזרימים עם עומק עמודת המים והרחפת הסדימנט בזמן סופות, במסגרת משוואות שימור תנע ומסה.

10.5.1 מידול התפתחות פרופיל הזרם עם העומק

כדי לתאר את התפתחות פרופיל הזרם עם העומק בזמן עלייתה ודעיכתה של סופת רוח-גלים השתמשנו במשוואות הזרימה, הרי הן משוואת נאווייה-סטוקס

$$(1) \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{v} \Rightarrow$$

ומשוואת הרציפות

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (2)$$

למקרה הדו-ממדי, נרשום את משוואה (1) כך:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right)$$

כאשר $\vec{v}$ וקטור מהירות הזורם, v_x, v_y , הם רכיבי הזרם בכיוון האופקי x ובכיוון האנכי y, t הוא הזמן, P הוא הלחץ, ρ , צפיפות הזורם, ν הצמיגות הקינמטית.

אנו משתמשים בהנחות הבאות:

$$(i) \quad \text{מהירות הזורם קבועה בכיוון האופקי (x)}$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} = 0$$

$$(ii) \quad \text{אין מהירויות בכיוון האנכי}$$

$$v_y = 0$$

$$(iii) \quad \text{הלחץ בממד האופקי הוא קבוע}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

עבור הנחות אלו משוואה (1) מתכנסת למשוואת זרימה מטיפוס משוואת דיפוזיה של תנע:

$$(3) \quad \frac{\partial v_x}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}$$

תנאי התחלה ושפה:

$$(i) \quad \text{בהתחלה הנוזל במנוחה, בכל מקום המהירות האופקית היא 0.}$$

$$v_x(y, 0) = 0$$

$$(ii) \quad \text{בכל זמן המהירות בקרקעית (y=0) היא 0.}$$

$$v_x(0, t) = 0$$

$$(iii) \quad \text{בכל זמן המאלץ בפני המים, (y=H) מתנהג כפונקציית גאוסית; פונקציה זו נבחרה כקירוב טוב ופשוט לסופת רוח בזמן.}$$

$$v_x(H, t) = A e^{-\left(\frac{t-t_0}{\sigma}\right)^2}$$

כאשר A היא אמפליטודת (גובה) אירוע הזרם, t_0 מבטא את זמן אמצע האירוע, σ מבטא את רוחב הגאוסית (משך אירוע מטאורולוגי). לכן, A מבטא את עוצמת הרוח המקסימלית, t_0 מבטא את הזמן של הרוח המקסימלית באמצע הסופה הממודלת, ו σ את משך הסופה/האירוע המטאורולוגי.

את משוואה (3) עם תנאי השפה וההתחלה הנתונים ניתן לפתור עבור מהירות הזורם באופן נומרי בשיטת ההפרשים הסופיים:

$$\Rightarrow (4) \frac{v_{x_i}^{n+1} - v_{x_i}^n}{dt} = v \frac{v_{x_{i+1}}^n - 2v_{x_i}^n + v_{x_{i-1}}^n}{dy^2}$$

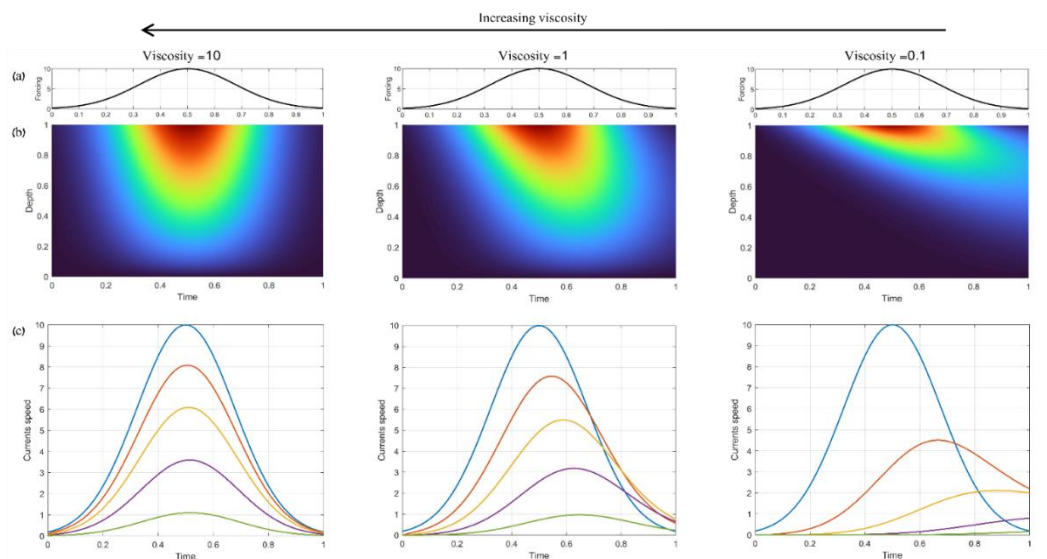
$$\Rightarrow v_{x_i}^{n+1} = \frac{v \cdot dt}{dy^2} (v_{x_{i+1}}^n - 2v_{x_i}^n + v_{x_{i-1}}^n) + v_{x_i}^n$$

כאשר n הוא מספר פרקי זמן ו dt הינו צעד זמן, i הוא מספר יחידות האורך ו dy הינו יחידת אורך ; תנאי יציבות הפתרון קושר בין הממד המרחבי לצעד הזמן דרך מקדם הצמיגות, על פי הקריטריון :

$$\frac{v \cdot dt}{dy^2} \leq 0.1$$

המודל הורץ עבור ערכים מנוורמלים וחסרי ממדים כאשר המשך הכולל של הסופה הינו 1, משך המחולק ל $n = 10^6$ צעדי זמן, לכן $dt = 10^{-6}$. הציר האנכי שאורכו 1, חולק ל $i = 100$, לכן $dy = 0.01$. הצמיגות נבחנה עבור שלושה ערכים : $v = 0.1, v = 1, v = 10$.

הפתרונות עבור שלושת ערכי הצמיגות מצליחים לשחזר את התפתחות הזרמים עם העומק כאשר ערך הצמיגות האמצעי ($v = 1$) מתאר בצורה הטובה ביותר את התפתחות הזרמים כמו שאנו מתעדים בים המלח (באיור 10.4). ניתן לראות שעוצמות הזרם הגבוהות ביותר מתקבלות בפני המים ודועכות עם העומק עבור כל ההרצות. אמנם, שיא העוצמה מוסט עם העומק לזמן מאוחר יותר במהלך התפתחות הסופה (הסטה ימינה) והמשך של כל פיק ארוך יותר עם העומק. בנוסף, ככל שהצמיגות נמוכה יותר מידת ההסטה של השיאים גדולה יותר ונוצר חיתוך בין פרופילי הזרם בעומקים השונים. בהמשך, נכיל את המודל עבור התצפיות שלנו ונדווח על ערך הצמיגות האפקטיבית לסביבה החופית בים המלח.



איור 10.4: מידול של התפתחות הזרמים עם העומק עבור שלוש צמיגויות שונות של הזרם. (a) מאלץ הרום שמניע את הזרמים בפני המים, ממודל כפונקציית גאוסית. במקרים שנבחנו נבחרה עוצמת רוח מקסימלית של $A=10 \text{ m s}^{-1}$. זמן הסופה מנוורמל בין 0 ל 1, לכן מרכז הסופה ב $t_0=0.5$. (b) התפתחות פרופיל הזרמים עם העומק כפי שהמודל חוזה עבור שלוש צמיגויות שונות: גבוהה, בינונית ונמוכה. (c) סדרות זמן של הזרם המחושב מחמישה עומקים שונים עבורה כל אחת משלוש ההרצות.

10.5.2 מידול הרחפת הסדימנט על קרקעית האגם

כדי לתאר את אופן הרחפת הסדימנט מהקרקעית, נדמה, בשלב זה, את תהליך ההסעה של החלקיקים המרחפים כתהליך דיפוזיבי של חלקיקים שמקורם בהרחפה מהקרקעית והם מתפשטים במעלה עמודת הזרם, מהאזור עם הריכוז הגבוה לנמוך. המקור להרחפה, כאמור, הוא גזירת הזרם בקרקעית של הסדימנט הדק. ניקח בחשבון גם שהחלקיקים נוטים לשקוע תחת השפעת הכבידה. נשתמש בערך הזרם בקרקעית שחושב בפתרון משוואה (3). הזרם מפעיל על הקרקעית כוח גזירה τ מהסוג: (מבוטא על ידי מכפלת צמיגות הנוזל בגראדינט המהירות)

$$(5) \quad \tau = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \Rightarrow \tau = \mu \frac{v_{x_{i+1}}^n - v_{x_i}^n}{dy}$$

כאשר μ היא צמיגות הנוזל.

שטף הסדימנט שייגזר מהקרקעית ויורחף הינו

$$(6) \quad \frac{\partial c}{\partial y} = -\text{const}|\tau| \Rightarrow -\text{const}|\tau| = \frac{c_{i+1}^n - c_i^n}{dy} \Rightarrow c_i^n = |\tau| \cdot dy + c_{i+1}^n$$

כאשר c ריכוז הסדימנט.

הסדימנט יורחף ויושקע לפי משוואת הדיפוזיה-אדווקציה:

$$(7) \quad \frac{\partial c}{\partial t} - V_s \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \Rightarrow$$

$$\frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{dt} + V_s |\tau| = D \frac{c_{i+1}^n - 2c_i^n + c_{i-1}^n}{dy^2}$$

$$\Rightarrow c_i^{n+1} = \frac{dt \cdot D}{dy^2} (c_{i+1}^n - 2c_i^n + c_{i-1}^n) - V_s |\tau| \cdot dt + c_i^n$$

כאשר V_s , מהירות ההשקעה (settling velocity) ו D , מקדם הדיפוזיה של החלקיקים.

תנאי התחלה ושפה:

(i) בהתחלה המים צלולים וריכוז החלקיקים בכל מקום הוא אפס

$$c(y, 0) = 0$$

(ii) בכל זמן, על הקרקעית, גרדינט הריכוזים שווה לכח הגזירה (תנאי שפה)

$$\frac{\partial c}{\partial y}(0, t) = \tau(0, t)$$

(iii) בפני המים אנו מניחים שאין שטף של חלקיקים מורחפים:

$$D \frac{\partial c}{\partial y}(H, t) + V_s \cdot c(H, t) = 0$$

10.6 דיון, מסקנות וצעדים להמשך

התהליך בו תנע מועבר מהרוח הנושבת על פני המים ליצירת גלים וזרמים מתואר באוסף התצפיות המוצג בעבודה זו ומוסבר על ידי מידול פיסיקלי. הזרמים, בהם מתמקדת העבודה, חודרים בסופות אל עומק המים ומגיעים לקרקעית האגם. בין שכבת הזורם התחתונה לבין הקרקעית נוצר חיכוך וסדימנט דק נגזר ומורחף אל עמודת המים.

המודל שפיתחנו מסביר את התצפיות והמאפיינים של התפתחות הזרם עם העומק:

1. תחת המאלץ של סופת רוח המדומה לפונקציית גאוסין, עוצמת הזרם היא הגבוהה והממושכת ביותר בפני המים, בעוד שככל שמעמיקים עוצמת הזרם דועכת ומשכו מתקצר. התופעה באה לידי ביטוי בתצפיות ובמודל בפעמונים/גאוסיינים המשתטחים ומתרחבים עם העומק בסדרות הזמן (איור 10.2d, איור 10.4c) וכן ב'משולשים ההפוכים' המופיעים בדיאגרמות פרופיל העומק מול זמן של הזרמים (איור 10.2c, איור 10.4b).

2. שיא הזרם בכל עומק מעוקב במעט ביחס לשיא של שכבה רדודה יותר, לכן השיאים 'נעים ימינה' על ציר הזמן בתצפיות והן במודל.

3. המודל הורץ עבור שלושה ערכים של צמיגות מסדרי גודל שונים. ניתן לראות כי ההרצה עם ערך הצמיגות הבינוני (איור 10.4) מדמה בצורה הטובה ביותר את התפתחות הזרמים עם העומק ביחס לתצפיות מים המלח (איור 10.2c-d). בהרצה זו נצפית ההסתה המועטה יחסית של שיאי עוצמת הזרמים ימינה בזמן. כמו כן, העקומות של הזרם מעומקים שונים בעת דעיכת הסופה רק מעט חוצות אחת את השנייה. ממידול התפתחות הזרמים עבור צמיגויות שונות ניתן לצפות כי במים או מים מתוקים התפתחות הזרם תדמה לזו של הצמיגות הגבוהה ומעבר הזרמים אל העומק קורה באופן ישיר יותר עם זמני עיקוב קצרים יותר במעבר מפני המים אל הקרקעית. כך גם הרחפת סדימנט תהיה מסונכרנת יותר עם הסופה עצמה. בהמשך, נבצע התאמה של ערכי הצמיגות למדידות הזרמים, ומכאן אנו מצפים לקבל ערך צמיגות אפקטיבית (טורבולנטית) שמתאימים לים המלח לסביבה בה מדדנו.

מידול של הרחפת הסדימנט מהקרקעית אל עמודת המים אינו נכלל בחיבור זה ויוצג בהמשך לצד מדידות של גדלי הגרגר המורחפים וטקסטורת הגלונים המופיעים על הקרקעית כפי שנמצא בדוגמאות סדימנט וצילומים שנאספו על ידי אמצעי התיעוד התת ימיים (איור 10.1e-g, איור 10.3).

תהליך ההרחפה וההשקעה שמוצג כאן מהווה נדבך בתהליך המורכב של הבנה ופיענוח של חתכים סדימנטריים בבקעים המלח ואף במקומות אחרים. התהליך מורכב כיוון שהחומרים הדקים שמורבדים על קרקעית האגם מגיעים ממספר מקורות: (1) הרוב מגיע על ידי שיטפונות בעונת החורף הנושאים חומר מורחף שמגיע לאגם ויוצר פלומות מהולות ועשירות בסדימנט דק (Armon et al., 2018; Bartov et al., 2006; Nehorai et al., 2013), (2) זרימות רציפות של נהרות ומעיינות הנושאים ריכוזים נמוכים יותר של חומר מורחף כמו בנהר הירדן (Dente et al., 2018) ובמעיינות עין פשחה (Dente et al., 2021; Mor et al., 2021), (3) אבק המושקע ישירות על פני המים (Censi et al., 2023; Palchan et al., 2017), ו(4) מחזור של חומר דק שכבר הושקע בעבר באגן ההשקעה למשל על ידי גידוד גלים המבלים חומר דק מקרקעית שנחשפה לחופי האגם בעשורים האחרונים (Nehorai et al., 2013), תהליך זה יוצר את הנוף של מדרגות החוף (Enzel et al., 2022) ואחראי, יחד עם

הדינמיקה של הזרמים בתוך האגם לערבוב, ארגון והשקעה מחדש של הסדימנט הדק באגן ההשקעה (Sirota et al., 2021). במהלך חורף טיפוסי ישנן 10-30 סופות רוח-גלים שסווגו כאחריות להסעה ומיון של חלקים גסים לאורך חופי האגם (Eyal et al., 2023) וכפי שראינו בעבודה זו אלו גם הסופות שמרחיפות חומר דק באופן משמעותי. לכן בכל חורף סדימנט דק המצוי על הקרקעית הרדודה של האגם עובר כמה עשרות בודדות של מחזורי הרחפה והשקעה עד שנקבר תחת עובי מספק של סדימנט או מלח ונשמר ברקורד הגיאולוגי כלמינה בודדת. תהליך זה רלוונטי לעומקים הרדודים של עד כ 15 מ' אליהם בסיס הגלים מגיע (Eyal et al., 2021) אך יכול להיות משמעותי גם בעומק רב יותר. הצורה שבה נבחנים הדברים בעבודה זו מלמדת על המורכבות שבמתן פרשנות סדימנטולוגית/אקלימית ללמינות הדטריטיות המצויות בחתכים הסדימנטולוגיים שנחקרים לאורך השנים (Ben Dor et al., 2019; Neugebauer et al., 2016).

תודות

הפרויקט ממומן מפרויקט ים המלח של המכון הגיאולוגי הממומן על ידי משרד רה"מ ולקרנות הבאות: הקרן המדעית למדעים ISF-1471/18 – נדב לנסקי, ISF-946/18 – יהודה אנזל, הקרן הדו לאומית ישראל ארה"ב - BSF-2018/035, NSF-BSF-2019/637 – נדב לנסקי, מלגת עזריאלי – חגי איל. תודה מיוחדת לצוות "תגלית": סילבי גונן, שחר גנ-אל ומאיר יפרח ולגיקי בן זקן מ"נופי מלח". תודה לעמיתנו זיו מור, עידו סירוטה, רענן בודזין, אורי מליק, הלל לוצקי, לירן בן משה, שי אביר וארנוולד בכרך על העזרה בעבודת השדה והמעבדה.

10.7 מקורות

- Arfi R, Guiral D, Bouvy M. 1993. Wind induced resuspension in a shallow tropical lagoon. *Estuarine, coastal and shelf science* **36** : 587–604. DOI: <https://doi.org/10.1006/ecss.1993.1036>
- Armon M, Dente E, Smith JA, Enzel Y, Morin E. 2018. Synoptic-Scale Control over Modern Rainfall and Flood Patterns in the Levant Drylands with Implications for Past Climates. *Journal of Hydrometeorology* **19** : 1077–1096. DOI: 10.1175/JHM-D-18-0013.1 [online] Available from: <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JHM-D-18-0013.1>
- Bartov Y, Bookman R, Enzel Y. 2006. Current depositional environments at the Dead Sea margins as indicators of past lake levels. In *New Frontiers in Dead Sea Paleoenvironmental Research* , . Geological Society of America; 127–140. [online] Available from: <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/558/chapter/3802592>
- Bloesch J. 1995. Mechanisms, measurement and importance of sediment resuspension in lakes. *Marine and Freshwater Research* **46** : 295–304. DOI: <https://doi.org/10.1071/MF9950295>
- Censi P, Sirota I, Zuddas P, Lensky NG, Crouvi O, Cangemi M, Piazzese D. 2023. Rare earths release from dissolving atmospheric dust and their accumulation into crystallising halite: The Dead Sea example. *Science of The Total Environment* **875** : 162682. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162682>

- Dente E, Lensky NG, Morin E, Dunne T, Enzel Y. 2018. Sinuosity evolution along an incising channel: New insights from the Jordan River response to the Dead Sea level fall. *Earth Surface Processes and Landforms* DOI: 10.1002/esp.4530
- Dente E, Lensky NG, Morin E, Enzel Y. 2021. From straight to deeply incised meandering channels: Slope impact on sinuosity of confined streams. *Earth Surface Processes and Landforms* **46** : 1041–1054. DOI: 10.1002/esp.5085 [online] Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.5085>
- Ben Dor Y, Neugebauer I, Enzel Y, Schwab MJ, Tjallingii R, Erel Y, Brauer A. 2019. Varves of the Dead Sea sedimentary record. *Quaternary Science Reviews* **215** : 173–184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.04.011>
- Enzel Y, Mushkin A, Groisman M, Calvo R, Eyal H, Lensky N. 2022. The modern wave-induced coastal staircase morphology along the western shores of the Dead Sea. *Geomorphology* **408** : 108237. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108237 [online] Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X22001301>
- Eyal H, Armon M, Enzel Y, Lensky NG. 2023. Synoptic-scale to mesoscale atmospheric circulation connects fluvial and coastal gravel conveyors and directional deposition of coastal landforms in the Dead Sea basin. *Earth Surface Dynamics* **11** : 547–574.
- Eyal H, Dente E, Haviv I, Enzel Y, Dunne T, Lensky NG. 2019. Fluvial incision and coarse gravel redistribution across the modern Dead Sea shelf as a result of base-level fall. *Earth Surface Processes and Landforms* **44** : 2170–2185. DOI: 10.1002/esp.4640 [online] Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.4640>
- Eyal H, Enzel Y, Meiburg E, Vowinkel B, Lensky NG. 2021. How Does Coastal Gravel Get Sorted Under Stormy Longshore Transport? *Geophysical Research Letters* **48** : e2021GL095082. DOI: 10.1029/2021GL095082 [online] Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021GL095082>
- Jalil A, Li Y, Zhang K, Gao X, Wang W, Khan HOS, Pan B, Ali S, Acharya K. 2019. Wind-induced hydrodynamic changes impact on sediment resuspension for large, shallow Lake Taihu, China. *International Journal of Sediment Research* **34** : 205–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.11.003>
- Karimpour A, Chen Q. 2017. Wind wave analysis in depth limited water using OCEANLYZ, A MATLAB toolbox. *Computers & Geosciences* **106** : 181–189. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.06.010 [online] Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300417306489>
- Lensky NG, Dvorkin Y, Lyakhovsky V, Gertman I, Gavrieli I. 2005. Water, salt, and energy balances of the Dead Sea. *Water Resources Research* **41** : 1–13. DOI: 10.1029/2005WR004084

- Li Y, Tang C, Wang J, Acharya K, Du W, Gao X, Luo L, Li H, Dai S, Mercy J. 2017. Effect of wave-current interactions on sediment resuspension in large shallow Lake Taihu, China. *Environmental Science and Pollution Research* **24** : 4029–4039. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8165-0>
- Mor Z, Lutzky H, Shalev E, Lensky NG. 2021. Hydrostatic densitometer for monitoring density in freshwater to hypersaline water bodies. *Water* **13** : 1842. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13131842>
- Nehorai R, Lensky IM, Hochman L, Gertman I, Brenner S, Muskin A, Lensky NG. 2013. Satellite observations of turbidity in the Dead Sea. **118** : 3146–3160. DOI: [10.1002/jgrc.20204](https://doi.org/10.1002/jgrc.20204)
- Neugebauer I et al. 2016. Hydroclimatic variability in the Levant during the early last glacial (~117–75 ka) derived from micro-facies analyses of deep Dead Sea sediments. *Climate of the Past* **12** : 75–90. DOI: [10.5194/cp-12-75-2016](https://doi.org/10.5194/cp-12-75-2016) [online] Available from: <https://cp.copernicus.org/articles/12/75/2016/>
- Palchan D, Neugebauer I, Amitai Y, Waldmann ND, Schwab MJ, Dulski P, Brauer A, Stein M, Erel Y, Enzel Y. 2017. North Atlantic controlled depositional cycles in MIS 5e layered sediments from the deep Dead Sea basin. *Quaternary Research* **87** : 168–179. DOI: [10.1017/qua.2016.10](https://doi.org/10.1017/qua.2016.10) [online] Available from: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0033589416000107/type/journal_article
- Qin B, Zhu G, Zhang L, Luo L, Gao G, Gu B. 2006. Estimation of internal nutrient release in large shallow Lake Taihu, China. *Science in China Series D* **49** : 38–50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-006-8104-x>
- Sirota I, Enzel Y, Mor Z, Ben Moshe L, Eyal H, Lowenstein TK, Lensky NG. 2021. Sedimentology and stratigraphy of a modern halite sequence formed under Dead Sea level fall. Lokier S (ed). *Sedimentology* **68** : 1069–1090. DOI: [10.1111/sed.12814](https://doi.org/10.1111/sed.12814) [online] Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/sed.12814>
- Stone R. 2011. China aims to turn tide against toxic lake pollution. *Science* **333** : 1210–1211. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.333.6047.1210>
- Witten AJ, Thomas JH. 1976. Steady wind-driven currents in a large lake with depth-dependent eddy viscosity. *Journal of Physical Oceanography* **6** : 85–92. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1976\)006%3C0085:SWDCIA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1976)006%3C0085:SWDCIA%3E2.0.CO;2)

11. שיטה חדשה למדידת איזוטופים יציבים של חמצן ומימן בדגימות מים מתוקים, תמלחות רוויות ולחות אוויר בנפחים מזעריים

לוי. א.

המכון הגיאולוגי

11.1 רקע

מליחות, ריכוז המלחים המומסים במים, משפיעה ישירות על פעילות המים ($\alpha(\text{H}_2\text{O})$ water activity) כלומר, ערך חסר יחידות הנע בין 0 ל-1 המייצג את תכולת המים החופשיים במערכת כימית. בסביבות כמו ים המלח, המאופיינות ברמות מליחות גבוהות במיוחד, ה- $\alpha(\text{H}_2\text{O})$ נמוכה באופן ניכר בהשוואה לגופי מים מתוקים או סביבות ימיות. $\alpha(\text{H}_2\text{O})$ נמוכה זו משפיעה באופן משמעותי על דינמיקת התמלחת, קצבי התאדות, ואינטראקציות עם האטמוספירה הסובבת. עם הירידה החזויה במפלסי המים בים המלח, העלייה במליחות והירידה ב- $\alpha(\text{H}_2\text{O})$ צפויים להשפיע על דפוסי התאדות התמלחת.

איזוטופים יציבים של חמצן (O) ומימן (H) במים ובאוויר שמעל מקדמים את הבנת תהליכי התאדות. הפרדת איזוטופים בעלי מסות שונות במהלך התאדות משפיעה על ההרכב האיזוטופי של אדים ותמלחת. חקר איזוטופים יציבים במהלך התאדות של תמלחות במליחות גבוהה מאוד הופך למפתח להבנה טובה יותר של מחזורי הידרולוגיים ושינויים סביבתיים. עם זאת, מלבד מספר מחקרים מסוף שנות ה-70 ושנות ה-80, לא היו מחקרים שחקרו לעומק את דפוסי האיזוטופים היציבים של התמלחות ואוויר באזור זה.

קיימים אתגרים משמעותיים בפיתוח שיטות המסוגלות למדוד איזוטופים בנפחי מים נמוכים מאוד עבור דוגמאות לחות מהאוויר וטיפול בתמלחות שהתאדו באופן קיצוני. לדוגמה, שיטות מדידה עבור תמיסות מים מתוקים או מי ים אינן יכולות לשמש עבור תמלחות מים המלח בגלל הרס הנגרם מקורוזיה של ציוד ו/או קריאות לא מדויקות. אפילו הזרקה ישירה של דגימות באמצעות מזרקים מעבדתים יכולה להיות מוגבלת בשל המאפיינים הפיזיקליים של תמלחות (לדוגמה, צפיפות וצמיגות גבוהה). קורוזיה כמובן נשארת בעיה מאוד שכיחה המפריעה למחקר איזוטופים יציבים של תמלחות בים המלח.

דוח זה יפרט שיטה אנליטית חדשה המתמודדת עם אתגרים אלה עבור מדידת איזוטופים יציבים של חמצן ומימן הן של תמלחות והן של לחות אוויר. שיטה זו מקדמת ומבססת מחקרים עתידיים של התאדות ועיבוי של תמלחות קיצוניות ומאפשרת הבנה עמוקה יותר של הדינמיקה המתפתחת בים המלח.

איזוטופים יציבים של חמצן ומימן במים

איזוטופים יציבים של חמצן ומימן מתייחסים לצורונים שונים של אותו היסוד הנבדלים אחד מהשני במסה שלהם המשתנה ביניהם בעקבות שינוי במספר הניוטונים בגרעין האטום. עבור חמצן, איזוטופ ^{16}O מכיל בגרעין 8 פרוטונים ו-8 ניוטרונים, ועבור ^{18}O הגרעין מכיל 8 פרוטונים ו-10 ניוטרונים. בחמצן, אלו הם שני האיזוטופים היציבים העיקריים הנמדדים בדרך כלל. עבור מימן, ^1H יש פרוטון אחד ואין ניוטרונים וב- ^2H (הידוע גם כדאוטריום) יש פרוטון אחד וניוטון אחד. שניהם איזוטופים יציבים. איזוטופים יציבים של חמצן ומימן

מציגים יחסים מבדלים (כלומר $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, $^1\text{H}/^2\text{H}$) במי טבע, ומספקים מדד למקורות, קצבים ותהליכים סביבתיים.

כדי לבטא הרכבים איזוטופיים משתמשים בסימון דלתא (δ). סימון δ מציין את ההבדל ביחידות פרמיל (‰) בין היחס של איזוטופים כבדים (נדירים) לקלים (שכיחים) בדגימה בהשוואה לחומר ייחוס (סטנדרט). ערכי δ מחושבים באמצעות הנוסחה:

$$\delta^{18}\text{O} = [((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}} / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$$

עבור חמצן ו:

$$\delta^2\text{H} = [((^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{sample}} / (^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$$

עבור מימן.

התקן הבינלאומי המוכר Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW) משמש ליצירת מסגרת אוניברסלית להשוואת נתונים איזוטופיים ודיווח עליהם, והבטחת עקביות בין מחקרים שונים ומעבדות.

לרוב, הרכבים איזוטופיים במים מלוחים נקבעים באמצעות שיטות קונבנציונליות הרלוונטיות למים מתוקים. ספקטרומטריית יחס מסה של איזוטופים (IRMS) היא אחת הטכניקות העיקריות המשמשות למדידת איזוטופים יציבים במים. עבור איזוטופי מימן, תחילה מבוצע זיקוק של מים ורדוקציה עם מתכת (Zn, U, Cr), בעוד שעבור איזוטופי חמצן מבוצע שיווי משקל CO_2 -עם מים לפני המדידה ב-IRMS. עם זאת, שיטות אלו עלולות לגרום לפערים עבור תמלחות רוויות בשל כמות גבוהה של מלחים מומסים שמובילים למדידות $\delta^2\text{H}$ לא מדויקות. עבור $\delta^{18}\text{O}$ קיים שיווי משקל איטי בין CO_2 למים עבור תמלחות, ולכן יש להחיל תיקון איזוטופי כדי להתחשב ב- $\alpha(\text{H}_2\text{O})$. טכניקות אנליטיות משתמשות בהליך זיקוק ייחודי עבור תמלחות רוויות כדי לאפשר מדידה מדויקת של $\delta^2\text{H}$. עם זאת, הליך זה מסורבל ואינו מתאים למחקרים בקנה מידה גדול הדורשים מדידה של מספר רב של דגימות. גישות חלופיות נחקרו כגון אחת שמערבת השגת שיווי משקל של התמלחת עם אדי מים שעוקפת את הבעיות הקשורות להיווצרות מלח במהלך זיקוק.

שיטת ספקטרוסקופיית מבוססת לייזר הנקראת 'הטבעת המתכלה' (CRDS) הולכת וזוכה לבולטות בשנים האחרונות בזכות יכולות המדידה המדויקות שלה עבור איזוטופים יציבים של מים ומי ים. בדומה לספקטרומטריית יחס מסה של איזוטופים, מכשירי CRDS מצטיינים ביצור מדידות איזוטופים של מים בדיוק גבוה. יתר על כן, CRDS מאפשר מדידה סימולטנית הן של $\delta^{18}\text{O}$ והן של $\delta^2\text{H}$ ללא הצורך בהליכי מעבדה מקדימים וממושכים, תוך קיצור משמעותי בקו הזמן של האנליזה והפחתת הצורך בהכנות מעבדה עתירות עבודה. בדוח זה אנו מציגים הליך חדשני המנצל מכשיר CRDS למדידת איזוטופים יציבים של מים במים מתוקים, תמלחות ומים הכלואים באמפולות זכוכית.

11.2 שיטות

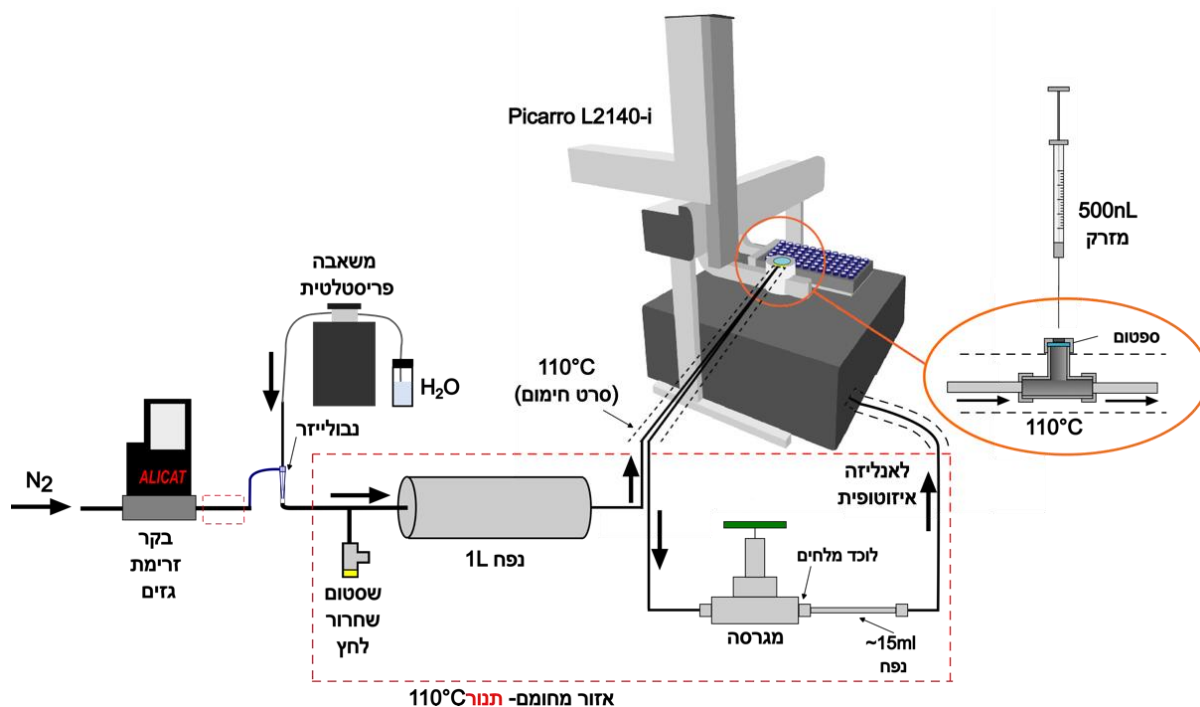
11.2.1 מכשור

מכשיר אנליזה Picarro L2130-i (פיקארו) למדידת איזוטופים יציבים בשיטת CRDS, יחד עם מכשיר נלווה לאיוד הדוגמא טרם המדידה (Vaporizer) ומכשיר להעברת דוגמאות המים באופן אוטומטי (Autosampler), מהווים את עיקר הציוד למדידת ערכים איזוטופים של מים במכון הגיאולוגי היום. הליך המדידה של המכשיר הינו בעזרת מזרק המעביר 2 מיקרוליטר מים ממבחנות במגש הדגימות לפתח ההזרקה שב- Vaporizer. לאחר מכן הדגימה המאודת מועברת מה- Vaporizer למכשיר האנליזה באמצעות זרימת גז חנקן ומשאבה.

קיים אפקט זיכרון איזוטופי (Memory effect) וסטיה לאורך זמן/דריפט (Drift) משמעותיים במערכת הפיקארו וכדי להתמודד עם אתגרים אלה נבנה קו הכנת דוגמא חדש שמחליף את Vaporizer (איור 11.1). קו זה דומה בעיקרו לקו שנבנה על ידי de Graaf et al. (2021), אשר מממן את אפקט הזיכרון והדריפט האיזוטופי של המערכת, אבל גם מפחית משמעותית את כמות המים הנדרשת לאנליזה לכ-0.25 מיקרוליטר למדידה וכ-1 מיקרוליטר לדגימה, לעומת 2 מיקרוליטר למדידה ו-24 מיקרוליטר לדגימה לפי השיטה המקורית. בנוסף להזרקות מים ישירות, הימצאות "מגרסה" על הקו החדש מאפשרת ריסוק של אמפולות זכוכית הנושאות מים למדידות איזוטופיות. נפח כמות המים הנדרש למדידה מופחת באופן משמעותי וכפועל יוצא, הדוגמה שנמדדת מובילה להפחתה בהצטברות המלח והקורוזיה במערכת. בנוסף, בדרך זו, מתאפשרת מדידת דגימות של לחות אוויר שעברו עיבוי לתוך אמפולות זכוכית.

11.2.2 הגדרה טכנית

הקו החדש כולל סדרה של רכיבים ובקורות נוזלים מדויקות. צינורות פלדת אל-חלד, מעבירים גז חנקן המווסת על ידי בקר זרימת מסה (MFC) לתנור מחומם ל-110 מעלות צלזיוס. לאחר מכן, הצינורות המחוממים מחוברים לנבולייזר מפלסטיק, המשמש לערבוב הומוגני של מים וגז חנקן מחומם. משאבה פריסטלטיית מסדירה את זרימת מים מזוקקים לנבולייזר בכ-0.4 מיקרוליטר/דקה. לאחר ההרטבה, גז מוליך מוחזר בחזרה לתנור להומוגניזציה נוספת בגליל פלדת אל-חלד בנפח 1 ליטר. הצינור מוסט החוצה מהתנור ומחובר ב-110 מעלות צלזיוס, לפתח הזרקה מותאם אישית שנמצא בקירוב לזרוע Autosampler. הצנרת חוזרת לתנור ומתחברת לשסתום ברז מסוג Swagelok עם אטימה בפעמון, הפועל כ"מגרסה" ומשמש לריסוק אמפולות המכילות מים. לאחר מכן ישנה מלכודת מלח ועוד נפח קטן להומוגניזציה. לבסוף, הקו מחובר למכשיר הפיקארו שמודד את הרכב האיזוטופים היציבים של חמצן ומימן באדי המים הנכנסים.



איור 11.1: תצורה חדשה לקו מדידת איזוטופים יציבים של דגימות מים בנפח נמוך ותמלחת עם אפקט זיכרון נמוך.

11.2.3 פרוטוקול מדידה

זרימת החנקן המורטבת והמחוממת מבטיחה לחצים מבוקרים בעת המדידה. שיעורי הכניסה של החנקן והאדים למכשיר הפיקארו נבדקו בקפידה כדי לשמור על תנאים אופטימליים למדידה, ונמצאים סביב כמות המים האידאלית המומלצת על ידי היצרן (כ-14000 ppm). דגימות מים, בכמות של 0.25 מיקרוליטר, הוזרקו ידנית או באמצעות ה-Automsampler לקו. כדי להעריך את מידת אפקט הזיכרון, הוזרקו מספר חזרות של סטנדרטים עם ערכי איזוטופים קיצוניים (מפורט בטבלה 11.1). לבדיקת המדידות של התמלחות, נמדדה תמלחת שנאספה מבריכות אידוי שמש סמוך לאילת (29.56319N, 34.96394E) בקיץ 2023. לתמלחת מבריכות האידוי באילת יש תכולת מלח, צמיגות וצפיפות גבוהים (1.15 ק"ג/ליטר), וכתוצאה מכך הזרקה ישירה לא אפשרית. לכן, דגימות אלה דוללו עם מים מזוקקים ונמדדו מספר פעמים. קביעה מדויקת של ערכי האיזוטופים היציבים כללה הערכת המשקל של H_2O על בסיס המליחות וצפיפות הדוגמא ולאחר מכן קביעת ערכי האיזוטופים היציבים של מים מזוקקים. סטנדרטים מהמכון הגיאולוגי של ארצות הברית שימשו לתיקון הדריפט והליניאריות. כדי להכין אמפולות מים, נפחי מים של 0.3 מיקרוליטר הוזרקו לתוך צינוריות זכוכית אטומות בקצה אחד המכילות צמר סיליקה. לאחר מכן, צינוריות אלה נאטמו בחלק העליון באמצעות להבה, תוך יצירת אמפולות באורך של כ-2 ס"מ לניתוח. סקריפט בשפת פייתון מותאם אישית, שפותח על בסיס המתודולוגיות שתוארו ב(de Graaf et al. (2021), מחשב את ערכי האיזוטופים היציבים עבור דגימות המים.

$\delta^2\text{H} (\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O} (\text{‰})$	סטנדרט:
-427.5	-55.50	SLAP-2
+802.4	+99.02	IAEA-607

טבלה 11.1: ערכים של איזוטופי חמצן ומימן יציבים של סטנדרטים של מים עם ערכים קיצוניים. להשוואה, מרבית המים המטאוריים (משקעים, מי תהום, אגמים) בישראל הם בין -15‰ ל- $+10\text{‰}$ עבור $\delta^{18}\text{O}$.

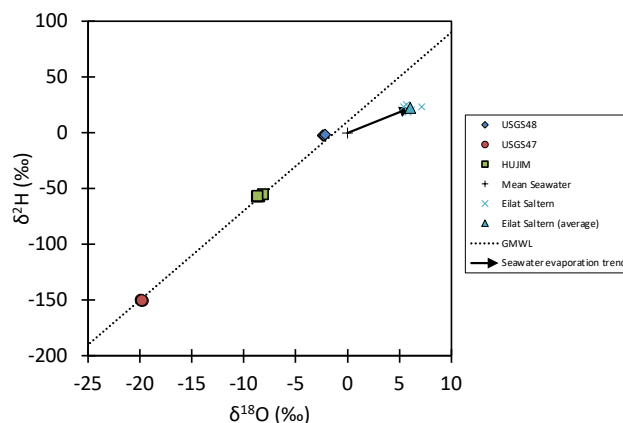
11.3 תוצאות

הזרקות רצופות של סטנדרטים קיצוניים (טבלה 11.1) הניבו ערכי איזוטופים יציבים עקביים עם הערכים המתועדים שלהם לפי היצרן. במיוחד, המעבר בין דגימות הסטנדרטים השונות הציגו תוצאות המצביעות על אפקט זיכרון מועט (טבלה 11.2). תוצאות אלה מעידות על כך שבשיטה הנוכחית ניתן לבצע מדידות דגימה במרווחים של כ-20 דקות, תוך ביטול הצורך בכמות הזרקות נרחבות כדי למתן את אפקט הזיכרון מהדגימה הקודמת (בשיטה המקורית היה צורך בכ-10-12 הזרקות).

Time	Sample	Amount (microliter)	$\delta^{18}\text{O} (\text{‰})$	$\pm$	$\delta^2\text{H} (\text{‰})$	$\pm$
17:20	SLAP2	0.25	-55.5	0.3	-430	7
17:43	SLAP2	0.24	-55.6	0.3	-426	7
18:06	SLAP2	0.25	-55.4	0.3	-430	7
18:29	SLAP2	0.24	-55.5	0.3	-424	7
18:52	IAEA607	0.25	98.8	0.5	799	10
19:15	IAEA607	0.25	98.8	0.5	795	10
19:38	IAEA607	0.25	99.1	0.5	808	10
20:01	IAEA607	0.25	99.3	0.5	806	10

טבלה 11.2: סדרת זמן של מדידות איזוטופים יציבים של חמצן ומימן של סטנדרטים עם ערכים קיצוניים. המעבר המהיר בין הסטנדרטים ממחיש כיצד אפקט הזיכרון של הדגימה הקודמת הוא זניח יחסית. הערה – השגיאות של המדידות בדגימות אלו עם ערכים קיצוניים הן גבוהות בהרבה מדוגמאות מים טבעיות כי הן מעבר לטווח הכיול הטיפוסי עבור מכשיר הפיקארו.

בהערכת היכולת של המערכת החדשה לנתח את ההרכב האיזוטופי של תמלחות רוויות, נמדדה סדרת דילולים של תמלחת מבריכות אידיי השמש באילת. בזמן שהנכונות (Accuracy) של מדידות איזוטופים נשמרה בהצלחה, הוספת שלב דילול נוסף הובילה לירידה בדיוק (Precision) ביחס לערכים מדגימות מים שלא נמהלות. התוצאות מראות שערכי האיזוטופים של תמלחת בריכות האידיי באילת תואמים למגמה חזויה של התאדות עבור מי ים בתנאי מדבר (שיפוע ~4) (איור 11.2).



איור 11.2: $\delta^2\text{H}$ מול $\delta^{18}\text{O}$ עבור סטנדרטים שונים (USGS48, USGS47, HUIJM). מוצגות גם מדידות הדגימה עבור תמלחת שנלקחה מבריכות האידוי השמש באילת (Eilat Saltern) והערך הממוצע (Eilat Saltern (average)). בנוסף, מוצגים על התרשים קו המים המטאורי העולמי (GMWL) אשר מתאים בקירוב לערכי הסטנדרטים ומגמת ההתאדות של מי ים (Seawater evaporation trend). ערכי בריכות האידוי באילת נופלים על מגמת התאדות של מי ים עם שיפוע 4, אשר מרמז על התאדות בתנאי לחות יחסית נמוכה מאוד שאופיינית לאזור מדברי זה.

ערכים איזוטופים במים שנמדדו על ידי ריסוק שלוש אמפולות זכוכית, אשר כל אחת מכילה 0.3 מיקרוליטר של מים סטנדרטים, נמצאו זהים לערכים שהתקבלו מהזרקות נפחים זהים. תצפית זו מדגישה את הגמישות של המערכת החדשה, מאששת שדגימות מים יכולות להיות מוכנסות באמצעות הזרקה ישירה או בהכנת אמפולות זכוכית באמצעות צינוריות קפילריות. מחקרים עתידיים יתמקדו בהערכה נוספת של יעילות המערכת במדידת איזוטופים יציבים של דגימות לחות אוויר באמצעות אמפולות זכוכית.

11.4 מסקנות

הגישה האנליטית החדשנית המפורטת במחקר זה מציגה התקדמות בהתמודדות עם האתגרים הכרוכים במדידת איזוטופים יציבים של חמצן ומימן הן בתמלחות רוויות והן בלחות. אימות מוצלח של המערכת באמצעות מדידות מדויקות של סטנדרטים עם ערכים איזוטופים קיצוניים מדגים את האמינות והפוטנציאל שלה לייעל הליכי המדידה. למרות הדיוק המופחת במדידות תמלחת רוויה מדוללת, ההתאמה של ערכים איזוטופים למגמות התאדות צפויות מאששת מחדש את תקפות המערכת לניתוח סביבתי. יתרה מכך, התאמת המערכת למדידות מים מאמפולות זכוכית מדגימה את הגמישות שלה להכנסת דגימות בצורות שונות. בהמשך, מחקרים עתידיים ישאפו להעמיק לתוך יכולות המערכת על ידי מדידה של איזוטופים יציבים בדגימות לחות אוויר באמצעות אמפולות זכוכית. תחום מחקר זה מבטיח לשפר את הבנתנו של תהליכי התאדות בסביבות היפר-מלוחות (Hypersaline), להציע תובנות לגבי דינמיקה סביבתית מתפתחת ולתרום למחקרים כוללניים יותר של אזור ים המלח.

11.5 מקורות

[1] De Graaf, S., Vonhof, H.B., Levy, E.J., Markowska, M. and Haug, G.H., 2021. Isotope ratio infrared spectroscopy analysis of water samples without memory effects. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 35(8), p.e9055.

12. בחינת הקשר בין האוכלוסיות המיקרוביאליות לבין כימיית המים בבולעני ים המלח - שנת מחקר שלישית

טויטש, נ.¹, אברני, ש.², לי, ק.^{1,2}, זילברמן, ת.¹, שרעבי, ג.¹, בן משה, ל.¹, עליאן, ס.¹, שרון, א.³, בוקמן, ר.⁴

¹ המכון הגיאולוגי

² החוג לביולוגיה אבולוציונית וסביבתית, אוניברסיטת חיפה

³ מרכז ידע גליל עליון (מיג"ל) ומכללת תל-חי

⁴ החוג למדעים גיאו-ימיים, בית הספר למדעי הים, אוניברסיטת חיפה

12.1 רקע

נסיגה מהירה של אגמים טרמינליים היא תופעה עולמית הנגרמת מהתחממות כדור הארץ ושימוש יתר במים (Wurtsbaugh et al. 2017). ייבוש זה מאיץ הידרדרות סביבתית, כגון עלייה במליחות ושינויים בהרכב היונים באגמים הללו, מה שהופך את סביבתם לקיצונית עוד יותר עבור המאקרו- והמיקרו- אורגניזמים המאכלסים אותם (Oren 2018). אוכלוסיות אלו מורכבות מאורגניזמים השייכים לכל שלוש העל-ממלכות הידועות: (1) אורגניזמים אוקריוטים, שהם בעלי תאים המכילים גרעין ואברונים (כגון אצות); (2) חיידקים, שהם אורגניזמים תאיים חסרי גרעין ואברונים; ו(3) ארכיאות, שהן אורגניזמים תאיים חסרי גרעין ואברונים (והינם קבוצה נפרדת מהחיידקים), שבמקרים רבים הם בעלי יכולת מאוד טובה לגדול בתנאי קיצון קשים (Oren 2018). ייבוש ים המלח הינו ייחודי בשל היווצרות אלפי הבולענים, כתוצאה מנדידת קו החוף והמערכת ההידרולוגית המובילה להמסה של אוופוריטים בתת הקרקע (Abelson et al., 2006; Frumkin et al., 2011). בזמן שתהליכים אלו מאיימים על תשתית החוף ועל חיי האדם היומיומיים (Nof et al., 2013), וחופי האגם הטבעיים שונים באופן בלתי הפיך, בולענים אלו יוצרים בית גידול מימי חדש בעל מאפיינים ייחודיים המשתנים ללא הרף. בתי גידול אלו כוללים מערכות מיקרוביאליות ייחודיות המספקות הזדמנות למחקר בתנאים אביוטיים קיצוניים ודינמיים.

אחד ההיבטים המעניינים של הבולענים באגן ים המלח, שהוכח כמשפיע על הרכב והישרדות של המיקרואורגניזמים (Adar et al., 2014; Hirshberg et al., 2019), הוא השונות הגבוהה של רמות המליחות בבולענים, הנעה בטווח הרחב של 0.5-550 גרם/ליטר (Zilberman-Kron 2008). רבים מהבולענים מלאים במים היפרסליניים, המצויים בעל-רוויה במשקעי ההולוקן בהם נוצרו הבולענים. מקור תמלחות הבולענים הוא תמלחת אינטרסטיאלית של ים המלח שכיסה את האזור בעבר (Zilberman-Kron 2008) המתאדה ומתרכזת עקב תנאי הסביבה הקיצוניים. בנוסף, ייתכן גם כי באתרים שונים ערבוב עם מעיינות מלוחים סמוכים בעלי הרכבים שונים אף הוא תורם לשונות הגבוהה. יתר על כן, התמלחות ההיפר-סליניות בבולענים רגישות מאוד

לתנודות קצרות טווח בלחות היחסית בעקבות שינויים עונתיים (Zilberman et al., 2017), ומאזן המים בבולענים אף רגיש לנדידת קו החוף עקב הירידה העקבית במפלס ים המלח.

מליחות היא גורם לחץ סלקטיבי חזק מאוד המניע את האבולוציה וההרכב של אוכלוסיות מיקרוביאליות (Kimbrel et al., 2018), ולכן מצופה ששונות המליחות במרחב ובזמן תשפיע על הרכב אוכלוסיית המיקרואורגניזמים בבולענים. גורם נוסף המניע את האבולוציה המיקרוביאלית ואת הדינמיקה של האוכלוסייה הוא הוירוסים שמדביקים אותם (Rodriguez-Valera et al., 2009). לדוגמה, שונות גנומית גבוהה מאוד בתוך מין ארכיאה בודד דווחה בעבר בבריכת מלח רוויה קטנה. חלק ניכר מהמגוון הזה נחשב תוצאה של "constant-diversity dynamics" המונעת על ידי וירוסים (Rodriguez-Valera et al., 2009). אך, למרות שהבולענים סביב ים המלח נחקרים מזה מספר עשורים, ידוע לנו מעט מאוד על הרכב אוכלוסיות המיקרואורגניזמים, והוירוסים המאכלסים את הבריכות הנוצרות בהם, ועוד פחות על הדינמיקה שלהם בזמן. כדי לזהות אוכלוסיות מיקרוביאליות, נהוג לרצף את החומר הגנטי (DNA) מסביבת המחקר, ולייצר מהרצפים מטהגנום אשר מייצג את הרכב הגנומים של אוכלוסיית המקור. ריצוף החומר הגנטי מאפשר להבין את הרכב האוכלוסייה והדינמיקה בין מרכיביה, ואת זיהוי השונות שלה בין בולענים שונים.

12.2 מטרת העבודה

1. לאפיין על בסיס עונתי את אוכלוסיות המיקרואורגניזמים ואת הגיאוכימיה של המים בבולענים שונים המצויים בסמוך לחוף ים המלח.
2. לקבוע את השפעתם של גורמים אביוטיים וביוטיים על הדינמיקה של אוכלוסיות המיקרואורגניזמים בבולענים.

12.3 שיטות

המחקר מתבצע בקבוצת בולענים באיזור עין גדי בקרבת חוף ים המלח, מצפון לשפך נחל דוד ובשנת 2023 לאחר חיפוש ממועד לבולענים עם צפיפות גבוהה יותר, הוסף אזור הדיגום בשפך החצצון (איור 12.1A). במהלך שלוש שנות הדיגום (2021-2023) מתוך 11 בולענים שנדגמו מאזור המחקר הראשוני בעין גדי (EG), שלושה בולענים התייבשו במהלך 2022 (2, 11, 13) ועוד שני בולענים במהלך 2023 (1, 9B) (איור 12.1B). אזור המחקר הראשוני בעין גדי הורחב מעט צפונה והחל מהדיגום השני במאי 2022, נדגמו שלושה בולענים בסמיכות לים המלח. משום שברוב מי הבולענים שנדגמו בשתי שנות המחקר הראשונות, הצפיפות לא עלתה מעל 1.25 גר"ס/מ"ל³ (למעט דגימות ספורות), בוצעה עבודת שדה נרחבת לאיתור בולענים בצפיפות גבוהה מזו. במרץ 2023 נדגמה בריכה אחת באתר חצצון (HA) על ידי רחפן עם צפיפות גבוהה מ 1.3, והחל מיוני 2023, ניתן היה להגיע לאתר רגלית ולדגום שלוש בריכות בצפיפות גבוהה (איור 12.1C).

מי הבולענים במהלך 2023 בדומה לשנת 2022 נדגמו להרכב כימי כללי, ליסודות קורט, לחומר אורגני כולל (TOC) ומומס (DOC) ולהרכב איזוטופי של חמצן ($\delta^{18}\text{O}$); בשדה נמדדו צפיפות, מוליכות חשמלית, טמפרטורה, דרגת חומציות (pH) ורמת החמצן של מי הבולענים.

מכל בריכה נדגמו מים לשם איסוף האורגניזמים המיקרוביאלים שבהם, ושונעו לאוניברסיטת חיפה להמשך טיפול. באותו היום, דגימות המים סוננו דרך מספר פילטרים (משורשרים) כדי לאסוף מיקרואורגניזמים בגדלים

שונים : 11 מיקרון, 5 מיקרון ו- 0.22 מיקרון. הפרקציה שעברה את הפילטר האחרון נקראה הפרקציה הויראלית (מאחר והרוב המוחלט של האורגניזמים התאיים לא יכולים לעבור פילטר זה). כל הדגימות סוננו עד השלב בו לפחות אחד מהפילטרים נסתם. DNA הופק מכל הפילטרים.

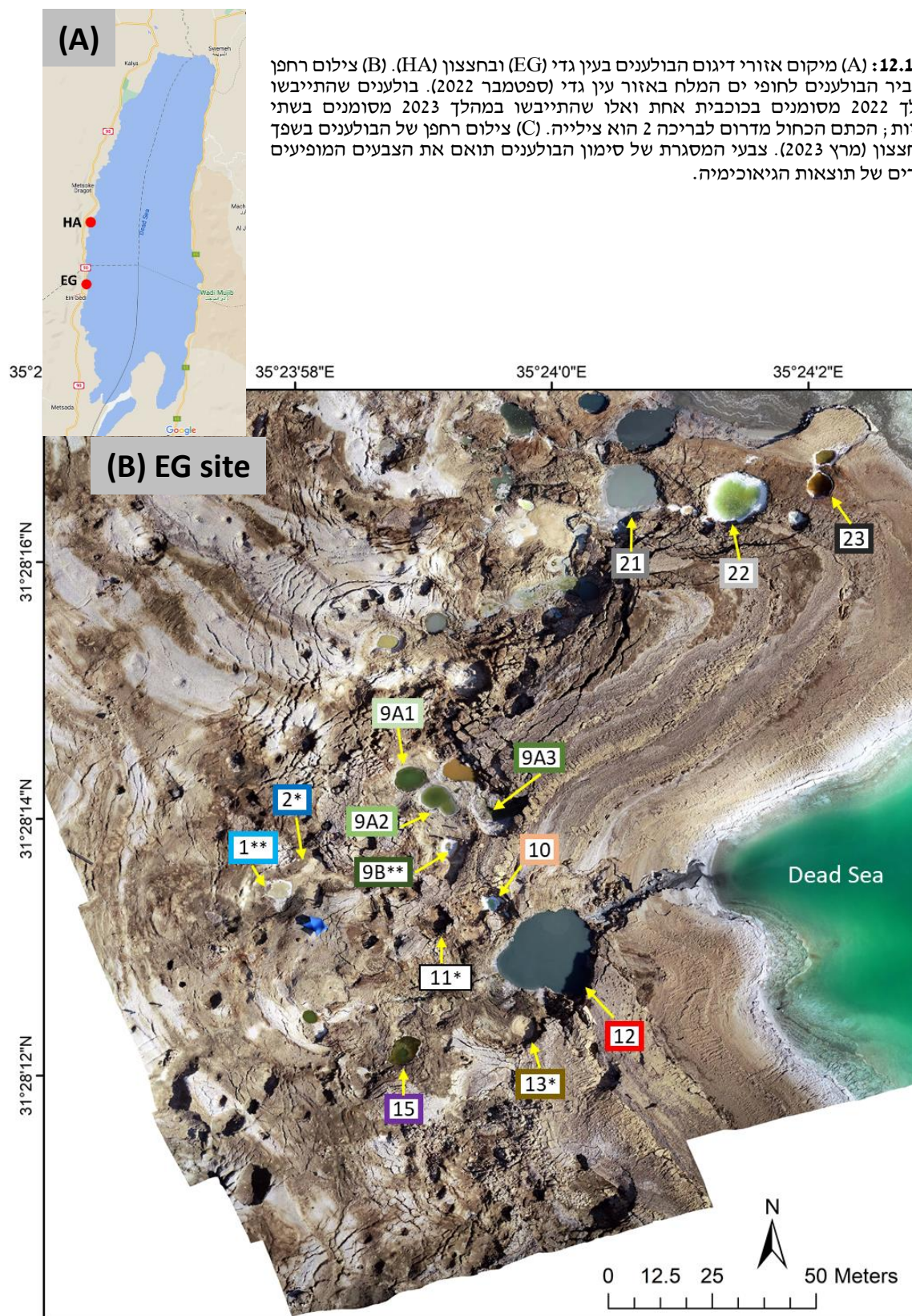
חומצות גרעין (DNA ו-RNA) הופקו מכל הדגימות שנאספו החל במאי 2022 (חוץ מספטמבר 2023, שם הופק רק DNA), הן מהפרקציה התאית (גודל החלקיקים בה מתאים לגודלם של אורגניזמים המורכבים מתאים – חיידקים, ארכיאות ואוקריוטים) ומהפרקציה הויראלית (גודל החלקיקים בה מתאים לגודלם של וירוסים). כל דגימות ה-DNA נשלחו לריצוף (במרכז הריצוף Rush University Genomics and Microbiome Core) בשיקגו, ארצות הברית. הנתונים הללו אינם זמינים ולכן התוצאות המוצגות בדו"ח זה הן רק מהפרקציה של הדיגומים מ-2021 ומינואר 2022. המטהגנומים עברו אסמבלי (תהליך בו רצפי DNA קצרים מחוברים ליצירת רצפים ארוכים המייצגים גנומים של מיקרואורגניזמים). מתוך הרצפים שהורכבו, זוהו 427 רצפים המהווים גנומים שלמים או כמעט שלמים של חיידקים או ארכיאות על פי רמת הדמיון שלהם לאורגניזמים ידועים באמצעות תוכנית ייעודית. הקשרים האבולוציוניים בין הגנומים שזוהו, בהשוואה לגנומים ידועים, נבחנו בעזרת עצי פילוגנטיים שנבנו ע"י GTDB-tk (Chaumeil et al., 2020). רמת הדמיון בין האוכלוסיות חושבה ע"י Principal Coordinate Analysis (PCoA) בעזרת חבילה ייעודית R (RStudio Team, 2023). הרכב אוכלוסיות חושב ע"י Kraken (Wood & Salzberg, 2014) ו Bracken (Lu et al., 2017), והקשר בין הרכב האוכלוסיות לגורמים האביוטים חושב בעזרת מבחן Mantel (Diniz-Filho et al., 2005) ע"י חבילה ייעודית R.

רחפן Phantom 4 pro, שהורם לגובה 40 מטר, איפשר לתאר את השינויים בצבע וגודל הבריות לאורך שתי שנות הדיגום. הסקר הפוטוגרמטרי נעשה בחפיפת תמונות של 75%. בעזרת תוכנת Agisoft עובדו התמונות ליצירת אורתופוטו ברזולוציה של 1.5 ס"מ לפיקסל.

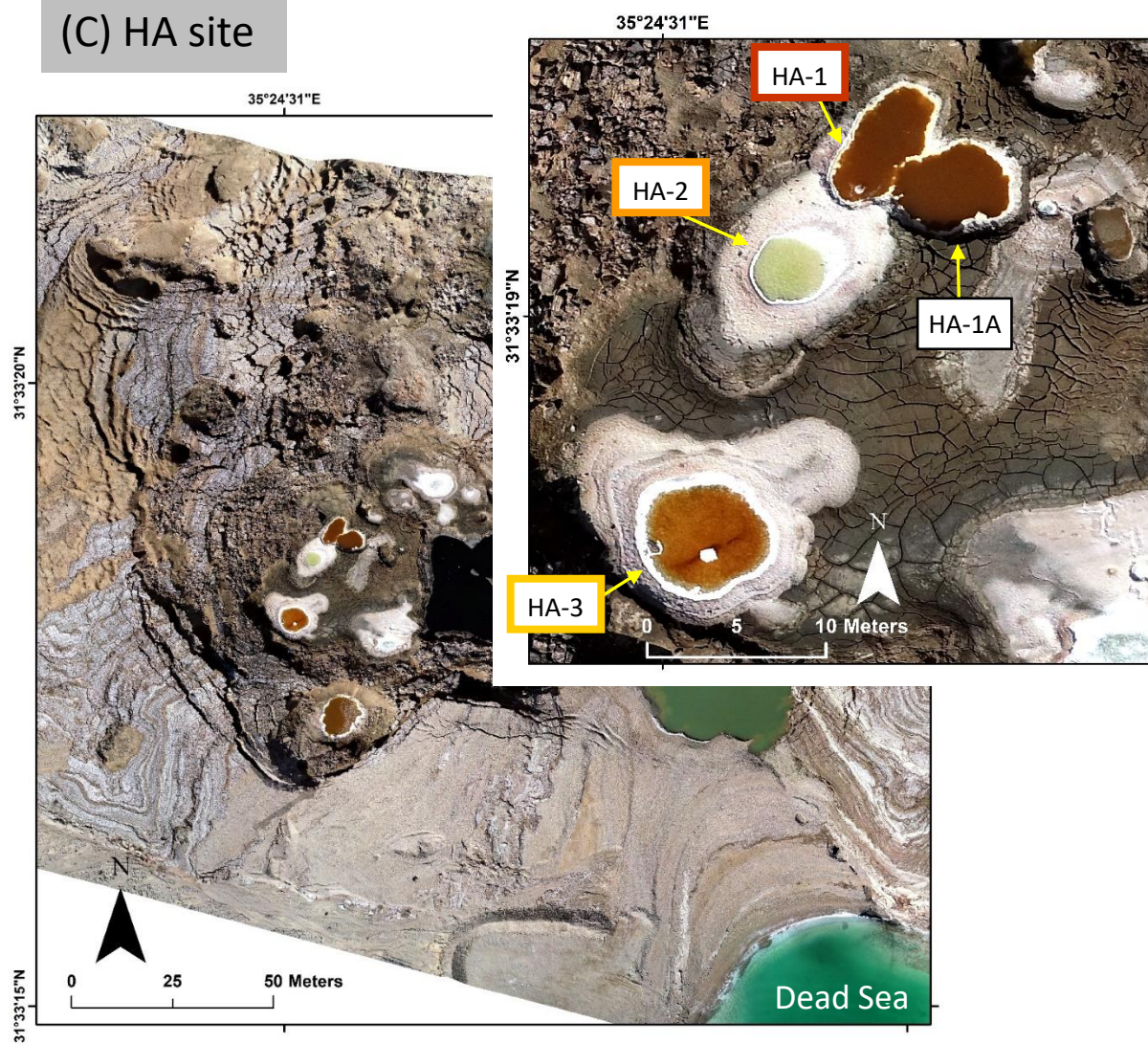
12.4 תוצאות ודין

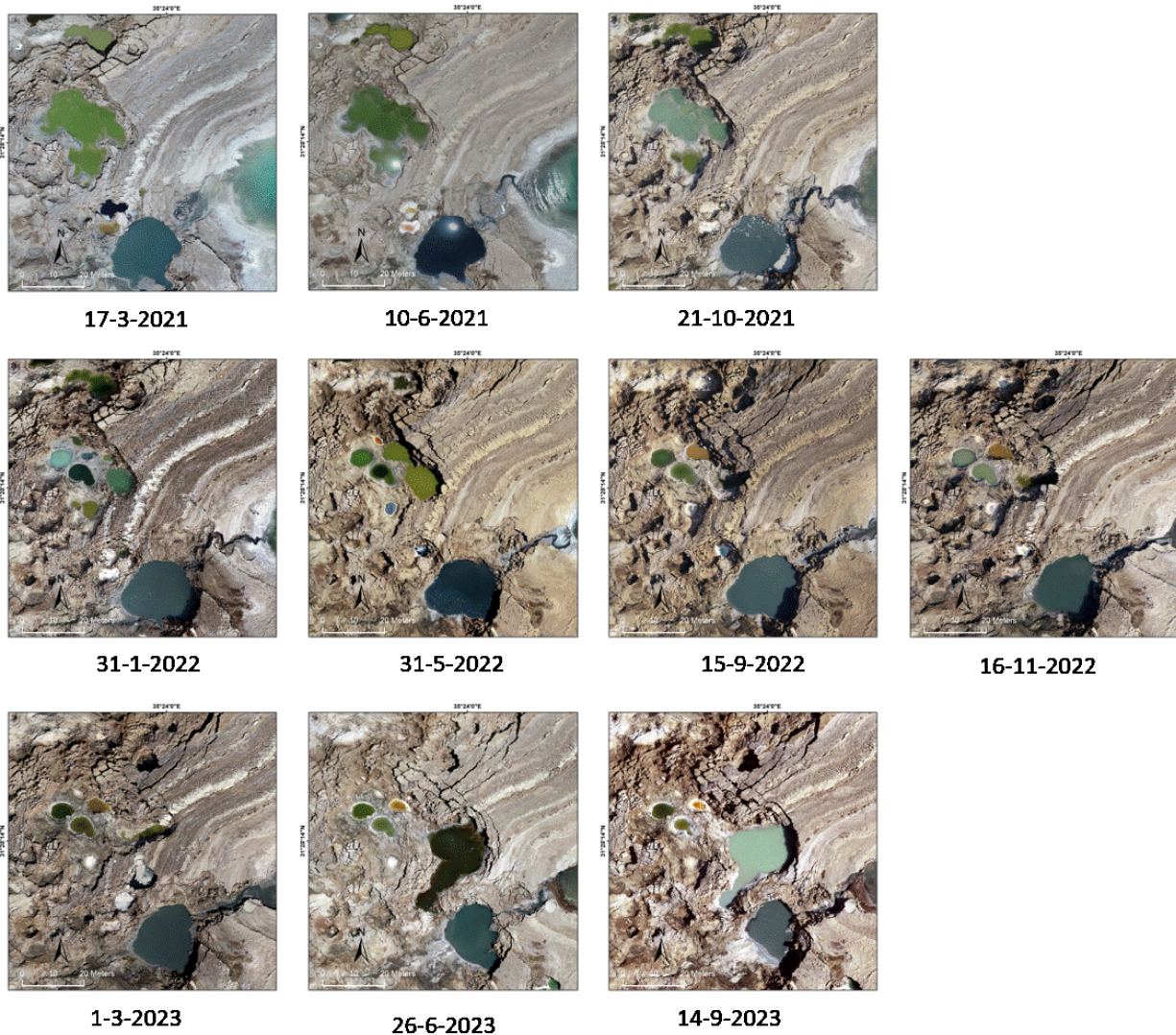
שונות בזמן ובמרחב במופע הבריות

צילומי הרחפן ותיאור השדה חשפו שגודל, צבע ואופי הבריות היה שונה באופן בולט באותו תא שטח, וכן מימיהן של הבריות השתנו לאורך תקופת הדיגום. בשל ירידת מפלס ים המלח והתנתקות ממקור ההזנה של הבריות, חלק מהבריות התייבשו (איור 12.1B). השינויים המשמעותיים ביותר התרחשו בבריקה 9 שהתפצלה למספר רב של בריכות משנה במהלך תקופת המחקר (איור 12.2), דבר שבא לידי ביטוי גם בתכונות הכימיות של מי הבריות. במהלך 2023, בין הדיגום של מרץ לדיגום של יוני, קרסה התשתית בין בריכה 9 לבין בריכה 10 ונוצרה בריכה גדולה מאוד שדומה באופייה בעיקר לקבוצת בריכות 9A.



(C) HA site



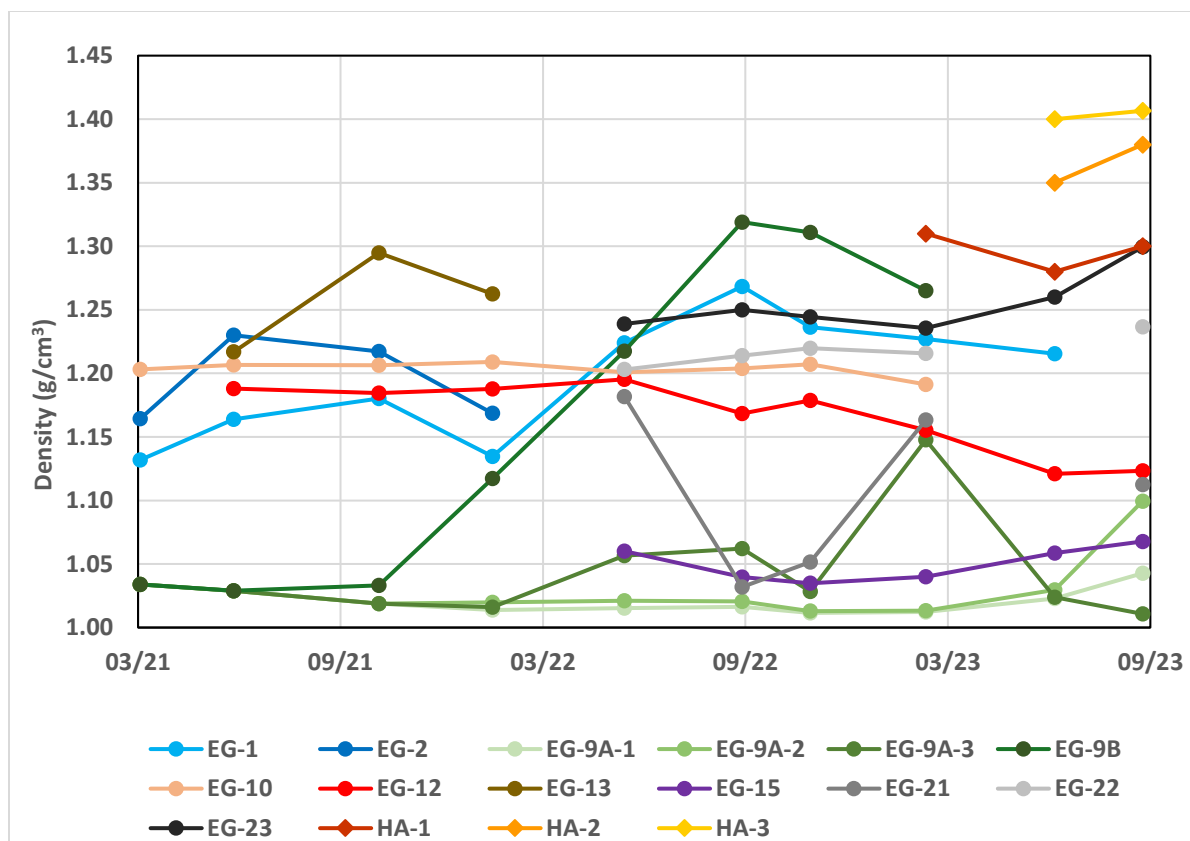


איור 12.2: השתנות בולען 9 עם הזמן (2021-2023). השינויים העיקריים הינם (1) התפצלות הבריכה הגדולה לבולעני המשנה 9A ו 9B (21-10-2021); (2) פיצול בריכת בולען 9A לבריכות משנה (31-1-2022), שמהן נדגמו שלוש בריכות (9A1, 9A2, 9A3), והתחברות של בריכה 9A3 שכמעט התייבשה (1-3-2023) עם בריכה 10 ליצירת בריכה גדולה (26-6-2023). שמות הבריכות מופיעות באיור 12.1B.

תכונות כימיות של מי הבולענים

צפיפות המים (גר/ס"מ³) שנמדדה במשך שלושת שנות הדיגום באזור עין גדי שונה משמעותית מאזור הדיגום בחצצון (איור 12.3). כל הבריכות בחצצון הינן בצפיפות גבוהה המגיעה עד 1.41 גר/ס"מ³ (עם טמפרטורות גבוהות שהגיעו עד ל 55 מעלות צלסיוס).

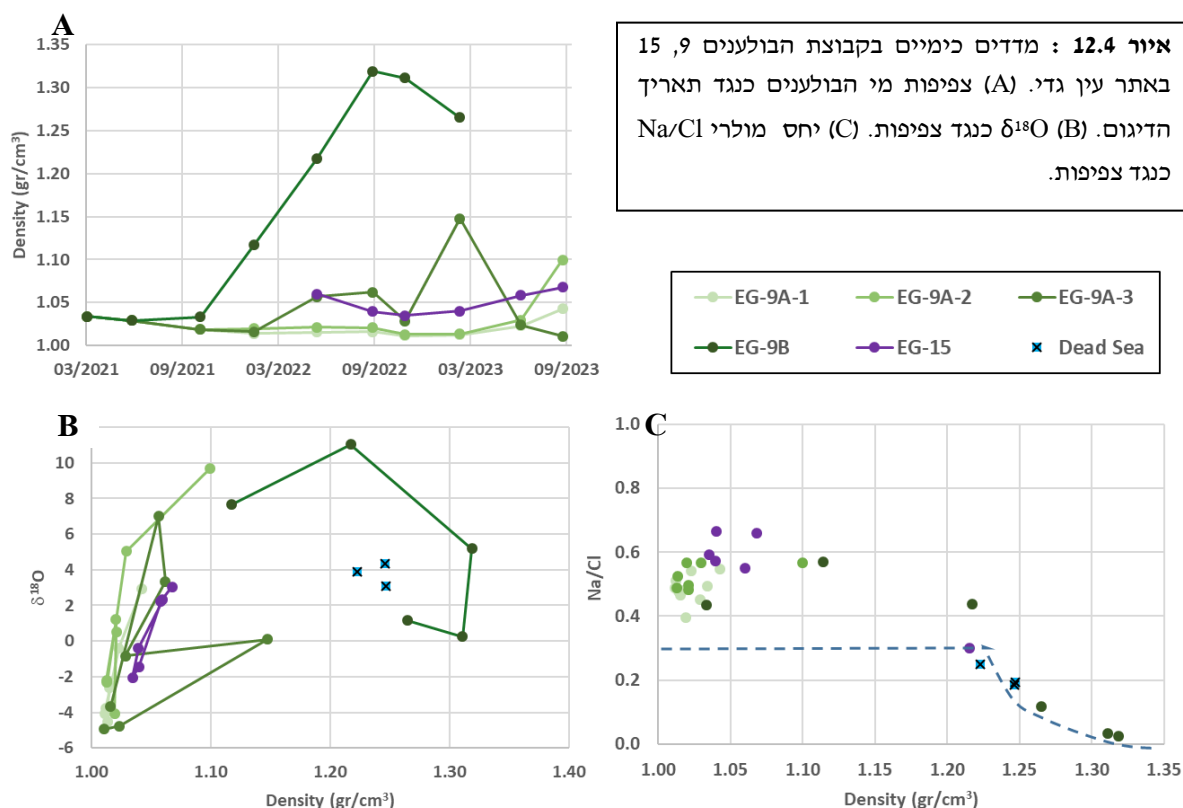
באזור עין גדי אופיינו שלוש קבוצות עיקריות של מי בריכות בולענים עם תכונות כימיות ברורות. בולענים שבהם צפיפות התמלחת נשארה יחסית קבועה לכל אורך תקופת הדיגום מעידים על כך שיש הזנה קבועה של תמלחת מסוג מסויים לתוך הבולען.



איור 12.3: צפיפות מי הבולענים במהלך שלושת שנות הדיגום 2021-2023

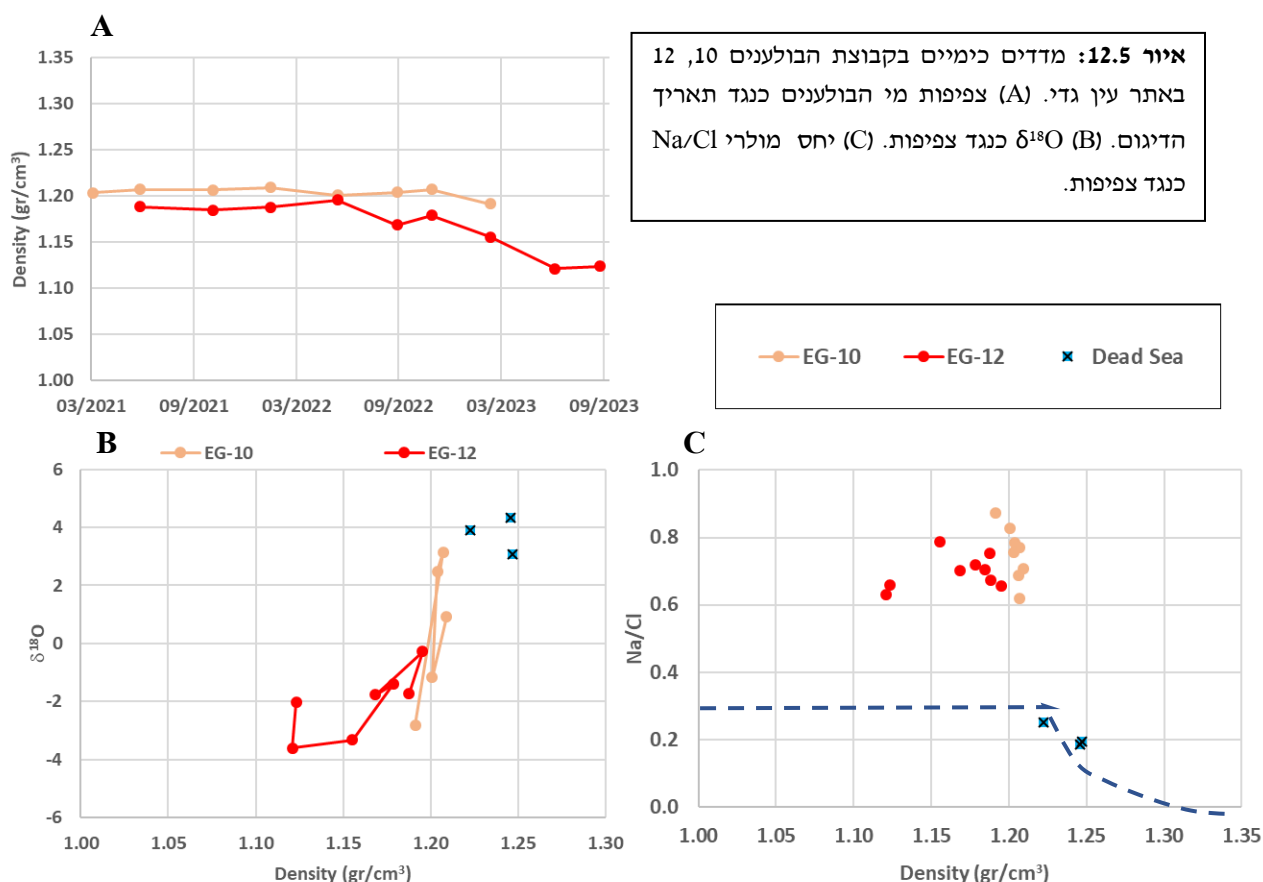
הקבוצה הראשונה כוללת את קבוצת בריכות 9 ואת בריכה 15 והיא מאופיינת בצפיפות נמוכה ביחס לשאר הבריכות (איור 12.4A). ערך הצפיפות נישמר כל עוד הבריכות מחוברות למקור מים משותף המזין אותן. עם ניתוק בריכה ממקור ההזנה ואידוי המים והתרכזותם, הצפיפות במים עולה. תהליך זה התקיים בצורה המובהקת ביותר בבריכה 9B שהחל מאוקטובר 2021 נצפתה הפרדה מבריכה 9A (שבהמשך נפרדה לבריכות רבות נוספות), ועברה תהליך אידוי שבו הצפיפות עלתה מ 1.03 (ספטמבר 2021) ל 1.32 גר"ס/מ"מ³ (ספטמבר 2022). ירידת הצפיפות לאחר מכן, מקורה בעבוי מים מהאוויר אל תוך גוף המים הקטן מאוד (עומק וקוטר של כ- 20 ס"מ שנותר בבריכה. מדד נוסף המעיד על הרכב המים בבולענים הוא $\delta^{18}\text{O}$) (איור 12.4B). מדד זה נותן את ערך הקצה של המים המוזנים לתוך הבולען. כל עוד הצפיפות וההרכב האיזוטופי נשארים קבועים, ניתן להסיק שמי המקור ממשיכים להזין את הבולען. "הכבדה" בערך האיזוטופי מעידה על אידוי של המים מהבולען. "הקלה" בערך האיזוטופי מעידה על כניסה של מים קלים יותר או ספיחה של מים מהלחות באוויר שמאופיינים בהרכב איזוטופי קל. בולעני 9A מראים הרכב איזוטופי בסביבות 4%— בתמלחת המקור. בכולם יש השתנות כלפי מעלה שנגרמת מאידוי בעונות השנה השונות, וחזרה לערך האיזוטופי והצפיפות של המקור. בולען 9A2 מראה שבתאריך הדיגום האחרון (ספטמבר 2023) ישנה עליה משמעותית בצפיפות ובהרכב האיזוטופי, מה שמעיד על ניתוק מתמלחת המקור. בהשוואה לבולעני 9A, ניתן לראות שבולען 9B התנתק לחלוטין מתמלחת המקור והתהליך העיקרי שמתרחש בתוכו הוא אידוי הגורם להכבדה איזוטופית. כמו שניכר ממדידות הצפיפות, גם ההרכב האיזוטופי מעיד על עיבוי של מים מטאוריים המקלים את ההרכב האיזוטופי בבולען זה בשני תאריכי הדיגום האחרונים (יוני וספטמבר 2023).

איור 12.4C מציג את היחס המולרי של נתרן לכלור (Na/Cl) במי הבולענים. יחס זה מצביע על שינויים בדרגת הרוויה של התמיסה להליט (NaCl). כאשר תמיסה מתאדה וריכוז המומסים בה עולה, היחס ביניהם יישאר קבוע, כל עוד אין רוויה להליט. כאשר התמיסה מגיעה לרוויה, היחס ישתנה בהתאם ליחס ביניהם במלח. בתמיסות באזור ים המלח, $Na/Cl > 1$, ולכן השקעת הליט תגרום לירידה ביחס זה והמסה תעלה אותו לכיוון 1. באיור 12.4C מסומן בקו מקווקו השינוי בתת הרוויה של תמלחות באזור ים המלח בהן $Na/Cl \sim 0.3$ עד צפיפות של 1.23, שמעליה ישנה ירידה ביחס זה המעידה על השקעה של הליט ככל שהצפיפות עולה. מיהול של מי הבולענים עם מים מטאוריים בנוכחות הליט מעלה את יחס הנתרן לכלור עם צפיפות קבועה בסביבות 1.23 (איור 12.4). מיהול של מי בולענים בנוכחות הליט מעלה את היחס Na/Cl לכיוון 1. בקבוצת בולעני 9 ניתן לראות שבמים המזינים את הבולענים יחס Na/Cl גבוה יחסית (~0.5) לקוטרת הרוויה, מה שמעיד על המסת מלח על ידי התמלחת עוד בטרם כניסת המים לבולען. בולען 9B מראה ירידה של יחס Na/Cl בצפיפות גבוהה מ-1.23, מה שמעיד על השקעת הליט במי הבולען. כל המתואר לגבי הבולענים מקבוצה 9 נכון גם לגבי בולען 15, ולמרות שהוא רחוק מהם הוא מראה קבלה של מים מאותו סוג.



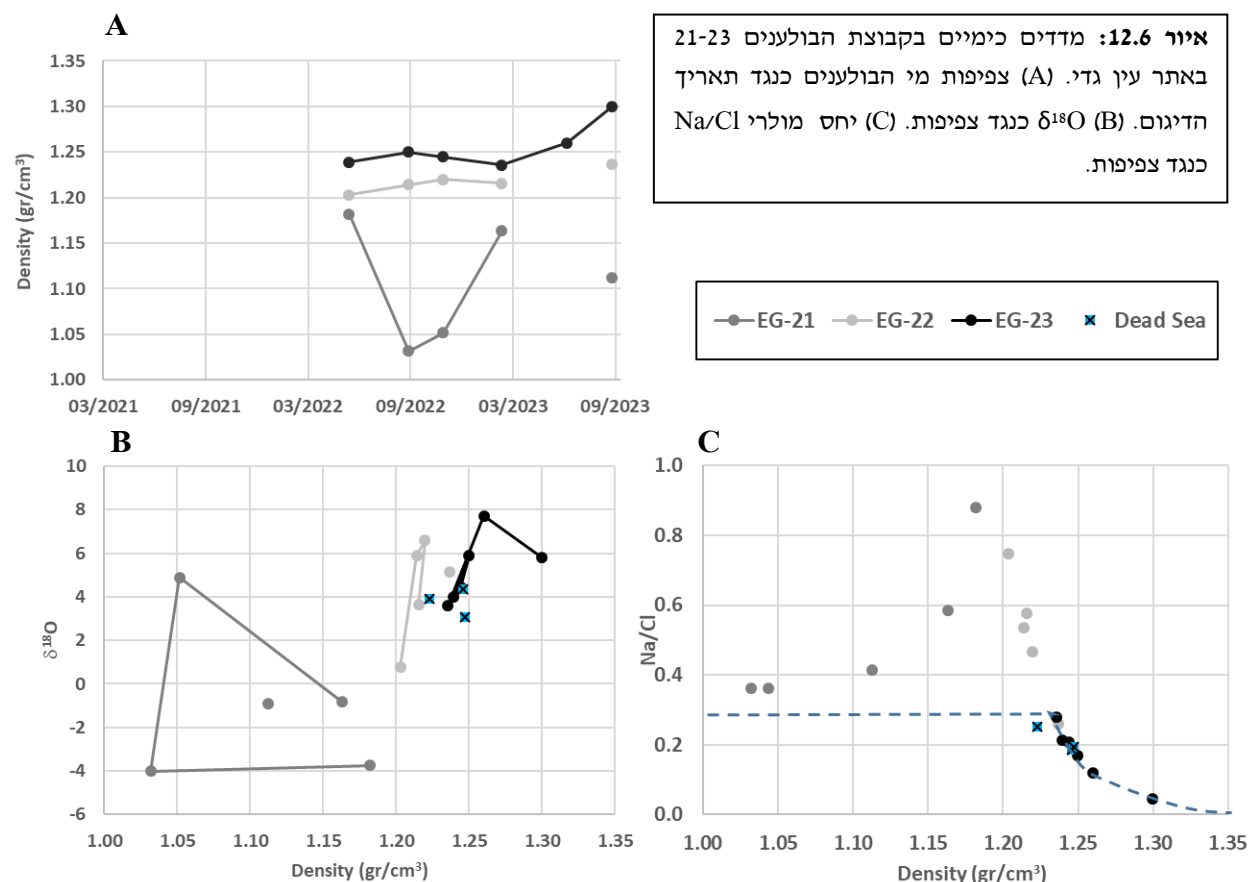
הקבוצה השנייה כוללת את בריכות 10 ו 12 שהינן יציבות לאורך למעלה משנתיים עם צפיפות קבועה סביב 1.20 גר/ס"מ³ (איור 12.5A), דבר המעיד על הזנה קבועה ויציבה של מים לתוך הבולענים הללו. עובדה זו נתמכת על ידי תצפית השדה של זרימה חזקה של מים לתוך בולען 12, ואף זרימה מבולען זה לכיוון ים המלח דרך תעלה צרה שאורכה כיום מגיע לעשרות מטרים בודדים (איורים 12.1B ו 12.2). הערך האיזוטופי בקבוצה זו דומה לזה

של קבוצת בולעני 9, 15 אך הצפיפות גבוהה בהם משמעותית (איור 12.5B). היחס Na/Cl גבוה יותר ונע סביב 0.6-0.8, מה שמעיד על המסה רבה יותר של מלח בתת הקרקע טרם כניסת התמלחת לבולענים אלו (איור 12.5C). לקראת סוף תקופת הדיגום (החל מיוני 2023; שתי הנקודות האחרונות), בולען 10 התחבר עם בולען 9A3, ולכן לא מוצג יותר באיורים, ומאידך, בולען 12 מראה ירידה קלה בצפיפות ובהרכב האיזוטופי, דבר המרמז על כניסה של מים מטיפוס 9 לבולען 12, ואכן נצפתה זרימה באזור הדרומי של בולען 9A3 באזור שבו היה בעבר בולען 10.

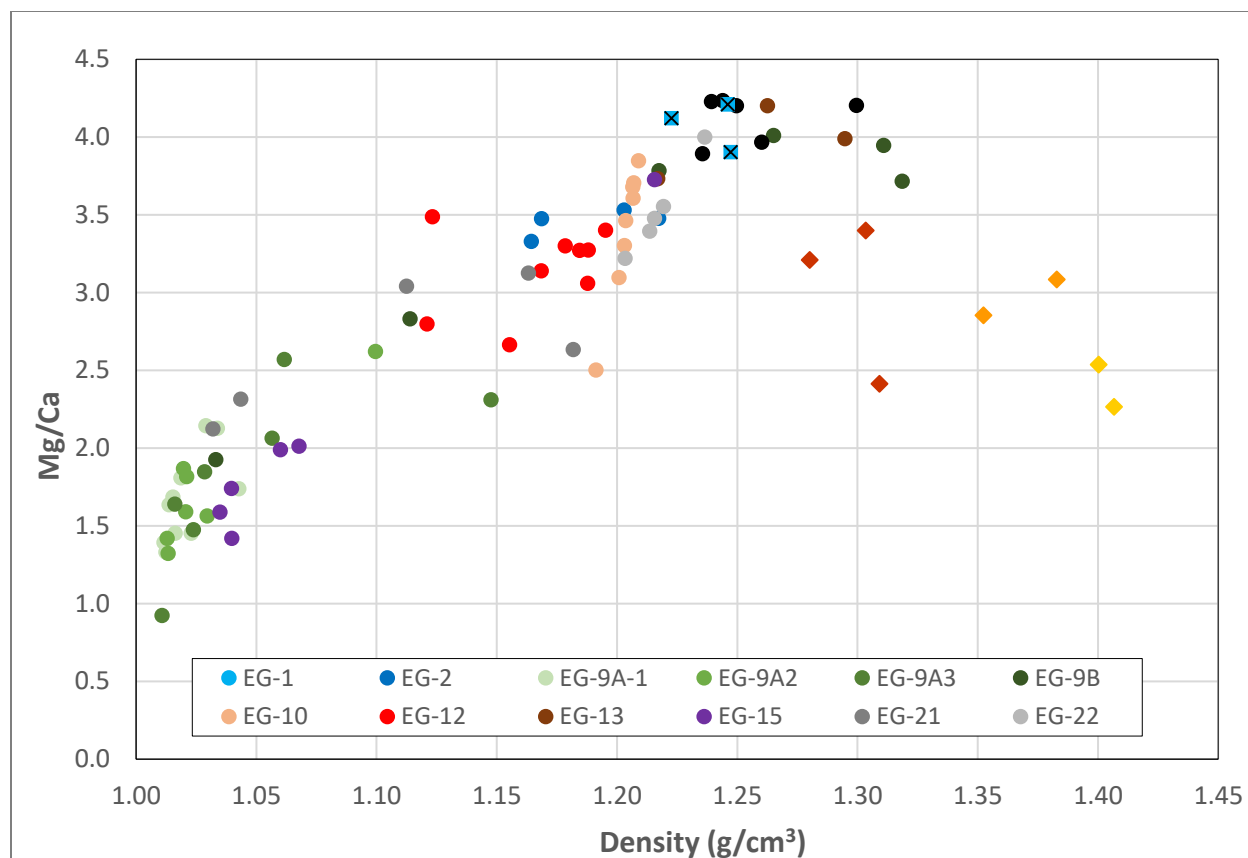


הקבוצה השלישית כוללת את בולענים 21-23 הנמצאים בצפון האתר (איור 12.6). בקבוצה זו צפיפות המים דומה לצפיפות ים המלח ונשארת קבועה לאורך תקופת הדיגום ברוב המקרים (איור 12.6A). בולען 23 מראה דמיון למי ים המלח בהרכב האיזוטופי ובצפיפות. זאת בנוסף לאידוי בתאריכי הדיגום האחרונים המתבטא בעליה בצפיפות ובהרכב האיזוטופי וירידה ביחס Na/Cl, דבר המעיד על כך שתמלחת ים המלח מזינה באופן קבוע את הבולען הזה. כאשר ניתוק קל מהזנת התמלחת גורם לאידוי והשקעה של הליט. ואכן, מפלס הים נמצא במרחק של מטרים בודדים מבולען זה (איור 12.1B). בולען 22 מראה התנהגות דומה לבולען 23, אך צפיפותו מעט נמוכה והוא נמצא באזור של תת רויה למלח ולכן ממס הליט, מה שמביא ליחס Na/Cl גבוה במימיו (איור 12.6C).

בולען 21 לא שייך לגמרי לקבוצת בולענים זו בתכונותיו הכימיות למרות קרבתו הרבה. הוא למעשה מראה כניסה לסרוגין של תמלחות מסוג 9 או 10, 12 בתאריכי הדיגום השונים. הערך האיזוטופי בו דומה לערך בקבוצות האלו והצפיפות דומה לפרקים לזו של קבוצה 9 ולפרקים לזו של קבוצה 10,12. תצפית זו מעידה על כך שבולען זה מוזן מאופקי סדימנט שונים המאפיינים את שתי הקבוצות הנזכרות לעיל והדינמיקה המהירה בצורת הבולען יוצרת הזנת מים משתנה עם הזמן לתוך בולען זה.



גם ביחסי מגנזיום לסידן (Mg/Ca) ניתן להבחין בחלוקה לקבוצות (איור 12.7). תמלחת ים המלח מאופיינת ביחס $\text{Mg/Ca} \sim 4$. בולענים 22, 23 מראים דמיון רב למי ים המלח גם בפרמטר זה. לעומת זאת, בבולענים בעלי הצפיפות הנמוכה, 9 ו-15 נצפה יחס Mg/Ca נמוך משמעותית בין 1.5-2.5. ערכים אלו מצביעים על כך שהתמלחת המזינה את בולעני קבוצה זו היא מדולדלת במגנזיום או מועשרת בקלציום. כל הבולענים שנמצאים בטווח שבין הצפיפויות של ים המלח לצפיפות מי קבוצה 9, מראים מעין קו ערבוב בין שני מרכיבי קצה אלה. בצפיפויות שמעל 1.3 (אזור בו נמצאים בעיקר בולעני אתר חצצון), ניתן לראות שהיחס Mg/Ca יורד, דבר המעיד על הגעה לרוויה של מלח קרנליט ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$) והשקעה של מגנזיום מתוך התמלחת.



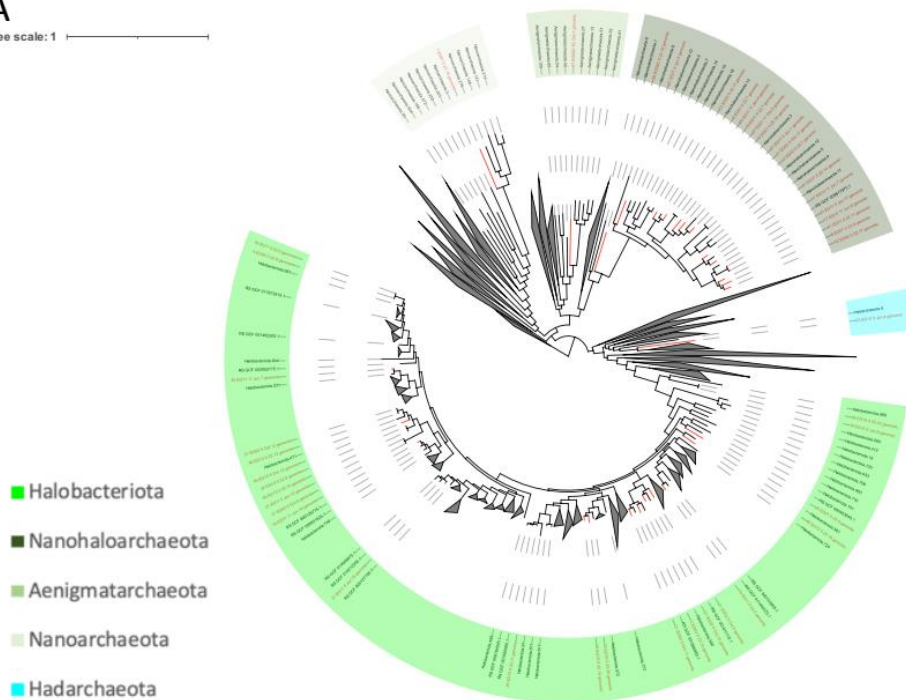
איור 12.7: יחסי מגנזיום לסידן כנגד הצפיפות במי הבולענים בעין גדי ובחצון.

מיקרואורגניזמים בבריכות

במהלך 2022 רוצפו 108 דגימות DNA, ו 22 דגימות RNA. בנוסף, נשלחו לריצוף DNA 130 דגימות נוספות במהלך 2023. תוצאות ריצוף זה עדיין לא התקבלו. תוצרי ריצוף הDNA (מטהגנומים) משקפים את זהות המיקרואורגניזמים בדגימות השונות (אורגניזמים תאיים ווירוסים בעלי גנום מדנ"א), ואילו תוצרי ריצוף דגימות הRNA (מטהטרנסקריפטומים) משקפים את פעילות המיקרואורגניזמים, ובנוסף מאפשרים לזהות וירוסים בעלי חומר גנטי המורכב מRNA. תוצאות הריצוף המוצגות בדו"ח זה הן משלוש דגימות שנאספו ב 2021 ואחת נוספת מינואר 2022. מתוך הרצפים של המטהגנומים שהורכבו, זוהו 427 רצפים המהווים גנומים שלמים או כמעט שלמים של חיידקים או ארכיאות. גנומים אלו שייכים ל 104 מיני חיידקים ו 47 מיני ארכיאות ממערכות (קבוצות טקסונומיות) שונות (איור 12.8). 137 מתוך המינים הללו הם מינים חדשים, שלא זוהו במקומות אחרים (לא מופיעים במסדי נתונים מפורסמים). אחד ממיני החיידקים, שמקורו בבריכה 9A2 (ינואר 2022; איורים 12.1B ו 12.2), כנראה מהווה נציג ראשון ממערכה חדשה למדע. חלק ניכר ממיני הארכיאה שזוהו בבריכות הבולענים שייכים לקבוצות טקסונומיות שזוהו בעבר בים המלח (כגון Halobacteria), אך בשונה מים המלח בו הרוב המוחלט של המינים שזוהו הם מיני ארכיאות, בבולענים עיקר המינים הם מיני חיידקים (איור 12.9). (Rhodes et al., 2012; Bodaker et al., 2010).

A

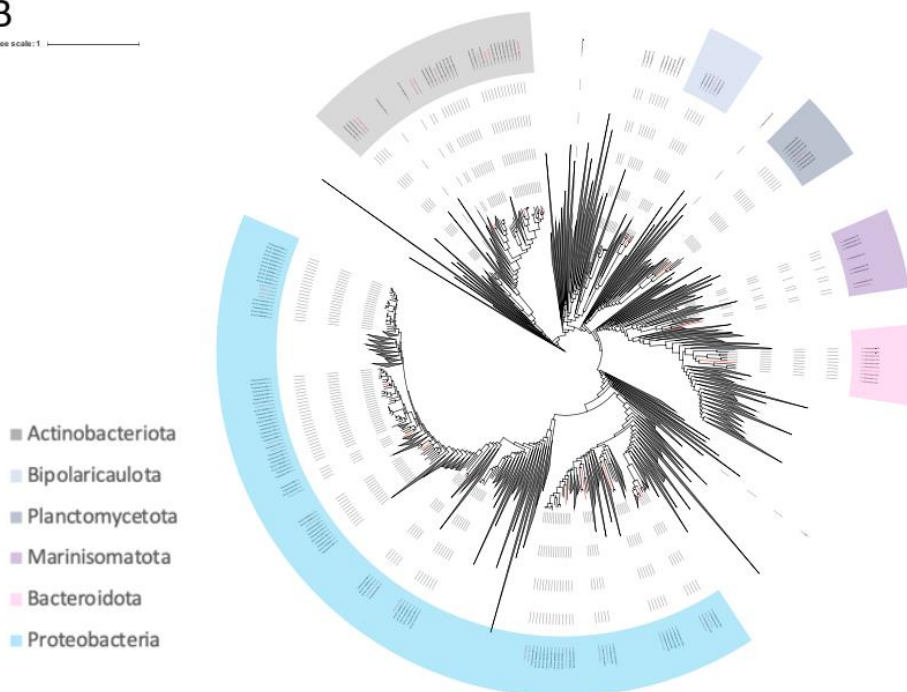
Tree scale: 1

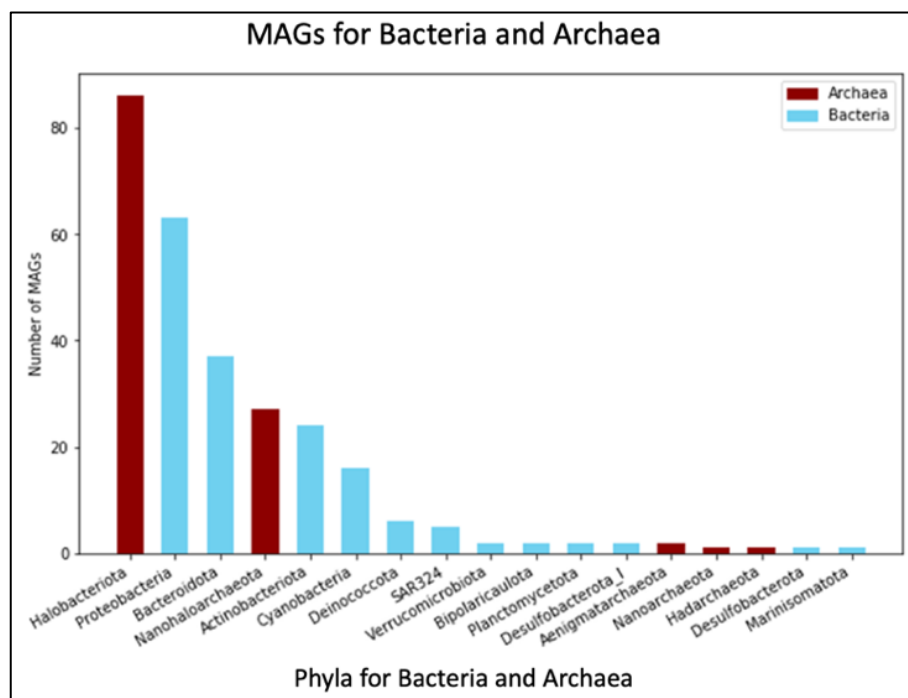


איור 12.8: פילוגנזה (קרבה אבולוציונית) של הארכיאות (A) והחידקים (B) שזוהו בבריות הבולענים. אלו עצים פילוגנטיים של גנומים שלמים, המבוססים על רצפי DNA. בארכיאות מסומנות חמש מערכות ובחידקים שש מערכות שמציגות את המערכות שבהן זוהו גנומים רבים. כל אורגניזם מיוצג על ידי קו שתחילתו במרכז המעגל וקצהו בפריפריה של המעגל. אורך הקווים המחברים כל שני אורגניזמים, מייצג את רמת הדמיון ביניהם וככל שהמרחק קצר יותר, הם יותר דומים. העצים מכילים אורגניזמים הידועים כפרנס ואלו שמסומנים באדום הם כאלו שזוהו בבריות הבולענים. משולשים מייצגים קבוצות מרובות אורגניזמים ולא ניתן לסמן בהם את האורגניזמים שזוהו בבריות.

B

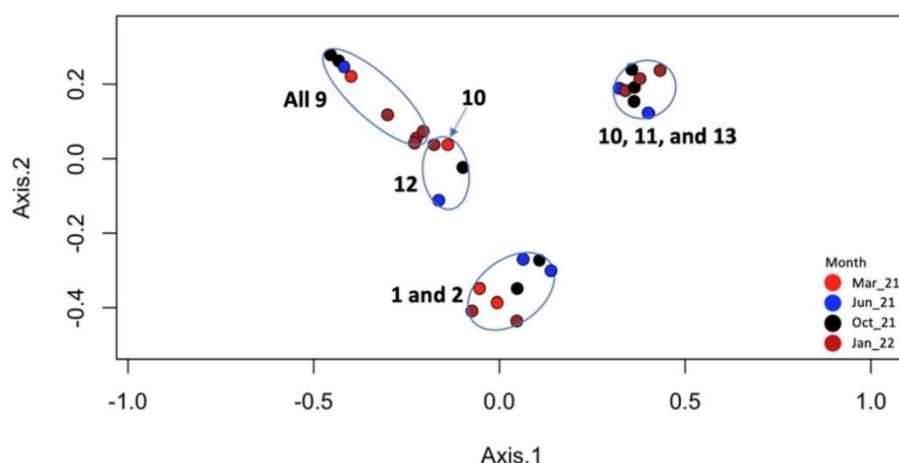
Tree scale: 1





איור 12.9: קבוצות טקסונומיות בבולענים. התפלגות מיני החיידקים (תכלת) והארכיאות (אדום) לפי הגנומים ששוחזרו מהדגימות שנאספו בין מרץ 2021 וינואר 2022. מוצגות 17 המערכות המכילות את המספר הרב ביותר של גנומים.

הרכב האוכלוסיות המיקרוביאליות הושפע יותר מזהות הבריקה הנדגמת מאשר תאריך הדגימה (איור 3.2.10). האוכלוסיות מבריקות 1 ו 2 (שהיתה זרימה ביניהן מעל לפני השטח) היו דומות האחת לשניה, ונראה כי הדגימות שנאספו בחודשי הקיץ מבריקות אלו (יוני ואוקטובר) התקבצו לחוד מהדגימות שנאספו בחודשי החורף (מרץ וינואר). הרכב האוכלוסיות בבריקה 9 ובבריקות שהתפתחו ממנה (9A, 9B, 9A1, 9A2, ו 9A3) השתנה לאורך השנה עד שבינואר 2022 התקרבו להרכב של בריכה 12, בשונה מההתנהגות הכימית. למרות שגיאוגרפית בריכה 9 קרובה יותר לבריקות 10 ו-11 מאשר לבריקה 12 (איור 12.1B), כל הדגימות מבריקה 11, ושלוש מארבע הדגימות של בריכה 10, היו מאוד שונות מבריקה 9, אך מאוד דומות לדגימות מבריקה 13.

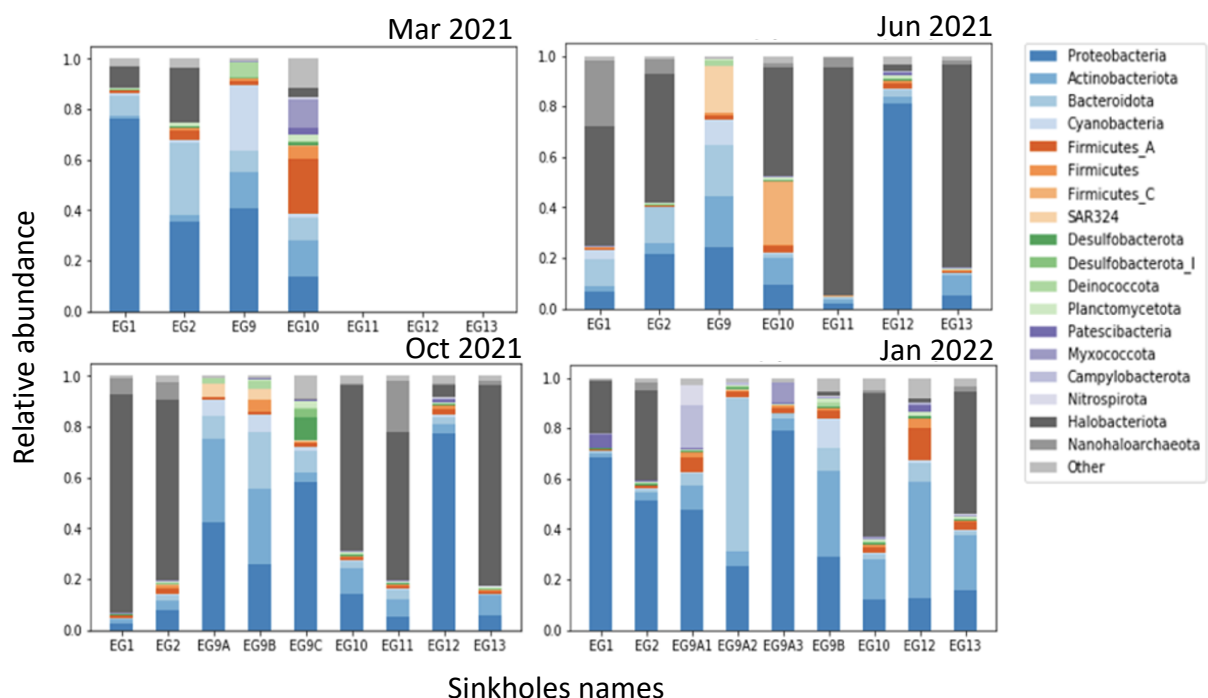


איור 12.10: הדמיון בהרכב אוכלוסיות הארכיאות והחיידקים שזוהו בבריקות הבולענים על פי PCoA. זוהי הצגה ויזואלית של רמת הקרבה בין האורגניזמים המרכיבים את האוכלוסיות בבולענים השונים בנקודות זמן שונות (3/21-1/22); הצבעים מייצגים תאריכי דיגום: בריכה 12-13 נדגמו החל מ 6/21; בריכה 11 נדגמה רק ב 6/21 ו 10/21 (איור 12.3). קרבה בין שתי נקודות מצביעה על קרבה בהרכב האוכלוסיות שהן מייצגות. האנליזה היא על דגימות שמקורן באורגניזמים שגודלם בין 0.22 ל 5 מיקרון.

רמת הדמיון בין האוכלוסיות השונות באה לידי ביטוי בהתפלגות מיני הארכיאות והחיידקים. לדוגמה, בחודשי החורף (מרץ וינואר) הרכב האורגניזמים בבריקות 1 ו 2 היה דומה, וכל ארבע הדגימות נשלטו ע"י מיני חיידקים

מקבוצת הפרוטאובקטריה. לעומת זאת, ארבעת הדגימות שנאספו בקיץ (יוני ואוקטובר) בבריכות אלו נשלטו ע"י מיני ארכיאה מקבוצת ההלובקטריה (איור 12.11). בנוסף, הדגימות של בריכות 11-13 (פרט לבריכה 10 ממרץ 2021) כולן נשלטו על ידי מיני ארכיאות מקבוצת ההלובקטריה. בדומה לבריכות 1 ו 2, בריכות 11-13 חוו ירידה בשיעור הארכיאות בדגימה היחידה שנערכה בחורף (ינואר 2022), אך בשונה מבריכות 1 ו 2, הן נשלטו ע"י הארכיאות גם בחורף.

ההבדל בהרכב המיקרואורגניזמים בבריכות 1 ו 2 בין חודשי החורף והקיץ בא יחד עם שינוי בצפיפות המים – בקיץ צפיפות המים היתה גבוהה יותר מאשר בחורף בשתי הבריכות, ויתכן שזהו אחד הגורמים שהשפיע על השינוי בהרכב האוכלוסיות. על פי (PCoA) Principal Coordinates Analysis, ההתקבצות של הדגימות נשלט באופן כמעט מוחלט לפי הבריכות, ולעונות השנה ישנה השפעה מינורית בתוך כל בריכה (איור 12.10). דבר המרמז כי יתכן וקיימים חסמים לתנועת מיקרואורגניזמים בין חלק מהבריכות. חסמים אלו מחזקים את ההשפעה של אפקט המייסדים (כלומר השפעה חזקה של האוכלוסיה הגרעינית שאכלסה במקור את הבריכה) ובהתאמה כנראה מחלישים את ההשפעה של הגורמים האביוטים על הרכב האוכלוסיות בעונות השונות.



איור 12.11: התפלגות החיידקים והארכיאות בבריכות הבולענים. השכיחות היחסית של חיידקים וארכיאות לפי המערכה אליה הם שייכים (ארכיאות מיוצגות ע"י גווני אפור, וחיידקים ע"י שאר הצבעים). כל עמודה מייצגת בריכה שונה שנדגמה באחד מארבעת הדיגומים שבין מרץ 2021 לינואר 2022. האנליזה היא על דגימות שמקורן באורגניזמים שגודלם בין 0.22 ל 5 מיקרון.

12.5 סיכום והמשך עבודה

תוצאות המחקר עד כה מראות בבירור שינוי משמעותי במי הבריכות לאורך השנה, הן בהרכב הכימי והן באוכלוסייה המיקרוביאלית. באזור עין גדי אופייני שלוש קבוצות עיקריות של מי בריכות בולענים עם תכונות כימיות ברורות המתבטאות בשינויי צפיפות, הרכב כימי והרכב איזוטופי. הקבוצה הראשונה (בריכות 9 ובריכה

15) מאופיינת בצפיפות נמוכה ביחס לשאר הבריכות שנישמרת כל עוד הבריכות מחוברות למקור מים משותף המזין אותן. עם ניתוק בריכה (לדוגמא 9B) ממקור ההזנה ואידוי המים והתרכזותם, הצפיפות במים עולה. עם העלייה בצפיפות גם ערכי $\delta^{18}\text{O}$ עולים ("הכבדה") ויחסי Na/Cl מצביעים על השקעת הליט במי הבולען. הקבוצה השנייה (בריכות 10 ו 12) הינן יציבות לאורך זמן עם צפיפות קבועה סביב 1.20 גר/ס"מ³, דבר המעיד על הזנה קבועה ויציבה של מים לתוך הבולענים הללו. למרות הצפיפות הגבוהה ביחס לקבוצה הראשונה, הערך האיזוטופי בשתי הקבוצות דומה, ומעיד על שינויים עונתיים. הקבוצה השלישית (בריכות 21-23) בצפון אתר עין גדי דומים לים המלח בצפיפות ובהרכב האיזוטופי למעט דוגמא 21 שמראה שונות בזמן.

הדמיון הכימי בין הבריכות מראה התאמה מסויימת לתוצאות המיקרוביאליות. חשוב לציין שהתוצאות הכימיות מייצגות שלוש שנות מחקר ואילו התוצאות המיקרוביאליות מייצגות שנה אחת. מבחינת ההרכב המיקרוביאל של בריכות הבולענים, זוהו בהן גנומים של 104 מיני חיידקים ו 47 מיני ארכיאות ממערכות שונות. 137 מתוך המינים הללו הם מינים חדשים. אחד ממיני החיידקים כנראה מהווה נציג ראשון ממערכה חדשה למדע. חלק ניכר ממיני הארכיאה שזוהו בבריכות הבולענים שייכים לקבוצות טקסונומיות שזוהו בעבר בים המלח, אך בשונה מים המלח בו הרוב המוחלט של המינים שזוהו הם מיני ארכיאות, בבולענים עיקר המינים הם מיני חיידקים שכלל לא נצפו בים המלח. הרכב האוכלוסיות המיקרוביאליות הושפע יותר מזהות הבריכה הנדגמת מאשר תאריך הדגימה, ולא תאם את ההבדלים בין התנאים האביוטים בבריכות השונות. יתכן וקיימים חסמים לתנועת מיקרואורגניזמים בין חלק מהבריכות. חסמים אלו מחזקים את ההשפעה של האוכלוסייה הגרעינית שאכלסה במקור את הבריכה, ובהתאמה כנראה מחלישים את ההשפעה של הגורמים האביוטים על הרכב האוכלוסיות בעונות השונות. כפי שהוזכר לעיל, הנתונים על האוכלוסיות המיקרוביאליות מגיעים מארבע דגימות שנערכו בין מרץ 2021 לינואר 2022, בעוד הנתונים האביוטים הינם משישה דיגומים נוספים (מאי 2022 עד ספטמבר 2023). הנתונים על ששת הדיגומים הללו יהיו זמינים בקרוב, ויתכן ויאפשרו מציאת קשרים נוספים בין הרכב האוכלוסיות לגורמים הסביבתיים. בנוסף במהלך שש נקודות הזמן שטרם רוצפו (מאי 2022 עד ספטמבר 2023) היה שינוי משמעותי בצפיפות של חלק מהבריכות (1, 9, 21, ו 23) שיתכן וישפיע על הרכב האוכלוסיות בתוך כל בריכה. המשך הדיגום בשני אזורי המחקר (עין גדי וחצצון) יימשך עוד שנה נוספת (שנת 2024) ותבוצענה האנליזות הכימיות והמיקרוביולוגיות.

12.6 מקורות

- Abelson, M., Yechieli, Y., Crouvi, O., Baer, G., Wachs, D., Bein, A., & Shtivelman, V. (2006). Evolution of the Dead Sea sinkholes. SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 401, 241.
- Adar, O., Groner, E. & Ben Natan, G. (2014) Colonization of a new habitat : The case of the Dead Sea sinkholes – preliminary observations. Negev, Dead Sea Arav. Stud. 6, 74–89.
- Bodaker, I., Sharon, I., Suzuki, M. T., Feingersch, R., Shmoish, M., Andreishcheva, E., Sogin, M. L., Rosenberg, M., Maguire, M. E., Belkin, S., Oren, A. & Béja, O. (2010). Comparative community genomics in the Dead Sea: an increasingly extreme environment. The ISME journal, 4(3), 399-407.
- Chaumeil, P. A., Mussig, A. J., Hugenholtz, P., & Parks, D. H. (2020). GTDB-Tk: a toolkit to classify genomes with the Genome Taxonomy Database. Bioinformatics, 36(6), 1925–1927.

- Diniz-Filho, J. A. F., Soares, T. N., Lima, J. S., Dobrovolski, R., Landeiro, V. L., Telles, M. P. D. C., ... & Bini, L. M. (2013). Mantel test in population genetics. *Genetics and molecular biology*, 36, 475-485.
- Frumkin, A., Ezersky, M., Al-Zoubi, A., Akkawi, E., & Abueladas, A. R. (2011). The Dead Sea sinkhole hazard: Geophysical assessment of salt dissolution and collapse. *Geomorphology*, 134(1-2), 102-117.
- Hirshberg, O. & Ben-Ami, F. (2019) Sinkholes as a source of life in the Dead Sea region. *Aquat. Sci.* 81, 1–14.
- Kimbrel, J. A., Ballor, N., Wu, Y. W., David, M. M., Hazen, T. C., Simmons, B. A., Singer S.W., & Jansson, J. K. (2018). Microbial community structure and functional potential along a hypersaline gradient. *Frontiers in microbiology*, 9, 1492.
- Lu, J., Breitwieser, F. P., Thielen, P., & Salzberg, S. L. (2017). Bracken: estimating species abundance in metagenomics data. *PeerJ Computer Science*, 3, e104.
- Nof, R. N., Baer, G., Ziv, A., Raz, E., Atzori, S., & Salvi, S. (2013). Sinkhole precursors along the Dead Sea, Israel, revealed by SAR interferometry. *Geology*, 41(9), 1019-1022.
- Oren, A. (2018). Salt lakes, climate change, and human impact: A microbiologist's perspective. *Aerul si Apa. Componente ale Mediului*, 163-170.
- Rhodes, M. E., Oren, A., & House, C. H. (2012). Dynamics and persistence of Dead Sea microbial populations as shown by high-throughput sequencing of rRNA. *Applied and environmental microbiology*, 78(7), 2489-2492.
- RStudio Team. (2023). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
- Rodriguez-Valera, F., Martin-Cuadrado, A. B., Rodriguez-Brito, B., Pasic, L., Thingstad, T. F., Rohwer, F., & Mira, A. (2009). Explaining microbial population genomics through phage predation. *Nature Precedings*, 1-1.
- Wood, D. E., & Salzberg, S. L. (2014). Kraken: ultrafast metagenomic sequence classification using exact alignments. *Genome biology*, 15(3), 1-12.
- Wurtsbaugh, W. A., Miller, C., Null, S. E., DeRose, R. J., Wilcock, P., Hahnenberger, M., Howe, F. & Moore, J. (2017). Decline of the world's saline lakes. *Nature Geoscience*, 10(11), 816-821.
- Zilberman-Kron, T. (2008). The origin and geochemical evolution of brines in the sinkholes along the Dead Sea coast. M.Sc. Thesis, The Hebrew University of Jerusalem (in Hebrew, English abstract).
- Zilberman, T., Gavrieli, I., Yechieli, Y., Gertman, I., & Katz, A. (2017). Constraints on evaporation and dilution of terminal, hypersaline lakes under negative water balance: The Dead Sea, Israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 217, 384-398.

13. כרונולוגיה של שלבי התפתחות בקע ים המלח על פי תיארוך U-Pb של משקעי קלציט פריאטי

ווקס, א.¹, לנגפורד, ב.^{1,2}, גולן, צ.¹, זילברמן, ת.¹, יסעור, ג.¹, שלדקס, א.^{1,4}, חביב, א.⁴, גרדס, א.³, אלברט, ר.³, פרומקין, ע.²

¹המכון הגיאולוגי

²המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית, ירושלים

³אוניברסיטת גטה בפרנקפורט, גרמניה

⁴אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר-שבע

13.1 תקציר

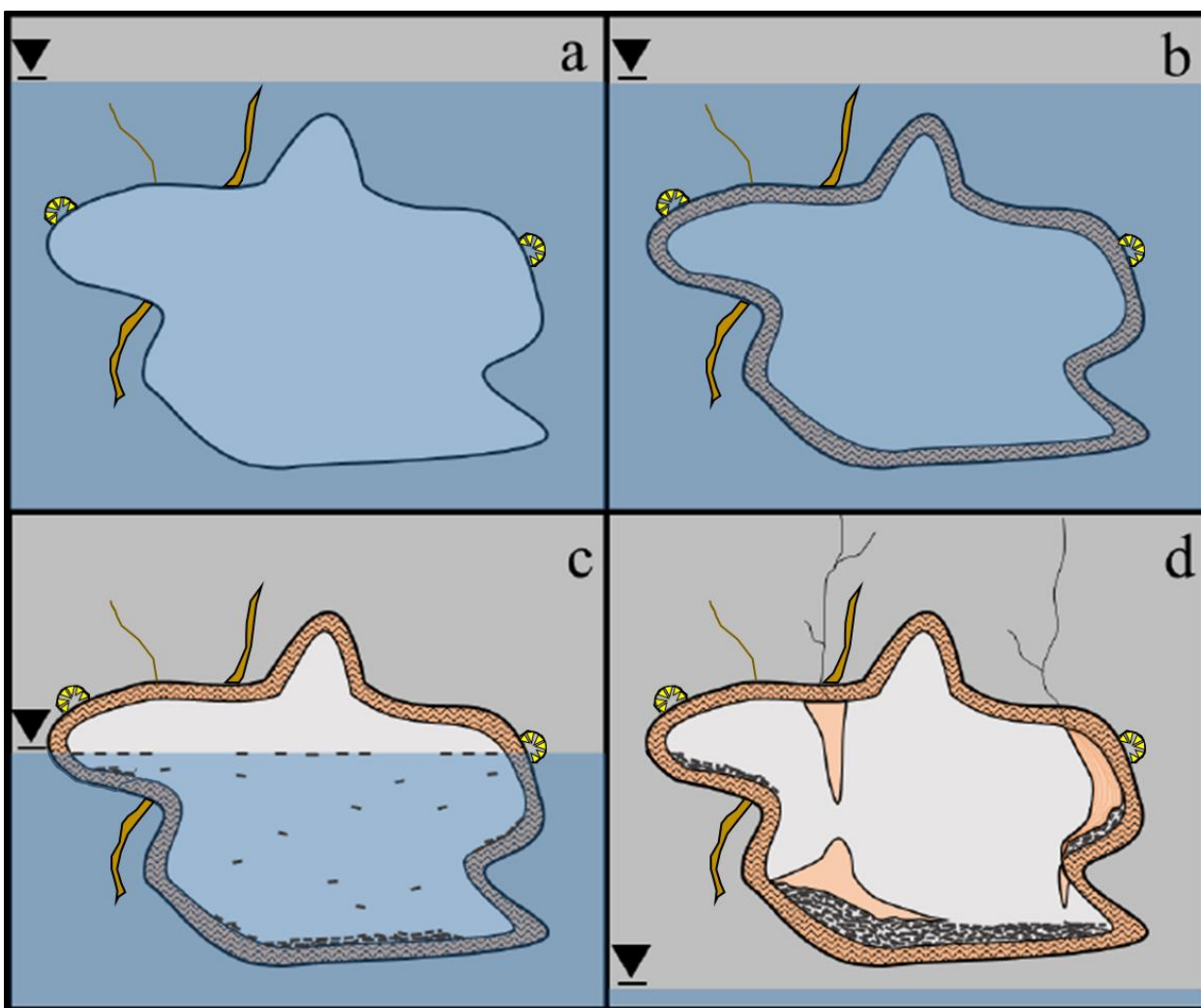
עבודה זו משחזרת את התפתחות הטקטוניקה האנכית בבקעת ים המלח בעזרת תיארוך משקעי מערות פריאטיים ותזמון המעבר למשקעי מערות וואדזיים. משקעי מערות (ספלאוטמים) פריאטיים נוצרו מעט מתחת למפלסי מי תהום קדומים בסמיכות לטבלת מי התהום (Chaldekas *et al.*, 2022, Ford & Williams, 1989), לכן הם משמשים אינדיקטורים למפלסים אלה. מעבר בין משקעי מערות פריאטיים למשקעי מערות וואדזיים (שנוצרו בתוך בלתי רווי) מראים על אירוע טקטוני של התרוממות מפלס המערות אל מעל לגובה מי התהום, או אירוע של ירידת בסיס סחיפה אזורי, הגורם לירידת מפלס מי התהום. בעבודה זו נסקרו אתרים בהם ישנה חשיפה של קלציט פריאטי וקלציט וואדזי בשוליים המערביים של בקע ים המלח, ונמצאו אתרי השקעה בטווח הגבהים שבין 160- במטרים ביחס לפני הים סמוך לים המלח ועד 852+ מטרים בהרי יהודה. כמאה דוגמאות משקעי הקלציט נדגמו מ-15 אתרים ובוצעו 33 תיארוכים בשיטת U-Pb. הגילים מראים ששלב ההשקעה הראשונה של קלציטים פריאטיים ממוצא מטאורי התרחש בין 25 לבין 16 מיליון שנה. המקור המטאורי שלהם נתמך על ידי ההרכבים האיזוטופיים של חמצן בהם, שנעים בין 16.32‰- לבין 10.34‰-. הימצאות הקלציטים בטווח גילאים אלה בכל סלעי חבורת יהודה (קנומן-טורון) בלי קשר לגובהם הטופוגרפי, מלמדת כנראה שבסוף אוליגוקן-תחילת מיוקן סלעי חבורת יהודה היו ממוקמים במפלס אחד ללא הבדלים טופוגרפיים גדולים ביניהם כמו שיש היום. סביר כי הבדלים טופוגרפיים עכשוויים נגרמו מהטיה וקימוט שהתרחשו מאוחר יותר בתהליכי היווצרות בקע ים המלח והתרוממותה של שדרת ההר. לאחר שלב ההתרוממות של סוף אוליגוקן-תחילת המיוקן הגיע שלב של שקט יחסי בטקטוניקה אנכית (14 - 6 מיליון שנה), בו שקעו ספלאוטמים פריאטיים באופק הנמצא היום בגבהים 400-600 מטר (Chaldekas *et al.*, 2022). ב-6 מיליון השנים האחרונות התרחש שלב נוסף פעיל מאוד של טקטוניקה אנכית, שכלל התרוממות שדרת ההר והתעמקותו של בור ים המלח. לפני 3 מיליון שנים מפלס מי התהום היה ממוקם במפלס שהיום ממוקם באופק שנמצא היום בגובה של 100 מטר מעל לגובה פני הים, כאשר לפני 1.5 מיליון שנה כבר שקעו ספלאוטמים וואדזיים בגובה פני הים, מה שמראה על כך שמפלס רגיונלי של מי התהום (ומפלסי אגמי הבקע) היה נמוך יותר. בתחתית קניוני ים המלח (בגובה 100- מטר, דהיינו מעל גובה הצפה של אגם הליסון) גיל המשקעים הפריאטיים שתוארכו הוא בתחום של חצי מיליון השנים האחרונות.

13.2 מבוא

במחקר זה מתבצע תיארוך מדויק של שלבי ההתרוממות של אזור הרי יהודה ומדבר יהודה שממערב לים המלח, מהתרוממות התחלתית אל מעל לגובה פני הים ועד לשלבי ההיווצרות של אגן ים המלח עצמו. המחקר מבצע תיארוך אורניום-עופרת של סוגים שונים משקעי המערות קלציטיים, מעידים על שלבים שונים של ההתפתחות הטקטונית האנכית של האזור. באופן גס ניתן לחלק את הפעילות הקרסטית לשני סוגים: כזו המתרחשת מעל מפלס מי התהום (קרסט וואדוסי או אפיגני) וכזו המתרחשת מתחת למפלס מי התהום (קרסט פריאטי או היפוגני) (Klimchouk *et al.*, 2017). המרחב הקרסטי של מרכז ודרום ישראל מאופיין במערות היפוגניות, מהמפותחות והארוכות ביותר בדרום הלבנט (Langford & Frumkin, 2013). מבנה המערות משתנה בהתאם לסביבת היווצרותן: מחילות מסועפות בתנאים כלואים (כאשר יש שכבה אוטמת מעל לאקוויפר) או חללים פשוטים בתנאים פריאטים לא כלואים (Frumkin & Fischhendler, 2005). המערות מופיעות בגבהים טופוגרפים שונים, כאשר מרביתן כיום מנותקות ממפלסי מי התהום - סביבת היווצרותן המקורית. עד כה, המחקר אודות מערות אלו עסק בעיקר בלימוד של אופן היווצרותן וכן בנסיבות הגיאולוגיות וההידרולוגיות שהובילו כך. שזירתן של נסיבות אלו בהיסטוריה הגיאולוגית המרחבית אפשרה להציע את פרק הזמן של יצירת המערות לתקופה שלאחר נסיגת אוקיינוס התטיס (Frumkin *et al.*, 2017).

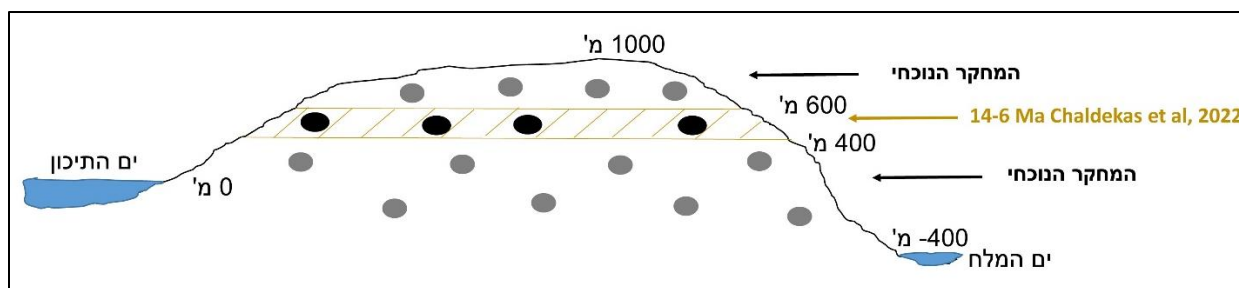
עד היום לא היה תיארוך מדויק של שלבי ההתרוממות אזור הלבנט אל מעל גובה פני הים ושלבי ההיווצרות של אגן ים המלח. התפתחות היכולת לתארך משקעים קרבונטים בעזרת שיטת האורניום-עופרת ישירות על דוגמת סלע על ידי LA-ICP-MS, מאפשרת לתארך משקעי קלציט פריאטיים וואדוסיים, וכך לקבוע את מועד תחילתה של פעילות קרסטית באזור, כמו גם שלבים המאוחרים יותר של פעילות זו. תחילתה של פעילות קרסטית, הבאה לידי ביטוי ביצירת חללים ראשונים ומילוי שלהם (עורקים וגיאודות בגדלים שונים) מראה על התרוממות האזור מעל לגובה פני הים. היווצרות מערות גדולות יותר, החותכות את הקלציטים הראשונים אלה, מראה על שלב הבא של פעילות קרסטית שהיה משמעותי יותר. יצירת מערות אופקיות גדולות מצריכה יציבות במפלס מי התהום ושקט יחסי בפעילות הטקטונית האנכית, בעוד שמי התהום הם תת-רוויים בקרבונט, לכן גורמים להמסת חללים. כאשר התמיסות במערות הנמצאות מתחת למפלס מי התהום הופכות מכל סיבה שהיא רוויות בקלציט, שוקעים במערות אלה משקעי מערה פריאטיים (כמו ממילריס, או רפסודות קלציט). הנחת העבודה מתייחסת למפלס מי התהום המרחבי כאל קו יחוס יציב, עם שינויים אפשריים בסדר גודל של עשרות מטרים בלבד, כאשר שינויים מסדר גודל של מאות מטרים מתרחשים בתגובה להתרוממות טקטונית. לכן מעבר קבוע מאוחר יותר ממשקעי מערה פריאטיים למשקעי מערה וואדוזיים (כמו נטיפים, זקיפים ומשטחי הזרימה) מראה על שלב של התרוממות המערות אל מעל לגובה מפלס מי התהום המרחבי (איור 13.1), עקב התרוממות טקטונית, ירידת בסיס הסחיפה, או שניהם (Chaldekis *et al.*, 2022).

במהלך אירועי התרוממות/השתפלות בסיס הסחיפה השונים מפלס המערות עולה אל מעל מפלס מי התהום, פעילות קרסטית הופכת לוואדוזית בתחום המאוורר והפעילות הקרסטית פריאטית עוברת למפלס נמוך יותר. שלבים שכאלו התרחשו במרחב מספר פעמים במהלך הקנוזואיקון, תוך יצירה של מרכיבים קרסטים בזיקה למבנים טקטוניים (איור 13.2).



איור 13.1: שחזור הכרונולוגיה של התפתחות החלל על ידי שימוש במשקעי מערות. אחרי Chaldekas et al., 2022.

בשנים האחרונות נעשו כמה מחקרים לשחזור שלבי ההתרוממות של שוליו המערביים של בקע ים המלח ויצירתה של שדרת ההר. עבודותיהם של גבירצמן (Gvirtzman *et al.*, 2011) ובר ושות' (Bar, 2009, Bar & Zilberman, 2016, Bar *et al.*, 2016) הציעו לחלק את ההתרוממות הטקטונית של שדרת ההר למספר שלבים במהלך הנאוגן, אך בוצעו ללא תיארוך רדיומטרי מדויק. גילים מדויקים ראשונים, לשלבי ההתרוממות של שולי בקע ים המלח, נעשו על ידי שלדקס ושות' (Chaldekas *et al.*, 2022) בעזרת תיארוך של משקעי מערות מסביבות השקעה שונות (מעל ומתחת למפלס מי התהום). מסקנות העבודה הן כי הרום הטופוגרפי הנוכחי של 400-600 מ' היה טבול בסביבת מפלס מי התהום לפני 6-14 מ"ש. לאחר תקופה זו חלה התרוממות טקטונית, או השתפלות בסיס הסחיפה, שניתקו את המפלס המדובר מקו מי התהום. העבודה הנוכחית עושה שימוש בתיארוך רדיומטרי של U-Pb על מנת לבנות את הכרונולוגיה של ההתרוממות האנכית של השוליים המערביים של בקע ים המלח והתפתחות מצוק העתקים, בדגש על מפלסים שטרם תוארכו, דהינו מעל ומתחת ל-400 ומעל 600 מ' מעפ"י.



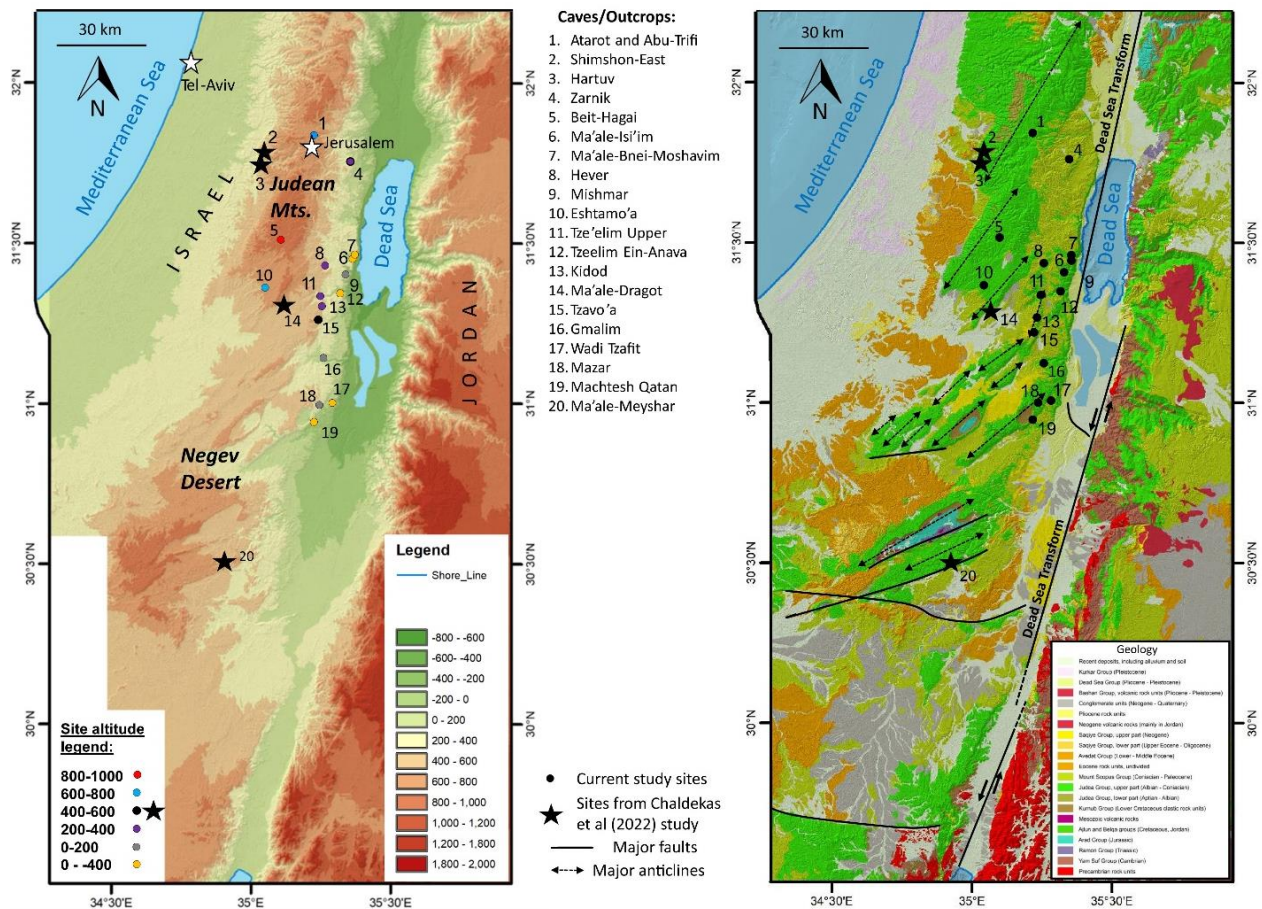
איור 13.2: תיאור הקשר בין מרכיבים קרסטיים ופעילות טקטונית של התרוממות אנכית. תיארוך משקעים פריאטים ממערות במפלסים שונים מאפשר לקבוע כרונולוגיה לפעילות הטקטונית.

13.3 שיטת עבודה

בשנתיים האחרונות תוארכו משקעי מערות מסוגים שונים ממספר אתרים בשולים המערביים של בקע ים המלח, בתחום שמהאזור הנמוך של מצוק העתקים ועד לגב הרי יהודה. המחשופים שתוארכו הם כדלהלן (איורים 13.3 ו-13.4): מערת בית חגי (852 מ'), מערת עטרות (760 מ'), מערת אבו טריפי (740 מ'), בית הכנסת העתיק באשתמוע/סמוע (720 מ'), מערת זרניק (270 מ'), נחל חבר תיכון, מעלה עוזי (230-180 מ'), נחל צאלים עליון (275 מ'), מפל נחל משמר (170 מ'), נחל מזר (85-110 מ'), נחל גמלים (130 מ'), מעלה איסיים (100- מ') ונחל צאלים עין ענבה (160- מ'). כמו כן ישנם 2 אתרים שתוארכו בעבודת המסטר של אורן שלדקס (*Chaldekas et al., 2022*), אך לא פורסמו והם בעלי חשיבות עבור עבודה זאת: אתר נחל צפית (5- מ') ואתר נחל חצרה/כניסה למכתש הקטן (20- מ'). המספרים בסוגרים מציינים רום במטר ביחס לפני הים. האתרים שתוארכו השנה מתוארים להלן.

בעבודה זו תוארכו עד כה במכון הגיאולוגי מספר דוגמאות ספלאוטמים בהתאם לפרוטוקול של (*Nuriel et al., 2017*). המכשור בו נעשה שימוש כולל Teledyne CETAC Analyte Excite וכן לייזר (193 ננומטר) עם אלומה בגודל 240 מיקרומטר ושטף של 3 J/Cm^2 . כל אנליזה מורכבת מ-300 פולסים עם זמן חזרה של 15Hz. מדידת יחסים איזוטופים נעשית על ידי MS-MC-ICP של חברת NU. עיבוד הנתונים בוצע על ידי תוכנת Iolite (*Paton et al., 2010*). עבור סטנדרט ליחסי עופרת $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ וכן יחסי אורניום עופרת $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ נעשה שימוש ב-NIST 614 (SRM-614). תיקון לשגיאה מכשירית ול matrix effects נעשה בעזרת סטנדרט WC-1, גיל $254 \pm$ Ma (*Roberts et al., 2017*) וכן סטנדרט משני ASH-15-D, גיל $2.965 \pm 0.011 \text{ Ma}$ (*Nuriel et al., 2021*). גילים מתוקנים חושבו על ידי IsoplotR (2018) Vermeesch והם מוצגים בטבלה 13.1. ממוצע הערכים של $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ של 904 ספליאוטמים צערים שנדגמו באזור עומד על 1.083 ± 0.138 , דהיינו קרוב לשיווי משקל (*Chaldekas et al., 2022*). בשל כך, אין טעם בתיקון הגילים עבור יחס התחלתי של ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$).

אנליזות של $\delta^{18}\text{O}$ ושל $\delta^{13}\text{C}$ בוצעו בחלק מהדוגמאות כדי לבדוק האם המקור של המים שהשקיעו את הקלציטים הוא אטמוספרי או ימי. מינרלוגיה של ספלאוטמים נחקרה בעזרת XRD ומיקרוסקופיה פטרוגרפית.



איור 13.3: מפת אתרי עבודה בהם בוצע תיארוך של משקעי המערות. האתרים שתוארכו במחקר הנוכחי הם 1, 4, 13, 15, 16, ו-18. אתרים שתוארכו בעבודת המסטר של אורן שלדקס ופורסמו (Chaldekas et al., 2022) מסומנים בכוכבים (2, 3, 14 ו-20), כאשר האתרים שתוארכו בעבודה זו ולא פורסמו, אך בעלי חשיבות למחקר זה הם 17 ו-19.



איור 13.4: תמונות מחשופים של משקעי מערות פריאטיים וואדוויים שנחקרו מאתרים הבאים: בית חגי (#5) - A, נחל גמלים (#16) - B, זרניך (#4) - C, עטרות (#1) - D, צאלים עליון (#11) - E, נחל חבר/מעלה עוזי (#8) - F ו-G, מערת צבוע (#15) - H, מעלה איסיים (#6) - I, נחל מזר (#18) - J.



איור 13.5: תמונות אתרים נוספים של משקעי מערות פריאטיים וואדזיים שנחקרו: מערת שמשון המזרחית (#2), A - מחצבת הרטוב (#3), B - נחל משמר (#9), C - מערת מעלה המישר (#20), D - נחל צפית (#17), E - מכתש הקטן (#19), F - אבו-טריפי (#1), G ו-H - ומערת כידוד (עורקי הקלציט, #13) - I.

13.4 תוצאות

בוצעו תיארוכי U-Pb על 33 ספלאוטמים מ-15 אתרים (טבלה 13.1, איורים 13.6, 13.7, 13.8, 13.9, 13.10).

טבלה 13.1, חלק א': גילי אורניום-עופרת.

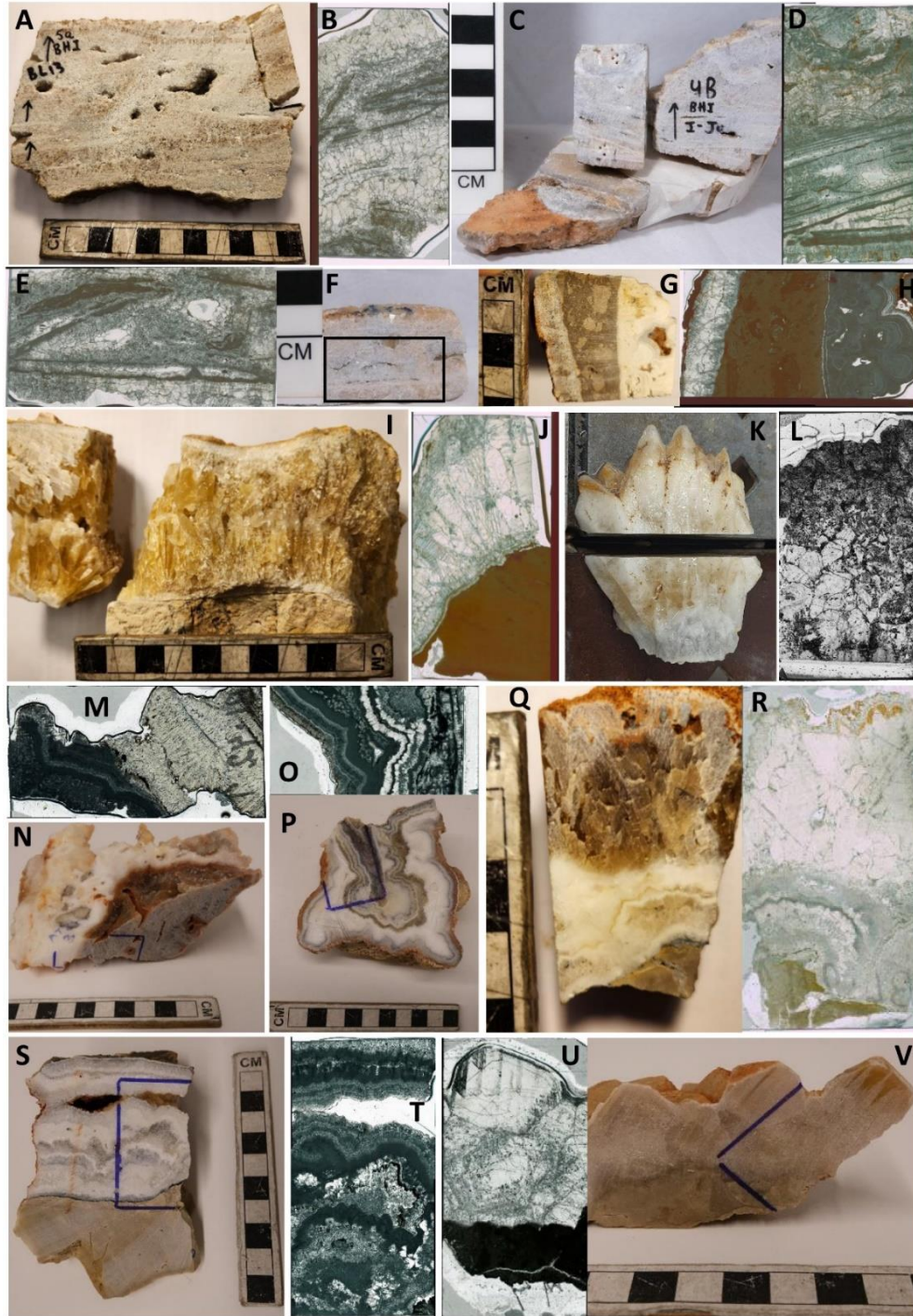
Sample Site Name and number on Fig. 2	Location	Elevation m asl	Geological formation, Period	Sample name	Type	Sub-type	Thin-section	U-Pb Age (Ma)	2s uncertainty	MSWD	Number of analyses
Beit-Hagai Cave, #5	31°29'46.7"N	852	Bina, Turonean	I-Ju-BHI-5c	Phreatic	Cave rafts	BL-25	24.47	0.47	4.8	20
	035°05'27.1"E			I-Ju-BHI-5a	Phreatic	Cement between the cave rafts	BL-13	23.29	0.23	1.9	22
				I-Ju-BHI-4b	Phreatic	Cement between the cave rafts	BL-19	22.05	0.24	2.2	29
				I-Ju-BHI-4b	Phreatic	Cave rafts	BL-19a	22.245	0.304	3.3	17
				I-Ju-BHI-2a	Vadose	Cave corals base	BL-22	7.1	0.43	1.9	22
				I-Ju-BHI-2a	Vadose	Cave corals top	BL-22	9.27	0.54	3.2	25
Samoa Sinagogue, #10	31°24'02.84"N	720	Bina, Turonean	I-JD-Samoa-5	Phreatic	Vein/Geode	BL-26	16.541	0.207	4.6	24
	035°04'02.09"E										
Abu-Trifi Quarry, #1	31°51'45.64"N	740	Vradim, Cenomanean	I-Ju-Abu Trifi	Phreatic	Vein/Geode	A-55	23.39	0.68	1.9	31
	35°20'43.58"N										
Atarot Cave, #1	31°51'04.65"N	760	Vradim, Cenomanean	I-Ju-ATRR_3	Vadose	Rafts - cave pool	BL-42	1.69	0.16	1.6	19
	035°13'08.53"E			I-Ju-ATRR_2	Vadose	Pool deposit - cave bell	BL-45	10.1	3.1	1.1	29
				I-Ju-Atarot-001	Phreatic/	Mamillaries or	BL-24	13.32	2.52	1.5	30
				I-Ju-ATRR_1b	vadose	pool deposits	BL-43	15.86	2.08	5.3	30
				I-Ju-ATRR_4	Phreatic	Cave rafts	BL-44	19.39	0.22	2.3	22
				I-Ju-ATRR_4	Phreatic	Geode - older than the cave	BL-44	17.56	0.31	5.9	55
Tzavoa Cave, #15	31°12'30.39"N	450	Shivta, Turonean	IN-TZ-2019-1	Phreatic	Vein older than the cave	BL-1	22.03	0.6	1.9	30
	035°13'52.06"E										
Kidod Cave, #13	31°15'43.52"N	280	Shivta, Turonean	IN-KID-6b	Phreatic	Geode older than the cave	BL-20	19.64	0.28	5.1	29
	035°16'34.65"E						BL-46	18.53	0.37	6.6	49
Nahal Gmalim, #16	31°08'08.1"N	130	Upper Drorim, Turonean	IL-N-GMAL-1-3	Phreatic	Veins	BA2	20.9	0.44	1.9	30
	035°14'23.5"E										
	31°08'08.7"N	130	Upper Drorim, Turonean	IL-N-GMAL-2-2	Phreatic	Veins	BA3	19.37	0.27	1.9	30
	035°14'22.7"E										
Nahal Mazar - 1, #18	30°58'33.5"N	85	Zafit, Cenomanean	IL-N-MAZAR-1	Phreatic	Mamillaries	BA4	3.83	0.16	2.4	30
	035°14'47.0"E										
Nahal Mazar - 2, #18	30°58'32.8"N	90	Zafit, Cenomanean	IL-N-MAZAR-2	Phreatic	Mamillaries	BA5	3.5	0.81	4.8	30
	035°14'43.4"E										
Nahal Mazar - 3, #18	30°58'32.4"N	110	Zafit, Cenomanean	IL-N-MAZAR-3	Phreatic	Mamillaries	BA6	3.22	0.28	4.3	29
	035°14'45.8"E										

טבלה 13.2, חלק ב': גילי אורניום-עופרת.

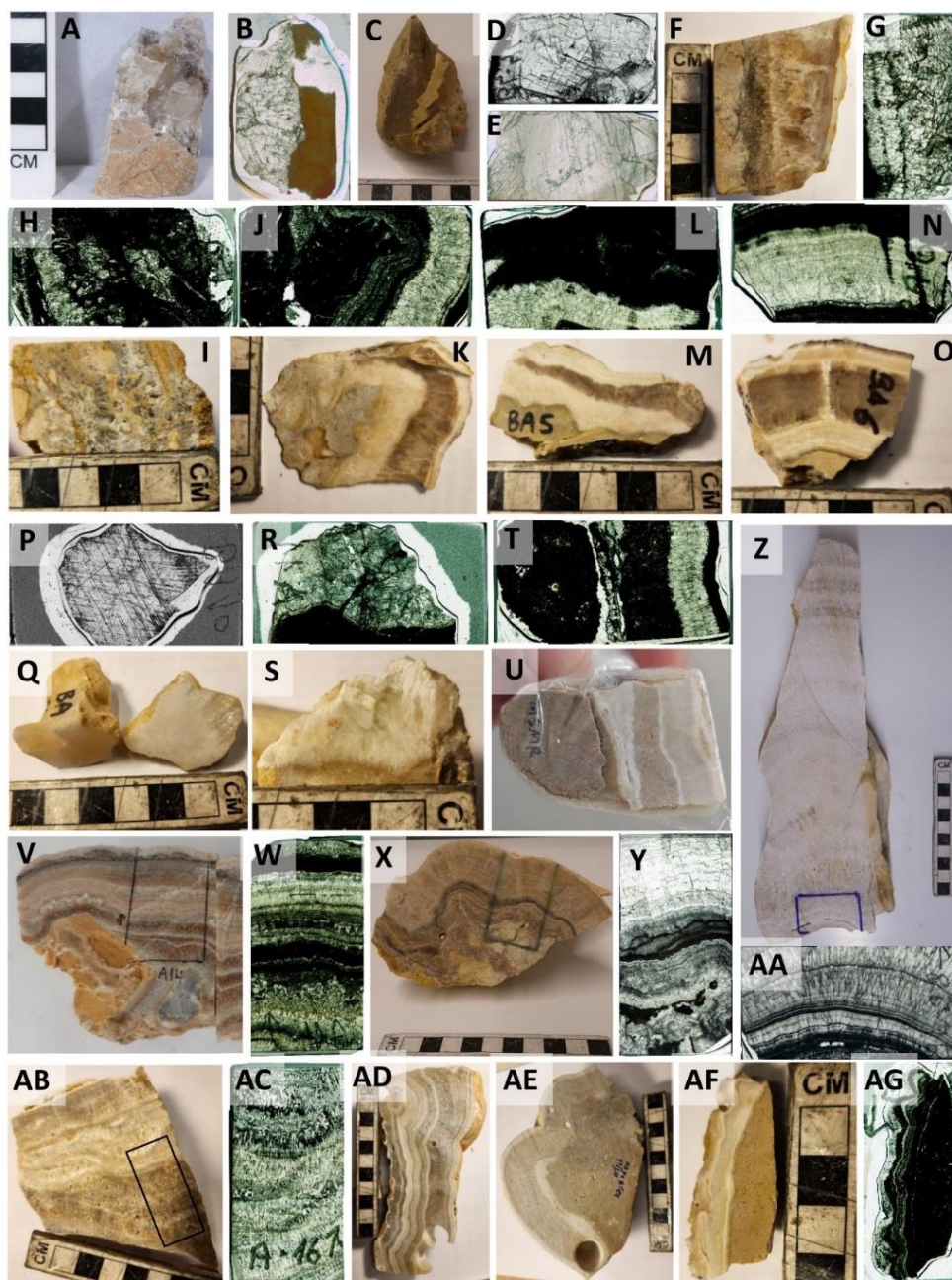
Sample Site Name	Location	Elevation m asl	Geological formation, Period	Sample name	Type	Sub-type	Thin-section	U-Pb Age (Ma)	2s uncertainty	MSWD	Number of analyses
Zarnikh Wadi 1, #4	31°44'39.7"N	265	Shivta, Turonean	Zarnik East	Phreatic	Large Crystals Filling Caves/Geodes/Veins	BA-11	24.03	0.87	4.2	27
	035°21'46.7"E										
Zarnikh Wadi 2, #4	31°44'41.2"N	275	Shivta, Turonean	Zarnik Center	Phreatic	Large Crystals Filling Caves/Geodes/Veins	BA-10	23.53	1.67	2.1	16
	035°21'44.3"E										
Nahal Mishmar, #9	31°23'8.65"N	170	Shivta-Netzer, Turonean	MSMR-2	Vadose	Mamillaries/Pool deposit	A2	1.54	0.097	1.5	26
	035°19'41.16"E										
Nahal Zeelim Upper, #11	31°20'14.92"N	275	Shivta, Turonean	Zeelim Upper	Vadose	Eroded mamillaries in wadi channel	BL-28	2.712	0.114	2.3	27
	035°15'27.71"E										
Nahal Zeelim Ein Anava, #12	31°21'05.78"N	-160	Rockfall, probably fell from Zafit in (~100 m), or Tamar/shivta (0-200 m)	ZLUM-2	Phreatic/ Pool deposits not in- situ	Fragments of eroded mamillaries in wadi channel	BL-53	1.01	0.26	1.5	40
	35°20'18.20"E										
Nahal Hever Ma'ale- Uzi, #8	31°26'13.7"N	230	Shivta, Turonean	IJ-HBR_1	Vadose	Mamillaries/Pool deposit	BL-31	1.7	0.22	3.1	20
	035°19'50.5"E										
				IJ-HBR-2-top IJ-HBR-2-bottom	Vadose	Mamillaries/Pool deposit	A14	1.23 1.97	0.17 0.26	2 2.4	30 30
	31°26'10.8"N	180	Shivta, Turonean	IJ-HBR 3_Base	Vadose	Stalagmite	A16	3.5	0.19	1.4	27
	035°19'45.1"E										
Ma'ale-Isi'im, #6	31°27'27.1"N	-100	Boundary Avnun-Zafit, Cenomanian	MISM_1b	Phreatic	Mamillaries/Folia	BL-39	0.365	0.088	3.2	24
	035°21'41.2"E										
Ma'ale-Bney- Moshavim, #7	31°27'36.2"N	-105	Boundary Avnun-Zafit, Cenomanian	MBM 1	Phreatic	Cave rafts	BA7	0.26	0.135	2	29
	035°21'55.0"E										

טבלה 13.2: גילי אורניום-עופרת מתוך עבודת המסטר של אורן שלדקס שלא פורסמו, ספלאטמים ממערות נחל צפית (17) ומכתש הקטן (19).

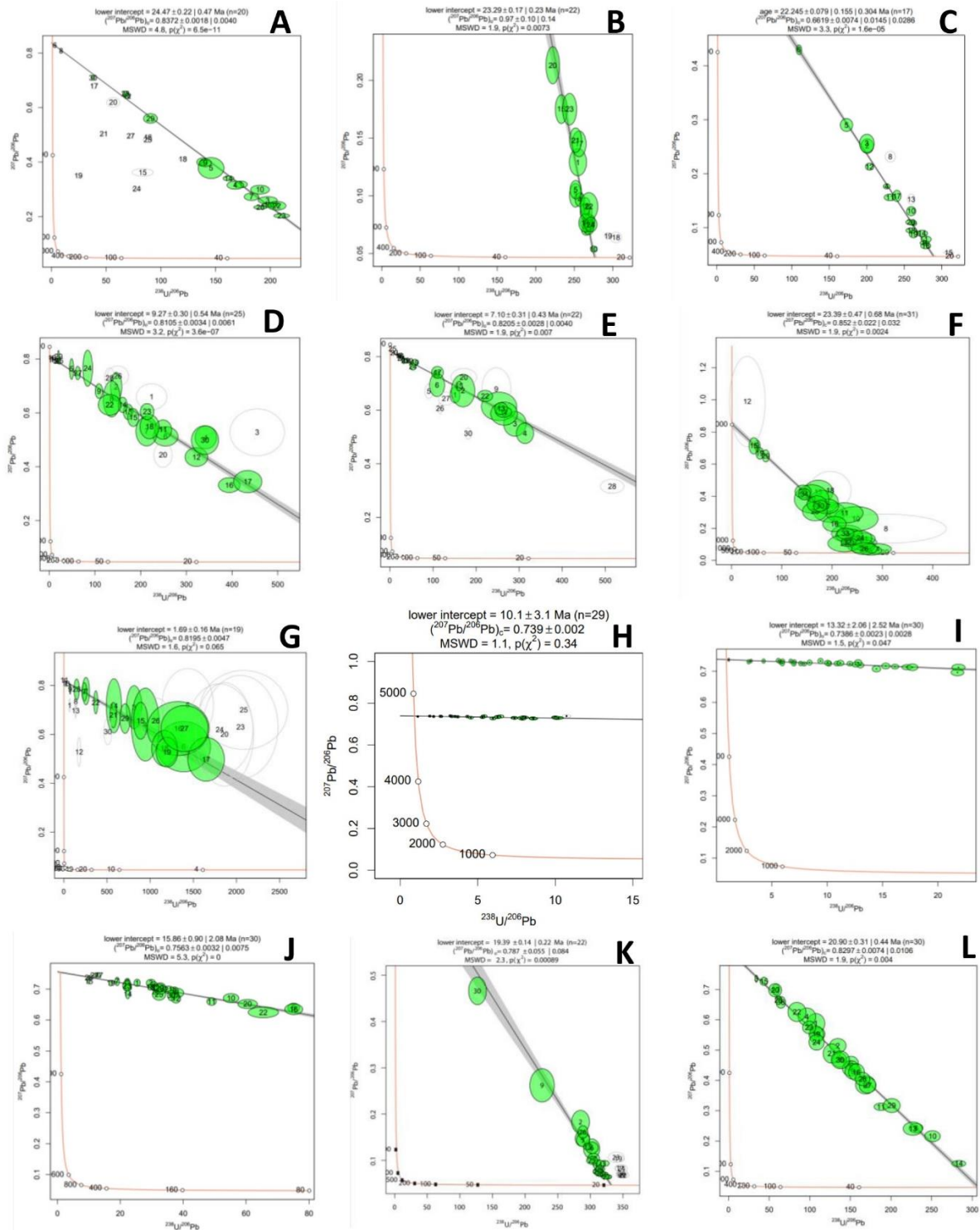
Cave	Number in Fig. 3	Thick section	Sample	Age (Ma)	2 σ	Number of subsamples	MSWD	Type of speleothem	Phreatic/vadose	Elevation (m/asl)
Makhtesh-ha-Qatan	#19	OC-33	IN-MKTC-12	0.464	0.033	29	0.86	Mamillaries or pool deposits	Pool - Vadose	-20
Makhtesh-ha-Qatan	#19	OC-50	IN-MKTC-13-B	0.43	0.2	35	0.39	Mamillaries or pool deposits	Pool - Vadose	-20
Makhtesh-ha-Qatan	#19	OC-50	IN-MKTC-13-C	0.698	0.094	29	0.49	Mamillaries or pool deposits	Pool - Vadose	-20
Makhtesh-ha-Qatan	#19	OC-52	IN-MKTC-13-E-base	0.804	0.055	48	1.4	Mamillaries or pool deposits	Pool - Vadose	-20
Makhtesh-ha-Qatan	#19	OC-52	IN-MKTC-13-G	1.45	0.15	39	1.9	Mamillaries or pool deposits	Pool - Vadose	-20
Wadi Tzafit	#17	OC-82	IN-TZAF-1-III-C-top	1.449	0.078	24	1	Vadose flowstone	Vadose	-5
Wadi Tzafit	#17	OC-68	IN-TZAF-1-I-P-base	1.513	0.039	28	1.1	Vadose flostone	Vadose	-5



איור 13.6: תמונות של דוגמאות היד והשקפים שלהן ששימשו לתיארוך U-Pb, ממערות בית חגי (#5), בית הכנסת של סמוע (#10), אבו-טריפי (#1) ועטרות (#1), לפי הסדר של טבלה 1: I-Ju-BHI-5A (BL-13) – A, B ; I-Ju-BHI-4b (BL-19, 19a) – C, D ; I-Ju-BHI-2a (BL-22) – G, H ; BHI-5c (BL-25) – E, F ; I-Ju-Abu Trifi (A-55) – K, L ; I-JD-Samoa-S (BL-26) – I, J ; I-Ju-ATRR_1b (BL-43) – S, ; I-Ju-Atarot-001 (BL-24) – Q, R ; I-Ju-ATRR_2 (BL-45) – O, P ; ATRR_3 (BL-42) – M, N ; I-Ju-ATRR_4 (BL-44) – U, V ; T

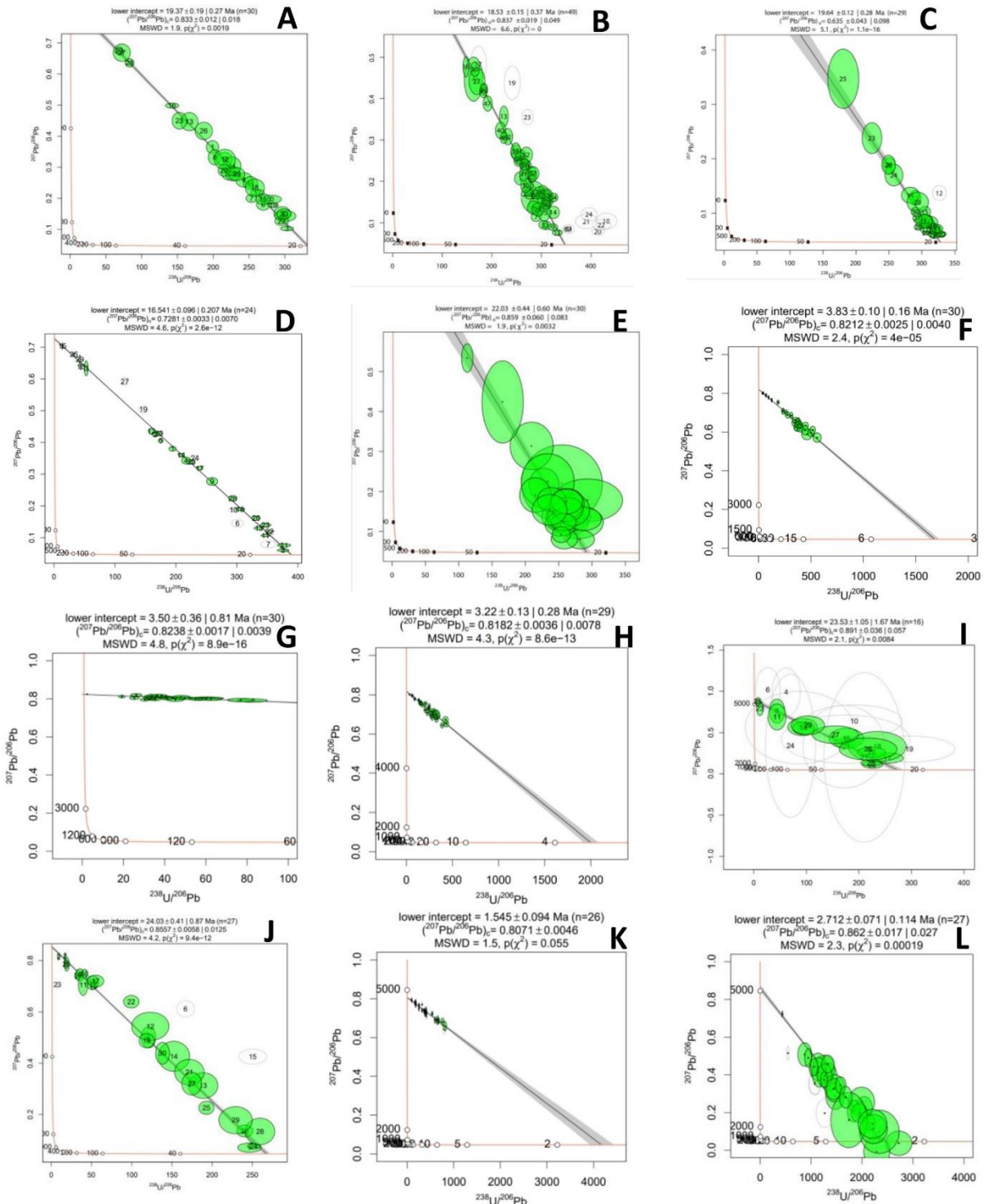


איור 13.7: תמונות של דוגמאות היד והשקפים שלהן ששימשו לתיארוך U-Pb, ממערות צבוע (#15), מערת כידוד (#13), נחל גמלים (#16), נחל מזר (#18), וואדי זרניך (#4), נחל משמר (#9), נחל צאלים עליון (#11), נחל צאלים עין-ענבה (#12), נחל חבר, מעלה עוזי (#8), מעלה איסיים (#6) ומעלה בני מושבים (#7), ראה טבלה 13.1: A, B – IN-TZ-2019-1 (BL-1); C – IN-KID-6b (BL-20, BL-46); D, E – IL-N-GMAL-1-3; F, G – IL-N-GMAL-2-2 (BA-3); H, I – IL-N-MAZAR-1 (BA-4); J, K – IL-N-MAZAR-3 (BA-6); L, M – Zeelim Upper (BL-28); N, O – 2 (BA-5); P, Q – Zarnik East (BA-11); R, S – Zarnik Center (BA-10); T, U – IJ-HBR-2-top + IJ-HBR-2-bottom (A-14); V, W – 2 (A-2); X, Y – IJ-HBR_1 (BL-31); Z, AA – MBM-1 (BA-7); AB, AC – ZLIM-2 (Mount); AD – MISM_1b (Mount); AE – IJ-HBR 3_Base (A-16); AF, AG – ZLIM-2 (Mount).

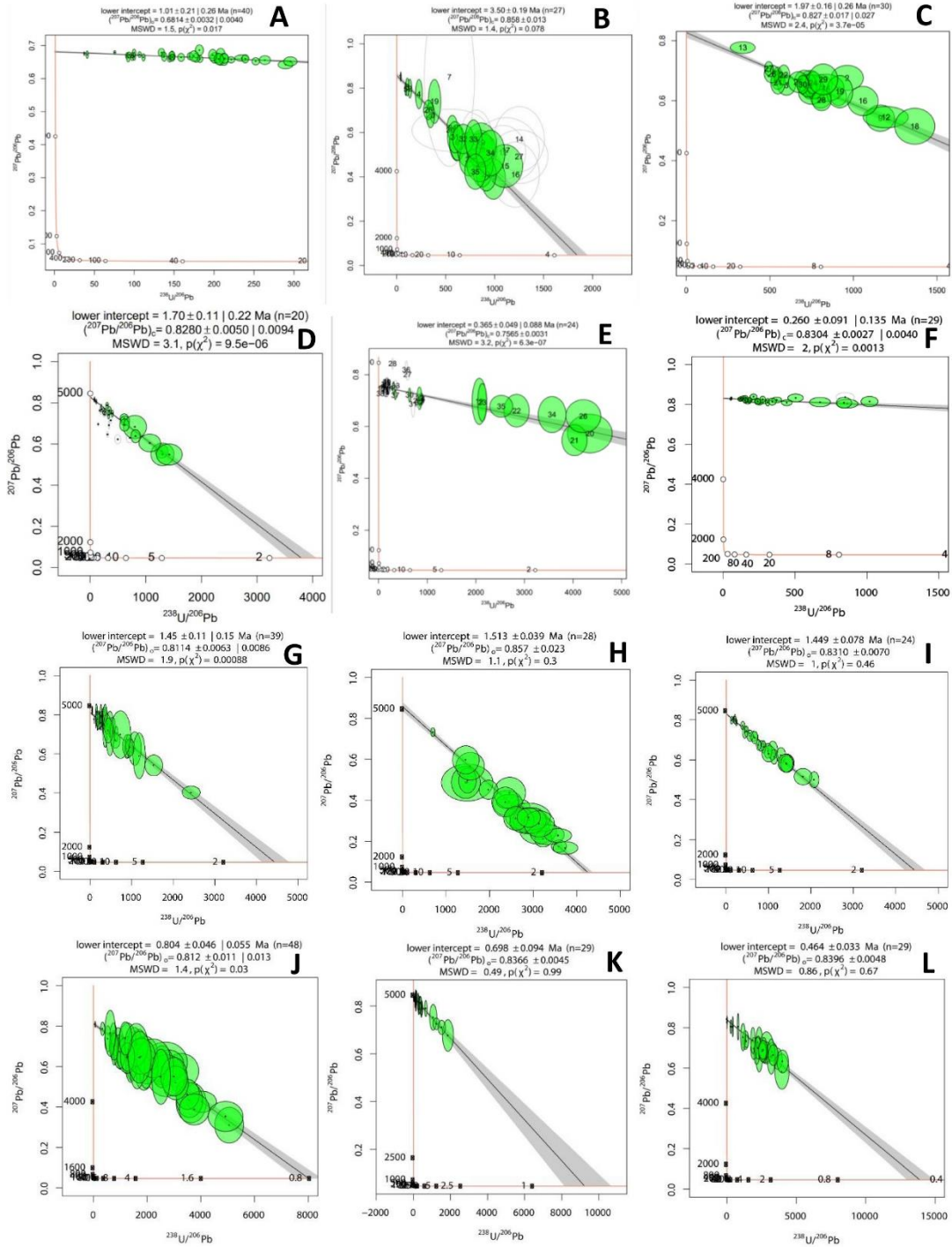


איור 13.8: איזוכרוניים של טרה-וסרבורג ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ – $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$) של הדוגמאות הבאות (ראה טבלה 13.1):

I-Ju-Abu ; I-Ju-BHI-2a (BL-22) – D, E ; I-Ju-BHI-4b (BL-19a) – C ; I-Ju-BHI-5A (BL-13) – B ; I-Ju-BHI-5c (BL-25) – A
I-Ju-ATRR_1b ; I-Ju-Atarot-001 (BL-24) – I ; I-Ju-ATRR_2 (BL-45) – H ; I-Ju-ATRR_3 (BL-42) – G ; Trifi (A-55) – F
IL-N-GMAL-1-3 (BA-2) – L ; I-Ju-ATRR_4 (BL-44) – K ; (BL-43) – J



איור 13.9: איזוכרונים של טרה-וסרבורג ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} - ^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$) של הדוגמאות הבאות (טבלה 13.1): (BA-13.1) IL-N-GMAL-2-2 (BA-13.1) ; IL-N- ; IN-TZ-2019-1 (BL-1) – E ; I-JD-Samoa-S (BL-26) – D ; IN-KID-6b (BL-20) – C ; IN-KID-6b (BL-46) – B ; 3) – A ; Zarnik ; Zarnik Center (BA-10) – I ; IL-N-MAZAR-3 (BA-6) – H ; IL-N-MAZAR-2 (BA-5) – G ; MAZAR-1 (BA-4) – F ; Zeelim Upper (BL-28) – L ; MSMR-2 (A-2) – K ; East (BA-11) – J



איור 13.10: איזוכרוניס של טרה-וסרבורג ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} - ^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$) של הדוגמאות הבאות (טבלאות 13.1 ו-13.2): ZLIM-2 (BL- ; A-14) – C ; IJ-HBR_1 (BL-31) – D ; IJ-HBR-2-bottom (A-14) – C ; IJ-HBR_3_Base (A-16) – B ; 53) – A ; IN-TZAF-1-III-C-top (OC-82) ; IN-TZAF-1-I-P-base (OC-68) – H ; IN-MKTC-13-G (OC-52) – G ; MBM-1 (BA-7) – F ; IN-MKTC-12 (OC-33) – L ; IN-MKTC-13-C (OC-50) – K ; IN-MKTC-13-E-base (OC-52) – J ; – I

Abu Trifi, #1, 740 m



	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1	-6.47	-15.47
2	-5.62	-15.58
3	-5.70	-16.32

Beit Hagai 4B (BHI 4B), #5, 860 m



	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
2.1	-6.25	-13.21
2.2	-6.17	-12.15
2.3	-6.10	-12.88
2.4	-6.15	-12.55

	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1.1	-6.13	-13.34
1.2	-6.26	-13.14
1.3	-7.48	-10.34
1.4	-7.12	-11.72

Atarot Cave 4 (Atrt 4), #1, 760 m



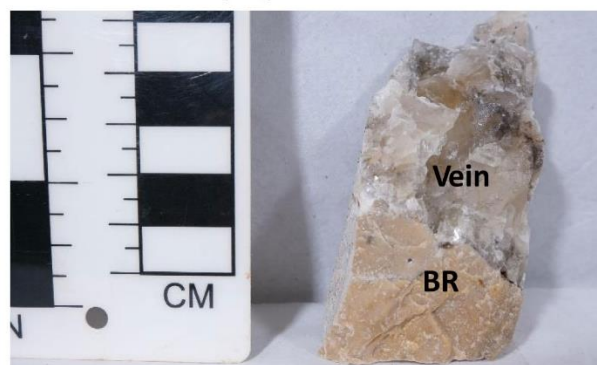
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
4.1	-2.89	-13.23
4.2	-5.64	-14.54
4.3 (BR)	2.61	0.78

Beit Hagai 5 (BHI 5), #5, 860 m



	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
5.1	-7.26	-11.98
5.2	-6.77	-11.82
5.3	-6.03	-13.44

Tzavoa Cave (TZ), #15, 450 m



	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
Vein	-4.56	-15.1
BR	-0.87	-6.76

איור 13.11: הרכבים איזוטופיים של חמצן ופחמן של כמה מדוגמאות הספלאוטמים בני ה-25 עד 16 מיליון שנה, בהשוואה להרכב האיזוטופי של סלע האם הימי הקרטיקוני.

בדיקת XRD הראתה שספלאוטמים מורכבים מקלציט בלבד, כאשר חלק מהקלציטים מכילים אינקלוזיות של תחמוצת מנגן. גילי הספלאוטמים הכי עתיקים הם בין 24.47 ± 0.47 לבין 16.54 ± 0.21 מיליון שנה (טבלה 13.1, איורים 13.8, 13.9 ו-13.10), ז"א הם גדלו מסוף אוליגוקן ולתוך המיוקן המוקדם. חללים גדולים שמכילים ספלאוטמים אלה נמצאו באזור בית חגי (852 מטר מעל לגובה פני הים) ובמערות זרניך ובסביבתה (265 - 275 מ'). חללים קטנים יותר שמלאים בקלציטים עתיקים אלו, כמו גם עורקים וגיאודות מגיל זה נמצאו בטווח רחב

של גבהים טופוגרפיים בסלעי חבורת יהודה בין תצורת צפית (קנומן) לתצורת שבטה (טורון) בין 860 לבין 130 מטר מעל לגובה פני הים, במערות צבוע, כידוד, זרניך ונחל גמלים. ערכי $\delta^{18}\text{O}$ של קלציטים עתיקים אלה (איור 13.11) נעים בין -16.32‰ לבין -10.34‰ , וערכי סלע האם הימי נעים בין -6.76‰ (שיבטה, טורון) לבין 0.78‰ (ורדים, קנומן). ערכי $\delta^{13}\text{C}$ של הקלציטים האלה נעים בין -7.48‰ לבין -2.89‰ , וערכי $\delta^{13}\text{C}$ של סלע האם הימי נעים בין -0.87‰ (תצורת שיבטה, טורון) לבין 2.61‰ (תצורת ורדים, קנומן).

גילם של ספלאוטמים ואדוזיים (אלמוגי המערות) במערת בית חגי נעים בין 9.37 ± 0.54 לבין 7.10 ± 0.43 מיליון שנה. במערת עטרות (גובה 760 מ') עורקים וגיאודות בקירות המערה הם בני 19.39 ± 0.22 עד 17.56 ± 0.31 מיליון שנה, כאשר גילם של משקעי המערה הפריאטיים הנמצאים במערה עצמה נע בין 15.86 ± 2.08 לבין 13.32 ± 2.52 מיליון שנה. גילם של משקעי מערה ואדוזיים הוא בין 10.1 ± 3.1 לבין 1.69 ± 0.16 מיליון שנה (טבלה 13.11 איור 13.8).

במערות נמוכות כמו מערת צבוע (450 מ') ומערת כידוד (280 מ'), הקלציטים העתיקים (22 – 18 מיליון שנה) הם גם כן קדומים לחלל המערה (איורים 13.4-H ו-13.5-I).

בגבהים הטופוגרפיים הנמוכים יותר סמוך לבקע ים המלח נמצאו קלציטים צעירים יותר. בנחל מזר נמצאו מספר מערות קטנות עם ספלאוטמים פריאטיים (ממילרס) במרחק של מאות מטרים זה מזה בגבהים טופוגרפיים של 85 עד 110 מטר מעל לגובה פני הים. פרישה מרחבית נרחבת של מחשופים אלה מראה על כך שהם נוצרו סמוך לאופק מי תהום קדום. הגילים של שלושת מחשופי הממילרס שתוארכו נעים בין 3.83 ± 0.16 לבין 3.22 ± 0.28 מיליון שנה (טבלה 13.1, איור 13.9).

בנחל חבר (מעלה עוזי) בגובה טופוגרפי של 180 מטר מעל לגובה פני הים נמצא זקיף ואדוזי בן 3.50 ± 0.19 מיליוני שנים (ראה טבלה 13.1, איור 13.9). צרוף של נתון זה לגילי הממילרס מנחל מזר מראה שמפלס מי תהום קדום היה נמוך יותר מגובה הזקיף בנחל חבר, אך גובה מגובה הממילרס בנחל מזר.

ספלאוטמים אחרים מגבהים דומים נתנו גילים צעירים יותר. בנחל משמר (170 מ') משקעי ממילרס נתנו גיל של 1.54 ± 0.097 מיליון שנה, בנחל צאלים העליון (275 מ') גיל הממילרס היה 2.712 ± 0.114 מיליון שנה ובנחל חבר, מעלה עוזי, (230 מ') נתנו גילים בין 1.97 ± 0.26 לבין 1.23 ± 0.17 מיליוני שנה. בנחל צאלים תחתון, עין ענבה, התקבל גיל של 1.01 ± 0.26 מיליון שנה על שבר של משקעי ממילרס שנפל מצוק ונמצא בגובה 160- מ'. לא נמצאו מחשופים בקרבתו, לכן ברור כי נפל מגובה רב. יש למצוא את המחשוף המקורי ממנו נפל (ראה טבלה 13.1, איורים 13.9 ו-13.10).

בנחל ערוגות בגובה של כ-100 מ' נמצאו חללים עם ממילרס, פוליה ורפסודות קלציט בשני צידי הקניון: במעלה איסיים וממולו במעלה בני מושבים. הגילים שהתקבלו ממחשופים אלה הם 0.365 ± 0.088 ו- 0.260 ± 0.135 מיליוני שנה בהתאמה (ראה טבלה 13.1, איור 13.10). על משקעי המערות הצעירים טרם בוצעו אנליזות של חמצן ופחמן. המרחק בין שני המחשופים משני צידי הקניון הוא כ-430 מטרים.

13.5 דיון

גילי הספלאוטמים הקדומים ביותר מצביעים על תאריך לפני כ-25 מיליון שנה כתאריך תחילת ההשקעה של הקלציטים הפריאטיים המצויים בסלעי חבורת היהודה הקנומנית – טורונית. ערכי $\delta^{18}\text{O}$ בקלציטים בני 16-25 מיליוני שנה נעים בין -16.32‰ לבין -10.34‰ (איור 13.11). ערכים אלה מאוד שלילים גם ביחס לגיר הימי של סלע האם (-6.76‰ - -0.78‰) וגם ביחס לספלאוטמים של מערות שורק ופקיעין ב-240 אלף השנים האחרונות (-8.0‰ - -2.0‰) (Bar-Matthews *et al.*, 2003). ערכי $\delta^{18}\text{O}$ של הספלאוטמים האינטרגלציאליים בנגב בפליוקן-פלייסטוקן (-7‰ - -11.5‰) (Vaks *et al.*, 2006, Vaks *et al.*, 2010, Vaks *et al.*, 2013) קרובים אליהם יותר, אך עדיין גבוהים יותר. בכל מקרה המקור השלילי מאוד של המים שהשקיעו את הקלציטים הפריאטיים של סוף אוליגוקן – מיוקן מוקדם חייב להיות מטאורי, מה שמצביע על נסיגת הים, חשיפה יבשתית ותחילת התהליכים הקרסטיים. ערכי $\delta^{13}\text{C}$ בקלציטים של סוף אוליגוקן – תחילת מיוקן (-7.48‰ - -2.89‰) שליליים מאוד של סלע האם הימי, דומים בערכיהם של הספלאוטמים האינטרגלציאליים בנגב בפליו-פלייסטוקן Vaks *et al.*, 2013, Vaks *et al.*, 2010, Vaks *et al.*, 2006) וגבוהים משמעותית מערכי ה- $\delta^{13}\text{C}$ של משקעי מערות שורק ופקיעין ב-240 אלף השנים האחרונות (-13.0‰ - -8.0‰), מלבד אירועים אקלימיים חריגים בהם האחרונים הכבידו עד לערכים של -4.0‰ (Bar-Matthews *et al.*, 2003).

יש לציין שגם במערות נמוכות יחסית טופוגרפית, כמו מערת צבוע (450 מ'), בקלציט הקדום בן כ-22 מיליון שנה ערך $\delta^{18}\text{O}$ הוא -15.1‰ , בדומה למערות הגבוהות טופוגרפית, מה שמראה על אותו המקור המטאורי. זה מרמז על כך שגם המערות שנמוכות טופוגרפית היום וגם המערות שהיום גבוהות טופוגרפית היו פעם כנראה במפלס טופוגרפי דומה ועומק דומה מתחת לפני השטח. הבדלים טופוגרפיים נוכחיים נוצרו מאוחר יותר בעקבות השתפלות הבקע והתרוממות של שדרת ההר. בהמשך הפרויקט יש לבדוק הרכבים איזוטופיים ופליאומטרטורות בהן נוצרו שאר הספלאוטמים העתיקים בגבהים טופוגרפיים נמוכים, כדי לאמת השארה זו.

ההיסטוריה של משקעי מערת עטרות מראה שמשקעים הכי קדומים, בני 20-17 מיליון שנה הם עתיקים מחלל המערה העיקרי, מה שמראה שבמפלס טופוגרפי של 740-760 מ' מעל לגובה פני הים היווצרות חללי מערות גדולים אירעה אחרי גיל של 16 מיליון שנה (גיל של משקעים פריאטיים במערה זו הוא סביב 16-13 מיליון שנה). זה גיל צעיר יותר מגיל משקעים פריאטיים במערת בית חגי הנמצאת כ-100 מטר גבוה יותר ממערת עטרות, מה שמראה שמערת בית חגי עתיקה יותר ממערת עטרות ואחרונה שייכת לשלב קרסטי מאוחר יותר כאשר מפלס מי התהום ירד משמעותית עקב התרוממות האזור בכ-100 מטר. משקעים וואדוזיים התחילו לגדול במערת עטרות בתאריך 3.1 ± 10.1 מיליון שנה וזה גיל עתיק יותר מאשר גיל של כ-6 מיליון שנה בו מפלס מי התהום הרגיונלי נטש את המערות בגובה הנוכחי של 400-600 מ'. אלו הן מערות הרטוב, מחצבת דרגות ומעלה המישר (ראה איור 13.3, מספרים #2, #3 ו-20 ואיור 13.5, עבודת המסטר של אורן שלדקס (Chaldekas *et al.*, 2022)).

לאחר 6 מיליון שנה מפלס מי התהום השתפל במהירות רבה, כנראה בגלל היווצרות בקע ים המלח והתרוממות שדרת ההר. גיל של משקעים פריאטיים מנחל מזר הפזורים באותו מפלס טופוגרפי לאורך מאות מטרים נע בין 0.16 ± 3.83 לבין 0.28 ± 3.22 מיליון שנה (טבלה 13.1, איור 13.3, מ"ס #18, איורים 13.10-13.4), מה שמראה על נוכחות מפלס מי תהום רגיונלי באותו אופק טופוגרפי. הדבר נתמך על ידי תיארוך סדימנטים אגמיים במערות

בגבהים דומים במצוק ההתקנים על ידי איזוטופים קוסמוגניים ל-3.4 עד 3.6 מיליון שנה (Davis *et al.*, 2014), המראים כי מפלסי אגמי הבקע באותה תקופה היו בגבהים טופוגרפיים דומים למפלס מי תהום הקדום של נחל מזר.

נוכחות של זקיף וואדווי בן אותו הגיל (3.50 ± 0.19 מיליון שנה) בגובה טופוגרפי נוכחי של 180 מ' בנחל חבר (מעלה עוזי), מראה שמפלס מי התהום באותה תקופה היה בין קווי גובה נוכחיים של 110 מ' ו-180 מ'. לכן כל משקעי המערות הצעירים יותר שנמצאים מעל המפלסים האלה (נחל משמר, נחל צאלים, נחל חבר), נוצרו באזור וואדווי אפילו אם יש להם מורפולוגיה של ממילריס או רפסודות. האחרונים כנראה גדלו בבריכות שהיו במערות בתוך הוואדווי.

נתונים לא מפורסמים מעבודת המסטר של אורן שלדקס מראים שספלאוטמים וואדוויים גדלו לפני כ-1.5 מיליון שנה בגבהים טופוגרפיים נוכחיים של 5- מ' בנחל צפית (איור 13.3, מ"ס #17, איור 13.5, טבלה 13.2, איור 13.10). ממילריס בני אותו הגיל ובגיליים מאוחרים יותר שגדלו בגובה טופוגרפי דומה במערת המכתש הקטן כנראה גם נוצרו בטווח וואדוסי (איור 13.3, מ"ס #19, איור 13.5, טבלה 13.2, איור 13.10) והיוצרותם נבעה מקיומה של בריכה במערה שהייתה ממוקמת מתחת לאפיק של נחל חצרה. קיומם של ספלאוטמים וואדוויים באופק טופוגרפי זה לפני כ-1.5 מיליון שנה מעידה על כך שאופק טופוגרפי זה כבר היה מצוי באותה העת מעל למפלס מי התהום הרגיונלי. מסקנה זאת נתמכת גם על ידי תוצאות עבודתם של ניאגו ושות' (Neagu *et al.*, 2020), המראים שטרסות פלוביאליות שקעו באותה התקופה ברמת מזר בגובה טופוגרפי דומה.

גילי משקעי מערות בעלי מורפולוגיה פריאטית בנחל ערוגות בגובה טופוגרפי של 100- מ' הם צעירים מחצי מיליון שנה (מעלה איסיים ומעלה בני מושבים, איור 13.1, #6, #7, איורים 13.4-13.10). מורפולוגיה של החללים בהם גדלו ספלאוטמים אלה מראה כי הם נוצרו במים עומדים בתוך המערות לפני שהקניון התרחב וניקז את המים ממערות אלה. העובדה ששני האתרים נמצאים בגובה זהה במרחק של למעלה מ-400 מטרים זה מזה בצידי הקניון השונים מעידה שהמים שמילאו את החללים היו שייכים לאותו מפלס מי התהום. ייתכן שהאחרון הוכתב על ידי מפלס של אחד מאגמי הבקע הקדומים שהיה אז בקו הגובה הנוכחי של 100- מ'. כדי לקבוע גיל מדויק של מפלס זה, משקעי מערות מאתרים אלה זקוקים לתיארוך בשיטת אורניום-תוריום.

מתוך ציוני הדרך בהשתפלות מפלס מי התהום בשוליים המערביים של בקעת ים המלח ניתן לחשב את קצבי השתפלות של האגן של ים המלח ושל התרוממות שדרת ההר ביחס אליו. נכון לעכשיו הנתונים של המחקר אינם מאפשרים להפריד בין קצב התרוממות שדרת ההר וקצב ההשתפלות של אגן ים המלח, לכן הקצבים שחושבו מהווים את הסיכום של השניים. לפיכך נשתמש במושג "קצב הטקטוני האנכי" לציון קצבי התרוממות שדרת ההר + השתפלות אגן ים המלח. לפני 20-25 מיליון שנה מפלסי מי התהום היו באופק הממוקם היום בגובה 850-860 מ' ולפני 13-16 מיליון שנה מפלס מי התהום היה ממוקם באופק שנמצא היום בגובה של 740 מ'. לכן מדובר בקצב טקטוני אנכי של כ-14 מטר למיליון שנה בין 22.5 לבין 14.5 מיליוני שנה לפני היום. אם לפני 6 מיליון שנה מפלס מי התהום היה באופק הנמצא היום גובה של כ-450 מ' (Chaldekas *et al.*, 2022), קצב טקטוני אנכי בין 14.5 ל-6 מ.ש. היה 34 מ' למיליון שנה. יש לציין שספלאוטמים פריאטיים מתחילים לגדול באופק שנמצא היום בגבהים 400-500 מ' כבר בין 14 ל-10 מיליון שנה לפני היום, מה שמצביע על סמיכות אופקים האלה לטבלת מי התהום. לכן ייתכן ורוב ההתרוממות התרחשה בתחילתה של תקופה זו, בעוד שבחלקה השני מפלס מי התהום

היה יציב יחסית ולא הייתה טקטוניקה אנכית משמעותית. מערות אולם שהתפתחו באופק זה בין אמצע לסוף מיוקן תומכות בהשארה זאת (Frumkin & Fischhendler, 2005).

לפני 3.5 מיליון שנה מפלס מי התהום היה באופק שנמצא היום בגובה 100 מ', לכן בין 6 מיליון ל-3.5 מיליון שנה לפני היום מדובר קצב טקטוני אנכי עלה ל-140 מ' למיליון שנה. בין 3.5 מ.ש. לבין הרביעון מאוחר (בהנחת מפלס ממוצע של 300- מ'), קצב טקטוני אנכי היה 114.3 מ' למיליון שנה.

13.6 מסקנות ביניים

עבודה זו ביחד עם עבודת המסטר של אורן שלדקס מראות כמה אבני דרך בהתפתחות הטקטוניקה האנכית של אזור ים המלח והרי יהודה:

- התרוממות כל האזור מעל לגובה פני הים לפני כ-25 מיליון שנה, מה שהוביל להתפתחות של קרסט ראשוני ומשקעי מערות ראשוניים בסלעי חבורת יהודה מגיל קנומן-טורון. העדות המרכזית שקלציטים אלו נוצרו ממים מטאוריים ולא ממי הים הוא הרכב איזוטופי שלילי של חמצן. שלב זה נמשך עד ל-16 מיליון שנה לפני היום ובמהלכו נוצרו חללים קרסטיים גדולים בהר חברון שהיום נמצאים בגובה של 850-860 מ'. היווצרות חללים קרסטיים עתיקים אלו התרחש בחבורת יהודה גם במקומות שהיום נמוכים יותר טופוגרפית, אלה שהשתפלות של מקומות אלה נבעה כנראה מתהליכים טקטוניים מאוחרים יותר.
- בתקופה שלפני 16 עד 13 מיליון שנה התרחש שלב שני בהיווצרות הקרסט שהוביל להמסת חללים קרסטיים גדולים באזור שנמצא היום בגבהים 740-760 מ'. מעבר חללים אלה לאזור הוואדוסי התרחשה אחרי כ-13 מיליון שנה. קצב טקטוני אנכי בין השלב הראשון לשלב השני היה כ-14 מטר למיליון שנים.
- לפני 6-14 מיליון שנה התרחש שלב שלישי באבולוציה קרסטית של האזור, בה מפלס מי התהום היה באופק המקביל לגבהים נוכחיים של 400-600 מ' מעל לגובה פני הים. כנראה שלפחות בחלקה המאוחר של תקופה זו שרר שקט טקטוני מבחינת תנודות אנכיות. הדבר איפשר המסה של חללים קרסטיים גדולים והיווצרות אופק עם ריכוז מערות הכי משמעותי בארץ. מי התהום נטשו מפלס זה סביב 6 מיליון שנה לפני היום בעקבות המשך התרוממות שדרת ההר ותחילת היווצרות בקע ים המלח. קצב טקטוני אנכי בין השלב השני לשלב השלישי היה כ-34 מטר למיליון שנה, אך רוב התנועות האנכיות התרחשו כנראה בחלקה הראשון של תקופה זו.
- בסביבות 6 מיליון שנה לפני היום התחיל השלב הרביעי והמהיר של טקטוניקה אנכית באזור. באופק הנמצא היום בגובה 400-450 מ' נפסקת בתאריך זה השקעת ספלאוטמים פריאטיים ומתחילה השקעה של ספלאוטמים וואדוויים (Chaldekis *et al.*, 2022). עדות הבאה למיקומו של מפלס מי תהום קדום שהשקיע ספלאוטמים פריאטיים נמצאה באופק המקביל לגבהים טופוגרפיים של 85-110 מ' מעל לגובה פני הים בנחל מזר. ספלאוטמים פריאטים אלה תוארכו לתקופה שלפני 3.8 – 3.2 מיליון שנה. נוכחות מפלס מי תהום רגיונלי באופק זה בתקופה זו נתמכת גם על ידי גיל של סדימנטים אגמיים ממערות במצוק ההעתקים (Davis *et al.*, 2014). קצב טקטוני אנכי בשלב זה היה 140 מ' למיליון שנה.

- 3.5 מיליוני השנים האחרונות ניתן להגדיר כשלב החמישי והאחרון של הטקטוניקה האנכית באזור, בו בקעת ים המלח לבשה את צורתה הנוכחית. לפני 1.5 מיליון שנה מפלס מי התהום ומפלס אגמי הבקע היה כבר נמוך מגובה פני הים הנוכחי, כפי שמראים משקעים וואדוזיים בגובה 5- מ' בנחל צפית. הדבר גם נתמך בגילי טרסות פלוביאליות ברמת מזר בגבהים דומים (Neagu *et al.*, 2020).
- קיימות עדויות לנוכחות מפלס מי התהום בגובה 100- מ' ממשקעי מערות פריאטיים בחללים שנפתחו על ידי ארוזיה משני צידי נחל ערוגות לפני כ-200-500 אלף שנה. הדבר עשוי להיות קשור למפלסים גבוהים של אגם עמורה. תיארוך משקעים אלה בשיטת אורניום-עופרת אינו מדויק, לכן יש צורך בתיארוך אורניום-תוריום. בהנחה שממוצע מפלסי אגמי הבקע ברביעון המאוחר היה 300- מ', ניין לחשב קצב טקטוני אנכי של 114.3 מ' למיליון שנה עבור 3.5 מיליוני השנה האחרונות.

13.7 תכניות להמשך

שחזור ההיסטוריה הטקטונית של בקעת ים המלח שבוצע עד כה בעבודה זו ובעבודות הנלוות אליה הוא שחזור גס עם רזולוציה נמוכה יחסית. כדי להגדיל את הרזולוציה שלו וגם לקבוע את מקורות המים מהם שקעו משקעי המערות יש למצוא מחשופים נוספים של ספלאוטמים פריאטיים שמהווים אינדיקטור לאופקי מי התהום הקדומים, במיוחד במפלסים הנמוכים הסמוכים לים המלח. יש לבצע תיארוכי אורניום-עופרת של אופקים אלה, כמו גם אנליזות איזוטופיות נוספות של חמצן ופחמן של כל הקלציטים הצעירים מגיל של 17 מיליון שנה. בהמשך המחקר יש גם לבצע תיארוך אורניום-תוריום של יחידות הספלאוטמים הסמוכות לים המלח כדי לשחזר את מפלסי מי התהום ברביעון אמצעי-מאוחר.

13.8 מקורות

- Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Gilmour, M., Matthews, A. & Hawkesworth, C. J. (2003). Sea-land oxygen isotopic relationships from planktonic foraminifera and speleothems in the Eastern Mediterranean region and their implication for paleorainfall during interglacial intervals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **67**, 3181-3199.
- Bar, O. (2009). The shaping of the continental margin of central Israel since the Late Eocene — Tectonics, morphology and stratigraphy. *Earth and Environmental Sciences*: Ben Gurion University.
- Bar, O. & Zilberman, E. (2016). Subsidence and conversion of the Dead Sea basin to an inland erosion base level in the early middle Miocene as inferred from geomorphological analysis of its ancient western fluvial outlet. *Geomorphology* **261**, 147-161.
- Bar, O., Zilberman, E., Feinstein, S., Calvo, R. & Gvirtzman, Z. (2016). The uplift history of the Arabian Plateau as inferred from geomorphologic analysis of its northwestern edge. *Tectonophysics* **671**, 9-23.
- Chaldeckas, O., Vaks, A., Haviv, I., Gerdes, A. & Albert, R. (2022). U-Pb speleothem geochronology reveals a major 6 Ma uplift phase along the western margin of Dead Sea Transform. *GSA Bulletin* **134**, 1571-1584.

- Davis, M., Fink, D., Frumkin, A., Matmon, A., Niedermann, S. & Rood, D. (2014). Unraveling rift margin evolution and escarpment development ages along the Dead Sea fault using cosmogenic burial ages. *Quaternary Research* **82**, 281-295.
- Ford, D. & Williams, P. W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. London: Unwin Hyman.
- Frumkin, A. & Fischhendler, I. (2005). Morphometry and distribution of isolated caves as a guide for phreatic and confined paleohydrological conditions. *Geomorphology* **67**, 457-471.
- Frumkin, A., Langford, B., Lisker, S. & Amrani, A. (2017). Hypogenic karst at the Arabian platform margins: Implications for far-field groundwater systems. *GSA Bulletin* **129**, 1636-1659.
- Gvirtzman, Z., Steinberg, J., Bar, O., Buchbinder, B., Zilberman, E., Siman-Tov, R., Calvo, R., Grossowicz, L., Almogi-Labin, A. & Rosenshaft, M. (2011). Retreating Late Tertiary shorelines in Israel: Implications for the exposure of north Arabia and Levant during Neotethys closure. *Lithosphere* **3**, 95-109.
- Klimchouk, A., Palmer, A. N., De Waele, J., Auler, A. S. & Audra, P. (2017). *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*: Springer.
- Langford, B. & Frumkin, A. (2013). The Longest Limestone Caves In Israel. In: Belig, M. (ed.) *Judea And Samaria Reserch Studies*. Ariel, 319-332.
- Neagu, N., Matmon, A., Enzel, Y. & Porat, N. (2020). Quaternary evolution of a hyperarid drainage under climatic fluctuations and rift-margin base-level fall, NE Negev, Israel. *Geomorphology* **354**, 107042.
- Nuriel, P., Weinberger, R., Kylander-Clark, A. R. C., Hacker, B. R. & Craddock, J. P. (2017). The onset of the Dead Sea transform based on calcite age-strain analyses. *Geology* **45**, 587-590.
- Nuriel, P., Wotzlaw, J. F., Ovtcharova, M., Vaks, A., Stremtan, C., Šála, M., Roberts, N. M. W. & Kylander-Clark, A. R. C. (2021). The use of ASH-15 flowstone as a matrix-matched reference material for laser-ablation U-Pb geochronology of calcite. *Geochronology* **3** 35–47.
- Paton, C., Woodhead, J. D., Hellstrom, J. C., Hergt, J. M., Greig, A. & Maas, R. (2010). Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **11**.
- Roberts, N. M. W., Rasbury, E. T., Parrish, R. R., Smith, C. J., Horstwood, M. S. A. & Condon, D. J. (2017). A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **18**, 2807-2814.
- Vaks, A., Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Matthews, A., Frumkin, A., Dayan, U., Halicz, L., Almogi-Labin, A. & Schilman, B. (2006). Paleoclimate and location of the border between Mediterranean climate region and the Saharo-

Arabian Desert as revealed by speleothems from the northern Negev Desert, Israel *Earth and Planetary Science Letters* **249**, 384-399.

Vaks, A., Bar-Matthews, M., Matthews, A., Ayalon, A. & Frumkin, A. (2010). Middle-Late Quaternary paleoclimate of northern margins of the Saharan-Arabian Desert: reconstruction from speleothems of Negev Desert, Israel. *Quaternary Science Reviews* **29**, 2647-2662.

Vaks, A., Woodhead, J., Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Cliff, R. A., Zilberman, T., Matthews, A. & Frumkin, A. (2013). Pliocene–Pleistocene climate of the northern margin of Saharan–Arabian Desert recorded in speleothems from the Negev Desert, Israel. *Earth and Planetary Science Letters* **368**, 88-100.

Vermeesch, P. (2018). IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers* **9**, 1479-1493.

14. תוצאות ראשונות של תיארוך קרבונט בשיטת U-Th לתיחום גילי פעילות העתקים צעירים באזור עין פשחה

שגיא, א.¹ גולן, צ.¹ ווקס, א.¹ גבריאלי, ת.^{1,2} נוריאלי, פ.^{1,3}

¹ המכון הגיאולוגי

² אוניברסיטת בן גוריון בנגב, באר-שבע

³ אוניברסיטת ז'נבה, ז'נבה, שוויץ

14.1 תקציר

מטרת עבודה זו היא לקבוע מתי פעלו העתקים צעירים באזור השוליים המערביים של צפון ים המלח. מוצגות תוצאות ראשונות של ניתוח סטרוקטורלי של אזורי העתקה ושל תיארוך גילי משקעים קרבונטים ששקעו על גבי העתקים, ולעיתים אף נגזרו שוב. אלו שימשו לתחימת זמני העתקה על ההעתקים. העתקי עין פשחה הם העתקים נורמלים אלכסוניים שנטייתם הכללית מזרחה והם מופעים בשני כיוונים עיקריים צפון-צפון-מזרח וצפון-צפון-מערב עם רכיב תנועה משני ימני ושמאלי. ההעתקים מופיעים במספר מדרגות במצוק ההעתקים עם בלוקים נטויים מזרחה ביניהם. ההעתקים המערביים בסדרה חשופים כמשטחי החלקה גדולים וגליים ומעתיקים את סלעי חבורת יהודה אל מול סלעים רביעונים. אזור ההעתק (fault zone) של העתק בודד מורכב מליבה (Core) ברוחב כמה עשרות סנטימטרים עד מספר מטרים הבנויה חלקיקי סלע גזורים שגדלם קטן לכיוון משטחי ההחלקה. רחוק יותר מהמשטח קיים אזור נזק (Damage zone) שכולל העתקונים וסדקים ורחבו מאות מטרים. בשלב זה נערכו תיארוכים לשבע דוגמאות בשיטת U-Th בארבעה מקומות על גבי העתקים, שלושה באזור עין פשחה ואחד באזור מצוקי דרגות המצביעים על מספר אירועי העתקה שונים לאורך הפליסטוקן העליון. בהמשך המחקר ישמשו גילים אלו ומדידות חדשות להערכת קצבי התנועה על גבי העתקי השולים מאז הפליסטוקן העליון.

14.2 מבוא

ההבנה שתופעת רעידת האדמה קשורה לתנועת העתקים היא בת יותר ממאה שנים (Gilbert, 1884; Reid, 1910) ומאז נמדדות הסטות של גופי סלע שגילם ידוע להערכת תנועה פעילות העתקים. מבחינה סטטיסטית, הסיכוי לפעולה חוזרת של העתקים שפעלו לאחרונה (מאות שנים עד עשרות אלפי שנים), גבוה מאלו שלא פעלו זמן רב יותר. מבחינה טקטונית, העתקה כולה להיות קבועה יחסית או משתנה בזמן ובמרחב. לכן, זיהוי העתקים צעירים, הערכה ומדידה של וקצביהם וזמן פעילותם לאחרונה מייצרים נתונים בסיסיים הן להערכת סיכונים סייסמיים והן להבנת הטקטוניקה העכשווית (Sharon et al., 2017; Valentini et al., 2017; Wesnousky, 2008; et al., 2020).

אגן ים המלח הוא גרaben עמוק וצר התפתח בין לוח ערב ללוח של אפריקה. דרוג של שני מקטעים של העתק ים המלח (Quennell, 1958) ותנועה שמאלית יחסית בינם יוצרים יחדיו מעוות מקומי המתבטא במתיחה עיקרית של הקרום בכיוון כללי צפון-דרום ומתיחה משנית בכיוון כללי מזרח-מערב (Garfunkel, 1981). הן לפי עדויות גיאולוגיות הממצעות זמן רב והן לפי עדויות גיאודטיות המודדות את תנועת היבשות באזור בעשרות השנים

האחרונות, קצב הגזירה השמאלית לאורך האגן קבוע יחסית ועומד על 4-5 מ"מ בשנה (Garfunkel, 2014; Hamiel et al., 2018; Masson et al., 2015). לעומת זאת, קצב התנועה האנכית האזורי בתקופות האחרונות פחות ברור ומבוסס על תצפיות שדה ספורות, מדידות GPS מקומיות ועל נתונים גיאופיזיים המייצרים טווח רחב של קצבים עבור תקופות שונות (Bartov and Sagy, 2004; Torfstein et al., 2009; Ten Brink and Flores, 212; Garfunkel 1997; Gardosh et al., 1990; Hamiel et al., 2021).

התפתחות שיטות לתיארוך רדיוגני של מינרלים וסלעים שונים בשנים האחרונות מאפשרת שימוש במספר "שעונים טבעיים" הקשורים להתגבשות מינרלים, התקררות לטמפרטורות מסוימות ולתהליכים של קבורה ו/או חשיפה, עבור הערכת גילי אירועי ההעתקה וקצביהם. בעזרת שיטות כאלו ניתן במקרים מסוימים לתיארוך את גיל הסלעים המוסטים משני צידי ההעתקה ולחשב את סכום התנועה בין גופי הסלע ובמידה וישנו סלע או סדימנט שאינו מוסט מעל ההעתקה, ניתן לעיתים לקבוע את גיל הווצרותו ולקבל מידע בצורה לא ישירה על גיל התנועה האחרונה על ההעתקה. אולם, מתודולוגיה כזו אינה יכולה להיות מיושמת כאשר משטח ההעתקה קורע את פני השטח עד לגג החתך. במקרים כאלו, מתוארכים אובייקטים באזור ההעתקה שהיווצרותם קשורה לפעולת ההעתקה: למשל, מינרלים שהתגבשו על משטחי ההעתקה ועורקים (Nuriel et al., 2017; Oren et al., 2020), או מינרלים שהשעונים בהם התאפסו כתוצאה מחימום (או קירור שאחריהם) הקשור בתנועה המהירה של ההעתקה (Tsukamoto et al., 2020). העתקים רבים נחשפים כשהם מכילים אזור העתקה רחב ובו מעוות בדרגות שונות. מעוות זה יכול להיות מדורג או בו זמני במקרה וכמה משטחים נעים באזור העתקה נתון באירוע אחד. לכן, זיהוי וניתוח זמני פעילות העתקים, בעקר כאלו שהיסטורית התנועה עליהם ארוכה, מצריך שילוב של ניתוח סטרוקטוראלי של אזורי ההעתקים ביחד עם תיארוך פעילותם.

מספר עבודות (Nuriel et al., 2011, 2012, 2017; Oren et al., 2020, 2023; Elisha et al., 2021) הציגו שיטה משולבת למדידת פעילות של העתקים באזור בקע ים המלח, בעקר בתיארוך קרבוניטים בשיטת אורניום-עופרת, שמאפשרת מדידת גיל התגבשות עתיק מ - 300 אלף שנים. עבור אירועי ההעתקה צעירים יותר השיטה יעילה פחות ולכן בפרויקט זה אנו משתמשים בשיטות שדה דומות, אולם שיטת התיארוך במעבדה היא מבוססת בעקרה על דעיכת אורניום לתוריום, המאפשרת תיארוך של התגבשות ממאות עד 500 אלף השנים האחרונות. בעוד שיטת אורניום עופרת משמשת בעקר כביקורת.

דוח זה מתמקד בתוצאות ניתוח סטרוקטורלי של מבנה העתק השוליים של אגן ים המלח באזור עין פשחה, כאשר תיארוך אירועי ההעתקה צעירים החלה בשנת 2020 ונעצרה בשל משבר הקורונה ובעיות במכשירי המדידה במעבדות מכון שלא קיבלו שירות מהחברה בחו"ל מתחילת 2020 עד לתחילת 2022. למעשה, מדידות תיארוך חדשות של אורניום-תוריום נערכו רק בסוף שנת 2023 ותוצאותיהן מוצגות כאן כתוצאות ראשוניות בלבד.

14.3 שיטות

שיטות שדה סטנדרטיות למדידות סטריגרפיות, ליתולוגיות וסטרוקטורליות היוו את הבסיס למדידות השדה אזור ההעתקה. בנוסף, הופעל סורק לייזר קרקעי למדידות גיאומטריות מדויקות של מבנים באזור ההעתקה. דגימות נלקחו מהעתקים ובקרבתם לבחינה פטרוגרפית ולתיארוכם.

הדוגמאות שנבחרו לאנליזת U-Th נטחנו לאבקה באמצעות מקדח ידני (Dremel). על מנת להימנע מתוצאות תיארוך שגויות של שכבות בליות המייצגות מערכת פתוחה וכתוצאה מכך חוו אובדן / תוספת של אורניום או תוריום, נבחרות שכבות שמורות, קשות, וללא נקבוביות. במקביל, כל דוגמא נבחנת תחת מיקרוסקופ אור מקטב באמצעות שקפים פטרוגרפיים, בבדיקה זו נבחנות הליתולוגיה, הטקסטורה ורמת הבליה.

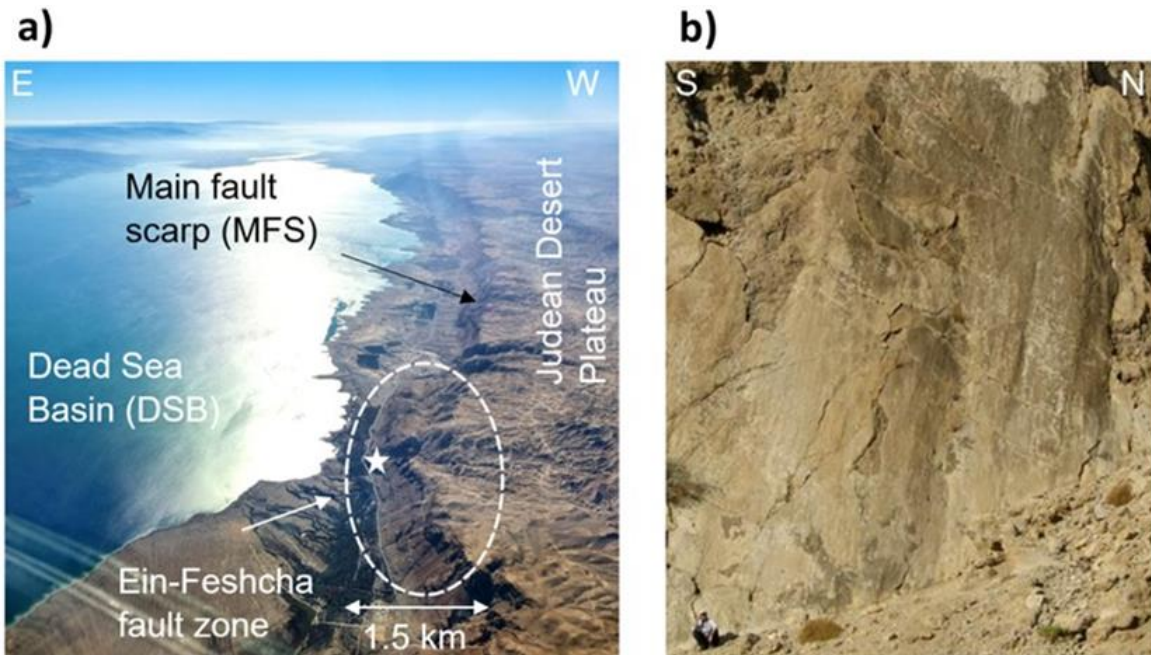
ריכוז האורניום בדוגמא נמדד באמצעות ספקרומטר מסות מסוג Perkin Elmer NexION™ 300D Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS), כל מדידה כוללת תוספת של היסוד רניום (Re) כסטנדרט פנימי עם סטנדרט מסגרת Merck-6. לצורך התיארוך, נעשה שימוש ב-0.05-0.25 גר' אבקה (כתלות בריכוז האורניום בכל דוגמא).

הדוגמאות עברו המסה באמצעות שילוב של תמיסה בריכוז 7 מולר חומצה ניטרית (HNO_3) וחומצה פלואורית (HF), ובתוספת של ספייק איזוטופי $^{229}\text{Th}/^{236}\text{U}$ (^{229}Th N 99.99%; ^{236}U = 99.97%). תהליך מיצוי האורניום והתוריום מכל דוגמא, ההפרדה וסנדרטים גרבימטריים (Henderson, et al. 2001). תהליך מיצוי האורניום והתוריום מכל דוגמא, ההפרדה והמדידה האיזוטופית של כל יסוד נערכו באמצעות מכשיר המולטי-קולקטור (NU Multi Collector-ICP-MS) על פי פרוטוקול המדידה של (Grant et al. 2012). תיקון המדידה עבור ^{230}Th ראשוני נעשה בשימוש יחס אטומי בחומרים דטריטים בקרבונט $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 0.85 \pm 0.085$ על פי (Haase-Schramm et al. 2004).

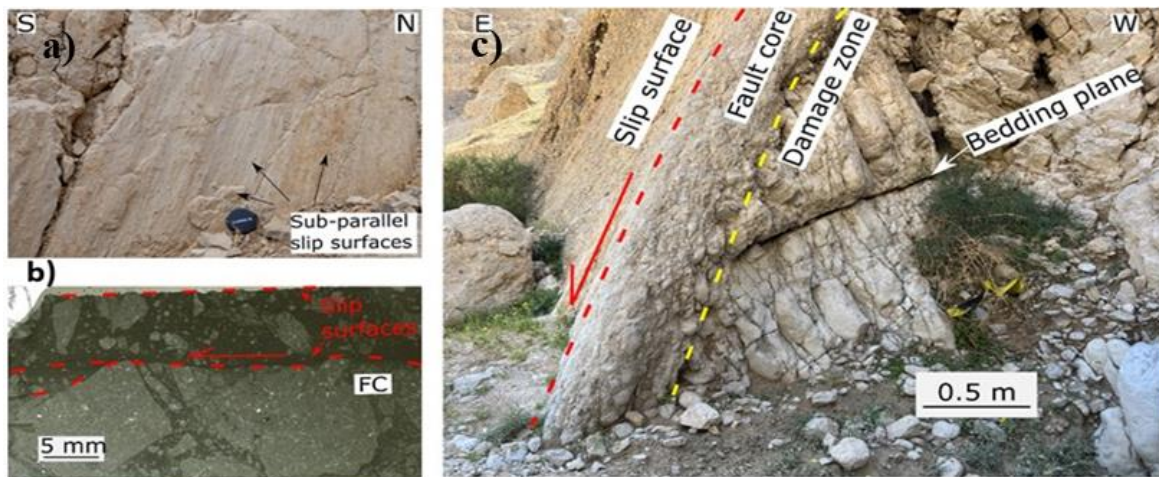
14.4 תוצאות

14.4.1 ניתוח העתקי השוליים באזור עין פשחה

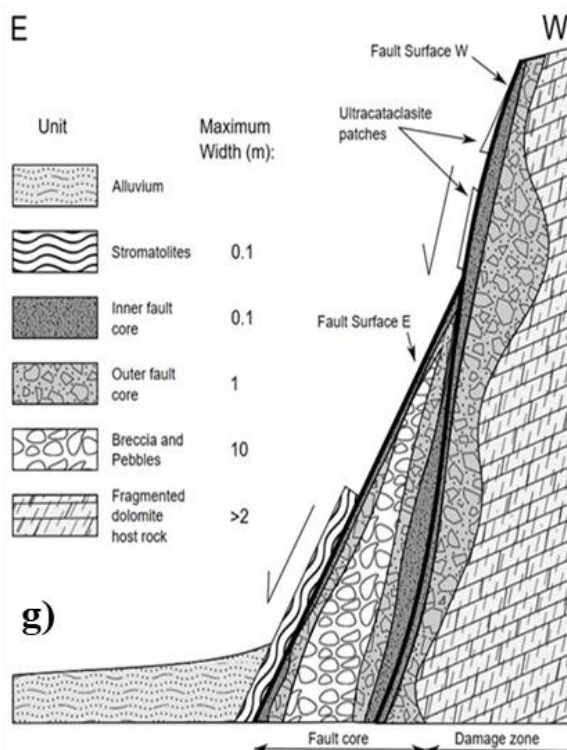
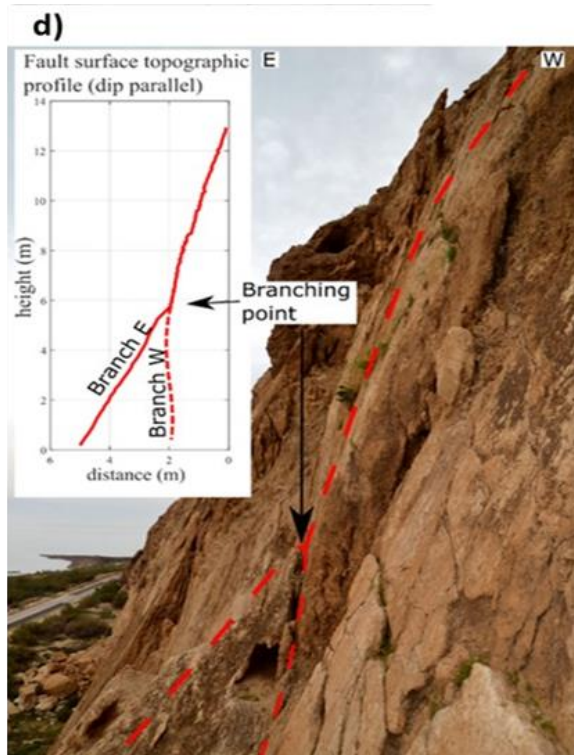
העתקי השוליים של ים המלח נחשפים ברצועת גזירה שכוללת העתקים נורמאליים אלכסוניים (איור 14.4a). טופוגרפית, חלק מהעתקה זו חשוף במצוק ההעתקים שהוא מצוק טופוגרפי בגובה 300-600 מ' שנוצר כצלכת העתק כתוצאה מגזירה אנכית בעקרה, שכמותה היא במקרים רבים באותו סדר גודל של גובה המצוק (Sagy et al., 2003). ניתוח של מערכת ההעתקים בקני-מידה כולל וכן ניתוח מכני וקינמטי של התנועה עליהם מובא בהרחבה במאמר מדעי (Gabrieli et al., 2024). בדוח הנוכחי מוצגים תצפיות הקשורות ישירות לאפשרויות תיארוך ההעתקים ואירועי ההעתקה באזור עין פשחה-אבנת ומשמעותן להמשך המחקר. כמות ההסטה הסטרטיגרפית הכוללת באזור עין פשחה הוא יותר מ-500 מ' לפי ניתוח חתכים סייסמיים (Bruner and Sagy, 2003), והיא מתפרסת על מספר משטחי החלקה תת מקבילים, שהמערביים בינם הם הגדולים ביותר והם מעתיקים את סלעי חבורת יהודה אל מול סלעים וסדימנטים רביעונים (איור 14.4b). משטחי ההעתקים נחשפים לאורך של כ-2 קמ, בניצב לנטייתם בדרגות שונות של חשיפה ובליה.



איור 14.1: מצוק ההעתקים בצפון ים המלח. (a) תמונה אווירית אלכסונית מצפון לדרום של מצוק ההעתקים בצפון אגן ים המלח (צולמה על ידי דן סלע). אזור העבודה מסומן בקו מקוטע. ניתן לראות את מבנה הזיג זג של המצוק הנוצר כתוצאה מחיבור שתי מערכות העתקים בכיוונים שונים. (b) משטח העתק נורמאלי אלכסוני. השריטות על ההעתק והגליות שלו מצביעות על רכיב ימני משני. המשטח מייצג את אחת משתי המערכות הדומיננטיות במצוק ההעתקים.



איור 14.2: אלמנטים סטרוקטורליים בהעתק עין פשחה המערבי. (a) משטח שחוק עם שריטות המעידות על העתקה נורמלית עם רכיב ימני. (b) שיקוף במיקרוסקופ מראה את משטח ההעתק החשוף ומשטח תת-מקביל לו. בינים קיימת שכבה של חומר גרגירי תמוכת מטריקס קרבוניטי. גדל חלקיקי הברקציה גדל ככל שמתרחקים מאזור המשטחים. (c) תמונה בניצב למשטח ההעתק המראה את: ההעתק החשוף, ליבת ההעתק (Fault core) המורכבת מברקציה ללא סמנים של השיכוך המקורי וחלקו המערבי של אזור הנזק (Damage zone) הכולל סידוק צפוף והעתקונים כאשר השכבות עצמן ניתנות לזיהוי. יש לציין שצדו המזרחי של ההעתק אינו חשוף ולכן התמונה היא חלקית.



d) משטחי העתקה מתענפים ואזור העתק מורכב. מוצגת תמונת המשטחים ולידה מוצג חתך טופוגרפי מדויק שנערך על ידי מדידת לייזר במקביל לדיפ. הקו המקווקו בגרף המדידה הוא אינטרפרטציה לענף פנימי. **e)** בקרציה שמקורה בחלוקים שהורבדו כרכסי חוף שנשענו על ההעתק ולאחר מכן הועתקו. **f)** שכבות סטרומטוליטים שהורבדו על המשטח ועברו גזירה. **g)** חתך סכמתי מוצג כדוגמה לארכיטקטורת אזור ההעתק.

משטח התנועה העיקרי בהעתק המערבי מופיע בדרך כלל על שכבות דלומיט מחבורת יהודה עם שריטות אלכסוניות בגליות בולטת המעידות על גם כיווניות התנועה ועל גם על שחק שנוצר מגזירה פריכה (איורים - 14.2a-b). מבט מקרוב על המשטח מגלה שקיימים מספר משטחים תת-מקבילים המופרדים בשכבות של חומר שחק דק גרגר (micritic) מלוכד (Cataclasite) על ידי תלכיד קרבונטי וחמר שחק דק גרגר חלש (Ultra Cataclasite), גם הוא מלוכד חלקית (איור 14.3b-e). לעיתים בין המשטחים נצפים שכבות קלציט ושכבות סטרומטוליטים שגם הם שרוטות (איור 14.2f) ולכן מוסק ששכבות אלו נוצרו על גבי חללים במשטח ההחלקה ובקרבם ולאחר מכן נגזרו בתנועה מאוחרת. אזור זה והשכבות בו מהווים פוטנציאל לתחימת גיל ההעתק ואירועי העתקה עליו. ההעתקים תחומים באזור נזק פריך שיכול להגיע לרחב מאות מטרים. ניתן לחלק אזור זה בחלוקה גסה לאזור הליבה (core) שמאופיין בברקציה (איור 14.2c) שנוצרה על ידי שחק ולאזור הנזק החיצוני המאופיין בעקר בסדקים ובהעתקים קטנים ובו צפיפות הסידוק הולכת וקטנה ככל שמתרחקים מליבת ההעתק.

דרומית למחשוף העיקרי נחשף העתק התחום על ידי סדימנטים רביעונים בלבד. במספר אזורים ההעתק מעתיק שכבות אנכיות של קרבונט וסטרומטוליטים ובהמשך דרומה הוא מעתיק שכבות של חלוקים וברקציה (איור 14.2e) שהוגדרו בתחילה כקונגלומרט פליוקני (קג"ל עין פשחה, מור, 1987). בעבודה זו, ניתחנו את יחסי השדה של יחידה זו ואת החלוקים והברקציה שמרכיבים אותה. נמצא כי סביר יותר שיחידה זו היא יחידה חופית שנוצרה בדומה לרכסי החוף של תצורת הלשון (Bartov et al, 2002) ועברה מספר אירועי העתקה. תוצאות ראשונות של גיל הצמנט של יחידה זו שנמדד לראשונה בעבודה הנוכחית מצביעות על כך שהיחידה הורבדה בתקופת הקרח הלפני אחרונה (Marine Isotopic Stage 6).

14.4.2 תיארוך

בשלב הנוכחי תוארכו שבע דוגמאות של סלעים קרבונטיים תוארכו בשיטת אורניום – תוריום (איורים - 14.3-14.4 וטבלה 14.1). מתוכן, להלן התיאור מצפון לדרום (איור 14.3) שתי דוגמאות אשר נדגמו מסימני החלקה שנצפו בצלקת ההעתק בעין פשחה הניבו טווח גילים הנע בין 7.3 ± 263.2 אלף שנים לבין 4.4 ± 230.2 אלף שנים. אלו מצטרפות לתיארוך קודם באותו מחשוף שערכו 1.42 ± 132 אלף שנים. 1.5 ק"מ דרום-דרום מערבית מאזור זה, נמצא מקטע נוסף של אותה מערכת העתקים (Ein-Feshcha-fault-2). השכבות הקרבונטיות המכסות מישור העתק זה הניבו שני גילים הנעים בין 1.5 ± 82.8 אלף שנים לבין 1.4 ± 66.7 אלף שנים. העתק זה מסיט יחידת קונגלומרט עבה עם חלוקים שהורבדה על ההעתק. תיארוך צמנט קרבונטי בקונגלומרט זהה מאתר מצוקי דרגות הממוקם כ-12 ק"מ דרום-דרום מערב, הניב שני גילים הנעים בין 1.6 ± 146.3 אלף שנים לבין 2.5 ± 141.3 אלף שנים (Matzokey Dragot Conglomerate cement 1-1, 1-2, טבלה 14.1).



איור 14.3: מיקומם של ארבעת ההעתיקים אותם דגמנו (שלושה באזור עין פשחה ואחד במצוקי דרגות) מסומנים בנעצים צהובים. קווים אדומים מסמנים עקבות העתיקים פעילים באזור (Sagy and Rosenshaft, 2022) וקווים כחולים הם עקבות העתיקים חשודים כפעילים.



איור 14.4: שלושה איורים של דוגמאות שדה מאזור ההעתק שתוארכו בעבודה זו. (a) שכבה קרבונטית על משטחי החלקה. (b) כיסוי וליכוד קרבונטי על משקעי רכס חוף מועתק. (c) עורק קרבונטי משוכב מועתק.

Site and elevation	Location	²³⁸ U (ppm) 1σ	²³² Th (ppb) 1σ	²³⁰ Th (ppb) 1σ	(²³⁴ U/ ²³⁸ U) uncorr 1σ	(²³⁰ Th/ ²³⁴ U) uncorr 1σ	(²³⁰ Th/ ²³² Th) 1σ	(²³⁴ U/ ²³⁸ U) corr 1σ	(²³⁰ Th/ ²³⁴ U) corr 1σ	Age corr (years before 2023) 1σ 2σ
Ein-Feshkha Fault-1, carbonate on slicken sides -352m	N-31°42'2.14" E-35°26'55.72"	15.9266 0.019	82.13 0.21	0.314938 0.000845	1.29667 0.00158	0.93166 0.0274	716.28 2.66	1.29853 0.00158	0.931976 0.00275	230298 2248 4406
Ein-Feshkha Fault-1, carbonate on slicken sides -352m	N-31°42'2.14" E-35°26'55.72"	15.9266 0.019	81.60 0.18	0.317323 0.000701	1.29667 0.00158	0.93872 0.0237	726.38 2.30	1.29851 0.00158	0.939072 0.00233	235700 2057 4031
Ein-Feshkha Fault-1 carbonate on slicken sides -376m	N-31°42'2.14" E-35°26'55.72"	5.2121 0.004	84.65 0.32	0.105229 0.000368	1.27447 0.00108	0.96778 0.0348	232.50 1.19	1.27996 0.00109	0.967949 0.00343	263312 3730 7311
Ein-Feshkha-fault-2 in conglomerate -376m	N-31°41'13.8" E-35°26'42.1"	5.0062 0.002	92.83 0.16	0.065685 0.000334	1.44006 0.0014	0.55663 0.028	133.93 0.72	1.45013 0.00143	0.550009 0.002849	82779 783 1534
Ein-Feshkha-fault-2 in conglomerate	N-31°41'13.8" E-35°26'42.1"	5.1736 0.002	108.05 0.21	0.058190 0.000326	1.43259 0.00160	0.47965 0.027	101.73 0.60	1.44377 0.00162	0.470651 0.002686	66701 699 1371
Matzokey Dragot Conglomerate cement-1-1 -354m	N-31°35'1.38" E-35°24'21.33"	6.9746 0.006	44.51 0.09	0.11828 0.00029	1.33911 0.00105	0.77364 0.020	497.07 1.61	1.34175 0.00105	0.772869 0.002009	146267 825 1618
Matzokey Dragot Conglomerate cement-1-1	N-31°35'1.38" E-35°24'21.33"	7.5055 0.004	67.09 0.21	0.124749 0.000481	1.33521 0.0021	0.76048 0.031	347.63 1.71	1.339279 0.00214	0.75884 0.00317	141347 1259 2468

טבלה 14.1: תוצאות ראשונות של תיארוך ההעתקים בשיטת U-Th באזור עין פשחה-מצוקי דרגות. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ מוערך בדטריטוס: 0.85 ± 0.09

14.5 סיכום ומסקנות

בדוח זה הוצגו תוצאות ראשונות של תיארוך העתקים נורמלים השייכים להעתקי השולים של אגן ים המלח באזור עין פשחה. העתקים נורמלים אלכסוניים אלו מעתיקים את חבורת יהודה אל מול סלעים רביעונים במספר אזורי העתקה. הם מופיעים במחשופים בסדרות של משטחי העתק ובלוקים נטויים. מבני ההעתקים כוללים בדרך כלל ליבה שבה מספר משטחי ההעתק תת-מקבילים ובניהם שכבות קרבונטיות וסטרומטוליטים שהורבדו או התגבשו בחללים בתוך ההעתקים או שיצרו צמנט בשכבות של שחק וברקציה. לפי התיארוך הראשוני שהוצג כאן, ההעתקים אמנם צעירים אולם נכון לעכשיו, העדות לפעילות אחרונה היא בתקופה הקרחונית האחרונה ולא נמצאו עדויות לפעילות הולוקנית. ולכן, בשלב זה ההעתקים אינם מוגדרים פעילים עבור ת.י 413 (תכן עמידות מבנים ברעידות אדמה). אולם, תוצאות אלו ראשונות בלבד ובהמשך נחקור ענפים נוספים באזור. כמו כן, בהמשך העבודה יחושבו קצבי ההסטה לפי סמנים סטרטיגרפים שכבר נמצאו באזור. שכבות החלוקים שכונו בעבר קג"ל עין פשחה הינם ככל הנראה מגיל פליסטוקן עליון. לפי יחסי השדה המוצעים כאן, אלו הם שאריות של רכסי חוף מהעידן הקרחוני הלפני האחרון. אלו עברו צמנטציה ולאחר מכן הועתקו על ידי העתק עין פשחה ודרומה, לפחות ליד למצוקי דרגות.

- Bartov, Y., Sagy, A., 2004. Late Pleistocene extension and strike-slip in the Dead Sea Basin. *Geol. Mag.* 141, 565–572.
- Bartov, Y., Stein, M., Enzel, Y., Agnon, A. and Reches, Z.E., 2002. Lake levels and sequence stratigraphy of Lake Lisan, the late Pleistocene precursor of the Dead Sea. *Quaternary Research*, 57(1), pp.9-21.
- Bruner, I., Sagy, Y., 2003. Summary of high-resolution seismic surveys in Ein Feshcha area. *Geophys. Inst. Isr. Ecol. Eng. LTD 15p* (Rep. 323/365/03, +appendices (in Hebrew)).
- Elisha, B., Nuriel, P., Kylander-Clark, A. and Weinberger, R., 2021. Towards in situ U–Pb dating of dolomite. *Geochronology*, 3(1), pp.337-349.
- Gabrieli, T., Hatzor, Y.H. and Sagy, A., 2024. Kinematics and geometry of normal faults at the margins of pull-apart basins: An example from the Dead Sea Basin. *Tectonophysics*, 870, p.230156.
- Gardosh, M., Reches, Z.E. and Garfunkel, Z., 1990. Holocene tectonic deformation along the western margins of the Dead Sea. *Tectonophysics*, 180(1), pp.123-137.
- Garfunkel, Z. (1997), The history and formation of the dead sea basin, in *The Dead Sea: The Lake and Its Setting*, edited by T. Niemi et al., pp. 36–56, Oxford Univ. Press, New York.
- Garfunkel, Z., 1981. Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics. *Tectonophysics* 80, 81–108.
- Garfunkel, Z., 2014. Dead Sea Transform Fault System: Reviews.
- Gilbert, G.K., 1884, A theory of the earthquakes of the Great Basin, with a practical application: *American Journal of Science*, ser. 3, v. 27, p. 49-53.
- Grant, K. M., E. J. Rohling, M. Bar-Matthews, A. Ayalon, M. Medina-Elizalde, C. B. Ramsey, C. Satow and A. P. Roberts (2012). "Rapid coupling between ice volume and polar temperature over the past 150,000 years." *Nature* 491: 744.
- Haase-Schramm, A., Goldstein, S.L. and Stein, M., 2004. U-Th dating of Lake Lisan (late Pleistocene Dead Sea) aragonite and implications for glacial East Mediterranean climate change. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(5), pp.985-1005.
- Hamiel, Y. and Piatibratova, O., 2021. Spatial variations of slip and creep rates along the southern and central Dead Sea Fault and the Carmel–Gilboa Fault System. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126(9), p.e2020JB021585.
- Hamiel, Y., Piatibratova, O., Mizrahi, Y., Nahmias, Y., Sagy, A., 2018. Crustal Deformation across the Jericho Valley Section of the Dead Sea Fault as Resolved by Detailed Field and Geodetic Observations. *Geophys. Res. Lett.* 45, 3043–3050.
- Henderson, G. M., N. C. Slowey and M. Q. Fleisher (2001). "U-Th dating of carbonate platform and slope sediments." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65(16): 2757-2770.

- Masson, F., Hamiel, Y., Agnon, A., Klinger, Y., Deprez, A., 2015. Variable behavior of the Dead Sea Fault along the southern Arava segment from GPS measurements. *Comptes Rendus - Geosci.* 347, 161–169.
- Nuriel, P., J. F. Wotzlaw, M. Ovtcharova, A. Vaks, C. Stremtan, M. Šala, N. M. W. Roberts and A. R. C. Kylander-Clark (2021). "The use of ASH-15 flowstone as a matrix-matched reference material for laser-ablation U-Pb geochronology of calcite." *Geochronology* 3 35–47.
- Nuriel, P., R. Weinberger, A. R. C. Kylander-Clark, B. R. Hacker and J. P. Craddock (2017). "The onset of the Dead Sea transform based on calcite age-strain analyses." *Geology* 45(7): 587-590.
- Nuriel, P., Rosenbaum, G., Zhao, J.X., Feng, Y., Golding, S.D., Villemant, B. and Weinberger, R., 2012. U-Th dating of striated fault planes. *Geology*, 40(7), pp.647-650.
- Nuriel, P., Weinberger, R., Kylander-Clark, A.R.C., Hacker, B.R. and Craddock, J.P., 2017. The onset of the Dead Sea transform based on calcite age-strain analyses. *Geology*, 45(7), pp.587-590.
- Oren, O., Nuriel, P., Kylander-Clark, A.R. and Haviv, I., 2020. Evolution and Propagation of an Active Plate Boundary: U-Pb Ages of Fault-Related Calcite From the Dead Sea Transform. *Tectonics*, 39(8), p.e2019TC005888.
- Oren, O., Nuriel, P., Kylander-Clark, A.R. and Haviv, I., 2020. Evolution and Propagation of an Active Plate Boundary: U-Pb Ages of Fault-Related Calcite From the Dead Sea Transform. *Tectonics*, 39(8), p.e2019TC005888.
- Oren, O., Nuriel, P., Kylander-Clark, A.R.C. and Haviv, I., 2023. Deciphering the Africa-Arabia breakup: Insights from U-Pb dating along the Carmel-Gilboa fault system and its triple junction with the Dead Sea transform. *Earth and Planetary Science Letters*, 611, p.118152.
- Quennell, A.M., 1958. The sturtural and geomorphic evolution of the Dead Sea Rift. *Q. J. Geol. Soc.* 114, 1–24.
- Reid, H.F., The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, Vol.2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C. 1910
- Sagy, A., Rosensaft, M., 2022. Map of active faults and potentially active faults for the Israel Standard 413 "design provisions for earthquakes resistance of structures - Update 2022. *Isr. Geol. Surv., Rep.*
- Sharon, M., Sagy, A., Kurzon, I., Marco, S. and Rosensaft, M., 2020. Assessment of seismic sources and capable faults through hierarchic tectonic criteria: implications for seismic hazard in the Levant. *NHESS*, 20(1), pp.125-148.
- Torfstein, A., Haase-Schramm, A., Waldmann, N., Kolodny, Y., Stein, M., 2009. U-series and oxygen isotope chronology of the mid-Pleistocene Lake Amora (Dead Sea basin). *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 2603–2630.
- Tsukamoto, S., Tagami, T. and Zwingmann, H., 2020. Direct dating of fault movement. In *Understanding Faults* (pp. 257-282). Elsevier.
- Valentini, A., Visini, F. and Pace, B., 2017. Integrating faults and past earthquakes into a probabilistic seismic hazard model for peninsular Italy. *NHESS*, 17(11).
- Wesnousky, S.G., 2008. Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(4), pp.1609-1632.

15. התפתחות בולענים באירוזיית פייפינג ותיארוך העתקה צעירה בדרום ים המלח

לנגפורד, ב.^{1,2}, ווקס, א.¹, פרומקין, ע.², מושקין, ע.¹, פורת, ג.¹, אסיף, ע.²

¹המכון הגיאולוגי

²מכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים

15.1 רקע

פייפינג הוא מושג המתייחס לתהליך של אירוזיה תת קרקעית היוצרת חללים לאורך נתיבי זרימה אלוביאליים (Bernatek-Jakiel and Poesen 2018 ; Jones 2004). התהליך הדומיננטי ביצירת הפייפינג הוא אירוזיה והובלה מכנית של גרגרים לאורך נתיב בעל מוליכות הידראולית מועדפת, אשר לאורכו לבסוף ייווצר צינור (חלל) תת קרקעי. תהליכים קרסטיים, הנפוצים ביצירה של חללים תת קרקעיים, לא מהווים גורם משמעותי בתהליך הפייפינג (Hamawi et al. 2022). ברמה העולמית, כמעט 70 אחוזים מהאזורים המורכבים מחומרים גיאולוגיים סחיפים מושפעים מאירוזיית פייפינג (Bernatek-Jakiel and Poesen 2018). אלו כוללים בעיקר אגני לס, קרקעות עבות, טוף ויחידות חרסיות, אך גם אזורי חולות. בישראל התופעה מוכרת בעיקר בדרום ובמזרח, באזורי אקלים סמי מדבריים ועד אקלים צחיח קיצון. האזור המושפע ביותר על ידי אירוזיית פייפינג הוא אגן ים המלח. משקעים אגמיים רכים של תצורת ליסאן מכסים כמה מאות קמ"ר משטח האגן ומהווים יחידה גיאולוגית חשובה, בה קיימות תשתיות אזוריות ותעשייתיות שונות, בנויים עליה ישובים ומפותחת על גביה חקלאות. ביחידה זו פייפינג מהווה את אחד מגורמי האירוזיה המשמעותיים ביותר, עם הופעה של אלפי בולענים בפני השטח וחללים תת קרקעיים מסדר גודל של אלפי מטרים¹.

הופעה של בולענים מהווה את הקשר העיקרי בין פני השטח וחללי הפייפינג בתת הקרקע. אלו כוללים בולעני קריסה וכן נקודות כניסה ויציאה של נגר עילי אל תת הקרקע ובחזרה אל פני השטח. בשל התפתחותו של הפייפינג בקצבים מהירים יחסית (Bernatek-Jakiel and Poesen 2018; Goren et al, 2023) נוכחותו קשורה בתהליכים גיאולוגיים צעירים, דוגמת העתקה פעילה או ירידת מפלס של גופי מים בבסיס ניקוז נחלי (למשל התייבשות ים המלח או התרוממות טקטונית בשוליו). הפרש הגובה הנוצר בתהליכים אלו, יוצר גרדיאנט הידראולי המעודד ניקוז אנרגטי. בנוסף, העתקה וסידוק מהווים את הגורמים העיקריים ליצירה של נתיבים בעלי מוליכות הידראולית, אשר לאורכם מתפתח הפייפינג.

בנוגע להעתקים פעילים, תיארוך מפלסי זרימה במחילות פייפינג הנוצרות אל מול העתק מאפשר לבנות את הכרונולוגיה של הפעילות על ההעתק. זאת מכיוון שבעקבות פעילות על ההעתק בסיס הניקוז עשוי לרדת ומחילות הפייפינג מתחתרות אל המפלס החדש (איור 15.1). ההנחה היא, שבשל התשתית הסלעית הרכה ערוצים עיליים ומחילות פייפינג מגיעים מהר לפרופיל של שיווי משקל עם בסיס הניקוז בחלקם התחתון. לכן טרסות גבוהות קדומות מייצגות שלבים קדומים בהתפתחות המתלול של העתק אמציהו שמהווה בסיס ניקוז. שיטה

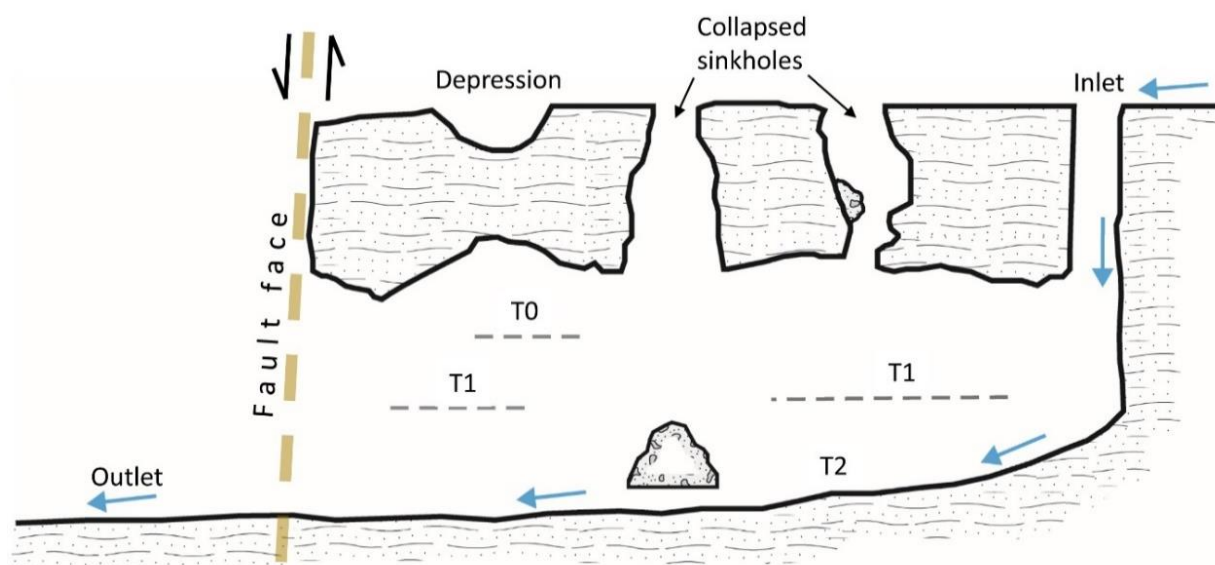
¹ התייחסות לפייפינג באגן ים המלח מופיע בעבודות שונות, בהן: אבני וחובריו 2003; מוצן וחובריו 2010; גייער וחובריו 2021;

Hamawi et al. 2022; Frumkin et al. 2021; Frumkin 2009; Arkin and Gilat 2000.

זו שימשה לתיארוך שינוי בסיס הניקוז במוצא מחילות המלח של הר סדום (Frumkin 2009) וכן לתיארוך מפלסים במחילת פייפינג בשפך נחל קדרון (Langford 2021).

15.2 מטרות המחקר

המחקר הנוכחי מתמקד באזור דרום ים המלח (איורים 15.2 – 15.3) כשטח מחקר ללימוד תופעת הפייפינג ויחסי הגומלין בין פייפינג, טקטוניקה צעירה ועיצוב הנוף. מטרת המחקר היא ללמוד את הדינמיקה של התפתחות אירוויית הפייפינג מבחינת: התנאים הפיסיים הנדרשים להתפתחותה, השלבים השונים בהתפתחות החללים והבולענים, וכן בחינת קצבי הבליה. מטרה נוספת היא בחינת הקשר בין התפתחות הפייפינג ואירועים גיאולוגיים צעירים, כמו העתקה צעירה בשולי האגן מאז ירידת מפלסו של אגם הליסאן. הקשר להעתקה צעירה נבחן לאורך העתק אמציהו שבדרום ים המלח, שם מוכרת אירוויית פייפינג מפותחת, כולל מערכות של מחילות ובתרונות פייפינג עם אלפי בולענים.



איור 15.1: דוגמא קונספטואלית לפרופיל לאורך מחילה שהתחתרה במספר שלבים כתגובה לשקיעה טקטונית של בסיס הניקוז. T2 מסמן את מפלס ההתחתרות הנוכחי, בעוד ש-T0, T1 מיצגים טרסות סדימנטריות שהושקעו בתקופות קדומות. שינוי מפלס בבסיס הניקוז ונטישת מפלס הטרסות נוצר עקב פעילות טקטונית על ההעתק שבמוצא המערה (קו חום מרוסק).

15.3 שיטות מחקר

המחקר כולל שיטות שדה באיתור ותיעוד המערות, תיארוך חומר אורגני בשיטת ^{14}C וכן תיארוך חומר אלוביאלי בשיטת OSL.

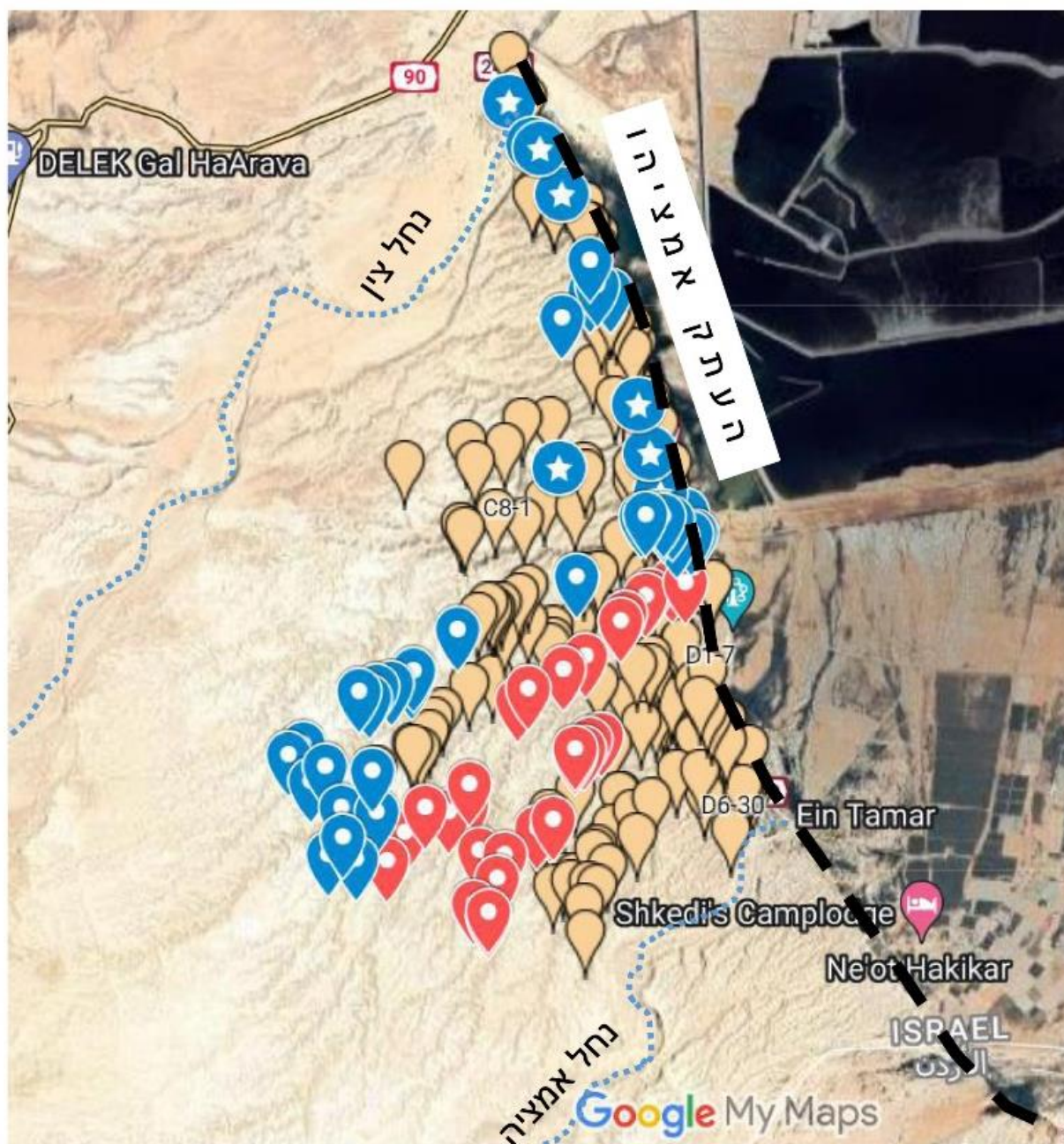
15.3.1 עבודת שדה

איתור חללי פייפינג נעשה בתצפיות בשטח וכן בעזרת ניתוח תצלומי אוויר מרחפן ומודל גבהים שהופק ב-LIDAR אווירי, רזולוציה של 0.5 מ' לפיקסל. תצפיות בשטח נעשו במהלך כ-80 ימי שדה בהובלת בועז לנגפורד ובהשתתפות מערנים ישראלים וכן ממספר מועדוני מערות באירופה². איתור המערות בשטח נעשה בהליכה רגלית לאורך קניונים הנשפכים אל העתק אמציה, תוך תיעוד של פתחים המנקזים מחילות תת קרקעיות. בולענים ופתחים מעל הקניונים אותרו גם כן בהליכה רגלית או בניתוח תצלומי אוויר מרחפן (Mavic1).

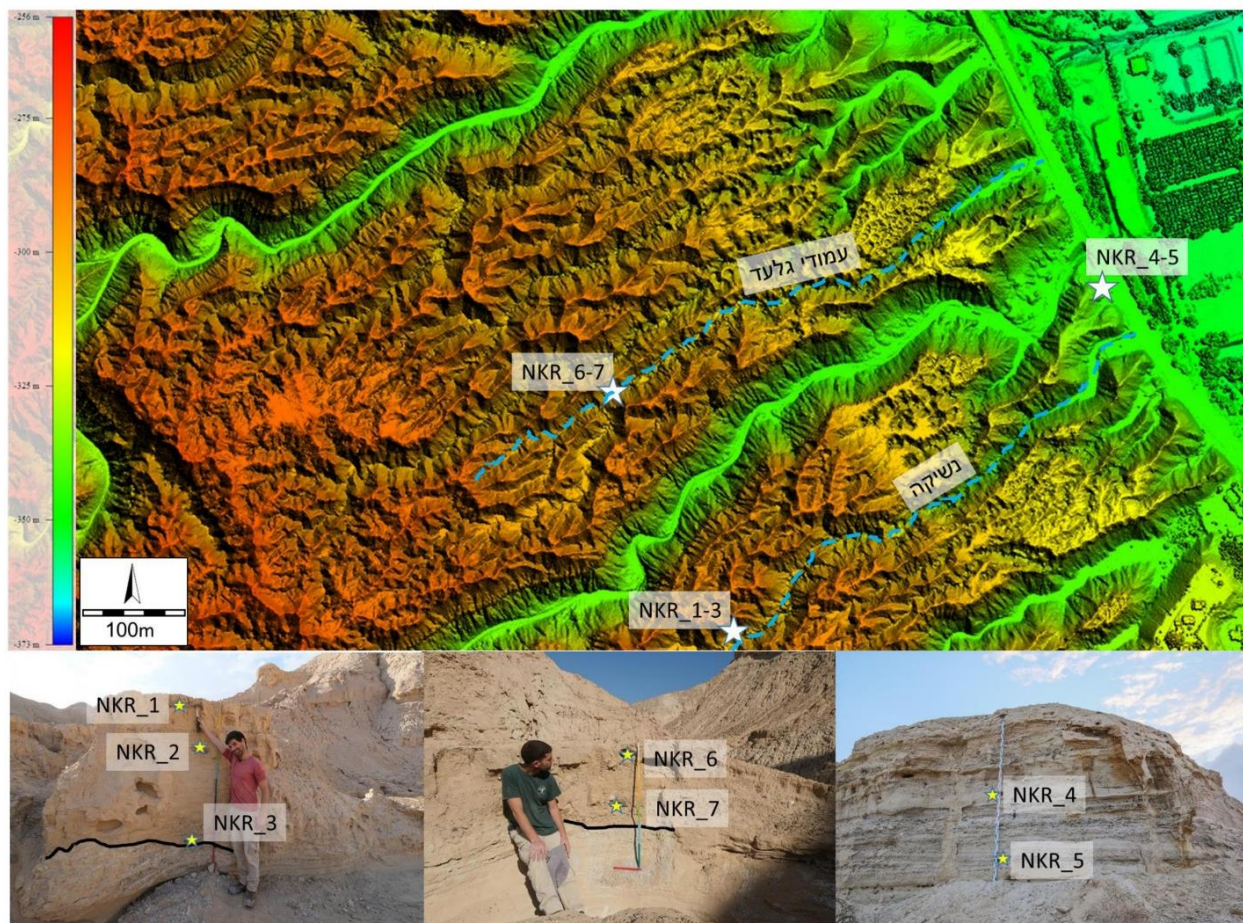


איור 15.2: תצלום לוויין של אזור העבודה בו בוצעה עבודת השדה לאיתור חללים בתצורת ליסאן. קו שחור מרוסק מסמן את העתק אמציה. כוכבים כחולים מסמנים נקודות דיגום חומר מתאריך. בהקטנה מימין: מיקום האזור במבט מרחבי. רקע מתוך: Google Earth.

² השותפים העיקריים הם אנשי מועדון Titan בפראג (צ'כיה) וכן ממועדון המערנים האיטלקי Tetide APS. לפירוט אודות העבודה המשותפת ראו: <https://www.tetide.org/2022/10/07/dead-sea-piping-caves-project>



איור 15.3: אתרי סקר השטח על גבי תצלום לוויין מתוך Google Earth. ניתן להתרשם מצפיפות האתרים באזור הסמוך להעתק אמציה (מסומן בקו שחור מרוסק).



איור 15.4: מודל גבהים של אזור הדיגום מנתוני לידר אווירי, רזולוציה 0.5 מ' לפיקסל. כוכבים לבנים מציינים את מיקום האתרים בהם נדגם סדימנט לתיארוך בשיטת OSL. הערוצים שבהם נמצאות נקודות הדיגום מסומנים בקו כחול מרוסק (למעלה). מחשופים של נקודת הדיגום. כוכבים צהובים מסמנים את מיקום הדוגמאות במחשוף. פרטי הדוגמאות מופיעים בטבלה 15.2 (למטה).

מיפוי מערות וחללים תת קרקעיים בוצע בשיטה המקובלת למיפוי מערות (Dasher, 2011), לרוב בשיטת מיפוי ללא נייר (Paperless cave mapping; Heeb 2014).

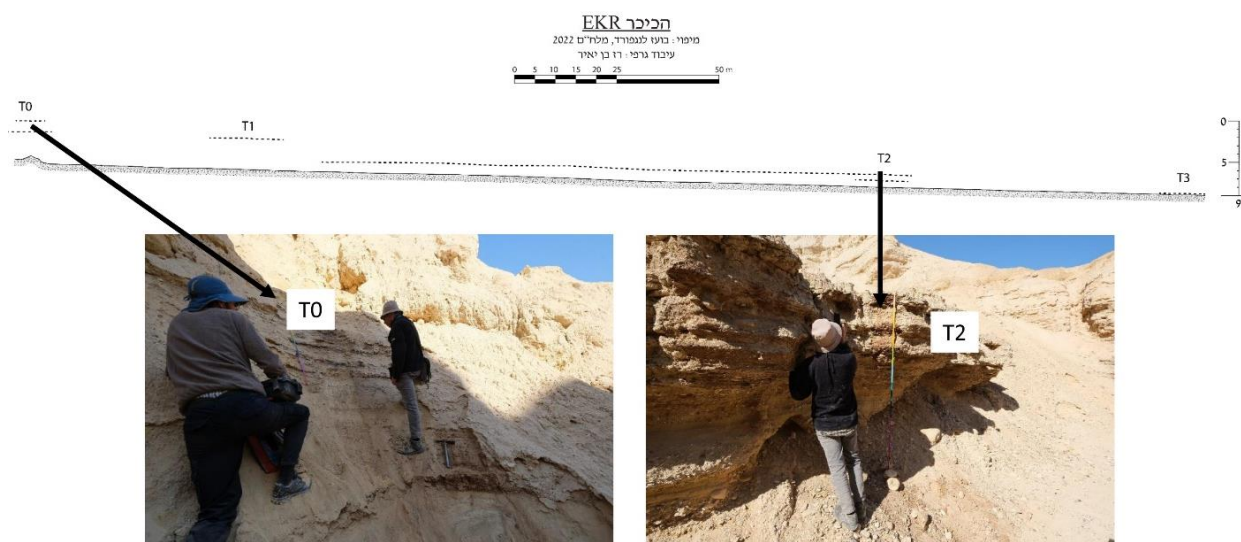
איסוף דוגמאות לתיארוך OSL בוצע בשעות האור, אך בסביבה חשוכה מתחת לכיסוי בד. הדיגום נעשה בעזרת כף מתכת, כאשר כל דוגמא נשמרה בשתי שקיות: חלקה בשקית שקופה וחלקה בשקית שחורה. השקיות השחורות נסגרו בחושך, מתחת לכיסוי הבד. דוגמאות סדימנט נאספו מטרסות נחליות מעל לבולעני חידור בעלי רום זהה ובשני ערוצים נפרדים (איור 15.2; איור 15.4, דוגמאות 1-3, 6-7). בנוסף נאספו דוגמאות לתיארוך OSL מסלע הסביבה שמתחת לתצורת ליסאן (איור 15.2; איור 15.4, דוגמאות 4-5), במטרה לקבוע את גיל הסלע ולקשרו להיסטוריית הגיאולוגית המרחבית.

איסוף דוגמאות לתיארוך ^{14}C בוצע לצד ניתוח סטרטיגרפי ולאחר חשיפה של נקודת הדיגום במטרה לאסוף חומר In-Situ. חומר אורגני נאסף ללא מגע יד, על ידי צבט מתכת ואריזה בנייר כסף. דוגמאות חומר אורגני נאספו משתי טרסות שנמצאות בבסיס העתק אמציהו, מעל למלחת סדום (איור 15.2; איור 15.5).

15.3.2 מעבדה

פתחי המערות שאותרו בשדה רוכזו בשכבת סקר ב Google maps (איור 15.3). תוצרי מיפוי המערות עובדו בתוכנת Adobe Illustrator ושימשו לבניית מודל תלת ממדי בסביבת Therion (איורים 15.6, 15.7 ו-15.8).

תיארוך OSL בוצע במעבדת הלומינסציה במכון הגיאולוגי ותיארוך ^{14}C במעבדות AWI, גרמניה.



איור 15.5: פרופיל אנכי של ערוץ עין הככר ומיקומי טרסות נטושות ביחס לאפיק. למיקום הערוץ ראו באיור 15.2 (למעלה). צילומי טרסות T0 ו-T2. מטרסות אלו נאספו דוגמאות חומר אורגני לתיארוך ^{14}C . פירוט הדיגום ותאריכים ראשונים שהתקבלו מהאתר מופיעים בטבלאות 15.3 ו-15.4 (למטה).

15.4 תוצאות

עד כה התגלו 57 מערות באורך של יותר מ-30 מ' ועוד עשרות קצרות יותר (טבלה 15.1; איור 15.3). מתוך המערות שהתגלו מופו 20 מערות באורך כולל של 8.5~ ק"מ. המערות בנויות כערוצים תת קרקעיים ובעלות מבנה דנדריטי מפותח באורך של עשרות ועד מאות מטרים. תחילת המערכת התת קרקעית בחדירת ערוצים עיליים אל תת הקרקע, לרוב בבולען אנכי. קצה המערכת במוצא אל פני השטח בבסיס אגן הניקוז או בסמוך אליו. נקודת המוצא נראית לרוב כפתח אופקי הפעור בגדות מצוקיות של ערוצים עמוקים הנשפכים אל מלחת סדום, תוך שהם חתורים במדרגה הטופוגרפית שיוצר העתק אמציהו (איורים 15.6, 15.7 ו-15.8).

בנוסף לבולעני החידור שבראשי המערות, לאורך העמקים שבפני השטח ומעל לערוצים התת קרקעיים, מופיעים בולעני קריסה רבים. בתת הקרקע הם נראים כארובות דרכם חודר אור וסדימנט אל המערה ובפני השטח הם בעלי צורות מגוונות של: שקעים דמויי משפך עם פתח אנכי בקרקעיתם, ארובות אנכיות, או מכתשי קריסה

דמויי דולינת התמוטטות. בולענים אחרים, אשר מופיעים מחוץ לעמקי הערוצים הראשיים, קשורים ביובלים הנשפכים בתת הקרקע אל הערוצים הראשיים.

תופעות הפייפנג בולטות יותר בסמוך למדרגה הטופוגרפית של העתק אמציהו, שם ישנה צפיפות גבוהה של בולענים רבים ושם גם מרוכזות המערות המפותחות ביותר (איור 15.3; איורים 15.6 ו-15.7). עם התרחקות דרומה מההעתק הולכת ויורדת צפיפות התופעות הקשורות באירוזיית פייפנג, יחד עם השפעה עולה של תהליכי פני שטח מוכרים יותר. השפעה של אירוזיית פייפנג באזורים רחוקים מההעתק היא באופן מובהק נמוכה יותר, עם יצירה של בולענים רדודים ומערכות זרימה תת קרקעיות מקבילות לפני השטח וללא חדירה לעומק רב.

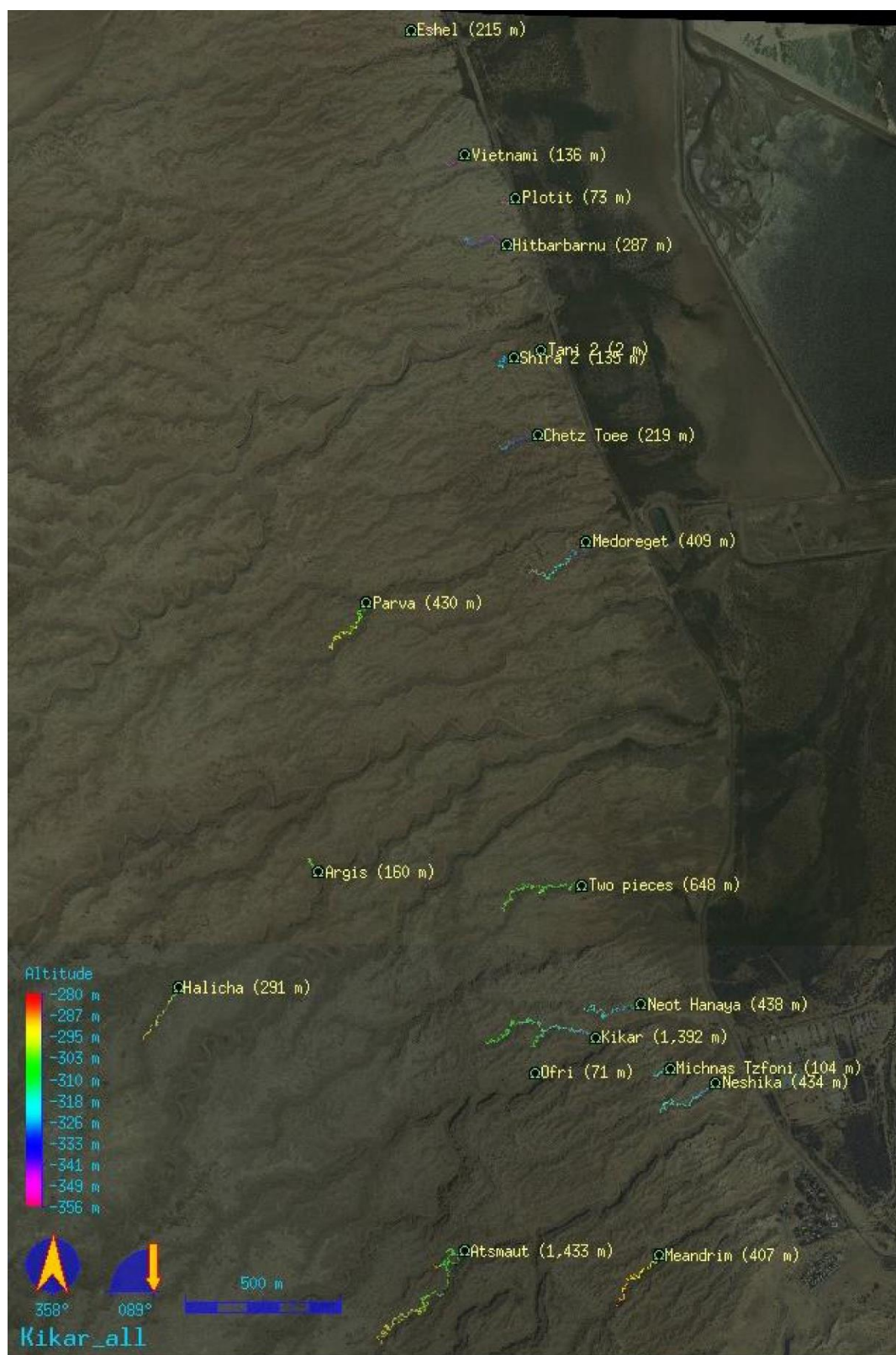
תוצאות ראשוניות של גילי OSL (טבלה 15.2) מלמדות כי הטרסות שמעל לבולעני החדירה הורבדו בפרק הזמן שמנסיגת אגם הליסאן, לפני כ-15 אלף שנה ועד לשלהי ההולוקן, לפני 4.3 אלף שנה. הסדימנטים האגמיים החשופים מתחת לתצורת ליסאן תוארכו ל-96 עד 75 אלף שנה והם משתייכים לתצורת סמרה (Waldmann et al. 2009). גיל הטרסות מעיד על כך שמתלול העתק אמציהו נוצר בפרק הזמן שבין 15 ל-4.3 אלף שנה, מה שאיפשר את החדירה האנכית והתפתחות המערות.

במטרה לאתר מפלסים נטושים המכילים חומר מתארך נעשה סקר מפורט באזור פתחי ערוצים הנשפכים אל מלחת סדום וחוצים את העתק אמציהו. אתר מפתח (שקיבל את הכינוי 'אתר הטרסות'; איור 15.5) מכיל מספר טרסות עשירות בחומר אורגני בהם נעשה דיגום מפורט. תיארוך ראשוני, הכולל את גג ובסיס הטרסות, מלמד שהן נוצרו החל מלפני 3.5 אלף שנה וננטשו לפני כ-500 שנה (טבלאות 15.3-15.4). על מנת לבנות כרונולוגיה מפורטת יותר, נשלחו דוגמאות נוספות לתיארוך מלא ומפורט של האתר. פירוט הדוגמאות והתאריכים שכבר התקבלו מופיע בטבלאות 15.3-15.4.

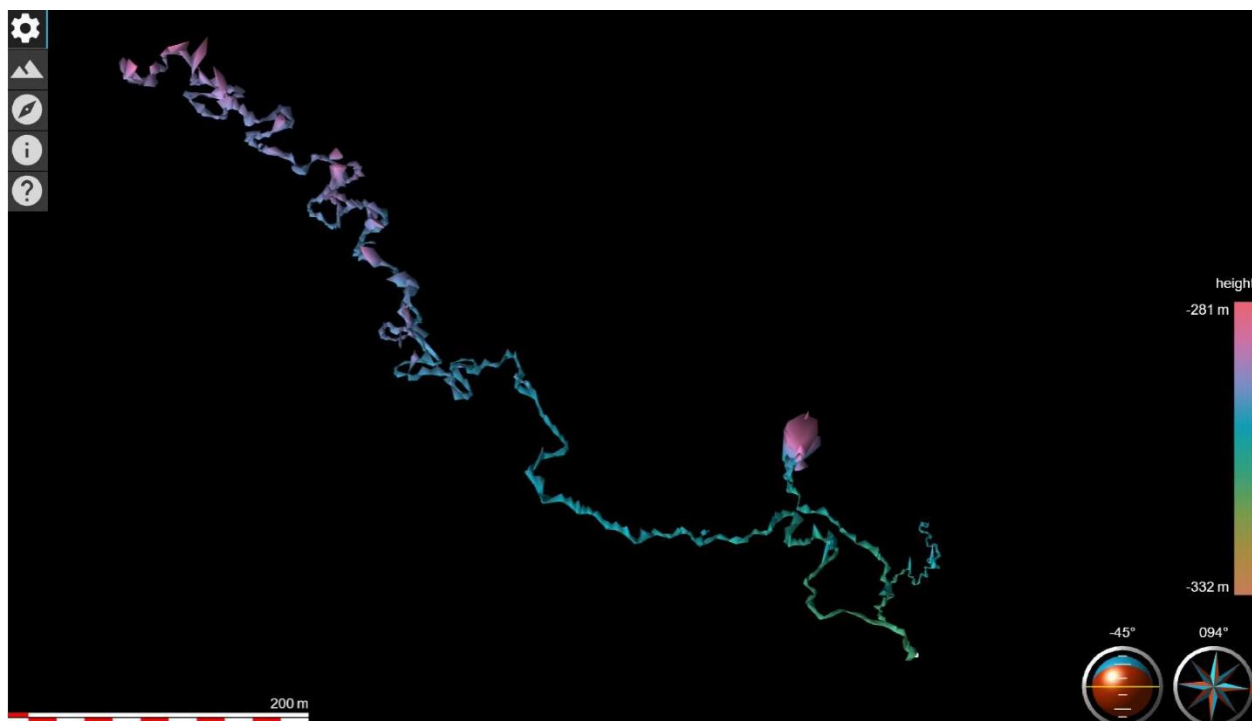
חומר אורגני למטרות תיארוך נאסף גם במפלסים נטושים בתוך חללי המערות (איורים 15.6, 15.7 ו-15.8) וכן במפלסים נטושים גבוהים מעל לבולעני החידור (הבולענים העליונים) של ערוצי הזרימה. לנטישת המפלסים קשר להתרוממות בלוק בתרונות הככר וצניחת מלחת סדום משני צידי העתק אמציהו. חומר זה מתוארך ב-AWI בימים אלו.

15.5 סיכום

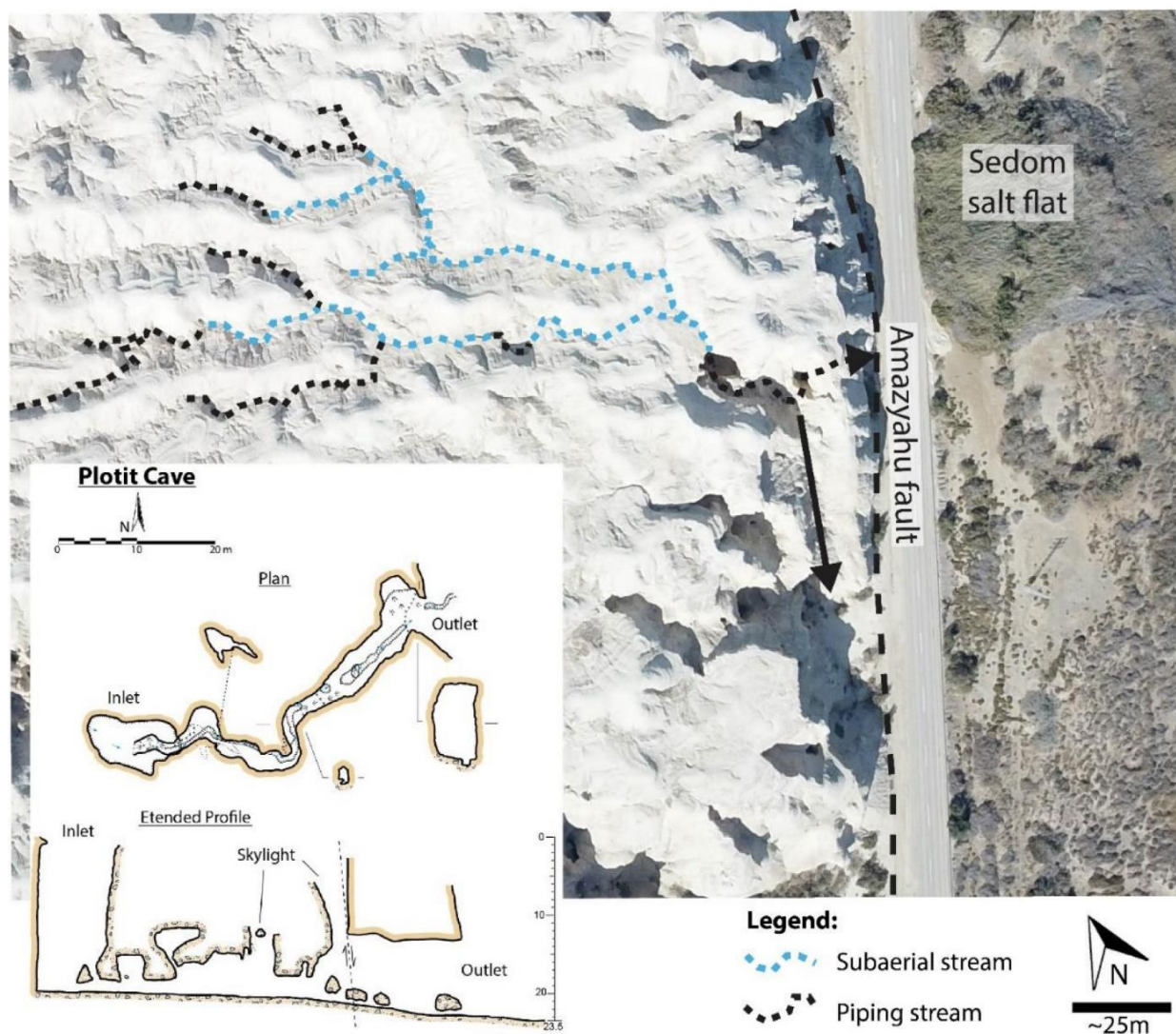
פרק זה של העבודה כולל עבודת שדה מקיפה, וכן תיארוך ראשוני, המהווה את התשתית להמשך המחקר באזור. מיפוי המערות שהתגלו בחלק הראשון של העבודה נמצא כעת בעיצומו, עם מיפוי של מחילות מסועפות וקשירתן לבולענים בפני השטח. איסוף דוגמאות לתיארוך הצטברות ונטישה של טרסות נחליות בפני השטח או בתת הקרקע מאפשר ללמוד את קצב התהליך וכן את שלבי הפעילות הטקטונית הצעירה על העתק אמציהו. התאריכים שהתקבלו עד כה מלמדים על התרוממות העתק אמציהו במהלך ההולוקן, דבר שיצר תנאים מתאימים להתפתחות אירוזיית פייפנג, אשר ממשיכה לפעול גם כיום תוך יצירה של אלפי בולענים בפני השטח. תיארוך ^{14}C באתר הטרסות מלמד על תקופה של שקט טקטוני במהלך הצטברות טרסות T0 ו-T2, דהינו לפני 3800 שנה ו-720 - 600 שנה (בהתאמה). בין שתי תקופות אלו הצטברה טרסה נוספת (T1) אשר טרם תוארכה ואשר גם היא מייצגת תקופה של שקט טקטוני ללא פעילות משמעותית של ההעתק.



איור 15.6: מקבץ המערות שמופו עד כה במסגרת העבודה, על גבי תצלום אוויר של אזור המחקר. אורכי המערות יכולים להיות שונים מהמופיע בטבלה 15.1 בשל חישוב אורך שונה בהפקת מודל Therion.



איור 15.7: מודל תלת ממדי שהופק בתוכנת Therion בו מוצגת מערת נחל עצמאות (D7-7). המערה מהווה דוגמא מייצגת למערות באזור העבודה. ניתן להתרשם ממבנה המערה כערוץ תת קרקעי מפותל, בעל מבנה דנדריטי (למטה).



איור 15.8: צילום פני שטח (פאנל גדול) ומיפוי תת הקרקע (פאנל קטן) של מערת פלוטית. בדומה למערות באזור העבודה, היא מורכבת ממחילת זרימה הנשפכת אל מלחת סדום בבסיס העתק אמציהו. בולענים בפני השטח קשורים בחידור נגר אל תת הקרקע ובקריסה בתקרת המחילה התת קרקעית. הבולענים בולטים בהיטל האנכי שבתחתית הפאנל הקטן.

טבלה 15.1: פרטי המערות הבולטות שנתגלו בעבודה

שם אתר	אורך במטרים	נ.צ (WGS84)
A6-4	עשרות מטרים	30.98224, 35.3507
A6-10	200	30.98, 35.3521
C2-1	69	30.9728, 35.3562
C2-10	282	30.97144, 35.35593
C2-11	~200	30.97295, 35.35343
C2-12	113	30.975518, 35.354264
C2-17	169	30.974000, 35.354100
C2-15	136	30.977574, 35.352612
C2-4	200	30.97355, 35.35463
C6-1	עשרות מטרים	30.962930, 35.357344
C6-2	408	30.96251, 35.35886
C6-5	40 מטר	30.960393, 35.358934
C6-8	עשרות מטרים	30.960464, 35.356654
C6-11	219	30.96568, 35.35666
C7-3	עשרות מטרים	30.96006, 35.34749
C7-4	458	30.96081, 35.3514
C7-8	135	30.96804, 35.3562
C7-12	עשרות מטרים	30.96817, 35.35447
D1-1	742	30.95262, 35.35876
D1-7	מאות מטרים	30.9551972, 35.3616551
D1-8	712	30.955948, 35.3623098
D1-15	אין מידע	30.959484, 35.3568431
D1-19	150	30.959169, 35.359359
D2-3	160	30.9530, 35.3499
D2-11	מאות מטרים	30.95853, 35.35504
D3-1	100	30.952855, 35.345949
D3-5	50	30.95450, 35.34468
D3-8	עשרות מטרים	30.95967, 35.34264
D3-9	עשרות מטרים	30.95985, 35.34243
D3-10	עשרות מטרים	30.95957, 35.34276
שם אתר	אורך במטרים	נ.צ (WGS84)
D6-1.2	עשרות מטרים	30.948108, 35.361303

30.947700, 35.359270	עשרות מטרים	D6-3
30.947483, 35.358314	עשרות מטרים	D6-5
30.94691, 35.35772	71	D6-6
30.9492, 35.3607	437	D6-9
30.94994, 35.36168	100	D6-10
30.944452, 35.363427 פתח תחתון	מאות מטרים	D6-16
30.942469, 35.363851	אין מידע	D6-21
30.941881, 35.361494	407	D6-25
30.946764, 35.363246	430	D6-26-27
30.943241, 35.361151	אין מידע	D6-29
30.94689, 35.36212	576	D6-31
30.94726, 35.36167	104	D6-32
30.94921, 35.35338	מאות מטרים	D7-6
30.9483, 35.3591	1392	D7-1
30.9422, 35.3551	1433.5	D7-7
30.950421, 35.350621	100	D7-8
30.944835, 35.351422	93	D7-15
30.9498, 35.3454	291	D8-10
30.948838, 35.334603	100	D9-2
30.93937, 35.36358	אין מידע	E2-4
30.9406, 35.3494	עשרות מטרים	E3-1
30.940207, 35.349513	עשרות מטרים	E3-18
30.941273, 35.343011	150	E4-1
30.940867, 35.341618	מאות מטרים	E4-2
30.934806, 35.343516	100	E4-9
30.904, 35.3402	עשרות מטרים	I2-1

טבלה 15.2: גיל OSL ונתוני הדוגמאות שנאספו בשטח המחקר³.

Lab code	Location	Burial depth (m)	Dose rate (Gy/ka)	O-D (%)	N	De (Gy)	Age (ka)
NKR-1	Fluvial Terrace 1	0.15	1.06±0.03	85	38/41	11.4±1.7	11±2
NKR-2	Fluvial Terrace 1	1.2	1.47±0.05	73	16/18	7.2±0.8	4.9±0.6
NKR-3	Fluvial Terrace 1	1.7	1.01±0.04	67	18/18	13.4±2.1	13±2
NKR-4	Amatzia fault wall	1.6	0.93±0.03	26	18/18	85±5	92±6
NKR-5	Amatzia fault wall	2.7	1.11±0.04	26	16/18	88±3	79±4
NKR-6	Fluvial Terrace 2	0.15	0.97±0.03	88	38/43	86.2±0.7	5.8±0.7
NKR-7	Fluvial Terrace 2	0.6	1.15±0.04	74	18/19	9.4±1.2	8.2±1.1

טבלה 15.3: תיאור הסטרטיגרפיה של טרסה EKR1 וגילי ¹⁴C של גג ובסיס הטרסה.

סוג החומר	שגיאה [Y]	Calibrated age [Y.BP]	גיל מעבדה [Y.BP]	הערות	גובה מתחת לגג [cm]	תיאור	שם היחידה
ענפים וגלל יעלים	26	3849	3503		0-9	חום בהיר, עשיר מאוד בחומר אורגני. גללים.	EKR-I-01
	28	3805-3900	3535				
פחם			X		9-13	אפורה, הרבה גרגירי פחם	EKR-I-02
זרדים ומעט פחם בתוך סדימנט חולי					13-27	שינוי גוון בתוכה, אפור-כתום, עם גללים	EKR-I-03
ענף סוף			X		27-37	אופק חום בהיר עשיר מאד בענפים וחלקים	EKR-I-04
				דיגום בוצע מהחלק העליון	37-45	חילופי צבע לבן עד שחור אפור, עשיר בפחמים	EKR-I-05
ענפים			X		45-60	אופק חום	EKR-I-06
					60-68	בהיר, מעט חומר אורגני	EKR-I-07
ענף וגללי צאן בתוך סדימנט מפוחם			X	נדגם מהבסיס הכהה והמפוחם	68-77	בבסיסו שחור, עולה לאפור ולבן	EKR-I-08
				לא נדגם, ללא חומר אורגני	77-112	אפור בהיר, קשה, לבנבן-צהבהב, אין חומר אורגני	EKR-I-09
ענף זעיר וגללי צאן			X	נדגם בראש היחידה ובמרכז, כולל גלל	112-126	כהה, שחור עד לבן אפור. יש קטעים שרופים ויש פחות	EKR-I-10a

Grain size for all samples was 75-125 µm; moisture contents estimated at 10±3 %; averages and errors were ³ calculated using the Central Age Model.

O-D – overdispersion, the scatter within the sample.

N – the number of aliquots used for calculations out of those measured

שם היחידה	תיאור	גובה מתחת לגג [cm]	הערות	גיל מעבדה [Y.BP]	Calibrated age [Y.BP]	שגיאה [Y]	סוג החומר
EKR-I-10b	בסיס יחידה 10	126					
EKR-I-11	אפור, קשה	126-139	נדגם ב-121 ס"מ	X			זרדים
EKR-I-12	כהה, פחות מלוכדת, פרגמנטים גסים, גללים, ענפים	139-144	נדגם ב-144 ס"מ, חשוד שעבר גלגול				לא נשלח לתיארוך בשלב זה בשל החשש שמדובר על דיגום של חומר מגולגל
EKR-I-13	צהבהבה, חצצים דקיקים, אין חומר אורגני	144-150	לא נדגם, ללא חומר אורגני				
EKR-I-14	חומה, עשירה בחומר אורגני	150-163	נדגם ב-163 ס"מ	X			ענפים זעירים מתוך גללי צאן מפורקים
EKR-I-15	לבנה, ללא חומר אורגני	163-239	ללא חומר אורגני				
EKR-I-16a	ראש יחידה עם גללים בהופעה המצטמצמת כלפי מטה	239-360		X			גללי צאן מעורבים בסדימנט
EKR-I-16b	גללים מפורקים?	272	33 ס"מ מגג היחידה	X			גללי צאן
EKR-I-16c	גללים	302	63 ס"מ מגג היחידה	X			גללי צאן
EKR-I-16d		326	87 ס"מ מגג היחידה		3514	23	ענף
EKR-I-16e		358	2 ס"מ מבסיס היחידה				גללים

טבלה 15.4: תיאור הסטרטיגרפיה של טרסה EKR2 וגילי ^{14}C של גג, מרכז ובסיס הטרסה.

שם היחידה	תיאור	גובה מתחת לגג [cm]	הערות	גיל מעבדה [Y.BP]	Calibrated age [Y.BP]	שגיאה [Y]	סוג החומר
EKR-II-01a	אופק 1 - אורגני, כהה	0-3	פני השטח, מיד מתחת לגג הטרסה	566	567-646	36	גללים
				624	653	25	
EKR-II-01b		3-13	ענף עץ מבסיס היחידה 13 ס"מ	X			ענף עץ אשל
EKR-II-02	פחות אורגני, יותר עשיר בחלוקים	13-32	דגימה מ-24 ס"מ	X			ענפים
EKR-II-03	כהה, עשיר בחומר אורגני, נוכחות זרדים קטנטנים	32-46	דגימה מ-34 ס"מ	X			ענפים

ענפים			X		46-48	ענפים דקים בסדימנט בז'	EKR-II-04a
ענפים			X				EKR-II-04b
גללי יעלים/שפנים מעורבים בסדימנט	26	597-669	656	דגימה מ-51 ס"מ	48-53.5	אופק חום	EKR-II-05
	אין חומר אורגני				53.5-56	אופק בהיר ללא חומר אורגני	EKR-II-06
				דגימה מ-62 ס"מ	56-65	חום כהה	EKR-II-07
	אין חומר אורגני				65-68	בהיר, אין חומר אורגני	EKR-II-08
גללי צאן			X	דגימה מגובה 72 ס"מ	68-97	כהה, נעשה בהיר כלפי מטה	EKR-II-09a
גללי צאן	22	723	751	דגימה מגובה 97 ס"מ			EKR-II-09b
	אין חומר אורגני				97-105	בהיר, אין חומר אורגני	EKR-II-10
גללי יעלים/שפנים מעורבים בסדימנט	נשלח לתיארוך אך לא מכיל מספיק חומר אורגני				105-112	עד בסיס החתך מורכב מקג"ל כהה. מתחת ל- 112 ס"מ הופך לחול דק משוכב דק עד למינרי עם חול עבה לסירוגין	EKR-II-11

15.6 מקורות

גיינר, א., גסטר, ע., בן-יאיר, ר., סובוליב, י., כהן, א., זכאי, ר., בוסלוב, ו., לנגפורד, ב., 2021. חווארי קידרון : מערכת מערות סחיפה בשפך נחל קידרון. נקרות צורים, גליון 21. עמ' 76-97.

אבני, י., זילברמן, ע., שירב, מ., 2003. תגובת המערכות הגיאומורפיות לאורך חופו המערבי של ים המלח לירידת המפלס וההשלכות על מערכות התשתית סקר ראשוני באתרי מבחן. דוח GSI/09/03, המכון הגיאולוגי, משרד התשתיות הלאומיות.

מוצן, צ., ארקין, י., אבני, י., 2010. קריסה וסחיפה תת קרקעית בקרבת העתק השוליים המערבי של אגן ים המלח ובצמוד לחוף ים המלח. דוח GSI/12/2010, המכון הגיאולוגי, משרד התשתיות הלאומיות.

Arkin, Y. and Gilat, A., 2000. Dead Sea sinkholes—an ever-developing hazard. *Environmental Geology*, 39(7), pp.711-722.

Bernatek-Jakiel, A. & Poesen, J. (2018) Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Science Reviews*.

Dasher, G.R., 2011. On station: a complete handbook for surveying and mapping caves. National Speleological Society: Huntsville, Alabama.

Frumkin, A., 2009. Formation and dating of a salt pillar in Mount Sedom diapir, Israel. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1-2), pp.286-293.

Frumkin, A., Pe'eri, S. and Zak, I., 2021. Development of banded terrain in an active salt diapir: potential analog to Mars. *Geomorphology*, p.107824.

Goren, L., Langford, B., Hamawi, M., Levi, T., Mushkin, A., Frumkin, A., Vaks, A., 2023. Caves, sinkholes, and canyons: landscape evolution in response to piping erosion in the Dead Sea Basin. In: Israel Geological Ein Gedi 2023, Field Trips Guide Society,

Hamawi, M., Goren, L., Mushkin, A. and Levi, T. 2022. Rectangular drainage pattern evolution controlled by pipe cave collapse along clastic dikes, the Dead Sea Basin, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(4), pp.936-954.

Heeb, B., 2014. The next generation of the DistoX cave surveying instrument. *CREG Journal* 88. pp. 5-8.

Jones, J.A.A., 2004. Pipe and piping. In: Goudie, A.S. (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, London, pp. 784–788.

Langford, B., Gayer, A., Frumkin, A., Cohen, Ch., Mushkin, A., 2021. Piping and landscape evolution of the Kidron marls, Dead Sea basin, Israel. In: Israel Geological Society, Yeruham 2021, Abstract Book.

Waldmann, N., Stein, M., Ariztegui, D. and Starinsky, A., 2009. Stratigraphy, depositional environments and level reconstruction of the last interglacial Lake Samra in the Dead Sea basin. *Quaternary Research*, 72(1), pp.1-15.

16. תהליך ריסוק סלעים על ידי מלחים בשטחים שנחשפו כתוצאה מירידת מפלס ים המלח

מושקין, ע.¹, אמית, ר.¹, בורודה, ר.¹, לנסקי, נ.^{1,2}, איל, ת.^{1,2}, בלמס, א.¹, מליק, א.¹

¹ המכון הגיאולוגי

² המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים

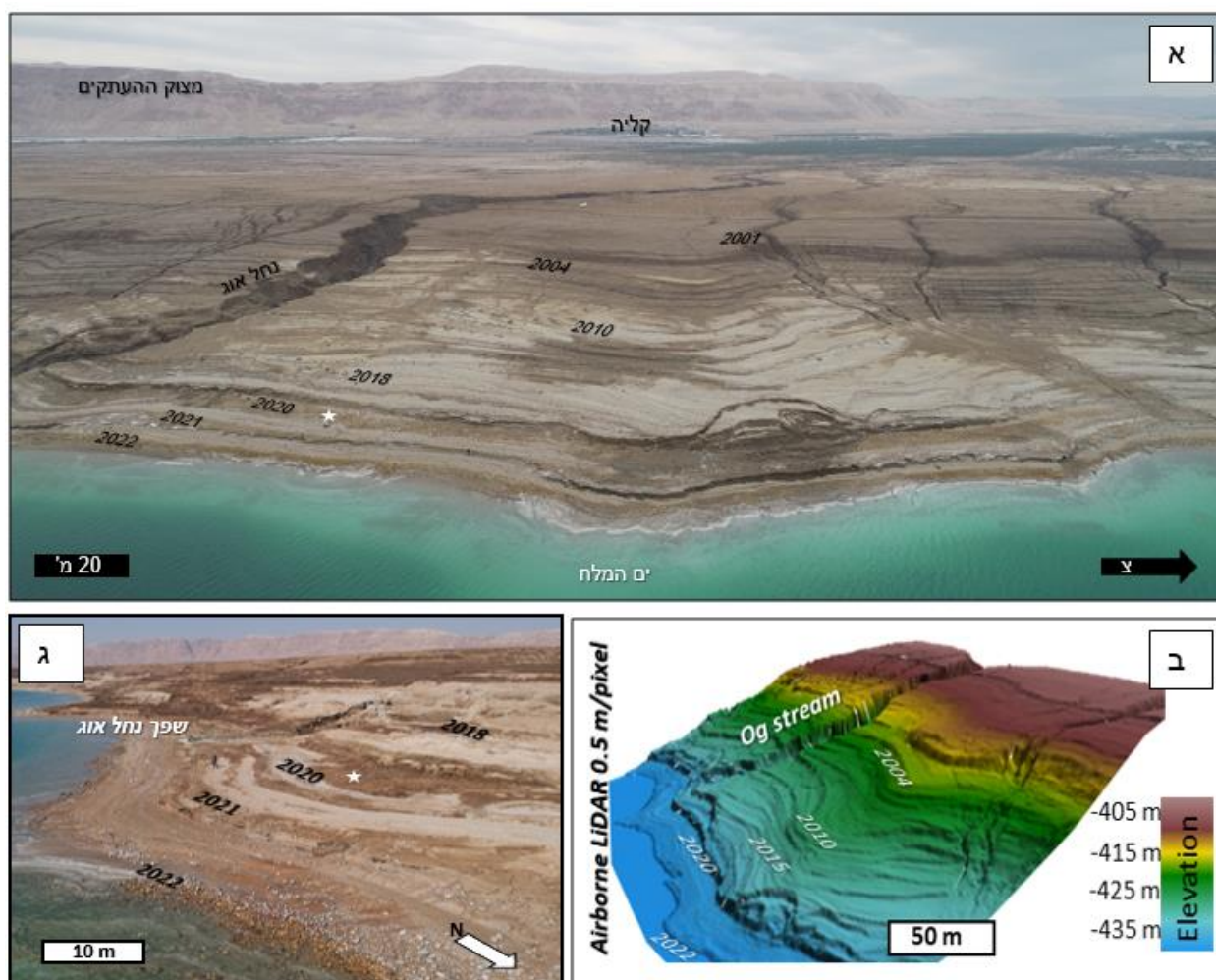
16.1 רקע

מלחים הינם גורמי בליה עיקריים באזורים צחיחים עבור סלעים טבעיים, מבני ארכיאולוגיה ותשתית מודרניות. (Goudie et al., 1985; Amit et al., 1993; Amit and Yaalon, 1996; Smith, 1988; Goudie, 2013). ניסויי מעבדה הדגימו בעבר את הקשר בין תהליכי בליה על ידי מלחים ושינויי הנפח שמלחים הנמצאים בתוך חללים וסדקים בסלעים יכולים לעבור תוך כדי מחזורים של הידרציה/דה-הידרציה, גיבוש/המסה וחימום/קירור (ראו סיכום ב Oguchi & Yu, 2021). למשל, הידרציה של סודיום סולפאט וסודיום קרבונט יכולה להיות מלווה בשינויי נפח של מעל 300% (Goudie et al., 1977). הלחצים המשמעותיים שנגרמים משינויי הנפח של מלחים בתוך חללים וסדקים בסלע הם בסופו של דבר המניעים העיקריים של תהליך בליית (ריסוק) סלעים על ידי מלחים ('בליית מלחים').

מנגנוני בליית מלחים נחקרו עד כה באופן שיטתי ויסודי בתנאי מעבדה (ראו סיכום Sato & Hattanji, 2018). ואולם במקרים רבים התגלה חוסר הלימה בין היעילות שבה מתרחשת בליית מלחים יעילה בדוגמאות סלע במעבדה ובין היעילות של בליית מלחים המתרחשת בדוגמאות סלע בסובב טבעי (Warke & Smith, 1998; Smith et al., 2005). למשל, נמצא שסודיום כלוריד, אשר באופן כללי אינו מאוד יעיל בריסוק דוגמאות סלע בתנאי מעבדה (Goudie, 2013), גורם בדרך כלל נזק מאוד משמעותי ומהיר בדוגמאות סלע שהונחו בסביבה טבעית (Matsuoka et al., 1996). קיים פער משמעותי בין ההבנה שלנו כיצד מלחים יכולים לגרום לבלייה בתנאי מעבדה וכיצד התהליך הזה מתקיים בפועל בסלעים טבעיים בסביבתם הגיאולוגית. למרות שתופעת בליית המלחים נפוצה והרסנית באזורי מדבר התנאים המדויקים הדרושים לקיום התופעה לא נמדדו בתנאי שדה, לא הוגדרו כראוי, לא נמדדו. כמו כן, עדיין לא נקבעו כמותית קצבי הבליה ע"י מלחים בסובב ארידי קיצון. המחקר הנוכחי נסמך על הייחודיות הגיאולוגית של חופי ים המלח בהם נחשפים מגוון סלעים לתהליכי בליית מלחים מואצים שניתן למדוד ולכמת בצורה ישירה בתנאים טבעיים בשדה. קווי החוף במוצא נחל אוג מהווים מעבדת שדה אידיאלית עקב ירידת המפלס המהירה של ים המלח שיוצרת סדרה צפופה של מפלסי חוף מאז שנת 2001 (Enzel et al., 2022) עליהם ניתן לעקוב בצורה רציפה אחר תהליך ריסוק סלעים (איור 16.1).

16.2 מטרות

1. לקבוע את הגורמים הסביבתיים לתהליך הבליה ע"י מלחים בתנאי שדה תוך התמקדות בברור הגורמים הסביבתיים הדרושים לתהליך הריסוק בסובב שבו הלחות הזמינה בפני השטח מוגבלת ביותר.
2. לכמת את תהליך הריסוק ולקבוע את קצב הבליה ע"י מלחים בסובב ים המלח בסקאלות זמן של שנים – עשרות שנים.

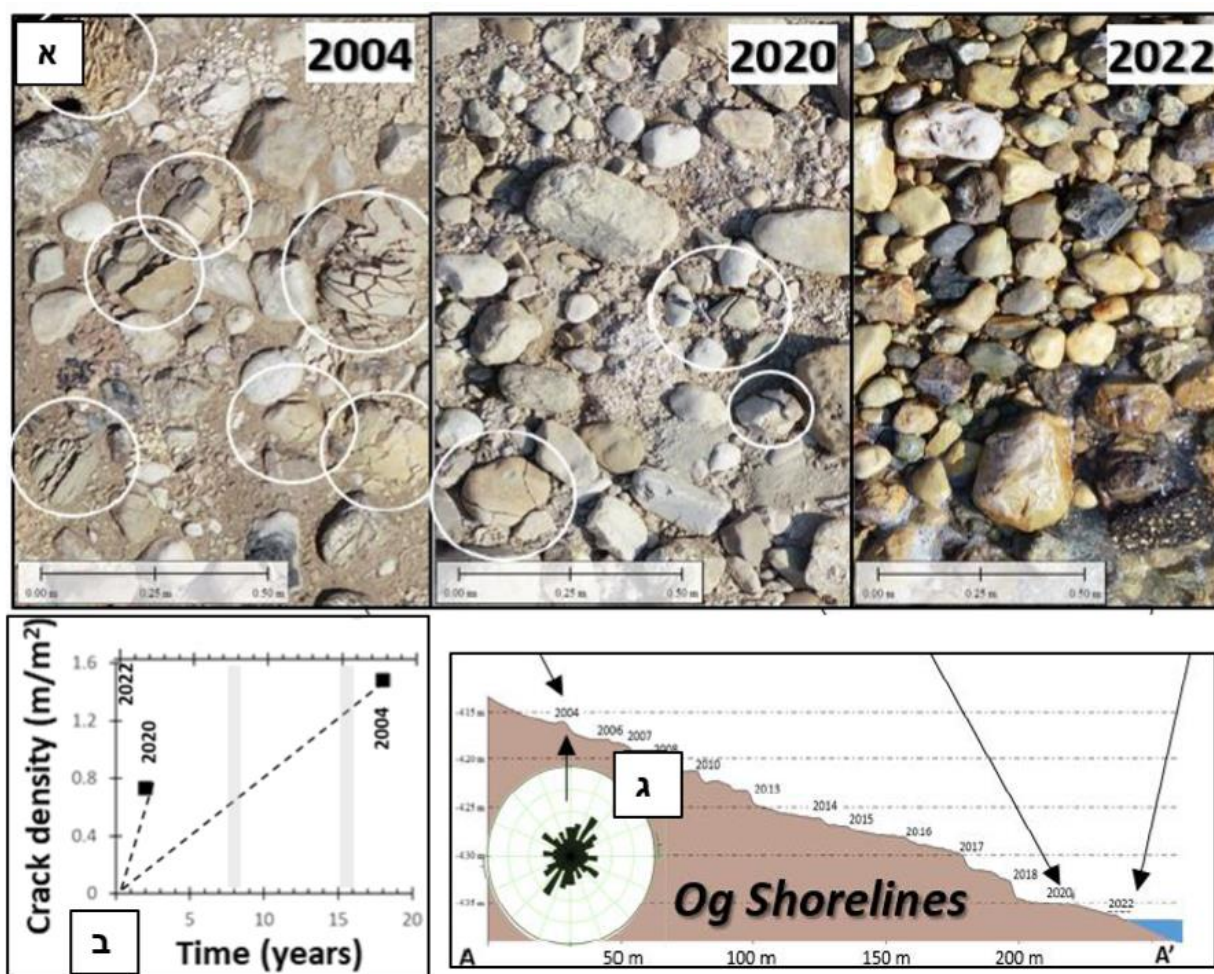


איור 16.1 : (א) תצלום רחפן של אתר המחקר בשפך נחל אוג המדגים את קווי החוף האבנוניים שננטשו באתר בעקבות ירידת המפלס מאז 2001. (ב) טופוגרפיה בקזלוציה גבוהה של אתר המחקר ומדרגות החוף בו. תקריב של מדרגות החוף הצעירות ביותר. כוכבית לבנה – מיקום מדידות הפליטות האקוסטיות שנערכו בבולדר שנמצא על קו החוף הנטוש של 2020.

16.3 שיטות

רצף קווי חוף באזור מניפת הסחף של נחל אוג מאפשר מעקב מפורט אחר תהליך הבליה ע"י מלחים מהשלב שהחלוקים מושקעים לאורך החוף הנוכחי ועד חלוקים שנמצאים על מפלסים נטושים הרחוקים עשרות מטרים מקו החוף (Eyal et al., 2019, 2021). כבר בקו החוף הנוכחי שננטש במהלך 2023 ניתן להבחין בשבירה אינטנסיבית של חלוקים והתקדמות סדקים בטווח זמן של שבועות (איור 16.2). השיטות שהופעלו לאפיון וכימות של תהליכי הבליה כללו:

1. מיפוי מורפולוגי של המפלסים השונים במרחב ובזמן
2. מדידות של כמות וכיווני הסדקים על מפלסים נטושים שונים מנת לקבל נתוני צפיפות וכיווניות של הסדקים. המדידות נעשו על גבי צילומי רחפן ברזלוציה גבוהה של 3 מ"מ/פיקסל.
3. מדידה רציפה של הטמפרטורה והלחות היחסית על פני השטח בסמוך לסלעים העוברים בליה על ידי מלחים.
4. צילומי מעקב רציפים (Time Lapse) של סלעים נבחרים המצויים בתהליך של סידוק.
5. מדידות רציפות של פליטות אקוסטיות (Acoustic Emission).



איור 16.2 : א) תצלומי רחפן ברזולוציה גבוהה מדגימים את התפתחות הסידוק במפלסי אוג. ב) השתנות קצבי הסידוק במפלסי אוג בין 2004 ו 2022. ג) חתך טופוגרפי של מדרגות החוף באוג וחוסר כיווניות בסידוק הסלעים באוג שנמדד במדרגת 2004.

16.5 תוצאות

16.5.1 מיפוי מורפולוגי של המפלסים השונים במרחב ובזמן (איור 16.1)

מופו בסך הכל 18 קווי חוף בדידים בשפך נחל אוג שנוצרו בין השנים 2004 – 2022. שימוש בנתוני ליידאר אווירי שנאספו ברזולוציה של 0.5 מטר/פיקסל במסגרת פרויקט ים המלח אפשרו לאפיין בצורה כמותית את גאומטריית המפלסים השונים ולוודא את גיל הנטישה של כל מפלס על ידי השוואה לעקומת המפלס של האגם. רוב קווי החוף מאופיינים במשטח בסוללה של חלוקים (רכס חוף) ומשטח בוץ מתחתיו לכוון מזרח שעליו מונחים גם סלעים פלוביאלים מנחל אוג שעברו הסעה צפונה לאורך החוף במהלך סערות חורף (Eyal et al., 2021). מתוצאות המיפוי עולה שהסלעים שמונחים על משטחי הבוץ סדוקים יותר מאשר הסלעים המונחים על רכס החוף של אותה שנה, וזאת למרות שתקופת הבלייה שהם עברו זהה. אנליזות ראשוניות מרמזות כי המלח בתוך הסדקים בסלעים הם בעיקר הליט עם כמויות משניות של גבס.

16.5.2 מדידות של כמות וכיווני הסדקים על מפלסים נטושים (איור 16.2)

נמצא שהסידוק בסלעים הנמצאים על קו המים זניח. במפלס של 2020 נמדדה צפיפות סדקים ממוצעת של $0.78 m/m^2$ ולא נמצאה כיווניות מועדפת לסדקים. במפלס של 2004 נמדדה צפיפות סדקים ממוצעת של $1.54 m/m^2$ ולא נמצאה כיווניות מועדפת לסדקים. מסתמן שקצב הסידוק אינו קבוע בזמן וישנה מגמה של ירידה

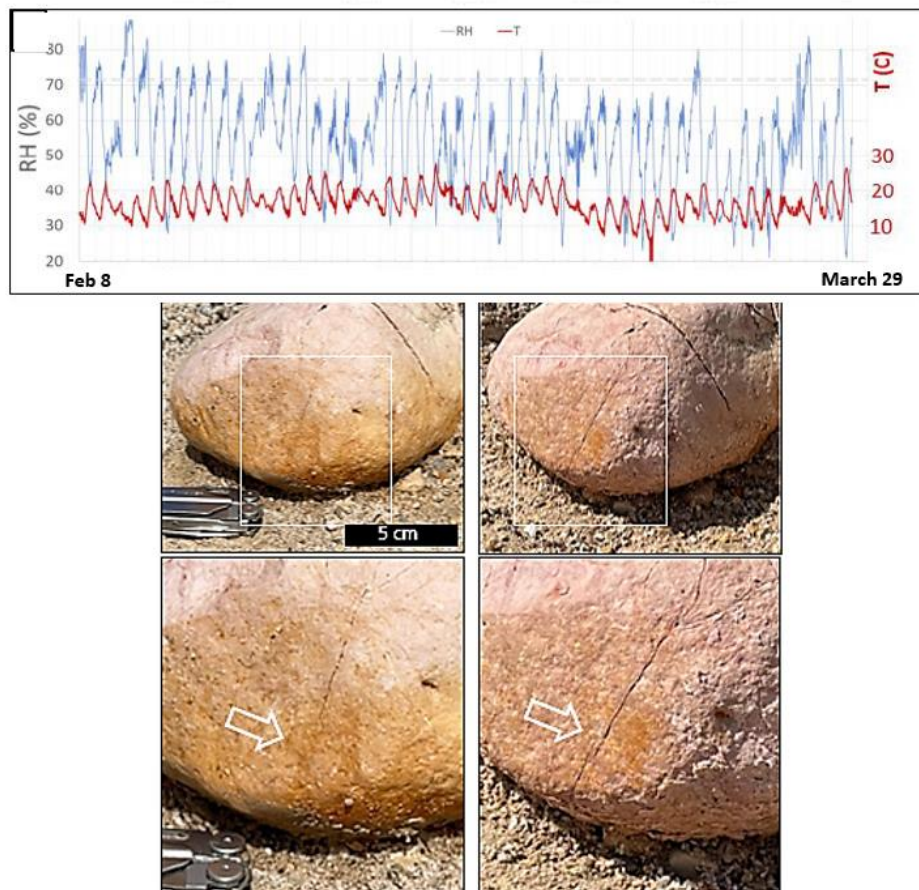
בקצב הסידוק עם הזמן. חוסר הכיווניות של תופעת הסידוק בקווי החוף של אוג מרמזת כי סידוק בתגובה לחימום/קירור מקרינת שמש ישירה לא היה משמעותי משום שבאתרים מדבריים אחרים תועדה כיווניות ברורה במקרים בהם חימום/קירור קרינתי היה המניע העיקרי לסידוק הסלעים (McFadden et al., 2005; Shaanan et al., 2023).

16.5.3 מדידה רציפה של הטמפרטורה והלחות היחסית

טמפרטורת האוויר, הלחות היחסית והרוח נמדדו באופן רציף במהלך תקופת המחקר ב 2023. המדידות הושוו לתצפיות של דינמיקת המלחים והסידוק שהושגו בעזרת צילומי Time Lapse (TL) ופליטות אקוסטיות (AE) Acoustic Emission המתוארות למטה.

16.5.4 צילומי Time Lapse (איור 16.3)

בעזרת צילומי TL תועדה התקדמות של מאקרו סידוק בסלעים בקצבים מאוד מהירים של מספר סנטימטרים לחודש. מדידות האקלים מדגימות כי במהלך התקופה בה גדלו הסדקים ערכי הלחות היחסית חצו את ערך ה deliquescence של הליט מספר רב של פעמים. ניסויי מעבדה קודמים (Sato & Hattanji, 2018) הדגימו שדינמיקת לחות יחסית מסוג זה גרמה לסידוק יעיל בדוגמאות מעבדה. צילומי ה TL הדגימו גם המסה/גיבוש יומיים של מלחים בסדקים בזמן לחות יחסית גבוהה/נמוכה, בהתאמה (איור 16.4).



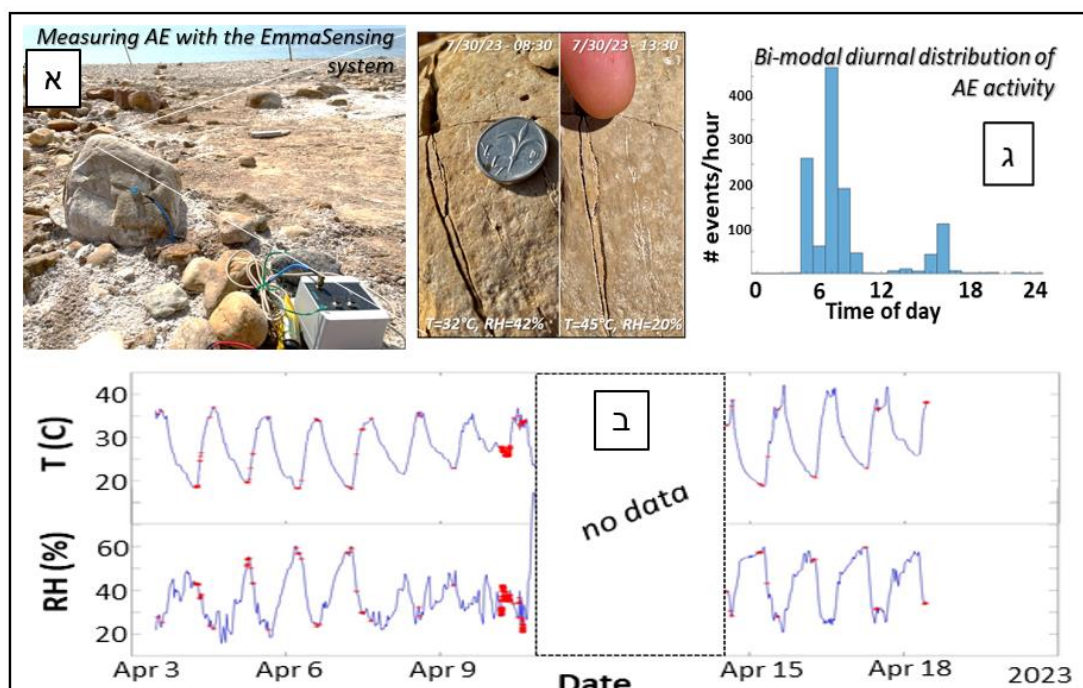
איור 16.3: למעלה- הדינמיקה היממתית של טמפרטורה ולחות יחסית באתר המחקר במהלך פברואר-מרץ. למטה – סדק שהתקדם כ 5 ס"מ במהלך פברואר – מרץ.

16.5.5 פליטות אקוסטיות (AE) (איור 16.4)

מדידות רציפות של פליטות אקוסטיות מבולדר אלוביאלי בודד שנמצא על משטח בוץ נטוש מ 2020 נערכו במהלך אפריל-אוקטובר 2023. פליטות האקוסטיות הינם proxy מקובל כיום להתרחשות של מיקרו סידוק בסלעים בתנאי מעבדה ובתנאי שדה. המדידות במחקר הנוכחי הינם הראשונות שנערכו אי פעם בתנאי שדה עבור סידוק הנובע מדינאמיקה של מלחים. המדידות מראות התפלגות בי-מודלית מובהקת של AE המתרחש בעיקר בשעות הבוקר המוקדמות (לפני הזריחה) כאשר הטמפר' מינימלית והלחות היחסית מקסימלית ובשעות אחר הצהריים כאשר הטמפר' מקסימלית והלחות היחסית מינימלית. דפוס זה של AE ביחד עם צילומי ה TL שמדגימים המסה/גיבוש יומיים של מלחים בסדקים מרמזים על חשיבות מלחים בפעילות הסידוק באוג.

16.6 סיכום

עבודת המחקר שנערכה באוג במהלך 2023 הניבה תוצאות ראשוניות מבטיחות. מסתמן שפעילות הסידוק המהיר של הסלעים באוג אכן נשלטת על דינאמיקה של מלחים, כאשר ככל הנראה הליט הוא המלח העיקרי. תועד קצב התקדמות סידוק מהיר מאוד של מספר סנטימטרים לחודש. ככל הנראה קצבי הסידוק יורדים עם הזמן בתוך סקאלות זמנים של שנים בודדות. נצפתה דינאמיקה של המסה/גיבוש יומיים של מלחים בסדקים של סלעי אוג המתאימה לדפוס ההתנהגות של מיקרו-סידוק המראה התפלגות בי-מודלית מובהקת של AE המתרחש בעיקר בשעות הבוקר המוקדמות (לפני הזריחה) כאשר הטמפר' מינימלית והלחות היחסית מקסימלית ובשעות אחר הצהריים כאשר הטמפר' מקסימלית והלחות היחסית מינימלית. התוצאות הראשוניות מהמחקר עד כה מצביעות כי דינאמיקה של לחות אטמוספרית יכולה להיות גורם עיקרי באספקת הלחות הנדרשת לבליית מלחים באזורים צחיחים.



איור 16.4: א) מדידות AE בבולדר ברוחב 40 ס"מ על משטח הבוץ הנטוש מ 2020 בחוף אוג. ימין – דוגמא לגיבוש/המסה של מלח בסדקים של הסלע בשעות הצהריים/בוקר, בהתאמה. ב) דינאמיקה יממתית של טמפר' ולחות יחסית (קווים כחולים) וארועי AE (אדום). ג) היסטוגרמה של אירועי ה AE כפונקציה של שעה ביום מדגימה התפלגות בי-מודלית.

- Amit, R., R. Gerson, and D. H. Yaalon. 1993. Stages and rate of the gravel shattering process by salts in desert Reg soils. *Geoderma* 57, no. 3: 295-324.
- Amit, R., and D. H. Yaalon. 1996. The micromorphology of gypsum and halite in Reg soils—The Negev Desert, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms* 21, no. 12: 1127-1143.
- Eyal, Haggai, Elad Dente, Itai Haviv, Yehouda Enzel, Thomas Dunne, and Nadav G. Lensky. 2019. Fluvial incision and coarse gravel redistribution across the modern Dead Sea shelf as a result of base-level fall. *Earth Surface Processes and Landforms* 44, no. 11: 2170-2185.
- Eyal, Haggai, Yehouda Enzel, Eckart Meiburg, Bernhard Vowinkel, and Nadav G. Lensky. 2021. How does coastal gravel get sorted under stormy longshore transport? *Geophysical Research Letters* 48, no. 21: e2021GL095082.
- Enzel, Yehouda, Amit Mushkin, Matias Groisman, Ran Calvo, Haggai Eyal, and Nadav Lensky. 2022. The modern wave-induced coastal staircase morphology along the western shores of the Dead Sea. *Geomorphology* 408: 108237.
- Goudie, A. S (1977). "Sodium sulphate weathering and the disintegration of Mohenjo-Daro, Pakistan." *Earth Surface Processes* 2, no. 1: 75-86.
- Goudie, A. S. Andrew S., Shaw. 1985. Salt weathering. *Research Paper* 33: 31.
- Goudie, Andrew S. 2013. *Arid and semi-arid geomorphology*. Cambridge university press .
- Matsuoka, Norikazu, Kiichi Moriwaki, and Kazuomi Hirakawa (1996). "Field experiments on physical weathering and wind erosion in an Antarctic cold desert." *Earth Surface Processes and Landforms* 21, no. 8: 687-699.
- McFadden, L. D., M. C. Eppes, A. R. Gillespie, and B. Hallet (2005). "Physical weathering in arid landscapes due to diurnal variation in the direction of solar heating." *Geological Society of America Bulletin* 117, no. 1-2: 161-173.
- Oguchi, C. T., & Yu, S. (2021). A review of theoretical salt weathering studies for stone heritage. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1), 1-23.
- Sato, Masato, and Tsuyoshi Hattaji. "A laboratory experiment on salt weathering by humidity change: salt damage induced by deliquescence and hydration (2018)." *Progress in Earth and Planetary Science* 5, no. 1: 1-10.
- Shaanan, U., Mushkin, A., Rasmussen, M., Sagy, A., Meredith, P., Nara, Y., ... & Eppes, M. C. (2023). Progressive fracturing in alluvial clasts. *Geological Society of America Bulletin*.
- Smith, B. J. 1988. Weathering of superficial limestone debris in a hot desert environment. *Geomorphology* 1, no. 4: 355-367.
- Smith, B.J., Warke, P.A., McGreevy, J.P., Kane, H.L. 2005. Salt-weathering simulations under hot desert conditions agents of enlightenment of perpetrators of preconceptions? *Geomorphology*, 67, 211-227
- Warke, P. A., and B. J. Smith (1998). "Effects of direct and indirect heating on the validity of rock weathering simulation studies and durability tests." *Geomorphology* 22, no. 3-4: 347-357.

17. האבולוציה הכימית של מלחת סדום, נאות הכיכר

בורג, א.¹ גבריאלי, א.¹ לוי, א.²

¹ מכון גיאולוגי

² מכון גיאופיסי

17.1 מבוא

מלחת סדום (נאות הכיכר) משתרעת מדרום למכלול ברכות האידוי של מפעלי ים המלח ופני השטח שלה מישוריים עם נטיה קלה כלפי צפון וצפון מזרח. למלחה צורה של משולש הפוך; ממערב ומדרום מערב היא תחומה ע"י שבר נאות הכיכר, בצפון היא גובלת בברכות מפעלי ים המלח (מי"ה) וממזרח גבולה עובר בערך לאורך הגבול הבינלאומי עם מדינת ירדן. רום פני השטח בפינה הדרום מערבית של המלחה הוא כ-350 מ' והוא יורד במתינות עד לכ-375 מ' בפינה הצפון מזרחית. פני השטח נמוכים טופוגרפית מהסביבה ולכן המלחה מהווה בסיס ניקוז של נחלי הערבה הצפונית – ערבה, אמציהו וצין. המלחה מהווה גם בסיס ניקוז של מערכות מי תהום, כולל של האקוויפרים הרגיונליים הזורמים ממערב – חבורות יהודה וכורנוב לאחר שחצו את שבר נאות הכיכר, של אקוויפרי המילוי ותצורת חצבה הממוקמים בבקע הערבה שמדרום, ושל מערכות מקומיות שמקורן במזרח, בשטח ממלכת ירדן. מקורות מים נוספים למלחה הם מי שיטפונות בנחלים הגדולים המחלחלים לתת הקרקע וכיום גם מים חוזרים מהשקיה חקלאית ברחבי המלחה. כמות המים הכללית המתנקזת מכל המקורות הללו איננה ידועה אולם מוערכת בעשרות מלמ"ק בשנה. תהליכי אידוי אינטנסיביים בשטח המלחה ומגע עם תמלחות הבקע גורמים להמלחת מי התהום, ועם זאת, הכניסה של מים ממקורות שונים ובאיכויות שונות וכן חלוקת תת הקרקע הרדוד (עד 100 מ') לתת אקוויפרים באה לידי ביטוי במגוון איכויות מים במרחב המלחה. טווח המליחויות בקידוחים ובמעיינות הוא מכ-1,000 מגכ"ל עד עשרות אלפי מגכ"ל. מליחות המים משתנה הן אנכית והן גיאוגרפית, כאשר קיימת מגמת המלחה עם העומק ועם המעבר צפונה בשטח המלחה. דרישות המים האזוריות לצרכי חקלאות ועבור הצרכים התעשייתיים של מי"ה והנתק של האזור ממערכות המים הארציות הביאו לקדיחת קידוחים רבים הן במרחב צפון הערבה בכלל והן במלחת סדום בפרט. הקידוחים נחלקים לשתי קבוצות – קידוחי חברת מקורות לצרכים חקלאיים ובעבר גם לברכות דגים, וקידוחי מי"ה לצרכים תעשייתיים. קידוחי מקורות מרוכזים רובם ככולם בפינה הדרום מערבית של המלחה, בעוד שקידוחי מי"ה ממוקמים מזרחה וצפונה יותר ובהתאמה גם מלוחים יותר. נפחי ההפקה לא עולים על כמה מלמ"ק בשנה.

בשטח המלחה אין נביעות טבעיות, אולם לאורך תוואי שבר נאות הכיכר המתבטא במצוק, נבעו בעבר מעיינות רבים, חלקם בעלי שפיעה משמעותית ואחרים זרזיפים קטנים. חלק ניכר מאלו התייבשו חלקית או לחלוטין בעקבות השאיבות ברחבי המלחה.

חקר תת הקרקע של מלחת סדום החל עוד בשנות ה-60 של המאה הקודמת. בצד עבודות הידרולוגיות נקדחו עשרות רבות של קידוחי מחקר בכל רחבי המלחה ולעומקים שונים במטרה לזהות את חלוקת החתך ליחידות הידרוגיאולוגיות, לקבוע יכולת ניצול של המים ולאפיין את איכות המים. על בסיס הנתונים שנאספו הוצגו מודלים קונספטואליים של המערכת ההידרולוגית המתנקזת למלחה ואף הוצבו מודלים כמותיים לצורך הארכת נפחי המים המתנקזים אליה ויכולת הפקת המים. מערך קידוחי המחקר וההפקה בד בבד עם הספרות הענפה מהווים את התשתית עליה נבנה המחקר הנוכחי. אולם, בצד ריבוי העבודות ההידרולוגיות וסקרי איכות המים, מועטות העבודות שניסו לנתח לעומק תהליכים גיאוכימיים המתרחשים

במערכת התת קרקעית של המלחה, תוך שילוב של נתונים גיאוכימיים ואיזוטופים מגוונים. מגוון עבודות (לא כולל) בהן הוצגו סקרים ותהליכים גיאוכימיים במלחה נתונות ברשימת הספרות שבסוף הדו"ח.

אין זה פשוט כלל וכלל לנתח את התהליכים הגיאוכימיים בתת הקרקע במלחה וזאת ממגוון סיבות: ריבוי תת האקוויפרים במלחה, ריבוי מקורות המים התורמים למלחה, חסרונם של קידוחים בחלקים נרחבים של המלחה, חסרונם של קידוחים לעומקים גדולים, תהליכי חיזור מסיביים עד מתנוגזה הממסכים מאפיינים גיאוכימיים מסוימים וגם פוגמים ביכולת תיארוך המים, אינטרקציות מים-סלע נרחבות, שימור ירוד של קידוחים ישנים, עד כדי אובדנם, כך שלא ניתן לערוך בהם שאיבות ודיגומים לאחר זמן מה, השפעת תהליכים אנתרופוגניים על איכות המים (חקלאות ושאובות) ועוד. מגבלות הידע והקשיים האובייקטיביים באיסוף מידע חסר ואמין הם אלו שהובילו להצעת המחקר הנוכחית, כאשר הדרך לסגירת פערי הידע התבססה על שני מערכי עבודה: דיגום קידוחים רבים ככל האפשר (קידוחי הפקה וקידוחי מחקר) למגוון רחב של מרכיבים גיאוכימיים ואיזוטופיים, ועריכת סקר גיאופיזי גיאושמלי מפורט בכל רחבי המלחה ובסביבתה. שני מערכי עבודה אלו נועדו לסגור את פערי הידע בנוגע לתהליכים הגיאוכימיים המתרחשים במלחה ולזהות את גופי המים בשטח המלחה ובעומקה ואת רציפותם במרחב.

17.2 מטרות העבודה

- א. תאור מרחבי של איכויות המים במלחה.
- ב. זיהוי התהליכים הגיאוכימיים העיקריים במלחה והשפעתם על איכות המים.
- ג. חלוקת שטח המלחה על פי תהליכים גיאוכימיים שולטים.
- ד. התמקדות בתהליכי החיזור המתרחשים במלחה והבנתם לעומק.
- ה. חיזוק ההבנה ההידרוגיאולוגית של המרחב על בסיס הניתוח הגיאוכימי.

17.3 שיטות העבודה

במטרה לעמוד במטרות העבודה הוחלט, כאמור, לחלק את המאמץ לשני כיוונים – סקר גיאופיזי גיאושמלי שבאמצעותו תזוהה חלוקת תת הקרקע ליחידות הידרוגיאולוגיות, או לחילופין לגופי מים שונים באיכותם בחלוקה אנכית וגיאוגרפית, ועבודה גיאוכימית שתכלול דיגום של כל הקידוחים הזמינים, קרי קידוחי הפקה בצד קידוחי מחקר ובתכנון דיגום כך שמים ידגמו הן מעומקים שונים והן בפריסה גיאוגרפית נרחבת ככל האפשר.

כדי לעמוד בדרישות שני מסלולים עבודה אלו נעשו שתי פעולות במקביל: הסכם עם המכון הגיאופיזי לצורך עריכת סקר גיאושמל מפורט בשטח המלחה ובנחלים הזורמים לתוכה, ובדיקת מצאי הקידוחים הזמין לדיגום. צוות המכון הגיאופיזי בראשותו של אלדד לוי יצא לדרך מיד עם חתימת ההסכם וערך סדרת סקרים שיפורטו להלן, וצוות המכון הגיאולוגי ברשותם של כותבי דו"ח זה עשו מיפוי של מצאי הקידוחים הזמין לדיגום. בעזרת טכנאי המכון – אלון משה והלל לוצקי וכן שלמה אשכנזי, נדגמו קידוחי השאיבה של מקורות ומי"ה וכן אותם קידוחי מחקר שנמצאו ראויים ותקינים. חשוב להדגיש שהמחשבה לפני תחילת המחקר הייתה שפרט לקידוחי השאיבה של מקורות ומי"ה המרוכזים רובם בדרום ובמרכז המלחה, ניתן יהיה לשאוב מספר רב של קידוחי מחקר נטושים הממוקמים באזורים נוספים בשטח המלחה ומחוץ לה, אולם מהר מאוד הסתבר שמצאי קידוחים אלו כמעט ולא קיים בפועל, הן בגלל שחלק ניכר מהקידוחים הללו אינם קיימים כלל (נהרסו ככל הנראה בפעולות הפיתוח החקלאי) והן בגלל שמרבית הקידוחים שנמצאו בשטח היו במצב טכני גרוע מאוד שמנע את דיגומם. בסופו של דבר נדגמו רק ארבעה קידוחי מחקר

(פרוט להלן). בנוסף לקידוחים נדגמו מים גם במעיין אחד (עין פלוטית) הממוקם על כביש 2499 (כביש הגישה לישובים עין תמר ונאות הכיכר, אשר עובר בצמוד לשבר נאות הכיכר). הסיבה לכך שלא נעשה מאמץ לדגום עוד מעיינות לאורך הכביש היא כפולה – חוסר יכולת לדגום מים במעיין מסודר שכן ברוב המעיינות הזרימה היא בדמות פילם דק על משטח בוץ.

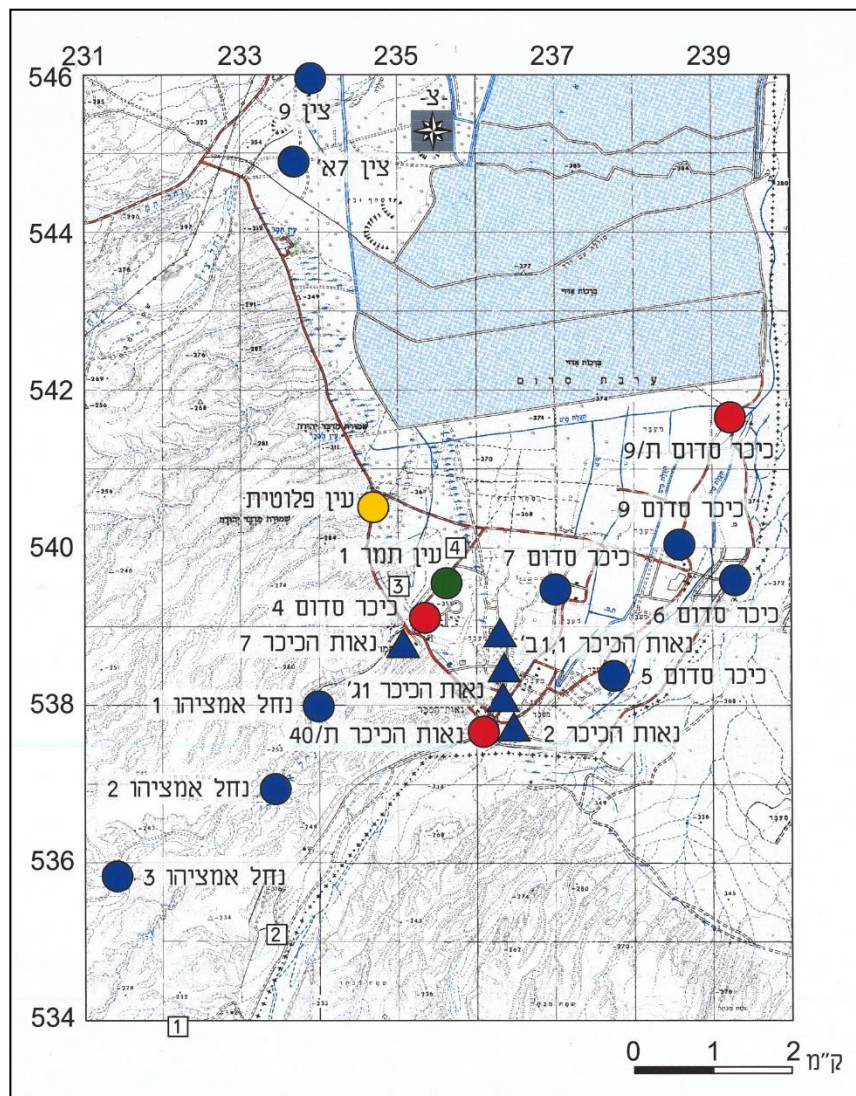
בתאום מול חברת מקורות ומי"ה נדגמו שמונה קידוחים שואבים (כל המצאי האפשרי) – נאות הכיכר 1, 1ב', 1ג', 2, 7 השייכים לחברת מקורות, כיכר סדום 5, 6, 7, 9, נחל אמציהו 1, 2, 3 ונחל צין 7א', 9 השייכים למי"ה (איור 17.1, טבלה 17.1). בקידוחים אלה מותקנת משאבה קבועה ולכן הדיגום היה אופטימלי מבחינה כימית, קרי מייצג את המים בתת הקרקע בלי השפעות לא רצויות, כגון חדירת אוויר אטמוספרי או מים עומדים בקדח. קידוח כיכר סדום 4 השייך אף הוא למי"ה, אולם אין בו משאבה, נדגם אף הוא בזכות היותו ארטזי. קידוח שאיבה נטוש נוסף, עין תמר 1, שהיה שייך לישוב המקומי ונקדח עבור ברכות הדגים שהיו קיימות בעבר בשולי המלחה, נדגם בתום שאיבה במשאבה של המכון הגיאולוגי. שני קידוחי מחקר – כיכר סדום ת/9 ונאות הכיכר ת/40 נדגמו אף הם בזכות היותם ארטזיים.

בכל הקידוחים נמדדו בשטח הפרמטרים הבאים באמצעות חיישנים יעודיים המרוכזים במזוודת WTW: מוליכות חשמלית, טמפ', חומציות (pH), ריכוז חמצן מומס ופוטנציאל חימצון-חיזור (Eh). מים נדגמו בקידוחים השונים למגוון אנליזות כימיות ואיזוטופיות, כולל אנליזה כימית כללית, יסודות קורט, הרכב איזוטופי של חמצן ומימן במים ($\delta^{18}\text{O}$, δD), DOC, TOC, הרכב איזוטופי של פחמן במים ($\delta^{13}\text{C}$), הרכב איזוטופי של גופרית וחמצן בסולפאט ($\delta^{34}\text{S-SO}_4$, $\delta^{18}\text{O-SO}_4$), יחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, תכולת פחמן-14 (PMC). בעין פלוטית נדגמו רק חלק מהפרמטרים – אלו שאינם רגישים לחשיפת המים לאטמוספירה.

הדגימות אוחסנו בשדה בצינורית והועברו למעבדות המכון הגיאולוגי. כאן נערכו כל האנליזות למעט מדידת פחמן-14 שנעשתה במעבדה בניוזילנד (Ratfer-GNS Science) ומדידת ההרכב האיזוטופי של הגופרית והחמצן בסולפאט שנעשתה במעבדה בקנדה (EIL, University of Waterloo).

קידוח	נ.צ., רשת חדשה	שייכות	מצב	רום פני קרקע או נקודת יחס, מ'	עומק מ'	מסגרות מ'	מספר קטעי מסגרות	הערות
כיכר סדום ת/9	239238/541678	רשות המים	ניטור רשות המים	-376.51	72.0	22.0-40.0	1	ארטזי כיום
כיכר סדום 4	235199/539092	מי"ה	נטוש	-344.71	103.0	83.5-100.0	2	ארטזי כיום
כיכר סדום 5	237771/538360	מי"ה	מפיק	-361.16	78.0	44.4-75.5	3	
כיכר סדום 6	239317/539610	מי"ה	מפיק	-368.60	68.5	32.1-65.5	3	ארטזי במקור
כיכר סדום 7	237029/539426	מי"ה	מפיק	-363.41	106.4	53.2-104.2	3	ארטזי במקור
כיכר סדום 9	238553/540083	מי"ה	מפיק	-372.95	78.0	32.0-74.0	3	ארטזי במקור
נאות הכיכר 1	236300/538800	מקורות	מפיק	-353.53	73.0	11.5-71.0	6	
נאות הכיכר 1ב'	236370/538396	מקורות	מפיק	-352.75	85.0	35.8-83.7	5	
נאות הכיכר 1ג'	236317/538066	מקורות	מפיק	-350.84	91.0	54.5-70.0	2	
נאות הכיכר 2	236447/537697	מקורות	מפיק	-348.32	67.0	20.0-59.5	2	
נאות הכיכר 7	235048/538854	מקורות	מפיק	-341.23	34.0	12.0-27.0	2	
נאות הכיכר ת/40	236071/537672	רשות המים	נטוש	-345.50	142.3	100.0-139.3	2	ארטזי כיום
עין תמר 1	235622/539602	מדגה עין תמר	נטוש	-345.5	123.0	59.0-77.0	2	
נחל אמציהו 1	233987/538008	מי"ה	מפיק	-327.63	135.4	94.4-131.9	6	ארטזי במקור
נחל אמציהו 2	233427/536981	מי"ה	מפיק	-316.40	132.0	80.0-117.4	5	
נחל אמציהו 3	231402/535856	מי"ה	מפיק	-292.68	152.2	67.0-137.0	4	
צין 7א'	233686/544938	מי"ה	מפיק	-362.7	74.0	38.4-66.6	1	
צין 9	233971/546022	מי"ה	מפיק	-376.35	58.5	32.6-55.7	2	

טבלה 17.1: נתונים קבועים של הקידוחים שנדגמו במסגרת המחקר הנוכחי



איור 17.1: מיקום מקורות המים שנדגמו במסגרת המחקר. בעיגולים כחולים – קידוחי שאיבה של מי"ה; במשולשים כחולים – קידוחי שאיבה של מקורות; בעיגולים אדומים – קידוחים מושבתים או קידוחי מחקר; בעיגול ירוק – הקידוח הנטוש עין תמר 1 שנשאב ע"י צוות המכון הגיאולוגי; בעיגול צהוב – מעיין עין פלוטית. כמו כן מצוינים ברבועים עם מספר בתוכם ארבעה קידוחים המוזכרים בטקסט: 1 - נאות הכיכר ת/25; 2 - נאות הכיכר ת/738 עמוק; 3 - כיכר סדום ת/16; 4 - כיכר סדום ת/15.

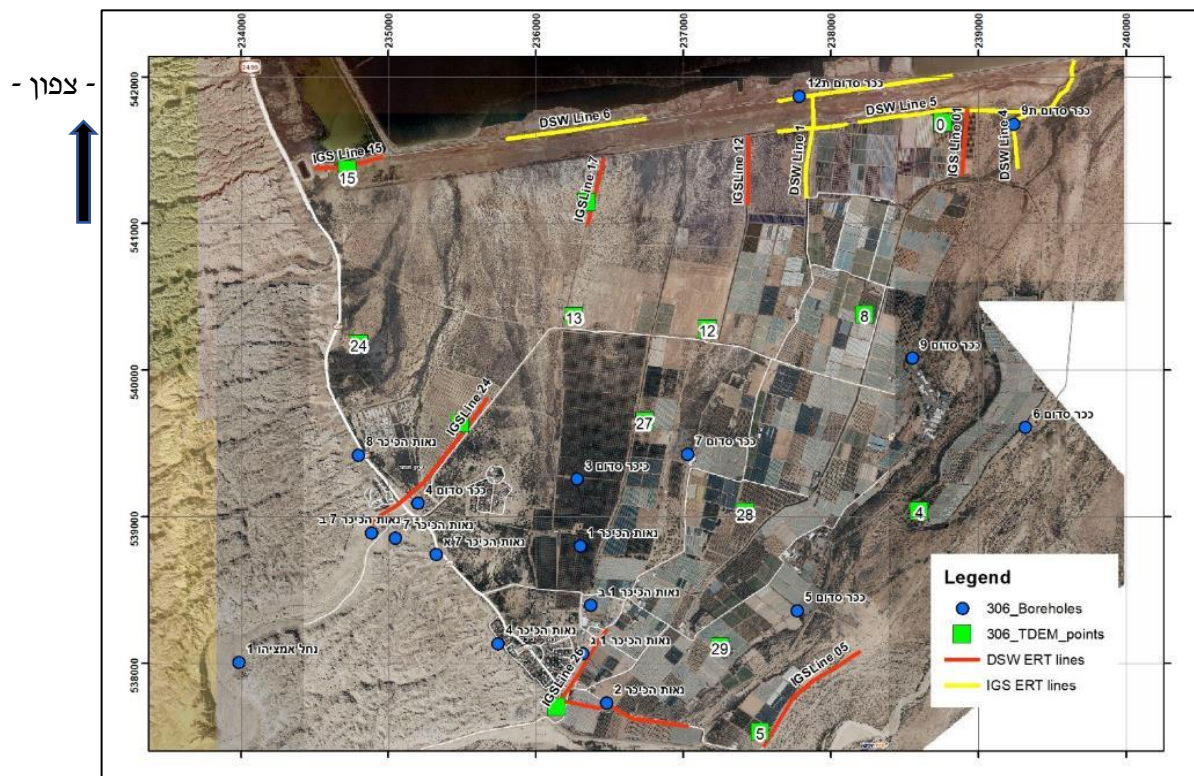
17.4 תוצאות העבודה

פרק זה יתאר בקצרה את התוצאות בשני מסלולי העבודה במקביל: הסקר הגיאופיזי גיאושמלי והסקר הגיאוכימי.

17.4.1 תוצאות הסקר הגיאופיזי גיאושמלי:

הסקר הגיאושמלי נערך בשני שלבים – סקר בשטח המלחה (שנה א') וסקר בנחלים המתנקזים אליה (שנה ב'). ההנחה בראשית העבודה הייתה שפערי המליחות בין תת האקוויפרים השונים במלחה ובסביבתה גדולים מספיק כדי לזהותם באמצעות גיאושמל. עם זאת, לא היו נתונים לגבי מליחות המים בעומקים של מאות מטרים ומטה מאחר ולא נקדחו קידוחים לעומקים אלו, אם כי היה ברור מנתוני הקידוחים הקיימים שההמלחה גוברת עם העומק. בנוסף לכך, לא היה מידע האם מים מחלחלים מברכות מי"ה לתת הקרקע בצפון המלחה, אולם היה חשש שדליפה כזו מתרחשת בשל הגבהת הברכות הדרומיות של המפעל ויצירת עומד הידרוסטטי גבוה יותר. תוצאות סקר הגיאושמל של השנה הראשונה פורסמו בדו"ח המכון הגיאופיזי (לוי, 2023) וממצאיו העיקריים מפורטים להלן.

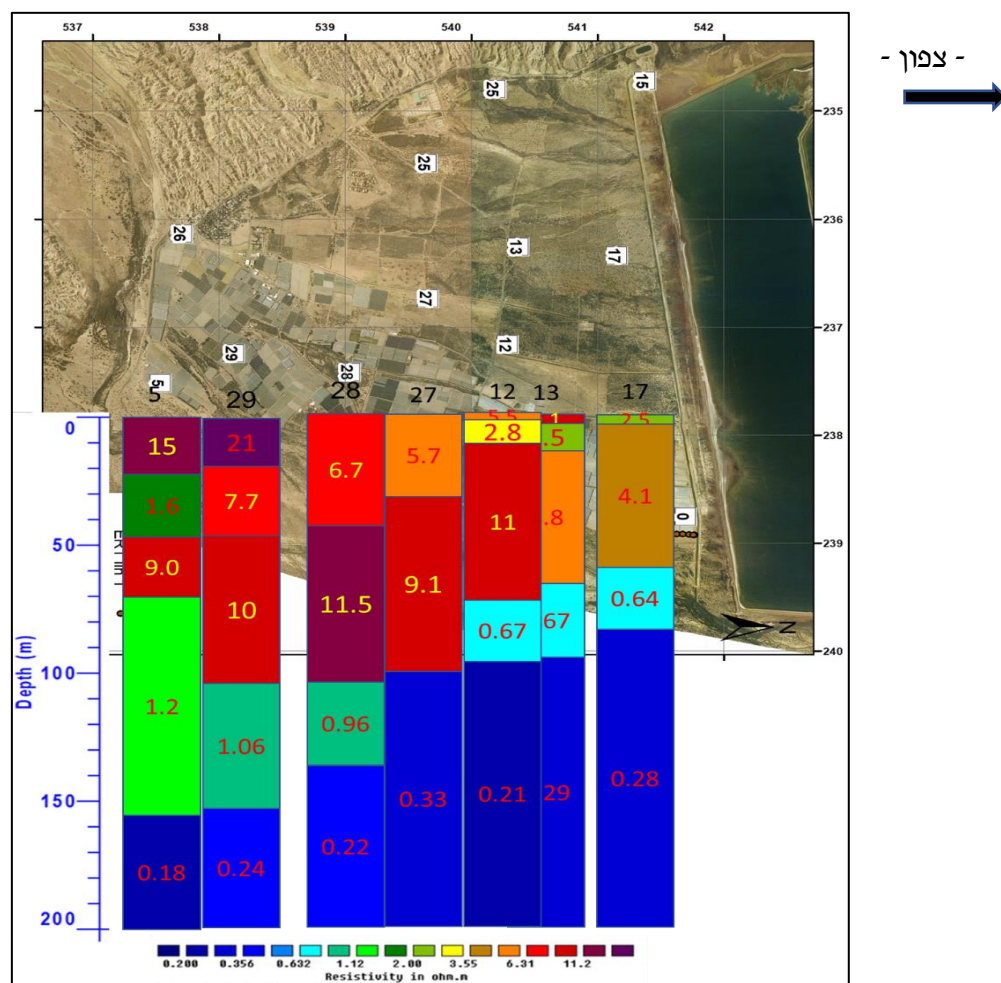
הסקר בשטח המלחה כלל 14 מדידות TDEM לקבלת פרופילי התנגדות חד מימדיים עם העומק (עד עומק של כ-200 מטר), ומדידות דו מימדיות בשיטת הטומוגרפיה הגיאושמלית (ERT) לאורך שמונה חתכים קווים באורך כולל של כ-5,500 מטר, עם עומק חדירה של כ-80 מטר (איור 17.2). כמסקנה ראשונית ובולטת – כל סקרי ה-TDEM וה-ERT הראו שתת הקרקע במלחה מחולק ליחידות הידרוגיאולוגיות שונות עם הבדלי מליחות (התנגדות) ניכרים ביניהם. חשוב להבהיר שהתנגדות נמוכה מצביעה על מליחות מים גבוהה ולהפך.



איור 17.2: מיקום אתרי סקר הגיאושמל במלחת סדום. בריבועים ירוקים – אתרי מדידות TDEM, בקווים אדומים – מדידות ERT. הרקע – תצלום אוויר מתוך אתר govmap (מתוך לוי, 2023).

סקר ה-TDEM אישר את קיומה של תמלחת עמוקה מדרום לברכות מי"ה; התנגדות נמוכה מאוד בטווח 0.2-0.4 אוהם-מטר זוהתה בעומק של כ-60 מטר בחלק הצפון מזרחי של המלחה, אשר מעמיקה בהדרגה לכיוון דרום, כפי שאפשר לראות בחתך מצפון לדרום דרך נקודות ה-TDEM (איור 17.3), וכן לכיוון מזרח.

עדות תומכת לקיומה של תמלחת זו התקבלה בקידוח המחקר כיכר סדום ת/12 (קידוח שלא קיים כיום וממוקם כ-1.5 ק"מ ממערב לקידוח כיכר סדום ת/9, איור 17.2). בקידוח זה שנקדח בשנת 1984 לעומק 103 מ', נמדדה מליחות של 168,000 מגכ"ל בעומק 75 מטר.

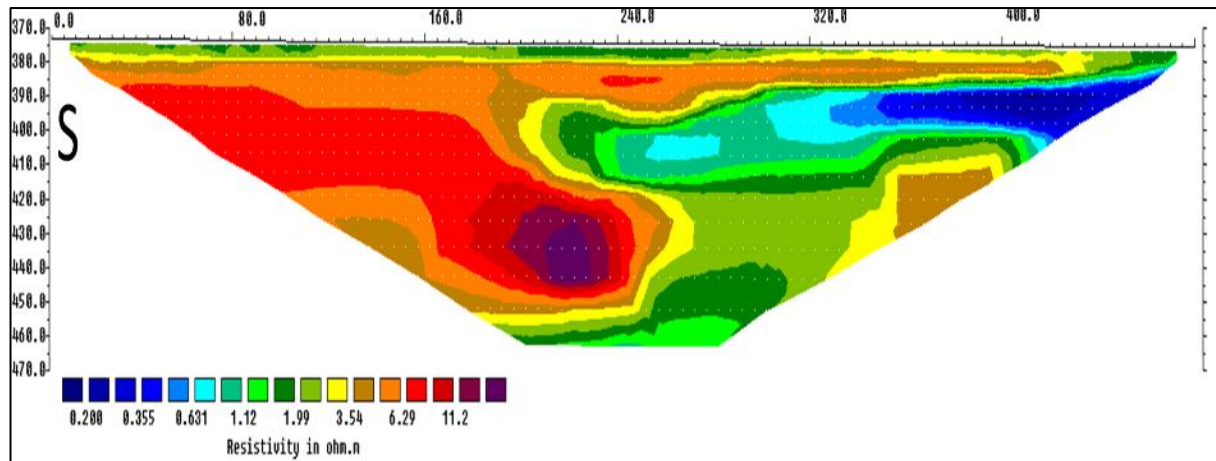


איור 17.3: השלכה של מדידות TDEM על חתך בכיוון צפון-דרום. ככל שההתנגדות נמוכה יותר מליחות המים גבוהה יותר. נראית בברור מגמת העמקה של התמלחת לכיוון דרום (מתוך לוי, 2023).

התאמה נוספת בין נתונים מדודים בתת הקרקע ותוצאות ה-TDEM נראית בפינה הדרום מערבית של המלחה, כאן מוקמה נקודת TDEM סמוך לקידוח המחקר העמוק יחסית - נאות הכיכר ת/40 (איור 17.2). בקידוח זה שנקדח לעומק 150 מ' (מסננות בעומקים 103.3-139.3 מ' ; אקולוג הנדסה, 2017) נמדדה מליחות מים של כ-24,000 מגכ"ל. בנקודת ה-TDEM שמוקמה ליד הקידוח נמדדה התנגדות נמוכה של 0.75 אוהם-מטר בחתך שמול המסננות, בעוד שבעומק 150 מ' ומטה ההתנגדות יורדת ל-0.31 אוהם-מטר והיא מייצגת ככל הנראה תמלחת מרוכזת יותר אליה הקידוח לא הגיע (לוי, 2023).

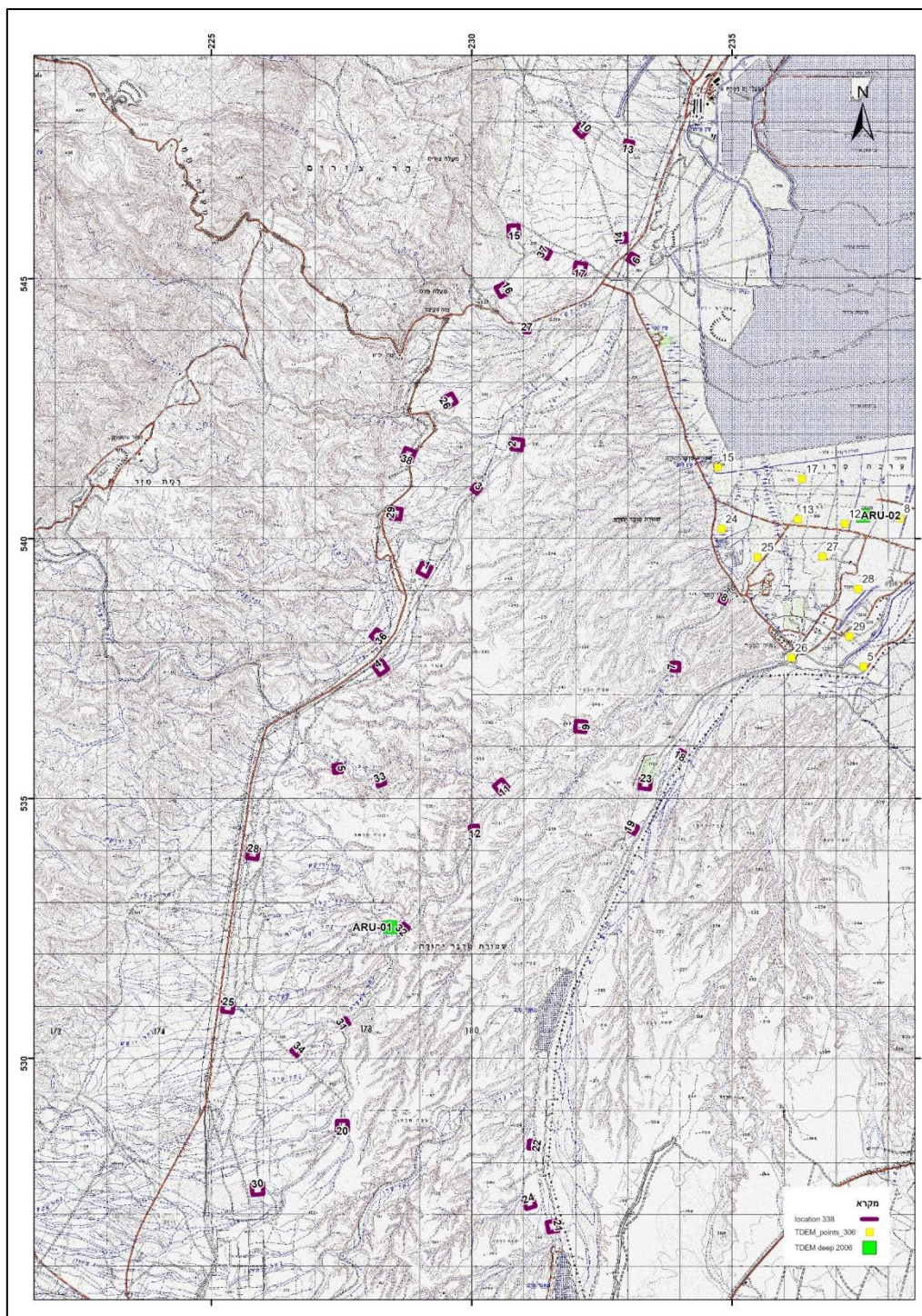
בנקודת TDEM 15 אשר ממוקמת בפינה הצפונית מערבית של המלחה (איור 17.2), זוהתה תמלחת בעומק רדוד מאוד. בשל הקרבה המידית לברכות מי"ה ניתן להניח שמדובר בתמלחת עכשווית שדלפה מהברכות, ולא בתמלחת העתיקה יותר הנמצאת בעומק יותר ותוארה לעיל. עדות נוספת לדליפת תמלחת עכשווית מברכות מי"ה כלפי דרום מתקבלת מחתכי ה-ERT שמוקמו בחלק הצפוני של המלחה. כך

לדוגמא, בחתך ERT מספר 15 שהועבר סמוך לנקודת TDEM 15 (איור 17.2) החתך מלוח מעומק רדוד, וכך לדוגמא, בחתך ERT מספר 17 (איור 17.2) נראית הלשון המלוחה והרדודה הנמתחת מהברכות כלפי דרום, אולם למרחב מוגבל (איור 17.4).

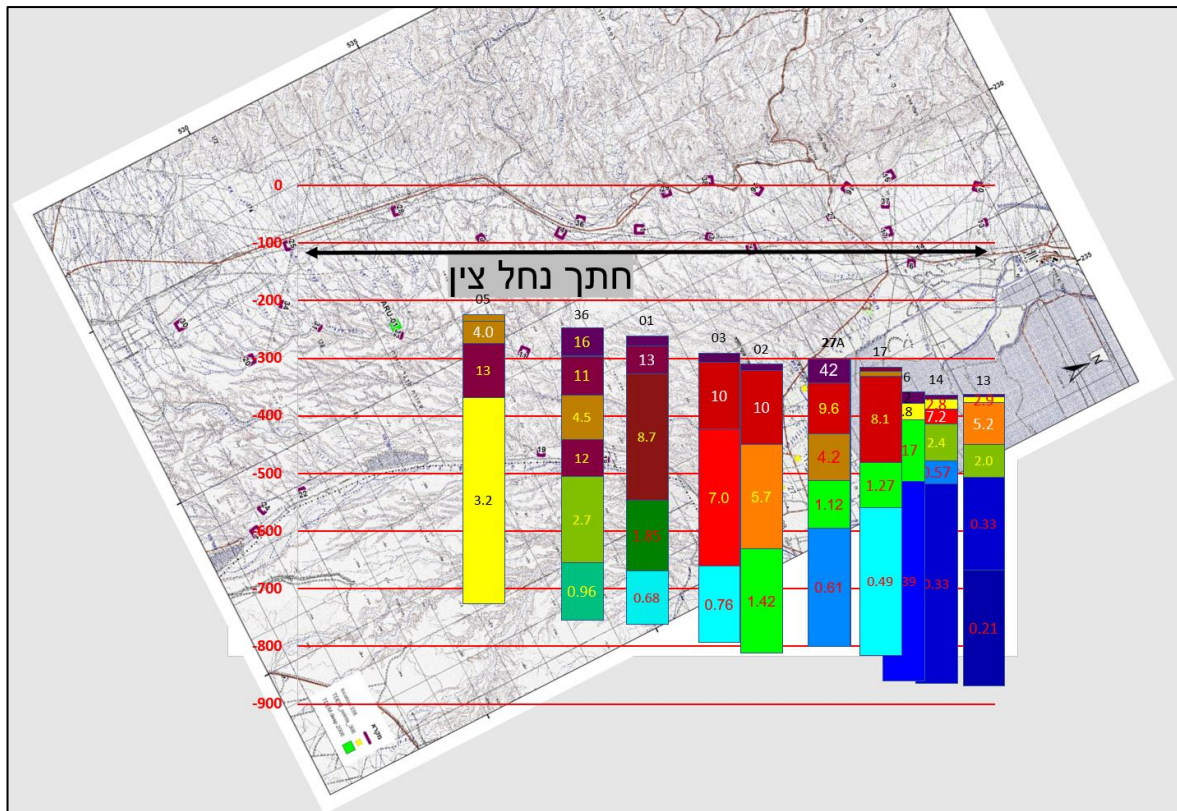


איור 17.4: חתך התנגדות דו מימדי, קו ERT 17, מקטע 0-475 מ'. התכנסות המודל ברמה טובה מאוד (RMS error = 3.0%) (מתוך לוי, 2023).

מטרת הסקר בשנה ב' של העבודה הייתה לנסות ולהבין מהם מקורות גופי המים השונים המתנקזים למלחה ומהו הפיזור הגיאוגרפי שלהם, וזאת על בסיס ההנחה שהמלחה מהווה אגן ניקוז לגופי מים הזורמים מכל הכיוונים. בשל קושי פיסי (טופוגרפיה בעייתית ושטחים ממוקשים או חשודים במיקוש) הסקר הגיאושמלי מחוץ למלחה התמקד לאורך הנחלים הגדולים באזור (ערבה, אמציהו וצין) וכן לאורך כביש הערבה ושולי מצוק ההעתקים, לכיוון מעלה צורים. איור 17.5 מציג את פריסת נקודות ה-TDEM בתוואים אלה. סך הכל מוקמו 37 אתרי מדידות בין מושב עידן בדרום ומפעלי ים המלח בצפון. הפריסת בכול אתר היו בריבוע של לפחות 150 x 150 מ' ועומק חדירה של כ-500 מטר. מאחר ודו"ח שנה ב' נמצא כעת בהכנה לא יוצגו ממצאיו ורק יוצג חתך אחד מעניין לאורך נחל צין (איור 17.6) המראה את ההעמקה המהירה של גוף המים המלוח מצפון מזרח לדרום מערב, ולמעשה את ההשפעה של כניסות מים דרך האקוויפרים הרגיונליים הממוקמים ממערב לכביש הערבה.



איור 17.5: אתרי סקר ה-TDEM שנערך בשנה ב' של המחקר לאורך הנחלים המתנקזים למלחת סדום, לאורך כביש הערבה ובשולי מצוק ההעתקים (לוי, בהכנה).



איור 17.6: תוצאות סקר ה-TDEM לאורך נחל צין (לוי, בהכנה). באדום – רוס פני השטח במטרים עבור החתכים השונים.

17.4.2 תוצאות הסקר הגיאוכימי

כל הנתונים הכימיים והאיזוטופיים שהתקבלו עד כה מרוכזים בטבלה 17.2. חלק מהאנליזות עדיין לא הושלמו, וכן לא מוצגות כאן תוצאות אנליזות יסודות הקורט.

בשורות הבאות יוצגו ניתוחים ראשוניים של תוצאות האנליזות השונות שנאספו במהלך המחקר ודרכם ניתן יהיה להבין את המורכבות הגיאוכימית הגדולה של המלחה וסביבתה. בהמשך, האנליזות שבידנו יוצלבו עם אחרות שנאספו במחקרים קודמים לשם יצירת תמונה גיאוכימית מרחבית ברורה יותר.

על פי ריכוז הכלורידים המשקף מדד של מליחות ניתן לחלק את הקידוחים לארבע קבוצות. **בקבוצה הראשונה**, בה ריכוז הכלורידים נמוך מ-1,500 מג"ל, נמצאים הקידוחים הממוקמים מול פתחי הנחלים הגדולים הזורמים למלחה או לאורכם, כולל קידוחי מקורות הממוקמים בחלק הדרומי של המלחה מול פתח נחל הערבה (נאות הכיכר 1, ב', ג', 2), קידוח נאות הכיכר 7 הממוקם בפתח נחל אמציהו וקידוחי נחל אמציהו 2 ו-3 הממוקמים במעלה הנחל. באופן מפתיע בקבוצה זו נכלל גם קידוח כיכר סדום 7 הממוקם במרכז המלחה. **בקבוצה השנייה**, בה ריכוז הכלורידים הוא בתחום 1,500-2,000 מג"ל נכללים קידוחים הרחוקים יותר מהשפעות הנחלים השטפוניים הגדולים, כולל כיכר סדום 5, כיכר סדום 9 ועין תמר 1. **בקבוצה השלישית** בה ריכוז הכלורידים הוא בתחום 2,000-5,000 מג"ל נכללים הקידוחים המזרחיים כיכר סדום 6 ו-9/10 וכן קידוח נחל אמציהו 1 ועין פלוטית. **בקבוצה הרביעית** בה ריכוז הכלורידים גבוה מ-5,000 מג"ל נכללים קידוחים המפוזרים אקראית במלחה וסביבתה – כיכר סדום 4, נאות הכיכר ת/40, צין 7א' וצין 9. שני הקידוחים האחרונים מבין הארבעה ממוקמים בצמוד וממערב לברכות האידוי של מי"ה והם שואבים מעומק עשרות מטרים בלבד (טבלה 17.3) ולכן בסבירות גבוהה מלוחים בשל השפעת מים מברכות

אלה, או אף "זוכרים" מים שדלפו לתת הקרקע כאשר ים המלח התקיים לא הרחק צפונה. לעומת זאת, שני הקידוחים הראשונים מהארבעה נקדחו לעומק גדול מ-100 מ' ולכן "מלחים" את התמלחות העמוקות יותר אשר מזוהות היטב בסקרי הגיאושמל. קידוחי נחל אמציהו נקדחו אף הם לעומק גדול מ-100 מ', אולם מיקומם הגבוה טופוגרפית מנע הגעה למים המלוחים שבעומק (על פי אותו הגיון אין הפתעה בהיות קידוח אמציהו 1 הצפוני והנמוך מהשלושה מלוח יותר מהשניים האחרים). אין הסבר ברור מדוע קידוח כיכר סדום 7 שנקדח אף הוא לעומק גדול מ-100 מ' וממוקם במרכז המלחה לא מראה עלייה בריכוז הכלורידים ונמנה דווקא עם הקידוחים הפחות מלוחים של הקבוצה הראשונה (אולי עדות לזרימה תת קרקעית מהירה לאורך אפיק קדום של נחל הערבה). מליחות גבוהה במלחה ובסביבתה דווחה בעבר בקידוחים עמוקים נוספים (איור 17.1): בקידוח כיכר סדום ת/16 שנקדח לעומק 136 מ' וממוקם מספר מאות מטרים ממערב לקדוח עין תמר 1, התקבלה מליחות של 27,000 מג"ל; בקידוח כיכר סדום ת/15 הממוקם כמה מאות מטרים מצפון מזרח לקידוח עין תמר 1, זוהתה בלוגים החשמליים עלייה הדרגתית ומשמעותית במליחות מעומק 80 מ' ומטה; בקידוח נאות הכיכר ת/738 עמוק אשר נקדח לעומק 248.6 מ' וממוקם בנחל הערבה, נמדדה מליחות של 6,700 מג"ל. קידוח נאות הכיכר ת/25 שנקדח לעומק של 250 מ' (מסננות בעומקים 135-195 מ') במעלה נחל הערבה הציג למרות עומקו מליחות של 1,620 מג"ל בלבד. בכך הקידוח דומה לקידוחי נחל אמציהו שלמרות עומקם לא הגיעו לגופי המים המלוחים וזאת הן בשל גובהם הטופוגרפי והן אודות להעמקת גופי המים המלוחים כלפי דרום.

ההתאמה בין המליחות בקידוחים השונים לבין המיקום במרחב והעומק נראית גם בגילי המים כפי שבא לידי ביטוי בתכולת הפחמן-14 במים (איור 17.7). תכולה גבוהה של פחמן 14 (מעל 20 PMC) נראית בקידוחים שמול פתח נחל הערבה (נאות הכיכר 1, ג, 2) ושוב באופן מפתיע גם בקידוח כיכר סדום 7. תכולה שבין 11-13 PMC נמדדה בקידוחים הרחוקים יותר מפתחי הנחלים ובקידוחים מזרחיים (כיכר סדום 5, 6, 9) ובאופן מפתיע גם בקידוח נאות הכיכר 7 הרדוד הממוקם במוצא נחל אמציהו למלחה והיה צפוי שיראה תכולת פחמן-14 גבוהה יותר. תכולת פחמן-14 נמוכה משמעותית נראית בקידוחים המלוחים (נחל אמציהו 1, כיכר סדום 4, נאות הכיכר ת/40 וצין 9). קידוח ת/40 העמוק ביותר והמלוח ביותר מכל הקידוחים מראה את התכולה הנמוכה ביותר.

במטרה לנסות ולראות האם גופי המליחות השונים שנמצאו ברחבי המלחה ובסביבתה שייכים כולם לאותו מקור תמלחתי פוזרו הקידוחים במרחב Cl-Na/Cl (איור 17.8). כל הקידוחים פרט לקידוחי שדה צין מפוזרים על קו ערבוב מספר (1), בו מרכיב הקצה המלוח הוא בעל יחס Na/Cl גבוה בהרבה מזה של ים המלח או של תמלחות מי"ה ולכן עשוי לייצג מי ליסן. לעומת זאת, מי שדה צין סוטים לקו ערבוב בו מרכיב הקצה המלוח הוא בעל יחס נמוך בהרבה (אם כי גבוה מזה של מי ים המלח) ולכן מייצג מרכיב מלוח ממקור שונה. העובדה שההרכב האיזוטופי של החמצן והמימן במים בקידוחי צין הוא כמו של קידוחים בעלי מליחות נמוכה בהרבה (טבלה 17.2) מעידה שמרכיב הקצה המלוח התורם לאזור נחל צין הוא במליחות גבוהה מאוד כך שתרומת מעט מתמלחת זו לא משפיעה על ההרכב האיזוטופי ה'קל' יחסית. אין כך בקידוח נאות הכיכר ת/40 אשר מראה הכבדה איזוטופית ברורה ולכן מושפע ככל הנראה מתמלחת פחות מרוכזת. תכולת הפחמן 14 הנמוכה בקידוח צין 9 (טבלה 17.2, איור 17.7) מצביעה על מקור מים עיקרי עתיק (מרוחק?).

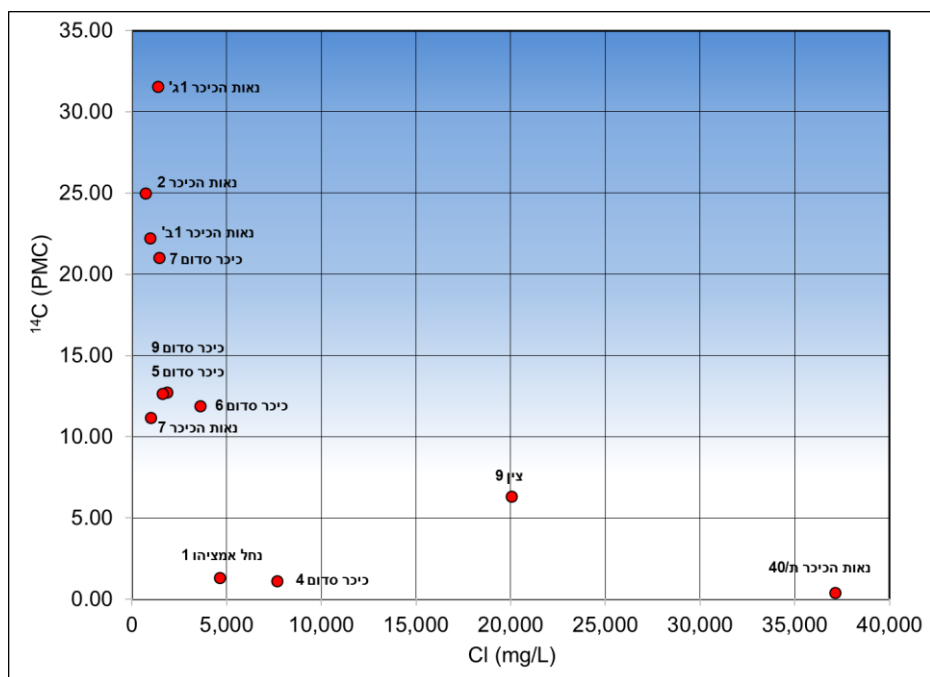
מתאם חיובי קיים בין מליחות המים להרכב האיזוטופי של הגופרית בסולפאט (איור 17.9). כאשר יגיעו לידנו התוצאות החסרות של ההרכב האיזוטופי של הגופרית בסולפאט אפשר יהיה לקבוע האם יש מתאם חיובי גם עם תכולת הפחמן האורגני במים (TOC, DOC). מהתוצאות החלקיות שיש כעת (טבלה 17.2) נראה שמתאם כזה יתכן ומתקיים. כמו כן, קיים מתאם של ההרכב האיזוטופי עם ריכוז החמצן המומס ופוטנציאל החמצון-חיזור של המים, כאשר הקידוחים בעלי ריכוז חמצן מומס גבוה שהם גם בעלי פוטנציאל חיובי (מים מחומצנים) מציגים הרכב איזוטופי שלילי או חיובי נמוך בעוד שקידוחים מחוזרים (ריכוז חמצן מומס נמוך עד אפסי ופוטנציאל שלילי) מציגים הרכב איזוטופי 'כבד' יותר. תהליכי חיזור של סולפאט הם האחראיים למתאמים אלו. ראוי לשים לב לריכוז הסולפאט הנמוך מאוד בקידוח כיכר סדום ת/9 המלווה בהרכב איזוטופי 'קל' מאוד של הפחמן במים – עדות לחימצון של גז מתאן שעדויות לקיומו במי הקידוח התגלו זה מזמן.

מספר אנליזה	שם הנדסה	חברות	pH	טמפרטורה °C	EC	EH	O ₂	Na	K	Ca	Mg	SO ₄	Cl	HCO ₃	NO ₃	Sr	TDS	Br	SiO ₂	RE
מספר אנליזה	שם הנדסה	חברות	pH	טמפרטורה °C	EC	EH	O ₂	Na	K	Ca	Mg	SO ₄	Cl	HCO ₃	NO ₃	Sr	TDS	Br	SiO ₂	RE
20.3.2022	AI-101	מאות הפכר 2	6.97	28.9	3.26	113.181	5.29	340	18	191	109	509	700	214	32	5.6	2119	5.7	21	-0.8
20.3.2022	AI-102	מאות הפכר 1.1	7.00	28.5	4.04	68.124	3.75	441	23	222	129	513	970	214	37	6.7	2556	10	21	-0.8
20.3.2022	AI-103	מאות הפכר 1	6.97	28.5	4.82	116.167	2.74	546	27	253	149	463	1255	207	40	7.8	2948	17	21	0.2
20.3.2022	AI-104	מאות הפכר 1.1	6.85	28.6	5.49	10.61	2.43	622	32	303	182	676	1380	240	42	9.3	3487	15	22	0.3
20.3.2022	AI-105	מאות הפכר 7	7.00	28.6	4.53	133.191	5.59	489	30	249	159	737	998	189	85	7.2	2942	6.7	22	-0.3
20.3.2022	AI-106	מאות הפכר 7						936	46	377	218	581	2215	231	< 2.5	11	4614	26	25	0.1
27.4.2022	AI-107	פיקה 112 מ"ק"ש	6.95	28.7	6.34	90	1.48	718	32	320	194	398	1865	192	4.4	10	3733	28	23	-0.2
27.4.2022	AI-108	פיקה 29 מ"ק"ש	7.02	29.0	11.0	-91	0.22	1390	66	463	360	414	3620	175	< 2.5	16	6504	60	29	0.4
27.4.2022	AI-109	פיקה 20 מ"ק"ש	7.04	29.6	5.61	-40	0.51	613	29	290	181	430	1595	189	< 2.5	10	3336	22	25	-0.3
27.4.2022	AI-110	פיקה 17 מ"ק"ש	6.99	28.7	5.21	73	1.13	574	25	270	161	460	1425	203	1.3	9.4	3140	19	23	-1.0
27.4.2022	AI-111	פיקה 0.36 מ"ק"ש	7.60	28.0	22.4	-286	0.16	2935	106	1030	581	581	7275	153	< 2.5	29	12690	135	22	1.9
2.1.2023	AI-112	פיקה 9/ח	7.34	29.5	12.7		3.40	1570	76	514	434	7.0	4610	197	< 10	23	7431	75	45	-0.8
25.1.2023	AI-113	פיקה 1.13 מ"ק"ש	6.36	29.6	85.0	6.8	0.08	12750	635	4760	3400	719	37130	110	< 50	100	59604	615	77	0.9
25.1.2023	AI-114	פיקה 0.29 מ"ק"ש	6.74	29.8	21.2	-268	0.07	2645	105	1100	600	560	7650	170	< 5	30	12860	110	25	-2.0
29.6.2023	AI-115	פיקה 1 מ"ק"ש	6.58	29.3	6.57	-369	0.15	778	42	245	207	484	1860	270	< 5	13	3900	17	34	-2.0
29.6.2023	AI-116	פיקה 80 מ"ק"ש	7.01	32.1	13.8	101	0.12	1549	45	804	379	404	4620	175	< 10	22	7999	74	31	-0.8
29.6.2023	AI-117	פיקה 90 מ"ק"ש	6.74	31.3	5.28	109	2.66	550	22	295	151	383	1463	190	< 5	9.3	3063	17	26	-0.7
29.6.2023	AI-118	פיקה 76 מ"ק"ש	6.90	30.3	5.65	186	2.50	712	50	206	169	655	1396	235	< 5	7.7	3431	8.5	26	-0.3
29.6.2023	AI-119	פיקה 229 מ"ק"ש	6.34	32.2	38.2	70	0.94	2873	525	1433	2903	895	14854	270	< 25	34	23788	328	61	0.4
29.6.2023	AI-120	פיקה 52 מ"ק"ש	6.36	29.6	49.9	38	0.45	4812	1245	1705	3115	633	20047	230	< 25	55	31841	344	65	-0.3

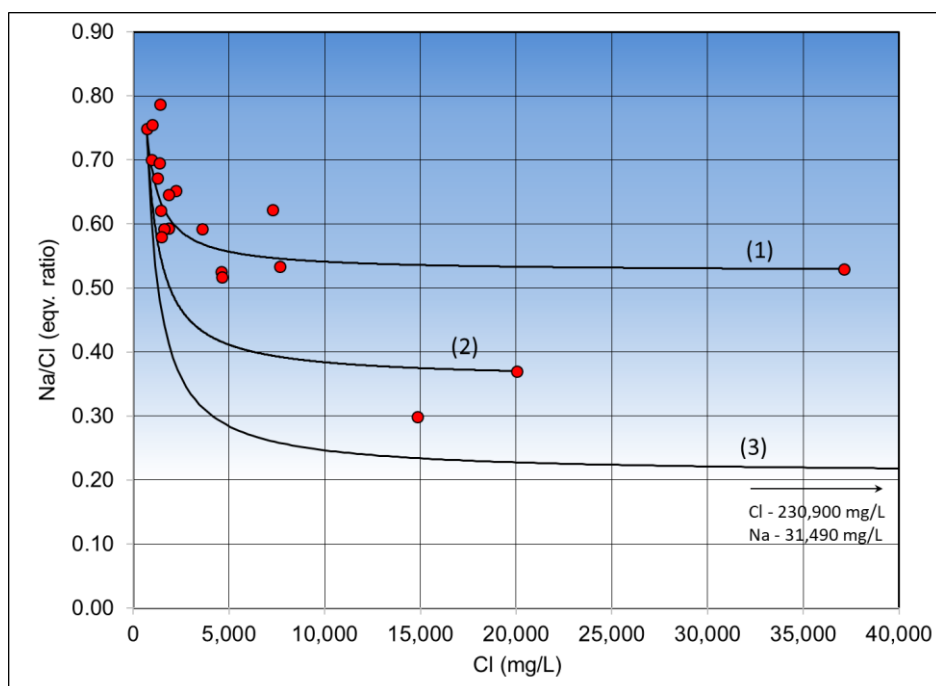
טבלה 17.2: נתונים כימיים בקידוחים שנדגמו במסגרת המחקר.

תאריך דגום	מספר אנליזה	Na/Cl	SO ₄ /Cl equiv. ratio	Mg/Ca	SO ₄ /Ca	Cl/Br weight ratio	δ ¹⁸ O ‰	δD ‰	dexcess	¹⁴ C PMC	TOC mg/l	DOC mg/l	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2s 10 ⁶	δ ³⁴ S (SO ₄) ‰	δ ¹⁸ O (SO ₄) ‰	δ ¹³ C ‰
20.3.2022	AI-101	0.75	0.54	0.94	1.11	123	-5.5	-25.5	18	24.99	<0.5	<0.5	0.7079742	15	-0.85	9.47	-4.5
20.3.2022	AI-102	0.70	0.39	0.96	0.96	97	-5.5	-26.9	17	22.22	<0.5	<0.5	0.7078966	10	-0.62	8.83	-4.7
20.3.2022	AI-103	0.67	0.27	0.97	0.76	74	-5.7	-25.8	20		0.5	0.5	0.7078830	9	-0.13	10.02	-5.0
20.3.2022	AI-104	0.70	0.36	0.99	0.93	92	-5.6	-26.6	18	31.55	<0.5	0.5	0.7078731	14	-1.34	9.64	-5.0
20.3.2022	AI-105	0.76	0.55	1.05	1.23	149	-5.5	-27.6	17	11.17	0.6	0.6	0.7077867	8	-1.93	8.27	-5.2
20.3.2022	AI-106	0.65	0.19	0.95	0.64	85	-6.4	-34.6	16				0.7080086	12	2.49	10.43	-5.8
27.4.2022	AI-107	0.59	0.16	1.00	0.52	66	-5.6	-28.3	17	12.73	0.5	0.6	0.7079498	7	1.49	10.29	-5.2
27.4.2022	AI-108	0.59	0.08	1.28	0.37	60	-5.4	-28.4	15	11.91	0.9	0.7	0.7080332	8	4.05	11.35	-5.3
27.4.2022	AI-109	0.59	0.20	1.03	0.62	72	-5.5	-25.8	18	12.66	0.7	0.7	0.7080303	6	1.56	10.01	-5.5
27.4.2022	AI-110	0.62	0.24	0.98	0.71	75	-5.4	-27.8	16	21.01	0.8	0.7	0.7078709	26	0.03	10.11	-5.6
27.4.2022	AI-111	0.62	0.06	0.93	0.24	54	-5.8	-34.3	12		30	30	0.7081005	5	10.37	13.60	-6.0
2.1.2023	AI-112	0.53	0.00	1.39	0.01	61	-5.2	-25.9	16		1.4	1.3	0.7079771	6			-24.8
25.1.2023	AI-113	0.53	0.01	1.18	0.06	60	-3.2	-18.5	7	0.41	1.0	1.1	0.7080816	7			-5.3
25.1.2023	AI-114	0.53	0.05	0.90	0.21	70	-5.8	-33.4	13	1.12	0.6	0.6	0.7081224	12			-5.8
29.6.2023	AI-115	0.65	0.19	1.40	0.83	109	-5.6	-29.5	15		0.5	0.7					-16.7
29.6.2023	AI-116	0.52	0.06	0.78	0.21	62	-5.6	-30.6	15	1.32	0.3	0.5					-5.0
29.6.2023	AI-117	0.58	0.19	0.84	0.54	86	-5.6	-28.5	17		0.2	0.7					-4.8
29.6.2023	AI-118	0.79	0.35	1.35	1.33	164	-5.8	-31.9	15		0.2	0.5					-6.5
29.6.2023	AI-119	0.30	0.04	3.34	0.26	45	-5.8	-31.8	15		1.1	1.4					-9.1
29.6.2023	AI-120	0.37	0.02	3.01	0.16	58	-6.2	-35.2	14	6.35	1.5	2.0					-7.8

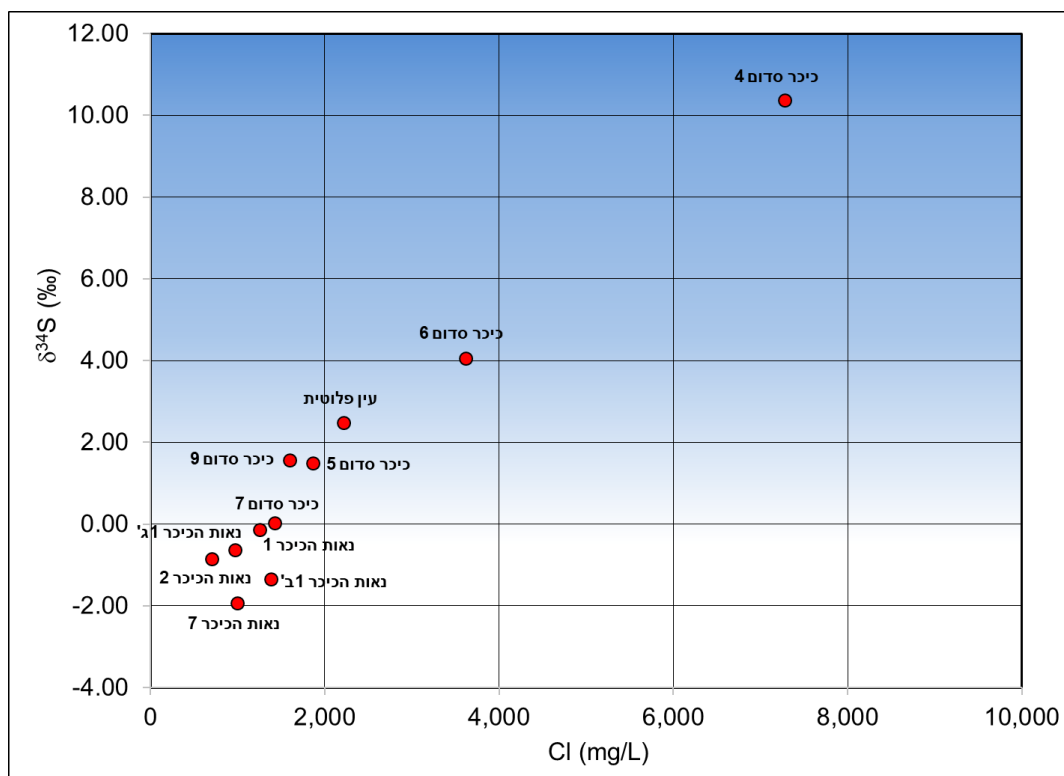
טבלה 17.2 (המשך): יחסים כימיים וערכים איזוטופיים בקידוחים שנדגמו במסגרת המחקר.



איור 17.7: ריכוז הכלוריד כנגד תכולת הפחמן-14 בקידוחים שנדגמו במסגרת המחקר.



איור 17.8: ריכוז הכלוריד כנגד היחס Na/Cl בקידוחים שנדגמו במסגרת המחקר. הועברו שלושה קווי ערבוב אפשריים במערכת, אשר אינם מגדירים מרכיבי קצה מדויקים. בכל קווי הערבוב מרכיב הקצה השפיר הוגדר כמים בקידוח נאות הכיכר 2 (המליחות הנמוכה ביותר שנמדדה). מרכיב הקצה המלוח עבור קו (1) הוא מי קידוח נאות הכיכר ת40 (המים המלוחים ביותר מחוץ לשדה צין), עבור קו (2) הוא מי קידוח צין 9 ועבור קו (3) מי ים המלח הנוכחיים.



איור 17.9: ריכוז הכלוריד כנגד ההרכב האיזוטופי של הגופרית בסולפאט בקידוחים שנדגמו במסגרת המחקר.

17.5 סיכום

המחקר, שתוצאותיו הראשוניות מוצגות כאן, התמקד בנסיון להבין את התהליכים הגיאוכימיים המתרחשים בתת הקרקע במלחת סדום ומתוך כך לגזור הבנה טובה יותר של המערכת ההידרוגיאולוגית המורכבת המתנקזת למלחה. המחקר נבנה על בסיס שני כיוונים מקבילים – סקר גיאוכימי מפורט וסקר גיאוכימי. סקר הגיאוכימי הפתיע בתוצאותיו המרשימות, חשף בפנינו את תמלחות תת הקרקע במלחה ובסביבתה ואיפשר לראשונה מעקב מסודר על עומקי התמלחות, מקורן ותהליכי הערבוב שלהן בעומק עם מים באיכות טובה יותר המגיעים למלחה ממערב, מדרום וממזרח. לעומת זאת, המחקר הגיאוכימי נתקל בקושי שלא היה צפוי בתחילת הדרך והוא מיעוטם של קידוחים זמינים לדיגום; הן מספר קידוחי השאיבה הסתבר כמוגבל והן רוב רובם של קידוחי המחקר והתצפית הרבים שנקדחו במהלך עשרות שנים התגלו כלא זמינים לדיגום (לא קיימים בפועל, ואם קיימים – הרוסים או סתומים). למעשה, לאחר חיפושים רבים בסיורי שטח הצלחנו למצוא ולדגום את כל מצאי הקידוחים האפשרי באזור (טבלה 17.1). דיגום הקידוחים נעשה עבור מגוון רחב של אנליזות כימיות ואיזוטופיות, חלקן כבר התקבל וחלקן (בעיקר אלו הקשורים לגורמי חוץ) עדיין לא בידינו. כאשר כל האנליזות יגיעו ליעדן נוכל לשפר את ניתוח התהליכים הגיאוכימיים במי התהום במלחה ובסביבתה ולהקיש מכך על התהליכים ההידרולוגיים בתת הקרקע. לחיבור זה בין גיאוכימיה והידרולוגיה חשיבות רבה בתפעול נכון של מערכת השאיבה של מי התהום במלחה ובסביבתה – מים אשר משמשים הן לתעשייה (מפעלי ים המלח) והן לחקלאות אזורית. ניתן כבר עכשיו לצאת במסקנה אחת חשובה לתכנון הפקה עתידי; התפיסה לפיה מי התהום ממליחים באופן מסודר עם כיוון הזרימה מדרום ומדרום מערב לכיוון צפון וצפון מזרח, ובהתאמה ניתן לתכנן את איכות המים שישאבו במרחב, איננה מדויקת. החלוקה במרחב נראית יותר כאזורים מלוחים שאכן מופיעים בעומק רדוד יותר עם

ההתקדמות צפונה וצפון מזרח, אולם בה בעת נראים אזורים בעלי מליחות נמוכות גם באזורים בהם היה צפוי על פי התפיסה הפשטנית הנ"ל להמצא גוף מים מלוח בהרבה. דוגמא טובה לכך הם קידוחי כיכר סדום 7 ו-9 הממוקמים במרכז ומזרח המלחה ובכל זאת איכות המים שבהם טובה יחסית וטובה בהרבה מהקידוחים המצויים מערבית ומזרחית להם (כיכר סדום 4, 6 ו-16). יתכן שההסבר לכך הוא קיומו של נתיב זרימה תת קרקעי מהיר לאורך ערוץ קבור, עתיק ובעל מוליכות הידראולית גבוהה של נחל הערבה. כמו כן, יש בידנו כלים טובים לזיהוי מידת החיזור של המים בתת הקרקע, כאשר חשוב לזכור שמים מחוזרים מתאפיינים בתכולת מומסים מסוימת ובאגרסיביות רבה כלפי צנרת הקידוח ולכן יש חשיבות בזיהוי האזורים בהם החיזור משמעותי יותר.

17.6 מקורות

- אפיק, הנדסת סביבה והידרולוגיה, 2014. אזור "כיכר סדום" – ריכוז מידע הידרולוגי קיים ותכנית ניטור. הוכן עבור רשות הטבע והגנים, 67 עמ'.
- אקולוג הנדסה בע"מ. 2017. תיק קידוח ניטור נאות הכיכר ת/40. הוגש לחברת מקורות, 6 עמ' + נספחים.
- בורג, א., לומלסקי, ל., שחר, ח., צוקרמן, ח., ליפשיץ, א., 2000. סקר הידרולוגי לבחינת פוטנציאל המים בדרום ים המלח וצפון הערבה, דו"ח התקדמות מס' 4: שדות ההפקה כיכר סדום-נחל אמציה-צין ויעלים, עדכון. תה"ל, 33 עמ'.
- גרניט, י., 2010. ניצול וניהול משאבי מים בתנאי מלחה (סבחה) מודל כיכר סדום. עבודת גמר לשם קבלת תואר "מוסמך חלמדעי החקלאות", האוניברסיטה העברית, הפקולטה ברחובות, ישראל, 101 עמ'.
- דבורי, נ.צ., קנר, ב., לבנון, א., צוריאלי, א., ליבשיץ, י., סקר גיאוכימי באזור נאות הכיכר וכיכר סדום. אתגר א. הנדסה בע"מ, רשות המים. דו"ח מספר ETR1911272a, 65 עמ'.
- הרפז, י., 1959. מעיינות כיכר סדום – סקר הנביעות שבין נחל אמציה ונחל הערבה. תה"ל, 5 עמ' + נספחים.
- לוי, א., 2023. סקר גיאוכימי משולב ERT + TDEM למיפוי תמלחות באזור מלחת סדום. המכון הגיאופיזי לישראל, דו"ח מס' 23/1083/306, 34 עמ'.
- מרכדו, א., 1975. חקירת תהליכים הידרוגיאוכימיים ככלי משלים לחיזוי שינויי מליחות באקוויפרים. דו"ח התקדמות מס' 1: מודל מליחות ומפלסים של מליחת נאות הכיכר. תה"ל.
- נאור, ה., מובשוביץ, מ., כץ, ד., 1985. הפקת מים מליחים לצרכים תעשייתיים מהאקוויפרים בכיכר סדום ובנחל אמציה. תה"ל.
- נאור, ה., גרניט, י., 1998. שדה השאיבה נאות הכיכר-כיכר סדום, תאור וחיזוי המצב ההידרולוגי והתפעולי של קידוחי ההפקה לשנת 2022, תה"ל, 18 עמ' + נספחים.
- נאור, ה., גרניט, י., צוריאלי, א., 2007. שדה שאיבה נאות הכיכר, עדכון המצב ההידרוגיאולוגי והניהולי של אקוויפר המילוי ושל הקידוחים לשנת 2006, הצעות להמשך פיתוח ותחזיות תפעול לחמש השנים הקרובות. תה"ל, 30 עמ' + נספחים.
- פינק, מ., 1994. סקר הידרוגיאולוגי באזורי עין עופרים ונאות הכיכר. בדיקת אפשרויות הגדלת ניצול משאבי מי תהום. תה"ל, 40 עמ'.
- פלישר, ע., 1998. ההידרוגיאולוגיה של ערבת סדום, דו"ח מסכם, עבור נציבות המים, 9 עמ' + נספחים.
- צוריאלי, א., 2016. תמונת מצב הידרוגיאולוגית עדכנית לאזור הערבה הצפונית וכיכר סדום. השירות ההידרולוגי, רשות המים, 10 עמ'.

צוריאלי, א., וולין, ל., 2016. סקר מעיינות וקידוחים באזור נאות הכיכר, 1.12.2016 - השרות ההידרולוגי, רשות המים, 8 עמ'.

Mazor, E., Rosenthal, E., Ekstein, J., 1969. Geochemical tracing of mineral water sources in the south western Dead Sea basin, Israel. *Journal of Hydrology*, V. 7(3): 246-275.

Shiftan, Z.L., 1961. New data on the artesian aquifers of the southern Dead Sea Basin and their geological evolution. *The Bulletin of the Research Council of Israel*, V. 10G: 267-291.

