



המכון הגיאולוגי לישראל
משרד האנרגיה

**תגובה התשתיית באגן ים המלח
לשינויים הטבעיים ומעשה ידי אדם:
מסגרת רב שנתית לניטור ומחקר 2018-2028
דו"ח מסכם לשנת 2022**

עורק: אייל שלו



תמונה שער: צלום אויר שפרק נחל הערבה

צילום: לiran בן משה
עיצוב: תרצה צוברי

תוכן העניינים

1	הקדמה
2	1. ניטור וניתוח התהליכיים בגוף המים
2	2. אינטראקציה של חזיות – סימולציות של קירור ים המלח מלמעלה
2	2.1. הקדמה
3	2.1.2 רקע תאורטי
5	2.1.3 תוצאות ומסקנות
6	2.1.4 יישום אפשרי לים המלח
8	תודות
9	1.2. שינויים שעתיים בקצב גיבוש מלח על קרקעית ים המלח בהשפעת האידי והקירור: תצפית שירה מצלמה תת ימית
9	1.2.1 רקע – חתכי מלח עבים ברקورد הגיאולוגי ובים המלח כאנלוג מודרני
9	1.2.2 שיטות
11	1.2.2.1 תוצאות ודיוון
13	1.2.3 סיכום ומסקנות
14	2. סיכון רعيית אדמה
14	2.1. גישה חדשה להערכת נזקים במבנים בודדים כתוצאה מרعيית אדמה, אזור מרכז-דרומ ים המלח
14	2.1.1 מבוא
17	2.1.2 מטרת הפרויקט
17	2.1.3 שיטות העבודה
21	2.1.4 תוצאות
27	2.1.5 דיוון
28	2.1.6 מסקנות
30	2.2. סמנים לשחזר תנועת סדימנטים לאורך מישורי גירה בתצורת הלשון והשלכות לבניית רקورد פליוסיסמי מהימן
30	2.2.1 מבוא
32	2.2.2 מטרת הפרויקט
32	2.2.3 דפורמציה של סדימנטים רכים
36	2.2.4 דיוון

2.3 מעקב אחר תנועות קром אופקיות ואנכיות באזור אגן ים המלח	39
2.3.1 רקע	39
2.3.2 GPS. שיטות- מדידה ועיבוד של נתוני תחנות ה-	39
2.3.3 GPS. תוצאות עיבוד נתוני ה-	41
2.3.4 דיוון	46
2.4. ניטור הפעולות הסיסמית וההידרואיסמית על העתקי ים המלח	47
2.4.1 רקע	47
2.4.2 בסיס נתונים	49
2.4.3 ניתוח ראשוני של הנתונים	52
2.4.4 תכנית להמשך	55
3. קritisת התשתיית יצירת בולענים חדשים לאורך חוף ים המלח	57
3.1 התנצלות והסעת סדמנטים דרך קארסט המלח כמנגנון משלים לשקיעות הקruk האינטרנציוניות במניפת נחל צאלים	57
3.1.1 הקדמה	57
3.1.2 השוואת בין שקיעות הקruk לפוטנציאל ההמסה של מי השיטפונות	60
3.1.3 התנצלות והובלת סדמנט במניפת צאלים	63
3.1.4 הערות לsicoms	65
3.2 בחינת הקשר בין האוכלוסיות המיקרוביאליות לבין כימיות המים בבולעני ים המלח - שנת מחקר שנייה	67
3.2.1 רקע	67
3.2.2 מטרות העבודה	68
3.2.3 שיטות	68
3.2.4 תוצאות	69
3.2.5 Sicoms והמשך עבודה	77
4. תנועת מי תהום, המסת מלח, והשפעות סביבתיות של ירידת המפלס	79
4.1 בחינת תבניות המסת במטריקס המורכב מלחה תחת תנאי זרימה שוניים	79
4.1.1 רקע	79
4.1.2 שיטות	79
4.1.3 תוצאות	80
4.1.4 מסקנות	82

5. התפתחות דינמית של הסביבה היבשתית והחופית לאורך ים המלח	83
5.1. הcronologia של שלבי התפתחות בקע ים המלח על פי תיארוך ס-Pb-U של משקעי קלציט פרטאי	83
83	5.1.1
85	5.1.2 שיטת עבודה
87	5.1.3 תוצאות
93	5.1.4 דיוון
5.2. הערכת הצמיגות של משקעים רכים (soft sediments) באגן ים המלח לשם מידול מנגנון הייצור של הסיסמיים בתצורת ליסאן	95
95	5.2.1 מבוא
96	5.2.2 צמיגות
97	5.2.3 חומרים ושיטות
101.....	5.2.4 תוצאות
104.....	5.2.5 מסקנות והמשך מחקר
5.3. זיהוי, מיפוי, וניתוח מורפומטרי של אירouri זרימת רסק (debris flows) לאורך מצוק העתקים	106
106.....	5.3.1 רקע
107.....	5.3.2 מטרות העבודה
107.....	5.3.3 אזור המחקר ושיטות למיפוי אירouri עבר
113.....	5.3.4 תוצאות
118.....	5.3.5 סיכום, מסקנות ועבודה להמשך
5.4. סירקולציה אטמוספרית ואזוריית קשורת הסעת חלוקים נחלית וחופית וגורמת להשכעה כיוונית של רכסי חוף ומיפויות שחף באגן ים המלח	119
119.....	5.4.1 הקדמה
122.....	5.4.2 שיטות
122.....	5.4.3 תוצאות ודיוון
5.5. בדיקת היתכנות להמסת וסילוק המלח מקצר המלח באמצעות המסה במילימטרים ומי רכז מהתפלת - קינטיקה של המסת הליט	128
128.....	5.5.1 הקדמה
128.....	5.5.2 שיטות
129.....	5.5.3 מהלך הניסויים ותוצאות
133.....	5.5.4 דיוון

134.....	5.5.5. השלכות על פרויקט קצ'יר המלח
5.6. הזנת מלח מקצ'יר המלח לנחל הערבה - הצעה להגנה מפני התחרותות הנחל ולהובלת המלח דרך הנחל לאגן הצפוני	137.....
137.....	5.6.1. רקע
137.....	5.6.1.1. אתגרים במרחב האגן הדרומי של ים המלח
138.....	5.6.1.2. רקע אזורי – הסביבה הגאולוגית, גאומורפולוגית ולימנולוגית
139.....	5.6.1.3. רקע תיאורתי ופער ידע
5.6.2. הצעה למחקר בנושא הזנת מלח לנחל הערבה - הגנה מפני התחרותות והובלת המלח לאגן הצפוני	142.....
142.....	5.6.2.1. מטרות המחקר
142.....	5.6.2.2. שאלות המחקר
143.....	5.6.2.3. גישת המחקר
143.....	5.6.3. צפי לישימות המחקר
144.....	מקורות

רשימת האיורים

7	פרופילים של גודל מהירות הזרימה, טמפרטורה, ריכוז מלח מומס, ריכוז גבישי מלח וצפיפות	איור 1.1.1.
8	פאנלים עליונים ותחתונים מראים פרופילי צפיפות אופייניים של שלושת אופני הזרימות שנצפו.	איור 1.1.2.
10	מערך המדידה בשדה.	איור 1.2.1.
11	הצטברות מלח על קרקעית האגם.	איור 1.2.2.
12	הצטברות המלח על קרקעית האגם בהשפעת האידיוי וקיורו עמודת המים.	איור 1.2.3.
15	אזור הפרויקט. ישראל ע"פ תאים סטטיסטיים (משמאלו). מרחב האזור הנבחן, כולל מוקדי ריעידות האדמה שנבחנו בפרויקט והישובים הנבדקים (מיינון).	איור 2.1.1.
20	דוגמא למדפת תואצת קרקע מרבית של תרחיש מזраה 3 - 7.5Mw.	איור 2.1.2.
23	סיכום מספר המבנים הניזוקים לפי דרגות הנזק (Slight, Moderate, None) (Extensive, Complete Tocazotot Loss Ratio (%)) עבור כל ישוב ועבור ששת התרחישים המבנים בשלושת היישובים שהושבו עבורים נזקים מבנים	איור 2.1.3.
24	המבנים להפעלת תרחיש מרובה סיכונים. לדוגמא, תרחיש המשלב אירוע של רעידת אדמה עם אירוע עוקב של רעידת משנה.	איור 2.1.4.
26		איור 2.1.5.
28		איור 2.1.6.

31	מפה טקטונית כללית המציגה את העתק ים-המלח ואת אתרי המחקר הממוקמים בסמוך לים המלח	.איור 2.2.1.
31	ציורי המכחשה של מודל "כשל רציף"	.איור 2.2.2.
32	תצלויות מנהל פרצים (א) ומミישור מצדה (ב)	.איור 2.2.3.
34	תיעוד של ייחסי גומלין בין מערכת של צמדי העתקים נורמאליים (אזור מצדה) ומישורי החלקה תת מקבילים.	.איור 2.2.4.
34	תיעוד של הכפלת חתך על ידי תנוצה לאורך מישורי החלקה מקבילים בזיקה עם העתק נורמלי	.איור 2.2.5.
35	תיעוד של ייחסי גומלין בין העתק נורמלי (נהל מפלט) ומישורי החלקה מקבילים	.איור 2.2.6.
35	תיעוד של מערכת קמטים והעתקים הפוכים אשר תחומיים בין שני מישורי החלקה מקבילים מעלה ומטה	.איור 2.2.7.
35	תיעוד של מערכת דיקרים קלסטיים שנוצרו בתהליך של הזוקה הגדוועים על ידי מישורי גזירה תת אופקיים שלו בקיימות ושבירה ההפוכה.	.איור 2.2.8.
36	תצלפית (נהל פרצים) המתארת תהליכי דפורמציה מורכבים	.איור 2.2.9.
37	איור המכחשה המסכם את הקריטריונים להבחנה בין ארועי החלקה	.איור 2.2.10.
38	מיפוי דיקרים קלסטיים מוסטיים לאורך שכבות תת-אופקיות שתועדו לאורך מספר תחנות במחושף בנחל פרצים.	.איור 2.2.11.
40	מפה המציגה את מיקום תחנות ה GPS.	.איור 2.3.1.
42	מפת מהירות תחנות ה GPS ביחס ללוח סיני.	.איור 2.3.2.
43	פרופיל מהירות תחנות ה GPS במקביל להעתק ים המלח לעומת המרחק מהעתק העתק הגבול המערבי (WBF) באזורי דרום אגן ים המלח	.איור 2.3.3.
44	מפת מהירות אנכית של תחנות GPS קבועות.	.איור 2.3.4.
45	סדרות זמן המציגות את השקיעה של תחנות MAS1-0 ו- DSPL.	.איור 2.3.5.
47	דוגמא להקלטה של רעידות טלה-סיסמיות בחישיבות סיסמיים ובמד לחץ מים.	.איור 2.4.1.
48	דוגמא לשימוש בקרוס-קורולציה ברעידות אדמה סיסמיות	.איור 2.4.2.
49	התחנה הhidrosismית בקידוח EZ10	.איור 2.4.3.
50	ממשק תוכנת אנטילופ המאפשר בדיקה של זמינות הנתונים	.איור 2.4.4.
51	מפות מיקום אירופי גשר 2022	.איור 2.4.5.
51	הימים בהם התבצע הניתוח הריאוני ובנויית הקטלוג הראשוני	.איור 2.4.6.
52	региונות החישנים לפי מגניתודה לרעידות למרחק של כ- 100 ק"מ.	.איור 2.4.7.
54	לחץ המים כפונקציה של המהירות הסיסמית האנכית	.איור 2.4.8.
56	מפת מיקום EZ10 ביחס לתחנות תרואה הקרובות וביחס לתחנות של רשות המחקה המיקروسיסמית על העתק יריחו	.איור 2.4.9.
58	מפת הפרשי גובהים של מניפת צאלים	.איור 3.1.1.
59	GBT מערכה אל מעלה עroz 14.	.איור 3.1.2.
59	נקודות הבלתיה (עיגולים), ממוספרים על פי הערווצים) והנביעה (ריבועים) של מי השיטפונות במnipת צאלים	.איור 3.1.3.
60	נפח אזורי השקעה והבולענים שהתקבלו מהפחחת המודלים הטופוגרפיים השנתיים	.איור 3.1.4.
62	השווואה בין נפח האזורי השוקעים ופוטנציאלי המסת המלח של מי השיטפונות	.איור 3.1.5.
62	מפות שינויים בגובה פני השטח על גבי מפת תבליט מוצכלת	.איור 3.1.6.

64	עדויות להתנזות ולהתפשטות לטרלית וشكיעות לכיוון מרכזי הבולענים בסדימנטים החרסיטיים	.3.1.7.
64	יחס נתרן לכBOR כנגד חרוטי בז אзор הנביעה בקרקעית הבולען	.3.1.8.
70	מיוקם אזור המחקר	.3.2.1.
71	השתנות בולען 9 עם הזמן	.3.2.2.
71	התפלגות הארכיאות והחידקים בבריכות בבולענים	.3.2.6.
72	יחס נתרן לכBOR ומגנזום לסידן כנגד הצפיפות במי הבולענים בעין גדי	.3.2.4.
74	הרכב איזוטופי של חמצן (O ¹⁸) (δ) כנגד צפיפות מי הבולענים	.3.2.5.
75	התפלגות הגנומים של הארגניזמים התאים בבריכות הבולענים	.3.2.6.
76	פילוגנזה של הוירוסים בבולענים יחד עם וירוסים ידועים	.3.2.8.
76	apiroן קשרים גנטיים בין וירוסים מהבולענים לוירוסים ממגاري מידע קיימים	.3.2.9.
77	התפלגות שכיחות הוירוסים בבולענים.	.3.2.10.
80	תיאור סכמטי של מערכת הניסוי	.4.1.1.
81	tabniot ha-masa tahat sefikot shel 4 mil le-shua	.4.1.2.
81	הצילומים מתארים סדרת זמן של חידרת צבע לתוך מטריצת המלח	.4.1.3.
84	שחוור הכרונולוגיה של התפתחות החלל על ידי שימוש במשקעי מערות	.5.1.1.
85	תיאור הקשר בין מרכיבים קרסטיים ופעילות טקטונית של התמורות אנטית	.5.1.2.
86	מחשופים של משקעים פרטניים במרכז ודרום ישראל	.5.1.3.
88	מערת בית חגי	.5.1.4.
91	מערת עטרות	.5.1.5.
95	צילום של חתך טבעי בסדימנטים של תצורת לישאן באזר נחל פרצים	.5.2.1.
98	אתרי דיגום סדימנטים מתחורת צאלים	.5.2.2.
100	מערכת הניסוי.	.5.2.3.
100	מהלך הניסוי.	.5.2.4.
101	מדידות מאץ גזירה כתלות בקצב גזירה של קטשוף במכשיר ה-UMT ובראומטר	.5.2.5.
102	מאץ הגזירה כפונקציה של הזמן עבור ניסוי קטשוף ודטריטוס	.5.2.6.
103	מאץ הגזירה כפונקציה של קצב המעוות של דטריטוס	.5.2.7.
104	מאץ הגזירה כפונקציה של קצב המעוות של דטריטוס	.5.2.8.
108	מפת אזור המחקר	.5.3.1.
109	הפרש הגבהים בין מודלים טופוגרפיים עוקבים לאורך כביש 90	.5.3.2.
110	דוגמה לאזר בשטח המיפוי בו סומנו 40 פוליגונים לחישוב ערכי הסטיה האנטית	.5.3.3.
111	דוגמה לבחינת שיפוע המדרון על הסטיה האנטית	.5.3.4.
112	קובצת DFs באזר שבין עין-פשה לנחל קומראן	.5.3.5.
113	היסטוגרמה המציגת את שטחי אגני הניקוז של העוזרים בהם היו DFs.	.5.3.6.
114	מד ZDF כפ שזורה ומופת על גבי מפת ההפרשים.	.5.3.7.
114	נפח המשקעים לעומת נפח המקור.	.5.3.8.
115	מנגנון הכשל בתעלת כתלות במרקח המקור ממפל במעלה העוזץ.	.5.3.9.
118	חתך אורך הנמשך מעלה המזוק ועד כ-35 מטר למרגלות משקעי ה-DF.	.5.3.10.
119	סכמה של עקרונות הובלת הסדימנט בעוזץ ובוחף כפי שנידונו בעבודה זו	.5.4.1.
120	אזור המחקר	.5.4.2.

123	תצלויות מהסופה שהתקיימה ב-7 לינואר, 2018	.איור 5.4.3.
124	rhochot sinopfiot rochot azoriot	.איור 5.4.4.
125	מניפות סחף ורכסי חוף משוכבים צפונה מהסבירה המודרנית והקדומה בבקע ים המלח	.איור 5.4.5.
128	התפלגות גודל גרגר של ההליט מקצ'יר המלח של בריכה	.איור 5.5.1.
131	מוליכות חשמלית כנגד כמות המלח שהומסה בכל ניסוי.	.איור 5.5.2.
131	צפיפות כנגד כמות המלח שהומסה בכל ניסוי.	.איור 5.5.3.
132	כמות המלח שהומסה כפונקציה של זמן בכל ניסוי.	.איור 5.5.4.
133	קצב ההמסה ביחידות של גרם הליט לשנייה לקילוגרם תמישה מול המרחק משיווי משקל	.איור 5.5.5.
139	מפת אורתופוטו של דרום האגן הצפוני, מיצר לינטש, והאגן הדרומי של ים המלח	.איור 6.1..5

רשימת הטבלאות

19	ששת תרחישי ריעידות האדמה	טבלה 2.1.1.
21	דוגמא לתוצאות נזק המתקבלות, בצורה הסתברותית ומסוגות לפי רמת הנזק	טבלה 2.1.2.
22	סיכום תוצאות הנזק המבנוי של ששת התרחישים	טבלה 2.1.3.
24	תוצאות (%) עברו כל ישב וסיכום כל התרחישים	טבלה 2.1.4.
25	דוגמא של 5 דרגות נזק ברמת המבנה הבודד	טבלה 2.1.5.
52	איירועי גשר וכיידם נקלטים בחישנים השונים של EZ10	טבלה 2.4.1.
55	איירועים סיסמיים שאינם קשורים לגשר	טבלה 2.4.2.
52	איירועי גשר וכיידם נקלטים בחישנים השונים של EZ10	טבלה 2.4.1.
61	נפח הגאות בשיטפונות הבודדים, השנתיים, ופוטנציאל המשט המלח השנתי	טבלה 3.1.1.
90	גילים ראשוניים של קלציט פרטאי	טבלה 5.1.1.
102	תוצאות המדידות של צמיגות קטשוף היין בשני מכשירים שונים	טבלה 5.2.1.
103	תוצאות מדידת צמיגות לדטריטוס מעורבב עם מים מזוקקים ומי ים המלח	טבלה 5.2.2.
129	פירוט מערכת ניסויי המשט התרמודינמיים והקינטיים.	טבלה 5.5.1.
130	הרכב היוניים העיקריים של התמיסות מהnisויים התרמודינמיים והקינטיים בגמר המשט הימי	טבלה 5.5.2.

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, לסייע לבניים או לאוכלוסייה, ולהעיר את ההשפעות הצפויות של תעלת הימים ים סוף - ים המלח וקצר המלח בבריכות האידוי על גוף המים וסביבתו. המחקר והnitור מתבצעים בחמשת תחומיים עיקריים: תהליכיים בגוף המים, סיכון רעידות אדמה, קריסת התשתית ויצירת בולענים, והפתחות דינמית של הסביבה היבשתית והחופית. המכון הגיאולוגי שואף לכך שמצאי המחקר והnitור יהיו בעלי משמעות יישומית ככל האפשר וישמשו בסיס לתוכניות הפיתוח באזורי. המחקר החל בתחילת שנות 2008 בדגש על אי יציבות התשתית, הוארך בשנת 2012 ב 5 שנים נוספות והורחב בתחום ניטור שונים של גוף המים, ובשנת 2018 הוארך ב 10 שנים נוספות. ד"ר זה מסכם את תוכניות המחקר לשנת 2022.

הדר' כמו גם סדרת הדרכות הקודמים מהשנים 2008 עד 2021, ונספחים שכולים מאמריים ודרכות מומחה של נושאי הניטור והמחקר, זמינים באתר המכון הגיאולוגי או אצל המחברים.

איל שלו
המכון הגיאולוגי

1. ניטור וניתוח התהליכיים בגוף המים

1.1. אינטראקציה של חזיות – סימולציות של קירור ים המלח מלמעלה

עוזתי, ר.^{1,2}, מייברג, א.³, רובינשטיין, ש.², לנסקי, ג.ג.¹

¹ המכון היגיולוגי לישראל.

² מכון רקח לפיזיקה, האוניברסיטה העברית בירושלים.

³ המחלקה להנדסת מכונות, אוניברסיטת קליפורניה בסנטה ברברה, ארחה"ב.

⁴ המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים.

1.1.1 הקדמה

ים המלח הינו אגם מלוח, שבשוריים האחרונים נמצא בעקבות מים כתוצאה של תפיסת מים (Lensky et al. 2005); כתגובה למחסור במים, מפלס האגם יורד, מליחות המים עולה, וצפיפות המים בפני השטח עולה מה שמטקין את יציבות עמודת המים (Armon et al., 2019). החל מראשית שנות ה-1980 ים המלח עבר ממצב של אגם מרוומיקי (שבבה עליונה של מי האגם מהולה יותר ועמודת מים יציבה של השנה) לאגם הולומיקי שבחודשי החורף נמצוא במצב של אי יציבות מתמדת בשל המשך אידיוי מפני המים בתוספת של קירור פנוי המים. בנוסף, האגם נמצא ברוויה למלח (NaCl) וכתוצאה מכך, ככל שמלס האגם יורד – מצטברים משקעים מלא על קרקעית האגם (Sirota et al. 2016, 2021) והם שוקעים בעיקר בחורף כתוצאה של קירור והמשך האידיוי (Sirota et al. 2016) והם שוקעים בגבישים דקים מתוך עמודת המים אל הקרקע (Salt Giants) – זה של אגם בתעוקה, עם השלכות להבנת תהליכיים שהובילו יצירת "ענק מלח" (Salt Giants) – כאשר ברור שחרורה הבנה של תהליכיים אלו בספרות (Roveri et al. 2014) וכן השלכות הנדסיות סביבתיות – ככל שמדובר על הנחת תשתיות בקרקעית ים המלח ולאורך עמודת המים שלו. פרויקט זה מביא רעיון לחקר תהליכיים אלה באמצעות יצירת מודל נומרי חדיש ומCPF המאפשר ניתוח פיזיקלי של הדינמיקה של עמודת המים והמשקעים כמקרה אחד. המטרה היא לחזור מקרה של קירור עמודת מים מפני המים, כפי שקרה בחורף. במקרה זה המים בחלק העליון נעשים על-רוויים למלח, גבישי מלח קטנים (עד קוטר מילימטר) נוצרים בעמודה ושוקעים לקרקעית ולהקיש מכך על הקורה בים המלח בחורף (Sirota et al. 2017). בנוסף, כיוון שהמים מתקררים מלמעלה הם מתערבלים ומסיעים אתכם את גבישי המלח ונשאלת השאלה כיצד ערבול זה משפייע על שקיעת הגבישים. תהליך זה של גיבוש וערבול מניע את יצירת שכבת המלח בקרקעית האגם אך הוא קשה מאוד למדידה וניטור משלב התמיisha עד שלב שכבת המלח. לכן אנחנו נuzziרים בסימולציות נומריות של משוואות הרצף, ההסעה והdifוזיה שمدמות את התופעה הזאת. סימולציות אלה לוקחות בחשבון: (1) את השפעת הטמפרטורה, ריכוז המלח המומס ורכיבי הגבישים (C,T,S) על צפיפות

המים (2) את שקיית הגבישים ביחס למים עצם ויצירתם של גבישים כתלות בטמפרטורה המים בכל מקום בעמודה, וכן יכולות לתאר את עירובם המים כתוצאה מקרור מלמעלה ואת יצירת והמסת גבישי המלח מתוך העמודה עקב על-רויה תוך כדי הזרימה ועירוב המים. במחקר זה אנו בוחנים מודל נומרי מكيف וחידש הפותר סט משוואות מצומדות המתארות זרימות מים מלוחים עם גבישי מלח השוקעים מטה תוך כדי הזרימה ומגדירים את היישום של מודל זה על מערכת כמו ים המלח. אחרי בוחינת המודל על זרימות מורכבות עם פתרונות אנלטיים מוכרים ושחזרו עבודות נומריות קודמות אנחנו בוחנים מקרה חדש שלא מודל עד היום של קירור מלמעלה של עמודה דו-מידית של מים מלוחים ברויה בכדי לענות על השאלה (1) מהו אופי הזרימה במערכת זו וכי怎ם הגבישים משתלבים בזרימה זו ? (2) מהם הפרמטרים המשפיעים על הזרימה וכי怎ם כל פרמטר משנה את הזרימה ? (3) מהו אופי הזרימה תחת הפרמטרים הספציפיים המתקאים בים המלח ? דוח זה מדגים גישה חישובית-תיאורטית שיכולה לתת מענה לעוד בעיות יסודיות בהבנת הקשר בין התנאים הסביבתיים לייצור משקעי מלח, דרך הבנה של ההידרודינמיקה של תמישה וגבישים.

1.1.2 רקע תאורטי

כדי לתאר את שדה הזרימה בעמודת מים מלוחים, علينا לפתור את משוואות הזרימה (Navier-Stokes), שמתארות הקשר בין הפרש הלחצים בנוזל, הפרש הצפיפות, ושדה הזרימה על נזירותיו. כמו כן פותרים את משוואת שימור המסה (משוואת הרציפות לנוזל אי-דיחיס). את המשוואות אלו פותרים תחת קירוב המזינה נזירות מרחביות של הצפיפות באיברים שאינם מצומדים קבועה הכבידה תחת הנחה של שינויים קטנים בצפיפות (Boussinesq approximation), מצב אשר אכן מתקיים בים המלח).

$$\nabla \cdot u = 0$$

$$u_t + (u \cdot \nabla)u = -\nabla p_{rgh} - (g \cdot y)\nabla\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right) + \nu\nabla^2u$$

כאשר u מייצגת את המהירות הוקטורית של המים בדו-מימד, הפרש הלחצים ביחס ללחץ הידростטי, מנורמל בצפיפות בקרה, הוא $\frac{p - \rho gy}{\rho_1}$ כאשר p הוא לחץ הכלול של המים, g הוא קבוע הכבידה ו- y הוא הצמיגות הקינמטית של המים.

הצפיפות קבועה על פי משוואת המצב (equation of state) כפונקציה לינארית של השדות הסקלריים T, S, C

$$\rho = \rho_1 - \alpha(T - T_1) + \beta_S(S - S_1) + \beta_C C$$

כאשר ρ_1, T_1, S_1 הם ערכי ייחוס ו- β_S, β_C, α הם קבועי ההתרחבות (ראה תיאור מפורט ב-Ouillon et al. 2019)

משוואות אלה נפתרות ביצימוד עם שלוש משוואות אדבקציה-דיפוזיה עבור T, S, C . תחת הנחה שכל גביש שוקע ב מהירות סטוקס אחידה ν , השדה של ריכוז הגבישים, C , כולם שוקע ב מהירות אחידה זו.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \kappa_T \nabla^2 T$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla S = \kappa_S \nabla^2 S$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{u} + \mathbf{v}_s) \cdot \nabla C = \kappa_C \nabla^2 C$$

כאשר $\kappa_C, \kappa_T, \kappa_S$ הם קבועי הדיפוזיה של חום, מליחות, ורכיב גבישי המלח. המסילות של המים קבועות כפונקציה לינארית של הטמפרטורה

$$Se = Se_1 + \sigma_{Se}(T - T_1)$$

כאשר Se_1 היא מסילות ייחוס בטמפרטורה T_1 . תהליך גיבוש והמסת המלח נלקח בחשבון בכל צעד זמן ובכל נקודה למרחב כך שערכי המלח המומס והגבישים מעודכנים בצורה הבאה: $= S^*(T)$

$$C^*(T) = C + S - S^*(T), \min(S + C, Se(T))$$

את מערכת המשוואות הלו פתרנו נומריית תוך שימוש בחבילת OpenFOAM אחרי שהרחבנו אותה כך שתתפרק ביצימוד למשוואות הזורימה את שלושת משוואות הדיפוזיה, את משוואת המסילות ואת תהליכי גיבוש והמסת המלח. הסימולציות נערכו עבור מערכת מרחבית דו-מימדי עם תנאי התחלתה של טמפרטורה ומלייחות אחידות כאשר התמיסה ברזואה למלח $= S(t = 0)$ ($Se(t = 0)$ ותנאי השפה בפני המים הוא של קירור או גרדיאנט טמפרטורה אחיד בזמן ומשתנה

במרחב באופן אקראי $\left(\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} \right|_0 (1 + \epsilon(random[0,1] - 0.5))$ כאשר ϵ הוא אמפליטודה הרעש (הנקחת כמספר קטן רק לשם סיוע לייצור אי-היציבות של העמודה) ו $random[0,1]$ מיצר מספר רנדומלי מהתפלגות אחידה בין אפס לאחד.

1.1.3 תוצאות ומסקנות

הסימולציות נועדו לבחון את התגובה הדינמית של הזרימה ויצירת גבישים והאינטראקטיות ביניהם, במצב של קירור מלמעלה. ביצעו מספר רב של סימולציות שבחן בחנו השפעת תנאי קירור מפני המים ($|_0 \frac{\partial T}{\partial y}$), מהירות שקיעה של הגבישים (s_u) וקבוע הדיפוזיה השונים. מפרמטרים אלה עלולים

פרמטרים חסרי ייחדות בצורה הבאה

$$A = \frac{\partial T}{\partial y} |_0 \frac{\kappa_T}{\nu_s(T_0 - T_1)}$$

$$\tau = \frac{\kappa_S}{\kappa_T} = \frac{\kappa_C}{\kappa_T}$$

הראשון (A) מתאר יחסים בין קצב קירור ומהירות השקעה, מנורמל כך שייהי חסר ייחדות, והשני (τ) מתאר את היחס בין קבוע הדיפוזיה של מלח מומס וגבישים (NELCH כזהה בעובדה זו) לזה של הטמפרטורה.

מצאו שעם הקירור נוצרות בשפה העליונה שתי חזיות של צפיפות גבואה מעל צפיפות נמוכה, כל אחת מתקדמת למטה בקצב שונה: האחת היא חזית טמפרטורה קרה שבהתחלת מתקדמת באופן דיפוזיבי והשנייה היא חזית של גבישי מלח שמתקדמת מטה במהירות s_u כפי שנראה באנל העליון באIOR 1.1.1. לאחר זמן מסוים, החזית התרטזית נעשית קונבקטיבית, מהירות המתקדמות שלה מטה נעשית מהירה יותר והיא מתלבצת עם החזית של הגבישים ויוצרת ערבול חדש של הגבישים כפי שנראה באנל התיכון של AIOR 1.1.1.

במקרים אחרים בהם מהירות השקעה של הגבישים היא גבוהה מספיק ביחס לקירור, גם אחרי שהחזית התרטזית נעשית קונבקטיבית, החזית התרטזית לא תפגש אותן והגבישים ישקעו ללא ערבול עד הקרקע (אנלים ימניים באIOR 1.1.2).

מקרה שלישי הוא כאשר מהירות השקעה איטית מאוד ביחס לקירור והגבישים מתערבלים ביחד עם המים כבר מההתחלת. במקרה הגבישים מתערבלים עם החזית התרטזית כבר מהשלבים הראשונים של הזרימה (אנלים ימניים באIOR 2).

במבט כולל יותר, סיוגנו את אופי הזרימה לשלוות האופנים הבאים:

- (1) זרימה בה שתי חזיות קיימות לכל זמן (אנלים אדומיים באIOR 1.1.2). במקרה זה מהירות השקעה של הגבישים זהה למהירות של גביש בודד (מהירות סטוקס).
- (2) שתי חזיות קיימות מהתחלת החזית התרטזית נפגשת עם זאת של הגבישים והשתים מתלבצות (אנלים כחולים באIOR 1.1.2). במקרה זה מהירות השקעה האפקטיבית של הגבישים, כיוון שהם מושעים בעוזרת החזית התרטזית הקונבקטיבית, היא מהירה ממהירות השקעה של גביש בודד.

(3) חזית אחת קיימת בכל זמן (פאנלים ירוקים באירור 1.1.2). בדומה לאופי 2) מהירות השקיעה האפקטיבית תהיה מהירה ממהירותו של גביש בודד.

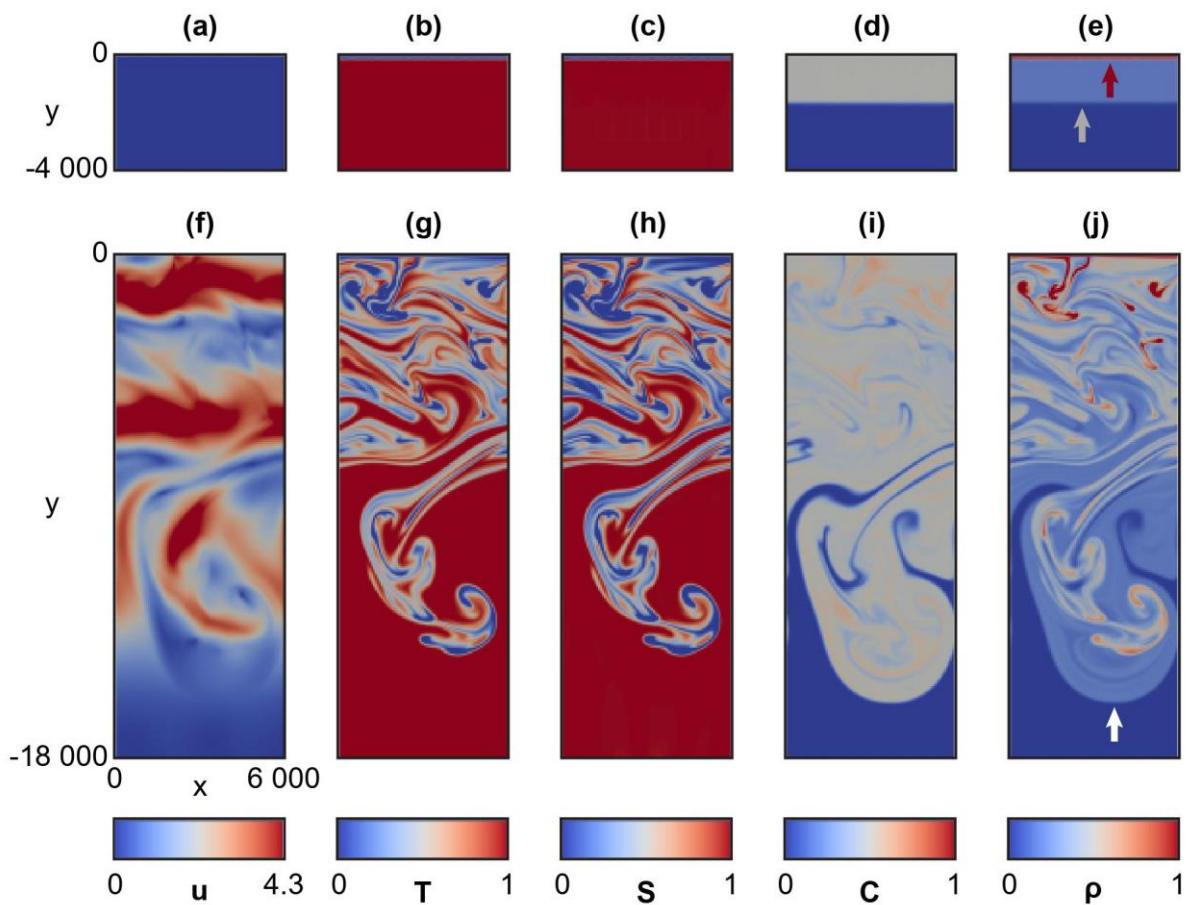
בדקנו איזה אופי זרימה יש עבור ערכים שונים של α , A והتوزעות מוגנות כדיארמת פאוזות של מצבי היציבות והופעת חזיות הקירור והגבוש, באירור 1.1.2. מדיאגרמת הפאוזות ניתן לראות כי הפרטנר A הוא הפרטנר המרכזי ששולט על אופי הזרימה ונitinן לשיקע לערכים מסוימים שלו אופי התנוגות אחד מבין השלושה שצווינו. ההשפעה של הפרטנר α על הזרימה היא כזאת שככל שהדייפוזיה של הטמפרטורה גבוהה יותר ביחס לקריסטלים (α קטן יותר) המערכת תעדיף אופי החנוגות (1) או (2) על פני (3); ניתן לראות זאת לפי שהשתה המשויך אופי 1 ו-2 גדול יותר ביחס ל-3 באירור 1.1.2 מאשר α קטן. הסבר לכך הוא שהדייפוזיה המהירה של הטמפרטורה גורמת למריחה של החזית התרמלית, דבר שמקבב את הזמן בו היא נעשית קונבקטיבית והוא מתחילה לנوع מהר יותר משלב הדיפוזיבי רק בזמןנים מאוחרים יותר. למרות זאת, ההשפעה הנכפית של ערכים שונים של α היא קטנה.

1.1.4 יישום אפשרי לים המלח

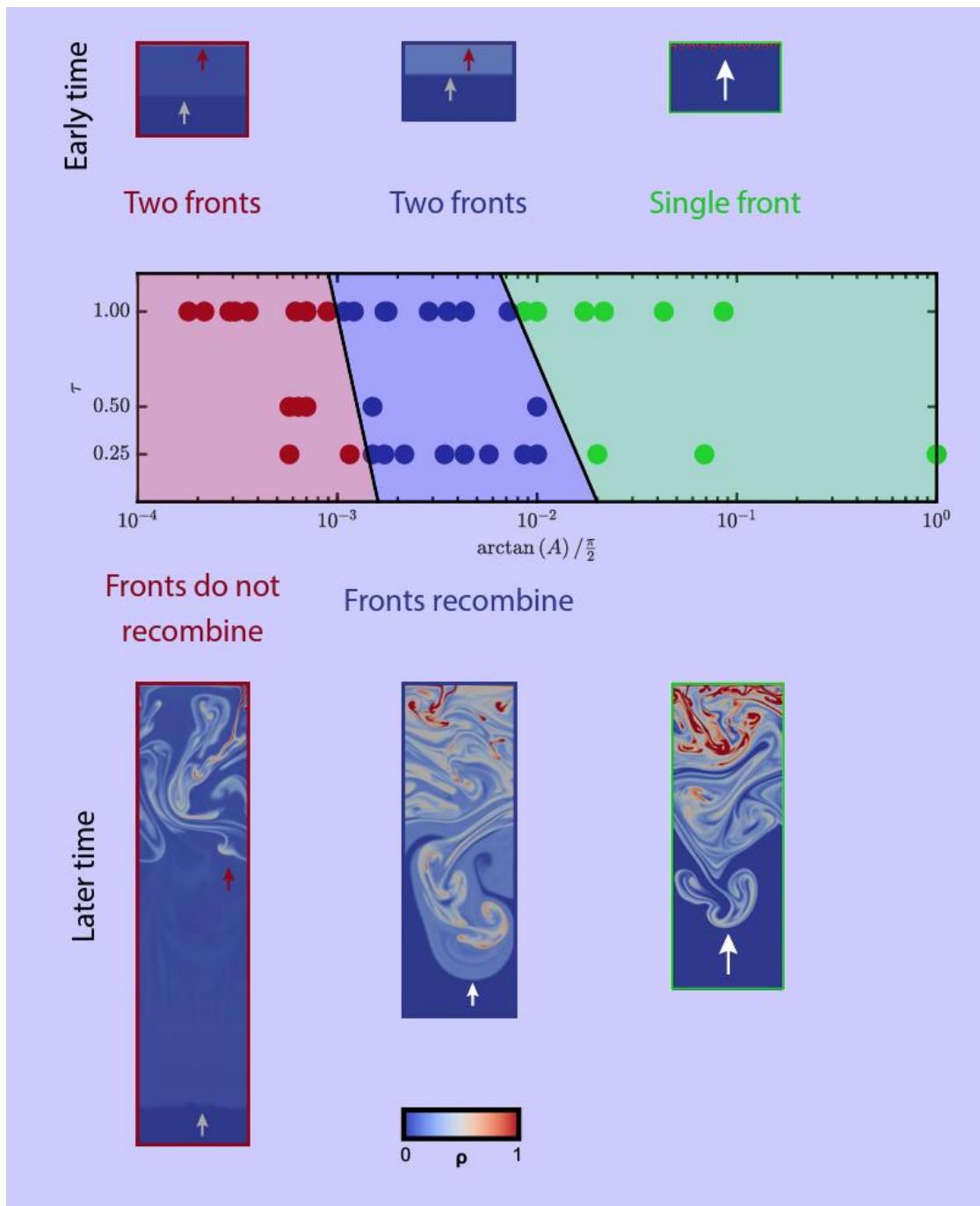
מדידות שטח מים המלח ניתן להוציא את הפרטנרים α_0 ו- α_s (Sirota et al., 2021, Arnon et al. 2016, Lensky et al. 2013). תחת הנחה שהגבישים שוקעים במהירות סטוקס המתאימה לקוטר ממוצע [mm] – 0.05 – 0.5, יש להסיק כי התנאים בים המלח, בהם ישנו קירור מהיר, כגון שקעה בחורף, אנו צופים שתיווצרנה שתי חזיות של ציפויות שמתקדמות מטה כל אחת בנפרד ולאחר הגעתן לעומק של כמה מטרים בודדים, החזית התרמלית תתלבד עם חזית הגבישים ותעוררן אותם ומהירות השקיעה האפקטיבית של הגבישים תהיה מהירה יותר ממהירות השקיעה של גביש בודד.

עבודה זו מראה את החשיבות של מודל הלוקח בחשבון את הסעת הגבישים עם הזרימה, כפי שעולה משלשות אפיוני הזרימה השונים שמופיעים כבר בעיה כה בסיסית של קירור عمودת מים רוויה למלח. עבודה זו מראה שבמקרה של גוף מים בצורת אגם – בין אם המלח או 'ענק מלך' מה עבר הגיאולוגי, אשר קרקייעתם נתווה ולא שתווה, החזית התרמלית הלוקחת אליה גבישים יכולת לשיקוע שכבת גבישי מלך דזוקא באזורי העומקים בעוזרת זרמי כבידה, אך יש צורך בסימולציות המשך ותצלויות על מנת לבחון מהי ההשפעה? האם העיבוי של שכבות המלח צפוי להיות לכיוון החלק העמוק או הרדוד? ובכמה?

עבודת המשך זו תוכל לחושף רבות על כיצד התנאים בחורף משפיעים על היוזניות שכבת המלח בקרקעית אגם כתלות בעומק عمودת המים והעובדת שהקרקעית נתווה וכן גם עבודות המשך נומריות וגם מדידות בשדה נערכות ביום אלה. כבר מעובדה ראשונית זו ששם לה למטרה לפתח כלי למקרה כללי יותר מים המלח וענק מלך' התואמים שלו, ניתן להסיק רבות על אופי השיקוע של הגבישים באגמים אלה.



איור 1.1.1. פרופילים של גודל מהירות הזרימה, טמפרטורה, ריכוז מלח מומס, ריכוז גבישי מלח וצפיפות (משמאלי לימין בהתאם) בזמן מוקדם של סימולציה (פאנלים עליונים) ומאוחרים (פאנלים תחתונים) עבור המקרה בו בזמן מוקדם יש שתי חזיות צפיפות - אחת כתוצאה מקירור ואחת כתוצאה מגיבוש גבישים ששוקעים מטה (חצים אדום ואפור בהתאם בפאנל e). בזמנים מאוחרים החזית התרמלית שנעשית קונקטיבית, מתלכדת עם חזית הגבישים ומערבלת אותן (חץ לבן בפאנל j).



איור 1.1.2. פאנלים עליונים ותחתונים מראים פרופילי צפיפות אופייניים של שלושת אופני הזרימות שנצפו. חצים מעידים על חזיות – אדום עבר חזית תרמלית, אפור עבר חזית גבישים ולבן עבר חזית שהתלכדה. באנל המרכז דיאגרמת פaza מהולקת לצבעים – אדום עבר אופי 1 – שתי חזיות שליעולם לא מתלכדות, כחול עבר 2 – שתי חזיות שמתלכדות זמן מה אחרי שהתרמלית נעשית קונקטיבית וירוק עבר 3 – חזית אחת קיימת בכל זמן.

תודות

הפרויקט ממומן פרויקט ים המלח של המכון הגיאולוגי הממומן על ידי משרד רה"מ והקרן הבאות: הקרן המדעית למדעים ISF-18/1471 – נדב לנסקי, והקרן הדו לאומיות ישראל ארחה"ב וקרן המדעים הלאומיות של ארחה"ב 2019/637-BSF-NSF – נדב לנסקי ואקרט מייברג.

1.2. שינויים שעתיים בקצב גיבוש מלח על קרקעית ים המלח בהשפעת האידוי והקירור: תצפית ישירה מצלמה תת ימית

מור, ג. ^{1,2}, נוי, ג. ^{1,2}, אייל, ח. ^{1,2}, סIROTA, ע. ^{1,2}, עזرتיה, ר. ^{1,2}, לנסקי, ג. ^{1,2}

¹ המכון הגיאולוגי לישראל.

² המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים.

1.2.1 רקע – חתכי מלח עבים ברקورد הגיאולוגי ובים המלח אנלוג מודרני

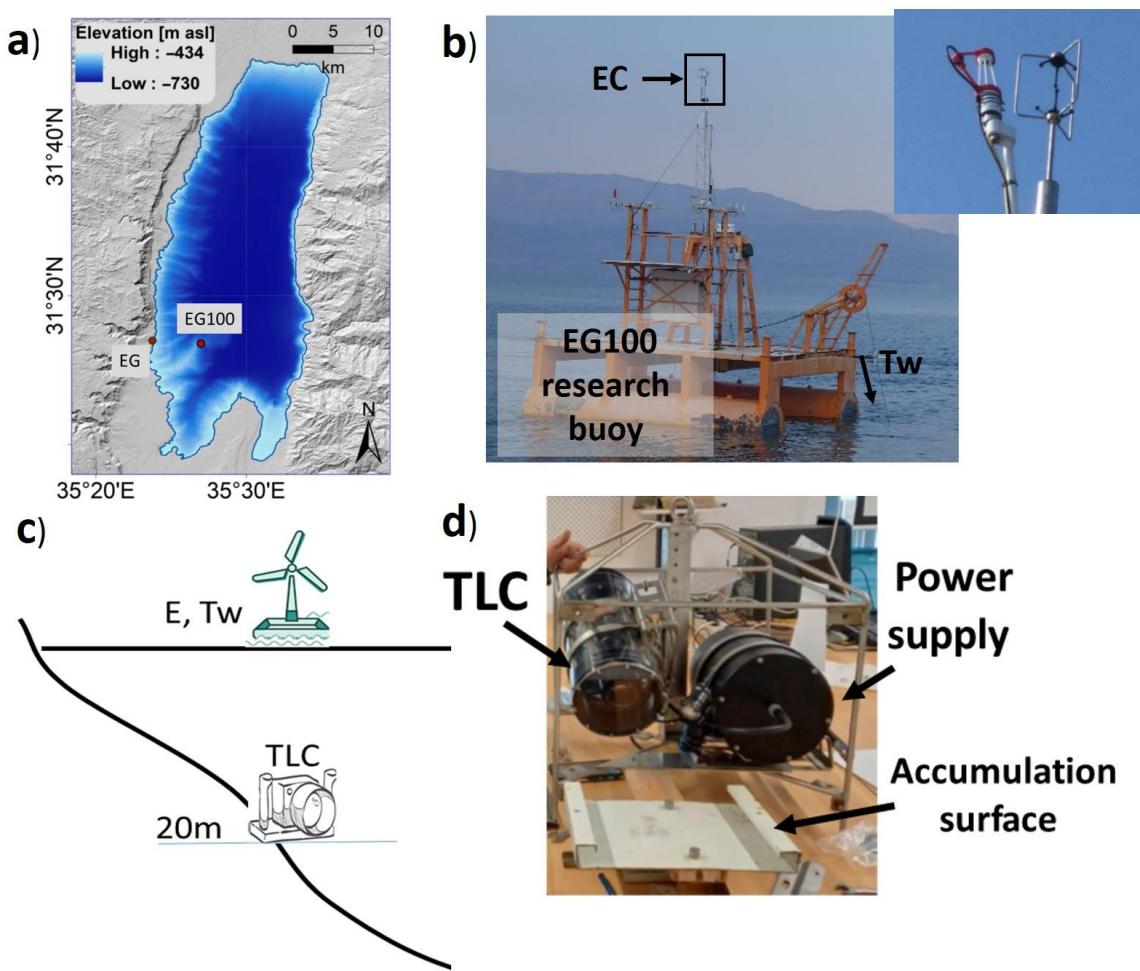
משקעים מלח עבים הושקעו ברכף הסלעים של כדור הארץ (Kozary et al., 1968; Ronov et al., 1980, מגופי מים عمוקים ומלוחים מאוד (Schmalz, 1969; Warren, 2010) ביום, המיקום היחידי בכדור הארץ שבו ניתן ללמוד על הקשר בין גיבוש המלח מגוף מים עמוק לאילוצים הסביבתיים השונים, הוא ים המלח (Sirota et al., 2016, 2021). בעשרות האחרונים, ים המלח נמצא בגראון מים מתמיד, דבר המוביל לירידת מפלס מהירה של כמטר בשנה, עליה במיליחות המים והשקעה של כ-0.1 מטר מלח על קרקעית האגם בכל שנה. בשנים האחרונות, בוצע מחקר אשר בוחן את גיבוש המלח הפעיל בים המלח ותוודו שינויים עם העומק והעונה באופי המלח המושקע (Sirota et al., 2016, 2017, 2020, 2021). גיבוש המלח (דרגת הרוויה) תלוי במאזן המסה והחומר של ים המלח. מלח ישקע בעקבות התאדות מים (עליה במיליחות) או קירור (ירידה ברוויה) או שילוב של שני התהליכים. רוב המלח מצטבר במהלך תקופה החורף, שבה נמשך האידוי ויישנו קירור של עמודת המים, במצב זה עמודת המים מעורבלת לגמרי (אחדות לאורך כל עמודת המים במאפייני התמלחת- טמפרטורה, מליחות וצפיפות) (Arnon et al., 2016; Hamdani et al., 2018; Sirota et al., 2016, 2017, 2020, 2021). מניתוח של חתך המלח אשר הושקע בעשרות האחרונים ונחשף לפני מספר שנים, ניתן להראות שגיבוש המלח במהלך החורף אינו אחד, ככל שניתן לזהות מחתך הסלעים של המלח (Sirota et al., 2021). כמו כן, מדידות ישירות של עמודת המים והאידוי מגוף המים לאורך השנים האחרונות, ניתן לקבוע שגם קצב הקירור במהלך החורף ומהילך האידוי מפני המים אינו אחד, שינויים אלו מתחדרים במשך שעות (Lensky et al., 2018; Mor et al., 2018) עד ימים (בנוסף לשינויים עונתיים, Hamdani et al., 2018).

בעבודה זו נתמודד עם השאלה, האם השינויים השעתיים הללו בקצב הקירור ובקצב האידוי במהלך תקופה החורף יכולים להוביל לשינוי בקצב גיבוש המלח על קרקעית האגם? והאם ניתן להעריך את השוני בגיבוש המלח הצפוי בעקבות השינויים באידוי מגוף המים? ניתוח המבחן מבוססת בעיקר על תצפיות ישירות מים המלח שבוצעו על ידי פיתוח חדש של מצלמת קיטועי זמן תת ימי אשר מאפשרת לנו לראשונה לאפיין את גיבוש המלח הפעיל על קרקעית האגם ברזולוציה שעטנית, במקביל למדידת האילוצים הסביבתיים-קצב האידוי וקצב הקירור של עמודת המים.

1.2.2 שיטות

בכדי לבחון את הקשר שבין שטף האידוי בפני המים, קצב הקירור בעמודת המים וקצב הצלבותות המלח על קרקעית האגם מדדנו את שלושת הפרמטרים הללו במקביל במהלך ה- 13-25.1.2022,

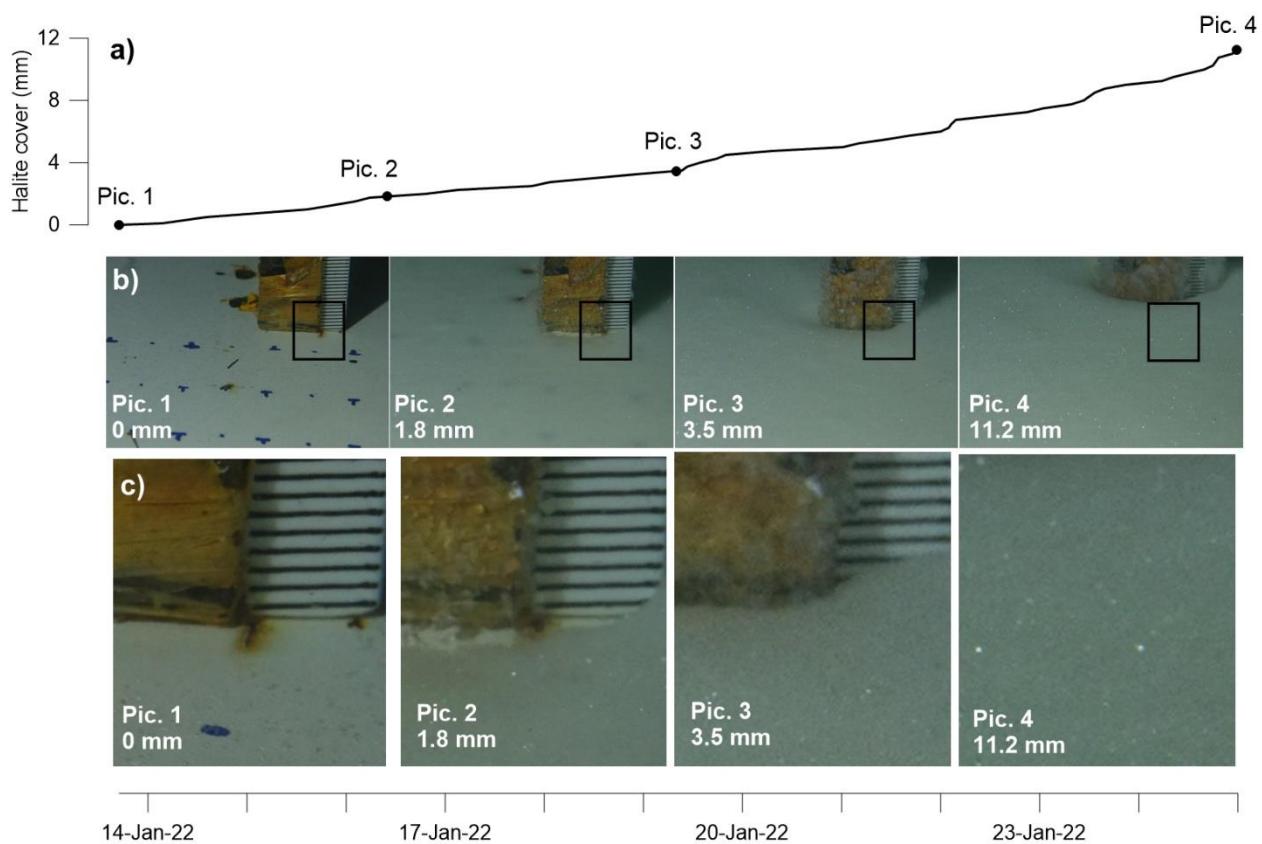
בתוך ים המלח בעומק מים של 20 מטרים, מזרחית לחוף עין גדי (איור 1.2.1a). (1) האידיומי פני המים נמדד על ידי מערכת eddy covariance (EC), הממוקמת על גבי מצוף המחקר עין גדי 100 (איור 1.2.1b), להסבירים נוספים ראה Hamdani et al., 2018. (2) טמפרטורת המים נמדדה על ידי מד טמפרטורה בעומק 20 מטר (איור 1.2.1c). (3) בכך למדוד את קצב הצטברות המלח על קרקיית האגם פיתחנו מערכת חדשה אשר מאפשרת לצלם בקיוטויי זמן את הצטברות המלח (איור 1.2.1c,d). המערכת בנויה מצלמה (Fuji XT3, Japan) בשילוב עם עדשת 60 מ"מ, אשר מצלמת בקיוטויי זמן של 20 דקות. האובייקט המרכזי הוא משטח הנמצא לפני המצלמה במקביל לקרקעית אשר כובר את המלח ששוקע מעומדות המים. בתמונה המתבקשת (איור 1.2.1d), ישנו מודיעין אשר מאפשר לנתח את עובי המלח אשר נוסף בכל 20 דקות.



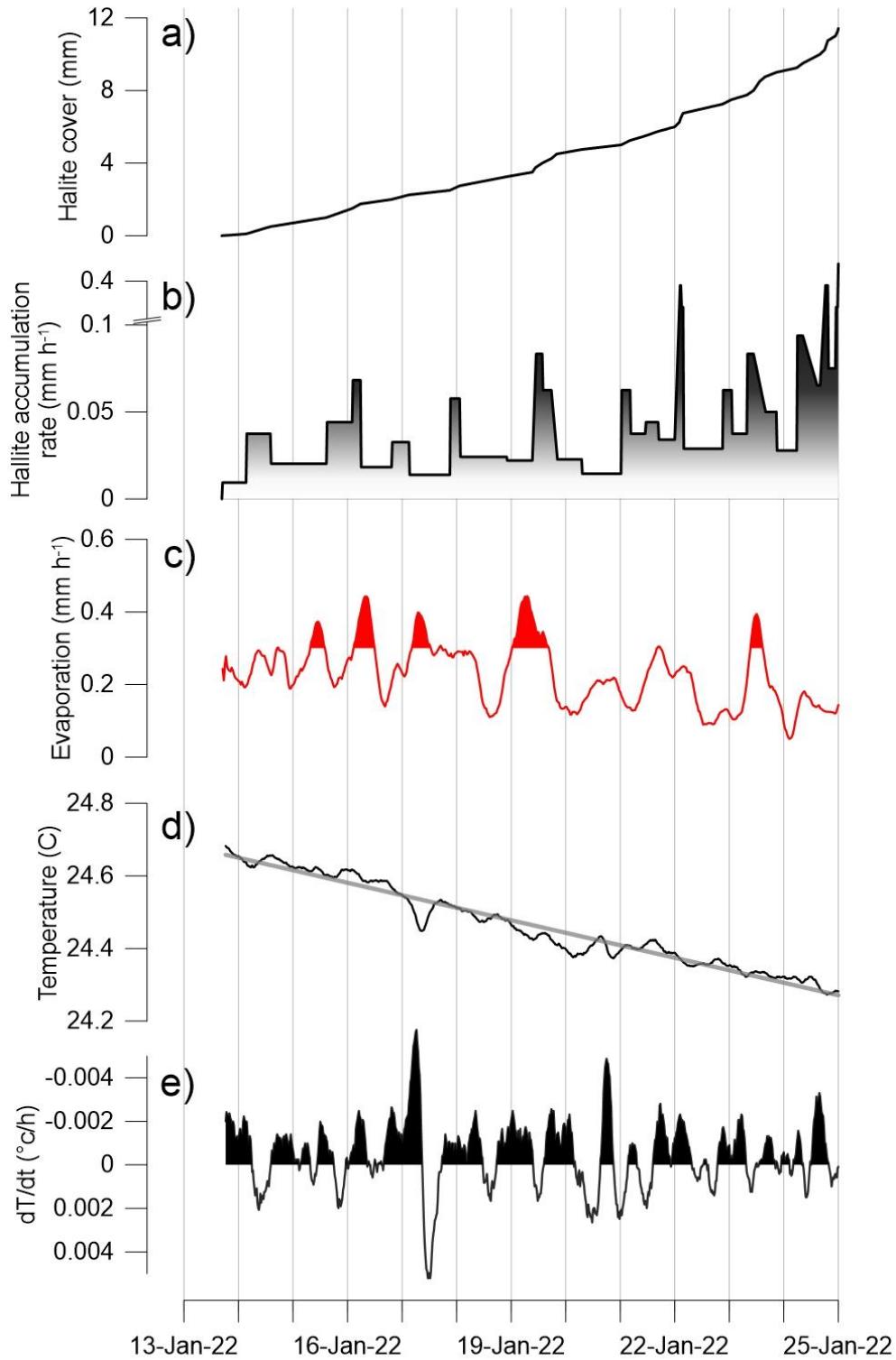
איור 1.2.1. מערכת המדידה בשדה. (a) מפה של אזור המחקר בים המלח ומיקומי תחנות המדידה. (b) מצוף המחקר עין גדי 100. במחקר זה השתמשו בנתוני האידיומי פני המים שנמדדו על ידי מערכת eddy covariance (EC) ובטמפרטורה בעומק 20 מטר שנמדדה על ידי מד טמפרטורה. (c) איור סכמטי של מערכת המדידה. מצוף המחקר מודד את האידיומי פני המים ואת טמפרטורת המים ומערכת הצילום התת ימית מודדת את קצב גיבוש המלח. (d) מערכת צילום תת ימית בקיוטויי זמן (TLC). המערכת מצלמת תמונה בכל 20 דקות של המלח המctrבר על המשטח (ואה איור 1.2.2).

1.2.2 תוצאות ודיון

באיור 1.2.2 מוצג עובי CISI המלח אשר מצטבר על קרקעית האגם כולל צילומים מייצגים, כפי שנמדדנו מצלמת קיטועי הזמן התת ימית. במהלך 12 ימי המדידה הצטברו 11.7 מ"מ של מלח (איור 1.2.2-c2-c6) ניתן לראות את התמונהות הגולמיות ותקריב לאזור המדייד, מיקום התמונהות על ציר הזמן מוצג על ידי עיגולים על גבי איור 1.2.2a. שיטת המדידה החדשה מאפשרת לנו למדוד את צבירת המלח על גבי קרקעית האגם בדיקוק של 0.25 מ"מ, ולכן מאפשר לנו למדוד את השינויים בעובי השכבה ברזולוציית זמן של שניות ספורות.



איור 1.2.2. הצטברות מלח על קרקעית האגם. (a) עובי שכבת המלח אשר הצטברה על הלוח האופקי שסמכה לקרקעית האגם. (b) תמונהות מייצגות מתוך מכשיר TLC התת ימי. מיקום התמונהות על ציר הזמן מופיע בסדרת הזמן של עובי המsalt. (c) תמונהות מוגדלות של האזור המסומן בריבוע שחור בפנل b.



איור 1.2.3. הצבירות המלח על קרקעית האגם בהשפעת האידי וקירור עמודות המים. (a) עובי המלח המצטבר על קרקעית האגם. (b) קצב הצבירות המלח. (c) קצב אידי מפני האגם. (d) מהלך קירור עמודות המים. (e) קצב שינוי הטמפרטורה של עמודות המים.

בכדי לבחון את הגורמים המשפיעים על קצב הצבירות המלח על קרקעית האגם, אנו בוחנים את הקשר שבין קצב גיבוש המלח הפעיל לבין קצב האידי מפני המים וקצב קירור עמודות המים (איור 1.2.3). מצאנו שקצב הצבירות המלח אינו אחיד במהלך תקופה המדידה, כשהקצב הממוצע הוא

0.04 מ"מ לשעה, והשונות הימית נעה בין 0.01 מ"מ ל- 0.08 מ"מ לשעה (איור 1.2.3 b). מהלך האידיוי (איור 1.2.3 c) גם הוא אחד במהלך תקופת המדיידה, כשהערך הממוצע עומד על 0.23 מ"מ לשעה והשונות הימית נעה בין 0.15 מ"מ לשעה ל- 0.4 מ"מ לשעה. טמפרטורת המים וקצב שינוי הטמפרטורה של עמודת המים מוצגים באיור 1.2.3 d,e בהתאם. עמודת המים מתקררת במהלך תקופת המדיידה (0.4 מעלות ב-20 ימים) עם שונות שעשית של 4 אלפיות המעליה (ממוצע קירור של 0.5 אלפיות המעליה לשעה).

השינויים בקצב גיבוש המלח מראים התאמה לשינויים בקצב האידיוי. התאמה זו מתאפשרת מכיוון שהמלח כולו מעורבל, קר, ונמצא ברוויה למלח (בניגוד לשוכב עמודת המים במהלך הקיש שיצרה שכבה עליונה מלוחה מאוד, חמה מאוד ובתת רוויה למלח). מגמת הקירור תומכת את המשך השקעת המלח מכל עמודות המים, אך השינויים השעתיים בקצב הקירור אינם מספיקים משמעותיים בשבייל להשפיע על קצב גיבוש המלח ולמן השינויים במהלך האידיוי הם הגורם המשמעותי לשינויים השעתיים בקצב גיבוש המלח.

1.2.3 סיכום ומסקנות

- פיתחנו מצלמת קיטועי זמן תחתיות אשר מאפשרת לנו למדוד ולבזון את קצב גיבוש המלח הפעיל על קרקעית ים המלח. שיטת המדיידה החדשה מאפשרת לנו למדוד את צבירת המלח על גבי קרקעית האגם בדיק של 0.25 מ"מ, וכך ניתן למדוד את השינויים בעובי המלח הנוצר ברזולוציות זמן של שעות ספורות.
- יש שינויים בסקלה השעשית בקצב גיבוש המלח על קרקעית האגם (קצב ההצברות הממוצע הוא 0.04 מ"מ לשעה, והשונות הימית נעה בין 0.01 מ"מ ל- 0.08 מ"מ לשעה).
- קצב גיבוש המלח על קרקעית האגם, במהלך החורף כאשר עמודת המים קרה ומעורבלת לחלוtin, מושפע בעיקר מהשינויים במהלך האידיוי.
- השינויים השעתיים בקצב קירור עמודת המים הם קטנים מאוד וההתאמה של שינויים אלו לקצב גיבוש המלח ברמה השעשית נמוק.

2. סיכוני רعيית אדמה

2.1. גישה חדשה להערכת נזקים מבנים בודדים כתוצאה מרעיית אדמה, אזור מרכז-דרום ים המלח

פרדוכט ע.¹, לוי צ.¹, אבירב ו.¹, סלמון ע.¹, קלבו ר.¹

1. המeon הגיאולוגי

2.1.1 מבוא

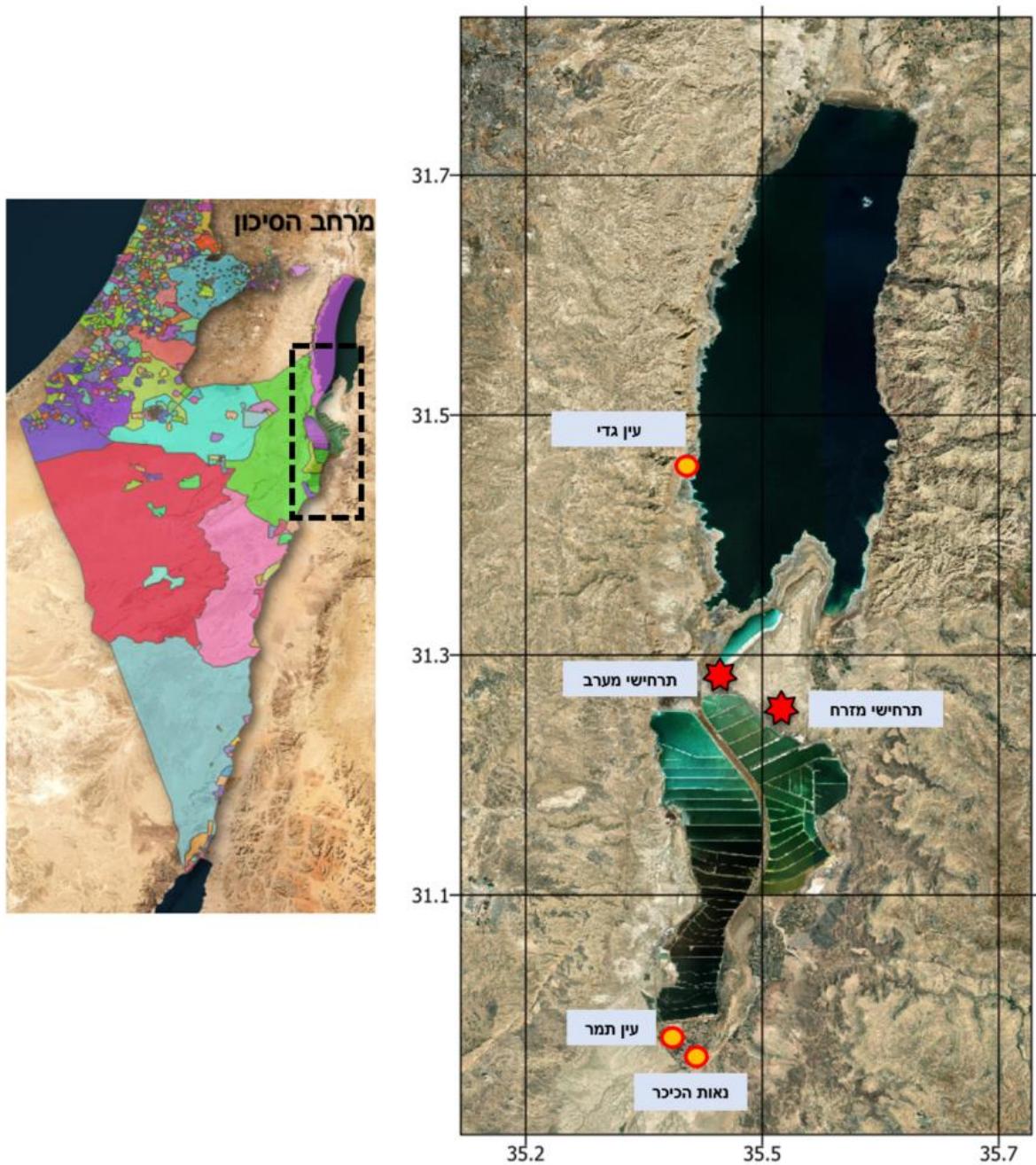
באגן ים המלח עוברת מערכת העתקי ים-המלח מהוות את המקור העיקרי לרعيות אדמה חזקות באזורי זה. הניסיון ההיסטורי והמיידן המחקרי מלבדים שרעיית אדמה חזקה יכולה להתרחש בישראל בכל עת (למשל, Hamiel et al., 2009 and references therein). בהתאם לתובנה זאת, מדינת ישראל ומערכותיה נערכים לקרה רعيית אדמה שכזאת.

בעבר כבר אירעו מספר רعيות אדמה חזקות לאורך המערכת זו והן הסבו נזקים קשים משנה עבריים ים המלח, הירדן והערבה, כדוגמת רعيית האדמה שהייתה בצפון ים המלח בשנת 1927 (Shapira et al., 1993) במגנטודה M6.2

רعيות אדמה מלולות במגוון תగבות ותופעות של כשל קרקע אשר עלולות לגרום לנזקים משמעותיים לבניינים מכל סוג שהוא ותשתיות חיוניות. גורם הנזק החמור ביותר הוא תנודות קרקע והגברת שלהן הנגרמת עקב תנאים ייחודיים של התשתית הגיאולוגית. גורמים נוספים העולמים לorzם לנזק כבד הם קריית פנימית (Sagy et al., 2013), כשל במדרכנות (כץ וחובי 2008 א, ב), התנוזלות (סלמן וחובי, 2008) וצונאמי (סלמן וחובי, 2009).

נזקים מרعيות אדמה עלולים לפגוע באופן חמור במרקם החיים האנושי, התשתיתי והכלכלי, כולל באזורי ים המלח, ונוהג לסוגיהם, כישירים ועקבים. הנזק ישיר מהתבטא בפגיעה בנפש, לבניינים ובתשתיות ואילו הנזק העקיף מקורה בתגובה שרשרת מהפגיעה הישירה, אשר יכולה לחול אסונות משנה ופיגועות סביה המעצימים את הפגיעה בבניינים ובנפש.

רعيית אדמה חזקה באזורי ים-המלח עלולה לגרום לנזק רב לבניינים שונים ובمتkenי התשתיות שמדוברים לאורכו, בעיקר משומם קרובם למרכז הרעייה והתשתיות הגיאולוגית הרגישה באזורי. לכן, חשוב ביותר לפתח שיטות עבודה למצורם מוגעים, הנזק לבניינים ובתשתיות ולהרחיב את מודיעות הציבור לסכנה באזורי זה. אחת הדרכים הייעילות ביותר לצורך מזעור את כמות הנזקים והנזקים כתוצאה מרעיית אדמה חזקה, היא פיתוח תרחישי נזק להערכות מיטבית בעוד מועד. כך ניתן להציג מראש על האזורי המועדים לפורענות, ולמקד בהם את פעולות המינעה ומזעור הנזק. פיתוח תרחישיים לאחר הרעייה יעזור לגורמי החром, לרבות אלה הפועלים באזורי ים המלח ומהווצה לו, לקבל החלטות מיטביות לגבי המענה הנדרש בימי הראשונים שלאחר האירוע.



איור 2.1.1. אזור הפרויקט. ישראל ע"פ תאים סטטיסטיים (משמאל). מרחב האזור הנבחן, כולל מוקדי ריעידות האדמה שנבחנו בפרויקט והיישובים הנבדקים (מימין).

הפרויקט הנוכחי הינו חלק מהמאץ הלאומי לסייעו סיוכני ריעידות אדמה בישראל בכל ומצערו סיוכני ריעידות אדמה באזורי ים המלח בפרט. אחד האמצעים לקידום הייערכות של אזור מסויים בפני סיוכני ריעידות אדמה, נעשה על ידי הדמיה של מגוון תרכishi נזקים הנובעים מסיכון אלה. התרכישים מפותחים תוך התחשבות בתנאים הגיאולוגיים המקומיים ואופי המבנים שבאזור הנבחן.

מקובל בעולם לחלק את השטח החשוף לסכנה באמצעות תאים סטטיסטיים (מכונים Tracts), ולהעריך את האבדות בנפש והנזק לצבר המבנים הנמצאים בתחום התא.

הסטטיטיסטי בישראל נקבע ביחס לצפיפות האוכלוסייה (בשביבות 2500-5000 איש לטא) והוא נע בין מספר קמ"ר בודדים למאות קמ"ר. המידע הסטטיטיסטי מופיע את מצאי המבנים והאוכלוסייה בכל תא. המיקום המדוקן של כל מבנה בתוך תא סטטיטיסטי נתון אינו מוגדר ולכון סוג הקרקע ותנודות הקרקע המוחשבות מוצגים על ידי ערך אחד בלבד לתא הסטטיטיסטי. גישה זו היא גנריית מהותה לפיה ניתן לאמוד באופן סטטיטיסטי את הנזק של צבר מבנים ובכך להתגבר על חוסר במידע בנוגע למאפייניו של המבנה הבודד. גישה זו שימושית ביותר כאשר עורכים תרחישי נזק ברמה הארץית או למרחב סיון גדול. ההנחה בגישה זאת שתמונות נזקים של צבר מבנים גדול עשויו לשקו באופן ריאלי את הנזקים למציאות.

יחד עם זאת, במידה וקיים מידע מפורט ואיכותי אודות מצאי המבנים והתנאים הגיאולוגיים בתא סטטיטיסטי נתון, יש טעם לנסות למצוא חישוב הערכת הנזק תיערכן עבור מבנים בודדים. לגישה זו, כפי שתוצג בסעיפים הבאים, ישנים יתרונות מגוונים, כמו המכחשה והצגה משופרת של תוצאות הנזק הצפויות. יש לציין שרוב גורמי החروم מעוניינים לקבל תמונה נזקים כוללת, אם זאת, ישנים היום גורמי חרום שעוניינים לקבל את המידע הממוחשב אודות הנזקים ברזולציה של עד רמת המבנה הבודד.

במסגרת הפרויקט הנוכחי פותחו תרחishi נזקים בפעם הראשונה בישראל באזורי ים המלח עבור מבנים בודדים שממוקמים ביישובים עין גדי, עין תמר ונאות הכיכר. תרחישי הנזק בוחנו סדרת תרחישים של רעידות אדמה באגן הדרומי של ים המלח (איור 2.1.1) ב嚷ון של מגנטודות (טבלה 2.1.1). הדמויות הנזק נערכו באמצעות מערכת HAZUS (קייזר של US Hazard), במכון הגיאולוגי. תוכנת התרחישים Hazus נחשבת כיום כאחת מערכות התרחישים המתקדמות והמובילות ביותר בעולם (FEMA, 2020, Technical Manual). מערכת זו נקלטה והוטמעה במכון הגיאולוגי והיא משתמשת לפיתוח תרחישי סיון עבור מבנים, תשתיות ואוכלוסייה, כתוצאה מאירוע רעידות אדמה וצונאמי בישראל. בתרחישים אלו משתמשים היום גופי מענה וחירום ומשדי ממשלה שונים בישראל, לצרכי הערכות והתמודדות עם אירועים שכאלו.

תוכנת HAZUS מסוגלת לחשב נזק עבור צבר של מבנים עד לרמת המתקן הבודד ועבור מגוון רחב מאד של תשתיות, בהתאם לאיכות הנתונים וסוג המידע שמוצנים לתוכה. חישוב הנזק מתבסס על תנודות קרקע (מחושבות או מדודות) ועל嚷ון של עקומות שבירות רבות אשר מאפשרות לקבל הסתברות לנזק המדוד בחמש רמות: "לא נזק", "נזק קל" (סדקים אלכסוניים ולפעמים אופקיים ברוב הקירות; סדקים בממשק מיולי המסתגרת, "נזק בינוני" (סדקים אלכסוניים או אופקיים בגדרות, ריסוק של לבנים סביב חיבור קורות-עמודים; סדק גזירה אלכסוניים בקורות בטון או בעמודים), "נזק מתקדם" (התפתחות של סדקים גדולים ברוב קירות המיולי; מספר לבנים עשויות ליפול; מספר קירות עולמים ליפול חלקית או לגמרי; מספר עמודי בטון או קורות עולמים להיבשל בגזירה וכתוואה מכח להגיע לקריסה חלקית; יכול להפתח מעות רוחביים (מבנה) ו- "נזק מוחלט" (המבנה קרס או נמצא בסכנה מיידית של קריסה עקב שלילוב של כל מוחלט של קירות המיולי וכשל לא-משיך של הקורות ועמודי הבטון) (לפרוטו נוסף ראה/
FEMA, 2020; (Technical Manual).

2.1.2 מטרת הפרויקט

למיוט ידיעתנו, עד היום לא פותחו תרחישים שדיםו את נזקי רעידות האדמה הצפויים עבור המבנה הבודד, בישראל בכלל, ובאזור אגן ים-המלח בפרט. העובודה הנוכחית מתמקדת בבדיקה של יישום חדש של הדמיית נזקים במבנים בודדים כתוצאה מרעידות אדמה בישובים שמוקמים לאורך החוף המערבי של ים המלח. יש לציין, שיטתה ה"תאים סטטיסטיים" לאומדן נזקים עבור צבר של מבנים והשוואה לשיטה החדשנית שושמה בפרויקט אינה במקודם של העובודה הנוכחית והיא יכולה להיבחן בשלבים מתקדמים יותר. בנוסף, בעובודה הנוכחית לא הייתה התייחסות לגורמי סיכון נוספים (גילשת מדדרונות, קריית פנוי שטח, התנזות).

אנו מכוונים שתוצאות הפרויקט הנוכחית יאפשרו לגורמי החróום השונים באזור ים המלח להתמודד עם שאלות כגון: מהו הנזק הצפוי כתוצאה מרעידות אדמה בישובים הסמוכים למועד רעידות האדמה וכיידן ניתן יהיה למזער את הנזק הצפוי.

2.1.3 שיטות העבודה

השיטות המקובלות כיום בעולם בכלל ובמתודולוגיה של Hazus בפרט להערכת סיכון רעידות אדמה, מတבססות על שלושת הרכיבים הבאים (רכיבי הסיכון): (1) הסכנה - Hazard (למשל, תנודות הקרקע); (2) מצאי המבנים – Exposure, Exposure (הנכדים הנמצאים למרחב הסכנה); ו-(3) פגיעות - Vulnerability (הנזק הצפוי לבניין על בסיס התלות שבין עוצמת הסכנה לחזק ההנדסי של המבנה).

יש לציין שרמת הוודאות לגבי תוכנות הנזק, תלויות באיכות ורמת הפירוט של רכיבי הסיכון. הדגש בעובודה הנוכחית עסוק בפיתוח היכולות הדרושים לaimoz גישת "המבנה הבודד", אשר יאפשרו לעורך תרחישי נזק מפורטים בישראל ובישובי ים המלח. על כן, יש לראות בתוצאות הנזק המוצגות בעובודה זו כהמחשה בלבד ליכולות של "גישת המבנה הבודד". בכך להקטין את אי הוודאות בנוגע לתוצאות הנזק ולתקפן, יש לבצע הערכת תנודות קרקע ברזולוציה גבוהה (כלומר, בקן"מ של שכונות עד לרמת המבנה הבודד). בנוסף, עיקומות השירות שהשתמשנו בהן כדי לייצג את המבנים בפרויקט, נבחרו מתוך רשומות עיקומות השירות המוצעות ע"י Hazus. לכן, אין לקחת ולהשתמש בתוצאות כפי שהן, מאחר ובשלב זה הן מוצגות להמחשת יכולות בלבד.

ישום הגישה החדשנית להערכת נזק לבניינים בודדים באזור ים המלח כפי שבוצע בעובודה הנוכחית, בוצע בשני שלבים עיקריים: א) הגדרת רכיבי הסיכון, ו- ב) הערכת הנזק ועיבוד תוצאות.

שלב ראשון – הגדרת רכיבי הסיכון להערכת הנזקים:

1. מצאי המבנים (Exposure):

א) איסוף המידע אודוט המבנים הנתוונים למרחב הסכנה. בעובודה זו מצאי המבנים שהוכנס להדמויות הנזקים היה מעודכן לשנת 2021 (מפ"י). מידע זה כלל את המיקום הגאוגרפי של המבנים, גאומטריה, שנת הקמה, גובה וייעוד המבנה. לצורך פשוטות, בפרויקט נכללו מבנים מגורים בלבד.

ב) אימות המאפיינים של מצאי המבנים ה证实 על ידי סיור בשטח לשם השוואה בין המידע שהתקבל ממפ"י, למבנים בשטח. באופן כללי, נראה שהנתונים המאפיינים את מצאי המבנים באזורי ים המלח הינם בעלי דיקוק נמוך יותר בהשוואה לאזורים עירוניים בישראל, כמו תל אביב. בנוסף, נראה כי מצאי המבנים באזוריים חקלאיים, כולל מבנים חקלאיים עם סיווג שונה מכפי שהם אמורים להיות (למשל, מגורים, מסחרי וכו'). מבנים אלו, הם בדרך כלל בעלי שטח גדול, ובשל כך הם עלולים להשפיע על תוכאות הנפגעים והנזק הכלכלי.

ג) סינון וטיפול במבנים חריגים ובמידע חסר - בוצע סינון ראשון ברשות המבנים בהתאם לקריטריונים הבאים: (1) במידה ושנת הבנייה של מבנה מסוימים אינה ידועה, שנת הקמת המבנה נקבעה ל- 1980 ומטה ו- 2) מבנים עם מאפיינים חריגים (למשל, מבני מגורים עם שטח וגאומטריה המראים שהם מבנים חקלאיים) הוסרו מרשות המבנים. לאחר קליטה ועיבוד של המידע של רשות המבנים המתוקנת, הוכנה טבלה סופית הכוללת את מצאי המבנים.

2. פגיעות (Vulnerability):

במהלך הכנת מצאי המבנים יש להגדיר שני פרמטרים מרכזיים המשפיעים על רכיב הפגיעות המתגלו כפונקציית הנזק הייחודי של המבנה (הקשר בין רמת הסכנה, תוכנות 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 היסימי המתאים לבנייה. כיצד, תקן 413 החל להיות מיושם מתחילת שנות ה-80 ומתעדכן במשך השנים (413), 2009 (Israel Standard 413, 2009). על כן ניתן להיעזר בשנת הבניה כדי לאפשרי לקביעת סוג המבנה ורמת התקן היסימי שלו.

3. סכנה (Hazard): ההדרת שישה תרחישים רעידות אדמה אופייניים

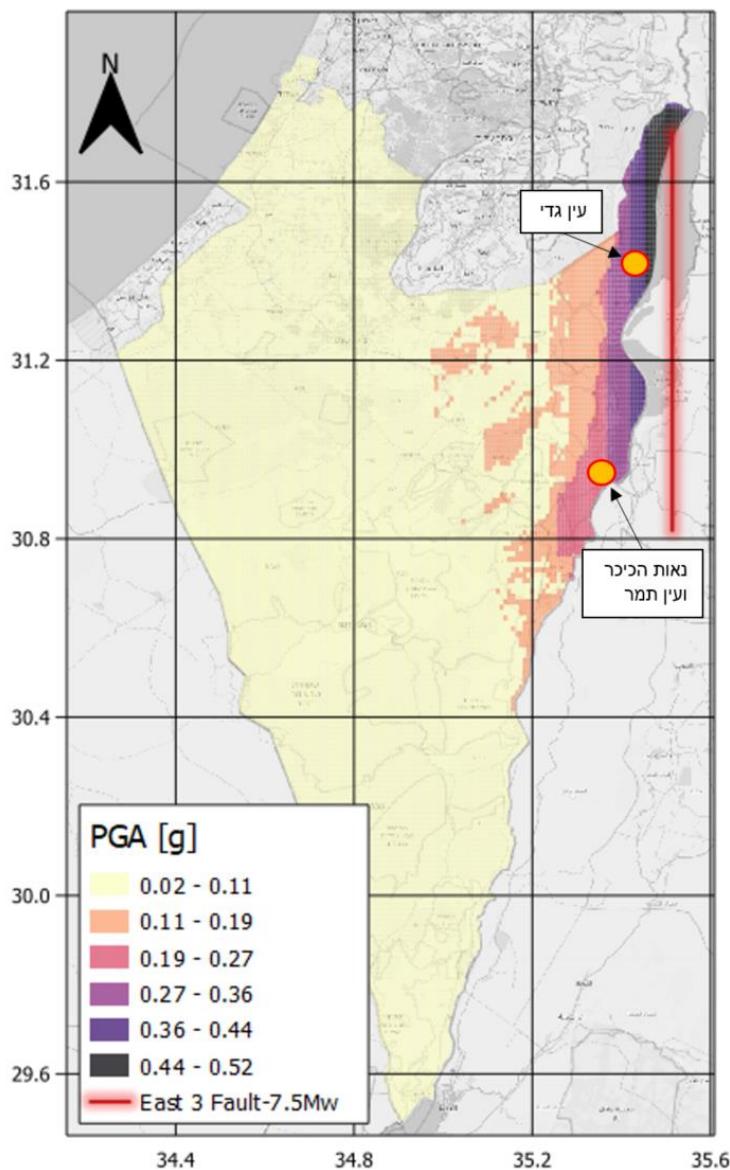
רכיב הסכנה המתאר את תנודות הקרקע הצפויות באזורי ים המלח, התבסס על שישה תרחישים. שלושת התרחישים הראשוניים מוקמו בסמוך לצד המזרחי של ים-המלח (קוואורדיינטות: 35.514/31.265 (Sneh and Weinberger, 2014) אשר לאורכו עובר העתק הגבול המזרחי של אגן ים המלח (35.451/31.298). המוקד של שלושת התרחישים הנוספים מוקם יחסית קרובה להמשכו הדורומי המשוער של העתק יריחו (קוואורדיינטות: Mw=6.5 (תרחיש מזרח 1); Mw=7.0 (תרחיש מזרח 2); Mw=7.5 (תרחיש מזרח 3) ובמוקד המערבי טווח המגנטוודה נע בין הערכיהם הבאים: Mw=6.0 (תרחיש מערב 4); Mw=6.5 (תרחיש מערב 5); Mw=7.0 (תרחיש מערב 6).

תרחיש	מגנטוודה Mw	קו רוחב	קו אורך	Dip	Depth	Strike
מזרח 1	6.5	31.265	35.514	90°	10 [km]	0

					7	מזרח 2
					7.5	מזרח 3
					6	מערב 4
	35.451		31.298		6.5	מערב 5
					7	מערב 6

טבלה 2.1.1. ששת תרחישי ריעידות האדמה

תנודות הקרקע של ששת התרחישים חושבו בהתבסס על משווהת הניחות של Campbell (2008) ועבור תנואה אופקית שמתרכשת לאורך העתק סייסמי, ואשר עליה מתבסס תיקון and Bozorgnia, Wells and Coppersmith (1994) המתארת את היחס שבין מגנטודה של ריעידת אדמה לאורך העתק והتوزעה לאורכו. ע"פ הפרמטרים הנדרשים להפעלת מודל Hazus גורם בעל השפעה גבוהה על עצמת התנודות שיחווה המבנה, הוא סוג הקרקע (Soil Type). בפרויקט הנוכחי התבצעה הצלה של שכבה הגאוגרפית של המבנים עם מפת הקרקע המסוגת ל- 6 דרגות (A-F) בהתאם לשיטה הקיימת בטקן הישראלי (Israel Standard 413), 2009 (הmathematical method לשינוי התכונות הגיאוטכניות של המסלע במרחב ישראל (כח וחוב', 2008) ב-30 המטרים העליונים של הקרקע, בהתאם ל מהירות גל הגזירה המומוצעת (Vs30) בעומק זה. לאחר תהליך זה, נקבע סוג הקרקע עבור כל מבנה.



איור 2.1.2. דוגמא למפת תאוצת קרקע מרבית של תרחיש מזרח 3 - 7.5Mw.

שלב שני - הערכת הנזק ועיבוד התוצאות:

בשלב זה הורצו ששת התרחישים (טבלה 2.1.1) עברו מבחנים בודדים באזור ים המלח. בסיום ההרצות סוכמו תוצאות התרחישים ונוחתו באמצעות כל GIS ובאמצעות כלים טכניים שנבנו לצורך זה.

תוצאות הנזק של התרחישים מחושבות באופן סטטיסטי, ומתקבלות לפי חמיש רמות נזק: (1) אין נזק (None); (2) נזק קל (Slight); (3) נזק בינוני (Moderate); (4) נזק נרחב (Extensive) ו- (5) נזק מוחלט (Complete). עברו כל מבנה ההסתברויות מוצגות לפי חמיש רמות הנזק (טבלה 2.1.1).

סיכוםה של ההסתברויות בכל עמודה (המייצגת רמת נזק) מייצגת את מספר המבנים הניזוקים, ע"פ כל רמת נזק, אך ללא מידע גיאוגרפי מדויק של המבנים.

מבנה	אין נזק	נזק קל	נזק בינוני	נזק נרחב	נזק מוחלט
1	0.4	0.3	0.2	0.1	0.000001
2	0.00001	0.1	0.3	0.4	0.2
3

טבלה 2.1.2. דוגמא לתוצאות נזק המתקבלות, בצורה הסתברותית ומוסוגות לפי רמות הנזק

עיבוד התוצאות כלל חישוב של ערך ה- "Loss Ratio" (LS), אשר מתאר את מידת הנזק המשווקלת באזור נבחן באמצעות ערך יחיד. חישוב הפרמטר LS מתבצע ע"י חלוקת (כלומר, נירמול) הערך המייצג את אובדן הכלכלי המוערך של המבנה עבור כל רמות הנזק בערך המייצג את עלות הקמתו המוערכות (משווהה 1). ניתן לחשב את ה-LS לתייאור הנזק ברמת המבנה, ברמת צבר מבנים (כגון ישוב, שכונה) או ברמה של כל המבנים בתרכיש.

$$(1) \quad Loss\ Ratio = \frac{Bldg\ Economic\ Loss}{Bldg\ Replacment\ Cost}$$

2.1.4. תוצאות

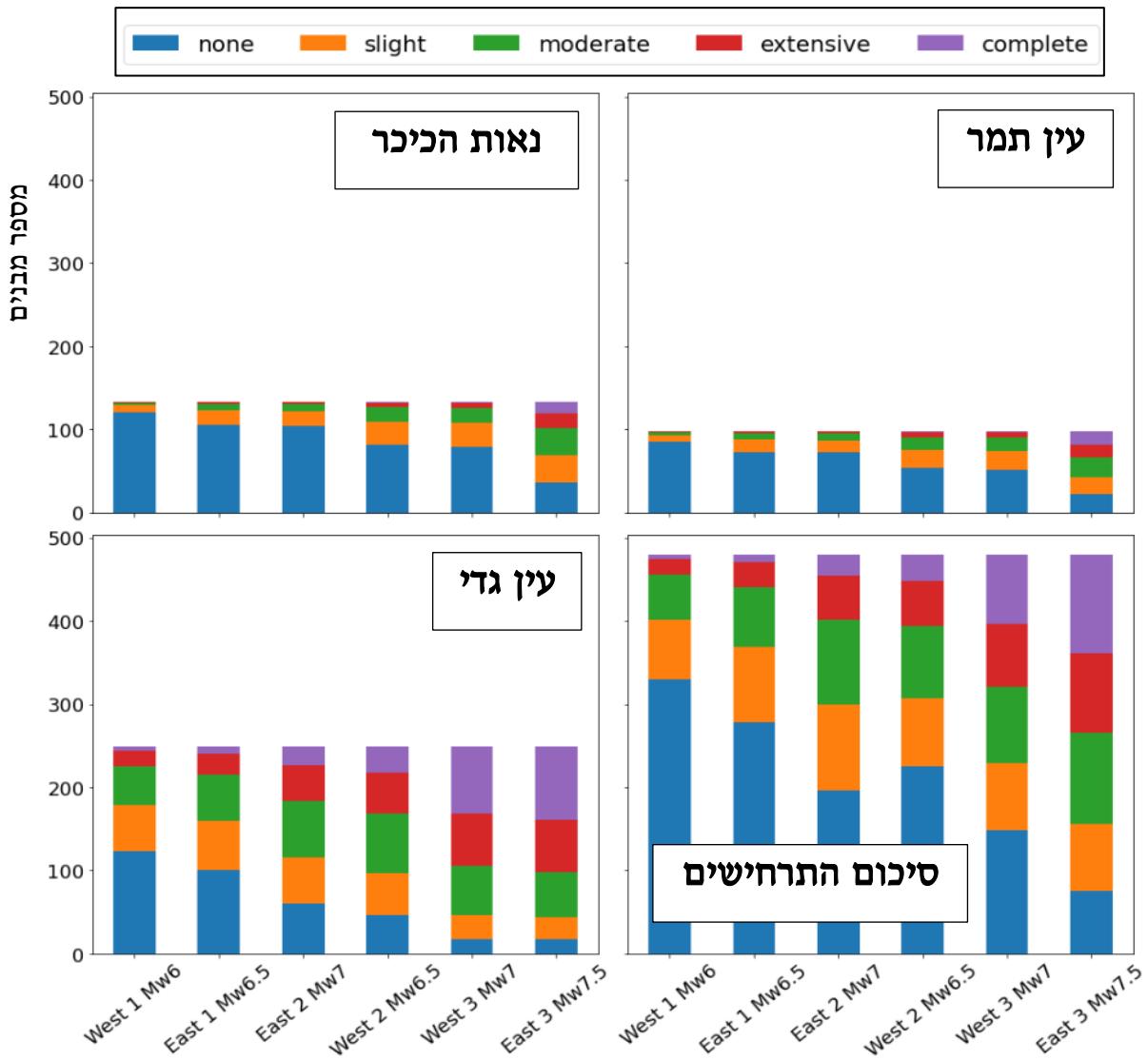
תוצאות הנזק עבור ששת התרחישים (טבלה 2.1.3 ואיורים 2.1.3-2.1.5) מבוטאות ע"פ חמש רמות נזק: (1) אין נזק (None); (2) נזק קל (Slight); (3) נזק בינוני (Moderate); (4) נזק נרחב (Extensive) ו- (5) נזק מוחלט (Complete).

מ בין ששת התרחישים, החמור ביותר, הוא "תרחיש מזרחה 3" ($Mw=7.5$), עם מספר המבנים שצפוים להינזק: 75 – אין נזק, 81 – נזק קל, 110 – נזק בינוני, 96 – נזק נרחב ו-118 עם נזק מוחלט. עבור תרחיש זה ה- LR הנו הגובה ביותר (53.8%). לעומת זאת, הנזק הנמוך ביותר התקבל עבור "תרחיש מערב 1" ($Mw=6$), בעל המוגנותה הנמוכה ביותר מ בין ששת התרחישים, בו מספר המבנים שצפוים להינזק: 329 – אין נזק, 72 – נזק קל, 54 – נזק בינוני, 20 – נזק נרחב ו-5 עם נזק מוחלט. ה- LR המוחש של תרחיש זה הוא 6%. התוצאות המתקבלות עבור "תרחיש מזרחה 3" ו-"תרחיש מערב 1" בהשוואה לשאר התרחישים, מראות כי לערך המוגנתה השפעה משמעותית ביותר על תוצאות הנזק.

תרחיש	Mw	אין תק	קל	בינוני	נרחב	מוחלט	Loss Ratio
מערב 1	6		72	54	20	5	6%
מזרח 1	6.5		278	73	30	9	8.7%
מזרח 2	7		196	101	54	25	18.3%
מערב 2	6.5		225	87	54	32	20.6%
מערב 3	7		149	93	75	84	44.3%
מזרח 3	7.5		75	81	96	118	53.8%

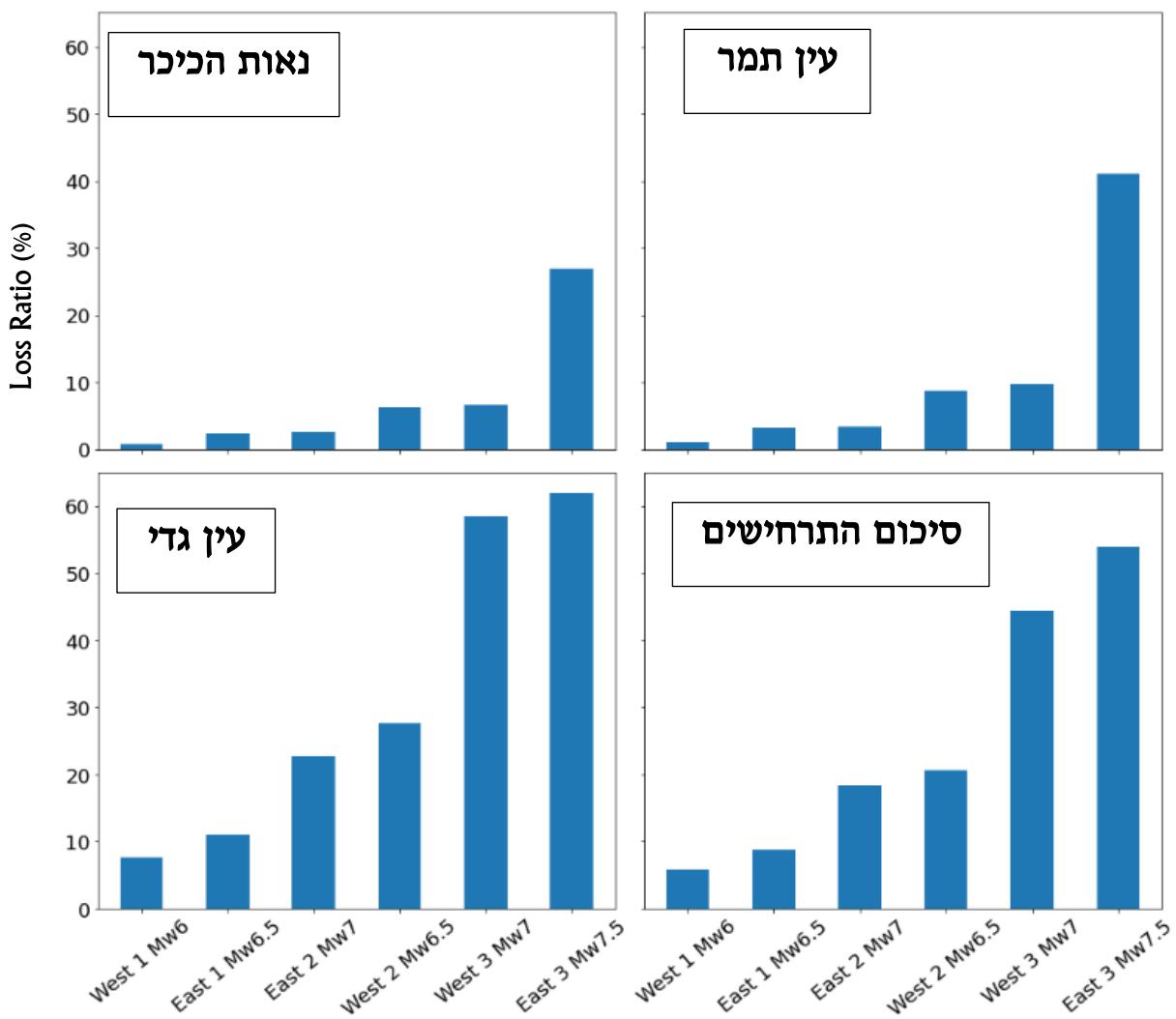
טבלה 2.1.3 . סיכום תוצאות הנזק המבנוי של ששת התרחישים

השוואה בין תוצאות הנזק של "תרחיש מערב 3" ($Mw=7$), לבין התוצאות של "תרחיש מזרח 2" ($Mw=7$), מראה כי הסיכון הצפוי מסדרת התרחישים המערביים ליישובים הנבדקים גדול יותר, מהסיכון של סדרת התרחישים המזרחי (בלבד "תרחיש מזרח 3" ($Mw=7.5$)). ההשוואה בין תוצאות הנזק של "תרחיש מערב 2" ($Mw=6.5$), ובין "תרחיש מזרח 1" ($Mw=6.5$), מצביעה על מגמה דומה. מגמות אלו אינן מפתיעות בשל המרחק הקצר יותר של המוקדים המערביים למבנים הנדונים. מכך ניתן להבין שגורם נוסף המשפיע על היקף הנזק, מלבד המגנטודה ואיכות הבניה, הוא הקרבה של מצאי המבנים למקור הסכנה.



איור 2.1.3. סיכום מספר המבנים הניזוקים לפי דרגות הנזק (Slight, None, Moderate, Extensive, Complete)

באמצעות ערך ה-LR ניתן להשתמש בערך ייחיד המיצג את היקף הנזק של כל המבנים שנבחנו בתרחיש ולכן באמצעותו ניתן להשוות את הנזקים בין התרחישים השונים. למשל, ערך ה-LR המוחושב עבור "תרחיש מערב 2" ($Mw=6.5$) הוא 20.6% ולעומת זאת, ערך ה-LR המוחושב עבור "תרחיש מזרח 1" ($Mw=6.5$) הוא רק 8.7% (איור 2.1.4). מכאן, מסתבר ש"תרחיש מערב 2" הנה חמור מבין שני התרחישים.



איור 2.1.4. תוצאות (%) Loss Ratio עבור כל יישוב וסיכום כל התרחישים

מהשוואת תוצאות הנזק המתקבלות מהתרחישים, מסתבר שקיובן עין גדי נמצא בסיכון הגבוה ביותר (איורים 2.1.3-2.1.4). זאת אפשר לראות מתוך טבלה 2.1.4, המציג את תוצאות הנזק הצפויות של "תרחיש מערב 2" ($Mw=6.5$), לפי יישוב. ערך ה- LR המוחשב עבור עין גדי בתרחיש זה הוא 62% (איור 2.1.4). תוצאות הנזק ביישובים עין תמר ונאות הרים נמוכות יותר עם LR בערך של 41%- 27%, בהתאם.

תרחיש	אין נזק	קל	בינוני	נרחב	מוחלט	Loss Ratio
עין גדי	47	50	71	50	32	62%
עין תמר	73	14	8	2	1	41%
נואות הרים	105	17	8	2	1	27%

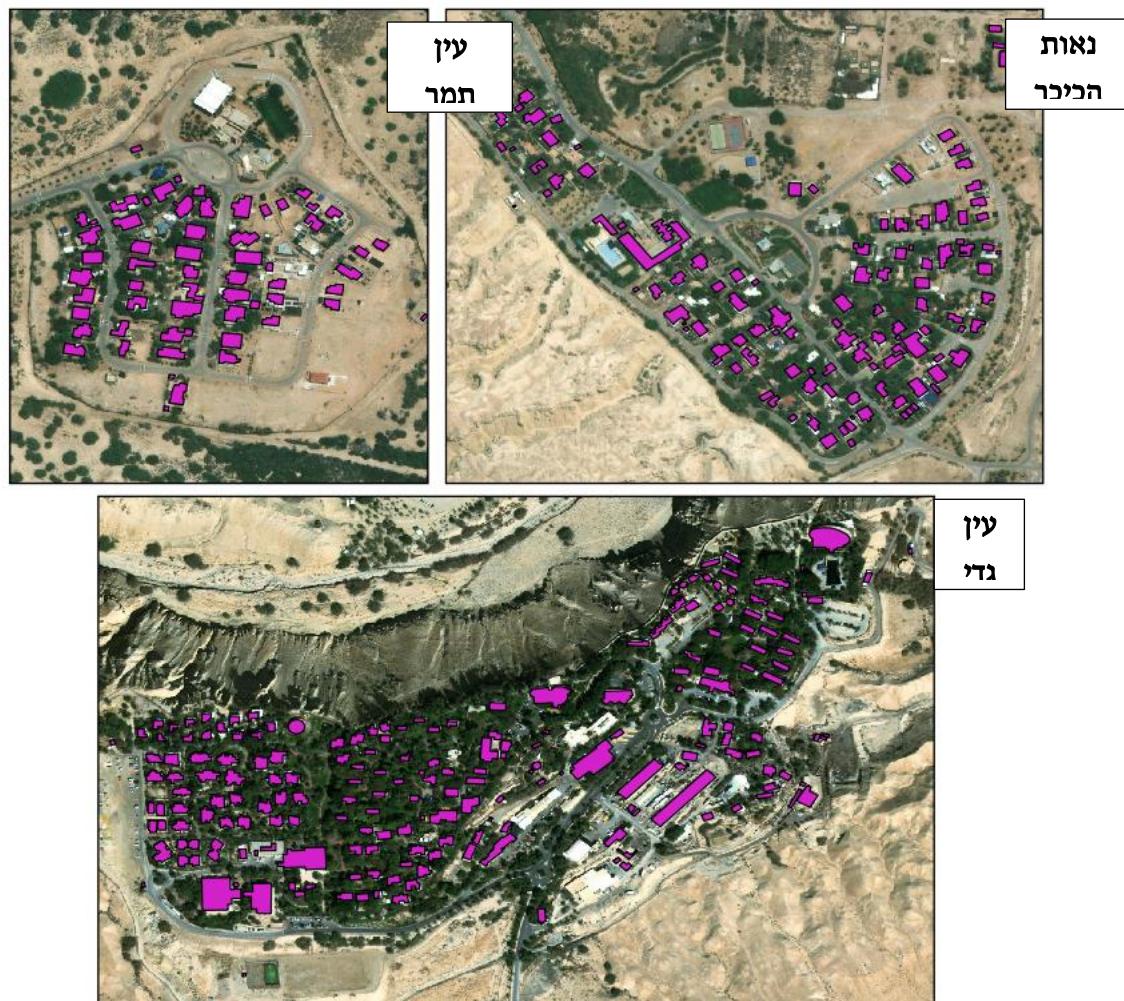
טבלה 2.1.4 . סיכום תוצאות הנזק של תרחיש מערב 2, לפי יישובים

טבלה 2.1.4 מציגה את מספר המבנים הכלל שנזקקו בהתאם לתרחיש הנבחר או היישוב. בפועל הנזקים הצפויים בתרחיש מתקובלים ברמת המבנה הבודד. טבלה 2.1.5 מציגה לדוגמא מספר מבנים בודדים מעין גדי עם 5 דרגות נזק שהושבו עבורם.

Loss Ratio	מוחלט	נרחב	בינוני	כל	אין מזק	יישוב	מספר מבנה
67.71574	0.4126	0.2749	0.2086	0.0763	0.0273	עין גדי	IL0
69.47013	0.4036	0.2758	0.2125	0.079	0.0289	עין גדי	IL1
69.57534	0.4269	0.2732	0.2024	0.0722	0.0251	עין גדי	IL10
9.83402	0.0039	0.089	0.2648	0.3078	0.3343	עין גדי	IL100
70.75177	0.436	0.272	0.1984	0.0697	0.0237	עין גדי	IL101
66.54398	0.4036	0.2758	0.2125	0.079	0.0289	עין גדי	IL102
69.47013	0.4036	0.2758	0.2125	0.079	0.0289	עין גדי	IL103
...

טבלה 2.1.5. דוגמא של 5 דרגות נזק ברמת המבנה הבודד

את תוצאות הנזקים הללו, ניתן לשיק לבניים ספציפיים בהתאם למיקומם הגאוגרפי (וairo 2.1.5).



איור 2.1.5. המבנים בשלושת היישובים שהוחשו עבורם נזקים מבנים (פוליגון בסגול)

2.1.5 דין

2.1.5.1 מודל המבנה הבודד

עבודה זו עסקה בהערכת נזק למבנים באמצעות גישה חדשה – "גישה המבנה הבודד". הגישה החדשה ייחד עם השיטות והכלים שפותחו בעבודה מknis את היכולת לבצע הערכות נזק מפורטות ולהמחיש את התוצאות והתובנות בಗמישות רבה. תכונות אלו עשויות לשמש כמקפץ לפיתוח יכולות מתקדמות בתחום הערכות הסיכוןים מרעידות אדמה, כפי שיצג בפרק המסקנות. בגישה זו רכיבי הסיכון והנזק המבני נבחרים עבור כל יישות (מבנה) בפני עצמה. זאת, בתנאי שהקיים מידע מפורט בעניין רכיבי הסיכון ובמיוחד רכיב (Exposure) המתאר את מצאי המבנים והישויות הנמצאות בסיכון. מידע זה כולל את הפרטים המבניים/ההנדסיים, מיקום גאוגרפי ותנאי הקרקע של כל יישות.

כאשר עורכים הערכות נזק בהיקף נרחב, לדוגמה ברמה הארצית, סביר שנתמודד עם חוסר במידע פרטוני כפי שצוין לעיל. במקרים שכזה, כאשר חסר מידע מפורט אודות רכיבי הסיכון, נהוג להשתמש בהתאם סטטיסטיים (Census Tracts) המכילים את המידע אודות רכיבי הסיכון בשטחים באופן מיצג. בגישה זו פורמטרים שונים כגון סוג הקרקע ותואצת הקרקע נקבעים באופן אחיד עבור כל המבנים בתחום. לגישה זו יתרון כאשר מבצעים הערכות נזק בקנה מידה גדול, בו לרוב חסר מידע הנחוץ להגדלת רכיבי הסיכון ברזולוציה גבוהה מאד.

2.1.5.2 תרחישי הנזק

ניתוח תוצאות התרחישים מצבי על נזקים נומכים שצפויים להיות עבור תרחישים בעלי מגנטודה $Mw=6$. הגדלת המגנטודה משפיעה באופן משמעותי על היקף ורמת הנזק. למשל, הגדלת המגנטודה מ- $Mw=6$ ל- $Mw=6.5$ (תרחישים המערביים) מגדילה באופן ניכר את הנזק המבני. בין שלושת היישובים שנבחנו, עין גדי נמצאה תחת הסיכון הגדל ביוטר. ניתן להסביר זאת בכך שתואצות הקרקע הצפויות שם, עבור התרחישים שנבדקו גבוהות יותר, עקב הקربה להעתיק הסיסמי. בסיכון התרחישים נמצאו "תרחיש מזרח 3" ($Mw=7.5$) ו"תרחיש מערב 3" ($Mw=7$), כמסוכנים ביותר ליישובים שנבחנו, בהתאם. "תרחיש מזרח 2" ($Mw=7$), ו"תרחיש מערב 2" ($Mw=6.5$), מציגים נזק נמוך יותר וכן יחשבו כבעלי סיכון בינוני. הנזקים הנומכים ביותר מתאפשרים עבור התרחישים "תרחיש מערב 1" ($Mw=6$) ו"תרחיש מזרח 1" ($Mw=6.5$), בהתאם.

בפרויקט הנוכחי חושב גם ערך ה- LR (Loss Ratio), המתאר את הנזק באמצעות ערך יחיד ומונומל. תוכנה זו של ה-LR מאפשרת להשוות בין תוצאות הנזק בצורה נוחה ולהמחישן במפות באופן ברור. כפי שהוצע בעבודה זו, ערך זה ניתן לחישוב עבור מבנה ייחודי ישבו צבר מבנים וגם עבור כל מצאי המבנים שבתרחיש.

6.2.1.6. מסקנות

הערכות נזק ממוקדות לצבר מבנים

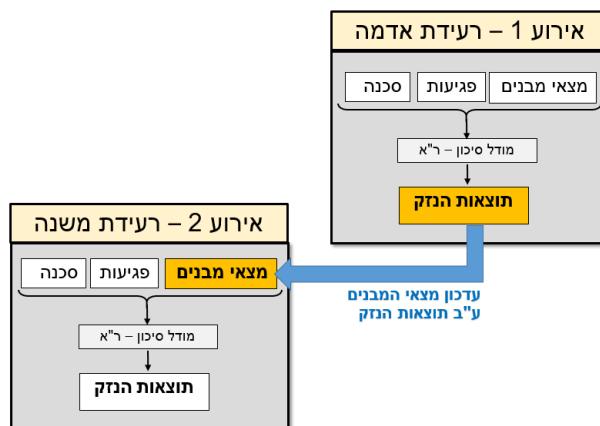
"גישת המבנה הבודד" המתאפיינת באופן פרטני לכל מבנה, מאפשרת לעורר תרחישים נזק באופן מפורט ומדויק ברמת היישוב, שכונה או כל צבר מבנים שיבחר. היישום החדש מאפשר לפתח תרחישים נזק מפורטים עבור שאר הישובים שממוקמים לאורך ים המלח ושאר אזורים עם סיכון גבוה בישראל.

סיכום של תוצאות הנזק המפורטות ושימוש במפות נזק מפורטות יאפשרו לזהות את מוקדי הנזק למרחב הסיכון (עיר, יישוב, שכונה או כל צבר מבנים). השימוש ב"גישת המבנה הבודד", יחד עם השיטות והכלים שפותחו בעבודה זו יוכל לעזור לגורמי החירום למקד את הערכת הנזק ותמונה הנזק ברמת המבנה הבודד. יכולת זו תאפשר לנשח סדר עדיפויות לטיפול פיני אוכלוסייה ומבנים אשר נפגעו בעת אירוע ר"א.

תרחישים "מרובי סיכונים"

הערכת הנזק בגישה המבנה הבודד שהוצאה בעבודה זו, טומנת בה כיוון עבודה חדש ובעל עניין רב – עירית תרחישים "מרובי סיכונים". בתרחישים אלו הסיכון לנכסים והאוכלוסייה מוערך בהתאם למגוון סכנות סיסמיות. עד כה אחד מהאתגרים המרכזיים ביחסות תרחישים "מרובי סיכונים", הוא אופן צבירת הנזק המתkeletal מ嗑כנות השונות. שימוש ב"גישת המבנה הבודד", המעריצה ומציג את תוצאות הנזק ברמת המבנה הבודד (כולל מיקומו למרחב), יכולה לננות ולענות על אתגר זה.

באופן כללי, הנזק המבני שנגרם מהאירוע הראשון, ישמש לעדכון מצאי המבנים, באמצעות עץ החלטות שיתבסס על שיקולים הנדסיים. שיקולים אלו נדרש להפחית עמידות המבנים שניזוקו וניפוי מבנים הצפויים לנזק מוחלט. לאחר עדכון מצאי המבנים הנזוקים מהאירוע הראשון, יחושו הנזקים המתkeletalים מהאירוע השני (כמו, רעידת משנה, גלישת מדרון, צונאמי). לוגיקה זו מאפשרת גמישות מלאה בשילוב מספר גורמי הסיכון וסדר התרחשותם. איור 2.1.6, מציג תרשימים אינטראקטיביים "תרחיש מרובה סיכונים". ככל שידוע לכותבי הדוח "תרחישים מרובי סיכונים" טרם נערכו



באזור ים המלח או בכלל בישראל. על כן, נמליץ על המשך פיתוחם, כדי לתרום להפחחת הסיכון איור 2.1.6. סכימה להפעלת תרחיש מרובה סיכונים. לדוגמה, תרחיש המשלב אירוע של רעידת אדמה עם אירוע עוקב של רעידת משנה.

מרעידות אדמה, למרחב ים המלח בפרט ובישראל בכלל.

אנו מוקוים שתוצאות העבודה זו יתרמו לנושא הערכת הסיכוןים הסיסמיים ושיפור ההיערכות של המדינה בנושא. בנוסף נקווה כי הגישה החדשה והפיתוחים בעבודה יתרמו למקבלי החלטות להבין את היקף הנזק הצפוי באירועי רעידת אדמה שבישובים הממוקמים במרכז ובדרום ים המלח לאחר רעידת אדמה שבאזור, ויעזרו להם להיערך بصورة מיטבית לקרה.

תודות

אנו מבקשים להודות ליובל גולדמן ולאפרת דנצינגר מהמועצה האזורית תמר על עזרתם בפרויקט.

2.2. סמנים לשחזור תנועת סדימנטים לאורך מישורי גירה בתצורת הלשון והשלכות לבניית רקורד פלאוסיסמי מהימן

לוי, צ.¹, ויינברגר, ר.¹ מרkon, ש.², אלסופ, א.³

¹המכון הגיאולוגי

School of Geosciences, University of Aberdeen²

2.2.1. מבוא

2.2.1. רקע

העתק ים-המלח מהווע את המקור העיקרי לפעלויות הסיסמית ולרעידות אדמה חזקות באגן ים-המלח. בעבר ארעו מספר רעידות אדמה לאורך העתק, אשר הסבו נזקים בשטח ישראל, דוגמת רעידות האדמה ביריחו ב- 1927 (Shapira et al., 1993) ובמפרץ אילת ב- 1995 (Baer, et al., 2008).

בנוסף לגורם סיכון זה, החתק הרדוד באגן ים-המלח בגין מסדיינטיטים רכימים וחלשים אשר מהווים גורם סיכון גיאו-הנדסי. בהתאם, חקר מבנים ותנועת סדימנטים רכימים תוצרי רעידות אדמה בעבר, מאפשר הבנה טובה יותר באשר לתגובה הסדיינטיטים הרכימים בעקבות רעידת אדמה עתידית, ובעזרתו ניתן לבנות רקורד פלאוסיסמי מהימן ושלם.

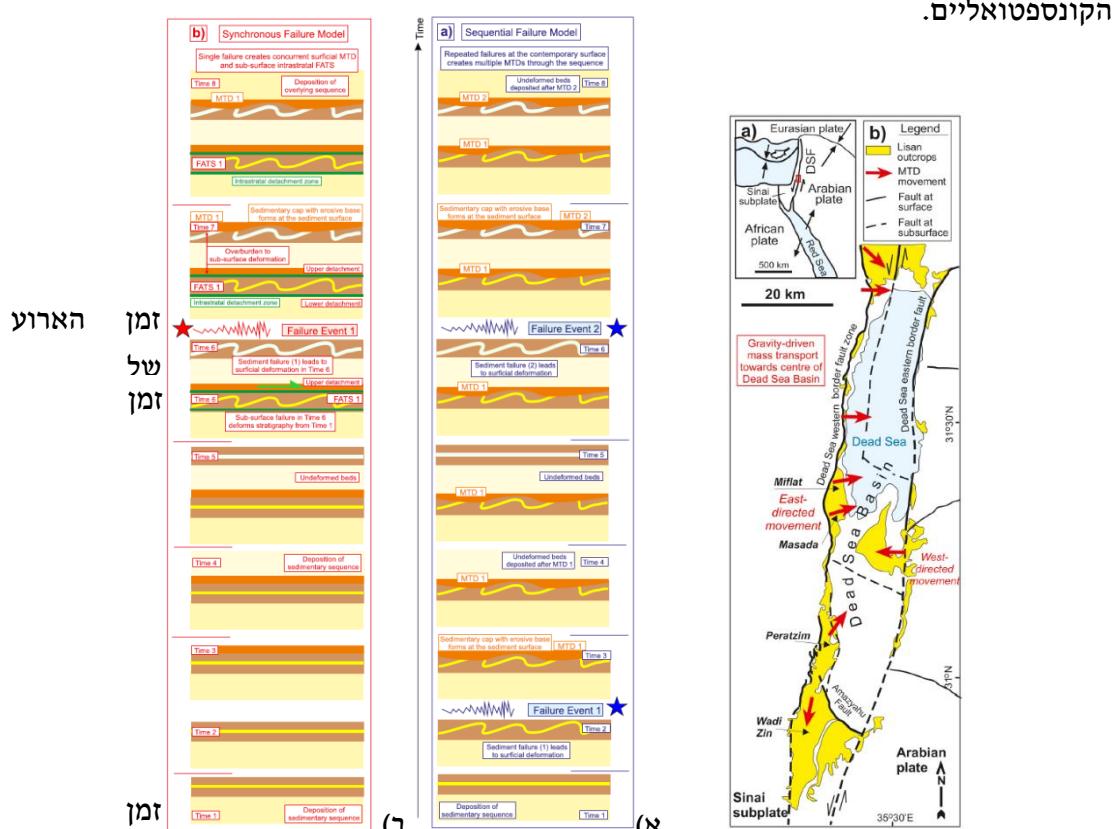
בעת רעידת אדמה המלווה בתנועות קרקע יכולה להתעורר תנועה של סדיינטיטים רכימים במקביל למישורי גירה לעבר מקום נמוך כמו האגן של ים המלח. תנועת סדיינטיטים מעין זו מלואה לעיתים בהתרחשות של קמטים, סדקאים והעתקים שעליה לגרום לנזקים מבנים ובמתקני תשתיות שימושיים לקרקע. למרות הסיכון הרב של תנועות חומר לאורך מישורי גירה המתרכשת בעקבות מעבר הגל סיסמי בחומר, תכפיות השדה שיכולה להיעיד על אירוע זהה הן נדירות. הסיבה לכך היא חוסר בסמנים (markers) מוסטומים כגון סדקאים או העתקים, אשר יכולים להעיד שתנועות חומר לאורך מישורי גירה אכן התרחשו.

בעזרה ניתוח סטרוקטורי של מחשופים לאורך שולי החוף של ים המלח או/וגם מניתוח של גלעינים קידוח, ניתן לבנות רקורד פלאוסיסמי מהימן ושלם ובשילוב עם רקורד סיסמי ניתן לאמוד את זמן החזרה של רעידות אדמה חזקות באזור.

מקובלקשרור את מבני הדפורמציה (קמטים והעתקים) שהתרחשו מרעידות אדמה ומכת הכבידה שפעל על הסדיינטיטים הרכימים שהובילו במورد (MTDs) (mass transport deposits) לתהליך שמתרכש על פני הקרקע. במקרה הנדון הסברת הרווחת היא שהההילך התתרחש על פני הקרקע האגם שעליה שקרה תצורת הלשון או בעומק רדוד הקרוב אליה. לפיק, ההנחה המקובלת בשחזור פלאוסיסמי המבוסס על מחשופים בשדה או מניתוח של גלעינים היא, שמבני דפורמציה שהתרחשו מרעידות אדמה ותנועת סדיינטיטים רכימים לאורך מישורי גירה, מעידים על אירוע רעידות אדמה ברצף הזמן לפי סדר הופעתם בחותם הטריטוריאלי.

בניסיון לשחזר את הסדר הcronologic של תנועת הסדימנטים וההתפתחות מבני דפורמציה (MTDs), דיקרים קלסטיים מוסטיטים או העתקים מוסטיטים) לאורך מישורי גזירה מחשופים או מתוך גלעוני קידות, עליה השאלה האם מישורים אלו מעידים על כשל רציף שהתרחש בזמן (מודל של "כשל רציף"; Sequential failure model) או לחילופין, האם מישורים אלו הם תוצר של אירוע סייסמי בוודד אשר יכול היה ליצור מישורי גזירה קרוב לפני השטח ומישורי גזירה בתה הקרווע בשכבות טטריגרפיות שונות (מודל של "כשל סינכרוני"; Synchronous failure model). ככלומר, מבני דפורמציה שמתוועדים בתה הקרווע בשכבה מסוימת יכולים היו להיווצר באירוע סייסמי שהיה מאוחר מגיל השכבות אשר מונחות מעל שכבה זאת. היחסום של אחד ממודלי קצה אלה הינו קרייטי שכן יכול לתקבל ורקוד סייסמי עם דרגת מהימנות יחסית נמוכה עקב הגדלה או החסירה של מספר אירועי הפלג לעומת מספר אירועי הפלג שהתרחשו בפועל.

כדי להתחקות אחר שני מודלי קצה אפשריים אלו בשדה ולהציג קריטריון אשר יוכל להבדיל בין שני מודלים אלו, נבחנו מספר רב של מבני דפורמציה של סדימנטים רכים בשכבות של תצורת הלשון מגיל פלייסטוקן מאוחר באגן ים המלח (איור 2.2.1). במהלך העבודה זהו מבני דפורמציה עם מצאים המעידים על דפורמציה מחדשת של מערכות קמטים שנוצרו בהובלה על פני מדרון בשלב מוקדם יותר (Reworking of surficial MTD horizons by secondary sub-surface) אך בשל מגבלות אורך הדור"ח ומורכבות הנושא הוחלט להתמקד בשני מודלי הקצה הקונספטואליים.



איור 2.2.2. ציורי המראה של מודל "כשל רציף" (א) ומודל של "כשל סינכרוני" (ב). במודל "כשל רציף" מישורי גזירה קרוב לקרקעית האגם נחלים שוב ושוב בסוללים הזמן. מבני ה MTDs נחתכים על ידי משטח אירוזיבי ובמקומות אי רגולארים שונים לאורכם הם מתמלאים ב"שכבת חיפוי" של חלקיים דקים ששקעו מהתרחיף (בכתום חיפוי) של MTDs. במודל של "כשל סינכרוני" (ב). מבני ה- MTDs קרוב לפני השטח

איור 2.2.1. מפה טקטונית כללית המציגה את העתק ים-המלח ואת אתרי המחקר הממוקמים בסמוך לים המלח (נחל מפלט, מישור מצדה ומישור עמיעז).

2.2.2. מטרת הפרויקט

הצגה של מספר קרייטריונים סטרוקטוראליים עיקריים לאבחנה בין דפורמציה של סדימנטים רכימיים שהובילו על קרקעית האגם או בסמוך אליה לבין דפורמציה של סדימנטים רכימיים שהתחفتה לאורק מישורי גירה מתחת לקרקע.

2.2.3. דפורמציה של סדימנטים רכימיים

תנועה של סדימנטים רכימיים (MTD) מתרכשת בדרך כלל לאורק המוריד (nettling the load) יכולת להיות גם פחתה ממעלה) של קרקעית מקווה המים. מקובל לחשוב שפנוי המשטח העליון של ה- MTDs משקפים במידה מסוימת את הבתימטריה של קרקעית מקווה המים ושל כך הם יכולים להיות איזוגלאוריים. תנועה של ה- MTDs יכולה להתבטא בהחלקה איטית של שכבה לאורק המוריד ללא דפורמציה, בתנועה של סדימנטים מלאה בדפורמציה (Slump) או בתנועה יחסית מהירה מאד (Fast debris flows).

יחד עם זאת, ידוע שתנועה של סדימנטים רווים במים עם רמת ליתיפיקציה נמוכה יכולה להתרכש גם מתחת לקרקע כתוצאה ממושך عمودת הסדימנטים ולפתח מבני קמטים בזיקה עם העתקים הפוכים (fold and thrust systems (FATS)). משמעות הדבר שאם תהליך שכזה אכן התרחש, למעשה ניתן מותק החתך הסטרטיגרافي לבצע התאמה בין גיל הסדימנט לבין הזמן של אירוע הדפורמציה.

מודל של "כשל רציף" (Sequential failure model) מתאר תהליך שבו כל שכבה של מבני דפורמציה המופיעה בחתך הסטרטיגרפי מייצגת אירוע של כשל בודד בזמן (למשל, Kumar et al., 2021). במהלך התנועה של ה- MTDs חלקיקים דקים עלולים להידחס בין קפלים הסדימנט ולהזדק למים וליצור תרחיף אשר ממנו תוכן כדי ולאחר הובלת הסדימנטים שכעתה שכבה של חלקיקים דקים אשר מכסה את שכבת מבני הדפורמציה (Sedimentary Cap, SD). במודול זה השכבה של מבני הדפורמציה ושכבות החלקיים הדקים ששקעו מהתרחיף (SD) מבטאות אירוע בודד בזמן. לכן מספר מסויים של שכבות של מבני הדפורמציה עם שכבות, SD יbeta מס' זהה של אירועי כשל ברצף הסטרטיגרافي (איור 2.2.2 א).

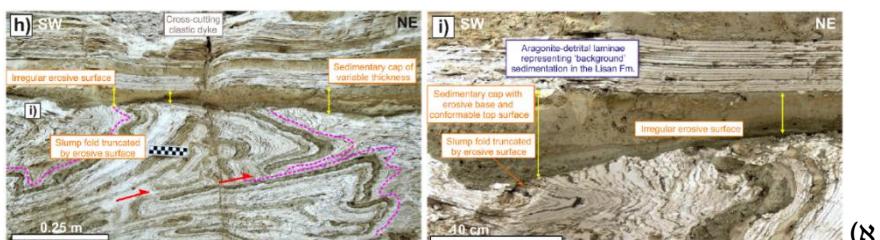
במודל של "כשל סינכרוני" (Synchronous failure model), יכולות להתפתח בו-זמן שכבות של מבני דפורמציה לאורק מישורי גירה נפרדים מתחת לקרקע (איור 2.2.2 ב). למשל, Williams (1960) תיאר תהליך שבו התרחשה "החלקה תוך-צורתית" (intraformational sliding) לאורק מישורי גירה מתחת לקרקע בתוך שכבות של סדימנטים רכימיים. ההחלקה הזאת נגרמה כתוצאה מעומס عمودת הסדימנטים שהיו מונחים מעל שכבות עם קוזהיה נמוכה שהיו קבועות מתחת לקרקע.

באיור 2.2.2 ב הממחיש את מודל ה"כשל הסינכרוני" שיוושם בפרויקט, אירוע ה成败 הראשון יתרחש רק בזמן "6" (איור 2.2.2 ב Time 6 in figure:) וזאת רק לאחר שנוצר עובי משמעותי של סדימנטים. במודול זה, אירוע ה成败 הראשון נוצר על ידי תנועה של סדימנטים קרוב לפני השטח שמתלווה אליה יצירת קמטים. במקביל מתפתח כשל תוך שכבות מתחת לקרקע שהביא לניתוק של הסדימנטים הרכימים בעומק. באյור 2.2.2 ב ניתן לראות התפתחות של שכבה המכילה מבני דפורמציהHon קרוב לפני השטח והן מתחת לקרקע בזמן "6" כאשר במקור שכבה זאת שקעה בזמן "1".

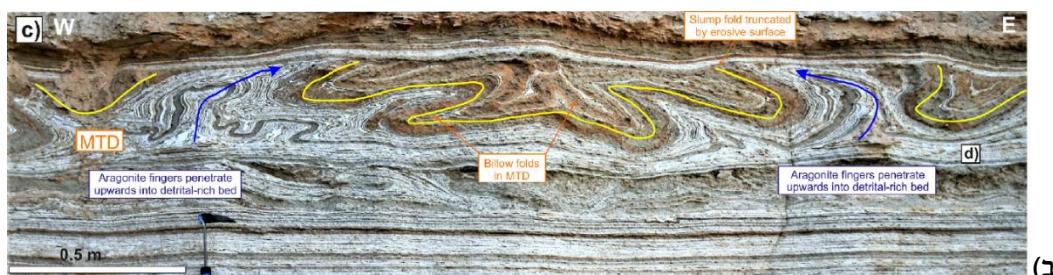
2.2.3.1. קרייטריוונים לזיהוי דפורמציה של סדימנטים רכימיים שהתרחשה קרוב לקרקעית האגם
מישוריים או אופקי גזירה הגדעים מבנים קיימים הם أولי הסמנים החשובים ביותר לכך ששכבת מבני דפורמציה התפתחה קרוב לקרקעית האגם. אתרים שונים בהם נחשפת תצורת הלשון אכן ניתן לזהות מישוריים כאלו החותכים למשל מבני קימוט ודייקם סדימנטריים. בנוסף, "משקעי חיפוי" (Sedimentary caps) אשר מכיסים את שכבות מבני הדפורמציה מהווים עדות נוספת לכך שהדפורמציה התרחשה קרוב לקרקעית האגם (איור 2.2.3).

עדויות נוספות לכך שהדפורמציה התרחשה קרוב לפני השטח, הן העתקה (Syn-depositional folding) או קימוט (faulting) שמתרכחים תוך כדי השקעת הסדימנט.

2.2.3.2. קרייטריוונים לזיהוי דפורמציה של סדימנטים רכימיים שהתרחשה מתחת לקרקע
ניתו של יחסי מפגש בין מישורי החלקה מקבילים (Bed-parallel detachments) עם מבנים שונים (למשל, העתקים תלולים), יכול לעזורAAD בקביעת הגיל היחסית של אירוע הכהל.
למשל, במקרה מייצג מאוזר מצד אחד ראות צמוד של העתקים נורמליים (conjugate normal faults) אשר נחתכים (מעלה ומטה) על ידי מישורי החלקה מקבילים ישרים. תצפית זאת מעידה על כך שאירוע הכהל התרחש מתחת לקרקע (איור 2.2.4).

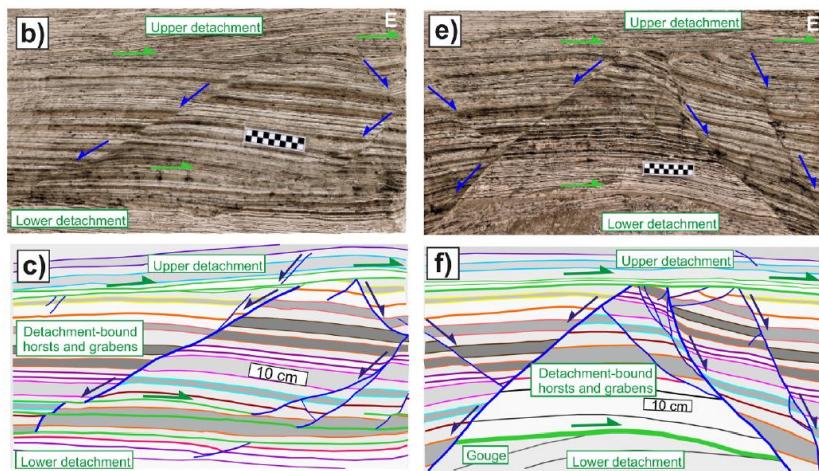


(א)



(ב)

2.2.3.3. תצפיות מנהל פרצים (א) ומישור מצד אחד (ב) בהן ניתן לזהות מישורי גידוע אי רגולריים החותכים קמטים ושכבת פרגמנטים מוקומת עם שכבות שלחיפוי סדימנטרי, עדות לכך שהדפורמציה התרחשה קרוב לקרקעית האגם.

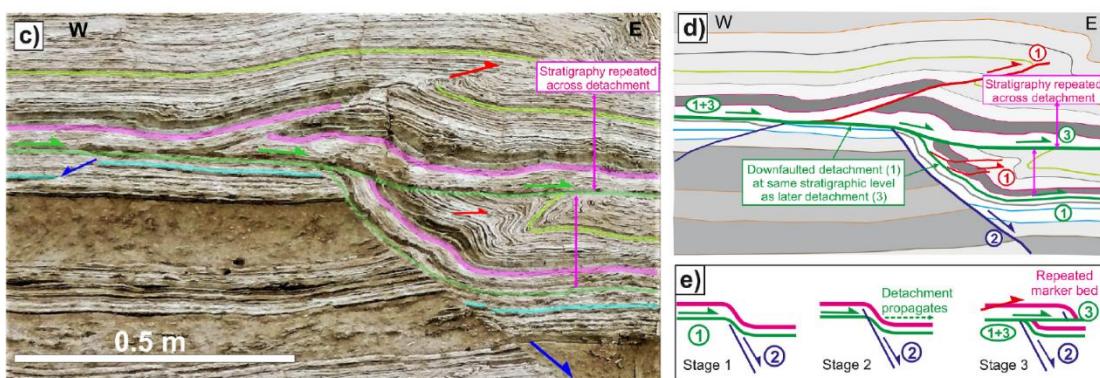


איור 2.2.4. תיעוד של יחס גומליין בין מערכות העתקים של צמדי העתקים נורמלאים (אזור מזרח) ומישורי החלקה תחת מקבילים. גידוע החלק העליון של העתקים, שהתרחש לאורך מישורי גזירה תחת אופקי חד החוטן את הסדימנטים של תצורת הלשון מעיד שהחלקה התרחשה מתחת לקרקע.

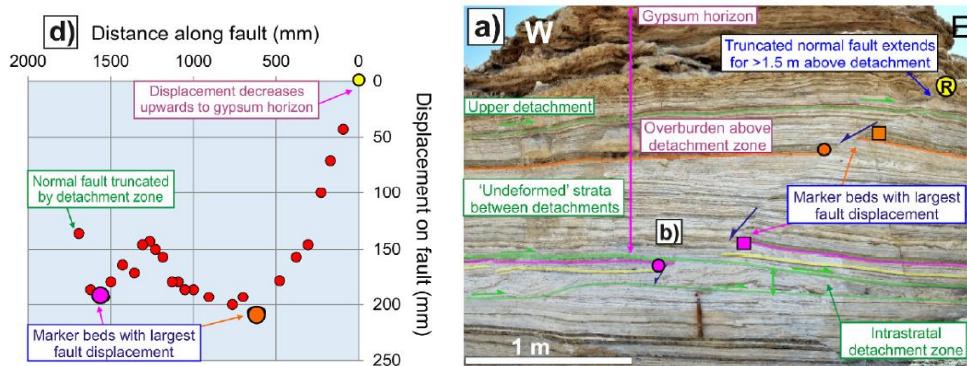
יחס גומליין בין מערכות העתקים מוקדמים לבין מישורי החלקה מקבילים מאוחרים יותר יכולם להתבטא בהכפלת החתך, מצא המuid על כן, שהחלקה התרחשה מתחת לקרקע. עדויות נוספות להובלת סדימנטים מתחת לקרקע הן מבני הזרקה שמתפתחים מתחת לקרקע ונמצאים בזיקה עם מערכות של קמטים (איור 2.2.5).

עדויות ליחס גומליין בין מערכות של קמטים והעתקים הפוכים המלווהים עם מבני הזרקה התתומניים מעלהם ומחתיהם על ידי מישורי החלקה מקבילים יכולות מגדיר לקבוע שהדפורמציה התרחשה מתחת לקרקע (איורים 2.2.6-2.2.8).

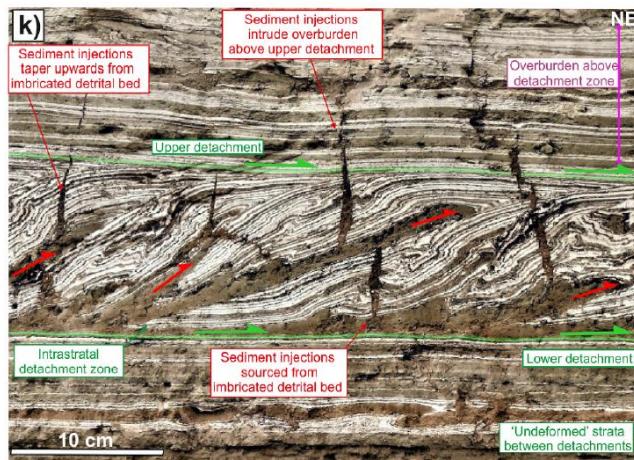
לעתים ניתן לזהות במחסומים יחס גומליין מורכבים בין מבני דפורמציה שונים. למשל, במחשוף בנחל פרצים, ניתן לזהות שכבות מבני דפורמציה המייצגת ארווע של של מוקדם שהתרחש קרוב לפניה קרakeup האגם ושכבות דפורמציה שממוקמת מעליה המייצגת ארווע של של צער שהתרחש מתחת לקרקע (איור 2.2.9).



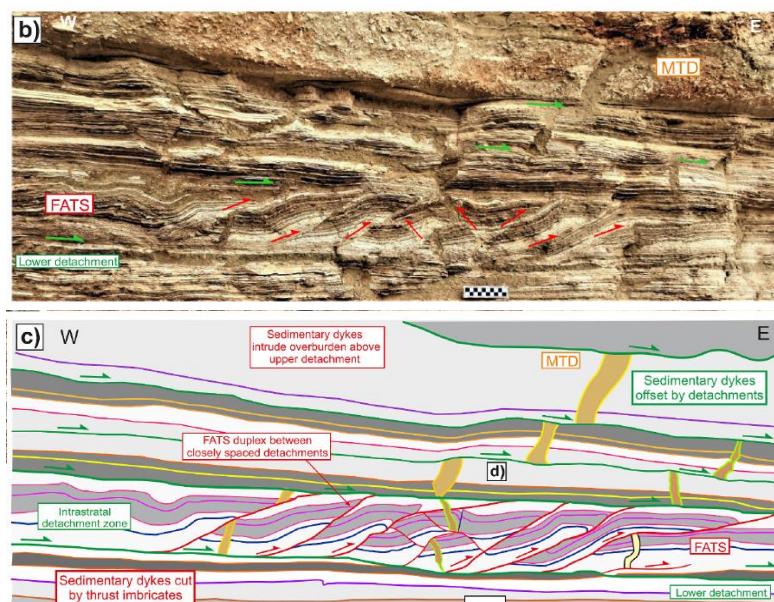
איור 2.2.5. תיעוד של הכפלת חתך על ידי תנוצה לאורך מישורי החלקה מקבילים בזיקה עם העתק נורמלי (נהר מפלט). האיור מצד ימין מציג באופן סכמטי את השלבים בהם הוכפל החתך הסטרטיגרافي על ידי העתקה נורמלאלית שלוותה תוך כדי החלקה לאורך מישורי הגזירה המקבילים. שחזור זה של העתקה תוך כדי החלקה לאורך מישורי גזירה ישרים ומקבילים הננו עדות לכך, שהחלקה התרחשה מתחת לקרקע.



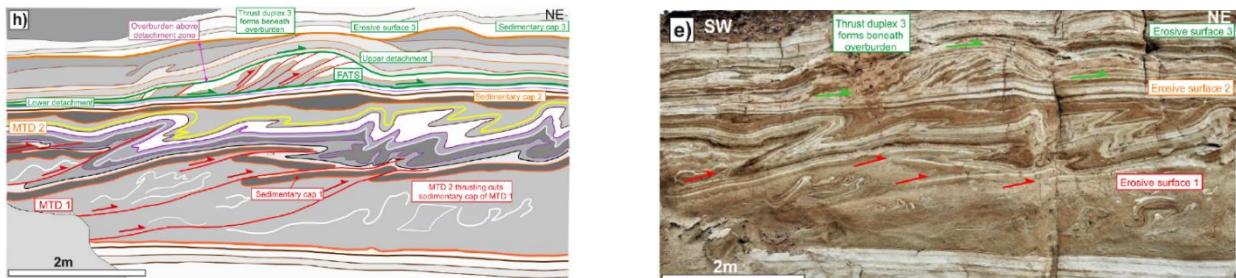
איור 2.2.6. תיעוד של ייחסי גומליין בין העתק נורמאלי (נחל מפלט) ומיישורי החילקה מקבילים (מעלה ומטה) עם גוף המשחזר את כמות ההחלקה לאורך מישור העתק (איור מצד שמאל).



איור 2.2.7. תיעוד (נחל מפלט) של מערכת קמטים והעתקים הפוכים אשר תוחמים בין שני מיישורי החילקה מקבילים מעלה ומטה עם מבני הזקחה שנוצרו תוך כדי הקימוט או מיד לאחר מכן. תצפית זאת מראה בברור שהובלת הסידיננטים לכיוון צפון מזרח התרחשה מתחת לקרקע אך מאוחר יותר מזמן השיקעתם המקורי.



איור 2.2.8. תיעוד (נחל מפלט) של מערכת דיאלקטים קלסטיים שנוצרו בתהליך של הזקחה הגדועים על ידי מיישורי גזירה תת אופקיים שלו בקיימות ושבירה ההפוכה. תצפית זאת הנה עדות טובה לכך, שהה��פתחות של מבני הדפורמציה וההחלקות לאורך מיישורי הגזירה התרחשו מתחת לקרקע.



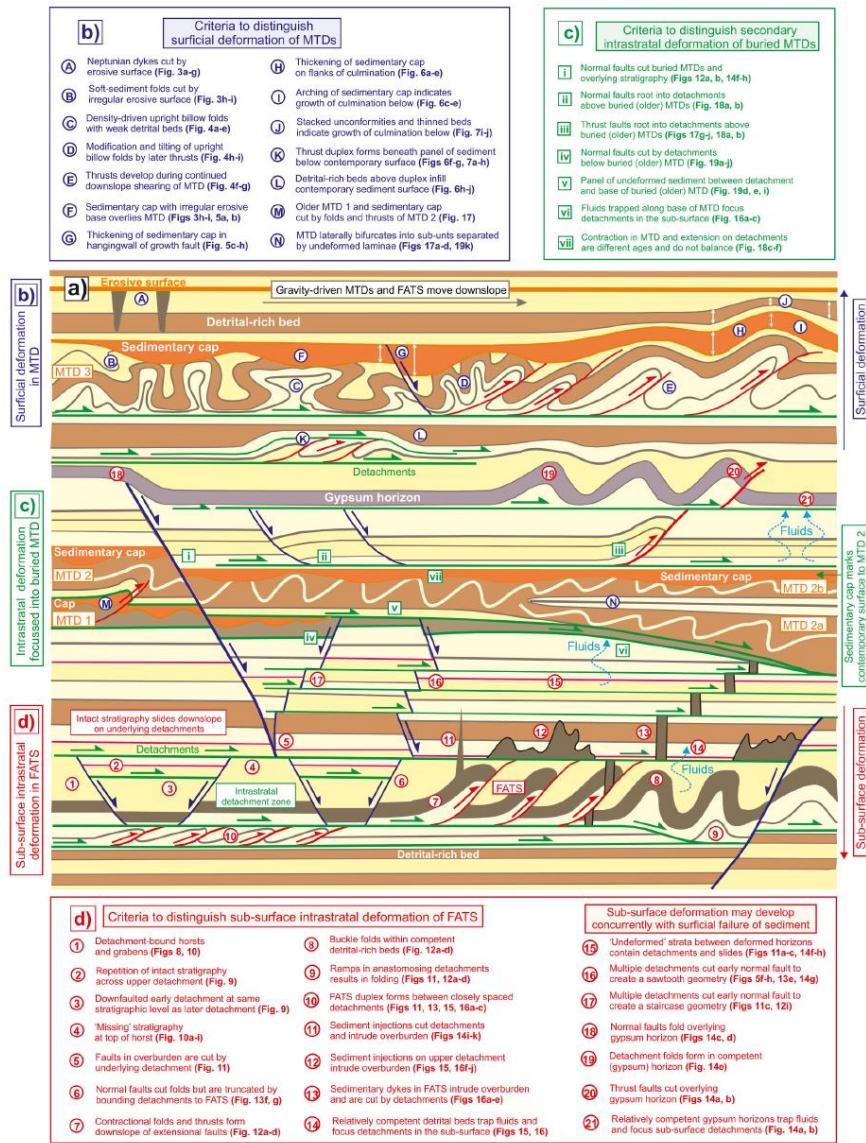
איור 2.2.9. תצפית (נהל פרציטים) המתארת תהליכי דפורמציה מורכבים (תמונה מהשדה מימין עם שחזור מצד שמאל). למיטה מזוהה שכבת דפורמציה 1 (MTD1) עם שכבה של Sedimentary Cap המUIDה שהדפורמציה בשחזור (משמאלי), למיטה מזוהה שכבת דפורמציה 2 (MTD2) מעליה מזוהה שכבת דפורמציה 3 (MTD3) עם קמטים ושבירים בשלב הראשוני התರחשה קרוב מאד לקרקעית האגם. מעליה מזוהה שכבת דפורמציה 4 (ארוע1) מעל שכבת MTD2 (בחלק העליון של הповלים המעטיקים את שכבת החיפוי הסידמינטרי השיכית לאரוע1). מטהו מזוהה שכבת דפורמציה נוספת (FATS) עם העתקים הפוכים (FATS), עדות לכך שהדפורמציה המאוחרת התרכשה בתת-הקרקע.

2.2.4. דין

במהלך הפרויקט גובשו מספר קרייטריונים סטרוקטוראליים שבאמצעותם ניתן להבחין בין הובלות סידמינטיים להתרכשה קרוב לקרקעית האגם לבין דפורמציה של סידמינטיים רכים שהתרכשה לאורך מישורי החלקה בתת הקרקע (איור 2.2.10). למעשה וכך, שקרייטריונים אלו יכולים להיות לעזר גם במקומות נוספים בהם קשה לקבוע האם הסידמינטיים המעוותים הינם תוצאה של הובלה בהשפעת כח הכבידה לאורך המורד או שהדפורמציה התרכשה כתוצאה מטקטוניקה.

הפרויקט הנוכחי בשילוב עם תצפיות שנעשו במקומות אחרים בעולם (Ortner and Kilian, 2016, p.357) מראה שהופעה של מישור הגודע שכבה של מערכת קמטים הנה עדות לכך שהקליפות התרכש לפני השקעת שכבות הסידמינטיים הבאה הממוקמות מעלה השכבה המקומתית. עבודות באגמים שבצ'ילה (למשל, Molenaar et al., 2021) הראו שהובלות סידמינטיים קרובות לקרקעית האגם יכולה להתרכש עד כ- 20 ס"מ מתחת לקרקעית האגם, כאשר עומק זה יכול להגיע ככל ששיפוע המדרון או מגנטוודות רעידת האדמה גדלה.

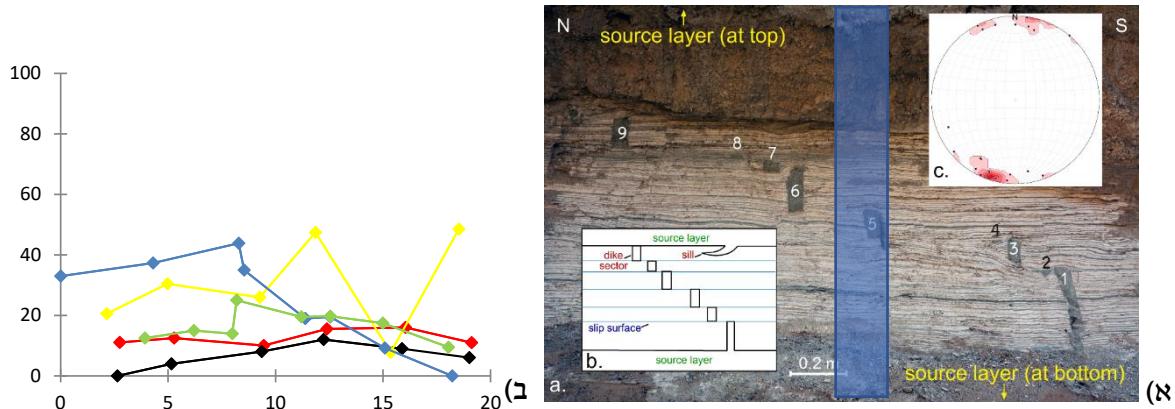
איורו של הובלות סידמינטיים על קרקעית האגם יכולה במקביל לגרום לכשל בתת הקרקע כתוצאה מעודת הסידמינטיים שנוסף בפתאומיות על סידמינטיים רכים רווים במים עם קוהזה נמוכה. תהליך שכזה יכול להיות מלאה גם בתחוםות. התצפיות מראות שכבות דפורמציה רבות התפתחו כתוצאה מהובלות סידמינטיים קרובי לקרקעית האגם. יחד עם זאת זהו מספר שכבות דפורמציה שהתפתחו לאורך מישורי גירה בתת הקרקע. במקרים אלו השכבות היו תוחומות על ידי מישורי החלקה (מטה ומעלה) כאשר גיל הארץ של הכשל האמתי למעשה אינו ידוע.



איור 2.2.10. איור המראה המסכם את הקритריונים להבחנה בין ארווי החלקה של סדימנטים רכים המתרחשים על פני קרקעית האגם (כיתוב בכהול) וקרוב אליה בין ארווי החלקה המתרחשים בתת הקרקע וגורמים לדפרומציה מחודשת של קמטים קודמים קבועים (כיתוב בירוק) וליצירת מבני קמטים (כיתוב באדום).

בהתבסס על עבודות קודמות שלנו שנערכו לאורך נחל פרצים בשילוב עם מדידות מארג מגנטי נראתה שההחלקה בתת הקרקע יכולה להיות אף מורכבת יותר ממה שתואר לעלה. למשל, בתייעוד של מקטעים של דיק קלסטי מוזרק נראה היה שדייק זה הווסט לאורך חמישה אופקים עיקריים המתוארים בחתך הסטרטיגרافي (איור 2.2.11). משמעות ניתוח של ממצא זה היא שבאזור בוודד של

ריעית אדמה יכולם להיווצר מספר מישורי החלקה תת מקבילים בתת הקרקע אשר יכולים לגרום להסעת סדימנטים רכיבם לעבר המורדר או מרכז האגן.



איור 2.2.11. א) מקטעי דייקים קלסטיים מוסטיטים לאורך שכבות תחת-אופקיות שתועדו לאורך מספר תחנות במחשוף בנחל פרצימ. מידת המרחקים בין מקטעי הדייקים לאחר מכון שימושה לבניית פרופיל תזוזה לאורך ובניצב למשוררים תזוזה אלו. כל החלוקת התוරחו באירוע בודד (ב). מלבד בכך מדמה מקרה של קידוח היפוטטי אשר חודר את שכבות תצורת הלשון של המחשוף. במקרה זה חוקר הגליין יכול להניח שכל אחד ממשורי הגזירה מצין אירוע סייסמי בודד ובכך "يגדל" מספר האירועים בركورد הפליאוסיניים בהשוואה למספר האירועים שהוא בפועל.

2.2.5. סיכום

תצלויות השدة והניתוחים הסטרוקטוראליים שהתבצעו בשנה החולפת בשילוב עם עבודות קודמות שלנו ותצלויות מקומיות נוספות בעולם מעלים שונות של סדימנטים לאורך מישורי גזירה הנגרמת מרעידה אדמה יכולה להתறחש על קרענות האגם ובמקביל גם בתת הקרקע. כמו כן, יכולה להתறחש החלקה באירוע בודד של ריעית אדמה לאורך מספר מישורי גזירה בתת הקרקע. בהתאם, מוצע ליישם את הקритריון שגובשו בפרויקט בתהליך של בניית רקורד פליואסיני שלם ומהימן לפי הדגשים הבאים:

- 1) במחשובים ובגלווני קידוח בהם לא מתווידים סמנטים בולטים כמו דייקים קלסטיים, והעתקים יש לקחת בחשבון שהרכיב הפליאוסיני עולול להיות "בחוסר";
- 2) מספר מישורי החלקה שנוצרו באירוע בודד בתת הקרקע יכולים לגרום להגדלה במספר אירועי בركورد הפליאוסיניים;
- 3) אירוע בודד יכול לגרום להחלקה על גבי קרענות האגם ולאורך מישורי החלקה בתת הקרקע, כאשר כל מישור החלקה שכזה יכול להיחשב כירוע של ריעית אדמה ובכך לגרום לשגיאה בركورد הפליאוסיניים;

4) יש להניח שבמידה וקיים מסוים יחוור דרך הבלוק הרכוב והבלוק השוכב של העתק נורמלי אשר מועתק על ידי מספר מישורי החלקה מאוחרים יותר, ארוועי רעידות האדמה שגרמו לגזירת העתק הנורמלי לSEGMENTIM לא ירשמו בركورد הפליאוסיני.

2.3 מעקב אחר תנועות קרום אופקיות ואנכיות באזור אגן ים המלח

חמייאל, י.,¹ פיאטibratov, א.¹

¹ המכון הגיאולוגי

2.3.1. רקע

במחקר הנוכחי אנו בוחנים את הדפרומציה הטקטונית המתרחשת באזור אגן ים המלח. אגן זה ממוקם בחלקו הדרומי של העתק ים המלח (איור 2.3.1) המהווה את המבנה הטקטוני הפעיל ביותר באזורנו מביניהם סיסמית המיצר רעידות אדמה חזקות. העתק ים המלח ממוקם לאורך הגבול בין הלוח הטקטוני של סיני והלוח הערבי ומתרחשת עליו תנועה شمالית יחסית בין שני הלוחות הטקטוניים. הדבר מתבטא בעוצמת שמצטרב עם הזמן, מרוכז בעיקר בשולי הלוחות, ומשתחרר ברעידות אדמה. במחקר הנוכחי השתמשנו במידידות GPS לצורך הבנת אופי וקצב התנועה באזור אגן ים המלח.

סקרי GPS לאורך העתק ים המלח מסיעים בהערכת התכונות המכניות של העתק ומספקים תשובה לשאלות מה קצב ועומק הנעילה של העתקים השונים והאם העתק "גובל" וצובר באמצעות או שהוא "זוחל" ומשחרר מאמצים. נתונים אלו הכרחיים כדי להעריך את הסיכוי לרעידת אדמה במקטע מסוים של העתק. במידידות GPS קודמות קבעו שיעור תנועה אופקי של כ-5 מ"מ לשנה באזור הערבה, דרוםית לאגן ים המלח (Masson et al., 2015; Hamiel et al., 2018a). שיעורים דומים התקבלו צפונה לאגן, לאורך העתק יריחו (Hamiel et al., 2018b). במחקר משלים שביצעו לאחרונה מצאנו כי גם באזור אגן ים המלח קצב התנועה האופקי הכלול הוא של כ- 5 מ"מ לשנה ואולם מחקר זה הניח העתק יחיד במרכז אגן ים המלח (Hamiel and Piatibratova, 2021). במסגרת המחקר הנוכחי מדדנו תחנות GPS קבועות ותחנות קמפניין (איור 2.3.1) וזאת לצורך קביעת אופי ושיעור התנועה האופקית והאנכית. במחקר שולבו נתונים מתחנות קבועות נוספות ובוצע עיבוד וניתוח משותף של כלל תחנות המדידה באזור.

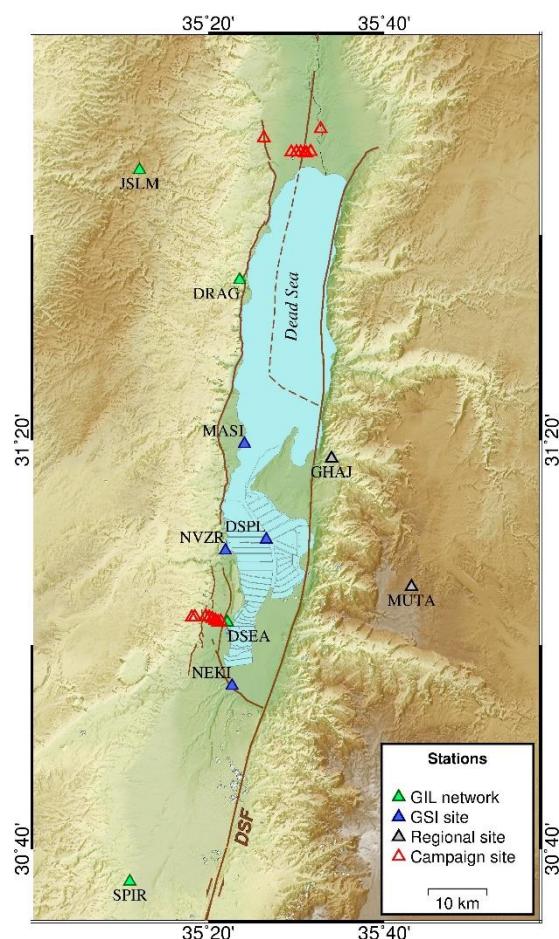
2.3.2. שיטות- מדידה ועיבוד של נתוני תחנות ה-GPS

במהלך מחקר זה הקמנו 4 תחנות GPS קבועות ו- 16 תחנות קמפניין באזור אגן ים המלח (איור 2.3.1). תחנה קבועה אחת (NEKI) הוקמה רק השנה (ולכן תוצאות המדידה אין נכללות בדוח זה). סך הכל עובדו הנתונים הגולמיים מ-25 תחנות קבועות ו- 16 תחנות קמפניין שנמדדו בין השנים 2009-2022. המחקר כולל נתונים שלוש רשותות שונות: רשות תחנות הקמפניין היא רשות צפופה בקרבת העתק ים המלח. רשות זו ממוקמת לאורך שני פרופילים בדרום וצפון אגן ים המלח. רשות צפופה זו הוקמה בשנת 2009 על ידי המכון הגיאולוגי לישראל ונ마다ה במשך 8-24 שעות מדי שנה בין השנים 2009-2022.

בנוסף לתחנות הקמפני השתמשנו בנתונים גולמיים מ 21 תחנות GPS קבועות בישראל השVICOT לרשות התחנות הקבוע של ישראל (GIL network). כמו כן, השתמשנו ב 4 תחנות GPS קבועות (MASI, DSPL, NVZR, NEKI) שהקמו באגן ים המלח במסגרת הפרויקט הנוכחי. הקמת תחנות אלו התרחשה בשלוש השנים האחרונות בלבד.

הנתונים הגולמיים מכלל תחנות ה GPS הקבועות והקמפני עובדו יחד באמצעות תוכנת GAMIT/GLOBK 10.7 (Herring et al., 2018). רכיב ה-GPS בתוכנה משתמש בנתוני המדידה, בנתוני המיקום של לויני-ה-ארץ ופרמטרים נוספים הקשורים לסייע כדור הארץ ועיכובים אטמוספריים ומיצר מטריצת מיקומיים יומיים של התחנות ומרחקים ביניהם. GLOBK משלב את כל הנתונים הימיים ויוצר פתרון רב שנתי למיקום ומהירות של תחנות. הליק העיבוד שלנו כלל שתי הרצאות של GAMIT ו-GLOBK. בתום ההרצאה הראשונה, מתקבלים מיקומיים ומהירות ראשוניות. מיקומיים ומהירות אלומתניים לאחר מכון כערכים-פרוריים עבור הרצת נוספת של GAMIT ו-GLOBK. התוצאות הסופיות כוללות את קואורדינטות ומהירות של כל התחנות ביחס למערכת ייחוס גלובלית - ITRF2014.

כדי להבין את הדפרמציה המקומית בקרבת העתק ים המלח המרנו את כל מהירות המערכת היחסוס הגלובלית (ITRF2014) ל מערכת ייחוס מקומית. בחרנו מהירות התחנות למערכת היחסוס של לוח סיני.עשינו זאת תוך שימוש בנתוני קווטר אוילר של לוח סיני כפי שהתקבלו מחקרים קודמים שלנו (Hamiel et al., 2018a,b; Hamiel and Piatibratova, 2019; Hamiel and Piatibratova, 2021).



איור 2.3.1. מפה המציגת את מיקום תחנות ה GPS. מושלים ירוקים מצינים מיקום התחנות קבועות מהוות חלק מרשת תחנות הקבע של ישראל. מושלים כחולים מצינים תחנות קבועות שהוקמו ונמדדו במסגרת מחקר זה. מושלים אדומים ריקים מצינים תחנות קמפני שנמדדו במסגרת פרויקט זה. קוים חומים מצינים את מיקום החזקים העיקריים. DSF- העתק ים המלח.

2.3.3. תוצאות עיבוד נתוני ה- GPS

2.3.3.1 מהילויות אופקיות

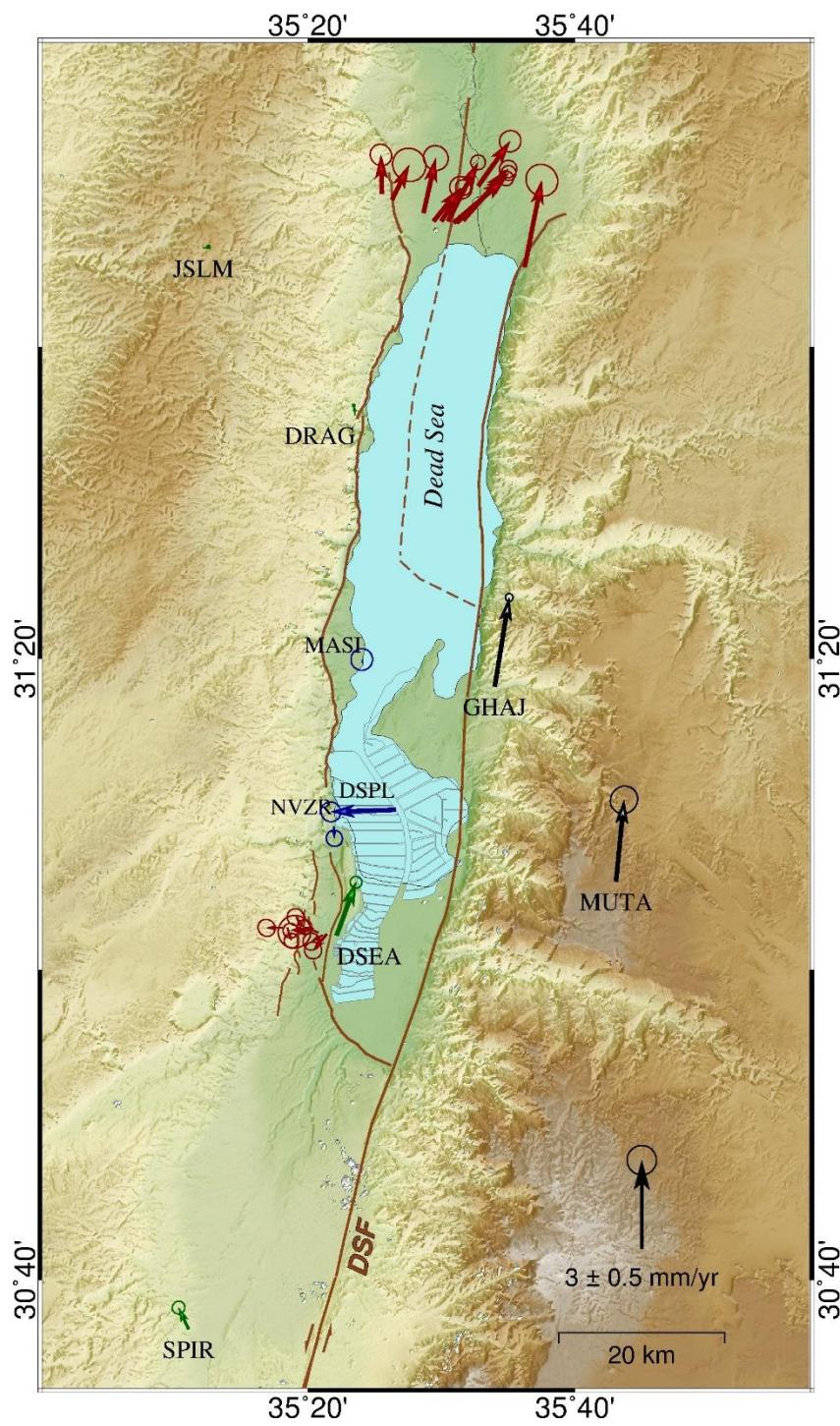
פייזור התחנות והמרקח הקטן יחסית בין תחנות אפשרי בחינה מפורטת של קבועי התנועה על העתקים ספציפיים ולאורך גבול הלוחות באזורי אגן ים המלח. איור 2.3.2 מציג את מהירותי האופקיות של תחנות ה- GPS ביחס ללוח סיני ומראה את התנועה השמאלית של הלוח הערבי ביחס ללוח סיני. בתוך לוח סיני והרחק מהעתק ים המלח, מהירות התחנות קרובה לאפס. לעומת זאת לאורך דרום אגן ים המלח ובקרבתו, שינוי מהירותו הוא חד ממירות אופקית אפסית למירות של כמה מילימטרים בשנה (איור 2.3.2). שינוי חד זה מרמז על זיהילה של חלקו הרדוד של ההעתק באזורי אגן ים המלח. נושא זה ידון בהרחבה בהמשך הדוח. כפי מוצג באיור 2.3.2 יש התאמה כללית בין מהירותי תחנות הקמפני ותחנות קבועות למעט תחנת DSPL הממוקמת בגבול בין ישראל לירדן בקרבת דיאפר המלח של הלשון (לייסאן). תחנה זו מראה תנעה מעורבת וככל הנראה מושפעת מהתהליכים מקומיים הקשורים בתנועת המלח בעומק האדמה, בקרבת דיאפר הליסאן (מזורח לתמונה).

איור 2.3.3 מציג את הרכב המקביל להעתק ים המלח של מהירות התחנות לאורך פרופיל חזקה העתק בדרום אגן ים המלח. תחנת DSPL הנמצאת בקרבת דיאפר המלח של הליסאן אינה נכללת בפרופיל מהירות זה. האיור מציג בבירור את התנועה השמאלית על גבי העתק ים המלח בדרום האגן הכוללת שינויים משמעותיים ומהירות בקרבת העתק הגובל המזרחי של אגן ים המלח. תוצאה זו מצביעה על זיהילה רדודה על גבי העתק זה ותידן בפרק הבא.

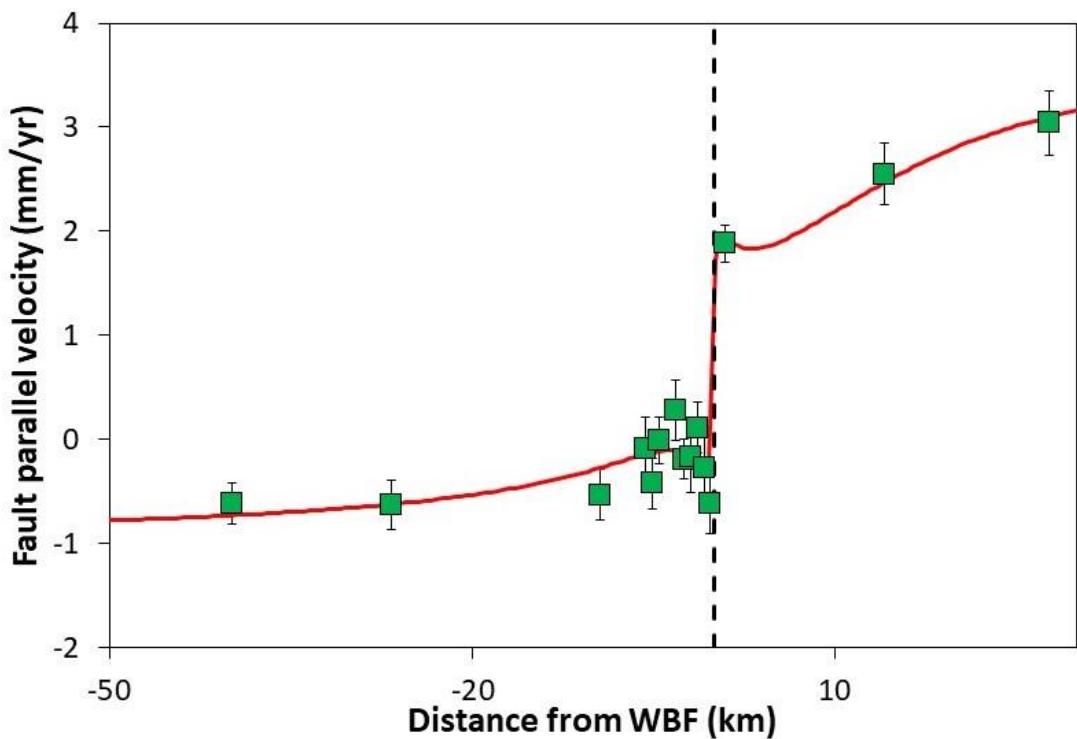
2.3.3.2 מהילויות אנכיות

איור 2.3.4 מציג תוצאות ראשוניות של מהירותי האנכיות המתקבלות עבור תחנות הקבע באזורי אגן ים המלח. באופן כללי ניתן לראות התרומות של תחנות ה GPS ממערב לאגן ים המלח ושקיעה משמעותית (כ- 30 מ"מ לשנה) של התחנות בתוך אגן ים המלח. עוד ניתן לראות כי מחוץ לאגן ים המלח ההתרומות דועכת לכיוון מערב, ככל שמתארחים מאזור אגן ים המלח, עד קצב התרומות מזרחי בקרבת הים התיכון.

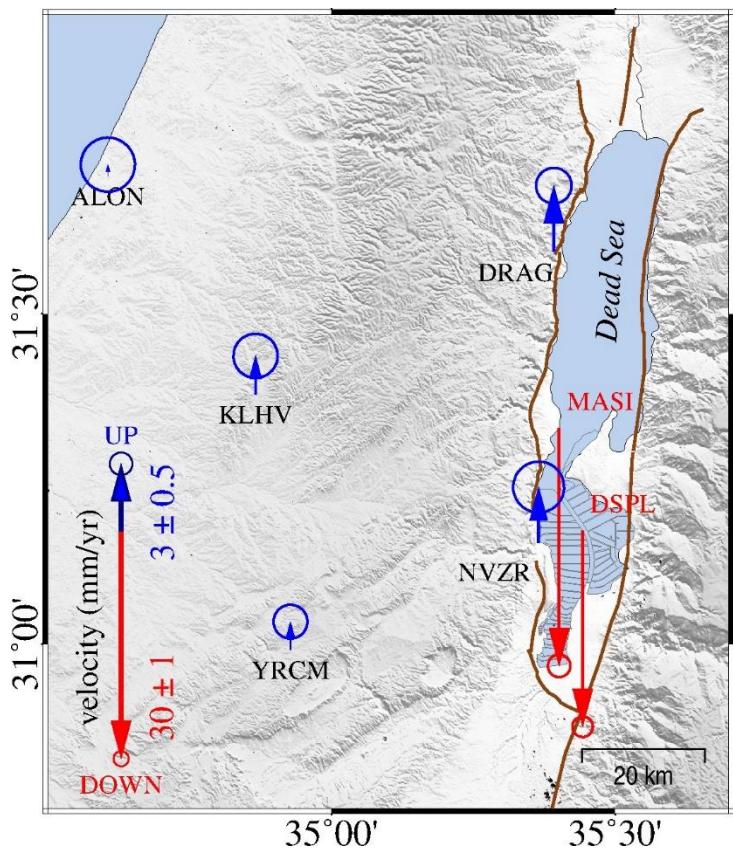
איור 2.3.5 מציג סדרות זמן של השקיעה היחסית של תחנות MASI ו- DSPL שנמצאות בתוך אגן ים המלח. השקיעה כאן מוצגת ביחס לתחנת DRAG הנמצאת ממערב להעתק הגובל המזרחי של אגן ים המלח. תוצאות דומות התקבלו ביחס לתחנת NVZR הממוקמת ממערב להעתק הגובל המזרחי של אגן ים המלח.



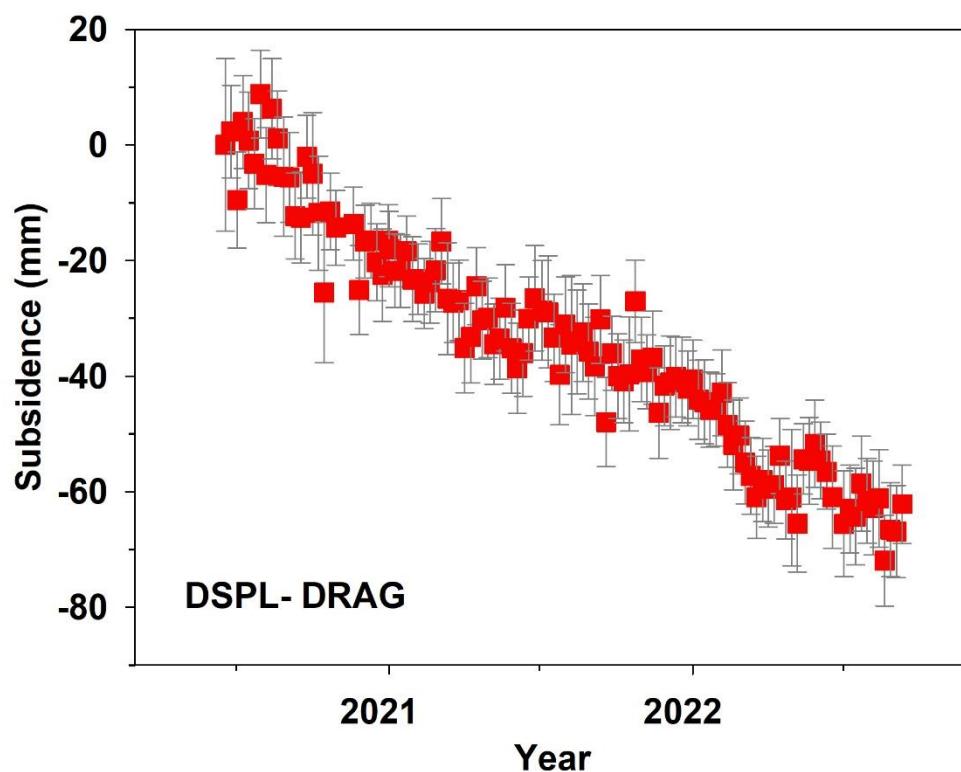
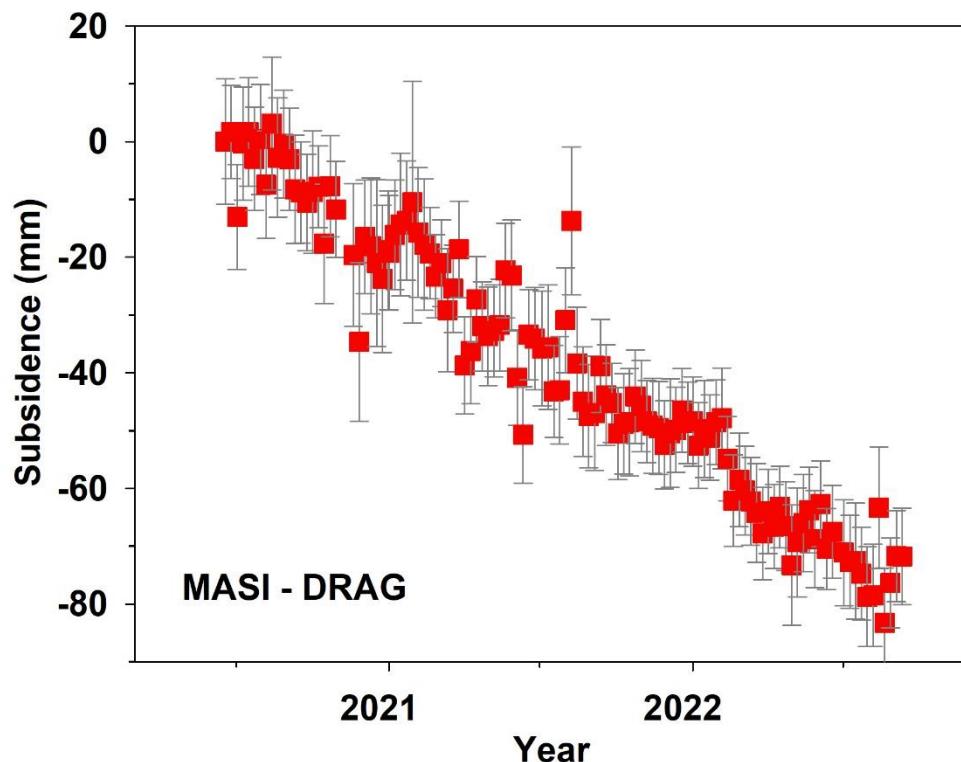
איור 2.3.2. מפת מהירות אופקית של תחנות ה-GPS ביחס ללוח סיני. חצים אדומים מציגים מהירותים מציין ני מהירות של תחנות קמפיין. חצים ירוקים וכחולים מציגים מהירות של תחנות קבועות (כפי שモוצגות באיור 2.3.1).



איור 2.3.3. פרופיל מהירות תחנות ה GPS במקביל להעתק ים המלח לעומת המרחק מהעתק העתק הגבול המערבי (WBF) באזורי דרום אגן ים המלח. מרובעים ירוקים מצינים את מהירותות תחנות ה GPS בכוון העתק. קו אדום וצף מצין את תוצאות המודל הכלול זהילה בחלק הרדוד של העתק. קו מוקוקו מצין את מיקום העתק הגבול המערבי. תוצאות המודל מצביעות על קצב תנואה שמאלי כללי וקצב זהילה רדודה זהים, של 2.5 ± 0.4 מ"מ לשנה על העתק הגבול המערבי. על פי המודל ההזילה מתרכשת בשלושת הקילומטרים העליוניים.



איור 2.3.4. מפת מהירות אנכית של תחנות GPS קבועות. חצים אדומים מצינים שכיהה. חצים כחולים מצינים התרומות. קיימת מחוז לאגן ים המלח והיא דועכת ככל שמתרחקים מהאגן. השכיהה קיימת רק בתחום אגן ים המלח. עקב קצב השכיהה הגדל בתחום האגן (כ 30 מ'מ לשנה) הסקללה המוצגת עברו שכיהה והתרומות היא שונה.



איור 2.3.5. סדרות זמן המציגות את השקיעה של תחנות MASI (למעלה) ו- DSPL (למטה) הנמצאות בתווך אגן ים המלח ביחס לתחנת DRAG הנמצאת ממערב לאגן.

2.3.4. דין

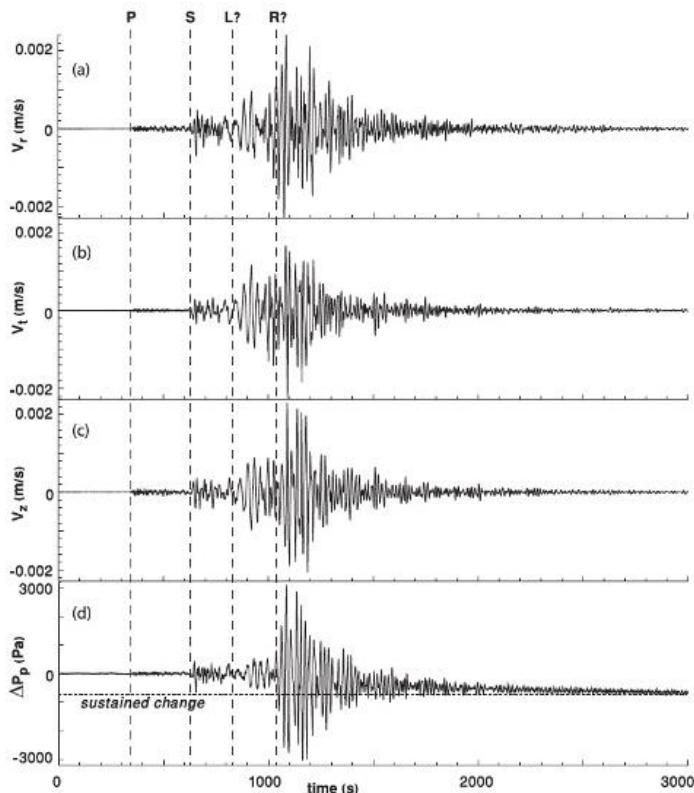
לצורך ניתוח תוכאות המדידה שהתבצעה בין השנים 2009-2022 והבנה טוביה יותר של קצב התרבות על גבי העתק הגבול המערבי של אגן ים המלח הצבוי מודל דו-מימדי פשוט (e.g. Hamiel and Piatibratova, 2019). פרופיל המהירות האופקית של תחנות ה GPS (איור 2.3.3) מציג על שינויים גדולים ב מהירות בקרבת העתק הגבול המערבי בדרום אגן ים המלח. תוצאה זו מצביעה על זהילה רדומה על גבי העתק זה. לנוכח בסיס המודל הנחנו כי העתק זה זוחל בעומקים רדודים. תוצאות הסימולציות הדו-ממדיות מצביעות בבירור כי קצב החלקה הכלול וקצב הזחילה הרדומה הם זהים ובועל ערך של 2.5 ± 0.4 מ"מ לשנה. עוד נמצא כי העתק זוחל מעלה عمוק של 3 ± 0.6 ק"מ. העומק בו נמצא מעבר מהעתק נועל להעתק זוחל נמצא בהתאם טוביה עם העומק בו מצוי שכבה מלחה עבה בתת הקרקע הרדוד (Hamiel and Piatibratova, 2019; 2021). נתוני סקרים סייסמיים וקידוחים מאזור דרום אגן ים המלח מצביעים על שכבות מלחה עבותות מתחורת סדום עד עומק של כ- 3 ק"מ בבלוק העליון ובעמוק שבין 3.5 ל-4.6 ק"מ בבלוק הירוד (Hamiel and Piatibratova, 2019). צפונה יותר, תוצאות סדום יוצרת מבנה כיפה דיאפרית ושבבות מלחה עבותות נחשפות על פני השטח (Ben-Avraham and Schubert, 2006; Weinberger et al., 2006) תוצאות דומות של עומק מלחה הוצגו על ידי Garfunkel (2014) אשר השתמש בתנאים סייסמיים ובנתוני קידוחים והסיק את התפלגות גופי המלח לאורך חתך צפון-דרום באגן ים המלח. לפיכך, אנו מציעים כי התאמת עומקים זו מצביעה על כך שהתנהלות הזחילה הרדומה נשלטה על ידי הנוכחות והתכונות המכניות של שכבות מלחה הרdrodot בagan ים המלח. התכונות המכניות של מלחה מאפשרות דפורמציה פלסטית ו/או צמיחה של הסדימנט ולכן אפשרות כל הנראה גם זחילה של העתק בחלקו הרדוד. תוצאות ראשוניות של התנאים האנכיווות שהתקבלו בעבודה זו (איור 2.3.4) מציעות שקיעה בתחום אגן ים המלח. השקיעה המתකלת כאן היא בסדר גדול גודלה יותר מאשר קצב התרבות לאורך העתק ים המלח. עוד קיבלנו כי מחוץ לאגן ים המלח ישנה התורמות מחוץ לאגן אשר דועכת מערבה, ככל שמתרכזים מהאגן. סביר להניח כי רק חלק מקצב השקיעה הגדל שנדדי בתחום אגן ים המלח (כ- 30 מ"מ לשנה) הוא טקTONI. קצב השקיעה הגדל של תחנות DSPL ו- MASII הנמשך כבר מספר שנים (איור 2.3.5) מצביע על כך כי ניתן ומעורבים כאן תהליכי הקשורים לקומפקציית סדימנט בתחום אגן ים המלח או דפורמציה הקשורה לשכבות מלחה רdrodot. השקיעה ותനועה מערבה של תחנת DSPL (איור 2.3.4) מצביע על כך שיתכן ומדובר כאן בתנועה א-סייסמית על העתק נורמלי הנמצא ממזרח לתחנה ונוטה מערבה, בגבול המערבי של דיאפר המלח של הליסאן. תנועת ההתרומות מחוץ לאגן ים המלח יוארה בעבר לירידה במפלס ים המלח (Nof et al., 2012) או להתרומות הנובעת משינויים איזוסטטיים הקשורים לתהליכי סדימנטציה בהם התיכון לאחר היוצרים העתק ים המלח (e.g. Steinberg et al., 2014). תוצאות העבודה זו מצביעות על כך שיתכן וקיים גורם דומיננטי אחר הגורם להתרומות מחוץ לאגן ים המלח. יתכן והשערה הגדולה בתחום אגן ים המלח והשינויים האיזוסטטיים הנובעים ממנה הם שגורמים לסביבת האגן להתרומות, ולכן התרומות זו דועכת ככל שמתרכזים מהאגן. מדידות נוספות בתחום ומוחוץ לאגן ים המלח בסיוו של מודלים מכניים אפשרו להבין טוב יותר תופעה זו בעtid.

2.4. ניטור הפעולות הסיסמיות וההידרואיסמיות על העתקים המלח

קורזון, א.¹, גリンברג, ל.¹

1 המכוון הגיאולוגי

2.4.1 רקע

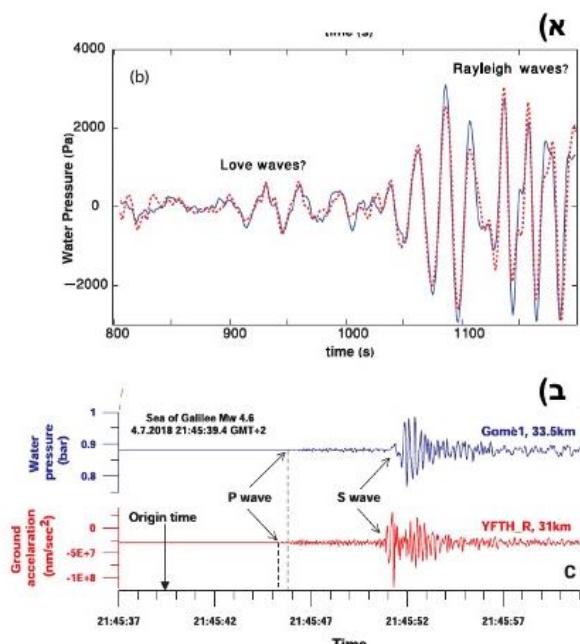


איור 2.4.1 דוגמא להקלטה של רעידות טלה-סיסמיות בחישננים סיסמיים (V) ובמד לחץ מים (ΔP). הגענות של P, S, Love, Rayleigh בעידת אדמה $M_w=7.3$ בספטמבר 2013 בפקיסטן. העורצים הסיסמיים מסווגים למערכת קווארדיינטוט בכיוון רעדת האדמה (R – בכיוון הרעדיה, T – בניצב, Z – אנכי). התחנה הסיסמית היא GEM, הקידוח הוא "גומה 1" (~ 10 ק"מ דרומה). האיור לקוח מתוך Shalev et al. 2016a.

בשנים האחרונות נעשו מספר מחקרים בארץ, אשר עשו שילוב של נתונים מחיישנים סיסמיים ונתונים ממדי מפלס ומדי לחץ בבורות קידוח. מחקרים אלה התבוסטו על קורלציה שנעשתה בין מכשירים סיסמיים במיקום אחד לעומת חישננים אחרים במקומות קרובים, אך שונים. בשני מאמריהם של שלו וחוביו (Shalev et al., 2016a, b) נעשה ניתוח כמותי של ההשפעה של גלים סיסמיים מרuidות רחוקות טלה-סיסמיות על התכונות האלסטיות והפоро-אלסטיות על המסלע שבסביבה מדי מפלס המים במספר קידוחים בישראל. על ידי ניתוח גלי השטח (איור 2.4.1) וקורס קורלציה של הגלים ביחס לממדות של לחץ המים, חולצו למדידות של לחץ המים, חולצו פרמטרים פורו-אלסטיים של המסלע בסביבת הקידוח, והותאמו לשוואות סקמפטון; כך

הוזגム למעשה של לחץ המים מושפע מציגוד בין הרכיבים הנפחיים ורכיבי הגזירה של המעוות בלסויי הסביבה (Shalev et al., 2016b). במאמר נוסף (Shalev et al., 2016a), נעשה ניתוח של שינוי מפלס בזמןנים ארוכים יותר בעקבות רעידות אדמה טלה-סיסמיות וניתן מודל המסביר כיצד הגלים הנפחיים מייצרים דחיסה והגדלה של לחץ הנקבובים, בעוד גלי הגזירה מגדילים את הנזק.

קו-לוקציה של חישנים סיסמיים ומדוי מפלס/ לחץ



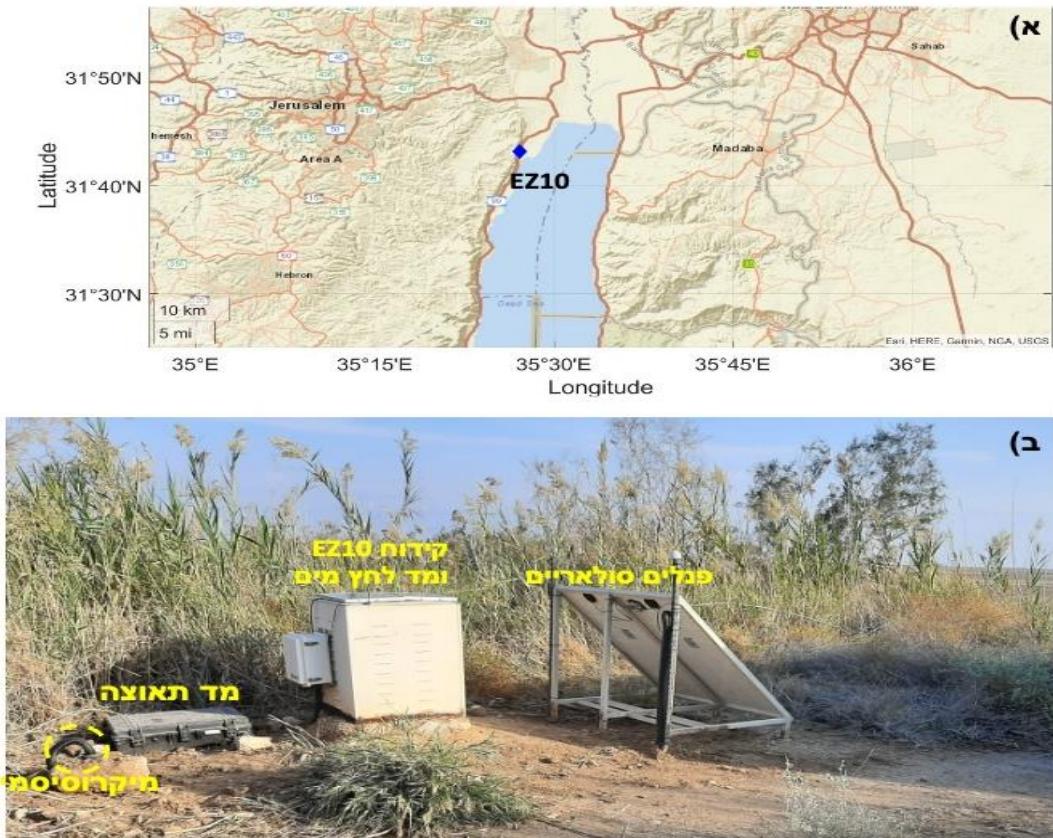
איור 2.4.2. א) דוגמא לשימוש בקרוס-קורלציה ברעידות אדמה (מתוך Shalev et al., 2016a) להתחממה בין מדיד לחץ המים לבין המוחוש מתוך 3 רכיבי המהירות של החישן הסיסמי. **ב)** דוגמא לרעידה מקומית הנצפיתה בקידוח גומה 1 ובמדת תאוצה בקיובץ יפתח (כ- 3 ק"מ משם; מתוך Lutzky et al., 2020). לא ניתן לעשות קרוס-קורלציה, גם לא לגלי ה-S מכיוון שמסלול הגלים כבר שונה משמעותית.

משמעותני, למשל בעזרת קרוס-קורלציה של האותות (איור 2.4.2).

התוצאות המתמשכות של מדיד לחץ המים מראות שMapView המים רגיש מאד לרעידות אדמה גם בrama המקומית, והם מגיבים גם לרעידות מקומיות קטנות יותר. מבחינה זו, ניתן להגיד שהבנה טובה יותר של האותות המוקלטיים במדיד לחץ המים, יכולה להוביל אותנו לשימוש מושכל בעתיד באוותם חישנים, בעוד תחנה ברשת הסיסמית המנתרת רעידות אדמה.

אחד האזוריים היוטר פעילים הוא אזור עין פאשחה, קידוח EZ10 (איור 2.4.3 א'), מפלס המים שם מראה באופן עקבי אוסף של אותות שהלכים קשورو לרעידות אדמה מקומיות, וחילקו לא קושרו לרעידות ידועות. אותן אלה יכולים לנבוע משני מקורות עיקריים: א. העתקים מקומיים עליהם מתרחשות רעידות מיקרוסיסמיות, ב. קריסות בתת הקרקע עקב פעילות של בולענים. תיתכנה אולי אפשרות רעידות נספות, ועל מנת להבין טוב יותר את פשר התופעה, הקמנו תחנה ראשונית ניסיונית בצדד לקידוח (בו מותכן החישן ההידרולוגי) – שם הותקנו גם חישנים סיסמיים (איור 2.4.3 ב').

בעוד שכאשר מדובר ברעידות רחוקות, ניתן לעשות קורלציה בין חישנים סיסמיים וקידוחים אשר ממוקמים מספיק קרוב (סדר גודל של קילומטרים בלבד), מאחר שהדרך אותם עושים עשוים הגלים הסיסמיים כמעט זהה לחלווטין, אין זה במקרה כאשר מעוניינים ברעידות מקומיות וקרובות, בהן הדרך בין האירוע לחישן הסיסמי וקידוח קרוב יכולה כבר להשנות משמעותית. במאמר של לוצקי וחובריו (Lutzky et al., 2020), נעשה שימוש בחישן סיסמי הממוקם כ- 3 ק"מ ממד לחץ-מים, לטובה ניתוח ההשפעה של רעידה מקומית 4.6 Mw בכנרת, ביולי 2018, על תגובת האקוופר באזורי. בין השאר, הם הראו שתגובה מערכת המים הייתה לגלי ה-S ולא לגלי ה-P, שהוא כפי הנראה חלש מדי. אולם מעבר לניתוח איזוכתי, מיקום השונה של התchanות הגביל את היכולת לעשות ניתוח יותר



איור 2.4.3. התחנה הידרואיסמית בקידוח EZ10. א) מפת מקום. ב) מיקומי הקידוח ומד לחץ המים, החישון המיקראיסמי, ומד התאוצה מסומנים בצהוב.

מטרות הדוח

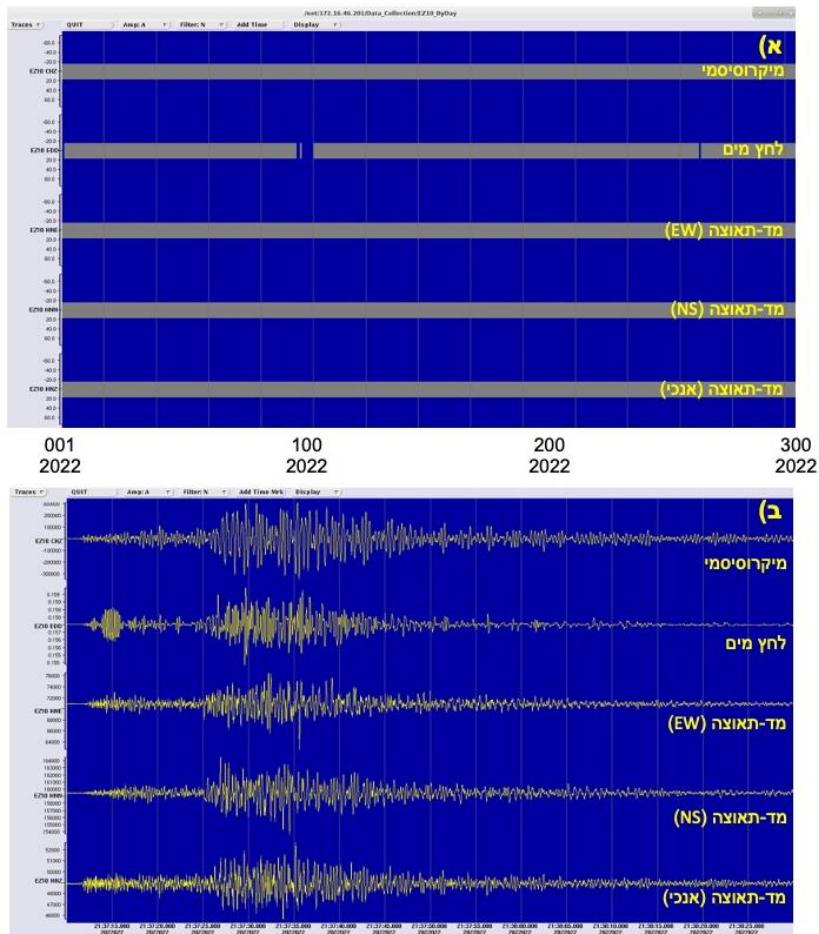
מטרות דוח זה הן לתאר: א. מה ה被执行 עד כה על מנת לבנות תשתיית מחקרית שתאפשר ביצוע מחקר הידרואיסטולוגי בתחנה בודדת כאב-טיפוס ראשון? ב. להציג ממצאים ראשוניים מבחינת סוג הקטלוג הסיסמי וההידרואיסמי שנitinן לבנות מתוך הנתונים הקיימים. ג. להציג את הפוטנציאל הקיים בהידרואיסטולוגיה ביחס לניטור של אירועים סיסמיים מסוימים בסקלנות מקומית.

2.4.2. בסיס נתונים

תחנת עין פאשחה שודרגה לטובה ניטור מיקראיסמי ב- 30 בדצמבר, 2021. השדרוג כלל: 1) העלה של קצב דגימת הנתונים של חישון הלוח בקידוח מ- 40 דגימות לשניה ל- 200 דגימות לשניה, 2) הוספה של רושם נתונים, סוג אובסידיאן (Obsidian) של חברת קינמטרייקס (Kinematics), 3) אשר בתוכו מד-תאוצה עם רגישות גבוהה ($\pm 1g$), עם 3 ערווצים: שניים אופקיים ואחד אנכי, 4) הוספה של חישון מיקראיסמי, עם ערוץ יחיד, אנכי, של חברת גאוספייס (GeoSpace), וקצב דגימת נתונים של 500 דגימות לשניה (איור 2.4.3).

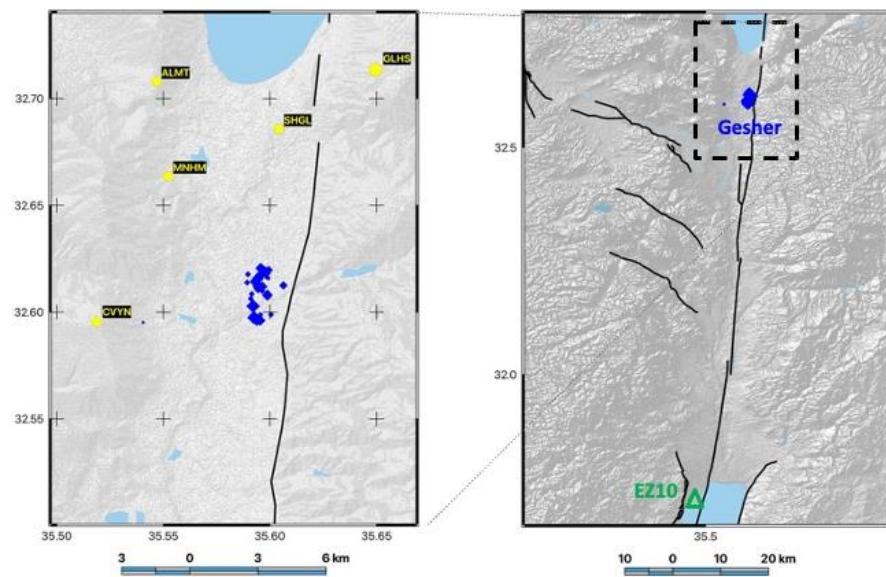
המידע הסיסמי נאסף פעמיים ביום באופן אוטומטי, והמידע הידרולוגי נאסף פעמיים בשבוע באופן יומי – כל המידע נאגר בשורת המכון הגאולוגי בטיקייה ייחודית. המידע הידרולוגי עובר המרה מפורמת ביןארי אחד לפורמט מיניסיד (miniseed), שהוא סטנדרט בינלאומי מקובל לניהול נתונים סיסמי.

כל המידע נרשם לתוך בסיס נתונים סיסמי מסווג CSS3.0. איור 2.4.4 מראה את זמינות הנתונים כפי שהם מופיעים במכשיר תוכנת אנטילופ (Antelope; www.brtt.com), התוכנה המשמשת לניהול הנתונים הסיסמיים.

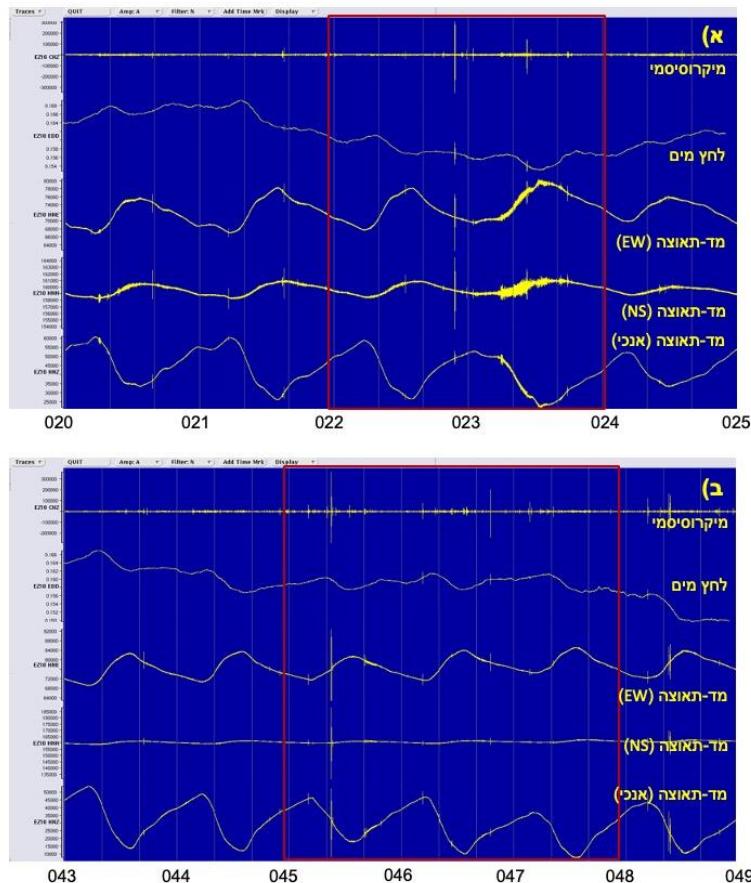


איור 2.4.4. מושך תוכנת אנטילופ המאפשרת בדיקה של זמינות הנתונים, ופעולות שונות לניטוח צפויות ראשוני של הרכב הגלים והח提ימה הסיסמית שלהם. א) זמינות הנתונים על פני כ-300 ימים מאז תחילת ההתקנות. ב) דוגמא לרעידת אדמה.

על-מנת לבצע באופן מבוקר ומובנה את הבדיקות הראשוניות, נבחרו מספר ימי מבחן החופפים לצבר האירועים הסיסמיים אשר התרחשו באזורי גשר, צפוןית לבית שאן, בתאריכים 22-23 לינואר, ו-15-16 לפברואר, 2022 (איורים 2.4.5 ו-2.4.6). האירועים היותר משמעותיים בцеיר נקלטו באופן ברור על-ידי כלל החישנים במקום.



איור 2.4.5. מפות מיקום אירופי גשר ביחס ל-EZ10.
ב) הגדלה של תפוקת האירועים הסיסמיים במרחב ביחס למתחנות "תרועה".



איור 2.4.6. הימים בהם התרחשו ה震颤 הראשוני ובנויית הקטלוג הראשוני. המלבנים החומים מסמנים את הימים בהם התרחשו רעידות אדמה במסגרת הצבר של גשר. א) 20-25 בינואר; ב) 12-17 לפברואר 2022.

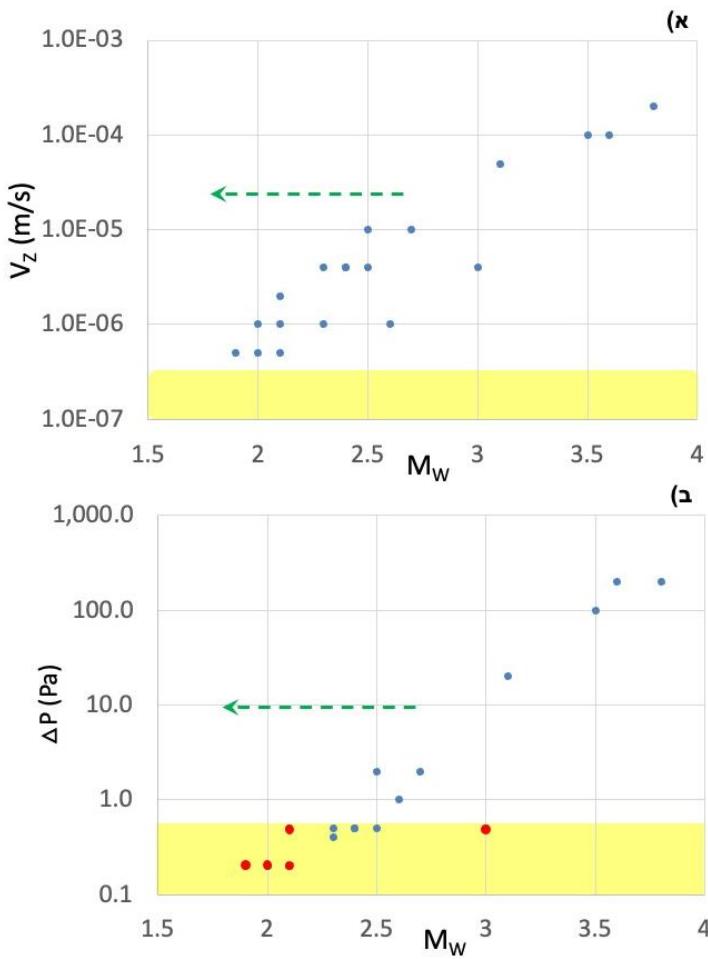
2.4.3. ניתוח ראשוני של הנתונים

השימוש בהם יש בנתונים הידרואיסמיים הקלוטות ברורות של רעלות אדמה ידועות, כולל איכון מדויק של אותן רעלות, מאפשר לנו נקודת התחלת טוביה, בה אנו צופים ומתרשים כיצד נראות רעלות אדמה סיסמיות בשלושת החישנים. מתוך סך 38 הרעלות אשר תועדו בצד רעלות האדמה, הוקלו בתחנת EZ10 תשעה-עשר אירועים מגנטוודה של $Mw >= 1.9$ (ראה טבלה 2.4.1).

טבלה 2.4.1. אירועי גשר וכיידם הם נקלוטים בחישנים השונים של EZ10. מתוך 38 רעלות של הצד הסיסמי, 19 נקלטו בחישון המיקרוסיסמי, וمتוכם 12 נקלטו גם במד לחץ המים. האירועים באודם מצינים את 7 האירועים שנקלטו בחישון המיקרוסיסמי אך לא במד לחץ המים.

eventname	lat	lon	depth	time	Mw	Distance (km)	Signal Observed	Obs_maxS(m/s)	Observed Max S (Pascal)	Observed P Arrival
202201221841	32.5951	35.5405	31.8028	1/22/2022 (022) 18:42:52.363	1.3	98.40446482	NO			
202201221915	32.6138	35.5893	10.0236	1/22/2022 (022) 19:16:43.678	1.7	101.1029192	NO			
20220122102	32.6123	35.5965	9.9962	1/22/2022 (022) 21:03:40.850	2.1	101.055683	YES	1.00E-06	0.2	NO
202201221118	32.6119	35.5974	9.6667	1/22/2022 (022) 21:19:34.991	1.6	101.0269271	NO			
202201221214	32.6119	35.5969	9.6634	1/22/2022 (022) 21:27:17.275	1.5	101.0185068	NO			
202201221216	32.6107	35.5964	10.2575	1/22/2022 (022) 21:27:28.614	1.4	100.8784438	NO			
202201221236	32.6156	35.5943	10.5398	1/22/2022 (022) 21:36:54.510	3.8	101.3813567	YES	2.00E-04	200.0	YES
202201222139	32.6142	35.5925	10.1562	1/22/2022 (022) 21:40:28.677	2.1	101.1982377	YES	2.00E-06	0.5	NO
202201221249	32.6156	35.5984	9.8481	1/22/2022 (022) 21:49:41.472	1.4	101.4667181	NO			
202201221253	32.617	35.5947	9.7569	1/22/2022 (022) 21:54:57.542	2.3	101.54162	YES	4.00E-06	0.5	YES
202201222008	32.6205	35.5957	10.1035	1/22/2022 (022) 22:09:58.078	3	101.9422968	YES	4.00E-06	0.5	YES
202201222240	32.6131	35.5945	10.1319	1/22/2022 (022) 22:41:40.830	2.5	101.1102218	YES	4.00E-06	0.5	NO
202201222256	32.6079	35.5988	9.6042	1/22/2022 (022) 22:57:03.697	2.6	100.6119466	YES	1.00E-06	1.0	YES
202201222307	32.6089	35.5964	9.9109	1/22/2022 (022) 23:08:50.747	1.9	100.7906643	NO			
202201230109	32.6185	35.598	9.9444	1/23/2022 (023) 1:10:06.450	2.1	101.7611487	NO			
202201230113	32.612	35.5993	9.8679	1/23/2022 (023) 1:14:21.025	2	100.9681016	NO			
202201230159	32.6163	35.5987	9.9146	1/23/2022 (023) 2:03:45.869	2	101.5316077	NO			
202201230206	32.6108	35.5944	9.7509	1/23/2022 (023) 2:07:28.184	2.4	100.8561125	YES	4.00E-06	0.5	YES
202201230301	32.6092	35.5988	9.6318	1/23/2022 (023) 3:02:29.695	1.6	100.7545241	NO			
202201230408	32.6125	35.6063	10.0927	1/23/2022 (023) 4:09:40.084	2.2	101.2475111	NO			
202201231027	32.6188	35.5976	9.9841	1/23/2022 (023) 10:28:06.848	3.6	101.7873473	YES	1.00E-04	200.0	YES
202201231031	32.6197	35.5984	9.5565	1/23/2022 (023) 10:32:38.085	2.2	101.9164475	NO			
202201231109	32.617	35.5957	9.6621	1/23/2022 (023) 11:10:13.721	2.5	101.5581366	YES	1.00E-05	2.0	YES
202201231124	32.6183	35.5985	10.622	1/23/2022 (023) 11:25:43.246	2.2	101.7476324	NO			
202201231131	32.616	35.5949	12.3819	1/23/2022 (023) 11:32:24.095	1.7	101.4351455	NO			
202201232052	32.6085	35.5915	10.4188	1/23/2022 (023) 20:53:16.091	1.9	100.5561066	YES	5.00E-07	0.2	NO
202201242052	32.6177	35.5897	9.8473	1/24/2022 (024) 20:53:03.964	1.9	101.5377213	NO			
202201250112	32.6203	35.5961	9.6907	1/25/2022 (025) 1:13:44.170	1.8	101.910455	NO			
202201251922	32.6063	35.591	6.5957	1/22/2022 (043) 19:23:18.249	1.6	100.3064186	NO			
202201242007	32.5987	35.5955	9.5569	2/14/2022 (045) 20:08:16.855	2	99.54669598	YES	1.00E-06	0.2	NO
202201242040	32.5974	35.5922	9.6166	2/14/2022 (045) 20:41:27.415	1.6	99.34893349	NO			
202201251853	32.6028	35.5921	10.0103	2/15/2022 (046) 18:54:59.157	3.5	99.94006484	YES	1.00E-04	100.0	YES
202201252245	32.5988	35.6005	9.9791	2/15/2022 (046) 22:46:55.745	2	99.6435978	YES	5.00E-07	0.2	NO
202201252319	32.6029	35.5928	9.7442	2/15/2022 (046) 23:20:05.782	2.3	99.96255162	YES	1.00E-06	0.4	YES
202201260111	32.5968	35.5951	10.0761	2/16/2022 (047) 1:12:08.721	2.1	99.33149691	YES	5.00E-07	0.2	NO
202201260142	32.5955	35.5988	9.8785	2/16/2022 (047) 1:43:05.353	2.4	99.16701229	YES	4.00E-06	0.5	YES
202201260321	32.5974	35.5925	9.9222	2/16/2022 (047) 3:22:28.949	3.1	99.35389208	YES	5.00E-05	20.0	YES
202201260347	32.5961	35.5954	9.5567	2/16/2022 (047) 3:49:00.902	2.7	99.25977186	YES	1.00E-05	2.0	YES

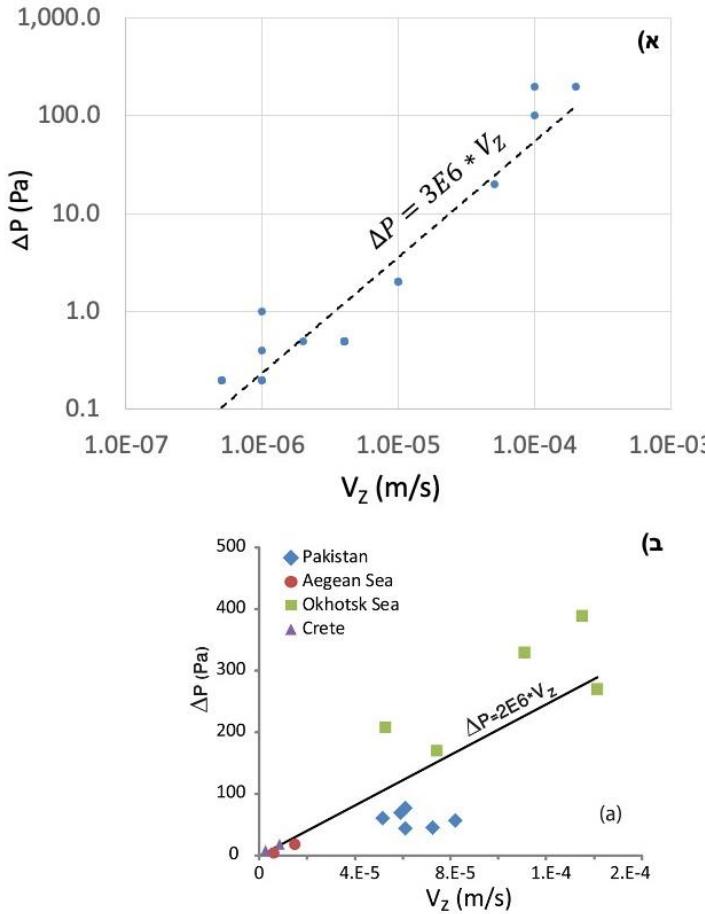
מהאחר שמקבץ האירועים במרחקים כמעט זהים לתחנה, כ- 100 ק"מ, המרחק אינו מוגבל אליו מהרעידות האלה תיקלטה, ומהגנטוודה היא הגורם המרכזי. איור 2.4.7 מציגים כיצד המגנטוודה של הרעידהקובעת האט הרעידה תיקלט ובאיו לחישנים היא תיראה. ההשוואה העיקרית היא ביחס למד לחץ המים (איור 2.4.7א'), ולהישן המיקרוסיסמי (איור 2ב'). כפי שניתן לראות מהרישון המיקרואיסמי וגייש יותר ביחס למד לחץ המים, למרות שהוא לפני השטח, בעוד ממד לחץ המים ממוקם עשרות מטרים מתחת לפני הקרקע. זה בא לידי ביטוי בכך שחלק מהרעידות הקטנות (הנקודות האדומות באירור 2ב'), אינן נקלוטות במד לחץ המים מעבר לסף $Mw < 2.5$, בעוד הן נקלוטות במד לחץ המים $Mw >= 1.9$, אין קשר בין המיקרואיסמי. כמו כן החיצים הרעיש (האזורים הצהובים באירור 2.4.7), בעוד הם נקלוטות בחישון המיקרוסיסמי. כמו כן ממסnim את המגמה המczופה מבחינה האמפלייטודות והרגניות למגנטוודות במידה ותהינה רעלות קרובות יותר.



איור 2.4.7. רגישות החישנים לפי מגניטודה לרעידות במרחך של כ- 100 ק"מ. א) לחישון המיקרוסיסמי - סף הרעש לגילי הוא 500 גנומטר לשנייה (s/m²); ב) לחישון מד לחץ המים - סף הרעש לגilio הוא כ- 0.4-0.5 פסקל). החיצים המוקווים מראים באופן סכמטי כיצד המערכת תגיב למקורות סיסמיים במרחכים קרובים יותר ותאפשר גילוי רעידות עם מגניטודה נמוכה יותר. הנקודות האדומות מצינינות את אותן אירועים אשר ניתנות לגilio ע"י החישון המיקרוסיסמי, אך לא עוברים את סף הגilio של מד לחץ המים.

באיור 2.4.8 אנו משווים בין השינוי בלחץ המים ומהירות האנכיית הנמדדת בחישון המיקרוסיסמי. ההשוואה מראה מגמה ברורה הניתנת להטאה ע"י נסחת התאמה. השיפוע של 3e6, קרוב לשיפוע אותו מצאו שלו וחובריו (Shalev et al., 2016a) באנגליזה דומה שנעשתה לרעידות טלה-סיסמיות בקידוח גומה 1, אשר מצאו שיפוע של 2e6. נראה שהתכונות המסלע בשני הקידוחים, גומה 1 בצדפון ו-10 EZ10 בדרום, אינם שונים מוהוטי, ולחץ המים מגיב באופן דומה בשני האקווייפרים.

לאחר שהבנו אילו אירועים סיסמיים מוכרים לנו מהקטלוג, השלב הבא הוא סינון של אותן ממוקוד אנושי (רכבים, עבודות בכביש, צעידה של אנשים / בע"ח). למעשה אלה הם חלק ממה שמרכיב את הרעש הנקלט בתחנה, אולם כמשמעותם קרוב – החתימה חזקה יותר ועלולה להקשות באבחנה של אירועים סיסמיים מעבר לסף הרעש. בנוסף, אחד האתגרים הגדולים של המיקרוסיסמולוגיה זה למצוא אותן סיסמיים בתוך רעש סיסמי המופיע באופליות דומות, ובתוכולת תדרים עם חפיפה חלקית או מלאה. לשם הקטנת חוסר הودאות הנ"ל, ניתן ליום של הקלטות בקרבת התחנה, והקלטנו חתימות שונות של אותן מוקור אנושי, חתימות אלה יישמשו בהמשך כתבניות אשר נחפש בנזוניות על-מנת לשלול אירועים אשר אינם מקור סיסמי / גאולוגי.



איור 2.4.8. לחץ המים כפונקציה של מהירות הסיסמית האנכית.
א. השוואת בין החישונים ומציאות נובחת התאמת. ב. מトル שלב וחובריו 2016. השיפוע שנמצא בתונינים שלנו דומה אך מעט יותר חריף מזה שנמצא בעבודה הקודמת שנעשתה על רעיונות טליסמיות.

במארג הנתונים המכיל את ריעות גשר, נמצאו בסריקה ידנית 37 אירועים אשר קתלגון באופן ראשוני כאירועים בעלי חתימה סיסמית שיכולה להיות מקור סיסמי-גיאולוגי או מפיצוצים (טבלה 2.4.2). לאירועים השונים מאפיינים שונים העוזרים לנו את המשך הקטלוג וההפרדה של האותות למשפחות שונות. הקритריון הראשון, המהווה את החלוקה הראשונית, הוא זמן האירוע ביחס לשעה ביום, בו אנו מפרידים בין ריעות של יום ולילה, בהנחה שפיצוצים במחצבות לרוב אינם מתרחשים בלילה. הנחה זו אינה שוללת את האפשרות של פיצוצים על קוליים למשל, אבל היא עוזרת לעשות סדר ראשוני. אותן סיסמי הנקלט בלילה יתנו רמת ודוות גבוהה יותר ביחס למקור סיסמי / גאולוגי מאשר אותן סיסמי הנקלט ביום. בקבוצת אירועי היום קיימים 20 אירועים ובקבוצת אירועי הלילה קיימים 17 אירועים.

הקריטריון השני הוא משך האירוע. קритריון זה חשוב והוא יכול לספר לנו על שלושה דברים עיקריים: גודל המקור, המרחק של האירוע, וניחות גלי הגזירה לאורך הדרך. כאשר האיכון של האירועים אינו ידוע (כפי שמתארח כאן), זו הדרך הטובה ביותר לקבל מושג ראשוני, בעיקר בוגוע לגודל האירוע ו/או המרחק ממנו. האירועים חולקו ל- 4 קבוצות לפי משך האירוע: 5-10 שניות, 10-20 שניות, 20-30 שניות, ואירועים ארוכים מ- 30 שניות. בשלב זה, מעבר לקיטלוג הראשוני אין לנו עדין תובנות לגבי הקבוצות השונות. נctrיך לחפש אירועים דומים בתונינים הסיסמיים, ולהתמקד בעיקר באירועי הלילה על מנת להתחיל להבין מה מקורם, ואילו מהם משמעותיים ומספרים לנו על תהליכיים סיסמיים ו/או hidro-sismיים באזור.

טבלה 2.4.2. אירועים סיסמיים שאינם קשורים לגשר. מחולקים לקטגוריות של יום / לילה, ושל משך האירוע: 5-10, 10-20, 20-30 ו- 30 שניות ומעלה. תמונות של האירועים מצורפים.

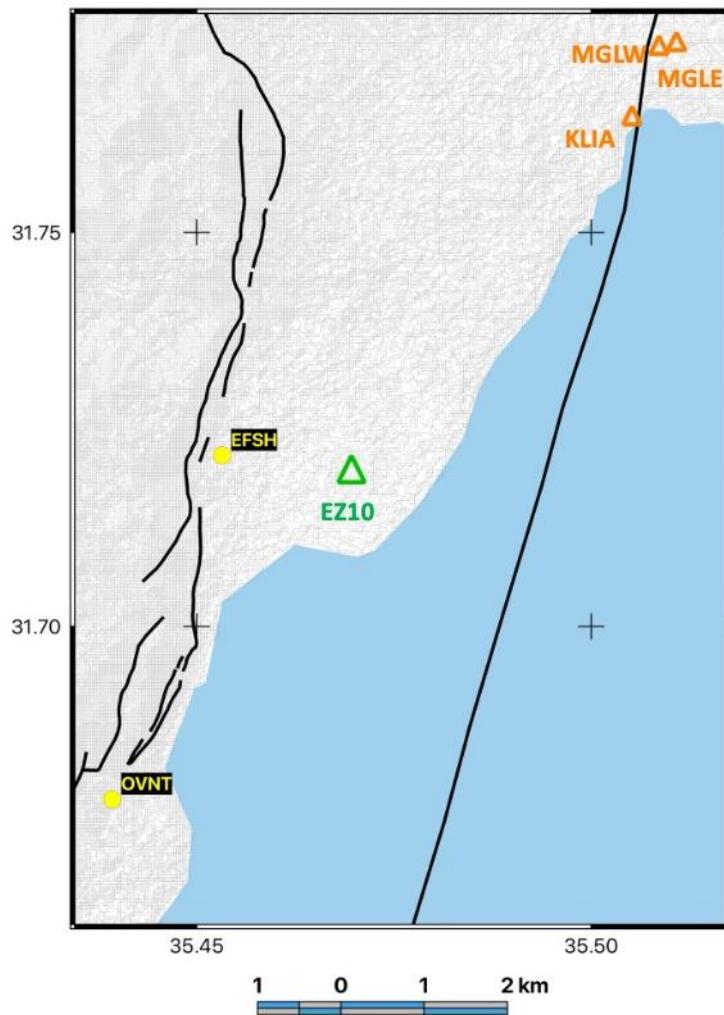
Counter	Date	Day	5-10s	10-20s	20-30s	30+s
1	21/01/22 22:27:50		V			
2	21/01/22 22:33:46		V			
3	21/01/22 23:17:00		V			
4	24/01/22 18:35:50		V			
5	12/02/22 21:19:20		V			
6	22/01/22 22:55:15			V		
7	22/01/22 23:17:00			V		
8	24/01/22 01:06:40			V		
9	13/02/22 00:42:40			V		
10	21/01/22 19:04:40				V	
11	12/02/22 21:40:55				V	
12	16/02/22 03:03:30				V	
13	16/02/22 03:38:30				V	
14	17/02/22 19:46:05				V	
15	22/01/22 19:24:40					V
16	12/02/22 17:34:30					V
17	15/02/22 18:55:15					V
1	21/01/22 15:06:20	V	V			
2	17/02/22 09:23:15	V	V			
3	24/01/22 09:34:50	V		V		
4	14/02/22 08:59:15	V		V		
5	15/02/22 07:14:04	V		V		
6	15/02/22 10:46:30	V		V		
7	15/02/22 13:51:20	V		V		
8	17/02/22 07:18:35	V		V		
9	24/01/22 06:04:40	V			V	
10	24/01/22 09:17:40	V			V	
11	24/01/22 13:12:05	V			V	
12	24/01/22 15:55:48	V			V	
13	24/01/22 16:05:50	V			V	
14	13/02/22 13:02:22	V			V	
15	14/02/22 09:58:15	V			V	
16	15/02/22 10:32:08	V			V	
17	16/02/22 08:28:55	V			V	
18	17/02/22 04:37:25	V			V	
19	17/02/22 15:04:55	V			V	
20	24/01/22 08:42:00	V				V

2.4.4. תכנית להמשך

כפי שנכתב לעיל, מדובר בתוצאות ראשוניות אשר מעידות בפירוש על הפטנציאל הגלום בקורס לוקציה של חישנים סיסמיים יחד עם מדיה לחץ-מים בקידוחים. היכולת לקשר באופן מובהק את החתימה הסיסמית של אותן שיטות ביחס לתגובה הנצפית במדדי לחץ-המים היא חשובה ומאפשרת לנו יכולת לחקור באופן יותר מדויק את אותן החדשנות. על-מנת להגיע לתובנות יותר משמעותיות אנחנו מתכוונים את המהלך הבאים:

1. לקשר את סריקת הנתונים יחד עם תחנות תרואה בעין-פאשחה (EFSH במרחק של 1 ק"מ מ-EZ10, באובנת (OVNT), יחד עם סריקת התchanות הדרומיות של הרשת המחקרית של העתק יריחו אשר מוצבות בימים אילו ממש (איור 2.4.9).

2. להתקין לפחות תחנה הידרואיסמית נוספת במתחם עין פאשחה על מנת להגביר את הودאות לגבי אירועים מיקרו- או הידרו- סיסמיים קרובים.
 3. להרחיב את האנליזה הסיסמית לטוח גדוֹל יותר של אירועים סיסמיים מהקטלוג הסיסמי של ישראל, על מנת לכיל טוב יותר את המערכת, ולהבין טוב יותר את טווחי הרגישויות למרחקים השונים.
- המחקר הנוכחי נכנס לטריטוריה מחקרית חדשה, אשר לא פורסם רבות בעניינה בעולם. הכלים בהם יש לשתמש ידועים, אבל דורשים תהליכי מובנה וUMBOKR על מנת לוודא בסוף התהילה שאנו יודעים ברמת ודיות גבוהה הן את מקום האירועים, והן את המקור הפוטנציאלי שלהם.



איור 2.4.9. מפת מיקום EZ10 ביחס לתחנות תרואה הקרוובות וביחס לתחנות של רשות המחקר המיקרוסיסמית על העתק יריחו (KLIA, MGLE, MGLW).

3. קרייסט התשתיות ויצירת בולענים חדשים לאורך חופי ים המלח

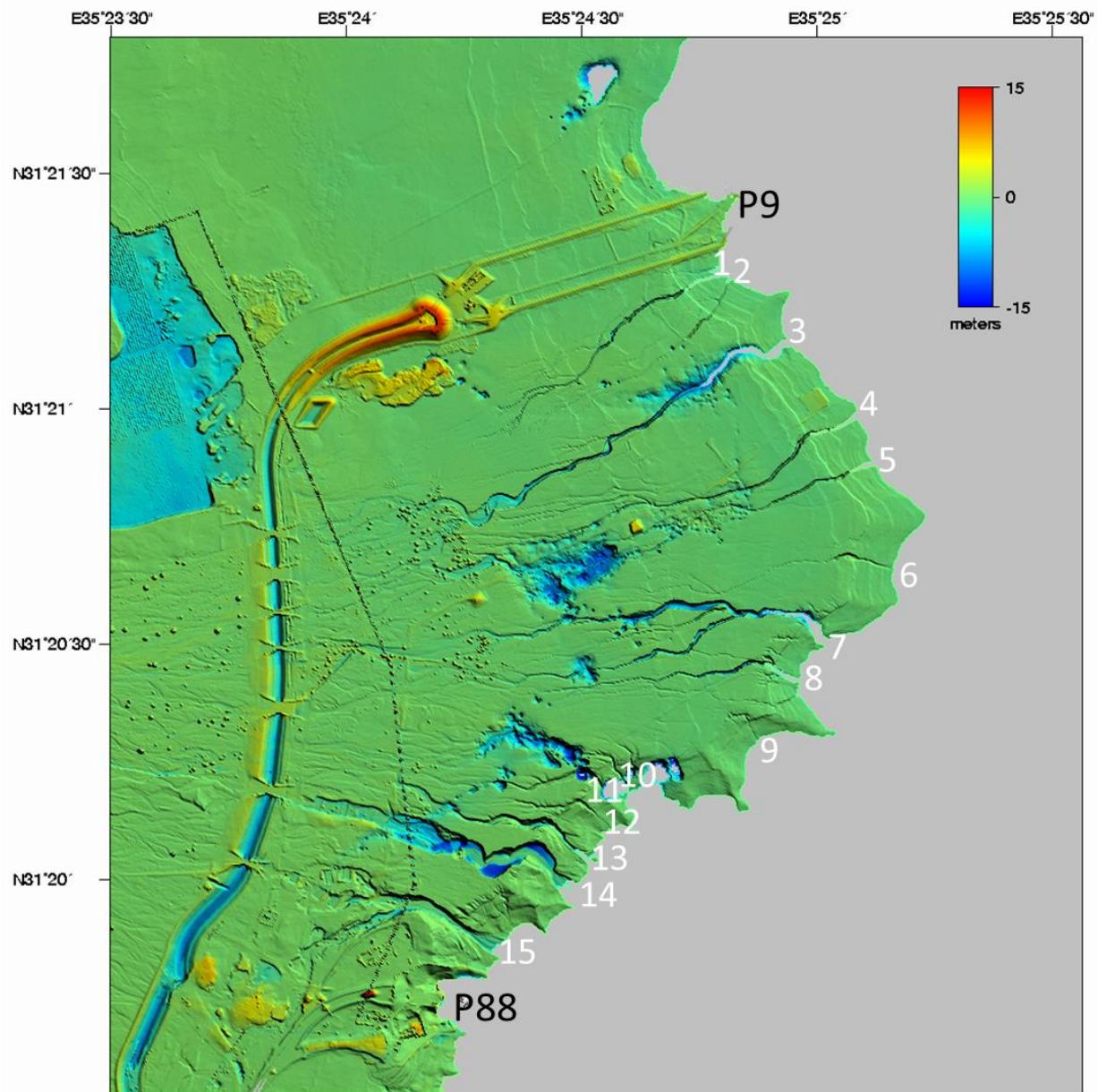
3.1. התוצאות והסעת סדיננטים דרך קארסט המלח כמנגנון משלים לשקיעות הקרקע האינטנסיביות במניפת נחל צאלים

בר, ג. 1, ברנשטיין, מ. 1, גבריאלי, א. 1

¹המכון הגיאולוגי

3.1.1. הקדמה

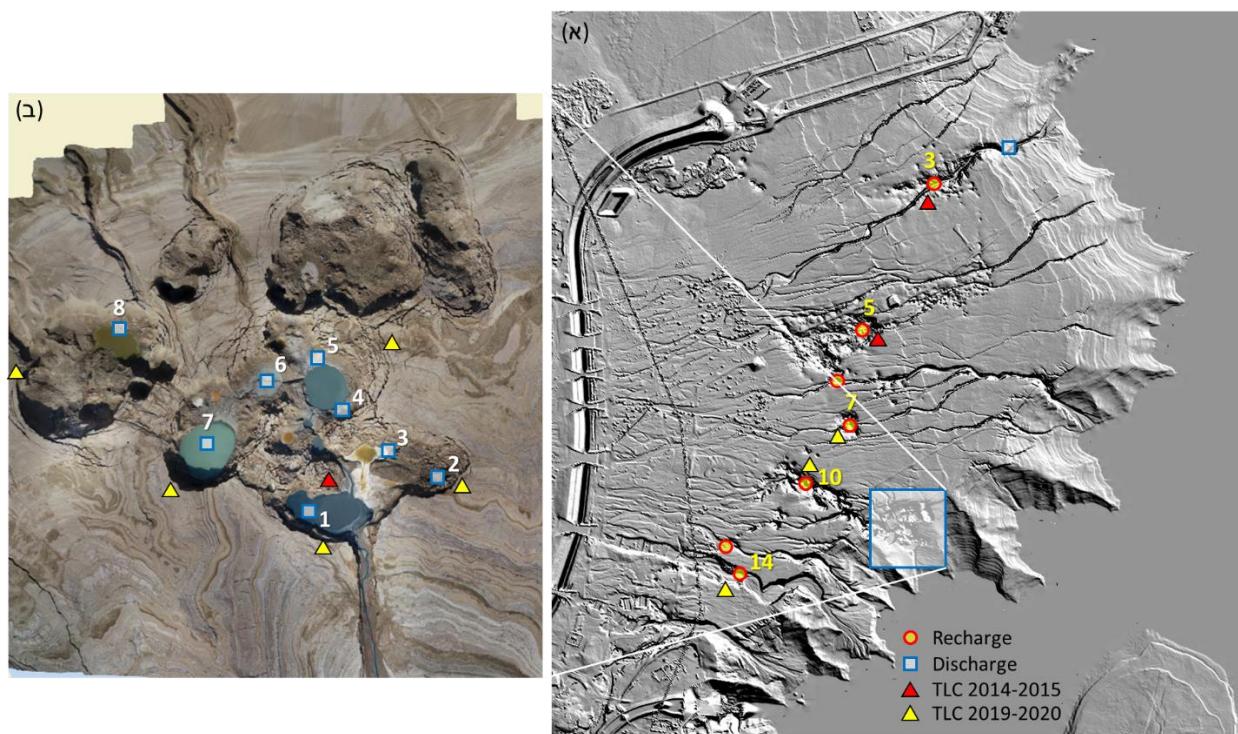
לפנינו כעשר החל תהליכי של בליעת מי שיטפונות אל תוך בולענים שנוצרו באפקטים הראשיים של מניפת צאלים (איור 3.1.1) (Avni et al., 2016; Shviro et al., 2017). כתוצאה לכך התגברת המסת המלח מתחת הקרקע סביר אוטם בולענים, נוצרו אזורי שקיעה נרחבים באפקטי הנחלים (איורים 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3), ומערכות קארסט המלח מתחת הקרקע במניפה התרחבה והשתעפה. בשנת 2013 התרחבו והתעמקו הבולענים ושקיעות הקרקע באחד מאפקטי המניפה עד כדי ניתוק חלקו התחתון של הנחל מחלקו העליון. מי השיטפונות באותו אפיק התנקזו לאזור השקווע, חלחלו ממנו אל תחת הקרקע והפסיקו לזרום על פני השטח לכיוון הים. שיעות בודדות לאחר כל שיטפון נבעו מי שיטפונות רווים במלח דורך בולענים ("בוקענים") בשני אתרים סמוך לחוף (Avni et al., 2016) ובשבועות שלאחר השיטפון קצב השקיעה באזורי הבולענים התגבר משמעותית (Shviro et al., 2017). בין השנים 2013 – 2019 התפתחו בולענים ואזורי שקיעה כאלה לרוחב מרבית אפיקי המניפה וניכזו לתוכם כמותות גדולות והולכות של מי שיטפונות. עם העמקת אזורי השקיעה, פסק הנגר העילי לעבר הים ברוב העrozים (בר וחוב', 2020), ונכון לשנת 2022 רק ערוץ אחד (عروץ מס' 3) מתוך 15 העrozים שמופיע במnipה לפני כעשור ממשיך להזרים מים ישירות אל ים המלח (איור 3.1.1). על מנת להבין טוב יותר את אופן וקצב התפתחות המערכות התת קרסטית דרכה זורמים מי השיטפונות הצבנו כ 8 מצלמות קיטועי זמן (TLC) סביר נקודות הבליעה והנביעה (איורים 3.1.2, 3.1.3) ודגמוניו את מי הנביות לפני ובזמן כל הניתן אחריו השיטפונות. הרכיב המים, מקור המלחים, והשינויים במלחיות וברכיב המים לאורך השנים ובעקבות שיטפונות, סוכמו בהרחבת בדוח קודם (בר וחוב', 2020). ספיקות המים שזרמו בכלל מניפת צאלים בכל שיטפון נמדד על ידי השירות הhidrolוגי בתחנה הידרומטרית שנמצאת כ 6 ק"מ במעלה המניפה, בפתח קניון הנחל, מעל נקודת ההתקפות של הזרימה לאפיקים השונים. בהנחה שהగורם היחיד לשקיעות הקרקע סביר הבולענים היה המסת המלח מתחת הקרקע על ידי מי תהוםומי שיטפונות, נבדק היחס בין שקיעות הקרקע שנצפו במניפה ופוטנציאל המסה של מי השיטפונות, והוצע שתרומות מי השיטפונות לכל המסה נעה בין 8% ל 60%: על פי הערכות אלו, ככל שנפח השיטפונות השנתי גדל יותר, גדל גם חלוקם היחסי של מי השיטפונות בהמסה. שאר המסה יוחס למי התהום, למרות שלא נמצא לכך עדויות שירות או עקיפות (בר וחוב', 2020).



איור 3.1.1. מפת הפרשי גבהים של מניפת צאלים בין שתי המדינות לידר מהשנים 2011 ו 2019. אזור שקיעה, התחרות, וחפירה מיוצגים על ידי צבעים חומים. אזור בנייה ותוספת סדימנט מיוצגים על ידי צבעים כתומים-אדומים. ערוצי הנהלים ממושפרים על פי אבני וחוב' (2012). בחלוקת המערבי של המפה נראים בריכת ההשקטה ותעלת ההזנה של מפעלי ים המלח הניזונים מתחנת השאיבה P9.



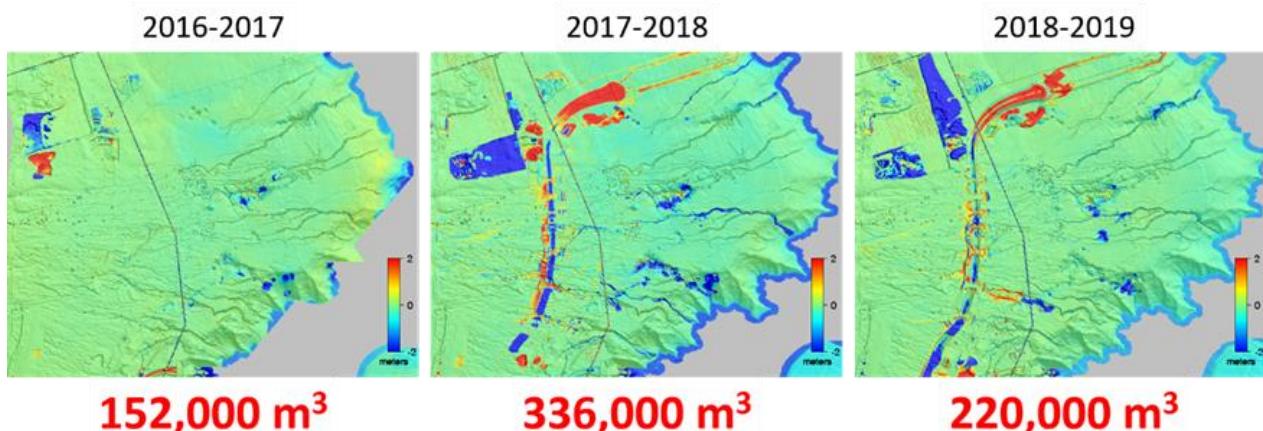
איור 3.1.2. א. מבט מערבה אל מעלה עוז 14. העורץ מתנקז אל תוך בולען שהחל להיווצר בתוכו בשנת 2016 ומאז התרחב והתקדם מזרחה. ב. מבט מערבה על אזור השקיעה שකולט אליו את מי השיטפונות מעוז 7. ברקע: צילום רחפן: אייד סועאדי. ג. אזור הבולענים מהם נובעים מי השיטפונות ("בוקענים"). בקצת הימני העליון - התעללה המנקזת את הנביות לים המלח. צילום רחפן: אייד סועאדי.



איור 3.1.3. א. נקודות הבליה (עיגולים, ממוספרים על פי העור齊ים) והנביות (ריבועים) של מי השיטפונות במניפת צאלים. מיקום המצלמות לפי שונות הצבען מסומן במשולשים. ב. צילום רחפן משנת 2019 (אייד סועאדי) ועליו מיקום נקודות הנביות והמצולמות באתר ה"בוקענים" (ריבוע כחול בתחתית פannel א).

3.1.2. השוואת שקיועות הקרקע לפוטנציאל המסה של מי השיטפונות

מדידות לידר מתבצעות אחת לשנה. נפח הבולענים ושמיועות הקרקע סביבם נמדדוו באמצעות הפחתת מודלים טופוגרפיים שהתקבלו ממדידות לידר מוטס (איור 3.1.4). הספיקות השנתיות שנמדדוו בהידромטר צאלים בשנים 2016-2019 כוללות מים שזרמו בעורוצים שהתקנו אל תוך בולענים וגרמו להמסה שבטעיה נוצרו שקיועות הקרקע ובולענים נוספים, ומים שזרמו בעורוץ 3 והמשיכו לזרום על פני השטח לים המלח. חלק מהמים שבעורוץ 3 התקן אף הוא אל תוך בולענים אך מכיוון שלא ניתן למדוד מהו החלק היחסי שנבלע בעורוץ, לא נכללו השקיועות בעורוץ זה בחישוב הנפקים. מבדיקה ראשונית של רום מי שיטפונות בכל מעברי המים שמעל תעלת ההובלה ב 4 אירופים בין נובמבר 2020 ופברואר 2021 יוצאה כי ערוץ 3 מעביר כ 35% מהמים שמניעים ממעלה הנחל (נתוני רום המים באדייבות מפעלי ים המלח).



איור 3.1.4. נפח אזורי השקיעה והבולענים שהתקבלו מഫחתת המודלים הטופוגרפיים השנתיים (בר וחוב', 2020).

masses מלח הליט במים מתוקים (S_{NaCl}) היא כ 360 ק"ג למטר מעוקב (מ"ק) וצפיפות המלח (ρ_{NaCl}) היא כ 2150 ק"ג למ"ק. מכאן שביחסות נפחיות, פוטנציאל המסת מלח של 1 מ"ק מים מתוקים עד הגעתם לרוויה (P_{dis}) הוא:

$$P_{dis} = 1 \times \frac{S_{NaCl}}{\rho_{NaCl}} = 1m^3 \times \frac{360 \text{ kg } m^{-3}}{2150 \text{ kg } m^{-3}} \approx 0.17m^3$$

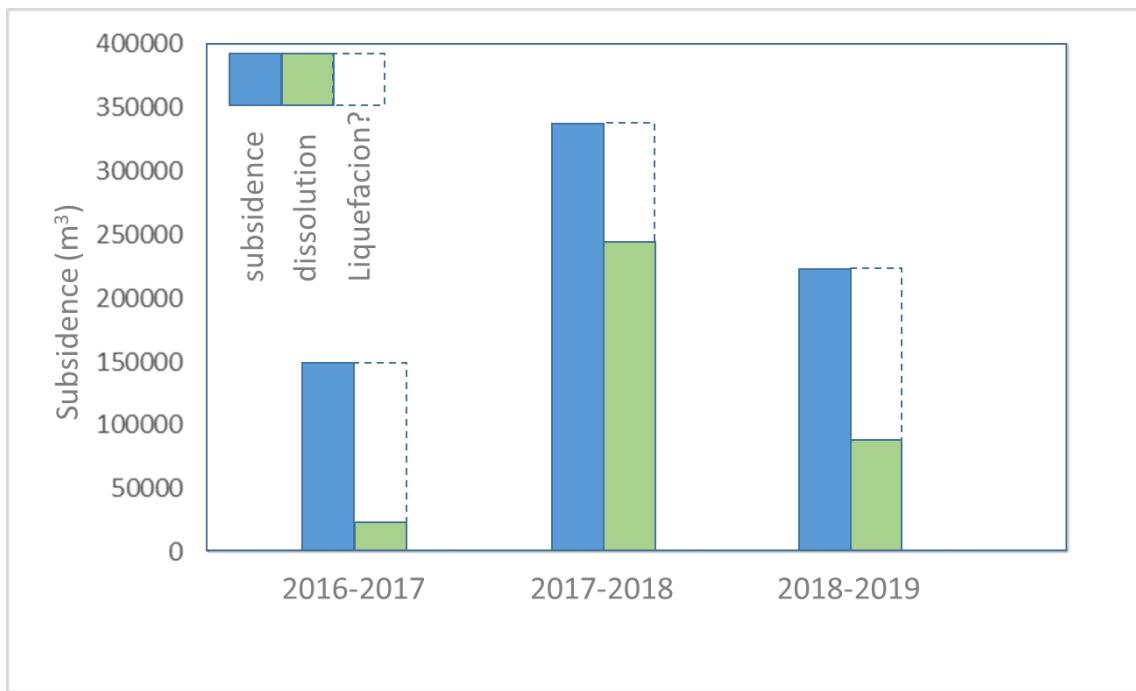
שמיועות הקרקע ופוטנציאל המסת המלח השנתיים בשנים 2016-2019 מסווגים בטבלה 3.1.1. פוטנציאל המסת המלח מחושב כ 17% מהספיקה המגיעה לעורוצים המתנקזים לבולענים, שהוא 65% מהנפח הנמדד בתחנה הידромטרית של נחל צאלים. השוואת בין נפח שקיועות הקרקע ופוטנציאל המסת על ידי מי השיטפונות (איור 3.1.5) מראה כי קיים קשר ביניהם, אך נפח שקיועה והבולענים גבוהים בכל השנים מפוטנציאל המסה של מי השיטפונות. את ההפרש ניתן ליחס

להמסה על ידי מי תהום שמקורם באקויף חברות יהודת וلتופעות ההתנוזלות והובלת הסדיימנט שיתואו בהמשך.

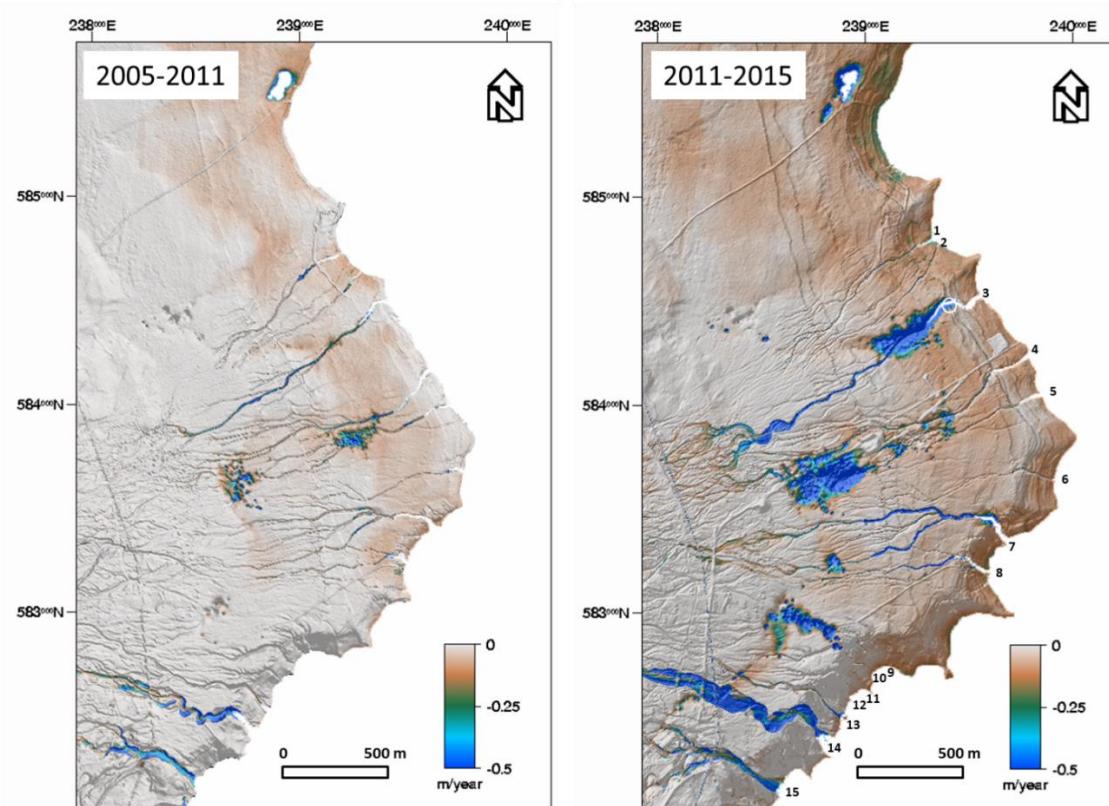
את פוטנציאל ההמסה של מי התהוםקשה להעיר שכן אין ביחסן כי כל המוצאים של המערכת לים המלח אותו. יחד עם זאת, מהשוואה בין שקיימות החקלאי לשנים 2005 עד 2011 לאלה שבין 2011 ל-2015 (Avni et al., 2016) (איור 3.1.6), נראה שבשנים שלפני בליעת השיטפונות בבולענים כמעט ולא היו שקיימות קרקע באזורי מניפת נחל צאלים (השקיימות היחידות שנצפו היו בעורוצים 4 ו-5 וזאת בעקבות שיטפונות 2011) ולכן ניתן להסיק כי גם כוון תרומות מי התהום להמסת מלח במניפה היא ככל הנראה נמוכה עד זינחה. בהמשך המחקר נערכן מדידות ספיקה של המים המתנקזים לים המלח דרך התעללה המנקז את הבוקענים (איור 3.1.3ב) בחדרי הקיש על מנת להעיר את נפח מי התהום העשויים לתרום להמסת מלח. יש לציין שכבר עתה ידוע כי מים אלו אינם ראויים למלח ואין ממצאים את מלא פוטנציאל ההמסה שלהם.

טבלה 3.1.1. נפח הגאות בשיטפונות הבודדים, השנתיים, ופוטנציאל המסת המלח השנתי עבור השנים 2016-2017, 2017-2018, ו-2018-2019. נתוני הגאות באדיבות השירות הידרולוגי. פוטנציאל ההמסה מניח כי 65% ממי השיטפונות מתנקזים דרך הבולענים ומימיים מלח עד לרוחיה (שווה ערך נפחיל לכ- 17% מנפח המים הממסים).

פוטנציאל המסת מלח שנתי (מ"ק מלח)	שקיימות קרקע (מ"ק)	נפח גאות שנתי (מ"ק)	נפח גאות (מלמ"ק)	תאריך תחילת גאות
		0.144	14/12/2016	
		0.005	19/12/2016	
		0.046	27/01/2017	
		0.012	01/02/2017	
		0.001	23/03/2017	
23,030	152,000	208,414		2016/2017
		0.144	05/01/2018	
		0.062	19/01/2018	
		0.023	17/02/2018	
		1.969	25/04/2018	
242,799	336,000	2,197,279		2017/2018
		0.011	18/10/2018	
		0.264	25/10/2018	
		0.262	24/11/2018	
		0.008	16/01/2019	
		0.228	07/02/2019	
		0.01	25/03/2019	
86,669	220,000	784,336		2018/2019



איור 3.1.5. השוואה בין נפחי האזוריים השוקעים ופוטנציאל המסת המלח של מי השיטפונות (טבלה 3.1.1). הנפחים שנמדדו גבוהים מפוטנציאל ההמסה ומצבעים על צורך בגורמים נוספים שיתרמו לשקיעות קרקע, ככל הנראה התנוזלות והסעת סדימנטים דרך מערכת קארסט המלח (ראא בהמשך).

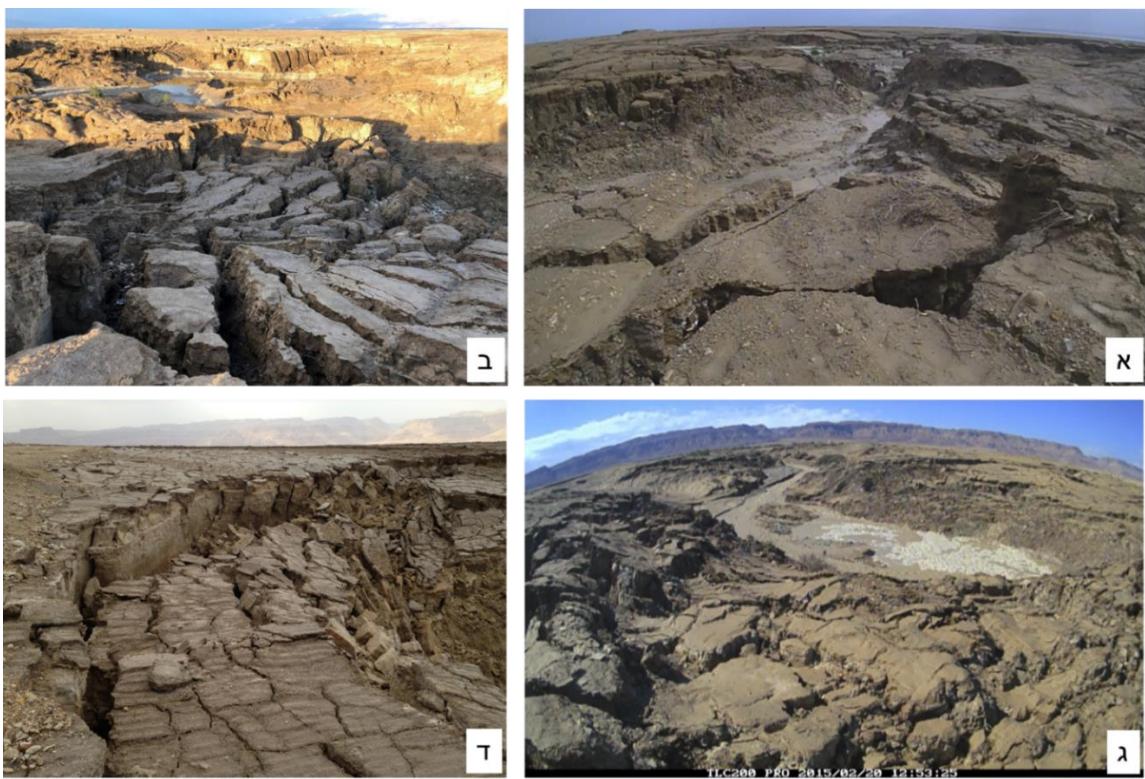


איור 3.1.6. מפות שינויים בגובה פני השטח על גבי מפת תבליט מוצלחת בין השנים 2005 ל 2011 ובין השנים 2011 ל 2015 (מתוך: Avni et al., 2016). יש לציין שבשנים הראשונות כמעט ולא היו שקיעות קרקע, פרט לשני אזורים בין העrozרים 4 ו 5, אשר שקוו בעקבות שיטפונות, בעוד שבשנים הבאות התרחשו שקיעות קרקע ברוב ערוצי המניפה.

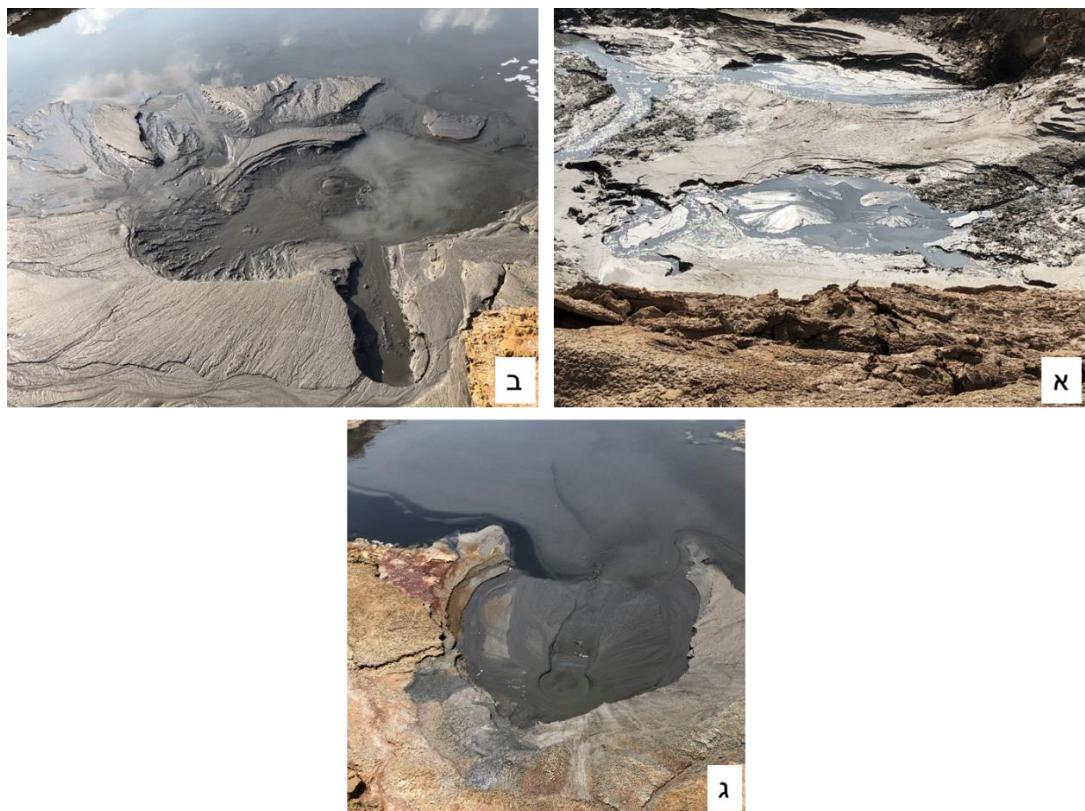
3.1.3. התנצלות והובלת סדימנט במניפת צאים

מצלמות קיטועי הזמן מראות תנודות משמעותיות בפני המים בזמן השיטפונות הן באזורי הבלייה והן באזורי הנביעה של מי השיטפונות. בצלומים נראים גם קריסות בולענים, שקיימות רקע מהירות והתפשטות לטלית בסדימנטים החרסיטיים לכיוון מרכז הבולענים, תוך כדי הירידה במפלסי המים (איור 3.1.7). התפשטות הטלית של הסדימנטים הרוויים במים מצבעה על תהליכי התנצלות ואובדן Kohzeia בסדימנטים הללו עקב השינויים במפלס המים בין ההצפה לניקוז. כאשר מפלס המים עולה, לחץ מי הנקובים בסדימנט עולה, הקוהזה יורדת והסדימנט עובר התנצלות (למשל, Cubrinovski et al., 2012). עם הירידה במפלס המים, מי השיטפונות וחלק מהסדימנט הדק שעבר התנצלות מתנקזים אל ודרך הבולען. ריבוי התצפיות מהסוג הזה וסמיוכות התופעה לירידת מפלס המים מצבעים על כך שהליך ההתנצלות והובלת הסדימנטים הדקים מכלל עמודת הסדימנט אל מערכת קארסט המלח התת קרקעית משמעותית יותר מכפי שתואר בעבר וכי שקיימות הקרקע שהתגברו מיד לאחר השיטפונות אינן תוצר של המסת מלח בלבד, אלא שילוב של המסת, התנצלות, והובלת סדימנט דק. חיזוק לטענה זו מגיע מאזורי הנביעה שם נחשפו, עם ירידת מפלסי המים בשנים האחרונות, חרוטי בווץ דרכם נובעים מים גם בתกופות לא שיטפוניות, המכילים כמוות גדולות של סדימנטים חרסיטיים (איור 3.1.8).

עדות נוספת לתרומה של הובלה וסילוק סדימנטים לשקיעות הקרקע באזורי הבולענים מתקבלת מהשוואה בין עובי המלח ועומק השקיעות/הבולענים באותו מקום. לו שקיימות הקרקע היו תוצאה של המסת מלח בלבד, אז עוצמת השקיעה הייתה מוגבלת לעובי המלח, וגם זאת בתנאי שהסדימנט שמעל השקע או מילא את כל החלל שהותיר המלח שהתמוסס. אולם, בהינתן כי במקרים רבים עוצמת השקיעה גדולה מעובי המלח המקומי, אז מתחייב גם סילוק של חלק מעמודת הסדימנט שמעל שכבת המלח, תהליך אשר אפשר את שקיעת פני הקרקע לעומק מצטבר הגדל מעובי המלח. סדימנט זה מנוקז דרך מערכת הקארסט אל הבוקענים ומשם זורם עם התמלחת לים המלח.



איור 3.1.7. עדויות להתנוזות ולהתפשטות לטרלית ושקיפות לכיוון מרכז הבולענים בסדי מננטים החרסיטיים, תוך כדי הירידה במפלסי המים. א. ערוץ 7. ב. ערוץ 5. ג. גדת בולען מעלה הנביעה (נקודה 2 באיור 3.1.3ב).



איור 3.1.8. חROUTי בועז באזורי הנביעה בקרקעית הבולען (נקודה 5, איור 3.1.3ב). תכולת החרסית העשויה להגיע עד ל 1000 גרם לליטר טוּרוּת.

במהלך השנה מי התהום המותנקים לים המלח דרכ הבקען (בולען 1, איור 3.1.3ב) והתעללה היוצאת ממנו מיללים סדימנט בטוחה ריכוזים של 2 עד 24 גרם לליטר. מנגד, צילומי ה TLC במהלך השיטפונות מעידים כי ריכוז הסדימנטים באירועים אלו עשוי להגיע לרמות גבוהות בהרבה שכן המים הנובעים איז מהבולענים בספקות גבוהות עכורים מאד עד שחורים. אולם, בשל בעיות נגישות ובתייחות לא ניתן היה להגיע לאזור הבולענים ולדגם את המים במהלך השיטפונות או מיד אחריהם. עם זאת, עדות לפוטנציאלי ההובלה של סדימנטים על ידי מי השיטפונות נמצאת בדוגמאות שנאספו מחרוטי בוץ באזורי הנביעה שנחקרו עם ירידת מפלסי המים בשנים האחרונות (איור 3.1.8). התמלחת שנאספה מביאה זו הכליה עד 1000 גרם סדימנט לליטר של תערובת. אמן לא ניתן לשול על הסף כי בפועל חלק מהסדימנט בתמיסה שנדגמה מקורו בהרחקה מחודשת של סדימנט קרקעית, אולם עצם העובדה כי התמלחת מסוגלת לשאת כמות כה גדולה של בוץ אף בספיקה נמוכה יחסית מעידה על פוטנציאלי ההסעה של סדימנטים על ידי התמלחת במהלך השיטפונות. בהנחה כי המשקל הסגול של החרסיות עומד על 2.5 גרם לסמ"ק, אזי נפח החרסית שנדגמת מהנביאות בחרוטי הבוץ (עד 1000 גרם לליטר תערובת) עשוי להגיע עד ל 400 סמ"ק לליטר (זאת מבלי להביא בחשבון את הפוריות של הסדימנט). נפח התמיסה הנקייה במקרה זה עומד על 600 מ"ל.

מכאן עולה כי ליטר של תמלחת בעלת צפיפות הדומה לו שلنביעת הבוץ (1.106 גרם לסמ"ק) יכול לפנות:

$$400\text{ml sediment} / 0.6 \text{ L brine} = 666 \text{ ml dry sediment/ 1 L brine.}$$

чисוב פשוטני זה מלמד כי פוטנציאלי סילוק החומר של התמיסות הוא בסדר גודל דומה, ואולי אף גדול יותר מפוטנציאלי ההמסה של מי השיטפונות. בהתאם לכך הפער של עשרות האחוזים הקיימים בין השקיעות הנצפות לבין פוטנציאלי ההמסה (טבלה 3.1.1, איור 3.1.5), יכול בהחלט להיות מושבר על ידי הובלת הסדימנטים בתת הקרקע, בין אם על ידי התמיסות הרוויות שמקורן במים השיטפוניים או בתמיסות פחות צפיפות המצוויות במניפה וממשיכות להתקן דרכ הבקען.

3.1.4. הערות לסייעות

1. מחקרים קודמים ניסו להסביר את שיקיעות הקרקע סביב הבולענים כתוצאה בלעדית של המסתמלח על ידי מי שיטפונות ומי תהום (Avni et al., 2016, Shviro et al., 2017, בר וחוב, 2020). התוצאות המוצגות בדור'ח זה מעידות על כך ששקיעות הקרקע אינן תוצר של המסתמלח בלבד, אלא שילוב של המסתמלח, התנזולות סדימנטים והובלתם במערכת קארסט המלח המפותחת. שלושת המרכיבים הכרחיים שכן המסת בלבד לא מסבירת את עצמת שיקיעות הקרקע שנמדדדו ואילו הסדימנט הדק מגיע יחד עם תמלחת שהרכבה מעיד על המסת נרחבת שלמלח. בנוסף, סילוק החומר בקצבים שנמדדדו לא ניתן ללא מערכת החללים והצינורות התת-קרקעיים שנוצרו בשכבות המלח עקב המסתה.

2. בשנים הראשונות להופעת הבולענים נתען כי בולענים ואזורי שיקעה נוצרים עקב סילוק חומר דק בתת הקרקע במנגנון של ארוזיה (Arkin and Gilat, 2000) (piping). אך לא הוצע עדויות שדה התומכות בכך. מודל זה לא דרש המסתמלח ולא הכיר את מערכת קארסט המלח התת-קרקעית

שרק החלה אז להתפתח באזורי שקייעות הבולענים. המחקר הנוכחי מציג עדויות שאכן תומכות בתהליכי ההובלה התת-קרקעיים של הסדימנט הדק אך קשורות אותן למערכת הקארוסט במלח ולשיטפונות מחוללי התתנוזות המלוים ב מהירות זרימה גבוהה, שבלעדיהם התהlik לא היה מתקיים.

3.2 בחינת הקשר בין האוכלוסיות המיקרוביאליות לבין כימיות המים בבולענים ים המלח - שנת מחקר שנייה

טוויטש ג.¹, אברוני ש.², ליק.^{1,2}, בן משה ל.¹, שרעבי ג.¹, זילברמן ת.¹, עליאן ס.¹, בורנשטיין י.³ שרון א.⁴, בוקמן ר.³

¹ המכון הגיאולוגי

² החוג לביולוגיה אבולוציונית וסביבתית, אוניברסיטת חיפה

³ החוג למדעים גיאו-ימיים, בית הספר למדעי הים, אוניברסיטת חיפה

⁴ מרכז ידע גליל עליון (מיג"ל) ומכללת תל-חי

3.2.1. רקע

נסיגה מהירה של אגמים טרמינליים היא תופעה עולמית הנגרמת מהתהומות כדור הארץ ושימוש יתר במים (Wurtsbaugh et al. 2017). יבוש זה מאיצ' הידדרות סביבתית, כגון עליה במליחות ושינויים בהרכב היונים באגמים הללו, מה שהופך את סביבתם לקיצונית עוד יותר עבור המקרו- והמיקרו- ארגניזמים המאכלסים אותם (Oren 2018). אוכלוסיות אלו מורכבות מארגוניים השיכים לכל שלוש העל-ממלכות הידועות: (1) ארגניזמים אוקריוטים, שהם בעלי תאים המכילים גרעין ואברונים (כגון אצות); (2) חיידקים, שהם ארגניזמים תאימים חסרי גרעין ואברונים; ו(3) ארכיאות, שהן ארגניזמים תאימים חסרי גרעין ואברונים (והינן קבוצה נפרדת מהחיידקים), שבמקרים רבים הם בעלי יכולת מאוד טובה לגודל בתנאי קיצון קשים (Oren 2018). יבוש ים המלח הינו ייחודי בשל היוצרות אלפי הבולענים, כתוצאה מנדיית קו החוף והמערכת ההידרולוגית המובילה להמסה של אופורטunitים מתחת לקרקע (Abelson et al., 2006; Frumkin et al., 2011). בזמן שתהיליכים אלו מאיצים על תשתיות החוף ועל חי האדם היומיומי (Nof et al., 2013), וחופי האגם הטבעיים שונים באופן בלתי הפיך, בולענים אלו יוצרים בית גידול מימי חדש בעל מאפיינים ייחודיים המשתנים ללא הרף. בתו גידול אלו כוללים מערכות מיקרוביאליות ייחודיות המספקות הזדמנויות למחקר בתנאים אביזוטיים קיצוניים ודינמיים.

אחד ההיבטים המעניינים של הבולענים בגן ים המלח, שהוא כמשמעותו על הרכב והישרדות של המקרו-אורגניזמים (Adar et al., 2014; Hirshberg et al., 2019), הוא השונות הגובהה של רמות המליחות בבולענים, הנעה בטוחה הרחב של 0.5-550 גראם/ליטר (Zilberman-Kron 2008). רבים מהבולענים מלאים במים היפרסתניים, המצויים בעל-רוויה במשקעי החולוקן בהם נוצרו הבולענים. מקור תמלחות הבולענים הוא תמלחת אינטראטיבית של ים המלח שכיסה את האזור בעבר (Zilberman-Kron 2008) המתדרה ומרתיכות עקב תנאי הסביבה הקיצוניים. בנוסף, יתכן גם כי באתרים שונים ערבות עם מעינות מלחים סמכים בעלי הרכבים שונים אף הוא תורם לשונות הגובהה. יתר על כן, התמלחות היפר-סליניות בבולענים רגשות מאוד לתנודות קצרות טווח בלחות היחסית בעקבות שינויי עונתיים (Zilberman et al., 2017), ומאזן המים בבולענים אף רגיש לנדיית קו החוף עקב הירידה העקבית במפלס ים המלח.

מליחות היא גורם לחץ סלקטיבי חזק מאוד המניע את האבולוציה והרכבת של אוכלוסיות מיקרוביאליות (Kimbrel et al., 2018), וכן מצופה שונות המליחות מרחב וזמן תשפיע על הרכבת אוכלוסיות המיקרואורגניזמים בובלענים. גורם נוסף המניע את האבולוציה המיקרוביאלית הוא הדינמיקה של האוכלוסייה הירטוסים שمدבקים אותם (Rodriguez-Valera et al., 2009). לדוגמה, שונות גנטית גבוהה מאוד מינית ארכיאית בודד דוחה בעבר בבריכת מלח רוויה קטנה. חלק ניכר מהמגון הזה נחשב תוצאה של "constant-diversity dynamics" המונעת על ידי יירוטים עשוירים, ידוע לנו מעט מאוד על הרכבת אוכלוסיות המיקרואורגניזמים, והירטוסים המאכלסים את הבריכות הנוצרות בהם, ועוד פחות על הדינמיקה שלהם בזמן.

כדי להזות אוכלוסיות מיקרוביאליות, נהוג לרצף את החומר הגנטי (DNA) מסביבת המחקר, ול以习近平 מחרצפים מטהගנים אשר מייצג את הרכבת הגנטיים של אוכלוסיות המקור. ריצוף החומר הגנטי מאפשר להבין את הרכבת האוכלוסייה והdinamika בין מרכיביה, ואת זיהוי השונות שלה בין בובלענים שונים.

3.2.2. מטרות העבודה

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

3.2.3. שיטות

המחקר מתבצע בקבוצת בובלענים באיזור עין גדי בקרבת חוף ים המלח, מצפון לשפך נחל דוד (אייר 3.2.1). במהלך שתי שנות הדיגום (2021-2022) נדגו 11 בובלענים מאזור המחקר הראשון, כשמתוכם שלושה בובלענים התyiיבשו במהלך 2022.אזור המחקר הורחב מעט צפונה ונבחרו שלושה בובלענים נוספים שנדרגו החל מהDIGOM השני במאי 2022. ברכות בובלענים אלו הם חלק מצביר בובלענים בגודלים ובצבעים שונים המצויים בסביבות זה זהה (אייר 3.2.1). מי הבובלענים נdaggo במהלך 2022 להרכבת כימי כללי, ליסודות קורט, לחומר אורגני כולל (TOC) ומומס (DOC) ולהרכבת איזוטופי של חמצן (O^{18}); בשדה נמדד ציפויות, מוליכות חשמלית, טמפרטורה, דרגת חומציות (H_k) ורמת החמצן של מי הבובלענים.

מכל ברייכה נdaggo מים לשם איסוף האורגניזמים המיקרוביאלים שבהם, ושונעו לאוניברסיטת חיפה להמשך טיפול. באותו היום, דגימות המים סוננו דרך מספר פילטרים (משורשים) כדי לאסוף מיקרואורגניזמים בגודלים שונים: 11 מיקרון, 5 מיקרון ו- 0.22 מיקרון. הפרקציה שעברה את הפילטר האחרון נקראת הפרקציה היריאלית (מאחר והרוב המוחלט של האורגניזמים התאים לא יכולם לעبور פילטר זה). כל הדגימות סוננו עד השלב בו לפחות אחד מהפילטרים נסתם. DNA הופק מכל הפילטרים.

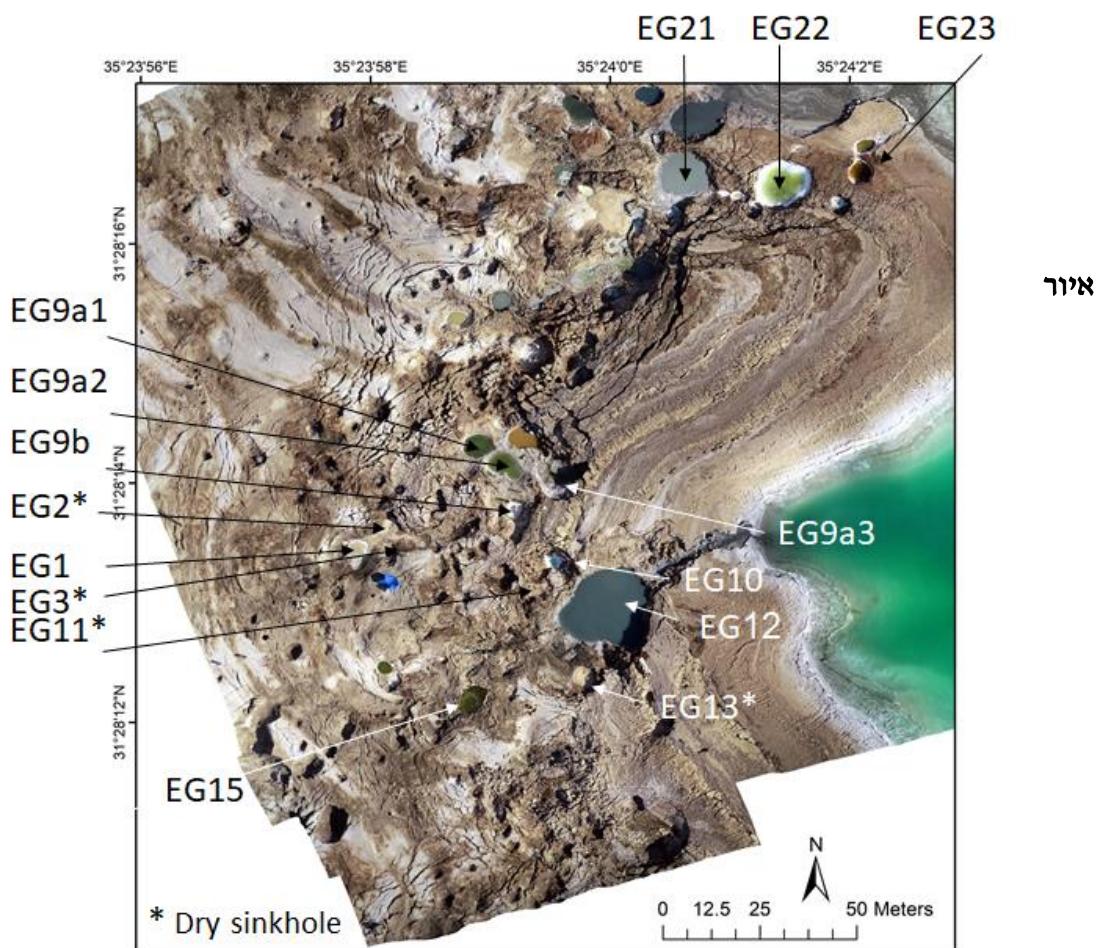
חומצות גרעין (DNA ו-RNA) הופקו מכל הדגימות שנאספו בינואר 2022 וייחד עם DNA שהופק משלשות הדיגומים ב-2021, רוצפו ה-DNA והRNA (במרכז הריצוף Rush University Genomics

המודולים המוצגים בדוח זה הן רק מהפרקציה התאית (גודל החלקיקים בה מתאים לגודלים של ארגניזמים המורכבים מתאים – חיידקים, ארכיאות ואוקריוטים, בוגר לירוסים) של הדיגומים מ-2021. המטהගנומיים עברו אסמבלי (תהליך בו רצפי DNA קצריים מחוברים לצירת רצפים ארוכים המיצגים גנומים של מיקרואורגניזמים). מתוך הרצפים שהורכבו, זהו 278 רצפים המהווים גנומים שלמים או כמעט שלמים של חיידקים או ארכיאות על פי רמת הדמיון שלהם לאורגניזמים ידועים באמצעות תוכנית "יעודית". בנוסף, זהו 29 רצפים המהווים גנומים שלמים או חלקיים של וירוסים. בשלב זה זהו, באופן יחסית, מעט גנומים של וירוסים לאחר מרבית הווירוסים נמצאים בפרקציה היראלית שעדיין לא עברה אנליזה. בנוסף, זיהוי רצפים ויראלים הוא תהליך מורכב, ויהיה יותר פשוט לזהות אותם, כאשר נחקרו את הדגימות בהן יהיה צפוי למצוא רק וירוסים. הגנומים של החידקים והארכיאות הושו למאגרי מידע קיימים. רמת הדמיון בין גנומים אלו לגנומים הידועים, מאפשרת לסוג אותם מבחינה טקסונומית. הגנומים של הווירוסים הושו אף הם למאגרי מידע קיימים בעזרת שתי תוכנות. אחת, VipTree, בונה עצים פילוגנטיים, בהם מחושב הדמיון בין כל שני גנומים על פי רצפי החלבון, ובננה עץ המראה את הדמיון היחסי בין הגנומים (Nishimura et al., 2017). השנייה, VconTACT, משתמשת ברשומות המחברות בין אלמנטים דומים בגנומים של וירוסים שונים (ברמת רצפי החלבון), וע"י כך מציגה קרבה בין גנומים חדשים, לאלו שנמצאים במאגר המידע של התוכנה (Bin Jang et al., 2019). זיהוי מיני הווירוסים הדומים לרצפים מהבולענים, אפשר לשער מי המאכسن (האורגניזם אותו הירוס יכול להדביק) של כל וירוס. זיהוי מדויק של המאכسن הוא ממשימה מאוד קשה ולעתים בלתי אפשרית, ולכן הגדרנו את המאכسن באופן מאוד כללי (ארכיאה/ცיאנوبקטיריה/חיידק אחר). רחפן סוק 4 Phantom, שהורם לגובה 40 מטר, אפשר לתאר את השינויים בצבע וגודל הבריכות לאורך שתי שנות הדיגום. הבולענים צולמו ברזולוציה של 1.5 ס"מ לפיקסל בחיפוי תמונות של 75%. בעזרת תוכנת Agisoft ובודו התמונות לצירת אורטופוטו.

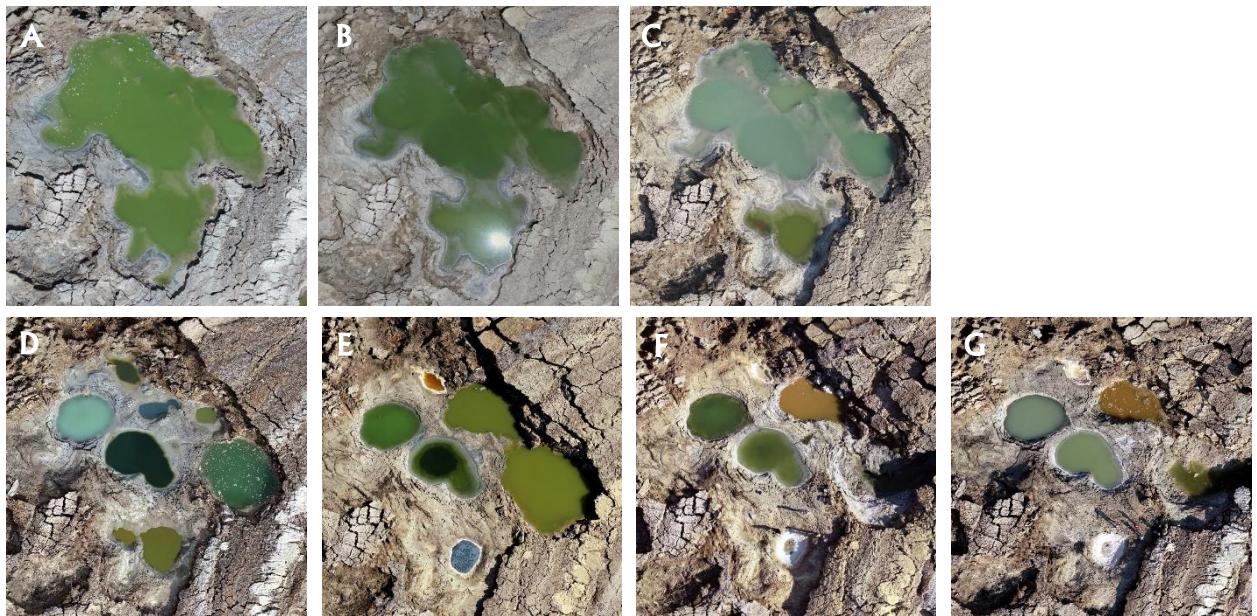
3.2.4. תוצאות

שינויים בזמן ובמרחב בצבע ובגודל הבריכות

צילומי הרחפן ותיאור השדה החשפו שוגדל, צבע ואופי הבריכות היה שונה באופן בולט באותו תא שטח, וכן מימיהן של הבריכות השתנו לאורך תקופת הדיגום. בשל ירידת מפלס ים המלח וההתńתקות ממוקור ההזנה של הבריכות, חלק מהבריכות התיבשו (איור C.3.2.1). השינויים המשמעותיים ביותר התרחשו בבריכה 9 שהתפסלה למספר רב של בריכות משנה במהלך תקופת המחקר (איור 3.2.2), דבר שבא לידי ביטוי גם בתוכנות הכימיות של מי הבריכות.



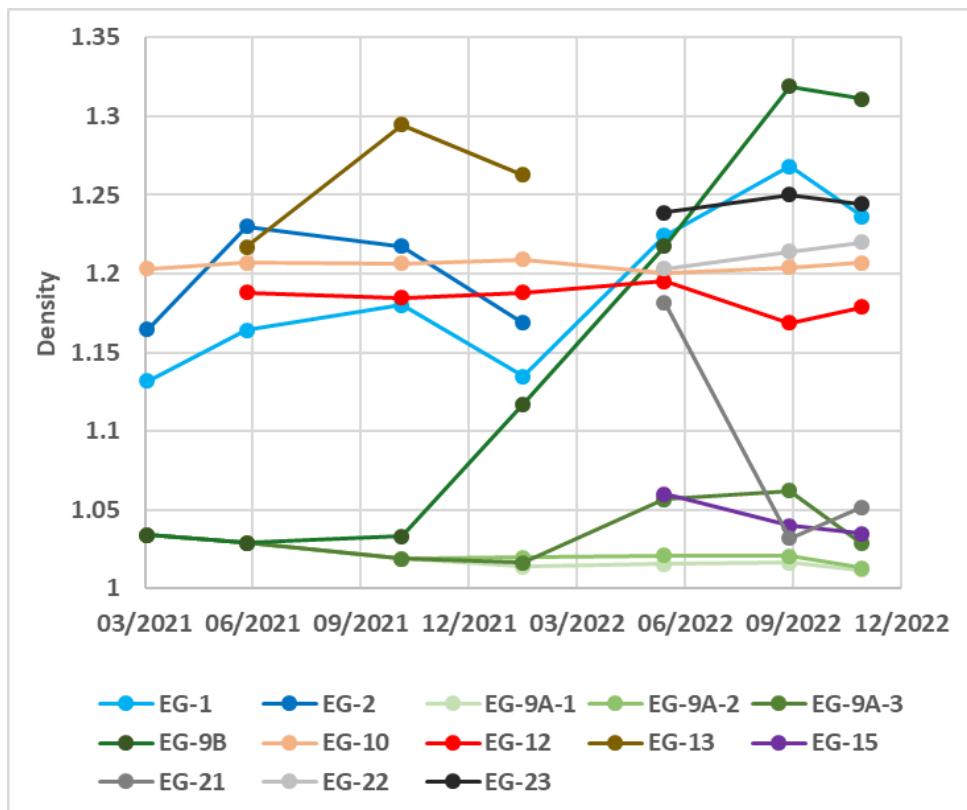
3.2.1. מיקום אזור המחקר. (A-B) מפות של אזור המחקר. מפה (B) היא הגדלה של האזור המסומן באדום במפה (A). במפה (B) ניתן לראות את צביר הבולענים לחופי ים המלח באזורי עין גדי, באזורי המסומן באדום. בתצלום (C) (ספטמבר 2022) מופיעים הבולענים שנדרגו במהלך המחקר (בולים נסויים, ישים מסומנים בכוכבית). ניתן לראות שלברירות מאפיינים שונים של צבע וגודל, אשר אנו מניחים קשורים לשונות הפיזית, הכימית והביולוגית של מימיהן. הכתם הכהה בין בריכות 1 ו-3 הוא ציליה.



איור 3.2.2. השתנות בולען 9 עם הזמן ויצירת בולעני המשנה A9 ו-B9, ופיצול של A9 לבריכות משנה במהלך שתי שנות הדיגום על פי צילומי רחפן: בשורה העליונה שנת 2021 (A) מרץ, (B) יוני, ו(C) אוקטובר, ובשורה התחתונה שנת 2022 (D) נובמבר, (E) מאי, (F) ספטמבר, ו(G) נובמבר. שמות בריכות 9 מופיעות באיור 1.3.2.1.

תכונות כימיות של מי הבולענים

כפיפות המים ($\text{גראם}/\text{ס"מ}^3$) שנמדזה במשך שתי שנות הדיגום מראה שונות בין הבריכות, גם כאלו המצויות בסביבות זו לזו (אייר 3.2.3). בחלק מהבריכות, הcpfיפות לא השתנתה משמעותית עם הזמן (1, 9A-2, 9B, 10, 12, 22, 23) ואילו בבריכות האחרות ישנו שינוי משמעותי בcpfיפות לאורך תקופת הדיגום (1, 2, 9B, 13, 21 ובמידה פחותה 3-9A). כדי, ישנו קשר ישיר בין ערבי הcpfיפות לערכי המלחות, כפי שמתבטים בסך כל המומסים (salts; total dissolved salts) על ידי שימושם בעיקר מרכיבי הצלור. עליה בערבי הcpfיפות בין הדיגומים השונים מחייבת על אידוי התמלחת ורכיבזה, כמו שניתן לראות בצורה מובהקת בבריכה B9 בין ספטמבר 2021 לספטמבר 2022 (1.03 ל-1.32, בהתאם). בולענים שבהם cpfיפות התמלחת נשארה יחסית קבועה לכל אורך תקופת הדיגום מעדים על כך שיש הזנה קבועה של תמלחת מסווג מסוים לתוך הבולען. ניתן להבחין בשני סוגים תמלחות המזינות את הבולענים: תמלחת בעלת cpfיפות נמוכה יחסית בסביבות 1.02 (קבוצת בולען 9 ובולען 15) ותמלחת בעלת cpfיפות גבוהה יותר סביבה 1.2 (בולענים 1, 2, 12, 10, 13, 22, ו-23). בחלק מהבולענים ניתן להבחין בירידה בcpfיפות עם המעבר לחודשי הסתיו-חורף (1, 2, 9, 13). תופעה זו נגרמת ע"י כניסה מים מטאוריים בתהליך התעבות מהלחות שבאויר לתוך מי הבולען. עם עליית הלחות היחסית באוויר בתקופה זו, וככניסת המים לבולען בדרך זו, נמהלת התמלחת שבו.



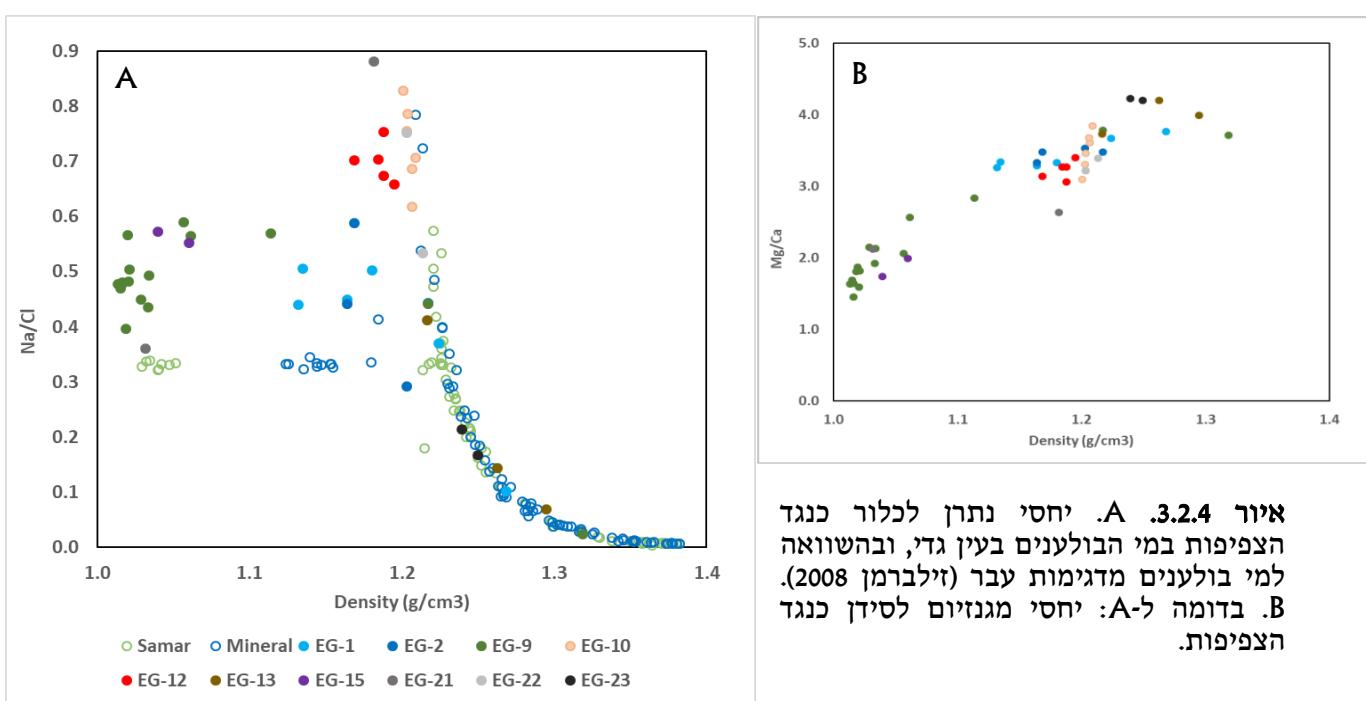
איור 3.2.3. צפיפות מי הבולענים (גר/ס"מ³)

היחס המולרי של נתרן לקלור Na/Cl מצביע על שינויים בדרגת הרויה של התמיסה להליט (NaCl). כאשר תמיסה מתאדה וריכזו המומסים בה עולה, היחס ביניהם ישאר קבוע, כל עוד הם לא שוקעים כמלח. כאשר התמיסה מגיעה לרוויה, היחס ישתנה בהתאם ליחס בהםם במלח. במקרה של תמיסות באזורי ים המלח, $\text{Na}/\text{Cl} > 1$, ולכן השקעת הליט תגרום לירידה ביחס זה והמסה תעלתה אותו לכיוון 1. מיהול של מי הבולענים עם מים מטאוריים בנוכחות הליט עד לרוויה מעלה את יחס הנתרן לקלור עם צפיפות קבועה בסביבות 1.23 (איור 1.2.4). מיהול עם מים מטאוריים ללא המסה של מלח - יחס של כ- 0.45 וצפיפות נמוכה הקרויה ל-1.

במרחב יחס Na/Cl לצפיפות (איור 3.2.4) ניתן לראות חלוקה ברורה לקבוצות הבולענים בעלות מאפיינים דומים. הקבוצה הראשונה, קבוצת בריכות 9 (מופיעות בירוק ללא חלוקה לבריכות משנה) ובריכה 15 הינה המהולות ביותר. כאשר בריכה 9 מתנתקת (איור 3.2.2- פאנל C והלאה) וועברת אידיוי היא מזכירה על השקעת הליט (ירידה משמעותית של היחס Na/Cl) והינה הדוגמא המודעה ביותר שנמדדה עד כה (ספטמבר 2022). קבוצת בריכות 1 ו-2 שמקורן בתמלחת מלוחה יותר (איור 3.2.3), הדומה יותר להרכב ים המלח, דומות ביחס Na/Cl לקבוצה הראשונה אך בצפיפות גבוהה יותר, וניתן לצפות במוגמת אידיוי בבריכה 1 (בריכה 2 התיבשה במחצית הראשונה של 2022 ומוגמת האידיוי המשמעותית לא נדגמה). שתי הקבוצות הללו דומות בצפיפותן לצפיפות בריכות סמר ומינרל (Zilberman, 2008), בהתאם, כאשר המוגמות דומות אך יחס Na/Cl של מי הבולענים המהולים ולא מסוימת מלח (צפיפות נמוכה) שונה בין הדיגום במחקר זה (2021-2022) לשני הדיגומים לפני כן- 15 שנה (Zilberman-Kron 2008). קבוצת בריכות 10 ו-12 מראות מגמת המסה של מלח עם עליה של היחס Na/Cl לכיוון 1. ניתן להבחין שניים בבריכה 12 שהינה גדולה משמעותית ביחס לבריכה 10,

מראה תחילת מגמה הדומה לשתי הקבוצות הראשונות (מייהל מקו שיווי המשקל של המסת הליט). שאר הbrickות מופיעות לאורך עקומת ההשקעה של הליט ($Na/Cl < 0.3$) והאידי ($Na/Cl > 0.3$). גם ביחס Mg/Ca ניתן להבחין בחלוקת לקבוצות אך מרחב זה בולענים 1, 2, 10, 12, 21-23 מראים יחסים דומים בתחום Mg/Ca שבין 3 ל-4.5. תחום זה מייצג את היחס הנ"ל בתמלחות ים המלח הנפוצות באזור, כאשר בתמלחת ים המלח $Mg/Ca = 4.5$ ובתמלחת קדם-שלם $Mg/Ca = 3$. המשקנה היא שמקור תמלחות בולענים אלה הוא אחד משני הסוגים הללו או תערובת שלהם.

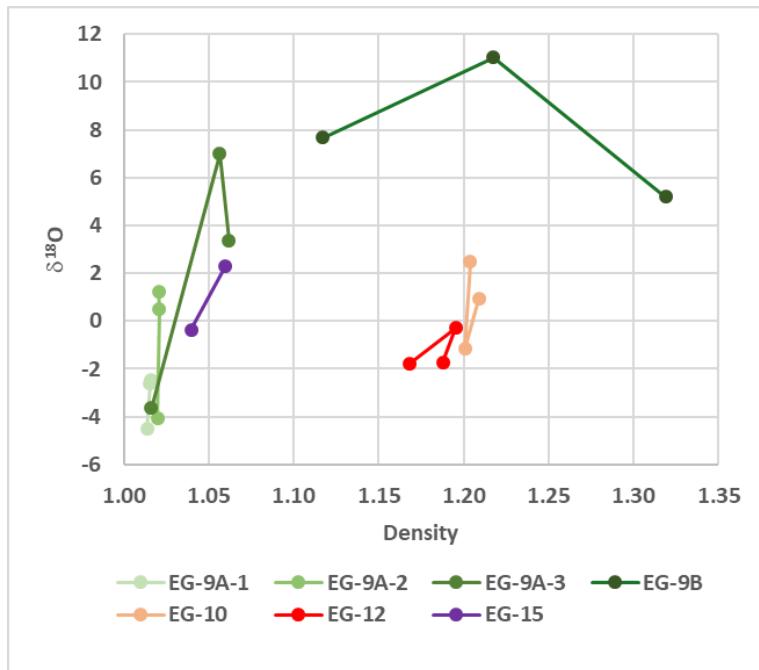
לעומת זאת, בבולענים בעלי הצפיפות הנמוכה, 9 ו-15 נצפה יחס Mg/Ca נמוך משמעותית בין 1.5-2.5. ערכיהם אלו מצביעים על קיומם מרכיב קטן נוספת במערכת שהוא מודולל במגנזיום או מועשר בקלציום.



איור 3.2.4. A. יחס נתרן לכליור כנגד הצפיפות בימי הבולענים בעין גדי, ובחשואה לימי בולענים מדגימות עבר (זילברמן 2008). B. בדומה לא: יחס מגנזיום לסידן כנגד הצפיפות.

באיור 3.2.5 מוצג הרכב האיזוטופי של חמצן (O^{18}) כנגד צפיפות מי הבולענים (gr/cm^3) בbrickות נבחרות. ניתן לראות שבbrickות מקבוצה 9, שבתחלת המחקר היו כלון בולען אחד (איור 3.2.2 - פannel A), יש עלייה בהרכב האיזוטופי של חמצן עם הזמן מתוך מקור משותף עם O^{18} . בERICA 9 מראה התנהגות שונה, משום שהתנתקה משאר brickות 9 והינה מאוזה בהרבה מהן. ככל הנראה לכל brickות 9 היה הרכב משותף אחד במקור (שלא נמדד לאיזוטופים בדיגומי שנות המחקר הראשונה). brickות 10 ו-12, למורות שונות משמעותית במופע הפיזי שלהם, הינן דומות מאוד ומראות יציבות הן בצפיפות והן בהרכב האיזוטופי, מה שמייד על הזנה קבועה של תמלחת לתוך בולענים אלו. brickה 15 מראה התנהגות כימית ואיזוטופית דומה לbrickות 9, מה שמייד על מקור משותף מהוות מרכיב קטן לשחקור מה מוצאו ולאיזה קבועה מתמלחות ים המלח הוא שייך. דמיון זה ניכר גם בצבע brickה הירוק שכנראה מעיד על המזאות של אצטן ו/או ציאנובקטורתה במים

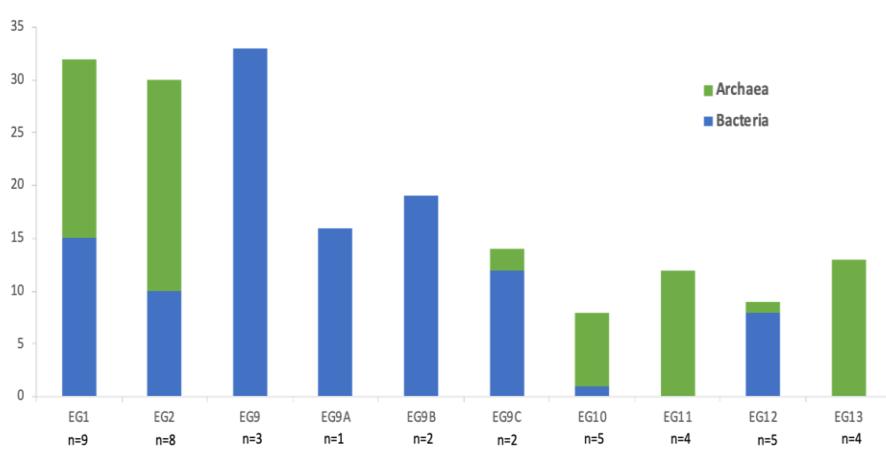
בבריכות אלו. כמו כן, זההו זחלים של יתושים במים בשני הדיגומים האחרונים ב-2022 בבריכות A9 .151.



איור 3.2.5. הרכב איזוטופי של חמצן ($\delta^{18}\text{O}$) כנגד צפיפות מי הבולענים (גר"/ס"מ³) בבריכות נבחרות.

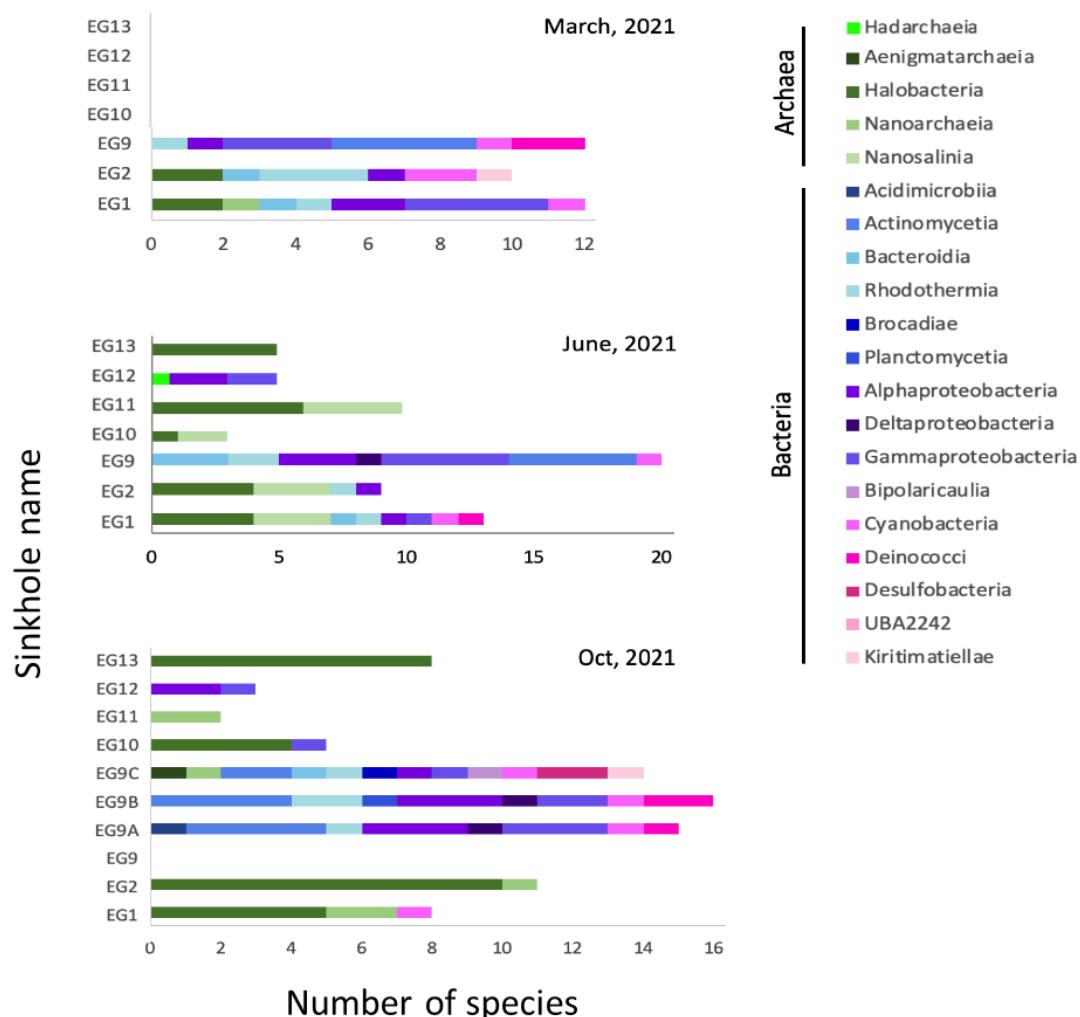
מיקרואורגניזמים בבריכות

סך הכל רוצפו 108 דגימות DNA, ו 22 דגימות RNA. תוצרי ריצוף ה-DNA (מטהගנומיים) משקפים את זהות המיקרואורגניזמים בדגימות השונות (אורוגניזמים תאימים ווירוסים בעלי גנים מדנ"א), ואילו תוצרי ריצוף דגימות RNA (מטהטנסקריפטומים) משקפים את פעילות המיקרואורגניזמים, ובנוסף מאפשרים לזהות וירוסים בעלי חומר גנטי המורכב מ-RNA. תוצאות הריצוף של הדיגום מינואר 2022, וכן כל הפרקיות הוויראליות, התקבלו לאחרונה, ולכן התוצאות המוצגות בדוח זה הן רק מהפרקציה התאית של הדיגומים מ-2021. מתוך הריצופים של המטהගנומיים שהורכבו, זההו 278 ריצפים המהווים גנומיים שלמים או כמעט שלמים של חידקים או ארכיאות. בנוסף, זההו 29 ריצפים המהווים גנומיים שלמים או חלקיים של וירוסים.



איור 3.2.6. התפלגות הארכיאות והחידקים בבריכות הגנומיים המיצגים מינים נפרדים של ארכיאות (ירוק) או חידקים (כחול) שזוהו בכל בריכה. מספר הדגימות שרוצפו מכל בריכה (ח) מופיע בחתית כל עמודה.

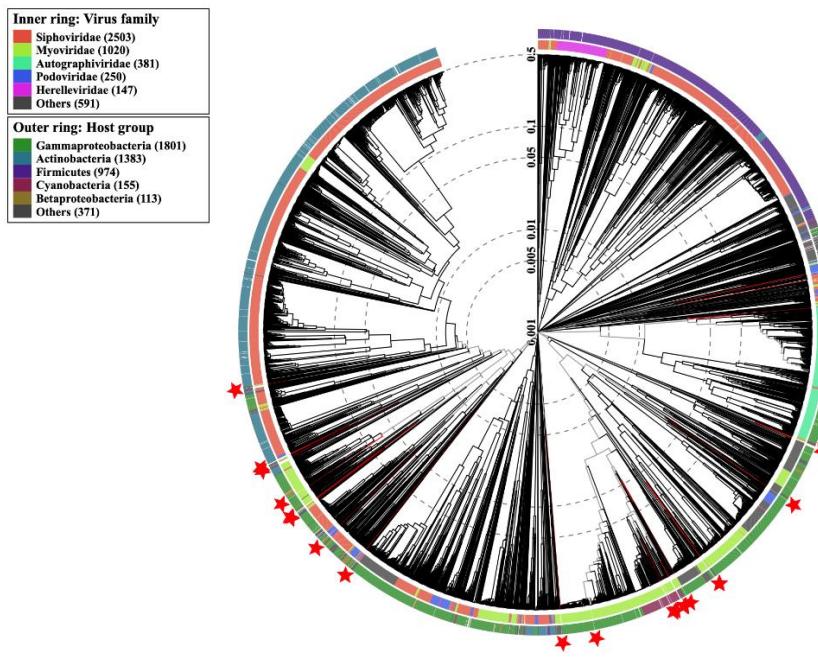
התפלגות מיני הארכיאות והחידקים נבדלה בין הבריכות השונות (איור 3.2.6). היו בריכות בהן נמצאו רק (או כמעט רק) חידקים (9 ו-12), בריכות בהן נמצאו רק (או כמעט רק) ארכיאות (10, 11 ו-13), ובריכות בהן נמצאו גם ארכיאות וגם חידקים (1 ו-2). מעניין לראות שהרכב המינים בבריכות השתנה בין הדגימות מהთאריכים השונים (איור 3.2.7). לדוגמה, בריכות 1 ו-2 נשלטו ע"י מיני חידקים שונים בחודש מרץ, אשר הוחלפו עם הזמן במיני ארכיאות, עד שבאוקטוברober שתי הבריכות נשלטו ע"י מיני ארכיאות. שינוי זה עשוי להיות עליה במליחות הבריכות בין מרץ ליוני (ובבריכה 1 גם בין יוני לאוקטובר; איור 3.2.3). שפע המינים היה גבוה ביותר בבריכה 9 (איור 3.2.7), בה נמדהה המלחות הנמוכה ביותר לאורך כל הדיגומים (איור 3.2.3). המלחות הנמוכה יחסית יכולה גם להשיבר את העובדה שבכל הדיגומים רק חידקים נמצאו בבריכה 9, וארכיאות לא נמצאו כלל. שפע המינים בבריכה 1 היה דומה לזה של בירכה 9 במרץ 2021, ועם הזמן מספר המינים בבריכה 1 נהייה נמוך משמעותית מזה של בירכה 9. ציאנובקטרייה נמצאו רק בבריכות 1, 2 ו-9. בבריכות 1 ו-9 נמצא לאורך כל הדיגום, אך בבריכה 2 רק במרץ 2021 (איור 3.2.7).



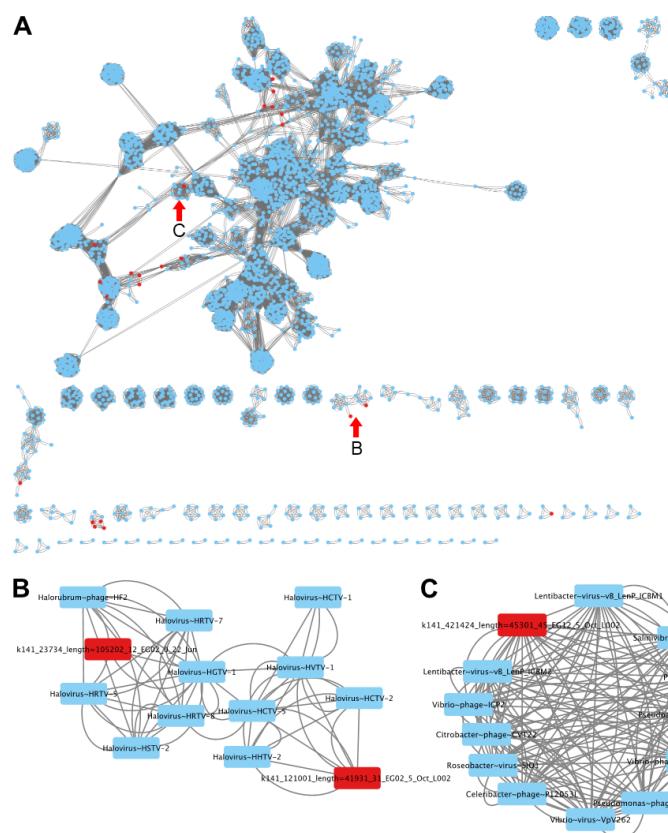
איור 3.2.7. התפלגות הגנומים של האורגניזמים התאיים בבריכות הבולענים. מספר הגנומים המייצגים מינים שונים של ארכאה או חידקים בבריכות השונות. צבעים שונים מצבעים על השתייכות המינים למחלקה שונה.

הגנומים של הווירוסים שנמצאו בבולענים היו דומים לוירוסים ממשפחות שונות (איורם & 3.2.8 ו- 3.2.9) ולכללו המדביקים מיני ארכיאה, ציאנובקטריה, וחידקים אחרים (איורים 3.2.7, 3.2.8 ו- 3.2.9).

כון, ניתן לראות דמיון בין מגמת השתנות מגוון הווירוסים להשתנות מגוון האורגניזמים התאים בבריכה 1. במרץ 2021 הווירוסים בבריכה זו הדקקו חיידקים, ומאותר יותר השתלוו על הבריכה וירוסים שmdbיקים ארכיאות (איור 3.2.10).



איור 3.2.8. פילוגנטזה של הווירוסים בבולענים יחד עם וירוסים ידועים. עץ פילוגנטי של גנומים שלמים, המבוסס על רצפי הלבון. כל וירוס מיוצג על ידי קצה קו על הפריפריה של המעגל. אורך הקווים המחברים כל שני וירוסים, מייצג את רמת הדמיון ביניהם (כל שהמרחב קצר יותר, הם יותר דומים). גנומים של וירוסים חדשים (כאלו שלא נמצאים במאגרי מידע ידועים) מהבולענים מסומנים בכוכב אדום. המעגל החיצוני מראה את המאחסנים של הווירוסים הידועים, והמעגל הפנימי מראה את המשפחות אליהן שייכים וירוסים אלו. העץ נבנה בעזרת VipTree.



איור 3.2.9. אפיון קשרים גנומיים בין וירוסים מהבולענים לווירוסים ממאגרי מידע קיימים. A. רשת המבוססת על רצף הלבון של גנומים של וירוסים מהבולענים (יעיגולים אדומים) או ממאגרי מידע קיימים (יעיגולים כחולים). B. & C. הגדלה של קבוצות וירוסים המדביקים ארכיאות (B) או חיידקים הטרוטרופים (C); גנומים ממאגרי מידע מסומנים במלבן כחול, וגנומים מהבולענים מסומנים במלבן אדום. מיקום הקבוצות המוגדרות בראש הגדרה מסומן בחיצים אדומים. האנליזה בוצעה ע"י התוכנה VconTACT2.

Host	Genome	EG9 Mar	EG9 Jun	EG9A Oct	EG9B Oct	EG12 Jun	EG12 Oct	EG1 Mar	EG1 Jun	EG3 Oct	EG2 Mar	EG2 Jun	EG2 Oct	EG10 Jun	EG10 Oct	EG11 Jun	EG11 Oct	EG13 Jun	EG13 Oct
cyanobacteria	EG9A Oct1																		
cyanobacteria	EG9 Jun1																		
cyanobacteria	EG9A Oct2																		
cyanobacteria	EG9B Oct1																		
cyanobacteria	EG9B Oct2																		
cyanobacteria	EG9 Jun2																		
cyanobacteria	EG9B Oct3																		
cyanobacteria	EG9B Oct4																		
cyanobacteria	EG9B Oct5																		
other bacteria	EG9B Oct6																		
other bacteria	EG9C Oct																		
other bacteria	EG9B Oct7																		
other bacteria	EG9B Oct8																		
other bacteria	EG9B Oct9																		
other bacteria	EG9B Oct10																		
other bacteria	EG9A Oct3																		
other bacteria	EG9A Oct4																		
other bacteria	EG9 Jun3																		
archaea	EG9 Mar																		
cyanobacteria	EG12 Oct																		
cyanobacteria	EG12 Oct																		
other bacteria	EG12 Oct																		
other bacteria	EG12 Oct																		
archaea	EG02 Jun																		
archaea	EG2 Oct																		
archaea	EG10 Jun																		
archaea	EG11 Jun																		
archaea	EG10 Jun																		
archaea	EG11 Oct																		

איור 3.2.10. התפלגות שכיחות הווירוסים בובילניים. עשרים ותשעה רצפי DNA, שמקורם במטה גנומיים מהובילניים, זוהו בגנים של וירוסים. הקבוצות הטקסונומיות אליהן שייכים המאכנסים (החדיק או הארכיה אותם מדקיק הווירוס) המשוערים של וירוסים אלו זוהו לפי דמיון ברצפי גנומיים אלו לוירוסים ידועים. כל שורה מייצגת גנים אחד של וירוס. שמota הווירוסים מורכבים ממש הבריכה וחודש הדיגום, בהם זווהה הגנים של הווירוס, וכן מספר קטלובי, במידה וזויה יותר מווירוס אחד מאותה הדגימה. משמאלי לכל שם של וירוס מצוין המאכן הסביר ביותר של הווירוס (ארכייה, ציאנובקטריה, או חידקים אחרים). כל טור מייצג דגימה אחת (מוחץ שם הבריכה ותאריך הדיגום). בכל דגימה חושבו סך הרცפים הקצרים הדומים לכל אחד מ-29 הגנים באנליה. בכל משבצת מוחץ שיעור הרცפים הדומים לגנים המוצע באלה השורה, מתוקן כל הרცפים הדומים לכל הווירוסים מהדגומה באותו הטו. שיעור הרცפים מוחץ ע"י רוחב העמודה (bar) הכהולה בכל משבצת. שמota הדגימות השונות והגנומיים השונים נקבעו לגוני ירוק וכחול לפי הדמיון בתתפלגות הווירוסים בבריכות בהן נערכה הדגימה: בריכה 9, בריכה 12, בריכות 1, 21, ולבסוף בריכות 10, 11, 13.

3.2.5. סיכום והמשך עבודה

התוצאות של המחקר לשנתיים של דיגום מראות בבירור שינויי משמעותיים במי הבריכות לאורך השנה, הן בהרכב הכימי והן באוכולוסייה המיקרוביאלית. התוצאות על המזאות DNA של אורגניזמים תאימים (חידקים ו/או ארכיאות) וכן של וירוסים במרבית הבריכות, אפילו במקרה עם מליחות גבוהה (למעלה מ- 400 גרם לליטר), הינו חדש. הבריכות מתחולקות למספר קבוצות בעלי מאפיינים דומים מבחינת הרכב כימי ואיזוטופי. כאשר ברייכה 9 מתפצלת לבריכות משנה וחלקה מתנתך, ישנו שינויי משמעותיים בצפיפות המלווה גם בשינוי בהרכב האיזוטופי. קבוצות ברייכות אלו הינה דומה במאפייניה הכימיים לברייכה 15 שהינה בעל ציפוי דומה. בריכות 10 ו-12 סמוכות אחת לשניה, מאוד שונות בגודלן וצבען אך הין דומות מאוד בצפיפות, בהרכב הכימי ובהרכב האיזוטופי, מה שمعد על הזנה קבועה של תמלחת זהה לתוך בולענים אלו. ברייכות 1 ו-21 גם דומות מבחינה כימית. הדמיון הימי בין הבריכות מראה התאמה מסוימת לתוצאות המיקרוביאליות חשוב לצין שהතוצאות הכימיות מייצגות שנתיים של מחקר ואילו התוצאות המיקרוביאליות מייצגות שנה אחת. ניתן לראות שבחינת הרכיב האוכולוסיט, הן של האורגניזמים התאים והן של הווירוסים, הבריכות (שנדגמו ב-2021) מתחולקות ל-4 קבוצות: (1) ברייכה 9, בה המלחות הנמוכות ביותר, ובה שפע המינימ הגובה ביותר, גם בין מיני האורגניזמים התאים וגם בין הווירוסים, וכן ברייכה זו מכילה כמעט רק חידקים וווירוסים של חידקים; (2) ברייכה 12 שמכילה בעיקר חידקים וווירוסים של חידקים; (3) ברייכות 1 ו-11; ו(4) ברייכות 10, 11, 12 ו-13 שנשלחות ע"י מיני ארכיה וווירוסים

של ארכיאות. עשר המינים הגבוהה והשליטה של מיני חיידקים באוכלוסיות בבריכה⁹, עשוי להיות קשור למיליחות הנמוכה יחסית בבריכה זו בזמן הדיגום. לעומת זאת, הבדלים בהרכב האוכלוסיות המיקרוביאליות בין הבירכיות בעלות המיליחות הגבוהה יותר, לא הסבירו ע"י הבדלים ברמת המיליחות הכלולת, או הבדלים ברכזוי המלחים שנבדקו בדיגומים הללו. בדיגומים שנערכו בשנת 2022 (मמנה אין עדין תוצאות ביולוגיות), נספו פרמטרים חדשים לאנליזות הכימיות, ויתכן שפרמטרים אלו יכולים להסביר את הבדלים הביולוגיים בין הבירכיות. הסקת מסקנות רחבות יותר לגבי השפעת התנאים האביזוטים על אוכלוסיות המיקרוארגניזמים בבולעים, והסקת מסקנות לגבי הגורמים המשפיעים על צבע המים, דורשת המשך דיגום עונתי, יחד עם אנליזות רצפים מעמיקה של המטהගנומי של הבירכיות. המידע הטמון במטהගנומיים יפתח פתח להבנת הרכיב אוכלוסיות אלו והשינויים בהרכב זה לאורך השנה. כמו כן, המידע יאפשר הבנה של התנאים בהם יש יתרון לקבוצות מסוימות, והдинמיקה ביניהן. בנוסף, ניתן יהיה לעקוב אחרי האבולוציה של מיקרוארגניזמים אלו ברזולוציה גבוהה והודות לגודל האוכלוסיה המצוומצם יחסית, ביחד עם צפי למורכבות נמוכה יחסית. נוסף על כך, אפשר יהיה לגלו את הפוטנציאלי המטבולי של האוכלוסיות, למצוא גנים מסוימים בהתמודדות עם תנאי הקיצון בסביבה זו, וכן לפחות את קיומם של גנים הלוקחים חלק בייצור טוקסינים. מאגר מידע זה יסייע בהמשך, כאשר דגימות האוכלוסיות תהיה ברזולוציה גבוהה יותר, אך ברמת איפיון פחות מפורטת.

4. תנועת מי תהום, המסת מלח, והשפעות סביבתיות של ירידת המפלס

4.1 בחינת תכונות המסת במטרייקס המורכב מלח תחת תנאי זרימה שונים

טורקלטאו, ט.¹, רוזנצויג, ר.², שלו, א.², ויסברוד, ג.¹

1. אוניברסיטה בן גוריון

2. המכון הגיאולוגי

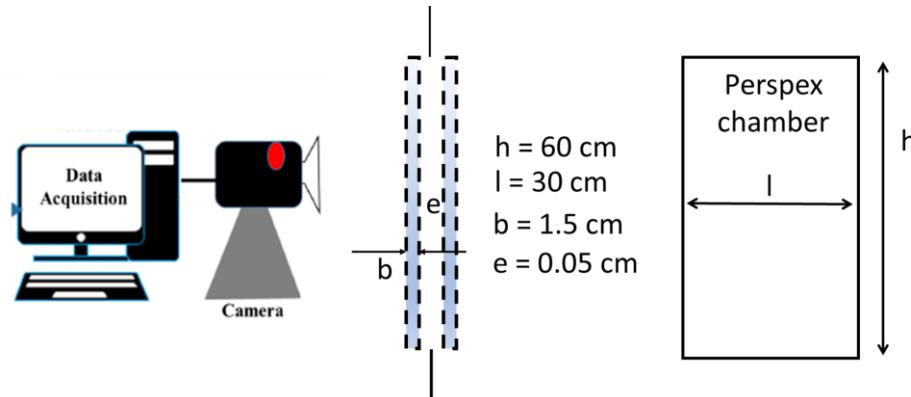
4.1.1 רקע

סלעים התאdots או סלעים אוופוריטים (Evaporites), כולל הליט, הם הסלעים המיסים ביותר מבין הסלעים הנפוצים. חללים קרסטיים גדולים נוצרים, בדומה לסלעי קרבונט, בשל קצבי המסת המהירים שלהם ברגע שהם נתקלים במים היפוגנים (לא רווים או חומצים) (Steefel and Lasaga, 1994). חללים אלה יכולים לגרום מקומי ליצירת שקעים גדולים הנקראים בולענים. מאז 1990, אף בולענים מופיעים לאורץ אזרוי חוף ים המלח (DS) בישראל ובירדן, הגורמים נזק למתקנים ולתשתיות (Abelson et al., 2006). עם זאת, התפתחותם של תעלות מקרוסkopיות בסלע הליט והתפוצה המרחבית שלהם אינה מובנת היטב. עבודות קודמות שעשו במנגנון המסת סלע-מלח בהקשר של ים המלח וההתפתחות הבולענים הראו כי קצבי המסת המלח מהירים יחסית ותלויים ברכיזה תמלחת מי ההזנה (Stiller et al., 2016), וכי גם חזית המסת איחידה וגם נתיבי המסת מועדים עלולים להתפתח כתלות בתנאי זרימה (Weisbrod et al., 2012). מטרת עבודה זו היא להרחיב את הבדיקות הללו ולהעריך את הדינמיקה של דפוס המסת תחת תנאי זרימה שונים של התמייה הבלתי רוויה (בהתיחס להליט).

4.1.2 שיטות

מערכת הניסוי מורכבת מתא זרימה, מיכלי הזנה ואייסוף, צנרת, ומצלמה המשמשת למעקב אחרי התקדמות חזית המסת (איור 4.1.1). תמיית הזנה מזונת לתא בספיקה קבועה הנקבעת על ידי משאבה פרליסטיטית. הניסויים בוצעו בחדר מבוקר טמפרטורה ועם תאורה מינימלית על מנת למנוע חידרת אור מהסבירה. לצורך הניסויים נבנה תא זרימה המורכב משנילוחות פלקסיגלס בגודל 30×60 ס"מ, כאשר ההפרדה בין שני הלוחות הוא מפתח של 5 מ"מ (איור 4.1.1).מלח שולחן גס גרגר ומלח שולחן דק גרגר היו החומרי גלם לבניית המטרייקס בניסויים. המלח נארז בתוך התא בשכבות באמצעות משפט ייעודי. לאחר הנחת כל שכבת מלח בתוך התא, תמייה הרוויה במלח (NaCl / g 350) הזרמה אל תוך התא עד שנראה היה כי השכבה החדשה רוויה בתמייה. לאחר מכן, הונחה שכבת מלח חדשה, וחזר חילתה. תהליך זה בוצע על מנת לשמר על אריזה הומוגנית, ככל

האפשר. הניסוי החל כאשר הזרמה לתא תמיסת הזנה תת-רוואה למלח אשר חלה את תהליך ההמסה. התא צולם במרוחבי זמן קבועים על מנת לעקוב אחרי תהליך ההמסה.



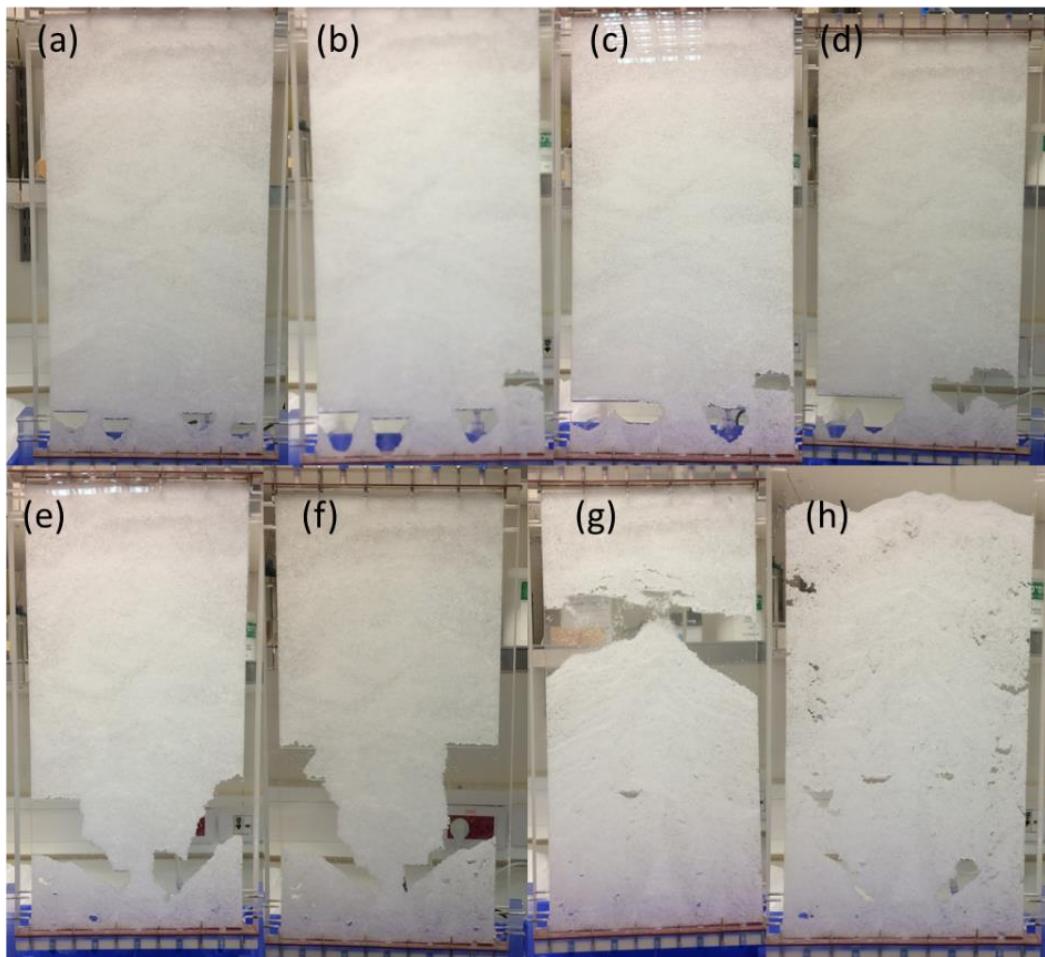
איור 4.1.1. תיאור סכמטי של מערכת הניסוי.

4.1.3 תוצאות

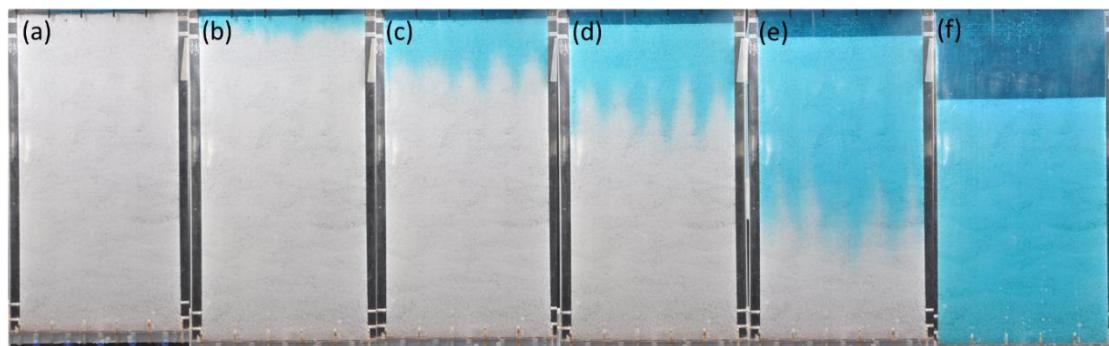
במשך השנה האחרונה בוצעו מספר רב של ניסויים, כאשר חלק מהניסויים בוצעו עם מלח שולחן גס גרגר וחלק עם מלח שולחן דק גרגר על מנת לבדוק את השפעת מרקם המלח על תהליכי ההמסה. בנוסף, בוצעו ניסויים עבור זרימה אנכית וזרימה אופקית. מכיוון שלא שנצפו הבדלים משמעותיים בין הניסויים השונים, בדוח מוצגים שני סטים של ניסויים המציגים את עיקרי תבניות ההמסה שנצפו.

בניסוי המוצג באיור 4.1.2, ארבע צינורות מחוברים לחלק התחתון של התא היזנו כל אחת תמיישה לא רויה בספיקה של 1 מ"ל לדקה (בסק הכל 4 מ"ל לדקה ספיקה). בתחילת הניסוי, נוצרו ארבעה חללים בקרבה לכינוסות של המים בתחתית התא (איור 4.1.2 a). ככל שהניסוי התקדם, החללים התמזגו לשני חללים עיקריים, והמסת המלח המשיכה לכיוון הקצוות של תא (איור 4.1.2 b). בשלבים האחרונים של הניסוי, מטריצת המלח קרסה, ונראה היה שהמסת המלח מרוחשת בצורה אקרואית למדי (איור 4.1.2).

בקבוצת הניסויים השנייה המתוארת בדוח נקבעה התמיישה ללא רויה בצביע כחול מביריק (איור 4.1.3). התמיישה נקבעה טרם כניסה לתוך התא. הצביע מעיד על דפוס חידרת המים בתוך המטריקס של המלח. במספר ניסויים, תמישת הצביע סופקה בשלבים הראשונים של הניסוי ובאמצעו הניסוי, אך לא נצפו הבדלים משמעותיים בין הניסויים. שימנו לב שבסדרת הניסויים המציגת הזרימה מהחلك העליון של התא לכיוון החלק התחתון (איור 4.1.3). זרימה בצורת אצבע הובחנה בשלבים הראשונים של הזרמת תמישת הצביע (איור 3). עם זאת, לאחר כ-30 דקות כל המטריקס של המלח נצביע בכחול. המסת המטריקס של המלח התרחשה בחזית איחוד (איור 4.1.3).



איור 4.1.2. תבניות המסה תחת ספיקות של 4 מ"ל לשעה כאשר הזרימה היא אנכית לחלקו התיכון של התא אל חלקו העליון. האותיות הלועזיות מתארות פרקי זמן שונים של מהלך הניסוי.



איור 4.1.3. הצלומים מתארים סדרת זמן של חדירת צבע לתוך מטריצת המלח. הזמן השונים מצוינים בפינה השמאלית העילונה.

4.1.4 מסקנות

תוצאות הניסויים מצביעות על כך שבתנאים מסוימים, בעיקר בתחילת הניסויים, מתרחשת המסה מועדרת של מלח לאורך נתיבים ספציפיים. המורפולוגיה של נתיבים מועדרים אלו משתנה כתלות בתנאי הזרימה. עם זאת, לא ניתן לדעת בשלב זה מה השפעת גודל התא על נתיבי המסה. העובדה שהנתיחה של המסה להתראות בזוקטור לכיוון הצדדים של התא יכולה להיות תוצר של זרימה עדיפה בין הקצה של התא למטריקס של המלח. בנוסף, יש לשפר את הניסויים בכך שיש למצוא דרך ליצב את המטריקס של המלח כדי להרחיב את משך זמן הניסוי ולבחן נתיבי המסה נוספים.

5. התפתחות דינמית של הסביבה היבשתית והחומרית לאורך ים המלח

ו.5. הcronologia של שלבי התפתחות בקע ים המלח על פי תיארוך Pb-U של משקעי קלציט פרטאי

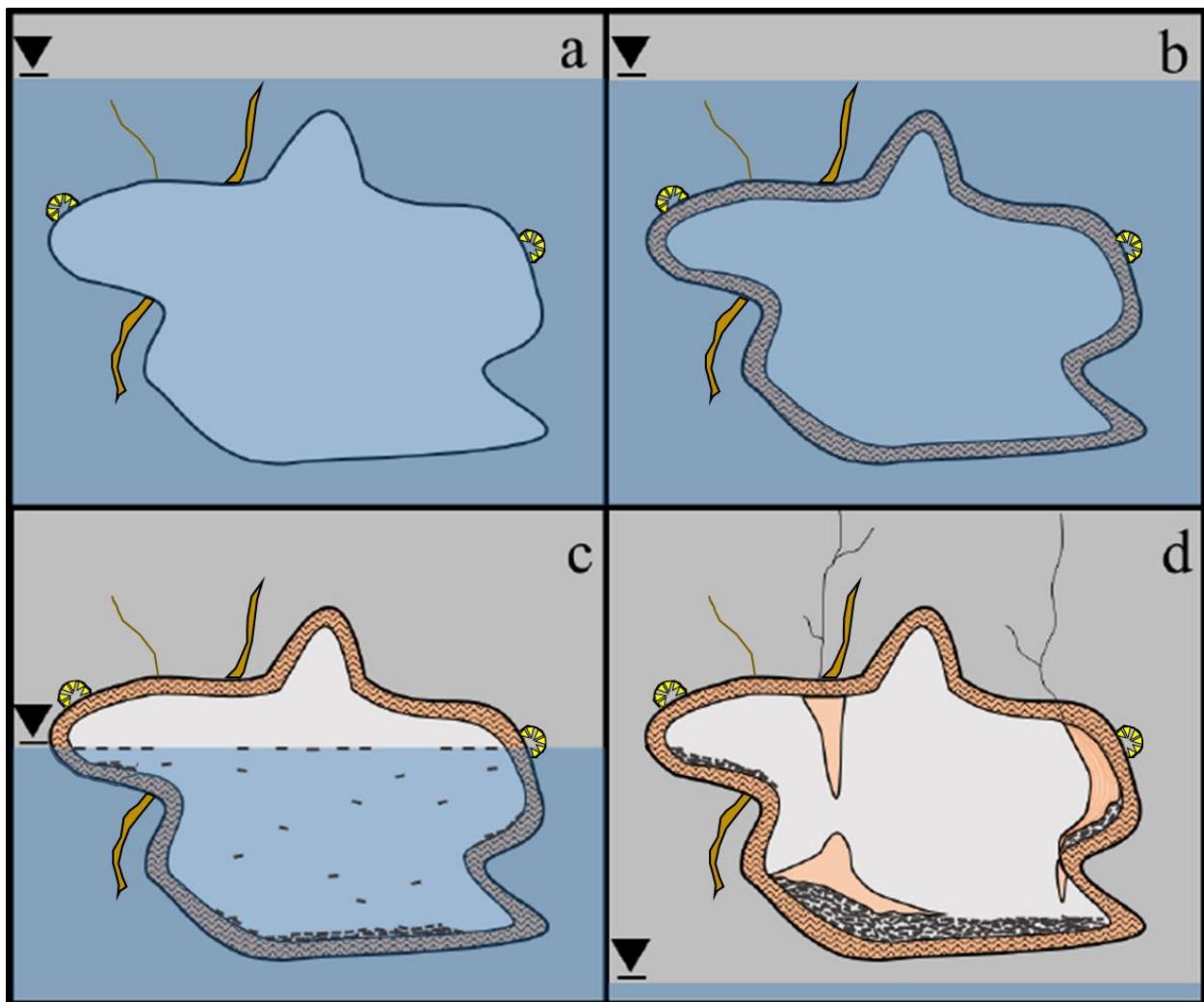
לנגפורד, ב.², וקס, א.¹, גולן, י.¹, פרומקין, ע.²

1. המכון הגיאולוגי

2. המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית

5.1.1. מבוא

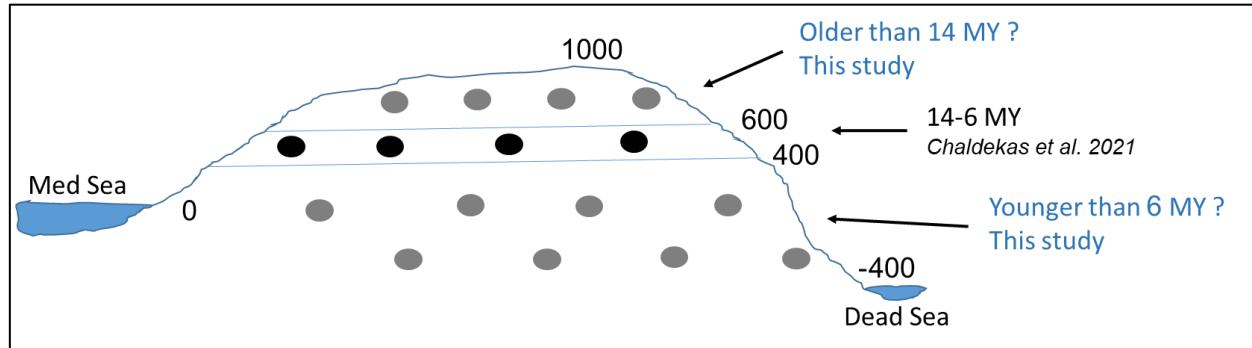
במבט כללי, ניתן לחלק את הפעולות הקרטטיות לכזו המתרכשת מעלה מפלס מי התהום (קרסט ודושאן או אפיגני) וכזו המתרכשת מתחת למפלס מי התהום (קרסט פרטאי או היפוגני) (Klimchouk 2017). המרחב הקרטטי של מרכז ודרום ישראל מאופיין במערות היפוגניות, מהמפוחחות והארוכות ביותר בדורות הלבנט (Langford and Frumkin, 2013). מבנה המערות משתנה בהתאם לסביבה היוצרותן: מחלות מסווגות בתנאים כלואים (כאשר יש שכבה אוטמת מעלה לאקווייפר) או חללים פשוטים בתנאים פרטאים לא כלואים (Frumkin and Fischhendler, 2005). המערות מופיעות בגביהם טופוגרפים שונים, כאשר מרביתן כיוון מנוקקות מסביבת היוצרותן המקורי. עד כה, המחקר אודות מערות אלו עוסק בעיקר בלמידה של אופן היוצרותן וכן בנסיבות הגיאולוגיות והhidrologיות שהובילו לייצורן. שיזרתן של נסיבות אלו בהיסטוריה הגיאולוגית המרחבית אפשרה להציג את פרק הזמן של ייצור המערות לתקופה שלאחר נסיגת אוקיינוס התטיס, בערך בתקופת האוליגוקן (Frumkin et al., 2017). הקושי בקביעה מוחלטת של מועד הפעולות הקרטטיות ונגיל המערה הוא בשל יכולת לתיארוך החלר רק באופן עקיף, למשל על ידי סידימנטים שהושקעו בתוכו. התפתחות היכולת לתארך משקעים קרboneטים בעוזרת שיטת האורניטום-עופרת ישירות על דוגמת סלע על ידי LA-ICP-MS, מאפשרת לתארך משקעי קלציט מוקדמים או מאוחרים לייצור המערה, ובכך למסגר את חלון הזמן בו נוצר החלר. תיארוך עורקים וגיאודות, המופיעים בסלע-האם ונחכמים על ידי המערה, מאפשר לקבוע את הגיל המksamלי של פעילות ההמסה. זאת בעוד שגיל ההשקעה של משקעי מערות פרטאים בחלל המערה, דהיינו כאלו שהושקעו מגוף מי התהום בחלל המערה בתנאים פרטאים, מייצג את הגיל המינימאלי של היוצרותן החלר. תיארוך משקעי מערות וואדויזים (נטיפים, זקיפים ומשטחי זרימה) המאוחרים למשקעים הפרטאים יצביע על גיל המעבר מצב פרטאי של המערה (מתחת למפלס מי התהום), למצב וודוזי (מעל המפלס) (איור 5.1.1).



איור 5.1.1. שחזור הקרוונולוגיה של התפתחות החלל על ידי שימוש במשקעי מערות. אחרי Chaldekas et al., 2022.

בשל הקשר שבין המערות הנדונות למפלס מי התהום, הרי שלגיל המערות והמשקעים שבנהו משמשות בכלל הנוגע להתפתחות הטקטונית של המרחב בו הן נמצאות. הנחת העובדה מתיחסת למפלס מי התהום המרחבי כאלו ייחוס ציב, עם שינויים אפשריים בסדר גודל של עשרות מטרים בלבד, כאשר שינויים מסוימים מסדר גודל של מאות מטרים מתרחשים בתגובה להתרומות טקטונית. חלים קרטסטים שנוצרו מתחת למפלס מי התהום, ומשקעי מערות שנוצרו במפלס מי התהום, יכולים לשמש כעדות ליציבות טקטונית, בה לא מתרחשת תרומות מרחבית. במהלך אירועי התרומות מפלס המערות עולה אל מעל מפלס מי התהום והפעולות הקרטסטיות עוברת לתהליכי השקעה בתחום המאוחר (איור 5.1.2). שלבים שכallocו התרחשו למרחב מספר פעמים במהלך הנקזואיקון, תוך יצירתה של מרכבים קרטסטיים בזיקה לבניינים טקטוניים. בשנים האחרונות נעשו כמה מחקרים לשחזור שלבי ההתרומות של שולי המערביים של בקע ים המלח וכירתה של שדרת ההר. עבדתו של Bar (2009) הציעה חלק את ההתרומות הטקטונית של שדרת ההר למספר שלבים במהלך הנאוגן, אך ללא תיארוך רדיומטרי מדויק. Matmon et al. (1999) הציג בעזרת שינוי במערכות הזורמת את התרומות שולי המערביים של הבקע מבחינת סוג הסטרוקטורה, אך ללא תיארוך של שלבי ההתרומות מתחילת ועד סוף. גילים מדויקים ראשונים, לשבי ההתרומות של שולי בקע ים המלח, נעשו על ידי Chaldekas et al. (2022).

השקעה שונות (מעל ומתחת למפלס מי התהום). מסקנות העבודה הן כי הרום הטופוגרפי הנוכחי של 400-600 מ' היה טובול כתוצאה מפלס מי התהום לפני 14-6 מיליון שנה. לאחר תקופה זו חלה התורוממות טקטונית שנייה את המפלס המדובר מקו מי התהום. העבודה הנוכחית עשויה שימוש בתיארוך רדיומטרי של $\text{Pb}-\text{U}$ על מנת לבנות את הcronology של התורוממות האנכית של השולדים המערביים של בקע ים המלח וההתפתחות מזוק העתקים, בדגש על מפלסים שטרם תוארכו, דהיינו מעל ומתחת ל-400 ומעל 600 מ' מעפ"י.



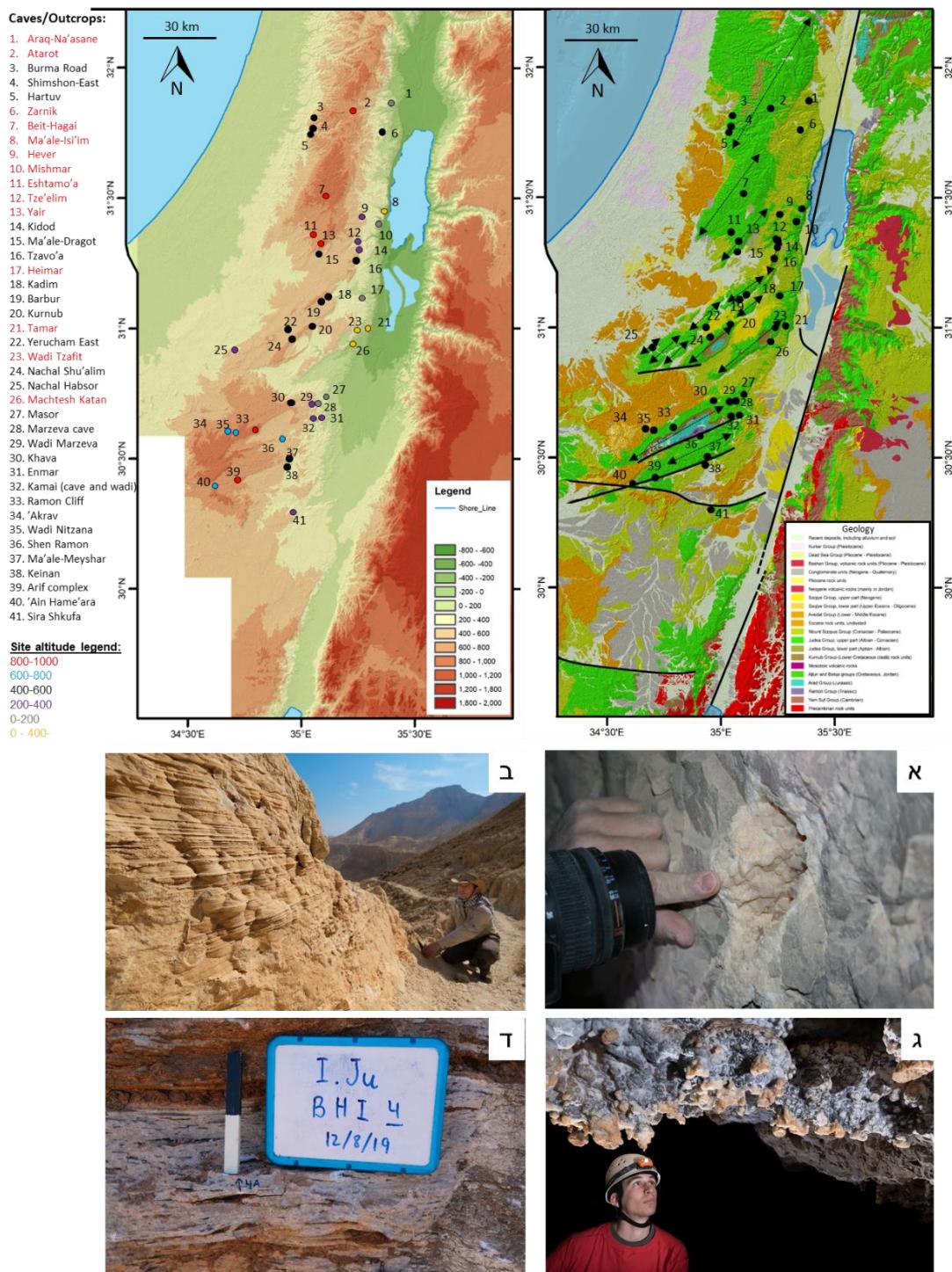
איור 5.1.2. תיאור הקשר בין מרכיבים קרסטיים ופעילות טקטונית של התורוממות אנכית. תיארוך משקעים פרטיטים ממערות במפלסים שונים מאפשר לקבוע קרונולוגיה לפעילות הטקטונית.

5.1.2. שיטת עבודה

בשנת העבודה הנוכחית תוארכו משקעי מערות פרטיטים ממספר אתרים בשולדים המערביים של בקע ים המלח, בתחום מהאזור הנמוך של מזוק העתקים ועד לג'רג'יה יהודה. בתחום הנזכר מוכרים מספר מחשופים, אשר רובם נדגומו בשדה (איור 5.1.3): מצפה יאיר (+880), מערה בית חגי (+860), מערה עטרות (+760), מערה ابو טרifi (+740), אשתמווע (+720), מערה זרינק (+500), נחל חבר תיכון (באב אל-חווא; +270), נחל צאלים עליון (+270), מעבר עוזי (+230), מפל נחל משמר (+170), נחל מזר (+170), מערת ערק נעסנה (+150), נחל גמלים (+140), נחל צפית (+10), נחל חרצה (-20), עין נמר (-40), מעלה איסיים (-100), עין ענבה (-160). המספרים בסוגרים מציננים רום במטר ביחס לפניו הים. האתרים שתוארכו השנה מתוארים להלן.

בעבודה זו תוארכו עד כה במכון הגיאולוגי מס' 204 דוגמאות ספלאוטמים בהתאם לפרווטוקול של Nuriel et al., (2017). המכשור בו נעשה שימוש כולל Teledyne CETAC Analyte Excite MC-300 (193 ננומטר) עם אלומה בגודל 240 mikrometr ושטח של J/cm^2 . כל אניליזה מורכבת מ-300 פולסים עם זמן חזרה של 15Hz. מדידת יחסים איזוטופים מתאפשרת על ידי חיבור הליאז' ל- MC-ICPMS . עיבוד הנתונים בוצע על ידי תוכנת Iolite (Paton et al., 2010). עבור סטנדרט ליחס עופרת $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ וכן יחס אורניום עופרת $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ נעשה שימוש ב-SRM-614 (NIST 614). תיקון לשגיאה מכנית ולmatrix effects נעשה בעזרת סטנדרט WC-1, גיל $254 \pm 6.5 \text{ Ma}$, Roberts et al., (2017) וכן סטנדרט שניי-ASH-15-D (Nuriel et al., 2.965 $\pm 0.011 \text{ Ma}$). גלים מתוקנים חושבו על ידי IsoplotR (Vermeesch, 2018) והם מוצגים בטבלה 5.1.1. ממוצע יחס האקטיביות של $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ההתחלתיים של 904 ספלאוטמים צעירים שנדגומו באזור עומד על 1.083 ± 0.1381 , דהיינו שווה לשינוי משקל סקולרי בטוחה השוויה (Chaldekas et al., 2021).

בשל כך, תיקון הגלים עברו יחס אקטיביות התחלתית זה יציג שינוי בגיל הקטון בהרבה מהשגיאה האנאליטית, שכן התקון המדובר לא בוצע.



איור 5.1.3. למטה. מיקום מחשופים של מושקים פרטניים במרכז ודרומן ישראל על גבי מפת גבהים (שמאל) ומפה גיאולוגית (ימין). שמות האטררים מופיעים בראשמה משמאלי. באדום המחשופים שנדגמו במסגרת עבודה זו. למטה. צילומי מחשופים של מושקים פרטניים. א. גיאודת קלציט במערת זוריק, נחל קומראן עליון; ב. ממיליארים וקווי מפלס במערה איסיים; ג. פעמוני מערות במערת עטרות; ד. רפסודות קלציט במערת בית חגי.

5.1.3. תוצאות

גב ההר

מעלת בית חי נמצאת בגב ההר באזור הגבולה של קמר חברון, ברום 860+ מ' ובס.צ 207600/600400 (ר"ח). האתר נחשף במהלך ה�建ה כביש 60, כך שכיוון הוא נמצא בשולי הכביש, מעט צפונית ליישוב בית חי. במקום ישנו מחשוף של חלל חדשתי המציג חתך רוחב במערת אולם שנחסמה במילוי (איור 5.1.4). תחתית חתך המילוי כוללת חתך עבה של רפסודות קלצייט (איור 5.1.3 ד; איור 5.1.4). משקעים אלו נוצרים כתוצאה משחרור CO_2 מפני השטח של גופי מים, דוגמת אגמים ובריכות. השקעה משטחית על פני המים יוצרת רפסודה, אשר צפה על מתח הפנים של המים עד שהופכת כבדה ושוקעת אל הקרקע. הירמות בלתי קומפקטיבית מאפיינת את סוג ההשקעה זהה, באופן שמייצר חללים רבים, לעיתים בעלי מילוי של צמנט מאוחר להשקעה ודוזית של אלומוגים הרפסודה. בסיס חתך הרפסודות לא נחשף באתר. בגב החתך ישנו מעבר להשקעה ודוזית של אלומוגים מעורות. אלו מעידים על מעבר לתוך המאוחר ולהשקעה תחת תנאים של טיפוף מהתקירה ויצירה של רסס המוביל להשקעה של אלומוגים. יחידת האלומוגים מכוסה שכבת קרע מסוג טרסה רוסה. השקעה זו מעידה על קישוריות טוביה לפניו השטח ולסחיפה של חורסיות בזרימה ישירה מפני השטח. על תקרת המערה ישנה השקעה של ממיליאריס (ענני מעורות). אלו מעידים על השקעה מתחת למפלס מי התהום, בחלק העליון של האקווייפר, היכן שמתאפשר שחרור CO_2 מפני מי התהום מעלה אזור השקיעת הקלצייט. היפוי בתקרה מייצג אל נכון את ראשית ההשקעה במקום, קודם להשקעת חתך הרפסודות.

אם כן, על פי המוכר מסיבות ההשקעה של סוגי המילוי במערה, ניתן לשחזר את סדר האירועים כך:

1. המערה התפתחה בתנאי המשא פרייטים לייצור של מערת אולם.
2. שינוי בכימיה של מי התהום, אולי כתוצאה להתרומות אנטית ומעבר לחלק העליון של האקווייפר, הוביל להשקעה של ציפוי קלצייט מסוג ממיליארים על גבי דפנות החלל.
3. התרומות אנטית הובילו את החלל אל החלק העליון של האקווייפר, שם הושקע חתך עבה של רפסודות קלצייט מגוף מים שהציף את חלקו התחתון של החלל.
4. המשך התרומות הוביל את החלל מעלה למפלס מי התהום, שם הושקו אלומוגים המערות.
5. התרומות נוספות, לצד דנדציה בפני השטח, גרמו לקשריות טוביה בין פני השטח ובין החלל ולמילוי המערה בטרה רוסה.

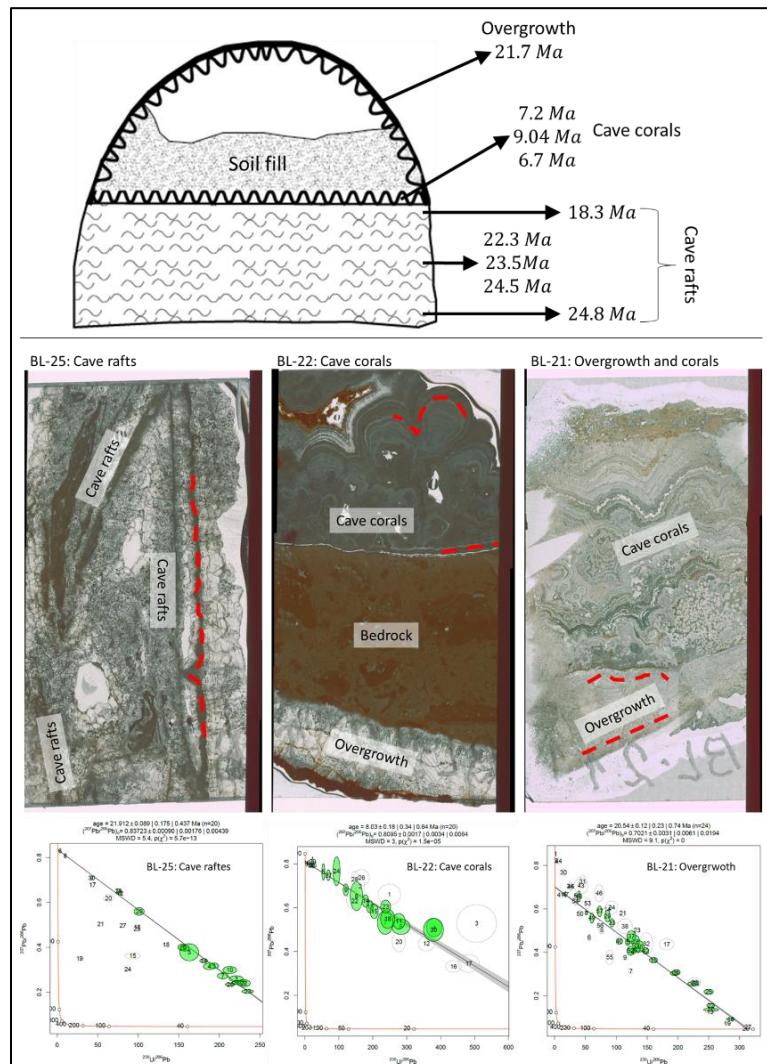
בשל השלבים הרבים המוצגים בחתך המילוי של החלל ובשל מיקומו גבוה בגב ההר שנחשף בשלב מוקדם בעקבות ריגסיה של אוקיינוס התטיס, האתר נבחר לדיגום מפורט, במטרה לתאר את כלל שלבי ההשקעה.

תוצאות ראשוניות של תיארוך הקלצייט מלמדות כי השקעת הציפוי (ממיליארים) על דפנות המערה והשקעת הרפסודות, התרחשו במועדים סמוכים בסוף האוליגוקן ובראשית המיקון (24.5 עד 18.3 מ"ש, איור 5.1.4, טבלה 5.1.1). הגלים המוצגים באյור עברו חתך הרפסודות כוללים גם תיארוך של צמנט של קלצייט שני שוחקע בחללים בתוך חתך הרפסודות. גיל הצמנט דומה לגיל הרפסודות ונראה כי הוא הושקع באותה סביבה ומאותם המים בהם הושקו הרפסודות. בסוף המיקון, בפרק

הזמן של 6.7-9.0 מ"ש הושקעו במערה אלמוגי המערות. הרבדת חתך הקרקע מעל ליחידת האלמוגים התרחשה בשלב מאוחר יותר.

איור 5.1.4. לעלה. חתך סכמטי במערת בית חגי, בהדגשה של יחסית השדה בין יחידות המילוי הנחשפות באתר ובתוספת גילים רדיוגניים פרהילימניריים של משקעי הקלציט (ראה גם טבלה 5.1.1). באמצע. סריקת שקפים של חלק מדוגמאות הקלציט שנאספו במערה עם סימון האזור שנדגם לתיאורן (קו אדום מרוסק). למטה. קו קוונקורדייה

$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ VS $238U/206Pb$ של הדוגמאות המוצגות באמצע (גילים לפני תיכון, ראה טבלה 5.1.1). מיגלים ירוקים מייצגים תוצאות מדידה תקינות ואפורים לא תקיןות (דיהינו כאלו עם מדידה לא אחידה, ריכוז אורניום נמוך, חרינה מאופק המטרה ועוד).



מעלת עטלית היא מערת אולם גדולה בגב ההר, בצפון קמר רמאללה, ברום של 760 + מ' מעפ"י ובנ.צ 639820/220840 (רי"ח). למערה מבנה של אולם גדול (איור 5.1.5) והוא נחשתת למערת האולם הגדולה בישראל. ספליואוטמיים מופיעים בנקודות שונות בתוך האולם, כאשר עיקרים הם ספליואוטמיים ודוזים מצורות השקעה שונות ואשר פעילים גם ביום. ספליואוטמיים פרטיאים נחשפים בחלק הצפוני של מרכז האולם, שם ישנה כיפה רחבה עם צורות השקעה פרטיאיות הכוללות: ציפוי קלצייט, רפסודות, ועומוני מערות (איור 5.1.5). עומוני מערות נחשים לצורת השקעה נדירה המאפיינת את סביבת הפאן הביני (בעבר ים-יבשה), באזורה שיכוב בין תמייסות בעלות רמת מליחות משתנה (Stinnesbeck et al., 2018). הטעמוניים בערת עטרות הם בגודלים של עד 20 ס"מ והם מרכזים בשולים של הכיפה, בה נחשפים המשקעים הפרטיאים. יחסי השדה בין המשקעים הם כאלו בהם ציפוי הקלצייט הוא הקדום ביותר ועליו הושקו הטעמוניים והרפסודות. אף שאין מגע ישיר בין הרפסודות לטעמוניים, באינטראקציה לשכבה של הטעמוניים ניתן להקדים את מועד השקעתם זהה של הרפסודות. בנוסף למשקעים המתוארים, בדפנות ותקרת המערה נחשפות גיאודות קלצייט בעלות צורה אירוגולית ואשר מכילות גבישים איאודרלים בגודל מופיען של 3-1 ס"מ.

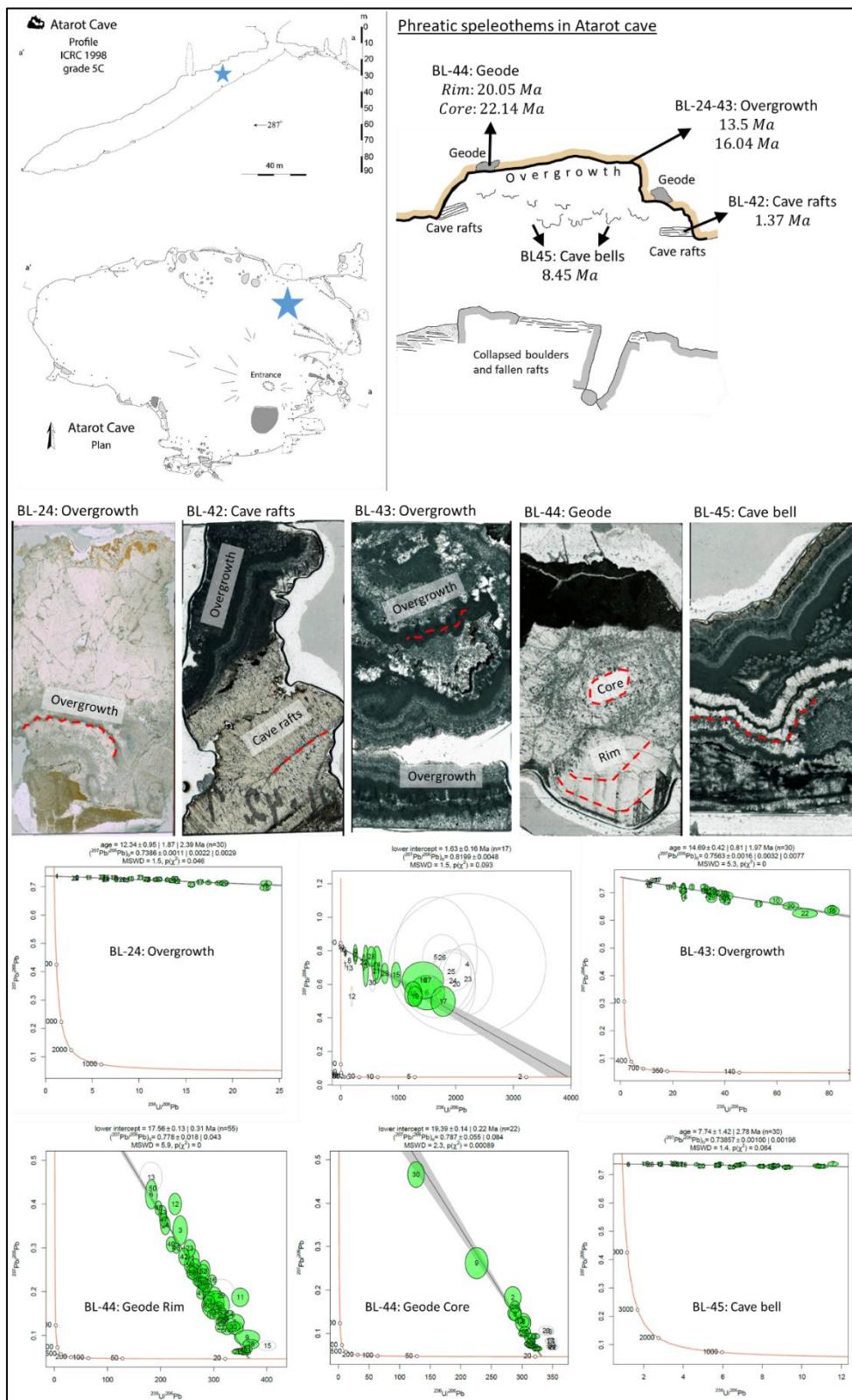
חיתוך של טומוני המערות במעבדה, מלמד כי במרכזם ישנו מבנה דמו נטיף, אשר סביבתו הושקע קלצייט פרטיאי במספר יחידות. חלק מהיחידות עברו החלפה והלבנה. מבנה הנטיף שבמרכז עבר החלפה, אולי בתהליך צירור.

אם כן, על פי המוכר מסביבות השקעה של סוגי המשקעים בערת, ניתן לשחזר את סדר האירועים כך:

1. המשא מתחת למפלס מי התהום יצרה חללים אירוגולרים קטנים. מעבר מהמשא להשקעה הוביל למילוי החללים לייצור של גיאודות קלצייט.
2. המשא חוזרת הוביל לייצור המערה במבנה של אולם.
3. מעבר מהמשא להשקעה, אולי בשל התרומות אנטית, הוביל להשקעת קרום הקלצייט על תקרת ודפנות האולם, מתחת למפלס מי התהום.
4. התרומות אנטית הובילו להתרונות המערה ממים ולהשקעת נטיפים על גבי קרום הקלצייט.
5. הצפה מחדש, אולי בהצבה באזור התהום הביני, הוביל להשקעה של טומוני מערות על גבי הנטיפים הוודזים.
6. רידת מפלס המים והימצאות בדרכות בחלל הוביל להשקעה של רפסודות הקלצייט.
7. התרומות והתרונות המערה הובילו להשקעת ספליואוטמיים ודוזים, בתהליך שנמשך עד היום.

בשל השלבים השונים המיזוגים בחותם המילוי של החלל ובשל מיקומו גבוה בגב ההר, אתר זה נבחר לדיגום מפורט, במטרה לתארך את כל שלבי השקעה באתר.

טבלה 5.1.1. גילים ראשוניים של קלציט פרטאי. כחול: גיל מוצלח. צהוב: תוצאה לא תקינה שמייבת תיארוך חזרה.



איור 5.1.5. מפה ופרופיל של מערה עטרות עם סימון המיקום של אזור החשיפה של המשקעים הפרטאים (כוכב כחול). מקור: המרכז לחקר מערות. ממלה משמאלי. חתך סכמטי בכיפה בה נחשפים המשקעים הפרטאים, בהדגשה של ייחוס השדה בין סוגים הספליואוטמיים ובתוספת גלים רדיוגנניים פרהילימנריים. במרכז. סריקת שקפים של דומאות הקלציט שנאספו במערה עם סימון האזור שנdagם לתיארוך (קו אדום מרוסק). למטה. קו קונקורדייה $207_{\text{Pb}}/206_{\text{Pb}}$ VS 238_{U} . מעגלים ירוקים של הדוגמאות המוצגות במרכז (גילים לפני תיקון, ראה טבלה 5.1.1).

מייצגים תוצאות מדידה תקינות ואפורים לא תקיןות (דהינו כאלו עם מדידה לא אחידה, ריכוז אורנים נמוך, חריגה מואפק המטרה ועוד).

כפי שמצוג באירור 5.1.3 ובטבלה 5.1.1, תוצאות ראשוניות של תיארוך הקלציט מלמדות כי השקעת גיאודוט הקלציט התרחשה בראשית המיוון, לפני 20-22 Ma. השקעת ציפוי הקלציט על התקורה והדפנות התרחשה באמצע המיוון, לפני כ-13.5 Ma. לעומת המערות הושקעו סביב סוף המיוון, לפני כ-8.5 Ma. רפסודות הקלציט הושקעו בראשית הפליסטוקן, לפני כ-1.4 Ma.

אשთמווע הוא אתר השקעה בגב הרי יהודה, באזורי דרום קמר חברון, ברום 720+ מ' ובערך 206427/589653 (רי"ח). במקום ישנה חסיפה של חללים צרים בהם התרחשה השקעה של קלציט פרטאי בצורה של ציפוי על הדופן. חללים צרים מולאו לחלווטין בעוד בחלים רחבים יותר נותר חלל במרכזו.

גיל פרהילימני של הקלציט באתר (טבלה 5.1.1) מלמד כי השקעה במקום התרחשה במיוון התיכון, לפני Ma 16.73.

בקע ים המלח

מעלה איסיים הוא מחשוף משקעים פרטאים שנמצא בגדתו הדרומית של נחל ערוגות, לאורך חלקו העליון של מעלה איסיים הקדום, ברום 100- מ' ובערך: 234382/596174 (רי"ח).

המשקעים כוללים קרום קלציט בעל מורפולוגיה של מיליארים (AIR 5.1.3 ב) בעובי משתנה בין החלקו העליון (1 ס"מ) לחלקו התחתון (5 ס"מ). על פני השטח של המשקע ישנים קווי קלציט אופקיים-מקבילים, בהם שנראה כקווי מפלס ברכיה. השקעת הקלציט התרחשה לאורך סדק באיזומות 340 וניתן להתחקות אחריו לאורך כ-50 מ'. לצד הסדק מופיעים סדקים מקבילים שגם בהם ישנה השקעת קלציט פרטאי. מערכת סיוך נוספת, בולטות פחות, בולטות נוספות, הוצאה את המערה הנזכרת וכיוונה איזומות 45. גם בסדקים אלו ישנה השקעה של קלציט אך באופן פחות מפותח. בשל פיתול רחב בקניון נחל ערוגות, מתקיים כי מערכת הסיוך הראשית (איזומות 340) ניצבת לדופן הנחל.

מן הבדיקה הליתולוגית, משקעי הקלציט נמצאים בתצורת אבן שטוחה במבנה מדרגש גיר משוכב בעובי כולל של כ-30 מ'. מתחת ומעל לדרגש מופיעות שכבות אבן בצורתה ה"קלאסית" הכוללת חוואר קירטוני עם עורקי גבס. נראה כי הדרgesch הגירני מתפרק כאקווייפר מקומי שבתחתיו, ב מגע עם החוואר של בסיס האבן, נובעים מעיינות זעירים. המעיינות לא מחללים אל תצורת צפית אלא נובעים מעליה. באופן דומה גם הקלציט שבמערכות הסיוך איןנו נמשך בתצורת צפית והוא מוגבל לסדקים שביחסה הגירנית בתוך תצורת אבן.

תיארוך דוגמא מהאתר (טבלה 5.1.1) מלמד שהקלציט במקום הושקעה לפני Ma 0.49 ± 0.4.

בעין ענבה שבאגן נחל צאלים, רום 160-, נצ: 232232/584384 (ר"ח) נמצא סלע מצופה במשקע פראטי מסווג ממיליאрис. הסלע נמצא גDOT נחל צאלים, لكن אינו סטואת-הו ומוקומו ודאי במצוקי גDOT הנחל, גובה יותר ממפלס עין ענבה. תיארוך ראשוני של המשקע (טבלה 5.1.1) מלמד שהקלציט במקומם הושקע לפני Ma 0.19 ± 0.96. בהמשך המחקר יש כוונה למצוא את השכבה המקורית ממנה ניתק סלע זה.

5.1.4. דין

תיארוך המשקעים הפראטים שבוצעו עד כה מציג גילים רדיומטריים ראשוניים עבורי אירופיים מוכרים בהיסטוריה הגיאולוגית של האזור. הגילים של 24.5 עד 18.3 מ"ש המתקבלים מתיארוך משקעי הקלציט במערת בית חגי מלדים על מעבר להשקעה בתנאים פראטים בסוף האוליגוקון - ראשית המיוון. לכתילה בסביבה בה כל החلل היה מתחת למפלס מי התהום (ממיליאריס) ובהמשך בחשיפה של פני מי התהום בתוך חלל המערה (ופסודות קלציט). המעבר בין סיביות ההשקעה התרחש בפרק זמן קצר, בשלב זה לא הפרדה ברורה בגילים שבין שני סוגי המשקעים. עוד ניתן ללמוד מהתוצאות התיארוך כי המערה נוצרה עוד לפני סוף האוליגוקון. המבנה העדשתי המלמד כי במקור נמצאה במקום מערה אולם, אפשר להצעיר כי המערה נוצרה בהמסה בתנאים פראטים, אולי באזור ערבות בין מקורותמים שונים (מקור, למשל: (Ford & Williams, 1989)). המעבר מהמסה של החلل להשקעת קלציט בתוכו יכולה להתפרש למשל כתגובה להתרומות אנטכית ומעבר מסביבה מתונה שאפיינה את הרחב בסוף האוליגוקון לסביבה בעלת טופוגרפיה חריפה יותר. התרומות גופ הסלע הטבול מתחת למפלס מי התהום מובילה את החלל אל החלק העליון של האקויפר, היכן שמתורחש שחזור CO_2 והשקעה של קלציט. השקעה ודוזית (אלומוגי מעורות) בסוף המיוון (0.6-9.0 מ"ש) מלמדת שהשלב זה המערה הייתה כבר מעל למפלס מי התהום.

הגילים המתקבלים מתיארוך משקעי הקלציט במערת עטרות מלדים על המסה של חללי הגיאודות בראשית המיוון או קודם לכן. ניתן לנתח להקביל את שלב זה למועד ההמסה של מערת בית חגי. מועד השקעת הקלציט בגיאודות מתוארך בראשית המיוון (לפני 20-22 מ"ש) וمعد על שינוי בתנאים הסביבתיים, אולי עקב התרומות אנטכית והתקרובות החללים אל החלק העליון של האקויפר. על פי יחסיו השדה, המסת חלל המערה התרחשה מאוחר להשקעת הקלציט בגיאודות. מצב זה מחייב חידוש אגרסיביות של מי התהום בפרק הזמן שבין השקעת קלציט הגיאודות לבין השקעת ציפוי הקלציט בדופן אולם המערה, דהיינו כ-4 מ"ש. בהתחשב בנצח המערה הקרוב ($1,131,000 \text{ מ"ק}$), מתקבל שקצב ההמסה עומד על $\frac{\text{m}^3}{\text{Ka}} = 283$. זה קצב מתUEL על הדעת לתהום הפרטוי ונמוך משמעותית מקצב ההמסה המתועדים בתחום הוודזוי (Ford and Williams, 2007).

השקעת קרום הקלציט על גבי דופן החלל לפני כ-13.5-16 מ"ש מלמדת על מעבר נוסף מהמסה להשקעה, אל נכוון בעקבות התרומות ומעבר לסביבה קרובה יותר אל פני מי התהום. המשך התרומות והתרונות החلل ממים אפשרה את ההשקעה הוודזית של נטיפים מהתקרה. סביב הנטיפים הושקעו לפני כ-8.5 מ"ש פעמוני המערות, אשר מעידים על השתפלות והצפה חזורת של חלל המערה. פעמוניים נחשיים כאינדיקטורים לסביבה הפאן הביני, כך שייתכן שההשתפלות והצפה המתועדים בשלב זה מלדים על אזור החוף בסביבה זו של המערה. ניתן גם שהחלפה

המינרלוגית של המשקע הווודזי שבלב הפעMONIIM קשורה גם היא לנוכחות תמלחת של הפאן הבינוי. מאידך, אפשר כי פעמוני המערות נוצרו בתנאים של בריכה מקומית באזור המערה בלבד, ולא עקב מעבר אל מפלס מי התהום.

ככל שכך, הרי שהמקרה של מערת עטרות מציג התפתחות אטרטנטיבית לモכר בספרות בכל הנוגע להשקעה של פעמוני מערות. המשך המחקר במערה יוכל לשפוך אור על התפתחות הפעמוניים ובכך לתורם להבנה של תהליך ההשקעה של צורת ההשקעה הייחודית זו. ככל שפעמוני המערות מייצגים מעבר למפלס מי תהום רגינוני, הרי התורומות נוספות לאחר מועד השקעתם פעמוני המערות הובילו את המערה אל מעל מפלס מי תהום ולסיבוב השקעה והזיהות אשר נמשכת עד היום. רפסודות הקלציט מלמדות על קיומם בירכה במערה לפני כ-1.4 מ"ש בפליטיסטוקן המוקדם. השתרעותם המוגבלת של הרפסודות, יחד עם גילם הצעיר, מאפשר להסיק שמדובר בירכה מקומית ולא במפלס מי תהום בעל השתרעות מרחבית.

ככל שהשקעת פעמוני המערות אינה מייצגת מעבר אל מפלס מי תהום הרגינוני, אלא רק על הצפה מקומית של המערה, הרי שמערת עטרות יוצאה מפלס מי תהום כבר לפני ~13.5 מ"ש, לאחר סיום השקעה של קרום הקלציט על דופן החלל.

ההשקעה הפרטיטית של קרומי הקלציט באתר אשטמווע תואם באופן כללי את מועד השקעת קרום הקלציט על התקרה והדופן של מערת עטרות. מכאן, שניתן להסיק כי אזור ההר שנמצא ביום ברום טופוגרפי של ~750+ מ' עמד לפני ~16 מ"ש באזור מי תהום וכי התורומות האנכית של גב ההר עד לרום זה התרחשו בפרק הזמן האמור. המשקעים הפרטיטים במערת בית חגי עתיקים יותר והם הושקעו בפרק זמן מסימיאלי של 21.7-24.5 מ"ש. אם כך, הרי שהפרש הרום האנכי שבין מערת בית חגי (~860+) ובין מערת עטרות לאתר אשטמווע (~750+) התרומות בחלק המוקדם יותר של המיקון, בין 21.7 ל-16~ מ"ש.

אתר השקעה במעלה איסיים מציג מילוי סדקאים בקלציט פרטיטי. ניתן להתייחס לאתר כאינדיקטור למפלס מי תהום המרחב, אך גם כגוף מים מקומי כמו למשל מפלס קדום של מעיינות עין ערוגות. על מנת לאשש את האפשרות יש צורך להשווות את האתר עם מחשופי קלציט פרטיטי נוספים מהמרחב. בשביל זה נדגמו משקעים פרטיטיים על הגדר הנגדית של קניון נחל ערוגות ברום ובמיקום סטרטיגרפי זהים למטה-איסיים וחן תטארכנה בזמן הקרוב. כך או כך, גם אם מדובר על מפלס קדום של עין ערוגות, הרי שהדבר מלמד כי נחל ערוגות לא היה חתוור מתחת למפלס האתר, מה שאפשר את אוגר המים בסדקאים מבלי שהם הטרוקנו בנביעה אל הנחל הסמוך. ככל שכך, הרי שההתחרות הנוכחית של נחל ערוגות מאוחרת לגיל השקעה הפרטיטית באתר מעלה איסיים. יש צורך לתאריך את יתר מחשופי הקלציט הפרטיטי במצוק העתקים וקניוניים המלח ולערוך השוואה נרחבת במבט מרחביב.

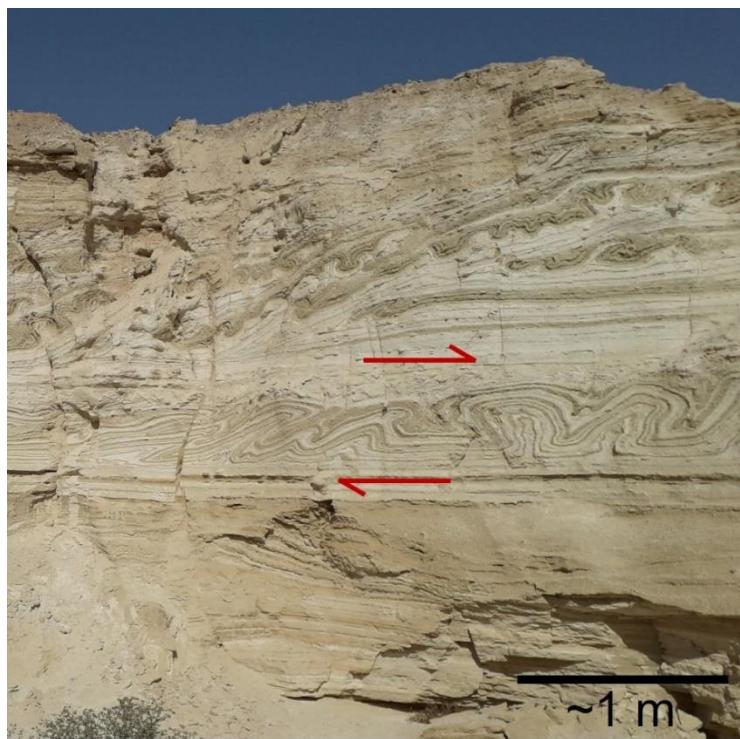
5.2. הערכת הצמיגות של משקעים רכים (soft sediments) באגן ים המלח לשם מידול מנגנון הייצור של סייסמייטים בתצורת ליסאן

סימן-טוב ש.¹, לוי י.¹, מרקו ש.², חפץ א.²

1. המכון הגיאולוגי
2. אוניברסיטת תל אביב

5.2.1. מבוא

סייסמייטים הינם מבנים סדיימנטריים הנוצרים על ידי רעידות אדמה (5.2.1, Seliacher, A., 1969). מעוותים אלו נצפים בצורות שונות בחתך הסדיומטורי, למשל: pseudonodules, קמטים, גלישות, גופי התנצלות ושבבות רסק (Bachmann & Aref, 2005; Rossetti, 1999; Velázquez-Bucio & Garduño-Monroy, 2018). לסייסמייטים חשיבות רבה במחקר הפאלαιוסיסטולוגי בראש ובראשונה בהיבט של בניית היסטורית ריעידות האדמה באזור מסויים ועל כך גם עמדו החוקרים הרבים שנערכו באגן ים המלח (Amit et al., 2002; Heifetz et al., 2005; Marco et al., 1996, 2005; Marco & Agnon, 2005; Rossetti, 1999). בנוסף לחשיבות הסייסמייטים בתיארוך ריעידות אדמה, ניתן ללמדם באמצעות העוצמת הרuidות ולהעריך פרמטרים של מקור הרuidה, למשל מגנטודת ומרחק המוקד של הרuidה. לשם כך, יש להבין בשלב ראשון את מנגנון הייצור של הסייסמייטים.



איור 5.2.1. צילום של חתך טבעי בסדיומנטים של תצורת ליסאן באזורי נחל פרצים. סייסמייטים שונים מצויים בחתך, כשהבולט ביניהם הוא קימוט של למינות ארגוניט ודטריטוס שנצפה במרכז התמונה (בין החיצים האדומים על ציוון גירה אפשרי לייצור הקמטים).

מודלים שונים הוצעו להיווצרותם של הסיסמייטים באגן ים המלח ובאזורים דומים בעולם, ביניהם:
 (1) גלישות רדודות בקרקעית האגן – (Alsop and Marco, 2011, 2013; Soft sediment slumping
 Bed-parallel slip – Alsop et al., 2016)
 (2) קימוט שנוצר מעל משטח החלקה מקביל שכוב – (Alsop et al., 2020)
 (3) דפורמציה הנובעת מכוחות ציפה, (Weinberger et al., 2016; Alsop et al., 2020)
 שצפיפותה גבוהה מונחת על גבי שכבה צפופה פחות – (Rayleigh–Taylor instability – Kull, 1991)
 (4) ערבול בסידמנט הרך שנוצר כתוצאה מייציבות הנובעת מגזירה יחסית בין שכבות נזילות
 בעלות תוכנות שונות – (Heifetz et al., 2005; Wetzler et al., 2010 Kelvin–Helmholtz instability).
 שני המודלים הראשוניים מניחים החלקה של שכבות על גבי מישור ניתוק וקיים על ידי מעות
 משיך כתוצאה של דחיסת חומר. לעומתם, שני המודלים הנוספים מבוססים על ההנחה שהשכבות
 מתנהגות כזרמים שבתנאים מסוימים עשויים להתרחש בהם אי יציבות שעשויה להוביל ליצירת
 הסיסמייטים. לאחר ולמייט הבנתנו בסידמנטים המשוכבים של ים המלח לא קיים היפוך בנסיבות
 החומר, ככלומר השכבות העמוקות צפופות יותר מאשר שמעליהן, לא צפופה להתרחש אי יציבות
 מסווג Rayleigh–Taylor (Heifetz et al., 2005). לעומת זאת, שינויים בתוכנות המכאניות של
 הסידמנטים עם העומק, למשל בצמיגותו, עשויים להתקיים ולגרום לאי יציבות מסווג Kelvin–
 Helmholtz (KH). מודל זה מtabס על ההנחה שהסידמנטים מתנהגים כזרמים בעלי צמיגות
 מסוימת, גבוהה מזו של מי האגן, ובעת רעידת אדמה נוצרת גזירה יחסית בין שכבות הזרמים
 השונות היוצרת את חוסר הייציבות ובקבוקות זאת את בני המעוות הנוצפים בתצורת ליסאן
 וצאלים (Wetzler et al., 2010; Heifetz et al., 2005). בדו"ח זה נציג תוצאות ראשוניות של ניסויי
 מעבדה ש�示רתם לקבוע את צמיגותם של החומרים הרכים שהיו קיימים בעבר בקרקעית אגם
 הליסאן ומתקיימים אולי גם כיום בים המלח ולאורך חופה במחשופי תצורת צאלים. בשלב הבא
 של הפרויקט, ישולבו ערכיו הצמיגות הנמדדים במעבדה במודלים הנומריים המדמים את ייצור
 הסיסמייטים.

5.2.2. צמיגות

צמיגות (viscosity) היא תכונה של זורם המבטאת את התנגדותו למעות הנוצר בחומר בהשפעת
 מאץ גזירה הפועל עליו, לעשה זו התנגדותו הפנימית של החומר לזרימה. התיאור המתמטי של
 הצמיגות, η , נתון במשוואת הבאה עבור נזילים ניוטוניים, שבעורם ערך הצמיגות קבוע:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

כאשר τ הוא מאץ הגזירה ו- $\dot{\gamma}$ הוא קצב המעוות ומוגדר על ידי השינוי ב מהירות הזירמה ו-
 ($\frac{\partial u}{\partial y}$) (המקבילה לכיוון המאץ) בניצב לכיוונה (כיוון ציר y) = $\dot{\gamma}$. אם השינוי הוא קבוע, מתקבל
 שבעור נוזל שנוצר בין שני לוחות אינסופיים מקבילים (Planar Couette flow): $\dot{\gamma} = \frac{v}{h}$, כאשר v
 היא מהירות הגזירה של הלוח העליון ו- h המרחק בין הלוחות.

עבור מערכת של גזירה סיבובית, כזו הקיימת במעבדה הגיאומכנית, מערכת הקואורדינטות
 הרלונטית לפתרון המשוואות היא מערכת גלילית. בהנחה שמאץ הגזירה במערכת נובע מרכיב
 התנועה המשיקי בלבד, ניתן写下 את הביטוי הבא למאץ כפונקציה של הרדיוס:

$$\tau(r) = \mu(r) \frac{\omega_r}{h} \quad (2)$$

כאשר ω היא המהירות הזרויתית, r הרדיוס (כש- R גדול הוא הרדיוס על השפה) ו- h , המרחק בין הפלטוות. את המומנט הכלול של המערכת, M , קיבל על ידי אינטגרציה על הרדיוס (Di Toro et al., 2010), ולאחר העברת אגפים והצבת משווה 2 בפתרון, קיבל ביטוי למאם הגזירה על השפה R בקואורדינטות גליליות:

$$\tau_R = \frac{2M}{\pi R^3} \quad (3)$$

בשלב זה, ניתן למעשה לחשב את הצמיגות מתוך תנאי הניסוי שקבענו והמומנט שנמדד במהלך הניסוי.

עם זאת, בחישוב האינטגרל לקבלת משווה 3, הנחנו לשם פשוטות כי הצמיגות קבועה לכל רדיוס והוצאנו אותה מהאינטגרל. על מנת לקבל פתרון מדויק יותר, נהוג להשתמש במשווה 4 (De Souza Mendes et al., 2014) שאינה מונחה שהנוזל ניוטוני (כלומר $n=1$ אינו קבוע מרחב ותלי ברדיויס) והיא נכונה עבור חישוב המאם על החלק החיצוני ביותר של שטח הדיסקה.

$$\tau_R = \frac{2M}{\pi R^3} \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d(\ln M)}{d(\ln \dot{\gamma}_R)} \right] \quad (4)$$

אנו מניחים כי הצמיגות של הסידמנטים הנבדקים היא מסוג Pseudoplastic ומואופיינית על ידי חוק החזקה הבא:

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

כאשר τ ו- k הם קבועים המאפיינים את הזורם. אם מחלקים את משווה 5 ב- $\dot{\gamma}$ מקבלים ביטוי לצמיגות האפקטיבית של הזורם הלא ניוטוני: $\tau_{eff} = k \dot{\gamma}^{n-1} \mu$. עבור זורם זורם שצמיגותו יורדת עם עליית קצב המעוות (thinning) $n < 1$, עבור זורם שצמיגותו עולה (thickening) $n > 1$ ועבור נוזל ניוטוני $n=1$.

את הצמיגות האפקטיבית של החומר (הערכת הקבועים τ ו- k) נמצא על ידי התאמת של קו ישר לגרף לוגריתמי של המאם (משווה 4) כפונקציה של קצב המעוות, כפי שיתואר בהמשך בפרק התוצאות.

5.2.3. חומרים ושיטות

דוגמאות של סידמנטים רכים מתחורת צאלים וליסאן נאספו מאזורים שונים באגן ים המלח וצמיגותן נמדדה באמצעות מכשיר לגזירה סיבובית כמפורט להלן.

דיגום בשדה

שני סוגים עיקריים של סידמנטים נדגמו למדידות הצמיגות בפרויקט זה: 1) חילופין של למינות טריטוס וארוגניט מתחורת צאלים, רוויות מים או עם תכולת מים גבוהה. 2) שכבות עבות יחסית (~1 cm) של ארגוניט וטריטוס שמקורן בתצורת ליסאן.

דוגמאות מ揆ורת צאלים נדגו בשני אתרים, בעורץ נחל אוג, בחלק המתחתר במישורי הבזע שמזרח לכיביש 90, ובים המלח, ברצועת החוף שמצרחה למעבר מצוקי דרגות (חוף השנתי). כל הדוגמאות נאספו באמצעות מכשיר ייודי המאפשר את דיגום הסדימנט תוך הפרה מינימלית של מבנהו (Undisturbed samples). באזורי נחל אוג נאספו דוגמאות מקרקעית הערוז, הן היו לחות מאד בעת הדיגום (איור A5.2.2). להבדיל מדוגמאות נחל אוג, הדוגמאות בחוף השנתי נדגו מתוכן קרקעית ים המלח, באזוריים בהם נחשפות למיניות של תצורת צאלים בקרבת קו החוף (איור B5.2.2). דוגמאות אלו רוויתות במים המלח ולכן בעת ייבושן בתנור 50°C במשך 24 שעות) נוצרו גבישי מלח רבים. גיבוש המלח, שהתקבל בכל הדוגמאות שנאספו מ揆ורת צאלים, עשוי לשנות באופן ניכר פרמטרים פיזיקליים של הסדימנט, כמו למשל את תכולת המים (Charrach et al., 2006; Frydman et al., 2008, 2014), וכן את הרואלוגיה של החומר כפי שנבדק בעבודה הנוכחית. בשל החשש מגיבוש מלח, גם בעת אחסון הדוגמאות, הן נשמרות באינקובטור בטמפרטורה של 30°C , שקוות במים המלח ובתוך קופסאות מיוחדות השומרות על צורתן.



איור 5.2.2. אתרי דיגום סדימנטים מ揆ורת צאלים. (A) דיגום בעורץ נחל אוג, במקטע שחוצה את מישורי הבזע, שמזרח לכיביש 90. (B) דיגום שכבות רוויתות מקרקעית ים המלח באזורי חוף מצוקי דרגות. בהגדלה ניתן לראות את אופן המסומן בחץ באזורי המסומן בחץ.

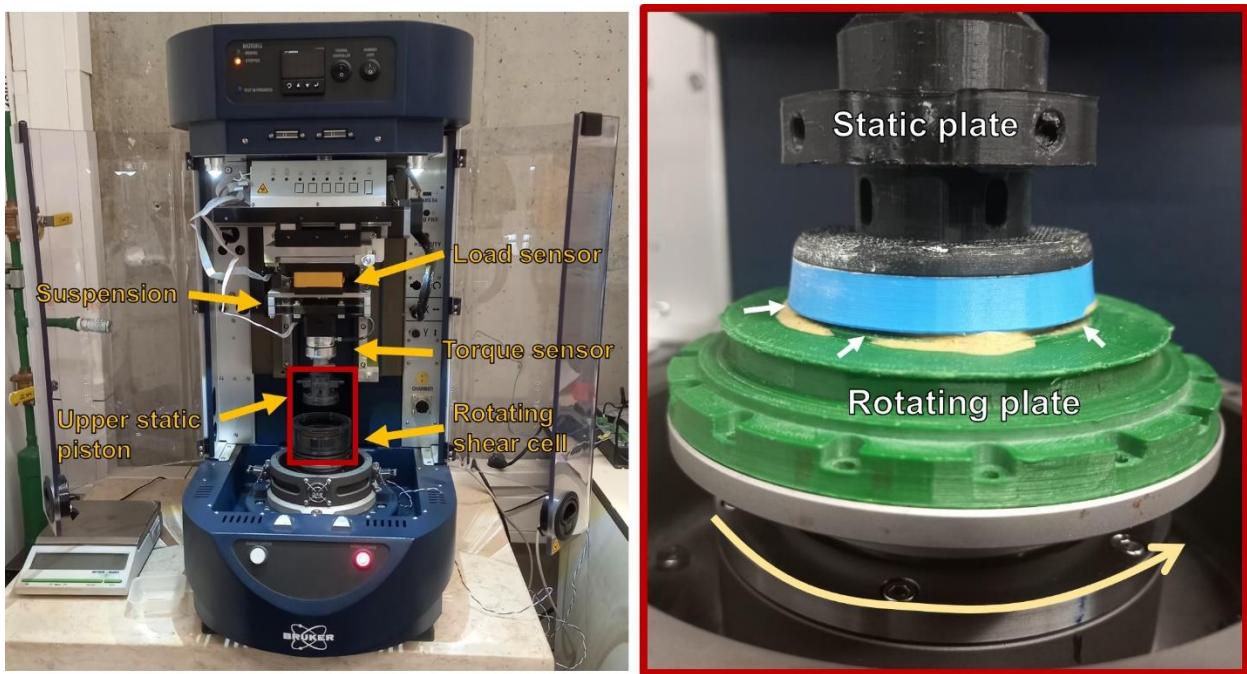
בעוד הלミニות הרוויות של תצורת צאלים הן אול' הסדרמנט הדומה ביוטר בתכונתו המכאניות למים נוות ששקעו בקרקעית אגן הליסאן, יש הבדלים רבים שעשוים לעורר על קביעה זו. בתצורת ליסאן החלק של למיניות הארגוניט מכלל התצורה גבוהה בהרבה מאשר בתצורת צאלים, שבה המרכיב הדטריטי גבוה יותר. הרכב המים בדוגמאות שנאספו מחוף ים המלח שונה ככל הנראה מהרכב המים שאפיין את קרקע אגן הליסאן. כמו כן, לא ידועה לנו היסטוריית השקעה של למיניות שנדגמו ממחוף ים המלח (למשל, עובי עמודת הסדרמנט השקע מעלה). בשל כך, ולאחר ואנו מתעניינים בסיסימיים שהתפתחו בקרקעית אגם הליסאן, החלנו שבועות לדוגמאות הלא מופרות מתצורת צאלים נבחן חומר מופר שמקורו בתצורת ליסאן. לשם כך, דגמוני למיניות עבות (סנטימטר אחד לפחות) של ארגוניט או דטריטוס מחושפי התצורה באזור בית הערבה ונחל פרצים. לאחר ייבוש של הדוגמאות בתנור (50 °C למשך 24 שעות), ערבבנו אותן מים מזוקקים או עם מי ים המלח על מנת לקבל סדרמנט רטוב בתכולת המים הרצוייה. בנוסף, דוגמאות אחרות, הונחו במיכל בו היו מים מזוקקים או מי ים המלח ולאחר מספר דקות התפזרו באופן טבעי ושקעו על קרקע המיכל. את המשקעים שנוצרו אספנו בזהירות ובחנו בניסוי הצמיגות. נציין, כי בדרך זה יוצגו תוצאות של הניסויים שנערכו על סדרמנטים של תצורת ליסאן בלבד.

ניסויי מעבדה

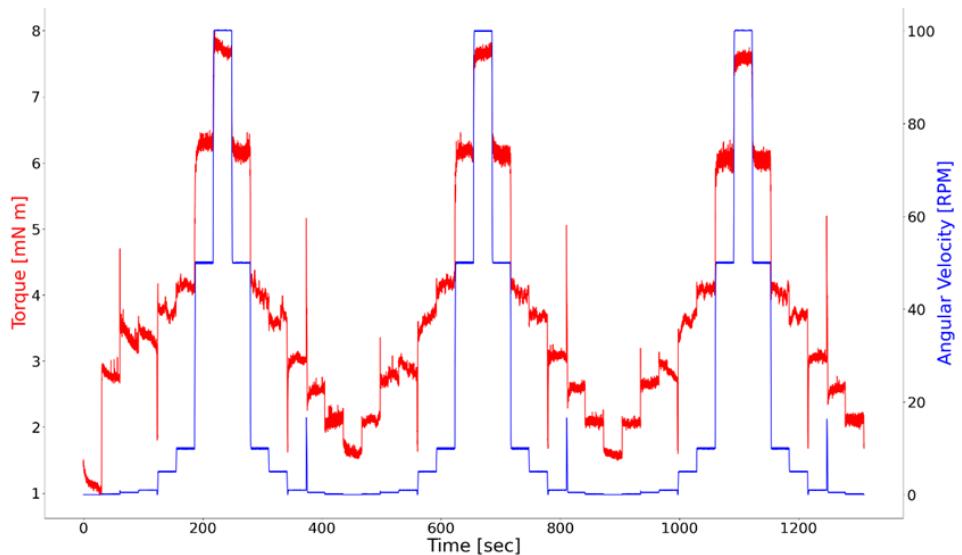
הצמיגות של דוגמאות הסדרמנט שהוזכרו לעיל נמדדה באמצעות גיאומטריית הלוחות המקבילים (Parallel plates) במכשיר מסוג UMT TribоЛabTM (by Bruker Co.). המכשיר משמש לגזירה סיוביית בעבדה הגיאומכנית, המכון הגיאולוגי לישראל (איור 5.2.3). במה עגולה הממוקמת בסיס המכשיר מסוגלת להסתובב במרחיקות של 0.1-5,000 mm, בעוד שהחלק העליון שדוחס את הדוגמה מלמעלה אינו מסתובב (איור 5.2.3). קצב הקלטת הנתונים מגיעה עד 5 kHz , אך בניסויים אלו השתמשנו בקצב דגימה נמוך בהרבה של 20 Hz . בעוד שמכשיר ה-UTM נועד למדוד בדרך כלל חיכוך של חומרים ועל כן אפשר גזירה ולהציג של דוגמאות תחת עומס מקסימלי של $N = 2,000$, בניסוי הצמיגות הנזול הנבדק מונח בין שתי פלטות עגולות ומקבילות ללא מגע ביניהן כך שהמאם הנורמלי על החומר אמר להיות אפסי. לטובות ניסויי הצמיגות, נרכש מד מומנט (Torque) מסוג TM-0.8 שהוא הרגיש ביותר שקיים עבור מכשירי ה-UTM, מודד בטווח של 0.170 mNm וברזולוציה של 0.5 Nm .

בכל ניסוי, הונחה דוגמת נזול על גבי מרכז הפלטה התחתונה ולאחר מכן הונמכת אליה הפלטה העליונה עד למרחק קבוע של 2, 1.5, 1 או 0.5 mm ממנה. המרווח הקטן בין הפלטות גורם לזרימת הנזול לצדדים, כך שנוצרה שכבת נזול בעובי המרוחה שבין הפלטות, כשהנוזל בוגע עם שטח שתי הפלטות העגולות שקורט כל אחת מהן 55 mm. במהלך הניסוי תוכנן מראש בתכנה הייעודית של המכשיר וכל מדרגות עולות ויורדות של מהירות (מצב של מנוחה ועד למהירות מקסימלית של 100 RPM), כך שבכל מדרגה מהירות נשמרת קבועה במשך 30 שניות (איור 5.2.4). במהלך הניסוי מוקלטים מהירות הסיבוב, כמוות הסיבובים, הכוח הנורמלי והמומנט כפונקציה של הזמן (איור 5.2.4).

אחריו וצמיגותו של חומר מוגדרת כיחס בין ממוצע הגזירה לקצב המעוות (משווה 1), יש לחשב לכל מדרגת מהירות את ממוצע הגזירה הממוצע במצב יציב (steady-state) מתוך מדידת המומנט, ואת קצב המעוות על פי ערך מהירות והמרחק בין הלוחות.



איור 5.2.3. מערכת הניסוי. משמאל, תמונה של מכשיר ה- UMT כשבבסיסו נמצאת הבמה המסתובבת. מימין, הגדלה של האזור המסומן במסגרת האדומה ובו מונחת הגיאומטריה המתאימה. הgiometria ששימשה בניסוי זה הودפסה במדפסת תלת ממד, כשהחולק בצלב יירוק הוא הדסקה המסתובבת (כוון הסיבוב מסומן בחץ מוארך) ובכחול הדסקה הսטטית. בין שני החלקים (חצים לבנים) מונח החומר שנבדק במהלך הניסוי.

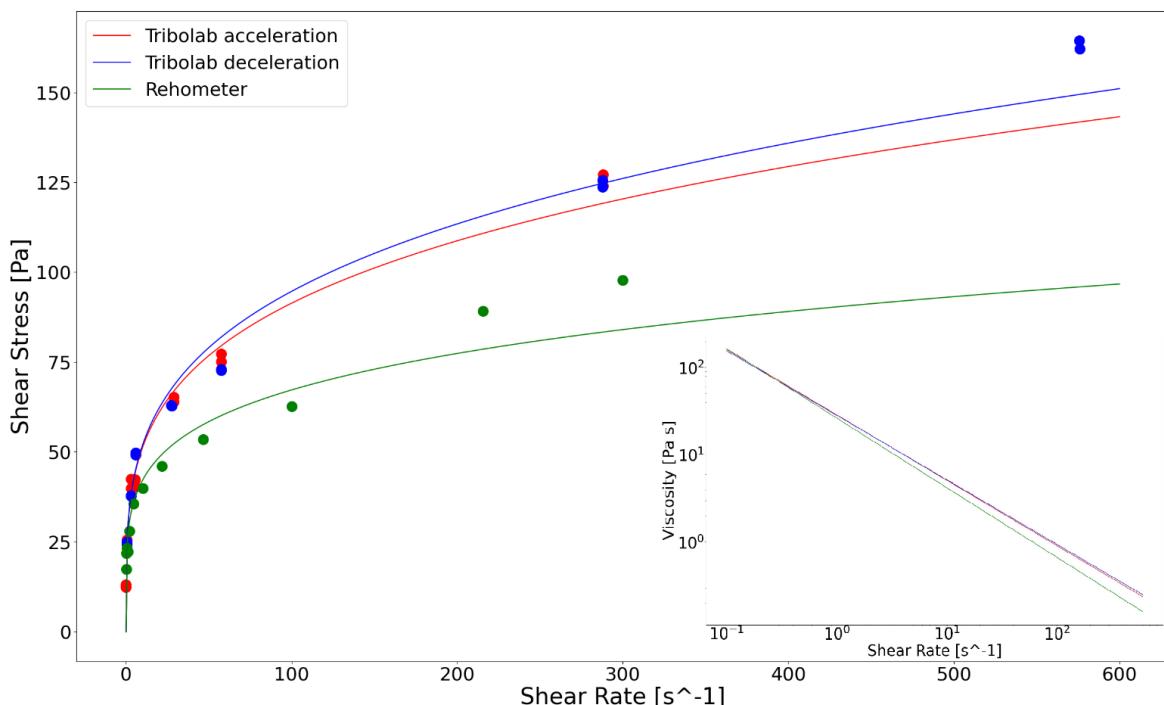


איור 5.2.4. מהלך הניסוי. בכל אחד מהניסויים אנו קובעים מראש את המהירותים הזוויתיות של המערכת (בכחול) ומודדים את המומנט המתקבל (באדום). בניסוי זה הזרם שנבדק הוא קטשוף מסווג היינץ. המרווח בין הפלטות בינויהם נגור הנזול הוא $\omega_0 = 0.5$. ניתן לראות כי מדרגות המומנט עוקבות אחר מדרגות המהירות.

5.2.4. תוצאות

בשלב ראשון, על מנת לוודא שאכן ניתן למדוד צמיגות של נזלים בעזרת ה- UMT מדדנו פרט לדוגמאות הטבעיות של הסידמנט מגן ים המלח גם קטשופ מסוג היינץ (איור 5.2.4). הקטשופ ידוע כזרם לא ניוטוני אשר צמיגותו יורדת עם עלייה קצוב מעות הגירה (shear thinning), התנהגות זו של הזורם דומה להתנהגות הצפואה של דוגמאות "הbow" מים המלח ומקובל לתאר אותה מתמטית באמצעות משווה 5. אכן עבר הקטשופ, עם העלייה בקטוב המעוות, הצמיגות האפקטיבית יורדת (שיוף הגרף הלינארי באיוור 5.2.5). באיוור 4.2.4 ניתן לראות כי המומנט מגיב לכל שינוי ב מהירות הסיבוב ורגישות המכשיר מספיקה כדי למדוד את ערך המומנט המוצע בכל מדרגה.

בנוסף לניסויים במכשיר ה- UMT, ערכנו ניסוי לבדיקת הצמיגות של הקטשופ במכשיר מסוג Netzsch Kinexus Lab+ במעבדה לכימיה אוניברסיטית תל אביב, כאשרנו משתמשים באותה גיאומטריה (parallel plates) אך בממדים מעט שונים לשקוטר הדסקה $\text{mm} = 40$. הדמיון בתוצאות בין הניסוי ברואומטר, המקובל במכשיר סטנדרטי למידית צמיגות, לבין התוצאות שהתקבלו ב- UMT (איור 5.2.5), אפשרו להבנתנו את השימוש זהה האחידן במכשיר למידית צמיגות של זורמים לא ניוטוניים לצמיגות דומה בערך לו של קטשופ. התוצאות הסופיות, כולל שגיאות ושגיאה יחסית אל מול תוצאות הרואומטר נתונות בטבלה 5.2.1.



איור 5.2.5. מדידות מאמצ גזירה כתלות בקטוב גזירה של קטשופ במכשיר ה- UMT (כחול ואדום), וברואומטר (ירוק). בניסוי ה- UMT, כפי שנivantן לראות באיוור 5.2.4, ישן מדרגות מהירות עלות (אדום) ומדרונות יורדות (כחול) ובהתאם לכך מסוימות התוצאות באיוור זה. באופן כללי, שיוף הגרף קטן עם העלייה בקטוב הגזירה כפי שמצופה מנוזל פסאודה-פלסטי. בגרף הלוגריתמי מימין למיטה ניתן להבחין בירידה בערך הצמיגות האפקטיבית עם העלייה בקטוב הגזירה ובאופן כללי תוצאות הניסויים דומות.

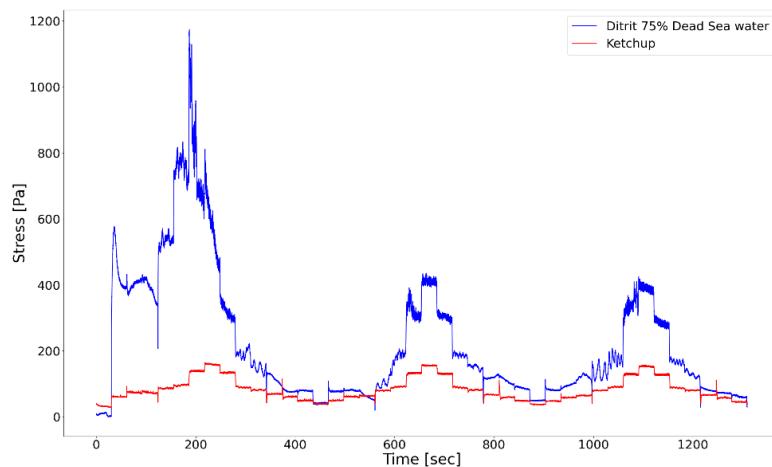
השגיאה היחסית אל מול הריאומטר חושבה על ידי המשוואה הבאה:

$$\Delta X_{relative} = \frac{|X_{Rheometer} - X|}{X_{Rheometer}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

טבלה 5.2.1. תוצאות המדידות של צמיגות קטשופ היין בשני מכשירים שונים.

Parameters	Rheometer	deceleration	acceleration
n	0.20	0.26	0.25
$k [Pa s^n]$	26.43	28.859648	28.950555
Δn	none	0.02	0.02
$\Delta n_{relative} [\%]$	0	27.25	23.22
Δk	none	2.04	1.65
$\Delta k_{relative} [\%]$	0	9.21	9.55
$R^2 [\%]$	98	99	99

לאחר שווידנו כי ניתן למדוד צמיגות בעזרת מכשיר ה- UMT Tribolab ההתחלנו למדוד צמיגות של החומרים הטבעיים שנאספו באזורי ים המלח. באIOR 5.2.6 אנו מציגים השוואת בין מדידות הקטשופ למדידה אופיינית של הסדימנטים. כמו כן, כי המחזור הראשון של ניסוי הסדימנט לא נראה דומה לניסוי הצמיגות של הקטשופ. בחלק זה, מתקבלת עלייה משמעותית במאםץ הגירה, כזו שלא חוזרת על עצמה במחזורים הבאים של אותו הניסוי. העלייה המשמעותית במאםץ הגירה בחלק הראשון של הניסוי מזכירה במידה מסוימת את ההתנהגות של סדימנט רך בניסוי גזירה תחת מאםץ נורמלי, שבו תחילת הניסוי יש עלייה של המאםץ לערך מקסימלי (peak shear strength) ולאחר מכן ירידת מהירה. התנהגות זו הינה תזכורת לכך שהחומר הטבעי הוא איננו זורם צמיגי סטנדרטי דוגמת הקטשופ, אלא מורכב יותר.

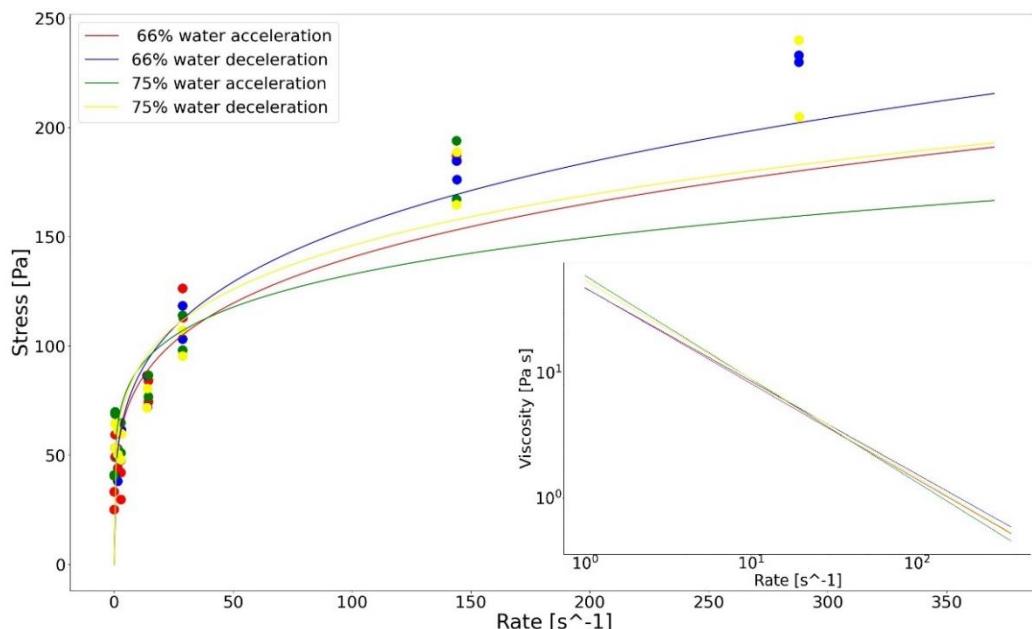


AIOR 5.2.6. מאםץ הגירה כפונקציה של הזמן עבור ניסויי קטשופ (אדום) ודטריטוס מעורבב במים ים המלח בתוכנות רטיבות של 75% (כחול). המרווה בין הדסיקות בניסוי זה $t_{now} = 1$ h. בעוד הגרף של הקטשופ שומר על מחזוריות קבועה, המחזור הראשון של גזירת הסדימנטים נראה שונה מאוד מאשר מהשניים העוקבים.

בAIOR 5.2.7 ובטבלה 5.2.2 אנו מציגים תוצאות מדידה מוצלחת של דטריטוס מעורבב עם מים מזוקקים בשתי תכולות רטיבות שונות: 1) 66% רטיבות (יחס של 3:2 לטובת הדטריטוס) ו- 2) 75% אחוז רטיבות (יחס של 4:3 לטובת הדטריטוס). על מנת להכין את התערובות לניסוי זה, כתשנו

דטריטוס במכתש ועלי ולאחר מכון ערבענו עם הכמותות הרצויות של מים. על אף כמות המים המשתנה בין הדוגמאות, התוצאות נראות דומות. תוצאות אלו אינן מוכחות שתכולת מים משתנה בסידמנט אינה משפיעה על צמיגותו של החומר, עוד ניסויים נדרשים על מנת לקבוע את מידת החשיבות של תכולת המים על הצמיגות. מעניין לציין כי עבור קצבי גזירה נומכים ערכי המאמץ גבוהים יותר עברו מדרגות מהירות עולות (acceleration) ביחס לאלו שיורדות (deceleration).

בקצבי גזירה גבוהים, מצב זה מתאפיין וערך המאמץ גבוהים יותר עברו מדרגות מהירות יורדות.

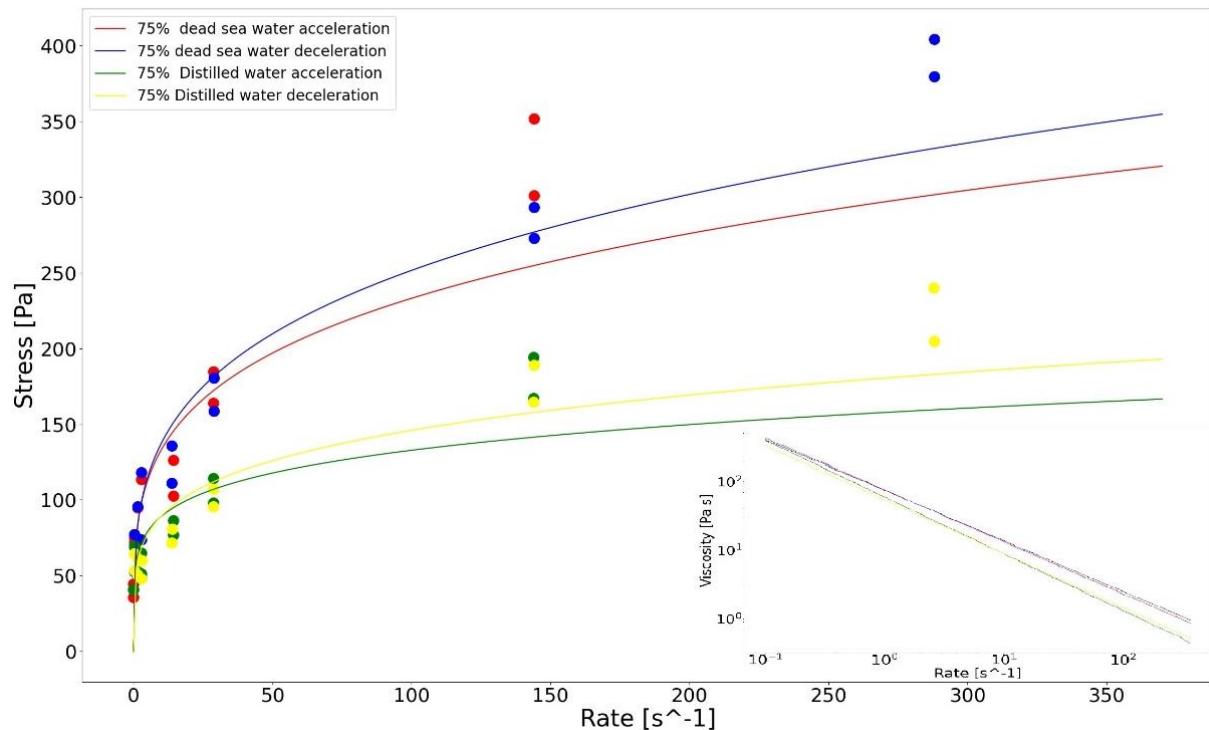


איור 5.2.7. מאץ הגזירה כפונקציה של קצבי המעוות של דטריטוס מעורבב עם מים מזוקקים בכמותות שונות. מרוחק בין דסקיות mm = 1. מימין למטה, גרפ לוגריתמי המתאר את הצמיגות האפקטיבית כפונקציה של קצבי הגזירה. לא נראה שיש הבדל משמעותי בין תוצאות הניסויים של הדוגמאות השונות.

טבלה 5.2.2. תוצאות מדידת צמיגות לדטריטוס מעורבב עם מים מזוקקים ומילח

	66 % Distilled water		75% Distilled water		75% Dead Sea water	
Parameters	acceleration	deceleration	acceleration	deceleration	acceleration	deceleration
<i>n</i>	0.23	0.25	0.17	0.21	0.24	0.26
<i>k</i> [Pa s ^{<i>n</i>}]	47.80	47.54	59.74	54.65	76.04	75.03
Δn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Δk	1.88	2.32	2.58	2.87	3.39	4.24
<i>R</i> ² [%]	70	90	68	83	75	91

בדומה לאופן בו הכננו דטריטוס מעורבב עם מים מזוקקים, הכנו אותו הסידמנט מעורבב במילח על מנת לבחון את השפעת מליחות המים על צמיגותו של החומר (איור 5.2.8). מהתוצאות עולה כי התערובת שמכילה מי ים המלח צמיגה יותר ביחס לזו המכילה מים מזוקקים (איור 5.2.8 וטבלה 5.2.2).



איור 5.2.8. מאמץ הגירה כפונקציה של קבועים המעורבבים עם מים מזוקקים (ירוק וצהוב) ומים המלח (אדום וכחול). מרוחה בין דסקרים $\text{tom} = 1$ h. מימין למטה, גוף לוגריטמי המתאר את הצמיגות האפקטיבית כפונקציה של קבועי הגירה. מהותצותות עולה כי לתערובת המכילה מי ים ערכי k גבוהים יותר מאשר עבור התערובת עם המים המזוקקים.

5.2.5. מסקנות והמשך מחקר

בדוח זה אנו מציגים תוצאות ראשוניות של מדידת צמיגות עבור זורמים לא ניוטוניים באמצעות מכשיר לגירה סיבובי מסוג Universal Mechanical Tester (UMT). ניסויי בדיקה של קטשופ מסוג היינץ שכלו בנוסף לניסויים ב- UMT גם ניסויים במכשיר מסוג ריאומטר, הוכחו כי ניתן למדוד זורמים לא ניוטוניים (כאלו שודומים לקטשופ בצמיגותם) באמצעות מכשיר ה- UMT. המדידות של לミニות הדטריטוס מתחזרת לישן הראו כי חומר זה שונה מהותית מנזילים סטנדרטיים (דוגמת הקטשופ). בשלבים הראשוניים של גירתו, מתנהג הסידימנט באופן דומה לקרקע, כך שיש להתגבר על חוזקו על מנת שתתחליל זרימה שניתן למדוד בעבורה את הצמיגות. כלל הניסויים שערכנו בסידימנטים מגנין ים המלח הראו ערכי <1 , כלומר הוכחו שלא ניתן להתייחס לזרם זה כאל זורם ניוטוני אלא כאל זורם שצמיגותו האפקטיבית יורדת עם העלייה בקצב מעות הגירה. בניסויים שערכנו עבור תכליות מים משתנות, לא מצאנו קשר ברור בין הפרמטר הזה לצמיגותו של החומר, אם כי בשלב זה לא ניתן לשולול קשר שכזה. השוואה שעשינו בין ערבות הסידימנט עם ים המלח לעומת ערבותו עם מים מזוקקים, הראתה כי מי ים המלח מעלים את צמיגותו של החומר.

התוצאות שהוצגו בדוח זה הן ראשוניות בלבד. בהמשך המחקר מתוכננות מדידות נוספות של החומרים השונים שנדגמו מ揆ורות צאים וליסאן. כמו כן, הערכים המספריים של α ו- k שיתקבלו

מהניסיונות השונים, יחולבו במודלים נומריים המדמים את התפתחותם של הסיסמיים משלב של שכבות אופקיות ומסודרות ועד לבנים המעוותים והמסובכים שנצפים בשטח.

5.3. זיהוי, מיפוי, וניתוח מורפומטרי של אירובי זרימת רסק (debris flows) לאורך מצוק ההעתקים

סימן-טוב, ש.¹, וקראט, א¹.

1. המכוון הגיאולוגי

5.3.1 רקע

מצוק ההעתקים, המתמשך לאורך שלויו המערביים של אגן ים המלח, הוא אחד מהמתלולים הארוכים והרציפים במדינת ישראל. בשל כך, גליישות מדרון היו והין נפוצות מאד לאורכו, מהוות חלקמשמעותי בהתפתחות הנוף של המתלול ומהוות סיכון ליישובים ועורך חיים שבביסיסו. אחד מסוגי הגלישות המוכרים באזורי מצוק ההעתקים הינו (DF, Debris flow) זרימת מים וסדימנט רב (יתר זרימת רסק DF, Varnes, 1978; Hungr et al., 2014) הינה תופעה של זרימת מים וסדימנט רב (יתר 50% מהזרם) ב מהירות גבוהה במורד מדרון (Takahashi, 2014; Iverson, 1997). מקור הסדימנט ב- DF הוא בדרך כלל ממשקעים מדרוניים (colluvium) המצפים את המסלע החשוף במורדון. במקרים רבים, סופות גשם משמעותיות הם הגורם המרכזי לייצור אירובי DF, במיוחד באזוריים בהם הצמחייה דלה ואינה מייצבת את הסדימנט המדרוני (McGuire et al., 2021).

אזור מצוק ההעתקים מאופיין בשיפוע גבוהה במיוחד, באקלים מדברי בו הצמחייה דלה וסופות גשם הגורמות לשיטפונות משמעותיים מעט לעת (Danin, 1983; Belachsen et al., 2017), אלו הם התנאים הבסיסיים לייצור DF. בסוף שנות ה-90 נערך מחקר מעמיק המגדיר בין השאר את התנאים לייצור DF באזורי מצוק ההעתקים (Ben David-Novak, 1998; Ben David-Novak et al., 2004; Ben David-Novak et al., 2004; Ben David-Novak, 1998). המחקר כלל ניתוח סופות גשם שאירעו בין השנים 1997-1987 ומהן עליה כי הגורם ל-DF באזורי המתלול הינה ירידת גשמי משמעותית מתאי גשם באזורי המתלול, בעוצמות $h / mm > 30$ לשעה לפחות (Ben-David et al., 2010).

הדו"ח הנוכחי (סיכום המחקר לשנת 2022) מהווה המשך ישיר לדוח של שנה שעברה בו הוצגו נתונים ראשוניים שנאספו בפרויקט, מופו לעלה מחייבים גליישות מדרון מודרניות והוצעו מאפייני הגשם הקרייטיים לייצור אירובי DF (Siman-Tov and Marra, 2021). הרוב המוחלט של גליישות המדרון שמופו הן מסוג DF, הגדרה זו נובעת בעיקר בגליל זיהוי הסדימנטים לאורך ערוצים ותמייה נוספת מתחזיפות השדה המעודת על אלמנטים מורפולוגיים של זרימה מסוג DF. עשרות DF שמופו ($N=52$) נוצרו במהלך שלוש סופות גשם משמעותיות שאירעו בין השנים 2013-2017. בעוד שהסתופה עצמה נמשכה בין מספר שעות ולעיתים בעוצמות נמוכות $h / mm < 30$. בשונה מהתוצאות בעוצמות גבוהות ממש פחות פחתה משעה ולעיתים בעוצמות נמוכות $h / mm > 30$. במחקר הקודם באזורי זה (Ben David-Novak et al., 2004), הסקנו כי תנאי קרייטי לייצור DF באזורי המחקר חייב לכל הנראה לכלול גשם מקדים משמעותית במהלך הסופה עצמה, כמו למשל בשעות או בימים שלפני המטריה של תא הגשם המשמעותי. אלו מציעים כי הגשם המקדים מוריד את חזק

החומר המדרוני ומאפשר את סחיפתו בעת האירוע השיטפוני. בנוסף הראיינו כי גושים בעוצמה חזקה אך לא הרטבה מוקדמת אומנם גרמו ככל הנראה לשיטפון אך לא לსחיפת מדרונית משמעותית שהובילה ליצירת DF.

הדו"ח הנוכחי מתמקד בניסיון לשפר את שיטות הזיהוי של הגלישות באמצעות מודלים טופוגרפיים, זיהוי ומייפוי של אירועי DF בין השנים 2019-2021, ותיאור כמותי מדויק יותר של משקעי ה-DFs ומקורותיו. המידע החדש שמציג בדו"ח זה יאפשר להבין טוב יותר את תהליך הכשל במדרון ולהגדיר את הפרמטרים שמאפשרים אירועי DF באזור המחקר.

5.3.2. מטרות העבודה

1. ניסיון לשפר ולתקן את מפות ההפרשיות על מנת לאפשר חישובים כמותיים של התופעות הנצפות וכן על מנת לזהות טוב יותר את השינויים הטבעיים במדרון לאורך השנים.
2. הרחבת מאגר הנתונים שכולל זיהוי ומייפוי גלישות מדרון באזור מצוק העתקים עבור השנים 2019-2021.
3. מייפוי מפורט של מקורות ומשקעי ה-DFs שairyעו בין השנים 2013-2017 וניתוח מורפומטרי של האירועים על מנת להבין את מגנון הכשל במדרון שמאפשר את יצירת DF.

5.3.3. אזור המחקר ושיטות למייפוי אירועי עבר

אזור המחקר משתרע לאורך מצוק העתקים, בשולייו המערביים של אגן ים המלח והמזרחיים של רמת המדבר. עבודה זו מתיחסת לאזור המתולול שבין ראש המצוק במערב, לככיש 90 במצפה. נחל אוג מהווה את גבולו הצפוני של אזור המחקר ונחל חבר הוא גבולו הדרומי. בנוסף לאזור זה, עליו גם דוחה בדו"ח (Siman-Tov and Marra, 2021), בדו"ח הנוכחי התווסף מקטע נוסף, דרומי יותר של מצוק העתקים, הנמשך מנהל צאלים בצפון ועד נחל זוהר בדרום, אזור הכלול בתוכו את הלב התירורי של ים המלח. נוספת זו התאפשרה בזכות הרחבת שטח היסוד של ה-LiDAR בשנים 2020-2021 (5.3.1).

מצוק העתקים בנייעו בעיקר מסלעי חברות יהודה, סלעי משקע קרבונטיים (בעיקר גיר, Dolomiti) וחואר. בחלקים מסוימים לאורך המצוק, מחושפי הסלע מכוסים בסידמנטים מדרוניים (קולוביום) או סידמנטים אגמיים וחופיים של תצורת הליסאן. האזור מאופיין בצמחייה דלה וכמות משקעים שנתנית של mm 50-100.

לצורך זיהוי גלישות מדרון בשיטה המחקר בין השנים 2013-2021 השתמשנו בצילומי אוויר מושרים (אורטופוטו) ובמודלים טופוגרפיים ברזולוציה גבוהה של פני השטח (0.5 m/pixel). נציג כי בעבר השנים הראשונות 2019-2013 ישנים נתוני ליידר עברו כל שנה שנייה בלבד והחל משנה 2019 (מועד תחילת הפרויקט) מתקיים סקר שנתי. על מנת לזהות שינויים טבאיים במדרון, החסכנו בין מודלים טופוגרפיים עוקבים (כשאנו מפחיתים את הערך של ה-DSM המוקדם מזה המאוחר (למשל 2015-2013). התוצר של הפחתה זו הינה מפה של ההפרשיות הטופוגרפיים הידועה בספרות הבינלאומית בשם DEM of difference (DoD) (Williams, 2012).

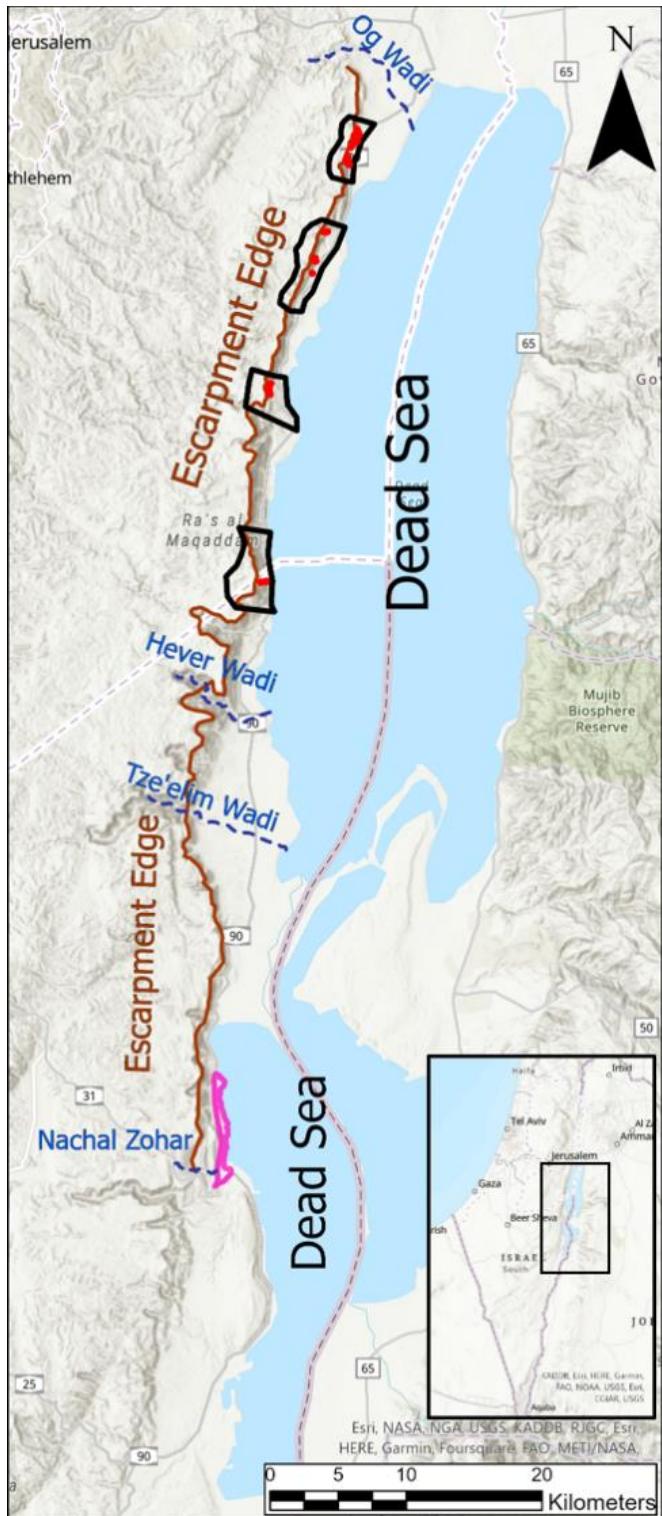
באמם המודלים הטופוגרפיים היו מעוגנים לצורה מושלמת במתחב (כולל בערכי הגובה), היינו מצפים לקבל ערכיהם חיוביים באזוריים בהם נוסף חומר (למשל הירמות של סידמנט), ערכיהם שליליים באזוריים מהם הושר חומר (התחררות או ניתוק של גוש סלע מהמצוק) וערך אף עבר אזוריים בהם

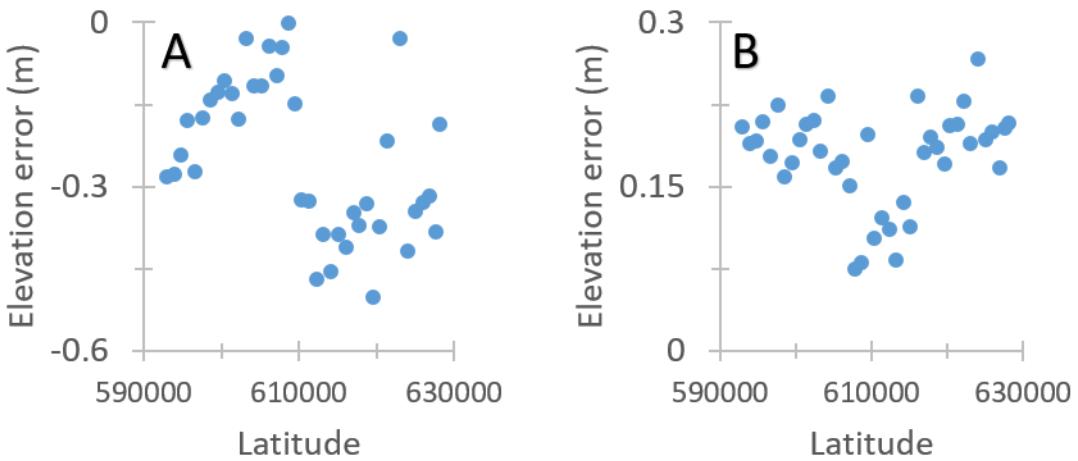
לא היה שינוי בפני השטה. מאחר והעיגון בין שנה לשנה אינו מדויק, נוצרו שתי הסטות במפותה ה-DoD: 1) הסטה אופקית, בסדר גודל של 1-2 פיקסלים (עד כמטר), היוצרת תמונה מטעה של שינויים בתופוגרפיה בעיקר באזורי תלולים ובפרט באלו המצוקיים. 2) הסטה אנטכית, בסדר גודל של עד עשרות סנטימטרים, כולל באזורי בהם ידוע כי לא היה כל שינוי במהלך השנים המתועדות. ההסתה האופקית לא תוקנה בשלב זה, אנו מודעים לשגיאה האפשרית במיפוי האלמנטים ולקושי שהוא יוצרת בזיהוי גלישות מדרון בעיקר באורי המזוק. לעומת זאת, ההסתה האנטכית, בנוסף לקושי שמערימה על זיהוי השינויים הטבעיים, היא משפיעה על חישובים כמוותים, דוגמת נפח גלישות המדرون. להלן מספר דוגמאות לבעה ואופן פתרונה כפי שמ>were used בדו"ח זה.

לכוארה, אם עברו כל DSM ההסתות האנטכיות היו קבועות למרחב, הבעה הייתה נפתרת בקלות על ידי החסרת ערך קבוע של הסטה המוחש מהחסרת המודלים של שנים עוקבות. אך מאחר וההסתה האנטכית אינה קבועה למרחב, בדקנו האם ניתן למצוא חוקיות מסוימת בהסתה לשם תיקונה (איורים 5.3.2-5.3.4). בדקנו את מידת השינוי של ההסתה האנטכית לאורך שטח המיפוי (על ציר צפון-דרום) והן את השפעת שיפוע המדرون על הסטה זו במטרה לתקן ולצמצם ככל האפשר את השגיאה ב-DoD.

השינוי בהפרש האנטכית על ציר צפון-דרום נבדק לאורך כביש 90, מתוך ההנחה שמדובר באלמנט המשכי המלאוה מזרחה את כל אזור המיפוי, אין שינוי שיפוע משמעותי ($4^{\circ} \pm 3^{\circ}$) לאורך הכביש ובאופן כללי לא צפויים להיות שינויים גובה משנה לשנה. סומנו כ- 40 פוליגונים לאורך הכביש שטוח כל אחד כ- 25-300 מ"ר והמרחק ביניהם כקילומטר אחד. לאחר חישוב הפרשי הגבהים בתוך שטחי הפוליגונים המסומנים (עבור ליידרים עוקבים בין השנים 2013-2017), חושב לכל פוליגון ערך ממוצע של הפרש הגובה הנתון בגרפים כפונקציה של מיקום הפוליגון על ציר צפון-דרום (איור 5.3.2).

איור 5.3.1. מפת אזור המחקר. אזור המחקר משתרע לאורך מצוק ההעתקים (קו חום) מנהל אוג בצפון ועד לנחל זוהר בדרום להוציאיה המקטעה שבין נחל חבר לנחל צאלים. מקטעה זו רוחק באופן ייחסי מהכביש הראשי. ואינו מהוות סיכון ממשמעותי. לכן, בשל צמצום שטח הטישה לייצור המודלים הטופוגרפיים, רצועה זו לא נכללה בשטח המחקר. כלל אירופי ה-DF שזוהה (מסומנים באדום) מצויים בחלק הצפוני של אזור המחקר, בין נחל אוג לנחל חבר ונחקרים לאربع קבוצות עיקריות (קו שחורה). אזור התתירות המרכז של ים המלח, מלונות עין בוקק – נווה זוהר, ממוקם בין בסיס המצוק לחוף הים בחלק הדרומי של אזור המחקר (מסומן בוורוד).





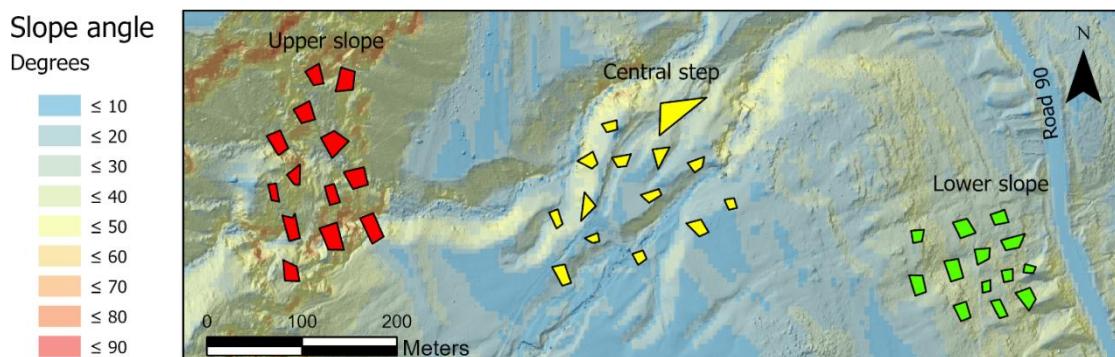
איור 5.3.2. הפרש הגבהים בין מודלים טופוגרפיים עוקבים לאורך כביש 90, עבור השנים (A) - 2015-2013 ו-(B) 2015-2017. ניתן להבחין כי יש שינויים ברורים בהסתה האנכית באזוריים בהם לכארה לא היה שינוי כלל ושינויים אלו לא אחידים לאורך כביש 90.

まいור 5.3.2 נובע לכארה כי קיים שינוי בטופוגרפיה לאורך כביש 90 ושינוי זה אינו אחיד למרחב. כמעט בכל נקודה לאורך הכביש נמדד שינוי גובה של סנטימטרים בודדים ועד חצי מטר. ערכים אלו, לעיתים חיוביים ולעיתים שליליים אבל כמעט תמיד שונים מאפס, נובעים מטעות בהכנות המודלים הטופוגרפיים ואינם מייצגים שינויים של ממש בפני השטח. מהנתונים עולה כי עבור DoD מסוים, קיים שינוי משמעותי בערכים לאורך כביש 90. הערכים הממוצעים ב-DoD משתנים לפי אזוריים גיאוגרפיים לאורך הכביש שככל הנראה נובעים מכיווני הטיסות ויצירת מודל הגבהים הטופוגרפי מעניין הנקודות. נציין כי בכל אחת מהיחידות הגיאוגרפיות הללו, הערך הממוצע של ההסתה האנכית נוטה להיות קבוע. כך למשל עבור השנים 2015-2017 ערך הפרש ממוצע של כ- 0.2 מ', קטן לכ- 0.1 מ' באזור מרכז המקטע. עבור השנים 2015-2013 בעוד שערך ההפרש בדרום השטח קטנים מ- 0.3 מ', בחלקו הצפוני הם נעים לרובה בין 0.3-0.5 מ' (בערכים מוחלטים). שונה זה בהפרש הגבהים לאורך כביש 90 נובע מחוסר אחידות במודל הגבהים המקורי עבור כל אחת מהשנים (כל DSM). לאור אי האחדות למרחב של הסטיה האנכית, לא ניתן לתקן אותה באמצעות החסורה של ערך קבוע לכל שטח המחקר, אלא יש לעשות זאת באופן מקומי.

בנוסף לשוני המרחבי שצווין לעיל, קיימת אפשרות שעבור אותה ייחידה גיאוגרפית בתוכה לא אמרו להתקיים שינוי משמעותי בשטיה האנכית, ייידך בכל זאת שינוי שכזה הנובע שינוי בשיפוע המדרון. כך למשל, הסטיה האנכית בייחידה גיאוגרפית מסוימת, צפויה להיות אחידה באזור מישורי בעוד שעם עליית השיפוע, אותה סטיה צפויה להשתנות ממשמעותית. הסיבה לכך נעוצה בביטחון העיגון המרחבי (تزוזה של עד כמטר אחד במישור האופק) צפויה להשפיע על הסטיה האנכית בצורה קיצונית יותר עבור אזוריים עם שיפוע גדול יותר. לשם בוחינת השפעת שיפוע המדרון על הסטיה האנכית, סומנו כ- 160 פוליגונים באזור המיפוי אשר חולקו בין יחידות גיאוגרפיות שונות. שטחו של כל פוליגון נוע בין 90-3285 מ"ר. בתוך כל אחת מהיחידות הגיאוגרפיות, חולקו הפוליגונים לשולשה אזורי מיפוי עיקריים: מתול תחתון, מדרגה מרכזית, והמתול העליון, כשהכל קבוצה ממוצע שיפועים שונה (איור 5.3.3). הבדיקה נעשתה לשתי מפות הפרשים, לשנים 2015-2017 ולשנים 2015-2013.

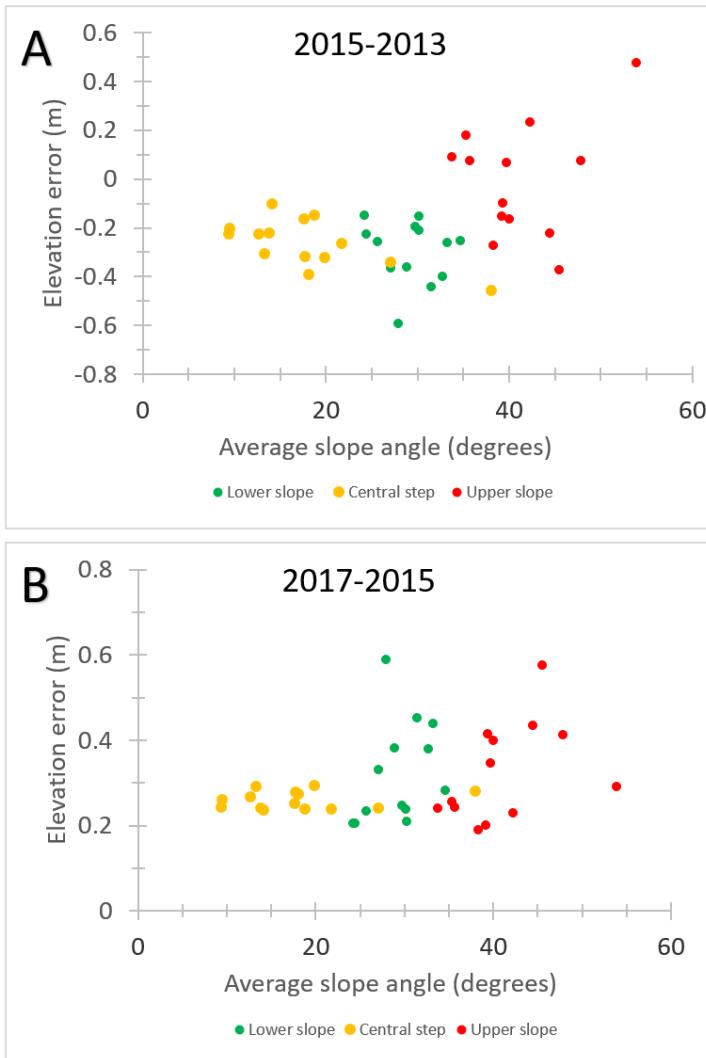
מניתוח הנתונים עולה כי עבור כל אחת מהיחידות הגיאוגרפיות שנבחנו, ככל שהשיפוע גדול יותר הפיזור בערכי הסטטיקה האנכית גדול יותר. עבור השנים 2015-2017 (איור 5.3.4) עולה כי טווח הערכים של קבוצת השיפועים הנמוכים (מסומנת בצהוב) לא עולה על 0.3 מ' (0.25 ± 0.15 מ'). בעוד שטוחה הערכים של השיפועים הגבוהים (מסומן באדום) גובל בהרבה (מגיע עד כ- 0.85 מ'). תוצאה דומה התקבלה עבור מפת ההפרשים של 2013-2015 (איור 5.3.4) והיא תואמת להנחה שהזוכחות לעיל, שעבור מודלים שאינם מעוגנים בצורה מושלמת אחד לשני נקבע פיזור גדול יותר בתוצאות עבור שיפועים הולכים וגדלים. בנוסף, ניתן אולי גם לבחין במוגמת עלייה של הסטטיקה האנכית עם השיפוע שנובעת מכך שרוב הפוליגונים סומנו על גבי מדרונות שפוניים לכיוון כלפי מזרח, אך מוגמה זו אינה ברורה לאור הפיזור הרב בערכים של השיפועים הגבוהים.

לאור האמור בפרק זה, תיקון הסטטיקה האנכית ב- DoD חייב להיות מקומי, כך נתמודד בצורה המיטבית גם עם השוני המרחבי שנובע מהביעה במודל הגבהים המקורי וגם עם השפעת שיפוע המדרון. בחירה זו, משמעותה שלא ניתן לשפר בשלב זה את מפות ההפרשים לצורכי זיהוי ומיפוי ראשוני של גלישות מדרון. אנו מציעים כי לאחר מיפוי ראשוני של הגלישה, יבוצע תיקון מקומי לסטטיקה האנכית שיאפשר מיפוי מדויק יותר וחישובים כמוותיים. לדוגמה, עבור מיפוי אירופי ה- DF כדי שיווצר בהמשך הדוח, שיטת העבודה תחל בזיהוי ומיפוי משקעי ה- DF על גבי מפת ההפרשים המקורי ללא תיקון (החסרת DSMs). לכל קבוצה של DFs להם שיפוע דומה ואזור גיאוגרפי מסויף, יחוسب ערך הסטטיקה האנכית, והוא יוחסר מאזור זה ב- DoD. תהליך זה נעשה ומדוחה בדוח הנוכחי גם עבור DFs שאירועו בין השנים 2013-2019, كانوا שמופו ודוחחו בדוח של השנה שעברה וזאת על מנת ללמידה על המאפיינים המורפולוגיים של כל DF ולאFINE בצורה מדויקת יותר את מקור הסדיימנט.



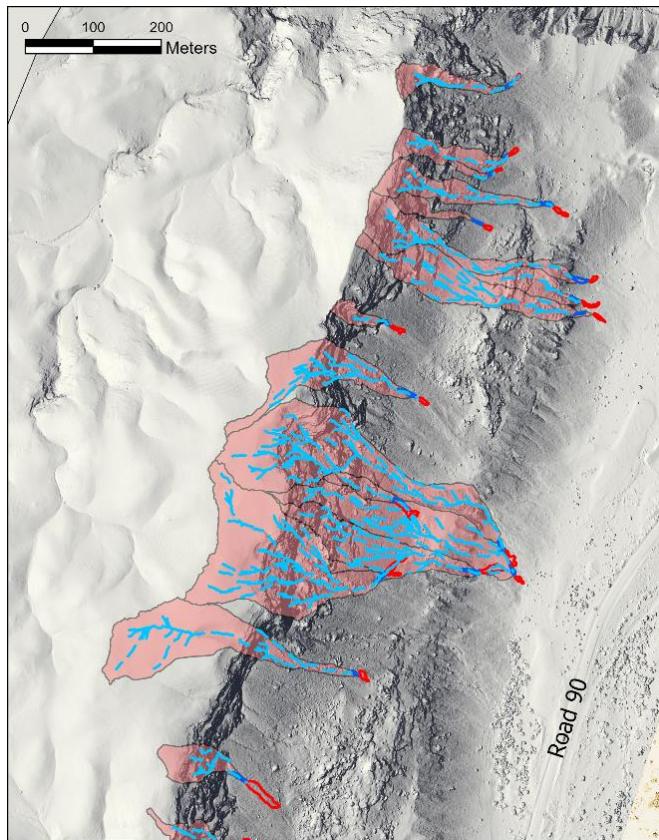
איור 5.3.3. דוגמה לאזור בשטח המיפוי בו סומנו 40 פוליגונים לחישוב ערכי הסטטיקה האנכית על גבי מפת שיפועים כשברקע מפת הצללה של האזור. ניתן לראות כי הפליגונים מסומנים בשלושה אזורים במצוק המאפיינים בשיפוע שונה, מדרון תחתון (קבוצה יוקה), מדרגה מרכזית (קבוצה צהובה) ומדרון עליון (קבוצה אדומה).

איור 5.3.4. דוגמה לבחינת שיוף המדרון על הסטייה האנכית (עבור הפליגונים שצוינו באיור 5.3.3). דוגמה לאזור בשטח המופיע בו סומנו 40 פוליגונים שחולקו בין שלושה אזורים במדרון: מדרון תחתון (בירוק), מדרון מרכזית (בצהוב) ומדרון עליון (באדום). כל נקודה בגרף מייצגת את הערך הממוצע של הסטייה האנכית בתחוםי הפליגון כפונקציה של ממוצע השיפועים בפליגון. (A) תוצאות על בסיס ה-DoD של השנים 2015-2013. (B) תוצאות על בסיס ה-DoD של השנים 2015-2017.

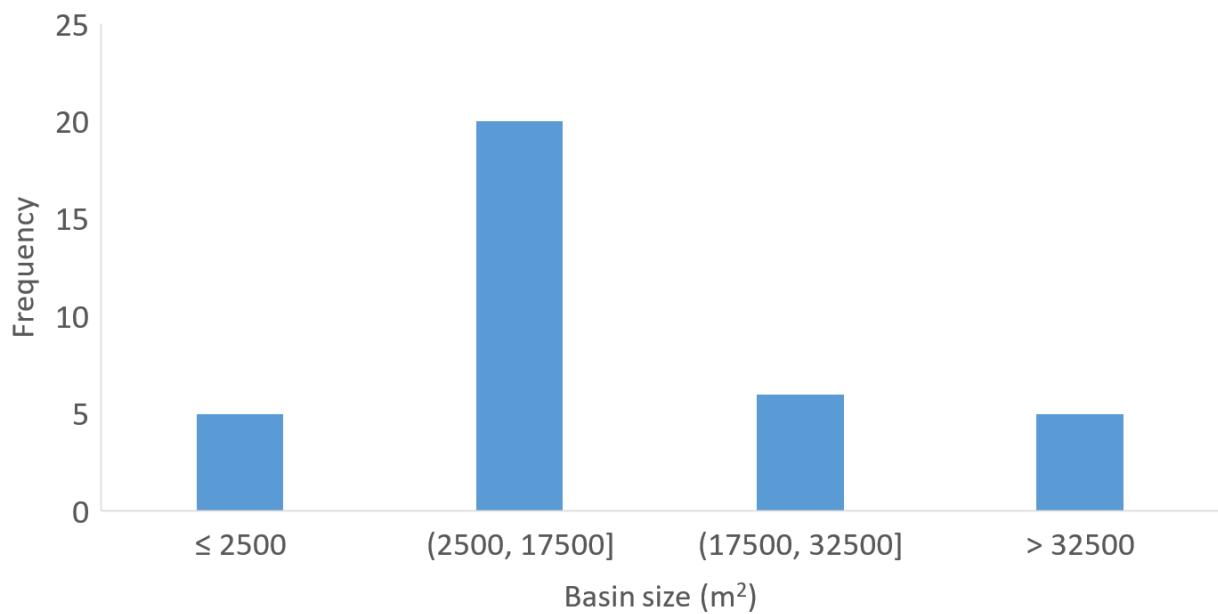


5.3.4. תוצאות

מניתוח הפרשי הגובה של שישה מודלים טופוגרפיים (DSMs) מהשנתיים 2013-2021, זהה ומופיע בסך הכל 52 משקעי DF אשר אירעו בין השנים 2013-2017. בנוסף, זהה מפולות סלעיות בודדות, אך עקב מספרן הקטן בחרנו להתמקד באירועי DF. כל משקעי ה-DF זהה לאורך ערוצים המנקזים את מצוק העתקים, עדות ישירה לחבר בין זרימה בנחלים לייצור תנועת הסדייננטים המדרוניים. עבור כל אחד מהערוצים בו זהה DF, חושב שטח האגן וסומנו קווי הערכוצים בו (איור 5.3.5). שטח אגני הניקוז נע בטווח של 650-115,000 מ"ר (איור 5.3.6). 52 משקעי ה-DFים שמופיעים הם תוצר של 5 תאים קונגקטיביים שאירעו בשלוש סופות שונות (בשתיים מהסוגות, היו שני תאים קונגקטיביים בכל סופה שייצרו DFs באזוריים שונים בשטח המיפוי). נציין כי זיהוי ומיפוי 52 DFs כלל בדוח שיפורסם אשתקד (Siman-Tov and Marra, 2021). באופן דומה, נבדק שטח הפרויקט באמצעות מפות ההפרשים שהוכנו משלשת המודלים הטופוגרפיים של השנים 2019-2021. המיפוי העלה כי לא הופיעו משקעי DF חדשים. נציין כי במהלך שנים אלו התרחשו מספר אירועים גשם משמעותיים שנגרמו לזרימות בנחלים הקצרים המנקזים את מצוק העתקים ולמרות זאת נראה שלא התרחשו אירועי DF. תוצאה זו היא עדות נוספת לנדרותם של אירועי DF ביחס לשיטפונות באותו הערכוצים. הסיבה שהוצאה לכך בדוח הקודם היא חשיבותו של הגשם המקיים ביצירת ה-DF, ככלומר, חייב להתקיים התנאי שבו שני אירועי גשם משמעותיים עוקבים, מתרחשים באותו אזור מעל הממצא ובפרש זמני של שעות עד ימים בודדים (Siman-Tov and Marra, 2021). הסבירות למימוש תנאים אלו נמוכה מאוד באזורי מדברי ובמיוחד כמשמעותם את השטח לרצעת מצוק העתקים בלבד.



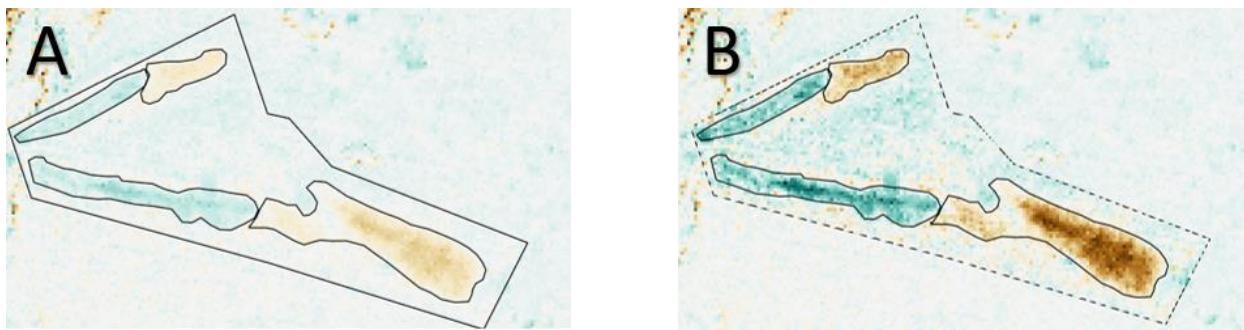
איור 5.3.5. קבוצת DFs באזורי שבין עין-פשחה לנחל קורמן מסומנים על גבי מפת הצללה של מודל הגבהים. מסומנים: מקור ה-DF (בכחול) ומשקעיו (באדום). לכל DF מסומנים ערוצי הזרימה שלו (קווקוו תחול) ואגן הניקוז (אדום בהיר). אגני הניקוז שונים מעט בשטחים, אך רובם מנקזים את המדרון וראש הממצא בלבד ולא משתרעים מערבה לכיוון פנים רמת המדבר.



איור 5.3.6. היסטוגרמה המציגה את שטחי אגני הניקוז של העורוצים בהם היו DFs. ניתן להבחין בשטח רוב אגני הניקוז נע בין אלף לعشורות אלפי מטרים רבועים, שטחים קטנים יחסית המנקיים הרבה את אזור המזוק ורשו בלבד.

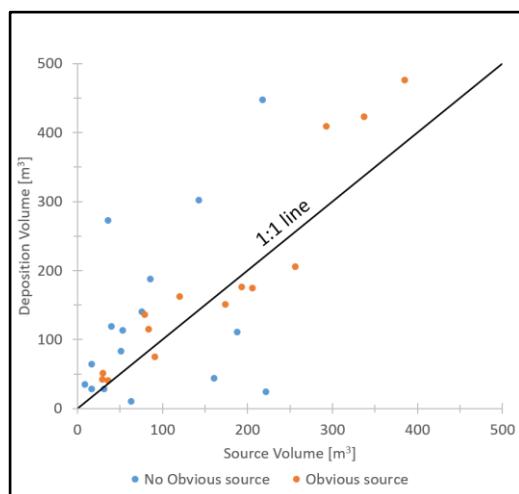
בעוד מיפוי ה- DF התמקד בזיהוי משקעי האירועים (lobes and levees), על מנת להבין את הגורם להתרחשותם חשוב לציין גם את מקור החומר במעלה העורוץ. המקור מזוהה כחומר של חומר (ערכיים שליליים במפת ההפרשים) במעלה העורוצים בהם זוהו משקעי ה- DF. באיור 5.3.7 ניתן לראות דוגמה למשקעי DF בגוון חום ומיד מעלה המקורות בגוון ירוק. מתוך 52 האירועים המופיעים, זוהו באופן ודאי המקורות של 13 אירועים, Über 16 אירועים נוספים התקבל זיהוי חלקו וברמת וודאות בינונית, ול- 22 אירועים לא זוהו המקורות כלל. במידה והמקורות והמשקעים אכן מופו באופן מדויק, נצפה כי נפח החומר החסר במעלה ישווה לנפח החומר שהצטבר במודר, כך שהפרש הנפחים ישאף לאפס עם סטיות קלות הנובעות מכך שהחומר הגיע ממקורות שאינן מזוהים במפת ההפרשים וכן בגל שהומר דק נשטף ולא הצטבר באזורי הממופה. לשם חישוב הנפחים, יש לסקום את מכפלת שטח התא בשציג ההפרשים בערך ההפרש.

לא ניתן לבצע את חישובי הנפח ללא תיקון הסטיות האנכיות כפי שהוסבר בפרק השיטות. לכן, לכל אחד מ- 29 האירועים עבורם זוהה מקור, תוקנה מפת ההפרשים באופן מקומי וחושבו הנפחים. באיור 5.3.7 ניתן לראות דוגמה למקור ומשקעים ברורים של אירוע DF לפניו (איור A5.3.7) ולאחר תיקון (איור B5.3.7). במפה המתוקנת ניתן לראות בצורה ברורה יותר את השינוי שארע במדרון ואת המורפולוגיה של ה- DF. כך למשל מבחינים בצורה טובת יותר בקיומו של תלוליות משנה צדי התעללה (levees), הידועות כאחד המאפיינים הבולטים של DF.



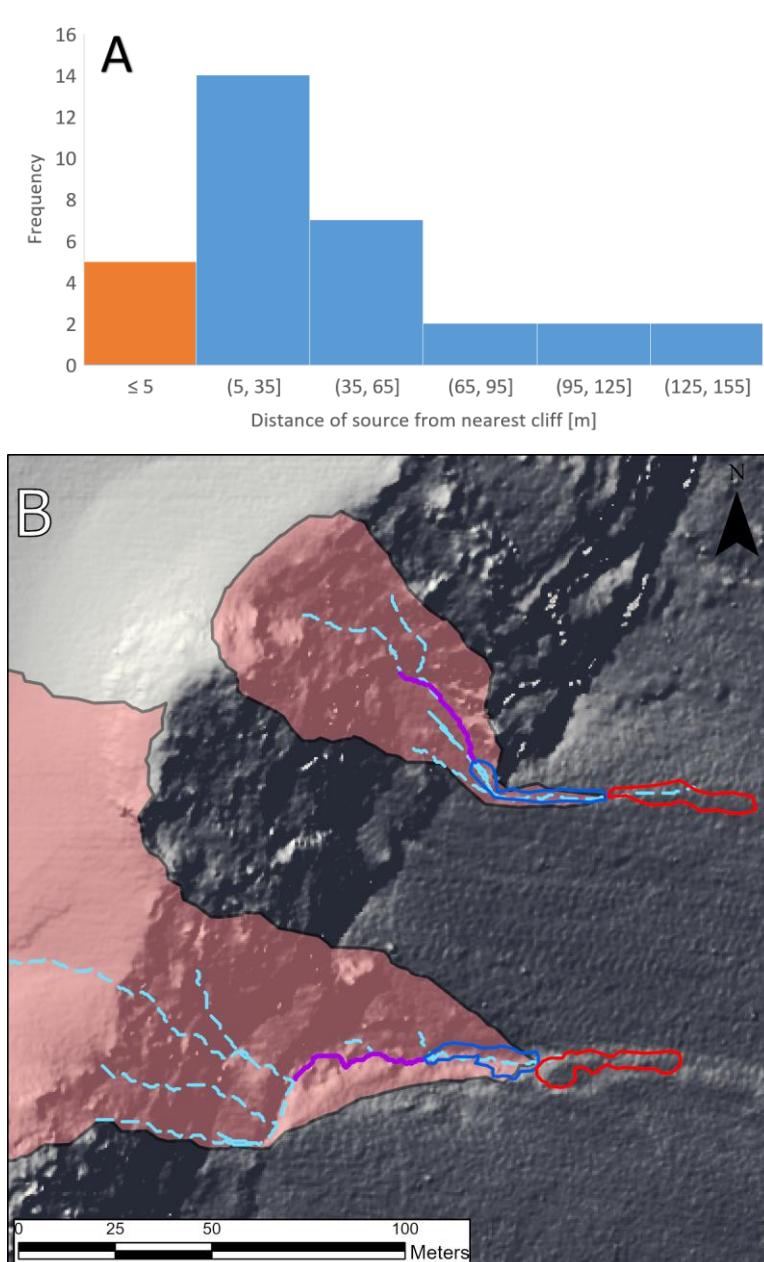
איור 5.3.7. צמד צפוי שזורה ומופת על גבי מפת ההפרשים. הגוון החום מייצג תוספת חומר משקעי ה-DF והגוון הירוק מחסור בחומר (מקור ה-DF). (A) מפת ההפרשים צפוי שהתקבלה מהחסרת ה-DSMs של השנים 2015-2013. (B) אותה מפה המוצגת ב-A אך לאחר תיקון הסטיטה האנכית. ניתן לראות שלאחר תיקון השינויים במדרון נראים חדים וברורים יותר. בקו מקווקו מסומן השטח (בניכוי שטח המשקעים והמקור של ה-DFs) עבורו חושב ערך הסטיטה האנכית ששימש לתקן המקום.

לאחר ביצוע התקונים הנדרשים במפות ההפרשים, חושב נפח הסדיימנט במשקעים אל מול נפח המקור (איור 5.3.8). נציין, כי נבדק גם היחס בין הנפחים של המקור וההשקעה ללא תיקון הסטיטה האנכית במפות ההפרשים, ואכן התקון הכרחי ומצמצם את המרחק של הנקודות מיחס של 1:1. מהתוצאות עולה כי נפח המשקעים בכל אחד מה-DFs לא עולה על 500 מ'ק, בעוד שנפח המקור קטן מ-400 מ'ק. אירועים אלו קתינים ביחס לאיירועים המדוחים בעולם שבדרך כלל מתיחסים ל-DFs באגני ניקוז גדולים בהרבה (Marchi and D'Agostino, 2004). עבור DFs שמקורם ברור (נקודות כתומות באיור 5.3.8) נפח המקור שווה בקירוב לנפח המשקע (עוקבים אחרי יחס של 1:1). באיור 5.3.8, ניתן לראות כי עבור מרבית ה-DFs נפח החומר במשקעים גדול מນפח המקור. הסיבה לכך יכולה להיות שלא ניתן באמצעות מפות ההפרשים לזהות חומר שנסחף מעלה העורוץ, מפני שכמות התחתרות בפני השטח קטנה מרגישות המפה לשינויי גובה. מופו גם אירועים בהם כמות המשקע קטנה ביחס לנפח המקור, במקרים אלו אנו מניחים שחלק מהחומר לא הצטבר בעדרימות הסדיימנט שמוספו אלא נסחף במודד העורוץ או שחלחל בין סלעים הטالוס עליהם זרם ה-DF.



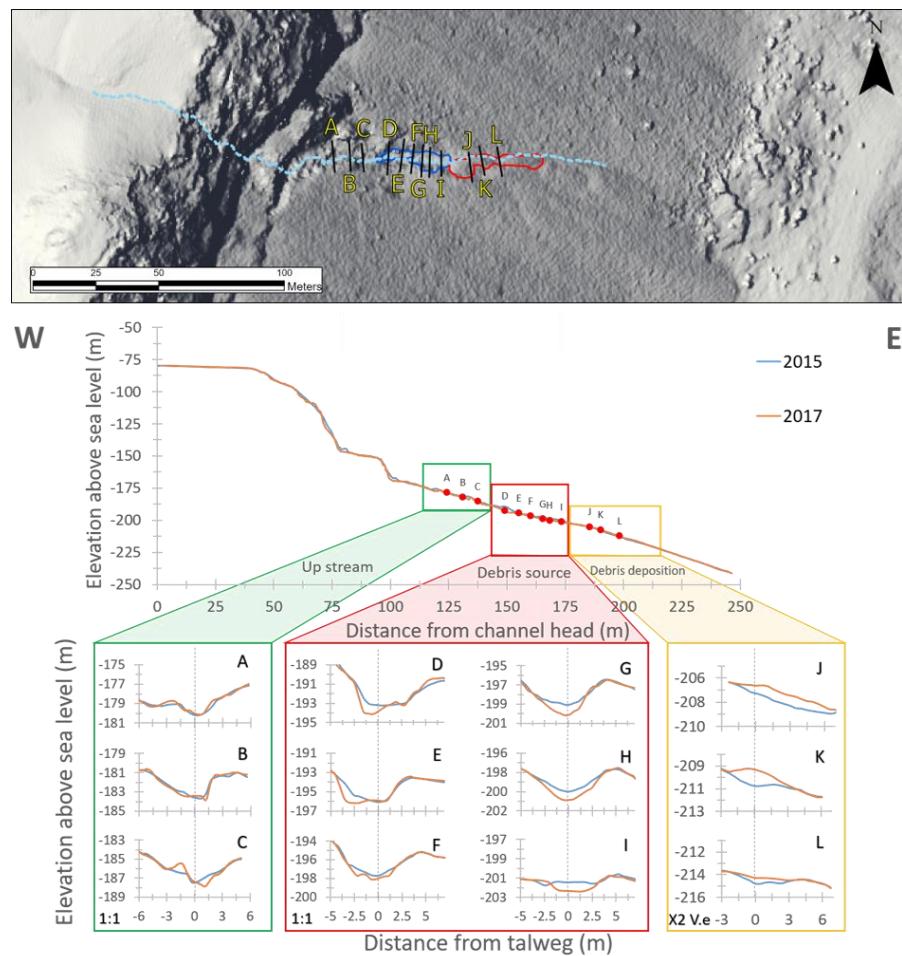
איור 5.3.8. נפח המשקעים לעומת נפח המקור. תיאורטית, בהנחה שימור החומר, נפח המקור צריך להיות זהה לנפח המשקע עבור כל DF (נכודה בגרף). במקרה כזה, כל הנקודות יהיו אמורות להסתדר לאורך הקו השחור (line 1:1). כך אכן מתקיים עבור DFs שהמקור והמשקע שלהם זהה בודדות (נקודות כתומות). עבור מקורות ברורים (נקודות כתומות) הפיזור בתוצאות פחות (נקודות כחולות) הפיזור ממוקמות מעל הקו השחור, כלומר, הגיע חומר ממוקור נוסף, מעלה אגן הניקוז ולא רק מהמקור המקורי.

אחד המנגנונים המוצע לכשל בסדיمنت מדרוני לא מלודד הוא התחרותה בסיס מפל (fire-hose effect) (Griffiths, 2004; Melis et al., 1995; Morino et al., 2019). באירור A5.3.9 מוצגת ההתפלגות של מרחקי המקורות המזוהים אל ה策וק הקרוב ביותר אליהם (המרחק למפל הקרוב ביותר במעלה DF הערוֹץ, איירור B5.3.9). התוצאות מבヒוּרָתִים כי ברוב המקרים המרחק המינימלי בין המקור של DF למפל הקרוב ביותר עולה על חמישה מטרים. המרחק הגדול שולל את האפשרות שמנגנון הכשל המרכזי הוא התחרותה בסיס מפל ומציריך הסבר שונה למקומות התחרותה ויצירת התעללה שמהווה את מקור הסדיamenti ב-DF.



איירור 5.3.9. 5. מנגנון הכשל בתעלת כתלות למרחוק המקור למפל במעלה הערוֹץ. (A) היסטוגרמה של מרחק מקורות ה-DF מה策וק הקרוב ביותר במעלה הערוֹץ. ניתן לראות כי אכן יש מספר אירועים בהם המקור קרוב מאד ל策וק (עמדו כתחום). ברוב המקרים המרחק גדול ממחמישה מטרים ואינו מאפשר מנגנון של התחרותה בסיס מפל. (B) שני אירועי DF סמוכים המציגים את אופן המדידה ממנו נגזרו התוצאות ב-A. על גבי מפת הצללה מסוימים אגני הניקוז של שני אירועים באזורי הממצא שמצוון לשמורת עין DF פשחה. משקעי ה-DF (באדום) ומעליהם המקור לסדימנט הקרוב ביותר בין המקור למפל במעלה הערוֹץ מסומן בקו סגול.

חלק מהניסיון להבין את מנגנון הכשל שמאפשר את יצירתה ה- DF, חשוב לבחון את גיאומטריה העורוץ לפני ואחרי האירוע. לשם כך הוכנו פרופילי אורך ורוחב עבור 3 אירועי DF שעוברים מkor הסדימנט והמשקעים מופו ברמת וודאות גבוהה והפרש הנפחים היה קטן מ- 50 מ"ק. באירוע 5.3.10 מוצגים הפרופילים של אחד משלשת האירועים הללו שאירעו בין השנים 2017-2015. בסך הכל מוצגים 13 פרופילים, פרופיל יחיד לאורכו של העורוץ, 12 פרופילי רוחב, מתוכם שישה באזור מkor הסדימנט, שלשה באזור המשקעים ושלשה במעלה העורוץ (מעל המkor). במעלה הנחל, ניכר שאין שינויי משמעותיים בפרופיל התעלה, בעוד שבאזור המkor השינויים משמעותיים ומייד על התוצאות. פרופילים D-E מצביעים על האפשרות כי קリスト גdots היא מנגנון הכשל והמקור לסדימנט בזרימה, אך באירועים I-G נראה שההתוצאות היא במרכז העורוץ ומנגנון הכשל או הסחיפה של הסדימנט שונה. גם במקרה שלפנינו ניתן לראות בפרופיל האורך שהמפל הקרוב ביותר למקור רוחק מידי מכדי להסביר את מקור הסדימנט על ידי התוצאות בסיס מפל.



5.3.10. איזור אורך הנמשך מעלה המזוקן ועד כ-35 מטר למרגולות משקעי ה-DF. נתוניים 12 פרופיל ורוחב: 3 במעלה הערוֹץ (A-C), מסומנים בירוק) 6 באזורי המקור (I-D), מסומנים באדום) ו-3 באזורי המשקע (L-J, מסומנים בצהוב). החתכים הוכנו מ-DSMs מהשנים 2015 (בכחול) ו-2017 (בכתום). אפשר לראות כי המקור ל-DF נמצא רחוק מהמזוקן הקרוב ביותר שבמעלה הערוֹץ ובכך שולל מגנון כשל מסווג התהתרות בבסיס מפל (fire-hose effect).

5.5. סיכום, מסקנות ועבודה להמשך

דו"ח זה מסכם את עיקרי תוצאות המחקר לשנת 2022 המהוות המשך ישיר של מחקר בפרויקט רב שנתי העוסק ביציבות מדרכנות לאורך מצוק העתקים תוך התמקדות בגלישות מדרכנות מסווג DF. התוצאות הראשוניות המוצגות בדו"ח מהוות בסיס להמשך מיפוי ומחקר ה- DF במצוק העתקים. החלק הראשון של מסמך זה עוסק בשיטה העיקרית בה השתמשנו לזהוי ומיפוי הגלישות, המתבססת על מפות הפרשי גבהים המיצירות מהחסרת DSMs משנים עוקבות. מצאנו כי אי דיויקים אנכיאים במודלים הטופוגרפיים המקוריים (DSMs) מביאים לסטיות אנכיות שימושיות (עשרות סנטימטרים) במפות הפרשיים (DoD). בדו"ח אנו מתייחסים לאפשרות לתקן סטיות אלו, תוך כדי התמקדות בשינויים מרחב של הסטיות וכן כאלו הנובעים מהתלות בשיפוע המדרון. לאור התוצאות אנו מטילים כי כדי לתקן את מפות הפרשיים בקנה מידה רחב (למשל עבור כלאזורים המלח) יש להשתמש בעוני הנkontakteים המקוריים מהם הופקו ה- DSMs. לגבי התלות של הסטיה האנכית בשיפוע, הראנו כי עבור שיפורים גבוהים יותר הפיזור בתוצאות רב יותר. לאור זאת, על מנת לתקן את הסטיות האנכיות יש לבצע תיקונים מקומיים בלבד כדי שהווצג בפרק התוצאות.

לאחר תיקון מפות הפרשיים חושבו נפח המשקע והמקור של כל DF. האירועים הנחקרים הם מסדר גודל קטן, נפח המשקע לא עולה על מאות אחודות של מטרים מעוקבים. הראנו כי בדרך כלל נפח המקור דומה לנפח המשקע עם נתיחה למחסור בנפח המקור. מכך אנו מטילים כי חלק לא מבוטל מהחומר השוקע במורד ה- DF מכוון בחלקים גבוהים יותר של אגן הניקוז אך מפת הפרשיים אינה רגישה מספיק כדי לחשב את הנפח מאזורים אלו (פיזור גדול ועובי קטן). אגני הניקוז בהם נצפו DFs בשנים הנחקרות הם קטנים באופן יחסי וברוב המקרים מנקיים את שטח המזוק וראש המתול בלבד, שטחים לא בדרך כלל על כ- 30,000 מ"ר.

חלק מהניסיונות להבין את מגנון הכשל של הסדימנט המדרוני שמאפשר יצירת DF, שורטו חתכי אורך ורוחב במספר עروצים וכן נבדק המרחק בין בסיס המזוק הקרוב ביותר במעלה העורץ למקור הסדימנט העיקרי של ה- DF. מרחק זה עולה בדרך כלל על חמישה מטרים ועל כן שולל את האפשרות כי התחרות בבסיס מפל (fire-hose effect) היא הגורם המרכזי לייצור הכשל. מתחמי הרוחב באורך המקור עולה כי קריסה של גdots והתחרות במרכז העروצים עשויים להוות את מגמוני הkowski של הקולובוים לייצור ה- DFs.

המשך המחקר יתמקד בניסוי להבין את מגנון הכשל/סחיפת הסדימנט שמאפשר את יצירת ה- DF בשונה מאי רוע שיטפון רגיל בערו. בנוסף ננסה לאבחן בצוורה מדוקת יותר את מאפייני הגשם שגורמים לייצור אי רועי ה- DF. לשם כך מותקנים בימים אלו בשטח המחקר מעל עשרה מדיניות גשם בראש ובבסיס מצוק העתקים וכן מצלמות אשר צלמו חלקים של המזוק לאורך העונה הגשומה ויאפשרו לקבוע את הקשר בין תכיפות הגשם לזרימת נגר בנחלי המזוק.

5.4 סירקולציה אטמוספרית ואזוריית קשורות הסעת חלוקים נחלית וחופית וגורמת להשקעה כיוונית של רכסי חוף ומיניות סחף באגן ים המלח

אליל ח.^{1,2}, ארמן, מ.³, אנזול, י.², לנסקי, ג.ג.^{2,1}

¹המכון הגיאולוגי.

²המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים.

³המכון למדעי האקלים והאטמוספירה, ETH, ציריך, שווייץ.

דיווח בעקבות מאמר שנשלח לשיפורו בכתב העת Earth Surface Dynamics. הפרטים המלאים של העבודה זו מצוים אצל המחברים באנגלית. Haggai.eyal@mail.huji.ac.il, nadavl@gsi.gov.il

5.4.1 הקדמה

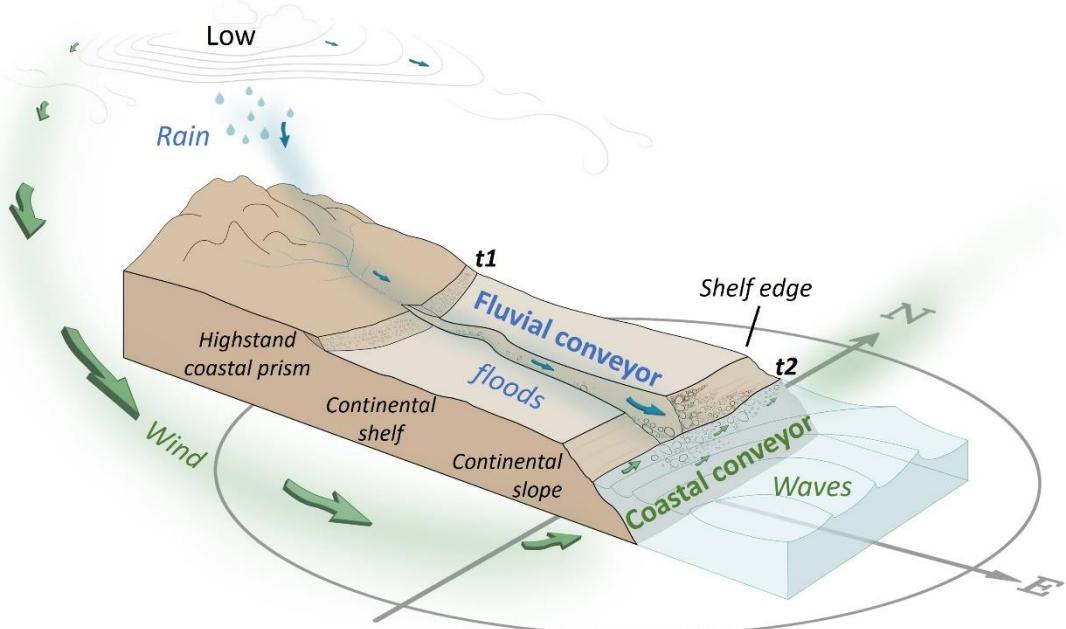
נהלים מוביילים סדיימנט אל חוף אגם או ים, שם האינטראקציה של הסדיימנט עם גוף המים יוצרת מיניות סחף ורכסי חוף (e.g., Ashton et al., 2013; Galloway, 1975; Postma, 1995). למורת שההבנה של תנאים הידרואקלימיים הטמונה בצורות נוף אלה היא מטרה חשובה בגיאומורפולוגיה (proxies) (e.g., Hansford and Plink-Björklund, 2020), מחקרים רבים משתמשים על סמנים עקיפים (proxies) כדי לפענח אקלים- עבר, והקשר בין תהליכי ההשקעה להידרואקלימים נותר מעורפל ולא ישיר (e.g., Torfstein et al., 2015, 2013; Huntington, 1911; Neugebauer et al., 2016; Kiro et al., 2017; Palchan et al., 2017; Ahlbom et al., 2018; Ben Dor et al., 2018) (פער ידוע זה הוא תוצר של האתגר לקשר בין תהליכיים שלרבים נבדים בנפרד וمتפרסים על פני סקלות זמן-מרחב גדולות; מהמא釐ים הסינופטיים-הידרואקלימיים, זרימות בנחלים, הידרו-динאמיקה של גוף המים והובלה והשקעה של סדיימנט לאורך הנחל והחוף).

בעבודה זו, אנו בוחנים את שרשרת התהליכים הללו בים המלח בו ההידרואקלים העכשווי קשור באדייקות לגיאומורפולוגיה (e.g., Bartov et al., 2006; Sirota et al., 2021) והובלת הסדיימנט בנחלים וחופים המתפתחים בקצב מואץ בתגובה לירידת המפלס המהירה של האגם (איור 1). עבודה זו קושרת עבודות קודמות שבחנו את ההתקפות החזקות הגיאומורפית של ערוצים והובלת סדיימנט גס בתגובה לירידת מפלס (Eyal et al., 2019), ואת המכנית של הובלות חלוקים ומינום משפכי הערוצים לאורך החוף ליצירת רכסי חוף ממויינים (Eyal et al., 2021). התהליכים נבחנו בשפק נחל אוג לחופיו הצפון מערביים של ים המלח (איור 2).

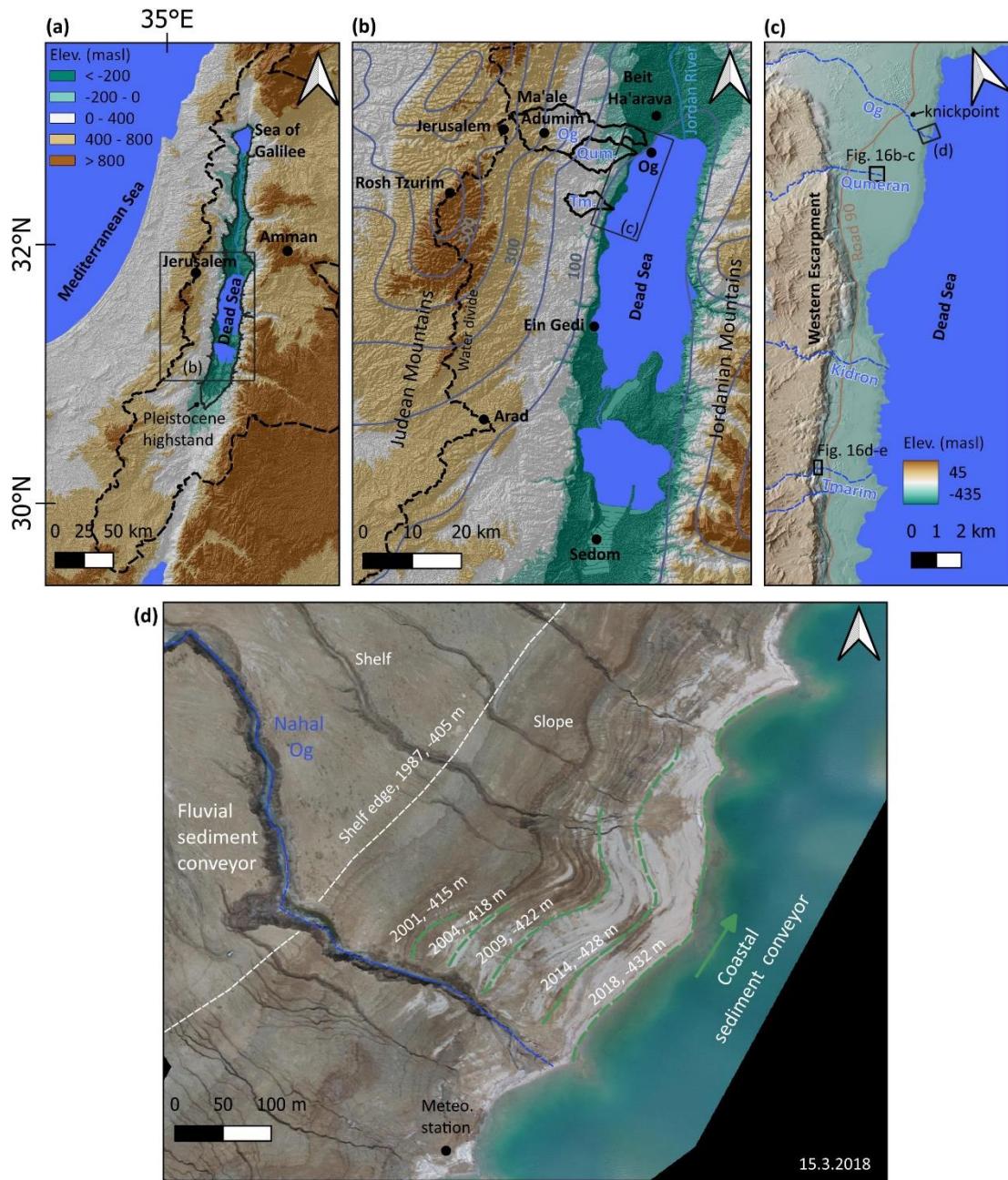
שאלות המחקר:

מה טבעה של הסירקולציה האטמוספרית והתנאים הhidrometeorולוגיים שפעילים את מסועי הסדימנט הנחלי והחוף?

1. מהם הספרים ההידראוקלמיים, במובן עוצמה ומשך של סופות גשם ושיטפונות, וסופות רוח וגלים הנדרשים להובלה והשקעה של חלוקים לאורך חוף האגם הנסוג?
2. כיצד האינטראקציה בין סופות גשם יוצרות שיטפונות וסופות רוח יוצרות גלים, יוצרת חופים ומיניפות סחף עם ארכיטקטורה סדימנטרית מסוימת?
3. מה אנו יכולים ללמוד מהנסיבות העכשוויות של הנחל והחוף והאינטראקציה ביניהם לגבי ארכיבים סדימנטריים קדומים יותר?



איור 5.4.1. סכמה של עקרונות הובלות הסדימנט בערוץ ובחוף כפי שנידונו בעובדה זו. בסקלה הגדולה, המאלע הסינוופטי הוא שער ברומטרי הגורם להובלות סדימנט בערוץ ובחוף על ידי יצירת גושים ושיטפונות המובילים לחלוקים אל אגן ההשקעה (כחול), והובלות סדימנט לאורך החוף על ידי גלים-מנעי-רוח הניגשים אל החוף בזווית (ירוק). כאן אנו בוחנים מקרה בו מפלס גוף המים נסוג; t1 ו t2 מסמלים מיקומי מפלס עליון ותחתון. במקרה של ים המלח t1 מיצג את מפלס אמצע המאה ה-20, וt2 את המפלס במאה ה-21.



איור 5.4.2. אזור הממחקר. (a) מזורה הים התיכון; מוצגים אגן הניקוז של ים המלח (קו שחור מקווקו) והמפלס העליון של אגם הליסון מהפליסטוקן המאוחר (קו שחור). (b) סביבת ים המלח. מוצגת פרשנת הימים האזוריית של הרי יהודה (קו שחור מקווקו) ואגני הניקוז של הנחלים הנלmediים: אוג (Og), קומראן (Qum.) ותמרים (Tm.) (פוליגונים). (c) העורצים שמתנקזים לצפון-מערב ים המלח. נקודות שחזורות מסמלות את תחנות המדידה המטאורולוגיות בהן השתמשנו. (d) העורצים שמתנקזים לדרום-מערב ים המלח (קו שחול מקווקו) וההעתק המערבי של בקע ים המלח. תצלום אויר של שפך נחל אוג המציג את מסועי הסידiments הנחליים והחופיים; יש לציין את התארכויות רכסי החוף משפט העורץ וצפונה עם ירידת המפלס. (קוויים ירוקים). עיבוד בעקבות Eyal et al., 2021.

5.4.2 שיטות

במחקר נעשה שימוש בנתונים שנאספו במהלך חמש שנים (2018-2022): (i) נתוני גלים, רוח, גשם ושיתפונות שנאספו על ידי התchanות המטאורולוגיות של המכון הגיאולוגי והשירות המטאורולוגי, (ii) מדידות סופתיות של הובלת חלקים קבועים וחלוקים 'חכמים' שהוצבו בנחל ובחוף (Eyal et al., 2021), (iii) סיוגים סינופטיים (Alpert et al., 2004) ונתוני סיירקולציה סינופטית ברזולוציה גבוהה מודל רה-אנגליזה ERA5 (Hersbach et al., 2020). סדרות הזמן של הגלים, הרוח, הגשם והשיתפונות עובדו על ידי קוד שנכתב בתוכנת MATLAB, בו סוגו סופות גלים ורוח לפי הסף של גובה הגלים להובלת חלקים, הוגדרו סופות הגשם היוצרות שיתפונות, בהתאם סיוגים סינופטיים לסופות ונעשתה קורלציה בין סדרות הזמן השונות.

5.4.3 תוצאות ודינון

מספר מערכות סינופטיות של לחץ נמוך שליטה במזג האוויר ובאקלים של אזור ים המלח: שקע ים תיכוני (קפריסאי או סורי, בהתאם למיקום של מרכז השקע), אפיק ים סוף, אפיק פרסי, ושקע שרבי (e.g., Alpert et al., 2004). מצאנו כי השקעים הים-תיכוניים הם היוצרים העיקריים גם של סופות הגשם וגם של סופות הגלים בים המלח. לכן, הם גם הגורמים העיקריים להובלת נחלית של סדימנט גס לתוך האגם ולהובלת ומיוון של חלקים לאורך חוף האגם על ידי גלים.

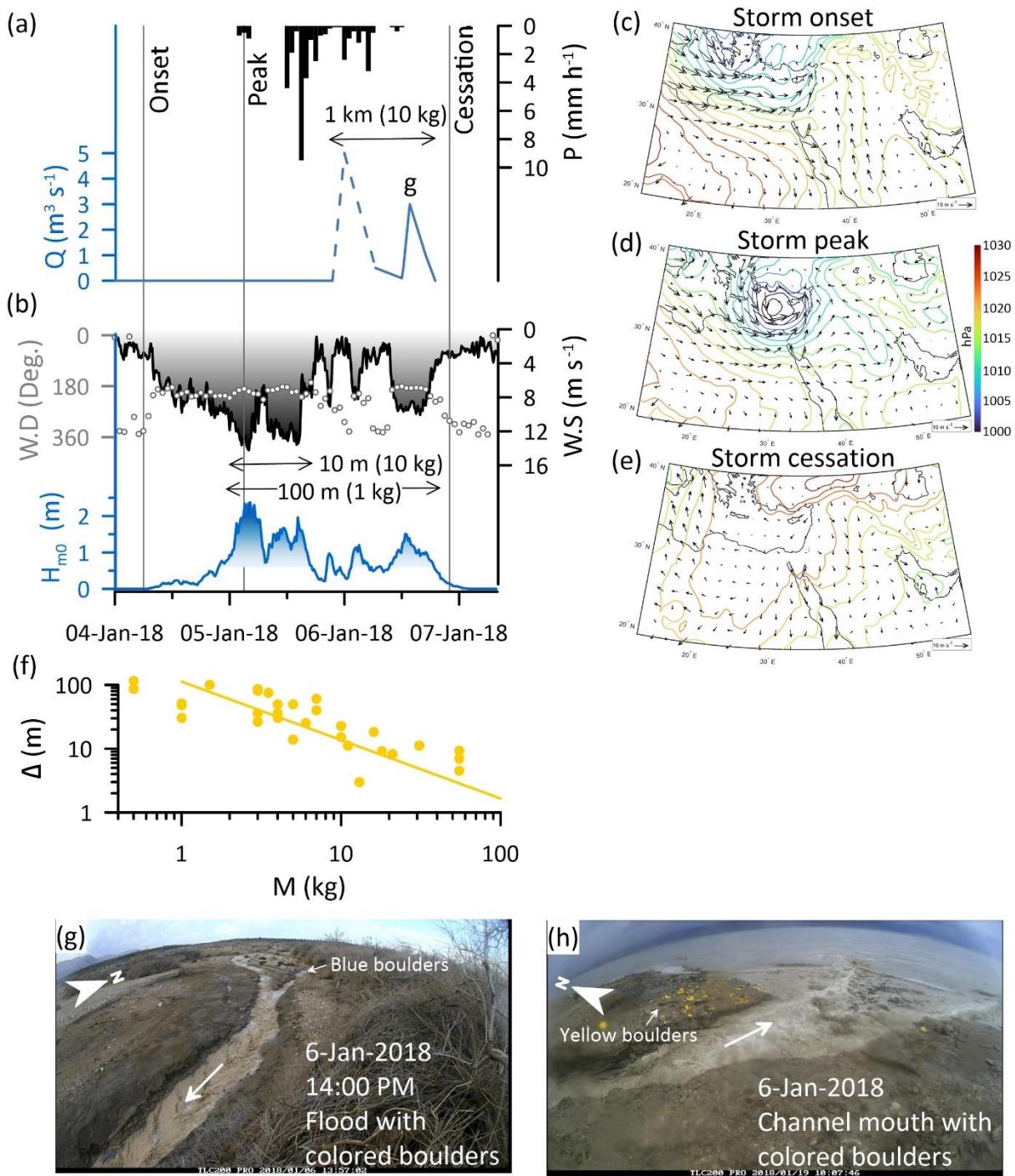
איור 5.4.3 מציג דוגמא נוספת חורפית ושרשרת התהליכים המשפיעים על הובלת סדימנט בשני המסעדים. בחינה מלאה של כל הסופות בתקופות המחקר מראה שזיהוי דוגמא מייצגת. ראשית, בסקרה הסינופטית, השקעים הים-תיכוניים יוצרים רוחות מעורבות עצומות כאשר הם מתקרבים לחופים הצפוני מזרחיים של הים התיכון. בקרבת פני השטח, במאונך לכיוון המערבי של הרוח הסינופטית, הרוחות מתווולות על ידי הטופוגרפיה של בקע ים המלח לכדי רוחות דרוםיות שמייצרות גלים הנעים מדרום לצפון והובלות לאורך החוף בכיוון זה (איור 5.4.4). לאחר מכן, כאשר השקע נמצא בקרבת החופים המזרחיים של הים התיכון או כבר ממוקם מעל סוריה (שקע סורי), הרכיב הצפוני של הרוח נהייה משמעותי יותר, הרוחות הדромיות דועכות ואיתן הגלים, ותאי גשם מתפתחים מעל אגן הניקוז של מדבר יהודה. הגשם יוצר שיטפונות שמתפתחים בתוך מספר שעות ומובילים סדימנט לים המלח, לכן, חלקים מגיעים במקביל או אחרי הדעיכה של סופת הגלים. בהתאם, הובלת החלוקים לאורך החוף ומיוון לרוב קורית במהלך הסופה הבאה בעונה או לעיתים רוחות תחת ההשפעה של אותה הסופה.

שקעים ים תיכוניים יוצרו גלים הם יותר עמוקים מאשרם יוצרים גלים (בכ-10 הקטו-פסקל במומצע). הם יוצרים רוחות דרוםיות שגיגיות ל-20 מטר לשניה וنمוכות לעלה מעשר שעות. כאשר הגלים מוגני הרוח גובהם מ-0.6 מטר, הסף התנועה של חלקים השוקלים 1 ק"ג נחצה והמיין והובלות לאורך החוף נהיים משמעותיים. כאשר מctrbutים מעל 10 מ"מ של גשם במרכז האגן, שיטפון ביןוני ומעלה מתפתח וחולקים מובלים אל אגן ההשקעה.

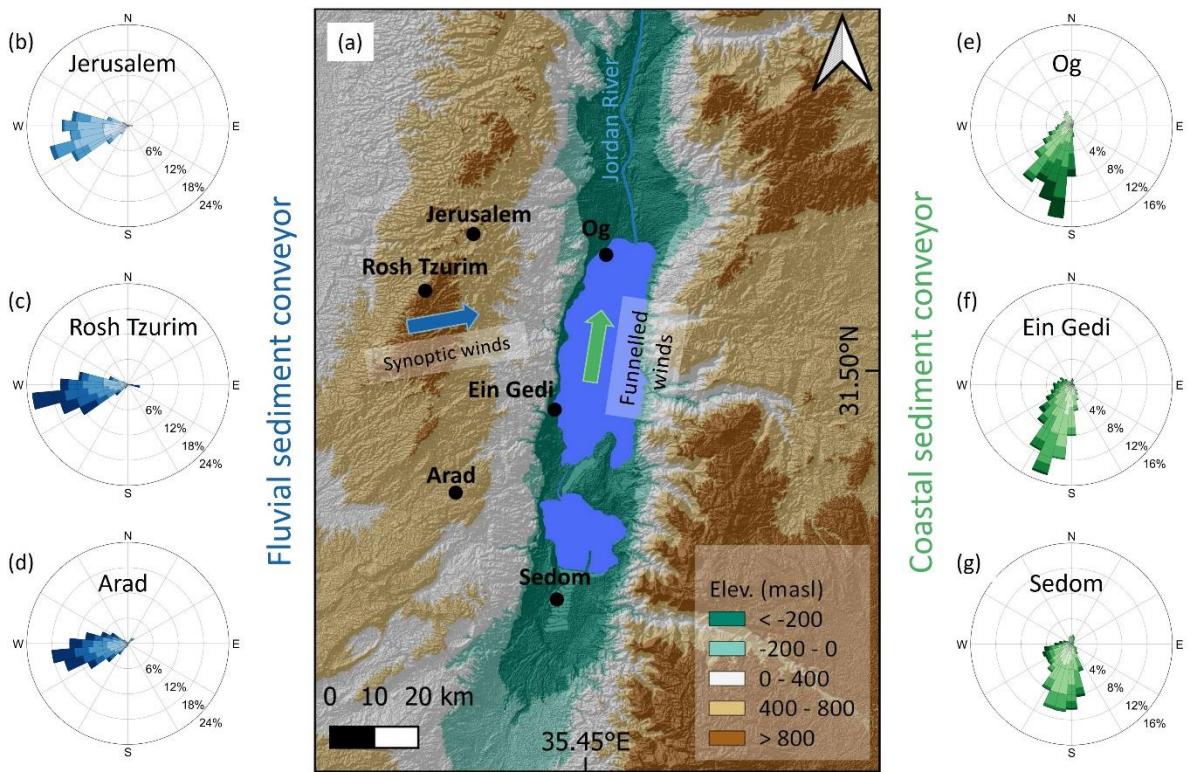
למרות שהעורך והחולף לרוב פועלם בהשפעת השקעים ים תיכוניים, ההובלות החופית היא לעלה מפי חמץ יותר נפוצה מהובלות של חלקים בעורך בשיטפונות ביןוניים ומעלה (10 מטר-קוב

לשנייה ומעלה). מצב זה מכתיב יצירה של מניפה נשלטת-গלים בשפַק הערוֹץ, שלמעשה הופכת לרכסי חוף ממויינים הנמשכים באופן מועדף צפונה משפַק הערוֹץ. למרות שההידוקלימטולוגיה של השיטפונות לא מראה מגמה ברורה בעשוריים האחרונים, ההגדלה בנפח הסדימנט שmobilitם את שפַק הערוֹץ, מיוחסת לתגובה של פרופיל הערוֹץ לירידת המפלס המהירה; שיפורים תלולים של קרקעית האגם נחשפים ויוצרים התחרותות מהירה המלווה בשיפורים גדולים שנודדים לכיוון מעלה הערוֹץ ומגדילים את פוטנציאל ההובלה של החלוקים. במקביל, תחת אקלים יחסית קבוע של סופות גלים, הגדלת שטח הסדימנטים אל השפַק באה ידי ביטוי גם בהובלה חופית למרחקים גדולים יותר ויצירת רכסי חוף ארוכים יותר עם הזמן.

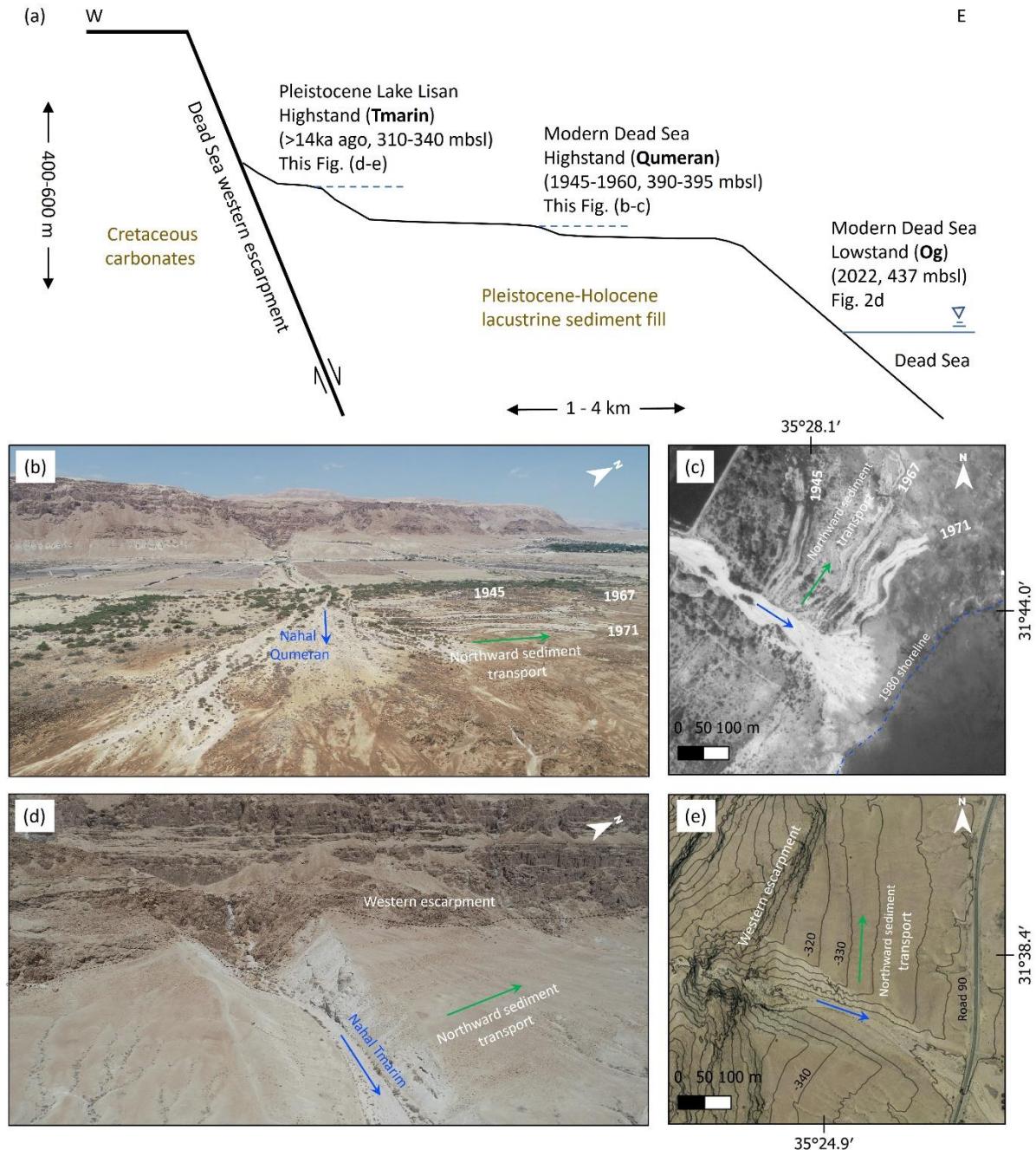
בעקבות התכפיות מהסבירה העכשוית, אנו מזהים כיווניות זהה של הובלות חלקים צפונה משפכי הערוֹצים והקניונים והשקרה של מניפות סחף ורכסי חוף גם ממשקעי ים המלח של העשוריים האחרונים וגם במשקעים מהפליטזוקן המאוחר של אגם הליסן (איור 5.4.5). תכפיות אלו מראות כי במהלך אלף השנים האחרונות, שקעים ים תיכוניים הם המנוע העיקרי המקשר בין הובלות סדימנטים אל אגן ההשקרה ופיזורים לאורך החוף.



5.4.3 תוצאות מהסופה שהתקיימה ב-4-7 בנואר, 2018, ודגימה את שרשראת התהליכים מהסיקולציה האטמוספרית שמיצרת סופות גשם ושיטפונות, סופות גלים מוגני רוח, והובלה של חלוקים בעורצים ולאורך החוף. (a) גשם שערתי (P, מעלה-אדומים, מיקום באירור 5.4.2), ספיקה בשיטפון (Q, קו רציף מבוסס על מצלמת TLC וקו מקווקו מבוסס על שחוור מסימני זרימה). במהלך שיטפון זה, חלוקים צבועים הובילו לאורך מקטע ערוץ שחוצה את המדריך הרחק של כ-1 ק"מ. (b) רוח W-S-מהירות רוח, נקודות, נקודות) וגובה גלים (H, גובה גל משמעותי, מילוי הצבע מסמל גלים מעל סף התנועה להובלת חלוקים גסים, ראה טקסט). (c,e) מפות לחץ של סירקולציה אטמוספרית המראות שקו ים תיכון عمוק בהתאם להתחנות סופת הרוח מתחילה הסופה, השיא, והסוף, בהתאם. (f) תנועה לאורך החוף (Δ) של חלוקים במסות שונות (M, נקודות צהובות), שהובילו ומינו משקל הערוֹץ וצפונה. המין ניתן לחיזוי על ידי חוק חזקה (קו צהוב), לפי Eyal et al., 2021. (g) השיטפון כפי שתועד בנקודות הנקע של הערוֹץ במיקום בו הוצבו החלוקים הצבועים. (h) כניסה השיטפון לים המלח במיקום שבו חלוקי החוף נקבעו.



איור 5.4.4. רוחות סינופטיות ורוחות אזוריות. (א) מפה מיקום שמרתת שני הכוונים המאוכנים של הרוחות בזמן שקיים ים תיכוניים. (ב,ג,ד) שונות רוח משלוש תחנות שממוקמות לאורך פרשת הרים של הרי יהודה (מיוקמים מופיעים על המפה). נתונים אלו מראים את הרוחות המערביות-דרומ מערביות העוצמתיות שנושבות בגובה רב בזמן סופות חורף ומספקות את הלחות לצירת גשמיים ושיטפונות המשיעים חלוקים אל אגן ההשקעה (צבע כחול). (ה,ו,ז) שונות רוח משלוש תחנות שממוקמות בתחום בקע ים המלח. נתונים אלו מראים את שינוי הכוון של הרוח הסינופטית לרוח עצמתית דרומית בהשפעת הטופוגרפיה של בקע ים המלח. רוחות אלו מייצרות את הגלים בים המלח שיוצרים הobile מועדףת של חלוקים לאורך החוף, צפונה משפכי הנהלים (צבע ירוק). הצבעים הכהים ביוטר מסמלים רוחות חזקות מ-10 מטר לשנייה.



איור 5.4.5. מיפויות סחף ורכסי חוף משוכנים צפונה מהסביבה המודרנית והקדומה בבקע ים המלח. (a) חתך סכמטי מההעתק המערבי של בקע ים המלח לכיוון ים המלח המודרני, המראה את המיקום הגיאומורפי-סטרטיגרפי של שלושת הסביבות הגיאומורפיות הנידונות. מיקום של האטרים מופיע באיזור 2. (b) צילום רחפן זוויתי של מניפת נחל קומראן, ו (c) אורתופוטו של נחל קומראן (1980), המראים את המשיכה צפונה של רכסי חוף שהושקעו כל עוד הערוץ היה מחובר לקו החוף של המאה ה-20. מרוגע שירידת המפלס האיצת הנחלה התנתק מהחוף הנסוג במהירות ומיפוי סחף אלוביאלית החלה להתחפה על גבי המדף החשוב. (d) צילום רחפן זוויתי של מניפת נחל תמרים, ו (e) אורתופוטו של נחל תמרים על גבי המדף החשוב. (d) המראים את המשיכה צפונה של מניפת הסחף ורכסי חוף שהושקעו תחת משטח הגלים של אגם (2012), המראים את המשיכה צפונה של מניפת הסחף ורכסי חוף שהושקעו תחת משטח הגלים של אגם הליסן מהפליסטוקן המאוחר. האסימטריה בהשקעת הסדימנט לכיוון צפון נצפית גם בקוי הגובה המופיעים ב (e), התואמות למדרגות של חופים קדומים ותת-מקבילים לסתרייק של העתק מצפון לערו, בעוד שמדרום לקוי הגובה ניגשים את העתק באלכסון.

תודות

הפרויקט ממומן מפרויקט ים המלח של המכון הגיאולוגי הממומן על ידי משרד רה"מ, ולקראנות הבאות: הקרן המדעית למדעים 1471/18-ISF – נדב לנסקי, 946/18-ISF – יהודה אנזל, הקרן הדוא-לאומית ישראל אריה"ב - 2018/035-BSF-NSF, 2019/637-BSF-NSF – נדב לנסקי, מלגת עזריאלי – חי אייל. תודה לסלבה קופמן על העיצוב והייצור של מארזי החישנים בחלוקת החכמים. תודה מיוחדת לצוות "תגלית": סילבי גונן, שחר גנ-אל ומאריר יפרח. תודה לעמיתנו זיו מור, עידו סיורוטה, יצחק חמدني, יובל שמילוביץ, רענן בודזין, אורית מליק, הלל לוצקי ולירן בן משה על העזרה בעבודת השדה והמעבדה, ותודה לוולדימיר ליחובסקי, אקרט מייברג, אפרת מוריין ואיתי חביב על הדינונים המעניןניים. תודה לדורייטה-רוזטקייר אדלשטיין ולידה שנדריך על מתן הסיווגים הסינופטיים בעקבות Alpert et al., 2004, וליאוב לוי על שיתוף נתוני רוח וגשם מהשירות המטאורולוגי. תודה ליאוב בלבן על הגרפיקה – איור 5.4.1, ולבת-שבע כהן על הערכה הgrafית.

5.5 בדיקת היתכנות להמסת וסילוק המלח מקציר המלח באמצעות המסה במים ומי רצז מהתפללה - קינטיקה של המסת הליט

גבריאל, א.¹, רזניק א.¹

1 המכוון הגיאולוגי

5.5.1 הקדמה

פרויקט קציר המלח המוקדם על ידי מפעלי ים המלח מתוקף החלטת ממשלה משנת 2012 כולל את הובלת המלח הנក挫 בבריכה 5 אל האגן הצפוני של ים המלח והטמנתו בים המלח. נפח המלח העתידי להיות מוביל עומד על כ-16 מיליון קוב מלח לשנה (16 מלמ"ש) במשקל המוערך על ידי המפעלים בכ-20 מיליון טון. שינוי נפחים כה גדולים של מלח דרך מצרי לינץ', והטמנתם בעומק הים מעלים חששות כבדים בדבר הנראות וטבעת הרgel העצומה הצפואה לפרוייקט על מצרי לינץ' ודרום ים המלח. מפעלי ים המלח ערים לחששות אלו ופתרונות להצעות חלופיות להצעות המקורית לשינוי המלח לאגן הצפוני באמצעות מסוע שיחצה את מצרי לינץ' והטמנת המלח בדרךם הים תוך סתיימת מפרץ צאלים ובהמשך על ידי הובלת המלח בDOBROT צפונה יותר והטבעתו לבב ים. העבודה הנוכחית בוחנת הצעה חלופית לסילוק המלח המשלבת בין פרוייקט קציר המלח ופרויקט מוביל ים סוף ים-המלח, אם וכאשר זה יוקם. ההצעה בוחנת את האפשרות כי המלח הנក挫 יומס על ידי מי ים ו/או מי רצז ויובל צפונה במצב מומס ללא צורך בהקמת מסוע ותשתיות כבדות באגן הצפוני של ים המלח. מימוש ההצעה הנדרשה מותנה בהקמתו של פרוייקט מוביל ים סוף - ים המלח במתכונת הדומה לו שהוצאה בסקירה היתכנות של הבנק העולמי ב-2012 ואשר אישר עקרונית על ידי ממשלות ישראל וירדן.

5.5.2. שיטות

חומרדים

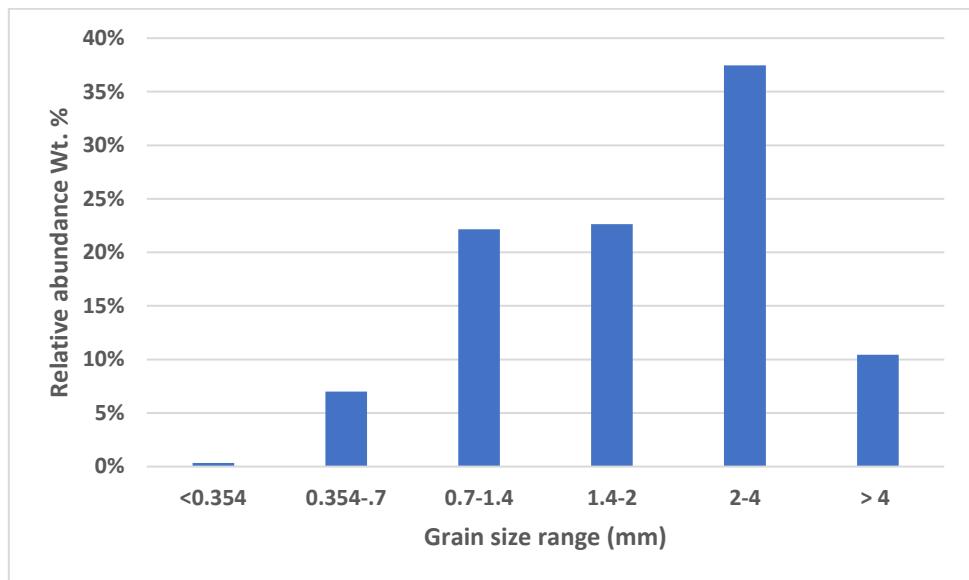
מלח מקציר המלח נדגם מסוללות בבריכה 5 בהן הוא נערם. הסוללות שנדגמו הן 154-1 ו-154-2 כאשר הראשונה היא סוללה שנקרה חצי שנה עד שנה טרם הדיגום בעוד השנייה היא סוללה טריה שהחילה מלח שנक挫 במהלך החודש טרם הדיגום. בהתאם לכך, הסוללה הראשונה הייתה מכוסה בשכבת דקה של אבק שהוסרה טרם הדיגום.

לצורך הגדרת תנאי הגבול של הניסויים אופיינו ההליט המוצק ותמייסות הקצה:

רמת הניקיון של המלח נקבעה על ידי המסתן המלאה ובדיקה היונים המומסים במים. בדיקה זו הראתה כי המלח הנក挫 הוא הליט בעל רמת ניקיון גבוהה מאוד ($\text{NaCl} > 99.5\%$). התפלגות גודל הגרגר של המלח הנក挫 נקבעה באמצעות סינון בනפות של דוגמאות מייצגות מכל ערמה. התוצאות מצבייעות על טחינה יחסית הומוגנית לגודל גראן שבין 0.354-0.354 מ"מ (איור 5.5.1).

מי ים נאספו מחוות הים של פלמחים. מי רcz מההתפלה (להלן מי_rcz) התקבלו באדייבות מתון ההתפללה של מקורות באשדוד.

האנליזות הכימיות של תמייסות הניסוי בוצעו במעבדות המכון הגיאולוגי.



איור 5.5.1. התפלגות גודל גרגיר של ההליט מקצר המלח של בריכה 5 (ממוצע של 3 ניסויים משתני ערמות מלח שונות)

3.5.5.3. מהלך הניסויים ותוצאות

על מנת לתאר באופן כימי-כימי את ראקטיבית ההמסה של המלח מקצר המלח (להלן הליט) במים ובמי_rcz, בוצעו ניסויים תרמודינמיים וקינטימיים תוך השוואת תוצאות ניסויי המסעה במים מזוקקים. ניסויי המסעה נערכו באופן מבוקר וביחסים שונים של מוצק (הליט) לתמיסה (טבלה 5.5.1). לאחר המסעה המלאה של ההליט נמדד הצפיפות וה מוליכות החשמלית של התמיסה. כמו כן, נערכו ניסויי המסעה בהם נמדד ה מוליכות החשמלית במהלך הפעולה כצבי המסעה. ניסויים אלו נערכו תוך כדי ערבות אינטנסיבי של גרגיר המלח והתמיסה באמצעות סטירר מגנטי.

בנוסף, הרכיבים הכימיים של התמיסות בסוף ריאקטיביות המסעה (טבלה 5.5.2) מודלו בתוכנת PhreeqC (Parkhurst and Appelo, 2013) לצורך חישוב דרגות הרויה של התמיסה.

(א) ניסויים תרמודינמיים (TD):

מטרת הניסויים התרמודינמיים היא לכיל את הקשר בין כמות המלח שהומסה למוליכות החשמלית, הצפיפות ודרגות הרויה בכל אחת משלוש התמיסות שנבחנו (מים מזוקקים, מי ים וממי_rcz).

ניסויי המסעה נערכו בסדרות של 7 מיכלים לכל Tamisah. כל סדרה כוללת כמות גדולה והולכת של הליט בהפרשיהם של 50 גרם מלח לק"ג Tamisah. עם ההגעה להמסה מלאה נמדד ה מוליכות החשמלית והצפיפות של התמיסה (איורים 5.5.2 ו- 5.5.3, בהתאם). פרמטרים אלו נמדד גם לתמיסות הניסוי

עצמן, ללא תוספת ההליט. כמות המלח המקסימלית שהומסה בכל סידרת ניסויים (פוטנציאלי ההמסה של כל תמישה) חושבה על ידי אקסטרופולציה של גרסיות פולינומיאליות שהותאמו בין המוליכות החשמלית לכמות המלח שהומסה ובין הצפיפות וכמות המלח שהומסה עד לערבים המקסימליים שנמדדו בניסויים בהם הוכנסה כמות מלח עודפת אשר לא התמוססה גם לאחר מספר שיעות (ראו קווים אופקיים המיצגים את ערכי שיווי המשקל וקווי גרסיה המבוססים על תוצאות הניסויים). על פי חישובים אלו הכמויות המקסימליות של הליט שהומסו במים מזוקקים,umi, ובמי ים רצ' הנים 302 ו- 266 גרם לקילוגרם תמישה מקורית (לפני ההמסה), בהתאם. ערכים אלו מתרגמים לפוטנציאלי המסה של 355, 310, ו- 279 גרם הליט לליטר תמישה מקורית (לפני ההמסה) בעבר מים מזוקקים,umi, וכי רצ' בהתאם.

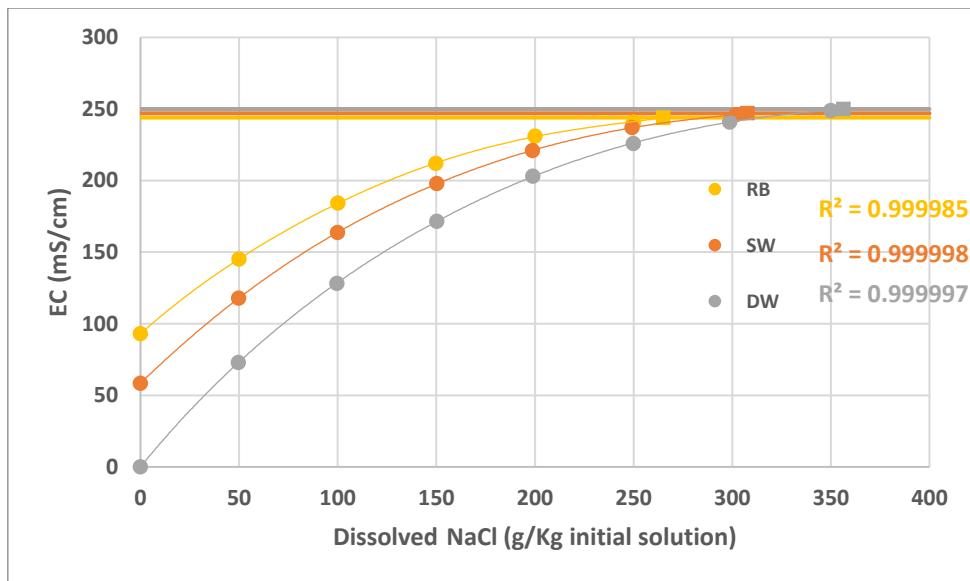
הבדלים אלו ממחישים את ההבדל בפוטנציאל ההמסה בין התמישות, וככזו מצביעים על ירידת בפוטנציאל ההמסה עם העלייה במלחות.

Exp. #	Grain size (mm)	Water type	Salt [C] (g/Kg initial solution)	EC (mS/cm)	T (°C)	pH	Leftover crystals?	Density (kg/L)	T (°C)
TD-1	Unsorted	DW	0	0.0106	23	7.45	No	0.9973	23.9
TD-2	Unsorted	DW	50	72.9	22.6	8.668	No	1.0307	23.9
TD-3	Unsorted	DW	100	128.3	22.4	7.02	No	1.0617	23.9
TD-4	Unsorted	DW	150	171.6	22.7	6.388	No	1.0914	24
TD-5	Unsorted	DW	200	203	22.6	6.04	No	1.1185	24
TD-6	Unsorted	DW	250	226	22.8	5.511	No	1.1448	24.1
TD-7	Unsorted	DW	300	241	22.9	5.5	No	1.1689	24.1
TD-8	Unsorted	DW	350	249	24.1	7.02	No	1.1923	24.5
TD-9	Unsorted	DW	400	250	24.1	7.16	Yes	1.1939	24.3
TD-10	Unsorted	SW	0	58.5	23	8.439	No	1.0270	23.8
TD-11	Unsorted	SW	50	117.9	23	8.416	No	1.0593	23.8
TD-12	Unsorted	SW	100	163.8	22.9	8.318	No	1.0903	23.8
TD-13	Unsorted	SW	150	197.9	23.1	8.288	No	1.1191	23.8
TD-14	Unsorted	SW	200	221	23	8.158	No	1.1453	23.9
TD-15	Unsorted	SW	250	237	23.3	8.038	No	1.1713	24
TD-16	Unsorted	SW	300	246	23.4	7.953	No	1.1968	24.2
TD-17	Unsorted	SW	350	247	24.1	7.88	Yes	1.1969	24.4
TD-18	Unsorted	RB	0	93	23.3	8.653	No	1.0479	23.8
TD-19	Unsorted	RB	50	145.2	22.8	8.539	No	1.0804	23.8
TD-20	Unsorted	RB	100	184.3	22.8	8.417	No	1.1106	23.8
TD-21	Unsorted	RB	150	212	22.8	8.32	No	1.1387	23.9
TD-22	Unsorted	RB	200	231	23.3	8.329	No	1.1659	24
TD-23	Unsorted	RB	250	241	23.4	8.146	No	1.1911	24.1
TD-24	Unsorted	RB	300	244	23.7	8.137	Yes	1.1980	24.2
K-1	1.4-2	DW	400	250	23.6	7.11	Yes	1.1983	24.4
K-2	1.4-2	SW	400	247	23.7	7.69	Yes	1.2018	24.4
K-3	1.4-2	RB	400	244	23.8	8.127	Yes	1.2034	24.7
K-4	2-4	DW	400	250	23.7	7.255	Yes	1.1987	24.5
K-5	2-4	SW	400	247	24.1	7.944	Yes	1.2011	24.9
K-6	2-4	RB	400	244	24.1	8.11	Yes	1.2031	25

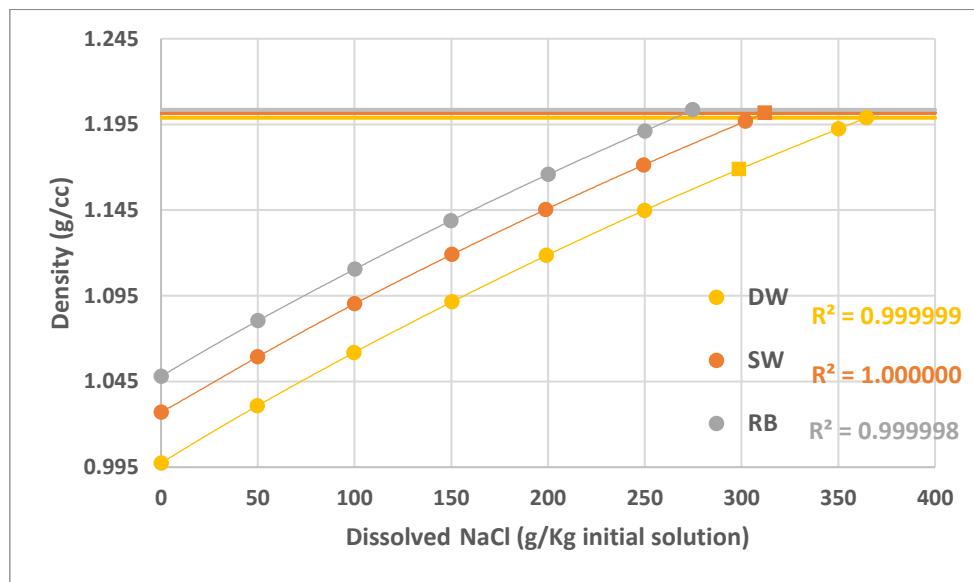
טבלה 5.5.1. פירוט מערך ניסויי ההמסה התרמודינמיים והקינטיים. הטבלה מפרטת את מספר הניסוי, האם המלח מערכות המלח נופה ואם כן, לאיזה טווח של גודל גרגר, סוג התמישה (DW - מים מזוקקים; SW - מים ים; RB - מי ים מהתפלח), כמות המלח שהוספה לתמישה (ביחידות של גרם מלח לקילוגרם תמישה לפני ההמסה), המוליכות החשמלית והטמפרטורה שנמדדה בסוף הניסוי לאחר ההמסה, ערך הגבה, האם נוטרו גבישים בתום הניסוי, ואצפיפות והטמפרטורה של הנוזל בתום הניסוי. יש לזכור שמכיוון שרackyty המסת המלח היא אנדרטרית קיימת משרעת טמפרטורה של 1.5 מעלות בין הטמפרטורה שנמדדה באמצעות חיישן המוליכות החשמלית בזמן אמת לבין הטמפרטורה של מד הצפיפות שנמדדה כשעה לאחר סיום התגובה.

mg/L	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Sr ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS	kgw/kgs
TD-1	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0	1.00
TD-2	20235	31	50	38	0.4	30321	30	119	50840	0.95
TD-3	37339	91	89	74	0.7	59071	44	159	96884	0.90
TD-4	57176	53	134	116	1.2	88395	54	191	146378	0.85
TD-5	75157	49	182	136	1.5	114636	67	315	190799	0.81
TD-6	91027	57	220	187	1.7	140712	80	331	232868	0.77
TD-7	106450	39	249	249	2.0	163286	94	403	271021	0.73
TD-8	120281	97	286	240	2.4	193452	76	450	315136	0.68
TD-9	122126	22	286	274	2.2	194748	101	479	318268	0.68
TD-10	12805	447	496	1562	8.2	24346	88	2865	42868	0.96
TD-11	32621	491	534	1574	8.4	55133	99	2953	93657	0.91
TD-12	51067	473	562	1585	9.1	82256	118	3329	139653	0.86
TD-13	71888	468	609	1592	9.2	112003	129	3381	190337	0.81
TD-14	87744	467	655	1633	9.4	136703	143	3287	230896	0.77
TD-15	99660	478	680	1547	9.4	162289	150	3250	268317	0.73
TD-16	117461	508	705	1642	9.8	188507	162	3348	312601	0.69
TD-17	120094	455	752	1694	10.2	194318	175	3517	321274	0.68
TD-18	21828	857	864	2800	15.0	40102	137	5615	72464	0.93
TD-19	42527	767	910	2733	15.2	71603	153	5743	124702	0.88
TD-20	60080	706	914	2682	14.9	98876	165	5620	169309	0.83
TD-21	81738	784	969	2760	15.5	128906	181	5772	221380	0.78
TD-22	100232	767	980	2665	15.3	154954	190	5635	265697	0.73
TD-23	111822	802	1027	2724	15.8	179824	198	5598	302270	0.70
TD-24	119563	783	1043	2714	15.6	194005	211	5654	324248	0.68
K-1	122150	19	296	284	2.3	196047	103	501	319656	0.68
K-2	120619	438	743	1669	9.9	194659	166	3570	322134	0.68
K-3	125237	838	1134	2951	16.9	198280	224	6130	335072	0.66
K-4	122103	26	276	265	2.1	193448	99	457	316880	0.68
K-5	127826	424	722	1613	9.8	194666	159	3387	329062	0.67
K-6	118665	813	1001	2618	15.3	192625	202	5552	321754	0.68

טבלה 5.5.2. הרכיב היוניים העיקריים של התמיסות מהניסויים התרמודינמיים והקינטיטיים (ביחידות של מיליגרם לליטר) בוגמר המסת ההליט. לצורך מעבר ליחידות משקליות מצוין גם ריכוז המים בתמלחות בוגמר כל ניסוי (ביחידות של קילוגרם מים לקילוגרם תמיסה - kgw/kg). הסטייה במאזן המטענים (reaction error – RE) בכל התמיסות אינו עולה על ±2%.



איור 5.5.2. מוליכות חשמלית נגד כמות המלח שהומסה בכל ניסוי. הקווים האופקיים מייצגים את ערכי המוליכות החשמלית המקסימלית בכל סדרת ניסויים אשר אליהם בוצעה האקסטרפלציה של הגרסאות הפולינומיאליות בהתאם לתוצאות הניסויים. DW - מים מזוקקים. SW - מים ים. RB - מי רצ' מהתפללה.

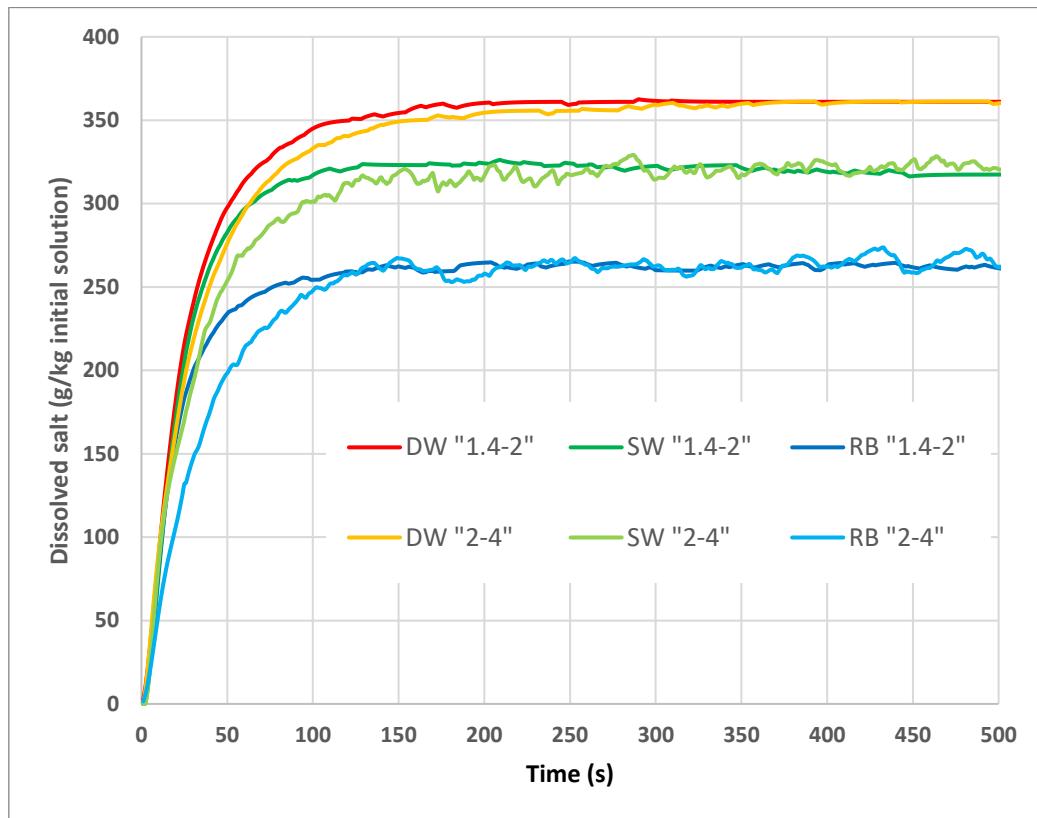


איור 5.5.3. צפיפות נגד כמות המלח שהומסה בכל ניסוי. הקווים האופקיים מייצגים את הצפיפות המקסימלית שנמדדה בכל סדרת ניסויים אשר אליהם בוצעה האקסטרפלציה של הגרסאות הפולינומיאליות בהתאם לתוצאות הניסויים. DW - מים מזוקקים, SW - מים ים, ו-RB - מי רצ' מהתפללה.

(ב) ניסויים קינטיים (K):

ניסויים קינטיים בוצעו על כמות קבועה ועודפת של מלח 400 גרם מלח לקילוגרם תמיסה) שהוספו בבת אחת לתרמיסות השונות (מים מזוקקים, מי ים ומי רצ') תוך שהן מעורבות ומעורבות באמצעות מגנט ובוהש מגנטי שנמצא בקרקעיתן. שתי סדרות של ניסויים בוצעו, האחת על מלח

בגודל גרגר של 1.4-2 מ"מ, והשנייה על מלח בגודל גרגר של 2-4 מ"מ. המיעקב אחר קינטיקת המסה ה证实 באמצעות מדידה רציפה של המוליכות החשמלית של התמיסה בזמן, ברזולוציה של שנייה, באמצעות חיישן מסוג WTW Multi 3630 (WTW). המוליכות החשמליות שנמדדו במהלך הניסוי הומרו לכמות המלח שהומסה בכל רגע נתון על ידי שימוש בקשרים האמפיריים שנקבעו בניסויים הtermodynamic (חלק א').



איור 5.5.4. כמות המלח שהומסה כפונקציה של זמן בכל ניסוי. הניסויים מצביעים על הגעה לשינוי משקל לאחר כ- שתיים וחצי דקות. ניתן להזות בברור כי עברו כל תמישה, קצב המסת המלח מהיר יותר כאשר גודל הגרגר קטן יותר.

5.5.4. דיוון

איור 5.3.4 מצביע על שתי נקודות מוכנות מהתיאוריה של קינטיקה של המסת אך חשובות לציין:

1. קצב המסת קטן ככל שהتمיסה קרובה יותר לשינוי משקל.
2. ככל שגודל הגרגר קטן יותר (דהיינו שטח פנים זמין גדול יותר) קצב המסת מהיר יותר.

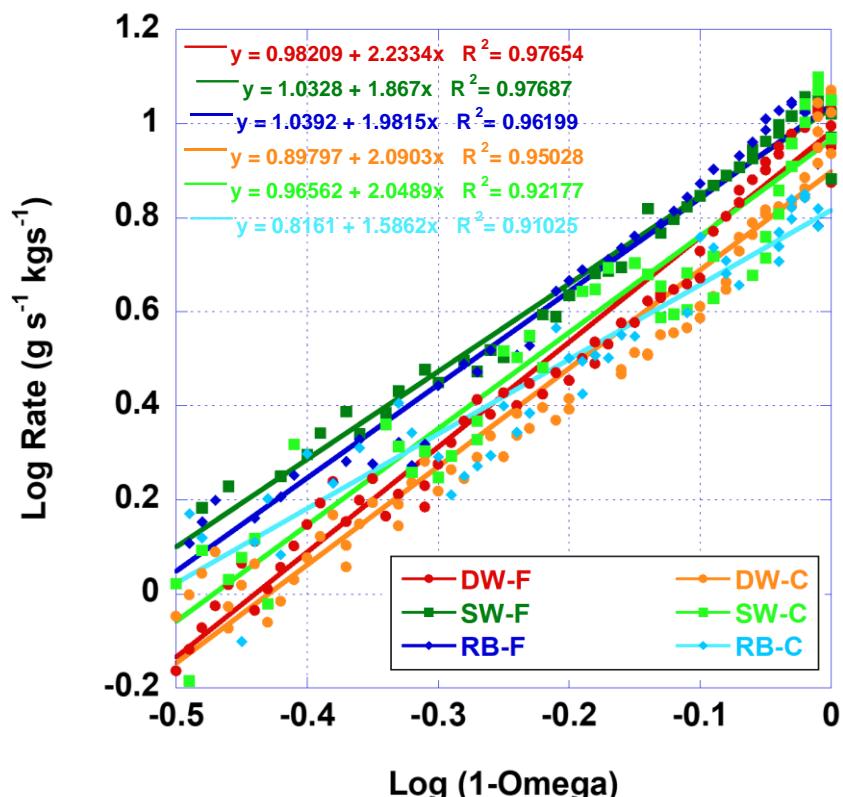
בנוסף, עד למכיוון של כ-80% מפוטנציאל המסת של המלח בכל תמישה, קצב המסת נותר יחסית ליניארי ופחות תלוי בשטח הפנים הזמין ובקרבה לשינוי משקל. הגעה לשינוי משקל מתרכשת בתוקן שתיים וחצי דקות בכל הניסויים למגוון תנאים הניסוי השונים מבחינת גודל הגרגר וההתמיסות השונות.

הניתוח הקינטי של הניסויים ה证实 על המשוואה הבאה (Brantley, 2008)

$$\text{Eq. (1): Log Rate (g halite kg solution}^{-1} \text{ s}^{-1}) = \log (k) + n \log (1-\Omega)$$

כאשר: χ מוגדר את סדר הריאקציה (ערך ממוצע של 10 ± 2), k הוא הקבוע הקינטי (ערך ממוצע של $0.95 \pm 10\%$) ו- Ω היא דרגת הרויה המוחשבת על ידי ה-C-Phreeq.

איור 5.5.5 מתרגם את תוצאות הניסויים על בסיס משווהה 1. הפיזור הנמוך המתkeletal מהקובע הקצוב בין ניסויי מראה שאין שונות כימי מובהק (אוטו חוק קצב ליחידת מסה) בין התמיוסות השונות וגודלי הגרגר השונים שנבדקו בניסויים. עם זאת, שטח פנים גדול יותר ליחידת מסה כפי שמתkeletal בניסויים בעלי גודל גראן קטן יותר, גורם לעלייה בקצב הריאקציה (איור 5.5.4).



איור 5.5.5. קצב ההמסה ביחסות של גורם הליט לשנייה לkilograms תמיסה מול המרחק משינוי משקל בסקלת log-log. סקלה זו מאפשרת הוצאה של קבוע הקצב וסדר הריאקציה בהתאם למושואה 1. (F) - פרקציית גודל הגרגר הדקה (1.4-2 מ"מ), (C) - פרקציית גודל הגרגר הגסה (2-4 מ"מ). DW - מים מזוקקים, SW - מי ים, ו-RB - מי רצץ מהתפללה.

5.5.5. השלכות על פרויקט קציר המלח

ניתוח קינטי/טרמודינמי המבוסס על תוצאות הניסויים המתוירים מאפשר לקבוע את פוטנציאל ההמסה של המלח מקציר המלח במים או מי רצץ מהתפללה אם וכאשר אלו יגיעו לדروم ים המלח במסגרת פרויקט מוביל ים סוף ים המלח: יודגש כי הניתוח כאן אינו מביא בחשבון את האתגרים הטכניים-הנדסיים-כלכליים במשמעותו ושל סילוק המלח מהאגן הדרומי לאגן הצפוני.

על פי מפעלי ים המלח, בפרויקט קציר המלח צפויים להיקצר כ-20 מיליון טון מלח לשנה. בהנחה והמפעלים בירדן (APC) קוצרים כ- 15 מיליון טון בשנה (הערכה על בסיס יחס שטחי האידוי), כמות המלח הכללית שיש להפטר ממנה היא כ-35 מיליון טון בשנה.

בבדיקה היתכנותה פרויקט ים סוף - ים המלח שנעשתה עבור הבנק העולמי על ידי המכון הגיאולוגי ותא"ל (Gavrieli et al., 2011), נקבע כי הזרמה של עד 400 מלמ"ש מי ים/מי רcz לא צפופה לשנות באופן מהותי את אופיו של הים.

על פי מספרים אלו, במידה ופרויקט המוביל ימומש יוכל בשלב ראשון הזרמה של הרף העליון של 400 מלמ"ש, אזי די בהמסה של כ-0.088 טון הליט למטר קוב (מ"ק) תמיסה (88 גרא' לליטר תמיסה) כדי לסלк את מלא משקל קציר המלח (35 מיליון טון בשנה) של שני המפעלים.

בפועל, פוטנציאל ההמסה של מי ים ושל מי רcz מהתפלת גובהים משמעותית מ- 0.088 טון הליט למ"ק תמיסה ועומדים על 0.310 ו-0.279 טון הליט למ"ק, בהתאם. דהיינו, המסה של 0.088 טון הליט למ"ק תמיסה מוצאה רק 28% ו-32% מפוטנציאל ההמסה של מי ים ומיל רcz, בהתאם. לכן, במידה וימצא הפתרון ההנדסי לשמר יחס קבוע של ערבות מלח ותמיסה במתකני ערבות/סחרור מתאימים, ותזרום כמות מי ים ו/או מי רcz בנפח של 400 מלמ"ש, פוטנציאל המסה רב לא ימושה וקצב המסה צפוי להיות מהיר מאד (פחות מ-20 שניות). בהתאם לכך, זמן השהות הנדרש של התערובת תמיסה-מלח במתќן הערבות צפוי להיות קצר ביותר.

לחילופין, מכיוון שכמות המלח הפוטנציאלית שנייה לסלק בהמסה על פי החישובים הנ"ל עולה משמעותית על הכמות השנתית של המלח הנוצר על ידי שני המפעלים, הרי ניתן יהיה להמיס את כל מלח הקציר משני המפעלים גם בנפחים קטנים מ-400 מלמ"ש. בהנחה כי תמצאה דרך להביא את התמיסות לרוויה בקצב שנצפה במעבדה (כשתי דקוט וחצי), אזי הנפח השנתי של מי הים הנדרשים לטילוק מלא המלח עומד על:

$$35 \cdot 10^6 \text{ Ton Halite} \div \frac{0.31 \text{ Ton Halite}}{m^3 SW} = \sim 110 \cdot 10^6 m^3 SW$$

ובמי רcz:

$$35 \cdot 10^6 \text{ Ton Halite} \div \frac{0.28 \text{ Ton Halite}}{m^3 RB} = \sim 125 \cdot 10^6 m^3 RB$$

ש להניח כי גם לאחר שיוסכם עליו בין הצדדים, יעבור זמן רב עד להוצאתו לפועל של פרויקט ים סוף ים המלח. מאידך אימוץ הפתרון של המסת מלח הקציר באמצעות מי הים מאפשר אגירה זמנית של המלח בבריכות תוך ידיעה כי עם הקמת הפרויקט ניתן יהיה בתוך שנים ספורות להmis ולסלק את כל נפח המלח שהצטבר עד אז. כמות המלח השנתית שנייה יהיה לסלק תוך הבאת מי הים לרוויה בהזרמה של 400 מלמ"ש עומדת על:

$$400 \cdot 10^6 m^3 SW \cdot \frac{0.31 \text{ Ton Halite}}{m^3 SW} = \sim 125 \cdot 10^6 \text{ Ton Halite}$$

ובמי רcz:

$$400 \cdot 10^6 m^3 RB \cdot \frac{0.28 \text{ Ton Halite}}{m^3 RB} = \sim 110 \cdot 10^6 \text{ Ton Halite}$$

כמויות אלו גובהות פי 3-3.5 ממכות המלח השוקעת בשנה במפעלים הישראלים והירדניים יחדיו.

כאמור, זמן השהות הנדרש על פי ניסויי המעבדה להגעה למיצוי פוטנציאל ה�性ה והגעה לשינוי משקל עומד על כשתי דקotas וחותמי. במידת הצורך ניתן יהיה לצמצם את זמן השהות הנ"ל באמצעות טחינת גרגירי המלח לגודל גרגר דק יותר מהנעשה כיום על ידי הדוברות על מנת להאיץ את קצב ה�性ה.

נקודה נוספת שיש לזכור היא שסביר שבמידה ובכל זאת ישאר מלח דק גרגר שלא עבר ה�性ה מלאה ניתן יהיה לסלקו בתרחיף אגב המסתור, לכיוון האגן הצפוני ובכך אף להגדיל יותר את כמות המלח הפוטנציאלית שניתן יהיה לשנע לאגן הצפוני.

כמתואר בהקדמה, המלצת הבנק העולמי, אשר אומצה בזמןו על ידי כל הגורמים המעורבים, הייתה להקים את מוביל ים סוף-ים המלח כולו בירדן ולשחרר את מי הים ו/או מי הרץ בפרקليسן שבدرום מזרחה ים המלח, גם הוא בתחום מלכת ירדן. מכאן שבכדי למש את הרעיון המועלה כאן היה צורך להוביל את המלח מקצר המלח של מפעלי ים המלח לתוך ירדן ומשם לבצע את העARBוב עם מוביל, או לחילופין, למשך חלק מנהר המים של המוביל לכיוון המפעלים ושם לבצע את ה�性ה. עם זאת יש לשקל בקפידה באם יהיה נכון לשחרר תמייסות אלו, לאחר ה�性ה, בזרימה חופשית דרך נחל ערבה, בין הסוללות של מפעלי ים המלח ו- APC שכן תמייסות אלו יהיו עדין בעלות פוטנציאל ה�性ה ולכנן הן עשויות להמס חלקיים של הסוללות הבנויים מהליט. כמו כן, עולה החשש להגברת התתחתרות בנחל העARBוב שעלולה לסכן את הבריכות גם כן. מאוחר וכך, אם ה�性ה של המלח מקצר המלח של מפעלי ים המלח יתבצע בשטח המפעלים הישראלים, עדין יהיה צורך להזרים חוזרת את התמייסות לממלכת ירדן לצורך שחזורם בפרקليسן, בהתאם להצעת הבנק העולמי.

מלבד השאלה הטכנית יש עוד לבחון את ההשלכות של ערבות של מי הים וממי הרץ אשר המיסו כמויות גדולות של מלח, עם ים המלח. חישובים תרמודינמיים ראשוניים מצבייעים על כך כי ערבות שכזה יהיה מלאוה-by-oultalting של מלח, בדומה למתරחש בדלתת המלח (Beyth, M., 1998, 1997 1989, Gavrieli et al., 1997, Gavrieli et al., 2009, Reznik et al., 2010, Reznik et al., 2012, Reiss et al., 2021). נושאים אלו יבחן בעבודות נפרדות.

תודות

לגב' שמיים שריקי מפעלי ים המלח אשר הדריכו אותנו וסייעו באיסוף מלח הקצר מהסוללות, לגב' נאיפה סובח אשר סייע בעבודת הניפוי ולצאות הגיאוכמאיות והגיאוכימאים במעבדות המכון הגיאולוגי אשרקבעו את הרכב המלח.

5.6 הזנת מלח מקציר המלח לנחל הערבה - הצעה להגנה מפני התחרותות הנחל ולהובלת המלח דרך הנחל לאגן הצפוני

לנסקי ג.ג.^{1,2}, בן משה ל.¹, אייל, ח.², אנzel, י.², קלבו ר.¹, ווביינקל ב.³, אברל ג.³, מייברג א.⁴,
דנטה א.⁵.

¹המכון הגיאולוגי

²המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית

³האוניברסיטה הטכнологית ברונשוויג, גרמניה

⁴המחלקה להנדסת מכונות, אוניברסיטת קליפורניה סנטה ברברה, ארחה"ב

⁵אוניברסיטת פיטסבורג, ארחה"ב

5.6.1 רקע

5.6.1.1 אתגרים למרחב האגן הדרומי של ים המלח קציר המלח – הובלת המלח הקצוץ ואחסונו

ההחלטה הממשלתית בעניין קציר המלח (2012) קובעת מפלס עליון לפני המים בבריכות האידוי באגן הדרומי של ים המלח, על מנת לאפשר את פעילות המלונות והתשתיות הנלוות לצד בריכות האידוי התעשייתית (רקע אזרחי מוצג בהמשך). מפלס הבריכות עולה בקצב של כ-2 מ' לשנה בשל הצלבות מלח בקרקעית הבריכות. לכן, על מנת לקבע את המפלס, יש לקצוץ מלח בקצב דומה להצלבות זו, המסתכמה לכ-15 מיליון מ"ק בשנה, ולהעביר את המלח אל האגן הצפוני. על פי התכננית המקורית, אמור להבנות מסוע מהאגן הדרומי אל שף נחל צאלים באגן הצפוני (איור 5.6.1), ומשם ולהלאה להסתמך על הובלה ימית לתוך האגן הצפוני, שם נפח אחסון המלח בלתי מוגבל (Lensky et al. 2010). המסוע היבשתי עובר דרך אזרחים עם תשתיות לא יציבה (בולענים, שקיעות קרקע, נחלים שמתחרטים ומתרחבים בהתמדה, פורט בהמשך). כדי להעביר את המלח מקצתה המסוע היבשתי, הלאה לתוך הים, נדרשת בניית תשתיות להובלה ימית באמצעות ספינות פריקה, שטוענות את המלח בחוף ופורקות אותו בים (*split barge*), או על ידי צינורות סילוק והובלה בלחץ (*slurry*). "ישום שתי חלופות אלו בים המלח אינו פשוט בשל התמודדות עם קרקע שאינה יציבה, לחוף ים נסוג, והצלבות מלח על כל מתקן הטעול בים (" Arnon et al. 2016, Lensky et al. 2016, Sirota et al. 2016 2017a,b). האתגרים שפורטו לעיל מציבים סימן שאלה על יישומות הביצוע של החלטות הממשלה בעניין קציר המלח על בסיס הרעיון המקורי של הובלת מלח והשלכתו לעומק האגן הצפוני.

במידה וההובלה הימית תתעכב, כמוניות גדולות של מלח מהקצר יישארו באזורי שבין האגן הדרומי לצפוני. לשם המחשה, בתום 30 שנה, בהנחה שקצב יצירת המלח יישאר קבוע, יקצרו ויערמו כ-450 מיליון מ"ק של מלח (מעל 4 פעמים הנפח של הר מצדה). מספר אפשרויות הוצעו, ביניהן: דחיקה

של מלח מהיבשה לאגם, בסמוך למפרץ פיאס (כ-60 מיל"ק), אחISON מלח למרחב מיצרי לינע' המפריד בין בריכות האידיוי לאגן הצפוני (כ-150 מיל"ק); אלו יכולים לתת מענה על חלק קטן מהנפח של המלח הקוצר ואינם נתונים מענה לפתרון ארוך הטווח. לחלופות אלו יש השלכות נזיפות וסביבתיות והן צורכות אנרגיה בהספק גבוהה. חלופה של המשא על ידי מי ים במסגרת תעלת הימים הוצאה לפניה עשור במסגרת מחקרים של חלי'י ונידון לאחרונה מחדש (גבריאלי ורוזניק 2022); בעת זו לא נראה שחלופה זו ישימות גאופוליטית. בעבודה זו נבחן חלופה של הטעת מלח מŹציר המלח באמצעות התמלחות השארתיות המוזמת במורוד נחל הערבה אל האגן הצפוני (מאפייני הזרימה בנחל הערבה מפורטים בהמשך). במידה וחלוּפה זו תמצא ישימה, היא תהיה יעילה אנרגטית (שימוש בכח הזרם של הנחל המונע מהפרש הגבהים והשיפוע), ויתכן שתמנע הקמה מأتגרת ומורכבת של התשתיות שתוארו לעיל.

התשתיות נחל העדבה - הגנה על סוללות בריכות האידיוי

נחל הערבה חטור בתחום משקעים אגמיים הולוקניים (תצורת צאלים) המורכבים ברובם מסילט וארגונייט (Bookman et al. 2004); משקעים אלו מוחופים בשכבות מלח צעירה (שקעה מאז שנות ה-80 של המאה שעבירה) שהולכת ומתuba לכיוון צפון (Dente et al. 2017, לנסקי וחוב' 2020g). עם ירידת המפלס של האגן הצפוני בעשורים האחרונים, נחל הערבה מתהדר, מתפתל ומשנה רוחבו (איור 5.6.1); במקטע הדרומי בו הנחל זורם בין בריכות האידיוי של מפעליים המלח הישראלי (מ"ה) והירדן (APC), התשתיתות והhaftפות הנחל מסכנת את יציבות הסוללות התוחמות את בריכות האידיוי. הוקמו מתקנים ריסון להרחקת הנחל מה솔לות של הבריכות, משני צדי הנחל. ביום מקודמת תכנית להקמת סכר (סכר A) בתחום הנחל, מצפון לבריכה 5 הישראלית (ראאה מיקום באיור 5.6.1), שטרכטו מניעת התשתיתות במקטע שבין הבריכות. עם הזמן, התשתיתות שתשתמש במורוד הסכר צפואה לפגוע בתחום הסכר, ולכן מתכננים להקים עוד סכרים במורוד, כדי להגן על הסכר העליון. בעבודה זו נבחן דרכי לשימוש במלח העודף מŹציר המלח לצורך שריוון קרקעית הנחל במורוד סכר A, ובכך גם להאט או לבלום את התשתיתות במורודו, וליתר את הצורך בהקמת מתקנים הנדסיים נוספים לאורך הנחל.

5.6.1.2 רקע אזורי – הסביבה הגאולוגית, גאומורפולוגית ולימנולוגית

ים המלח בניו מאגן צפוני عمוק (כיקום, עומק של 280 מ') המשתרע על פני שטח של מעלת מ-600 קמ"ר (Sade et al. 2014), ומאגן דרומי רדוד שמשמש בעשורים האחרונים בritchות אידיוי לשם הפקת אשלג וחומרים נוספים. מפלס האגן הצפוני יורד בקצב של מטר בשנה בשל חפיסת מים במעלת אגן ההיקוות (בעיקר הירדן) ופעילות מפעלי האשלג (Lensky et al. 2005, לנסקי ודנטה 2015). ההזנה של המים מהאגן הצפוני לדרומי, שהינו גבוה יותר, מתבצעת באמצעות תחנות שאיבה של מ"ה ו- APC. שני האגנים מבדלים במבנה הגאולוגי המורם של ה"לשון" (היה מכונה חצי-אי הלשון), שמערב לו זורם נחל הערבה; נחל זה מנוקז את מזרח הנגב, הערבה, ומערב אדום. במורודו – עבר הנחל בין בריכות האידיוי של המפעלים, ובו מזרמות התמלחות הסופיות של המפעלים אחרים מיצוי המינרלים (לנסקי וחוב' 2014, 2020a). במושצאו של נחל הערבה לים המלח (אגן צפוני), נוצרת מכך הדלתא מתקדמת מתחת למים בתחום האגם הנסוג (לנסקי וחוב' 2020b,g). הספיקה השנתית

הכוללת של התמלחות הסופיות היא מעל ל-300 מיליון מ"ק לשנה (ישנו רכיב נוסף של דלייפות מהבריכות, Levy and Gvirtzman 2021; צפיפות התמלחות גבוהה מאוד, כ-1.35 ג'ר' לסמ"ק (לנסקי וחוב' 2011, 2014). בנוסף, בנחל זורמים מי שטפונות בספיקת שנתית של כמיליון מ"ק לשנה ובשנים גשםות במיוחד יכול להגיע לעשרה מיליון מ"ק. כיוון שמלס האגם יורד (ארכיים מטרים במהלך חמישים השנים האחרונות), ושפך הנחל מונדק בהתאם, הזרימה בנחל סוחפת חומר מהקרקעית ויוצרת התחרות לאחרר ועליה בפייטוליות הנחל (Dente et al. 2017). תגובה הנחל לירידה של מלס האגם תלואה גם במבנה הטופוגרפי הנחשי ובקצב בנייה דلتת המלח בmouth הנחל (לנסקי וחוב' 2011); ככל שהמדרון תלול כך התחרות לאחרר תהיה עצמתית יותר (Dente et al. 2017, Eyal et al. 2019).

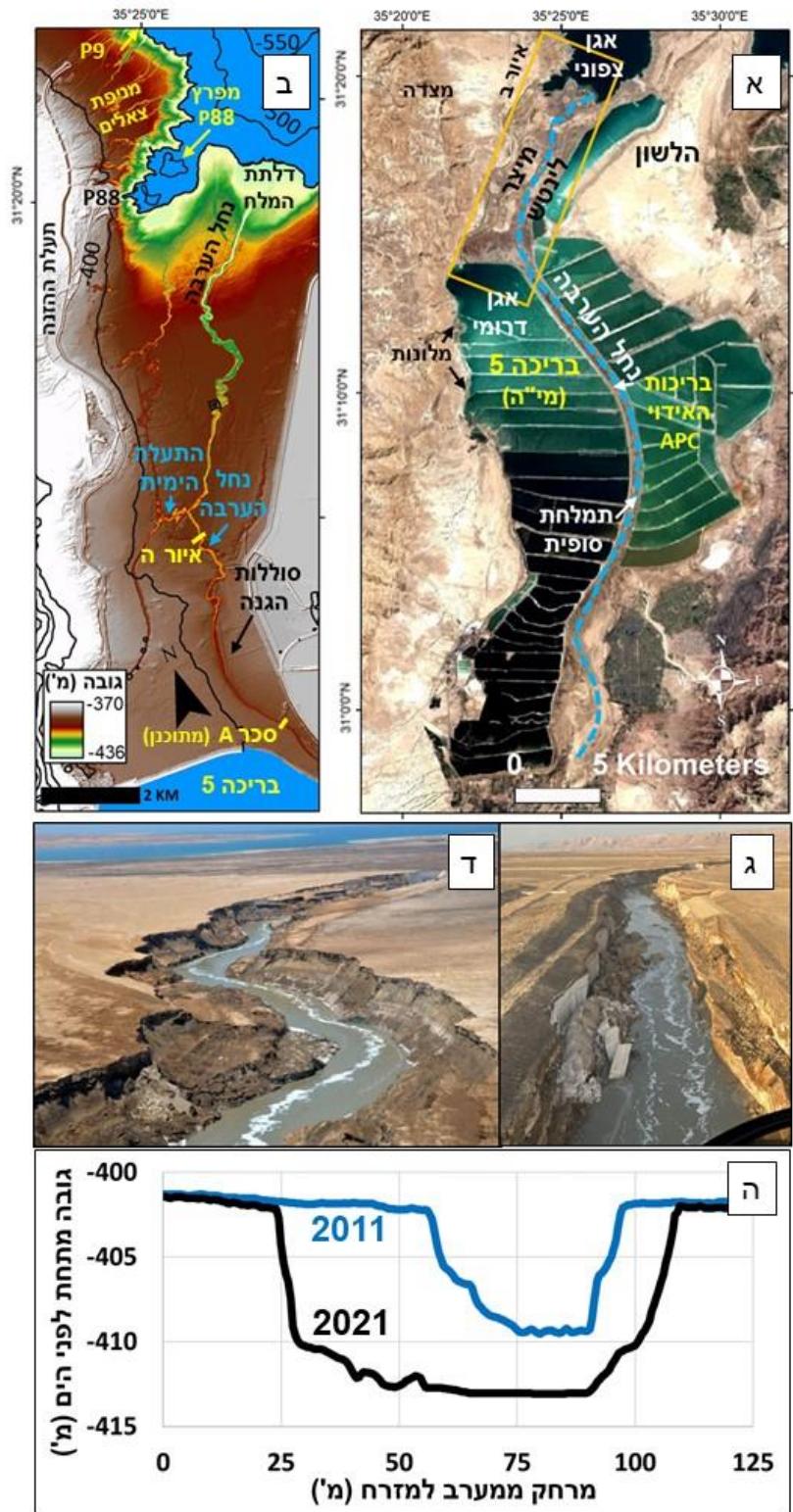
את מאפייני עמודת המים של ים המלח עם התיחסות להשפעות הצפויות מפייזר מלח מהקצר וואחסון המלח, ניתן למצוא בדוחות ומאמרי המכון הגאולוגי (לנסקי וחוב' 2011א,ב, Lensky et al. 2010, 2013-a-f, 2016, 2017a-b, Nehorai et al., 2013 a-b).

אי הייציבות של התשתית באזורי נבעי מספר גורמים: (א) החוף של האגן הצפוני של ים המלח משתנה באופן תדיר, מלס הים יורד ובהתקף קרקעית האגם עם המבנים הטופוגרפיים וסדיינטריים מיוחדים. סופות חוף עם רוחות עצמאיות מייצרות גלים אשר בתורם מייצרים מצוקי חוף (Enzel et al. 2022) ומשיעים חומרים שמנגנים עם הנחלים כולל חילוקי נחל, לאורך החוף ופייזר המלח בים. (ב) בולענים מתפתחים לאורך חוף ים המלח וכן במצרים לינץ', אלו מצויים באזוריים בהם קבורה שכבת מלח בתת הקרקע, בדרך כלל בין קו החוף (כיום, רום 437 מ') לבין סביבות רום 400- מ' (Abelson 2021, Abelson et al. 2020). (ג) שיקעות קרקע משמעותיות נמדדות לאורך חוף ים המלח (Yechieli et al. 2016). (ד) התחרותות נחלים (כמפורט לעיל ורחבה בהמשך).

5.6.1.3 רקע תיאורתי ופער ידע

גאומורפולוגיה פלוביאלית והשפעת סדיימנט / התחרותות

הSHIPOU הטבעי של נחלים אלובייאליים (SHIPOU שיווי המשקל) נוצר מהמאפיינים ההידרו-אקליםיים של אגן הניקוז, מספיקת הסדיימנט וממאפייני החלוקים המגיעים מהמעלה והמוסעים למורדר (בן משה ולנסקי, 2020). עליה בשיפוע הנחל אשר אינה נובעת מהמשתנים שפורטו לעיל, תגרום לעליה ביכולת הנחל להוביל סדיימנט ובהתאם לאזירת חומר בלתי מלודק מקרעית האפיק ולהתחרותות. מאז תחילת שנות ה-90 של המאה שעברה, מתרחשת התחרותות בנחל הערבה עקב חטיבת בתימטריה התוליה המשיפוע שיווי המשקל שלו בשפך הנחל אל חוף ים המלח הנסוג (Dente et al. 2017). התחרותות מסוג זה מתרחשת ביום בחלק ניכר מהנחלים המתנקיים לאגם (בן משה ולנסקי, 2020; 2022, Ben Moshe et al., 2008, 2020). והוא מלווה בדרך כלל בשינוי ברוחב ובפייטוליות הנחלים (Dente 2017, 2018, 2021). ניתן לאמוד את קצב התחרותות הצפوية בעתיד בשילוב שיטות תיאורטיות ואמפיריות, אולם אנו מוגבלים ביכולת החיזוי לשינויים עתידיים בחותך הרוחב ומידת הפיתוליות של הנחלים.



איור 5.6.1. א. מפת אורטופוטו של דרום האגן הצפוני, מצר לינטש, והאגן הדרומי של ים המלח, עם ציון האזוריים והאזורים המזוכרים בדו"ח. המלבן הכתום מסמן את תחום מפה הגבהים. ב. מפה גבהים של אזור מצר לינטש ונחל הערבה. הקוו החזוב מסמן את מיקום חתך הרוחב באירור ה. ג. ד. צילום אוויר אלכסוני של נחל הערבה באזור שמדרומים למפגשו עם התעללה הימית (מבט דרומה למעלה הנחל), ובאזור שמצפון למפגשו עם התעללה הימית (מבט צפונה במורד הנחל). ה. חתכי רוחב של נחל הערבה בשנים 2011 ו-2021, המציגים את התרחבות והתعمקות תעלת הנחל.

כאשר השכבה הפעילה בנהל (שכבות החומר האלביאלי בקרקעית האפיק המוסף כגروفת, active layer) מכוסה בחלוקים גסים, אשר מאמץ הגירה הקריטי הנחוץ להסעתם גבוה ממאם הגירה של הזרם, נוצר שרiron של קרקעית הנהל; השרiron מגן על השכבה הפעילה מפני בליה וגורם לעלייה בשיפוע שיווי המשקל של הנהל (van den Berg 1995). שרiron יכול להתפרק כתותזה מתחליכים טבעיות (לדוגמה 2011 Storz-Peretz et al., 2022). או עקב התערבות מלואכותית שמטרתה להאט או למנווע התחרות (Czapiga et al., 2022). לצורך השגת אפקט שרiron מיטבי יש לדעת את ספיקת הסדימנט וגודל הגורר המתאים, את מספר ומיקום נקודות הזנת הסדימנט לאורך האפיק, את שיטת הזנת הסדימנט, מאפייני תשתית הנהל, ואת התగובות הגיאומורפולוגיות הצפויות להזנה (לדוגמה שינויו פיתוליות עקב הצטברות סדימנט במיאנדרים, היוצריםشرطונות).

הידראוליקה של הובלות סדימנט בתעלת פתונה

כדי לאמוד את יכולת השרiron של קרקעית הנהל למניעת התחרות, ויכולת ההובלה של מלח כתחריף בתמלחת נחל הערבה, אין די בחישובים תיאורתיים אלא דרושה גישה משולבת של תיאוריה, ניסוי מעבדה וניסוי שדה. הובלות מלח קצר בנחל הערבה בתמלחת הסופית של המפעלים שונה לחילוטין מהובלות חול סילט וחרסית בנחלים ורגילים. לדוגמה, כח הציפה של גוררי מלח בתמלחת הסופית גדול עד פי שלוש מהציפפה של גוררי סילט במים מתוקים (על פי הפרש צפיפות בין הגרגירים לנוזל מנורמל לצפיפות הנוזל), וכן צמיגות התמלחת גבוהה פי עשר משל מים מתוקים, Weisbrod et al. 2016 – אלו משפייעים מהותית על יכולת ההובלה של חלקיקים ועל יכולת החישוב של יעילות ההובלה. בגישות המקובלת בהנדסה וניהול של נהרות ותעלות פתוחות, מקובל להתחילה בחישובים המבוססים על ניסיון אמפירי שהצטבר לאורך השנים; לפניו כל יישום של פרויקט הנדי בנהרות, מבצעים גם ניסויים מקדים, בשל פער הידע בתחום ההובלות של סדימנטים בנהרות. במקורה של הובלות המלח בתמלחת של נחל הערבה, השאלות מתרחבות בגלל חסר בנסיון קודם עם התכונות הייחודיות, ומפני שיש מרכיבות נוספות שדרשות חקר מקדים:

1. התמלחת בעלת תוכנות שונות מהותית ממים מתוקים ואף מים (צפיפות גבוהה בכ-35 אחוז ממים מתוקים, והצמיגות גבוהה פי עשר).
2. המלח בעל צפיפות נמוכה מרוב החומרים המושעים בנחלים ותעלות "רגילים", ובנוסף, המלח מגיב בצורה של גיבוש או המסה, בהתאם לתנאים המשתנים לאורך הזרימה בנחל (שינוי מליחות וטמף) וכתוכאה מכך גוררים יכולים להתגבש בקרקעית ולשרין אותה, או להיפך, להתמוסס במהלך שטפונות עם מים מתוקים.
3. השיפוע לאורך הנהל משתנה כל הזמן, כתגובה לירידת המפלס ולהגובת הנהל. זהו מקרה החורג מהמודר בנחלים בעולם, וזה מקרה מאייג במיוחד בתכנון מערכות ניהול של נחל.

כאשר מתכוונים פעילות הנדסית בנחלים רגילים, מקובל לחשב את גדי הגורר שיובלו כתחריף או כגروفת באמצעות משוואות ידועות כגון משוואת Rouse ומערכת משוואות שפותחה ע"י Cheng (2009). על מנת לחשב את קצב הובלות סדימנט בתחריף בתעלת פתונה יש לבצע אינטגרל לכל עמודת המים של מכפלת ריכוז הסדימנט ב מהירות זרימתו ורוחב התעלה (בהתה של תעלת מלבנית). את החישוב ניתן לבצע בהליך שהוצע ע"י Van Rijn (1984), ואת קצב הובלות גروفת בתעלת ניתן להעריך באמצעות מערכת משוואות אמפירית שפותחה (במעבדה) ע"י Meyer-Peter

רבות כגון גיאומטריה מלכנית של חתך האפיק, התפלגות גDAL גורגר, מאמץ הגזירה הקרייטי לניטוק גרגרים בגודלים שונים מהקרקעית, מוקם ההפרחתה (במקרים בהם מאמץ הגזירה נמוך ממאם הגזירה הקרייטי), ומספר רינולס (mbeta את היחס בין כוחות האינרציה לבין כוחות החיכוך בזרם). כמו כן חישובים מחויבים הזנחות כגון השפעת גdots הטעלה על פרופיל הזרימה, וההשלכות של שינוי מהירות ולחץ חדים בין שכבות שונות בזרימה טורבולנטית (לדוגמה, Afzal and Gersten, 1996). מסיבות אלו, חישובים תיאורטיים יכולים לשמש כבסיס לתכנון ניסויים במעבדה ובשיטה, אך אינם מהווים תחליף למחקר אמפירי. לכן, אין תחליף לניטור בשטח על מנת לכמת את הסעת הסדימנט המוזן, למדוד את השינויים בגיאומטריה של תעלת האפיק, ולהקטין את אי הוודאות בניהול נכון של הזנת הסדימנט לנחל (Arnaud et al., 2017).

5.6.2. הצעה למחקר בנושא הזנת מלח לנחל הערבה - הגנה מפני התהתרות והובלת המלח לאגן

הצפוני

5.6.2.1 מטרות המחקר

מטרת המחקר היא מציאת הדרכים לאופטימיזציה של הזנת מלח לנחל הערבה, על מנת לעמוד במידדים של: 1) מזעור התהתרות במورد נחל הערבה (מתחת לסכר A המתווכן), ו- 2) הובלת כמות מלח גדולה ככל שניתן (עד 15 מיליון מ"ק לשנה). עמידה במידדים אלו תקטין מאוד את התהתרות הנדסית ואת הפרעה הנוגעת לאזור כיוון שהנחל "יעשה את העבודה" (פתרון מבוסס טבעי), וגם תקטין את הצורך בהבאת חומרים וכיור אנרגיה לייצור עוד סקרים ומוסעים.

5.6.2.2 שאלות המחקר

1. מהי התפלגות גודל הגרגר האופטימלית להשיג את שני היעדים? לשני דרישים גרגרים גסים ואילו להובלה כתרחיף דרישים גרגרים דקים ככל שניתן.
2. מהי שיטת הזנה האופטימלית? ישנן דרכים רבות להזין חומר גרגרי בנهر, מה היא הדרך המתאימה ביותר במקרה המוחדר של נחל הערבה?
3. מהי הדרך האופטימלית לפיזור המלח לאורך הנחל, לעומת זאת? ברווח שככל שהוא יותר נקודות הזנה במورد הנחל, השליטה בתהילך תגדל.
4. מה ספיקת המלח המרבית שניתן להזין, כתלות בגודל הגרגר, כדי לעמוד בשני היעדים במקביל?
5. מה יהיו התగובות הגאומורפולוגיות של הנחל לאורך הנחל ושינויים לאורך זמן? שינוי בפיתוליות? רוחב הנחל? בניית דلتא? כל אלו תחת תנאים של הזנת מלח במעלה וירידת מפלס במورد.
6. כיצד משפיעים שיטפונות של מים מתוקים שבאים בספיקה גבוהה ובועל יכולת המסה של המלח באפיק?
7. שאלת הנפחים – בהנחה שהנחל יקח את כל כמות המלח, כמה שנים ניתן המשיך לתת לנחל להסיע את המלח עד שהמעורומים התתי ימיים וдолתת המלח יגיעו לתחנות השאיבה (מי"ה – P9, APC)?

5.6.2.3 גישת המבחן

בשל מרכיבות הבעה של הובלת חלקיי מלח באמצעות זרימה בנחל של תמלחת ואחר כך באגם, ושל פער הידע בתחום זה, המבחן המוצע ישלב את שלוש הגישות המקובלות: תצפיות וניסויי שדה (המכון היגיולוגי והאוניברסיטה העברית), ניסויים במעבדה (*Technical University*) (University of California Santa Barbara, USA), והדמיות ממוחשבות (*Braunschweig, Germany*). המבחן מתוכנן באופן שלוש הגישות מובולות על ידי מומחים מוביילים בתחום אלון, והגישות מזינות זו את זו; ככל שהפרויקט יתקדם, פער הידע יצטמצמו והבסיס המדעי להמלצות יתחזק.

3. צפי לישימות המבחן

לאחר בדיקות מקידמות, נראה שבסבירות גבוהה - ניתן ליישם את היעד הראשון של הזנת מלח לשם הגנה מפני התחרות הנחל במورد סכר A. השאלה היא איך לעשות התהילה באופן אופטימלי. במידה ויתברר שלא ניתן למנוע את כל התחרות, המשמעות היא תוספת מתקנים הנדסיים במورد הנחל כדי לשמר על סכר A. לגבי היעד השני של הזנת מלח אך שיובל כתרחיף יהיה לפחות, כאן יש שאלה יסודית, כמה ניתן להוביל בתנאים מיטביים? אלו פעולות נדרשות כדי "לעזר" לנחל להגיע להובלה של 5% נפח של גרגרים בתמלחת הזורמת? בעובדה זו נבחן את התנאים הנדרשים כדי לעמוד ביעד זה, ויתכן, שיעד זה יושג רק בהתערבות הנדסית מסיבית (טחינה ופיזור של המלח הקצוץ) באופן שקשה לישום. ככל שנתקדם במחקר ובניסויי השדה, נדע יותר. אנו מודיעים לך שהישום של קציר המלח והובלת המלח צפונה עומד בלוחות זמינים שדורשים מחקר מהיר מאוד כי המלח לא יכול לחכות בערמות בגין הדומי. עם זאת, כפי שציינו בפתח, יישום ההובלה הימית כרגע לא נראה באופן, ויתכן שגם אין נסיבות ונויפות. לכן קשה להמעיט בחשיבות מחקר זה – יש לו פוטנציאל לענות על צורך הנדסי-סביבתי אדיר למרחב ים המלח, אתגר שילך ויגבר בשנים הבאות.

מקורות

- אבני, י., פילין, ש., זילברמן, ע., 2012. התפתחות מניפת נחל צאלים והמלצות למיקום תשתיות במרחבי המניפה. דוח מכון גיאולוגי GSI/3/2012, 50 עמ'.
- אבני, י., זילברמן, ע., שירב-שורץ, מ., כץ, ע., בן משה, ל. (2004) תגوبת המערכות הגיאומורפיות לירידת מפלס ים המלח וההשלכות על התשתיות ההנדסיות לאורך חוף המערבי, דוח המכון הגיאולוגי GSI/18/2004.
- בן משה, ל. (2006) תגوبת פרופיל אורך של אפיקים אלובייאליים לשינויים במפלסי ים המלח במאה העשרים, דוח המכון הגיאולוגי GSI/02/2006.
- בן משה, ל., לנסקי, נ. (2020) התורחות מתגברת של נחל 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 בשיפור נחלים אלובייאליים: דוגמאות מאזור ים המלח, דוח המכון הגיאולוגי GSI/12/2022.
- בר, ג., גבריאלי, א., סוועד, א., נוף, ר., ברנסטיין, מ., 2020. בולענים ושיטפונות בחוף ים המלח: מבליעת נחלים והמסת מלח לשינויים גיאומורפולוגיים. מתוך: שלו, א. (עורך) תגوبת התשתיות בגין ים המלח לשינויים הטבעיים ומעשה ידי אדם: מסגרת רב שנתית לניטור ומחקר, 2018-2028. דוח מכון גיאולוגי GSI/33/2020, עמ' 70-85.
- גבriali, A., Rznicik, A. (2022) בדיקת היתכנות להמסת וסילוק המלח מקציר המלח של בריכה 5 לים המלח באמצעות המסה במ' ים ומ' רcz מהתפללה - קינטיקה של המסת הליט. דוח המכון הגיאולוגי GSI/13/2022.
- כץ, ע., הפט, ה., אלמוג, ע., 2008. מפת סכנה ארצית לגלישות-מדרון בישראל; גילון מרכז, קנ'מ 1:200,000. דוח מכון הגיאולוגי, GSI/07/2008.
- כץ, ע., הפט, ה., אלמוג, ע., 2008. בסיס נתונים עבור תוכנת HAZUS לתרחישי רעידות אדמה בישראל: מפה גיאוטכנית ומפה של רגישות המדרונות לכשל. דוח המכון הגיאולוגי, GSI/08/2008.
- לנסקי, נ., גרטמן, א., גבריאלי, א. (2011) איקות התמלחת שצפויה להשאוב בתחנה 9: דוח א' - הידרוגרפיה ונתיב התמלחת הסופיות. דוח המכון הגיאולוגי GSI/17/2011.
- לנסקי, נ., גרטמן, א., רוזנטראוב, צ., לנסקי, א., נהורי, ר., גבריאלי, א. (2011) איקות התמלחת שצפויה להשאוב בתחנה 9: דוח ב' – זרמים והסעה. דוח המכון הגיאולוגי GSI/18/2011.
- לנסקי, נ., בודזין, ר., ארנון, ע., גבריאלי, א., דבורקין, י., קלבו, ר. (2011) איקות התמלחת שצפויה להשאוב בתחנה 9: דוח ג' – דלתת המלח. דוח המכון הגיאולוגי GSI/19/2011.
- לנסקי, נ., גרטמן, א., גבריאלי, א., עוזר, ט., קצנلسון, ב., ארנון, ע., גולן, ר., בודזין, ר. (2014) סקר מעקב אחר התמלחות הסופיות בקרבת תחנת השאבה P88 (יולי 2012 ואוגוסט 2013). דוח המכון הגיאולוגי, GSI/07/2014.
- לנסקי, נ., דנטה א. (2015) הגורמים לירידת המואצת של מפלס ים המלח בעשרות השנים האחרונות, דוח המכון הגיאולוגי GSI/16/2015.
- סלמון, ע., צbiali, D., Rozenzpat, M., Lehman, T., Hyman, A., Abramov, R. 2008. האזוריים במישור החוף של ישראל בהם נדרשת חקירת הסיכון להtanזולות. דוח המכון הגיאולוגי, GSI/34/2008.
- סלמון, ע., 2009. מפת האזוריים המועדים להצפה מצונאמי לאורך חוף הים התיכון של ישראל במרחב חיפה, גוש דן, אשדוד ואשקלון. דוח המכון הגיאולוגי, GSI/24/2009, מוגש לוועדת ההיגוי הממשלתית להיערכות לרעידות אדמה בישראל, http://www.gsi.gov.il/_Uploads/744GSI-24-2009.pdf
- קלבו, ר., לנסקי, נ. (2015) עדות אחסון קציר המלח באזור מפרץ P88, דוח המכון הגיאולוגי GSI/09/2015.

- 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.
- Abelson, M. (2021) Hydrological and Geological Controls on the Evolution of the Dead Sea Sinkholes. In: The Many Facets of Israel's Hydrogeology (pp. 273-298). Springer, Cham.
- Abelson, M., Y. Yechieli, O. Crouvi, G. Baer, D. Wachs, A. Bein, and V. Shtivelman, Evolution of the Dead Sea sinkholes. In *New Frontiers in the Dead Sea Paleoenvironmental Research*, edited by: Y. Enzel, A. Agnon, M. Stein, *Geological Society of America, Special Paper*, pp. 241-253, 2006
- 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.
- Afzal, N. and Gersten, K. (1996) Wake layer in a turbulent boundary layer with pressure gradient: a new approach, Fluid mechanics and its implications , 37, pp.95-118.
- Ahlborn M, Armon M, Ben Dor Y, Neugebauer I, Schwab MJ, Tjallingii R, Shoqeir JH, Morin E, Enzel Y, Brauer A. 2018. Increased frequency of torrential rainstorms during a regional late Holocene eastern Mediterranean drought. Quaternary Research 89 : 425–431. DOI: 10.1017/qua.2018.9 [online] Available from: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0033589418000091/type/journal_article
- Alpert P, Osetinsky I, Ziv B, Shafir H. 2004. Semi-objective classification for daily synoptic systems: application to the eastern Mediterranean climate change. International Journal of Climatology 24 : 1001–1011. DOI: 10.1002/joc.1036 [online] Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1036>
- Alsop, G.I., and Marco, S., 2011, Soft-sediment deformation within seismogenic slumps of the Dead Sea Basin: *Journal of Structural Geology*, v. 33, p. 433–457, doi:10.1016/j.jsg.2011.02.003.
- Alsop, G.I., Marco, S., Weinberger, R., and Levi, T., 2016, Sedimentary and structural controls on seismogenic slumping within mass transport deposits from the Dead Sea Basin: *Sedimentary Geology*, v. 344, p. 71–90, doi:10.1016/j.sedgeo.2016.02.019.
- Alsop, G.I., Weinberger, R., Marco, S., and Levi, T., 2020, Bed-parallel slip: Identifying missing displacement in mass transport deposits: *Journal of Structural Geology*, v. 131, p. 1–22, doi:10.1016/j.jsg.2019.103952.
- Alsop, G. I., Weinberger, R., 2020. Are slump folds reliable indicators of downslope flow in recent mass transport deposits? *J. Struct. Geol.*, 135, 104037.
- 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):1-37.
- Amit, R., Zilberman, E., Enzel, Y., and Porat, N., 2002, Paleoseismic evidence for time dependency of seismic response on a fault system in the southern Arava Valley, Dead Sea rift, Israel: *Bulletin of the Geological Society of America*, doi:10.1130/0016-7606(2002)114<0192:PEFTDO>2.0.CO;2.

- Arkin, Y., Gilat, A., 2000. Dead Sea sinkholes: an ever-developing hazard. *Environ. Geol.* 39: 711–722.
- Arnaud, F., Piégay, H., Béal, D., Collery, P., Vaudor, L. and Rollet, A.J. (2017) Monitoring gravel augmentation in a large regulated river and implications for process-based restoration, *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(13), pp.2147-2166.
- Arnon, A., et al. “Seasonal dynamics of internal waves governed by stratification stability and wind: Analysis of high-resolution observations from the Dead Sea”. In: *Limnology and Oceanography* 64.5 (2019), pp. 1864–
- Arnon, A., Selker J.S. and Lensky N.G. (2016). Thermohaline Stratification and Diapycnal fluxes in a Hyper-saline lake: high resolution observations from the Dead Sea. *Limnology and Oceanography*, 61, <https://doi.org/10.1002/lno.10285>.
- Arnon, A., Selker, J. S., & Lensky, N. G. (2016). Thermohaline stratification and double diffusion diapycnal fluxes in the hypersaline Dead Sea. *Limnology and Oceanography*, 61(4), 1214–1231.
- Ashton AD, Hutton EWH, Kettner AJ, Xing F, Kallumadikal J, Nienhuis J, Giosan L. 2013. Progress in coupling models of coastline and fluvial dynamics. *Computers & Geosciences* 53 : 21–29. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.04.004 [online] Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300412001276>
- Alsop, G.I., and Marco, S., 2013, Seismogenic slump folds formed by gravity-driven tectonics down a negligible subaqueous slope: *Tectonophysics*, v. 605, p. 48–69, doi:10.1016/j.tecto.2013.04.004.
- Avni, Y., Lensky, N., Dente, E., Shviro, M., Arav, R., Gavrieli, I., Yechieli, Y., Abelson, M., Lutzky, H., Filin, S., Haviv, I., Baer, G., 2016. Self-accelerated development of salt karst during flash floods along the Dead Sea coast, Israel. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 121 (1), 17–38.
- Bachmann, G.H., and Aref, M.A., 2005, A seismite in Triassic gypsum deposits (Grabfeld Formation, Ladinian), southwestern Germany: *Sedimentary Geology*, doi:10.1016/j.sedgeo.2005.04.006.
- Baer, G., Funning, G. J., Shamir, G., & Wright, T. J. (2008). The 1995 November 22, Mw 7.2 gulf of elat earthquake cycle revisited. *Geophysical Journal International*, 175(3), 1040–1054. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03901.x>
- Bar, O., 2009. The shaping of the continental margin of central Israel since the Late Eocene—Tectonics, morphology and stratigraphy. *Geological Survey of Israel Report GSI/32/2009*.
- 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>
- Ben Dor Y, Armon M, Ahlbom M, Morin E, Erel Y, Brauer A, Schwab MJ, Tjallingii R, Enzel Y. 2018. Changing flood frequencies under opposing late Pleistocene eastern Mediterranean climates. *Scientific Reports* 8 : 8445. DOI: 10.1038/s41598-018-25969-6 [online] Available from: <http://www.nature.com/articles/s41598-018-25969-6>
- Ben-Avraham, Z., and G. Schubert (2006), Deep “drop down” basin in the southern Dead Sea, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 251, 254–263.

- 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), pp.524-536.
- Beyth, M., Katz, O., Gavrieli, I., 1998. Propagation and retrogradation of the Salt Delta in the Southern Dead Sea: 1985 – 1992. *Isr. J. Earth Sci.* 46, 95 – 106.
- Bin Jang H., Bolduc B., Zablocki O., Kuhn J.H., Roux S., Adriaenssens E.M., Brister J.R., Kropinski A.M., Krupovic M., Lavigne R., Turner D. & Sullivan, M.A.-O. (2019) Taxonomic assignment of uncultivated prokaryotic virus genomes is enabled by gene-sharing networks. *Nature biotechnology*.37(6):632-9.
- Bookman (Ken-Tor), R., Enzel, Y., Agnon, A., Stein, M. (2004) Late Holocene lake levels of the Dead Sea. *GSA Bulletin*, 116 (5-6): 555–571.
doi: <https://doi.org/10.1130/B25286.1>.
- Brantley, S.L., 2008. Kinetics of mineral dissolution. In *Kinetics of water-rock interaction* (pp. 151-210). Springer, New York, NY.
- Chaldekas, 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.
- Charrach, J., Goretsky, I., and Frydman, S., 2006, Geotechnical studies of soils from an evaporite environment in Israel, *in* 5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics - Proceedings of the ISSMGE 5th Int. Congress, v. I, p. 407–414.
- Cheng, N.S. (2009) Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles, *Powder Technology*, 189(3), pp.395-398.
- Cubrinovski, M., Robinson, K., Taylor, M., Hughes, M., Orense, R. (2012). Lateral spreading and its impacts in urban areas in the 2010–2011 Christchurch earthquakes, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 55:3, 255-269, DOI: 10.1080/00288306.2012.699895
- Czapiga, M.J., Blom, A. and Viparelli, E. (2022) Sediment Nourishments to Mitigate Channel Bed Incision in Engineered Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(6), p.04022009.
- 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.
- Dente, E., Lensky, N.G., 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, N.G., Morin, E. and 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. (2020). Fluvial response to base-level fall: Insights from the main perennial tributaries of the Dead Sea. PhD Thesis, Hebrew University, Jerusalem. Geological Survey of Israel Report GSI/01/2020.
- 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>

- Enzel, Y., Mushkin, A., Groisman, M., Calvo, R., Eyal, H. and Lensky, N. (2022) The modern wave-induced coastal staircase morphology along the western shores of the Dead Sea. *Geomorphology*, 408, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108237>.
- Eyal, H., Dente, E., 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(11), pp.2170-2185.
- Eyal, H., Enzel, Y., Meiburg, E., Vowinckel, B. and Lensky, N.G. (2021) How does coastal gravel get sorted under stormy longshore transport?. *Geophysical Research Letters*, 48(21), p.e2021GL095082.
- Hamiel Y, Amit R, Begin ZB, Marco S, Katz O, Salomon 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
- Hirshberg, O. & Ben-Ami, F. (2019) Sinkholes as a source of life in the Dead Sea region. *Aquat. Sci.* 81, 1–14.
- FEMA (2020), Hazus Earthquake Model Technical Manual.
- Ford, D. and Williams, P.D., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Frumkin, A. and Fischhendler, I., 2005. Morphometry and distribution of isolated caves as a guide for phreatic and confined paleohydrological conditions. *Geomorphology*, 67(3-4), pp.457-471.
- 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.
- Frumkin, A., Langford, B., Lisker, S. and Amrani, A., 2017. Hypogenic karst at the Arabian platform margins: Implications for far-field groundwater systems. *GSA Bulletin*, 129(11-12), pp.1636-1659.
- Frydman, S., Charrach, J., and Goretsky, I., 2014, A geotechnical study of evaporitic, lacustrine sediments in the saline environment of the Dead Sea area: Engineering Geology, v. 181, p. 309–322, doi:10.1016/j.enggeo.2014.08.028.
- Frydman, S., Charrach, J., and Goretsky, I., 2008, Geotechnical properties of evaporite soils of the Dead Sea area: Engineering Geology, v. 101, p. 236–244, doi:10.1016/j.enggeo.2008.06.003.
- Galloway WE. 1975. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. : 87–98.
- Garfunkel, Z., and Z. Ben-Avraham (1996), The structure of the Dead Sea basin, *Tectonophysics*, 266, 155-176.
- Garfunkel, Z. (2014), Lateral motion and deformation along the Dead Sea transform, in Dead Sea transform system reviews. Editors Z. Garfunkel, Z. Ben-Avraham, and A. Kagan, Dordrecht, Netherlands: Springer, pp. 109–151.
- Gavrieli, I., Starinsky, A., Bein, A., 1989. The solubility of halite as a function of temperature in the highly saline Dead Sea brine system. *Limnol. Oceanogr.* 34(7), 1224-1234.

- Gavrieli, I., 1997. Halite deposition from the Dead Sea 1960-1993. In: The Dead Sea: the lake and its setting (eds. T. Niemi, Z. Ben-Avraham ,J.R. Gat) chap. 14, p.161-170. Oxford University Press
- Gavrieli, I., Lensky, N., Abelson, M., Ganor, J., Oren, A., Brenner, S., Lensky, I., Shalev, E., Yechieli, Y., Dvorkin, Y., Gertman, I., Wells, S., Simon, E., Rosentraub, Z., Reznik, I., Elias, E., (2011). Dead Sea Study. Final Report. Isr. Geol. Surv., Rep. GSI/10/2011 and TAHAL Rep. IL-201280-R11-218 (Submitted to the World Bank)
- 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>.
- Hansford MR, Plink-Björklund P. 2020. River discharge variability as the link between climate and fluvial fan formation. *Geology* 48 : 952–956. DOI: 10.1130/G47471.1 [online] Available from: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article/48/10/952/587409/River-discharge-variability-as-the-link-between>
- Heifetz, E., Agnon, A., and Marco, S., 2005, Soft sediment deformation by Kelvin Helmholtz Instability: A case from Dead Sea earthquakes: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 236, p. 497–504, doi:10.1016/j.epsl.2005.04.019.
- 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.
- Hersbach H et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146 : 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803 [online] Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803>
- Huntington E. 1911. Palestine and its Transformation . Houghton MifflinGarfunkel, Z. (1981), Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics, *Tectonophysics*, 80, 81–108, doi:10.1016/0040-1951(81)90143-8.
- 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.
- Kiro Y, Goldstein SL, Garcia-Veigas J, Levy E, Kushnir Y, Stein M, Lazar B. 2017. Relationships between lake-level changes and water and salt budgets in the Dead Sea during extreme aridities in the Eastern Mediterranean. *Earth and Planetary Science Letters* 464 : 211–226. DOI: 10.1016/j.epsl.2017.01.043 [online] Available

- from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012821X17300559> Klimchouk, A., Palmer, A.N., De Waele, J., Auler, A.S. and Audra, P. eds., 2017. Hypogene karst regions and caves of the world. Springer.
- Kull, H.J., 1991, Theory of the Rayleigh-Taylor instability: Physics Reports, v. 206, p. 197–325, doi:10.1016/0370-1573(91)90153-D.
- Langford B., and Frumkon A., 2013. The Longest Limstone Caves In Israel. in: M. Belig, (eds.). *Judea And Samaria Reserch Studies* Vol. 22. Ariel. pp. 319-332 (Hebrew).
- Lensky, N.G., Dvorkin, Y., Lyakhovsky, V., Gertman, I., and Gavrieli, I. (2005) Water, salt, and energy balances of the Dead Sea: Water Resources Research, 41, 1–13, doi: 10.1029/2005WR004084.
- Lensky, N., Gertman, I., Rosentraub, Z., Lensky, I., Gavrieli, I., Calvo, R., Katz, O. (2010) Alternative dumping sites in the Dead Sea for harvested salt from pond 5: Final report. Geological Survey of Israel Report GSI/05/2010.
- Lensky NG, Gertman I, Arnon A, Ozer T, Biton E, Katsenelson B and Bodzin R (2013a) Currents and hydrography of the Dead Sea: A study for the Salt Recovery Project, 1st Report – July 2012 Survey. Geological Survey of Israel Report GSI/03/2013.
- Lensky NG, Gertman I, Arnon A, Ozer T, Biton E, Katsenelson B and Bodzin R (2013b) Currents and hydrography of the Dead Sea: A study for the Salt Recovery Project, 2nd Report - August 2012 Survey. Geological Survey of Israel Report GSI/04/2013.
- Lensky NG, Gertman I, Arnon A, Ozer T, Biton E, Katsenelson B and Bodzin R (2013c) Currents and hydrography of the Dead Sea: A study for the Salt Recovery Project, 3rd Report - October 2012 Survey. Geological Survey of Israel Report GSI/05/2013.
- Lensky NG, Gertman I, Arnon A, Ozer T, Biton E, Katsenelson B and Bodzin R (2013d) Currents and hydrography of the Dead Sea: A study for the Salt Recovery Project, 4th Report – February 2013 Survey. Geological Survey of Israel Report GSI/21/2013.
- Lensky NG, Gertman I, Arnon A, Ozer T, Biton E, Katsenelson B, Bodzin R, Harley N (2013e) Currents and hydrography of the Dead Sea: A study for the Salt Recovery Project, 5th Report - May 2013 Survey. Geological Survey of Israel Report GSI/22/2013.
- Lensky N.G., Hochman L., Moshe A. and Bodzin R. (2013f) Settling velocity and turbidity of halite grains in Dead Sea brine: A study for the Salt Recovery Project, 6th Report. Geological Survey of Israel Report GSI/18/2013.
- Lensky, N., Sirota, I., Arnon, A., Lutzky, H., Bodzin, R., Mor, A. (2016) Salt crystallization along cables in the Dead Sea: Part A –monthly observations. Geological Survey of Israel Report GSI/30/2016.
- Lensky, N., Sirota, I., Mor, Z., Lutzky, H., Bodzin, R., Eyal, H. (2017a) Salt crystallization along cables in the Dead Sea: Part B –buoy winter observation. Geological Survey of Israel Report GSI/15/2017.
- Lensky, N., Sirota, I., Mor, Z., Lutzky, H., Bodzin, R., Eyal, H. (2017b) Salt crystallization along cables in the Dead Sea: Part C –Seasonal observations along a submerged pipe. Geological Survey of Israel Report GSI/16/2017.
- Levy, Y. and Gvirtzman, H., (2021) Industry-Driven versus Natural Groundwater Flow Regime at the Dead Sea Coastal Aquifer. *Water*, 13(4), 498.

- Lutzky, H., Lyakhovsky, V., Kurzon, I. and Shalev, E. (2020). Hydrological response to the Sea of Galilee 2018 seismic swarm. *J. Hydrol.*, 582, 124499, 7p.
- Marco, S., and Agnon, A., 2005, High-resolution stratigraphy reveals repeated earthquake faulting in the Masada Fault Zone, Dead Sea Transform: Tectonophysics, v. 408, p. 101–112, doi:10.1016/j.tecto.2005.05.036.
- Marco, S., Rockwell, T.K., Heimann, A., Frieslander, U., and Agnon, A., 2005, Late Holocene activity of the Dead Sea Transform revealed in 3D palaeoseismic trenches on the Jordan Gorge segment: Earth and Planetary Science Letters, doi:10.1016/j.epsl.2005.01.017.
- 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 B: Solid Earth, v. 101, p. 6179–6191, doi:10.1029/95jb01587.
- 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.
- Matmon, A., Enzel, Y., Zilberman, E. and Heimann, A., 1999. Late Pliocene and Pleistocene reversal of drainage systems in northern Israel: tectonic implications. *Geomorphology*, 28(1-2), pp.43-59.
- Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948) Formulas for bed-load transport. In IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2. IAHR.
- Molenaar, A., Van Daele, M., Vandorpe, T., Degenhart, G., De Batist, M., Urrutia, M.P., Pino, M., Strasser, M., Moernaut, J., 2021. What controls the remobilization and deformation of surficial sediment by seismic shaking? Linking lacustrine slope stratigraphy to great earthquakes in South-Central Chile. *Sedimentology*. <https://doi.org/10.1111/sed.12856>.
- Nehorai R., Lensky N.G., Hochman L., Lensky I.M. (2013a) Turbidity of the Dead Sea surface – Observations from Remote Sensing: A study for the Salt Recovery Project, 7th Report. Geological Survey of Israel Report GSI/19/2013.
- Nehorai, R., Lensky, I.M., Hochman, L., Gertman, I., Brenner, S., Muskin, A. and Lensky, N.G. (2013b) Satellite observations of turbidity in the Dead Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(6), pp.3146-3160.
- 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 [online] Available from: [151](https://cp.copernicus.org/articles/12/75/2016/Nishimura, Y., Yoshida, T., Kuronishi, M., Uehara, H., Ogata, H., & Goto, S. (2017). ViPTree: the viral proteomic tree server. Bioinformatics, 33(15), 2379-2380.</p>
<p>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. <i>Remote Sensing</i>, 11(1), p.89.</p>
<p>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. <i>Geology</i>, 41(9), 1019-1022.</p>
<p>Nof, R. N., Ziv, A., Doin, M.-P., Baer, G., Fialko, Y., Wdowinski, S., Eyal, Y., and Bock, Y. (2012), Rising of the lowest place on Earth due to Dead Sea water-level drop:</p>
</div>
<div data-bbox=)

Evidence from SAR interferometry and GPS, *J. Geophys. Res.*, 117, B05412,
doi:10.1029/2011JB008961.

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., Stremlan, C., Šala, 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.

Oren, A. (2018). Salt lakes, climate change, and human impact: A microbiologist's perspective. *Aerul si Apa. Componente ale Mediului*, 163-170.

Ortner, H., Kilian, S., 2016. Sediment creep on slopes in pelagic limestones: upper Jurassic of northern Calcareous alps, Austria. *Sediment. Geol.* 344, 350–363.

Ouillon, R., Lensky, N.G.**, Lyakhovsky, V., Arnon, A.,& Meiburg, E.(2019). Halite precipitation from double-diffusive salt fingers in the Dead Sea: Numerical simulations. *Water Resour. Res.*,55. <https://doi.org/10.1029/2019WR024818>.

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 [online] Available from: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0033589416000107/type/journal_article

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.

Postma G. 1995. Sea-level-related architectural trends in coarse-grained delta complexes. *Sedimentary Geology* 98 : 3–12. DOI: 10.1016/0037-0738(95)00024-3 [online]
Available from:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0037073895000243> Parkhurst, D.L.,
Appelo, C.A.J., 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3 – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. In: Modeling and Techniques. In: U.S. Geol. Surv. Tech. Methods, vol. 6. U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.

Reiss, A.G.; Gavrieli, I.; Rosenberg, Y.O.; Reznik, I.J.; Luttge, A.; Emmanuel, S.; Ganor, J. (2021). Gypsum Precipitation under Saline Conditions: Thermodynamics, Kinetics, Morphology, and Size Distribution. *Minerals* , 11, 141.

Reznik, I. J., Gal, A., Ganor, J., and Gavrieli, I., (2009). Gypsum saturation degrees and precipitation potential from Dead Sea-Seawater mixtures. *Environmental Chemistry*, 6 (5), 416-423.

Reznik, I. J., Antler, G., Gavrieli, I., and Ganor, J., (2010). Kinetics of gypsum crystal growth from high ionic strength solutions; case study of Dead Sea- seawater mixtures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 2187-2199.

Reznik, I. J., Gruber, C., Ganor, J., and Gavrieli, I (2012). Towards the establishment of a general rate law for gypsum nucleation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 85, 75-87.

- 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.
- 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.
- Sade, A., Hall, J.K., Sade, H., Amit, G., Tibor, G., Schulze, B., and Gertman, I. (2014) Multibeam Bathymetric Map of the Dead Sea (scale 1:80,000). Geological Survey of Israel Report, GSI/01/2014.
- Sagy A, A Sneh, Rosensaft 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).
- Shalev, E., Kurzon, I., Doan, M.-L. and Lyakhovsky, V. (2016a). Water Level Oscillations Caused by Volumetric and Deviatoric Dynamic Strains. *Geophys. J. Int.*, 204, pp. 841-851.
- Shalev, E., Kurzon, I., Doan, M.-L. and Lyakhovsky, V. (2016b). Sustained Water Level Changes Caused by Damage and Compaction Induced by Teleseismic Earthquakes. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, doi:10.1002/2016JB013068.
- 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.
- Shviro, M., Haviv, I., Baer, G., 2017. High-resolution InSAR constraints on flood-related subsidence and evaporate dissolution along the Dead Sea shores: interplay between hydrology and rheology. *Geomorphology*, 293, 53-68.
- Sirota I., Arnon A., Lensky N.G. (2016). Seasonal variations of halite saturation in the Dead Sea. *Water Resour. Res.*, 52, <https://doi.org/10.1002/2016WR018974>.
- Sirota I., Enzel Y., Lensky N.G. (2017). Temperature seasonality control modern halite layers in the Dead Sea: In situ observations. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 129, <https://doi.org/10.1130/B31661.1>.
- Sirota, I., Arnon, A., & Lensky, N. G. (2016) Seasonal variations of halite saturation in the Dead Sea. *Water Resources Research*, 52(9), 7151–7162.
- Sirota, I., Enzel, Y., & Lensky, N. G. (2017) Temperature seasonality control on modern halite layers in the Dead Sea: In situ observations. *Bulletin of the Geological Society of America*, 129(9–10), 1181–1194. <https://doi.org/10.1130/B31661.1>
- 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(22), <https://doi.org/10.1029/2020GL090836>.
- Sirota, I., Enzel, Y., Mor, Z., Ben Moshe, L., Eyal, H., Lowenstein, T. K., & Lensky, N. G. (2021) Sedimentology and stratigraphy of a modern halite sequence formed under Dead Sea level fall. *Sedimentology*, 68(3), 1069–1090. <https://doi.org/10.1111/sed.12814>.
- Steefel, C.I., and A.C. Lasaga, A coupled model for transport of multiple chemical species and kinetic precipitation/dissolution reactions with application to reactive flow in single phase hydrothermal systems, *Am. J. Sci.*, 294, 529-592, 1994

- Steinberg, J., Gvirtzman, Z., and Garfunkel, Z. (2014), Flexural response of a continental margin to sedimentary loading and lithospheric rupturing: The mountain ridge between the Levant Basin and the Dead Sea Transform, *Tectonics*, 33, 166– 186, doi:10.1002/2013TC003330.
- Stinnesbeck, W., Frey, E., Zell, P., Avilés, J., Hering, F., Frank, N., Arps, J., Geenen, A., Gescher, J., Isenbeck-Schröter, M. and Ritter, S., 2018. Hells Bells—unique speleothems from the Yucatán Peninsula, Mexico, generated under highly specific subaqueous conditions. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 489, pp.209-229.
- Stiller, M., Yechieli, Y., & Gavrieli, I. Rates of halite dissolution in natural brines: Dead Sea solutions as a case study. *Chemical Geology*, 447, 161-172, 2016
- Storz-Peretz, Y., Bowman, D., Laronne, J.B. and Svoray, T., 2011. Rapid incision of a small, coarse and steep fan-delta in response to base-level fall: the case of Nahal Qedem, the Dead Sea, Israel, *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(4), pp.467-480.
- van den Berg, J.H. (1995) Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers. *Geomorphology* 12 : 259–279. DOI: 10.1016/0169-555X(95)00014-V.
- van Rijn L. C. (1984) Sediment transport, part ii: suspended load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110, 1613–1641.
- Torfstein A, Goldstein SL, Kushnir Y, Enzel Y, Haug G, Stein M. 2015. Dead Sea drawdown and monsoonal impacts in the Levant during the last interglacial. *Earth and Planetary Science Letters* 412 : 235–244. DOI: 10.1016/j.epsl.2014.12.013 [online] Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.12.013>
- Torfstein A, Goldstein SL, Stein M, Enzel Y. 2013. Impacts of abrupt climate changes in the Levant from Last Glacial Dead Sea levels. *Quaternary Science Reviews* 69 : 1–7. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.02.015 [online] Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0277379113000693>
- Vermesch, P., 2018. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers* 9, 1479–1493.
- 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., Lyakhovsky, V., Baer, G., and Z.B. Begin (2006), Mechanical modeling and InSAR measurements of Mount Sodom uplift, Dead Sea basin: Implications for effective viscosity of rock salt, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q05014, doi:10.1029/2005GC001185.
- Weisbrod, N., Alon-Mordish, C., Konen, E., & Yechieli, Y. Dynamic dissolution of halite rock during flow of diluted saline solutions. *Geophysical Research Letters*, 39 (9), 2012
- Weisbrod, N., Yechieli, Y., Shandalov, S. and Lensky, N. (2016) On the viscosity of natural hyper-saline solutions and its importance: The Dead Sea brines. *Journal of Hydrology*, 532, pp.46-51.
- Williams, E., 1960. Intra-stratal flow and convolute folding. *Geol. Mag.* 97 (3), 208–214.
- 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.

- Yechieli, Y., Abelson, M. and Baer, G., (2016) Sinkhole formation and subsidence along the Dead Sea coast, Israel. *Hydrogeology Journal*, 24(3), pp.601-612.
- 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.