



המכון הגיאולוגי
משרד האנרגיה

התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2023 ו- 2024

עמית מושקין, דפנה שמר, אוריאל מאיר, אלון קליימן, עודד כץ, און כרובי

מוגש לחברה הממשלתית להגנות מצוקי חוף הים התיכון

ירושלים, מאי 2025

דוח מס' GSI/13/2025

תקציר

דוח זה מציג איתור, מיפוי ואפיון של השינויים בתוואי המצוק החופי (ים התיכון) שהתרחשו בין אוגוסט 2023 לבין דצמבר 2024 (סה"כ כ- 16 חודשים). הניתוח נעשה על בסיס השוואה בין שני שריגים טופוגרפיים ברזולוציה של 0.5 מטר/פיקסל, תוצרי גיחות LiDAR מוטס ממועדים אלו. המיפוי נערך באופן ידני בעזרת כלי ממ"ג (ARC-GIS) ועבר בחינה ואימות על ידי סיורים פיזיים בשטח במקרים בהם עלה צורך. נפח החומר שהעתיק את מקומו בתקופת המחקר חושב בנפרד עבור כל אחד משבעת מקטעי המצוק הרציפים המרכיבים ביחד את עיקר מצוק החוף של ישראל: מקטע עין ים (אולגה – מכמורת), מקטע נעורים (בית ינאי – נתניה), מקטע נתניה העיר, מקטע נתניה דרום (נתניה – פולג), מקטע געש (ווינגייט – הרצליה), מקטע אשקלון צפון (מצפון למרינת אשקלון), ומקטע אשקלון דרום (תל אשקלון – תחנת הכוח רוטנברג). בנוסף נבחנה פעילות המצוק לפי חלוקה לתאי השטח של תמ"א 13/9.

בתקופת המחקר (2023 - 2024) מופו לאורך 7 מקטעי המצוק הרציפים 236 אירועים בדידים של כשל מצוק בנפח מצטבר של כ- 31,772 מ"ק. ב- 179 אתרים נערמו טאלוסים על החוף בנפח כולל של כ- 12,628 מ"ק, וב- 81 אתרים התרחשה סחיפה של טאלוסים (תוצרי כשל מצוק מלפני אוגוסט 2023) על ידי הגלים בנפח כולל של כ- 7,485 מ"ק. נמצא כי בתקופה האמורה (8/2023-12/2024) נגרע מהמצוק ומבסיסו ב- 7 מקטעי המצוק הרציפים שמופו נפח של 26,630 מ"ק הגורם למגמה של נסיגת המצוק כלפי מזרח וסחיפת חומר מהמערכת בקצב ממוצע של כ- 835 מ"ק עבור ק"מ מצוק. קצב ממוצע מדוד זה עבור 2023-24 נמצא בתוך טווח של קצבי הנסיגה הממוצעים שנמדדו לאורך המצוק של ישראל מאז 2015, כלומר בין 323 ל- 1,614 מ"ק/ק"מ/חורף. עם זאת, בדומה לשנים קודמות נמדדה גם ב- 2023-2024 שונות מרחבית משמעותית בקצבי הסחיפה בין מקטעי המצוק השונים: במקטעי עין ים, נתניה העיר ונתניה דרום שטף הגריעה (נפח החומר שנגרע עבור יחידת אורך מצוק בתקופת המחקר) היה נמוך מהשטף הממוצע של כלל המצוק ואילו במקטע אשקלון צפון השטף היה גבוה ממוצע כלל המצוק. במקטעי געש, נעורים ואשקלון דרום שטף הגריעה היה דומה לממוצע כלל המצוק ב- 2023-2024.

השוואה בין פעילות המצוק בשנת המעקב הנוכחית (2023-24) לשנה הקודמת לה (2022-23) מראה כי במקטעי נתניה העיר, געש ואשקלון צפון היה קצב הסחיפה מהמצוק בשנה הנוכחית דומה לקצב הסחיפה בשנה הקודמת. במקטעי עין הים, נעורים, נתניה דרום ואשקלון דרום שטף הגריעה היה גבוה מזה שנמדד בשנה שעברה. יצוין כי שטף הגריעה החריג שנמדד במקטע אשקלון צפון במהלך 2018-19 לא חזר על עצמו במהלך 2023-2024 וכי קצב הגריעה מהמצוק במקטע אשקלון צפון בשנה הנוכחית נמצא בטווח העליון של קצב הסחיפה השנתי הממוצע שנמדד לאורך כלל המצוק מאז 2015. בחלוקת פעילות המצוק לפי תאי השטח של תמ"א 13/9 מתקבל ששטף הגריעה הממוצע בתאי השטח ה"עירוניים" היה גבוה משטף הגריעה הממוצע בתאי השטח ה"טבעיים/חקלאיים" (956 מול 581 מ"ק/ק"מ/חורף, בהתאמה).

תוכן העניינים:

עמוד

3	1. הקדמה
3	1.1 אזור העבודה
4	1.2 הגיאולוגיה של המצוק החופי
7	2. שיטות העבודה
11	3. תוצאות
11	3.1 מפת שינויים 2023 - 2024
13	3.1.1 מקטע עין הים
13	3.1.2 מקטע נעורים
13	3.1.3 מקטע נתניה העיר
13	3.1.4 מקטע נתניה דרום
13	3.1.5 מקטע געש
14	3.1.6 מקטע אשקלון צפון
14	3.1.7 מקטע אשקלון דרום
14	4. דיון
14	4.1 נפחים והערכת נסיגה
14	4.2 השוואה בין המקטעים השונים
16	4.3 השוואה של פעילות המצוק בין שנת המעקב הנוכחית לקודמות
17	5. מסקנות
19	6. רשימת מקורות
22	נספח 1 - פעילות המצוק (2023-2024) לפי תאי השטח של תמ"א 13/9

1. הקדמה

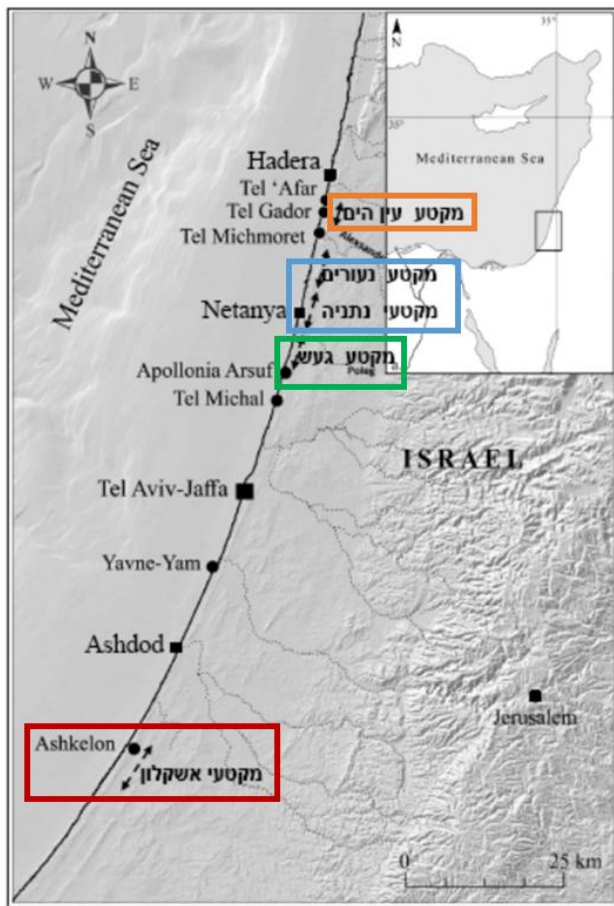
לאורך כ- 50 קילומטר של רצועת החוף הישראלי קיים מצוק חוף המפריד בין אזור חוף הים למרגלותיו, הנתון להשפעת הגלים, לבין מישור החוף מעל, בו מצויים מבנים וממוקמות תשתיות רבות (ניר, 1992). גובה המצוק מגיע עד חמישים מטרים ובסיסו מצוי במרחק של בין מטרים עד עשרות מטרים מזרחה מקו המים. בעקבות פגיעת הגלים החוזרת בבסיס המצוק, מתרחשות מעת לעת התמוטטויות אשר במשך הזמן מסיגות את גג המצוק מזרחה לכיוון היבשה (כץ וחבריו, 2007; כץ וחבריו, 2016; Arkin and Michaeli, 1985; Zvieli et al., 2004; Katz et al., 2013; Mushkin et al., 2016; Barkai et al., 2017; Mushkin et al., 2019). נסיגה זו נחשבת כמאיימת על מבנים ותשתיות הבנויים על גג המצוק.

במסגרת מחקר לגבי התפתחות המצוק החופי וכמעקב אחרי שינויים טבעיים או מלאכותיים בקצבי הנסיגה אנחנו עורכים טיסות מיפוי שנתיות (תוך שימוש ב- LiDAR מוטס), מאז שנת 2011, המאפשרות מיפוי של אירועי כשל המצוק שהתרחשו (למשל, כץ וחוב', 2016, 2017 ו- 2018). הדוח הנוכחי מציג איתור, מיפוי ואפיון של השינויים בתוואי המצוק החופי שהתרחשו בין אוגוסט 2023 לדצמבר 2024 (סה"כ כ- 16 חודשים) לאורך כלל המצוק. דוח זה הוא חלק מהמחקר השוטף במכון הגיאולוגי והוא נערך גם כחלק מהפעילות לאורך החופים של החברה הממשלתית להגנות מצוקי חוף הים התיכון ובהזמנתה.

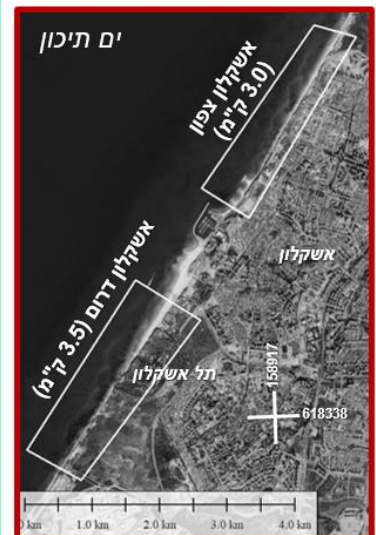
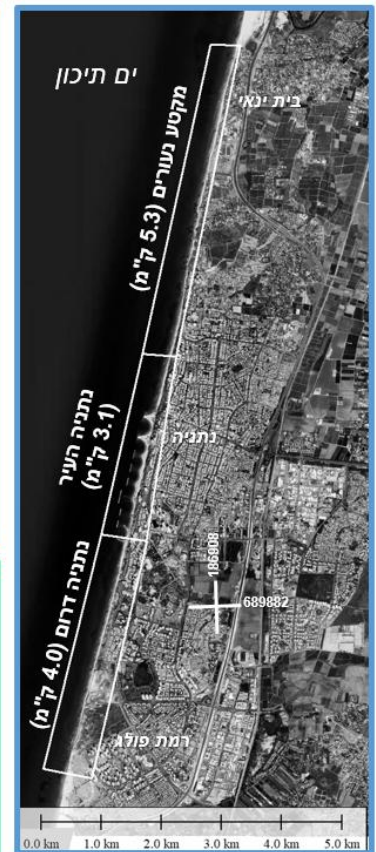
1.1 אזור העבודה

המצוק החופי של ישראל הוא למעשה חזית גידוד, תוצר של פעולת הגלים, לאורך בסיסם של רכסי חוף מאורכים (פרת ואלמגור, 1996; אלמגור ופרת, 2016 ומקורות נוספים שם), הבנויים בעיקר מסלעי כורכר (גרגרי חול מנהר הנילוס המלוכדים על ידי חומר גירי) ואופקים של קרקעות קבורות מסוף תקופת הקרח האחרונה (כ- 60,000 שנים לפני ההווה) ועד אמצע תקופת ההולוקן, כ- 5,000 שנה לפני ההווה (Porat et al., 2004; Gvirtzman et al., 1984; Engelmann et al., 2001; French et al., 2001, 2002; Yaalon, 1967). המקטע העיקרי של המצוק החופי מתמשך מהרצליה עד חדרה בכיוון צפון-מזרח ונקרא 'מצוק השרון' (איור 1). אורכו כ- 32 קילומטר וגובהו הממוצע 26 מטר. המצוק במקטע זה הוא רציף, למעט מוצאי הנחלים פולג ואלכסנדר לים, שם קיימות פתחות במצוק ברוחב של כקילומטר. בנוסף, באופן מקומי קיימים ערוצים חתורים במצוק ברוחב של עד עשרות מטרים, ברובם כתוצאה מפעילות האדם. מקטעי מצוק חופי נוספים גובלים ממערב את אזור גוש דן (הרצליה עד בת ים) וכן את אזור אשקלון.

כפי שיתואר בהמשך הגורם העיקרי ליצירת תוואי הנוף של המצוק החופי ולהמשך התפתחותו הוא גלי הים. במהלך תקופת הקרח האחרונה פני הים היו נמוכים מהיום, וקו החוף (המפגש בין הים ורכסי הכורכר) היה 7 עד 10 קילומטרים מערבית למיקום קו החוף הנוכחי (במקום בו עומק המים כיום הינו כ- 100 מטר). עם המעבר לתקופה הבין-קרחונית הנוכחית פני הים עלו והתייצבו בגובהם הנוכחי לפני כ- 4,000 שנה (Sivan et al., 2001). רק בהגיע פני הים למיקום זה, החל המצוק החופי הנוכחי להיווצר, ולפיכך גילו המרבי של המצוק הוא כ- 4,000 שנה. מצוקי חוף נוספים, כיום טבועים, שנוצרו מול מפלסי ים נמוכים יותר בזמן המעבר לתקופה הבינקרחונית קיימים מערבית למצוק החוף הנוכחי (Goodman-Tchernov and Katz, 2016).



איור 1. אזור העבודה לאורך חוף הים התיכון בחלוקה ל 7 מקטעי מצוק נפרדים בעלי אורך של לפחות 3 ק"מ כל אחד. קוארדינטות מדויכות ברשת ישראל החדשה.



1.2 הגיאולוגיה של המצוק החופי

באזור העבודה בנוי המצוק בעיקר חילופין של כורכר (Eolianite), קרקעות קבורות (Paleosols) וחול מנושב, המונחים באי התאמה זה על גבי זה (ניר, 1988; ניר, 1992; פרת ואלמגור, 1996; זילברמן וחוב', 2006; Harel et al., 2016). להלן מובא תיאור קצר של היחידות הסטרטיגרפיות החשופות באזור העבודה (איור 2), כאשר שמות היחידות הן בעקבות (Gvirtzman et al., 1984):

כורכר רמת-גן: מורכב בעיקר מגרגירי קוורץ (40% עד 60%) ושברי-קונכיות בליכוד גירי אשר משנה את דרגתו במידה רבה על פני מרחקים לא קבועים. כורכר רמת-גן מציג ריבוד צולב האופייני לדיונה, ויוצר למינות בעובי עד סנטימטרים שביניהן רבדים דקים וכיסים של חול לא מלוכד. בסיס היחידה אינו חשוף. כלפי מעלה עובר הכורכר בהדרגה לקרקע קבורה (חמרת נחשולים). עובי היחידה כ- 30 מטר, כאשר לגגה הופעה גלית בעלת משרעת של 30 מטר ואורך גל של 100 מטר. גיל היחידה 60,000 שנה לפני ההווה (Porat et al., 2004).

חמרת נחשולים: מורכבת מחול דק, בעיקרו קוורצי (10%-90%) ומיעוט גירי (שברי-קונכיות), וחרסית ממקור לא ימי (10% עד 20%). חמרת נחשולים מונחת על כורכר רמת-גן במעבר הדרגתי, בעוד שהמגע העליון של החמרה עם כורכר דור הוא חד. עובי החמרה מגיע עד מספר מטרים בשקעים של כורכר רמת-גן ובמקומות בהם הכורכר עבה היא דקה ואף חסרה. במקומות חמרת נחשולים מפוצלת לשתיים-שלוש תת-יחידות.

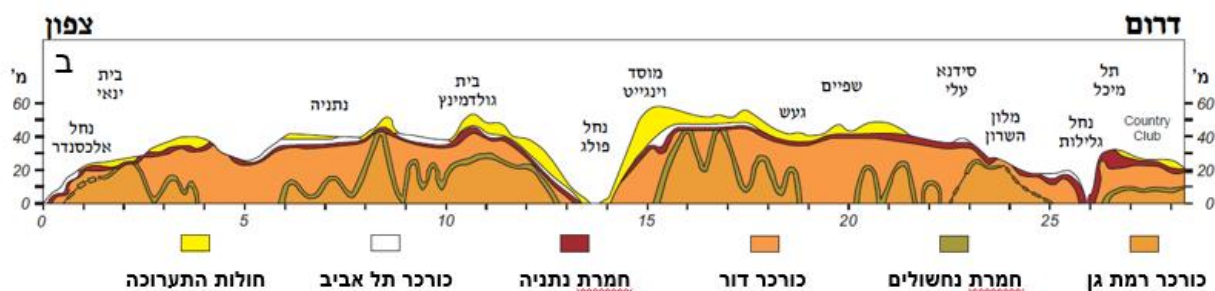
כורכר דור: מורכב בעיקר גרגירי קוורץ (30%-90%) ושברי-קונכיות בליכוד גירי בדרגה משתנה. כורכר דור מציג ריבוד צולב וכיס חול בלתי מלוכד, בדומה לכורכר רמת-גן. כורכר דור ממלא שקעים בכורכר רמת-גן (עם חמרת נחשולים בגגו) ומגיע לעובי מרבי של 40 מטר. המגע העליון עם חמרת נתניה הוא גלי. גיל היחידה 53,000 - 51,000 שנה לפני ההווה (Porat et al., 2004).

חמרת נתניה: מורכבת בעיקר מגרגירי קוורץ בגודל סילטי-חולי דק (65%-93%), וחרסית (בעיקר מונטמורילוניט) ועובייה מסנטימטרים עד מטרים. תחמוצות ברזל שעוטפות את גרגירי הקוורץ נותנות לחמרה את צבעה האדום. במקומות רבים יש לחמרת נתניה פרופיל של קרקע. המגע התחתון שלה גלי (משרעת מספר מטרים) והמגע העליון עם כורכר תל אביב יוצר טופוגרפיה של מרזבות.

כורכר תל אביב (קלקארניט): מורכב בעיקר מחול גירי (60%-90%) וגרגירי קוורץ (10%-40%) בליכוד גירי. במקומות ניתן להבחין בחלק תחתון עם ריבוד צולב (ללא כיסי חול בלתי מלוכד) וחלק עליון למינרי. עובי הקלקארניט עד מספר מטרים (עבה יותר בשקעים). המגע התחתון עם חמרת נתניה גלי עם התיידידות לקראת פסגות גבוהות בכורכרים. גג הקלקארניט חשוף במקומות או מכוסה בחול רבד במגע גלי. מחשופי הקלקארניט בד"כ יוצרים את שפת המצוק כדרגש מעל הצנר בחמרת נתניה. גילו 10,000-6,700 שנים לפני ההווה (Porat et al., 2004).

חולות תערוכה: חול למינרי לא מלוכד, זהה בהרכבו לכורכר רמת-גן ודור (70%-90% גרגירי קוורץ דקים). לחולות אין ליכוד גירי אך הם מיוצבים הודות לנוכחות חומר אורגני. עוביים המרבי של החולות מגיע למספר מטרים. מגע תחתון, עם כורכר תל אביב, כמעט אופקי. בגג חולות התערוכה קיים מעבר לא סדור לחולות חדרה או לקרקע. גיל החולות 6,000-3,000 שנים לפני ההווה (מקור הגילים מפורט בפרת ואלמגור, 1996).

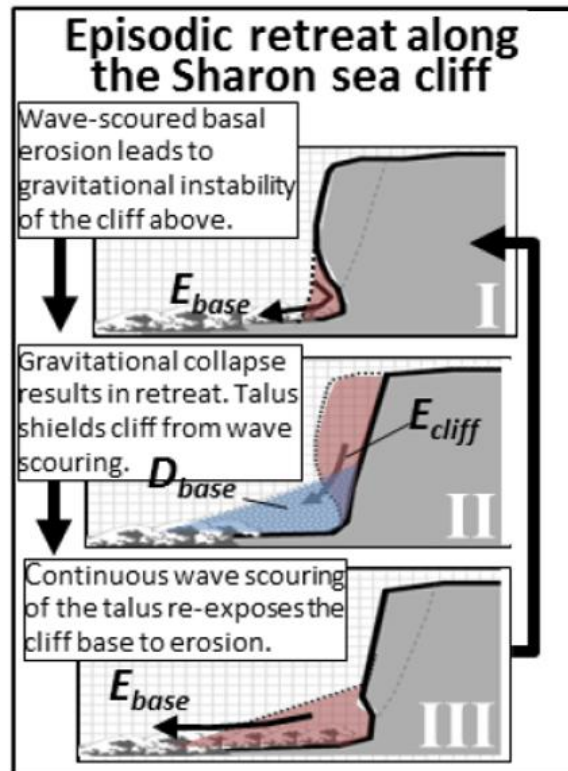
חולות חדרה: מכילים בעיקר חול קוורצי דק (85%-95%) ושברי-קונכיות. חולות חדרה הם דיונות אשר מתעבות כלפי דרום עד לעובי של מספר מטרים. מקור החול הוא בלייה של חולות התערוכה או חול המגיע מרצועת החוף. בסיס החתך תוארך ל- 3,700-3,200 שנים לפני ההווה (מקור הגילים מפורט בפרת ואלמגור, 1996) וחלקים אחרים בחתך מכסים מבנים מהתקופה הרומית עד היום.



איור 2. (א) חתך גיאולוגי סכמתי של יחידות הסלע החשופות לאורך מצוק החוף. החתך מוצג על גבי תמונה של החתך מאזור נתניה; (ב) חתך גיאולוגי לאורך מצוק השרון (הגזמה אנכית $\times 40$) המציג את יחידות הסלע החשופות (מתוך אלמגור ופרת, 2016).

המצוק החופי של ישראל נסוג מזרחה על ידי מחזורים של אירועי אי יציבות וכשל 'רגעיים' המופרדים על ידי תקופות ממושכות של יציבות יחסית (למשל, ויסמן וחיתי, 1971; Arkin and Michaeli, 1985; Perath and Almogor, 2000; Katz and Mushkin, 2013). סכימה בזמן ובמרחב של מחזורי הכשל והיציבות הללו היא המניע העיקרי לנסיגת מצוק החוף של ישראל בסדרי זמן גיאולוגיים. ניתן לתאר את גריעת הנפח מהמצוק כתהליך רב-שלבי הכולל (אלמגור ופרת, 2016; מושקין וחוברין, 2016; Perath and Almogor, 2000; Mushkin et al., 2019): (I) סחיפת בסיס המצוק על ידי הגלים, יצירת צנר הגורם לאי יציבות במצוק מעל;

(II) קריסה של המצוק והערמות של חומר המצוק כטאלוס (או גושי סלע) בבסיס המצוק; (III) סחיפה של חומר הטאלוס על ידי גלי הים הנעשית מיד לאחר הקריסה או במשך הזמן לאחריה (איור 3).



איור 3. מחזורי היציבות והכשל לאורך המצוק החופי. (I) שלב הסחיפה בבסיס המצוק: פגיעה מתמשכת של גלים בבסיס המצוק גורמת ליצירה של צנר (מסומן אדום) הגדל עם הזמן וגורם לאי יציבות גרביטציונית של חלק המצוק מעליו; (II) שלב אי יציבות וכשל: התרחשות אירוע כשל מעל הצנר (מסומן אדום), תוצרי הכשל נערמים בבסיס המצוק (מסומן כחול); (III) שלב היציבות: תוצרי הכשל למעשה מגינים על בסיס המצוק מפני פגיעת הגלים ויצירה של צנר חדש. עם הזמן תוצרי הכשל נסחפים (מסומן אדום) וחושפים את בסיס המצוק ליצירת צנר חדש.

2. שיטת העבודה

איתור, מיפוי וניתוח כמותי של השינויים שהתרחשו בכלל תוואי המצוק החופי בין אוגוסט 2023 לדצמבר 2024 נעשה בעזרת השוואה בין שני שריגים טופוגרפיים ממועדים אילו. השריגים הטופוגרפיים מבוססים על מידע שנאסף תוך שימוש ב-LiDAR מוטס בשתי גיחות מיפוי מהתאריכים:

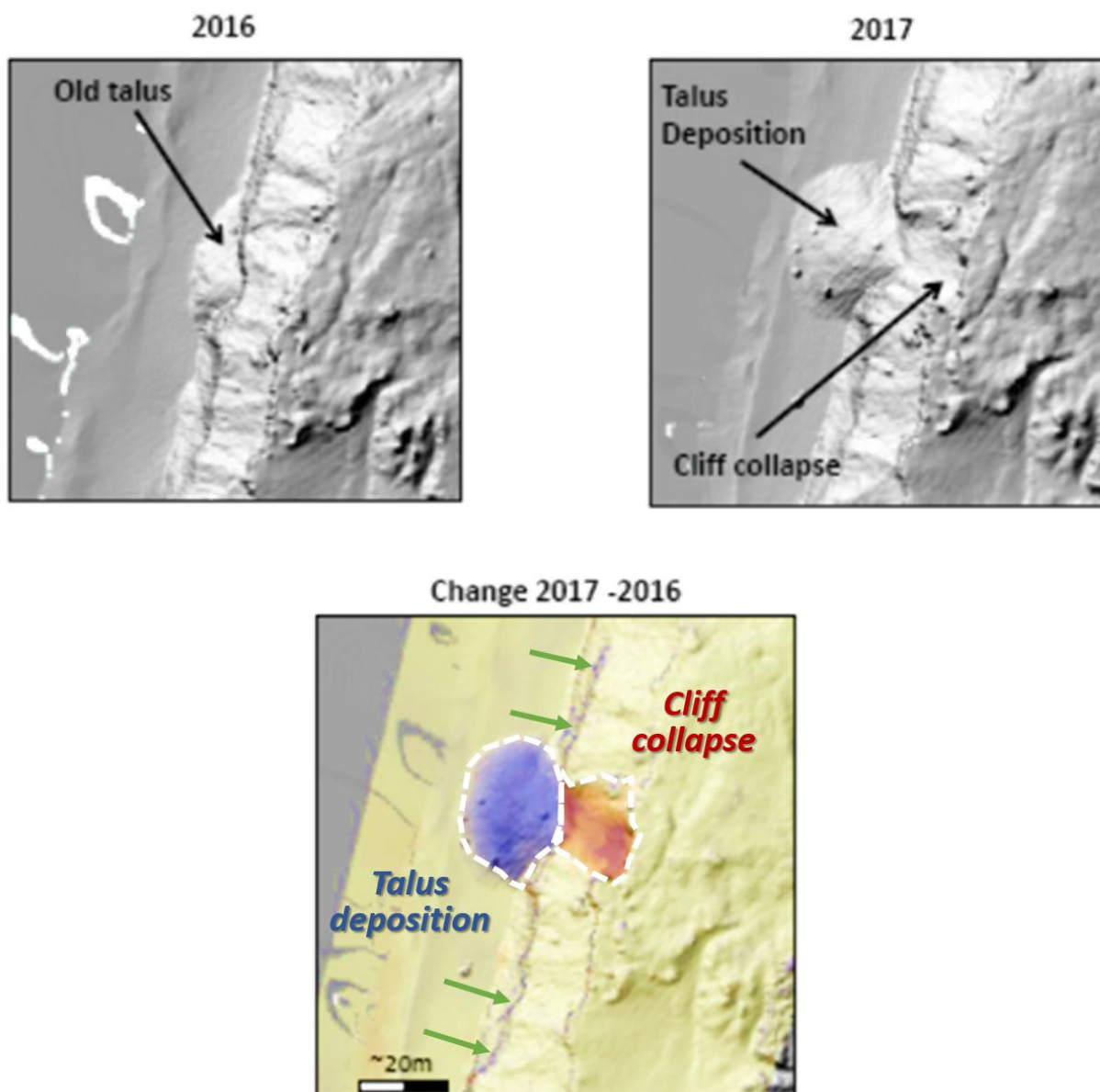
גיחת 2023: 8/2023

גיחת 2024: 12/2024

ביצוע הטיסה: חברת אופק תצלומי אוויר. פיקוח ובקרת איכות של נתוני הליידאר: המכון הגיאולוגי. בנוסף במסגרת הדוח הנוכחי התבצעה גם השוואה לשינויים שהתרחשו במצוק החופי מאז 2015, תוך שימוש בעבודת המכון הגיאולוגי שנעשתה בשנה הקודמת (מושקין וחוב', 2023).

להלן שלבי תהליך העבודה שבוצע לצורך איתור, מיפוי ומדידת נפח השינויים לאורך המצוק החופי:

1. **ביצוע טיסות LiDAR חוזרות** (ברזולוציה של לפחות 4 נקודות למ"ר) ובנייה של שריג טופוגרפי (DEM) ברזולוציה גבוהה של 0.5 מטר/פיקסל עבור שני המועדים הגובלים את תקופת המחקר. דיוק גיאוגרפי מרחבי של נתוני הליידאר: פחות מ 1 מטר. דיוק במימד האנכי של המדידות: פחות מ 0.1 מטר. דיוק הנתונים נקבע על סמך השוואה לנתוני GPS-RTK שנאספו על ידי מודד מוסמך בכ 30 נקודות בקרה לאורך החוף.
2. **ייצור מפת הפרשים** (ההפרש בגובה הטופוגרפי בין שני השריגים עבור כל פיקסל) במערכת ממ"ג על מנת לזהות שינויים טופוגרפיים בין שני מועדי הטיסה.
3. **מיפוי** של האזורים בהם קיים שינוי בטופוגרפיה בסביבת המצוק, בין שני מועדי טיסה, בעזרת מפת ההפרשים (איור 4). הזיהוי נעשה בשני שלבים: (א) ממוחשב, כאשר פיקסל עם ערך שלילי או חיובי במפת ההפרשים מציין אזור שהתרחשה בו גריעה או תוספת של חומר בין שני מועדי הטיסה, בהתאמה; (ב) מיפוי ידני פרטני של אזורי השינוי על ידי שרטוט פוליגונים סביב אזורי השינוי וזאת בכדי לוודא שאכן מדובר בפעילות מצוק ולא בבעייה בנתונים (איור 4). לדוגמא הפרש טופוגרפיה המתקבל ומראה נסיגת מצוק רציפה של 1 מטר לאורך מספר ק"מ מקורו בשגיאת עיגון בין השריגים הטופוגרפיים, שכן התמוטטויות מצוק טבעיות בד"כ לא עולות על אורך של עשרות מטרים ויש להן גיאומטריה קעורה אופיינית. באזורים נבחרים, לפי הצורך, התבצע גם אימות בשדה.
4. **ייצור שכבות ממ"ג** של פוליגונים המציינים אתרים בהם זוהו שינויים טופוגרפיים. המיפוי נעשה לפי חלוקה לשלוש קטגוריות המציינות שלבים שונים בתהליך נסיגת המצוק (איור 3):
 - א. גריעה של חומר מהמצוק עצמו (שינוי שלילי בטופוגרפיה במימד האנכי) המבטאת התמוטטות מצוק ('CC' – Cliff Collapse) (איור 4). נציין כי התמוטטות מצוק לא בהכרח מביאה לנסיגה של גג המצוק אם מתרחשת בחלקו התחתון.
 - ב. גריעה של חומר מטאלוס קיים בבסיס המצוק (שינוי שלילי בטופוגרפיה במימד האנכי) המבטאת סחיפת חומר על ידי פעילות הגלים ('TE' – Talus Erosion)
 - ג. תוספת חומר על החוף בבסיס המצוק (שינוי חיובי בטופוגרפיה במימד האנכי) המבטא הערמות טאלוס חדש בבסיס המצוק ('TE' – Talus Deposition) כתוצאה מקריסת מצוק (CC) מעל (איור 4).



איור 4. דוגמא לזיהוי ומיפוי של אירוע כשל מצוק והערמות טאלוס. למעלה משמאל, מפת הצללה 2016 הכוללת טאלוס בבסיס המצוק (מסומן בחץ); למעלה מימין מפת הצללה 2017 של אותו תא-שטח עליה מסומן בחץ אירוע כשל בו נסוג קו המצוק מזרחה ותוצרי הכשל נערמו כטאלוס בבסיס המצוק (מסומן בחץ). למטה, מפת הפרשים (בין 2017 ו- 2016) על גבי מפת הצללה 2017. צבע צהבהב מציין ערך הפרש אפס (ללא שינוי), צבע אדום מסמן ערך הפרש שלילי (חוסר חומר), צבע כחול מציין ערך הפרש חיובי (עודף חומר). קו לבן מקוקו – סימון פוליגונים של קריסת מצוק (אדום) והערמות טאלוס (כחול). חיצים ירוקים מסמנים איזורים בהם השינוי המתקבל בין שתי סריקות הליידאר הוא ארטיפקט (ממצא שווא) הנובע ממגבלות הדיוק של העיגון הגיאוגרפי בסריקות הליידאר. ארטיפקטים מסוג זה לא נכללים באנליזה המדווחת.

הנתונים המרחביים והפיזיים של כלל הפוליגונים מהטיפוסים השונים חושבו ונשמרו בטבלאות עם עיגון גיאוגרפי לרשת ישראל החדשה. שטח כל פוליגון חושב באמצעות הממ"ג ונפח החומר שמייצג הפוליגון

חושב על ידי הכפלת שטחו בהפרש הטופוגרפי במימד האנכי בין שני מועדי הטיסה. הפרש זה לכלל הפוליון נקבע כממוצע של ההפרש שמחושב על ידי הממ"ג עבור כל פיקסל בתחום הפוליון, באופן הבא:

$$V = A \times \langle ti \rangle$$

כאשר V הוא נפח הפוליון (m^3). A הוא שטח הפוליון (m^2), $\langle ti \rangle$ הוא ממוצע הפרש הגבהים (ההפרש הטופוגרפי, m) עבור הפיקסלים בפוליון.

הערכת שגיאת המדידה: זיהוי ומיפוי הפוליונים נעשה באופן ידני ומבוקר וזאת בכדי לצמצם למינימום את ההשפעה של אי הדיוקים בעיגון המרחבי של השריגים מ-2023 ו-2024. בהתאם, המקור העיקרי לשגיאת המדידה נותר הדיוק האבסולוטי (accuracy) של ערכי הגבהים בכל אחד מהשריגים הטופוגרפיים. הדיוק האנכי האבסולוטי של השריגים הטופוגרפיים בהם נעשה שימוש בעבודה זו הינו $0.05 \pm$ מטר. עבור פיקסל בודד השגיאה (e) מהפחתת שריג 2023 משריג 2024 חושבה כמקובל בהערכה של טעות מצטברת עבור חיבור/חיסור של שתי מדידות בלתי תלויות:

$$e_i = \sqrt{0.05^2 + 0.05^2} = 0.07 \text{ m}$$

עבור כל פוליון (הכולל מספר פיקסלים) בעל שטח A חושב המקרה המחמיר ביותר בו כל השגיאות הן באותו כיוון ועל כן השגיאה המצטברת המתקבלת באומדן הנפח (m^3) של כל פוליון ($\langle e_i \rangle$) חושבה לפי:

$$\langle e_i \rangle = 0.07 * A$$

5. **חלוקה למקטעי מצוק** - לטובת המיפוי, חישובי הנפחים והשוואה לשנים קודמות חולק אזור העבודה ל-7 מקטעים ראשיים הכוללים מצוק רציף באורך של לפחות 3 ק"מ (איור 1 ו-טבלה 1). מקטע 'עין ים' (חוף אולגה – מכמורת, אורך 3.0 ק"מ, גובה ממוצע 14 מטר); מקטע 'נעורים' (בית ינאי – נתניה, אורך 5.3 ק"מ, גובה ממוצע 26 מטר); מקטע 'נתניה העיר' (אורך 3.1 ק"מ), המקטע כולל את החוף למרגלות העיר ובכלל זה את האזור המוגן על ידי שוברי הגלים; מקטע 'נתניה דרום' (נתניה – פולג, אורך 4.0 ק"מ, גובה ממוצע 30 מטר); מקטע 'געש' (ווינגייט – הרצליה, אורך 10.0 ק"מ, גובה ממוצע 29 מטר); מקטע 'אשקלון צפון' (מצפון למרינה, אורך 3.0 ק"מ); מקטע 'אשקלון דרום' (מצפון לתחנת הכוח – עד תל-אשקלון, אורך 3.5 ק"מ). בהמשך, מוצג מיקום כל פוליון כמרחק צפונה של מרכז הפוליון ביחס לנקודת ראשית קבועה. עבור מקטעי עין ים, נעורים, נתניה העיר, נתניה דרום והרצליה נקודת הייחוס נמצאת במרינה של הרצליה ב.נ.צ. 181070/674645. ועבור מקטעי אשקלון צפון ואשקלון דרום נמצאת נקודת הייחוס באזור תחנת הכוח ב.נ.צ. 154776/615988.

תיאור פעילות המצוק 2023-2024 לפי תאי השטח שנקבעו במסגרת תמ"א 13/9 מופיע בנספח 1.

6. **חישוב מאזן הסדימנט כאומדן לקצב נסיגת המצוק.** עקרונות המעקב אחר קצב נסיגת המצוק בעזרת חישובי מאזן הסדימנט המיושם כאן מתוארים בפירוט ב כץ וחוב' (2016) וב (Mushkin et al. 2019). בעבודה הנוכחית מאזן הסדימנט מבוטא בעזרת ה Effective Erosion (EE) שמחושב לפי:

$$EE = |CC| + |TE| - |TD|$$

כאשר נעשה שימוש בערכים המוחלטים של CC, TE ו TD כך שערכי EE חיוביים מציינים איבוד חומר ממערכת המצוק-טאלוס. חלוקה של EE (הנפח שנגרע) בשטח הפנים של המצוק הנבחן מאפשר לתרגם את חישובי הנפחים המתוארים לעיל לאומדן חד מימדי של קצב נסיגת המצוק במימד האופקי לכוון היבשה.

טבלה 1. חלוקה למקטעי התייחסות ראשיים לאורך המצוק החופי

קצה צפוני		קצה דרומי		אורך/גובה ¹	מקטע
מרחק צפונה (ק"מ) מהרצליה/אשקלון ²	נ.צ. (ITM)	מרחק צפונה (ק"מ) מהרצליה/אשקלון ²	נ.צ. (ITM)	(ק"מ)/(מ')	
31	188678/704712	28	187891/701802	14 / 3.0	עין הים
25.3	187233/699183	20	185942/694043	26 / 5.3	נעורים
20	185942/694043	16.9	185187/691036	34 / 3.1	נתניה העיר
16.9	185187/691036	12.9	184212/687157	30 / 4.0	נתניה דרום
11.9	183963/686163	1.9	181580/676462	29 / 10.0	געש
9.5	159941/624100	6.5	158381/621477	16 / 3.0	אשקלון צפון
4.5	157199/619736	1	155306/616831	10 / 3.5	אשקלון דרום

1. גובה ממוצע של המקטע

2. נקודות ייחוס: הרצליה: נ.צ. 181070/674645; אשקלון: נ.צ. 154776/615988.

3. תוצאות

3.1 מפת שינויים 2023-2024

השינויים לאורך כל מצוק החוף סווגו להתמוטטות מצוק (CC, נפח מחושב בסימן שלילי), לסחיפת חומר מטאלוס (TE, נפח מחושב בסימן שלילי) ולתוספת חומר לטאלוס (TD, נפח מחושב בסימן חיובי) (איור 4). סכום כלל הנפחים הללו מציין את אובדן החומר שמקורו במצוק בתקופת המחקר (EE). סיכום הממצאים מופיע בטבלאות 2 ו- 3 בחלוקה לפי שבעת מקטעי החוף השונים. בנספח 1 מופיע סיכום של הפעילות ב 2023-2024 לפי תאי השטח של תמ"א 13/9.

טבלה 2. סיכום הפעילות לאורך המצוק החופי (2023 - 2024)

מקטע	אורך	כשל מצוק (CC)		סחיפת טאלוס (TE)		טאלוסים שנוספו (TD)		סה"כ גריעה ¹ (EE)
		מספר קריסות	נפח כולל (m ³)	מספר פוליגונים	נפח כולל (m ³)	מספר טאלוסים	נפח כולל (m ³)	
עין הים	3.0	16	-516 ±43	5	-679 ±35	14	181 ±23	-1015
נעורים	5.3	48	-5093 ±241	14	-667 ±76	40	1410 ±132	-4350
נתניה העיר	3.1	39	-2931 ±170	3	-65 ±13	28	2777 ±170	-218
נתניה דרום	4.0	29	-1886 ±128	4	-157 ±17	15	618 ±75	-1426
געש	10.0	77	-12778 ±416	45	-5256 ±396	70	6150 ±361	-11883
אשקלון צפון	3.0	11	-5041 ±147	4	-272 ±15	8	1321 ±58	-3991
אשקלון דרום	3.5	16	-3528 ±127	6	-390 ±27	4	171 ±15	-3746
סיכום	31.9	236	-31772	81	-7485	179	12628	-26630

1. סה"כ גריעת חומר מצוק מהמערכת החופית (כשל מצוק + טאלוסים שנוספו + סחיפת טאלוסים).

טבלה 3. סיכום מאפייני נפח הפעילות לאורך המצוק החופי (2023- 2024)

מקטע	כשל מצוק (CC) (m ³)		סחיפת טאלוס (TE) (m ³)		טאלוסים שנוספו (TD) (m ³)	
	טווח	ממוצע	טווח	ממוצע	טווח	ממוצע
עין הים	<81	32	<642	136	<55	13
נעורים	<560	106	<84	48	<270	35
נתניה העיר	<248	75	<45	22	<480	99
נתניה דרום	<520	65	<53	39	<172	41
געש	<1731	166	<500	117	<1065	88
אשקלון צפון	<1305	458	<162	68	<317	165
אשקלון דרום	<1589	220	<189	65	<74	43

3.1.1 מקטע עין הים

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 16 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 81 מ"ק (ממוצע: 32 מ"ק) ובנפח כולל של 516 מ"ק. תועדו 5 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 679 מ"ק ו- 14 אתרים של הערמות טאלוס בנפח כולל של 181 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 1,015 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.2 מקטע נעורים

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 46 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 560 מ"ק (ממוצע: 106 מ"ק) בנפח כולל של 5,093 מ"ק. תועדו 14 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 667 מ"ק ו- 40 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 1,410 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 4,350 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.3 מקטע נתניה העיר

מקטע זה כולל את חופי העיר נתניה ובכלל זה הקטע המוגן על ידי שוברי גלים אשר אורכו כ- 700 מטר. בתקופת המחקר, במקטע זה, מופו 39 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 248 מ"ק (ממוצע: 75 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 2,931 מ"ק חומר. תועדו 3 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 65 מ"ק ו- 28 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 2,777 מ"ק (טבלה 2). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 218 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.4 מקטע נתניה דרום

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 29 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 520 מ"ק (ממוצע: 65 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 1,886 מ"ק חומר. תועדו 4 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 157 מ"ק ו- 15 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 618 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 1,426 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.5 מקטע געש

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 77 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 1,731 מ"ק (ממוצע: 166 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 12,776 מ"ק חומר. תועדו 45 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 5,256 מ"ק ו- 70 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 6,150 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 11,883 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.6 מקטע אשקלון צפון

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 11 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 1,305 מ"ק (ממוצע: 458 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 5,041 מ"ק חומר. תועדו 4 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 272 מ"ק ו- 8 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 1,321 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 3,991 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.7 מקטע אשקלון דרום

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 16 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 1,589 מ"ק (ממוצע: 220 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 3,526 מ"ק חומר. תועדו 6 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 390 מ"ק ו- 4 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 171 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 3,746 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

4. דיון

4.1 נפחים והערכת הנסיגה

בתקופת המחקר (כ- 16 חודשים בין אוגוסט 2023 לדצמבר 2024) תועדו לאורך 7 מקטעי המצוק הרציף 236 אירועי כשל מצוק (CC) בנפח כולל של 31,772 מ"ק, 81 אתרים של סחיפת טאלוסים (TE) בנפח כולל של 7,485 מ"ק ו- 179 אתרים בהם נערם חומר שקרס מהמצוק על החוף (TD) בנפח כולל של 12,628 מ"ק (טבלה 2). בהתאם נמדד מאזן-נפח שלילי (EE) עבור כלל המצוק החופי, המסתכם ב- 26,630 מ"ק. בהתחשב באורך המצטרב של מקטעי המצוק שנבחנו (31.9 ק"מ) מתקבל שטף גריעה ממוצע של 835 מ"ק עבור כל ק"מ מצוק לתקופה המחקר 2023-2024. בהתחשב בכך ששטח הפנים של כלל מקטעי המצוק שנבחנו (כלומר: סה"כ אורך X גובה ממוצע) הוא ~747,000 מ² (טבלה 1) הנפח שנגרע מהמערכת במהלך 2023-2024 מתרגם לנסיגה מזרחה לכוון היבשה **ממוצעת** של כ 0.035 מ' עבור כלל מצוק (3.5 ס"מ).

4.2 השוואה בין מקטעי המצוק השונים

התפלגות האירועים השונים וקצב הפעילות לאורך מקטעי המצוק השונים במהלך תקופת המחקר 2023 - 2024 לא הייתה אחידה (טבלה 4):

התמוטטות מצוק (CC): שטף גריעת הסדימנט כתוצאה מהתמוטטות מצוק (CC) במקטעים עין הים, נתניה העיר ונתניה דרום (1,72, 945 ו 472 מ"ק/ק"מ מצוק, בהתאמה) היה נמוך משטף קריסות מצוק הממוצע של כלל המצוק (835 מ"ק/ק"מ). במקטעי נעורים, געש ואשקלון דרום שטף גריעת הסדימנט כתוצאה מהתמוטטות מצוק (1,278, 961 ו 1,008 מ"ק/ק"מ, בהתאמה) היה דומה לקצב הגריעה הממוצע לאורך כלל המצוק ואילו במקטע אשקלון צפון שטף גריעת הסדימנט כתוצאה מהתמוטטות מצוק (1,680 מ"ק/ק"מ מצוק) היה גבוה ~פי 2 ממוצע כלל המצוק במהלך 2023-2024 (835 מ"ק/ק"מ מצוק).

סחיפת טאלוסים (TE): שטף סחיפת הטאלוסים (TE) הממוצע לאורך כלל המצוק בתקופה 2023-2024 היה 235 מ"ק/ק"מ (טבלה 4). ערכי TE גבוהים ממוצע זה נמדדו במקטע געש (526 מ"ק/ק"מ). ערכי TE דומים לממוצע כלל המצוק נמדדו במקטעי עין הים, נעורים, אשקלון צפון ואשקלון דרום (111, 91, 126, 226, 226 מ"ק/ק"מ, בהתאמה) וערכי TE נמוכים מהממוצע נמדדו במקטעי נתניה העיר ונתניה דרום (21 ו 39 מ"ק/ק"מ, בהתאמה).

הערמות טאלוסים (TD): שטף הערמות הטאלוסים (TD) הממוצע לאורך כלל המצוק בתקופת המחקר 2023-2024 היה 396 מ"ק/ק"מ (טבלה 4). ערכי TD גבוהים ממוצע זה נמדדו במקטע נתניה העיר (896 מ"ק/ק"מ) בעוד ערכי TD נמוכים מהממוצע נמדדו במקטעי עין הים ואשקלון דרום (60 ו 21 מ"ק/ק"מ, בהתאמה). במקטעי נעורים, נתניה דרום, געש ואשקלון צפון נמדדו ערכי TD הקרובים לממוצע של כלל המצוק (266, 154, 615 ו 440 מ"ק/ק"מ, בהתאמה).

טבלה 4. צפיפות האירועים ושטף הסדימנט (עבור 16 חודשים; 8/2023-12/2024)

מקטע	אורך	כשל מצוק (CC _f)				סחיפת טאלוס (TE _f)				טאלוסים שנוספו (TD _f)				סה"כ גריעה (EE _f)
		מספר קריסות (#)	נפח כולל (m ³)	מ"ק/מ	מ"ק/מ	מספר איתרים (#)	נפח כולל (m ³)	מ"ק/מ	מ"ק/מ	מספר טאלוסים (#)	נפח כולל (m ³)	מ"ק/מ	מ"ק/מ	
עין הים	3	16	516	5.3	-172	5	679	1.7	-226	14	181	4.7	60	-338
נעורים	5.3	48	5093	9.1	-961	14	667	2.6	-126	40	1410	7.5	266	-821
נתניה העיר	3.1	39	2931	12.6	-945	3	65	1.0	-21	28	2777	9.0	896	-70
נתניה דרום	4.0	29	1886	7.3	-472	4	157	1.0	-39	15	618	3.8	154	-356
געש	10.0	77	12778	7.7	-1278	45	5256	4.5	-526	70	6150	7.0	615	-1188
אשקלון צפון	3.0	11	5041	3.7	-1680	4	272	1.3	-91	8	1321	2.7	440	-1330
אשקלון דרום	3.5	16	3528	4.6	-1008	6	390	1.7	-111	4	171	1.1	49	-1070
סה"כ / ממוצע	31.9	236	31772	7.4	-996	81	7485	2.5	-235	179	12628	5.6	396	-835

שטף גריעת חומר מהמצוק ובסיסו (EE_f): שטף הגריעה EE_f (מ"ק/ק"מ) הממוצע לכלל המצוק חושב על ידי חלוקה של נפח EE הכולל (מ"ק) בכלל אורך המצוק (ק"מ) (טבלה 4). שטף גריעת החומר הממוצע לאורך כל מצוק החוף בתקופה 2023-2024 עומד על 835 מ"ק/ק"מ. במקטעי עין הים, נתניה העיר ונתניה דרום

נמדדו שטפי EE_f נמוכים ממוצע זה (338, 70 ו 356 מ"ק/ק"מ, בהתאמה). במקטעי נעורים, געש, אשקלון צפון ואשקלון דרום נמדדו שטפי EE_f דומים לממוצע (821, 1,188, 1,330 ו 1,070 מ"ק/ק"מ, בהתאמה).

4.3 השוואה של פעילות המצוק בין שנת המעקב הנוכחית (2023-24) לשנים הקודמות (2015-16, 2016-17, 2017-18, 2018-19, 2019-20, 2020-21, 2021-22 ו 2022-23)

טבלה 5 מציגה השוואה בין פעילות המצוק בשנת המעקב הנוכחית (2023-24) לשבע תקופות המחקר הקודמות מאז 2015. מסיבות של אילוצים טכניים גיחות הליידאר החוזרות עליהן מתבסס המיפוי במהלך שנים אלו לא בוצעו באותה עונה כל שנה (2015/2, 2016/3, 2017/4, 2018/10, 2019/7, 2020/7, 2021/12, 2022/10, 2023/8 ו 2024/12) ולכן בפועל אורך תקופות המחקר של 2015-16, 2016-17, 2017-18, 2018-19, 2019-20, 2020-21, 2021-22, 2022-23 ו 2023-24 הוא 13, 13, 18, 10, 12, 17, 10 ו 16 חודשים, בהתאמה. ואולם משום שרוב פעילות קריסת המצוק ופינוי החומר מבססו מתרחשת במהלך עונת החורף והאביב המוקדם (Katz and Mushkin, 2013) וכל אחת מתקופות המחקר תוחמת חורף בודד, מושווים כאן נפחי פעילות המצוק שנמדדו בכל תקופת מחקר ללא נרמול למספר החודשים של תקופת המדידה.

פעילות כלל המצוק - ממוצע שטף הגריעה (EE_f) של חומר מכלל המצוק החופי כפי שנמדד בשנת המחקר הנוכחית (2023-24), כלומר 835 מ"ק/ק"מ/חורף, היה במרכז טווח הערכים שנמדדו במיפויים הקודמים מאז 2015: 323 – 1614 מ"ק/ק"מ/חורף (טבלה 5). קצב הסחיפה שנמדד ב 2023-2024 דומה לקצב סחיפת החומר הממוצע (930 מ"ק/ק"מ/שנה) שנמדד לאורך המצוק החופי בעזרת מדידות ליידאר אווירי מאז 2015.

פעילות המקטעים השונים - בתקופת המחקר הנוכחית (2023-24), בדומה לתקופות המחקר הקודמות, נמדדה שונות משמעותית בשטף הגריעה (EE_f) בין מקטעי המצוק השונים (טבלה 5, סעיף 4.2). בחינת השונות בערכי EE_f של מקטעי המצוק השונים לאורך הזמן מגלה שערכי EE_f שנמדדו עבור מקטע עין הים ב 2023-24 (338 מ"ק/ק"מ/חורף) נמצאים בתוך טווח הערכים שנמדדו למקטע זה במרוצת השנים מ 2015 (23 - 1,162 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע נעורים שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2023-24 עמד על 821 (23 - 1,162 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע נעורים שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2023-24 עמד על 70 (98 - 1,021 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע נתניה העיר שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2023-24 עמד על 70 (98 - 1,021 מ"ק/ק"מ/חורף). התחתון של ערכי EE_f שנמדדו למקטע זה מאז 2016 (60 - 1,091 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע נתניה דרום נמדד EE_f של 356 מ"ק/ק"מ/חורף עבר 2023-2024 כאשר ערך זה נמצא בחלק התחתון של הטווח שנמדד עבור מקטע זה מאז 2015 (55 - 1,484 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע געש שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2023-24 עמד על 1,188 מ"ק/ק"מ. ערך זה נמצא בגבול התחתון של טווח ערכי EE_f שנמדדו למקטע זה מאז 2015 (1,238-2,522 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע אשקלון צפון שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2023-24

עמד על 1,330 מ"ק/ק"מ ונמצא בטווח ערכי EE_f ה"רגילים" שנמדדו למקטע זה מאז 2015 (716-2,368 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע אשקלון דרום שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2023-24 (1070 מ"ק/ק"מ/חורף) היה במרכז טווח ערכי ה EE_f שנמדדו במקטע זה מאז 2015 (84-1,558 מ"ק/ק"מ/חורף).

5. מסקנות

בכל מקטעי המצוק שנבדקו במסגרת הדוח הנוכחי, נרשמה בסיכום שנת המעקב 2023-24 גריעה של חומר מהמערכת החופית. במהלך תקופה זו נפח קריסות המצוק המצטבר עמד על כ 31,772 מ"ק וסה"כ נגרע נפח של כ 26,630 מ"ק לאורך כל 31.9 הק"מ של מערכת המצוק-חוף. ממוצע גריעת חומר של 835 מ"ק/ק"מ/חורף מתרגם לקצב נסיגה ממוצע של 0.035 מ"/שנה (3.5 ס"מ) עבור כלל המצוק בתקופה 8/2023-12/2024. קצב סחיפה ממוצע זה עבור 2023-24 דומה לקצב סחיפת החומר השנתי מהמצוק החופי (930 מ"ק/ק"מ/שנה) שנמדד בעזרת מדידות לייזר אווירי מאז 2015 (טבלה 5). קצב גריעת החומר במקטע אשקלון צפון במהלך 2023-24 שעמד על 1,330 מ"ק/ק"מ/חורף לעומת קצב ממוצע של כלל המצוק שהיה 835 מ"ק/ק"מ/חורף באותה תקופה מצביע על כך שמקטע אשקלון צפון נותר ב 2023-24 כ"מוקד" של קצב גריעה גבוה יחסית לממוצע כלל המצוק.

טבלה 5. השוואה של פעילות המצוק בין השנים: 2015-16, 2016-17 ו- 2017-18, 2018-19, 2019-20, 2020-21, 2021-22, 2022-23 ו 2023-24

סה"כ גריעה (EE _i) (מ"ק/ק"מ/חורף)									טאלוסים שנוספו (TD _i) (מ"ק/ק"מ/חורף)									סחיפת טאלוס (TE _i) (מ"ק/ק"מ/חורף)									כשל מצוק (CC _i) (מ"ק/ק"מ/חורף)									מקטע
2023-2024 [^]	2022-2023	2021-2022	-2020-2021 ^{**}	2019-2020	2018-2019	2017-2018 [*]	2016-2017	2015-2016	2023-2024 [^]	2022-2023	2021-2022	-2020-2021 ^{**}	2019-2020	2018-2019	2017-2018 [*]	2016-2017	2015-2016	2023-2024 [^]	2022-2023	2021-2022	-2020-2021 ^{**}	2019-2020	2018-2019	2017-2018 [*]	2016-2017	2015-2016	2023-2024 [^]	2022-2023	2021-2022	-2020-2021 ^{**}	2019-2020	2018-2019	2017-2018 [*]	2016-2017	2015-2016	
338	100	320	487	1,162	538	104	23	563	60	45	954	82	137	291	107	1	145	136	21	20	29	603	180	33	10	117	172	124	1254	440	696	649	179	14	591	עין הים
821	482	109	511	598	311	210	98	1021	266	163	128	105	232	154	162	112	126	48	85	68	192	59	154	197	46	273	961	561	170	424	771	311	176	163	874	נעורים
70	100	60	582	290	486	1,091	168		896	188	158	362	489	178	332	545		22	51	34	189	148	303	515	46		945	236	184	757	633	361	908	667		נתניה העיר
356	98	55	165	625	1,484	977	205	206	154	637	82	301	406	280	665	526	243	39	4	19	80	218	606	840	16	88	472	731	119	386	840	1,158	801	715	361	נתניה דרום
1188	567	293	1,922	1,757	2,522	2,342	1,238	1,322	615	312	207	822	1,025	705	872	611	500	117	363	113	638	608	1,364	611	196	366	1278	516	387	2,106	2,175	1,863	2,603	1,654	1,456	געש
1330	1771	1394	1,253	1,111	4,070	908	716	2,368	440	33	46	330	782	529	480	122	285	68	1013	1169	781	233	1,152	141	128	683	1680	792	271	803	1,660	3,447	1,247	710	1,970	אשקלון צפון
1070	1205	359	1,497	1,558	965	489	872	84	49	21	78	146	10	21	488	15	163	65	22	98	217	54	760	125	46	54	1008	1203	340	1,427	1,514	226	851	841	193	אשקלון דרום
835	588	323	1193	1,145	1,614	1,146	612	895	ממוצע כל המצוק																											

* נתוני 2017-2018 מכסים תקופה של 18 חודשים בין 4/2017 – 10/2018. בטבלה זו נתוני 2017-2018 אינם מנומלים למספר החודשים משום שתקופה זו כללה עונת חורף אחת בלבד. רוב פעילות קריסת המצוק ופינוי החומר מבסיסו מתרחשת החורף.

** נתוני 2020-2021 מכסים תקופה של 17 חודשים בין 7/2020 – 12/2021. בטבלה זו נתוני 2020-2021 אינם מנומלים למספר החודשים בהנחה מקורבת שתקופה זו כללה עונת חורף אחת.

[^] נתוני 2023-2024 מכסים תקופה של 16 חודשים בין 8/2023 – 12/2024. בטבלה זו נתוני 2023-2024 אינם מנומלים למספר החודשים בהנחה מקורבת שתקופה זו כללה עונת חורף אחת.

- תאריכי גיחות הליידאר ותקופות המחקר מאז 2015:

- 2/2015-3/2016, 2015-2016 13 חודשים בין
- 3/2016-4/2017, 2016-2017 13 חודשים בין
- 4/2017-10/2018, 2017-2018 18 חודשים בין
- 10/2018-7/2019, 2018-2019 10 חודשים בין
- 7/2019-7/2020, 2019-2020 12 חודשים בין
- 7/2020-12/2021, 2020-2021 17 חודשים בין
- 12/2021-10/2022, 2021-2022 10 חודשים בין
- 8/2023-10/2022, 2022-2023 10 חודשים בין
- 12/2024- 8/2023, 2023-2024 16 חודשים בין

6. רשימת מקורות

- אלמגור, ג., פרת, א., 2016. חוף הים התיכון של ישראל – מהדורה רביעית. המכון הגיאולוגי דוח GSI/13/02, 470 עמ'.
- זילברמן, ע., אילני, ש., נצר-כהן, ח., קלבו, ר., 2006. מיפוי גיאומורפולוגי-ליתולוגי של רצועת החוף של ישראל (עד כ- 1 ק"מ ממזרח לחוף) הערות ודברי הסבר למפה. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/23/06.
- כץ, ע., הכט, ה., פטרנקר, ג., אלמוג, ע., 2007. אומדן קצב הנסיגה של המצוק החופי בישראל והערכת מיקום המצוק בשנת 2100. המכון הגיאולוגי דוח GSI/21/07, 34 עמ'.
- כץ, ע., מושקין, ע., כרובי, א., שמש, ר., 2016. קצבי הרקע והקצב הנוכחי של נסיגת המצוק החופי של ישראל והמלצה לשיטה חדשה לניטור, זיהוי וכימות שינויים בקצב הנסיגה. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/26/2016, 35 עמ'.
- כץ, ע., מושקין, ע., בוסטן, ע., כרובי, א., שמש, ר., 2017. התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2015 ו-2016. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/01/2017, 29 עמ'.
- כץ, ע., מושקין, ע., בוסטן, ע., כרובי, א., עופרי, ע., בוסטן, ע., שמש, ר., 2018. התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2016 ו-2017. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/01/2018, 41 עמ'.
- כץ, ע., מושקין, ע., כרובי, א., סגל, ע., עפרי, ע., 2019. התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2017 ו-2018. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/13/2019, 41 עמ'.
- מושקין, ע., כץ, ע., כרובי, א., קוטליארוב, מ., סגל, ע., 2020. התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2018 ו-2019. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/11/2020, 31 עמ'.
- מושקין, ע., כץ, ע., כרובי, א., אשקר, ל., נבון, נ., קוטליארוב, מ., 2021. התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2019 ו-2020. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/15/2021, 30 עמ'.
- מושקין, ע., רוזן, נ., כץ, ע., כרובי, א., 2022. התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2020 ו-2021. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/09/2022, 28 עמ'.
- מושקין, ע., רוזן, נ., פלג, א., כץ, ע., כרובי, א., 2023. התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2021 ו-2022. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/16/2023, 31 עמ'.
- מושקין, ע., קליינמן, א., כץ, ע., כרובי, א., 2024. התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2022 ו-2023. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/08/2024, 28 עמ'.
- נר, י., 1988. חופי הים התיכון של ישראל וצפון סיני, היבטים סדימנטולוגיים. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/39/88, 130 עמ'.
- נר, י., 1992. מצוקי הכורכר בחופי הים התיכון של ישראל. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/28/92, 75 עמ'.
- פרת, א., אלמגור, ג., 1996. סיכונים לאורך מצוק השרון. המכון הגיאולוגי GSI/5/96, 80 עמ'.
- Arkin, Y., Michaeli, L., 1985. Short- and long- term erosional processes affecting the stability of Mediterranean coastal cliffs of Israel. Engineering Geology 21, 153-174.
- Barkai, O., Katz, O., Mushkin, A., Goodman-Tchernov, B.N., 2017. Erosion of archaeological sites along the Israeli Mediterranean coastline and its application for assessing long-term retreat rates of the sea cliff. Geoarchaeology 2017, 1-14.

- Engelmann, A., Neber, A., Frenchen, M., Boenigk, W., Ronen., A., 2001. Luminescence chronology of Upper Pleistocene and Holocene aeolianites from Netanya South Sharon Coastal Plain, Israel. *Quaternary Science Reviews* 20, 799-804.
- Frenchen, M., Dermann, B., Boenigk, W., Ronen., A., 2001. Luminescence chronology of aeolianites from the section at Givat Olga Coastal Plain of Israel. *Quaternary Science Reviews* 20, 805-809.
- Frenchen, M., Neber, A., Dermann, B., Tsatskin, A., Boenigk, W., Ronen., A., 2002. Chronostratigraphy of aeolianites from the Sharon Coastal Plain of Israel. *Quaternary International* 89, 31-44.
- Goodman-Tchernov, B., Katz, O., 2016. Holocene-era submerged notches along the southern Levantine coastline: Punctuated sea level rise? *Quaternary International* 401, 17-27.
- Gvirtzman, G., Shachnai, E., Bakler, N., Ilani, S., 1984. Stratigraphy of the Kurkar Group (Quaternary) of the coastal plain of Israel. *Geological Survey of Israel, Current Research* 1983-4, 70-82.
- Goldreich, Y., 2003, *The Climate of Israel: Observation, Research, and Application*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Harel, M., Amit, R., Porat, N., Enzel, Y., in press. Evolution in of the southeastern Mediterranean coastal plain. In: Enzel, Y., and Bar-Yosef, O., *Quaternary of the Levant: Environments, Climate Change, and Humans*. Cambridge University Press.
- Katz, O., and Mushkin, A., 2013. Characteristics of sea-cliff erosion induced by a strong winter storm in the eastern Mediterranean: *Quaternary Research*, v. 80, no. 1, p. 20-32.
- Mushkin A., Katz, O., Crouvi, O., Alter, S.R., Shemesh, R., 2016. Sediment contribution from Israel's coastal cliffs into the Nile's littoral cell and its significance to cliff-retreat mitigation efforts. *Engineering Geology* 215, 91-94.
- Mushkin A., Katz, O., Porat, N., 2019. Overestimation of short-term coastal cliff retreat rates in the eastern Mediterranean resolved with a sediment budget approach. *Earth Surface Processes Landforms*, 44, 177-190 DOI: 10.1002/esp.4490.
- Perath, I., Almagor, G., 2000. The Sharon Escarpment (Mediterranean Coast, Israel): Stability, Dynamics, Risks and Environmental Management. *Journal of Coastal Research* 16, 207-224.
- Porat, N., Wintle, A.G., Rite, M., 2004. Mode and timing of kurkar and hamra formation, central coastal plain, Israel. *Isr. J. Earth Sci.* 53, 13-25.
- Shemesh, R., 2018. The sediment budget along Israel's eastern Mediterranean cliff dominated beaches, during single storm to annual time scales. Master thesis, Hebrew University.
- Sivan, D., Wdowinski, S., Lambeck, K., Galili, E., and Raban, A., 2001. Holocene sea-level changes along the Mediterranean coast of Israel, based on archaeological

observations and numerical model: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 167, no. 1, p. 101-117.

Yaalon, D. H., 1967. Factors affecting the lithification of eolianite and interpretation of its environmental significance in the coastal plain of Israel. *Journal of Sedimentary Petrology* 37, 1189-1199.

Zviely, D., Klein, M., 2004. Coastal cliff retreat rates at Beit-Yannay, Israel in the 20th century. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 175-184.

נספח 1

פעילות המצוק במהלך 2023-2024 לפי תאי השטח של תמ"א 13/9

תוצאות המיפוי המתוארות בדו"ח זה נבחנו גם במסגרת חלוקה גיאוגרפית של המצוק החופי ל 50 תאי השטח של תמ"א 13/9 המשתרעים לאורך מצוק מצטבר של כ 21.3 ק"מ (טבלה 6). במהלך 16 החודשים של תקופת המחקר (8/2023-12/2024) נמדדו בכלל תאי השטח של תמ"א 13/9 נפחי TE, CC ו TD של 15,318, 1,102 ו 6,096 מ"ק, בהתאמה. נפח הגריעה האפקטיבי (EE), כמתואר בסעיף 2.6) מכלל תאי השטח במהלך 2023-2024 היה 10,324 מ"ק. במהלך 2023-24 תועדה פעילות מצוק ב 22 מתוך 50 תאי השטח של תמ"א 13/9, כלומר ב 44% מהתאים. אורכם המצטבר של כלל התאים הפעילים ב 2023-24 היה 11.5 ק"מ. בחלוקה של סה"כ הגריעה מהתאים (10,324 מ"ק) באורכם המצטבר של התאים הפעילים (11.5 ק"מ) מתקבל שטף גריעה ממוצע (EE_f) של 904 מ"ק/ק"מ/חורף. ערך זה דומה לשטף ה EE_f הממוצע שחושב עבור כל המצוק החופי של ישראל ב 2023-24 (835 מ"ק/ק"מ/חורף).

סיווג של 50 תאי השטח של תמ"א 13/9 לתאים בעלי אופי עירוני/מפותח (כולל חניות, דרכים ושטחים שבוצעו בהם עבודות עפר), ולתאים בעלי אופי טבעי/חקלאי (נספח 2, מושקין וחוב', 2024). אורכם המצטבר של 39 תאי השטח שסווגו כ"עירוניים" הוא 18.3 ק"מ ובמהלך 2023-24 תועדה פעילות מצוק ב 16 מתוך תאים אלו (41%). אורכם המצטבר של התאים העירוניים מהם נגרע חומר ב 2023-24 היה 9.8 ק"מ ובסך הכל נגרע מתאים אלו נפח מצטבר של 9,741 מ"ק. בהתאם, מתקבל ששטף הגריעה הממוצע (EE_f) מהתאים העירוניים הפעילים ב 2023-24 היה 956 מ"ק/ק"מ/חורף. אורכם המצטבר של 11 התאים שסווגו כ"טבעיים" הוא 3.0 ק"מ ובמהלך 2023-2024 תועדה פעילות מצוק ב 6 מתוך תאים אלו (55%). אורכם המצטבר של התאים הטבעיים מהם נגרע חומר ב 2023-24 היה 1.6 ק"מ ובסך הכל נגרע מתאים אלו נפח מצטבר של 911 מ"ק. בהתאם, מתקבל ששטף הגריעה הממוצע (EE_f) מהתאים העירוניים הפעילים ב 2023-24 היה 581 מ"ק/ק"מ/חורף. במהלך 2023-24 שטף הגריעה בתאים העירוניים הפעילים היה גבוה משטף הגריעה בתאים הטבעיים – 956 מול 581 מ"ק/ק"מ/חורף, בהתאמה.

טבלה 6 - סיכום הפעילות לאורך המצוק החופי (2023-2024) במקטעי העבודה של תמ"א 13/9.

מקטע	אורך (m)	סוג מקטע -1 מופר/עירוני -4 טבעי/חקלאי	כשל מצוק CC		סחיפת טאלוס TE		טאלוסים TD שנוספו		סה"כ גריעה EE		שטפים	
			נפח כולל (m³)	מספר קריסות	נפח כולל (m³)	מספר פוליגונים	נפח כולל (m³)	מספר טאלוסים	נפח כולל (m³)	סה"כ גריעה (m³)	CC _f (m³/m)	EE _f (m³/m)
1	188	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	58	1	-424	2	0	0	0	0	-424	-7.32	-7.32	-7.32
3	303	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	122	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	197	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	640	1	-1946	15	0	0	303	12	-1643	-3.04	-2.57	-2.57
7	337	1	-409	5	-76	2	46	5	-439	-1.21	-1.30	-1.30
8	518	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9A	88	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9B	139	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	258	1	-47	2	-71	1	35	3	-83	-0.18	-0.32	-0.32
11	349	1	-327	1	-114	2	195	1	-246	-0.94	-0.71	-0.71
12	220	1	-113	2	0	0	195	2	82	-0.52	0.37	0.37
13	232	1	-223	5	-37	1	22	1	-237	-0.96	-1.02	-1.02
14	1342	1	-896	8	-61	2	354	7	-603	-0.67	-0.45	-0.45
15A	2837	1	-3306	46	-72	3	2701	26	-677	-1.17	-0.24	-0.24
15B	570	1	-369	3	0	0	253	3	-116	-0.65	-0.20	-0.20
16	229	1	-90	1	0	0	28	1	-62	-0.39	-0.27	-0.27
17	196	4	-46	1	0	0	0	0	-46	-0.24	-0.24	-0.24
18	316	4	-180	3	0	0	63	2	-117	-0.57	-0.37	-0.37
19	173	4	-65	1	-398	2	0	0	-464	-0.38	-2.68	-2.68
19.1	290	1	-113	2	0	0	76	1	-37	-0.39	-0.13	-0.13
20	187	1	-103	1	0	0	14	1	-89	-0.55	-0.47	-0.47
20.1	92	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.2	278	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	170	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21.1	263	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21.2	175	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	411	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	894	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	216	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24.1	290	4	-119	1	0	0	42	1	-76	-0.41	-0.26	-0.26
24.2	304	4	-118	2	0	0	10	1	-108	-0.39	-0.36	-0.36
25	620	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.1	290	4	-141	4	0	0	41	3	-100	-0.49	-0.34	-0.34
26	345	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	904	1	-1205	7	0	0	30	2	-1176	-1.33	-1.30	-1.30
28A	261	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28B	262	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	734	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	635	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	546	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	250	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	850	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	375	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	177	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	170	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	284	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	1161	1	-5041	11	-272	4	1321	8	-3991	-4.34	-3.44	-3.44
39	642	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
סה"כ מקטעי מצוק		21388	11417		17		-15318		124		-1.3	
מקטעי מצוק פעילים		11417	11417		17		-15318		124		-1.3	
		אורך (m)			TE (m³)		TD (#)		EE (m³)		CC _f (m³/m)	

1 – תא שטח בן מתקיים פיתוח עירוני כולל חניות דרכים ושטחים שבוצעו בהם עבודות עפר
4 – תא שטח טבעי/ חקלאי פתוח

Abstract

This report presents quantitative mapping of sea-cliff collapse and erosion activity along Israel's Mediterranean sea cliffs during a 16 month period between August 2023 and December 2024. Results are based on topographic changes measured by differencing two high-resolution (0.5 m/pixel) Digital Elevation Models (DEMs) derived from airborne LiDAR data acquired at 4 pts/m². Cliff activity is described in terms of volumetric erosion/deposition along the seven primary segments that comprise Israel's sea cliff: Ein Yam, Ne'urim, Natanya, Natanya South, Ga'ash, Ashkelon North, and Ashkelon South. Mapping was conducted manually in the GIS software environments and was verified in the field.

For the studied period we found 236 cliff collapse events that amount to a total of ~31,772 m³. Talus deposition occurred at 179 sites and amounted to a total of ~12,628 m³. Talus erosion (of pre-existing talus piles) due to wave scouring was documented at 81 sites and amounted to a total of ~7,485 m³. Our results indicate that erosion and landwards retreat of Israel's sea cliff between 2023-2024 occurred at an average rate of ~835 m³ per km of cliff per year, which translates to a cliff-scale retreat rate of ~0.035 m/yr (3.5 cm/yr). This erosion rate is lower than the cliff's average annual erosion rates previously measured with airborne LiDAR since 2006. As in previous years, significant spatial variability in cliff activity was documented during 2023-2024: Erosion rates along the Ein Yam, Natanya city and Natanya South segments were lower than the entire cliff average, whereas erosion rates higher than the entire cliff average were measured along the Ashkelon North segment. Erosion rates comparable to the entire cliff average were measured along the Ne'urim, Ga'ash and Ashkelon South segments.

A comparison of cliff activity during 2023-24 and the previous year revealed higher erosion rates along the Ein Yam, Neurim and Natanya South segments. Comparable erosion rates to 2022-2023 were measured along the Natanya City, Gaash, Ashkelon North and Ashkelon South segments during 2023-2024. The exceptionally high erosion rates documented along the Ashkelon North segment during the 2018-2019 period did not occur during the 2023-2024 period. The 2023-2024 erosion rate along the Ashkelon North segment was comparable to the 9-year average rate measured for this segments since 2015.



Ministry of Energy
Geological Survey of Israel

Failure and erosion along Israel's coastal cliffs between 2023 and 2024

**Amit Mushkin, Dafna Shemer, Uriel Meir, Alon Klaiman, Oded Katz and
Onn Crouvi**

Submitted to

The Mediterranean Coastal Cliff Preservation Government Company

GSI Report: GSI/13/2025

Jerusalem, May 2025