



המכון הגיאולוגי
משרד האנרגיה

התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2021 ו- 2022

עמית מושקין, נגה רוזן, אייל פלג, עודד כץ, און כרובי

מוגש לחברה הממשלתית להגנות מצוקי חוף הים התיכון

ירושלים, מאי 2023

דוח מס' GSI/XX/2023

תקציר

דוח זה מציג איתור, מיפוי ואפיון של השינויים בתוואי המצוק החופי (ים התיכון) שהתרחשו בין דצמבר 2021 לבין אוקטובר 2022 (סה"כ כ- 10 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 ממ"ג (ARC-GIS) ועבר אימות 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 ובנפרד נבדקו גם מקטעים מצוקיים קצרים, רובם באזורים עירוניים מופרים, לאורך החופים בין הרצליה ובת ים וכן באזור פלמחים.

בתקופת המחקר (2021 - 2022) נרשמו בכלל מקטעי המצוק הרציפים שמופו 269 אירועי כשל מצוק בנפח כולל של כ- 11,572 מ"ק. ב- 77 אתרים נערמו טאלוסים על החוף בנפח כולל של כ- 5,580 מ"ק, וב- 177 אתרים התרחשה סחיפה של טאלוסים (תוצרי כשל מצוק מלפני דצמבר 2021) על ידי הגלים בנפח כולל של כ- 6,840 מ"ק. נמצא כי בתקופה האמורה (10/2022-12/2021) נגרע מהמצוק ומבסיסו נפח של 10,310 מ"ק הגורם למגמה של נסיגת המצוק כלפי מזרח וסחיפת חומר מהמערכת בקצב ממוצע של כ- 323 מ"ק עבור ק"מ מצוק. קצב ממוצע מדוד זה עבור 2021-22 נמוך מטווח קצבי הנסיגה הממוצעים שנמדדו לאורך המצוק של ישראל מאז 2015, כלומר בין 612 ל 1,614 מ"ק/ק"מ/חורף. עם זאת, בדומה לשנים קודמות נמדדה גם ב 2021-2022 שונות מרחבית משמעותית בקצבי הסחיפה בין מקטעי המצוק השונים: במקטעי נעורים, נתניה העיר, ונתניה דרום השטף (נפח החומר שנגרע עבור יחידת אורך מצוק) היה נמוך מהשטף הממוצע של כלל המצוק ואילו במקטע אשקלון צפון השטף היה גבוה ממוצע כלל המצוק. במקטעי אשקלון דרום, געש ועין ים שטף הגריעה היה דומה לממוצע כלל המצוק ב 2021-2022.

השוואה בין פעילות המצוק בשנת המעקב הנוכחית (2021-22) לשנה הקודמת לה (2020-21) מראה כי ברוב מקטעי המצוק (פרט למקטע אשקלון צפון) היה קצב הפעילות בשנה הנוכחית נמוך מאשר בשנה הקודמת. במקטע אשקלון צפון היה קצב הסחיפה מהמצוק בשנה הנוכחית דומה לקצב הסחיפה בשנה הקודמת. יצוין כי שטף הסחיפה החריג שנמדד במקטע אשקלון צפון במהלך 2018-19 לא חזר על עצמו במהלך 2021-2022 וכי קצב הגריעה מהמצוק במקטע אשקלון צפון בשנה הנוכחית דומה לקצב הסחיפה השנתי הממוצע שנמדד לאורך כלל המצוק מאז 2015.

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 2021 - 2022
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
13	3.1.6 מקטע אשקלון צפון
14	3.1.7 מקטע אשקלון דרום
22	4. דיון
22	4.1 נפחים והערכת נסיגה
22	4.2 השוואה בין המקטעים השונים
23	4.3 השוואה של פעילות המצוק בין שנת המעקב הנוכחית לקודמות
25	5. מסקנות
26	6. רשימת מקורות
27	7. נספחים

1. הקדמה

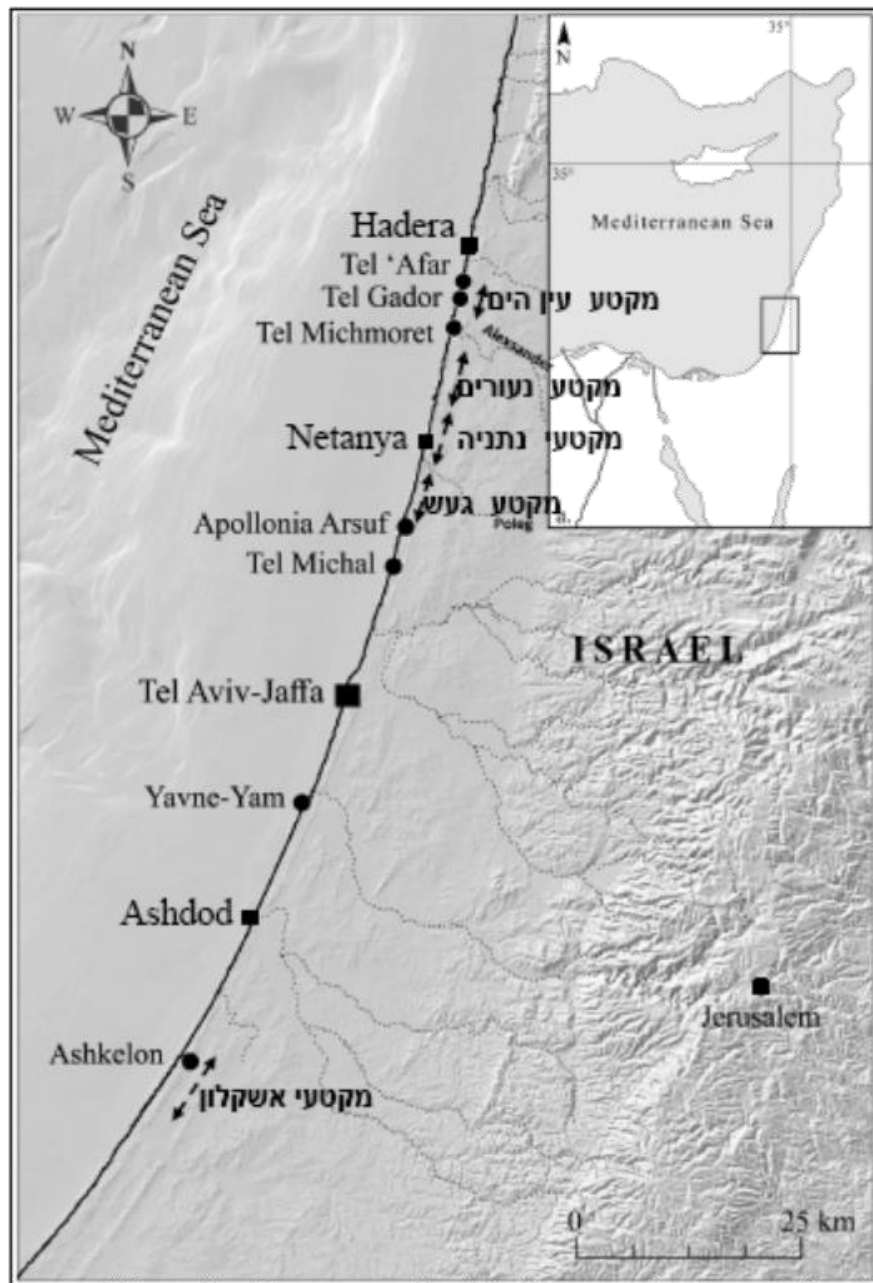
לאורך כ- 50 קילומטר של רצועת החוף הישראלי קיים מצוק חוף המפריד בין אזור חוף הים למרגלותיו, הנתון להשפעת הגלים, לבין מישור החוף מעל, בו מצויים מבנים וממוקמות תשתיות רבות (ניר, 1992). גובה המצוק מגיע עד חמישים מטרים ובסיסו מצוי במרחק של בין מטרים עד עשרות מטרים מזרחה מקו המים. בעקבות פגיעת הגלים החוזרת בבסיס המצוק, מתרחשות מעת לעת התמוטטויות אשר במשך הזמן מסיגות את גג המצוק מזרחה לכיוון היבשה (כץ וחובריו, 2007; כץ וחובריו, 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 דצמבר 2021 לאוקטובר 2022 (סה"כ כ- 10 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; al., 2004). 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. מקטעי המצוק החופי לאורכם התבצעה העבודה מסומנים בקו מקווקוו. מצוק השרון הוא חלק המצוק החופי הנמשך מחלקו הדרומי של מקטע געש עד חלקו הצפוני של מקטע עין הים.

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.

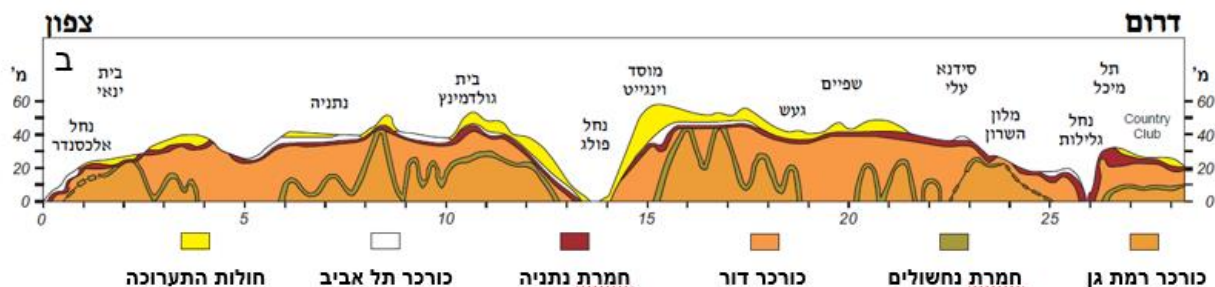
כורכר דור: מורכב בעיקר מגרגירי קוורץ (30%-90%) ושברי-קונכיות בליכוד גירי בדרגה משתנה. כורכר דור מציג ריבוד צולב וכיסי חול בלתי מלוכד, בדומה לכורכר רמת-גן. כורכר דור ממלא שקעים בכורכר רמת-גן (עם חמרת נחשולים בגגו) ומגיע לעובי מרבי של 40 מטר. המגע העליון עם חמרת נתניה הוא גלי. גיל היחידה 53,000 - 51,000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

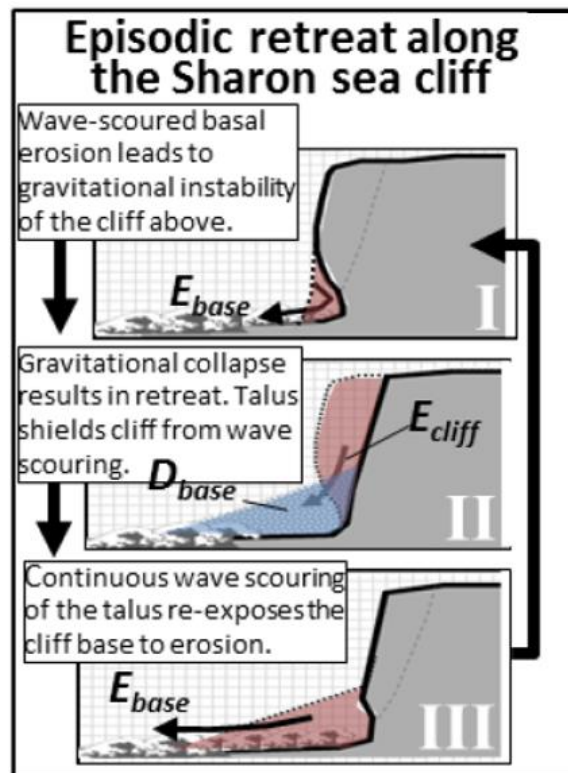
חולות תערוכה: חול למינרי לא מלוכד, זהה בהרכבו לכורכר רמת-גן ודור (70%-90% גרגירי קוורץ דקים). לחולות אין ליכוד גירי אך הם מיוצבים הודות לנוכחות חומר אורגני. עוביים המרבי של החולות מגיע למספר מטרים. מגע תחתון, עם כורכר תל אביב, כמעט אופקי. בגג חולות התערוכה קיים מעבר לא סדור לחולות חדרה או לקרקע. גיל 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 40x) 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 וחיטי, 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 וחובריו, 2016; Perath and Almogor, 2000; Mushkin et al., 2019): (I) סחיפת בסיס המצוק על ידי הגלים, יצירת צניר 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 דצמבר 2021 לבין אוקטובר 2022 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 2021: 12/2021

גיחת 2022: 10/2022

ביצוע הטיסה: חברת אופק תצלומי אוויר; פיקוח ובקרת איכות: 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', 2021).

להלן שלבי התהליך 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. זאת תוך הערכה

של דיוק העיגון המרחבי של הנתונים מהגיחות השונות ומזעור של השגיאה האנכית (± 0.05 ס"מ דיוק אבסולוטי עבור גיחות 2021, 2022).

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.

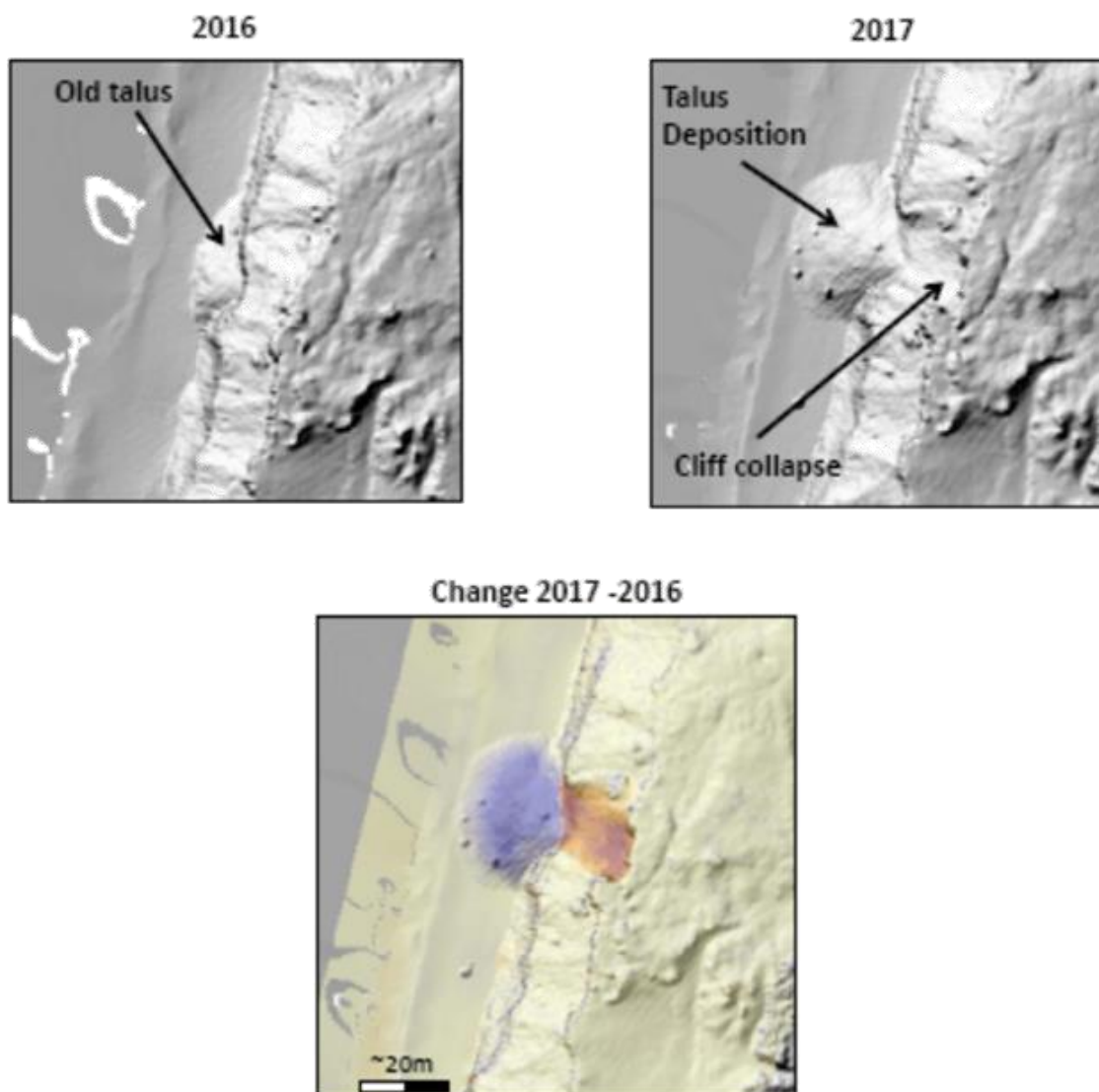
3. **מיפוי** של האזורים בהם קיים שינוי בטופוגרפיה בסביבת המצוק, בין שני מועדי טיסה, בעזרת מפת ההפרשים (איור 4). הזיהוי נעשה בשני שלבים: (א) ממוחשב, כאשר פיקסל עם ערך שלילי או חיובי במפת ההפרשים מציין אזור שהתרחשה בו גריעה או תוספת של חומר בין שני מועדי הטיסה, בהתאמה; (ב) בקרה פרטנית של אזורי השינוי ואימות "ידני" שאכן מדובר בפעילות מצוק ולא בבעייה בנתונים. 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 4א). 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 4א).



איור 4. (א) דוגמא לאירוע כשל מצוק. 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).

הנתונים המרחביים והפיזיים של כלל הפוליוגונים מהטיפוסים השונים חושבו ונשמרו בטבלאות עם עיגון גיאוגרפי לרשת ישראל החדשה. שטח כל פוליוגון חושב באמצעות הממ"ג ונפח החומר שמייצג הפוליוגון חושב על ידי הכפלת שטחו בהפרש הטופוגרפי במימד האנכי בין שני מועדי הטיסה. הפרש זה לכלל הפוליוגון נקבע כממוצע של ההפרש שמחושב על ידי הממ"ג עבור כל פיקסל בתחום הפוליוגון, באופן הבא:

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

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

הערכת שגיאת המדידה: זיהוי ומיפוי הפוליוגונים נעשה באופן ידני ומבוקר וזאת בכדי לצמצם למינימום את ההשפעה של אי הדיוקים בעיגון המרחבי של השריגים מ-2021 ו-2022. 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 2021 משריג 2022 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 פוליגון (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 פוליגון ($\langle e_i \rangle$) 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 (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 פוליגון כמרחק צפונה של מרכז הפוליגון 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 2021-22 לפי תאי השטח 1 - 39 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

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

1. גובה ממוצע של המקטע

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

3. תוצאות

3.1 מפת שינויים 2021-2022

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-2021-2022 לפי מקטעי העבודה של תמ"א 13/9.

טבלה 2. סיכום הפעילות לאורך המצוק החופי (2021 - 2022)

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	22	-3,762 ±137	4	-61 ±21	13	2,863 ±196	-960 ±240
נעורים	5.3	37	-899 ±129	15	-358 ±101	20	677 ±165	-580 ±233
נתניה העיר	3.1	23	-569 ±98	2	-104 ±17	14	488 ±98	-185 ±140
נתניה דרום	4.0	27	-474 ±99	3	-74 ±24	18	327 ±133	-221 ±167
געש	10.0	93	-3,867 ±471	27	-1,130 ±362	66	2,071 ±617	-2,926 ±856
אשקלון צפון	3.0	20	-812 ±106	13	-3,507 ±356	16	138 ±47	-4181 ±375
אשקלון דרום	3.5	47	-1,189 ±161	13	-341 ±82	24	274 ±96	-1,257 ±205
סיכום	31.9	269	-11,572	77	-5,575	171	6,838	-10,310

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

טבלה 3. סיכום מאפייני נפח הפעילות לאורך המצוק החופי (2021 - 2022)

מקטע	כשל מצוק (CC) (m ³)		סחיפת טאלוס (TE) (m ³)		טאלוסים שנוספו (TD) (m ³)	
	טווח	חציון	טווח	חציון	טווח	חציון
עין הים	<3,273	15	<41	9	<2,733	6
נעורים	<140	10	<140	6	<140	17
נתניה העיר	<156	16	<79	52	<209	17
נתניה דרום	<73	10	<38	33	<108	7
געש	<586	16	<306	18	<282	11
אשקלון צפון	<204	14	<1,750	34	<68	4
אשקלון דרום	<127	13	<102	20	<37	6

3.1.1 מקטע עין הים

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 22 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 3,273 מ"ק (חציון: 15 מ"ק) ובנפח כולל של 3,762 מ"ק. תועדו 4 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 61 מ"ק ו- 13 אתרים של הערמות טאלוס בנפח כולל של 2,863 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 960 מ"ק של חומר שמקורו במצוק. במקטע זה התרחשה ב 2021-2022 אחת הקריסות הגדולות (3,273 מ"ק) שתועדו אי פעם לאורך מצוקי ישראל.

3.1.2 מקטע נעורים

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 37 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 140 מ"ק (חציון: 10 מ"ק) בנפח כולל של 899 מ"ק. תועדו 15 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 358 מ"ק ו- 20 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 677 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 580 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 23 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 156 מ"ק (חציון: 16 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 569 מ"ק חומר (איור 7). תועדו 2 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 104 מ"ק ו- 14 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 488 מ"ק (טבלה 2). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 185 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.4 מקטע נתניה דרום

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 27 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 73 מ"ק (חציון: 10 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 474 מ"ק חומר (איור 8). תועדו 3 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 74 מ"ק ו- 18 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 327 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 221 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.5 מקטע געש

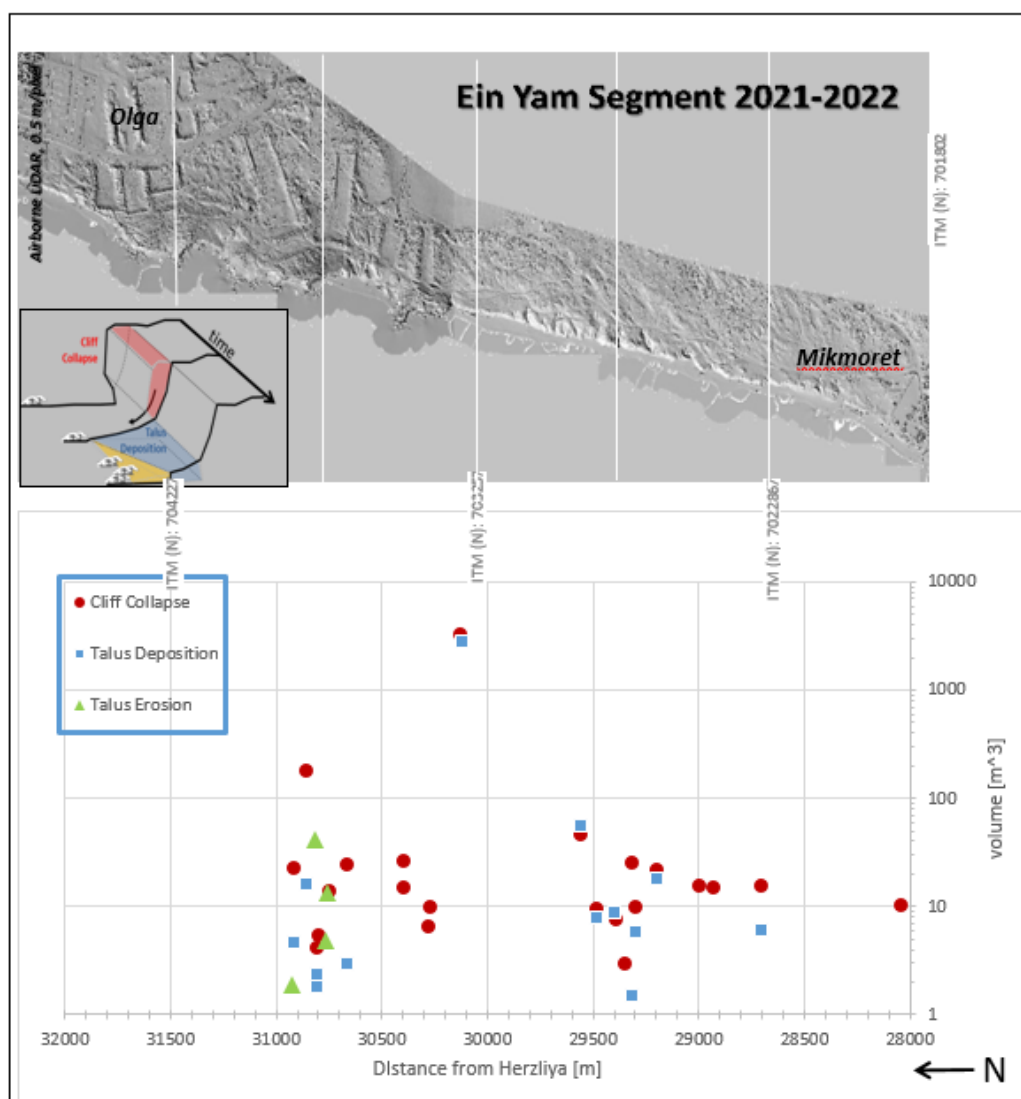
במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 93 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 586 מ"ק (חציון: 16 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 3,867 מ"ק חומר (איור 9). תועדו 27 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 1,130 מ"ק ו- 66 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 2,071 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 2,926 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.6 מקטע אשקלון צפון

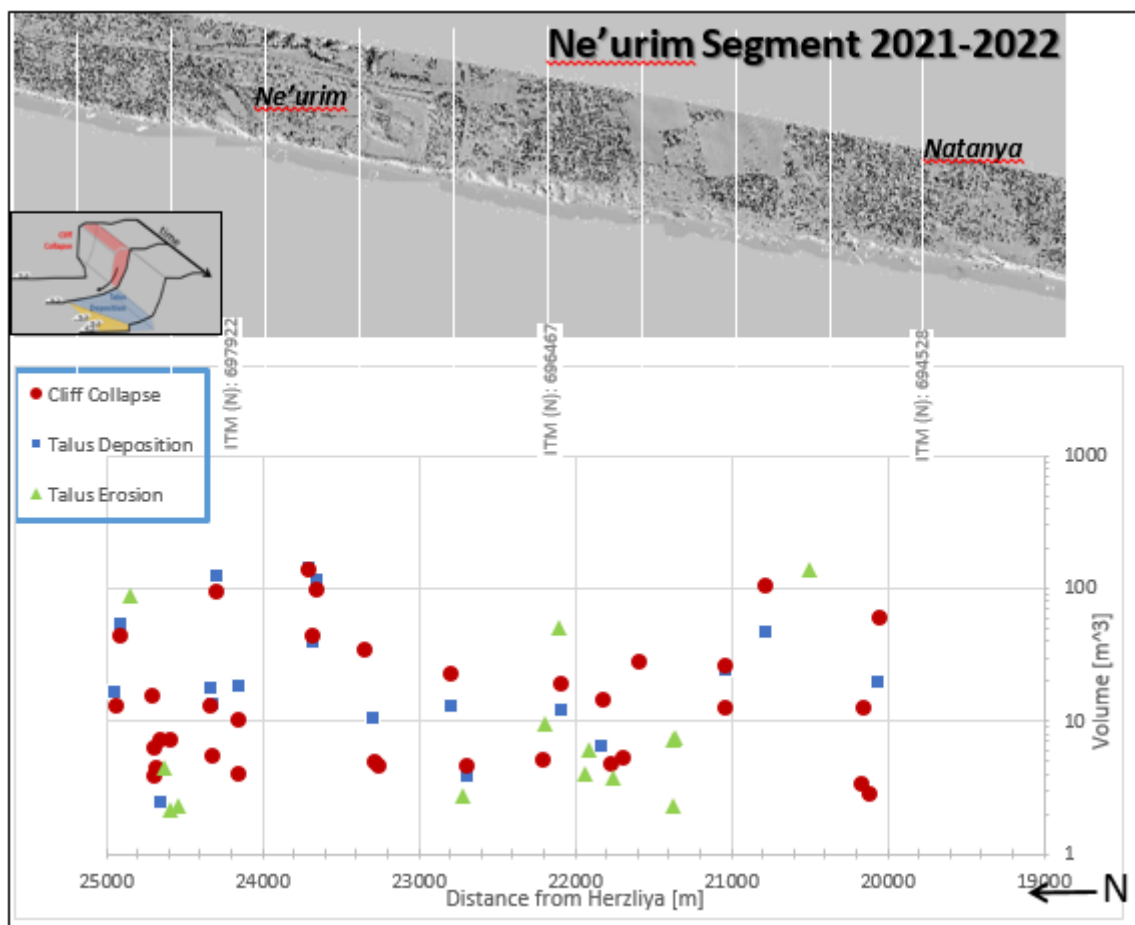
במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 20 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 204 מ"ק (חציון: 14 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 812 מ"ק חומר (איור 10). תועדו 13 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 3,507 מ"ק ו- 16 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 138 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 4,181 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.7 מקטע אשקלון דרום

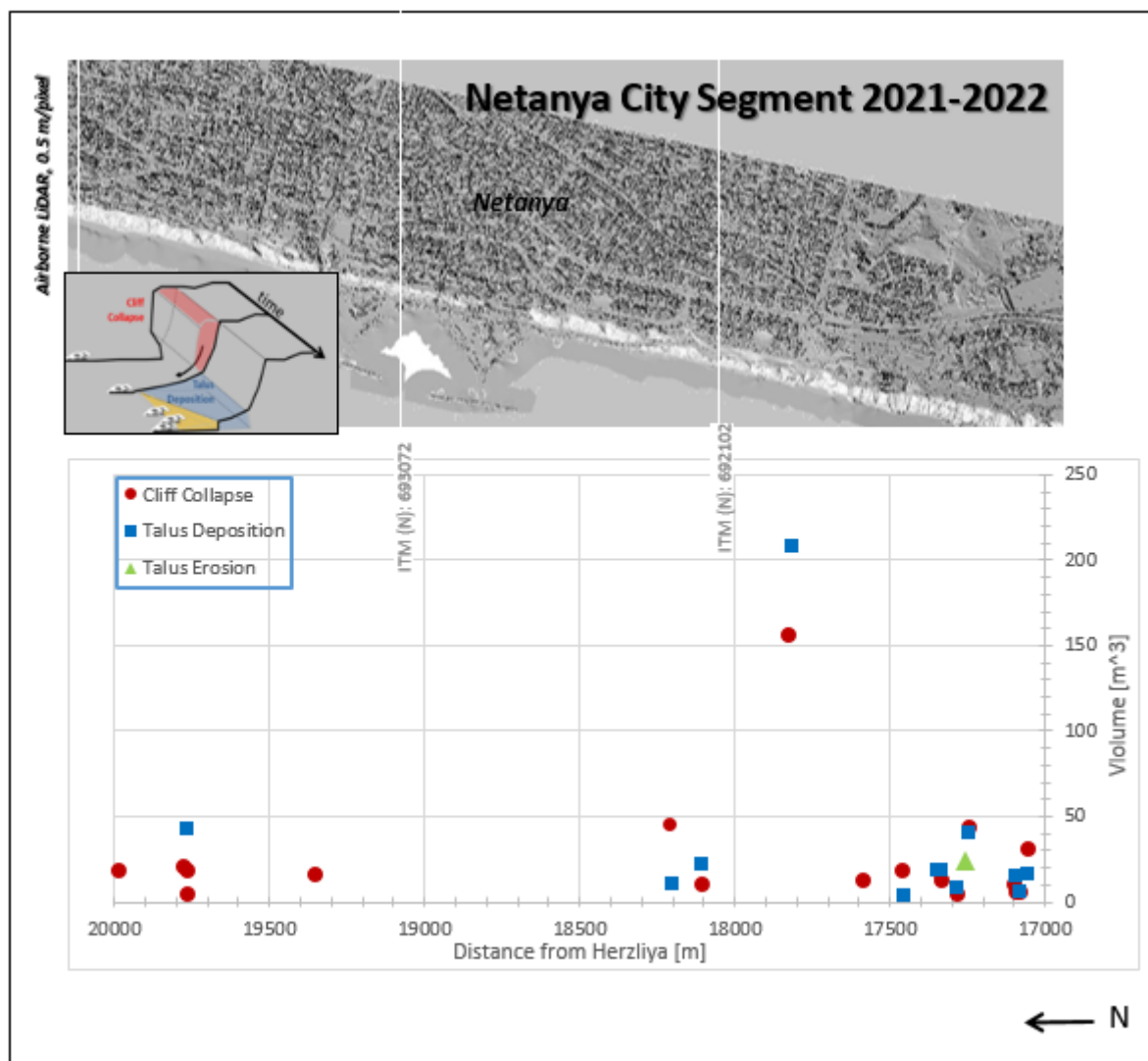
במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 47 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 127 מ"ק (חציון: 13 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 1,189 מ"ק חומר (איור 11). תועדו 13 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 341 מ"ק ו- 24 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 274 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 1,257 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.



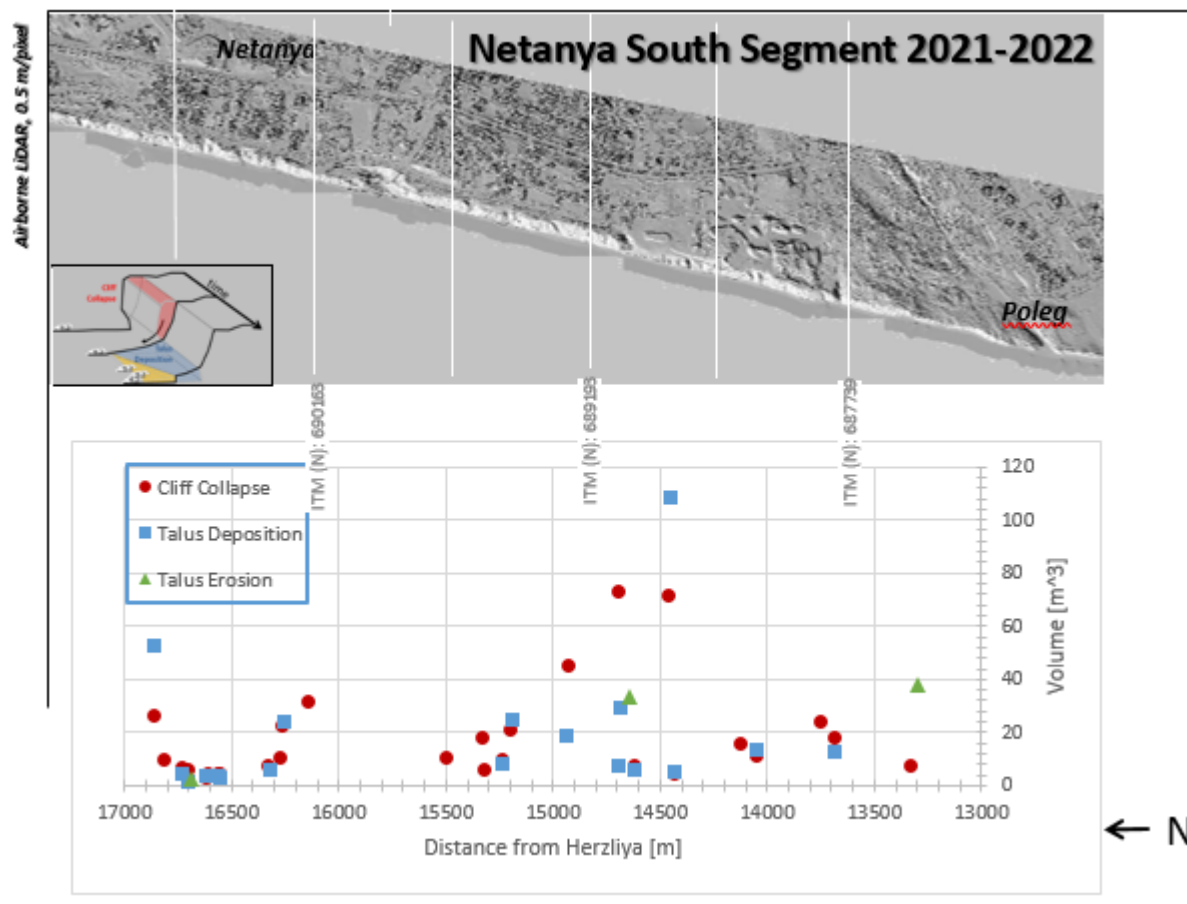
איור 5. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע עין ים 2021 - 2022 מוצגת לפי המרחק ממרינת הרצליה. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



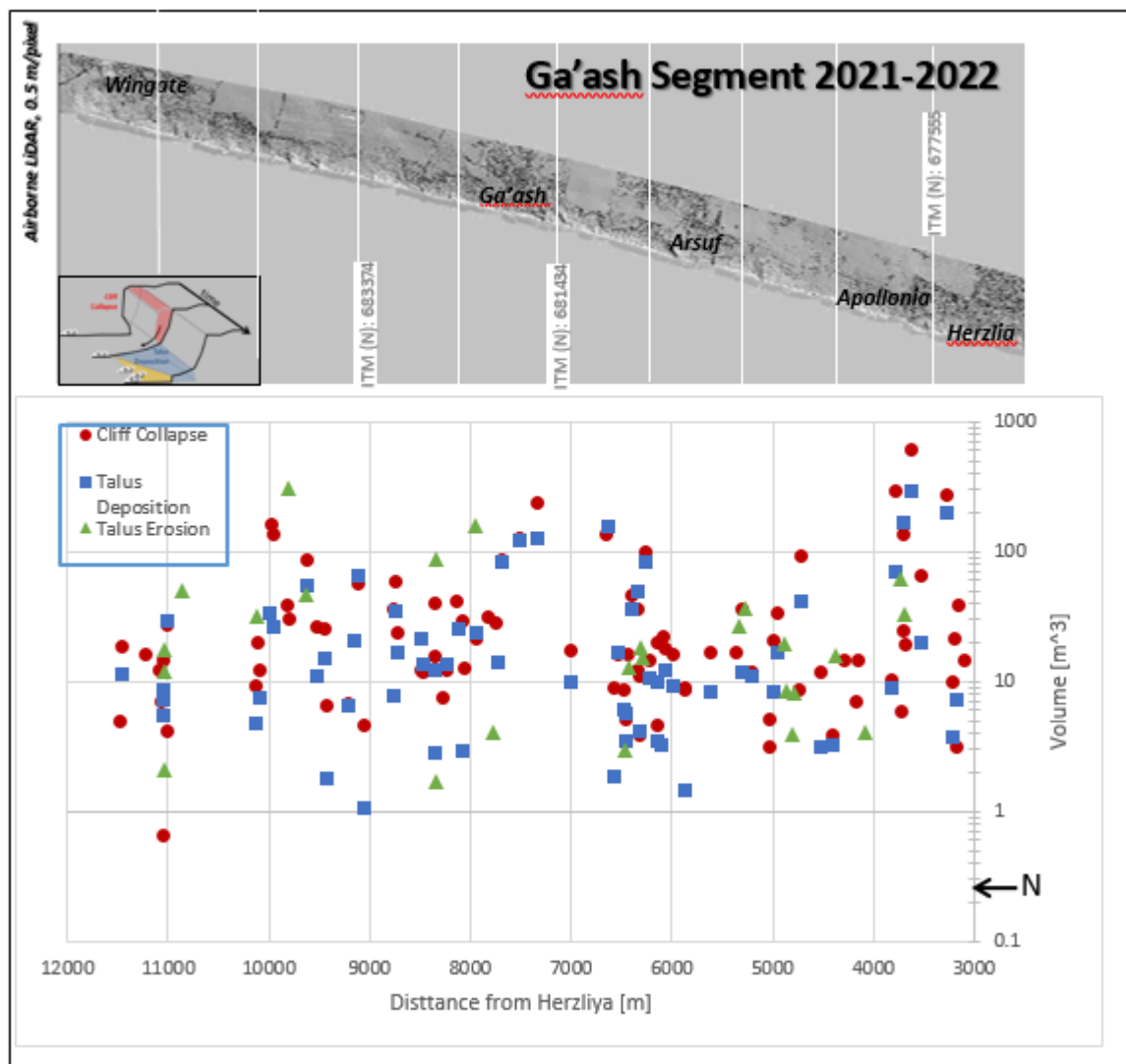
איור 6. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע נעורים 2021 - 2022 מוצגת לפי המרחק ממרינת הרצליה. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



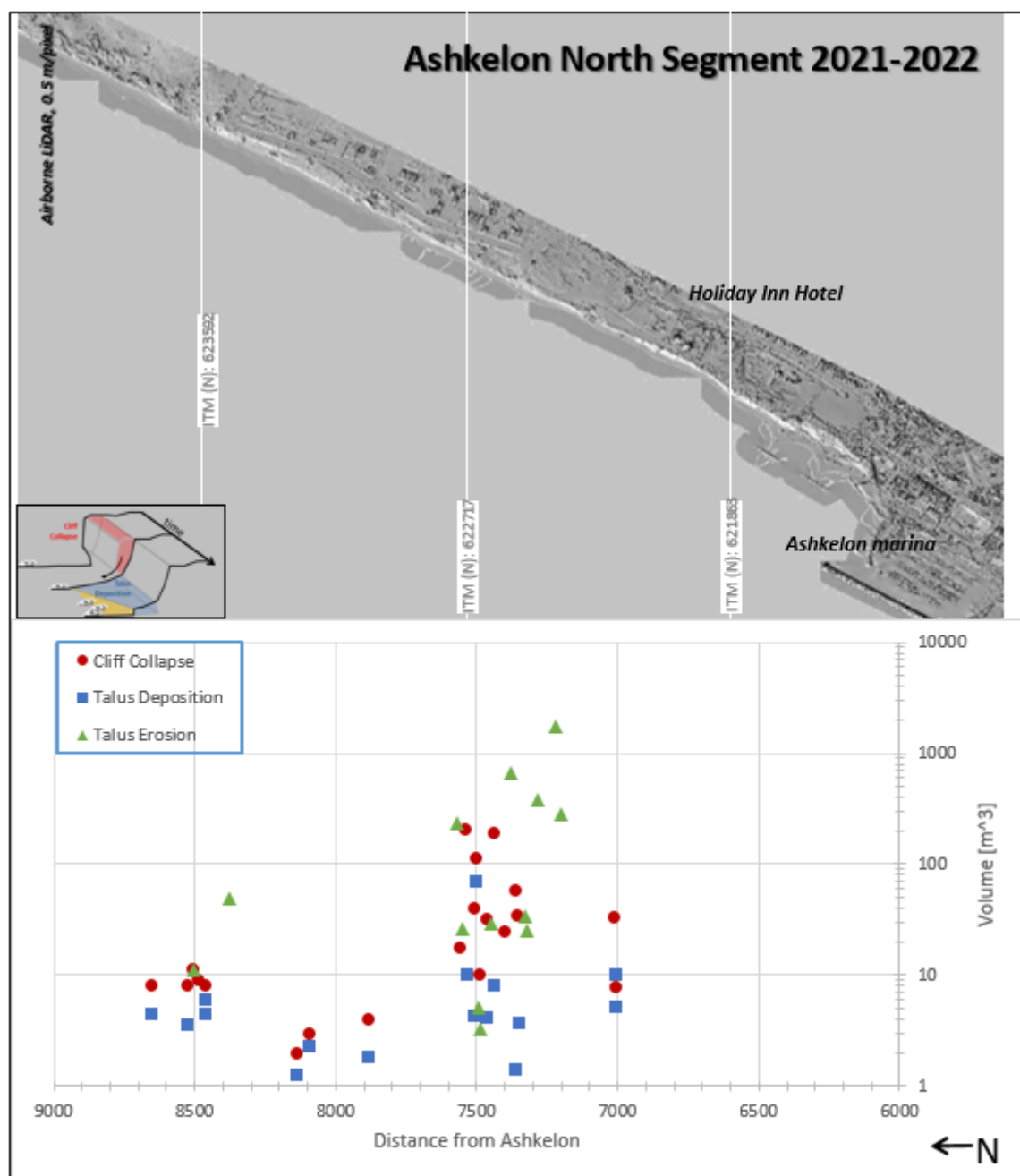
איור 7. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע נתניה העיר 2021 - 2022 מוצגת לפי המרחק ממרינת הרצליה. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמטית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



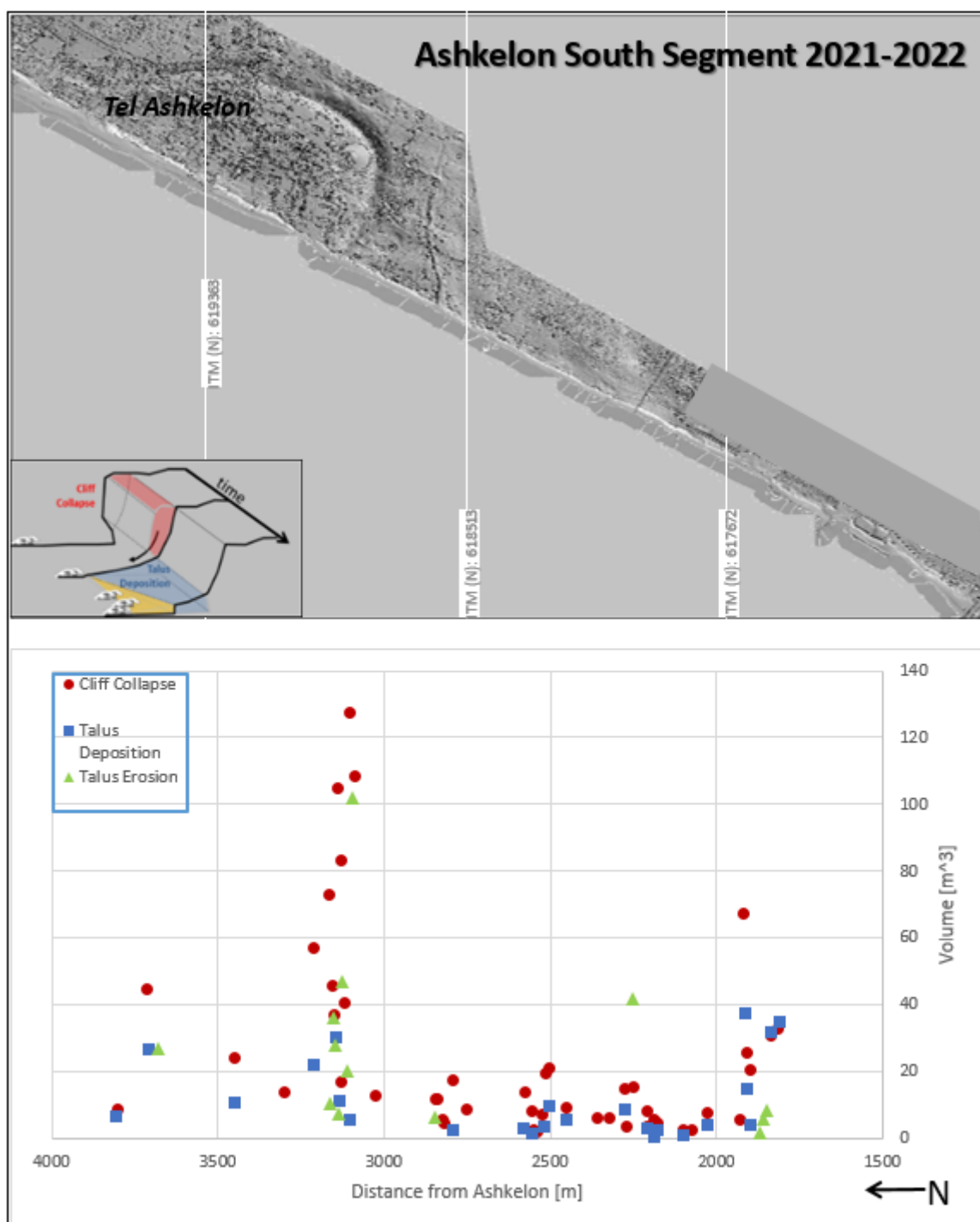
איור 8. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע נתניה דרום 2021 - 2022 מוצגת לפי המרחק ממרינת הרצליה. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



איור 9. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע געש 2021 - 2022 מוצגת לפי המרחק ממרינת הרצליה. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



איור 10. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע אשקלון צפון 2021 - 2022 מוצגת לפי המרחק מתחנת הכוח. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



איור 11. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע אשקלון דרום 2021 - 2022 מוצגת לפי המרחק מתחנת הכוח. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.

4. דיון

4.1 נפחים והערכת הנסיגה

בתקופת המחקר (כ- 10 חודשים בין דצמבר 2021 ואוקטובר 2022) תועדו לאורך כל המצוק החופי 269 אירועי כשל מצוק (CC) בנפח כולל של 11,572 מ"ק, 77 אתרים של סחיפת טאלוסים (TE) בנפח כולל של 5,575 מ"ק ו- 171 אתרים בהם נערם חומר שקרס מהמצוק על החוף (TD) בנפח כולל של 6,838 מ"ק (טבלה 4). בהתאם נמדד מאזן-נפח שלילי (EE) עבור כלל המצוק החופי, המסתכם ב- 10,310 מ"ק. בהתחשב באורך המצטבר של מקטעי המצוק שנבחנו (31.9 ק"מ) מתקבל שטף גריעה ממוצע של 323.2 מ"ק עבור כל ק"מ מצוק לתקופה המחקר 2021-22. 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 2021-2022 מתרגם לנסיגה מזרחה לכוון היבשה ממוצעת של כ 0.013 מ' עבור כלל מצוק (1.3 ס"מ).

4.2 השוואה בין מקטעי המצוק השונים

התפלגות האירועים השונים וקצב הפעילות לאורך מקטעי המצוק השונים במהלך תקופת המחקר 2021 - 2022 לא הייתה אחידה (טבלה 4):

התמוטטות מצוק (CC): שטף גריעת הסדימנט כתוצאה מהתמוטטות מצוק (CC) במקטעים נעורים, נתניה העיר ונתניה דרום (170, 184 ו 119 מ"ק/ק"מ מצוק, בהתאמה) היה נמוך משטף קריסות מצוק הממוצע של כלל המצוק (362.8 מ"ק/ק"מ). במקטעי געש, אשקלון צפון ואשקלון דרום שטף גריעת הסדימנט כתוצאה מהתמוטטות מצוק (387, 271 ו 340 מ"ק/ק"מ, בהתאמה) היה דומה לקצב הגריעה הממוצע לאורך כלל המצוק ואילו במקטע עין הים שטף גריעת הסדימנט כתוצאה מהתמוטטות מצוק (1,254 מ"ק/ק"מ מצוק) היה גבוה ~פי 4 ממוצע כלל המצוק.

סחיפת טאלוסים (TE): שטף סחיפת הטאלוסים (TE) הממוצע לאורך כלל המצוק בתקופת המחקר 2021-2022 היה 174.8 מ"ק/ק"מ (טבלה 4). ערכי TE גבוהים ממוצע זה נמדדו במקטע אשקלון צפון (1,169 מ"ק/ק"מ) בעוד ערכי TE נמוכים מהממוצע נמדדו בשאר מקטעי המצוק עין הים, נעורים, נתניה העיר, נתניה דרום, געש ואשקלון צפון (20, 68, 34, 19, 113 ו 97 מ"ק/ק"מ, בהתאמה).

הערמות טאלוסים (TD): שטף הערמות הטאלוסים (TD) הממוצע לאורך כלל המצוק בתקופת המחקר 2021-2022 היה 214.3 מ"ק/ק"מ (טבלה 4). ערכי TD גבוהים ממוצע זה נמדדו במקטע עין הים (954 מ"ק/ק"מ) בעוד ערכי TD נמוכים מהממוצע נמדדו במקטעי נעורים, נתניה העיר, נתניה דרום, אשקלון צפון ואשקלון דרום (128, 157, 82, 46 ו-78 מ"ק/ק"מ, בהתאמה). במקטע געש נמדדו ערכי TD (207 מ"ק/ק"מ) הקרובים לממוצע של כלל המצוק.

שטף גריעת חומר מהמצוק ובסיסו (EE): מאזן הסדימנט לאורך המצוק חושב בעזרת הפרמטר EE (טבלה 4). שטף גריעת החומר הממוצע לאורך כל מצוק החוף בתקופה 2021-2022 עומד על 323.3 מ"ק/ק"מ

(טבלה 4). במקטעי נעורים, נתניה העיר ונתניה דרום נמדדו שטפי EE נמוכים ממוצע זה (109, 60, ו 55 מ"ק/ק"מ, בהתאמה). במקטעי עין הים, געש ואשקלון דרום נמדד שטף EE דומים לממוצע (293, 320 ו 359 מ"ק/ק"מ, בהתאמה) ואילו במקטע ואשקלון צפון נמדדו שטף EE (1,393 מ"ק/ק"מ) הגבוה משמעותית מהממוצע של כלל המצוק.

טבלה 4. צפיפות האירועים ושטף הסדימנט (עבור 10 חודשים; 10.2021 – 12.2021)

מקטע	אורך	כשל מצוק (CC)				סחיפת טאלוס (TE)				טאלוסים שנוספו (TD)				סה"כ גריעה (EE)
		מ"ק	מספר קריסות (#)	נפח כולל (מ ³)	מ"ק/מ"מ	מספר אתרים (#)	מ"ק/מ"מ	נפח כולל (מ ³)	מ"ק/מ"מ	מספר טאלוסים (#)	מ"ק/מ"מ	נפח כולל (מ ³)	מ"ק/מ"מ	
עין הים	3	22	7.3	-3,762	-1254	4	1.33	-61	-20	13	4.3	2,863	954	-320
נעורים	5.3	37	7	-899	-170	15	2.8	-358	-68	20	3.8	677	128	-109
נתניה העיר	3.1	23	7.4	-569	-184	2	0.65	-104	-34	14	4.5	488	157	-60
נתניה דרום	4.0	27	6.8	-474	-119	3	0.75	-74	-19	18	4.5	327	82	-55
געש	10.0	93	9.3	-3,867	-387	27	2.7	-1,130	-113	66	6.6	2,071	207	-293
אשקלון צפון	3.0	20	6.66	-812	-271	13	4.33	-3,507	-1169	16	5.33	138	46	-1,394
אשקלון דרום	3.5	47	13.4	-1,189	-340	13	3.7	-341	-97	24	6.9	274	78	-359
סה"כ / ממוצע	31.9	269	8.4	-11,572	-362.8	77	2.4	-5,575	-174.8	171	5.3	6,838	214.3	-323.2

4.3 השוואה של פעילות המצוק בין שנת המעקב הנוכחית (2021-22) לשנים הקודמות (2015-16, 2016-17, 2017-18, 2018-19, 2019-2020, 2020-2021)

טבלה 5 מציגה השוואה בין פעילות המצוק בשנת המעקב הנוכחית (2021-22) לשש תקופות המחקר הקודמות מאז 2015. מסיבות של אילוצים טכניים גיחות הליידאר החוזרות עליהן מתבסס המיפוי במהלך שנים אלו לא בוצעו באותה עונה כל שנה (2/2015, 3/2016, 4/2017, 10/2018, 7/2019, 7/2020, 12/2021 ו 10/2022) ולכן בפועל אורך תקופות המחקר של 2015-16, 2016-17, 2017-18, 2018-19, 2019-2020, 2020-2021 ו 2021-2022 הוא 13, 13, 10, 12, 17 ו 10 חודשים, בהתאמה. ואולם משום שרוב פעילות קריסת המצוק ופינוי החומר מבסו 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 המחקר. בעבודה זו נעשתה הנחת עבודה כי קירוב זה מתקיים גם עבור התקופה של 12/2021-10/2022.

פעילות כלל המצוק - ממוצע נפח הגריעה (EE) של חומר מכלל המצוק החופי כפי שנמדד בשנת המחקר הנוכחית (2021-22) היה נמוך מזה שנמדד במיפויים הקודמים מאז 2015: 323 מ"ק/ק"מ/חורף ב 2021/22 לעומת 1193 מ"ק/ק"מ/חורף ב 2020/21 ו 1,145 - 1,614 - 1,146 - 612 - 895 מ"ק/ק"מ/חורף ב 2019/20 - 2018/19 - 2017/18 - 2016/17 - 2015/16, בהתאמה (טבלה 5). במחקר של Mushkin et al. (2016) נמדד נפח גריעה כולל של 282×10^3 מ"ק ממצוק השרון שאורכו המצטבר הוא 18.8 ק"מ בין 3/2006 ל 2/2015. בהתחשב בכך שתקופה זו תוחמת תשעה חורפים מתקבל קצב גריעה ממוצע של כ 1,670 מ"ק/ק"מ/חורף ממצוק השרון בין 2006-2015. בהינתן טווח שגיאה של $\pm 20-30\%$ במדידות אלו מתקבל שקצב הגריעה מכלל המצוק החופי במהלך 2021-22 (323 מ"ק/ק"מ/חורף) נמוך משמעותית מקצב הנסיגה הרב שנתי הממוצע שנמדד עבור מצוק השרון מאז 2006.

פעילות המקטעים השונים - בשנת המחקר הנוכחית (2021-22), בדומה לתקופות המחקר הקודמות, נמדדה שונות משמעותית בנפח הגריעה (EE) בין מקטעי המצוק השונים (טבלה 5, סעיף 4.2). בחינת השונות בערכי EE של מקטעי המצוק השונים לאורך הזמן מגלה שערכי EE שנמדדו עבור מקטע עין הים ב 2021/22 (320 מ"ק/ק"מ/חורף) נמצאים בתוך טווח הערכים שנמדדו למקטע זה במרוצת השנים מ 2015 (1,162-23 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע נעורים שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2021/22 עמד על 109 מ"ק/ק"מ/חורף ונמצא בקצה הנמוך של ערכי EE שנמדדו למקטע זה מאז 2015 (1,021-98 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטעי נתניה העיר ונתניה דרום שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2021/22 עמד על 60 ו 55 מ"ק/ק"מ/חורף, בהתאמה, והיו נמוכים משמעותית מטווח ערכי EE שנמדדו למקטעים אלה מאז 2016 (1,484-165 מ"ק/ק"מ/חורף, בהתאמה). במקטע געש שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2021/22 עמד על 293 מ"ק/ק"מ/חורף. ערך זה נמוך משמעותית מטווח ערכי EE שנמדדו למקטע זה מאז 2015 (2,522-1,238 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע אשקלון צפון שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2021/22 עמד על 1,394 מ"ק/ק"מ/חורף ונמצא בטווח ערכי EE ה"רגילים" שנמדדו למקטע זה מאז 2015 (2,368-716 מ"ק/ק"מ/חורף). במקטע אשקלון דרום היה שטף הגריעה ממערכת המצוק ב 2021/22 (359 מ"ק/ק"מ/חורף) קרוב לקצה הנמוך של טווח ערכי EE שנמדדו במקטע זה מאז 2015 (1,558-84 מ"ק/ק"מ/חורף).

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

סה"כ גריעה (EE) (מ"ק/ק"מ/חורף)							טאלוסים שנוספו (TD) (מ"ק/ק"מ/חורף)							סחיפת טאלוס (TE) (מ"ק/ק"מ/חורף)							כשל מצוק (CC) (מ"ק/ק"מ/חורף)							אורך	מקטע
2021-2022	-2020-2021**	2019-2020	2018-2019	2017-2018*	2016-2017	2015-2016	2021-2022	-2020-2021**	2019-2020	2018-2019	2017-2018*	2016-2017	2015-2016	2021-2022	-2020-2021**	2019-2020	2018-2019	2017-2018*	2016-2017	2015-2016	2021-2022	-2020-2021**	2019-2020	2018-2019	2017-2018*	2016-2017	2015-2016	ק"מ	
320	487	1,162	538	104	23	563	954	82	137	291	107	1	145	20	29	603	180	33	10	117	1254	440	696	649	179	14	591	3	עין הים
109	511	598	311	210	98	1021	128	105	232	154	162	112	126	68	192	59	154	197	46	273	170	424	771	311	176	163	874	5.3	נעורים
60	582	290	486	1,091	168		158	362	489	178	332	545		34	189	148	303	515	46		184	757	633	361	908	667		3.1	נתניה העיר
55	165	625	1,484	977	205	206	82	301	406	280	665	526	243	19	80	218	606	840	16	88	119	386	840	1,158	801	715	361	4.0	נתניה דרום
293	1,922	1,757	2,522	2,342	1,238	1,322	207	822	1,025	705	872	611	500	113	638	608	1,364	611	196	366	387	2,106	2,175	1,863	2,603	1,654	1,456	10.0	געש
1394	1,253	1,111	4,070	908	716	2,368	46	330	782	529	480	122	285	1169	781	233	1,152	141	128	683	271	803	1,660	3,447	1,247	710	1,970	3.0	אשקלון צפון
359	1,497	1,558	965	489	872	84	78	146	10	21	488	15	163	98	217	54	760	125	46	54	340	1,427	1,514	226	851	841	193	3.5	אשקלון דרום
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 מנורמלים 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 מנורמלים למספר החודשים בהנחה מקורבת שתקופה זו כללה עונת חורף אחת.

- תאריכי גיחות הליידאר ותקופות המחקר מאז 2015:

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

5. מסקנות

בכל מקטעי המצוק שנבדקו במסגרת הדוח הנוכחי, נרשמה בסיכום שנת המעקב 2021-22 גריעה של חומר מהמערכת החופית. במהלך התקופה נגרע נפח של כ 10,310 מ"ק מסך 31.9 הק"מ של המצוק החופי בכללותו. ממוצע גריעת חומר של 323.2 מ"ק/ק"מ מצוק המתרגם לקצב נסיגה ממוצע של 0.013 מ"/שנה. קצב סחיפה ממוצע זה נמוך משמעותית מקצב סחיפת חומר מהמצוק החופי שנמדד בעזרת מדידות ליידאר אווירי מאז 2006 (Mushkin et al., 2016; 2019). בדומה לשנות המעקב הקודמות גם ב 2021-2022 נמדדה שונות מרחבית משמעותית בפעילות המצוק בין מקטעי המצוק השונים. מתקבל ש: במקטע עין הים שבו התרחשה ב 2021/22 אחת הקריסות הגדולות (3,273 מ"ק) שאי פעם תועדה לאורך המצוק היה שטף גריעה אפקטיבי (EE) של 320 מ"ק/ק"מ/חורף הדומה לממוצע כלל המצוק ב 2021/22. ערך זה גם אינו חריג ביחס לממוצע הגריעה ממקטע עין הים במרוצת השנים. במקטע אשקלון צפון נמדדה סחיפת טאלוסים גבוהה יחסית לממוצע כלל המצוק במהלך 2021/22 ואולם שטף הגריעה האפקטיבי (EE) ממקטע זה היה בטווח הערכים שנמדד באשקלון צפון מאז 2015. בשאר מקטעי המצוק היה שטף גריעה אפקטיבי נמוך או דומה ל לשטף הגריעה שנמדד בשנות המדידה הקודמות.

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'.
- 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., French, 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.
- French, 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.

7. נספחים

נספח 1 (טבלה 6) - סיכום הפעילות לאורך המצוק החופי (2021-2022) במקטעי העבודה של תמ"א 13/9.

מקטע	אורך	כשל מצוק CC		סחיפת טאלוס TE		TD טאלוסים שנוספו		סה"כ גריעה EE
		מספר קריסות	נפח כולל (m ³)	מספר פוליגונים	נפח כולל (m ³)	מספר טאלוסים	נפח כולל (m ³)	
1	תל עפר	188	0	0	0	0	0	0
2	בית חנקין	65	79±26	0	0	2	101±29	22±39
3	אולגה כפר נופש	303	0	0	0	0	0	0
4	בית ינאי	122	10±3	0	0	1	5±2	-5±4
5	בית ינאי צפון	197	6±1	1	27±5	0	0	-32±5
6	בית ינאי דרום	650	102±17	4	98±23	3	73±25	-127±38
7	נעורים	337	127±20	0	0	4	172±41	45±46
8	כפר נוער נעורים	518	281±39	0	0	3	292±58	11±69
9A	חוף נעורים	88	5±1	0	0	0	0	-5±1
9B	חוף נעורים דרומי	139	0	0	0	0	0	0
10	בלו ביי	221	0	3	17±4	0	0	-17±4
11	נתניה צפון	318	39±3	0	0	2	70±20	30±20
12	החוף הנפרד	0	0	1	140±59	0	0	-140±59
13	שדרות ניצה	232	19±3	0	0	1	1±1	-18±3
14	חוף העוגות חוף האמפי	0	146±25	0	0	3	72±13	-75±28
15A	נתניה חוף סירונית וארגמן	2,837	597±106	2	28±6	19	524±130	-101±168
15B		570	64±15	0	0	2	32±17	-32±23
16	דרום נתניה	210	45±10	0	0	1	18±13	-27±17
17	חוף געש	196	0	0	0	0	0	0
18	אפולוניה צפון	350	668±29	0	0	2	307±52	-366±60

-101±28	204±23	3	0	0	304±16	4	144	אפולוניה דרום	19
-102±19	0	0	50 ±18	1	53±5	2			19.1
0	0	0	0	0	0	0	187	חוף נוף ים	20
-98±13	0	0	98±13	1	0	0			20.1
-22±2	0	0	0	0	22±2	1			20.2
0	0	0	0	0	0	0	130	גלי תכלת	21
-24±3	0	0	0	0	24±3	6	370	חוף השרון הרצליה	22
0	0	0	0	0	0	0	795	חוף אכדיה	23
0	0	0	0	0	0	0	216	חוף נפרד הרצליה	24
-6±8	7±6	1	0	0	12±5	1			24.1
0	0	0	0	0	0	0	620	חוף הצוק תל אביב	25
0	0	0	0	0	0	0	345	סי אנד סאן	26
0	0	0	0	0	0	0	904	תל אביב מרכז	27
-5±2	0	0	0	0	5±2	2	261	תל ברוך	28A
0	0	0	0	0	0	0	262	תל ברוך	28B
-25±5	5±1	1	0	0	30±5	1	734	הילטון תל אביב	29
0	0	0	0	0	0	0	635	חוף נחום גולדמן	30
-6±3	0	0	6±3	1	0	0	546	יפו חוף עליה	31
-24±4	0	0	0	0	24±4	4	250	בת ים צפון	32
0	0	0	0	0	0	0	850	בת ים מרכז	33
0	0	0	0	0	0	0	375	בת ים דרום	34
-47±6	0	0	0	0	47±6	3	177	פלמחים	35
-42±6	0	0	15± 5	2	27±34	3	170	בית קברות פלמחים	36
-121±15	7±4	2	14±4	2	114±14	4	284	תל יבנה ים	37

-3862±332	116±35	10	3215±318	10	763±92	13	1,130	אשקלון צפון	38
-61±21	43±14	3	27±9	1	77±12	3	642	אשקלון גן לאומי	39

Abstract

This report presents quantitative mapping of sea-cliff collapse and erosion activity along Israel's Mediterranean sea cliffs during a 10 month period between December 2021 and October 2022. Results are based on topographic changes measured by differencing two high-resolution (0.5 m/pixel) 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. The mapping efforts were conducted manually using GIS and were verified in the field.

For the studied period we found 269 cliff collapse events that amount to a total of ~11,572 m³. Talus deposition occurred at 77 sites and amounted to a total of ~5,580 m³. Talus erosion (of pre-existing talus piles) due to wave scouring was documented at 177 sites and amounted to a total of ~6,840 m³. Our results indicate that erosion and landwards retreat of Israel's sea cliff between 2021-2022 occurred at an average rate of ~323 m³ per km of cliff, which translates to a cliff-scale retreat rate of ~0.013 m/yr (1.3 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 2021-2022. Erosion rates along Neurim, Natanya City, and Natanya South segments were lower than the entire cliff average during the same period, 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 Ein Yam, Ga'ash, and Ashkelon south segments.

A comparison of the cliff activity between 2021-22 and previous years reveals changes in erosion volumes along most of the studied segments. The exceptionally high erosion rates documented along the Ashkelon North segment during the 2018-19 period did not carry into the 2021-2022 period during which average erosion rates were measured for this segment.



Ministry of Energy
Geological Survey of Israel

Failure and erosion along Israel's coastal cliffs between 2021 and 2022

Amit Mushkin, Noga Rozen, Eyal Peleg, Oded Katz, Onn Crouvi

Submitted to

The Mediterranean Coastal Cliff Preservation Government Company

GSI Report: GSI/XX/2023

Jerusalem, May 2023