



המכון הגיאולוגי
משרד האנרגיה

התמוטטות וסחיפת המצוק החופי בין השנים 2019 ו- 2020

עמית מושקין, עודד כץ, און כרובי, לנא אשקר,

נדב נבון, מיכל קוטליארוב

מוגש לחברה הממשלתית להגנות מצוקי חוף הים התיכון

ירושלים, אפריל 2022 (עדכון)

דוח מס' GSI/15/2021

תקציר

דוח זה מציג איתור, מיפוי ואפיון של השינויים בתוואי המצוק החופי (ים התיכון) שהתרחשו בין יולי 2019 לבין יולי 2020 (סה"כ כ- 12 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 גם נבדקו מקטעים מצוקיים קצרים, רובם באזורים עירוניים מופרים, לאורך החופים בין הרצליה ובת ים וכן באזור פלמחים.

בתקופת המחקר (2019 - 2020) נרשמו בכלל מקטעי המצוק הרציפים שמופו 289 אירועי כשל מצוק בנפח כולל של כ- 43,500 מ"ק. ב- 148 אתרים נערמו טאלוסים על החוף בנפח כולל של כ- 10,400 מ"ק, וב- 197 אתרים התרחשה סחיפה של טאלוסים (תוצרי כשל מצוק מלפני יולי 2019) על ידי הגלים בנפח כולל של כ- 17,400 מ"ק. נמצא כי בתקופת האמורה (7/2019 – 7/2020) נגרע מהמצוק ומבסיסו נפח של 36,500 מ"ק הגורם למגמה של נסיגת המצוק כלפי מזרח וסחיפת חומר מהמערכת בקצב ממוצע של כ- 1,145 מ"ק עבור ק"מ מצוק. קצב ממוצע מדוד זה עבור 2019-2020 מצוי בטווח קצבי הנסיגה שנמדדו לאורך המצוק של ישראל מאז 2015, כלומר בין 612 ל 1,614 מ"ק/ק"מ/חורף. קצב זה גם דומה להערכת קצבי הרקע של סחיפת המצוק על סמך תצפיות גיאולוגיות וארכיאולוגיות עבור מאות עד אלפי השנים האחרונות. עם זאת, בדומה לשנים קודמות נמדדה ב 2019-2020 שונות מרחבית משמעותית בקצבי הסחיפה בין מקטעי המצוק השונים: במקטעי נעורים נתניה העיר ונתניה דרום השטף (נפח החומר שנגרעה עבור יחידת אורך מצוק) היה נמוך מהשטף הממוצע של כלל המצוק ואילו במקטע געש השטף היה גבוה מעט ממוצע כלל המצוק. במקטעי עין הים, אשקלון צפון ואשקלון דרום שטף הגריעה היה דומה לממוצע כלל המצוק ב 2019-2020.

השוואה בין פעילות המצוק בשנת המעקב הנוכחית (2019-2020) לשנה הקודמת לה (2018-2019) מראה הבדלים בקצב הפעילות של רוב מקטעי המצוק בין שתי תקופות המחקר. ואולם, שונות זו בכמות הסדימנט הנגרע מהמצוק ובסיסו נמצא בתחום התנודה הטבעית בפעילות המצוק. יצוין כי שטף הפעילות החריג שנמדד במקטע אשקלון צפון במהלך 2018-19 לא המשיך במהלך 2019-2020 וכי בתקופת הדו"ח הנוכחי היה שטף הפעילות באשקלון צפון דומה לשטף הפעילות הממוצע לאורך כלל המצוק.

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 2019 - 2020
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

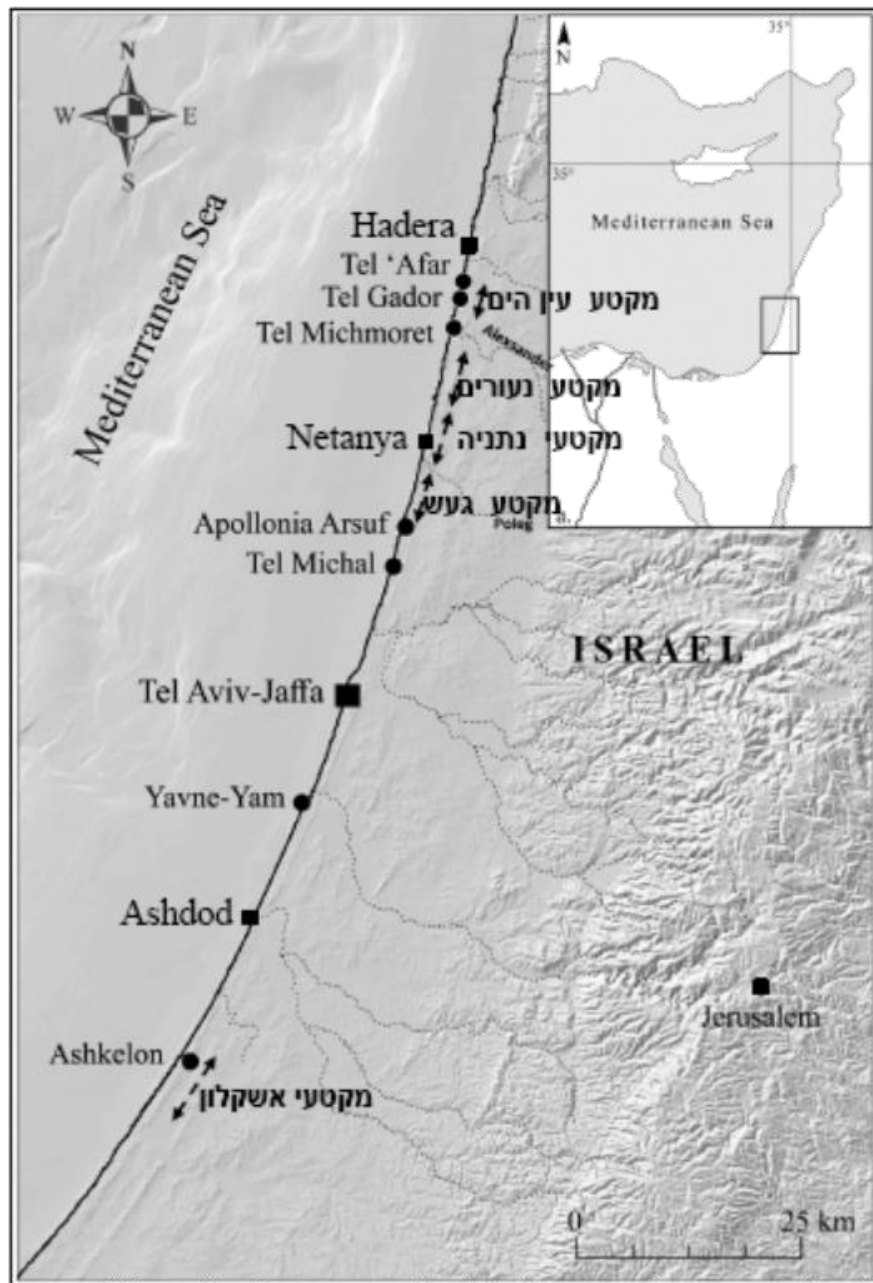
לאורך כ- 50 קילומטר של רצועת החוף הישראלי קיים מצוק חוף המפריד בין אזור חוף הים למרגלותיו, הנתון להשפעת הגלים, לבין מישור החוף מעל, בו מצויים מבנים וממוקמות תשתיות רבות (ניר, 1992). גובה המצוק מגיע עד חמישים מטרים ובסיסו מצוי במרחק של בין מטרים עד עשרות מטרים מזרחה מקו המים. בעקבות פגיעת הגלים החוזרת 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., 2018). 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 קיץ 2019 לקיץ 2020 (סה"כ כ- 12 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.

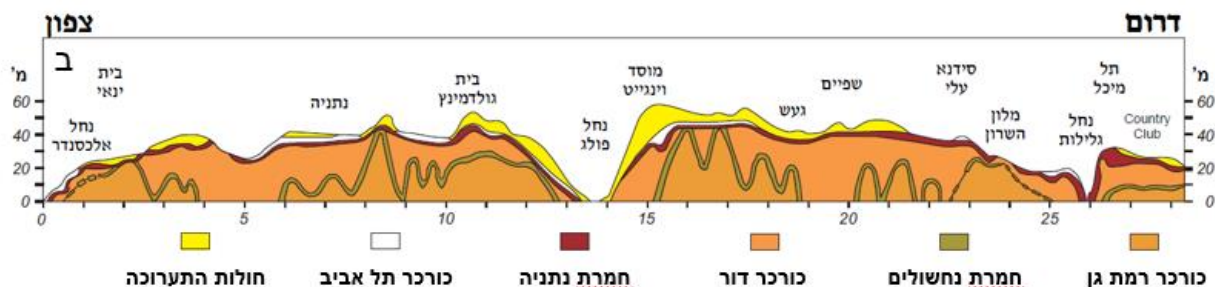
כורכר דור: מורכב בעיקר מגרגירי קוורץ (30%-90%) ושברי-קונכיות בליכוד גירי בדרגה משתנה. כורכר דור מציג ריבוד צולב וכיס חול בלתי מלוכד, בדומה לכורכר רמת-גן. כורכר דור ממלא שקעים בכורכר רמת-גן (עם חמרת נחשולים בגגו) ומגיע לעובי מרבי של 40 מטר. המגע העליון עם חמרת נתניה הוא גלי. גיל היחידה 53,000 - 51,000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

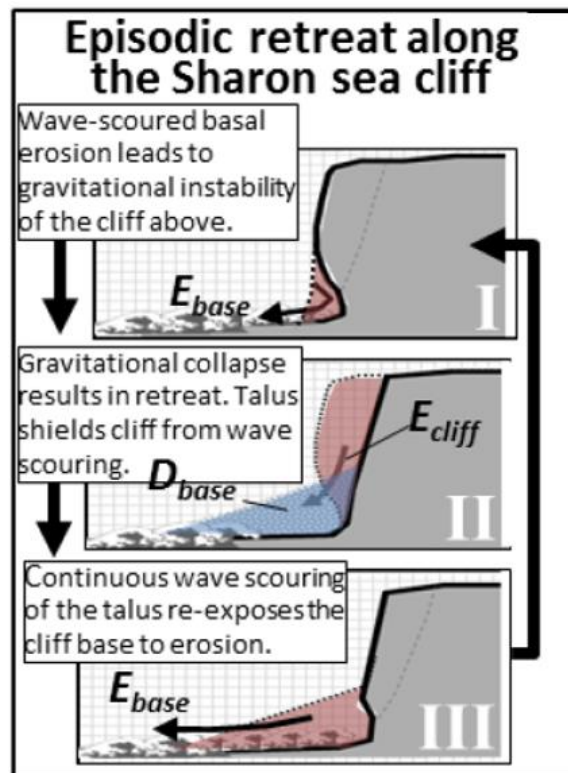
חולות תערוכה: חול למינרי לא מלוכד, זהה בהרכבו לכורכר רמת-גן ודור (70%-90% גרגירי קוורץ דקים). לחולות אין ליכוד גירי אך הם מיוצבים הודות לנוכחות חומר אורגני. עוביים המרבי של החולות מגיע למספר מטרים. מגע תחתון, עם כורכר תל אביב, כמעט אופקי. בגג חולות התערוכה קיים מעבר לא סדור לחולות חדרה או לקרקע. גיל 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 מגנים 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 קיץ 2019 וקיץ 2020 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 2020: 3/7/2020

גיחת 2019: 22/6/2019-12/7/2019

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', 2020).

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 2019, 2020).

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.

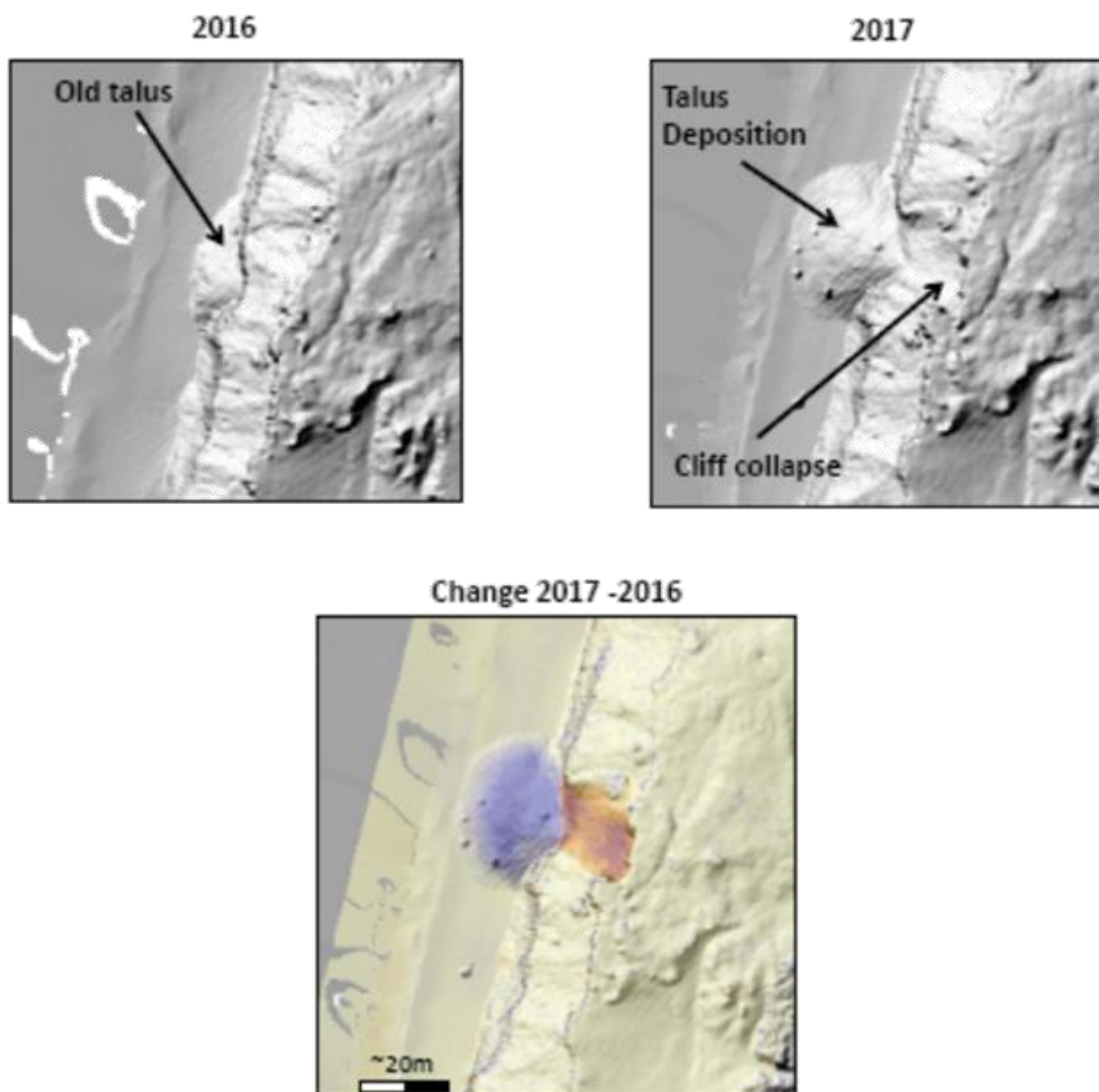
3. **מיפוי** של האזורים בהם קיים שינוי בטופוגרפיה בסביבת המצוק, בין שני מועדי טיסה, בעזרת מפת ההפרשים (איור 4). הזיהוי נעשה בשני שלבים: (א) ממוחשב, כאשר פיקסל עם ערך שלילי או חיובי במפת ההפרשים מציין אזור שהתרחשה בו גריעה או תוספת של חומר בין שני מועדי הטיסה, בהתאמה; (ב) בקרה פרטנית של אזורי השינוי ואימות "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 2016 ו-2017) 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-2020 ו-2019. 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 2109 משריג 2020 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 2019-20 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 2020-2019

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-2020-2019 לפי מקטעי העבודה של תמ"א 13/9.

טבלה 2. סיכום הפעילות לאורך המצוק החופי (2019 - 2020)

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	49	-2,089 ±281	42	-1,809 ±468	36	413 ±178	-3,486 ±574
נעורים	5.3	35	-4,086 ±182	13	-309 ±43	31	1,226 ±175	-3,169 ±256
נתניה העיר	3.1	26	-1,962 ±233	16	-458 ±83	20	1,518 ±253	-902 ±354
נתניה דרום	4.0	30	-3,361 ±460	12	-875 ±153	20	1,623 ±445	-2,613 ±658
געש	10.0	79	-21,746 ±1592	50	-6,081 ±1144	61	10,254 ±1233	-17,573 ±2316
אשקלון צפון	3.0	47	-4,980 ±361	12	-698 ±88	26	2,346 ±176	-3332 ±411
אשקלון דרום	3.5	23	-5,298 ±263	3	-190 ±28	3	35 ±7	-5,453 ±265
סיכום	31.9	289	-43,522	148	-10,420	197	17,415	36,527

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

טבלה 3. סיכום מאפייני נפח הפעילות לאורך המצוק החופי (2019 - 2020)

מקטע	כשל מצוק (CC) (m ³)		סחיפת טאלוס (TE) (m ³)		טאלוסים שנוספו (TD) (m ³)	
	טווח	חציון	טווח	חציון	טווח	חציון
עין הים	<194	24	<277	21	<81	6
נעורים	<845	43	<304	20	<68	23
נתניה העיר	<577	33	<385	26	<540	47
נתניה דרום	<585	51	<358	46	<275	55
געש	<2475	78	<1680	61	<1218	40
אשקלון צפון	<875	47	<175	28	<757	21
אשקלון דרום	<2627	36	<67	64	<22	11

3.1.1 מקטע עין הים

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 49 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 194 מ"ק (חציון: 24 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 2089 מ"ק (מטר מעוקב) חומר (איור 5). תועדו 42 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 1809 מ"ק ו- 36 אתרים אחד של הערמות טאלוס בנפח 413 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 3486 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.2 מקטע נעורים

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 35 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 845 מ"ק (חציון: 43 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 4086 מ"ק חומר (איור 6). תועדו 13 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 309 מ"ק ו- 31 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 1226 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 3169 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 26 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 577 מ"ק (חציון: 33 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 1,962 מ"ק חומר (איור 7). תועדו 16 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 458 מ"ק ו- 20 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 1,518 מ"ק (טבלה 2). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 902 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.4 מקטע נתניה דרום

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 30 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 585 מ"ק (חציון: 51 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 3,361 מ"ק חומר (איור 8). תועדו 12 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 875 מ"ק ו- 20 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 1,623 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 2,613 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.5 מקטע געש

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 79 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 2,475 מ"ק (חציון: 78 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 21,746 מ"ק חומר (איור 9). תועדו 50 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 6,081 מ"ק ו- 61 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 10,254 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 17,573 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

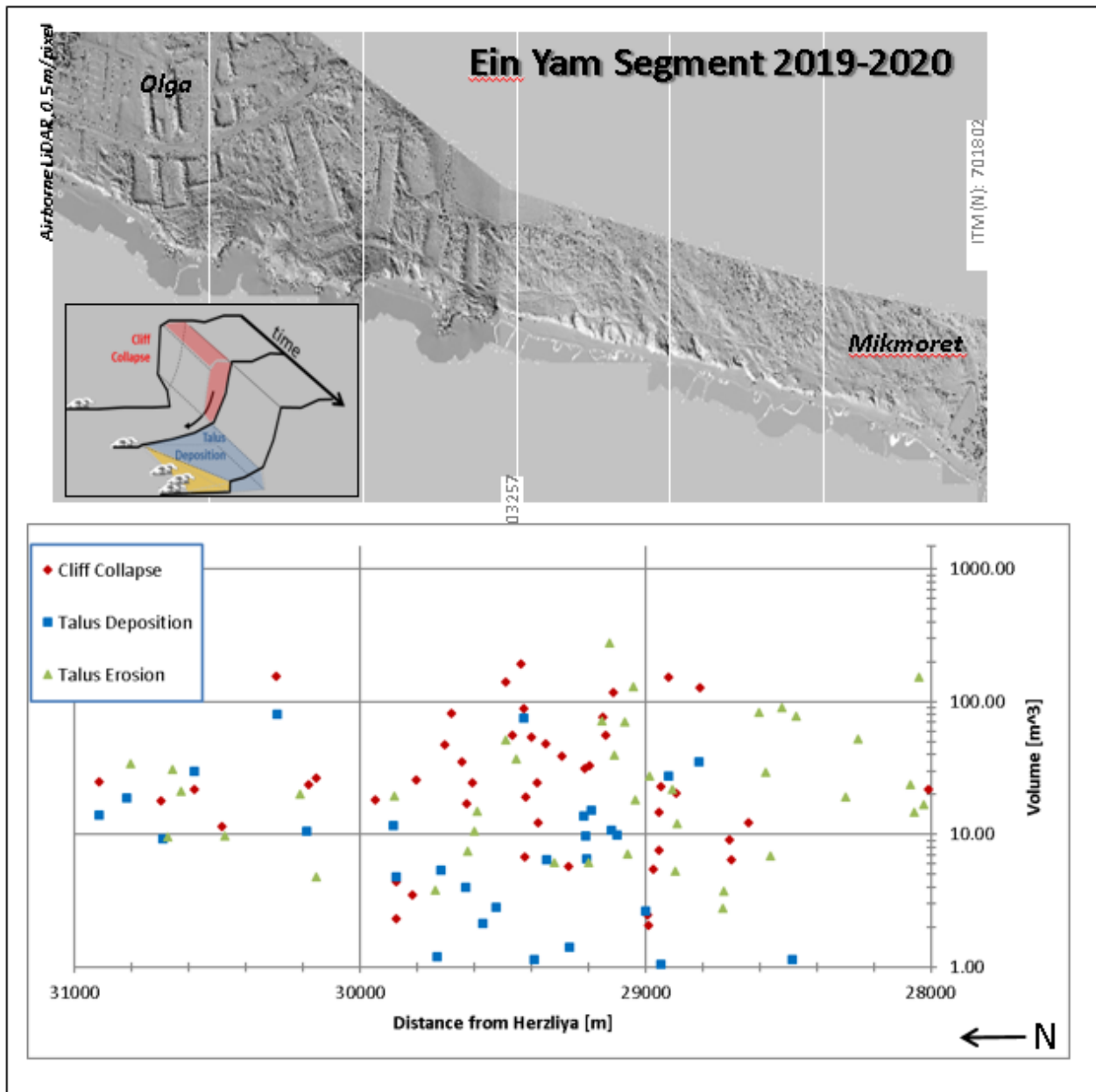
3.1.6 מקטע אשקלון צפון

במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 47 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 875 מ"ק (חציון: 47 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 4,980 מ"ק חומר (איור 10). תועדו 12 אתרים של סחיפת טאלוס

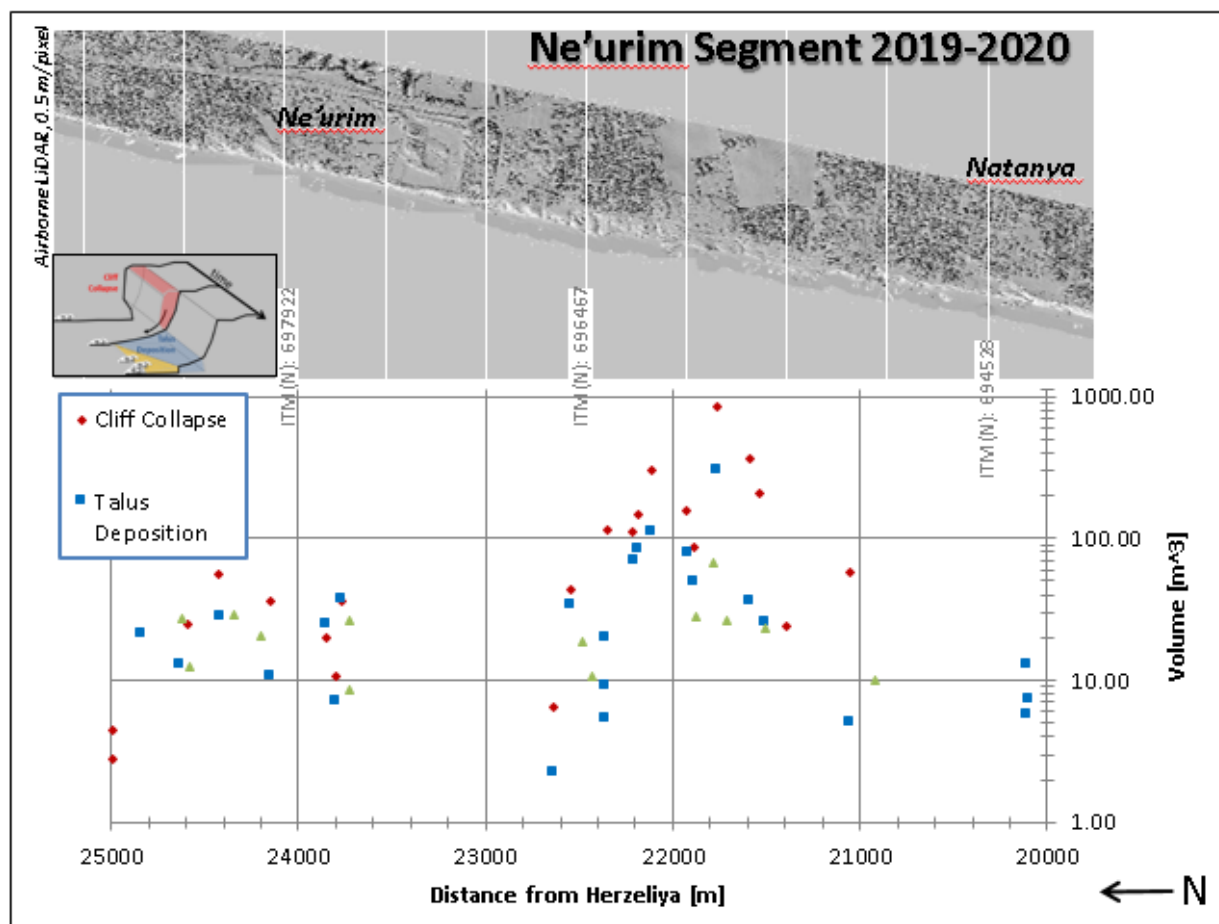
בנפח כולל של 698 מ"ק ו- 26 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 2,346 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 3,332 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.

3.1.7 מקטע אשקלון דרום

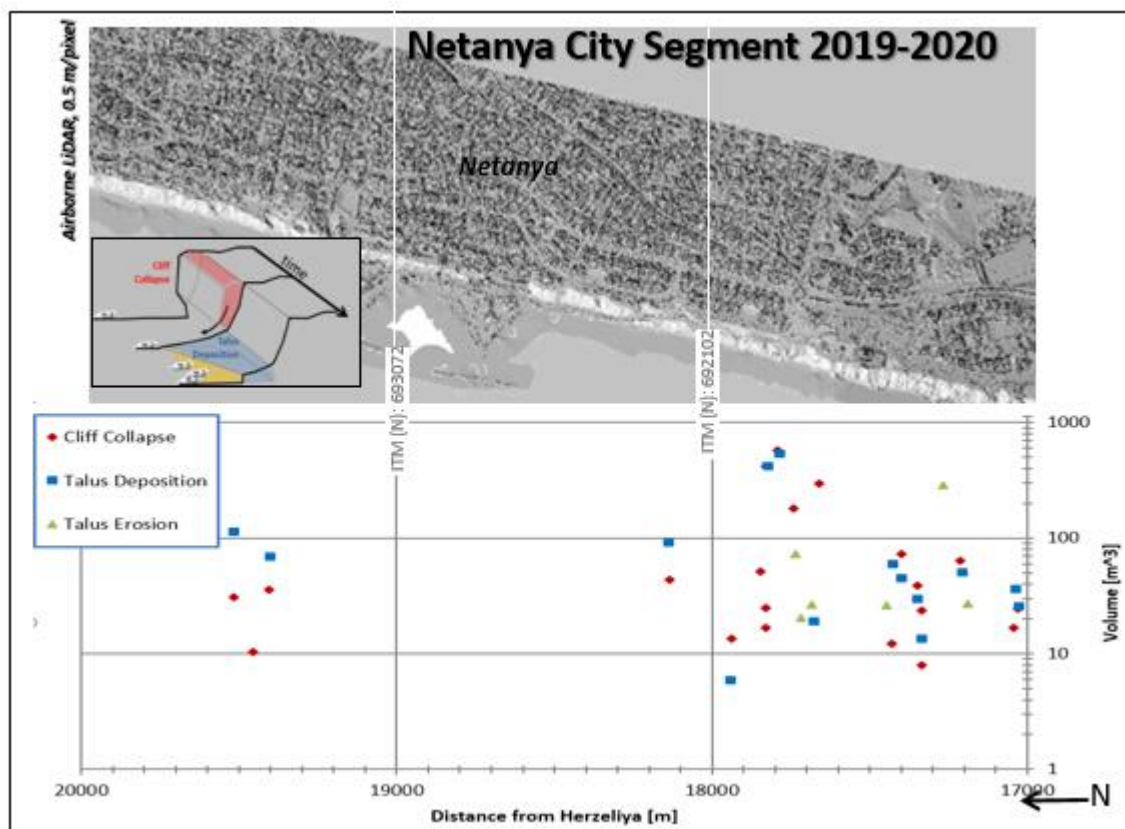
במהלך תקופת המחקר התרחשו במקטע זה 23 אירועי כשל מצוק בטווח נפחים של עד 2,627 מ"ק (חציון: 36 מ"ק) שגרעו מהמצוק החופי בסה"כ 5,298 מ"ק חומר (איור 11). תועדו 3 אתרים של סחיפת טאלוס בנפח כולל של 190 מ"ק ו- 3 אתרים של הערמות טאלוס שהגיעו בסה"כ ל- 35 מ"ק (טבלאות 2, 3). בתקופת המחקר נגרע מהמערכת החופית במקטע זה בסה"כ 5,453 מ"ק של חומר שמקורו במצוק.



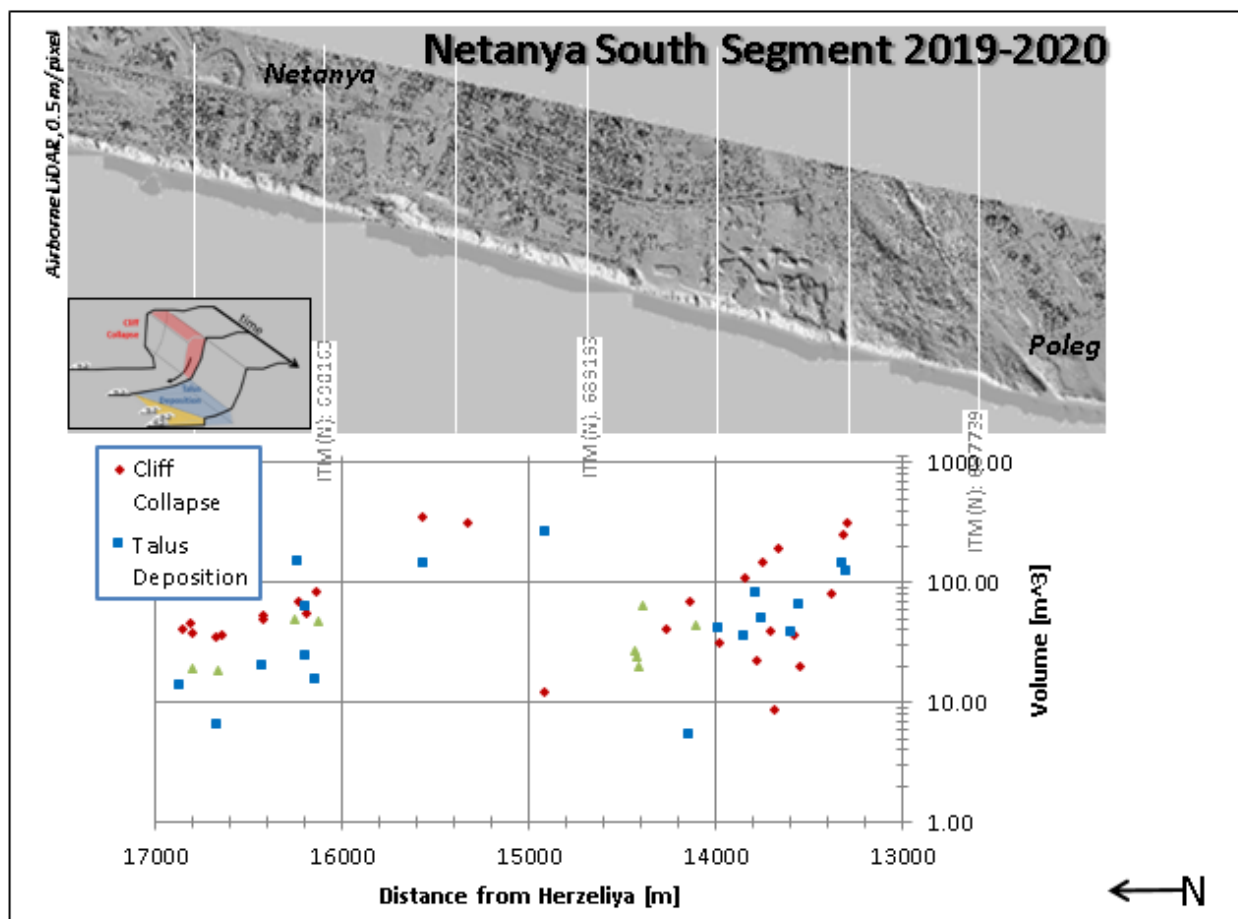
איור 5. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע עין ים 2019 - 2020 מוצגת לפי המרחק ממרינת הרצליה. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



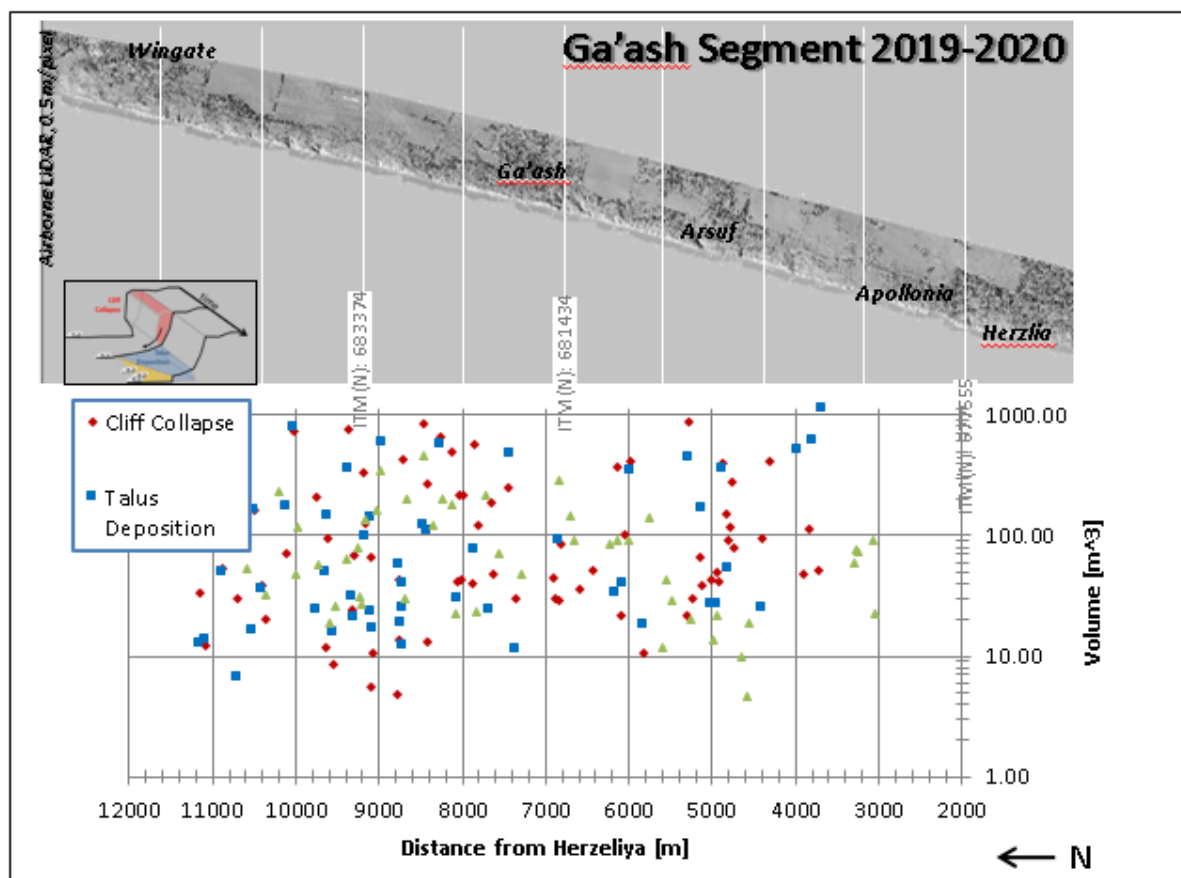
איור 6. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע נעורים 2019 - 2020 מוצגת לפי המרחק ממרינת הרצליה. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



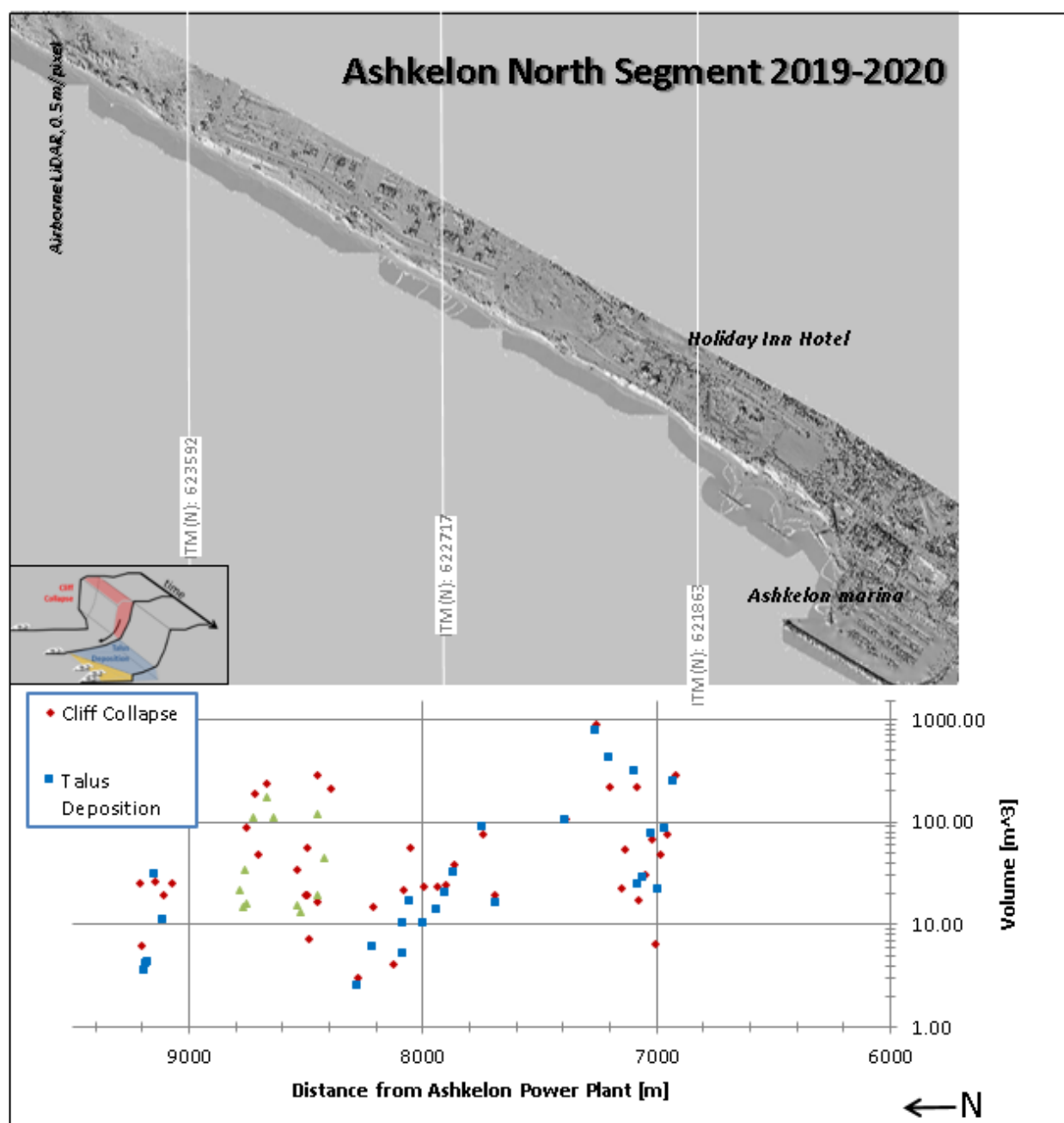
איור 7. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע נתניה העיר 2019 - 2020 מוצגת לפי המרחק ממרינת הרצליה. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



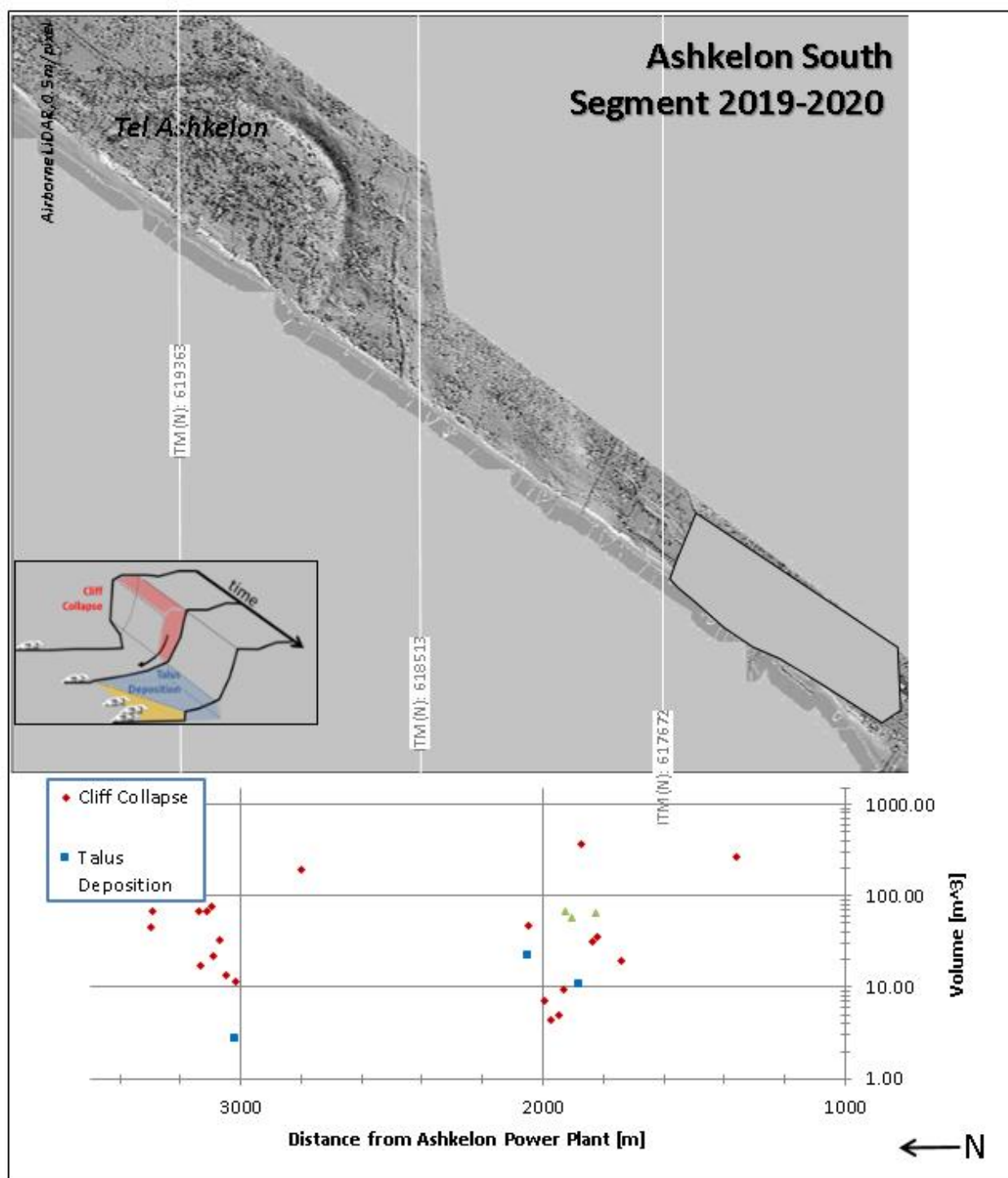
איור 8. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע נתניה דרום 2019 - 2020 מוצגת לפי המרחק ממרינת הרצליה. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמתית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



איור 9. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע געש 2019 - 2020 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 2019 - 2020 מוצגת לפי המרחק מתחנת הכוח. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמטית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.



איור 11. סיכום פעילות המצוק לאורך מקטע אשקלון דרום 2019 - 2020 מוצגת לפי המרחק מתחנת הכוח. אדום: קריסת מצוק, כחול: השקעת טאלוס, ירוק: סחיפת טאלוס על ידי הגלים (מוצג בצורה סכמטית באיור המוקטן). קואורדינטות צפון ברשת ישראל החדשה באפור.

4. דיון

4.1 נפחים והערכת הנסיגה

בתקופת המחקר (כ- 12 חודשים בין יולי 2019 ויולי 2020) תועדו לאורך כל המצוק החופי 289 אירועי כשל מצוק (CC) בנפח כולל של 43,522 מ"ק, 138 אתרים של סחיפת טאלוסים (TE) בנפח כולל של 10,421 מ"ק ו- 191 אתרים בהם נערם חומר שקרס מהמצוק על החוף (TD) בנפח כולל של 17,415 מ"ק (טבלה 4). בהתאם נמדד מאזן-נפח שלילי (EE) עבור כלל המצוק החופי, המסתכם ב- 36,527 מ"ק. בהתחשב באורך המצטבר של מקטעי המצוק שנבחנו (31.9 ק"מ) חושב שטף גריעה ממוצע של 1,145 מ"ק עבור כל ק"מ מצוק לתקופה המחקר 2019-2020. 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 2019-2020 מתרגם לנסיגה מזרחה לכוון היבשה ממוצעת של כ 0.05 מ' עבור כלל מצוק.

4.2 השוואה בין מקטעי המצוק השונים

התפלגות האירועים השונים וקצב הפעילות לאורך מקטעי המצוק השונים במהלך תקופת המחקר 2020 - 2019 לא הייתה אחידה (טבלה 4):

התמוטטות מצוק (CC): שטף גריעת הסדימנט כתוצאה מהתמוטטות מצוק (CC) בארבעת המקטעים עין הים, נעורים, נתניה העיר ונתניה דרום (696, 771, 633 ו 840 מ"ק/ק"מ מצוק, בהתאמה) היה נמוך משטף קריסות מצוק הממוצע לאורך כל המצוק (1,364 מ"ק/ק"מ). במקטע געש שטף גריעת הסדימנט כתוצאה מהתמוטטות מצוק (2,175 מ"ק/ק"מ מצוק) היה גבוה ממוצע המצוק. במקטעי אשקלון צפון ודרום שטף גריעת הסדימנט כתוצאה מהתמוטטות מצוק (1,660 ו 1,514 מ"ק/ק"מ, בהתאמה) היה דומה לקצב הממוצע לאורך כלל המצוק.

סחיפת טאלוסים (TE): שטף סחיפת הטאלוסים (TE) הממוצע לאורך כלל המצוק בתקופת המחקר 2020-2019 היה 327 מ"ק/ק"מ (טבלה 4). ערכי TE גבוהים ממוצע זה נמדדו במקטעי עין הים וגעש (603 ו 608 מ"ק/ק"מ, בהתאמה) בעוד ערכי TE נמוכים מהממוצע נמדדו במקטעי נעורים, נתניה העיר ואשקלון דרום (59, 148 ו 54 מ"ק/ק"מ, בהתאמה). במקטעי נתניה דרום ואשקלון צפון נמדדו ערכי TE קרובים לממוצע של כלל המצוק (218 ו 233 מ"ק/ק"מ, בהתאמה).

הערמות טאלוסים (TD): שטף הערמות הטאלוסים (TD) הממוצע לאורך כלל המצוק בתקופת המחקר 2019-2020 היה 546 מ"ק/ק"מ (טבלה 4). ערכי TD גבוהים ממוצע זה נמדדו במקטע געש (1025 מ"ק/ק"מ) בעוד ערכי TD נמוכים מהממוצע נמדדו במקטעי עין הים, ואשקלון דרום (137 ו 10 מ"ק/ק"מ, בהתאמה). במקטעי נעורים, נתניה העיר, נתניה דרום ואשקלון צפון נמדדו ערכי TD קרובים לממוצע של כלל המצוק (232, 489, 406 ו 782 מ"ק/ק"מ, בהתאמה).

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 2019-2020 עומד על 1,145 מ"ק/ק"מ

(טבלה 4). במקטעי נעורים, נתניה העיר ונתניה דרום נמדדו שטפי EE נמוכים ממוצע זה (598, 290 ו 625 מ"ק/ק"מ, בהתאמה) ובמקטעי עין הים, געש, אשקלון צפון ואשקלון דרום נמדדו שטפי EE דומים לממוצע של כלל המצוק (1162, 1757, 1111 ו 1558 מ"ק/ק"מ, בהתאמה).

טבלה 4. צפיפות האירועים ושטף הסדימנט (עבור 12 חודשים; 7.2019 – 7.2020)

מקטע	אורך	כשל מצוק (CC)				סחיפת טאלוס (TE)				טאלוסים שנוספו (TD)				סה"כ גריעה (EE)
		מספר קריסות (#)	נפח כולל (m ³)	מ"ק/מ	מ"ק/מ	מספר אתרים (#)	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	49	16.3	-2,088	-696	42	14	-1,809	-603	36	12	412	137	-1,162
נעורים	5.3	35	6.6	-4,086	-771	13	2.45	-310	-59	31	5.9	1,227	232	-598
נתניה העיר	3.1	20	6.4	-1,962	-633	6	1.9	-458	-148	14	4.5	1,518	489	-290
נתניה דרום	4.0	30	7.5	-3,361	-840	12	3	-875	-218	20	5	1,623	406	-625
געש	10.0	79	7.9	-21,745	-2,175	50	5	-6,081	-608	61	6.1	10,254	1,025	-1,757
אשקלון צפון	3.0	47	15.7	-4,980	-1,660	12	4	-698	-233	26	8.7	2,346	782	-1,111
אשקלון דרום	3.5	23	6.6	-5,298	-1,514	3	0.86	-190	54	3	0.9	35	10	-1,558
סה"כ / ממוצע	31.9	283	8.9	-43,520	-1,364	138	4.3	-10,421	-327	191	6.0	17,415	546	-1,145

4.3 השוואה של פעילות המצוק בין שנת המעקב הנוכחית (2019-20) לשנים הקודמות (2015-16, 2016-17, 2017-18 ו 2018-19)

טבלה 5 מציגה השוואה בין פעילות המצוק בשנת המעקב הנוכחית (2019-20) לארבעת תקופות המחקר הקודמות מאז 2015. מסיבות טכניות 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) ולכן בפועל אורך תקופות המחקר של 2015-16, 2016-17, 2017-18, 2018-19 ו 2019-20 הוא 13, 13, 18 ו 12 חודשים, בהתאמה. ואולם משום שרוב פעילות קריסת המצוק ופינוי החומר מבסיסו מתרחשת במהלך עונת החורף והאביב המוקדם (Katz and Mushkin, 2013) וכל אחת מחמשת תקופות המחקר תוחמת חורף בודד, מושווים כאן נפחי פעילות המצוק שנמדדו בכל תקופת מחקר ללא נרמול למספר החודשים של תקופת המחקר.

פעילות כלל המצוק - ממוצע נפח הגריעה (EE) של חומר מכלל המצוק החופי כפי שנמדד בשנת המחקר הנוכחית (2019-20) היה דומה לזה שנמדד במיפויים הקודמים מאז 2015: 36,527 מ"ק ב 2019-20 לעומת 51,510, 36,560, 19,520, ו 28,550 מ"ק ב 2018-2019, 2017-18, 2016-17 ו 2015-16, בהתאמה. בנרמול לאורך מצוק מצטבר של 31.9 ק"מ מתקבל 1,145 מ"ק/ק"מ ל 2019-20 לעומת 1,614, 1,146, 612 ו 895 מ"ק/ק"מ ל 2018-2019, 2017-18, 2016-17 ו 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 $18.8 \pm 20\%$ מ"ק 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 $\pm 20\%$ במדידות אלו מתקבל שקצב הגריעה מכלל המצוק החופי במהלך 2019-20 (1,145 מ"ק/ק"מ) דומה לקצב הנסיגה הרב שנתי הממוצע שנמדד עבור מצוק השרון מאז 2006.

פעילות המקטעים השונים - בשנת המחקר הנוכחית (2019-20), בדומה לתקופות המחקר הקודמות, נמדדה שונות משמעותית בנפח הגריעה (EE) בין מקטעי המצוק השונים (טבלה 5). מתקבל ששטף הגריעה במקטע עין הים ב 2019-2020 היה דומה לממוצע כלל המצוק ב 2019-2020 לעומת שנות המחקר הקודמות בהם נמדד במקטע זה בדרך כלל שטף גריעה נמוך ממוצע כלל המצוק. במקטע נעורים היה שטף הגריעה ב 2019-2020 נמוך ממוצע כלל המצוק וזאת בדומה לפעילות מקטע זה מאז 2016. בתקופה 2015-2016 היה שטף הגריעה במקטע נעורים דומה לשטף הגריעה הממוצע של כל מצוק החוף באותה שנה. במקטע נתניה העיר נמדד ב 2019-2020 שטף גריעה נמוך ממוצע כלל המצוק ל 2019-2020 וזאת בדומה לשנים 2018-2019 ו 2016-2017. בתקופה 2017-2018 היה שטף הגריעה לאורך מקטע נתניה העיר דומה לממוצע כלל המצוק באותה שנה. במקטע נתניה דרום היה שטף הגריעה ב 2019-2020 נמוך ממוצע כלל המצוק וזאת בדומה לפעילות מקטע זה בשנים 2015-2016 ו 2016-2017. בתקופות 2017-2018 ו 2018-2019 היה שטף הגריעה לאורך מקטע נתניה דרום דומה לממוצע כלל המצוק באותן שנים. במקטע געש נמדד ב 2019-2020 שטף גריעה מעט גבוהה ממוצע המצוק ב 2019-2020 וזאת בדומה לכל תקופות המדידה מאז 2015. במקטע אשקלון צפון נמדד שטף גריעה ב 2019-2020 הדומה לממוצע כלל המצוק ב 2019-2020 וזאת בניגוד לתקופות 2015-2016 ו 2018-2019 בהן נמדד במקטע זה שטף גבוהה ממוצע כלל המצוק באותן שנים. גם בתקופות 2016-2017 ו 2017-2018 היה שטף הגריעה במקטע אשקלון צפון דומה לשטף הגריעה הממוצע של כלל המצוק באותן שנים. במקטע אשקלון דרום נמדד ב 2019-2020 שטף גריעה דומה לשטף הממוצע של כלל המצוק ב 2019-2020. אותה מגמה נמדדה גם במקטע זה ב 2018-2019. לעומת זאת, בשנים 2015-2016, 2016-2017 ו 2017-2018 היה שטף הגריעה במקטע אשקלון דרום נמוך ממוצע כלל המצוק באותן שנים.

טבלה 5. השוואה של פעילות המצוק בין השנים: 2015-16, 2016-17 ו-2017-18, 2018-19 ו-2019-20

סה"כ גריעה (EE) (מ"ק/מ"חורף)					טאלוסים שנספו (TD) (מ"ק/מ"חורף)					סחיפת טאלוס (TE) (מ"ק/מ"חורף)					כשל מצוק (CC) (מ"ק/מ"חורף)					אורך	מקטע
2019-2020	2018-2019	2017-2018	2016-2017	2015-2016	2019-2020	2018-2019	2017-2018	2016-2017	2015-2016	2019-2020	2018-2019	2017-2018	2016-2017	2015-2016	2019-2020	2018-2019	2017-2018	2016-2017	2015-2016	ק"מ	
1,162	538	104	23	563	137	291	107	1	145	603	180	33	10	117	696	649	179	14	591	3	עין הים
598	311	210	98	1021	232	154	162	112	126	59	154	197	46	273	771	311	176	163	874	5.3	נעורים
290	486	1,091	168		489	178	332	545		148	303	515	46		633	361	908	667		3.1	נתניה העיר
625	1,484	977	205	206	406	280	665	526	243	218	606	840	16	88	840	1,158	801	715	361	4.0	נתניה דרום
1,757	2,522	2,342	1,238	1,322	1,025	705	872	611	500	608	1,364	611	196	366	2,175	1,863	2,603	1,654	1,456	10.0	געש
1,111	4,070	908	716	2,368	782	529	480	122	285	233	1,152	141	128	683	1,660	3,447	1,247	710	1,970	3.0	אשקלון צפון
1,558	965	489	872	84	10	21	488	15	163	54	760	125	46	54	1,514	226	851	841	193	3.5	אשקלון דרום
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 מנרמלים למספר החודשים משום שתקופה זו כללה עונת חורף אחת בלבד. רוב פעילות קריסת המצוק ופינוי החומר מבסיסו מתרחשת החורף.

- 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

5. מסקנות

בכל מקטעי המצוק שנבדקו במסגרת הדוח הנוכחי, נרשמה בסיכום שנת המעקב 2019-20 גריעה של חומר מהמערכת החופית. במהלך התקופה נגרע נפח של כ 36,527 מ"ק מסך 31.9 הק"מ של המצוק החופי בכללותו: ממוצע של 1,145 מ"ק/ק"מ מצוק המתרגם לקצב נסיגה ממוצע של 0.05 מ"/שנה. קצב סחיפה זה עבור כלל המצוק דומה לקצב סחיפת המצוק שנמדד בעזרת מדידות ליידאר אווירי מאז 2006 (Mushkin et al., 2016; 2019) ובעזרת תצפיות גיאולוגיות וארכיאולוגיות עבור אלפי השנה האחרונים (Barkai et al., 2018; Mushkin et al., 2019). בדומה לשנות המעקב הקודמות גם ב 2019-2020 נמדדה שונות מרחבית משמעותית בפעילות המצוק בין מקטעי המצוק השונים. מתקבל ש: במקטע עין הים שטף גריעה נמוך מממוצע המצוק ב 2018-2019 עלה לשטף גריעה הדומה לממוצע המצוק ב 2019-2020. במקטע נעורים ונתניה העיר שטף הגריעה ב 2019-2020 נותר נמוך מממוצע כלל המצוק כפי שהיה ב 2018-2019. במקטע נתניה דרום שטף גריעה דומה לממוצע המצוק ב 2018-2019 ירד ב 2019-2020 לשטף גריעה נמוך מממוצע כלל המצוק ב 2019-2020. במקטע געש נותר שטף הגריעה ב 2019-2020 גבוהה מממוצע כלל המצוק וזאת בדומה לאותה מגמה שנמדדת במקטע זה מאז 2015. שטף הגריעה החריג שנמדד במקטע אשקלון צפון במהלך 2018-2019 (4,070 מ"ק/ק"מ שהיו פי 2.5 מהממוצע של כלל המצוק בתקופת המחקר 2018-19) לא חזר על עצמו במהלך תקופת 2019-2020 בה נמדד במקטע אשקלון צפון שטף גריעה של 1,111 מ"ק/ק"מ אשר דומה לממוצע כלל המצוק ב 2019-2020. במקטע אשקלון דרום נותר שטף הגריעה מהמצוק ב-2019-2020 דומה לממוצע כלל המצוק ב 2019-2020 כפי שהיה גם בשנת המעקב הקודמת של 2018-2019.

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'.
- ניר, י., 1988. חופי הים התיכון של ישראל וצפון סיני, היבטים סדימנטולוגיים. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/39/88, 130 עמ'.
- ניר, 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.
- French, 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 (2019-2020) 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	475±30	0	0	1	180±25	295
3	אולגה כפר נופש	303	0	0	0	0	0	0
4	בית ינאי	122	39±8	0	0	1	1±1	38
5	בית ינאי צפון	197	51±10	0	0	3	4±3	47
6	בית ינאי דרום	650	1208±320	2	40±15	4	156±34	1,092
7	נעורים	337	56±15	2	49±15	2	32±10	73
8	כפר נוער נעורים	518	53±15	2	35±10	3	73±25	15
9A	חוף נעורים	88	0	0	0	0	0	0
9B	חוף נעורים דרומי	139	0	0	0	0	0	0
10	בלו ביי	221	50±15	1	23±8	1	26±5	47
11	נתניה צפון	318	57±15	1	10±5	1	5±3	62
12	החוף הנפרד	0	0	0	0	0	0	0
13	שדרות ניצה	232	0	0	0	3	26±8	-26
14	חוף העונות חוף האמפי	0	77±20	0	0	2	182±55	-105
15A	נתניה חוף סירונית וארגמן	2,837	3,044±700	13	1,155±366	21	1,717±455	2,482
15B		570	158±45	0	0	1	8±2	150
16	דרום נתניה	210	0	0	0	0	0	0
17	חוף געש	196	0	0	0	0	0	0
18	אפולוניה צפון	350	2,388±470	0	0	1	1,105±320	1,283
19	אפולוניה דרום	144	0	3	209±40	0	0	209
20	חוף נוף ים	187	0	0	0	0	0	0
21	גלי תכלת	130	0	0	0	0	0	0
22	חוף השרון הרצליה	370	24±10	0	0	1	24±10	0
23	חוף אכדיה	795	43±15	0	0	0	0	43

0	0	0	0	0	0	0	216	חוף נפרד הרצליה	24
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
0	0	0	0	0	0	0	261	תל ברוך	28A
0	0	0	0	0	0	0	262	תל ברוך	28B
0	0	0	0	0	0	0	734	הילטון תל אביב	29
0	0	0	0	0	0	0	635	חוף נחום גולדמן	30
0	0	0	0	0	0	0	546	יפו חוף עליה	31
70	120±25	1	0	0	190±35	1	250	בת ים צפון	32
43	0	0	0	0	0	0	850	בת ים מרכז	33
250	155±30	4	0	0	405±80	4	375	בת ים דרום	34
4	0	0	4	1	0	0	177	פלמחים	35
158	126±35	1	0	0	284±50	2	170	בית קברות פלמחים	36
17	0	0	17±4	2	0	0	284	תל יבנה ים	37
-47	2,207±509	13	0	0	2,160±554	16	1,130	אשקלון צפון	38
0	0	0	0	0	0	0	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 ten month period between July 2019 and July 2020. Results are based on topographic changes measured by differencing two high-resolution (0.5 m/pixel) DEM's 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 within a GIS environment, and where required results were verified in the field.

For the studied period we found 289 cliff collapse events that amount to a total of ~43,500 m³. Talus deposition occurred at 148 sites and amounted to a total of ~10,400 m³. Talus erosion (of pre-existing talus piles) due to wave scouring was documented at 197 sites and amounted to a total of ~17,400 m³. Our results indicate that erosion and landwards retreat of Israel's sea cliff between 2019-2020 occurred at an average rate of ~1,145 m³ per km of cliff. This rate is comparable to the cliff's average annual erosion rates as previously measured with airborne LiDAR since 2006 and as previously estimated from geologic and archeological data over recent centennial-millennial time scales. As in previous years, significant spatial variability in cliff activity was documented during 2019-2020. Erosion rates along the Neurim, Natanya City and Natanya South segments was lower than the entire cliff average for 2019-2020 whereas erosion rates slightly higher than the entire cliff average were found along the Ga'ash segment. Erosion rates comparable to the entire cliff average were found along the Ein Yam, Ashkelon North and Ashkelon South segments.

Comparison of the cliff activity between 2018-19 and 2017-18 reveals changes in erosion volumes along most of the studied segments. However, this variability appears to be mostly within the natural fluctuations of inter-annual cliff activity. The exceptionally high erosion rates documented along the Ashkelon North segment during the 2018-19 period did not carry into the 2019-2020 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 2019 and 2020

**Amit Mushkin, Oded Katz, Onn Crouvi, Lana Ashkar, Nadav Navon,
Michal Kotliyarov,**

Submitted to

The Mediterranean Coastal Cliff Preservation Government Company

GSI Report: GSI/15/2021

Jerusalem, April 2022 (update)