

GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

חוות דעת בנושא חלופות להגנת

חופי קרית חיים

הוכן עבור עמותת "צלול"

הוכן על ידי נעמה שריד (M.Sc)

GeoMare שירותי יעוץ גיאולוגיה והנדסה ימית

נובמבר 2024

GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

רקע

סחף בחופים מהווים את אחד האתגרים המשמעותיים ביותר איתם מתמודדים מתכנני ההנדסה הימית במאה ה-21.

בעידן הנוכחי, התמודדות עם תופעת סחף החופים מציבה אתגר מורכב. מעבר לפגיעה הסביבתית הישירה, התופעה מייצרת שרשרת השפעות הכוללת שיבושים במרקם חברתי-כלכלי, פגיעה במערכות הסביבתיות והחלשת עמידות הקהילות החופיות (אנושיות ואקולוגיות). תכנון וניהול יעיל של אזורי החוף מחייב הבנה מעמיקה של מכלול ההשפעות הללו.

הנזק המידי המשמעותי ביותר של ארוזיה חופית מתבטא בהרס בתי הגידול של יצורים ימיים וחופיים. נסיגת קו החוף גורמת להצטמצמות דרמטית של אזורי המחיה של בעלי חיים וצמחים מקומיים, ובכך מערערת את שיווי המשקל האקולוגי העדין. לאורך ההיסטוריה האנושית, התפתחה מסורת של בנייה והתאמה של הסביבה החופית, בעיקר לצורכי ספנות וחקלאות ימית. עם זאת, התפתחות ענפי התיירות והנדל"ן הובילה להרחבת מגוון הצרכים בהגנה על החופים, ועימם התפתחו שיטות הנדסיות מתקדמות.

כמו כן, התעוררות המודעות הסביבתית בשנים האחרונות הובילה לפיתוח גישות חדשניות בהגנת החופים. גישות אלו מתמקדות במתן מענה לאתגרים סביבתיים עכשוויים:

- התמודדות עם תמורות אקלימיות
- התאמה לעליית פני הים
- היערכות לתופעות אקלים קיצוניות

מערך הפתרונות הקיימים היום כולל שלוש קטגוריות עיקריות:

1. פתרונות הנדסיים קשיחים
2. פתרונות הנדסיים רכים
3. פתרונות מבוססי טבע (Nature Based Solutions -NbS)

כל אחת מהגישות תורמת לפיתוח בר-קיימא של סביבת החוף. בחירת הפתרון המיטבי תלויה במספר גורמים:

- מאפייני האזור הספציפי
- אופי תהליכי הסחף המקומיים
- צרכים ייחודיים של האתר

גישה זו משקפת את התפיסה העדכנית בהנדסת חופים, המשלבת שיקולים סביבתיים, חברתיים וכלכליים בפתרון בעיית הסחף, המביאים איתם יציבות רבת שנים.

GeoMare

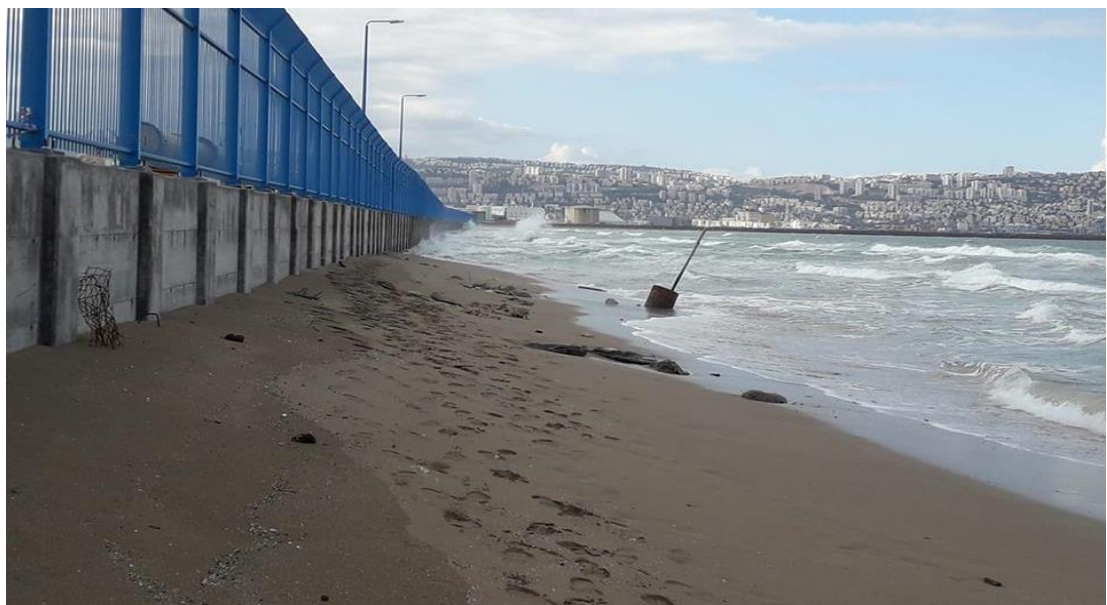
Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

שיטות הנדסיות קשיחות "דור ישן"

דוגמה לפתרונות הנדסיים "דור ישן" היא קירות ים, שאמנם נותנים הגנה על עורפם בסמוך לזמן בנייתם, אך מעודדים סחף חול בבסיסם שמובילה להתמוטטות הקיר עצמו ולהגברת תהליך הסחף או הפירוק גם בעורפם ולכן דורשים תחזוקה רבה לאורך זמן. בישראל ניתן לראות חופים רבים בהם נבנו טיילות המשמשות כקירות ים ללא כוונה תחילה וקירות ים עם כוונה תחילה, כדוגמת גדר חוות המיכלים בקרית חיים, שעוברת חידושים מדי שנה- שנתיים (תמונה 1, תמונה 2).



תמונה 1- חוף חלוצי התעשייה בקרית חיים, קיר הים של חוות המיכלים במבט צפונה (צילום: נעמה שרד, 2019)



תמונה 2- חוף קרית חיים, מבט לדרום, גדר חוות המיכלים (צילום: נעמה שרד, 2019)

GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

שוברי גלים מקבילים לחוף הם פתרון הנדסי קשיח נפוץ שנבנה על מנת להגן על החוף והרוחצים בים, באמצעות הפחתת אנרגיית הגלים ולכידת חולות מוסעים. שיטה זו יעילה בים רגוע, אך בים סוער הם גורמים להגברת הזרם כלפי הקרקעית ובמקביל אליהם ואף יוצרים זרמי פריצה לכיוון הים הפתוח- ובכך יוצרים סכנה לרוחצים. בנוסף, שוברי גלים עלולים לשבש את תהליכי הסעת הסדימנט הטבעי, מה שמוביל להשלכות בלתי מכוונות על חופים סמוכים, כדוגמת חופי מפרץ חיפה לאחר הקמת שובר הגלים של הנמל הבריטי, לאחר מכן שובר הגלים של הפולינום, ועל כך נוספו גם הארכת שובר הגלים הקיים והקמת רציף כחלק מהעבודות על נמל המפרץ (Sarid 2019, Schoonees et al. 2019). דוגמה נוספת היא מחופי הרצליה הצפוניים שהוצרו לאחר הקמת המרינה ושוברי הגלים (דו"ח המשרד להגנת הסביבה 2020). זה הוביל להערכה מחדש של ניהול שיקום החופים, תוך הדגשת הצורך בתכנונים "ירוקים" יותר המשלבים שיקולים אקולוגיים וראייה יותר מרחבית (Schoonees et al. 2019, Shabtay et al. 2018). **מבנים קשיחים זוכים כיום לביקורות רבות בשל הפוטנציאל שלהם ליצור השפעות אקולוגיות ארוכות טווח ובשל היותם לעיתים קרובות לא ברי קיימא מבחינה כלכלית עקב עלויות תחזוקה מתמשכות** (Morris et al. 2018, Shabtay et al. 2018). גם בישראל רשויות מקומיות ומשרדי ממשלה בוחנים מחדש פרויקטים בתחילת דרכם, על אף הקשיים הכרוכים בדבר, ועל מנת לבחור בשיטות המתאימות ביותר לשיקום החופים ושיפור בריאות המערכת האקולוגית. בין רשויות אלו ניתן למנות את עיריית הרצליה, עיריית תל אביב והחברה להגנת מצוק החוף, אשר בימים אלו בוחנים מחדש פרויקט שוברי הגלים שתוכנן בעבר, ומקדמים פרויקטים הנדסיים אקולוגיים.

שיטות הנדסיות רכות

גיאוטויב (גיאוטקסטיל)

בשנים האחרונות, חלה התפתחות משמעותית בתחום שימור החופים עם אימוץ גישות הנדסיות רכות. במרכז מגמה זו עומד השימוש בטכנולוגיות כמו צינורות גיאוטויב (גיאוטקסטיל) והזנת חול, המציעות פתרונות חדשניים להגנה על קו החוף. צינורות הגיאוטקסטיל, שהם למעשה שרולי בד המאפשרים מעבר מים אך אוטמים חול, משמשים במגוון יישומים של הגנה חופית. יכולתם ליצור סוללות חופיות ושוברי גלים תת-ימיים הוכחה כיעילה במניעת סחף (Bar & Drimer 2021, Nugroho et al. 2023). הטכנולוגיה מציעה מספר יתרונות בולטים, ביניהם עלויות הקמה נמוכות, התקנה פשוטה, גמישות בהתאמה לתנאי השטח, ואפשרות להסרה או שינוי בקלות יחסית. יתרון משמעותי נוסף הוא השימוש בחומרים מקומיים, המפחית את ההשפעה הסביבתית של שינוע. מעבר להגנה החופית, המערכת הוכיחה את יעילותה גם בבקרת שיטפונות וניקוז, תוך עמידות בתנאי ים קשים. תופעה מעניינת שנצפתה היא התפתחות חיים ביולוגיים על הצינורות, אם כי דרוש מחקר נוסף להערכת השפעתה על המינים המקומיים.

הזנת חול מלאכותיות/ מגה- הזנת

הזנת חופים היא שיטה הנדסית "רכה" הכוללת הוספת חול לחוף כדי לפצות על אובדן סדימנט. גישה זו משפרת את רוחב החוף, ערכו התיירותי והאקולוגי, ותורמת ליצירת בתי גידול (Bitan & Zviely 2020; Kindeberg et al. 2023). בשנים האחרונות התרחב השימוש בהזנת ענק, בהן מועברות כמויות משמעותיות של חול להארכת חופים או יצירת איים מלאכותיים, מה שמסייע בהפחתת אנרגיית הגלים ובתחזוקה נמוכה יותר בהשוואה להזנת מסורתיות (Kumar 2023).

הולנד היא חלוצה בשיטה זו מאז 1990, עם פרויקטים כמו "Sand Motor" שהוזרמו בו 20 מיליון מטרים מעוקבים של חול, מה שתורם להגנת החופים ולשיקום בתי גידול טבעיים (Bergen et al. 2021). בארצות הברית, השיטה אומצה לאורך החופים המזרחיים והמערביים כדי להתמודד עם סחיפה ונזקי סערות (Amrouni 2024). גם בספרד, בפרויקט בדלתא טורדורה, בוצעה הזנה "חירום" לשיקום חופים מצטמצמים (Sagrsta & Sarda 2020).

בישראל בוצעו הזנת חול קטנות יותר כפתרון זמני נגד סחיפות חורף (Sarid & Lazar 2019). פרויקטים אלו מצביעים על יעילות ההזנה בשיפור עמידות החופים, תוך ניטור והשוואה מתמשכים להבנת השפעותיהם מול שינויי אקלים ועליית מפלס הים.

GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

שיטות מבוססות טבע NbS "דור חדש"

החופים הטבעיים שאנו מכירים נוצרו בתהליכים גיאולוגיים שהתרחשו במשך מיליוני שנים. עם הזמן, שרדו חופים שהיו להם הגנות טבעיות שאיפשרו לשמור על החול. באזורים בהם לא הייתה הגנה טבעית מתאימה, ניתן למצוא מצוקים או סלעים במים במקום חופים חוליים. בשנים האחרונות, מהנדסים ואקולוגים החלו לחקור את המבנים הטבעיים שהתפתחו במהלך ההיסטוריה הגיאולוגית, ולנסות לחקות אותם באופן מלאכותי כדי ליצור תנאים להתפתחות חופים חוליים טבעיים. פתרונות אלו, הידועים כשיטות מבוססות טבע (Nature-based Solutions - NbS), הפכו לחלק מרכזי באסטרטגיות המודרניות להגנת חופים.

שיקום ושימור מערכות אקולוגיות חופיות, כמו ביצות, יערות מנגרובים וביצות מלח, וכן שימוש בדיונות חול, מציעים מחסומים טבעיים להגנה מפני סערות והצפות (D'Alessandro et al. 2020, Adams et al. 2020). ישנן גם גישות המחקות מבנים קשיחים טבעיים, במקומות בהם מבנים כאלה יכולים לספק הגנה חופית. מערכות אקולוגיות אלה, כולל ריפים מלאכותיים, ריפי סלעים ושוברי גלים טבעיים, לא רק שמספקות הגנה לאזורי החוף, אלא גם משפרות את המגוון הביולוגי ותורמות לקיבוע פחמן (Joyce et al. 2022). מחקרים מדגישים את החשיבות של שיקום ביצות כהגנה על אזורים נמוכים בחוף (Barbier et al. 2013), וכן את היתרונות של שוברי גלים "חיים" (Living shorelines). בנוסף, נמצא כי שילוב שירותי מערכת אקולוגית בניהול חופים מספק תוצאות יעילות כלכלית ובעלות קיימות גבוהה (D'Alpaos & D'Alpaos 2021).

שוניות מלאכותיות - השימוש בריפים מלאכותיים החל כבר לפני 1965 עם מבנים שנוצרו במקרה, כמו כלי שיט טבעיים ומבנים חופיים, שהפכו בתי גידול למגוון מינים ימיים (Ramm et al. 2021). כיום, ריפים מלאכותיים נבנים מחומרים כמו מתכת, עץ, צמיגים, או בטון אקולוגי, שמותאם להרכב הימי ואינו מזהם את המים (Ramm 2021).

ריפים מלאכותיים מציעים הגנה לחופים חוליים בכך שהם מפחיתים אנרגיית גלים ותורמים לשיקום אקולוגי. דוגמה לכך היא שונית נארוונק באוסטרליה, שנבנתה בסוף שנות ה-90 לשיפור תנאי גלישה, לעידוד תיירות ולהגנה על חופי הזהב. השונית הפחיתה סחיפת חול והגדילה את שטח החוף בכ-20-30 מטר (Silva et al. 2020).

מחקרים הדגימו את יכולת הריפים המלאכותיים לשנות תנאים הידרודינמיים, להגביר השקעת סדימנט ולייצב את קו החוף (Kuang et al. 2020; Escodero et al. 2021). בנוסף, הם יוצרים בתי גידול חדשים לאורגניזמים ימיים, משפרים את המגוון הביולוגי ותורמים לאסטרטגיות ניהול חופים ברות קיימא (Loksha et al. 2013).

בעשורים האחרונים נעשו פרויקטים רבים בעולם, למשל באיי סיישל, שם הותקנו "כדורי שונית" מבטון לבלימת אובדן חול ולעידוד שיקום אקולוגי. ההשראה לפרויקט נלקחה מניסיון מוצלח באיים המלדיביים, שם ריף מלאכותי סייע לשמירת החופים המקומיים (רשות הטבע והגנים 2015, מידע שפורסם Reef Ball Foundation). פרויקטים דומים ניתן למצוא בסקוטלנד, אינדונזיה, איטליה ועוד.

שילוב בין שיטות

אחת המגמות המובילות כיום בתחום ההנדסה הימית היא שילוב בין שיטות הנדסיות קשיחות (כגון חומות ים ושוברי גלים) לבין שיטות "רכות" מבוססות טבע. גישה היברידיית זו שואפת לספק גם הגנה מיידית מפני סחיפה ונזקים, וגם לשמר קיימות לאורך זמן (Imran 2017). לדוגמה, מחקרים הראו כי צינורות גיאוטיוב יכולים להאט סחיפת חול ביעילות, ובמקביל להתאים את עצמם טוב יותר לשינויים בתנאים הסביבתיים (Imran 2017, Bar & Drimer 2023). גם ריפים מלאכותיים, כאשר הם משולבים עם הזנות חול ושחזור דיונות, נמצאו יעילים בהגנה על חופים. דוגמה לכך היא פרויקט בפארק חוף קרדיף שבקליפורניה, בו שוחזרה דיונה כחלק מהשלב הראשוני במטרה להפחית הצפות ונזקים עקב סערות. בעתיד, מתוכננות גם תוספות של מבנים קשיחים להגנה נוספת, אך בינתיים, הוספת חול לחוף מאפשרת דחייה בהתמודדות עם עליית מפלס הים הצפויה בעקבות שינויי אקלים.

GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

קו החוף הישראלי וחופי קרית חיים

בחופים השומרים על איזון אקולוגי, קיימת תנועה עונתית של חול: בחורף ישנה גריעה טבעית של חול כתוצאה מסופות, ובעונות המעבר ישנה הזנה טבעית של חול דרך דיונות. בחוף הישראלי, החול מוזן ממזרח למערב על ידי דיונות ומועבר מדרום לצפון באמצעות זרם מקביל לחוף. זרם זה סוחף חול מהמים אל החוף באמצעות גלים, רוחות וזרמים מקומיים, בעיקר בעונות המעבר ובקיץ.

קו החוף של מפרץ חיפה הוא הנקודה הסופית של הסחף מהנילוס לכיוון צפון. האזור נתון להשפעות רבות של תעשייה, בנייה והשפעות אנתרופוגניות נוספות מאז תחילת המאה ה-20, כולל בניית נמלים, שוברי גלים והרחבת נמל חיפה. שינויים אלו הביאו לצמצום חופי קריית חיים ולגריעת חול למרות ניסיונות שיקום באמצעות הזנת חול (לפי היתרים 9/10 ו-7/16).

הבנייה לאורך החופים פגעה באיזון הטבעי עקב פגיעה בדיונות והקמת תשתיות קשיחות שהגבירו את עוצמת הגלים, מה שגרם לסחף חול מוגבר אל הים. החול המוסע צפונה כולל חלקיקי קוורץ וסדימנטים מקומיים. ככל שעולים צפונה, החול נהיה דק יותר ורגיש יותר לגריעה.

תא השטח של החוף החולי בקריית חיים רגיש מאוד לסחף, ובנייה אינטנסיבית באזור הפרה את האיזון האקולוגי. במצב הנוכחי, המערכת האקולוגית אינה מצליחה לשקם את עצמה או לפצות על אובדן החול, ולכן נדרשת התערבות חיצונית לשיקום מתוכנן שיאט את נסיגת החוף.

שיטות שיקום שנעשו בעבר על ידי חנ"י כללו ניסיונות להרחבת קו החוף באמצעות הזנת חול מלאכותית, אך לאחר סופת חורף ראשונה החול המוזן נסחף, והרחבת החוף לא צלחה.

במסגרת עבודת מאסטר באוניברסיטת חיפה, נערך מחקר על ידי מחברת המסמך אשר בחן את השינויים הגיאומורפולוגיים בחופי מפרץ חיפה לאורך מאה השנים האחרונות. המחקר כלל ניתוח והשוואה של תצלומי אוויר במטרה לזהות מגמות ארוכות טווח לצד תופעות מקומיות.

תוצאות המחקר הראו כי בחופי קריית חיים קיימת מגמה ארוכת שנים של היצרות החוף, עד כדי כך שהגלים נשברים על גדר חוות המיכלים (תמונות 1,2). כמו כן, תצלומי האוויר הצביעו על תופעה מקומית של זרם בכיוון דרום לצפון בעונת החורף (תמונה 3), ואילו בצפון המפרץ נצפה זרם מצפון לדרום המסיע חול בעונות המעבר (תמונה 4).

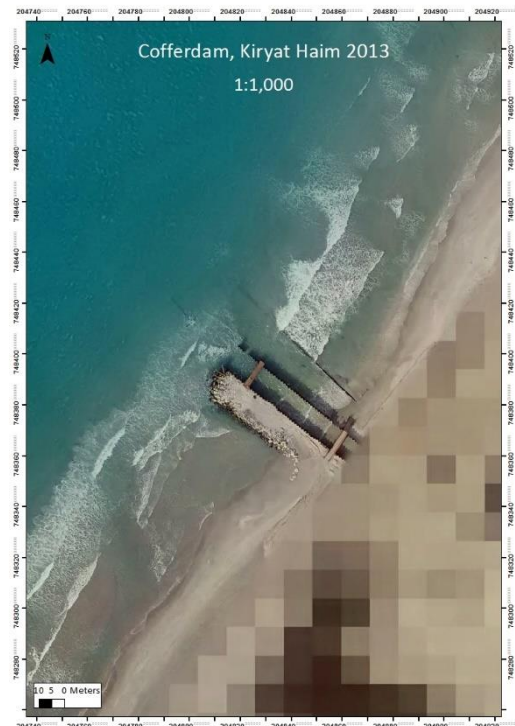
GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

השוואת תצלומי אוויר התבררה כשיטה יעילה לזיהוי מגמות ארוכות טווח, אך היא מוגבלת בהערכת עוצמת וכיוון הזרמים לאורך זמן, משום שהיא מספקת תמונה נקודתית בלבד. בקריית חיים, לא נערכו מדידות רציפות של זרמי החוף הרדוד, ולכן לא ניתן לקבוע את יחסיות רכיבי הזרם המרכזיים המשפיעים על תנועת החול. כאשר מוקמות תשתיות הנדסיות בים, יש חשיבות רבה להבנת משטר הזרמים המקומי על מנת למנוע החמרת נזקים לחוף.



תמונה 4- תופעה מקומית של הצטברות חול במעלה הזרם, מצפון לאלמנט המוצב במים. חוף כאן, קרית חיים 2013 (Sarid 2019)



תמונה 3- תופעה מקומית של הצטברות חול במעלה הזרם, מדרום לאלמנט המוצב במים. חוף חוות המיכלים, קרית חיים 2013 (Sarid 2019)

GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

סיכום ומסקנות

בעשור האחרון חלה מגמה בהגנה על חופים, המתמקדת בגישות בנות קיימא, משולבות ושיתופיות. השילוב בין פתרונות הנדסיים קשיחים ורכים לבין שיקום מערכות אקולוגיות טבעיות מציע גישה הוליסטית לחיזוק חוסן החופים. עם החרפת השפעות שינויי האקלים, גישות חדשניות אלו יהפכו חיוניות להגנה על אוכלוסייה, מערכות אקולוגיות חופיות ומגוון המינים בסביבה.

המגמה העולמית כיום היא לפתח פתרונות מבוססי טבע וברי קיימא, התואמים מגוון שימושי חוף. בהתאם לכך, יש לבחון את קו החוף המקומי ולאמץ פתרונות שעובדים בסביבות דומות, על מנת להגדיל את סיכויי ההצלחה בהגנה על קו החוף. מחקרים מראים כי החופים הטבעיים המוגנים ביותר כוללים מאגר חול טבעי רחב בשילוב מסלע ימי, המסייע בשבירת גלים מתחת או מעל פני המים. יחד עם זאת, יש להתחשב בהשפעת מבנים על חופים סמוכים ולשאוף לצמצום השפעתם על אגירת חול.

לשם כך, מומלץ לשלב מבנים קשיחים מטובעים כמו ריפים מלאכותיים או שוברי גלים מטובעים, עם הזנות חול ישירות לחוף או שיקום דיונות, במידת האפשר. סקירת הספרות מציינת כי פתרונות המשלבים בין הנדסה רכה וקשיחה נמצאו יעילים בהפחתת היצרות חופים עם מאפיינים דומים לאלו של קריית חיים. שיטות הנדסה רכות מספקות מענה זמני ומהיר, בעוד שיטות קשיחות מיועדות לטווח ארוך. שילוב שתי השיטות נותן מענה משולב ואפקטיבי.

מבנים קשיחים כגון ריפים מלאכותיים ושוברי גלים מטובעים יכולים לסייע בהגנה על קו החוף. בנוסף, שימוש בהזנות חול רחבות היקף הוכח כשיטה רכה יעילה במיוחד לתוואי כפי שיש במפרץ חיפה. שילוב שיטות אלו היא הדרך היעילה ביותר לשימור חופים לטווח ארוך בהתערבות המינימלית הנדרשת. כדי להמשיך ולפתח פתרונות אלו, מומלץ לחקור את משטרי הזרמים והגלים בחופי קריית חיים ולמדוד את גובה פני הים באמצעות מדי זרם ומצופים. נתונים אלו ישמשו לפיתוח מודלים ממוחשבים ופיזיקליים, אשר יאפשרו לבחון את ההשפעות של כל אחד מהפתרונות המוצעים על קו החוף במצבים שונים.

על החתום:

נעמה שריד (M.Sc)

גיאולוגית ויועצת הנדסה ימית

GeoMare



GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

מסמך זה נכתב בהתבסס על המחקרים הנ"ל:

Adams, J. B., Raw, J. L., Riddin, T., Wasserman, J., & van Niekerk, L. (2021). Salt marsh restoration for the provision of multiple ecosystem services. *Diversity*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/d13120680>

AW Ramm, L., Florisson, J. H., Watts, S. L., Becker, A., & Tweedley, J. R. (2021). Artificial reefs in the Anthropocene: A review of geographical and historical trends in their design, purpose, and monitoring. *Bulletin of Marine Science*, 97(4), 699–728. <https://doi.org/10.5343/bms.2020.0046>

Arriaga, J., Ribas, F., Falqués, A., Rutten, J., & Ruessink, G. (2020). Long-term performance of mega-nourishments: Role of directional wave climate and initial geometry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(12), 1–21. <https://doi.org/10.3390/jmse8120965>

Bar, D., & Drimer, N. (2023). Preliminary Design Tools for Hydrodynamic Aspects of Submerged Impermeable Breakwaters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/jmse11020236>

Barbier, E. (2013). Valuing ecosystem services for coastal wetland protection and restoration: progress and challenges. *Resources*, 2(3), 213–230. <https://doi.org/10.3390/resources2030213>

Barbier, E., Georgiou, I., Enchelmeyer, B., & Reed, D. (2013). The value of wetlands in protecting southeast louisiana from hurricane storm surges. *Plos One*, 8(3), e58715. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058715>

Bitan, M., & Zviely, D. (2020). Sand beach nourishment: Experience from the mediterranean coast of Israel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/JMSE8040273>

D'Alessandro, F., Tomasicchio, G. R., Francone, A., Leone, E., Frega, F., Chiaia, G., Saponieri, A., & Damiani, L. (2020). Coastal sand dune restoration with an eco-friendly technique. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 23(4), 417–426. <https://doi.org/10.1080/14634988.2020.1811531>

D'Alpaos, C. and D'Alpaos, A. (2021). The valuation of ecosystem services in the venice lagoon: a multicriteria approach. *Sustainability*, 13(17), 9485. <https://doi.org/10.3390/su13179485>

ECONcrete, Poerto de Vigo, Technical University of Denmark, & Cardama. (2024). Living Ports Nature Inclusive Port Infrastructure Case Study.

Ells, K., & Brad Murray, A. (2012). Long-term, non-local coastline responses to local shoreline stabilization. *Geophysical Research Letters*, 39(18). <https://doi.org/10.1029/2012GL052627>

Escudero, M., Mendoza, E., & Silva, R. (2020). Micro sand engine beach stabilization strategy at Puerto Morelos, Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/JMSE8040247>

Escudero, M., Reguero, B. G., Mendoza, E., Secaira, F., & Silva, R. (2021). Coral Reef Geometry and Hydrodynamics in Beach Erosion Control in North Quintana Roo, Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.684732>

Glavovic, B. (2013). Coastal innovation imperative. *Sustainability*, 5(3), 934–954. <https://doi.org/10.3390/su5030934>

GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

- Huisman, B. J. A., Walstra, D. J. R., Radermacher, M., de Schipper, M. A., & Ruessink, B. G. (2019). Observations and modelling of shoreface nourishment behaviour. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/jmse7030059>
- Imran, A. (2017). Combination technology of geotextile tube and artificial beachrock for coastal protection. *International Journal of Geomate*, 13(39). <https://doi.org/10.21660/2017.39.7144>
- Jackson, A., Tomlinson, R., Corbett, B., & Strauss, D. (n.d.). Long Term Performance of a Submerged Coastal Control Structure: A case study of the Narrowneck multi-functional artificial reef.
- Jayathunga, S. (2024). Identification of beach erosion in colombo- north coast line: effectiveness of the engineered solutions. *CONTRE*, 1(1). <https://doi.org/10.31357/contre.v1i1.7403>
- Johnston, K. K., Dugan, J. E., Hubbard, D. M., Emery, K. A., & Grubbs, M. W. (2023). Using dune restoration on an urban beach as a coastal resilience approach. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1187488>
- Joyce, K., Fickas, K., & Kalamandeen, M. (2022). The unique value proposition for using drones to map coastal ecosystems. *Cambridge Prisms Coastal Futures*, 1. <https://doi.org/10.1017/cft.2022.7>
- Kelly, C., Ellis, G., & Flannery, W. (2019). Unravelling persistent problems to transformative marine governance. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00213>
- Kindeberg, T., Almström, B., Skoog, M., Olsson, P. A., & Hollander, J. (2023). Toward a multifunctional nature-based coastal defense: a review of the interaction between beach nourishment and ecological restoration. *Nordic Journal of Botany*, 2023(1). <https://doi.org/10.1111/njb.03751>
- Kuang, C., Ma, Y., Han, X., Pan, S., & Zhu, L. (2020). Experimental observation on beach evolution process with presence of artificial submerged sand bar and reef. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(12), 1–24. <https://doi.org/10.3390/jmse8121019>
- Kumar, P., & Leonardi, N. (2023). A novel framework for the evaluation of coastal protection schemes through integration of numerical modelling and artificial intelligence into the Sand Engine App. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35801-5>
- Kumar, P., & Leonardi, N. (2023). Exploring Mega-Nourishment Interventions Using Long Short-Term Memory (LSTM) Models and the Sand Engine Surface MATLAB Framework Exploring Mega-Nourishment Interventions Using Long Short-Term Memory (LSTM) 1 Models and the Sand Engine Surface MATLAB Framework 2 3. <https://doi.org/10.22541/au.169297181.19761587/v1>
- Layman, C. A., & Allgeier, J. E. (2020). An ecosystem ecology perspective on artificial reef production. In *Journal of Applied Ecology* (Vol. 57, Issue 11, pp. 2139–2148). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13748>
- Lee, S. C., Hashim, R., Motamedi, S., & Song, K. il. (2014). Utilization of geotextile tube for sandy and muddy coastal management: A review. In *Scientific World Journal* (Vol. 2014). The Scientific World Journal. <https://doi.org/10.1155/2014/494020>

GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

Leija, M. B. G. and Rio, E. A. d. (2012). Coastal erosion management at yucatan, mexico: engineering efforts and experiences. *Coastal Engineering Proceedings*, (33), 8.

<https://doi.org/10.9753/icce.v33.posters.8>

Loksha, Sundar, V., & Sannasiraj, S. A. (2013). *Artificial Reefs: A Review* (Vol. 4, Issue 2).

Ma, Y., Kuang, C., Han, X., Niu, H., Zheng, Y., & Shen, C. (2020). Experimental study on the influence of an artificial reef on cross-shore morphodynamic processes of a wave-dominated beach. *Water (Switzerland)*, 12(10), 1–28. <https://doi.org/10.3390/w12102947>

Morris, R., Peyre, M., Webb, B., Marshall, D., Bilkovic, D., Cebrián, J., ... & Swearer, S. (2021). Large-scale variation in wave attenuation of oyster reef living shorelines and the influence of inundation duration. *Ecological Applications*, 31(6). <https://doi.org/10.1002/eap.2382>

Morris, R. L., Konlechner, T. M., Ghisalberti, M., & Swearer, S. E. (2018). From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. In *Global Change Biology* (Vol. 24, Issue 5, pp. 1827–1842). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcb.14063>

Nicholas Institute for Energy, E. & S., & United States Department of the Interior. (2023). Nature-Based Solutions Roadmap. In *Coastal Habitats*. Department of the Interior.

Nugroho, D., Yovita Indriasari, V., Sufyan, A., Mahabrur, D., & Rudhy, A. (2021). The application of semi-submersible geotextile tubes for coastal protection in Pamekasan, Madura. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 860(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/860/1/012100>

Olanrewaju, O. (2023). Hydrodynamic model tests for seaweed as a source of energy reduction during extreme events. *Aquaculture Journal*, 3(3), 181-195. <https://doi.org/10.3390/aquacj3030015>

Palinkas, C., Orton, P., Hummel, M., Nardin, W., Sutton-Grier, A., Harris, L., ... & Williams, T. (2022). Innovations in coastline management with natural and nature-based features (nnbf): lessons learned from three case studies. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.814180>

Sarid, N., & Lazar, M. (2019). Anthropogenic Impacts on the Edge of Sand Nourishing Littoral Cell-a case study from the eastern Mediterranean. *Published as a Thesis, University of Haifa*.

Schoonees, T., Mancheño, A., Scheres, B., Bouma, T., Silva, R., Schlurmann, T., ... & Schüttrumpf, H. (2019). Hard structures for coastal protection, towards greener designs. *Estuaries and Coasts*, 42(7), 1709-1729. <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00551-z>

Shabtay, A., Portman, M. E., Ofir, E., Carmel, Y., & Gal, G. (2018). Using ecological modelling in marine spatial planning to enhance ecosystem-based management. *Marine Policy*, 95, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.06.018>

Silva, G. V. d., Hamilton, D. S., Murray, T., Strauss, D., Shaeri, S., Faivre, G., ... & Tomlinson, R. B. (2020). Impacts of a multi-purpose artificial reef on hydrodynamics, waves and long-term beach morphology. *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 706. <https://doi.org/10.2112/si95-137.1>

U.S. Fish and Wildlife Services, & State of Florida Department of Environmental Protection. (2017). *Building Back the Sand Dunes Brochure*.

GeoMare

Maritime Ecological Engineering Consultants
4 Sharl Lutz, Haifa, 3501203 · Mobile: +972-50-8455457

Staudt, F., Gijsman, R., Ganal, C., Mielck, F., Wolbring, J., Hass, H. C., Goseberg, N., Schüttrumpf, H., Schlurmann, T., & Schimmels, S. (2021). The sustainability of beach nourishments: a review of nourishment and environmental monitoring practice. In *Journal of Coastal Conservation* (Vol. 25, Issue 2). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11852-021-00801-y>

Tschirky, P., Brashear, P., Sella, I., & Manson, T. (2018). Living breakwaters: designing for resiliency. *Coastal Engineering Proceedings*, (36), 50. <https://doi.org/10.9753/icce.v36.risk.50>

Valsamidis, A., & Reeve, D. (n.d.). *Ensemble Prediction of Mega-Nourishment Morphodynamic Evolution*

van Bergen, J., Mulder, J., Nijhuis, S., Poppema, D., Wijnberg, K., & Kuschnerus, M. (2021). Urban dunes towards BwN design principles for dune formation along urbanized shores. *Research in Urbanism Series*, 7, 101–127. <https://doi.org/10.47982/rius.7.130>

Vodden, K. (2014). Governing sustainable coastal development: the promise and challenge of collaborative governance in canadian coastal watersheds. *Canadian Geographer / Le Géographe Canadien*, 59(2), 167-180. <https://doi.org/10.1111/cag.12135>

Yokota, T., Uda, T., & Noshi, Y. (n.d.). *Numerical Simulation on Sand Accumulation behind Artificial Reefs and Enhancement of Windblown Sand to Hinterland*. www.intechopen.com

Yuanita, N., Kurniawan, A., Hakim, M. L. al, Irawan, K. R., & Saputra, N. W. (2020). Physical Model of Natural Coastal Protection System: Geobag-Dyke Performance to Effectiveness of Natural Coastal Protection System. *Journal of Sustainability Science and Management*, 15(6), 85–99. <https://doi.org/10.46754/jssm.2020.08.008>

החברה להגנת הטבע, החברה להגנת מצוק החוף & המשרד להגנת הסביבה. (2017). ארגז כלים אקולוגיים שיקולים להטמעת ויבשתיים ימיים מיגונים וביצוע בתכנון החופי המצוק על להגנה. www.teva.org.il/business

רשות הטבע והגנים (2015). סקר ביולוגי Marine Bioblitz בשמורות טבע ימיות בים התיכון הישראלי