חקירה והמלצות לפתרונות בעניין בעיות סחיפה בחופים של העיר הרצליה, ישראל

בדיקה באתר בין התאריכים 30 באפריל עד 6 במאי, 2007

עבור:

העיר הרצליה
משרד ראש העיר
הרצליה, ישראל

ע"י:
Lee E. Harris, PhD, P.E.
Consulting Coastal & Oceanographic Engineer
Assoc. Prof. of Ocean Engineering
Dep. Of Marine & Env. Systems
Florida Inst. Of Technology
Melbourne, Florida 32901 USA

תרגום:
ד"ר רם בן-דוד
ר˙ בד יעוץ גיאולגי

פברואר 2008

תוכן העניינים:

רשימת הטבלאות
רשימת האיורים
תקציר מנהלים

1. מבוא
2. מיקום האתר והתנאים בו
3. נתוני גאויות וגלים
4. בעיות סחיפה בְּחופים
5. פתרונות לסחיפה בְּחופים
   א. שינויים במבנים קיימים
   ב. מנגנונים למעברי חול חזרה למקום סחיפתם
   ג. מעברים לחול
   ד. הזנת חול לחופים
   ה. תוספת מרכיבי שוברי גלים בולטים
   ו. שוברי גלים משוקעים
6. Reef Ball (סימן רשום) מלאכותיים משוקעים
   א. Reef Ball (סימן רשום) – יחידות שונית
   ב. יישום יחידות כדורי שונית – Reef Ball – בהרצליה
   ג. יחידות כדורי שונית בחופי הרצליה
7. המלצות לעיר הרצליה
8. מקורות

נספח 1 – דוח ראשוני
נספח 2 – מאמר מאת- Stuabar and Tabar, JCR 2003

רשימת טבלאות

טבלה 1: זמינות (מצאי) גדלי יחידות Reef Ball לבניית שוברי גלים

רשימת איורים

איור 1: אזור חקירת הפרויקט בחלקו המזרחי של הים התיכון
איור 2: קו החוף בקטע תל-אביב - הרצליה
איור 3: אתר הפרויקט באזורים שמצפון ומדרום למרינה
איור 4: מבט לדרום מאפולוניה – תמונה מ- 30 אפריל 2007
איור 5: מבט על סחיפה במצוקי צפונית למרינה – תמונה מ- 1 במאי 2007
איור 6: חקירת שטח הפרויקט בחלוקה לפי 9 אזורים
איור 7: תחזית גאויות במהלך הביקור
איור 8: מגוון מוקדי יציאת מים לאורך חופי הרצליה
איור 9: הצעה לשוברי גלים בקצה הצפוני של הרצליה
איור 10: הקצה הצפוני של חופי הרצליה (בחלק העליון – אפולוניה)
איור 11: יחידת Reef Ball מקובלת – (יח' L) ו"שכבות עוגה" (יח' R)
איור 12: Reef Ball מטיפוס גולית מבוסס על בטון – דוגמא ממלזיה, 2007
איור 13: תמונות מעל ומתחת לשובר גלים בנוי מ- Reef Balls
איור 14: מבנה והתקנה של שובר הגלים מ- Reef Ball בחוף Marriott
איור 15: Grand Cayman Marriott- נובמבר 2006 (L) ופברואר 2007 (R)

תקציר מנהלים

דוח זה מבקש להציג ממצאים וההמלצות של ד״ר לי הריס (Lee Harris), יועץ בהנדסת חופים. היועץ הוזמן ע״י עיריית הרצליה ע״מ לחקור סחיפה בחופים, לבחון ולייעץ לגבי חלופות אפשריות עבור חופי צפון הרצליה. העבודה כללה ביקורים באתר ובדיקה מעל ומתחת לפני המים, פגישות ומצגות כמו גם ניתוח כל המאמרים, הדוחות והמחקרים שבוצעו באזור. העבודות המתייחסות לסחיפה בחופים שנבדקו במסגרת זו, כללו מסמכים המצביעים על החמרה במצב החופים בשל בניית המרינה, ושלושת שוברי הגלים מצפון למרינה ובסמיכות לה.

שלושה פתרונות אפשריים לבעיית הסחיפה בחוף הוצעו בעבור החוף הצפוני של הרצליה בחלק המסכם את המלצות של דוח זה:

1. שוברי גלים - בניית שני שוברי גלים בחלקו הצפוני של חוף הרצליה, דומים לשלושת אלו הקיים בסמוך למרינת הרצליה. הצעה זו **<u>אינה מומלצת</u>** שכן הם אמנם יגרמו לייצוב החופים בצדדם המוגן בשל שבירת הגלים ורצועת החול שתיוצר בשל כך (tombolos) אך הם יגרמו לסחיפה מוגברת בחופים הסמוכים, כפי שקרה בעתיים של שוברי הגלים הקיימים. אפילו אם אזור שוברי הגלים ימולא בחול, קודם להתקנתם, החיץ שייבנה יגרום למניעת מעבר הסדימנטים הנעים לאורך החופים (longshore sediment) שיגרור אחריו הפחתה בכמות החול וע״כ יוביל לתוצאה הפוכה על החופים הסמוכים, במיוחד בחלק שבהמשך הזרימה, בחופים הסמוכים לאפולוניה. כך קרה במיאמי ביץ׳ שבה למרות שבוצע מילוי חול בעורף שוברי הגלים (תוך קיומה של תוכנית להזנה חוזרת מדי תקופה), נוצרה סחיפה משמעותית בחופים בהמשך ציר תנועת החולות.

2. שוברי גלים שקועים – פתרון זה כולל בניית 2 שוברי גלים שוניתיים, שקועים ובעלי רוחב ניכר בחלקם הצפוני של חופי הרצליה. פתרון זה **<u>מומלץ</u>** בשל העובדה שהוא מאפשר לחלק מאנרגית הגלים לעבור מעליהם ותמנע בניית tombolos. השימוש ביחידות ״שונית״ מלאכותית, חלולות ומחוררות, הן המומלצות בשל יכולת המים לעבור דרכם ובכך מונעות תופעת חבטת הגלים היכולה לגרום לסחיפה בקצהו של שובר הגלים. בשל החירור בהם והיתרונות שנמצאו באתרים אחרים, השימוש ב- Reef Balls כשונית מלאכותית הנה הדבר המומלץ. בהתבסס על תצפיות באתר, עומק המים, טווח הגאות והשפל, ותכונות הגלים השימוש ב- Reef Balls - הוא הפתרון המועדף. הצלחה לשיטה זו נמצאה במקומות אחרים והוכחה במודל פיסיקלי של הגלים, שנבדק במיכלים של צבא ארה״ב, במעבדה השייכת לזרוע להנדסת הידראוליקה של חופים. הנתונים מצביעים על כך ששונית מלאכותית שרוחבה 8-10 מ׳, הבנויה מ- Reef Balls וגובהה אינו עולה על 0.5 מ׳ מתחת למעמד הנמוך של הגאות באתר כלשהו, מצליחה לבלום גלים תוך ייצוב החופים. בה בעת, יצירת tombolos נמנעת ו/או סחיפה בחופים הסמוכים. בשל המבנה השקוע והחירור בו, מתאפשר לחול לנוע לאורך החופים וכלפי היבשה באופן שנמנע חסר בחול בהמשך החופים. קיומם של סלעים חופיים בסמוך לחוף מצביעים על מנגנון טבעי זמין לצבירת חול הדומה לעקרון זה.

3. שוברי גלים שקועים בעלי מרווח עליון צרים – **חלופה זו אינה מומלצת**, שכן מרווחים צרים של המבנים לא יספקו החלשה מספקת לעוצמת הגלים – כמפורט בדיון. תוכננו שני מבנים דומים שנעשה בהם שימוש בארה״ב, ובכלל זה יחידה המכונה – Beach Saver (של – Breakwaters International) ויחידה המכונה- PEP Reef (Prefabricated Erosion Prevention Reef). מעקב אחר שני סוגי מבנים אלו בוצע ע״י ד״ר הריס ומאמר ביקורת שנכתב ע״י Stauble and Tabar מופיע בנספח של דוח זה. בעיה משמעותית לשיטת Beach Saver ולשיטת PEP Reef הנה שקיעה בתשתית בשל משקל רב של יחידות המבנה, המוקשח ע״י בטון. מודלים פיסיקליים ונומריים כמו גם חקירות שדה הצביעו אף הם על שקיעה סוג מבנים אלו (שקיעה אל תוך החול) של קצה הגופים בבסיסם בשל מוצקותו של חתך המבנה.

המלצות דוח זה כוללות שימוש בשובר גלים שקוע הבנוי משונית מלאכותית לייצוב החופים של צפון הרצליה. מומלץ לבנות שני שוברי גלים כאלו, שימוקמו מדרום לסלעי החוף הקיימים של אפולוניה. הזנת חול בחוף עצמו, חייבת להיעשות כחלק מתהליך תכנון ובניית שוברי הגלים, זאת ע"מ למלא מראש את האזורים שאמורים להבנות ממילא. ניתן גם לבצע תוספת הזנה של חול של חופי הרצליה בין שוברי הגלים הקיימים לבין אלו שייבנו. המבנים הרחבים והמחוררים, שירכיבו את שוברי הגלים השקועים, לא אמורים להגביר את סחיפה באזור אפולוניה, שכן לחול תתאפשר תנועה לאורך החוף וכלפי היבשה, דרך החורים של שובר הגלים. ליחידות השונית המלאכותיות קיים גם יתרון נוסף בכך שהם מאפשרים הגברת יכולת התפתחות תנאי חיים ימיים בסביבתם.

נערך גם דיון על הגנת האתר הארכיאולוגי של אפולוניה. בשל השיפועים החדים מאוד של חומרי סלעיים, סלעי השונית והגושים הארכיאולוגיים בבסיס האתר, לא סחיפה בבסיס המצוק בשל פעולת הגלים היא הקריטית ביותר, אלא הסחיפה במדרונות עצמם שהם בזוית גזירה גדולה דבר המאפשר סחיפה קלה באמצעות גשם ורוח.

תכנון העבודות הנדרשות, אותם יש להמשיך ברציפות תוך בניית שובר בגלים השקוע באמצעות שוניות מלאכותיות (או כל אחת מהחלופות המצוינות לעיל), יחייב חקירה מפורטת של האזור בו ייבנה שובר הגלים. המידע יאפשר לקבוע את מספר וגודל יחידות השוניות המלאכותיות הנדרש לשוברי הגלים. הסקר חייב לכלול מיפוי סלעי החוף הקיימים באזור, וכן קביעת עומק החול שמעל לתשתית הסלעית, ע"מ שניתן יהיה לתכנן את אופן ביסוס המתקן. נתוני גלים ומיפוי בתימטרי ישמשו לתכנון מפורט ויכולים לשמש למודל הפיסיקלי והנומרי שניך לעשות שימוש לעידון התכנון ולאופטימיזציה של הביצועים הנדרשים ממנו.

יש למקם קרוב ככל האפשר לאזור שוברי הגלים אתר לביצוע יציקות ה- Reef Balls. הסעת היחידות למקום שוברי הגלים, ניתן לבצע דרך המרינה של הרצליה באמצעות מנופים המונחים ע"ג דוברה. ייתכן שהובלתם בציפה ממקום ייצורם, לאורך החוף ועד לאתר שקיעתם עשויה להיות שיטה כלכלית יותר. עלויות מותנות בקונפיגורציה סופית של שובר הגלים ואופן הובלתן של היחידות לאתר השיקוע שלהן. ניתן להעריך שמתקן הכולל שתי שורות Reef Balls ברוחב של 10 מ' ולאורך של כ- 100 מ' יעלו כ- US$ 500,000. עם זאת, העלויות האמיתיות מותנות מאוד לאתר ונתונות לפקטורים רבים, כפי נדון בגוף הדוח.

1. מבוא

דוח זה מציג הממצאים וההמלצות של דר׳ לי הריס, שהוזמן ע״י עיריית הרצליה במטרה לחקור בעיות הנובעות מסחיפה בחופים וכן לבחון ההמלצות הקיימות ולהציע אלטרנטיבות. מטרת העבודה הייתה קודם לכל לפתח יעוץ ראשוני לעירייה שיכלול ביקור באתר בישראל. באופן ממוקד הדרישות היו כדלקמן:

- ☒ שימוש ב- Reef Balls (״כדורי שוניות״) בעולם כמרכיב מרכזי לשיקום חופים, ובכלל זה בעיות והצלחות.
- ☒ הצעה לתוכנית עבודה בזמן הביקור בישראל, ובכלל זה פגישות ומצגות לגורמי עיריית הרצליה והמשרד להגנת הסביבה.

הדוח הראשוני הושלם והוגש קודם לביקור בשטח האתר. הוא מתאר את השימוש בטכנולוגיית Reef Balls כשובר גלים משוקע, כולל דוגמאות וביצועים בפרויקטים קיימים. דוח זה אמור לשמש כנספח לדוח הנוכחי.

הדוח הסופי:

- ☒ דיון והמלצות ראשוניות לפתרונות בחופי הרצליה.
- ☒ דיון והמלצות לשימוש ב- Reef Balls כשובר גלים משוקע בחלק הצפוני של חופי הרצליה.
- ☒ הצעות לתוכנית עבודה ליישום ההמלצות.

הדוח המוגש בזאת, מטפל בכל הסוגיות הנ״ל. הוא מציג תוצאות של חקירת שדה, דיונים ומידע שנאסף קודם ובמהלך הביקור בחופי הרצליה שנערך בין התאריכים 30.4.07 ל- 5.5.07. עבודת השדה כללה שייט מהמרינה ועד לאזור אפולוניה, נסיעה לאורך החוף, וכן צלילה במי חופי הרצליה עם ד״ר יהודה בניהו. ממצאים שנאספו לצורך עבודה זו נכללו בדוח הראשוני, מידע מהמפגישות השונות, ראיונות עם גופים ופרטים מקומיים (ממשל, חוקרים, אנשי סביבה וכו׳), מאמרים מפות ושרטוטים. באופן מיוחד, נעשה מאמץ לבחון ההיתכנות שבשימוש שוברי גלים שקועים בים בקצה חופי הרצליה, כפי שהומלץ בעבר.

מאמרים, דוחות ומחקרים רבים מתעדים את בעיות הסחיפה בחופי הרצליה שנבעו מבניית מרינת הרצליה (שהושלמה ב- 1992) ושלושת שוברי הגלים מצפון למרינה וסמוכים לה. בשנים שחלפו מאז הבניות הימיות הללו, החופים שמצפון להם עברו תהליכי סחיפה. עיריית הרצליה בחנה פתרונות שונים לבעיית הסחיפה בחופים, ומטרת דוח זה היא לחקור את בעיית הסחיפה בחופים והציע פתרונות אפשריים.

2. מיקום האתר ותיאור המצב

הרצליה נמצאת בחופי ישראל שבמזרח הים התיכון, כמוצג באיור 1. עקב החשיפה הרבה כלפי מערב, האזור נתון לגלים גדולים מצפ׳-מערב, ממערב ודר׳-מערב. הזרמים השולטים, יחד עם הסעת חולות, הנם אלו שלאורך החופים מדרום לצפון, המביאים את הסדימנט אף מהדלתא של הנילוס. מספר ניכר של מבנים ימיים נבנו לאורך חופי ישראל, ובכלל זה נמלים, מרינות, ושוברי גלים, חלקם עיליים וחלקם שקועים. רבים מהם נבנו מדרום להרצליה, בחופי תל-אביב – כמוצג באיור 2. איור 3 הנו תצ״א של קווי החוף של העיר הרצליה, בו המבנה הבולט הנו המרינה ושוברי הגלים שמצפון לה (נראה היטב גם באיור 2). שלושת שוברי הגלים נבנו ע״מ למנוע סחיפה בתחום הסמוך לתחום ההשפעה של המרינה ולגרום לאבדן חול (באזור זה לא בוצע מילוי מלאכותי של חול). החופים הרחבים ביותר נמצאים בתחום השוליים הצפוניים של המרינה בשל שוברי הגלים וכן בקרבה מיידית לחלק הדרומי של המרינה.

החוף שמצפון לשוברי הגלים הוא צר מאוד בשל חסימה בתנועה החולות עקב המחסום שהמרינה מהווה. עם זאת, קיימים שתי בליטות ברציפות הקווית של חופי הרצליה, המצוינים באיור 3, והתצלום שבאיור 4. בליטות אלו נוצרו בשל שוניות ימיות טבעיות, הנראים בתצלום, המתנהגים כשוברי גלים שקועים.

איור 1 : אזור חקירת הפרויקט בקצה המזרחי של הים התיכון

איור 2 : קו החוף מתל-אביב להרצליה. תנועת החול העיקרית הנה מדרום לצפון (בתמונה - משמאל לימין)

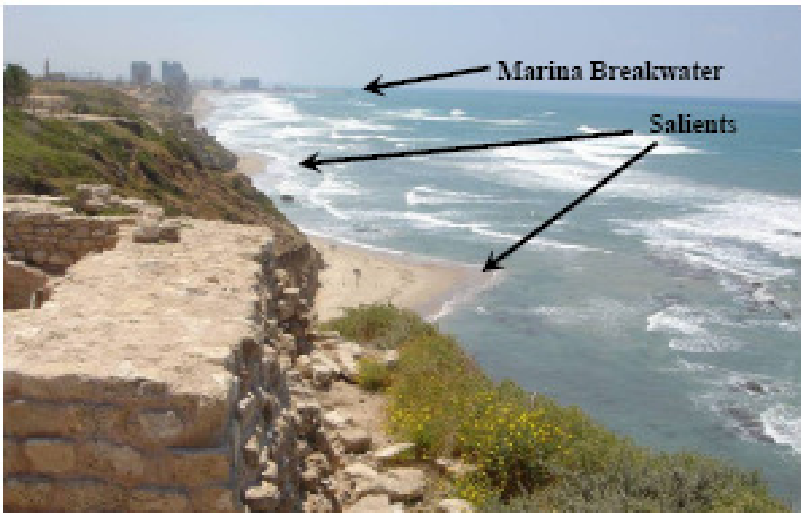
איור 3 : אזור העבודה המצביע על האזורים השונים מדרום וצפון למרינה

צילום 1.4(1) – תאי חוף הרצליה – צילום מקורי מ- 1999

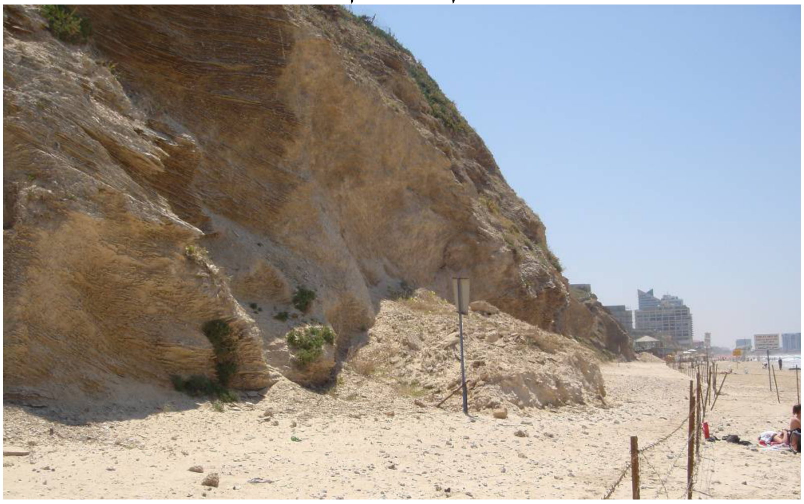
פ.מ.פרפיניאן – מהנדס יועץ
פרוייקט: שיקום חוף הרצליה

עבודות קודמות, מאמרים ודוחות, תיעדו את אפקט המרינה ושוברי הגלים והשפעתם מצפון שמצפון לה (במורד הזרימה –הולכת החול). סחיפה בחופים אלו גרמה להגברת הסחיפה גם במצוקים, דבר הניכר במקומות רבים לאורך חופי הרצליה, כשדוגמא אחת ניתן לראות בצילום שבאיור 5.

איור 4: מבט כלפי דרום ממבצר אפולוניה – צילום מ- 30.4.07. יש לשים לב להתרחבויות החוף מצפון למרינת הרצליה המצוינות כשתי בליטות.

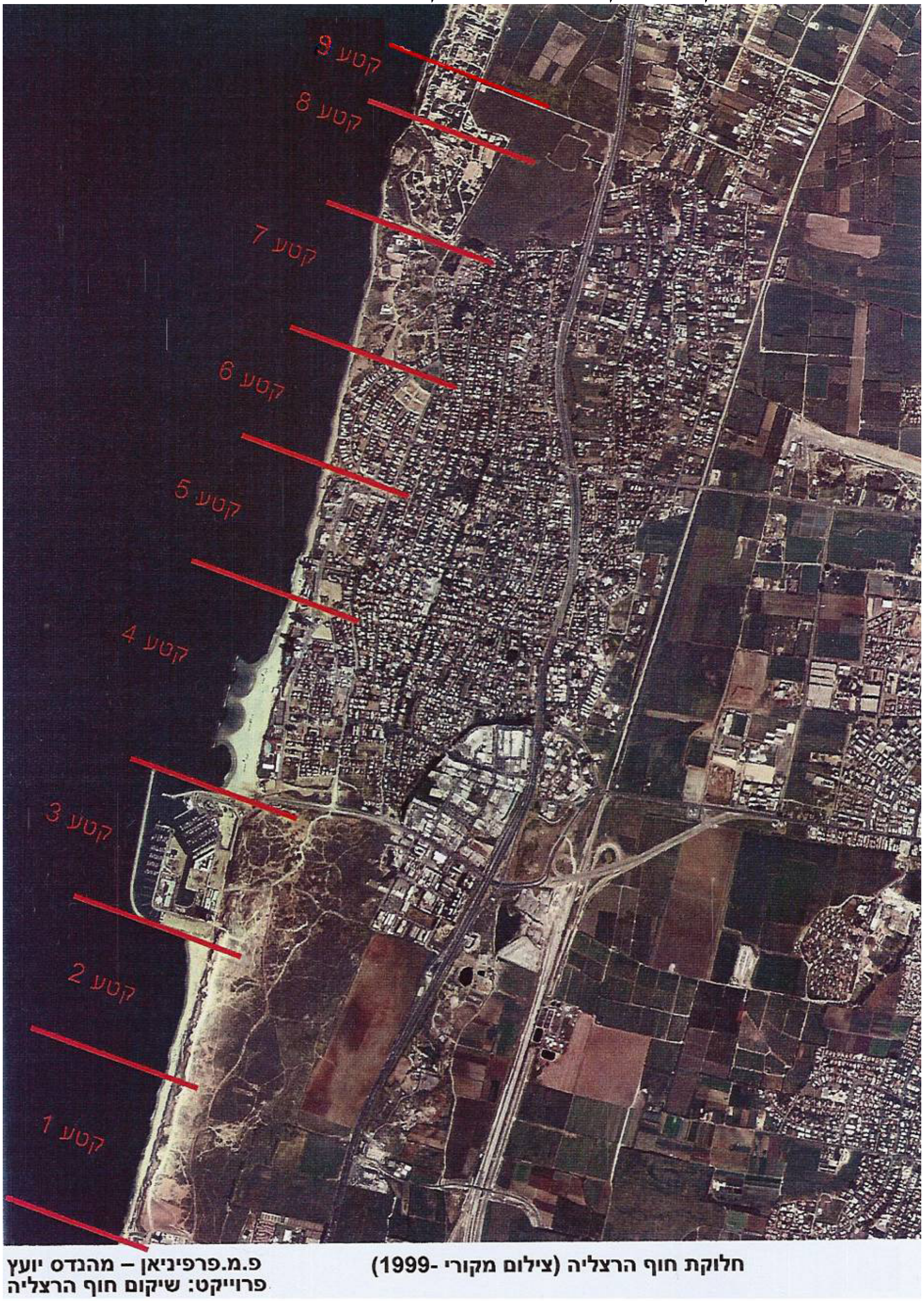


איור 5: מבט על סחיפה במצוקים מצפון למרינה – 1.5.07.



דוחות שנכתבו לאחרונה, חילקו את חופי הרצליה לתשעה מקטעים שונים, כמוצג באיור 6. מקטע (אזור) 3 כולל את המרינה ומקטע 4 – מכיל את שלושת שוברי הגלים. דוחות אלו משווים שינויים שחלו בבטימטריה (טופוגרפיה שמתחת למפלס פני הים) מתוך סקרים בטימטריים קיימים וכן תיעוד ודיון בשינויים שחלו בעובי החול בכל מקטע. ההערכה היא ששוברי הגלים לכדו כ- 300,000 ממ"ק של חול מתוך הזרמים החופיים.

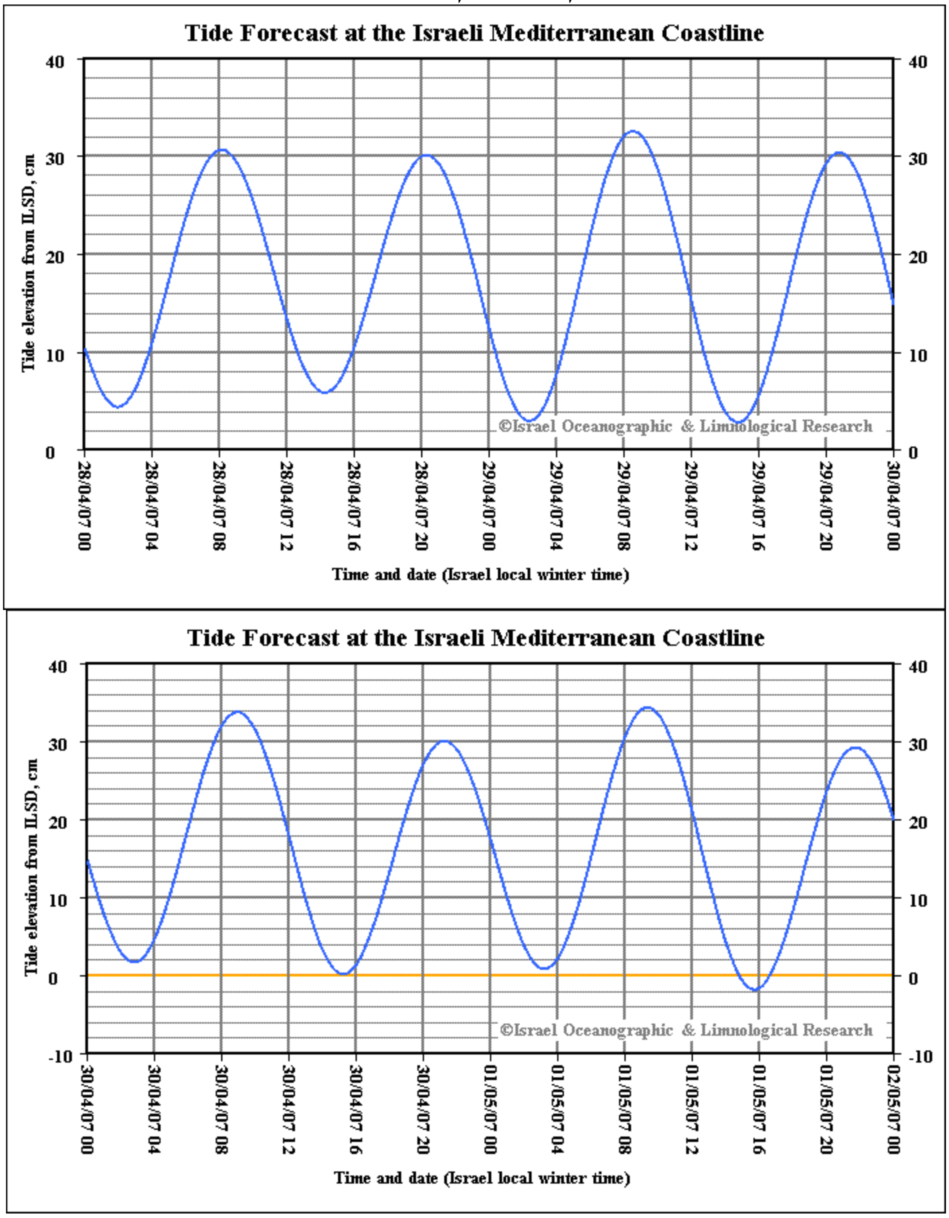
איור 6 : אזור הפרויקט מחולק ל- 9 אזורים (מקטעים)

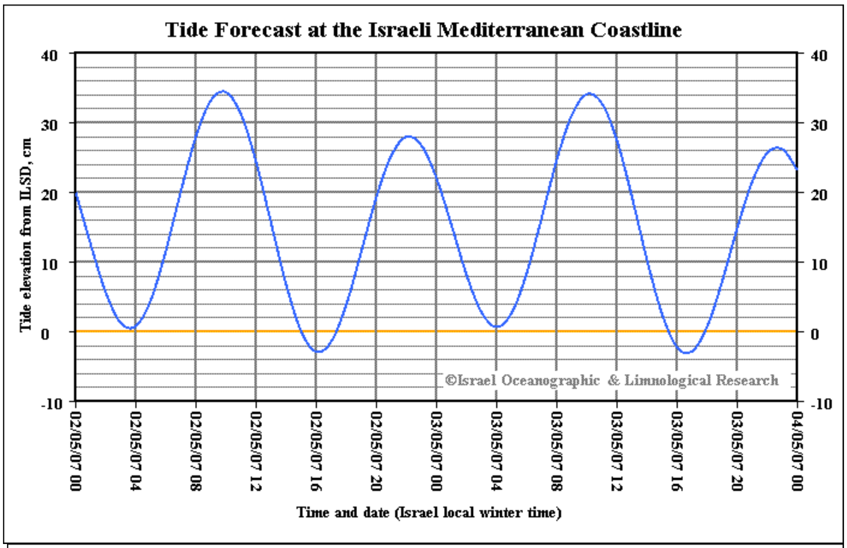


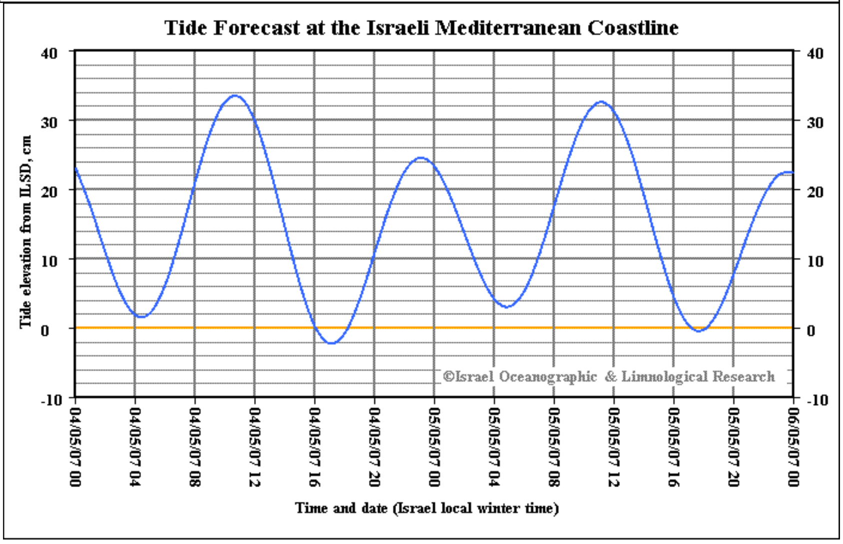
3. נתונים גלים וגאויות

הגאויות בחופי הרצליה הנם קטנים למדי, כך שבשל כוחות אסטרונומיים הגאות הנה בתחום של 20-40 ס"מ בלבד. מפלסי מים גבוהים (התפרצויות של סערות) נוצרים בשל רוחות חופיות חזקות הבונים גלים גבוהים. נתוני הגאויות שהתרחשו במהלך הביקור מוצגים באיור 7, והם מצביעים על ערכים נמוכים. במהלך הביקור נצפו רוחות על החוף ובניית גלים שגורמות לגלים גבוהים יותר.

איור 7 : גלים גאות מוערכות בתקופת הביקור באתר .







מדידים למדידת גלים נמצאים בים שבאזור חיפה, חדרה ואשדוד, ומהם דווח על כך שגלים הגיעו ל– 9 מ' במהלך הסערות הגדולות (גלים של 5 מ' הנם שכיחים ביותר). הגלים בקרבת החוף הנם מוגבלי קרקעית (דהיינו עליית הקרקעית מקטינה את גובה הגל), דבר המנחה את התכנון (ההערכה) של גובה הגלים האפשרי. בזמן סערות החופים הצרים והרדודים שמצפון למרינה ושוברי הגלים נמצאים מתחת למי הים והגלים חובטים בבסיס המצוקים הנתונים לסחיפה.

4. בעיית הסחיפה בחופים

כפי שנכתב קודם לכן, קיימים מאמרים, דוחות ומסמכים רבים הדנים בשינויים בסחיפה בחופי הרצליה בשל בנית המרינה ושוברי הגלים הסמוכים לה. האורך הכולל המקביל לחוף, של המרינה ושוברי הגלים מגיע לכ- 800 מ'. והציר הניצב לחוף של המרינה מגיע לכ – 500 מ' ושל שוברי הגלים – לכ – 200 מ', כשהמבנים מתקצרים מדרום לצפון. להלן מספר גורמים עיקריים המשפיעים על מידת הסחיפה בחופי הרצליה:

א. תנועת החולות מדרום לצפון (הכיוון המועדף של החולות לאורך החוף) נעצר בשל מחסום המרינה הלוכדת חולות בקצה הדרומי שלה ומונעת הצטברותם בחוף מצפון למבנים החופיים הנ"ל.

ב. החול עשוי להילכד בתוך המרינה והכניסה אליה, ואם החול נאסף ומושלך בים המרוחק מהחוף הוא נגרע ממאזן החולות החופיים (הליטוראליים).

ג. ההערכה היא ששוברי הגלים לכדו כ- 300,000 ממ"ק חול ממערך תנועת החולות החופיים. ע"מ למנוע זאת, היה צורך למלא מראש את אזורי המילוי שבשולי מבנים אלו והמרינה.

ד. קיימים גורמים חיצוניים לסילוק חול מאזור החוף כמוצג באיור 8. הגדול מכולם נמצא ממש מצפון למרינה, בקצה מערך ניקוז (צילום עליון באיור 8). לכל מסלקי- חולות אלו קיימת

האפשרות לשטיפת חול מהחוף אל הים, בעיקר בזמן סערות גשם חזקות. קיים גם מבנה המשמש למיזוג אויר הכולל מערך קירור באמצעות מים הנשטפים כלפי החוף ויוצרים בו סחיפה (איור 8 - תמונה תחתונה). קיימים גם מתקנים קטנים המזרימים מים מהחוף לים ומהם מסולקים חולות כלפי הים.
הסיבות העיקריות המשפיעות על הסחיפה בחופי הרצליה הם המרינה ושוברי הגלים הסמוכים לה, החוסמים את זרימת החולות לאורך החוף, מקטינים את עובי החתך החולי בקרקעית הים ולוכדים חולות בתחומי גבולותיהם.

איור 8 : מספר מתקנים לאורך חופי הרצליה, היוצרים סילוק חול בשטיפה כלפי הים.

זהירות!

5. פתרונות לסחיפה בחופים

הוצעו מספר חלופות במטרה להפחית את עוצמת בעיית הסחיפה בחופי הרצליה. במצב הנוכחי מומלץ להוציא חול משולי שוברי הגלים מדי שנה, בתחילת הקיץ, ולהניחם בחופים הצפוניים של הרצליה. הצעה זו, כמו גם הצעות נוספות, ניתנות לביצוע בלתי תלוי או בתלות בפעולות נוספות, כמוצע בהמשך:

5.1 שינויים במבנים הקיימים

השינויים היחידים העשויים לסייע במניעת הצטברות חול לכוד המיועד לחופי הרצליה הם שינויים במבנה שוברי הגלים המנותקים. במהלך 15 השנה האחרונות כמויות לא מבוטלות של חול הצטברו בתחומי שוברי גלים אלו (ההערכה היא 300,000 ממ״ק). שינוי זה יכול לכלול קיצור אורכם, הפחתת גובהם, הסטתם לקרבה גדולה יותר לחוף או סילוק כליל של אחד או יותר משוברי הגלים.

למרות זאת,אילולא קיומם של שלושת שוברי הגלים המנותקים, צפויה הייתה להתרחש סחיפה משמעותית באזור זה, בשל בניית המרינה, וזאת למרות הגברת הסחיפה ביתר החופים הצפוניים של הרצליה (היכולים היו לקטון אם היה מתבצע מילוי מוקדם של 300,000 ממ״ק חול בשולי שוברי הגלים ובזמן בנייתם).

נראה ששוברי הגלים הקיימים נמצאים כיום בשיווי משקל יחסי ועל כן במקום לשנות את המבנה שלהם, דבר העלול להיות כרוך בקשיים ובעלויות גבוהות, הרי סילוק מתמשך של חול והעשרת החופים שמצפון להם, היא דרך פעולה אפשרית – כפי שנדון בסעיף הבא.

5.2 החזרת חול

חלופה זו מתייחסת ללקיחת החול שנלכד והצטבר, ולהחזרתו למקום ממנו הוא נסחף. שיטה זו כבר בוצעה מידי אביב בחופי הרצליה בנפחים של כ- 10-15,000 ממ״ק שהועתקו מאזור ההצטברות של שוברי הגלים לאזורים שבחופים הצפוניים. בשל הכמות העצומה של החול שנלכד, שלושת שוברי הגלים יצרו מבני tombolos (הצטברות חול בים קו החוף המקורי לבין שובר הגלים). על כן, כמות החול הניתנת להסרה מאזורים אלו ניתנת להגברה רבה מבלי שהדבר יפגע בפעילות הנופש לציבור בחוף. עם זאת, כמויות החול הלכודות בין שוברי הגלים נמצאות ככל הנראה בשיווי משקל, ועל כן כל כמות חול שתצא ממערכת זו תתקבל חזרה עם תנועת הגלים. על כן ניתן להתייחס לשיטה זו כשיטה ברת קיימא. סילוק חול זה עשוי לסייע גם במניעת חול בכניסה למרינה, חול שאמור היה להיות מפוזר באופן טבעי לאורך חופיה הצפוניים של הרצליה.

5.3 מעברי חול

חלופה זו מציעה מעברי חול בהיקף המרינה ושוברי הגלים באופן שישחזר את זרימת החול הטבעית לחופים הצפוניים של הרצליה. כמו שנידון קודם לכן, חול נלכד מדרום למרינה, בים שליד המרינה, במרינה עצמה, בכניסה למרינה ובשוליים ובין שוברי הגלים. ע״מ לשחזר את תנועת החולות זרימת חול, קבועה או מחזורית, צריכה להיות מופעלת מדרום למרינה, והסעתם לחופים הצפוניים של העיר.

שיטה זו מתבצעת בדרך כלל בד בבד עם בניית שוברי גלים, בדומה למה שבוצע עם הקמת המרינה. אם מערכת מסוג זה, ביחד עם הוספת חול מקדימה בסמוך לשוברי הגלים המנותקים, הייתה מבוצעת, חלק גדול מבעיות הסחיפה בחופים להם אנו עדים כיום, היו ממותנות בהרבה. עם זאת, כיום, שיטה זו של מעברי חול אינה מומלצת בשל בעיות סחיפה שנצפו גם בחופים שמדרום למרינה.

על מנת לבצע מעברי חול על פי שיטה זו, סיכור (מלשון סכר) היה צריך להיות מוקם ממש מדרום למרינה, באמצעות גרירת חול ועירום חול (dredging) מחול שהצטבר במצפון למרינה. הובלת חול מדרום לצפון כמתואר כאן, ניתן לבצע באמצעות זרנוקים וצינורות הידראוליים, או באמצעות משאיות. חלופה זו מציעה למעשה ללכוד החול שהצטבר מדרום למרינה ובים שבסמוך למזח המרינה, לפני שהם מגיעים לאזורים אלו, ולמלא את תנועת זרמי החוף האורכיים, שבעבר כללו חול מרחף או נגרר. לפי הצורך, ניתן גם להעביר חול כלפי החופים הדרומיים.

הצלחה בפעולות בשיטה המוצעת בחלופה זו דורשת פעולה עקבית וברת-קיימא להזזת כמויות גדולות של חול הנעות בכיוון אחד. אף שבדרך כלל כיוון הזרמים הוא מדרום לצפון, הרי לעיתים נוצרים תנאים המביאים לרוחות וגלים צפוניים, הגורמים לתנועה הפוכה. תיעוד מדויק של תנאים אלו ועוצמתם, יאפשר ניצולם להסעת חול דרומה.

5.4 המילוי חול בחופים

קיימים עירומי חול של כ- 300,000 ממ״ק שנוצרו בשל חפירת המרינה, והוצאתם אל החוף והם ניתנים להנחה בחופי הרצליה. הקושי בשיטה זו שהקיים של החול לתקופה ארוכה אינו ודאי. העשרה של החופים בחול הנו תוספת לחוף הקיים, אך אינו עוצר או מקטין את תנאי הסחיפה הפועלים לאורכו. באופן טיפוסי, נהוג להשתמש בשיטה זו כחלק מהחזרת חול הנסחף מהחופים עצמם. כמו כן, מקובלת תוספת מחזורית של חול לאורך 3-10 שנים, עם תוספות מיוחדת הנובעות מגריעת חול עקב סערות. לשם כך צריך להיות ידוע מראש למקור לחול, אם בוחרים בשיטה זו.

חול מאזור שוברי הגלים המנותקים עשוי להיות מקור משמעותי, אך יש להביא בחשבון שחסר באזור זה יגרום למילוי מחדש של חול במקום בשל ההפרה בשיווי משקל.

5.5 תוספת שוברי גלים מפוצלים

תוספת של מערכת חלקית של שוברי גלים (חשופים חלקית מעל פני הים) יכולים להבנות מצפון לקיימים, ועד לאזור אפולוניה. זוהי מערכת יקרה העשויה לסייע בייצוב כל תנועת החולות שתתוסף לחופי הים.

חלופה נוספת כוללת תוספת של שובר גלים אחד או יותר בחלק הצפוני ביותר של חופי הרצליה, כמוצג באיור 9. בליטות או tombolos שייווצרו בשוליהם עשויים לסייע בייצוב החופים שמדרום להם. מומלץ לבצע מילוי מוקדם של חול, כך שהצטברות ראשונה בשוליים המוגנים של שוברי הגלים, תוך היווצרות הבליטות או ה׳טומבולוס׳ , ימנע סילוק חול מהסביבה החולית. למרות זאת, בהיווצרות של ׳טומבולוס׳ בשוברי הגלים שוב נגרמת עצירה של זרמי האורך, דבר שיגרע חול בחלקים שמצפון להרצליה, במורד הזרימה ותנועת החולות.

כל תוספת של מקטעי שוברי גלים משנה את המבנה הנופי (אסטטי) של החוף כמו גם התהליכים המתרחשים בו. במטרה למנוע פגיעה נופית אך בה בשעה לייצב את כמות החול ולמנוע הצטברות באותם שוברי גלים, חלופה זו אינה מומלצת, בעוד שהחלופה של שוברי גלים שקועים יידונו בפרקים הבאים.

איור 9 : הצעה לשוברי גלים בחלק הצפוני ביותר של חופי הרצליה

5.6 שוברי גלים שקועים

בשנים האחרונות קיימת התעניינות גוברת בשימוש בשוברי גלי שקועים לשם ייצוב קווי חוף. בהשוואה לשוברי גלים העוצרים כל תנועת גלים שמעליהם, שוברי גלים משוקעים מאפשרים חציית הגלים הקטנים, תוך החלשתם של הגלים הגדולים. כך מתאפשר המשך תנועת החולות לאורך החוף בחלק הפנימי של המבנים, תוך מניעת היוצרות ׳טומבולוס׳, ותוך היווצרות בליטות קטנות נוספות, קטנות בהרבה מאלה הצפויות כאשר מקימים שוברי גלים מעל פני הים.

בתצלום האוויר העליון (שמאלי בדוח שבאנגלית) שבאיור 10, מראה הצטברות טבעית של חול בחלקים הפנימיים של שוברי גלים שקועים טבעיים (סלעי חוף). בתצלום התחתון (ימני בדוח שבאנגלית) שבאיור 10, הוא אותו אזור אך עם תוספת קונצפטואלית של שוברי גלים משוקעים והצטברות החול הנובעת מכך בעורף שלהם. ניתן לתכנן את שוברי הגלים האלו כשונית מלאכותית שקועה, להגברת הפעילות הביולוגית הימית שמקורם מהשוניות הקיימות ממילא בסביבה, וכן ייצוב החוף הסמוך להם.

בנוסף לכך, סוג זה של שוברי גלים מונע היווצרות בריכות מים בינם לבין החוף והבליטות מהחוף יהיו מצומצמות בלבד. אכן החלופה הנה שימוש ב׳כדורי השונית׳ (Reef Balls™)- יחידות שונית מלאכותיות לבניית שונית שקועה, כפי שיידון בפרקים הבאים.

איור 10 : החלק הצפוני ביותר של חופי הרצליה (אפולוניה בקצה הצפוני).
הצילום העליון מראה את המצב הנוכחי שבו מתקיימים שוברי גלים שוניתיים שקועים היוצרים בליטות טבעיות בחוף. הצילום התחתון מראה העמדה קונצפטואלית של שני שוברי גלים שוניתיים מלאכותיים והבליטות בחוף שנוצרו בשל כך.

. שוברי גלים שוניתיים מלאכותיים שקועים מטיפוס Reef Balls™

6.1 יחידות של Reef Balls

אחת מסוגי היחידות שמשמשות לבניית שוברי גלים משוקעים היא ה- Reef Balls Unit המופיע באיור 11, וכן אחד מהסוגים המקבילים המכונה "שכבות עוגה" (Layer Cake). פרטים על שני סוגי המתקנים הללו מופיעים בדוח הראשוני שלנו, המופיע גם בנספח לדוח זה. כמה מההיבטים הרלוונטיים לחופי הרצליה מצוינים בפרק זה. במקור יחידות אלו, שבאיור 11, תוכננו להגברת הפעילות הביולוגית במים עמוקים יותר. ל- Reef Balls מספר יתרונות משמעותיים לעומת חומרים מסורתיים המשמשים לשוברי גלים:

א. ייצור קל וחסכוני של היחידות באתר באמצעות מערכת של תבניות יציקה.
ב. שינוע קל של היחידות המוכנות ממקום היצור, באמצעות מערכות בלוני ציפה (מונע שימוש בדוברה ובמנופים).
ג. יכולת קלה לעיגון היחידות לקרקעית (המתכסים בהמשך).
ד. ניתן לתכנן היחידות בהתאם לפעילות הביולוגית הבנטונית הקיימת באזור מסוים, כולל בתי גידול ימיים, שתילה של צמחיה ימית וריבוי של אלמוגים.

איור 11: א. צילום עליון - Reef Ball מסורתי (יחידה "L"); ב. צילום תחתון - Reef Ball מסוג Layer Cake - (יחידה "R")

בהתבסס על הממצאים שנמצאו בהרצליה, גודל ה- Reef Balls המתאים לתנאים בחופים אלו מופיע בטבלה 1. פיתוח חדש שהותאם לחופי מלזיה ב- 2007 שילב בסיס מבטון ב- Reef Balls מטיפוס – Goliath Balls (כדורי גלית), באופן שהתקיים גובה לא אחיד בין היחידות. השיטה נראית באיור 12, והיא תתכן בחופי הרצליה, בתלות בעומק הקרקעית שתבחר כמתאימה להנחתם. במלזיה השימוש בבסיס הבטון יצר גובה המורכב מ- 2 חלקים של שוברי גלים בגובה של 2.1 מ', או אף גבוה יותר, מותנה כאמור בגובה הבסיס (יסוד).

טבלה 1: פירוט סוגי ה- Reef Balls™ ומימדיהם לבניית שוברי גלים שקועים

סגנון	רוחב	גובה	משקל	נפח הבטון	מספר החורים
Style	***Width***	***Height***	***Weight***	***Concrete Volume***	***# Holes***
Goliath Ball	(1.83m)	(1.52m)	(1800-2700 kg)	(1.0 m3)	25-40
Super Ball	(1.83m)	(1.37m)	(1800-2700 kg)	(1.0 m3)	22-34
Ultra Ball	(1.83m)	(1.31m)	1600-2000 kg)	(0.7m3)	22-34
Reef Ball	(1.83m)	(1.22m)	(1350-1900 kg)	(0.6m3)	22-34

איור 12: שימוש בטיפוס 'כדורי גלית' על גבי בסיס מבטון לשובר גלים במלזיה, 2007.

6.2 יישום שוברי גלים מסוג Reef Balls בהרצליה

עבודת השדה שבוצעה בחופי הרצליה מצביעה על כך שחופים אלו מתאימים לשימוש בשיטת ה-Reef Balls כשובר גלים שקוע ובניית שונית מלאכותית. זאת בשל עומק המים, טווח הגאויות, סוג הקרקעית, ותכונות הגלים. היעילות של שימוש בשיטה מותנה בזוית המבנה ורוחבו. קיומן של שוניות טבעיות קרובות לחוף, היוצרות בליטות בחוף נמצאים בעומק של 1-3 מ' - שהוא עומק

מתאים גם לבניית השונית המלאכותית. בשל הגאויות הקטנות שבחופי הרצליה (בדומה לאלו של הקריביים שנדונו מקודם), הרי אם גג המבנה המלאכותי יהיה מעט מאוד מתחת לגובה פני המים בעת שפל, כאשר תתרחש גאות, יהיו הגלים שמעליו בגובה של כ- 40 ס"מ לכל היותר. תנאים אלו מתאימים לכל השינויים האסטרונומיים הקיימים באזור זה. הפחתה ביעילות המערכת תתקבל בעת סערות, דבר שניתן להתגבר ע"י הגדלת רוחב שובר הגלים.

בשל האפשרות לגלים ברוחב גדול באזור זה, ה- Reef Balls חייבים להיות מעוגנים בבטחה לקרקעית. דבר זה יכול להתבצע באמצעות עיגון כבלים לקרקעית המוצקה (כורכר – רב"ד), או באמצעות כלונס מוזרק לתוך החולות, בתלות בסוג הקרקעית ועובי החול שבו אמור להתבצע הפרויקט. ניתן לשקול שימוש ביריעות (יריעות גיאוטכניות) בבסיס המערכת, כאשר אין בנמצא סלעי שונית. יהיה צורך לבצע מיפוי בטימטרי מפורט מאוד לשם תכנון המערכת באתר. יבוצע סימון גריד של השטח המיועד לבנייה. כחלק מחקירת האתר יעשה שימוש במזרקי גילוי לקביעת עובי החול וסוג הקרקעית בכל נקודה ונקודה באתר לשם קביעת תוכנית העיגון והביסוס.

המערכת הקיימת של Reef Balls, המתאימה לחופי הרצליה, מופיעה באיור 13. מבנה זה בוצע ב- 2002 באזור חוף האי Grand Cayman, בחוף Seven Mile Beach בקטע השייך ל- Mariott Beach Resort. המצב שקדם להתקנת שובר בגלים ולאחריו מופיעים באיורים 14 ו- 15, המראים על הצלחת הפרויקט בייצוב החוף, אפילו אחרי סופת ההוריקן, דרגה 5, שפקדה את האזור ב- 2005. שינוים עונתיים ברוחב החוף ממשיכים להתרחש, כפי שחופים מגיבים לאירועי סערות, אך שובר הגלים הפחית את הסחיפה וייצב את חוף.

איור 13: מעל ומתחת לפני המים של מערכת Reef Balls שקועה בחוף Seven Mile Beach בקטע השייך ל- Mariott Beach Resort.

איור 14: Mariott Beach Resort לפני ואחרי התקנת שובר הגלים השקוע

איור 15: Mariott Beach Resort - נובמבר 2006 – צילום עליון; פברואר 2007 – צילום תחתון.

6.3 עלויות הקמת שובר גלים שקוע מטיפוס Reef Balls בהרצליה

לשם השוואה ראשונית, ההתקנה של המבנה בקריביים, עלתה כ- 1000 $US ליחידה. לפיכך לבניית מערך באורך של כ- 100 מ' וברוחב של כ- 10 מ' יהיה צורך בכ- 250 יחידות, שהם – 250,000 $US. בעבור 2 שורות כאלו יהיה צורך ב- 500,000 $US. עם זאת, העלויות האמיתיות משתנות מאתר לאתר בשל שינויים במרכיבים רבים כגון :

א. עלויות בטון וזמינותו, כח עבודה וציוד כבד לייצור היחידות והשמתם במקומם.

ב. הובלת התבניות ליציקות וכל ציוד מיוחד שאינם זמינים במקום האתר.

ג. עלויות ביטוח, מיסים והוצאות נוספות.

ד. עומק המים (מכתיב את גודל היחידה ועומק שובר הגלים).

ה. סוג הקרקעית ועובי החול (מכתיב צורך העיגון ותכנון היסודות).

ו. שינוע היחידות (בציפה מהחוף או באמצעות רפסודה ומנופים).

7. המלצות עבור הרצליה

בהתבסס על חקירת שטח, מפגשים, דיונים, בחינת כל המסמכים הזמינים, דוחות ומחקרים שונים, להלן ההמלצות לפעולות שיש להביא בחשבון כדי להגביר המידע המדעי והמידע ההנדסי הזמין, כמו גם השיטות הטובות ביותר לשיפור מצב החופים של העיר הרצליה:

1. הקמת מערך נקודות מדידה קבועות (ניטור) לאורך קו החוף לשם מעקב אחר השינויים המחזוריים של פרופיל החוף

בתחום חופי העיר הרצליה בוצעו 9 פרופילים חופיים ממדידות שנעשו בשנים 1989, 1995, 1998 ו- 2000 (אך לא כל קוי הפרופיל הללו בוצעו על אותו מסד נתונים. כמו כן, חסרים קוי פרופיל מחלקו הצפוני ביותר של חוף הרצליה). בניגוד לנתונים בטימטריים המבוצעים מסירה, קוי פרופילים עד לעומק של 2 מ' ניתן לבצע באמצעות מכשירי מדידות דיפרנציאליות רגילים ולא יקרים, דבר המאפשר ביצוע מדידות במרווחי זמן קבועים ולא גדולים, מעקב אחר השינויים בחוף לאחר אירועי סערות, שינויים עונתיים או שינויים ארוכי טווח. מידע על קוי פרופיל מספק החומר העיקרי על שינויים בחוף, דבר הנדרש לתכנון הנדסי ולבנייה של מבנים בחוף הים כמו גם להזנת חולות.

מדינת פלורידה הקימה עוד בשנות ה- 70 המוקדמות סדרה של נקודות ציון (benchmarks) הממוקמים כל 300 מ' בכל האזורים החוליים של חופי המדינה. נקודות אלו משמשות כבסיס נתונים לכל מחקר מדעי ומידע הנדסי להבנת שינויים בקו החוף ובנפחי החול בחופים. הם משמשים לכל תכנון וניתוח הנדסי, כולל תכנון וביצוע הזנת חולות ובניית מבנים חופיים. באזורי פרויקטים מסוימים, המרחק בין נקודות הציון מצטמצם. במקרה של הרצליה יש לסמן נקודות ציון בהתחשב במידע הקיים, בהתחשב במבנים החופיים הקיימים ובמיקום 9 אזורי החוף שהוגדרו במחקרים הקודמים. נקודות קבועות אלה יהיו קשורות אל נקודות נוספות שיקבעו כלפי החוף, עד לנקודת ציון מבוטנת (קיר, מתקן וכיו"ב) או בבסיס המצוק.

בפלורידה סדרת נקודות הציון הועמדו תחילה ע"י האוניברסיטה והמדידה המחזורית הנדרשת של קוי החוף וחישוב נפחי החול, היוו פרויקטים מצוינים לסטודנטים. כיום, ה- FDEP (המחלקה להגנת הסביבה של פלורידה) מתחזקת את המערכת באופן קבוע (on line). מתקבלים נתונים רציפים מגוף זה, מגופים ממשלתיים אחרים ומגורמים פרטיים. כל אלו מהווים כאמור את בסיס הנתונים של כל המחקרים על השינויים באזורי החוף. הם מאפשרים את כל התכנונים ההנדסיים של מבנים בסביבה החופית כמו גם פרויקטים של הזנת חול. נקודות הציון והגבהים של כל מדידה ניתנים לצפייה באתר ה- FDEP והם משמשים לאיתור הנקודות ולקביעת גבהי המדידה.

אף שקיימות מפות בטימטריות של אזורי חופי הרצליה, הן מוגבלות במידע לגבי קוי החוף וסביבתו הקרובה. רוחב החופים והגבהים בו משתנים משמעותית במהלך עונות השנה ובעקבות סערות. הכרתם של שינויים אלו הוא מרכזי לניתוח משמעותי של התופעות והתהליכים השונים באזור החופי, ולתכנון הזנת חוף ומבנים חופיים. תכנון וישום כל החלופות לייצוב החוף שנידון בדוח זה יצא נשכר ממידע מסוג זה לשיפור התכנון ולמעקב אחר תוצאותיו.

2. התייחסות להגברת נפחי החול ושכיחות מעברי החול

השיטה המקובלת בהרצליה, שבה מתבצעת העברה שנתית של חול שנלכד בשולי עורף שלושת שוברי הגלים המנותקים, לצפון הרצליה יכול להמשך, ואף ניתן לשקול הגדלת הנפחים של חול ממקור זה לחופי צפון הרצליה. מדידת פרופילי חוף בהתאמה לעבודה זו יאפשרו לתעד את נפחי החול, את תנועתם, את מיקום הצטברותם על ציר זמן ואיחוי המקומות שמהם נלקח חול בשולי שוברי הגלים הקיימים. הגברת יכולת מעברי חול למקומם יקטינו התרדדות קרקעית המרינה ובכניסה אליה, שכן תנועת החולות מצפון לדרום, העוברים את המילוי בגין ה- tombolos ונלכדים בכניסה למרינה, עשוי להיתפס באזורים שמהם נלקח החול לשם מילוי אחורי חוזר.

3. ביצוע של מדידות נוספות במטרה לשפר התכנון והפיתוח של שוברי גלים עיליים או שקועים

נדרש מיפוי בטימטרי מדויק של קו החוף, אזור המים הרדודים והחוף עצמו, בקוי שתי וערב (grid) צפופים לתכנון מדויק של שוברי לים שקועים או עיליים. נדרשים גם נתוני עומקים, ומרחקיהם מקו החוף וכן חקירת עומק החול וסוג הקרקעית באמצעות זרנוקי מים, כל זאת לשם תכנון מדויק של כל חלופה. נתונים אלו הנם קריטיים במיוחד בשביל שוברי גלים שקועים הבנויים מיחידות כגון reef balls - במטרה לאפיין גודל היחידות והביסוס הנדרש להם.

4. בניית מזחים שקועים בים הרדוד של חופי צפון הרצליה

בניית 2 מזחים שקועים בחוף הים שבצפון הרצליה, כמוצג באיור 10, יגרום לייצוב קו החוף, עם תרומה נוספת לאזור שמדרום להם. **מומלץ מאוד** לבצע מילוי מוקדם של המרחב שבין מיקום המזחים לבין החוף בנפחי חול בנפח המוכתב מהתחזית של תנועת החול באזור (נגזר מהמודל הנומרי). ניתן להוסיף חול לאורך החופים מדרום לשוברי הגלים החדשים.

5. ניטור שוברי הגלים המשוקעים

תידרש מדידה שיטתית ומחזורית, ומחקרים בשיטות אחרות יידרשו להערכת יעילות המזחים השקועים.

6. הגנה על האתר הארכיאולוגי של אפולוניה

גם על הגנת האתר הארכיאולוגי של אפולוניה נערך דיון. מקיומם של שיפועים חדים במיוחד של חומר מצוקי, וכן קיומם של סלעי שונית ובלוקים ממוצא ארכיאולוגי בבסיס המצוק, עולה שלא פעילות הגלים שבבסיס המצוק הם הקריטיים ביותר לסחיפה במדרונות, אלא השיפועים החדים של המדרונות הנמצאים בשיפוע הגדול מזוית המנוחה שלהם, ועל כן הם נסחפים בקלות ע״י הגשם והרוח. סחיפה במדרונות אפולוניה צריכה להיות מטופלת ע״י מומחה לתחום יציבות המדרונות. שינויים של קו החוף באזור זה עשויים להפחית מהמשמעות של המעגן ההיסטורי.

תרגום -
ד״ר רם בן-דוד

הפניות

1. Baird, W.F., 1998. Design Investigations for Shore Protection, Wave Agitation and Sedimentation at Herzliya Marina. Baird Associates Coastal Engineers Ltd.,Oakville, Ontario, Canada.

2. Baldock, T.E. and Simmonds, D.J. "Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry." *Coastal Engineering* 38 (1999): 167-176.

3. Balkemak, A.A., Rotterdam and Brookfield, 1998. Slope stability problems along the Israeli Mediterranean beach cliffs and ways for improving its stability. *Eighth International IAEG Congress* Vancouver, Canada, September 21-25 1998, p. 1545-1550.

4. Black, Kerry and Andrews, C. "Sandy shoreline response to offshore obstacles: Part 1. Salient and tombolo geometry and shape." *Journal of Coastal Research* 29 (2001): 82-93.

5. Black, Kerry. "Numerical prediction of salient formation in the lee of offshore reefs." *Proceedings of the 3rd International Surfing Reef Symposium*, 2003.

6. Chasten, M. et al. "Engineering Design Guidance for Detached Breakwaters as Shoreline Stabilization Structures." *Technical Report CERC 93-19. U.S. Army Corps of Engineers*, Coastal Engineering Research Center. 1993.

7. Cho, Yong-Sik et al. "Experimental study of strong reflection of regular water waves over submerged breakwaters in tandem." *Ocean Engineering* 31 (2004): 1325-1335.

8. Dean, Robert and Dalrymple, Robert. Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

9. Dean, Robert and Dalrymple, Robert. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Teaneck: World Scientific, 1991.

9. Dean, Robert et al. "Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA." *Coastal Engineering* 29 (1997): 291-315.

11. Emery, K.O. and Bentor, Y.K., 1960. The Continental Shelf of Israel. *Ministry of Agriculture Division of Fisheries* No. 28 and *Ministry of Development Geological Survey* No. 26, p. 25-41.

12. Emery, K.O. and Neev, D., 1960. Mediterranean Beaches of Israel. Ministry *of Agriculture Division of Fisheries* No. 28 and *Ministry of Development Geological Survey* No. 26, p. 1-24.

13. Friebel, Harry. "Re-evaluation of wave transmission coefficients for submerged breakwater physical models." Master's thesis, Florida Institute of Technology. 2000.

14. Gabbay, S., 2000. Coastal Area Management Programme (CAMP) Israel Final Integrated Report. United Nations Environment Programme. Split, Croatia, p. 1-89.

15. Harris, L.E., 2007. Artificial reefs for ecosystem restoration and coastal erosion protection with aquaculture and recreational amenities. *5th International Surfing Reef Conference*.

16. Harris, L.E. and Sample, J.W., 2005. The evolution of multi-celled sand-filled geosynthetic systems for coastal protection and surfing enhancement. *4th International Surfing Reef Conference.*

17. Harris, L.E., Sample, J.W., and Mead, S., 2005. Design evolution and performance of coastal structures using geosynthetic materials for coastal protection and surfing enhancement. *Beach Preservation Technology 2005*, FSBPA.

18. Harris, Turk, and Mead, 2004. Combined recreational amenities and coastal erosion protection using submerged breakwaters for shoreline stabilization. *Beach Preservation Technology 2004*, FSBPA.

19. Harris, 2003. Submerged reef structures for beach erosion control. Proceedings of *Coastal Structures '03*. ASCE.

20. Harris, 2003. Artificial reef structures for shoreline stabilization and habitat enhancement. *3rd International Surfing Reef Symposium*, ASR, Ltd., Raglan, New Zealand.

21. Harris, 2003. Correlation between the physical structure of the nearshore reefs and the historical beach erosion/accretion in Indian River County, FL. Proceedings of *Coastal Sediments '03*, USGS, St. Petersburg, FL.

22. Harris, Lee. "Wave Attenuation by Rigid and Flexible-Membrane Submerged Breakwaters." Doctoral dissertation, Florida Atlantic University, 1996.

23. Huang, Ching-Jer et al. "Structural permeability effects on the interaction of a solitary wave and a submerged breakwater." *Coastal Engineering* 49 (2003): 1-24.

24. Johnson, Hakeem. "Wave modeling in the vicinity of submerged breakwaters." *Coastal Engineering* 53 (2006): 39-48.

25. Longuet-Higgins, M.S. "On the wave-induced difference in mean sea level between the two sides of a submerged breakwater." *Journal of Marine Research* 25 (1967): 149-153.

26. Losada, I. et al. "3-D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwaters." *Coastal Engineering* 28 (1996) 229-248.

27. Mizutani, Norimi et al. "Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction." *Coastal Engineering* 33 (1998): 177-202.

28. Nir, Y., 1982. Offshore artificial structures and their influence on the Israel and Sinai Mediterranean beaches. *Eighteenth Coastal Engineering Conference* ASCE, Cape Town, South Africa, November 14-16 1982, p. 1837-1856.

29. Nir, Y., 2004. Israel Mediterranean Coasts Faults and Mistakes in Beach Management or the Seven Pillars of Unwisdom. *First International Conference on the Management of Coastal Recreation resources Beaches, Yacht Marinas and Coastal Ecotourism*, Malta, October 20-23 2004, p. 87-89.

30. Nir, Y., and Elimelech, A., 1990. Twenty five years of development along the Israeli Mediterranean coast: goals and achievements. *Development along the Israeli Mediterranean Coast* No.18, p 211-218.

31. Rambabu, A. and Mani, J. "Numerical prediction of performance of submerged breakwaters." *Ocean Engineering* 32 (2005): 1235-1246.

32. Ranasignhe, Roshanka et al. "Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modeling study." *Coastal Engineering* 53 (2006): 589-611.

33. Ranasinghe, R.S. and Sato, S., 2007. Beach morphology behind single impermeable submerged breakwater under obliquely incident waves. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 49, No. 1 p. 1-24.

34. Ranasinghe, Roshanka and Turner, Ian. "Shoreline response to submerged structures: A review." *Coastal Engineering* 53 (2006): 65-79.

35. Schwartz, M. L., 1982. Asia, Middle East, Coastal Morphology: Israel and Sinai. *The Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments*. Encyclopedia of Earth Sciences Vol. 15, p 86-98. Publication of the Ross Publishing Company, Stroudsburg, Pennsylvania.

36. Schwartz, M.L and Bird, E.C.F., 1985. Israel. *The World's Coastline*, Vol 70. p 505-511. Publication of the Van Norstrand Reinhold Company, New York.

37. Stauble, D.K. and Tabar, J.R., 2003. "The Use of Submerged Narrow-Crested Breakwaters for Shoreline Erosion Control." *Journal of Coastal Research*, 19-3 pages 684-722.

38. Ting, Chao-Lung et al. "Porosity effects on non-breaking surface waves over permeable submerged breakwaters." *Coastal Engineering* 50 (2004): 213-224.

39. Turner, Ian. "Discriminating Modes of Shoreline Response to Offshore-Detached Structures." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* (American Society of Civil Engineers) 132 (2006):180-190.

40. U.S. Army Corps of Engineers. "Fundamentals of Design." *Coastal Engineering Manual,* Part VI, Chapter 5. 2006.

41. U.S. Army Corps of Engineers. "Surf Zone Hydrodynamics." *Coastal Engineering Manual*, Part II, Chapter 4. 2003.

42. U.S. Army Corps of Engineers. *Shore Protection Manual*. 1984.

43. Yuan, Dekui and Tao, Jianhua. "Wave forces on submerged, alternately submerged, and emerged semicircular breakwaters." *Coastal Engineering* 48 (2003): 75-93.

44. Zviely, D. The Impact of the Herzliya Marina on the width of its neighboring beaches