

# ד'נמיקה ומאזן החול בחוף הישראלי

אברהם גוליק

חקר ימים ואגמים לישראל, המכון הלאומי לאוקיאנוגרפיה, חיפה

"והרבה ארבה את זרעך... וכחול אשר על שפת הים..."  
בראשית כב 17

## מבוא

לפני מספר שנים גילה ארכיאולוג מאוניברסיטת חיפה שרידי כפר ניאוליתי על קרקעית הים בעומק מים של כשמונה מטר באזור (Galili et al., 1993). באותה תקופה, לפני 8,000-10,000 שנה, היו פני הים נמוכים בכמה מטרים מכפי שהם היום, והשטח שכיום מכוסה בים, היה אז חשוף. האדם הקדמון חי בשטח זה, ושם גם קבר את מתיו. באיור 1 מופיע צילום שלד של תושב אותו כפר, כפי שנתגלה על קרקעית הים. מאחר ששלד הוא עצם שברירי ביותר, אשר כל סערת חורף יכולה לפזר עצמותיו לכל רוח, נשאלת השאלה, כיצד שרד השלד בתנאים כאלה במשך אלפי שנים. התשובה לכך היא שהשלד היה מכוסה כל אותה תקופה בשכבת חול שהגנה עליו, ועתה, לאחר שנעלמה, נותר השלד חשוף.

במשך למעלה מחמישים שנה אנשים רוחצים בחוף מעגן מיכאל, ומעולם לא הבחין איש בתופעה יוצאת דופן בחוף זה. והנה, לפני מספר שנים, החלה לבצבץ מקרקעית הים אניית סוחר (כפי שהתברר לאחר חפירה), אשר נטרפה

בחוף זה לפני כאלפיים שנה. באנייה נתגלה מטען, שכלל כִּדְי חרס שנשמרו במצב מצוין (Linder, 1992). גם כאן היה זה כיסוי חול אשר הגן על האנייה מעוצמת הגלים ושימר אותה ואת מטענה במשך כאלפיים שנה, ועתה, משהחל חול זה להיעלם, נחשפה האנייה.



▲ איור 1:

שלד אדם ניאוליתי כפי שנמצא על קרקעית הים בעומק מים של כשמונה מטר ליד עתלית (מתוך: Galili et al., 1993)

לעומת דוגמאות אלו המעידות על גירעון במאזן החול, דהיינו מצב שבו כמות החול העוזב את החוף גדולה מזו המגיעה אליו, יש דוגמאות המעידות על מאזן חול חיובי, ששרר בחופינו עד לפני כחמישים שנה. למשל, אמת המים ליד קיסריה היתה קבורה בחול, אשר סולק ממנה בתחילת שנות השישים כדי לגלותה. רים (1950) מתריע מפני התפשטות החול מרצועת שפת הים פנימה ליבשה ומאובדן קרקעות בדרך זו. הוא אף מציע להקים מבנה בתוך הים ליד רצועת עזה על מנת ללכוד שם את החול, ובדרך זו למנוע ממנו להגיע לארץ ולכסות בה שטחים. מה קרה אם כן? מה גרם למאזן חול שהיה חיובי במשך אלפי שנים, להפוך, כמעט באופן פתאומי, לשלילי? לפני שנוכל להתייחס לשאלה זו, עלינו להבין את התהליכים הטבעיים, המכתיבים את מאזן החול בחוף.

## תהליכים חופיים

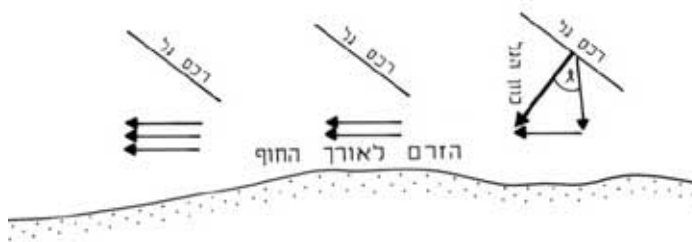
על פי ההגדרה הגיאולוגית, חול הוא אסופת גרגרים, שגודלם בין 62 ל-2,000 מיקרון. ההגדרה אינה מציינת את החומר ממנו עשויים הגרגרים, אולם במרבית המקרים, וכך גם במקרה שלנו, הכוונה היא לגרגרי קוורץ.

הסלעים המצויים באגן ההיקוות של הים התיכון בארץ ישראל הם ברובם סלעים קרבונטים, דהיינו גיר, דולומיט וקירטון, שאינם מכילים קוורץ. לכן, החול אשר על שפת הים, אשר רובו ככולו מורכב מגרגרי קוורץ, מקורו מחוץ לתחומי הארץ. מסתבר, שהנילוס מביא עמו לים התיכון סדימנטים שמקורם ממרכז אפריקה, שבהם חרסית, טין וחול קוורצי.

כל אלה שקעו לקרקעית עם כניסתו של הנילוס לים התיכון (מאז הקמת סכר אסואן הם שוקעים לקרקעית אגם נאסר), ויצרו בדרך זו את הדלתא של הנילוס. גלי הים והזרמים הם "מנועי", המסיע את החול מהדלתא לעבר חופינו.

כאשר גלים מתקרבים מהים העמוק אל החוף, חלים שינויים בתכונותיהם: רכסיהם מתחדדים, וגובהם גדל עד שהם נשברים באזור הנקרא אזור המשברים. עם שבירת הגל משתחררת אנרגיה, שחלק ממנה מכניס את חול הקרקעית למצב של תרחיף בתוך עמוד המים. צופה חד עין יוכל להבחין בצבע צהבהב, ה"מלכלך" כביכול את קצף הגלים הלבן בעת שבירתם; זהו החול אשר במים.

הגלים המתקרבים לחוף מביאים עמם כמות מים מסוימת לחוף. בהתאם לכיוון ההתקדמות של הגל יחסית לניצב לחוף, ניתן לפרק את כמות המים המגיעה לחוף לשני רכיבים: האחד ניצב לחוף, והשני מקביל לו. המים המיוצגים על ידי הרכיב הניצב לחוף, מוחזרים חזרה לים. זוהי תנועת ההלוך ושוב של המים, המוכרת לנו משפת הים. אולם הרכיב המקביל לחוף מסיע את המים בכיוון זה (ראו איור 2). כיוון שגם בגלים השכנים מתקיים אותו תהליך, נוצר זרם שכיוונו מקביל לחוף בהתאם לכיוון הגלים הקרבים לחוף. זרם זה, הנקרא "הזרם שלאורך החוף" (longshore current), נושא עמו גם את גרגרי החול המרחפים בעמוד המים, כפי שהוסבר קודם לכן. בדרך זו



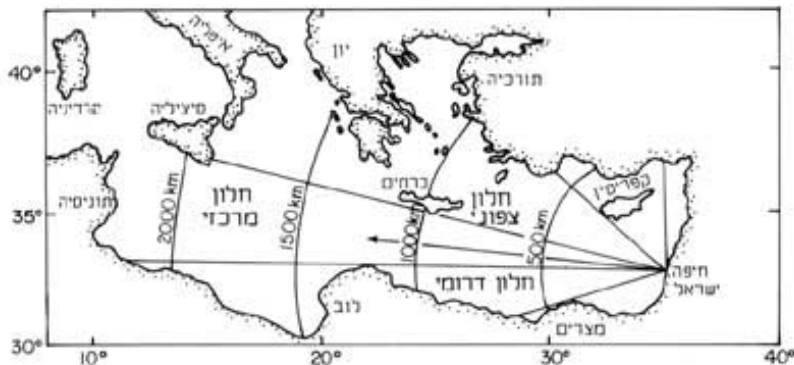
איור 2: ציור סכמטי המראה את היווצרות הזרם שלאורך החוף

גורמים הגלים באזור המשברים לריחוף החול בתוך עמוד המים וליצירת הזרם שלאורך החוף, הנושא עמו את החול. כמות החול המוסעת בדרך זו לאורך החוף, תלויה בגובה הגלים ובזווית שבין כיוון התקדמות הגלים לניצב לקו העומק באזור המשברים (או לחילופין בין כיוון רכס הגל לכיוון קו העומק באזור המשברים).

כיוון שכמות החול המוסע תלויה בגובה הגלים ובכיוונם, מן הראוי לחקור את הגורמים המשפיעים על התנהגותם של אלה. מסתבר ששלושה גורמים משפיעים על ממדי הגלים: עוצמת הרוח הנושבת על פני המים, משך הזמן שבו נושבת הרוח, והיקף השטח שבו היא נושבת (fetch). ככל ששלושת אלה גדולים יותר, כן יהיה גובה הגלים רב יותר. בחינת הגיאוגרפיה של מזרח הים התיכון (ראו איור 3) מלמדת, שמול חופה של ישראל קיים "חלון" בעל זווית פתיחה של 12° בלבד, המשתרע עד מצרי סיציליה, מרחק של כ-2,200 ק"מ ים פתוח ובלתי מופרע על ידי יבשות או

איור 3:

כיוון ה-fetch הגדול ביותר הפונה לחוף הישראלי; שימו לב שהחלון המרכזי מגיע עד מצרי סיציליה, מרחק של למעלה מ-2,200 ק"מ (מתוך: Carmel et al., 1985)

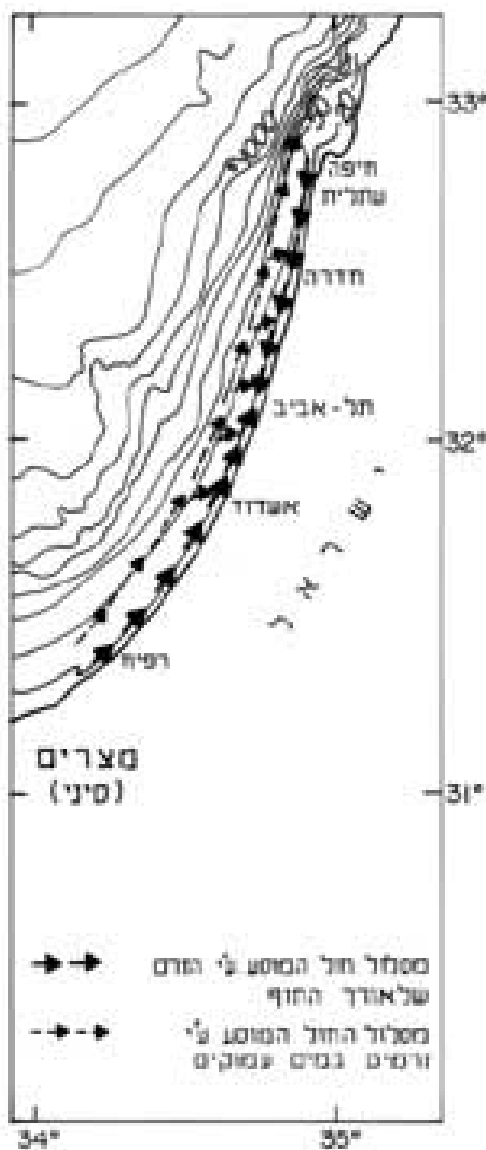


איים. אם הרוח נושבת על פני כל השטח הזה בעוצמה ובמשך זמן, והדבר אכן מתרחש כל מספר שנים, יגיעו אל החוף הישראלי גלים בגובה רב. לדוגמה, בסערת חורף ב-1992 נמדדו גלים בעלי גובה משמעותי של 7.2 מטר (גובה גל

משמעותי הוא הגובה הממוצע של שליש הגלים הגבוהים, שנמדדו במשך 20 דקות). אין בים התיכון חוף הפונה לשטח ים נרחב יותר מזה שאליו פונה החוף שבין רפיח וביירות, ולכן חוף זה חשוף לגלים הגבוהים ביותר בים זה.

איור 4:

מתכונת הסעת החולות לאורך החוף הישראלי (Emery and Neev, 1960)



מודלים להסעת חולות לאורך חופי הארץ

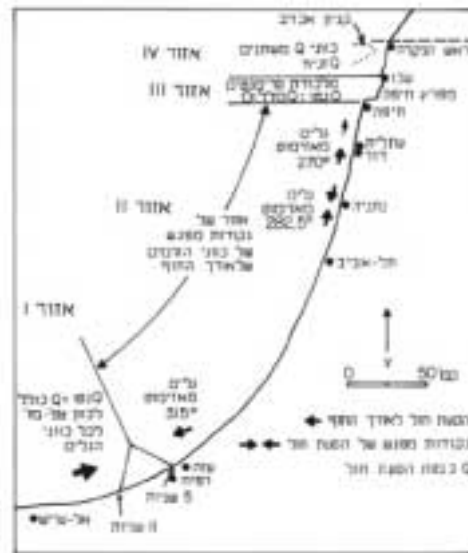
המחקר הראשון המתאר את מתכונת הסעת החולות לאורך החוף הישראלי הוא של אמרי וניב (Emery and Neev, 1960). מחקרם מתבסס על שתי עובדות: האחת - כיוון ה"חלון" של משטח ים בלתי מופרע (fetch) הוא אזימוט  $282^\circ$ , ולכן מכיוון זה יגיעו הגלים הגבוהים ביותר, אשר יסיעו את הכמות הגדולה ביותר של חול; השנייה - צורתו של החוף הישראלי קעורה וכיוונו משתנה בהדרגתיות מצפון-מזרח - דרום-מערב בדרום הארץ לכמעט צפון-דרום בצפונה.

לכן, גלים שיגיעו מאזימוט  $282^\circ$  לחופים בצפון הארץ, יגרמו להסעת חולות לכיוון דרום, בעוד שגלים מאותו כיוון בדרום הארץ, יגרמו להסעת חולות צפונה. נקודת המפגש בין שני אלה צריכה להיות, לדעת מציעי מודל זה, בסביבות תל אביב (ראו איור 4).

הקושי הקיים במודל זה הוא מקור החול. בעוד שבדרום מקור החול ברור - הנילוס, לא ברור מהו מקור החול המוסע מהצפון דרומה? המחברים התייחסו לשאלה זו בהציעם מנגנון הסעת חול נוסף לזה המוסע על ידי הגלים, והוא הזרם הים-תיכוני, שכיוונו ככלל הוא מדרום לצפון. זרם זה מסייע חול מעבר לאזור משברי הגלים לכיוון צפון, וחול זה מזין את המערכת החופית (שם). לכן, בפני גרגר

חול המגיע לחופי הארץ ממצרים עומדות מספר אפשרויות: הוא יכול להצטרף לתנועת החול צפונה באזור המשברים עד הגיעו למרכז הארץ, שם ייפגש בזרם הבא מצפון; הוא יכול להצטרף לתנועת החול צפונה, על פנים מדף היבשת מעבר למשברים, ולהיסחף לכיוון החוף - ושם להשתתף בהסעה, צפונה או דרומה, בהתאם למקום שאליו הוא נסחף לחוף.

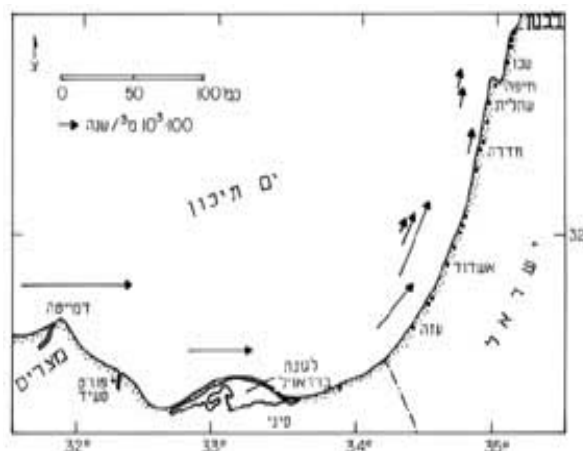
גוליק (Gollik, 1993) מביא עדויות, המבוססות על תנועת סדימנטים על קרקעית הים ועל הצטברויות חול ליד מבנים חופיים בין חיפה לנתניה, שלפיהן תנועת החול בקטע זה של החוף היא מצפון לדרום, ואילו מהדרום עד הרצליה תנועת החול נטו היא צפונה. עדויות אלו מאששות את ההיפותזה, שהציעו אמרי וניב (Emery and Neev, 1960).



איור 5: מודל הסעת חולות לאורך החוף בישראל (עפ"י Goldsmith and Golik, 1980)

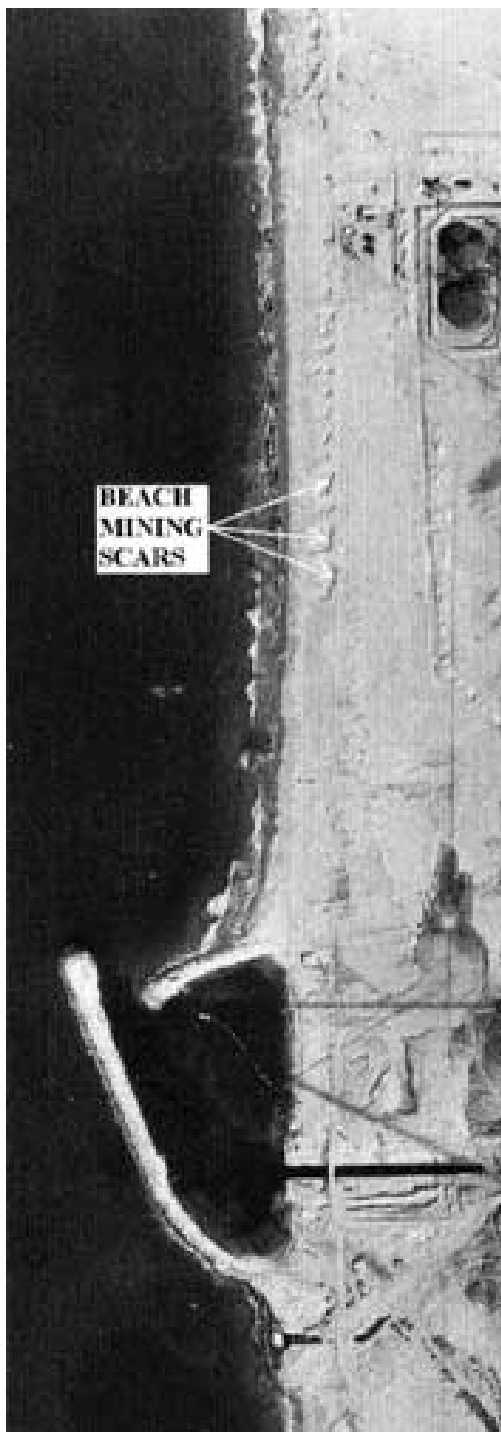
גולדסמית וגוליק (Goldsmith and Golik, 1980) התייחסו לתופעת הרפקציה המתחוללת בגלים, בהציעם מודל להסעת החולות בחוף הישראלי. כאשר גלים מתקרבים מהים העמוק לכיוון החוף, הם משנים את כיוון תנועתם באופן שרכסי הגלים נעשים מקבילים יותר ויותר לקווי העומק. תופעה זו נקראת רפרקציה וניתן לחשבה אם ידועים תבליט פני קרקעית הים וכן ממדי הגלים וכיוונם בים העמוק. המחברים עשו שימוש בתוכנות מחשב לחישוב רפרקציה של גלים וכן במפת קרקעית הים, כדי למצוא את כיוון הגלים באזור המשברים לגבי תנאי גלים שונים (גובה, תדירות וכיוון) בים העמוק. תוצאות חישובים אלו הצביעו על כיווני הסעת החולות לגבי תנאי הגלים השונים שנבחנו. מתוך אלו הציעו גולדסמית וגוליק (שם) את המודל הזה (ראו איור 5): מאל עריש עד רפיח הסעת החולות היא תמיד מזרחה לכיוון החוף הישראלי; בין רפיח לחיפה תנועת החול יכולה להשתנות צפונה או דרומה על פי כיוון הגלים, כאשר הנטייה היא תנועה צפונה בדרום הארץ, ההולכת ומתמעטת, ואולי אף מתהפכת לכיוון דרום, ככל שעולים בחוף, סמוך לחיפה; במפרץ חיפה תנועת החולות מוגבלת, והמפרץ משמש כמלכודת סופית לחול המגיע לחוף הישראלי; מעכו צפונה לא מצוי יותר חול שמקורו בנילוס, והחוף ברובו סלעי ומצוקי עם חול שמקורו ביוגני (מבעלי חיים כגון צדפים, קונכיות, אצות גיריות ועוד) - לכן קטע חוף זה אינו משמעותי במאזן החול של החוף הישראלי.

המודלים שתוארו עד כה הציעו רק הערכות איכותיות להסעת החולות, דהיינו כיווני הסעה, אך לא נתונים על כמויות ההסעה, וזאת משום שבידי החוקרים שעסקו בנושא לא היו נתוני גלים. כרמל ואחרים (Carmel et al., 1985) ביצעו בשנים 1980-1983 מדידות גלים כמעט רציפות סמוך לאזור המשברים בחוף דדו שבחיפה. תוצאות מדידות אלו הראו, כי תנועת החול בחודשי החורף היא צפונה, בחודשי האביב והסתיו תנועת החול מועטה ביותר, ואילו בחודשי הקיץ תנועת החולות היא דרומה.



איור 6: מודל הסעת החולות לאורך החוף בדרום-מזרח הים התיכון (עפ"י Carmel et al., 1984)

איור 7: צילום אוויר של החוף בקרבת אשדוד בשנת 1958. ניתן לראות את צלקות כריית החול מהחוף על ידי הדחפורים



הממוצע השנתי של תנועת החול נטו לגבי שנות המדידה היתה  $100,000 \pm 100,000$  ממ"ק לשנה לכיוון צפון. טווח הטעות הגדול נובע מכך, שטעות במדידת כיוון הגלים בשיעור של מעלה אחת יכול לגרום לטעות של  $180^\circ$  בכיוון הולכת החול בשיעור של כ-50,000 ממ"ק לשנה.

כרמל ואחרים (Carmel et al., 1984) טוענים, שאם כיוון הסעת החולות בחיפה הוא צפונה, הרי שאז למעשה לכל אורך החוף הישראלי זהו כיוון הסעת החול נטו; הסיבה לכך היא השינוי ההדרגתי שחל בכיוון החוף מחיפה עד עזה ואף הלאה, ואף מגביר את קצב ההסעה צפונה ככל שמדרמים (ראו איור 6).

הכל, אם כן, מסכימים, שמקור החול הוא בנילוס, שהחול מוסע על ידי הגלים והזרמים לאורך חופי סיני אל החוף הישראלי לפחות עד הרצליה, ואילו משם צפונה כיוון ההסעה אינו ברור, אך ודאי שקצב הסעת החולות באזור זה קטן.

## מאזן החול

עתה, לאחר שהכרנו את התהליכים הגורמים לתנועת החול לאורך חופינו, מן הדין לטפל בשאלה שהוצגה בתחילת המאמר ונתמכת בעדויות ארכיאולוגיות לגבי שינוי מאזן החול החיובי לפני כמה עשרות שנים למאזן שלילי כיום. שתי סיבות למהפך זה, שתיהן מעשה ידי אדם: כריית חול מסיבית מהחוף; בניית מבנים חופיים היוצאים מהיבשה לים.

במקביל לעלייה הרבה בקצב הבנייה בארץ מאז תחילת המאה, חל גם גידול עצום בקצב כריית החול משפת הים כחומר גלם לבנייה. איור 7 הוא קטע מצילום אוויר משנת 1958 של החוף בקרבת אשדוד, ובו ניתן לראות את

הצלקות שהשאירו דחפורים שכרו חול משפת הים. על פי רישומי הכורים ועדויות של אישים שהיו מעורבים בכרייה, כ-6.9 מיליון ממ"ק חול נכרו בחופי המדינה מאז הקמתה (בתל אביב מאז 1936) ועד 1964, השנה שבה נאסרה כרייה זו (ועדת הזיפיץ, 1964). תנופת בנייה התקיימה בתל אביב עוד לפני 1936 ובשאר האזורים החופיים לפני הקמת המדינה, ומכאן אפשר להעריך, כי מאז תחילת המאה גרעה פעולת הכרייה כ-10 מיליון ממ"ק חול מהמערכת החופית.

הגורם השני שערער את מאזן החול הוא המבנים החופיים. המבנה החופי הראשון שהוקם בתקופה המודרנית בחוף הישראלי הוא נמל חיפה שהוקם בשנות השלושים; אולם, מאז שנות השישים החלה תנופת בנייה עצומה בחופים: נמל אשדוד שהוקם בשנים 1960-1964, ברכות להשקטת מי קירור לתחנות הכוח רידינג, אשכול, מאור דוד ורוטנברג, מרינות, שוברי גלים מקבילים לחוף, דורבנות ניצבים לחוף, קירות ים ועוד -- סה"כ כחמישים מבנים ימיים הקיימים כיום בחופי הארץ. כל מבנה כזה פוגע בתהליכים החופיים הטבעיים, בעיקר בכך שהוא מונע מהחול לנוע במסלולו הטבעי - החול, שבדרך כלל נע צפונה, נלכד בצדו הדרומי של המבנה, ואינו ממשיך לנוע צפונה.

גוליק ואחרים (Golik et al., 1996) מדדו על סמך מיפויים חוזרים של קרקעית הים, שנעשו בקרבת נמל אשדוד, את כמות החול שנלכדה על ידי הנמל; הסתבר, כי מאז תחילת הקמתו ב-1960 ועד 1995 נלכדו בצדו הדרומי כ-4.5 מיליון ממ"ק חול. נמל אשדוד הוא אכן המכשול הגדול ביותר בחוף הישראלי לתנועת החול; אולם, נוכח מספרם הרב של המבנים האחרים נראית ההנחה, שבעטיים הוצאו מהמערכת החופית עד כה כ-10 מיליון ממ"ק חול, סבירה ואף זהירה.

הערכות שונות, המבוססות על חישובי שטף האנרגיה של גלים, נעשו לגבי קצב הסעת החול באזור עזה (Deflt Hydraulics, 1994). הערכות אלו נעו בין 170,000 ל-540,000 ממ"ק חול לשנה לכיוון צפון. אם ניקח כערך ביניים 1/3 מיליון ממ"ק, זוהי ההכנסה השנתית למאזן החול של החוף הישראלי. אם במרוצת המאה הנוכחית נגרעו מהמאזן 20 מיליון ממ"ק חול עקב כריית חול ולכידתו על ידי מבנים, הרי שבתקופה זו נגרע מהחוף הישראלי חול בכמות השווה לשישים שנות אספקת חול טבעית. למעשה, הנוק גדול יותר - חלק מהחול המגיע לחוף אובד, שכן הוא מוסע על ידי הרוח ליבשה. מסיבה זו, האובדן למאזן החול עקב מעשה ידי אדם הוא יותר משישים שנות אספקת חול, וייתכן שהוא מגיע לשמונים ואולי אף למאה. ברור לנו עתה, מדוע הולך ונעלם כיסוי החול, שהגן עד עתה על עצמים ארכיאולוגיים במשך אלפי שנים.

## תחזית

התחזית לגבי חופי ישראל עגומה ביותר. כריית החול אמנם פסקה, אך צריכתו העולה באופן מדהים תיצור לחץ כביר לכריית חול מהחוף ומקרקעית הים בעתיד. על פי דיווחי כורי החול, יספיקו המקורות היבשתיים לחול לשנתיים נוספות בלבד. בעשור הקרוב יורחבו נמלי חיפה ואשדוד, הרחבה שתדרוש כ-12 מיליון ממ"ק חול. מדובר על הקמתם של איים מלאכותיים, ומחקרי היתכנות לאלה כבר מתבצעים. אי מלאכותי ששטחו 1,000 דונם, ידרוש כ-20 מיליון ממ"ק חומר מילוי.

אין סימנים לכך שבניית מבנים חופיים תיפסק, להפך - כבר עתה ידוע, כי לפחות הנמלים יורחבו, ולכן סכנת לכידת החול על ידי המבנים תגדל. כבר עתה מוקמת מעגנה בעזה, ומדובר בהקמת נמל עמוק מים שם. אין לדעת אילו מבנים חופיים נוספים יקומו בעתיד ברצועת עזה ובחופי סיני, אולם השפעתם על מאזן החול אצלנו ברורה. נוסף לכל אלה הולכות ומתחזקות התחזיות לעליית מפלס הים בשל אפקט החממה, תופעה אשר תגרום גם היא נזק לחוף. בעתיד הרחוק יותר אנו צפויים להרגיש את השפעתו של סכר אסואן. תופעת הרס קטעים של החוף המצרי בשל הפסקת זרימת הנילוס לים התיכון, ידועה ומוכרת. כיום אנו נהנים מתוצרי הרס אלה, הממשיכים לנוע לחופינו כאילו לא אירע דבר, אולם ברור שבנקודת זמן עתידית תגיע הארוזיה בשל סיבה זו גם אלינו.

מברכת אלוהים לאברהם "והרבה ארבה את זרעך ... וכחול אשר על שפת הים" משתמע, כי מצאי החול הוא אינסופי. למעשה אין הדבר כך, ויש לגבש במהירות מדיניות לשימור החול המצוי בחופינו, ולמצוא דרכים להתגבר על המחסור בחול ההולך וגדל. קיימות היום בעולם טכנולוגיות, המאפשרות להעביר את החול מצד אחד לצדו האחר של מבנה חופי (sand by-passing), וצריך לבדוק את ישימותן לחופינו. על פי ההערכות קיימות היום בצפון סיני כמויות של כ-200 מיליארד מ"ק חול. יש לבדוק אם ניתן לרכוש חול זה ואם מעשי להזין בו את חופינו המידלדלים. יש ודאי דרכים נוספות להתמודד עם בעיית החול ההולך ונעלם, והן ימצאו אם רק ניתן דעתנו על כך.

## מקורות

ועדת הזיפיץ, 1964. דו"ח ועדת הזיפיץ, משרד הפיתוח, ירושלים.  
רים, מ., 1950. נדידת החולות והיווצרות אדמת החול האדומה בארץ ישראל, האוניברסיטה העברית, עבודה לתואר דוקטור לפילוסופיה, 54 עמ'.

Carmel, Z., Inman, D.L. and Golik, A. 1984. Transport of Nile sand along the southeastern Mediterranean Coast, Porch. 19th International Conference of Coastal Engineers, ACE: 1282-1290.

Carmel, Z., Inman, D.L. and Golik, A. 1985. Directional wave measurement at Haifa, Israel, and sediment transport along the Nile littoral cell, Coastal Engineering 9: 21-36.

Delft Hydraulics, 1994. Port of Gaza, basic Engineering study, coastal impact study, Final report Part 11: 31.

Emery, K.O. and Neev, D. 1960. Mediterranean beaches of Israel, Israel Geol. Survey, Bull. 26: 1-24.

Galili, E., Hershkovitz, I., Gopher, A., Weinstein-Evron, M., Lernou, H., Lernou, O., Kislev, M. and Kolska-Hershkovitz, L., 1993. Atlit Yam, a submerged Neolithic site off the Israeli coast, Jour. Field Archaeology 20: 133-157.

Goldsmith, V. and Golik, A. 1980. Sediment transport model of the southeastern Mediterranean Coast, Marine Geology 37: 147-175.

Golik, A. 1993. Indirect evidence for sediment transport on the continental shelf off Israel, Geo-Marine Letters 13: 159-164.

Golik, A., Rosen, D.S., Golan, A. and Shoshany, M. 1996. The effect of Ashdod Port on the surrounding seabed, shoreline and sediments, IOLR Report H02/96: 66.

Linder, E. 1992. Ma'agan Michael ship wreck. Excavating an ancient merchantman, Biblical Archaeology Rev. 18: 24-35.