

# המצב הסביבתי והסדימנטולוגי של חופי ישראל - בדיקת קדם-היתכנות להקמת איים מלאכותיים מול חופי ישראל

דב ס. רוזן  
המכון לחקר ימים ואגמים לישראל

## מבוא

לפי תחזית גידול האוכלוסייה בישראל, תהפוך ישראל כבר בעשורים הראשונים של המאה ה-21 למדינה הצפופה ביותר בעולם (באזור מישור החוף), אם לא יגדל שטח הקרקע הזמין בקרבת הים. במטרה להיערך למתן פתרונות לתחזית זו, החליטה ממשלת ישראל לבחון היתכנות הקמתם של איים מלאכותיים מול חופיה. הבדיקות הראשונות נבחרו לצורך קביעת ההיתכנות היישומית של חלופה זו בישראל, והן כללו: בדיקת זמינות חומרי מילוי לבניית האיים; בחינה והערכה של ההשפעות הסביבתיות הצפויות, כתוצאה מבניית איים מלאכותיים מול החוף הישראלי. דגש מיוחד הושם על ההשפעות הסדימנטולוגיות מבחינת היתכנות הפגיעה בחופים, התנאים שבהם ניתן לבצע ייבוש ימי והאמצעים הדרושים למניעת השפעות סביבתיות שליליות אם יימצאו כאלה. ביצוע הבדיקות הוטל על צוות ישראל-הולנדי משותף (במסגרת הסכם בין ממשלות הולנד וישראל), כאשר הצד ההולנדי מסייע בנושאים שבהם לא קיימים בישראל ידע, ניסיון או ציוד נדרשים\*. עקב תקציב מחקר מוגבל, הוחלט לבחון את היתכנות בנייתם של איים מלאכותיים באזור המרכז (בת ים עד נתניה) ואת ההשפעות הסביבתיות בקטע החוף שבין פלמחים בדרום לבית ינאי בצפון (רצועה של כ-50 ק"מ חוף); ראו איור 1.

## שיטת ביצוע המחקר

הבדיקה הסביבתית התרכזה בעיקר בבחינת השפעות סדימנטולוגיות וכללה:

1. איסוף נתונים סביבתיים וניתוחם לצורך אפיון המצב הסביבתי (מפלסי ים, רוח, זרמים וגלים) והסדימנטולוגי הקיים; במקביל, בחינת נתונים הנוגעים לביוטה הימית, למקורות זיהום, לסוגי מזהמים וכמויותיהם במצב הקיים, ליצירת בסיס ייחוס לבחינת השפעות איים מלאכותיים וכן לבנייה, לכיול ולאומות של מערכת מודלים ספרתיים סדימנטולוגיים ואחרים, הדרושים לבדיקת השפעותיהם הסביבתיות של האיים.
2. הגדרת היכולות של המודלים וכן הדרישות והתנאים שבהם יבוצעו.
3. בחירת חלופות איים מלאכותיים לבדיקה במודלים.
4. ביצוע המודלים הנ"ל וניתוח הממצאים.

מאמר זה יסקור בעיקר את המשימות, שבוצעו במסגרת שלושת הסעיפים הראשונים (כמפורט לעיל);

\* ביצוע המחקר שעניינו ההשפעות הסביבתיות הוטל על חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל) ועל מעבדת דלפט להידרוליקה (DHL), שהיא מהמובילות מסוגה בעולם. ניהול הפרויקט נעשה בצד הישראלי על ידי אינג' ח. בן-אליהו מטעם חברת מבני תעשייה ובצד ההולנדי על ידי Ir. D. Zwemmer מחברת ליבנזה. המחקר בוצע בפיקוח ועדת היגוי בינמשרדית בראשות ד"ר מ. בייט, מנהל מינהל המחקר למדעי האדמה במשרד התשתיות הלאומיות ובשיתוף ועדת היגוי מצד ממשלת הולנד, בראשות Dr. J. Blom, מנכ"ל משרד התחבורה, עבודות ציבוריות וניהול המים.

## ממצאי המחקר המטאוקיינוגרפי

בוצע אפיון האקלים המטאוקיינוגרפי באזור חופי מרכז הארץ על ידי ניתוח נתונים סביבתיים, שנאספו מכל המקורות הזמינים בארץ בין אשקלון וחיפה. הניתוח כלל את הפרמטרים האלה: מפלסי ים, גלים, זרמים ורוחות.

הממצאים העיקריים שהתקבלו מוצגים באופן מילולי וכן בטבלאות ובגרפים כלהלן: עבור מפלס הים בנספח A1, עבור הזרמים בנספח A2, עבור הרוחות בנספח A3 ועבור הגלים בנספח A4. כאן נציג רק את המסקנות הנובעות מהממצאים הנ"ל.

מבחינת ההשפעות הסדימנטולוגיות והסביבתיות, הגורמים הישירים החשובים ביותר הם משטר הגלים ומשטר הזרמים, אף כי משטר הרוחות משפיע בעצם על שני הקודמים. הגלים הם הגורם העיקרי בהסעת סדימנטים (חול) באזורי חוף, המאופיינים על ידי טווח מועדי ים נמוך, כזה הקיים בחוף הים-תיכוני הישראלי. הזווית שבין אזימוט כיוון ההתקרבות של הגלים במים עמוקים לאזימוט הניצב לקו החוף מהווה אחד הפרמטרים הראשיים, המשפיעים על כמות החול המוסעת לאורך החוף. מסתבר כי בחופיה הים-תיכוניים של ישראל, כיוון הגלים (האזימוט) הבו-זמני לאורך החוף אינו אחיד (Rosen, 1998; Rosen and Vajda, 1978), אלא מסתובב לכיוון מערב ככל שמצפיינים לאורך החוף (ראו איור 2). לפיכך, הזווית שבין כיוון התקרבות הגלים והניצב לקו החוף אינה מושפעת רק משינוי כיוון קו החוף ככל שמצפיינים, אלא גם משינוי כיוון ההתקרבות של הגלים לאורך החוף. ההפרש בין אזימוט כיוון הגלים במים עמוקים באשדוד לבין זה שמול חדרה הוא בסדר גודל של  $10^{\circ}$ , ומול חיפה גדל ההפרש עד לכ- $15^{\circ}$ . הפרש הזווית גדול יותר במצבי ים נמוכים ובינוניים מאשר במצבי ים סוערים, כאשר הפרש זה קטן למספר מעלות בלבד; הסיבה לכך היא אורך משב רוח (fetch) גדול יותר עד חופי ישראל במצבים סינופטיים כאלה. בנוסף לכך, בזמן מצבי סערה ניתן לזהות עלייה קטנה בגובה הגל המשמעותי במים עמוקים ככל שמצפיינים. זאת הודות לאורך מוגדל של משב הרוח בחלק הצפוני ולהגבלת תחום נשיבת הרוח באזור החוף הים-תיכוני הדרומי של ישראל על ידי חופי לוב ומצרים עבור כיווני נשיבה דרום-מערביים עד מערב-דרום מערביים.

מסתבר גם, כי רוב הזמן בשנה ממוצעת הזרימה הכללית מחוץ לתחום רצועת המשברים נעה צפונה באזור מדף היבשת הרדוד של החוף הישראלי במקביל לקווי העומק. זרימה זו בשילוב תופעות הערבול וההרחפה של סדימנטים מהקרקעית על ידי המהירות האורביטלית של הגלים באזור שמחוץ לתחום רצועת המשברים, תורמות לקיום מנגנון הסעה נוסף להסעת סדימנטים לאורך החוף שם.

ייתכן, בניגוד למה שאפשר היה לחשוב, שבחופי ישראל בים התיכון עלולים להיווצר במצבי ים קיצוניים גלים גבוהים מאוד (איור 3). נתון זה יחייב, לשם הבטחת קיום ארוך טווח זמן של איים מלאכותיים, שתכנון שוברי הגלים המגנים על שטחי האיים ייעשה תוך שימוש במקדמי סיכון קטנים (גלי תכן בעלי תקופת חזרה ממוצעת של מאות שנים). פועל יוצא מכך הוא עלות גבוהה יותר של שוברי גלים, לעומת אלה שהיו נבנים עבור איים באזורי מים מוגנים.

## ממצאי המחקר הסדימנטולוגי

לשם אפיון המצב הסדימנטולוגי הקיים בתחום המחקר נאסף ממקורות שונים מידע זמין, הנוגע לתהליכים הסדימנטולוגיים בארבעה תחומים:

1. עריכת מיפוי של תפוצה, התפלגות ודירוג הגודל של גרגרי החול בחמישה חתכים אופייניים לאורך תחום החוף הנחקר; ביצוע מיפוי טופוגרפי פוטוגרמטרי ומיפוי בתימטרי מפורט חדש של אזור המחקר בין קו גובה +3.0 מטר לבין קו עומק 30.0- מטר (והשלמת המיפוי בעומקים גדולים יותר ממיפוי קיים פחות מפורט); איסוף מידע קיים וחדש על עובי שכבת החול ומיקום סלעים חשופים.

2. בדיקת מאזן נפחים של חולות על ידי איסוף מפות עומקים של אזור המחקר מתקופות שונות (שהוכנו בהזמנת גופים שונים); הכנת מפות הפרשיות לזיהוי מקומות ארוזיה או הצטברות חול וכימותם הנפחי ממפות עוקבות בשטחים חופיים וכנגד המיפוי החדש.

3. בחינות מעקב אחר שינויים במיקומי קו החוף וקו המצוק התחתון באזור המחקר; זאת על ידי ליקוט, ספרור, עיבוד וניתוח של תצלומי אוויר מתקופות שונות (החל משנות ה-60 ועד 1997) בשבעה קטעי חוף שונים בתחום המחקר.

4. אומדן משטר הסעת החול לאורך קטע החוף הנחקר על ידי עריכת חישובי הסעת חול לאורך החוף; זאת על בסיס נתוני גלים כיווניים מהימנים מאשדוד, חדרה וחיפה, נתוני התכונות הגרנולומטריות של החולות ותצורת צדודית החוף וכן תוך שימוש בנוסחאות חישוב מקובלות (LCHF, Bijker, CERC). באומדן זה נלקחו בחשבון גם ההסעה האורכית מחוץ לרצועת המשברים מחד, וקיומם של רכסי כורכר חשופים או מכוסים בשכבת חול דקיקה מאוד בתחומים שבין קווי העומק 3- מטר עד 5- מטר ובין 10- מטר עד 14- מטר מאידך.

עקב אי-דיוקים במפות הישנות (מסיבות שונות), הבדיקה של השינויים הבתימטריים על סמך המפות ההפרשיות שבוצעו בתחום המחקר, יכולה לשמש יותר להערכה איכותית ובמקרה הטוב רק חצי כמותית של השינויים הנפחיים במצבור החול באזורי המיפוי. למרות זאת, מגמת הנפחים שחושבו תואמת את המגמה הסדימנטולוגית הכללית שנתקבלה על בסיס צילומי האוויר ונתוני הגלים. נמצאו סימנים ברורים לכך, שההסעה נטו לטווח ארוך לאורך החוף הישראלי עד מפרץ חיפה - כיוונה מהדרום לצפון. ברוב התקופה שנבדקה נמצאה הצטברות חול מדרום למבנים החופיים שנבנו, בדומה לממצאים בשתי שיטות הבדיקה האחרות. ממכלול הממצאים עולה בבירור, כי ההשפעות המקומיות, הנגרמות על ידי בניית מבנים חופיים בחוף הישראלי בים התיכון באזור המחקר, מתבטאות בלכידת חול מדרום למבנים ובתחומם ובארוזיה מצפון למבנים. המצב קיים בכל המקומות, שבהם נבנו מבנים חופיים, כגון שוברי גלים מסוגים שונים או מעגנות (בחופי בת ים, תל אביב, הרצליה ונתניה). יחד עם זאת, הכמויות הנלכדות קטנות יותר מאלה שלכד נמל אשדוד הקיים, המגיע כיום עד קו עומק 14- מטר בקירוב ובעתיד עד קו עומק 22- מטר בקירוב. הכמויות המשמעותיות ביותר שנלכדו באזור המחקר היו בקטע החוף של תל אביב ובאזור המרינה בהרצליה.

ניתוח שינויי מיקום קו המים וקו המצוק התחתון בשבעה קטעי החוף הני"ל, מהם שניים באזורים רחוקים יחסית לאחרים מקיומם של מבנים חופיים מלאכותיים (פלמחים ושפיים לעומת בת ים, תל אביב, תל ברוך, הרצליה ונתניה), לא הצביע על שום מגמה קבועה של ארוזיה כללית של החוף, אלא יותר על תנדודיות הקשורה ישירות למצבי ים סוערים במיוחד או לבניית מבנים חופיים.

ניתוח משטר הסעת החולות על בסיס נתוני הגלים, הצביע על כך, כי ההסעה נטו בשנה ממוצעת מבחינת אקלים הגלים היא מדרום לצפון, והיא קטנה ככל שמצפינים עד חיפה. מדי פעם, בשנים שבהם היו סערות גדולות במיוחד, המתקרבות תמיד מכיוון מערב, כמויות ההסעה האורכית נטו יכולות לגדול מספר מונים ביחס לשנה ממוצעת (עד

סדר גודל אחד במצבים קיצוניים). בין אירוע לאירוע של סערה נדירה (המתרחשת אחת לעשר עד עשרים שנה או יותר בממוצע) ובמהלך שנים עם אקלים גלים מתון, מתרחשות מדי פעם סערות בינוניות מכיוון מערב-צפון-מערב, אשר יכולות לשנות זמנית את אקלים הסעת הסדימנטים ולגרור להיפוך בכיוון ההסעה נטו בתחום החוף, צפונה לשפיים. לפיכך, ניתן לדבר על קיום נקודת היפוך בהסעת הסדימנטים נטו לאורך החוף (Goldsmith and Golik, 1980; Shoshany et al., 1996) רק באופן זמני (שנה עד מספר שנים ספורות). לטווח שנים ארוך נקודה זו לא קיימת, והוכחה לכך מהוות כמויות של מספר מיליוני מ"ק חול, שהצטברו במפרץ חיפה בסמוך לשובר הגלים מאז בנייתו בתחילת שנות ה-30. עקב הזווית של קו החוף בחיפה (אזימוט 5°) ושינוי כיוון הגלים ככל שמצפינים, ברור כי רוב הכמות הגיעה לשם באותן שנים סוערות במיוחד. גם ממצאי השוואת צילומי אוויר מחופי נתניה מראים, כי המידע שהביאו שושני ואחרים (שם) על קיום נקודת היפוך מדרום לנתניה היה נכון רק לתקופת שנים מסוימת.

אומדני כמויות החול המוסעות לאורך החופים, חושבו תוך שימוש בשלוש נוסחאות שונות מקובלות (ראו איור 4). אומדן נוסחת CERC גדול כמעט פי ארבעה מהאומדן לפי נוסחת בייקר וגדול עוד יותר ביחס לאומדן לפי נוסחת LCHF. הסיבה להבדלים בין האומדנים היא שנוסחת CERC מצביעה על כושר ההסעה בחוף מסוים אם קיים חול ללא הגבלה על הקרקעית, והיא גם אינה מתחשבת בתכונות החול המקומי ובצורת צדודית החוף. גם נוסחת LCHF היא נוסחה אנרגטית, אך היא מגלמת מקדם אמפירי, שאמור לפצות על היעדר חול זמין להסעה בגלל רכסי כורכר חשופים. לעומתן, נוסחת בייקר מתחשבת לא רק בשטף אנרגיית הגלים אלא גם בתכונות הסדימנט, בצורת צדודית החוף, במנגנוני ההסעה של החול ברחופת ובגרופת (ליד הקרקעית) וכן בקיום הסעה על ידי זרמים מחוץ לרצועת המשברים. לפיכך בחרנו את האומדן המחושב לפי נוסחת בייקר כקרוב ביותר לנתונים הריאליים של כמויות החול המוסעות לאורך החוף. אומדן כמויות החול המוסעות בשנה ממוצעת מדרום לנמל אשדוד לפי נוסחת בייקר (בהתחשב גם בנוכחות הזרימה הכללית ובחוסר חול בקטעי רכסי הכורכר החשופים או הכמעט-חשופים) הנו בסדר גודל של 400,000 מ"ק צפונה ו-160,000 מ"ק דרומה, כלומר כ-240,000 מ"ק נטו צפונה. בחדרה, 75 ק"מ צפונה לאשדוד, מקבלים כ-340,000 מ"ק צפונה וכ-190,000 מ"ק דרומה, הנותנים רק 150,000 מ"ק נטו צפונה. בחיפה הכמות נטו בשנה ממוצעת יורדת לכ-100,000 מ"ק, אך קיימות גם שנים חריגות, שבהן ההסעה נטו באזור היא דרומה (לדוגמה השנה הסדימנטולוגית מרץ 1996 עד אפריל 1997, שבמהלכה היה אומדן ההסעה נטו בחיפה כ-265,000 מ"ק דרומה (ראו איור 4)).

המקום שבו שוקעת כמות החול נטו החסרה בין אשדוד לחיפה אינו ברור. מכיוון שקיימת גם הסעה של החולות בניצב לחוף, קיימת אפשרות של הסעה לכיוון המים העמוקים; אולם, עובדת היעדרו של חול על הקרקעית בעומקים העולים על 30 מטר עד 32 מטר בקירוב, מעלה ספק באשר להנחה, כי רוב החול החסר מוסע לירכתי החוף. זאת ללא קשר להימצאות רכסי כורכר, הבולטים מהקרקעית בטווח עומקים אלה, שנחשבו (Almagor et al., 1998) כחוסמים את הסעת החול הניצבת, מכיוון שבכל מקרה מרבית הסעת החול בעומקים כאלה תהיה בצורת רחופת. עם זאת ידוע, כי חול מוסע משפת הים אל הדיונות החופיות, בעיקר באזורים שבהם ישנה פריצה במצוק החופי ובשפכי הנחלים. סביר להניח, כי הכמויות שהוערכו בעבר קטנות מהאמיתיות, וכי הדיונות והאזור הבנוי כיום מהווים מלכודת לכמות משמעותית מהחול החסר. האפשרות האחרונה היא כי החול החסר מצטבר בחתך הצדודית, שעל פי נוסחת Dean (Kamphuis, 1998) נחשב כתלול מחתך צדודית בשיווי משקל. אולם, במצב הקיים לא ניתן לבצע מאזן ולדעת לאן "נעלם" החול החסר במאזן; זאת מכיוון שאמצעי המדידה הקיימים עדיין לא מאפשרים מדידה מספיק מדויקת של העומקים (דיוק של כ-30 ס"מ או יותר), וגם משום

שמדידת כמות החול המוסעת ליבשה קשה ולא מדויקת. אם ניחשב עבור קטע החוף בין אשדוד וחיפה, שאורכו 110 ק"מ ורוחבו כ-2.5 ק"מ, את הנפח עבור שינוי אנכי של 1 מ"מ (בממוצע 5 גרגרים) נקבל נפח של 275,000 מ"מ<sup>3</sup> חול - קרוב לאומדן הכמות החסרה; אולם, אומדן סדר הגודל של השינוי השנתי של מפלס הים במאה ה-20 בים התיכון נע בין 1 ל-2 מ"מ (כ-18 ס"מ במאה ה-20). לפיכך, אין כיום מסקנות החלטיות בנושא, ולא נראה כי ניתן יהיה לקבלן לפני שיעברו עוד מספר עשורים.

על פי המודל המחשבתי שפותח, בשנים מתונות כמויות ההסעה נטו קטנות יחסית, ונראה כי רוב החול המוסע לאורך החוף בטווח העומקים של מבנה חוסם נעצר, ואינו עוקף את המבנה החוסם שבדרכו. מצב זה נמשך עד להיווצרות שיווי משקל מקומי סדימנטולוגי חדש (כלומר, עד למיצוי יכולת הלכידה המקסימלית של המבנה והתפתחות שינויים בתימטריים, שמשנים מקומית את משטר ההסעה). כאשר מתרחשות במים עמוקים (מעל שישה-שבעה מטר) סערות מערביות חזקות במיוחד ובעלות גובה משמעותי, הכמויות המוסעות גדלות באופן משמעותי, ולרוב מתרחש מילוי מסוים של החסר ביכולת הלכידה של המבנים; במקביל נוצר גם מעקף של החול שהצטבר בשנים השקטות ליד המבנים, או של החול המגיע מהדרום אל הצד שמצפון למבנים. אולם, במיוחד בסערות הגדולות משתלבת גם הסעה ניכרת בכיוון ניצב לקו החוף, החותרת את שפת הים ומעבירה את החול מסביבתו, תוך כדי שינוי צורת הצדודית ויצירת שרטונות - בדרך כלל בקו עומק 5- מטר בקירוב (וגם 7- מטר בסערות עם גלים משמעותיים במים עמוקים של 7 מטר ומעלה). לכן, בעקבות אירועים של סערות גדולות במיוחד (כפי שאירעו בינואר 1968 ובפברואר 1992), שפת הים נחתרת ודרושות מספר שנים של אקלים גלים מתון לשיקומה. שיקום זה מתרחש על ידי הסעת החול מהשרטונות הנייל לשפת הים על ידי גלים בעלי תלילות מתונה (בעיקר בקיץ), היוצרים הסעה ניצבת לכיוון שפת הים. הוצאת חלק מהחול ממחזור ההסעה על ידי לכידתו מדרום למבנים חופיים, עלולה לגרום לכך, שתהליך השיקום הטבעי לא יספיק להשלים שיקומם של קטעי חוף קרובים מצפון למבנה חוסם, לפני שתתרחש סערה חזקה נוספת.

## מסקנות והמלצות

מסקנת המחקר העיקרית היא כי החוף הישראלי היה יציב יחסית במשך אלפיים השנים האחרונות, עם תנודות שנבעו מתנודות במפלס הים. על פי ממצאים ארכיאולוגיים, מצבו של מפלס הים כיום קרוב מאוד למצבו לפני אלפיים שנה. כיום סובל החוף מארוזיה שנגרמה עקב כריית חול משפת הים במאה ה-20 עד שנת 1965 וכן מחסימת ומלכידת החול על ידי מבנים חופיים לאחר מכן. ייתכן שבעתיד הרחוק, בעוד מאה-מאתיים שנה, יחמיר מצב החופים עקב הפסקה באספקת חול בגין חסימת נהר הנילוס ולאחר תהליך של הידלדלות מקורות החול בחופי סיני. בינתיים ההרס ניכר בדתא של הנילוס, שנסוגה בכחמישה ק"מ מאז סיום בניית סכר אסואן הנמוך בשנים 1905 עד 1965, ובחמישה ק"מ נוספים מאז סיום בניית סכר אסואן הגבוה בשנים 1965 עד 1995. אולם, כבר לפני כן עלול מצב החופים בארץ להחמיר, עקב היתכנות עליית מפלס הים בהשפעת תופעת החממה. טרם ניתן לאמת קיומה של תופעה זו בחוף הישראלי, אך הדבר דורש בחינת השפעות אפשריות אם יתרחש וכן הצעדים שיהיה צורך לנקוט ועלותם.

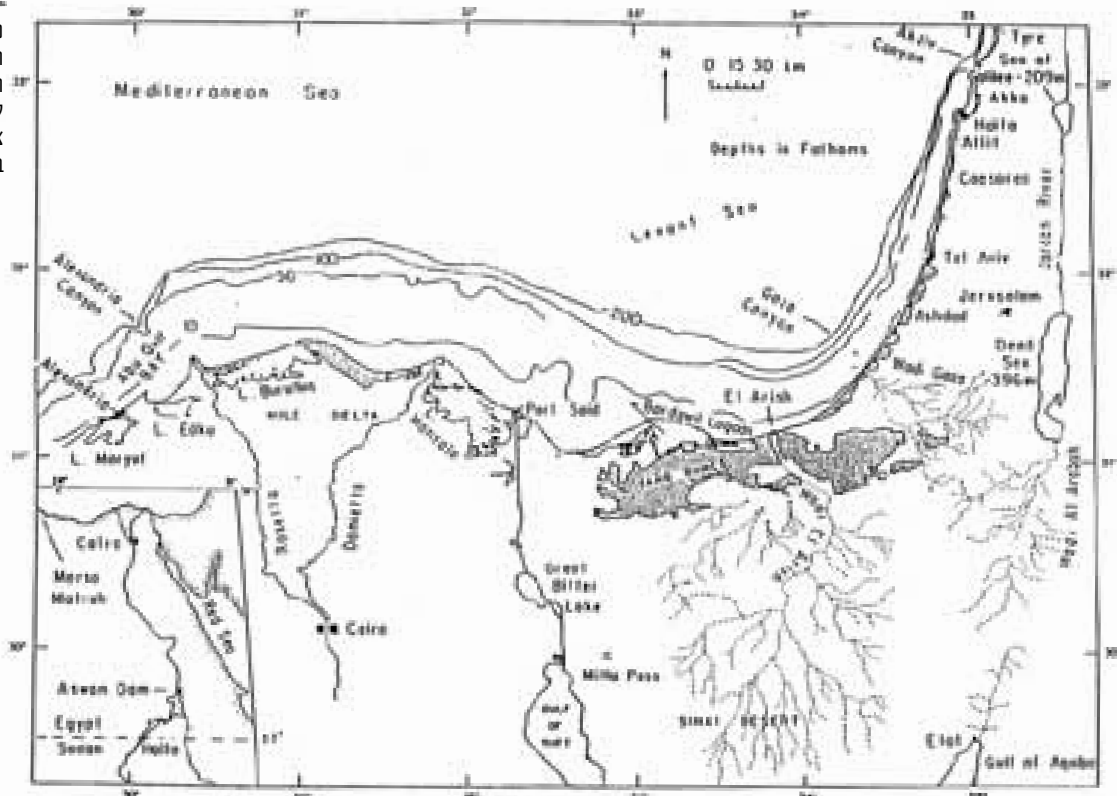
בניית מבנים מלאכותיים בחוף הישראלי, היכולים לגרום לחסימה זמנית (במשך שנים) או תמידית ברצף הסעת החולות לאורך החוף ובמיוחד ללכידה של הפרקציה של הגרגרים הגסים המייצבים את שפת הים - אפשרית, אך חובה שתיעשה אך ורק תוך הבטחה על שמירת רציפות ההסעה של החול על ידי העברה מלאכותית של החול הנחסם צפונה למבנים.

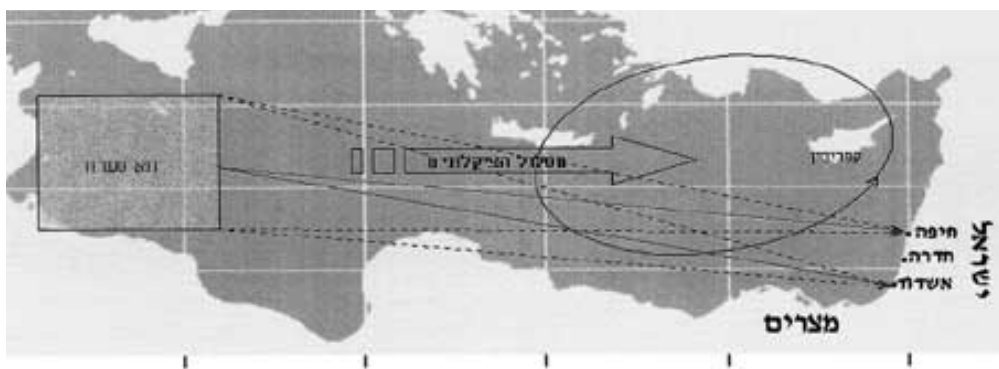
הבעת תודה

עבודת המחקר המוצגת במסמך זה בוצעה תוך שיתוף פעולה בין אנשים וגופים רבים, שחלקם סיפקו נתונים וחלקם לקחו חלק בנייתוח המידע והסקת המסקנות. להלן התודות: לרשות הנמלים על הרשות להשתמש בנתוני הגלים מאשדוד וחיפה, הנאספים על ידה באמצעות המכון להנדסה ימית; בנתוני רוחות ומפלסי ים מאשדוד, שנאספו על ידה באמצעות השיירות המטאורולוגי; ובנתוני זרמים מאשדוד, שנאספו על ידה באמצעות חברת "אוקיאנה מחקרים ימיים"; לשיירות המטאורולוגי עבור נתוני רוחות ולחץ אטמוספרי מתל אביב; לחקר ימים ואגמים לישראל ועובדיה עבור איסוף, עיבוד וניתוח של נתוני זרמים וגלים מאשקלון, נתוני זרמים חדשים בחוף תל ברוך בתל אביב, נתוני גלים, זרמים, מפלסי ים ורוחות מתחנת המעקב 80 ברשת העולמית אחר מפלס הים המוצבת בחדרה, עבור נתוני גלים מחיפה ועבור דיגום החולות בתחום החוף הנחקר. מיפוי מדגמי החול בוצע בקפדנות רבה על ידי היחידה לציוויליזציות ימיות באוניברסיטת חיפה.

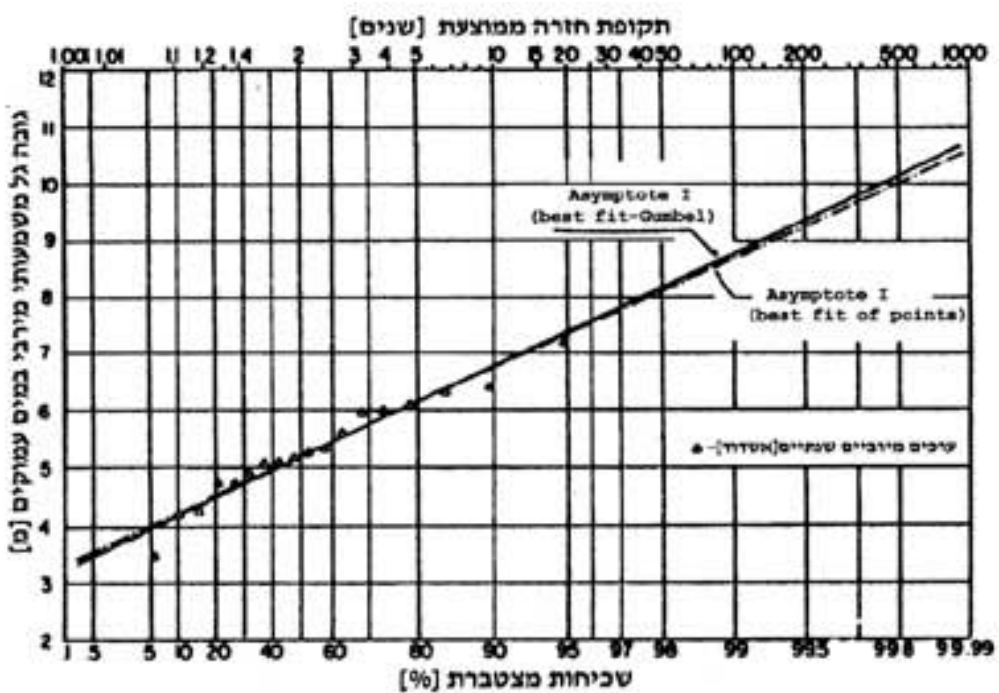
תודתנו לגב' ב. רוחן וצוות המודדים של חברת "דטהמפ מערכות מידע גיאוגרפיות" עבור המאמץ המיוחד בביצוע המיפוי הפוטוגרמטרי והוצאת קואורדינטות לנקודות ציון בשטח החוף הנחקר. מדידת עומקים להכנת המיפוי הימי בוצעה על ידי "אוקיאנה מחקרים ימיים", ונתונים אלה עובדו למפת עומקים וסריג עומקים למודלים הסדימנטולוגיים על ידי מר א. גולן מחקר ימים ואגמים לישראל. צילומי אוויר היסטוריים נרכשו מיחידת הצילום של המרכז למיפוי ישראל והם סופרוו בקפדנות, יושרו ועובדו עד ליצירת שרטוטים השוואתיים של שינויי קו המים וקו המצוק התחתון על ידי אנשי חברת "אופק צילומי אוויר" לפי הנחיותי ולטביעות רצוני. תודתנו גם למר ז. צביאלי מאגף הידרוגרפיה של חיל הים עבור מסירת נתוני שינויי קווי חוף מעובדים באזור מרינה הרצליה ועבור אימות הדיוק של המיפוי הפוטוגרמטרי. תודתנו עבור קבלת מפות עומקים היסטוריות וחומר אחר ממנהלת השפד"ן, מעיריית בת ים, מעיריית תל אביב, מחברת "אתרים" בחוף תל אביב-יפו, ממרינה הרצליה, מעיריית נתניה ומהחברה לפיתוח תיירות נתניה. המפות ההיסטוריות סופרוו ויושרו לרשת ישראל על ידי חברת "מיקרודטה". לבסוף, תודתנו לאנשי מעבדת דלפט להידרוליקה בראשות Prof. M., Stive ו-Jr., Toms, למנהלי המחקר בצד הישראלי וההולנדי ולחברי ועדות ההיגוי עבור הדיונים המפרים ועבור הגיבוי ושיתוף הפעולה הפורה, ובמיוחד למר R. Waterman, סגן יו"ר ועדת ההיגוי ההולנדית, עבור מאמציו בקידום מחקר זה.

איור 1: מקום התא הליטורלי של הנלוס ומקומות עיקריים של צבירת חול בדינות בחוף

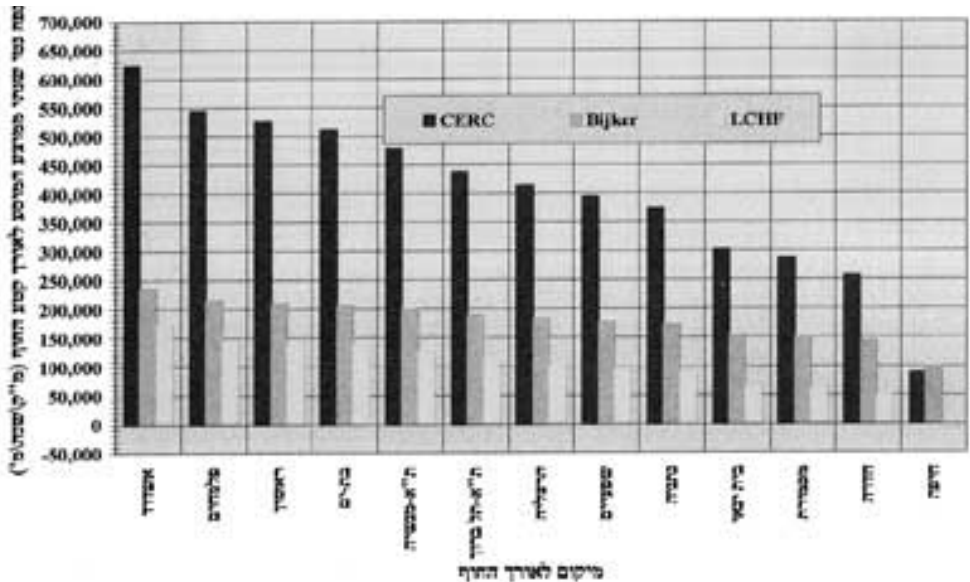




איור 2: מסלול תנועת הצקלונים בסערות החורף ושינוי כיוון הגלים הבו-זמני לאורך החוף הישראלי



איור 4: אומדני הסעה שנתית ממוצעת נטו לאורך החוף הישראלי לפי שלוש שיטות חישוב שונות



איור 3: תקופות חזרה ממוצעות של מצבי ים קיצוניים במים עמוקים בחופי ישראל בים התיכון

## נספח AI: אקלים מפלטי ים

ניתוחי אקלים מפלס הים בחוף הישראלי בים התיכון התבססו על נתונים היסטוריים של ממוצעים שעתיים מאשדוד, מיפו ומחיפה. מאז 1992 הותקנה תחנה מתקדמת למעקב אחר שינויים במפלס הים בקצה מזרחה הפחם בחדרה. כיום מספקת תחנה זו מידע לרשת עולמית למעקב אחר מפלס הים ומוכרת כתחנה ראשית 80 ברשת זו (GLOSS).

בעבר נבחר אופי מפלס הים בישראל על ידי מספר חוקרים (Rosen, 1975; Rosen and Vajda, 1978; Vajda, 1984; Goldsmith and Gilboa, 1985; Inman and Aubrey, 1991) ועוד. חוקרים אלה בחנו שינויים לטווח זמן של עד מספר עשרות שנים על סמך ממוצעים של מפלסים חודשיים מאשדוד, מיפו ומחיפה. עבודות על שינוי מפלס הים בתקופות היסטוריות הוצגו על ידי ארכיאולוגים וגיאולוגים (Nir, 1982, 1986; Raban, 1985; Galili et al., 1988; Mart, 1996; Flemming, 1978).

על פי מחקרי קבוצת החוקרים השנייה הובא מידע על מיקום מפלס הים כיום ביחס לעבר הרחוק, דבר החשוב להבנת התהליכים האקלימיים והסדימנטולוגיים. על פי נתונים אלה ניתן לומר, כי מפלס הים כיום כמעט זהה לזה שהיה לפני אלפיים שנה, אך מאז היו תקופות של תנודות ברום מפלס הים הממוצע הרב-שנתי בסדר גודל של כ-50 ס"מ. הדבר חשוב לאור התחזיות העולמיות להיתכנות עליית מפלס הים הממוצע העולמי במאה הבאה עקב תופעת החממה. מדובר על כעשרים ס"מ ב-2030 ועד כשבעים ס"מ ב-2100. אולם, מקובל על רוב החוקרים, כי השינויים האזוריים יכולים להיות שונים באופן משמעותי עקב תנועות פלטות הקרקע וגורמים אחרים. המידע הקיים בארץ עדיין לא מאפשר הסקת מסקנות חד משמעיות באשר למגמת השינויים וקצבם; זאת מאחר שהשינויים העונתיים בהשפעת גורמי סביבה שונים גדולים בסדר גודל אחד מהשינויים שייתכנו בשנים הקרובות.

על פי מיקומה של ישראל על כדור הארץ, מועדי הים האסטרונומיים (המוכרים גם בשם גאות ושפל) תורמים את התרומה העיקרית לשינויים במפלס הים במהלך השנה, כאשר המפלסים הנמוכים מתקבלים בפברואר-מרץ והגבוהים ביותר (מלבד במצבי סערה) באוגוסט. בלנק ורוזן (1998) הראו, כי הגורם העיקרי לשינוי זה הוא ריחוקו השונה בחורף ובקיץ מהשמש, וכי רק באופן משני קיימת תרומה נפחית עקב הבדלי טמפרטורת מי הים בחורף ובקיץ.

בלנק (1998) ניתח (בהנחיית הכותב) 19 שנות נתונים שעתיים של מפלס הים מאשדוד, ולראשונה ונתקבל בארץ הקשר בין רום פני ים ממוצעים, פני מים גבוהים ונמוכים ואפס האיזון הארצי (+2.73 ס"מ, +17.77 ס"מ ו-11.92 ס"מ ביחס לאפס האיזון הארצי בהתאמה).

טווח מועדי הים האסטרונומיים הנו כ-30 ס"מ בקירוב (כ-40 ס"מ בירח מלא וכ-15 ס"מ במועד נסוג). מועדי הים הם בעלי מחזוריות חצי-יממית, דו-שבועית, ירחית ושנתית. בחורף, בהשפעת רוחות וגלים בזמן סערות, יכול מפלס הים לעלות בצורה משמעותית בשפת הים עד למעלה ממטר אחד.

חישוב אקלים מפלטי ים קיצוניים, ללא הכללת תרומת תופעת החממה, נעשה על סמך נתוני המפלסים מחדרה ואשדוד. אומדן המפלסים למצבים קיצוניים (ללא תרומת נד רוח) מוצג בטבלה להלן.



**טבלה 1:** אומדן ערכים של מפלסי ים קיצוניים בחוף ישראל בים התיכון (ללא תרומת נד רוח או תופעת החממה)

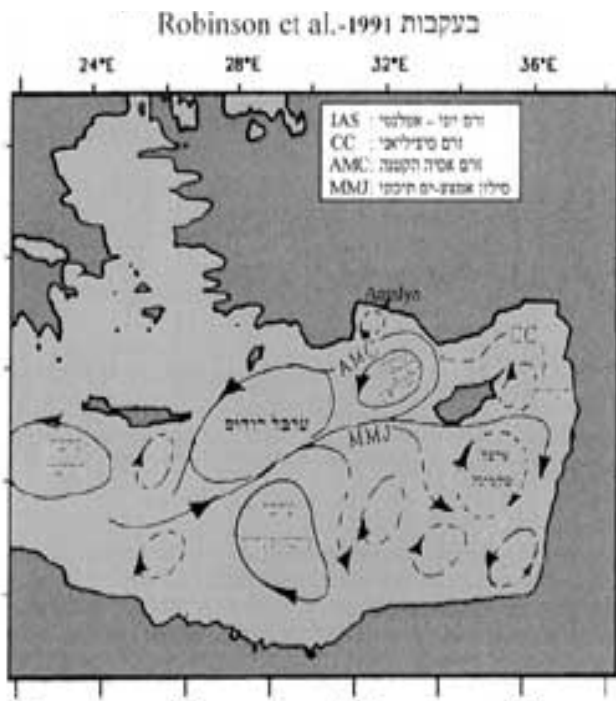
מפלס מי ים גבוה (מטר)	מפלס מי ים נמוך (מטר)	תקופת חזרה ממוצעת (שנים)
0.64	-0.38	1
1.04	-0.74	50
1.10	-0.87	100

### נספח A2 - אקלים הזרמים

#### משטר הזרמים במים עמוקים במי החופים של ישראל בים התיכון

בקרב החוף הישראלי, תנועת הזרימה הכללית, שנגרמת בעיקר על ידי הזרם הגיאוסטרופי, היא צקלונית; כיוון תנועה זו מנוגד לכיוון השעון (צפונה) רוב הזמן, והיא מקבילה לקו החוף, אך לעתים יכולה לשנות כיוון ולנוע בכיוון

הפוך למשך מספר ימים עד שבועות. רוב הזמן הזרמים חלשים במהירויות של כ-10 ס"מ/שנייה (0.2 קשר). הפרוס האנכי של מהירות הזרמים בחורף די אחיד, אך בקיץ המהירות קטנה בכיוון הקרקעית. כמו כן, בפרוס ניצב לחוף, ניתן לציין אזור של מהירות זרימה כללית די אחידה בטווח קווי העומק 30 עד 100 מטר, לאחריו תחום של הגדלת המהירות באחוזים בודדים עד מספר עשרות אחוזים (בין קווי עומק 100 מטר עד 150 מטר), ולאחר מכן ירידה לערך שקרוב לזה שבין 30 מטר עד 100 מטר בקירוב. בין קו עומק 30- מטר וקו החוף ישנה הקטנה של הזרם הגיאוסטרופי לכיוון החוף, עד כמעט אפס בקו החוף; אולם, במקרים מסוימים נצפו ונמדדו זרמים בעלי מהירות של למעלה מ-2 קשר. תרומת הרוח לעוצמת הזרמים ולכיוונם משמעותית ביותר ולרוב השלטת. תיאור הסירקולציה האופיינית באגן המזרח התיכון מוצג באיור 5 להלן.



**איור 5:** תבנית זרימה כללית עקרונית באגן המזרחי של הים התיכון

#### התפתחות זרמים ברצועת המשברים בהשראת הגלים

בתוך רצועת המשברים מתפתחים זרמים מושרים על ידי הגלים. עוצמתם קשורה ישירות בערכי אפיוני הגלים, במיוחד הגובה וזווית ההתקרבות ביחס לניצב לקו החוף. ניתן להבחין בעיקר בשני סוגי זרמים חשובים: הזרם האורכי, המסיע סדימנטים לאורך החוף, וזרמי פריצה חזקים מאוד הנעים מהחוף אל גבול רצועת המשברים כמעט בניצב לחוף.

### מאפיינים סטטיסטיים

אפיון הזרמים של הזרימה הכללית התבסס על מדידות זרמים באשקלון, באשדוד, בנתניה, בחדרה ובעתלית, שבוצעו בעבר בעיקר בקווי עומק שמעל 20 מטר. לצורך הפרויקט הוחל באמצע פברואר 1998 למדוד גם את הזרמים בכל עמודת המים בעזרת מד זרם לפי אפקט דופלר מול חוף תל ברוך בעומק של 15 מטר.

### נספח A3: אקלים הרוחות

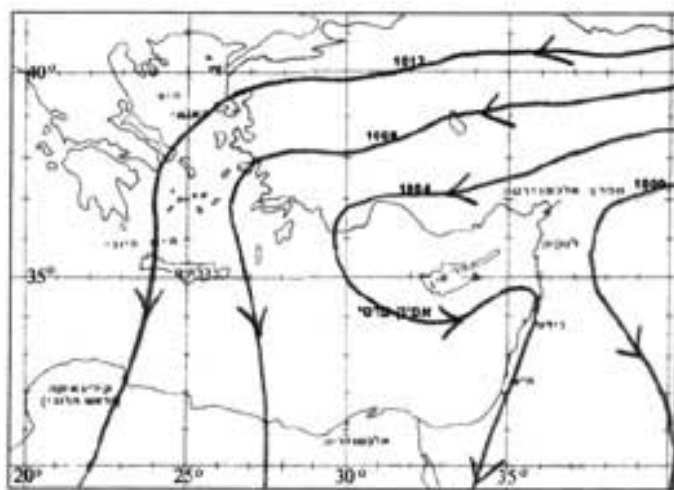
#### כללי

משטר הרוחות מכתוב את האפיונים של גלי הרוח, אך פועל ישירות גם על כלי שיט ומשפיע גם על זרמים המתפתחים בעיקר בתחום שמחוץ לרצועת המשברים ותחום המים הרדודים, במרחקים של למעלה משני ק"מ מהחוף.

#### משטר הרוחות במי החופים של ישראל בים התיכון

בעונת הקיץ, בעיקר מאמצע יוני עד אמצע ספטמבר, כתוצאה מהחום הגבוה מעל אסיה, נוצר מעל היבשת השקע המונוסוני - שקע עמוק יחסית, הנוצר די יציב במשך כל תקופה זו. מתוך שקע זה נשלחת שלוחה של אפיק הקרוי "אפיק פרסי", העובר דרך פרס, עירק וסוריה, מקיף בהמשך את טורקיה, חוזר דרך קפריסין לישראל ומשם פונה דרומה למצרים ולמזרח אפריקה (ראו איור 6). בהשפעת האפיק הפרסי מתקבלים לחצים נמוכים יותר בדרום טורקיה ובאזור קפריסין מאשר בתחום מי החופים של ישראל בים התיכון, הגורמים להתהוות גרדיאנט עם רוח הנושבת בכיוון מערב בקירוב. תנודות בגרדיאנט זה יכולות לשנות במקצת את עוצמת הרוח (המהירות), שלרוב נמצאת בטווח שבין 5 עד 8 קשר, וכן את כיוונה.

איור 6: תיאור אופייני של מצב אפיק פרסי בקיץ



מהאביב עד הסתיו נושבת ברצועה הקרובה לחוף בים וביבשה רוח הבריזה. מהירותה של רוח זו היא בסדר גודל של כ-3 עד 5 קשר, והיא נוצרת עקב הפרשי טמפרטורה של אזור החוף והים. כיוון הבריזה ומהירותה משתנים במשך היממה כמתואר להלן: בשעות הבוקר הבריזה נושבת אל היבשה עקב התחממות מהירה יותר של היבשה מאשר הים; אחר הצהריים נושבת הבריזה לכיוון הים עקב התקררות יותר מהירה של

היבשה בשעות הערב והלילה, לעומת טמפרטורת מי הים הנוותרת כמעט ללא שינוי בין יום ולילה (שינוי של כ-1%). מכיוון שהגרדיאנט של האפיק הפרסי אינו גבוה במיוחד, הופכת רוח הבריזה בתקופה זו להיות בעלת השפעה משמעותית על משטר הרוחות, שמשתנה במהלך היממה מבחינת מהירות הרוח וכיוונה.

בשעות הבוקר המאוחרות (9-10) הרוח נושבת מדרום-מערב בעוצמה של 5-8 קשר, בשעות הצהריים משנה כיוון למערבית בעוצמה של כ-8-10 קשר, בשעות אחר הצהריים (14:00-17:00) הופכת לצפון-מערבית בעוצמה של 10-15

קשר, ודועכת לגמרי לקראת הלילה. בלילה אמורה להיווצר רוח בעלת כיוון כללי מזרחי כלפי היבשה; אולם, דבר זה נוגד את המרכיב המערבי של הרוח, שנובע מהגרדיאנט של אפיק השקע המונסוני, ובפועל מנטרל אותה לחלוטין או כמעט לחלוטין. בשעות הבוקר המוקדמות (4-6) קורה לעתים, שכאשר טמפרטורת היבשה נמצאת במינימום, גוברת הרוח הנגרמת על ידי האפיק הפרסי ומתקבלת רוח מזרחית או דרום-מזרחית בעוצמה של 3-5 קשר. יצוין, כי בתחילת הקיץ, כאשר מי הים עדיין קרים יחסית והיבשה חמה, מהירותה של רוח הבריזה גבוהה יותר מאשר באוגוסט, כאשר טמפרטורת מי הים קרובה מאוד לטמפרטורת היבשה.

בעונת החורף מזג האוויר נשלט על ידי מעבר מערכות צקלוניות הנעות ממערב למזרח (כמסומן באיור 2), שבהן כיוון נשיבת הרוחות הוא נגד כיוון השעון במשיק לקווי שווי הלחץ האטמוספרי. מעבר הצקלונים גורם למצבים מאוד בלתי יציבים, כשמרבית הרוחות הנושבות נעות בתחום הכיוונים דרום-מערב עד צפון-מערב דרך מערב. אורך משב הרוח המרבי הנו בכיוון מערב (ראו איור 2), ולכן זהו הכיוון שממנו מתקבלים בחוף הישראלי הגלים הגבוהים ביותר. למרות שהשקעים בים התיכון באופן כללי קטנים יחסית לאלה המתפתחים בקווי רוחב צפוניים יותר, הם עדיין מסוגלים להביא להתפתחות רוחות חזקות בקצב מהיר יחסית. הצקלונים נעים יחסית לאט, ונדרשים לרוב מספר ימים לנוע באגן המזרחי של הים התיכון. לעתים הצקלונים נשארים ללא תנועה במשך יום או יומיים באזור קפריסין; במצבים כאלה מתקבלים מצבי רוחות, הנושבות מכיוונים מערביים במשך זמן רב יחסית, דבר הגורם להתפתחות גלים גבוהים בחוף הישראלי בים התיכון.

הצקלונים עוברים גם בעונות האביב והסתיו, אך באביב עוצמת השקעים יורדת באופן הדרגתי מתנאי חורף לתנאי הקיץ, והפוך בסתיו. בנוסף למצבים האופייניים שתוארו לעיל צריך להזכיר מספר סוגי רוחות, המתפתחות במצבים מיוחדים. המצב הראשון מתרחש לרוב באביב ובסתיו ויוצר את רוח השרב. הדבר מתרחש כאשר נוצר שקע שנע לאורך המדבר הלווי, הנע לכיוון מזרח מעל אפריקה. מיד בהגיעו למצרים מתקבלת ירידה חדה בלחץ האטמוספרי ומתפתחות רוחות מזרחיות בארץ. כתלות בגודל השקע מתקבלות רוחות שמהירותן מ-5 עד 10 קשר בשקע רדוד וכאלה שמהירותן 30 עד 40 קשר בשקע עמוק. לפעמים השקע נע לאחר מכן צפונה וגורם להתפתחות מהירה של גלים דרום-מערביים עד מערביים בעיקר במרכז חופי הארץ ובצפונם.

### אפיון סטטיסטי של משטר הרוחות במי החופים של ישראל בים התיכון

בארץ נמדדה הרוח בעבר על ידי השירות המטאורולוגי שמחזיק את בסיס הנתונים של הרוחות, אך גם על ידי מספר גופים כגון חברת החשמל, חקר ימים ואגמים לישראל, חיל האוויר וחיל הים. שלושת האחרונים התרכזו בעיקר במדידות רוח בקרבת שפת הים או בים. סטטיסטיקות של רוח בחוף הים ובים הוכנו על ידי (Rosen and Vajda, 1978) בקשר לתכנון מזח הפריקה בחדרה. נתונים עדכניים לעבודה הנוכחית נתקבלו מהתחנה בנמל אשדוד, מהתחנה בשדה דב בתל אביב ומהתחנה 80 ברשת העולמית למעקב אחר שינוי במפלס הים, המופעלת על ידי חקר ימים ואגמים לישראל בקצה המזח לפריקת פחם בחדרה וממוקמת 2.2 ק"מ בתוך הים (על קו עומק 27- מטר). כל נתוני הרוח מבוססים על מדידה בגובה סטנדרטי של 10 מטר מעל פני הים. הנתונים מאשדוד ומחדרה הם ערכים ממוצעים שעתיים, לעומת אלה משדה דב, הכוללים ערכים תלת-שעתיים רגועים בלבד. להלן ממצאי הניתוחים הסטטיסטיים:

## שכיחות ממוצעת שנתי של מהירות הרוח

### חוף אשדוד (1958-1971)

רוחות קלות (פחות מ-10 קשר/18 קמ"ש)	81.4%~מהזמן
רוחות ערות (בין 11 ל-21 קשר/19 עד 37 קמ"ש)	81.3% מהזמן
רוחות חזקות (בין 22 ל-33 קשר/38 עד 60 קמ"ש)	1.2% מהזמן
רוחות סערה (מעל 33 קשר/60 קמ"ש)	פחות מ-0.1% מהזמן

### חוף אשדוד (1992-1995)

רוחות קלות (פחות מ-10 קשר/18 קמ"ש)	84.3%~מהזמן
רוחות ערות (בין 11 ל-21 קשר/19 עד 37 קמ"ש)	15.3% מהזמן
רוחות חזקות (בין 22 ל-33 קשר/38 עד 60 קמ"ש)	0.45% מהזמן
רוחות סערה (מעל 33 קשר/60 קמ"ש)	פחות מ-0.1% מהזמן

### חוף תל-אביב (1971-1997)

רוחות קלות (פחות מ-10 קשר/18 קמ"ש)	79.6%~מהזמן
רוחות ערות (בין 11 ל-21 קשר/19 עד 37 קמ"ש)	18.9% מהזמן
רוחות חזקות (בין 22 ל-33 קשר/38 עד 60 קמ"ש)	0.36% מהזמן
רוחות סערה (מעל 33 קשר/60 קמ"ש)	פחות מ-0.1% מהזמן

### בים מול חוף חדרה (1995-1997)

רוחות קלות (פחות מ-10 קשר/18 קמ"ש)	69.8%~מהזמן
רוחות ערות (בין 11 ל-21 קשר/19 עד 37 קמ"ש)	28.2% מהזמן
רוחות חזקות (בין 22 ל-33 קשר/38 עד 60 קמ"ש)	1.93% מהזמן
רוחות סערה (מעל 33 קשר/60 קמ"ש)	פחות מ-0.1% מהזמן

## התפלגות כיוונית שנתי של הרוח

### חוף אשדוד (1958-1971)

- כ-77% מהרוחות הערות נושבות מהכיוונים מערב עד צפון דרך צפון-מערב.
- כ-77% מהרוחות החזקות נושבות מהכיוונים דרום-מערב עד מערב דרך מערב-דרום-מערב.

### חוף אשדוד (1992-1995)

- כ-52% מהרוחות הערות נושבות מהכיוונים מערב עד צפון דרך צפון-מערב.
- כ-49% מהרוחות החזקות נושבות מהכיוונים דרום-מערב עד מערב דרך מערב-דרום-מערב.

### חוף תל אביב (1971-1997)

- כ-39% מהרוחות הערות נושבות מהכיוונים מערב עד צפון דרך צפון-מערב.
- כ-47% מהרוחות החזקות נושבות מהכיוונים דרום-מערב עד מערב דרך מערב-דרום-מערב.

### בים מול חוף חדרה (1995-1997)

- כ-30% מהרוחות הערות נושבות מהכיוונים מערב עד צפון דרך צפון-מערב.
- כ-16% מהרוחות החזקות נושבות מהכיוונים דרום-מערב עד מערב דרך מערב-דרום-מערב.

### התפלגות עונתית על בסיס נתוני אשדוד (1958-1971)

כ-94% מהרוחות הערות מתרחשות בין נובמבר עד מרץ ועד בכלל, כ-60% מהרוחות החזקות מתרחשות בחודשים ינואר ופברואר.

השוואה בין שכיחויות הרוח בים בחדרה לעומת השכיחויות בחוף בתל אביב מראה, כי אקלים הרוחות בים מעיד על מהירויות רוח גדולות מאלה הנמדדות בחוף, דבר הידוע גם ממחקרים שבוצעו במקומות אחרים בעולם. בנוסף יצוין, כי מהשוואה בין אקלים הרוחות בים בחדרה לבין זה שנמדד בחוף באתרים היותר דרומיים, עולה כי בתחנה הימית נמדד תחום רחב יותר של כיווני רוחות חזקות.

כמו כן ראוי להזכיר, כי הנתונים החדשים מאשדוד ומתל אביב, שמכסים את התקופה של פברואר 1992, כלל לא מצביעים על רוחות בעלות מהירויות קיצוניות. למרות זאת ידוע, כי לפחות בימים 4-6 בפברואר 1992 אירעו מצבים עם מהירויות רוח מעל 50 קשר.

### נספח A4: אקלים הגלים

#### מקורות היווצרות הגלים בחוף הים התיכון של ישראל

תופעת התפתחות הגלים בפני הים נגרמת על ידי גורמי סביבה שונים. הגלים העיקריים המשפיעים על התהליכים המתרחשים באזור החוף הם גלי הרוח, אך קיימים גלים נוספים בעלי השפעה על המתרחש באזור החוף, כגון גלים מועדי הים וגלים המתפתחים בעקבות רעידות אדמה (צונמי). ניתן לתאר התפלגות מקורבת של אנרגיית הגלים בפני הים על פי זמן המחזור (המגדיר את אורך הגל) ועל פי סוג הכוח המעורר הראשי והכוח המאזן הראשי.

בהמשך נתייחס בעיקר לגלי רוח, התוקפים את אזור החוף של ישראל. גלים אלה מאופיינים על ידי גובה הגל (המדוד בין שפל הגל לשיא הגל), זמן המחזור של הגל (משך הזמן הדרוש למעבר שני שיאים עוקבים של גלים זהים דרך נקודה קבועה) וכיוון התקדמותו של הגל. המרחק בין שני שיאים של גלים נקרא אורך גל, ומהירות התקדמות

הגל (הנקראת חפזות הגל; celerity) מוגדרת על ידי היחס בין אורך הגל לזמן המחזור. כללית ניתן למיין את הגלים לפי מיקומם ביחס למיקום היווצרותם על ידי פעולת נשיבת הרוח על פני המים.

כאשר הגלים המתפתחים נעים בתוך אזור היצירה הם נקראים גלי רוח (sea waves), ואפיוניהם (זמן המחזור, גובה הגל וכיוון התקדמותו) תלויים במשך הזמן של נשיבת הרוחות, בעוצמת הרוחות ובאורך התחום של נשיבת הרוח (fetch); כיווני התנועה שלהם יהיו בטווח של  $\pm 90^\circ$  לכיוון נשיבת הרוח.

כאשר הגלים מתקדמים אל תחומים שמחוץ לאזור בו נוצרו, מתחילה הפרדה בין הגלים בעלי זמני המחזור השונים. הגלים בעלי זמני המחזור הארוכים יותר נעים במהירות גבוהה יותר מהגלים הקצרים יותר. לכן, במרחק מסוים מאזור היצירה שבו נושבת הרוח, ניתן יהיה להבחין בגלים בעלי חזיתות ארוכות וזמני מחזור ארוכים, המתקדמים לכיוון החופים למרות שאין שם רוחות מקומיות. גלים אלה נקראים גלי גיבוע (swell). הגלים נעים בים לכיוון החופים מבלי לשנות את ערכי האפיונים שלהם, כל עוד המים עמוקים דיים כך שלא תורגש השפעת הקרקעית. כאשר הגלים מתקרבים לחופים הם מתחילים "להרגיש" את הקרקעית, ומאותו רגע מתחילים לשנות את אפיוניהם, כפי שיתואר להלן.

גלי הרוח המגיעים אל החוף הישראלי נוצרים באגן הים התיכון על ידי הרוחות הנושבות, ומכאן שמשטר הרוחות מכתוב את האפיונים של גלי הרוח. כפי שלמדנו לעיל אודות הרוח, בעונת החורף מזג האוויר נשלט על ידי מעבר מערכות צקלוניות הנעות ממערב למזרח, כמודגם באיור 2. במערכות אלה כיוון הרוח הוא נגד כיוון השעון, משיק לקווי האיזוברים. מעבר הצקלונים גורם למצבים מאוד בלתי יציבים. כמודגם באיור 2, אורך משב הרוח המרבי הנו בכיוון מערב, ולכן זהו הכיוון שממנו מתקבלים הגלים הגבוהים ביותר. הצקלונים נעים יחסית לאט, ולרוב נדרשים לנוע מספר ימים באגן המזרחי של הים התיכון. לעתים הצקלונים נשארים ללא תנועה במשך יום או יומיים באזור קפריסין. במצבים כאלה מתקבלים מצבי רוחות הנושבות מכיוונים מערביים במשך זמן רב יחסית, דבר המחולל התפתחות גלים גבוהים בחוף הישראלי בים התיכון. מעבר הצקלונים מתרחש גם באביב ובסתיו, אך באביב עוצמת השקעים יורדת באופן הדרגתי מתנאי חורף לתנאי הקיץ, והפוך בסתיו.

עקב העובדה שהגלים שנוצרו בתא סערה מסוים נעים בכיוונים שונים, הגלים המתקרבים למקום מסוים יהיו רק גלים ממרווח כיוונים מסוים. לכן, כפי שמתואר באיור 2, הכיוון הממוצע של הגלים במים עמוקים בקרבת החוף יהיה שונה לאורך החוף.

## הגדרת מונחים ואפיוני גלים

ניתן לסווג את גלי הרוח לשלוש קבוצות, על פי טווח הזמן שבו מעוניינים לבחון את השפעות הגלים: קצר, ארוך וקיצוני. בטווח הזמן הקצר עוקבים אחר הקשרים בין הגלים השונים במשך זמן קצר, על ידי בחינת הקשרים בין הפרמטרים המאפיינים כל מצב ים בטווח זמן קצר. בדיקת השתנותם של פרמטרים אלה במשך ימים, חודשים ושנים אפשרית על ידי אפיון מצב הים לטווח זמן ארוך, והשתנות פרמטרים אלה בטווחי זמן של שנים רבות (עד מאות ואלפי שנים) ניתנת על ידי אפיון לטווח זמן קיצוני.

על פי ניתוחים של מדידות גלים בחופי ישראל - באשדוד, בחדרה ובחיפה, נמצא כי פרוס ריילי תופס בדרך כלל עבור הגלים שנמדדו, ולכן כל עוד מדובר בגלים בתחום מים עמוקים או בתחום ביניים, ניתן להשתמש בהנחת

פרוס ריילי לתיאור הקשר בין הגלים במצב ים נתון. כמו כן נמצא, כי הצורות הספקטרליות יכולות להיות שונות במידה משמעותית מהצורה בעלת שיא יחיד של פירסון-מוסקוביץ, ובמקרים לא מעטים התקבלה ספקטרה עם יותר משיא אחד, דבר שהצביע על שילוב של יותר ממערכת גלים אחת (למשל גלי רוח מקומיים יחד עם גלי גיבוע או שתי מערכות גלים, הנעות בכיוונים ממוצעים שונים). בחינת ספקטרה בזמן התרחשותן של מספר סערות גדולות יחסית, הצביעה על צורה ספקטרלית הקרובה יותר לצורת JONSWAP, אך בעלת שיא ספקטרי נמוך יותר.

יחד עם זאת, ככל הידוע לנו, עדיין לא קיים ניתוח סטטיסטי מקיף של אפיוני הצורות הספקטרליות בחוף הישראלי בים התיכון על פי רמות אנרגיית הגלים והעונתיות.

לא ידוע גם על ביצוע מחקר סטטיסטי מסודר לבחינת הספקטרום הכיווני של גלי הים בחוף הישראלי, מאחר שאמצעי המדידה מבוססים על מדידה בנקודה אחת; דבר זה אינו מאפשר תיאור מפורט של הספקטרום הכיווני של הגלים אלא רק את הכיוון העיקרי, את הכיוון הממוצע ואת התחום שממנו מתקרבים גלים שזמני המחזור שלהם שונים.

## אפיוני גלים לטווח זמן ארוך מונחים וקשרים סטטיסטיים

לטווח זמן ארוך אקלים הגלים מאופיין על ידי פונקציית ההסתברות המשותפת של הגובה המשמעותי של הגלים, זמן המחזור של שיא הספקטרום או זמן המחזור הממוצע וכיוון הגלים הממוצע או של הגלים בשיא הספקטרום. ניתוחים של מדידות גלים בעולם ובחופי ישראל (רוזן וקיט-1981) הראו, כי ניתן לקבל נתוני התפלגות מהימנים יחסית של גובהי הגלים לטווח זמן ארוך על ידי הנחת פרוס וייבול או לוג-נורמל.

## מקורות מידע על אפיוני הגלים

בסיס המידע של אפיוני הגלים בחוף הישראלי הוא בנק נתוני הגלים, שנמדדו בחופי ישראל מאז שנות ה-50, המצוי בחקר ימים ואגמים לישראל. עיקר המידע לטווח זמן ארוך מבוסס על מדידות גלים שבוצעו בחוף אשדוד מאז 1958, ובתקופות קצרות יותר בחופי אשקלון, תל אביב, חדרה וחיפה. כמו כן קיימות סטטיסטיקות של אפיוני הגלים כפי שנמדדו מספינות ועובדו על ידי הצי האמריקאי בים התיכון, ששימשו לאימות מידע.

שיטות מדידת אפיוני הגלים השתכללו במהלך השנים. עד שנות ה-60 של המאה התבססו נתוני הגלים על תצפיות עין של גובה הגל, זמן המחזור וכיוון ההתקרבות. בין השנים 1958 עד 1971 נמדדו הגלים באשדוד על ידי תצפיות עין בעזרת משקפת וסרגל גובה. המדידה כללה רישום שלוש פעמים ביממה בשעות האור של גובה שיא המשבר המרבי מעל האופק, שנצפה במשך עשר דקות בקרוב. כמו כן נמדד זמן המחזור הממוצע על בסיס ספירת עשרה גלים, ונצפה כיוון הגלים על ידי צפייה במשקפת וייחוס לצפון של מצפן ידני. על בסיס ההנחה, כי השיא שנמדד מהווה כ-75% מגובה המשבר המרבי, חושב גובה גל המשבר המרבי, ובהתבסס על הנחות שונות וקשרים אמפיריים שנקבעו במחקרים שונים חושבו אפיוני הגלים במים עמוקים. מובן כי שיטה זו אינה מדויקת, במיוחד בנוגע לכיוון הגלים, אך למרות זאת תכנון מזה הפחם בחדרה התבסס על הנתונים המעובדים על בסיס הנתונים הגולמיים הנייל, והניסיון מוכיח כי אפיון משטר הגלים היה משביע רצון. בין 1973 ל-1975 בוצעו מדידות הגלים באשדוד על ידי מדידת גובה הגל המרבי על ידי צפייה במוט אנכי, שהוצב באשדוד בקו עומק מים של 12 מטר, כאשר זמן המחזור

והכיוון נקבעו כמקודם. בתחילת שנות ה-70 פותח מד גלים צף רוכב גלים (waverider) על ידי חברת Datawell, אשר רשם על נייר את שינוי פני הים ואפשר על ידי כך למדוד את גובה הגלים ואת זמן המחזור שלהם למשך זמן קצר, לרוב במשך עשרים דקות אחת לשלוש שעות.

מכשיר זה הפך נפוץ, והוצב לראשונה בארץ בחיפה ב-1974 למשך מספר חודשים בקשר לתכניות ההרחבה של נמל חיפה. ב-1976 הועבר לאשדוד, ופעל שם עד 1978 עם הפסקות. ב-1978 הועבר המכשיר מול חוף חדרה למשך שנה בקשר לתכנון מזח הפחם בחדרה, ומאז 1979 הוצב מול חוף אשדוד, מצפון לנמל, בעומק מים של עשרים מטר בקירוב. מכשיר זה עדיין לא אפשר למדוד בעזרת מכשור בצורה אמינה את כיוון הגלים, שנקבע בצורה ויזואלית תוך הסתייעות במשקפת ובמצפן; כמו כן, עד 1978 נעשו כל מדידות הגלים על ידי רישום על סרטי נייר, דבר שלא אפשר ניתוח מתוחכם של נתוני הגלים לשם קביעה מדויקת של ערכי הגובה המשמעותי או האופייני ושל זמני המחזור ובחינת הצורות הספקטרליות. החל מ-1978 נרשמו הגלים על סרטים מגנטיים ועובדו במחשב, דבר שאפשר לבחון בצורה מהימנה את אפיוניהם לטווח זמן קצר וארוך. באפריל 1992 הוצב מד גלים כיווני צף במקום מד הגלים הלא-כיווני בעומק מים של 24 מטר מצפון לנמל אשדוד, והוא פועל עד היום.

אתר נוסף שבו נמדדו אפיוני הגלים היה חוף תל אביב, שבו בוצעו תצפיות ויזואליות של הגלים בשנות ה-60 וה-70 למשך תקופות קצרות (שנה בין 1962 ל-1963 ומספר חודשים בתקופה 1971-1972).

אתר נוסף שבו בוצעה מדידת גלים ויזואלית בייחוס למוט שהוצב בעומק מים של עשרה מטר, בוצעה גם בחדרה במשך למעלה משנה בין 1974 ו-1975, במקביל למדידות שבוצעו באשדוד. ניתוח שפורסם ב-1977 הצביע על קיום כיווני גלים שונים בו-זמניים במים עמוקים באשדוד ובחדרה. מאז 1979 הוחל בביצוע מדידות גלים בעזרת מד גלים צף לא כיווני ליד מזח הפחם בחדרה, כאשר עד 1982 נרשמו המדידות על סרטים מגנטיים ועובדו בצורה מסודרת. מאז ועד סוף שנות ה-80 נרשמו המדידות רק על נייר, ורק בתחילת שנות ה-90 הוחל ברישום מסודר מחדש של מדידות הגלים על מדיה מגנטית, אך ככל הידוע עד היום נתונים אלה לא מעובדים עיבודים ספקטראליים.

מאז סוף 1991 הציבה חקר ימים ואגמים לישראל תחנת מעקב מתוחכמת בקצה המזח בחדרה למעקב אחר שינויים במפלס הים לטווח ארוך. ציוד התחנה מאפשר למדוד בין היתר גם את אפיוני הגלים הכיווניים לטווח זמן קצר במשך 17 דקות מדי שעה ברציפות, וזאת בעזרת מד לחץ מדויק וריגיש מאוד ובשילוב מד-זרם כיווני נייד. בעזרת ציוד זה מתאפשרת מדידת גלים בעלי זמני מחזור העולים על עשרים שניות, תחום בו מדי הגלים הצפים אינם מודדים בגלל בעיות תדירות עצמית. במקביל למדידות הנ"ל מתקבלים נתונים של מפלס הים הממוצע על פני מחצית דקה, כל חצי דקה ברציפות לאורך השנים (למעט הפסקות תחזוקה או תקלות). מלבד אינפורמציה על מפלס הים, מספקים נתונים אלה מידע גם על גלים בתחומי זמני מחזור של דקה ומעלה, אשר לא ניתנים למדידה על ידי מדי הגלים הצפים.

אתר נוסף בו נמדדו אפיוני הגלים בצורה אינסטרומנטלית הוא חוף אשקלון. בין 1983 ל-1989 בוצעו מדידות של גלים במים רדודים בעזרת מערכת מדי לחץ CAS שפותחה על ידי מכון Scripps. בין 1992 ל-1994 בוצעו מדידות גלים בעומק מים של 27 מטר מצפון למעגן קצא"א בעזרת מערכת זהה למערכת המוצבת בחדרה.

האתר האחרון שבו יש מידע אינסטרומנטלי הוא חיפה (למעשה במספר מיקומים). כפי שנאמר לעיל, בשנת 1974 בוצעה מדידה של הגלים במפרץ חיפה במשך חודש או חודשיים ובווצעו תצפיות ויזואליות במשך כשנה אחת בסוף שנות ה-70.



בין 1982 עד 1991 בוצעו מדידות גלים כיווניות במים רדודים בחוף דדו, אך בגלל ההפסקות עקב פגיעה בציד נצברו כחמש שנות מדידה של גלים, במקבצים של 34 דקות ארבע פעמים ביממה.

ב-1989 הוצב על ידי רשות הנמלים מד גלים צף לא כיווני בעומק 20 מטר מול חוף דדו-דרום, שהוצא לקראת סוף אותה שנה. מאז סוף 1993, לאחר שרשות הנמלים רכשה מד גלים צף כיווני זהה למכשיר מאשדוד, היא מבצעת מדידות גלים כיווניות בקו עומק 24 מטר מול נמל חיפה, וזאת בסיוע המכון לחקר הנדסה ימית, בהקשר לתכנון הרחבת הנמל. כמו כן, בהזמנת רשות הנמלים ובעזרת ציוד של רשות הנמלים ושל חקר ימים ואגמים לישראל נמדדים ומעובדים על ידי חקר ימים ואגמים לישראל אפיוני הגלים הקצרים (כולל כיוון) והארוכים ליד ראש שובר הגלים של נמל חיפה ובתוך הנמל (ללא כיוון) מאז 1994 ועד היום.

בנוסף לנתונים הנ"ל קיימים נתונים נוספים, המבוססים על תצפיות עין במשך זמן קצר בנהריה ועל שנת מדידה (1981) של נתונים בעזרת מד גלים צף לא כיווני מול חוף קטיף. כיום מתחילים להיות זמינים גם נתוני גלים שנמדדו בעזרת לוויינים מאז 1987, ומהתוצאות נראה שהם מאפשרים אומדן די טוב של גובה הגל המשמעותי ושל זמן המחזור במקרה של גלי גיבוע (זמני מחזור מעל שמונה שניות), אך עדיין לא מדייקים במדידת כיוון הגלים. לאלה מצטרפת קבוצה חדשה של נתונים, המחושבים בעזרת מודלים ספרתיים אזוריים לחיזוי גלים על בסיס נתוני מפות סינופטיות, שנאגרו במרכזי חיזוי מטאורולוגי באנגליה, בצרפת ובארה"ב.

באפיון משטר הגלים בחוף הים הישראלי לא נעשה שימוש בבסיסי נתונים משני המקורות האחרונים אלא בעיקר בבסיס נתוני הגלים הכיווניים מחיפה, מחדרה ומאשדוד מאז אפריל 1992; לשם אפיונם של מצבי ים קיצוניים מסתייעים גם בנתונים הישנים יותר מאשדוד ומחדרה.

### משטר הגלים לטווח זמן ארוך בחופי הים התיכון באזור המחקר בישראל

משטר הגלים בחופי ישראל בים התיכון במים עמוקים מוצג בטבלאות שכיחות משותפת בנפרד על בסיס נתוני אשדוד בחלוקה שנתית ועונתית. יצוין, כי מאחר שבסיס נתוני הגלים מאשדוד הוא הגדול ביותר, הן לנתוני גלים כיווניים והן לנתונים במשך זמן ארוך, ראוי להשתמש בבסיס נתוני הגלים מאשדוד כל עוד לא משתמשים בכיווני הגלים. השוני בין אזור אשדוד ואזוריים צפוניים יותר מתבטא בעיקר בשינוי כיוון כפי שהוסבר לעיל, שהינו כ- $10^{\circ}$  עד  $15^{\circ}$  מערבי יותר ככל שמצפינים בזמן מצבי ים שקטים עד כ-5 מטר, וקטן לכדי  $3^{\circ}$  עד  $5^{\circ}$  בזמן סערות חזקות מערביות עם גלים מעל 5 מטר גובה משמעותי בים עמוק. ניתן להציג חלק מהנתונים גם באופן גרפי להמחשה.

### איורים

על בסיס נתוני אשדוד לתקופה הנ"ל, שכיחות כל גובהי הגלים המשמעותיים מוצגת באופן גרפי באיור 7, שכיחות כל זמני המחזור של השיא הספקטרי מוצגת באיור 8 ושכיחות כל כיווני הגלים באיור 9. השוואה של שכיחות גובה הגל המשמעותי שנתקבלו מנתוני אשדוד, חדרה וחיפה מוצגת באיור 10. השוואה של שכיחות כיווני הגלים במים עמוקים שנתקבלו מנתוני אשדוד, חדרה וחיפה עבור כל הגלים מוצגת באיור 11; ובאיור 12 מוצגת השוואה של שכיחות כיווני הגלים בעלי גובה משמעותי במים עמוקים העולה על ארבעה מטר, שנתקבלו מנתוני אשדוד, חדרה וחיפה עבור כל הגלים. מהממצאים הנ"ל ניתן לראות את שינוי כיוון הגלים לאורך החוף הים-תיכוני של ישראל.

בהכללה ניתן לומר, כי משטר הגלים הבו-זמני לאורך החופים די אחיד מבחינת גובה גל משמעותי וזמן מחזור שיא הספקטרום, כאשר מדובר בגלים מעל שני מטר גובה משמעותי. במצבי ים שקטים יותר קיים לעתים שוני, הנובע ממצבי רוחות מקומיות. במצבים כאלה יש השפעה ניכרת של הבריזה על כיוון הגלים ועוצמתם במשך היממה. תופעה היוצרת שוני דווקא במצבי ים שקטים מתרחשת בסוף הסתיו, כאשר באזור מפרץ חיפה נושבות רוחות מזרחיות, תופעה שכמעט אינה מורגשת במקומות אחרים. בזמן נשיבת הרוחות המזרחיות עולה גובה הגלים ככל שמתרחקים מהחוף. לעומת זאת, בזמן מצבי סערה ישנו גידול קטן בגובה הגל המשמעותי במים עמוקים, ככל שמצפינים לאורך החוף הישראלי. מבחינת כיוון הגלים, הרי שהוא משתנה במים עמוקים מדרום לצפון לאורך החוף כמוסבר לעיל.

### סיכום מידע אקלים הגלים לטווח זמן ארוך

על בסיס המידע הנייל ניתן לסכם את הממצאים שלהלן:

#### שכיחות ממוצעת של גלים משמעותיים במים עמוקים מול אשדוד (על בסיס תקופת 1958-1975)

מצבי ים נמוכים (פחות מ-1 מטר)	50% מהזמן
מצבי ים מתונים (בין 1 מטר ל-2 מטר)	25% מהזמן
מצבי ים חזקים (בין 2 מטר ל-4 מטר)	20% מהזמן
מצבי ים גבוהים (מעל 4 מטר)	5% מהזמן

#### שכיחות ממוצעת של גלים משמעותיים במים עמוקים מול אשדוד (על בסיס תקופת 1992-1998)

מצבי ים נמוכים (פחות מ-1 מטר)	72.4% מהזמן
מצבי ים מתונים (בין 1 מטר ל-2 מטר)	21.0% מהזמן
מצבי ים חזקים (בין 2 מטר ל-4 מטר)	5.86% מהזמן
מצבי ים גבוהים (מעל 4 מטר)	0.5%~ מהזמן

#### שכיחות ממוצעת של גלים משמעותיים במים עמוקים מול חדרה (על בסיס תקופת 1992-1998)

מצבי ים נמוכים (פחות מ-1 מטר)	76.4%~ מהזמן
מצבי ים מתונים (בין 1 מטר ו-2 מטר)	17.3% מהזמן
מצבי ים חזקים (בין 2 מטר ו-4 מטר)	5.6%~ מהזמן
מצבי ים גבוהים (מעל 4 מטר)	0.6%~ מהזמן

#### שכיחות ממוצעת של גלים משמעותיים במים עמוקים מול חיפה (על בסיס תקופת 1994-1998)

מצבי ים נמוכים (פחות מ-1 מטר)	70.9%~ מהזמן
מצבי ים מתונים (בין 1 מטר ו-2 מטר)	22.1% מהזמן

מצבי ים חזקים (בין 2 מטר ו-4 מטר) 6.4%~ מהזמן  
 מצבי ים גבוהים (מעל 4 מטר) 0.9%~ מהזמן

במצבי ים חזקים עד גבוהים (עד כשישה מטר גובה משמעותי באשדוד) ישנו גידול אחיד בגובה הגל המשמעותי לאורך החוף מאשקלון עד ראש הנקרה, עקב גידול של אורך משב הרוח והסתרת כיווני גלים מסוימים על ידי חופי לוב ומצרים (ראו איור 2). בסיס הנתונים הכיווניים מהתקופה שבין אפריל 1992 למרץ 1998 קצר יחסית, תקופה שבמהלכה אירעו מעט סערות גדולות. לעומת זאת, על בסיס נתוני גלים, בתקופה 1958-1975 אירעו סערות גדולות במספר רב יותר. שתי הסערות הגדולות ביותר (כנראה) הידועות אירעו ב-13.1.1968 וב-04.2.1992 (האחרונה לא נכללה בסטטיסטיקה הני"ל), והיו בסדר גודל של כ-7.2 מטר גובה משמעותי במים עמוקים.

מכיוון שהמדידות בתקופה הקודמת בוצעו בדרך פחות מדויקת, ייתכן שהיתה הגזמה באומדן הסערות הגדולות, או שלחילופין אנו עדים לשינוי באקלים הגלים. כיום אין אפשרות לאמת היפותזות אלה, ולכן מומלץ להשתמש לצורכי תכן בבסיס נתוני הגלים הישן יותר, כדי להימנע מצד הבטוח.

### התפלגות כיווני הגלים בשנה ממוצעת

בכל מצבי הים המתונים, החזקים והגבוהים, הגלים מתקרבים מתחום הכיוונים מערב דרום-מערב עד צפון צפון-מערב דרך מערב. הגלים הגבוהים ביותר מתקרבים ממערב, אך תהליך ההתפתחות והדעיכה של הסערות מתרחש לרוב על ידי התקרבות התחלתית ממערב דרום-מערב, התעצמות עם שינוי כיוון ממערב ודעיכה עם שינוי כיוון מצפון-מערב. אלמנט חשוב של אקלים הגלים בחוף הישראלי במים עמוקים הוא העובדה, כי כיווני הגלים במים עמוקים אינם אחידים בו-זמנית לאורך כל החוף הישראלי: בדרך כלל נמצא שינוי בכיוון הגלים ככל שמצפינים לאורך החוף, כאשר הגלים מסתובבים יותר לכיוון מערב מאשר באזורים דרומיים יותר. השינוי בין הכיוון באשדוד ובחדרה יכול להיות כ-10° ובחיפה הוא מגיע עד 15°-17°. ככל שגובה הגלים המשמעותיים במים עמוקים גבוה יותר, השינוי בין האזימוטים של כיווני הגלים לאורך החוף קטן אך נותר סופי (כ-5° בין אשקלון לנהריה).

### זמני מחזור שיא של ספקטרום הגלים

זמני המחזור של שיא הספקטרה של גלי הרוח (המציינים את זמני המחזור, שבהם מרוכזת עיקר האנרגיה של הגלים) הם בין 3 ל-15 שניות. בעת מצבי ים גבוהים תחום זמני המחזור של שיא הספקטרה של הגלים הוא בין 10 ל-13 שניות, ובסערות החזקות ביותר זמני מחזור אלה יכולים להיות בין 12 ל-15 שניות. ככל שזמני המחזור גדולים יותר, כך גֵדֵל אורך הגל האופייני (השווה במים עמוקים בקירוב, מדוד במטרים ל-1.56 כפול ריבוע זמן המחזור). ככל שאורך הגל גדול יותר, השפעתו מתחילה להיות מורגשת בקרקעית מעומק רב יותר, עומק השווה למחצית אורך הגל, המגדיר את גבול המים העמוקים.

### אפיוני גלים למצבים נדירים (קיצוניים)

אומדן של סטטיסטיקת מצבי ים קיצוניים הוצג על ידי רוזן וקייט (1981); מאחר שמאז נאספו נתונים נוספים, בוצע ניסיון לאומדן חדש, אשר בדיעבד הופסק לאחר שהתברר כי לא ניתן להשלים מידע לגבי שנים שבהן חסרו נתוני גלים (בתקופה שלאחר 1975), וכי בינתיים אין אפשרות לקבל אומדן טוב יותר. בחקר ימים ואגמים לישראל

פועלים כעת לכיסוי "חורי המידע" הנ"ל, תוך הסתייעות בנתוני מדידות לוויינים וחיזוי לאחור בעזרת מודלים ספרתיים על בסיס מפות סינופטיות של הסערות בשנים שבהן חסרים נתונים. אומדן סטטיסטיקת מצבי ים קיצוניים על בסיס הנתונים הישנים מאשדוד, מוצג באיור 3. סטטיסטיקה זו מתקבלת על ידי הערכת תקופת החזרה הממוצעת של מצבי ים שונים, המוגדרים על פי גובה הגל המשמעותי השנתי המרבי במים עמוקים. חשיבות תקופת החזרה הממוצעת של מצב ים נובעת מצורכי התכן הבטוח של מבנים ימיים. אם נניח שאורך חיים כלכלי של מבנה ימי הוא חמישים שנה, בחירת גל תכן כגל המשמעותי בעל תקופת חזרה ממוצעת של חמישים שנה לא תבטיח בטיחות המבנה; זאת מאחר שניתן להוכיח שקיים סיכון (risk) של כ-64% של אירוע גל, הגבוה מהגל בעל תקופת חזרה ממוצעת של חמישים שנה. כדי להבטיח את בטיחות המבנה, מקובל לתכנן מבנים ימיים באחוז סיכון שלא עולה על 10% ובדרך כלל נע בין 2% עד 5%.

במקרה זה ניתן לחשב את תקופת החזרה הממוצעת של מצב הים, שבו הסיכון לא יעלה על רמת הסיכון הנבחרת על פי הנוסחה דלהלן:

$$R(\text{years}) = \frac{1}{1-(1-r)^{1/L}}$$

כאשר R היא תקופת החזרה, r הוא אחוז הסיכון, ו-L הוא אורך החיים הכלכלי של המבנה. יצוין, כי אמינות האומדן של תקופת החזרה של מצבי ים קיצוניים (נדירים), תלויה בראש וראשונה באורך סדרת הזמן הרציפה (מספר השנים הרצופות של נתונים), ובדרך כלל האמינות יורדת כאשר התחזית עולה על פעמיים משך תקופת הנתונים.

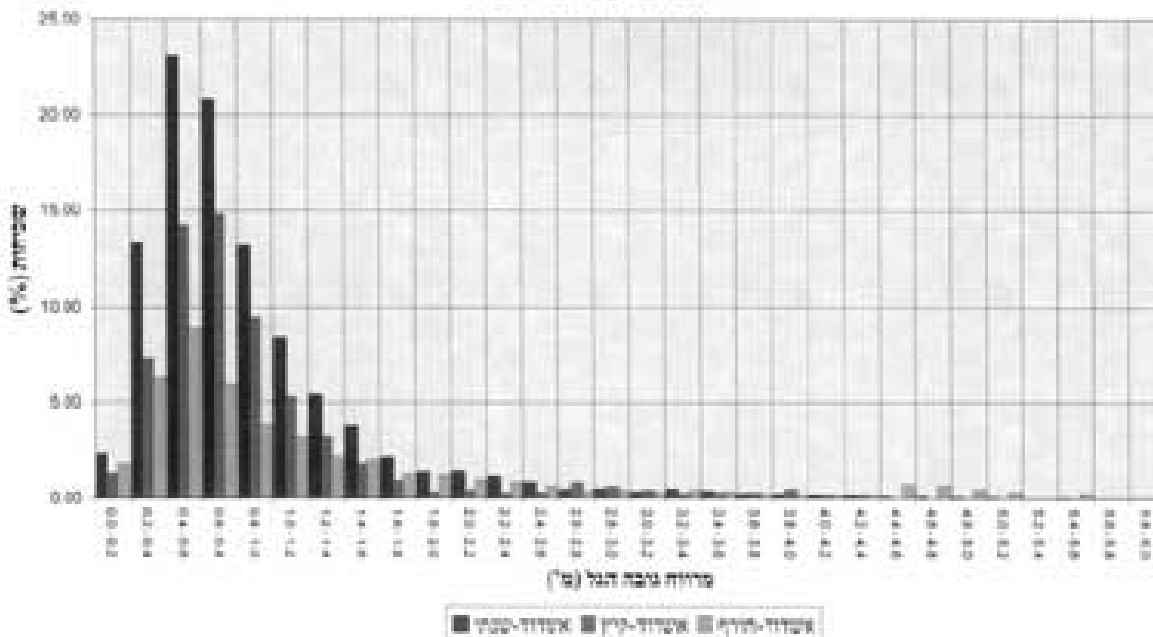
שכיחות הופעתם של מצבי ים קיצוניים נמדדת על ידי תקופת החזרה הממוצעת של מצב ים בעל גובה משמעותי נתון במים עמוקים. בטבלה 2 מרוכזים נתונים של גובה הגלים עבור תקופות חזרה ממוצעות, ובטבלה 3 נתון הקשר בין אורך חיי המבנה, תקופת החזרה, גל התכן ורמת הסיכון לפי נוסחה 1.

**טבלה 2: תקופות חזרה ממוצעות של מצבי ים קיצוניים**

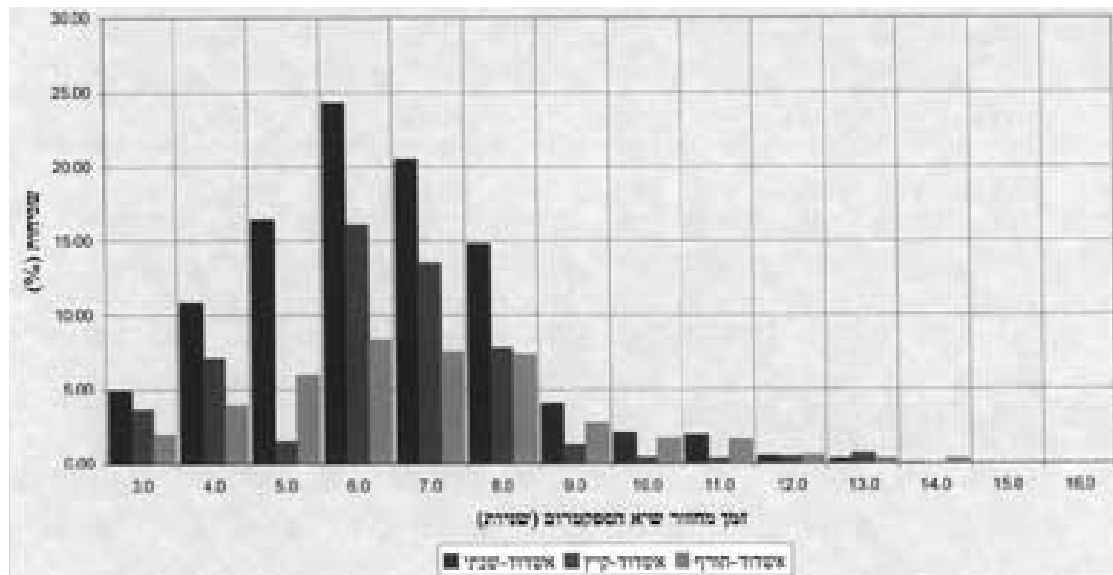
טבלה - תקופות חזרה ממוצעות של מצבי ים קיצוניים	
תקופת חזרה ממוצעת	גובה גל משמעותי במים עמוקים
שנים	מטר
2	5.15
5	6.15
6	6.25
10	6.80
15	7.15
20	7.40
50	8.20
100	8.70
500	10.15

טבלה 3: בחירת תקופות חזרה ממוצעות של גלי תכן לפי רמת סיכון ואורך חיים כלכלי ▼

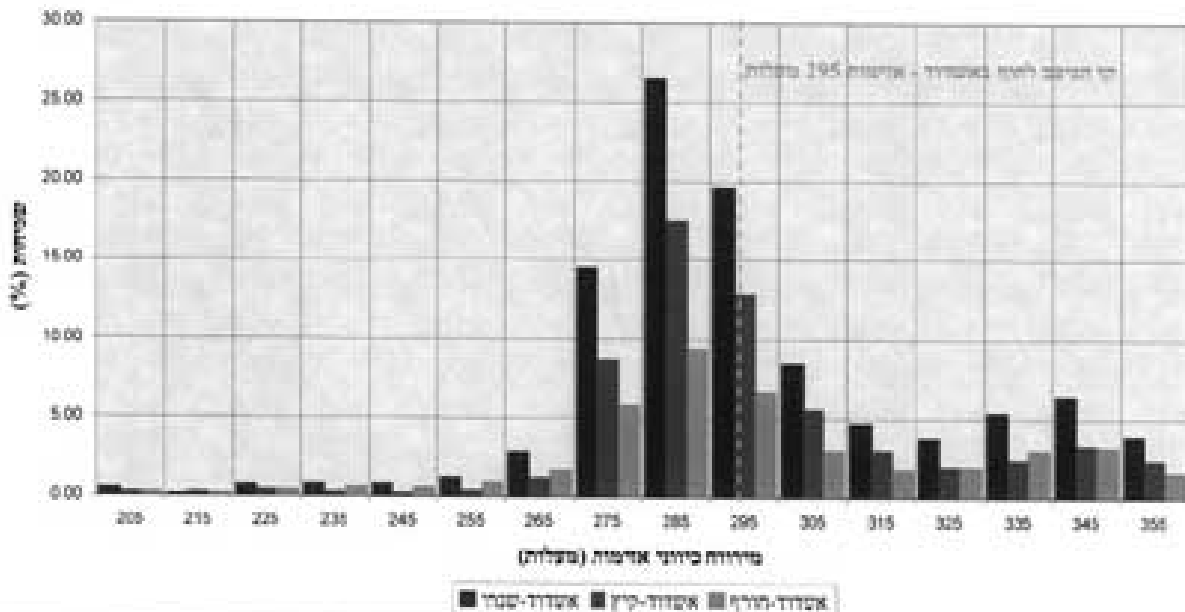
אורך חיים כלכלי של מבנה [שנים]									סיכון מוסכם לאירוע גל התכן
100	50	20	15	10	8	6	4	2	אזורים
תקופת חזרה ממוצעת לשימוש [שנים]									
9,950	4,975	1,990	1,493	995	796	597	398	199	1
4,950	2,475	990	743	495	396	297	198	99	2
1,950	975	390	293	195	156	117	78	39	5
950	475	190	143	95	76	57	38	19	10
616	308	124	93	62	50	37	25	13	15
449	225	90	68	45	36	27	18	9	20
145	73	29	22	15	12	9	6	3	50
98	49	20	15	10	8	6	4	3	64



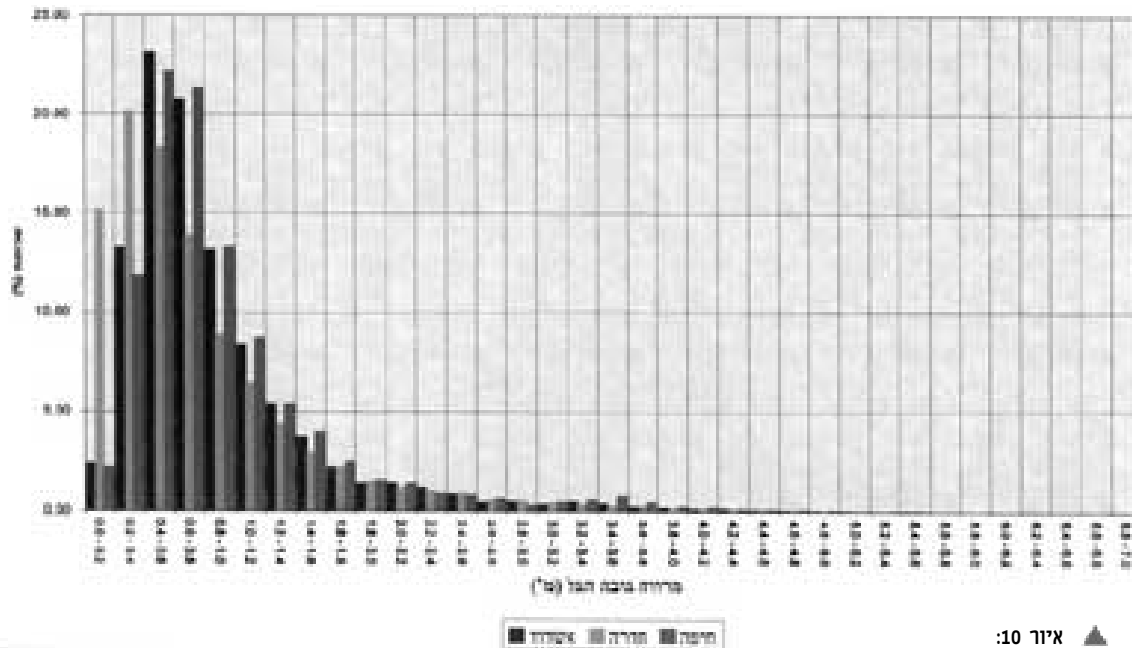
▲ איור 7:  
 התפלגות השכיחות של גובה  
 הגל המשמעותי במים עמוקים  
 באשדוד (כל הגלים  
 03/98- 04/92)



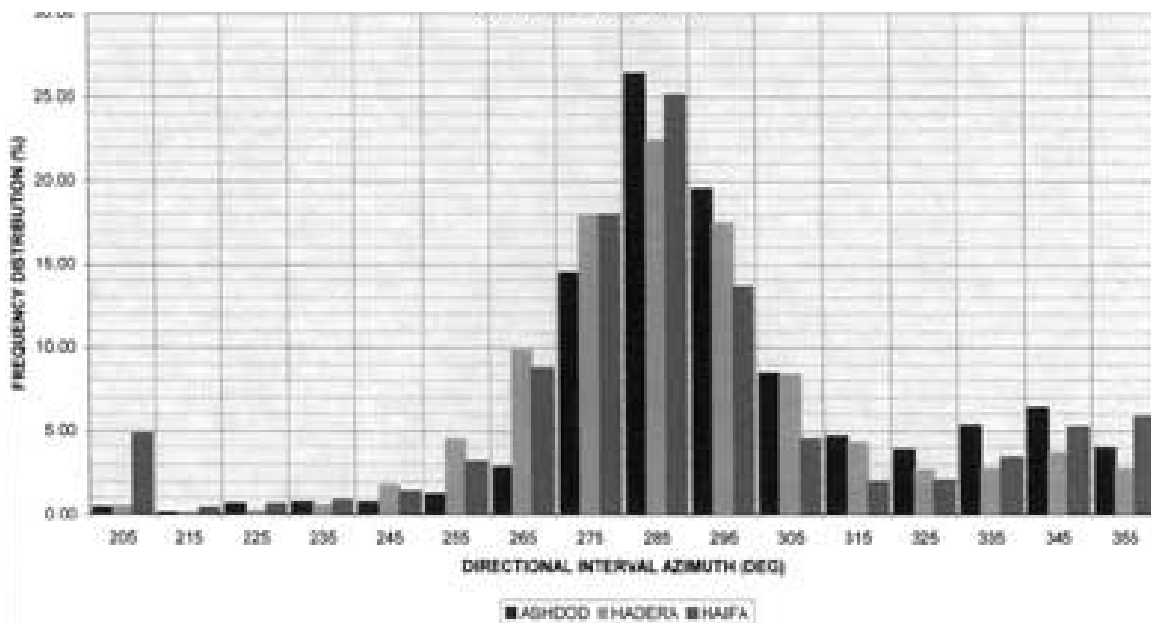
**איור 8:** התפלגות השכיחות של זמני מחזור שיא הספקטרום באשדוד (כל הגלים 04/92 - 03/98)



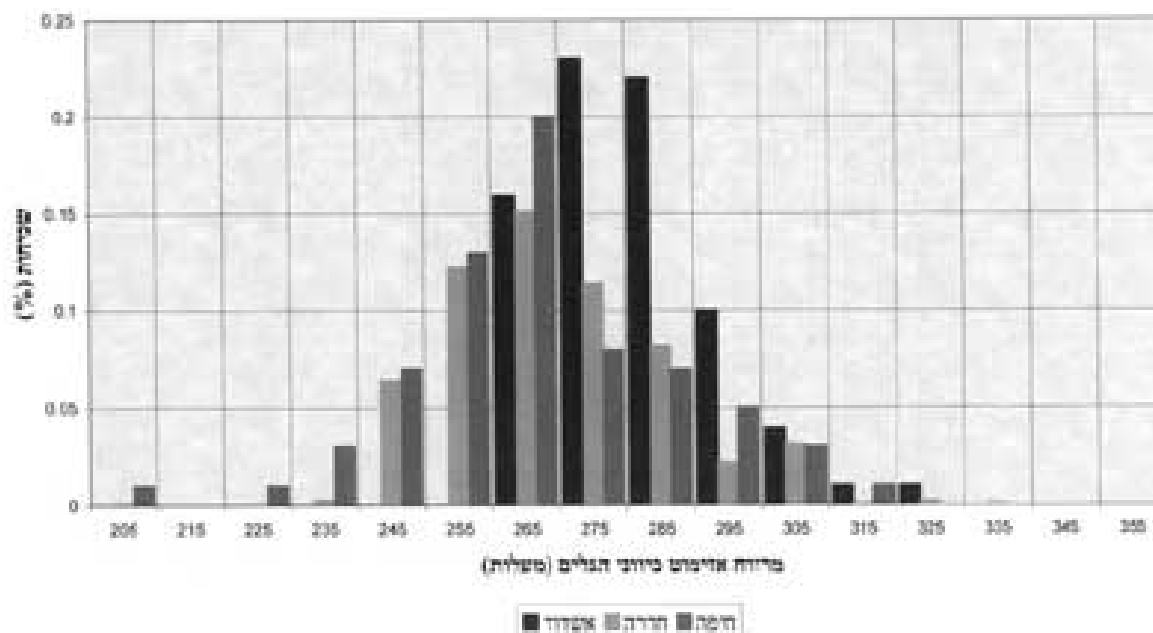
**איור 9:** התפלגות השכיחות הכיוונית של הגלים במים עמוקים באשדוד (כל הגלים 04/92 - 03/98)



**איור 10:** התפלגות שנתית של שכיחות גובה הגל המשמעותי במים עמוקים; השוואה בין השכיחויות באשדוד, בחדרה ובחיפה עבור כל הגלים (לתקופה 03/98-04/92)



**איור 11:** התפלגות שנתית של שכיחות כיווני הגלים במים עמוקים; השוואה בין השכיחויות באשדוד, בחדרה ובחיפה עבור כל הגלים (לתקופה 03/98-04/92)



**איור 12:** התפלגות שנתית של שכיחות כיווני הגלים במים עמוקים; השוואה בין השכיחויות באשדוד, בחדרה ובחיפה עבור גלים בעלי גובה משמעותי מעל 4 מטר (לתקופה 03/98-04/92)

מקורות

למאמר זה רשימת מקורות ארוכה. ניתן למצוא רשימה זו בדו"ח תא"ל 17/98