

# שינוי מפלס הים ובחינת ההשלכות על מצב חופי הים התיכון של ישראל

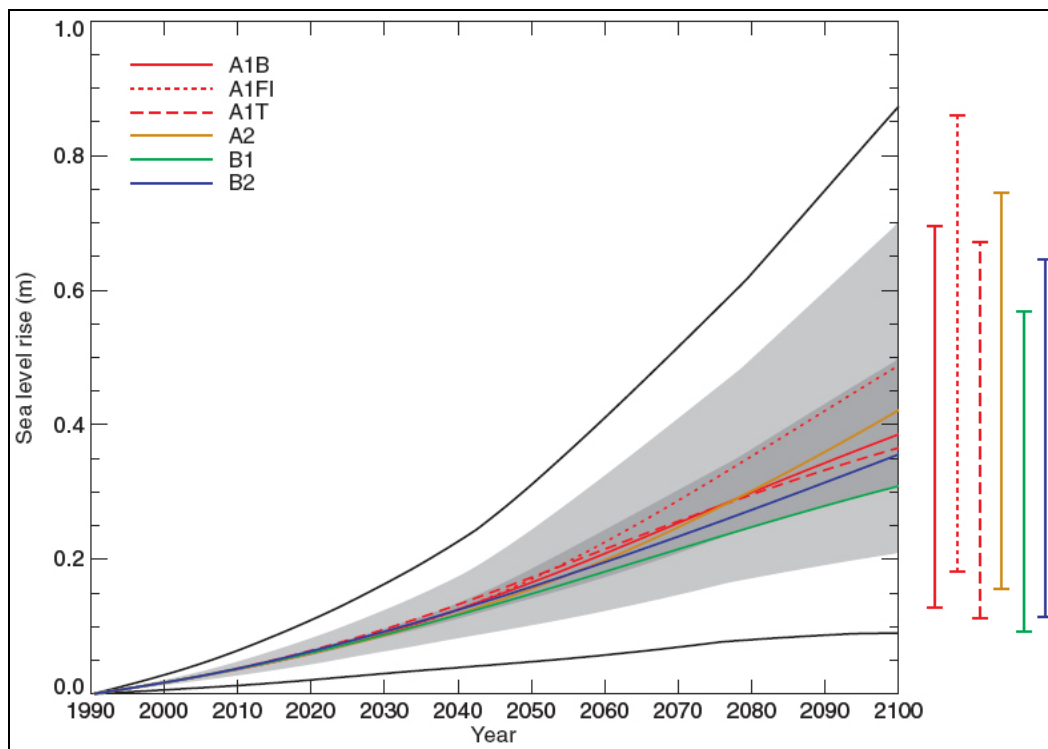
דב ס. רוזן<sup>1</sup>

<sup>1</sup> מנהל המחלקה לגיאולוגיה ימית ותהליכים חופיים, חקר ימים ואגמים לישראל, מתאם תכנית MedGLOSS לים התיכון והים השחור וחבר בצוות המומחים לתכנית GLOSS של IOC/UNESCO

## מבוא

בדו"ח ההערכה השלישי (TAR) של הפאנל הבינ-משלתי לשינוי האקלים (IPCC), שפועל מטעם תכנית הסביבה של האו"ם (UNEP) וארגון המטאורולוגי העולמי (WMO) שפורסם (Church et al.; McCarthy et al.; Metz et al.; 2001) הוצגה תחזית לגבי שינוי האקלים בכדור הארץ ואומדנים להשפעות שינוי האקלים על פי תרחישים שונים לגבי השתנות האקלים במאה ה-21 ומעבר לה בהשפעת תופעת החממה ופעולות אנוש וטבע אחרות בעבר, בהווה ובעתיד.

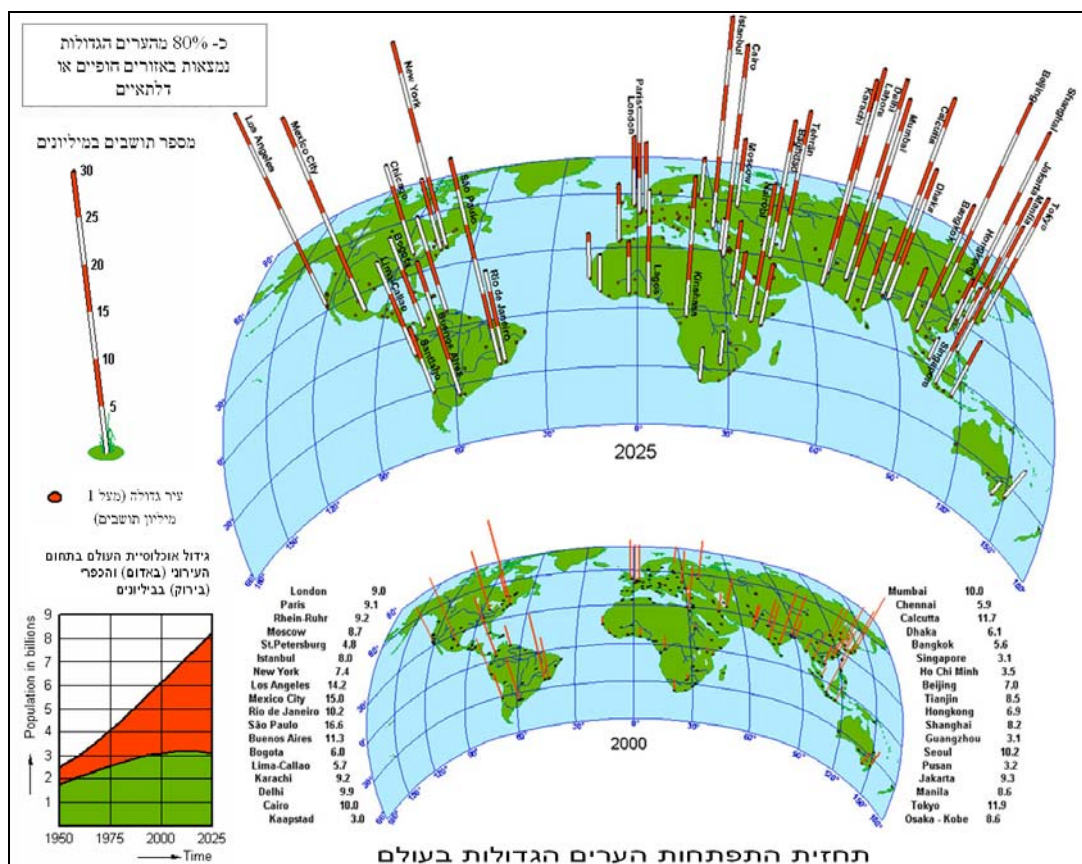
אחת ההשפעות של שינוי האקלים (ויש קביעה ברורה כי אנו כבר נמצאים בתהליך שינוי האקלים) היא עלייה של מפלס פני הים, כתוצאה מעליית הטמפרטורה על פני כדור הארץ. עליית הטמפרטורה גורמת לעליית מפלס הים בעיקר ע"י שינוי נפחי (steric effect) ובמידה קטנה יותר ע"י הפשרת חלק מכיפות הקרח באזורי הקטבים. התחזית של העלייה הממוצעת העולמית של מפלס הים ביחס למצב בשנת 1990 על פי תרחיש של "עסקים כרגיל" והנחות נוספות שונות (ללא צמצום פליטות CO<sub>2</sub>) לשנת 2025 הינה בין 3 עד 14 ס"מ, ל-2050 בין 5 עד 35 ס"מ ול-2100 של בין 9 עד 88 ס"מ (ציור מס' 1). אומדנים דומים הציגו גם Douglas et al. (2001). על פי IPCC גם אם תצומצם כמות גזי הפליטה המזיקים או אפילו תיפסק פליטתם לחלוטין, תופעת החממה תמשיך להתקיים עוד מאות שנים רבות. למרות התחזית לעלייה עולמית של מפלס פני הים (עלייה אאוסטטית) בהשפעת תופעת החממה שינוי מפלס הים היחסי (ביחס ליבשה במקום מסוים) יהיה שונה מאזור אחד למשנהו, כאשר יש לקחת בחשבון גם את המיקום על פני כדור הארץ וגם תנועות הפלטות הטקטוניות באותו אזור (בהשפעת רעידות אדמה, שאיבת יתר של מי תהום, תגובת שחרור מעומס של הקרקע באזורים שהיו עמוסים קרחונים, שיקוע או ארוזיה של סדימנטים על מדף היבשת הרדוד של הימים ועוד).



ציור מס' 1 – תחזית עליית מפלס הים העולמי הממוצע עד 2100 לפי 6 מודלים שונים במצב "עסקים כרגיל" (בעקבות IPCC TAR Group 1 – 2001)

ניטור מפלס הים בכל העולם מנוהל מאז סוף שנות השמונים של המאה שעברה ע"י הועדה הממשלתית לאוקיאנוגרפיה (IOC) של UNESCO בשיתוף WMO דרך תכנית המעקב העולמי אחר מפלס הים (GLOSS). תכנית זאת עצמה הינה חלק מתכנית גדולה יותר לניטור העולמי של האוקיאנוסים (GOOS) אשר כוללת גם תת-תכנית לניטור העולמי של אזורי החוף (COOM). בפרסום הדין בהערכות לניטור אזורי החוף (UNESCO, 2003) הוצגה רשימה של גורמים מחוללים טבעיים ואנטרופוגניים לשינויים באזור החוף ומולם התחומים הציפויים להשפעות ושינוי בגללם. בגורמים הטבעיים נכללו: התחממות עולמית ועליית מפלס הים, סערות ואירועי מזג אוויר קיצוני אחרים, זרמים בסדר גודל אוקיאני, אירועים סיסמיים, גלים, מועדי ים ונחשושולי סערות, זרימת נהרות ומי תהום. ברשימת הגורמים המחוללים האנטרופוגניים נכללו: ייצוב פיזי מחודש של הסביבה, השתנות המחזור ההידרולוגי, ניצול מקורות חיים ודוממים, השתנות מחזורי נוטריאנטים, תשומות סדימנטים, זיהום כימי, תשומות

פאטוגני אדם, הכנסת מינים זרים. ברשימת התופעות שנדרש לנטר נכללו: תנודות במפלס הים, שינויים במצב הים, שינויים בזרמי פני שטח וזרמים תת מימיים, אירועי שיטפונות חופיים, שינויים בקו החוף ובקרקעית הים הרדוד של אזור החוף ועוד תופעות. האוכלוסיות החופיות על פי אותו מסמך מושפעות משורה של סכנות טבעיות ביניהן ארוזיה (גריעה), חדירת מי ים למי תהום, שקיעה (עקב שאיבת יתר), שיטפונות וגלי צונמי ע"י זרימות נחלים ונחשולי סערות. ההשיפה לסכנות טבעיות אלה צפויה לגדול עקב גידול צפיפות האוכלוסין באזורים חופיים נמוכים ועקב תופעות של שינוי האקלים העולמי (כגון עליית מפלס הים וייתכנות גידול שכיחות אירוע מצבי מזג אוויר קיצוניים). אומדנים אחרונים של התפלגות אוכלוסיית העולם (Nicholls and Small, 2002; Small and Nicholls, 2003) מצביעות כי: (א) מספר התושבים המתגוררים בקרבת אזור החוף (עד 100 ק"מ מרחק מקו החוף ועד רום 100 מ' מפני הים הבינוניים) היה כ-1.9 ביליון או כ-38% מאוכלוסיית העולם ב-1990 (מספר קטן מאומדנים אחרים – Hinrichsen, 1998); (ב) כ-40% מהאוכלוסייה השוהה באזורי החוף תופסת 4% מכלל הקרקע של אזורי החוף בצפיפות אוכלוסיות של כ-1000 איש/ק"מ<sup>2</sup>. האזורים הצפופים ביותר הם באירופה ובדרום, דרום-מזרח ומזרח אסיה. לכן, על אף ריכוז האוכלוסין באזורי החוף, ברב השטחים החופיים צפיפות האוכלוסין דלה; (ג) למרות ש-11 מתוך 15 הערים הגדולות בעולם (עם ריכוזי אוכלוסיה של מעל 10,000 איש/ק"מ<sup>2</sup> נמצאות באזורי חוף, רק כ-10% של אוכלוסיית אזורי החוף גרה בערים אלה. רב האוכלוסייה החשופה מתגוררת בערים קטנות או באזורים כפריים כמו למשל באזורים דלתאיים (1000 איש/ק"מ<sup>2</sup>). אולם, מגמת המעבר לערים צפויה לגדול בקצב מואץ ולגרום לשינוי מגמות ריכוז האוכלוסין. המחשה לכך מוצגת בציור מס' 2.



ציור 2 – תחזית גידול האוכלוסין בערים הגדולות בעולם (בעקבות Waterman and Liesting, 2002).

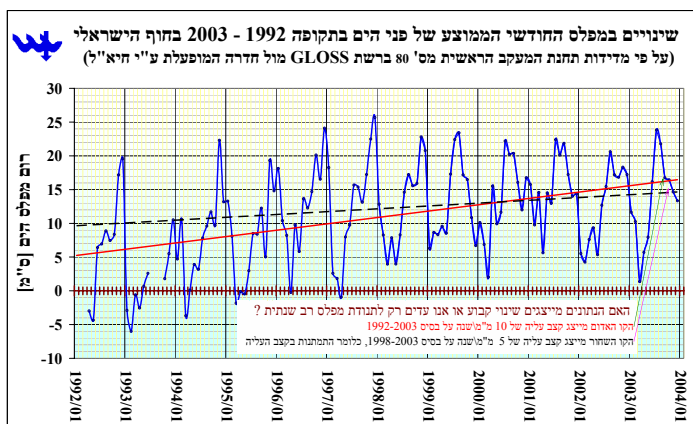
לאור מידע הרקע דלעיל במאמר זה אנו מבקשים להתייחס להשפעות שינוי מפלס הים וייתכנות שינוי אקלים הרוחות והגלים על מצב החופים בישראל על בסיס מידע שנאסף ומעובד בהתמדה ע"י חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל) במכון הלאומי לאוקיאנוגרפיה שבחיפה, בפעילות ניטור ומחקר של הסביבה הימית בארץ ובעולם.

## ניטור שינוי מפלס הים

האתגר של הניטור, ההבנה והחזוי של עליית מפלס הים נובע מהשינוי (variability) בזמן ובמרחב של מפלס הים כמו גם מריבוי הגורמים המשפיעים על מפלס הים. לתקופה 1993 – 2003 נקבע קצב של עליית מפלס פני הים בממוצע עולמי של  $0.4 \pm 2.6$  מ"מ/שנה על בסיס נתוני מדידות מלוויני טופקס ופוסאידון (Cazenave and Nerem, 2003). גם חיא"ל כמו מכוני מחקר אוקיאנוגרפי אחרים בעולם, החל בתחילת שנות התשעים של המאה שעברה, במחקר מוגבר בנושא שינוי מפלס הים בחופי ישראל. כיום חיא"ל משמש כמוקד לפעילות המחקר לניטור שינויים במפלס הים בים התיכון ובים השחור ע"י ייזום וקבלת ניהול רשת תחנות הניטור של מפלס הים MedGLOSS, שהינה הרשת האזורית לים התיכון המהווה תת-רשת צפופה ל-GLOSS. רשת MedGLOSS מופעלת בחסות שני ארגונים בינלאומיים, הועדה הבינלאומית לחקר המדעי של הים התיכון (CIESM) ו-IOC/UNESCO, בהשתתפות 17 מדינות בים התיכון ובים השחור.

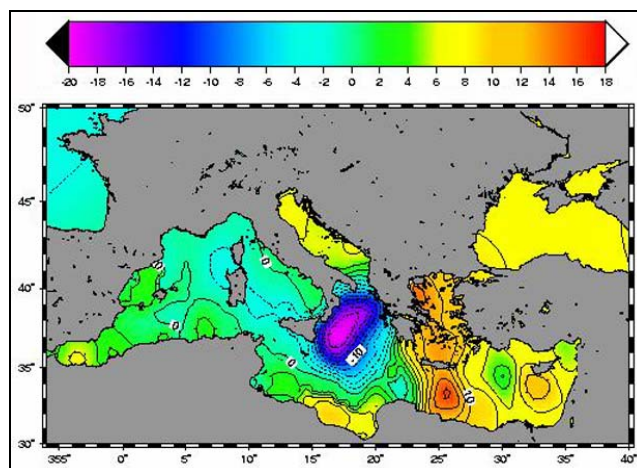
בנוסף, מאז נובמבר 2003, חיא"ל יחד עם עוד 20 ארגונים אירופיים משתתף בפרויקט ESEAS-RI במימון תכנית המחקר של האיחוד האירופי, לשיפור תשתיות המחקר ולניטור שינויים במפלס הים בימים סביב אירופה. במסגרת הפרויקט נקבעו המקומות החשובים ביותר לשדרוג תחנות ניטור סביב אירופה וכעת כמעט הושלם שדרוג מערכות הניטור של מפלס הים ושל

תזוזות נקודות הבקרה לייחוס מפלסי הים לרשת הייחוס היבשתית העולמית (ITRF). היא"ל הציבה 5 תחנות ניטור מפלס הים בחו"ל (מלטה, קפריסין, קרואטיה, רומניה ואוקראינה) בנוסף לתחנה המופעלת בחדרה ולתחנה חדשה שתוצב בקרוב באשדוד המשדרות המידע בכמעט זמן אמת. כמו כן במשימות הפרויקט כלול גם ניתוח נתוני מפלס הים ותזוזות הקרקע בימים סביב אירופה ובמקומות נבחרים בעולם באופן שיטתי ואחיד, לאומדן מדויק יותר של מגמות השנתיות מפלס הים בטווח זמן ארוך (מעשור ועד מאה שנה). ממצאי ביניים של המחקר יוצגו בהרחבה בכנס שיתקיים בתחילת נובמבר 2004 במלטה. בעשור האחרון נמדדה בתחנת חדרה עלייה רב שנתית ממוצעת של כ-10 מ"מ/שנה (רוזן, 2002) לעומת קצב הקטן בסדר גודל כמעט (1-2 מ"מ/שנה בממוצע) שהוערך בחוף הישראלי במהלך יתר המאה העשרים. לעומת זאת, בהתייחסות לחצי תריסר השנים האחרונות עליית מפלס הים מתונה יותר בסדר גודל של 5 מ"מ/שנה (ציור 3).



ציור מס' 3 – השנתות קצב עליית מפלס הים בחוף הישראלי בים התיכון בשנים האחרונות.

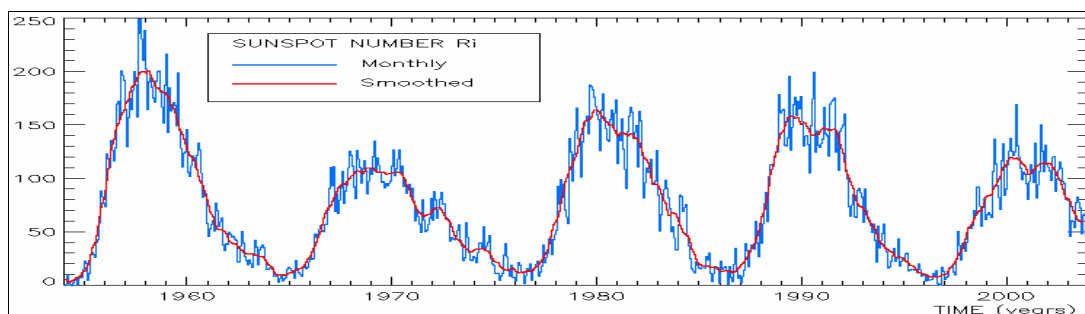
המצב מפתיע עוד יותר היות ונמצא ממדידות מפלס הים מלוויינים כי אין אחידות בקצב ומגמת שינוי מפלס הים בים התיכון בעשור האחרון (FENOGLIO-MARC, 2002). אם כי סדר הגודל והעלייה של מפלס הים המדוד מלוויינים תואם את המדידות בתחנת GLOSS מס' 80 בחדרה, הרי שמדידות הלוויינים הראו בתקופה 1992-2000 קצב עלייה שנתית של כ-20 מ"מ באזור האי כריתין, ולעומת זאת ירידה במפלס הים באזור הים היוני (Ionian sea) מול חופי איטליה, (ציור 4).



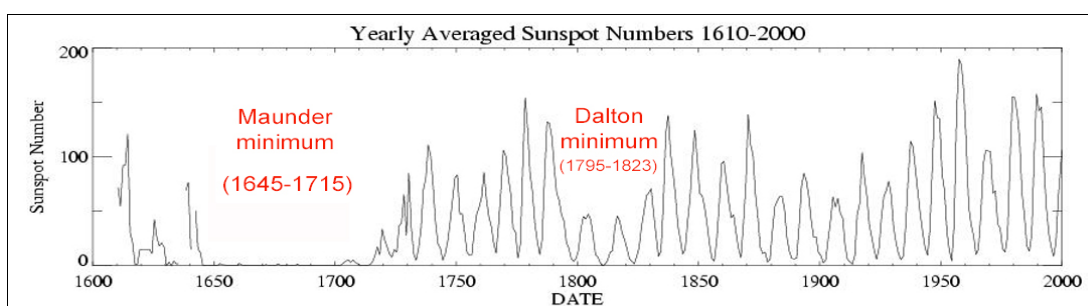
ציור מס' 4 – שינוי מפלס הים בים התיכון ממדידות לווייני טופס\פוסאידון בתקופה 1992-2000 (בעקבות Fenoglio-Marc, 2002).

הממצאים שמוצגים בציור 3 מצביעים למעשה על נוכחות שתי תופעות רב שנתיות, האחת תנודה במחזור של עשור שנים (decadal fluctuation) והשניה כנראה עלייה בהשפעת תופעת החממה, בעלת קצב דומה לקצב הממוצע העולמי החוזי. כמו כן, תנודות מפלס הים הרב שנתיות בסקלת עשור תואמות להפליא את המידע בציור 4. בציור 4 באה לידי ביטוי מורכבות הזרימות והגורמים הפועלים בים התיכון, במיוחד במרכז ומזרח הים התיכון ע"י כך שרואים כי אין מצב של "כלים שלובים" פשוט עקב כיווני שינוי שונים של המפלס בחלק המזרחי ובים היוני. על פי ניטור אוקיאנוגרפי של הזרימות באזור זה ידוע כי המקור למי הביניים הלבנטיניים שהיה לפני סוף שנות השמונים של המאה שעברה בים האדריאטי שם נוצרו וזרמו לאגן המזרחי של הים התיכון, השתנה בתחילת שנות ה-90 (Malanotte-Rizzoli et al., 1996). מאז ועד 2002 המקור להיווצרות מים כבדים אלה עבר לים האגאי, אך ב-2002 שוב נצפתה יצירת וזרימת מי הביניים מהים האדריאטי. לפיכך, תהליך זה נראה קשור עם תופעות תונדות גלובליות כגון "El Niño/La Niña", העשויים להשפיע על אקלים הרוחות באזור שלנו דרך רוחות המונסונים החודרות מהאוקיאנוס ההודי (N. Pinardi, דווח אישי). מאידך, תנודתיות זאת, כמו גם שינוי הטמפרטורה והאקלים נשלטים באופן ברור ע"י קרינת השמש. על פי תצפיות שהחלו מהמאה ה-17 של הכתמים בשמש (Eddy, Wei-Hock and Yaskell, 1980; 2003) קיימת מחזוריות בהעצמת קרינת השמש המתבטאת בהופעת כתמים על פני השמש. המחזוריות הגבוהה הינה בקצב של כמעט 11 שנה (ציור 5). מחזוריות זאת תואמת בצורה טובה את התקופה 1992-2002. על פי אותם מחברים ניתן ללמוד גם כי קיימת מחזוריות נוספת של החלשת הפעילות למינימום כמות כתמי בערך כל 22 שנה של מינימום כמות כתמי השמש. כמו כן, על פי מחקרים שביצעו משפחת Maunder, הם גילו קשר בין אירוע "תקופת הקרח הקטנה" שנמשכה בין 1645 ועד 1715 לתקופה של כמות מזערית של כתמי שמש. אירוע זה קיבל

הכינוי "Maunder minimum" (ציור 6). Eddy שהמשיך עבודתו של Maunder הראה כי במהלך 7000 השנים האחרונות היו 10 תקופות של "מינימום Maunder", האחרונה בתקופה בין 1795 ל-1823 (הקרויה "מינימום Dalton"). כל תקופה כזאת היתה תקופת מזג אוויר קר מאד. לפי כך צריך להתייחס לשינוי האקלים הצפוי לא רק בהקשר לתופעת החממה, אלא גם ביחס לקרינת השמש. קרינת השמש משפיעה כמובן ישירות על ידי הקרינה האינפרא-אדומה המגיעה לכדור הארץ, ואינה מוחזרת לחלל עקב חסימת גזי CO<sub>2</sub> וגזים אנטרופוגניים אחרים. מאידך, מעריכים כי קרינת השמש משפיעה גם על הטעינה החשמלית של חלקיקים באטמוספירה (כולל אירסולים) המהווים גרעיני עיבוי ליצירת עננים, אשר פועלים כחסמים של כל קרינת השמש, ובאופן זה להקטנה של תופעת החממה (2003, Wei-Hock and Yaskell).



ציור מס' 5 - מחזוריות כמות כתמי השמש (בעקבות SIDC, RWC Belgium; <http://sidc.oma.be/>)



ציור מס' 6 - שינוי אינדקס מספר כתמי השמש השנתית מאז 1610 ועד שנת 2000 (בעקבות NASA; <http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/>)

### ייתכנות השפעת האקלים על משטר הרוחות והגלים

בנוסף להשפעת שינוי האקלים על מפלס הים צריך לקחת בחשבון גם ההשפעה האפשרית על משטר הרוחות ועל גלי הרוח הנוצרים ע"י נשיבת הרוחות (לצורכנו בתחום הרלוונטי לחוף הישראלי). זאת בנוסף לתחזיות של ייתכנות הגדלת השכיחות של אירועי מזג אוויר קיצוניים שהזכרנו לעיל וכן של הגדלת משרעת התנודות. כיום, משטר הגלים בחוף הישראלי מאופיין ע"י כיוון גלים שולטים (הגבוהים ביותר) מערבי בקרוב (המשתנה לאורך החוף בסדר גודל של מספר מעלות בודדות), עם כיווני גלים שכיחים במרווח הכיווני מדרום-מערב ועד צפון (Rosen, 2002). עקב מיקומו היחסי של החוף הישראלי ביים התיכון, כיוון הגלים השולטים לא צפוי להשתנות היות והכיוון של נשיבת הרוחות ממערב למזרח (בקרוב) הינו הכיוון עם אורך משב הרוח המרבי עבור החוף הישראלי. לעומת זאת, עד היום (וכנראה במספר אלפי השנים האחרונות) שכיחות הגלים השכיחים מהתחום הדרום מערבי עד מערב צפון-מערב היתה גדולה יותר בדרך כלל מאשר השכיחות של הגלים מהכיוונים הצפוניים יותר. מכיוון שעוצמת הסעת הסדימנטים לאורך החוף תלויה ישירות בזווית ההתקרבות של הגלים עם הניצב לקו החוף (ככל שהזווית גדולה יותר ההסעה גדולה יותר) ניתן לומר כי בממוצע רב שנתי, כיוון הסעת הסדימנטים נטו לאורך החוף בתא הוּפּי של הנילוס עד היום הינו לאורך החוף לכיוון צפון, כאשר כמות ההסעה קטנה ככל שמצפינים מעזה עד מפרץ חיפה. רק בשנים שקטות יחסית, בהן לא היו סערות חזקות מערביות, גברה תרומת הגלים הצפון-מערביים עד צפון באזור שבין חיפה עד בין חדרה לשפיים בקרוב, להסעה שנתית נטו דרומה. בעתיד, אם תשתנה שכיחות ועוצמת הרוחות, הדבר עלול להביא גם לאפשרות של שינוי רב שנתי בכמויות השנתיות המוסעות ואולי אפילו בכיוון ההסעה נטו בממוצע רב שנתי. מנתוני הגלים שנמדדו בארץ מאז 1958 (ברמות שונות של דיוק בתלות ברמת הדיוק של שיטות המדידה שהלכו והשתפרו, במיוחד מאז 1992), ניתן לסנן את הסערות הגדולות אשר אירעו בתקופה מאז 1958. ניתן לציין כי הסערות הגדולות ביותר שנמדדו היו בדצמבר 1964, בינואר 1968, בדצמבר 1980, בדצמבר 1991, בפברואר 1992 ובפברואר 2001. אם נשווה מועדים אלה עם ציור 5, ניתן לראות שמלבד לגבי 1964 לגבי כל היתר ישנו מתאם גבוה מאד עם מחזוריות של שיא מספר כתמי השמש (שאז מתגברת קרינת השמש), ונראה כי אכן אירועי מזג האוויר קיצוני קשורים באופן חזק לפעילות השמש.

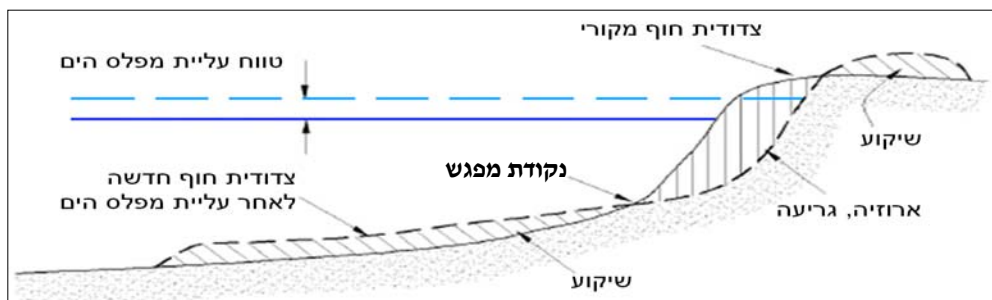
### השפעת עליית מפלס הים ושל ייתכנות שינוי במשטר הרוחות והגלים על מצב החוף הישראלי

מזה שנים רבות מתבצעים בחיא"ל מחקרים בקשר למשטר הסדימנטולוגי בחוף הישראלי, בעיקר בתא הוּפּי של הנילוס. הממצאים של המחקרים שבוצעו וההמלצות שניתנו ע"י חוקרי חיא"ל הביאו לשינוי מדיניות פיתוח וניהול החופים בישראל. בין פעילויות אלה ראוי להזכיר זיהוי ההשפעות של מבנים חופיים של לכידת חול בצד הדרומי למבנה וגריעה זמנית בצד שמצפון למבנה, אימוץ המדיניות של אי כריית חול מתחום מי הים הרדוד מ-30 מ', שינוי הגדרת מיקום קו המים הגבוהים בקשר לרוחב רצועת החוף של 100 מ' בתמ"א 13, והעברה מלאכותית של חול לשם שימור על מאזן הסעת החולות לאורך החוף. בהקשר לפרויקט לבדיקת ייתכנות הקמת איים מלאכותיים וכן בהקשר לעבודות הכנת תסקירי ההשפעה על הסביבה של הרחבת נמל אשדוד ונמל חיפה נאספו נתונים רבים על מצב החופים מבחינת הארוזיה החופית ונסיגת המצוק החופי. מאז 2002



חיא"ל משתפת בתכנית MAMA של האיחוד האירופי יחד עם גופי מחקר מכל המדינות שלאורך חופי הים התיכון וכן גופים בינלאומיים ליצירת רשת ים-תיכונית לקידום פעילות ניטור וחיזוי הסביבה הימית. במסגרת תכנית זאת חיא"ל גם פיתח ומפעיל אתר אינטרנט לייעוץ בנושאי הגנה מפני הרס חופים ולניהול חופים כוללני בר קיימא למדינות הים התיכון (<http://cerospig.ocean.org.il/>). בשנתיים האחרונות בוצעו פעולות ניטור שינוי מיקום קו המים באזור בין בת ים לנהל פולג ולראשונה בוצעו מופיים חוזרים באבחנה גבוהה של המצוק החופי, דבר שסיפק בקרוב מאד מידע כמותי מדוייק לגבי קצב נסיגת המצוק החופי בתחום הנ"ל בשנים האחרונות. כל המידע הנ"ל מאפשר להעריך הערכה איכותית את השפעות עליית מפלס הים וייתכנות שינוי אקלים הגלים והרוחות בחוף הישראלי ולהתייחס למדיניות ניהול בר קיימא הדרושה לאזור החוף הישראלי. אומדנים איכותיים אלה מוצגים להלן. ואולם, לשם קבלת אומדנים כמותיים, יהיה צורך להשתמש בכלים מתקדמים ובהמשך ניטור הסביבה של אזור החוף, על פי הקווים שהכין COOP שהוזכר במבוא. אחד הכלים החשובים הינו המודל הסדימנטולוגי והסביבתי התלת מימדי DELFT3D, המתקדם מסוגו בעולם, שנרכש בשנה שעברה ע"י חיא"ל במימון ממלכתי ומופעל בשיתוף המכון הישראלי לחקר הנדסה ימית.

מבחינת השפעת עליית מפלס הים וייתכנות גידול טווח התנודות של מפלס הים על מצב החוף הישראלי אנו מתייחסים בעיקר לחוף הישראלי בים התיכון. מובן מאליו כי עליית מפלס הים תפגע באזור הדלתה של הנילוס ותגרום להגברת הנסיגה של חופי הדלתה. למרות מאמצי מצרים להגן על חופים אלה, יש להניח כי יימשך לפחות באופן חלקי ההרס ונסיגת הדלתה של הנילוס שיגדילו את מקור החול שיוכל להיות מוסע לכיוון החוף הישראלי בתא החופי של הנילוס. זאת בתנאי כי לא ישתנה משטר הרוחות והגלים במיוחד מבחינת התפלגות כיוונית באזור זה. בחוף הישראלי עצמו אם לא יינקטו אמצעי הגנה, עליית מפלס הים צפויה לגרום להגברת קצב הנסיגה של קו המים מזרחה ולפחות זמנית הצרה של החופים לרגלי המצוק החופי, המושך הרס במצוק החופי והשתנות צדודית החוף המקומית. כמו כן עליית מפלס הים תגרום לעלייה במשכי הזמן של ההצפה של אזורי חוף רדודים וחזירת מי הים בתוך מוצאי נחלים. העלייה של מפלס הים לא מתבטאת בפעילות ישירה של גריעת החוף כי אם ביצירת תנאי נגישות לגלי הים להגיע לקטעי החוף הרדודים וכבר בזמן סערות חלשות יותר לגרוע בתחתית המצוק החופי, אשר מקודם היו מתרחשים רק בזמן סערות חזקות מאד ובעת אירועי נחשולי סערה (storm surge). צדודית החוף צפויה להשתנות בקרוב בהתאם ל-"כלל Bruun" (Bruun, 1962). על פי גישה זאת, אף כי מהווה מודל פשטני דו-ממדי של שינוי צדודית החוף, צדודית החוף בתנאי עליית מפלס הים תנוע לכיוון החוף ובהסטה כלפי מעלה לשם יצירת צדודית זהה, כאשר החלק של החול שייגרע משפת הים יוסע הימה לשיקוע בירכתי החוף (ציור מס' 7).



ציור מס' 7 – השתנות צדודית החוף תוך נסיגת קו החוף בהשפעת עליית מפלס הים לפי כלל Bruun

מאחר שנסיגת החוף על פי כלל Bruun היא בעיקר תאור איכותי, פותחו מודלים מורכבים יותר לתאור שינוי הצדודית החופית בהשפעת עליית מפלס הים, אך גם הם עדיין מודלים סכמטיים. מודל מתאים לאומדן אמיין של השינויים הצפויים בתרחישי עליית מפלס ים ושינוי משטר הגלים הוא מודל DELFT3D שהוזכר לעיל. לפיכך אין אנו נוטים לתת אומדן כמותי מדוייק של מידת נסיגת קו החוף, אם כי המדובר בנסיגה בסדר גודל שבין כמה עשרות בודדות ועד מאות מטרים עד סוף המאה הנוכחית, ולא אחידה לאורך החוף, כתלות במידת העלייה היחסית של מפלס הים בחוף הישראלי ובחוזק רכסי הכורכר הרדודים ושל המצוק החופי. כמו כן הדבר תלוי במדיניות ובאמצעים שישיושמו להתמודדות מול המצב המתפתח.

השפעה נוספת של עליית מפלס הים הינה המלחה נוספת של האקוויפר החופי. במצב הנוכחי של גרעון במי התהום עקב שאיבת יתר של עשרות שנים, האקוויפר החופי כבר נפגע עקב חדירת הפן הביני (בין מי הים למים מתוקים) מזרחה, וכל תוספת בהתקדמות מזרחה רק תרע את המצב. בהקשר זה יאמר כי הושמעו הצעות לשאוב מים מליחים להתפלה ממי התהום בקרבת החוף ביבשה כפתרון זול כביכול של שאיבת מי ים להתפלה. לדעתנו פתרון כזה אינו נכון, היות ובשנים גשומות לא יהיה היכן לאגור את מי הגשם עקב הפיכת האקוויפר למלוח.

כהשפעות נוספת של עליית מפלס הים ניתן לציין את ההשפעה הסוציאלית, היות ונסיגה של קו החוף תפגע בתיירות ובפעילות הנופש והקייט ותחייב הסטת פעילויות ומבנים מזרחה לקו החוף הנוכחי. השפעה נוספת הינה לגבי הצורך בהשקעת משאבים בהגבהת מבנים חופיים וחיזוקם, בהגבהת רציפים בנמלים, בבריכות השקטה ובמעגנות. כמו כן, עליית מפלס הים תגרום להקטנת גרדיינט הזרימה של מוצאים ימיים ולהגברת שיקוע סדימנטים בפתחי נחלים, תופעות שיחייבו השקעת משאבים ניכרים לתיקון המצב.

מבחינת השפעת ייתכנות שינוי משטר הרוחות והגלים, הדבר תלוי בסוג השינוי. אם לא תשתנה ההתפלגות הכיוונית לא תהיה השפעה נוספת על מצב החופים. אולם, כפי שהוסבר מקודם, אם ייוצר שינוי כיווני באקלים הגלים הדבר יכול לגרום להגברת ההרס של החופים ומאידך לשינוי נטיית קו החוף הכללי אך זאת בתהליך איטי של עשרות עד מאות שנים.

לבסוף, לגבי המצב בחוף הישראלי במפרץ אילת, העלייה הצפויה טרם ניתנת להערכה טובה. מכיוון שטווח מועדי הים שם גדול בהרבה מהטווח בחוף הישראלי בים התיכון, ומאחר שאופי החוף שם שונה הן מבחינת שיפוע הצדודית וכן מבחינת מבנה החוף, נראה לנו בהערכה ראשונית כי המצב העתידי יפגע פחות בחופים אלה מאשר מצב החוף בים התיכון (מלבד סיכון לפגיעה חמורה במושבות האלמוגים עקב ההתחממות). מאידך, כמות המידע על מפלס הים ומשטר הגלים באילת שנצבר בינתיים מועט יחסית ולכן קשה להגיע לאומדן ברור יותר.

## הערכות למצב של עליית מפלס הים ושינוי אקלים

ההערכות למצב של עליית מפלס הים ושינוי האקלים נבחנו ע"י IPCC (Metz et al., 2001) ואחרים (Klein et al., 2001). קיימות שלוש אפשרויות עקרוניות של הערכות למצב המתפתח: (א) הסגה מבוקרת של קו החוף, כלומר אי נקיטת כל אמצעים למניעת ארוזיה; (ב) בניית מחסומים קשים (קירות ים ו/או שוברי גלים גבוהים רציפים) להסימת הפעילות הארוזיבית שתפתח; (ג) התאמה למצב המתפתח תוך נקיטת אמצעי מיגון במקומות קריטיים, הסטת מבנים, חיזוק והגבהת מבנים, הזנה מלאכותית של חופים במקומות אחרים.

מצב החוף הישראלי בים התיכון הנמצא כבר כיום בתהליך מתון של נסיגה וקוטן השטח של מדינת ישראל מול ביקושי האוכלוסין הנוכחיים והעתידיים לשטחים באזור החוף אינם מרשים לדעתנו בחירה בחלופה א' כמדיניות ניהול חופים כוללת בר קיימא. גם החלופה ב' איננה מעשית כי משמעות הדבר לבנות "גדר הפרדה" לאורך כל החוף הישראלי.

נותרת לכן רק החלופה השלישית, של צורך בהתאמה למצב של עליית מפלס הים ושינוי האקלים. משמעות הדבר הוא בהתארגנות לביצוע פעולות שונות חופפות או מפצות כגון: בניית קיר ים מגן וסופג גלים לאורך רכסי הכורכר בקטעים רגישים למצבים של סערות מאד חזקות ו/או אירועים קיצוניים, כיסוי הקיר במיכלי בד גיאוטכני גמיש מלאים בחול וריפוד בחול של כל רצועת החוף להרחבת החוף באופן מלאכותי ע"י חול מובא בעל גודל גרגר ודרוג מתאים, הגבהת וחיזוק מבנים ורציפים וריפוד החופים בשכבת חול מיובא שתחודש אחת לעשר או יותר שנים. פעילות כזאת תשמר את החופים אך צפויה להיות יקרה. לפי כך, יש צורך בהתארגנות המדינה בנדון, כולל עריכת בדיקה מסודרת במודל שנרכש לתרחישים שונים של עליית מפלס הים ושינוי האקלים, תוך הגברת מאמץ הניטור של הסביבה הימית (מפלס הים, רוחות, גלים, זרמים, שינויים בקרקעית הים, בקו המים ובמצוק החופי, תנועות טקטוניות) היות ולא הופרטו הבסיסיים שמשמשים כתשומה בבדיקת תרחישים.

## מקורות

- רוזן ד.ס., 1996, *העמיד טמון בחול*, מסע אחר - המגזין הגיאוגרפי הישראלי, כרך 57, עמ' 116-135, יוני 1996.
- Brachia V., Rosen D.S., (1993), *World coast 1993, Country description - Israel*, in Proc. World Coast 1993 - Intl. Conf. On Coastal Zone Management, Nordwijk, the Netherlands, Nov. 1993, 14 pp.
- Cazenave, A. and Nerem R.S., 2003, *Present-day Sea Level Change: Observations and Causes*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 08353, 2003, 64pp.
- Church, J.A. et al. 2001, *Changes in Sea Level*. In *Climate Change 2001, The Scientific Basis*, edited by J.T. Houghton, IPCC TAR Working Group I, Cambridge University Press., Cap. 11, pp. 639-694.
- Douglas B.C., Kearney M.S., and Leatherman S.P., 2001, *Sea level rise history and consequences*, Academic Press, San Diego, California, USA, 232pp.
- Fenoglio-Marc L., 2002, *Long term sea level changes in Mediterranean sea from multi-mission altimetry and tide gauges*, EGS XXVI General Assembly, Nice, France, March 2001, Session G4.01.
- Hinrichsen, D., 1998. *Coastal Waters of the World: Trends, Threats, and Strategies*, Washington, D.C., Island Press, 275 pp.
- Klein R.J.T., Nicholls R.J., Ragoonaden S., Capobianco M., Aston J., and Buckley E.N., 2001, *Technological options for adaptations to climate change in coastal zones*, J. Coastal Research, Vol. 17, no. 3, pp. 531-543.
- McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J., and White K.S., Ed. 2001, *Climate Change 2001, Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, IPCC TAR Working Group II, Cambridge Univ. Press.
- Metz B., Davidson O., Swart R., Pan J., Ed. 2001, *Climate Change 2001, Mitigation*, IPCC TAR Working Group III, Cambridge Univ. Press.
- Malanotte-Rizzoli P., Robinson A. R., Roether W., Manca B., Bergamasco A., Brenner S., Civitarese G., Georgopoulos D., Haley P. J., Kioroglou S., Kontoyannis H., Kress N., Latif M. A., Leslie W. G., Ozsoy E., Ribera d'Alcala M., Salihoglu I., Sansone E., and Theocharis A., 1996, *Experiment in Eastern Mediterranean Probes Origin of Deep Water Masses*, EOS Transactions, Vol. 77, No. 32.
- Nicholls, R.J. and Small, C., 2002, *Improved estimates of coastal population and exposure to hazards*, EOS, 83, 301.
- Rosen D.S., 2002, *Long term remedial measures of sedimentological impact due to coastal developments on the South-Eastern Mediterranean coast*, Proc. Littoral 2002, The Changing Coast EUROCOAST/EUCC, Ed. EUROCOAST, paper 40, Vol 2., pp.322-331, Porto, Portugal, Sept. 2002.
- Small, C. and Nicholls, R.J., 2003, *A global analysis of human settlement in the coastal zone*, Journal of Coastal Research
- Waterman R.E., and Liesting P.T.A., 2001, *Integrated Coastal Policy via Building with Nature*.
- Wei-Hock Soon W., Yaskell S.H., 2003, *The Maunder minimum and the variable Sun-Earth connection*, World Scientific, N.J., USA, 278pp.
- UNESCO, 2003, *The Integrated, Strategic Design Plan for the Coastal Ocean Observations Module of the Global Ocean Observing System*, GOOS Report No. 125; IOC Inf. Documents Series N°1183;