

# והים איננו מלא

כשמפזרים את ערפל המיתוס וחושפים את תיקוני הנתונים, מגלים שלתחזיות האימה על עליית מפלס פני הים אין בסיס מדעי. קובעי המדיניות מוזמנים לשחיית היכרות במימה המלוחים של הגיאופיזיקה

זה שני עשורים ויותר שהציבור בישראל, ובעולם כולו, מוצף בהתרעות קולניות על הצפה עתידית של אזורי החוף במהלך המאה הנוכחית. מאחורי התחזיות האפוקליפטיות הללו עומדת תפיסה המקובלת כיום בקרב רבים בקהילה המדעית, בארגונים האזרחיים ובציבור, ולפיה אנו מצויים בעיצומה של התחממות גלובלית חסרת תקדים. התחממות זו נובעת מהצטברותם של "גזי חממה", בעיקר פחמן דור-חמצני, תוצר לוואי של שריפת דלקים המניעים את העידן התעשייתי שלנו; והיא עתידה, כך רגילים לחשוב, להביא לעלייה דרמטית במפלס מי הים – כתוצאה מהמסת קרחונים באנטארקטיקה (הקוטב הדרומי) ובאזור הארקטי (ים הקרח ואזורי היבשת שסביב הקוטב הצפוני), וכתוצאה מהתרחבות נפח מי האוקיינוסים בשל התחממות המים. לפי תפיסה זו, העלייה במפלס פני הים כבר הורגשה במהלך המאה העשרים, והיא צפויה להתעצם פי כמה וכמה אם תימשך מגמת הגידול בשריפת הדלקים, בעקבות התיעוש ההולך וגובר במדינות המתפתחות. עלייה כזו במפלס מי הים, מזהירים מומחים רבים, תביא עד סוף המאה הנוכחית להצפה ולהחרבה של אזורי היישוב השוכנים סמוך לימים ולדלתאות נהר. המסקנה המעשית של תפיסה זו היא כי שומה על ממשלות העולם ליישם תוכניות מדיניות שגיבילו את כמות גזי החממה שבני האדם מייצרים, על מנת למתן את מגמת ההתחממות ואת תרחישי האימה הקשורים בה; וכן לגבש תוכניות שיבטיחו את המוכנות של המדינות לאותם תרחישים ויגנו עליהן מפניהם.

אולם ישנם כאלו, בקרב הקהילה המדעית ומחוצה לה, שאינם שותפים למוסכמות אלה וסבורים כי ככל קביעה מדעית גם הן אמורות לעמוד במבחן המציאות ולהשיב לשאלות שראוי לשאול על אודותיהן. למעשה, על כל אחת מהנחות אלו ניתן וראוי לשאול סדרת שאלות: האומנם כבר כיום ישנה מגמת עלייה במפלס פני הים? האומנם

---

מיכה קליין הוא פרופסור אמריטוס בחוג לגיאוגרפיה באוניברסיטת חיפה. המאמר מבוסס על נייר עמדה והרצאה שעובדו על ידי אלון שלו ממערכת 'השילוח' יחד עם פרופ' קליין.

צפויה בהמשך המסה מסיבית של קרחונים? האומנם המסה כזו תעצים את עליית המפלס? וממילא: האומנם נמצאים אנו בסכנת הצפה בסדר גודל קטסטרופלי כפי שמציגות התחזיות? שאלות אלו (שבחינתן המדויקת מורכבת ביותר) הן רק דוגמה לתהיות הרבות שניתן וראוי לשאול באשר למוסכמות המדעיות העומדות בבסיס תזת העלייה בגובה פני הים.

בניגוד למחלוקות בתחומים מדעיים אחרים, למחקר המדעי בתחום האקלים נודעות השלכות רחבות היקף על חיי הפרט והחברה בכל מדינות העולם; לכן הוא מעניין את כולנו ונוגע בנו. אולם תחום זה הוא מן התחומים המורכבים והסבוכים ביותר, שכן הוא עוסק בתופעות בסדר גודל ענק המושפעות מריבוי גורמים. מסיבה זו, הוא בלתי-נגיש לאדם מן השורה האמור לצעוד עם מסקנותיו לקלפי, וגם לאיש הממשל האמור לעצב מדיניות לאורו. אין זה פלא כי נוח לו לאדם להישען על מה שמדווח לו בתקשורת ובתעמולה של ארגונים אזרחיים ובינלאומיים כקונצנזוס מדעי – במיוחד לאור רמת הסיכון הכרוך לכאורה באי-אימוצן של עמדות אלו.

במאמר זה אני מבקש לעסוק בנושא העלייה במפלס פני הים. מסקנתי היא שאין ראיות מובהקות למגמת עלייה משמעותית במפלס פני הים; וככל שישנה, היא רחוקה מרחק מילין רבים מהנתונים והתחזיות המושמעים חדשים לבקרים. מטרתו במאמר זה כפולה: לקרב את הסוגיה לדעתו של הקורא באופן שיקנה לו יכולת חשיבה וביקורת על שאלת מפלס פני הים, ובאופן כללי על מדעי האקלים באקלים המדעי הנוכחי; וכן להתריע מפני בזבוז המשאבים הפוטנציאלי הנכון לחברה הישראלית בשל אימוץ מדיניות הנגזרת מהנחות בלתי-מבוססות – מבית מדרשם של ארגונים ממשלתיים ואזרחיים שנשבעו אמונים לאמונות רווחות הנדמות כקונצנזוס מדעי.

## דור הולך ודור בא

בני האדם משקיעים משאבים רבים בניסיון לחזות את התנהגותו של הטבע, הן לטווח הקצר הן לטווח הארוך, ויכולתם לעשות זאת הולכת ומשתכללת מדי דור. התחזיות האקלימיות לטווח הקצר מסייעות לאדם למגן את עצמו מפני אסונות כבדים, לכלכל את צעדיו ואף לרתום את הטבע לצרכיו. התחזיות לטווח ארוך, מטרתן לסייע למדינות וממשלות לגבש מדיניות רב-תחומית שתבטיח את חוסנה ושגשוגה של החברה העתידית; ולתוכניות הנגזרות ממדיניות זו השלכות רחבות היקף – כלכליות ואזרחיות. בעוד התחזיות לטווח הקצר מתבררות לאלתר – וככל שעובר הזמן, הן מוכיחות את עצמן ואת שיטות המדידה והחישוב שעליהן הן מתבססות – נכונותן של התחזיות לטווח הארוך (והצדקתן של התוכניות המדיניות הנגזרות מהן, על השלכותיהן כבדות המשקל) מתגלה רק בדיעבד, זמן רב לאחר שנהגו התוכניות, בשלב שבו מאוחר מדי לתקן. על כן ראוי לבחון, ולשוב ולבחון, את מידת מהימנותן – עד היכן שהיד משגת.



"אמרו שלפי החישובים אנחנו נרגע מתחת לגובה פני הים"

עצה זו עשויה להישמע טריוויאלית, אולם הניסיון מלמד כי עיתים שהאדם נחפו ומסיק מסקנות (חלקן בעלות משמעות מעשית) שעין שלוה וביקורתית הייתה מבחינה בתפלות. בתלמוד מסופר כי כאשר ראה האדם הראשון – שלפי המסורת נברא בראש השנה,<sup>1</sup> סמוך ליום השוויון, היום שבו הימים והלילות שווים באורכם – שהימים הולכים ומתקצרים

אמר: אוי לי, שמא בשביל שסרחתי עולם חשוך בעדי וחוזר לתוהו ובוהו, וזו היא מיתה שנקנסה עלי מן השמים. עמד וישב שמונה ימים בתענית ובתפלה. כיון שראה תקופת טבת וראה יום שמאריך והולך, אמר: מנהגו של עולם הוא, הלך ועשה שמונה ימים טובים, לשנה האחרת עשאו לאלו ולאלו ימים טובים.<sup>2</sup>

אם כן, האדם הראשון הסיק מסקנה חפוזה וקבע כי בגלל חטאו העולם הולך ונמוג והיום הולך ומתקצר; אך אז הגיע יום היפוך החורף והימים שבו והתארכו. או אז הבין האדם כי הסיק מסקנה חפוזה על פי תקופה קצרה מדי וחגג.<sup>3</sup> מתברר כי דרך הסקת המסקנות שחזו"ל ייחסו לאדם הראשון נמשכת עד ימינו, כפי שניתן ללמוד מן העבר הקרוב וכפי שאבקש להראות – גם מן ההווה.

במכתב לנשיא ניקסון משנת 1972 כתבו שני גיאולוגים אמריקנים, ג'ורג' ג' קולקה ורוברט ק' מתייס, את הדברים הבאים:

התדרדרות אקלימית גלובלית, בסדר גודל שטרם ידע האדם המתורבת, הינה אפשרות ממשית ביותר, וייתכן שתארע בקרוב מאוד. התקררות זו היא בשל סיבות טבעיות ודומה לתהליכים שהביאו את עידן הקרח האחרון... הקצב הנוכחי של ההתקררות נדמה מהיר מספיק על מנת להגיע לטמפרטורות קרחוניות בעוד כמאה שנים, אם קצב זה יתמיד. ההשלכות המעשיות שעלולות להיות להתפתחויות אלו... כוללות בין השאר: (1) ירידה משמעותית בתפוקת המזון... (2) תדירות ועוצמה גבוהה יותר של תופעות טבע קיצוניות כגון שיטפונות, סופות שלגים, הכחדת יערות וכיוצא באלו.

במכתבם קראו שני הגיאולוגים לנשיא לכנס את מנהיגי העולם ולפעול על מנת להכין את בני האדם לעידן קרח נוסף הממשמש ובא. המכתב נשלח בעיצומה של המלחמה הקרה, ושולחיו לא שכחו לציין כי המדענים הרוסים כבר חוקרים את העניין. זמן לא-רב לאחר מכן פרסמו שני הגיאולוגים את טענתם במאמר מדעי שהתפרסם באחד מכתבי העת המדעיים המובילים בעולם, ה־Science.<sup>4</sup>

במשך שנות השבעים של המאה הקודמת הלכה והתקבלה התפיסה על אודות התקררות גלובלית ורבים אחזו בה – הגם שנחלקו על היקפה – עד שבי-1979 פרסם כתב העת היוקרתי Nature מאמר שקבע כי קיים קונצנזוס עולמי שאנו בתחילתה של תקופה קרה.<sup>5</sup> קביעה זו, יש לומר, הייתה הפרוזה. אדרבה, באותה תקופה מאמרים מדעיים רבים דיווחו על מגמות מתונות ואפילו הפוכות; אולם בשיח הציבורי זכו

לבכורה התפיסות בדבר התקררות גלובלית והן לוו במסע הפחדה לא מבוטל. עיתונים וכתבי עת פופולריים, כולל כתבי עת איכותיים דוגמת מגזיני "טיים" ו"ניויויק", פרסמו כתבות עם כותרות זועקות על עידן הקרח שעתיד להחריב את העולם, וניירות עמדה קראו ליצירת צוותי מחקר שיגבשו תוכניות מדיניות שיקדמו את פני הרעה; חלקם אף תיארו את חלקו של האדם באסון הקרב – זיהום האוויר שגרם.<sup>6</sup>

למותר לציין כי תחזיות אלו הופרכו לחלוטין, ואת מקומן תפסו תחזיות ההפוכות ב-180 מעלות – ובעוד כמה מעלות צלזיוס... בשנים האחרונות יש הסכמה כמעט גורפת על כך שאנו בעיצומה של התחממות גלובלית, וכי עד לתום המאה ה-21 יעלו הטמפרטורות בעולם – בשיעור של 1.1–2.9 מעלות צלזיוס לפי התרחיש הנמוך או בשיעור של 2.4–6.4 מעלות צלזיוס לפי התרחיש הגבוה.<sup>7</sup> המובילים את הטענה באשר להתחממות הגלובלית והסכנות הסביבתיות שצפויות בגינה הם מדעני "הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי האקלים", ה-IPCC, שלוחה של האו"ם שהוקמה בשנת 1990 והחליפה את "הקבוצה המייעצת על גזי חממה", ה-AGGG. באופן דומה לבהלת ההתקררות הגלובלית, אך בעוצמה כפולה ומכופלת, תיאוריית ההתחממות הגלובלית מלווה במסע הפחדה ציבורי בתקשורת ובפרסומים שונים; ומסע זה קיבל רוח גבית חזקה עם מתן פרס נובל לשלום לסגן נשיא ארה"ב לשעבר, אל גור, ול-IPCC, על מלחמתם בהתחממות הגלובלית ועל יצירת הסרט "אמת מטרידה". מסע ההפחדה נוחל הצלחה רבה ונושא פירות ברמה המדינית בדמות קידומן של אג'נדות "ירוקות"; הענקת תקציבי מחקר רבים לחוקרים, מוסדות וארגונים העוסקים בתחום; והשפעה על מהלכי תכנון ומדיניות בתחומים שונים. למסע קידום האג'נדה יש כמובן צד שני: בריאיון שנערך לאחרונה ב"גלובס" עם הפיזיקאי ניר שביב, שהשתכנע בעקבות מחקר כי ההתחממות אינה מעשה ידי אדם, טען שביב כי לסבורים כמותו "קשה יותר לקבל מענקים, קשה יותר לפרסם בכתבי עת נחשבים, וכשמאמרים כבר מתפרסמים, די מתעלמים מהם". לדבריו, בישראל זה רק "קשה", אולם באירופה ובארצות הברית עמדות כשלו נחשבות לדברי כפירה ממש, ומדענים התומכים בהם נזרקים ממשורותיהם או מנוודים על ידי עמיתיהם.<sup>8</sup>

יחד עם בניית הקונצנזוס סביב ההתחממות הצפויה, באו התחזיות באשר להשלכותיה הקטסטרופליות. בשנת 2005 פרסם ה-IPCC תחזית ולפיה בשנת 2100 יהיו בעולם 50 מיליון פליטים (!) עקב בעיות אקלימיות. פליטים אלו היו אמורים להגיע משולי המדבר עקב מדבור מואץ; מאזורי כפור-עד ("פרמה-פרוסט") בשל הפשרת קרחונים ושלג; ובעיקר – מדלתאות ואזורי חוף מיושבים כתוצאה מעלייה במפלס פני הים. ברם, שנת 2010 עברה ותחזית הפליטים לא התממשה. אותו ארגון שב וכתב ב-2011 כי עד לשנת 2020 יהיו בעולם 50 מיליון פליטי אקלים. נכון למועד כתיבת שורות אלו, בפתחה של שנת 2018, עדיין לא נראה כי תחזית זו הולכת ומתממשת. העלייה הניכרת היחידה שנצפתה בתקופה זו היא עלייתו של מפלס הנתונים והתחזיות.

העלייה במפלס פני הים היא הגורם המרכזי העומד בבסיסן של התחזיות האפוקליפטיות על הצפה של שטחים רבים העתידה ליצור מיליוני "מהגרי אקלים". בעבר היו אנשי ה-IPCC, הנושאים בעולם את דגל ההתחממות הגלובלית ועליית מפלס פני הים, צנועים יותר בקביעותיהם. בדו"ח הראשון שפרסם הארגון בשנת 1990 דווח כי אין עדויות משכנעות להאצה בעליית גובה פני הים במאה העשרים.<sup>9</sup> לעומת זאת, בדו"ח לשנת 2001 דווח כי העלייה החזיונית בגובה פני הים במהלך המאה העשרים – כלומר באותן שנים בדיוק שעליהן דובר בדו"ח הקודם – הייתה בשיעור של 0.7 מ"מ בשנה.<sup>10</sup> בשנים האחרונות כותבים אנשי IPCC על עלייה מדודה בשיעור של 1.5 מ"מ בשנה במהלך אותן שנים עצמן; על עלייה של 3.2 מ"מ בשנה מאז תחילת המאה העשרים ואחת; וחוזים עלייה של מטר במפלס מי הים עד שנת 2100 –<sup>11</sup> ותחזית זו נחשבת שמרנית בעיני ארגונים אחרים.

כאמור בפתיחה, על פי אסכולה זו העלייה נגרמת בשל שינוי טמפרטורת המים ובשל המסה מסיבית של קרחונים. המסת הקרחונים הצפויה מעלה את התחזית האפוקליפטית של עליית המפלס לשישה מטרים ויותר עד סוף המאה – מה שכמובן יביא למאות מיליוני נפגעים ולנזקים בסדרי גודל בלתי-משוערים.

התחזיות האפוקליפטיות ומסע ההפחדה הציבורי אינם פוסחים על מדינת ישראל; להפך – נדמה כי ארץ-ישראל נבחרה מבין כל הארצות לאתר עלייה לרגל של מי ים. בשנת 2008 למשל פורסם דו"ח מטעם לשכת המדען הראשי של המשרד להגנת הסביבה ובו דווח כי קצב עליית מפלס פני הים בים התיכון עומד על כ-10 מ"מ מדי שנה, ודבר זה יוביל "לנסיגה של 2-10 מטרים של קו החוף ואובדן של 2 עד 4 קמ"ר חוף כל 10 שנים, נסיגת המצוק החופי והרחבת תחום הסיכון של תשתיות הבנויות עליו ב-40-50 מטרים מזרחה".<sup>12</sup> בשנת 2013 עלתה לרשת מערכת שפותחה באוניברסיטה העברית (במסגרת פרויקט מחקר במימון האיחוד האירופי) ומאפשרת למשתמשים בה לדמות רמות שונות של הצפה לאורך חופי ישראל, ממטר אחד ועד ל-10 מטרים, ולבחון מהן הפגיעות החברתיות והכלכליות הצפויות על פי כל תרחיש. ההשקה לוותה בפרסומים באתרי אינטרנט ובכלי תקשורת מרכזיים.<sup>13</sup>

חודשים ספורים לאחר מכן צוטט בעיתון "כלכליסט" דב רוזן, מנהל המחלקה לגיאולוגיה ימית ותהליכים חופיים מהמכון לחקר ימים ואגמים בחיפה, באומרו כי צפויה עלייה של 50 ס"מ עד לשנת 2040 במפלס פני הים התיכון (כלומר עלייה של כ-2 ס"מ בשנה) ולפחות מטר אחד עד לשנת 2100.<sup>14</sup> בשנת 2015 ראה אור פרסום של הפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון, "תוכנית ימית לישראל", המתריע אף הוא על עלייה צפויה של 1-1.4 מטר בגובה פני הים התיכון עד שנת 2100.<sup>15</sup>

המוסכמה בדבר העלייה בגובה פני הים מחלחלת גם למסדרונות השלטון הישראליים. למשל, בשנת 2004 נחקק חוק שמירת הסביבה החופית הקובע בין היתר איסור על

בנייה במרחק של עד 100 מטרים מקו החוף – בהתאם לתוכנית המתאר האזורית (תמ"א) של חופי הים התיכון משנת 1983; וכן מטיל איסור על בנייה במרחק של עד 300 מטרים מקו החוף ללא אישור מטעם הוועדה לשמירת הסביבה החופית (ולחו"ף). חוק שמירת הסביבה החופית קובע כי לצורך הוראותיו, קו החוף יוגדר "בגובה 0.75 מטר מעל אפס האיזון הארצי"<sup>16</sup>. למעשה הייתה זו פשרה שהתקבלה על ידי המחוקק, שכן הוועדה הבין-משרדית שטיפלה בגיבוש החוק המליצה על קביעת הקו בגובה 1.5 מטרים מעל פני הים, כדי לקדם את פני הרעה בהתאם לתחזיות העלייה בגובה פני הים.<sup>17</sup> כל עלייה במפלס האנכי של פני הים המשוערים מתורגמת למתיחה של רצועת החוף עשרות מטרים מזרחה, ופירוש הדבר אובדן של מאות ואלפי דונמים של שטח ציבורי ופרטי לבנייה.

מאז ועד היום התקבלה שורה של החלטות ממשלה והוקמו כמה וכמה ועדות ממשלתיות שעיקרן היערכות לשינויי אקלים בכלל ולעלייה ניכרת במפלס פני הים בפרט. בדיון בוועדת הכנסת בשנת 2014 דיווחה ד"ר סיגיה נתניהו, המדענית הראשית של המשרד להגנת הסביבה, כי "גם בישראל אנחנו רואים עלייה בקצב עליית מפלס פני הים, ומדברים על 12-16 סנטימטרים ב-20 השנה האחרונות או אפילו פחות לדעתי [כלומר כ-1.5 ס"מ בשנה] גם כאן בחופי ישראל. זה אומר הרבה מאוד על איך אנחנו צריכים להיערך מבחינת תשתיות"<sup>18</sup>. שורה של גופים עמלים בימים אלו על גיבוש אמצעי מדיניות לאור התחזיות בדבר העלייה הצפויה של מפלס פני הים, ובכללם: גופים ממשלתיים דוגמת "פרויקט מדיניות מרחב ימי ישראל" של מנהל התכנון ו"התוכנית האסטרטגית להיערכות לשינויי אקלים" של המשרד להגנת הסביבה; גופים במימון ממשלתי דוגמת "מרכז הידע הישראלי להיערכות לשינויי אקלים (ICCI)" באוניברסיטת חיפה; וגופים בלתי-ממשלתיים הפועלים בשיתוף פעולה צמוד עם הממשלה דוגמת פרויקט "תוכנית ימית לישראל" בטכניון.

כפי שנראה להלן, תחזיות מבהילות אלה, המוצגות כמדעיות ומעצבות את החלטותיהם של גופי התכנון בעולם ובישראל, הן תחזיות כוזבות. מאז פרסום המודלים של IPCC, הן ביחס לשינויי הטמפרטורה הצפויים הן באשר לעלייה הצפויה בגובה פני הים, עברו כמעט שני עשורים. אומנם זוהי תקופה קצרה כאשר עוסקים בתחזיות אקלימיות, אך יש בה כדי לתת אינדיקציה באשר לאמינות התחזיות. חוקרים שהעמידו את התחזיות במבחן המדידות גילו כי תחזיות המודלים גבוהות מאוד ביחס לתצפיות ולמדידות.

מדוע נכשלו תחזיותיהם של נביאי החורבן האקלימי? כיצד קרה ששלושה דו"חות מטעם אותו גוף, המתייחסים לאותן שנים ומתבססים על אותן מדידות, הציגו נתונים שונים כל כך לגבי מידת העלייה בגובה פני הים? נראה שהפער נובע מכשלים מתודולוגיים לצד הטיית נתונים – הנעשית מתוך רצון להגיע אל תוצאות העולות בקנה אחד עם התזה המקובלת על התחממות גלובלית מעשה ידי אדם. על מנת להבין

את העניין עד תומו, עלינו לפרוס מעט את היריעה בדבר השיטות למדידת מפלס פני הים.

## יש רעה אשר ראיתי תחת השמש

מדידת שינויים בגובה פני הים היא אתגר קשה ביותר. באופן כללי, הים אינו נגיש למדידות מדויקות כפי שמתאפשר על היבשה, והוא חשוף לגורמים רבים, קשים למדידה בפני עצמם, העשויים להשפיע על התנהגותו. גורמים אלו עלולים להשפיע גם באופן נקודתי, ובכך להטות את ממצאי המדידות. על מנת להגיע למדידות אמינות, לא כל שכן תחזיות אמינות, יש להכיר ולקחת בחשבון מכלול רב של גורמים מגוונים: גורמים המשפיעים על גובה פני הים עצמו, גורמים המשפיעים על מדידת גובה פני הים, וגורמים ההופכים את עצם המדידה לבלתי-אפשרית ובלתי-אמינה. נפתח בקבוצה האחרונה, שכן היא הרלוונטית ביותר לנושא הראשון שנרצה לטפל בו: מדידת גובה פני הים באמצעות לוויינים.

מאז תחילת המאה העשרים הפכו המדידות הלווייניות, "אלטימטריה לוויינית" בשפה המקצועית, לאמת המידה המקובלת, ועליהן נסמכים הנתונים והתחזיות של ה-IPCC וחבריו. אלא שמדידות אלו סובלות מבעיות מתודולוגיות המעמידות את מהימנותן בספק עצום. בהקשר של תזת ההתחממות הגלובלית הן סובלות מבעיה נוספת: המדידות המתקבלות אינן מניבות כלל ועיקר נתונים המעידים על עלייה במפלס פני הים.

הקושי המרכזי ביכולת למדוד את גובה פני הים באמצעות לוויינים הוא קביעת משטח הייחוס שביחס אליו מודדים. העיקרון העומד מאחורי מדידות לוויין פשוט לכאורה: הלוויין משייט מעל פני כדור הארץ בגובה קבוע, ומעת לעת הוא מודד את המרחק שבינו לבין פני הים; מחסרים את הפער מגובה השיוט ומשווים את התוצאה למפות שבידינו, והרי גובה פני הים ברגע נתון; משווים נתון זה לנתון קודם ומתקבלת מגמת השינוי. אכן, נשמע פשוט; אך למעשה אין ולו שלב אחד פשוט בכל התהליך הזה.

והרי הבעיה: באופן אמיתי איננו יכולים למדוד את גובה פני כדור הארץ בשום מקום. אין צורך להסביר כי גובה שטח היבשה של כדור הארץ אינו אחיד; כדור הארץ רצוף הרים, בקעות, מישורים בגבהים שונים וכיוצא באלו. אם כן, כאשר אנו אומרים שלוויין משייט בגובה 100 ק"מ מעל כדור הארץ, נשאלת השאלה: מעל מה? יש לנו צורך בגובה אפס אשר ביחס אליו נוכל למדוד גבהים, יהיו אלו הרים או תחנות חלל. בשלב זה הקורא עשוי לחשוב כי בעיה זו נפתרה מזמן, שהרי גובה אפס הוא גובה פני הים. ייתכן שכאן נכונה הפתעה לקורא.

ראשית, ישנה בעיה בסיסית והיא שגובה פני הים מופרע באופן תמידי על ידי גורמים משתנים כרוחות, גלים וסערות; כלומר לא ניתן לקבוע את גובה פני הים על ידי



תצפית, אלא רק באמצעות חישוב המתעלם מגורמים אלו ומשער מה היה גובה המים בהינתן השפעות קבועות בלבד. זו הבעיה הקלה. הבעיה הקשה יותר היא העובדה שגובה פני הים אינו אחיד. רובנו רגילים לחשוב על שטח פני הים כעל שטחם של פני המים בכוס המונחת על השיש במטבח; המים חסרי צורה, ומכיוון שכוח הכבידה פועל באופן שווה בכל מקום, הם נמשכים כלפי מטה באופן שווה ומתיישרים בהתאם לכלי שבו הם נמצאים. אך אליבא דאמת, כשם שהיבשה אינה משטח בעל גובה אחיד, גם הים אינו משטח בעל גובה אחיד. מדוע? משום שכדור הארץ אינו ספירה מושלמת ולכידה: במקומות שונים, על פני כדור הארץ ומתחת לקרקעית הים, ישנם ריכוזי מסה שונים, בעלי הרכב כימי שונה וצפיפות שונה. ממילא, כוח הכבידה אינו שווה בכל נקודה על פני הכדור. במקומות שבהם ישנו ריכוז מסה גדול – לדוגמה, במקומות שבהם יש צפיפות חומר מתחת לקרקעית הים או בקרבת יבשת – תהיה התקבצות מסיבית יותר של מים שתתבטא במפלס ים גבוה יותר; ולהפך במקומות שבהם ריכוז מסה נמוך.

בעיה זו מוכרת לאנושות כמאתיים שנה, ואכן במרבית השנים הללו היכולת לחשב את גובה פני הים הייתה מוגבלת ביותר. רק בעשורים האחרונים, באמצעות כלים עדינים המורכבים על גבי ספינות ולוויינים ומסוגלים לחוש שינויים בכוח הכבידה ולמדוד אותם, נוצרה היכולת להפיק משטח ייחוס בעל דיוק רב למדי המראה את גובהו של הים במקומות שונים. משטח זה מתקבל לאחר חישוב גובה פני הים לו היה מושפע מכוח הכבידה וסיבוב כדור הארץ בלבד, ובהתעלם מקיומה של יבשה או גורמים מפריעים אחרים (גלים למשל). משטח זה נקרא בשפה המקצועית "גיאואיד". הפער בין הנקודות הגבוהות ביותר על פני הגיאואיד לבין הנקודות הנמוכות ביותר מגיע לכדי 200 מטרים.<sup>19</sup>

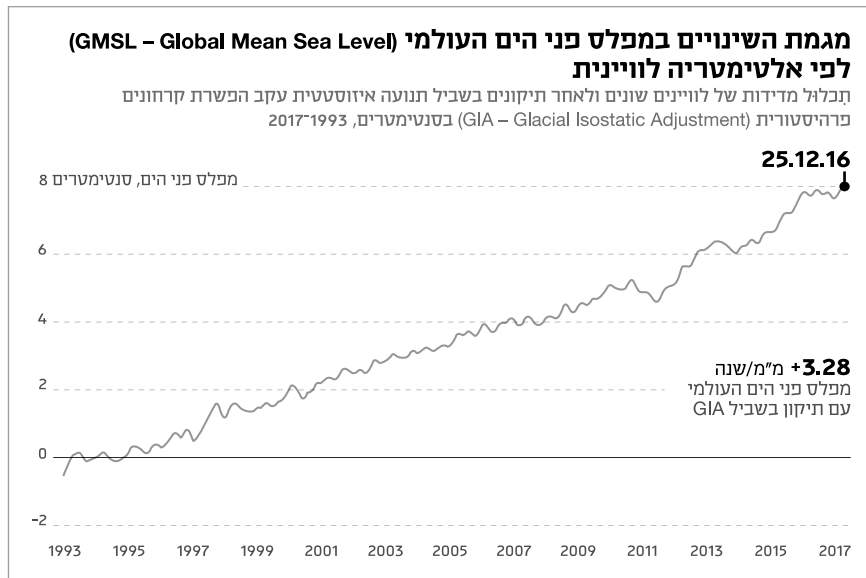
אם כן, בבואנו לקבוע את גובהו של לוויין המשייט בחלל ביחס לכדור הארץ, עדיין נמצאים אנו בבעיה שכן אין לנו גובה אפס. כמשטח ייחוס ללוויינים מחשבים "אליפסואיד" (מלשון אליפסה) – משטח מדומיין המתייחס לכדור הארץ כולו, ים ויבשה, כמשטח אחיד וחלק, כולו באותה גובה; זהו גובה האפס של הלוויין. כדי למדוד את גובה פני הים יש להחסיר מגובהו המדומיין של הלוויין את המרחק שנמדד ממנו אל הים, ואת התוצאה לתקן בהתאם לפער שבין אליפסואיד הייחוס של הלוויין לבין הגיאואיד באותה נקודה – פער שעלול להגיע לכדי עשרות מטרים. אם לא די בזה, יש לקחת בחשבון כי הגיאואיד אינו קבוע אלא משתנה משנה לשנה במקומות שונים בהתאם לשינויים במסת כדור הארץ, ושינויים אלו יכולים להגיע לסדרי הגודל של השינויים המדווחים במדידות.

זה עוד לא הכול. ישנה גם בעיית ההתאמה של שטחי הייחוס למפות המקומיות שבעזרתן מבקשים למדוד את השינוי ביחס שבין גובה פני הים לבין היבשה. גובה האפס המקומי בין מדינות, לעיתים אפילו בין מדינות שכנות, אינו זהה – ואי-

התאמה זו קיימת לעיתים גם בין מקומות שונים בתוך אותה מדינה. מדינות שונות קובעות לעצמן גובה אפס שונה, באופן המקל על החישובים והמדידות הטופוגרפיות המקומיות שלהן. כך לדוגמה גובה אפס במפה הולנדית שונה מזו הבלגית ב-2.34 מטר (!); וגובה פני הים הממוצע במפות ארצות הברית באזורים הנמצאים לחוף האוקיינוס האטלנטי שונה בכ-0.6–0.7 מטר מגובהו באזורים הנמצאים לחוף האוקיינוס השקט.

בשורה התחתונה, בבוא החוקר להשתמש בנתונים המתקבלים ממדידות גובה לווייניות – ועל אחת כמה וכמה בבואו להפיק מהם ממוצע כלל-עולמי – עליו לצלוח מסכת חישובים מורכבת ביותר, הדורשת ממנו התחשבות בגורמים שונים ומשתנים. ניתוח של נתוני לוויינים (שנשלחו לשם מדידת גבהים) מאז 1992 הראה כי במקרים רבים נפלו טעויות קשות במדידות כתוצאה מהקשיים הנ"ל. לדוגמה, באחת הבדיקות בחנו את נתוני גובהם של משרדי חברת Esri בקליפורניה (מחברות המיפוי הגיאוגרפי המובילות בעולם) והתקבל פער של למעלה מ-30 מטר (!) בין גובהם על פי המפות המפורטות, 400 מטר, לבין המדידות הלווייניות הלא-מתוקנות – 368 מטר בלבד.

אם כן, כדי להפיק מידע על עלייה בגובה פני הים באמצעות לוויינים יש לבצע סדרת תיקונים חישוביים במדידות המתקבלות מהם, כאשר סדרי הגודל של התיקונים הם מטרים ואילו מן המדידות אמורים להפיק נתונים ברמת דיוק של מילימטרים. האופן שבאמצעותו יש לחשב את התיקונים הנדרשים, והחשיבות המיוחדת לסוגי חישובים שונים, תלויים מאוד בשיקול דעתו של החוקר. כפי שנראה מיד, זהו המפתח לתופעת העלייה במפלס הנתונים משנה לשנה, כולל בדו"חות המתייחסים אל אותן מדידות

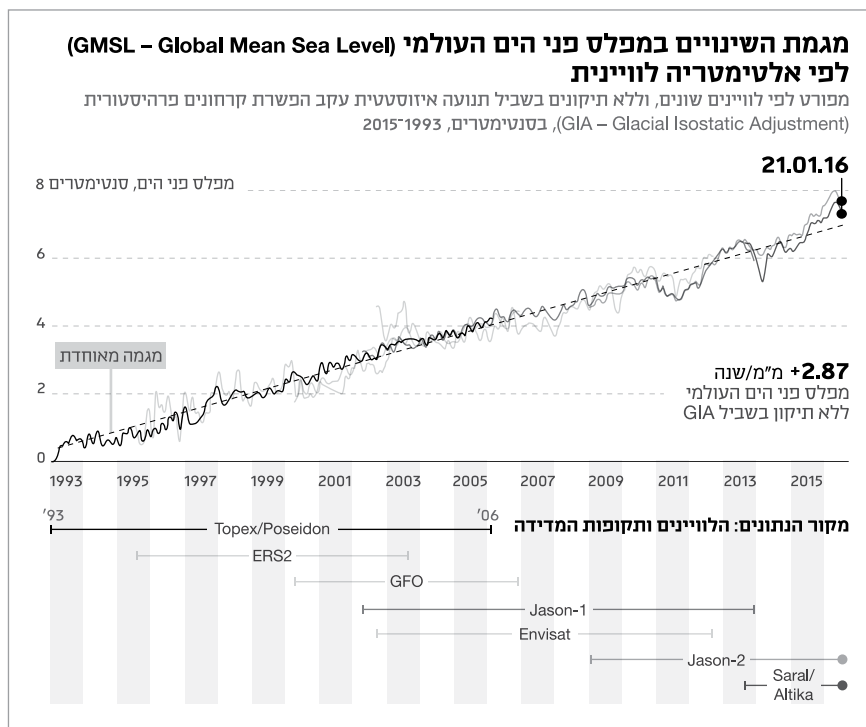


אזור 1: העלייה במפלס פני הים על פי תכלול גופים מנטרים שונים, דצמבר 2016

ממש, כמתואר לעיל. מתברר שישנם לא שניים אלא שלושה דברים שעדיף לא לדעת כיצד הם מיוצרים: נקניקיות, חוקים – ונתוני אלטימטריה לוויינית.

בשלהי שנת 2016 הופק מאתר AVISO+ (ארגון העוסק בתיעוד, אימות ותיווך מידע לווייני) הגרף הבא (איור 1), המציג נתונים בנוגע לשינויים בגובה פני הים מאז שנת 1992. ניתן לראות כי בין השנים 1993–2016 נמדדה עלייה של 3.28 מ"מ בשנה.

זוהי אם כן "הנקניקיה"; כעת ננסה להתחקות אחר תהליך הייצור שלה. ראשית, יש לדעת שגרף זה שורטט לאחר תיקון בעבור הרמה איזוסטטית המתרחשת באזורים הצפוניים של כדור הארץ. המונח הגיאולוגי "איזוסטטיקה" משמש לתיאור תופעות כגון שקיעה או הרמה של המעטפת העליונה הנוקשה של כדור הארץ (הליתוספרה), היושבת על מעטפת בעלת מאפיינים צמיגים יותר (אסתנוספרה) – עקב שינויי מסה. אזורים שונים בצפון כדור הארץ נמצאים בתהליך ארוך מאוד של הרמה איזוסטטית עקב הפרשת קרחונים (GIA – Glacial Isostatic Adjustment) שהקטינה באופן ניכר את המסה שלהם; לא מדובר בהפשרת קרחונים נוכחית אלא בתהליכים שנגרמו בשל הפשרה מסיבית של קרחונים לפני כ-20,000 שנה בצפון אמריקה ובאירופה, תהליכים הנמשכים עד היום. אזורים אלו נמצאים עדיין בתהליך "ריבאונד" שבמהלכו מתרחשת הרמה של חלקי יבשה מסוימים ושקיעה של נקודות מסוימות



איור 2: העלייה במפלס פני הים, הלוויינים שעל פיהם חושבה המגמה, ינואר 2016

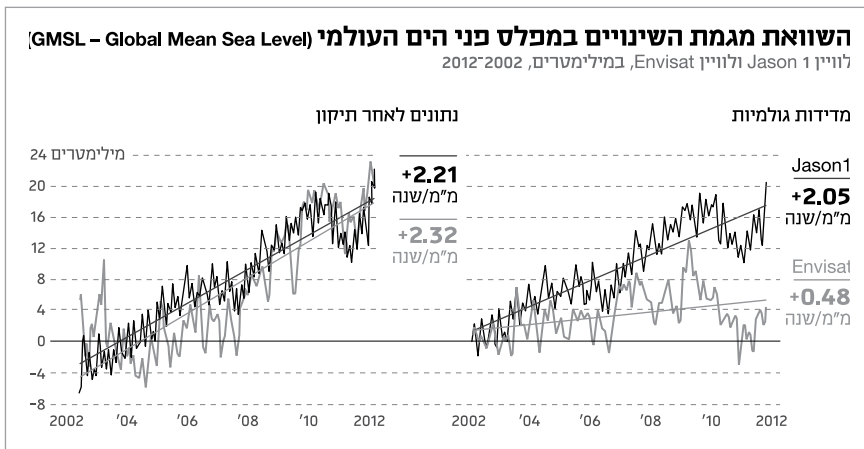
בקרקעית הים ושני התהליכים גורמים לירידה משמעותית במפלס פני הים באזורים המדוברים. אם כן, הגרף דלעיל אינו מציג כמה פני הים עלו בפועל ביחס ליבשה, אלא כמה הם עולים באופן מבודד – בהתעלם מגורמים המנוגדים למגמה.

שנית, המדידות המוצגות בגרף זה לא נמדדו מעולם בפועל, והן אינן אלא איחוד של כמה מדידות מכמה לוויינים שונים, שבעה ליתר דיוק, כפי שניתן לראות באיור 2 שהופק מאותו מקור בראשית אותה שנה (ללא תיקון בעבור GIA).

אם כן, ללא התיקון מצביעים הנתונים על עלייה מדודה של 2.87 מ"מ בשנה – פער של כ-15 אחוזים ביחס לנתונים המופיעים באיור 1. מאיור 2 נראה כי המדידות של כלל הלוויינים, שנערכו על פני שנים שונות בשיטות שונות ובגובהי שיט שונים, נתנו תוצאות זהות, פחות או יותר; אך גם הצבת נתוני כל הלוויינים בגרף אחד אינה הצבת התוצאות האמיתיות שלהם אלא מעין עיבוד, כפי שנראה מיד.

כיוון שיש בידינו גם את הנתונים המקוריים של הלוויינים עצמם, אנחנו יכולים לעמוד מיד על כמה הבחנות חשובות. ראשית, תוצאות שלושת הלוויינים הראשונים השייכים לסוכנות נאס"א האמריקנית: Jason-1, Jason-2 ו-Jason, אכן מתלכדים למגמה אחידה; אך הערכים המוחלטים שהתקבלו בכל אחד מהם היו שונים מאוד.

מרתק במיוחד הוא מה שאירע לנתוני הלוויין הרביעי בגרף שבאיור מס' 2, Envisat, שנשלח לחלל בשנת 2003 למטרות סביבתיות. נתוני הגלם של לוויין זה הראו כי העלייה בפני הים נמוכה בשיעור ניכר מהתוצאה של שילוב שלושת הלוויינים שהוצגה לעיל. לוויין זה מדד בשנים 2004–2012 עלייה ממוצעת של 0.4 מ"מ בשנה – פחות מרבע מהמדידות של Jason-1 (איור 3). הנתונים התפרסמו לאחר תיקון שהתאים אותם לנתוני הלוויין "המחמיר"<sup>20</sup>.



איור 3: נתוני לוויין Envisat בהשוואה ל-Jason-1, לפני תיקון ואחריו.

באותה שנה, שנת 2003, שלחו האמריקנים לוויין נוסף ושמו GRACE, המכונה גם GFO, הלוויין השביעי באיור 2 לעיל, אשר מודד את מסת המים באוקיינוסים. בעזרת הנתונים שאסף, כאמור למטרה אחרת, ניתן לחשב גם את גובה פני הים. התוצאה שהתקבלה מלוויין זה הציגה ירידה בגובה פני הים בשיעור של 0.12 מ"מ בשנה. לעומת זאת, בגרף המאוחד הנתונים תוקנו כך שישקפו עלייה של 1.9 מ"מ בשנה; אך לא ברור על מה מתבסס תיקון זה.<sup>21</sup>

אם כן, המגמה הברורה היחידה שניתן לחלץ מנתוני הלוויינים היא מגמת יישור הקו אל לווייני נאס"א, היחידים שתוצאותיהם מתיישבות, תוך פערים משמעותיים בינם לבין עצמם, עם תזת העלייה. לזאת יש להוסיף את העובדה המדהימה הבאה: על פי נאס"א הדיוק של מדידות הלוויינים הוא בשיעור של 3.3–5 ס"מ. כלומר תחום השגיאה הוא יותר מפי עשרה מהשינוי המדוד – דבר שלכאורה מופרך לחלוטין בכל הנוגע למדידות מדעיות. על פי רוב, הסטנדרט המדעי הפוך: דיוק המדידה צריך להיות גבוה פי עשרה מהפרמטר הנחקר. אין זה פלא שישנם כבר קולות בקהילת המדענים הטוענים כי "בנתוני האלטימטריה הלוויינית יש בעיות קריטיות העושים אותם כמעט בלתי-שמישים לחלוטין".<sup>22</sup>

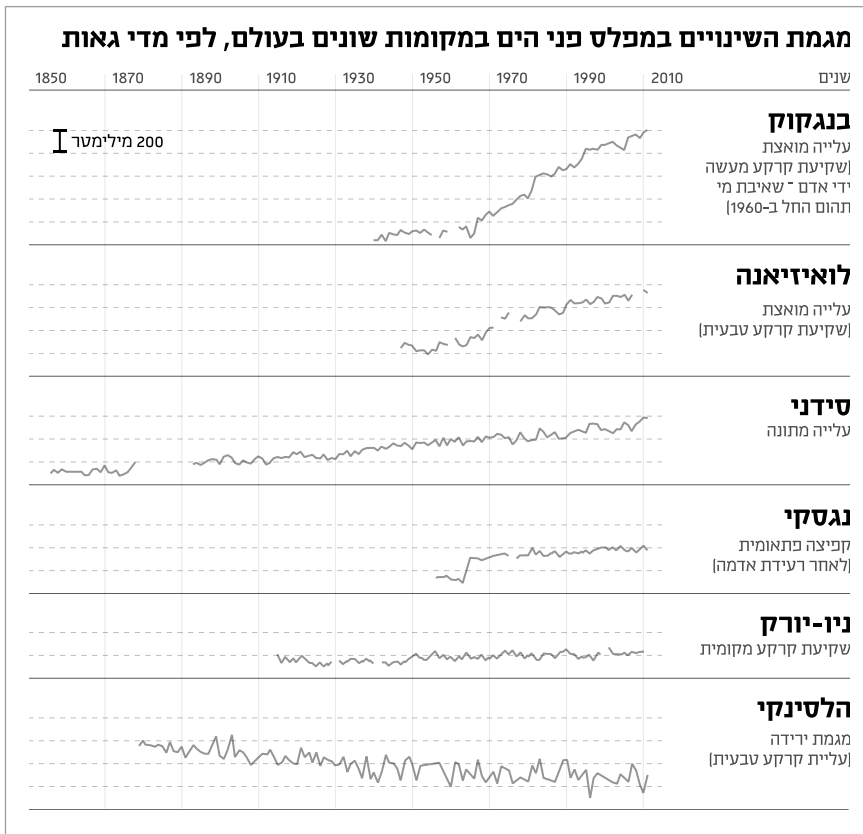
## טוב ילד מסכן וחכם ממלך זקן וכסיל

בניגוד לאלטימטריה הלוויינית, מדידות המתבצעות על פני כדור הארץ מייצגות באופן נאמן יותר את השינוי בגובה פני הים. מדידות אלו כוללות בעיקר את מדי הגאות, אשר מיד נרחיב את הדיבור על אודותיהם, אך גם את עדויות השדה.

עדויות השדה הן המידע הפשוט והברור ביותר לשינוי היחסי שחל בין ים ליבשה במקום נתון. מובן כי עדויות השדה בעולם מעידות רק על מקום התצפית. כך למשל בעבודת שדה שנעשתה בטסמניה בשנת 1841 נחקק על פני צוק בנמל סימן המראה את יחסי הים והיבשה; 158 שנה לאחר מכן, בשנת 1999, חזר חוקר לאותו מקום וצילם את הסימון; הצילום מראה כי גובה פני הים ירד בכ-35 ס"מ.<sup>23</sup>

לעומת עדות שדה זו, ניצבת הבאר בחוף דור בישראל המעידה על עליית מפלס של כ-20–30 ס"מ מאז תחילת המאה העשרים. מטייל גרמני שטייל אז בארץ ישראל תיאר כיצד התושבים מנצלים את הבאר לשאיבת מים, מה שאינו אפשרי בימינו כאשר הבאר נמצאת כולה מתחת לפני הים.

עדויות השדה הן מטבען גסות למדי ולוקליות לחלוטין, ולא ניתן להפיק מהן די מידע על מנת לבסס תמונה מדויקת בכל הנוגע לשינויים בגובה פני הים. אולם יש בכוחן להמחיש את הנקודה הראשונה שאותה חשוב להבין בהקשר של מדידות מפלס פני הים: כל הנתונים המתפרסמים על שינויים במפלס פני הים מתייחסים לשינוי ממוצע; שינוי זה אינו מדוד אלא מחושב. מדידות במקומות שונים בעולם עשויות להצביע על



איור 4: מדידות שהתקבלו ממדי גאות ברחבי העולם

מגמות שונות, ואף סותרות – וזו אכן התמונה המתקבלת בבירור מהמדידות, ועל כך יורחב בהמשך.

השיטה הוותיקה והאמינה ביותר למדידת גובה פני הים היא מדידה באמצעות מדי גאות, הרושמים את שינויי מפלס הים בעזרת מצוף. המקור לכל נתוני מדי הגאות הוא בנק הנתונים המנוהל על ידי ה-PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) שמושבו בבריטניה ובו מרוכזים כל תוצאות מדי הגאות – הן אלה הפעילים כיום, הן אלה שהיו פעילים בתקופות כלשהן בעבר; סך הכול יש בבנק זה נתונים על כ-2,000 מדי גאות. נוסף על כך ישנו פרויקט GLOSS (Global Sea Level Observing System) המבצע מעקב כלל-עולמי אחר השינויים במפלס הים, וכולל כ-300 תחנות מדידה ובהן גם תחנת חדרה המופעלת על ידי המכון לחקר ימים ואגמים לישראל (תחנה מס' 80). עד שנת 1900 היו מדי הגאות בעיקר בצפון מערב אירופה ובצפון אמריקה; ובמהלך המאה העשרים התרבו מדי הגאות וכיסו בהדרגה את כל יבשות העולם.

כאמור, באזורים שונים בעולם עשויות להתרחש מגמות שונות לחלוטין בגובה פני הים. האיור הבא (איור מס' 4) משווה בין מדידות שנצפו בכמה אזורים בעולם במהלך המאה העשרים. כפי שניתן לראות, במקומות מסוימים, דוגמת ניו-יורק ונגסקי, לאחר קפיצה שהתרחשה בשנות השישים, גובה פני הים סטטי למדי; במקומות אחרים דוגמת בנגקוק ולואיזיאנה נרשמה עלייה ניכרת; ואילו בפּינלנד נרשמה ירידה ניכרת.

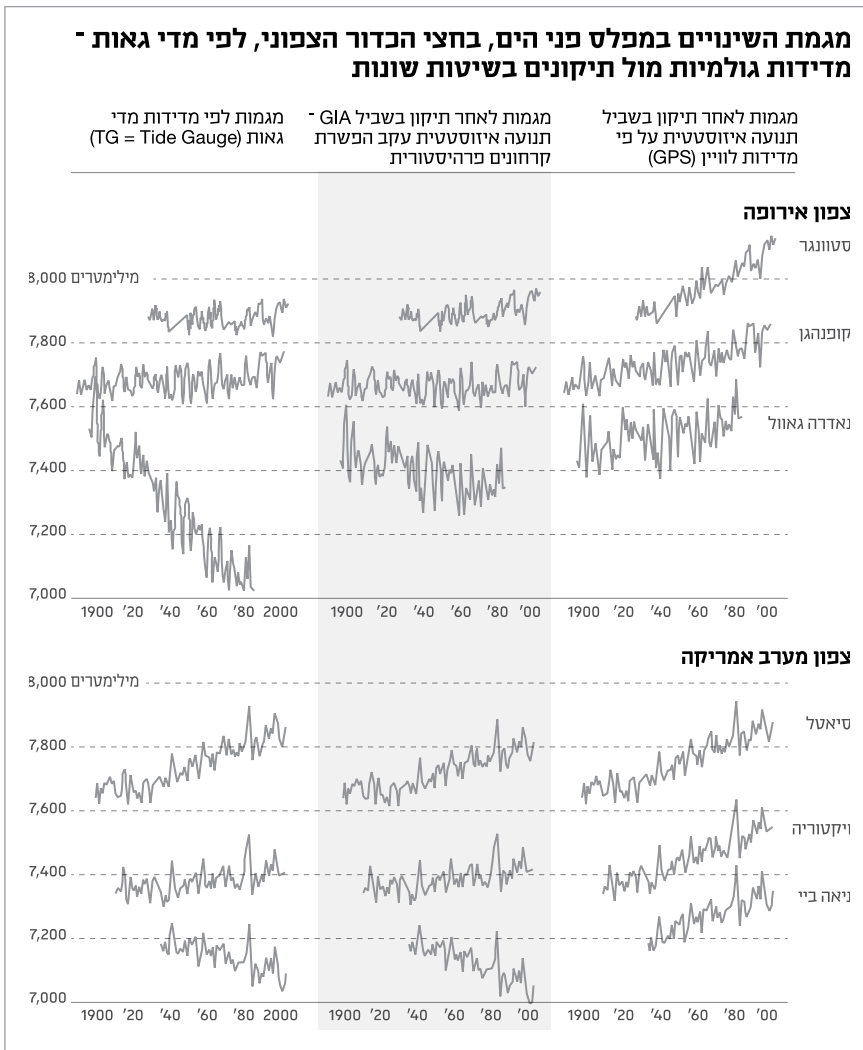
איור זה ממחיש היטב את התועלת המועטה היוצאת מחישוב ממוצעים של שינויים במפלס פני הים וכיצד תרחישים המתבססים עליהם אינם שמישים – שכן לא ניתן ללמוד מהם מה צפוי בפועל במקום מסוים. תכנון מדיניות על בסיס תרחישים שכאלו הוא טעות אסטרטגית ממעלה ראשונה.

אבל לא נפטור בלא-כלום את העניין ונסביר משהו על מדי הגאות. מדי הגאות מעוגנים ביבשה ולכן כל מדידה שלהם היא של תנועה יחסית: מה שנראה כעליית פני הים אפשר שאינו אלא שקיעת היבשה, ולהפך. במזרח ארצות הברית מצויים מדי גאות רבים שרישומם מוצג בספרות המדעית כעדות לעלייה בגובה פני הים; אך יש בספרות המדעית גם מפות רבות המציגות את השקיעה של מזרח ארצות הברית, וכמובן תוצר הרישום של שקיעה כזו זהה לרישום של עליית פני הים. לדוגמה, באיור לעיל תועדה "עלייה" במפלס פני הים בלואיזיאנה הנמצאת באזור שבו מתרחשת, לכל הדעות, שקיעה טבעית של הקרקע היבשתית.

הלסינקי לעומתה נמצאת באזור שבו מתרחשת הרמת קרקע, עקב הפשרת הקרחונים הקדומה שתוארה לעיל, מה שמתבטא במדידות כירידה יחסית של גובה המים. למעשה, כל מדי הגאות בעלי הרקורד הארוך ביותר נמצאים באזורים שעוברים הרמה, עקב הפשרת הקרחון האחרון לפני כ-15,000 שנה, שהשפעתה המדויקת על מפלס פני הים קשה לקביעה. דבר זה מערער מאוד על מהימנות המידע המופק מהן, ולכן בוחרים חלק מן החוקרים להתעלם מהשפעות אלו בכואם לחשב ממוצעים גלובליים של שינויים בגובה פני הים. אולם בעבור אלו הבוחרים שלא להתעלם מהם נוצר מרחב רב לתיקונים חישוביים מהסוג שבו נתקלנו כבר, עד לכדי היפוך הממצאים לחלוטין. התרשים בעמוד הבא מתאר את האופן שבו מדידות בצפון אירופה ואמריקה תוקנו בשיטות שונות, שהניבו תוצאות שונות, כך שיתאימו למגמה הכללית (איור 5).<sup>24</sup>

דוגמה הראויה לתשומת לב מיוחדת היא בנגקוק, הנקודה שבה נרשמה העלייה המשמעותית ביותר בגובה פני הים. גם במקרה זה מדובר בשקיעה של הקרקע, אך הפעם מדובר בשקיעה מעשה ידי אדם שנגרמה בעקבות שאיבה מסיבית של מי תהום והידחסות הקרקע כתוצאה מבנייה עירונית. מאז סוף שנות השמונים של המאה הקודמת שקעה בנגקוק בקצב של כ-40 מ"מ בשנה, ובהתאם נמדדה עלייה של מטר במפלס פני הים במד הגאות הסמוך לה.

לבסוף, עלינו להפנות את מבטנו לתחנת יפן. לאורך כל השנים, תחנת יפן הראתה



איור 5: מדידות מול נתונים של מדי גאות בחצי הכדור הצפוני

מצב סטטי במפלס פני הים, למעט קפיצה ברישום במהלך שנות השישים. קפיצה זו מתייחסת לרעידה האדמה הגדולה שהתרחשה באלסקה בשנת 1964, והיא מבטאת שינוי שנוצר עקב תזוזת לוחות טקטוניים. תופעה דומה ניתן לראות במדידות של תחנת אלסקה, וכן של סיציליה, שחוותה רעידת אדמה בשנת 1908. ברי שגרף זה אינו יכול לבטא מגמת שינוי כללית בגובה פני הים, אך מי שיפיק ממנו שינוי ממוצע לאורך שנות המדידה יגלה עלייה של כ-4 מ"מ בשנה.

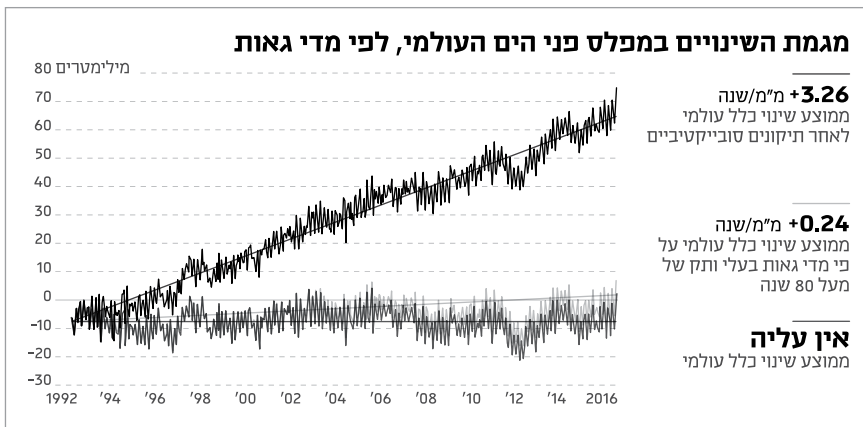
בניגוד לתחנות חצי הכדור הצפוני, שבהן מצויות תנודות חריפות בשל שינויים בקרקע, התמונה העולה ממדי הגאות שבחצי הכדור הדרומי שונה למדי. חצי הכדור



הדרומי סובל ממיעוט מדי גאות ביחס לחצי הכדור הצפוני, אולם נתוני מדי הגאות המצויים בו מצביעים על יציבות יחסית של גובה פני הים.<sup>25</sup>

קבוצת המחקר של NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) המתפעלת 159 מדי גאות מיינה את התחנות לפי סביבת הימצאותם הגיאולוגית. לפי נתוניה, ארבעים תחנות נמצאות באזורי הרמה מובהקים ולכן מראות ירידה בגובה פני הים; כחמישים תחנות נמצאות באזורי שקיעה ומציגות עלייה בגובה פני הים; וכשישים תחנות שלה נמצאות באזורים יציבים, באופן יחסי, מבחינה גיאולוגית, ומראות עלייה בשיעור של 0-2 מ"מ בשנה – מספר נמוך במידה ניכרת מ-3.25 מ"מ בשנה המופיע בדו"ח של IPCC.

בשנת 2016 ניתחו שני חוקרים, פרקר ואולייר, בעבודה מפורטת, את מגמות העלייה בגובה פני הים בתחנות רבות: תחנות עם רקורד ארוך (יותר משמונים שנה) ותחנות צעירות יותר. הם מצאו כי ללא כל תיקון, קצב העלייה בפני הים הוא 0.24 מ"מ בשנה; ואילו לאחר התיקונים הקצב עומד על 3.25 מ"מ בשנה כפי שדיווח IPCC. על פי המדידות עצמן, קצב העלייה בפועל בגובה פני הים במהלך המאה העשרים ולאחריה, זניח עד לא-קיים.<sup>26</sup>



איור 6: קצב עלייה עולמי ממוצע בגובה פני הים, לפני ואחרי תיקונים

כעת מובן היטב כיצד ייתכן שבדו"חות שונים של ה-IPCC לאורך השנים הוצגו נתונים שונים באשר לעלייה במפלס פני הים בהתייחס לאותו טווח שנים: זוהי עדות ברורה לעלייה במפלס התיקונים.

ניתן להרחיב עוד רבות על טיבן של המדידות והעלייה במפלס פני הים בעבר ובהווה; והמעוניין יוכל למצוא חומר רב נוסף בספרות המקצועית ובמקורות אחרים. מכל מקום, נדמה שדי במה שתארנו עד כה כדי להראות כי החד-משמעיות שבה מוצגת העלייה העולמית במפלס פני הים כעובדה מדעית שאין עליה עוררין מטעה. אולם

התחזיות האפוקליפטיות אינן תלויות רק בהתנהגות המים כיום, אלא גם ובעיקר בהתרחשויות עתידיות שיווצרו כתוצאה מההתחממות הגלובלית. התחזית בדבר המסת הקרחונים, שאם תתרחש עלולה להכפיל פי שישה ויותר את העלייה-לכאורה במפלס פני הים (על פי התחזיות "המקלות"), נשענת על ההנחה כי המים מתחממים, בשל ההתחממות הגלובלית הכללית, וכי הקרחונים נמצאים כבר כעת בתהליכי המסה שרק ילכו ויואצו עם הימשכותה של מגמת ההתחממות.

נושא ההתחממות הגלובלית כשלעצמו חורג מהיקפו של מאמר זה, ולא נוכל להציג כאן ניתוח מפורט של הבעיות בנתונים הקיימים לגביו וביישום בהם, אך פטור בלא כלום אי אפשר והמעוניין להרחיב יפנה למקורות שבהערות. בקצרה נאמר כי הבעיות והתופעות הקיימות בהקשר הצר של מדידת מפלס פני הים והתחזיות לגביו מופיעות גם בהקשר הרחב של שאלת ההתחממות.

גם בהקשר של מדידת החום באטמוספירה ישנן בעיות מתודולוגיות המעמידות בספק את ערכם של הנתונים המתפרסמים בנושא. הספרות העולמית העוסקת בשינויי הטמפרטורה עם הזמן נוטה להתייחס ל"טמפרטורה העולמית הממוצעת" או ל"שינויי הטמפרטורה העולמית הממוצעת" אך ערכים אלו – כמו השינויים הממוצעים בגובה פני הים – הם ערכים מחושבים המושפעים משיקול דעתו של עורך החישוב. שיטת מדידת הטמפרטורה גם היא יכולה להביא לקבלת תוצאות שונות: ניתן למדוד טמפרטורה באמצעות תרמומטרים הנמצאים בסוכה מטאורולוגית, בכדור פורח, או להסתייע במדידות מלוויינים. התוצאות המתקבלות בשיטות השונות, והמגמות המתקבלות בהתאם לכך, אינן זהות.<sup>27</sup>

בעיה קשה נוספת היא שינויים לאורך זמן בתחנות המדידה שעליהן מתבססים הנתונים. ביבשה, תחנות רבות שהיו בשולי האזור הבנוי הפכו עם הזמן לתחנות הנמצאות בתוך אי החום העירוני. בעיה דומה קיימת במדידות המתבצעות על אוניות בים הפתוח. הטמפרטורה נמדדת על גשר הפיקוד, אולם גשר הפיקוד הממוצע בספינות לפני 100 שנה היה נמוך מאוד מגשר הפיקוד באוניות בנות זמננו. בשנים האחרונות, מדענים שונים ובלתי-תלויים מעמידים במבחן "החזוי מול המדוד" את תחזיות ה-IPCC, המתבססות על המשך המגמות שנמצאו בנתונים שגוף זה הפיק ממדידות העבר; ופעם אחר פעם התחזיות מתבררות ככוזבות.<sup>28</sup> בינתיים, תצפיות עדכניות של טמפרטורת פני המים מראות עלייה כמעט זניחה בטמפרטורות, שאם תימשך תבטא בעלייה של 0.23 מעלות עד שנת 2100.<sup>29</sup> החישובים הנוגעים להפשרת הקרחונים מראים כי הפשרה של כל קרחוני גרינלנד תגרום לעליית מפלס עולמית של כ-6 מטר; והפשרה של כל קרחוני אנטארקטיקה תביא לעלייה של כ-65 מטר. אולם בינתיים, למרות ההתרעות הרבות, מחקר של נאס"א שפורסם באוקטובר 2015 מראה כי אנטארקטיקה לא מאבדת אלא צוברת קרח בכל שנה בשיעור של 82 ג'יגה טון.<sup>30</sup> קרחוני הקוטב הצפוני, לעומתם, הם קרחונים רדודים הצפים במים שכן

הם לא מצטברים על יבשה; ומשום כך כמות המים הצבורה בהם מועטה ותרומתם לעליית פני הים זניחה. בסופו של יום, הן התצפיות הן התחזיות של אסכולת ההתחממות מתבררות כפשוטות למדי – פעם אחר פעם.

## יש הבל אשר נעשה על הארץ

מכל האמור לעיל מתקבלות שתי מסקנות: הראשונה היא שיש לשמור על ספקנות בריאה בכל הנוגע למידע המוזרם על ידי אנשי אסכולת ההתחממות, וודאי שאין להיבהל מדיבורים על קונצנזוס מדעי; השנייה, כי בבואנו לדון על מדיניות נכונה בנוגע לאפשרות של עלייה במפלס פני הים בישראל, אין להתבסס על נתונים ותחזיות גלובליות למיניהם, אלא על המידע הנאסף כאן בחופי ישראל.

שני גופים מנטרים את מדי הגאות של ישראל. הגוף האחד הוא המרכז למיפוי ישראל (מפ"י) המפעיל מדי גאות באשקלון, באשדוד, ביפו, ובעבר גם בחיפה. המדידות בארץ ישראל החלו בתקופת המנדט הבריטי: בשנת 1921 נמדד לראשונה המפלס הממוצע של פני הים בעזה; ב-1927 הותקן מד גאות בנמל יפו; ובאוגוסט 1928 הותקן מד נוסף בנמל חיפה. מדי גאות אלה לא פעלו באופן רציף. בשנות השישים הוצבו מדי גאות חדשים: באשדוד ובאילת בשנת 1961, וביוני 1962 בנמל יפו. בראשית שנות השמונים הוצב מד גאות גם באשקלון, ובנובמבר 2004 הועבר לעכו מד הגאות שהיה בחיפה.

המרכז למיפוי ישראל עוקב אחר שינויי המפלס בחופי הים התיכון של ישראל מאז שנת 1958. במהלך תקופה זו מצויים פרקי זמן שבהם המפלס עלה או ירד, אך המגמה הכללית אינה לא מגמת עלייה ולא מגמת ירידה. על פי אתר מפ"י, המדידות מתחילת המאה העשרים ואחת מלמדות על המשך המגמה הקבועה:

בסיסי הנתונים הנמצאים ברשותנו מאפשרים לנו לעקוב אחר שינויים במפלס הים בישראל. מדי המפלס מפקחים בשיטות פשוטות ואמינות. אנו מקפידים על מעקבי יציבות תקופתיים שנועדו להגביר את אמינות המדידה. כמו כן פיתחנו תכנה מיוחדת וייחודית לעיבוד נתוני מפלס הים. כל זה ועוד מאפשרים לנו לתאר את מפלס הים הרב שנתי בישראל באופן אמין ומדויק. לפי התוצאות הנמצאות בידינו מתחילת המילניום השלישי (2000–2005) מפלס הים התיכון שומר על יציבות. דהיינו, אין שינויים משמעותיים בין מפלס הים הממוצע לשנת 2000, 2001, 2002, ואילך...

בהינתן נתונים אלו, לפלא כי התפיסה לגבי עלייה חסרת תקדים במפלס פני הים בחופי ישראל כה רווחת, כפי שראינו בפתחת מאמר זה. אלא שכאן אנו מגיעים לגוף השני המפיק נתונים בנוגע לשינויים במפלס פני הים – החברה לחקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל). לחיא"ל תחנה אחת הממוקמת בחדרה (ומאז 2012 תחנה נוספת באשקלון), הנכללת גם בתוכנית הניטור הכלל-עולמית של GLOSS. תחנה זו

מדווחת על מדידות שונות מאוד: בשנת 2004 דווח כי בין השנים 1992–2003 נמדד קצב עלייה ממוצע של 10 מ"מ בשנה;<sup>31</sup> ואילו בדו"ח משנת 2015 נכתב כי בין השנים 1992–2015 נמדד קצב עלייה ממוצע של כ-5.5 מ"מ בשנה.<sup>32</sup> אומנם הסברנו לעיל כי באזורים שונים ייתכנו הבדלי מגמות בשינויים בגובה פני הים, אך פער מקומי שכזה – כך שבנקודה מסוימת ישנה עלייה של 5.5–10 מ"מ בשנה וקילומטרים ספורים מצפון ומדרום לנקודה זו אין כל שינוי בגובה פני הים – לא ייתכן. ואכן, מי שיוודע לחפש את הגורמים העשויים להשפיע על מדידות בגובה פני הים, יוכל לספק הסבר פשוט ל"אנומליה" זו, והוא קשור בהבדלים שבין תחנת היא"ל לשאר תחנות המדידה.

תחנת חדרה נבדלת מיתר התחנות בשלשה אופנים: בסוג המכשיר, במיקום ובסביבה. תחנות מפ"י מורכבות ממכשיר מדידה המותקן על גבי מצוף העולה ויורד עם המים, וממוקמות בתוך נמלים. מיקום מדי גאות בתוך נמלים הוא פרקטיקה מקובלת מאוד, שכן נמלים הם אזורים "מושקטים" המוגנים מפני גלים חזקים אשר יוצרים תנודות חזקות וקפיצות במדידות. תחנת היא"ל בחדרה, לעומתם, מורכבת ממד לחץ הנמצא בעומק של כ-18 מטרים מתחת פני הים. הוא אינו זו עם המים אלא עומד קבוע (לכאורה) ומודד את השתנות המים ביחס אליו: כאשר גובה פני הים עולה, ישנה הצטברות רבה יותר של מים על גביו ומופעל עליו יותר לחץ, והשינויים בלחץ מתורגמים לשינויים בגובה המים. מד זה אינו ממוקם בנמל אלא במרחק 2 ק"מ מהחוף, מקובע ל"דולפין הרתיקה" שבקצה מזח הפחם המשרת את תחנת הכוח של חדרה ואליו מרתקים את אוניות הפחם. הבדלים אלו יוצרים ארבע בעיות המשליכות על המדידות בארבעה אופנים, ונציגם מן הקל אל הכבד.

הראשונה והברורה היא בעיית ה"רעש". המדידות מתבצעות בים הפתוח, באזור החשוף לתנודתיות בשל גלים גבוהים וחזקים. הבעיה השנייה שממנה סובלת סביבת המדידה היא זיהום תרמי. כידוע, העלייה-לכאורה במפלס פני הים קשורה לעלייה בטמפרטורת המים בשל ההתחממות הגלובלית. כפי שראינו, אין כל ראייה כי מי הים מתחממים באופן גלובלי, אך המים שבקרבת תחנת הכוח של חדרה ודאי וודאי מתחממים. תחנת הכוח משתמשת במי הים לצינון התחנה: היא שואבת באופן קבוע מאות אלפי טונות של מי ים קרים, ומשיבה אותם כשהם חמים פי כמה וכמה. מאז החלה התחנה לייצר חשמל, בשנת 1981, עלה ייצור החשמל מ-1,400 מגה-ואט ל-2,600 מגה-ואט, ולכן גם כמויות המים החמים החוזרים לים גדלו לאורך השנים. עובדה זו לבדה עלולה להתבטא בעלייה של 1 ס"מ לפחות בגובה המים.<sup>33</sup>

הבעיה השלישית והחמורה, שאפשר שהקורא הערני כבר העלה על דעתו, היא כמובן שקיעה. על מנת לוודא את יציבות דולפין הרתיקה שעליו מותקן מכשיר המדידה, הועמס הדולפין ב-900 טון בטון. במידע המופיע לגבי התחנה במאגר של GLOSS מופיע כי בשנים 1991 ו-1993 בוצעו מדידות לבדיקת האיזון של נקודות הבקרה של הדולפין, והתגלה ביניהן פער של כ-3 מ"מ;<sup>34</sup> מדובר אפוא בעדות לשקיעה של 1.5–

3 מ"מ בשנה (תלוי באילו חודשים באותן שנים בוצעה המדידה).<sup>35</sup> מחקר שפורסם בשנת 2007 ועסק במיפוי שינויים בקרום כדור הארץ באגן הים התיכון הראה שבאזור חדרה, בין השנים 1993–2001, נמדדה שקיעה של 2.4 מ"מ לשנה.

אם לא די בכל זה, ישנה הבעיה הרביעית והיא שאלת האיזון. את גובה פני הים מודדים כאמור ביחס ליבשה, ולשם כך יש לקבוע ברמת דיוק גבוהה את מיקום מכשיר המדידה ביחס ליבשה. קל לחשב את מיקום מדי הגאות המותקנים על גבי מצופים ביחס ליבשה, שכן הם סמוכים אליה ומעוגנים אל מבנים בנקודת גובה אפס מדוד; אולם המכשיר בתחנת חדרה נמצא במרחק של 2,400 מטר מהחוף ובעומק של 18 מטר בתוך הים, ועל מנת לקבוע את מיקומו המדויק ביחס ליבשה יש למדוד באופן מדויק את מיקומו ביחס לדולפין הרתיקה, את מיקום הדולפין ביחס לקצה המזח ואת מיקום קצה המזח ביחס ליבשה. ד"ר דן צ'רני, שחקר את תחנת המדידה בעבור מפ"י, דיווח כי ניסה בכל שיטות המדידה הקיימות לקבע את מיקום המכשיר ביחס לחוף, ורמת הדיוק הטובה ביותר שאליה הצליח להגיע הייתה של כ-10 ס"מ. לדבריו, "לא ברור איך – ואם בכלל – הם העבירו את הגובה ליבשה".<sup>36</sup>

סיכומו של עניין: תחנת המדידה היחידה שלחופי מדינת ישראל המראה מדידות היכולות להתיישב עם המגמה המבוקשת של אסכולת ההתחממות, מושפעת מגורמים המשליכים באופן חמור על המידע המתקבל ממנה – רעש, זיהום תרמי, שקיעה מהירה וחוסר איזון – באופן המעמיד את מהימנותה בספק חמור. מדיניות תכנון הנשענת על נתוני חיא"ל – ולא על נתונים שנמדדו על ידי מפ"י בשיטות מדויקות יותר – עלולה להביא לבזבוז עצום ומיותר של משאבים וכספי ציבור.

## סוף דבר הכול נשמע

הנתונים המתפרסמים חדשות לבקרים בנוגע להתחממות גלובלית בכלל, ולעלייה במפלס פני הים בפרט, רחוקים מלהיות ודאיים כפי שהם מוצגים. במבחן החזוי מול המדוד, כל תחזיותיהם של ה-IPCC וחבריו הצופות עלייה בגובה פני הים הוכחו עד כה ככוזבות; ואין סיבה להאמין שתחזיותיהם האפוקליפטיות תתממשנה בעתיד. בפועל, הטיותיהם של החוקרים המחויבים לתזת ההתחממות מביאה לתיקונים רדיקליים במדידות, באמצעות חישובים מחישובים שונים, בין כשמדובר במדידות לווייניות – הסובלות מבעיות מתודולוגיות שיתכן כי אינן פתירות שכן תחום השגיאה שלהן גבוה בשיעור ניכר מתחום המדידה – בין כשמדובר במדי גאות החשופים לגורמים משפיעים שפעמים שהחוקרים אינם מודעים אליהם, מתעלמים מהם או מפצים עליהם – שוב, בעזרת חישובים בעייתיים. מכל מקום, גובה פני הים הנמדד על ידי מדי גאות הוא המייצג הנאמן יותר של השינוי בכל נקודה ונקודה; לכן בכל תכנון המתייחס למקום מסוים יש לקחת את המדידות המקומיות ולא נתון של "מוצע עולמי".

הנתונים האמיתיים לגבי שינויים במפלס פני הים העולמי, עד כמה שניתן לדבר על כך, מראים כי במקרה הגרוע אפשר שתימשך עלייה של עד 2 מ"מ בשנה במפלס פני הים, וקצב זה יביא לעלייה של פחות מ-20 ס"מ עד שנת "נבואת הימים", שנת 2100; אולם קיימת סבירות רבה שהגובה לא עולה ולא יעלה כלל. יש לקוות כי עבודות המתפרסמות לאחרונה בבמות אקדמיות שונות, וכן מאמרים הפונים לשיח הציבורי כגון זה המונח לפניכם, ישחררו את העולם מהמשבר המלאכותי שיצר ה-IPCC ויאפשרו לציבור ולמנהיגיו לקבל החלטות שקולות ומדודות יותר בכל הנוגע לעתיד אזור החוף בישראל.

1. פסיקתא דרב כהנא, כ"ג, א.
2. בבלי, עבודה זרה ח ע"א.
3. יום היפוך החורף נחגג בתרבויות רבות מאז העת העתיקה. כאלו הם: חג הסויאל האינדיאני, חג ההיאלדה הפרסי, חג הסאטורנאליה הרומאי וחג הדונג'זי הסיני. יש המשערים כי חגי חורף המקובלים בדתות עכשוויות, כגון חג המולד הנוצרי וחג החנוכה היהודי, הם צאצאיהם של חגי חורף עתיקים.
4. George. J. Gulka and Robert. K. Matthews, "When Will the Present Interglacial End?", *Science*, 178 (1972), pp. 190–202
5. Peter Collins, "World Climate Conference Turn to the Weather", *Nature*, 278 (1979), p. 4
6. Thomas C. Peterson et al., "The Myth of the 1970s Global Cooling Scientific Consensus", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89 (2008), pp. 1325–1337
7. Ipcc Fourth Assessment Report, Geneva: WMO, 2007, p. 749
8. גלי וינבר, "המדען שמתעקש: התחממות גלובלית היא לא באמת בעיה", *גלובס*, 29.12.2017.
9. Ipcc First Assessment Report, Geneva: WMO, 1990, p. 266
10. Ipcc Third Assessment Report, Geneva: WMO, 2001, p. 641
11. Fifth Assessment Report, Geneva: WMO, 2013, pp. 1139–1140 Ipcc
12. עיריית גולן-אנגלקו וישעיהו בראור, "היערכות ישראל לשינויי אקלים גלובליים: פרק א' – השלכות שינויי האקלים על ישראל והמלצות ביניים", ירושלים: המשרד להגנת הסביבה, 2008.
13. בילי פרנקל, "עליית מפלס פני הים: האם הבית שלכם בסכנת הצפה?"; *ynet*, 21.7.2013.
14. רן אברמסון, "עליית גובה פני הים תעלה לעולם טריליון דולר ב-2050", *כלכליסט*, 2.9.2013.
15. ראו בכתובת <http://msp-israel.net.technion.ac.il/files/2015/11/Israel-Marine-Plan-.pdf>
16. חוק שמירת הסביבה החופית, תשס"ד–2004, סעיף 2.
17. ראו בכתובת [http://mapi.gov.il/Heritage/Pages/kav\\_hachof.aspx](http://mapi.gov.il/Heritage/Pages/kav_hachof.aspx). בפועל, בשל קשיים טכניים בחלק מן המקומות נקבע קו החוף בקו גובה 0+1 ואף 0+1.25 מ'.
18. פרוטוקול מס' 48 מיישבת ועדת המדע והטכנולוגיה, יום שלישי, י"ט בסיון תשע"ד (17 ביוני 2014).
19. Rolf. A de By (ed.), *Principles of geographic information systems, 2nd edition, ITC Educational Textbook*, ITC: Enschede, 2001, Chapter 4.2 on spatial referencing
20. Kipp Von Rudolf, *Was nicht passt wird passend gemacht – ESA korrigiert Daten zum Meeresspiegel*, 2012
21. Anny Cazenave et al., "Sea level budget over 2003–2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo", *Global and Planetary Change*, 65 (2009), pp.83–88
22. Albert Parker and Cliff D. Ollier, "Coastal planning should be based on proven sea level data", *Ocean & Coastal Management*, 124 (2016), pp. 1–9
23. John L. Daly, "Testing the Waters: A report on sea levels for the greening earth society", 2000 (זמין במרשתת). ראו שם הסבר נרחב על שיטת הסימון ורמת אמינותו.

- ואגמים לישראל, 2016 (זמין במרשתת).
33. בעומק של 30 מטר, במקדם התפשטות שערכו 0.00007 (מעוגל מעלה), ובהפרש טמפרטורה של חמש מעלות, פני המים יעלו בכ-1 ס"מ.
34. זאת על פי המידע לגבי התחנה המופיע במאגר של GLOSS: "Auxiliary benchmarks0012: Land control benchmark (32 28N, 34 53E), on top of water storage tank, H=16.132m, N=34.821m. Height difference from 0012 to 0013 (1991) orthometric diff.=9.945m, ellipsoidal diff.=9.980m; (1993) ellipsoidal diff.=9.983m. Three other precise levelling points in Israel Land Survey Network (0745, 0746 and 4462) are located nearby"
35. למען הסר כל ספק פנה המחבר אל הממונה על תפעול התחנה וביקש את מדידות האיוון מאז שנת 1993. להלן תשובתו שהתקבלה ב-5.4.2016: "נאמר לי כי בעבר התבצעו מספר מדידות לבחינת יציבות דולפין הרתיקה. מדידות אלו הראו שינויים של מספר מילימטרים בין מדידה למדידה, כולן בטווח טעות המדידה, ולא הצביעו על מגמה כלשהיא במיקום הדולפין (שקיעה או הרמה). מדידות המפלס נקבעות ביחס למיצוע אותן המדידות". המדידות עצמן אינן בנמצא, ולא ניתן לבקורן או לעמוד על טיבן באופן חד-משמעי.
36. מתוך התכתבות של ד"ר צ'רני עם מחבר המאמר.
24. Guy Wöppelmann et al., „Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame", *Geophysical research letters*, 36 (2009), p. 12
25. „Daly, "Testing the Waters"
26. „Parker and Ollier, "Coastal planning"
27. Jonathan DuHamel, "NOAA Caught Manipulating Temperature Data – Again", 2017 (זמין במרשתת).
28. U.S. House Committee on Science, Space & Technology 29 Mar 2017 Testimony of John R. Christy Professor of Atmospheric Science, Alabama State Climatologist (זמין University of Alabama in Huntsville במרשתת).
29. על פי Argo Mariene Atlas (<http://www.argo.ucsd.edu/>)
30. H. Jay Zwally et al., "Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses", *Journal of Glaciology*, 61 (2015), pp. 1019–1036
31. דב רוזן, שינוי מפלס הים ובחינת ההשלכות על מצב חופי הים התיכון של ישראל, 2004 (זמין במרשתת).
32. ברק חרות ואיל רהב, תכנית הניטור הלאומית של ישראל בים התיכון, דו"ח מדעי ל-2015, חלק I – ניטור שינויי אקלים והמערכת ההידרוגרפית, חקר ימים

