שינוי האקלים והשפעתו הצפויה על הים והחוף בישראל – צעדי הסתגלות ואפחות רלוונטיים

פרופ' אלון אנגרט, החוג למדעי הסביבה, המכון למדעי כדור הארץ,
האוניברסיטה העברית בירושלים

תוכן העניינים

1. רקע - שינוי האקלים והתחממות גלובלית 2
1.1 שינויים בריכוז גזי חממה, והאילוץ הקרינתי 2
1.2 תצפיות של שינוי האקלים בהווה 3
1.3 השוואה לעבר 4
1.4 קשר בין גזי חממה וההתחממות עד היום..... 5
1.5 שינוי האקלים במאה ה-21 6
2. תרחיש התייחסות לישראל 9
3. הים ושינוי האקלים 13
4. השפעות שינוי האקלים על הסביבה הימית ואזורי החוף והצורך בהסתגלות .. 14
5. אפחות שינוי האקלים 17
5.1 ישראל ואפחות 17
5.2 צמצום פליטות מדליפות של גז טבעי 18
5.3 דישון הים ללכידת פחמן 21
5.4 הטמנה גאולוגית של פחמן בים התיכון ובמדף היבשת 22
6. רשימת מקורות 24

1. רקע - שינוי האקלים והתחממות גלובלית

כיום ידוע כי פליטת גזי חממה כתוצאה מפעילות אנושית (בעיקר שרפת דלק מחצבים, אבל גם גורמים נוספים) גורמת לעלייה בטמפרטורה הממוצעת העולמית ("התחממות גלובלית") ומשנה את אקלים כדור הארץ בהיבטים חשובים אחרים, כמו משקעים, מפלס הים ועוד. מסקנה מדעית זאת נתמכת על-ידי האקדמיה הלאומית למדעים של ארה"ב, כמו גם על-ידי אקדמיות לאומיות של 33 מדינות אחרות, ועל-ידי אגודות מדעיות חשובות אחרות מתחומים רבים (מדעי כדור הארץ, פיזיקה, גאולוגיה, מטאורולוגיה, ביולוגיה, אוקיינוגרפיה ועוד). עיקר המסקנות שבקונצנזוס המדעי בקשר לשינוי האקלים יוצגו באמצעות סיכום של דו"ח הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי אקלים IPCC שנקרא AR4 (Solomon et al., 2007).

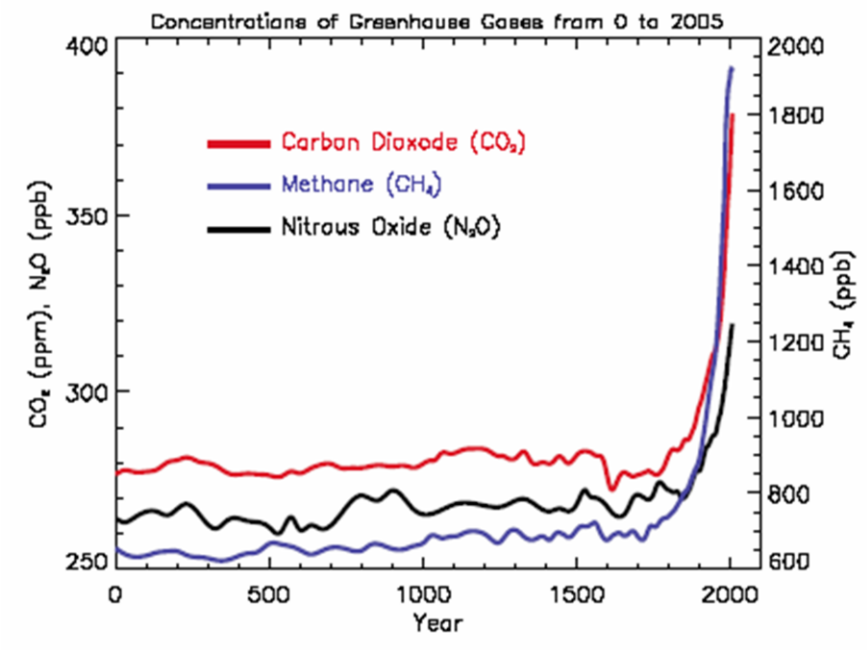
הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי אקלים (IPCC) הוקם בשנת 1988 על-ידי הארגון המטאורולוגי העולמי (WMO) והמחלקה להגנת הסביבה של האו"ם (UNEP) במטרה להתמודד עם בעיית שינוי האקלים הגלובלי. ה-IPCC פתוח לכל חברות האו"ם וה-WMO. תפקיד ה-IPCC הוא להעריך באופן מקיף, אובייקטיבי, פתוח ושקוף את המידע הרלוונטי בתחום המדעי, המקצועי והחברתי-כלכלי, כדי שתתאפשר הבנת הבסיס המדעי של הסיכון הכרוך בשינוי האקלים כתוצאה מפעולות האדם. ה-IPCC אינו מבצע מחקר או מעקב צמוד אחר מידע הקשור לאקלים או אחר פרמטרים רלוונטיים אחרים, והוא מבסס את הערכתו בעיקר על ספרות מקצועית ומדעית. בכתיבת הדו"חות ובבדיקתם מעורבים אלפי מדענים.

להלן מובא תרגום וסיכום של התקציר למקבלי החלטות של דו"ח AR4 של ה-IPCC (קבוצת עבודה 1 – "הבסיס המדעי"). הערות ותוספות שלא היו בדו"ח מופיעות *בכתב נטוי*.

1.1 שינויים בריכוז גזי חממה, והאילוץ הקרינתי

הריכוזים האטמוספריים של פחמן דו-חמצני (CO_2), מתאן (CH_4), וחמצן דו-חנקני (N_2O) עלו בצורה חדה מאז המהפכה התעשייתית, כתוצאה מפעילות אנושית (איור 1).

ריכוזי ה-CO_2 עלו בתקופה שעד 2005 ב-35% (*43% עד 2014*) בעיקר בגלל שרפת דלק מחצבים (פחם, נפט, גז טבעי), כאשר סיבה משנית אך חשובה לעלייה בריכוז היא שינויים בשימושי קרקע (בעיקר כריתת יערות). קצב פליטת ה-CO_2 ב-2005 משרפת דלקים גלובלית עומד על כ-26 מיליארד טונות לשנה. ריכוז המתאן באטמוספרה עלה עד 2005 ב-148%, וריכוז ה-N_2O עלה ב-18%, שניהם בעיקר בגלל פעילות חקלאית.



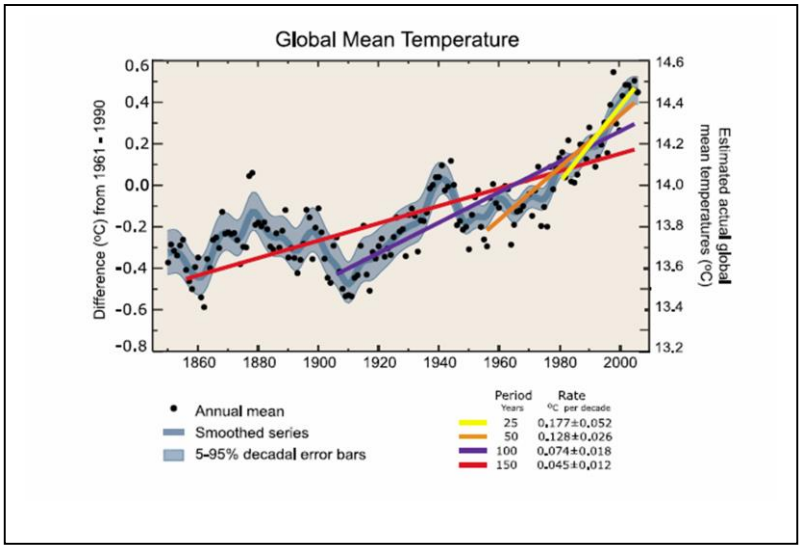
איור 1. שינויים בריכוז האטמוספרי של גזי חממה (מקור:IPCC,2007).

על פי מדידות שנערכו בגלעיני קרח, גבוהים ריכוזיהם של גזי חממה אלה כיום באופן ניכר מאלה שהיו ב-600 אלף השנים האחרונות.

העלייה בריכוז גזי החממה יוצרת אילוץ קרינתי חיובי (עלייה בקרינה הנקלטת בפני השטח) של כ-2.3 ואט למ״ר. עלייה בריכוז הארוסולים *(חלקיקים מרחפים)* האטמוספריים כתוצאה מזיהום אוויר יוצרת אילוץ קרינתי שלילי *(״התעמעמות עולמית״)* שקטן בערכו המוחלט (כ-1.2 ואט למ״ר), במידה גבוהה מאוד של ודאות, מאפקט העלייה בריכוז גזי החממה. לכן, ההשפעה נטו של הפעילות האנושית (כולל השפעות נוספות קטנות יותר) היא אילוץ קרינתי חיובי של כ-1.6 ואט למ״ר. אילוץ זה גדול פי עשרה ויותר מהאילוץ שנגרם מהשינויים הטבעיים (כ-0.12 ואט למ״ר) בקרינת השמש באותה תקופה.

1.2 <u>תצפיות של שינוי האקלים בהווה</u>

בוודאות ובאופן חד-משמעי חלה התחממות ניכרת מאז המהפכה התעשייתית. ההתחממות עד *2005* היא של 0.8°C, כאשר עיקר ההתחממות אירעה בחמישים השנים האחרונות (איור 2).



איור 2. שינויים בטמפרטורה הממוצעת הגלובלית (יחסית לממוצע 1961-1990), וקווי מגמה עבור 25, 50, 100 , ו-150 שנה (מקור: IPCC, 2007).

ההתחממות נצפתה גם במדידות בתחנות שטח (ההשפעה של איי-חום עירוניים נמצאה זניחה), גם בתצפיות מבלונים מטאורולוגיים, גם במדידות לוויין, וגם במדידות באוקיינוס. הטמפרטורה העולמית של האוקיינוסים בעומק של עד 3,000 מטר עלתה, וכ-80% מהחום שנוסף למערכת האקלים נספג על-ידי האוקיינוס.

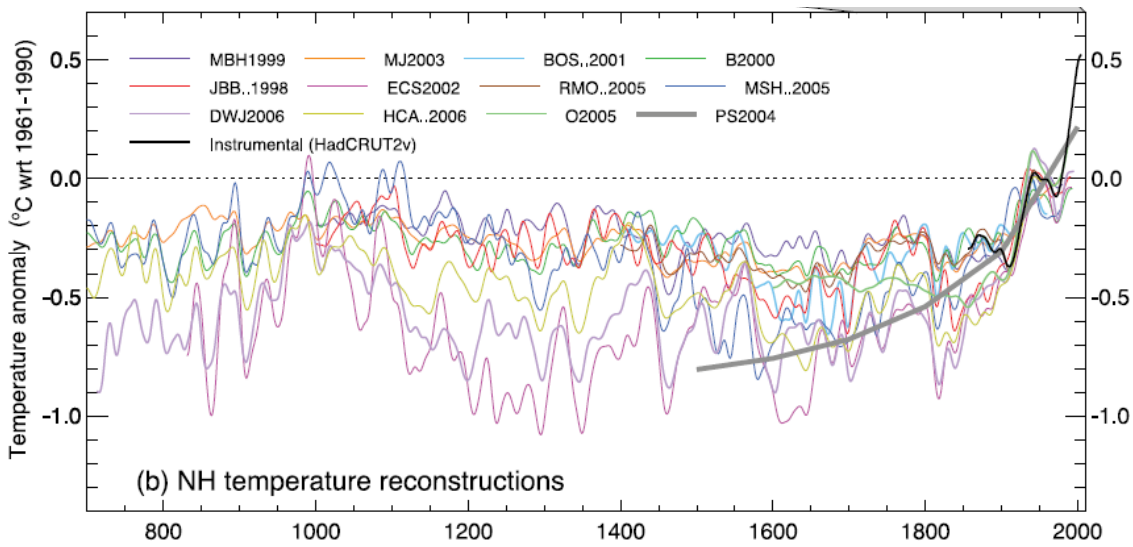
נצפתה עלייה בתכולת אדי המים *(שהם גז חממה חשוב)* באטמוספרה, שמתאימה ליכולת של אוויר חם יותר לשאת יותר אדי מים.

כמו כן נצפו ירידה בכיסוי השלג ובשטח כיפות הקרח, ועלייה במפלס הים.

שינויים נוספים שנצפו באקלים כוללים שינויים נרחבים בכמויות המשקעים, במליחות האוקיינוסים, באירועי בצורות, באירועי גשם בעוצמה גבוהה, בגלי חום, ובעוצמה של ציקלונים טרופיים (הוריקנים וטייפונים).

1.3 השוואה לעבר

נתוני פלאו-אקלים מצביעים כי הטמפרטורות הגבוהות כיום חריגות, לפחות ביחס ל-1,300 השנים האחרונות. בפעם האחרונה שאזורים קוטביים היו חמים יותר מהיום לתקופה ממושכת (לפני כ-125,000 שנה), הובילה ירידה בנפח הקרח בקטבים לעלייה במפלס מי הים של בין 4 ל-6 מטר.

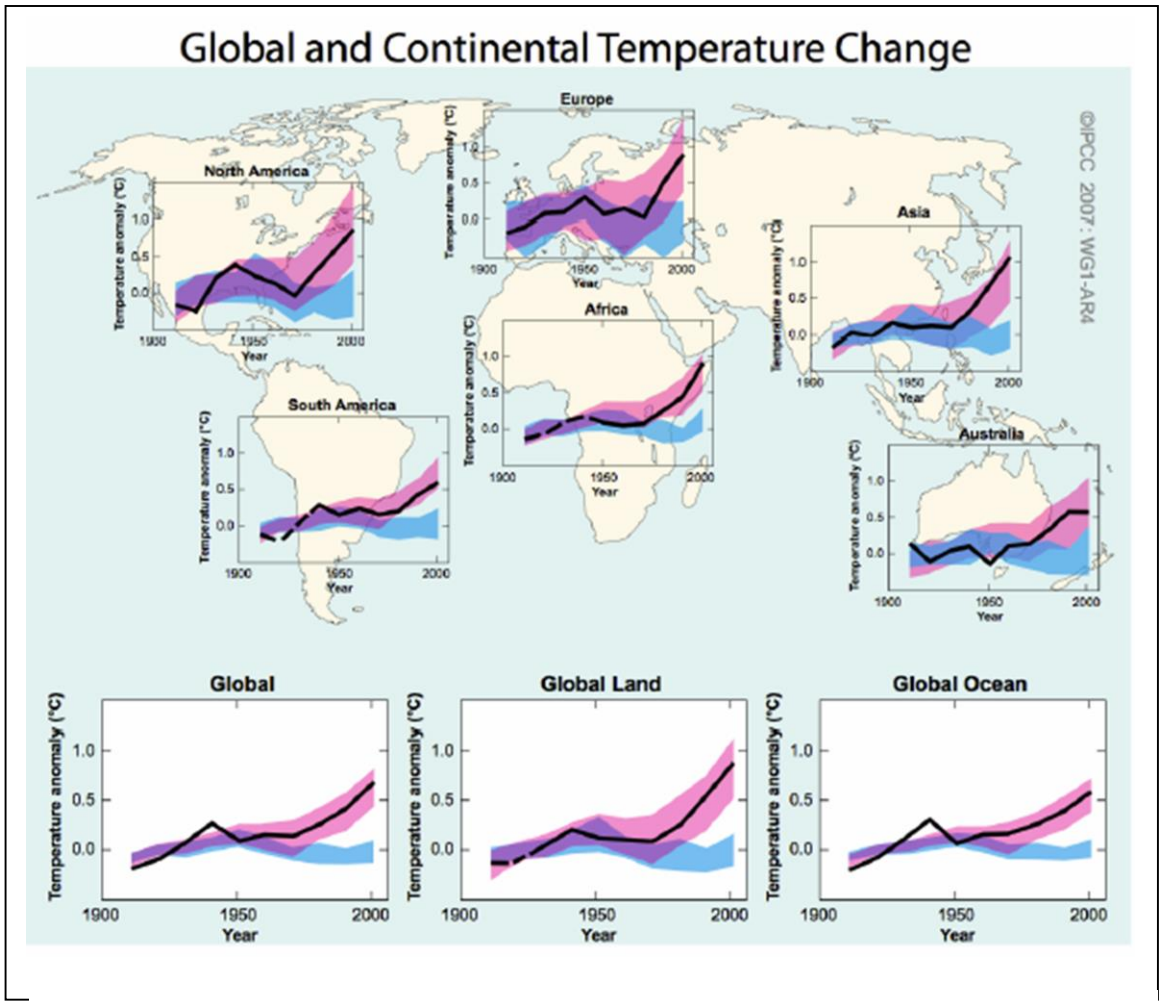


איור 3 : שחזורים של שינויים בטמפרטורה במהלך 1,200 השנים האחרונות (מקור : IPCC, 2007).

1.4 קשר בין גזי חממה וההתחממות עד היום

מרבית ההתחממות מאמצע המאה ה-20 עד היום היא בוודאות גבוהה (>90%) תוצאה של עלייה בגזי חממה הנפלטים על-ידי האדם. לחלוטין לא סביר כי התחממות זו נובעת מגורמים טבעיים בלבד.

התבנית של ההתחממות, המראה התחממות מהירה יותר ביבשות מאשר באוקיינוסים, והשינויים בטמפרטורה עם הזמן, ניתנים להדמיה במודלים גלובליים של מערכת האקלים רק אם מביאים בחשבון את השפעת האדם (איור 4). היכולת של המודלים לדמות את התפתחות השינויים בטמפרטורה ב-6 יבשות שונות, מחזקת את הראיות להשפעת האדם. עדיין קיימים קשיים רבים בהדמיות אמינות בקני מידה קטנים יותר.



איור 4. השוואה של השינויים בטמפרטורת השטח כפי שנצפו (קו שחור), ועל פי הדמיות של מודלי אקלים. רצועה כחולה מייצגת את טווח ה-5-95% של 19 סימולציות ב-5 מודלים עם אילוצים אקלימיים טבעיים בלבד (שמש והרי געש), והרצועה הוורודה מייצגת את טווח ה-5-95% של 58 סימולציות ב-14 מודלים עם אילוצי אקלים טבעיים ואנושיים (גזי חממה וארוסולים) (מקור: IPCC, 2007). ניתן לראות שרק המודל המשלב אילוצים אנושיים נמצא בהלימה טובה עם הטמפרטורות שנצפו בפועל.

תנודות אקלים בשבע המאות שקדמו ל-1950 נגרמו בעיקר מהתפרצויות וולקניות ומשינויים בקרינת השמש (וסביר כי השפעה אנושית גרמה להתחממות בתחילת המאה ה-20). מאוד לא סביר כי תנודות אקלימיות אלה נבעו משונות פנימית של מערכת האקלים.

הרגישות האקלימית להכפלה בריכוז ה-CO_2 באטמוספרה היא בוודאות של 90% בטווח שבין 2°C ל-4.5°C , וההערכה הטובה ביותר היא של 3°C. מאוד לא סביר כי הרגישות היא של פחות מ-1.5°C. לעומת זאת, לא ניתן לפסול ערכי רגישות אקלימית העולים על 4.5°C.

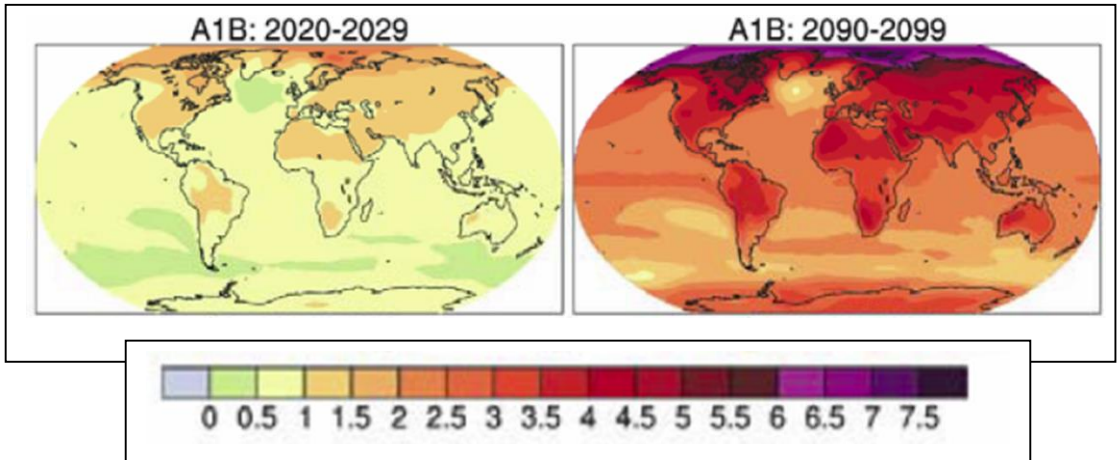
1.5 שינוי האקלים במאה ה-21

המשך פליטת גזי חממה בקצב הנוכחי או מעבר לו, יגרום שינויים רבים במערכת האקלים במאה ה-21, שברמת ודאות גבוהה (>90%) יהיו גדולים מהשינויים שנצפו במאה ה-20.

הקצב המדויק של שינוי האקלים תלוי בקצב הפליטה של גזי חממה על-ידי האנושות.

*בדו"ח AR4 נעשה שימוש בשישה תרחישים שונים של פליטות גזי חממה, שיביאו בסוף המאה הנוכחית לריכוזים השקולים לריכוזי CO_2 באטמוספרה שגבוהים מהריכוז שלפני המהפכה התעשייתית ב-110% עד 450%. על פי אחד מתרחישי **הביניים** (A1B) הריכוז בסוף המאה יגיע ל-200% יותר מהריכוז שלפני המהפכה התעשייתית.*

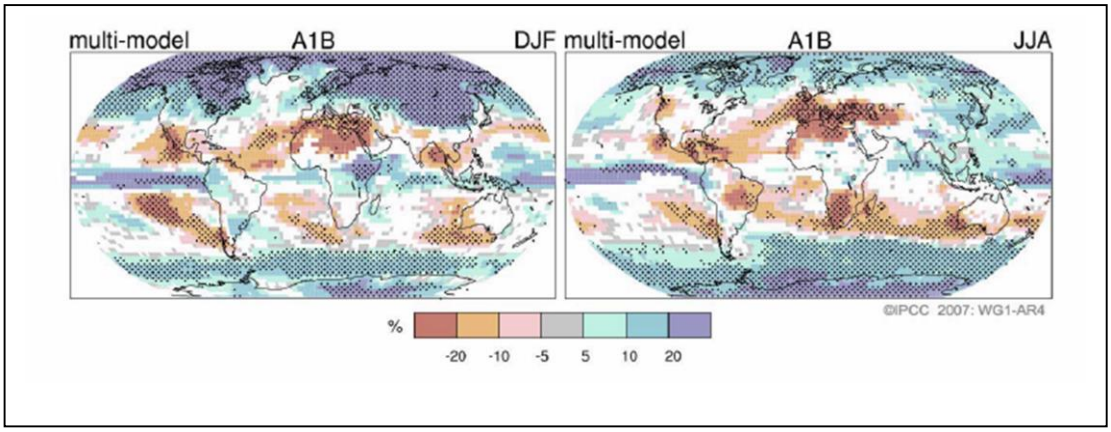
ההתחממות הגלובלית הממוצעת הצפויה עד סוף המאה ה-21 על פי תרחיש הביניים A1B היא של כ-2.8°C (עם טווח סביר של 1.7°C –4.4°C). צפויה התחממות גדולה יותר ביבשות ובקווי הרוחב הגבוהים בצפון (איור 5).



איור 5. תפרוסת ההתחממות הגלובלית הצפויה (יחסית לממוצע 1980–1999) בשתי תקופות זמן, על פי תרחיש A1B (מקור: IPCC, 2007).

צפויה הצטמצמות הקרח הצף בים, ותיתכן אף היעלמות שלו באזור הארקטי בחודשי הקיץ.

ישנה סבירות גבוהה לעלייה בתכיפותם של גלי חום ושל אירועי גשם קיצוניים. צפויה עלייה בעוצמתן של סופות טרופיות. מערכות מזג אוויר שמחוץ לאזור הטרופי צפויות לנדוד לכיוון הקטבים, עם השפעה נלווית על הטמפרטורה ועל המשקעים באזורים שונים. צפויות עלייה בכמות הגשמים בקווי הרוחב הגבוהים, וירידה במשקעים באזורים התת-טרופיים (איור 6).



איור 6. שינויים יחסיים במשקעים ב-2090–2099 (באחוזים, יחסית לממוצע 1980–1999) על פי תרחיש A1B , עבור חודשי החורף (דצמבר, ינואר, פברואר – DJF) והקיץ (יוני, יולי, אוגוסט – JJA) ממוצעים על פני הדמיות המודלים השונים. באזורים המנוקדים, למעלה מ-90% מהמודלים הסכימו על כיוון השינוי (מקור: IPCC, 2007).

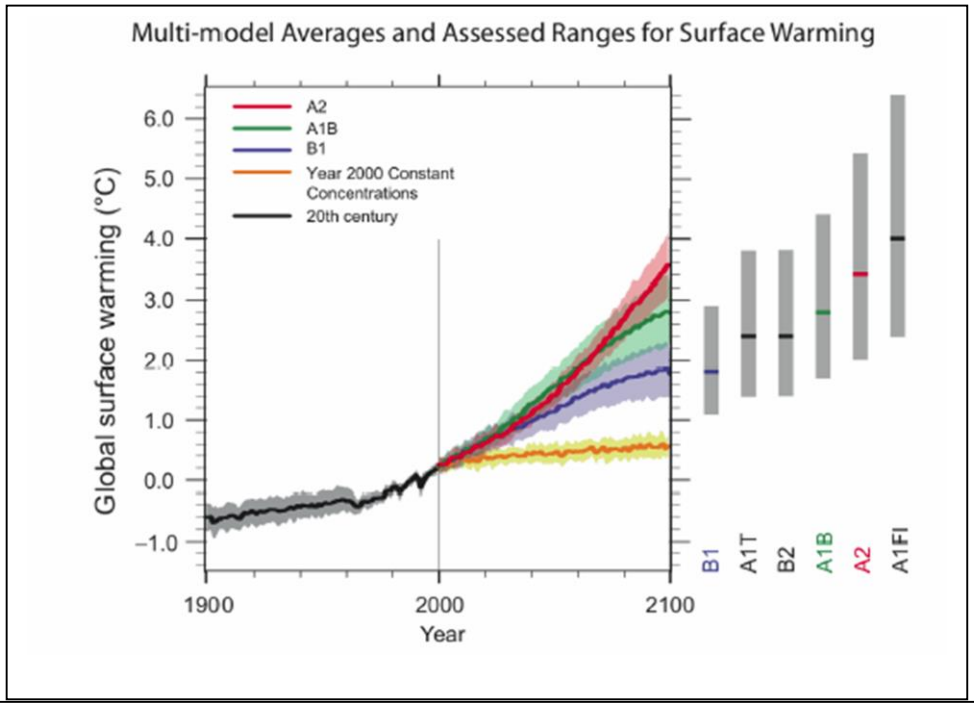
צפויה האטה בקצב סירקולציית ה-MOC באוקיינוס האטלנטי *(סירקולציה המביאה מים חמים מזרם הגולף לצפון האוקיינוס האטלנטי, וידועה גם כזרימה התרמו-הלינית)*. למרות האטה זאת, צפויה התחממות בבריטניה ובצפון אירופה, משום שההשפעה של גזי החממה חזויה להיות גדולה יותר. מאוד לא סביר שיתרחשו שינויים פתאומיים בסירקולציה זו במאה ה-21, אך לא ניתן לחזות שינויים לטווח ארוך יותר.

ההתחממות נוטה להפחית את הקליטה של CO_2 באוקיינוסים (הקטנת קצב ההתמוססות והשקיעה לעומק) וביבשות (הקטנת האגירה של פחמן בצמחים ובקרקעות). תופעה זו תגביר את החלק היחסי של פליטות CO_2 שיישאר באטמוספרה, ולכן יוצרת משוב חיובי להתחממות. המודלים שנעשה בהם שימוש בדוח AR4 אינם כוללים את אי-הוודאויות במשוב זה.

אין כיום יכולת לחזות את התגובה הדינמית של מדפי קרח להתחממות. העלייה במפלס מי הים, כאשר השפעות אלה אינן מובאות בחשבון, היא של עד 0.5 מטר (בתסריט A1B). תהליכים דינמיים הקשורים לזרימה של קרח עלולים להגביר את הרגישות של מדפי קרח להתחממות, ותצפיות שנעשו לאחרונה תומכות בקיום תהליכים אלה. הטמפרטורות החזויות בגרינלנד דומות לאלה שלפני 125,000 שנה – תקופה בה ראיות פלאו-אקלימיות מצביעות על מפלס ים שגבוה ב-4 עד 6 מטר מהמפלס הנוכחי.

העלייה בריכוז האטמוספרי של CO_2 מובילה לעלייה בחומציות האוקיינוס (כאשר CO_2 נוסף מומס באוקיינוס). הירידה הצפויה בערכי ההגבה (pH) היא של 0.14–0.35 יחידות. זאת נוסף על ירידה של 0.1 יחידות מאז המהפכה התעשייתית. ההשלכות של העלייה בחומציות על מערכות אקולוגיות ימיות הן בין השאר גרימה לפגיעה בקצב השקעת השלד הגירני של יצורים ימיים *(שעלול לגרור פגיעה בשוניות אלמוגים והיעלמות של סוגי פלנקטון שונים באזורים מסוימים, הנמצאים בבסיס שרשרת המזון)*.

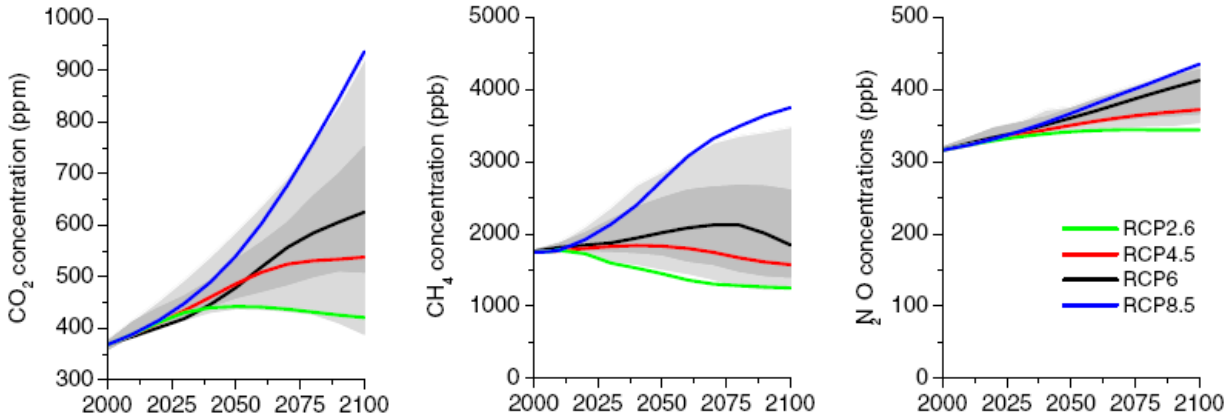
בתרחיש עם קצב הפליטות הגבוה ביותר (A1F1) ההתחממות היא של כ-4.0°C (עם טווח סביר של 2.4°C– 6.4°C, איור 7).ההתחממות על פי תרחיש B1 *(התסריט עם קצב הפליטות הנמוך ביותר)* היא מתונה יותר, כ-1.8°C *(בהשוואה ל-2.8° בתסריט A1B)*.



איור 7. שינויים מדודים (עד שנת 2000, בשחור) וחזויים (קווים צבעוניים) בטמפרטורה על פי התרחישים השונים. העמודות האפורות בצד ימין מציינות את הטווח הסביר עבור כל תסריט, והקווים הצבעוניים בתוכן מציינים את ההערכה הטובה ביותר לשיעור ההתחממות (מקור: IPCC, 2007).

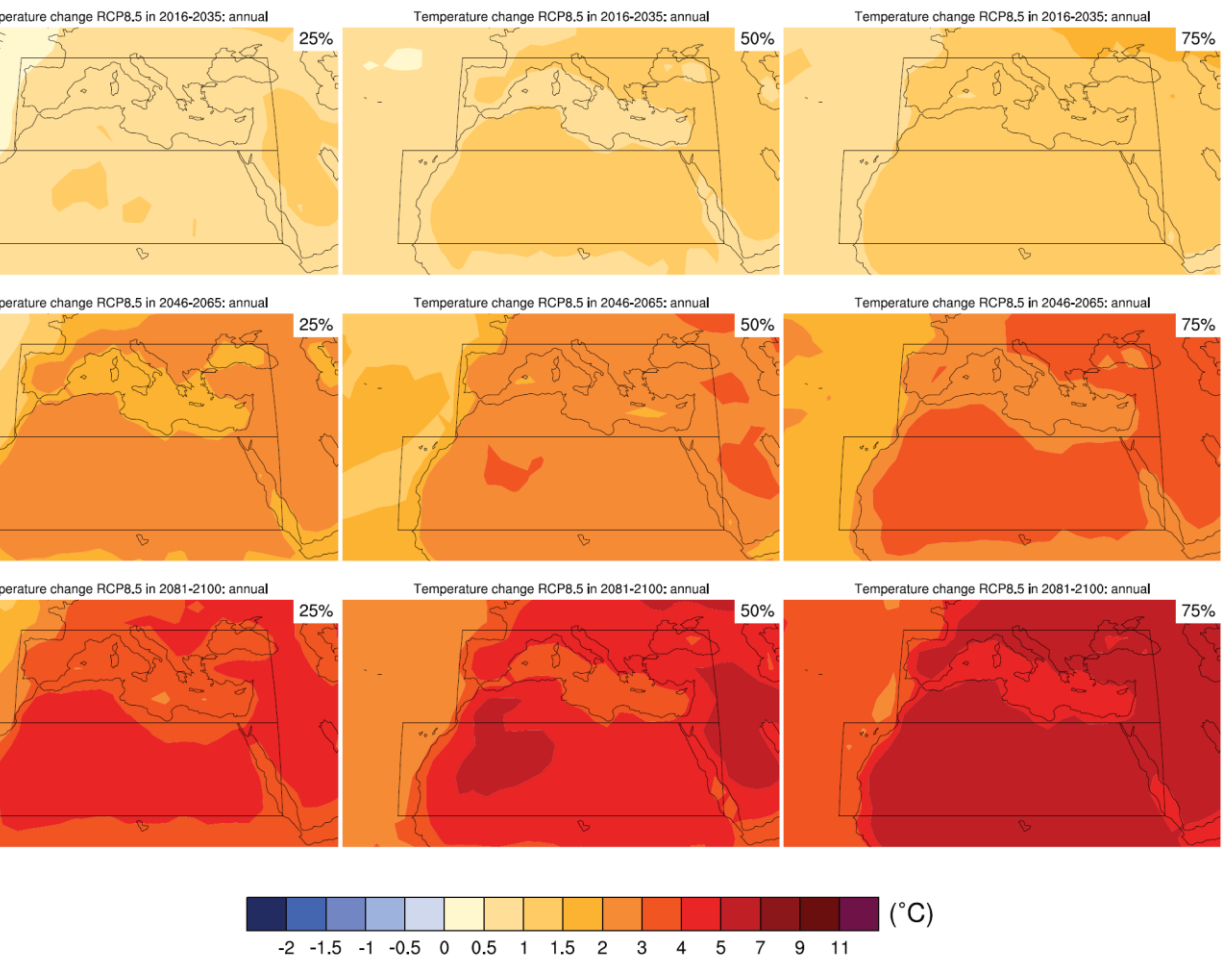
2. תרחיש התייחסות לישראל

לצורך דו"ח זה, ובמיוחד כדי לסייע לכותבי הפרקים האחרים, ולהביא לאחידות ביניהם בהתייחסות לשינוי האקלים הצפוי, נבנה תרחיש התייחסות לישראל. תרחיש ההתייחסות לישראל מבוסס על הדו"ח האחרון של ה-IPCC (AR5 – Stocker et al., 2013) על פי תרחיש מייצג לריכוזי גזי חממה באטמוספרה הנקרא RCP8.5 (איור 8). זהו תרחיש של פליטות גזי חממה גבוהות יחסית, שהולכות ומתגברות במהלך כל המאה ה-21. תרחיש זה מתבסס על ההנחות הבאות: אוכלוסיית כדור הארץ גדולה; קצב צמיחה איטי בהכנסה לנפש; קצב צנוע של שיפורים טכנולוגיים לצמצום פליטות כתוצאה מחוסר במדיניות לטיפול בשינוי האקלים (Riahi et al., 2011). תרחיש זה מתאים למגמות העכשוויות (Global Carbon Project, 2014).



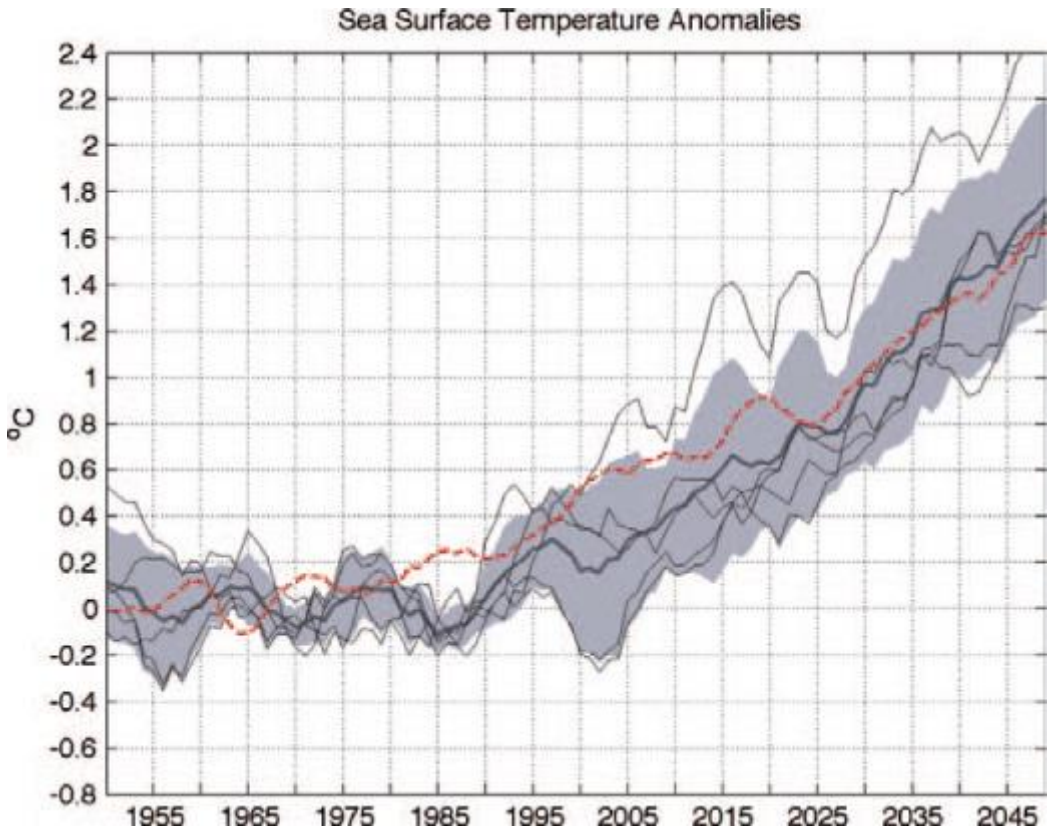
איור 8 השינויים בריכוזי גזי חממה באטמוספרה על פי תרחישי התייחסות שונים של ה-IPCC (Van Vuuren et al., 2011).

על פי תרחיש זה, ההתחממות החזויה החציונית באזור ישראל בשנים 2046–2065 תהיה 2.5 מעלות צלזיוס ביחס לממוצע 1986–2005, ובשנים 2081–2100 תהיה 4.5 מעלות צלזיוס יחסית לממוצע זה (איור 9).



איור 9: שיעור ההתחממות החזוי תחת תרחיש ההתייחסות בטווחים שונים של שנים, ועבור האחוזונים ה-25, ה-50 (חציון) וה-75 (Stocker et al., 2013).

על פי מודלים ברזולוציה גבוהה, העלייה הצפויה בטמפרטורת מי השטח (SST) של הים התיכון היא כ-1.5 מעלות צלזיוס עד שנת 2050 (איור 10, Gualdi et al., 2012) על פי תרחיש לפליטות SERS A1B (מסדרת התרחישים ששימשו בדו"חות ה-IPCC הקודמים), שדומה בחצי הראשון של המאה ה-21 לתרחיש RCP8.5 שדו"ח זה מתבסס עליו.



איור 10. העלייה הצפויה בטמפרטורת פני השטח של הים התיכון על פי מודלים שונים (Gualdi et al., 2012).

במהלך השנים 1901–2010 עלה מפלס הים ב-0.19±0.02 מטרים. על פי מודלים מבוססי תהליכים יעלה מפלס הים עד 2100 ב-0.52–0.98 מטרים. העלייה נובעת מהתפשטות תרמית ומאבדן מסת קרח בקרחונים ובכיפות קרח. שיעור עליית המפלס החזוי עד שנת 2050 הוא כ-0.25 מטרים. מודלים חצי-אמפיריים רבים חוזים עליית מפלס גדולה יותר, אך אין קונצנזוס בקהילה המדעית לגבי אמינות מודלים אלה (פרק 13, Stocker et al., 2013).

במסגרת דו"ח על הסכנות למצוק חופי (ביין, אידלמן וכהן, 2010), נעשה שימוש בהערכות שלפיהן גובה מפלס הים יעלה ב-2100 בלפחות כ-1.0 מטר, ועד הערכה מרבית של 1.4 מטרים. טבלה 1 להלן, שלקוחה מאותו דו"ח, אף נותנת הערכה של ההסתברות למצבי ים נדירים ואומדן רום "טיפוס" הגלים המרבי אל בוהן המצוק החופי. רום ה"טיפוס" עם זמן חזרה אופייני של 20, 50 ו-100 שנה הוא 5.51, 7.39, ו-8.32 מטרים, בהתאמה, וגובה הגל המשמעותי בים הפתוח הוא 7.40, 8.20, ו-8.70 מטרים, בהתאמה. בדו"ח מניחים כי שינוי האקלים יגרום לעלייה של כ-5% בגובה הגלים עבור אותה תקופת חזרה. יש לציין כי תחזית השינוי הצפוי בגובה הגלים בזמן סערות היא מסובכת. מצד אחד, פחות סערות צפויות להגיע לים התיכון בעקבות שינוי האקלים (Marcos et al., 2011), אך לעומת זאת יש סיכוי לסערות בעלות עוצמה גבוהה יותר (Beniston et al., 2007). בתרחיש התייחסות זה נאמץ ערך של

עלייה כוללת (כתוצאה מעליית מפלס וגם משינוי בעוצמת הסערות) של 1.0 מטר עבור העלייה עד 2100, כפי שנעשה במחקר קודם על השפעות על חוף הים התיכון (Nicholls and Hoozemans, 1996).

טבלה 1: תקופות חזרה של מצבי ים נדירים ואומדן רום "טיפוס" הגלים המרבי (ביין, אידלמן וכהן, 2010). יש להוסיף מטר אחד לערכים בטבלה הזאת עבור העלייה הצפויה במפלס הים בעקבות שינוי האקלים.

מצבי ים נדירים		אומדן רום "טיפוס" גלים מרבי	
תקופת חזרה ממוצעת (שנים)	גובה גל משמעותי במים עמוקים (מטר)	תקופת חזרה ממוצעת (שנים)	רום טיפוס גלים מרבי (מטר)
1	4.80	2	4.09
5	6.15	10	4.87
20	7.40	20	5.51
50	8.20	50	7.39
100	8.70	100	8.32

פליטת פחמן דו-חמצני גורמת גם לעלייה בחומציות מי הים, שפוגעת בקצבי השקעת השלד של חלק מהיצורים הימיים (אלמוגים, פלנקטון וכו'). רמת ההגבה (pH) ירדה ב-0.1 מהמהפכה התעשייתית ועד היום. אם יימשכו פליטות הפחמן הדו-חמצני והעלייה בריכוזו באטמוספרה על פי תרחיש ההתייחסות, הן צפויות לגרום לירידה ב-0.32 יחידות pH עד סוף המאה.

3. הים ושינוי האקלים

לאוקיינוסים ולאטמוספרה יש השפעות הדדיות חשובות שמשפיעות בצורה קריטית על מערכת האקלים. האוקיינוסים קולטים קרינה מהשמש, מסיעים חום בזרמי האוקיינוס הגדולים, והם גורם דומיננטי במחזור המים, ולכן גם בהסעת חום כמוס. מסיבות אלה, לשינויים בסירקולציית האוקיינוסים יכולים להיות השפעות מרחיקות לכת על האקלים באזורים רבים. האוקיינוסים הם גם מאגר גדול לחום, וכ-80% מהחום שנוסף למערכת האקלים עד כה כתוצאה מההתחממות הגלובלית נמצא במאות המטרים העליונים של האוקיינוס. נוסף על כך, האוקיינוסים משפיעים גם על מחזורים ביוגאוכימיים, וכרבע מהפחמן הדו-חמצני שנפלט על-ידי האנושות נקלט על-ידי האוקיינוסים כפחמן אי-אורגני מומס. קצב

הקליטה של הפחמן הדו-חמצני צפוי להאט, כתוצאה מהתחממות פני השטח ומהייצוב המוגבר של עמודת המים.

האוקיינוסים והימים מושפעים גם הם מההתחממות הגלובלית ומשינוי האקלים. פרק 5 של הדו"ח של קבוצת עבודה 2 של ה-IPCC (Field et al., 2014), העוסק בנושא ההסתגלות (adaptation), סוקר בהרחבה את ההשפעות על מערכות ימיות וחופיות, ואיך להיערך להן. השינויים העיקריים הצפויים הם התחממות מי השטח, עליית מפלס הים ועלייה בחומציות. גורמים אלה צפויים להשפיע בצורה מוגברת על מערכות חופיות. עליית מפלס הים תגרום להצפת חופים ואזורים נמוכים, ותאיץ ארוזיה של חופים ומצוקים חופיים. מגמה זאת תוחרף בשל העלייה הצפויה בעוצמת הסערות. תהליכי ההצפה והארוזיה יושפעו גם מתהליכים טבעיים ואנושיים שאינם קשורים לשינוי האקלים (הסעת סדימנט, פיתוח חופי וכן הלאה).

העלייה בחומציות מי הים תפגע באורגניזמים רבים המשקיעים שלד גירני. העלייה בחומציות בשילוב עם העלייה בטמפרטורה של מי הים תפגע באלמוגים, ותגרום ל"הלבנה" (bleaching) שלהם. באזורים ממוזגים, מערכות אקולוגיות של עשב ים ואצות עלולות להיפגע גם הן מהעלייה בתכיפות של אירועי חום קיצוני ומפלישה של מינים טרופיים.

הדו"ח גם קובע כי יש יתרון להשקעה כספית בפעילויות הסתגלות באזורים חופיים לצמצום נזקי הצפה וארוזיה חופית, בהתחשב במחיר הכלכלי והחברתי של אי-עשייה. עלויות ההסתגלות משתנות בצורה חדה בין מדינות שונות.

4. השפעות שינוי האקלים על הסביבה הימית ואזורי החוף והצורך בהסתגלות

לשינוי האקלים כתוצאה מפליטת גזי חממה יש השפעות מרחיקות לכת, הן על הסביבה הטבעית, הן על מערכות כלכליות וחברתיות. לכן, יש עניין רב בעשורים האחרונים לפתח גישות לצמצום הנזק שייגרם משינוי האקלים. את השיטות האלה מקובל לשניים: פעולות שעוסקות בצמצום הריכוז של גזי החממה באטמוספרה, ונקראות בשם הכללי פעולות אִפְחוּת (mitigation), והן יידונו בפרק הבא; שיטות שנועדו להסתגלות למצב האקלים החדש ולצמצום הנזקים, שנקראות בשם הכללי פעולות הסתגלות, ובהן ידון פרק זה. כאמור לעיל, השינויים העיקריים הצפויים בים ובחוף הם התחממות מי השטח, עליית מפלס הים ועלייה בחומציות.

דו"חות ישראליים קודמים שעסקו בנושא ההשפעות וההסתגלות לשינוי האקלים בים ובאזור החוף כוללים את דוח מרכז הידע לשינויי אקלים (מרכז ידע להיערכות לשינויי אקלים בישראל, 2012) ואת דו"ח המשרד לאיכות הסביבה (Pe'er and Safriel, 2000). דו"חות ישראליים אחרים בנושא שינוי האקלים כמו דו"ח נאמן (מוסד שמואל נאמן, 2011), ודו"ח מקינזי (מקינזי, 2009) עסקו רק בתחום האפחות. דו"ח המשרד לאיכות הסביבה משנת

2000 (Pe'er and Safriel, 2000) קבע כי העלייה בגובה המפלס והעלייה בעוצמת סערות (ואולי גם השינוי בכיוונן) עלולות לפגוע בתשתיות ימיות ובמצוק החופי, ולהשפיע על תנועת החול לאורך החוף. דו"ח מרכז הידע ציין סיכונים הקשורים ל:"*הגברת הצפות מבחינת התדירות ומבחינת העוצמה, ארוזיה ומחסור בחומרי סחף, הצפת ביצות או דֶלתות ואזורים נמוכים טופוגרפית, השפעה על מי התהום, והמלחת אקוות*". אותו דו"ח מציין גם כי קיים פער ידע בשאלה מה יהיה גובה הגלים בזמן סערות בעקבות שינוי האקלים. מבחינת השפעה על מערכות אקולוגיות ימיות מציין אותו דו"ח חדירה מוגברת של מינים פולשים, הן מים סוף הן מהחוף האטלנטי של אפריקה, בעקבות העלייה הצפויה בטמפרטורת הים. איום נוסף הוא הרס טבלאות הגידוד החופיות כתוצאה מירידת חומציות הים שתגרום בליה מואצת, ותשפיע על היצורים הגירניים בבית הגידול. היא תשפיע בייחוד על החלזונות קבועי המקום מהמין צינוריר בונה (*Dendropoma petraeum*), שקונכיותיהם יוצרות צברים צפופים בשולי הטבלאות, שמורידים את שיעור הבליה. איום אחר על טבלאות הגידוד ועל אזורי הכרית והתת-כרית הרדוד נגרם מעליית המפלס. על פי הדו"ח, עלייה של עשרה ס"מ ויותר בגובה המים עלולה לגרום לפגיעה במגוון המינים לאורך החוף. הדו"ח מציין שייתכנו גם השפעות על המגוון הביולוגי כתוצאה מ: שינויים בזרמים שישפיעו על מידת הקישוריות בין אוכלוסיות ואזורים; שינויים במליחות; איטרופיקציה כתוצאה מעלייה בשכיחות השיטפונות, שעשויה להגדיל את כמות הנוטריינטים ממוצא יבשתי הנשטפים אל הים. הדו"ח מציין כי השפעות אלה קשות להערכה.

הדו"ח גם סוקר בהרחבה את ההשפעות הגאו-אסטרטגיות של עליית המפלס. מבחינת ההשפעה על ישראל מצוינים התמוטטות מצוקי הכורכר בחוף, חדירת מי ים בשפכי הנחלים, ופגיעה במתקני חיל הים ובתשתיות לאומיות כמו נמלים. עליית המפלס צפויה לצמצם את שטחה של רצועת עזה ולגרום להמלחת מי התהום, דבר שיגביר את הלחצים ברצועה. המדינה השכנה העיקרית שתיפגע מעליית המפלס היא מצרים, שבה עלייה של מטר אחד תגרום להצפת אזורים נרחבים בדלתה של הנילוס, תחייב פינוי של כ-6 מיליון תושבים, ותפגע בכ-35% מהחקלאות. הצפות ופגיעות במתקני תשתית צפויות גם באזורים חופיים אחרים במצרים. הצפות נרחבות צפויות גם בעיראק, באיראן ובטורקיה. תהליכים באזורים רחוקים יותר, כמו פתיחת המעבר הצפוני-מערבי לשיט מסחרי, והצפות וגלי נדידה בקנה מידה גדול, יכולים גם הם להשפיע על המצב הגאו-אסטרטגי של ישראל.

האיחוד האירופי פרסם דו"ח על השיקולים הכלכליים הקשורים להסתגלות לשינוי האקלים באזורים חופיים (Policy-Research-Corporation, 2009) . הסיכונים העיקריים המוזכרים הם הצפות, ארוזיה חופית, פגיעה במערכות אקולוגיות וחדירת מי ים לאקוות. אותו דו"ח קובע גם כי עלותה של השקעה כספית בביצוע פעילות הסתגלות (כמו הגנה על חופים מהצפה) תהיה פחותה מהנזקים שיימנעו בזכותה.

דו"ח אירופי אחר (Travers, 2010) קובע כי האיומים הם: הצפות תכופות יותר של אזורים נמוכים, ארוזיה מוגברת של חופים ומצוקים חופיים והמלחה של שפכי נחלים ואקוות. התחממות ועליית החומציות עלולות לפגוע במקורות הדיג ובחקלאות הימית. עליית המפלס עלולה לפגוע גם בתשתיות אנרגיה ותחבורה. צפויה גם פגיעה בתיירות. באופן כללי מדגיש הדו"ח כי האיומים העיקרים הם פגיעה במקורות מים ועליית מפלס הים.

להלן התחומים שנמצאים בשאר הדו"ח הנוכחי (תכנית ימית לישראל) ואשר השפעת שינוי האקלים בהם חשובה ויש להביאה בחשבון:

הסביבה החופית, ביולוגיה ימית, דיג וחקלאות ימית

כאמור לעיל, עליית הטמפרטורה ועליית החומציות יוצרות איום על מינים מסוימים. כמו כן, עליית המפלס מאיימת בעיקר על טבלאות הגידוד, וגם על אזור הכרית. עליית הטמפרטורה גם מגבירה את האיום מצד מינים פולשים. עליית המפלס מאיימת על שטחים פתוחים ועל שטחים ייחודיים באזור החוף.

ביוגאוכימיה ימית

כאמור, צפויה עלייה בחומציות הים, עם השלכות על יכולתם של יצורים ימיים שונים להשקיע שלד גירני. כמו כן, השינויים במשטר המשקעים עשויים להשפיע על שיטפונות הנושאים איתם נוטריינטים מהיבשה לים.

אוקיינוגרפיה פיזיקלית

צפויים שינויים בטמפרטורת הים, ואולי גם בזרמים.

ארכאולוגיה

עליית המפלס יכולה לאיים על מבנים ועל ממצאים קרוב לקו החוף.

גז, נפט ואנרגיה ומתקני תשתית אחרים

מתקנים להפקה ולהובלה של גז טבעי הם מקור לפליטות מתאן, שיש להתמודד איתן (ראו להלן). עליית מפלס הים תשפיע על מתקני תשתית לאנרגיה, התפלת מים, חשמל, תקשורת, נמלים וכו', וצריכה להיכנס למערכות השיקולים בזמן התכנון.

חוק ומשפט

הרגולציה הבין-לאומית בנושא שינוי האקלים עדיין נמצאת בתהליך משא ומתן, ועתידה אינו ברור. עם זאת, ישראל התחייבה בעקבות ועידת קופנהגן (2009) לצמצום צנוע בפליטות גזי החממה. ייתכן כי בעתיד החובות שיוטלו על ישראל, כמדינה מפותחת, יהיו נרחבים יותר.

ביטחון ואסטרטגיה

עליית המפלס עלולה לאיים על אתרים אסטרטגיים בישראל (תחנות כוח, נמלים, בסיסי חיל הים), ותפגע בצורה חמורה במצרים, שאזורים נרחבים בה יוצפו מעליית מפלס של מטר אחד. שינויים נרחבים בעולם צפויים להשפיע גם על ישראל.

5. אפחות שינוי האקלים

5.1 ישראל ואפחות

מדינת ישראל חתמה על פרוטוקול קיוטו לשינוי אקלים ואשררה אותו בשנת 1996. מטרת הפרוטוקול הייתה להביא לצמצום פליטות של גזי חממה. ישראל הוגדרה בפרוטוקול כמדינה מתפתחת, שלא מחויבת בצמצום פליטות (אם כי פליטות הפחמן הדו-חמצני ממנה דומות לאלה של מדינות מפותחות אחרות). בשנת 2009 קיבלה על עצמה מדינת ישראל התחייבות בפני ועידת קופנהגן, שלפיה עד שנת 2020 יופחתו 20% מפליטות גזי החממה לעומת תרחיש "עסקים כרגיל". שעור הפחתה זה מתבסס על דו"ח מקינזי (מקינזי, 2009) שצפה תחת "עסקים כרגיל" הכפלה בפליטות, וכי צמצום של 20% בקצב הגידול יוביל לרווח כספי כתוצאה מחיסכון באנרגיה וכו'. יש לציין כי דו"ח זה זכה לביקורת, מאחר שלמעשה הומלץ רק על הקטנת קצב הגידול בפליטות, בעוד שיעור הפליטות המוחלט ימשיך לגדול – וזאת בניגוד להערכות שגרסו כי ניתן לצמצם את הפליטות. דוגמה בולטת לאפשרויות הצמצום ניתנת בדו"ח "אפס פליטות פחמן בישראל" (דולב ואח', 2013), שתיאר תרחיש שלפיו שיעור הפליטות המוחלט יצומצם לאפס באמצעות חיסכון והתייעלות בשימוש באנרגיה, ובאמצעות הפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים.

בעקבות ההתחייבות בוועידת קופנהגן החליטה ממשלת ישראל בשנת 2010 להקים ועדה בין-משרדית להפחתת פליטות גזי חממה. החלטת הממשלה (מס' 1504) קובעת כי:

"בהמשך להחלטת הממשלה מס' 474 מיום 25 ביוני 2009 בנושא "היערכות ישראל לשינוי אקלים - היערכות ומוכנות לשינוי אקלים והפחתת פליטות גזי חממה" (להלן - החלטה 474), למנות ועדת היגוי (להלן - הוועדה) שתמליץ על אמצעי מדיניות נדרשים להפחתת פליטות גזי חממה במדינת ישראל, ולבחינת האפשרויות לניצול הזדמנויות לצמיחת המשק המקומי הנובעות מהתהליך הבינלאומי בנושא זה.

הוועדה תגבש המלצות להפחתת פליטת גזי חממה בישראל, בשאיפה להביא להפחתה בשיעור של 20% מסך הפליטות הצפויות בשנת 2020 על פי תרחיש "עסקים כרגיל".

הוועדה תבחן את ההשלכות הכלכליות של הפחתת הפליטות על המשק הישראלי ותציע את כלי המדיניות היעילים ביותר.

מנכ"ל משרד האוצר יעמוד בראש הוועדה ומנכ"ל המשרד להגנת הסביבה יהיה סגנו וממלא מקומו. חברי הוועדה יהיו המנהלים הכלליים של משרד התשתיות הלאומיות, משרד התחבורה והבטיחות בדרכים, משרד התעשייה, המסחר והתעסוקה ומשרד הפנים, ראש המועצה הלאומית לכלכלה, יו"ר הרשות לשירותים ציבוריים - חשמל והיועץ המשפטי לממשלה או נציגו.

הוועדה תבחן פעולות אפשריות להפחתת פליטות גזי חממה, תאתר חסמים ליישומן במשק, ותציע אמצעי מדיניות, כלים כלכליים והקצאת משאבים ברמה המשקית. הוועדה גם תקבע לוחות זמנים ליישום התכנית."

החלטת ממשלה מספר 2508 (משנת 2010) אימצה המלצות של הוועדה, וקבעה תקציב כולל להפעלת התכנית של 2.2 מיליארד ש"ח. לפי חישוב ועדת המנכ"לים, התועלת המשקית של הפחתת הפליטות תגיע ל-28 מיליארד ש"ח עד שנת 2020 .

נוסף על החלטת הממשלה בדבר התכנית הלאומית לצמצום פליטות גזי חממה קיימות גם שתי החלטות ממשלה קודמות, שיש להן השפעה מרכזית על פליטות גזי החממה בישראל:

1.החלטה מס' 4095, מ-2008, להפחית את צריכת החשמל בשיעור 20% עד שנת 2020

לעומת תרחיש "עסקים כרגיל". בהתאם להחלטה זו הוכנה תכנית לאומית לייעול השימוש באנרגיה.

2.החלטה מס' 4450, מ-2009, שלפיה עד שנת 2020 ייוצרו 10% מצריכת החשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות.

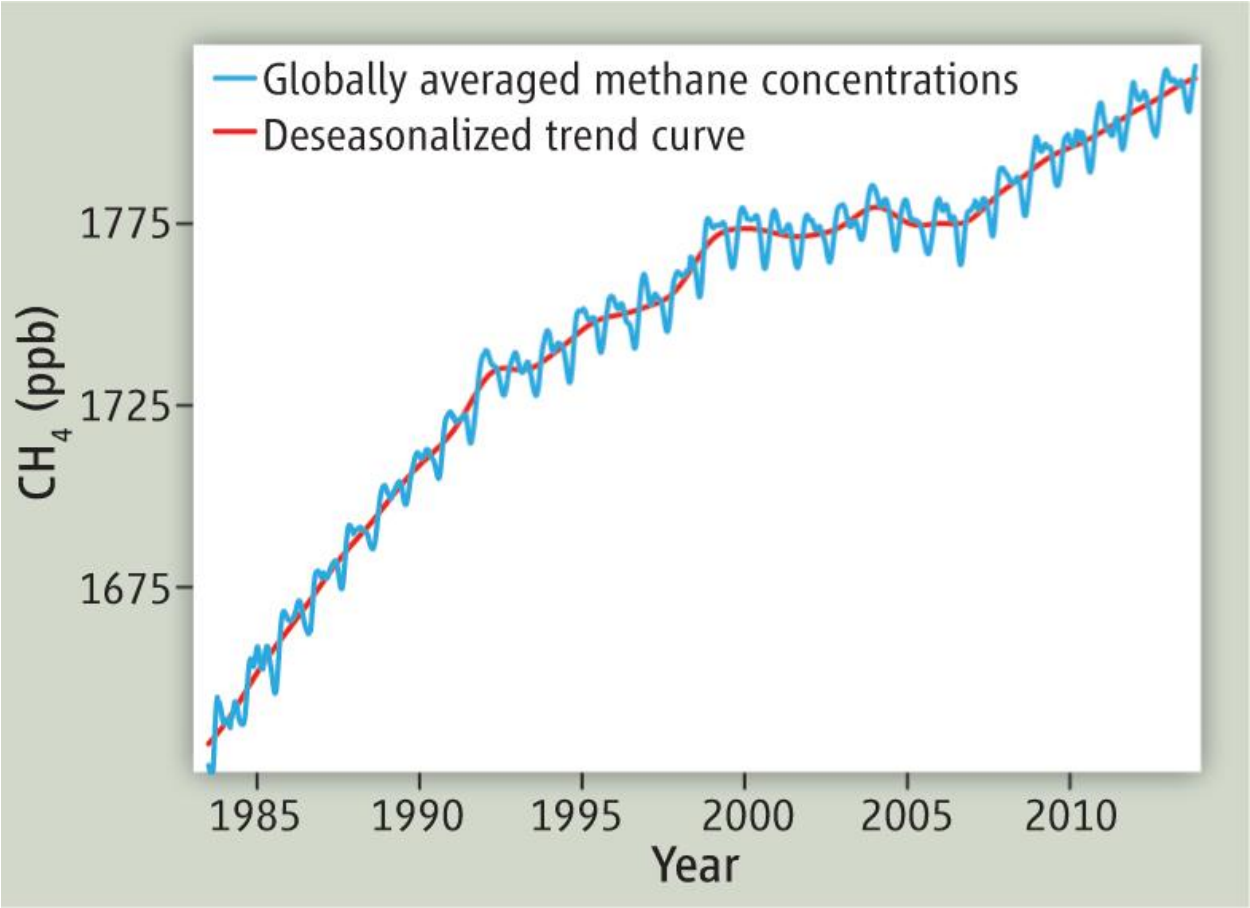
בשנת 2013 הקפיא משרד האוצר באמצעות חוק ההסדרים את התכנית הלאומית להפחתת פליטת גזי חממה, למרות ההתנגדות הנמרצת של המשרד להגנת הסביבה.

בחלק הבא יוצגו האפשרויות לצמצום פליטות (ולכן אפחות שינוי האקלים – mitigation) הקשורות לים שבשליטת ישראל.

<u>5.2 צמצום פליטות מדליפות של גז טבעי</u>

גז טבעי נחשב דלק שיוכל לשמש כדלק-מעבר במסגרת תהליך שינוי במשק האנרגיה העולמי לכזה שלא פולט כלל פחמן דו-חמצני. זאת משום שפליטת הפחמן הדו-חמצני בשרפת גז טבעי נמוכה בהרבה מהפליטה בשרפה של דלקים אחרים, ומשום שניתן להשתמש בגז הטבעי במגזרים שונים של משק האנרגיה. על פי קבוצת עבודה 3 של IPCC ("אפחות", פרק 7 – מערכות אנרגיה) ניתוחי מחזור החיים (LCA) מראים שכ-50% מפליטות

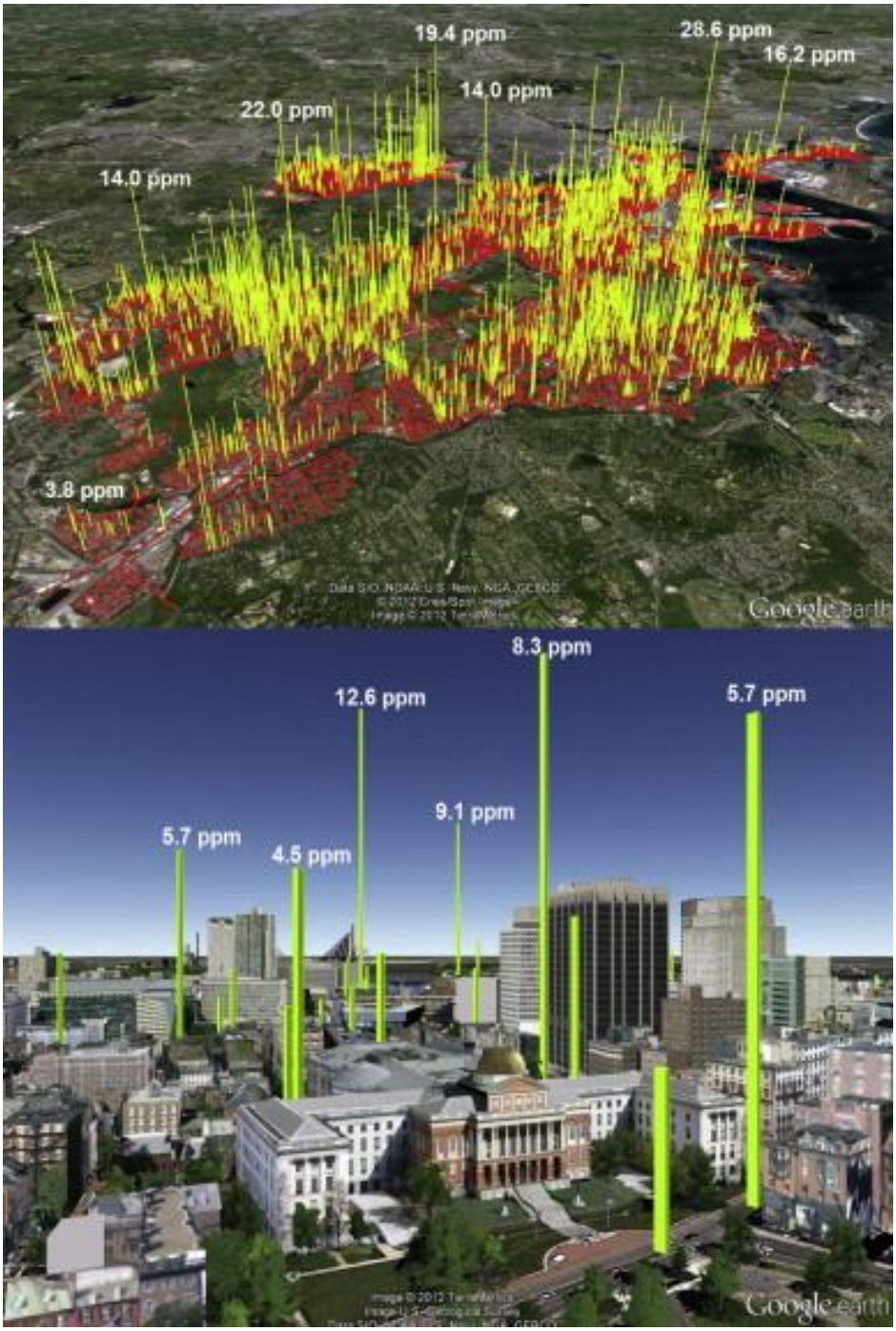
הפחמן הדו-חמצני יכולות להיחסך באמצעות מעבר מהפקת חשמל בתחנת כוח פחמית לתחנה מופעלת בגז מסוג מחזור-משולב (Edenhofer et al., 2014). עם זאת, מתאן, שהוא המרכיב העיקרי של גז טבעי, הוא גז חממה רב עוצמה, המחמם פי 86 מפחמן דו-חמצני באותו ריכוז בטווח זמן של 20 שנה, ופי 34 בטווח זמן של 100 שנה (התלות בזמן נובעת מכך שמתאן מתפרק באטמוספרה). העלייה בריכוזי המתאן באטמוספרה, החל במהפכה התעשייתית, גרמה לכך שהוא הגז השני בחשיבותו (לאחר הפחמן הדו-חמצני) התורם לשינוי אקלים מעשה ידי אדם. העלייה בריכוז המתאן באטמוספרה התחדשה בשנים האחרונות (איור 11) מסיבות לא ידועות, לאחר האטה בקצב שהחלה בשנות ה-90 (Nisbet et al., 2014).



איור 11: שינויים בריכוז המתאן באטמוספרה (Nisbet et al., 2014)

דליפות ושחרור מכוון של גז טבעי בתהליכי ההפקה וההובלה (Fugitive Emissions, להלן "דליפות") משחררות מתאן לאטמוספרה (איור 12). אם הקצב שהגז משתחרר בו בדליפות הוא גבוה, השימוש בגז טבעי לא יפחית את קצב שינוי האקלים, אלא להפך. מסיבות אלה נערכו מחקרים רבים בשנים האחרונות במטרה להעריך את קצב הדליפות של גז טבעי ממערכות ההפקה ומתשתית החלוקה (Allen et al., 2013; Alvarez et al., 2012; Caulton et

al., 2014; Jeong et al., 2014; Karion et al., 2013; Kort et al., 2008; Miller et al., 2013; Schwietzke et al., 2014; Weber and Clavin, 2012).



איור 12: דליפות מתאן מצנרת ההובלה העירונית בבוסטון גורמות לריכוזים גבוהים של הגז בנקודות שונות בעיר. ריכוז הרקע באטמוספרה כיום הוא כ-2ppm (Phillips et al., 2013).

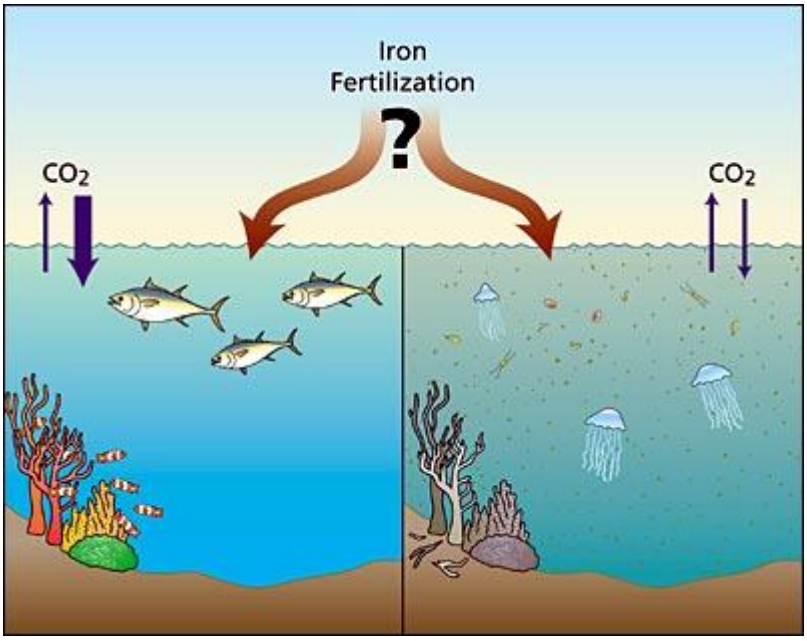
מחקרים שונים מעריכים את קצב הדליפות בטווח של 1-5% מסך כל הגז המופק (Edenhofer et al., 2014). מחקרים מהזמן האחרון מתכנסים לערכים של 2-3% מסך כל הגז המופק, כנראה ללא הבדלים ניכרים בין קצב הדליפות בהפקת גז קונבנציונלי ובהפקת

גז בסדיקה הידראולית מפצלים (Jaramillo et al., 2007; O'Sullivan and Paltsev, 2012; Weber and Clavin, 2012). נמצא גם כי קצב הדליפות תלוי במידה רבה בנהלים של תהליך פיתוח בארות הגז, ובנהלים לניטור של דליפות ברשת ההובלה והטיפול בהן (Edenhofer et al., 2014). מרבית המחקר עד כה עסק בדליפות בזמן פיתוח הבארות, אך דליפות מרשת ההובלה או בתהליך ההנזלה חשובות גם הן (Jaramillo et al., 2007).

בישראל, המחשבה המקובלת על פי דו"ח נאמן (מוסד שמואל נאמן, 2011) ודו"ח מקינזי (מקינזי, 2009) היא כי המעבר לשימוש בגז טבעי יעזור בצמצום פליטות גזי החממה. על פי דו"ח נאמן, החלפה של הדלקים הקיימים במערכת ייצור החשמל ובתעשייה בגז טבעי, תקטין את פליטת גזי החממה בשיעור של 30-44%. על פי דו"ח מקינזי, החלפה כזאת תמנע פליטה של 1.6 מגה-טון פחמן דו-חמצני לשנה בשנת 2030. על פי דו"ח נאמן יש גם לבדוק את האפשרות להגביר באופן משמעותי את השימוש בגז טבעי להנעת משאיות ואוטובוסים. כאמור לעיל, המחקרים בעולם קובעים כי המעבר לשימוש בגז טבעי בתחנות כוח ובתעשייה יעיל לאפחות שינוי האקלים רק אם נעשים צעדים רציניים לצמצום דליפות גז במערכות ההפקה וההובלה. שימוש בגז בתחבורה אינו מומלץ כלל (Alvarez et al., 2012) בגלל היקף הדליפות שמוערך בשימוש כזה. נושא הדליפות אינו מוזכר כלל בדו"ח מקינזי ובדו"ח נאמן, וגם לא בתכנית הפעולה הלאומית לצמצום פליטות של גזי חממה (שני, 2011). פיתוח של שדות הגז בים ושל מערכות הובלת הגז מהים לחוף באופן בר-קיימא שיצמצם פליטות גזי חממה מישראל, מחייב אסדרה ואכיפה שמטרתן ניטור דליפות הגז וצמצומן.

5.3 דישון הים ללכידת פחמן

האוקיינוס הדרומי, בו ידוע כי ריכוזי החנקן בפני השטח יחסית גבוהים וקצב היצרנות הראשוני נמוך, נחשב כאזור בו ריכוזי הברזל מגבילים את קצב היצרנות (Martin and Fitzwater, 1988). לכן, הוצע כי דישון האוקיינוס באופן מלאכותי בברזל יעלה את קצב היצרנות הראשונית, ומשום כך גם יגביר את קצב השקיעה של חלקיקים אורגניים אל עומק האוקיינוס. שקיעת חלקיקים אורגניים אלה אל העומק יוצרת שטף של פחמן אל האוקיינוס העמוק ממי השטח, שבעצמם קולטים פחמן דו-חמצני מהאטמוספרה. לכן, ההנחה הייתה שדישון בברזל יוביל לאפחות של פחמן דו-חמצני באטמוספרה. סדרה של ניסויים רחבי היקף שנעשו באוקיינוס הדרומי, העלו ספקות כבדים לגבי היעילות האמתית של דישון בברזל ללכידת פחמן באוקיינוס העמוק (Buesseler and Boyd, 2003). יתרה מזאת, התעוררו חששות (איור 13) לגבי פגיעה אפשרית ביציבות המערכת האקולוגית הימית כתוצאה מהדישון (Chisholm et al., 2001).



איור 13. השפעות אפשריות של דישון ברזל: משמאל – הגברת הפוריות הימית והגדלת קליטת הפחמן דו-חמצני מהאטמוספרה. מימין – פגיעה במערכת האקולוגית הימית, וכתוצאה מכך גם ירידה בקליטת הפחמן הדו-חמצני על-ידי האוקיינוס.

לאור ממצאים אלה החליט האו"ם לאסור על פרויקטים בהיקף גדול לדישון האוקיינוס בברזל (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2002). עבור ישראל, הפוטנציאל לדישון הים התיכון בברזל למטרות אפחות פחמן דו-חמצני כנראה אינו קיים, גם מאחר שבאזור המים הכלכליים של ישראל המים רדודים יחסית, וגם משום שמזרח הים התיכון מוגבל בעיקר על-ידי זרחן ואולי גם חנקן, אבל לא על-ידי ברזל (Krom et al., 1991; Thingstad et al., 2005).

5.4 הטמנה גאולוגית של פחמן בים התיכון ובמדף היבשת

בעשור האחרון נעשים מחקרים רבים בעולם על הטמנת פחמן דו-חמצני, שנלכד בארובות של תחנות כוח, בתת-הקרקע ובים העמוק, במטרה לאפחת את שינוי האקלים (Haszeldine, 2009; Holloway, 2009; House et al., 2009; Lu et al., 2009; Meinshausen et al., 2009; Orr, 2009). התהליך כולו נקרא לכידה והטמנה של פחמן (carbon capture and sequestration, CCS), וכולל הפרדה של הפחמן הדו-חמצני משאר הגזים הנפלטים בארובה, הזרמתו אל אתר ההטמנה והחדרתו לאתר. אתר ההטמנה צריך להיבחר כך שהפחמן הדו-חמצני שיוטמן בו יישאר ברובו באתר, ולא ידלוף ממנו גם לאחר מאות שנים. האתר צריך להיות קרוב מספיק לתחנות הכוח, כך שמחיר צנרת ההובלה לא יהיה גבוה מדי. לעומת זאת, האתר צריך להיות ממוקם לא קרוב מדי ליישובים. הסיבה לכך היא שדליפה

פתאומית של כמות גדולה של פחמן דו-חמצני, גז הכבד מהאוויר, עלולה לגרום להצטברותו בפני השטח, והצטבורת זו עלולה להוביל לתוצאות קטסטרופליות (Bachu, 2000; Herzog, 2001).

בישראל נערך מחקר על-ידי המכון הגאולוגי על מצאי אתרי ההטמנה האפשריים (קלבו וגבירצמן, 2010). נמצא כי אפשרויות ההטמנה בעלות הפוטנציאל הגבוה ביותר הן בעיקר בשכבות גאולוגיות שנושאות מי תהום מלוחים, ובמאגרים מדולדלים של נפט או גז טבעי (החדרת הפחמן הדו-חמצני אליהם גם מסייעת בהגברת ההפקה). בעולם נחקר גם נושא ההטמנה באמצעות הזרקה של פחמן דו-חמצני לים העמוק (Brewer et al., 1999) ופיזורו כתרחיף או צבירתו בקרקעית הים. אפשרות זאת אינה רלוונטית לישראל מאחר שאין במרחב המים הטריטוריאליים של ישראל אזור בעל עומק מים מספק שאפשר יהיה להזריק אליו פחמן דו-חמצני בלי שהוא יבעבע לאטמוספרה (קלבו וגבירצמן, 2010).

חלק משדות הגז שהתגלו בעשור האחרון אל מול חופי אשדוד ואשקלון (קידוחי יהושע, ים, נועה, מרי, אור, גד, נורדן, אנדרומדה וחנה) קרובים יחסית לתחנות הכוח במרכז הארץ ובדרומה (תל-אביב, אשדוד ואשקלון), ויכולים לשמש מאגר הטמנה. עם זאת, ייתכן שיש כוונה שמאגרים אלה ישמשו כמאגרי ביניים לגז שיופק במאגרים הרחוקים יותר (תמר ולווייתן). חשוב מזאת, פוטנציאל ההטמנה בשדות הגז קטן יחסית לפוטנציאל העצום בשכבות מי תהום שנושאות מים מלוחים, המצויות מתחת לכל הנגב (Calvo and Gvirtzman, 2013).

לסיכום: עיקר הפוטנציאל להטמנה של פחמן בישראל הוא ביבשה, ולא בים התיכון או במדף היבשת. דישון אוקיינוסים בברזל אינו נחשב עוד כפעולת אפחות מומלצת, ובכל מקרה זאת אינה פעולה רלוונטית בים התיכון. פעולת האפחות המרכזית שאפשר ושיש לבצע בחופי מדינת ישראל, היא צמצום הפליטות של גז טבעי כתוצאה מדליפות ומשחרורים מכוונים בתהליך ההפקה וברשת ההובלה אל החוף. פעולה זאת דורשת אסדרה, ניטור ופיקוח.

6. רשימת מקורות

ביין ע', אידלמן ע' וכהן ג' (עורכים). 2010. התמוטטות המצוק החופי בישראל. דרכים להתמודדויות והמשמעויות הכלכליות, הציבוריות והסביבתיות. מסמך מדיניות – טיוטה לדיון – מוגש למשרד ראש הממשלה.

דולב ש', סגל נ', כהן-פארן י', רוזנטל ג' וגבאי ד'. 2013. אפס פליטות פחמן בישראל - חזון למשק האנרגיה בשנת 2040: הסבת משק הפחמן של ישראל לנטול פליטות גזי חממה. הפורום הישראלי לאנרגיה.

מוסד שמואל נאמן. 2011. הטיפול בסוגיית גזי החממה בישראל 2011. חיפה.

מרכז ידע להיערכות לשינויי אקלים בישראל. 2012. דו"ח מספר 1: סקירת ידע קיים, זיהוי פערי ידע ועדיפות להשלמתם.

מקינזי. 2009. פוטנציאל הפחתת פליטות גזי חממה בישראל. עקומת עלות הפחתת גזי חממה בישראל. נובמבר 2009.

קלבו ר' וגבירצמן ז'. 2010. אומדן ראשוני לנפחי הטמנה גיאולוגית של פחמן דו-חמצני בישראל. ירושלים: משרד התשתיות הלאומיות, המכון הגיאולוגי. דו"ח מספר GSI/14/2010 .

שני ח'. 2011. תכנית פעולה לאומית להפחתת פליטות גזי חממה. דוח סופי של ועדת ההיגוי בראשות מנכ"ל משרד האוצר, מר חיים שני. ירושלים: משרד האוצר. יוני 2011.

Allen, D. T., Torres, V. M., Thomas, J., Sullivan, D. W., Harrison, M., Hendler, A., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Fraser, M. P., Hill, A. D., Lamb, B. K., Miskimins, J., Sawyer, R. F., and Seinfeld, J. H.: Measurements of methane emissions at natural gas production sites in the United States, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110, 17768-17773, 10.1073/pnas.1304880110, 2013.

Alvarez, R. A., Pacala, S. W., Winebrake, J. J., Chameides, W. L., and Hamburg, S. P.: Greater focus needed on methane leakage from natural gas infrastructure, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109, 6435-6440, 10.1073/pnas.1202407109, 2012.

Bachu, S.: Sequestration of CO2 in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change, Energy Conversion and Management, 41, 953-970, http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00149-1, 2000.

Beniston, M., Stephenson, D., Christensen, O., Ferro, C. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., and Woth, K.: Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections, Climatic Change, 81, 71-95, 10.1007/s10584-006-9226-z, 2007.

Brewer, P. G., Friederich, G., Peltzer, E. T., and Orr, F. M.: Direct Experiments on the Ocean Disposal of Fossil Fuel CO2, Science, 284, 943-945, 10.1126/science.284.5416.943, 1999.

Buesseler, K. O., and Boyd, P. W.: Will Ocean Fertilization Work?, Science, 300, 67-68, 10.1126/science.1082959, 2003.

Calvo, R., and Gvirtzman, Z.: Assessment of CO2 storage capacity in southern Israel, International Journal of Greenhouse Gas Control, 14, 25-38, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.12.027, 2013.

Caulton, D. R., Shepson, P. B., Santoro, R. L., Sparks, J. P., Howarth, R. W., Ingraffea, A. R., Cambaliza, M. O. L., Sweeney, C., Karion, A., Davis, K. J., Stirm, B. H., Montzka, S. A., and Miller, B. R.: Toward a better understanding and quantification of methane emissions from shale gas development, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111, 6237-6242, 10.1073/pnas.1316546111, 2014.

Chisholm, S. W., Falkowski, P. G., and Cullen, J. J.: Dis-Crediting Ocean Fertilization, Science, 294, 309-310, 10.1126/science.1065349, 2001.

Gualdi, S., Somot, S., Li, L., Artale, V., Adani, M., Bellucci, A., Braun, A., Calmanti, S., Carillo, A., Dell'Aquila, A., Déqué, M., Dubois, C., Elizalde, A., Harzallah, A., Jacob, D., L'Hévéder, B., May, W., Oddo, P., Ruti, P., Sanna, A., Sannino, G., Scoccimarro, E., Sevault, F., and Navarra, A.: The CIRCE Simulations: Regional Climate Change Projections with Realistic Representation of the Mediterranean Sea, Bulletin of the American Meteorological Society, 94, 65-81, 10.1175/bams-d-11-00136.1, 2012.

Field, C.; Barros, V.; Mach, K.; Mastrandrea, M., Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Press. Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK:

Haszeldine, R. S.: Carbon Capture and Storage: How Green Can Black Be?, Science, 325, 1647-1652, 10.1126/science.1172246, 2009.

Herzog, H. J.: Peer Reviewed: What Future for Carbon Capture and Sequestration?, Environmental Science & Technology, 35, 148A-153A, 10.1021/es012307j, 2001.

Holloway, S.: Storage capacity and containment issues for carbon dioxide capture and geological storage on the UK continental shelf, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy, 223, 239-248, 10.1243/09576509jpe650, 2009.

House, K. Z., Harvey, C. F., Aziz, M. J., and Schrag, D. P.: The energy penalty of post-combustion CO2 capture & storage and its implications for retrofitting the US installed base, Energy & Environmental Science, 2, 193-205, 10.1039/b811608c, 2009.

Jaramillo, P., Griffin, W. M., and Matthews, H. S.: Comparative Life-Cycle Air Emissions of Coal, Domestic Natural Gas, LNG, and SNG for Electricity Generation, Environmental Science & Technology, 41, 6290-6296, 10.1021/es063031o, 2007.

Global Carbon Project. Carbon budget and trends 2014. [www.globalcarbonproject.org/carbonbudget] released on 21 September 2014.

Jeong, S., Millstein, D., and Fischer, M. L.: Spatially Explicit Methane Emissions from Petroleum Production and the Natural Gas System in California, Environmental Science & Technology, 48, 5982-5990, 10.1021/es4046692, 2014.

Karion, A., Sweeney, C., Petron, G., Frost, G., Hardesty, R. M., Kofler, J., Miller, B. R., Newberger, T., Wolter, S., Banta, R., Brewer, A., Dlugokencky, E., Lang, P., Montzka, S. A., Schnell, R., Tans, P., Trainer, M., Zamora, R., and Conley, S.: Methane emissions estimate from airborne measurements over a western United States natural gas field, Geophysical Research Letters, 40, 4393-4397, 10.1002/grl.50811, 2013.

Kort, E. A., Eluszkiewicz, J., Stephens, B. B., Miller, J. B., Gerbig, C., Nehrkorn, T., Daube, B. C., Kaplan, J. O., Houweling, S., and Wofsy, S. C.: Emissions of CH(4) and N(2)O over the United States and Canada based on a receptor-oriented modeling framework and COBRA-NA atmospheric observations, Geophysical Research Letters, 35, 10.1029/2008gl034031, 2008.

Krom, M., Kress, N., Brenner, S., and Gordon, L.: Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea, Limnology and Oceanography, 36, 424-432, 1991.

Lu, J. M., Wilkinson, M., Haszeldine, R. S., and Fallick, A. E.: Long-term performance of a mudrock seal in natural CO2 storage, Geology, 37, 35-38, 10.1130/g25412a.1, 2009.

Marcos, M., Jordà, G., Gomis, D., and Pérez, B.: Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios, Global and Planetary Change, 77, 116-128, http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.04.002, 2011.

Martin, J. H., and Fitzwater, S.: Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic, Nature, 331, 947-975, 1988.

Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S. C. B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D. J., and Allen, M. R.: Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 degrees C, Nature, 458, 1158-U1196, 10.1038/nature08017, 2009.

Miller, S. M., Wofsy, S. C., Michalak, A. M., Kort, E. A., Andrews, A. E., Biraud, S. C., Dlugokencky, E. J., Eluszkiewicz, J., Fischer, M. L., Janssens-Maenhout, G., Miller, B. R., Miller, J. B., Montzka, S. A., Nehrkorn, T., and Sweeney, C.: Anthropogenic emissions of methane in the United States, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110, 20018-20022, 10.1073/pnas.1314392110, 2013.

Nicholls, R. J., and Hoozemans, F. M. J.: The Mediterranean: vulnerability to coastal implications of climate change, Ocean & Coastal Management, 31, 105-132, http://dx.doi.org/10.1016/S0964-5691(96)00037-3, 1996.

Nisbet, E. G., Dlugokencky, E. J., and Bousquet, P.: Methane on the Rise-Again, Science, 343, 493-495, 10.1126/science.1247828, 2014.

O'Sullivan, F., and Paltsev, S.: Shale gas production: potential versus actual greenhouse gas emissions, Environmental Research Letters, 7, 044030, 2012.

Orr, F. M.: CO2 capture and storage: are we ready?, Energy & Environmental Science, 2, 449-458, 10.1039/b822107n, 2009.

Pe'er, G., and Safriel, U. N. Climate Change: Israel National Report under The United Nations Framework Convention on Climate Change. Impact, Vulnerability and Adaptation. Commissioned by the Ministry of Environment. Sede Boqer: Ben-Gurion University of the Negev. October 2000.

Phillips, N. G., Ackley, R., Crosson, E. R., Down, A., Hutyra, L. R., Brondfield, M., Karr, J. D., Zhao, K., and Jackson, R. B.: Mapping urban pipeline leaks: Methane leaks across Boston, Environmental Pollution, 173, 1-4, http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.003, 2013.

Policy-Research-Corporation: The economics of climate change adaptation in EU coastal areas, Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries, 2009.

Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., and Rafaj, P.: RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, Climatic Change, 109, 33-57, 10.1007/s10584-011-0149-y, 2011.

Schwietzke, S., Griffin, W. M., Matthews, H. S., and Bruhwiler, L. M. P.: Natural Gas Fugitive Emissions Rates Constrained by Global Atmospheric Methane and Ethane, Environmental Science & Technology, 48, 7714-7722, 10.1021/es501204c, 2014.

Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2002).Bonn Guidelines on Access to Genetic Resources and Fair and Equitable Sharing of the Benefits Arising out of their Utilization. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., and Miller, H.: IPCC, 2007: climate change 2007: the physical science basis, Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, B., and Midgley, B.: IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2013.

Thingstad, T. F., Krom, M. D., Mantoura, R. F. C., Flaten, G. A. F., Groom, S., Herut, B., Kress, N., Law, C. S., Pasternak, A., Pitta, P., Psarra, S., Rassoulzadegan, F., Tanaka, T., Tselepides, A., Wassmann, P., Woodward, E. M. S., Riser, C. W., Zodiatis, G., and Zohary, T.: Nature of Phosphorus Limitation in the Ultraoligotrophic Eastern Mediterranean, Science, 309, 1068-1071, 10.1126/science.1112632, 2005.

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., and Lamarque, J.-F.: The representative concentration pathways: an overview, Climatic Change, 109, 5-31, 2011.

Weber, C. L., and Clavin, C.: Life Cycle Carbon Footprint of Shale Gas: Review of Evidence and Implications, Environmental Science & Technology, 46, 5688-5695, 10.1021/es300375n, 2012.