

# משבר האקלים – גורמים, השפעות, תרחישים עתידיים ודרכים לפתרון

אבנר גרוס

המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי ובית הספר לקיימות ושינויי אקלים, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב  
avnergro@bgu.ac.il

## תקציר

הכימי במערכות אקולוגיות יבשתיות. עם זאת, ספיגתו המוגברת במי האוקיינוס מעלה את חומציות הים, תהליך שיש לו השלכות חמורות על המערכת האקולוגית הימית. כדי למנוע שינוי אקלים בעל השלכות קטסטרופליות על האדם והטבע, המוסכמה המדעית המקובלת היא שעלינו להגביל את עליית הטמפרטורה הגלובלית עד סוף המאה ללא יותר מ-2°C לעומת הממוצע של 1850–1900. כדי להגיע ליעד זה עלינו לאפס את פליטות גזי החממה עד אמצע המאה הנוכחית ולהגביר את שאיבת הפחמן מהאטמוספירה תוך שימוש בפתרונות טבעיים, כמו נטיעת יערות.

פני השטח של כדור הארץ נמצאים במגמת התחממות מואצת מאז תחילת המאה ה-20, ושבע השנים האחרונות (2014–2021) מהוות את רצף השנים החם ביותר מאז החלו המדידות. התחממות כדור הארץ נגרמת בעקבות עלייה חדה בריכוז האטמוספרי של גזי חממה, כמו פחמן דו-חמצני, מתאן ודו-חנקן חמצני, שנפלטות בקצב הולך ועולה מפעילויות אנושיות כמו שרפת דלקי מחצבים, חקלאות וכריתת יערות.

שינוי האקלים, המשפיע על כל אזור בכדור הארץ, מסיט את כדור הארץ ממצב האקלים היציב שהיה שרוי בו בעשרת אלפים השנים האחרונות ומעלה את התדירות, העוצמה והמשך של אירועי אקלים קיצוניים, כמו גלי חום, אירועי גשם ובצורות. נוסף על כך, ההתחממות גורמת לירידה בצמיחת התפוקה החקלאית ומאיצה את קצב המסת הקרחונים, תהליך המוביל לעלייה מהירה של פני הים.

נוסף על היותו גז חממה, לעליית ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה יש השפעות נוספות על המערכות היבשתיות והימיות. ספיגתו המוגברת על ידי הצמחייה היבשתית, שהובילה עד היום לתהליך של "התיירקות כדור הארץ" (global greening), הגיעה לרוויה, ותרמה להפרת האיזון

### מילות מפתח

אירועי אקלים קיצוניים, אפקט החממה, החמצת אוקיינוסים, נקודות מפנה אקלימיות, פחמן דו-חמצני

**מבוא – כדור הארץ מתחמם**

שמניע את המעברים של כדור הארץ בין מצבי אקלים שונים הוא שינוי במאזן הקרינה הפלנטרי. שינויים במאזן הקרינה נובעים משינוי בכמות הקרינה האלקטרומגנטית קצרת-גל המגיעה מהשמש ליחידת שטח (ביחידות של וואט למ"ר) או משינוי בכמות הקרינה ארוכת-הגל שנפלטת מפני השטח לחלל החיצון. עודפי אנרגיה בעקבות עלייה בכמות הקרינה קצרת-הגל או ירידה בכמות הקרינה ארוכת-הגל יובילו בהכרח להתחממות הימים והיבשות. כמות הקרינה קצרת-הגל נקבעת בעיקר על ידי גורמים טבעיים, כמו עוצמת קרינת השמש הפוגעת בפני השטח, ומידת ההחזר שלה לאחר פגיעתה במשטחים (אפקט האלֶבְדוּ). לעומת זאת, כמות הקרינה ארוכת-הגל הנפלטת מפני השטח שמצליחה להגיע לחלל מווסתת על ידי ריכוז גזי החממה באטמוספירה, המושפע מפעילות אנושית, בתהליך שנהוג לכנות "אפקט החממה". בעוד האילוצים הקרינתיים הטבעיים נותרו ללא שינוי ב-150 השנים האחרונות, התחממות כדור הארץ מאז תחילת העידן התעשייתי משויכת לעלייה בריכוז האטמוספרי של גז החממה פחמן דו-חמצני ( $\text{CO}_2$ ) (וברמה פחותה גם של מתאן ( $\text{CH}_4$ ) ודו-חנקן חמצני ( $\text{N}_2\text{O}$ )). גזי החממה בולעים את הקרינה ארוכת הגל הנפלטת מפני שטח כדור הארץ, ובכך הצטברותם באטמוספירה מגבירה את אפקט החממה וגורמת לעלייה בטמפרטורה הממוצעת העולמית (איור 1).

העלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני קשורה ישירות לפעילות אנושית אשר הביאה לפליטה של 2,500 מיליארד טונות פחמן דו-חמצני מאז המאה ה-19 ועד היום (Friedlingstein et al., 2020). הפליטות הנרחבות תרמו לעלייה של כ-50 אחוזים בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה, מערך של 280 חלקים למיליון בעידן הקדם-תעשייתי ועד לערך של 410 חלקים למיליון כיום. ההערכות כיום הן שהערך הנוכחי הוא הגבוה ביותר מאז תקופת הפליוקן (Pliocene) שהסתיימה לפני 2.5 מיליון שנים (IPCC, 2021).

במקביל לעלייה בפחמן הדו-חמצני נצפתה עלייה דרמטית גם בערכי גזי החממה המשניים – מתאן וחנקן דו-חמצני. מתאן עלה ב-156 אחוזים משנת 1850 (והגיע עד לערכים של 1,866 חלקים למיליארד) וחנקן דו-חמצני עלה ב-23 אחוזים (והגיע עד לערכים של 332 חלקים למיליארד). אלה ערכים חסרי תקדים לפחות ב-800 אלף השנים האחרונות, וייתכן שאף יותר מכך (IPCC, 2021). למעשה, הנתונים שנאספו בעשורים האחרונים מראים כי פעילות אנושית אחראית ל-100 אחוזים מעודף החום שנאגר בכדור הארץ מ-1850 ועד היום (IPCC, 2021).

ניתן לשייך כ-70 אחוזים מההתחממות לפחמן דו-חמצני שנפלט משרפת דלקים, כמו נפט, פחם וגז, עשרה אחוזים נוספים לפחמן דו-חמצני שנפלט בשל שינוי ייעודי קרקע וכריתת יערות, 20 אחוזים לפליטות מתאן מכלל המקורות האנושיים, ועוד כ-8 אחוזים לפליטות חנקן דו-חמצני

טמפרטורת פני השטח בכדור הארץ נמצאת במגמת עלייה מאז תחילת העידן התעשייתי. בשנת 1988 החליטו הארגון המטאורולוגי העולמי וארגון הסביבה של האו"ם על הקמת פאנל בין-ממשלתי לשינוי האקלים (Intergovernmental Panel on Climate Change), שירכז את הידע המדעי העדכני בנושא האקלים. מאז, ה-IPCC מפרסם דו"ח אחת לחמש עד שבע שנים. הדו"ח האחרון מתבסס על מעל 14 אלף מאמרים מדעיים שעברו ביקורת עמיתים, ועולה ממנו כי בין השנים 1850–1900 לבין השנים 2011–2020 עלתה הטמפרטורה העולמית ב- $1.1^\circ\text{C}$  (IPCC, 2021).

עליית הטמפרטורה הביאה את כדור הארץ למצב החם ביותר מאז העידן הבין-קרחוני האחרון (Eemian period) שהסתיים לפני 115 אלף שנים (IPCC, 2021) (איור 1). כשני שלישים מההתחממות התרחשו מאז 1975, בקצב של  $0.2^\circ\text{C}$  לעשור (Lenssen et al., 2019). קצב התחממות זה גבוה פי עשרה בקירוב מקצב ההתחממות הטבעי של כדור הארץ במעברים בין תקופות קרח ותקופות בין-קרחוניות, המתרחשים באופן מחזורי ונובעים מהמסלול הטבעי של כדור הארץ סביב השמש במיליון השנים האחרונות (Gaffney and Steffen, 2017).

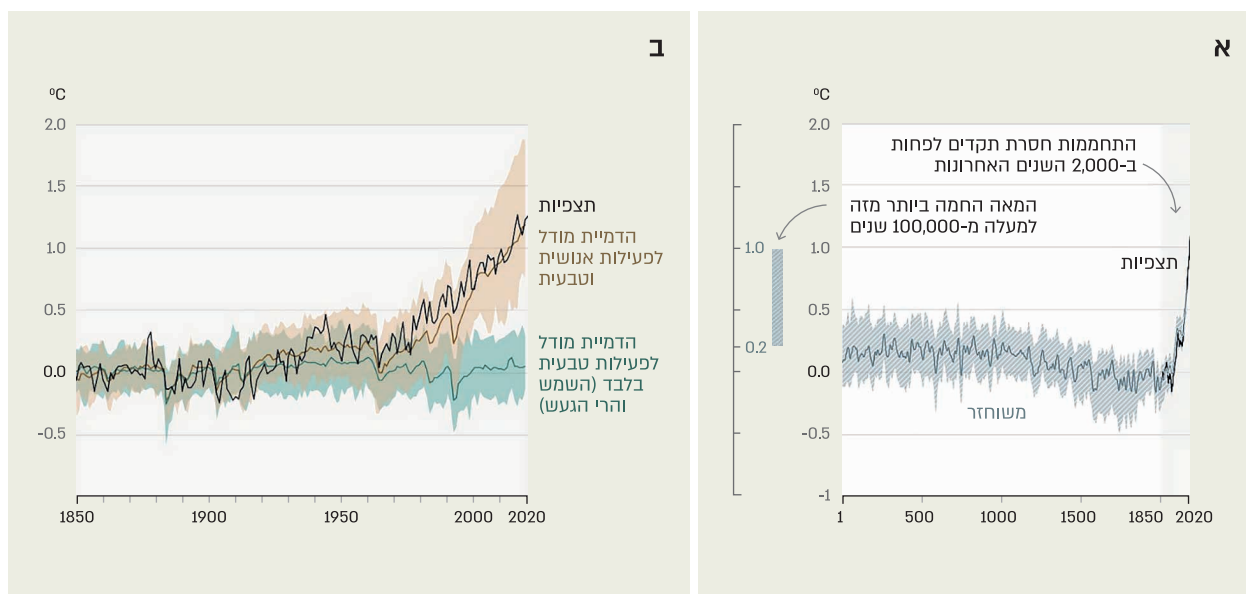
עליית הטמפרטורה הממוצעת מאז תחילת העידן התעשייתי אינה אחידה מבחינה מרחבית. באופן כללי, היבשה מתחממת בקצב מהיר יותר מהאוקיינוסים. הטמפרטורה הממוצעת ביבשה עלתה ב- $1.59^\circ\text{C}$  לעומת עלייה מקבילה של  $0.88^\circ\text{C}$  בים בהשוואה לממוצע השנים 1850–1900 (IPCC, 2021).

קצב ההתחממות הממוצע אינו קבוע במרחב, ומשתנה מאזור לאזור. באופן כללי, הקטבים מתחממים בקצב מהיר יותר מאשר האזורים הטרופיים וקווי הרוחב הנמוכים. קצב ההתחממות הגבוה ביותר נמדד באזור הארקטי, עם התחממות של כמעט  $2.5^\circ\text{C}$  מעל הממוצע של השנים 1850–1900, קצב המהיר פי שניים עד שלושה מההתחממות העולמית הממוצעת (Thoman et al., 2020).

לפי דו"ח השירות המטאורולוגי הישראלי, מדינת ישראל התחממה ב- $1.5^\circ\text{C}$  בין השנים 1950–2020, בקצב עלייה ממוצע של  $0.21^\circ\text{C}$  לעשור. עם זאת, נתונים חדשים של השירות המטאורולוגי מראים כי מאז 1980 ישראל מתחממת בקצב של  $0.54^\circ\text{C}$  לעשור, קצב כמעט כפול מאשר קצב ההתחממות הממוצע בעולם בארבעת העשורים האחרונים.

**אפקט החממה וההשפעה האנושית על האקלים של כדור הארץ**

האקלים בכדור הארץ השתנה פעמים רבות בעבר. מה



איור 1

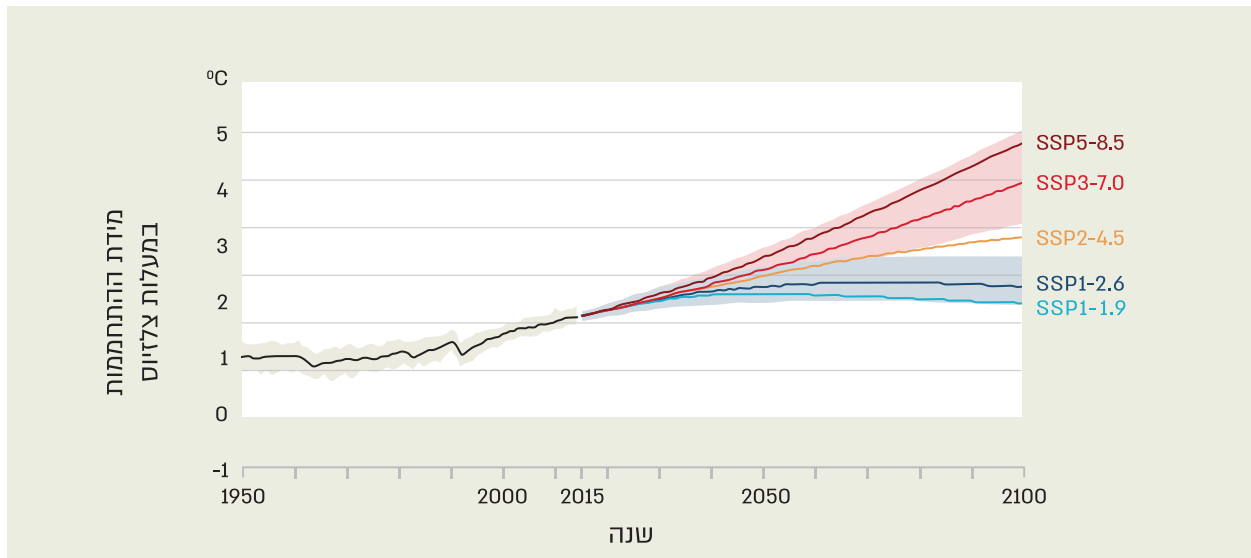
**שינוי בטמפרטורת פני השטח הגלובלית (ב-°C) ביחס לרמות שנמדדו בשנים 1850–1900**

א. שינוי בטמפרטורת פני השטח העולמית (ממוצע של עשור) מנתונים משוחזרים (בין השנים 1850–1) ומדודים (בין השנים 1850–2020).  
 ב. שינוי בטמפרטורת פני השטח העולמית (ממוצע שנתי) שנמדדה בפועל (קו שחור) או הוערכה בעזרת הדמיית מודל המבוסס על אילוצים קרינתיים אנושיים וטבעיים (חום) או על אילוצים קרינתיים טבעיים בלבד (ירוק).  
 מקור: דו"ח ההערכה השישי של ה-IPCC (IPCC, 2021).

**ההשפעות של עליית הטמפרטורה על מערכות כדור הארץ**

לעליית הטמפרטורה העולמית יש השפעות נרחבות על כל המערכות בכדור הארץ. נתוני אקלים שסוכמו בדו"ח ה-IPCC האחרון מראים כי בעשורים האחרונים ישנה עלייה דרמטית בגלי חום קיצוניים, באירועי גשם קיצוניים ובבצורות ברוב אזורי העולם, וכי ברוב המקרים ניתן לשייך את ההשפעה האנושית על האקלים לאירועי הקיצון שנצפו (IPCC, 2021). התחזיות הן שהתדירות והעוצמה של אירועי האקלים הקיצוניים יגברו בהתאם לעלייה בטמפרטורה הגלובלית, כתלות בקצב פליטות גזי החממה. בעקבות זאת, מדענים צופים כי כדור הארץ יעבור שינויים הידרולוגיים, אקלימיים ואקולוגיים נרחבים בכל היבשות והאוקיינוסים. לדוגמה, דו"ח ה-IPCC האחרון מצא כי בתרחיש התחממות של  $1.5^{\circ}\text{C}$  עד סוף המאה התדירות של אירועי חום המתרחשים בתדירות של פעם ב-50 שנה צפויה לעלות פי 8.6 לעומת התדירות הממוצעת שלהם בשנים 1850–1900, וכי 39.2 בתרחיש התחממות של  $4^{\circ}\text{C}$  (IPCC, 2021). נוסף על כך, נתונים חדשים מראים כי התדירות של אירועי חום שוברי שיאים היסטוריים צפויה לגדול עד פי 7 בין שנת 2021 לשנת 2050 ואף להתגבר עד פי 21 בין 2051 ל-2080 (Fischer et al., 2021).

מפעילות חקלאית. את השארית ניתן לשייך לפליטות גזים הלונגניים ולפליטות אוזון ממקור אנושי (IPCC, 2021). בעוד שקצב פליטות גזי החממה ממקורות אנושיים התגבר משמעותית לאחר מלחמת העולם השנייה ועלה בהדרגתיות עם התיעוש המואץ בעולם מתקופה זו, בשנים האחרונות נצפית התמתנות בעלייה של קצב הפליטות העולמי השנתי, והוא התייצב על כ-40 מיליארד טונות שווה ערך כחמן דו-חמצני ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ) (IPCC, 2021). מאחר שקצב פליטות גזי החממה העתידי יקבע את קצב התחממות כדור הארץ ואת ההשפעות העתידיות של שינוי האקלים על האדם והטבע, מדענים מדיסציפלינות שונות יצרו חמישה תרחישים עתידיים עם רמות פליטת גזי חממה משתנות, התלויות בסט תרחישים דמוגרפיים, כלכליים, חברתיים, פוליטיים וטכנולוגיים (Shared Socioeconomic Pathways, SSP). לפי תרחיש הפליטות הנמוך, המביא בחשבון הפחתה חדה בפליטות גזי החממה כבר בעשור הקרוב (SSP1), עליית הטמפרטורה בכדור הארץ בסוף המאה הנוכחית לעומת הערך ממוצע של 1850–1900 תהיה בין  $1.5^{\circ}\text{C}$  ל- $2^{\circ}\text{C}$  (בהתאם לקצב הפחתת הפליטות). לעומת זאת, לפי תרחיש הפליטות הגבוה, המנבא המשך צמיחה כלכלית מבוססת כחמן ללא מאמץ עולמי להפחתת פליטות (SSP5), טמפרטורת כדור הארץ תעלה במוצע ב- $4.5^{\circ}\text{C}$  עד סוף המאה (איור 2) (IPCC, 2021).



איור 2

**שינוי בטמפרטורת פני השטח הגלובלית עד סוף המאה (ב-°C) ביחס לרמות שנמדדו בשנים 1850–1900 לפי חמשת תרחישי האקלים השונים (SSP1–SSP5)**

הקיום הצבעוניים מייצגים את הערך הממוצע שהתקבל בהרצת כל הדמיות האקלים השונות, והשטחים הצבועים מייצגים את הערכים שהתקבלו ב-90 אחוזים מהסימולציות. הקו השחור מייצג את הטמפרטורות המדודות מ-1950 ועד 2020. המספרים מייצגים את מספר התרחיש (1–5) ואת רמת האילוץ הקרינתי בכל תרחיש (בטווח של 1.9–8.5, בוואט למ"ר). מקור: דו"ח ההערכה השישי של ה-IPCC (2021).

עליית הטמפרטורה והתגברות קצב אידוי המים בשילוב עם צפי למרווחים הולכים וגדלים בין אירועי גשם צפויים להגביר את קצב התייבשות הקרקע וכך את התדירות והמשך של בצורות. התדירות של בצורות המתרחשות פעם בעשור צפויה להתגבר פי 2 בתרחיש התחממות של 1.5°C, ופי 4.1 בתרחיש התחממות של 4°C (IPCC, 2021).

נוסף על העלייה החזויה באירועי אקלים קיצוניים, עליית הטמפרטורה הגבירה באופן דרמטי את קצב המסת הקרח שנמצא מחוץ למים ובתוכם במדפי הקרח הגדולים בגרינלנד, בקרחונים היבשתיים ובים הקרח הארקטי, וזאת על סמך השוואת המצב כיום למדידות מהימנות מתחילת שנות ה-70 של המאה שעברה ואילך. קצב המסת הקרחונים צפוי להתגבר משמעותית בכל האזורים עם המשך עליית הטמפרטורה העולמית ואף להמיס לחלוטין את כיסוי הקרח בים הארקטי כבר משנת 2050 בכל תרחיש של עלייה מעל ב-2°C (SSP2-SSP5).

לפי מנהל האוקיינוסים והאטמוספירה הלאומי האמריקאי (NOAA), העלייה בקצב המסת הקרחונים (יחד עם ההתפשטות התרמית של מי הים המתחממים) תרמה לעלייה של 21–24 ס"מ בכני הים מאז 1880. פני הים צפויים לעלות יחד עם עליית הטמפרטורה העולמית בכ-50 ס"מ בתרחיש פליטות נמוך, וכמעט ב-100 ס"מ בתרחיש פליטות גבוה.

נוסף על אירועי חום קיצוני, העלייה בטמפרטורה העולמית הממוצעת מגבירה את קצב אידוי המים וכך מגדילה את האחוז שלהם באטמוספירה. למעשה, כמות אדי המים באטמוספירה צפויה לגדול בכ-7 אחוזים לכל מעלת התחממות, מה שיוביל לעלייה בכמות המשקעים הכללית בכדור הארץ וכן להתגברות אירועי גשם קיצוניים והצפות (IPCC, 2021). התדירות של אירועי גשם קיצוניים המתרחשים בתדירות של פעם בעשור צפויה להתגבר פי 1.5, ועוצמתם צפויה להתגבר ב-10.5 אחוזים בתרחיש התחממות של 1.5°C. לעומת זאת, בתרחיש התחממות של 4°C תדירות אירועי גשם קיצוניים צפויה לעלות פי 2.7, יחד עם התגברות של 30.2 אחוזים בעוצמת הגשם (IPCC, 2021). העלייה בכמות המשקעים לא צפויה להיות אחידה בזמן ובמרחב. בעוד כמויות המשקעים צפויות לעלות משמעותית בקווי הרוחב 60–90 צפון ודרום – באזור הסהל, באזור המפרץ הפרסי ובמערב הודו, הפחתה משמעותית בכמויות המשקעים צפויה באגן הים התיכון ובאזור האמזונס (IPCC, 2021).

השירות המטאורולוגי הישראלי מדווח על הפחתת משקעים בקצב של כ-25 מ"מ בעשור ב-30 השנים האחרונות (ללא מובהקות סטטיסטית) וחוזה כי כמות המשקעים תפחת בכ-15 עד 25 אחוזים עד סוף המאה לעומת הממוצע של 1961–1990, בהתאם לתרחישי ההתחממות השונים.

זרחן וברזל, אינו עולה באותו הקצב כמו העלייה בריכוז הפחמן (Loladze, 2002). ההערכות הן כי חוסר האיזון הזה יפגע לא רק בקצב הצמיחה, אלא גם בערך התזונתי שיש לחומר הצמחי לשאר המינים הניזונים ממנו. לכן, הפער שנוצר ביחס שבין הפחמן לזרחן ולחנקן עלול להיגרר מהיצרנים הראשוניים למינים נוספים במעלה שרשרת המזון, וכן להשפיע על הרכב החומר האורגני בקרקע ואף לשנות את ההרכב הכימי של מערכות אקולוגיות שלמות.

נוסף על כך, הדישון בפחמן דו-חמצני השפיע באופן ניכר על ההרכב הכימי של גידולים חקלאיים רבים ברחבי העולם. עדויות רבות מראות כי בעוד קצב הצמיחה של גידולים רבים הואץ עם העלייה בריכוז האטמוספרי של פחמן דו-חמצני, כמעט בכל הגידולים שנבדקו ישנה ירידה דרמטית בריכוז החלבונים והוויטמינים וכן בריכוז של יסודות חיוניים לתזונה האדם, כמו ברזל, אבץ וסידן (Myers et al., 2014). תופעה זו מעצימה את אפקט "הרעב הנסתר", המתאר את הירידה בערך התזונתי של דגנים רבים עקב דילול הריכוז של יסודות חיוניים לתזונה האנושית, כמו אבץ וברזל, במדינות כמו הודו, שהתזונה בהן מבוססת פחמימות (Müller et al., 2014). למרות זאת, ההיבט החקלאי של תופעת הדישון בפחמן דו-חמצני אינו מקבל את תשומת הלב הראויה בקרב מדענים ובקרב מקבלי ההחלטות, בוודאי אם מניחים כי הירידה בערך התזונתי של גידולים רבים תתעצם עוד יותר בעקבות העלייה הצפויה בריכוז האטמוספרי של הפחמן הדו-חמצני. במקביל להשלכות האקולוגיות ביבשה, לעלייה בריכוז האטמוספרי של פחמן דו-חמצני יש השלכות נרחבות על הים, מאחר שעודפי הפחמן שנספגים באוקיינוסים מובילים לשינוי בהרכבו הכימי ולירידה בחומציות מי הים, תהליך שמכונה "החמצת האוקיינוסים" (ocean acidification).

בעקבות תהליך זה ערך ההגבה (pH) הממוצע של מי הים נמצא בירידה מתמדת מאז העידן הקדם-תעשייתי ועד היום, מערך של 8.20 עד לערך של 8.07 (Jiang et al., 2019). בתרחיש פליטות נמוך, חומציות מי הים צפויה לרדת לערך pH של 8.0 עד סוף המאה ואף להגיע לערך של 7.65 בתרחיש פליטות גבוה (IPCC, 2021).

להחמצת האוקיינוסים יש השפעה אקולוגית נרחבת על המערכת הימית. התמוססות עודפי הפחמן האטמוספרי במי הים מקשה על תפקודם של אורגניזמים ימיים רבים, ובראשם האלמוגים, מאחר שעלייה בערך ה-pH של מי הים משבשת את יכולתם להשקיע את השלד המינרלי שלהם.

תופעת החמצת האוקיינוסים, בשילוב עם העלייה ההדרגתית בטמפרטורת מי הים ועם תדירות גלי החום הימיים, מגדילה את תופעת הלבנת האלמוגים (coral bleaching) המאיימת על שרידות שוניות האלמוגים ברחבי העולם, תהליך שצפוי להתגבר לכדי פגיעה בעד כ-90 אחוזים מהאלמוגים עד שנת 2100 בתרחיש הפליטות הנמוך או להוביל להכחדתם המוחלטת בתרחיש הפליטות

עם זאת, עליית הטמפרטורה והשינויים במשטר הגשמים צפויים לחשוף אזורים רבים לתנאי אקלים קיצוניים שעלולים לפגוע באופן חד במגוון המינים. תחזיות עדכניות מראות כי בתרחיש פליטות גבוה כ-15 אחוזים משטח בכדור הארץ צפויים להיחשף לתנאי אקלים קיצוניים שיפגעו במעל 20 אחוזים מהמינים. הפגיעה החדה ביותר במגוון המינים צפויה להתרחש במערכות טרופיות ימיות ויבשתיות, ובחלק מהן יש סכנה לאובדן מהיר של כ-90 אחוזים מהמינים בתוך 50 שנים (Trisos et al., 2020). עם זאת, ההשפעה על מגוון המינים צפויה להצטמק לכדי 2 אחוזים משטח כדור הארץ בתרחיש פליטות נמוך.

נוסף על ההשפעות האקלימיות והאקולוגיות, שינוי האקלים גובה מחירים חקלאיים כבדים. נתונים מהשנה האחרונה מצביעים על ירידה של כ-21 אחוזים במדד צמיחת התפוקה החקלאית הכוללת מאז שנות ה-60 של המאה שעברה. הפגיעה הגדולה ביותר נרשמה באזורים החמים, כמו אפריקה, המזרח התיכון, דרום אמריקה והאיים הקריביים, עם ירידה של בין 26 ל-34 אחוזים במדד צמיחת התפוקה החקלאית (Ortiz-Bobea et al., 2021).

### "הבעיות האחרות" של הפחמן הדו-חמצני

רק כמחצית מהפחמן שנפלט מפעילות אנושית מצטבר באטמוספירה. 27 אחוזים מהפחמן האנושי נספגים בסופו של דבר בביוספירה היבשתית, ו-23 אחוזים נוספים נספגים באוקיינוס (Friedlingstein et al., 2020). אי לכך, כמות הפחמן הכללית בצמחייה היבשתית, בקרקעות ובאוקיינוסים עלתה בשיעורים גדולים מאז 1750 ועד היום. תהליך ספיגת עודפי הפחמן בצמחייה נקרא "אפקט הדישון בפחמן דו-חמצני" (CO<sub>2</sub> fertilization effect). תהליך זה העלה את כמות הביומסה היבשתית באזורים רבים בכדור הארץ מאז אמצע המאה שעברה, והוביל להתיירקות כדור הארץ (global greening). לצד זאת, עדויות אחרונות מראות כי אפקט הדישון בפחמן דו-חמצני התמתן משמעותית בארבעת העשורים האחרונים, וכנראה הגיע לרוויה בגלל מגבלות של מים וזמינות חומרי הזנה כמו חנקות וזרחות (Wang et al., 2020). בעקבות זאת, מדענים צופים כי העלייה בספיגת הפחמן הדו-חמצני הנפלט ממקורות אנושיים על ידי הצמחייה היבשתית צפויה להאט, מה שצפוי להגביר את קצב הצטברות הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה (IPCC, 2021).

נוסף על השפעתו על הריכוז האטמוספרי של הפחמן הדו-חמצני, לאפקט הדישון בפחמן דו-חמצני יש השפעות אקולוגיות נרחבות. ההשפעה המרכזית נובעת מחוסר איזון שנוצר בצמחייה בשל התגברות קצב קיבוע הפחמן, מאחר שהריכוז של שאר היסודות החיוניים לצמחים, כמו חנקן,

לפי דו"ח ה-IPCC האחרון, עצירת ההתחממות העולמית הממוצעת מתחת לסף של  $1.5^{\circ}\text{C}$  עד סוף המאה דורשת הפחתה של כ-50 אחוזים בפליטות גזי החממה ממקורות אנושיים עד שנת 2030 בדרך לאיפוס המוחלט עד לשנת 2050. איפוס הפליטות דורש מעבר לכלכלה נטולת-פחמן, ועובר דרך יעול דרמטי של השימוש באנרגיה והגדלה ניכרת בפיתוח מקורות אנרגיה דלי-פחמן ושימוש בהם עד לכדי מצב שבו כמעט כל צריכת האנרגיה העולמית תגיע ממקורות כמו שמש, רוח, מים וגרעין. לפי סוכנות האנרגיה הבין-לאומית (IEA), מהפכה כזו דורשת השקעה כלכלית שמוערכת בכ-4.2 טריליון דולר בשנה, ובזמן טומנת בחובה יתרונות כלכליים ובריאותיים, למשל כאלה הנובעים מהפחתה בזיהום האוויר הנגרם משרפת דלקים. בד בבד עם המעבר לאנרגיות דלות-פחמן, העמידה ביעדי האקלים מחייבת הגדלה של שאיבת הפחמן מהאטמוספירה תוך שימוש בפתרונות מבוססי טבע או בפתרונות מלאכותיים. מתוך הפתרונות הקיימים, נטיעת יערות ויעור מחדש (afforestation and reforestation) הם אחת הדרכים היעילות, הזולות והזמינות ביותר להורדת ריכוז הפחמן הדו-חמצני האטמוספרי, מאחר שהרחבת השטח המיוער תעלה את אגירת הפחמן הדו-חמצני במערכות היבשתיות (Doelman et al., 2020). נטיעת יערות חדשים ושיקום יערות הם הפתרון עם פוטנציאל ההשפעה הגדול ביותר מבין כל פתרונות שאיבת הפחמן הקיימים, ויש לו פוטנציאל ספיחת פחמן שנע מ-0.5 ועד 10.1 מיליארד טונות שווה ערך פחמן דו-חמצני ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ) לשנה, שהוא בין אחוז ורבע לכ-25 אחוזים מכמות הפחמן השנתית הנפלטת מפעילות אנושית (IPCC, 2019). נוסף על כך, יש להביא בחשבון כי הרחבת השטח המיוער דורשת שימוש במשאבים, מאיימת על הביטחון התזונתי באזורים מסוימים, וכן יש לה השפעות ישירות על האקלים בשל הפרת מחזור המים ושינוי רמות האלבודו של כדור הארץ (IPCC, 2019).

לסיכום, עמידה ביעדי האקלים (שנוסחו בוועידת האקלים בפריז ב-2015 ואושרו מחדש בוועידת האקלים בגלזגו בשנת 2021) הדרושים לשם עצירת ההתחממות העולמית הממוצעת מתחת לסף של  $2^{\circ}\text{C}$  תלויה בהפחתה ניכרת בפליטות גזי החממה ממקורות אנושיים כבר בעשור הקרוב ובהגברת קצב שאיבת הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה תוך שימוש בפתרונות טבעיים שונים.

הגבוה (IPCC, 2021). ההשלכות האקולוגיות של פגיעה בשוניות האלמוגים צפויות להיות נרחבות, היות ששוניות האלמוגים מתפקדות כמוקד אקולוגי ימי ומספקות מזון ומחסה לאורגניזמים ימיים רבים.

## האם יש דרך לעצור את הקטסטרופה האקלימית? הגבלת התחממות ל- $1.5^{\circ}\text{C}$ ותפקיד היערות

כל התופעות האקלימיות האקולוגיות המוזכרות במאמר זה צפויות להתגבר עם עליית ריכוז גזי החממה באטמוספירה ולגבות מחירים אנושיים כבדים. עליית פני הים צפויה להוביל לאובדן אזורי מחיה רבים ולפגוע במאות מיליוני אנשים החיים באזורים עירוניים צפופים בקרבת הים. המשך העלייה בטמפרטורה העולמית צפוי להגביר את הכשלים בתפוקה החקלאית ולהוביל לאי-סדירות באספקת המזון באזורים רבים בשל התגברות העוצמה והתדירות של גלי חום, אירועי גשם קיצוניים ובצורות. סך ההשפעות של שינוי האקלים על בני האדם עלול להביא למעבר המוני של אוכלוסיות מאזורים פגיעים אקלימית לאזורים פחות, לפגיעה בצמיחה הכלכלית העולמית, להגברת התדירות והעצימות של סכסוכים מקומיים ובין-לאומיים עקב התדלדלות המשאבים ולפגיעה באזורי המחיה, ובסופו של דבר להוביל לחוסר יציבות חברתית ופוליטית כולל. המוסכמה המדעית המקובלת היא שמניעת שינוי אקלים בלתי הפיך בעל השלכות קטסטרופליות על החברה האנושית דורשת את הגבלת עליית הטמפרטורה העולמית עד סוף המאה בלא יותר מ- $2^{\circ}\text{C}$  מהמוצע של 1850–1900, תוך הפעלת מאמץ עולמי כולל לעצירת התחממות בלא יותר מ- $1.5^{\circ}\text{C}$ . עצירת ההתחממות מתחת לסף זה תאט או אף תמנע לחלוטין את החציה של נקודות מפנה אקלימיות (tipping points), כגון האצה בהמסה של הקרח מעל פני המים ומתחת להם בגרינלנד, בים הארקטי ובאנטארקטיקה, קריסת יערות האמזונס, קריסת היערות הצפוניים (boreal), המסת קרקעות קפאט-עד (permafrost) באזורים התת-ארקטיים ועצירת סירקולציית המים המרידוניאלית האטלנטית (AMOC). חציית נקודות מפנה אלה עלולה להניע שרשרת של משובים חיוביים שישנו את אקלים כדור הארץ באופן בלתי הפיך (Lenton et al., 2019).

## מקורות

Fischer E, Sippel S, and Knutti R. 2021. Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nature Climate Change*, 11(8), 689–695.

Doelman JC, Stehfest E, van Vuuren DP, Tabeau A, Hof AF, Braakhekke MC, et al. 2020. Afforestation for climate change mitigation: Potentials, risks and tradeoffs. *Global Change Biology*, 26(3), 1576–1591.



- Lenton TM, Rockström J, Gaffney O, Rahmstorf S, Richardson K, Steffen W, and Schellnhuber HJ. 2019. Climate tipping points – too risky to bet against: Nature Publishing Group.
- Loladze I. 2002. Rising atmospheric CO<sub>2</sub> and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry. *Trends in Ecology & Evolution* 17(10), 457–461.
- Müller C, Elliott J, and Levermann A. 2014. Fertilizing hidden hunger. *Nature Climate Change*, 4(7), 540–541.
- Myers SS, Zanobetti A, Kloog I, Huybers P, Leakey AD, Bloom AJ, et al. 2014. Increasing CO<sub>2</sub> threatens human nutrition. *Nature*, 510(7503), 139–142.
- Ortiz-Bobea A, Ault TR, Carrillo CM, Chambers RG, and Lobell DB. 2021. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 306–312.
- Thoman R, Richter-Menge J, and Druckenmiller M. 2020. *Arctic Report Card 2020*. Washington, DC: NOAA 10.
- Trisos CH, Merow C, and Pigot AL. 2020. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature*, 580(7804), 496–501.
- Wang S, Zhang Y, Ju W, Chen JM, Ciais P, Cescatti A, et al. 2020. Recent global decline of CO<sub>2</sub> fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science*, 370(6522), 1295–1300.
- Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Hauck J, Olsen A, et al. 2020. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269–3340.
- Gaffney O and Steffen W. 2017. The anthropocene equation. *The Anthropocene Review*, 4(1), 53–61.
- IPCC. 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. [Shukla P, Skea J, Calvo Buendia E, Masson-Delmotte V, Pörtner H, Roberts D, et al. (Eds)]. Cambridge University Press.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors CP SL, Berger S, Caud N, et al. (Eds)]. Cambridge University Press.
- Jiang L, Carter B, Feely R, Lauvset S, and Olsen A 2019. Surface ocean pH and buffer capacity: Past, present and future. *Scientific Reports*, 9, 18624.
- Lenssen NJ, Schmidt GA, Hansen JE, Menne MJ, Persin A, Ruedy R, and Zyss D. 2019. Improvements in the GISTEMP uncertainty model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(12), 6307–6326.



יער המלאכים (יער שחריה), שניטע בשנות ה-50, ממוקם כ-4 ק"מ ממזרח לקרית גת בצפון הנגב. היער הפך מיער אורנים חד-גילי ליער מגוון רב-גילי. אפריל 2021  
צילום ממסוק: גיל סיאקי