

איפכא מסתברא - שני פנים לעלייה של הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה: השפעה מתונה על טמפרטורת כדור הארץ והשפעה חיובית על הצומח, בייחוד באזורים שחונים

יוסף גיל^[1] וניר שביב^[2]

^[1] המכון למדעי החיים, האוניברסיטה העברית בירושלים
gale.joel@mail.huji.ac.il

^[2] מכון רקח לפיזיקה, האוניברסיטה העברית בירושלים
shaviv@phys.huji.ac.il



פעילות טקטונית משפיעה גם היא על הרכב האטמוספירה. התפרצות הר הגעש Eyjafjallajokull, באיסלנד, אפריל 2010 | צילום: © Árni Friðriksson

בין קונצנזוס לספקנות - על מה המחלוקת?

בין חוקרים המבטאים את תפיסת הקונצנזוס לבין המטילים בה ספק, יש הסכמה מלאה על הדברים הבאים:

א. ריכוז הפחמן הדו-חמצני (CO_2) עלה מכ־280 חלקים למיליון לפי נפח (חל"מ) לפני המהפכה התעשייתית (איור 1) ועד לכ־400 חל"מ בשנת 2013.

ב. עלייה זו נגרמה מפעילות האדם, ואם האנושות לא תעבור למקורות אנרגיה חלופיים, צפוי ריכוז הפחמן הדו-חמצני להגיע לכ־600 חל"מ בעשורים הבאים.

המחלוקת נסובה בעיקר סביב הטענות הבאות המוצגות בפרסומי הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי אקלים^[12]:

א. עלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני תביא לעליית טמפרטורת

לאחרונה מופנית תשומת לב רבה לשינוי האקלים העולמי, רבות בזכות פרסומי הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי האקלים (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change). גם אצלנו, רבים בדעה ששינויי האקלים ברורים ותמיד מזיקים, ושהם נגרמים בלעדית מפעילות האדם; למשל אנגרט בעיתון זה^[1]. אולם מספר לא קטן של מדענים בעולם וגם בארץ, מעז לחלוק על קביעות אלה. ערעורם על ה"קונצנזוס" גורם לעתים לביקורת לא הוגנת כלפיהם. אנגרט, למשל, מתייחס לעמדותיהם כאל "טענות פוסט-מודרניסטיות", בעלות "מטרה לבלבל ולזרוע ספקות", וכאל "התקפה על השיטה המדעית". הוא מרבה להשתמש בביטוי "עובדות". אולם במדע אין עובדות, רק נתונים והשערות, המשתנים עם התקדמות המדע.

בהן עליות בטמפרטורה. כמו כן, חשוב לזכור שגם אילו המתאם היה גבוה, אין בכך הוכחה של נסיבתיות.

שינויי אקלים היום ובעבר

מספר תופעות עכשוויות אכן מצביעות על התחממות עולמית: למשל, פתיחת המעבר לאניות דרך הקרח של הים הצפוני, התמוססות השלג בהר הקילימנג'רו והתייבשות אגם צ'אד במרכז אפריקה. למרות זאת, בניגוד להכרזות ה-IPCC, לכל התופעות הללו היו תקדימים בעבר ההיסטורי בלי קשר לפעולות האדם [24].

באלף השנים האחרונות יש עדות לתנודות אקלימיות רבות בכל העולם, בייחוד באירופה ובחצי הכדור הצפוני של כדור הארץ, כולל באזורנו [9]. למשל, בשנים 800-1200 לספירה הייתה תקופה חמה באירופה ובמרכז יבשת אמריקה (שבשילוב עם בצורת תרמה להתמוססות אימפריות המאיה והאינקה [4]). לעומת זאת, בשנים 1400-1850 הייתה תקופת קרה (The Little Ice Age). כיום נסוגים הקרחונים בעולם כתולדה של המשך היציאה מתקופת הקרח האחרונה, אם כי נראה שקצב התמוססותם גדל בעשורים האחרונים.

הרגישות האקלימית של כדור הארץ לריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה

שאלת הסיבה לעלייה בטמפרטורה במאה ה-20 קשורה לשאלה הכללית של הרגישות האקלימית. ובכן מהי? כאשר עולה כמות הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה, קטנה כמות החום הנפלטת ממנו, ומשתנה טמפרטורת שיווי המשקל של כדור הארץ. הרגישות האקלימית היא היחס בין שינוי במאזן האנרגיה לבין השינוי בטמפרטורת שיווי המשקל. במקרה הפשוט, ללא משוברים, כדור הארץ יתאזן תרמית לאחר

כדור הארץ בכ-1.5 עד 4.5 מעלות צלזיוס בעשורים הקרובים, זאת אחרי עלייה של 0.8 מעלות במאה הקודמת.

ב. "שינוי האקלים הוא ללא תקדים, ומעל לכל ספק נגרם מפעילות האדם".

ג. התוצאה תהיה אסון אקולוגי.

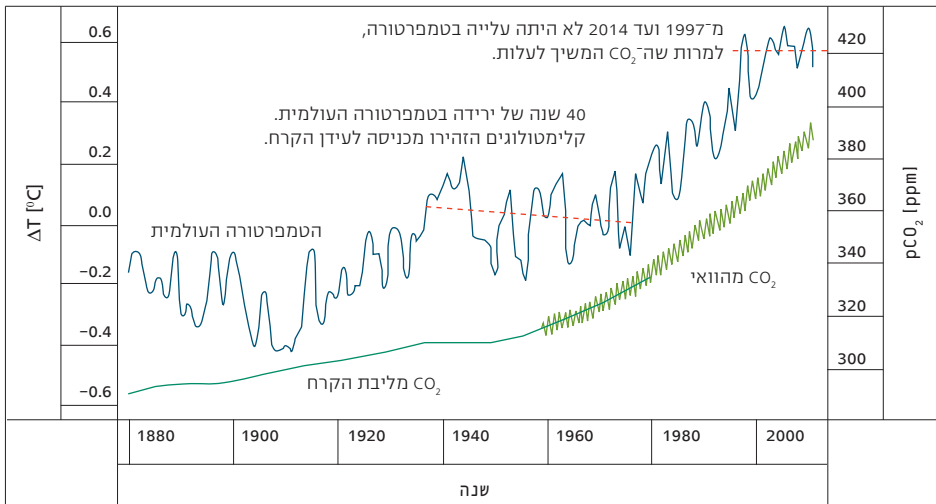
ההסתייגויות העיקריות של הספקנים

ננמק כאן מדוע השינויים האקלימיים אינם "ללא תקדים", ומדוע לעלייה בפחמן הדו-חמצני באטמוספירה יש רק השפעה שולית על טמפרטורת כדור הארץ אבל השפעה חיובית וניכרת על הצומח, ובייחוד באזורים שחונים.

עליית הטמפרטורה

נתוני ה-IPCC על עלייה של 0.8 מעלות בטמפרטורת כדור הארץ ב-120 השנים האחרונות [12] התקבלו ממקורות שאינם מהימנים ביותר. רובם נאספו מתחנות (כגון בית דגן), שבמשך השנים "נבלעו" על-ידי הרחבת הערים. העיור גורם להתחממות מקומית היכולה להגיע ל-2-3 מעלות. ה-IPCC טוען כי נתוניו נוכח מהשפעת העיור. אולם חוקר האקלים John Christy, ממחברי דו"חות ה-IPCC הראשונים, הראה שבניכוי הטיית העיור פחתה העלייה בטמפרטורה בכ-50% [6]. ממצאיו תואמים תצפיות לוויין [5, 7]. נתונים מטאורולוגיים "רועשים" מטבעם. כעת מנסים להסביר את העובדה שב-17 השנים האחרונות טמפרטורת כדור הארץ לא עלתה (למרות המשך העלייה בפחמן דו-חמצני) ברעשים אלה.

נתוני ה-IPCC על עלייה בריכוז פחמן דו-חמצני ובטמפרטורה (איור 1), מראים מתאם חלש מאוד. בזמן שהעלייה בפחמן דו-חמצני מונוטונית, זו של הטמפרטורה מראה שלוש תקופות (1880-1910, 1910-1940, 1940-1970, ומשנת 1996 עד 2014), שלא נרשמו



איור 1. העלייה בריכוז האטמוספרי של פחמן דו-חמצני ושל הטמפרטורות העולמיות נתוני פחמן דו-חמצני וטמפרטורה לקוחים מפרסומי ה-IPCC [12] ואחרים.

קרינה קוסמית - קרינה זו מגיעה אלינו מהסביבה הגלקטית של מערכת השמש. חלקיקי הקרינה הקוסמית (ק"ק) המגיעים באנרגיות גבוהות (מעל ל- 10^{10} ג'יגה אלקטרון וולט) חודרים לתוך האטמוספירה ומגבירים את יינונה. במהלך העשורים האחרונים הוצע שיינון זה מביא להגברת יצירת גרעיני התעבות לעננים, ומכאן לעלייה באלבדו העולמי ולהתקררות [7]. בשנות ה-90 הראה Svensmark כי העננות על פני כדור הארץ משתנה ביחד עם פעילות השמש [16, 22]. הפעילות המחזורית של השמש מלווה בהופעת "כתמי שמש". בשיא מחזורים אלה "רוח השמש" חזקה יותר. רוח זו היא בעלת אנרגיות נמוכות הרבה יותר מהק"ק. "רוח השמש" מחלישה את שטף הק"ק המגיע לכדור הארץ, ולכן גם את יינון האטמוספירה ויצירת העננים, ומשום כך מהווה גורם מחמם (איור 2). תאוריה זו קיבלה גיבוי בניסויי מעבדה בדנמרק ובמאיץ החלקיקים הגדול בז'נבה [22, 23].

על סקלות זמן של עשרות ומאות מיליוני שנים, הסביבה הגלקטית שלנו משפיעה על האקלים. מעבר של מערכת השמש דרך זרוע של שביל החלב, שם צפיפות הק"ק גבוהה, גורר ירידה בטמפרטורה הגלובלית של כחמש מעלות [20]. על סקלות זמן קצרות מאוד, ישנם אירועים הנקראים אירועי פורבוש, ששטף הק"ק יורד בהם עד עשרות אחוזים למשך כמה ימים. מסתבר שבמקביל לאירועים אלה ניתן לראות ירידה בכמות הארוסולים, ושינויים במשתנים שונים המאפיינים את העננות על פני כדור הארץ [22].

השפעת השמש על האקלים במאה ה-20 - כפי שצוין לעיל, לשמש השפעה גדולה על האקלים, וההסבר העקבי ביותר להשפעה זו הוא דרך אפנון הק"ק שמגיעה לכדור הארץ. ניתן לכמת את השפעת השטף על-ידי מדידת השינויים בגובה פני הים, המראה שינוי מחזורי המסונכרן למחזור ה-11 השנים בפעילות של השמש. שינוי זה נובע בעיקר מהתפשטות תרמית של השמש, והוא שווה ערך לשינוי מחזורי של כ-1 ואט למטר מרובע. אנרגיה זו גדולה פי שבעה מהשינויים בעצמת ההארה האלקטרומגנטית של השמש, דבר המצביע על השפעת גורם נוסף, כגון "רוח השמש" [21].

נוסף על מחזור ה-11 השנים, לשמש שינויים ארוכי טווח. בפרט, פעילות השמש גדלה לאורך המאה ה-20. בשנים 1950-1990 עלתה הפעילות הממוצעת לרמה הגבוהה ביותר שהשמש הגיעה אליה באלף השנים האחרונות. עליית הפעילות במאה ה-20 תרמה בהכרח לחלק מההתחממות [26]. לעומת זאת, "תקופת הקרח הקטנה" אופיינה על-ידי פעילות נמוכה של השמש. בעשרים השנים האחרונות הייתה פעילות השמש נמוכה, ובמקביל לא נרשמה עלייה בטמפרטורה העולמית.

תרומת השמש קשורה גם לשאלת הרגישות האקלימית. במודל הסטנדרטי של ה-IPCC השינוי במאזן האנרגיה במאה ה-20

הכפלת הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה, עם עלייה בטמפרטורה של מעט פחות מ- 1.2°C מעלות. אולם על פי רוב המודלים הנומריים, העלייה תהיה גדולה יותר כתוצאה ממשוברים, כשהגדולים מביניהם הם השפעת אדי המים והעננות. לאחרונה אפקט של חימום (הם כמו שמיכה) ואפקט של קירור (הם מחזירים את קרינת השמש), שיכול בערכו המוחלט להיות גדול מהשפעת אדי המים. אולם המודלים הנומריים מכילים אלגוריתמים פשוטים לתיאור העננות, כך שרגישות המודלים נקבעת כמעט לחלוטין על-ידי האלגוריתם שנבחר לתיאור העננות [3].

היות שלא ניתן לנבא את הרגישות בעזרת מודלים נומריים, יש לבחון את ההתנהגות ההיסטורית של אקלים כדור הארץ כדי להסיק את הרגישות בעזרת מחקרים אמפיריים. אלה מראים שהרגישות נמוכה [15].

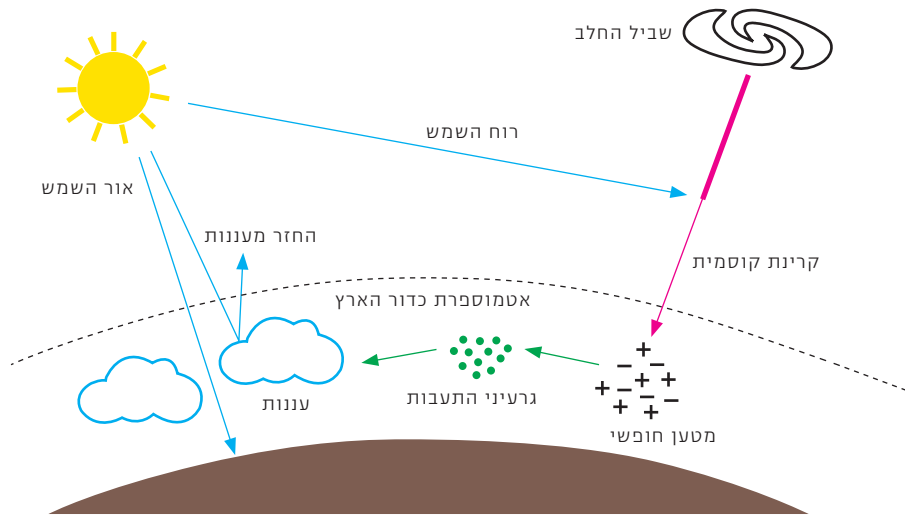
לשינויי האקלים בחצי מיליארד השנים האחרונות אין כל מתאם עם שינויי הפחמן הדו-חמצני. למשל, לפני כ-450 מיליון שנה, כדור הארץ היה בעידן קרח משמעותי יותר מבעשרות מיליוני השנים האחרונות, אולם כמות הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה הייתה ככל הנראה גדולה פי עשרה. למעשה, אם בוחנים כחמש תקופות שונות, מגיעים למסקנה שבכולן הרגישות האקלימית נמוכה, עלייה של 1-1.5 מעלות עם הכפלת הפחמן הדו-חמצני [20].

גורמים טבעיים המשפיעים על האקלים

גורמים רבים, שאינם תולדה של פעילות האדם, משפיעים על האקלים העולמי. גורמים אלה ניתן לחלק לגורמים פנימיים בכדור הארץ ולגורמים החיצוניים לו.

בין הגורמים הפנימיים ניתן למנות: פעילות טקטונית המשפיעה על הרכב האטמוספירה בכלל (ועל כמות הפחמן הדו-חמצני הכוללת בפרט) ועל הגאוגרפיה של היבשות והאוקיינוסים. גם החי והצומח משפיעים על הרכב האטמוספירה ועל מידת החזר הקרינה: למשל, יצירת דימטילסולפיד על-ידי אצות ימיות מגבירה את היווצרות גרעיני ההתעבות (nucleation) בעננים.

גורמים חיצוניים הם, לדוגמה, שינויים במסלול כדור הארץ ובנטייתו, המשנים את שטף הקרינה המגיעה לקווי רוחב שונים בסקלות זמן של עשרות עד מאות אלפי שנים. כדור הארץ חשוף למספר סוגי קרינה. הקרינה האלקטרומגנטית הכוללת של השמש היא בעיקרה קרינה תרמית. אולם, על פני עשרות אלפי שנים, רכיב זה אינו משתנה ביותר מאלפית מערכו, ולכן לא יכול להשפיע כמעט על האקלים. נתעכב על שני הגורמים החיצוניים שנראה שלהם יש השפעה חשובה על אקלים כדור הארץ: הקרינה הקוסמית ורוח השמש, ששתיהן קרינות חלקיקיות, בעיקרן פרוטונים.



איור 2. הקשר בין הקרינה הקוסמית, רוח השמש והאקלים

כשהשמש פעילה יותר והרוח שלה חזקה יותר, פחות ק"ק מגיעה מסביבתנו בשביל החלב. ישנה פחות יוניזציה באטמוספירה, ובעקבות זאת פחות יצירה של גרעיני התעבות. בתנאים אלה נוצרים עננים פחות לבנים, ולפיכך מחזירים פחות מאור השמש לחלל. התוצאה היא עלייה בטמפרטורת כדור הארץ.

גם היא לא מצאה שינויי אקלים שעמדו במבחן הסטטיסטיקה. יש לזכור, שאין למעשה באפשרותנו לחזות שינויי אקלים קטנים כאלה, לא לשנים הקרובות, ובוודאי לא לעוד 50 שנה [13].

השפעה הישירה של העלייה בפחמן הדו-חמצני על הביטחון השפעת פחמן דו-חמצני על הצומח

כבר יותר ממאה שנה ידוע שמבחינת רוב הצומח, ריכוז החמצן הנוכחי גבוה מדי והפחמן הדו-חמצני נמוך מדי (למשל Zelitch [29]). בניסוי מעבדה עולה שיעור הפוטוסינתזה כמעט ליגאריית עם עליית רמת הפחמן הדו-חמצני מ-280 חל"מ ל-600 חל"מ. מידת התגובה תלויה במין הצמח, בקרינה ובזמינות של מים ומינרלים. עבור צמחים רבים הגדלים בשדה בתנאים טובים, סביר לצפות לעלייה גדולה בייצור הראשוני (primary productivity) עם עליית ריכוז הפחמן הדו-חמצני מ-280 ל-600 חל"מ. הדבר נכון לגבי כ-80% מהצומח, השייך לקבוצה הפיזיולוגית C-3 [25].

מלבד השפעה על שיעור הפוטוסינתזה יש לפחמן דו-חמצני גבוה השפעה חיובית על הרבה משתנים אחרים המעורבים בגידול הראשוני, שהם בעלי חשיבות מיוחדת לצומח באזורים שחונים. פחמן דו-חמצני גבוה מביא לסגירה חלקית של פיוניות ולהקטנת הדיות, בו בזמן שהריכוז הגבוה יותר של הפחמן הדו-חמצני מתגבר על ההתנגדות לדיפוזיה של הפיוניות הסגורות למחצה; כך שרמת הפוטוסינתזה נשמרת ואף עולה. כתוצאה מכך, קטנה תצרוכת המים של הצמחים [17,10].

מליחות בקרקע מביאה, בשלב ראשון, לסגירת פיוניות חלקית ולהקטנת דיפוזיית הפחמן הדו-חמצני לתוך העלה, ומכאן להקטנת הפוטוסינתזה והגידול. אולם, כאמור, עליית הפחמן הדו-חמצני מגדילה את קצב הדיפוזיה. בשלב השני, מליחות וגם חום גורמים להשקעת אנרגיה במנגוני הסתגלות. כאשר

נובע בלעדית מעליית הפחמן הדו-חמצני. כדי שאותו שינוי יוכל להסביר את כל ההתחממות המשוערת של 0.8 מעלות, דרושה רגישות אקלימית גבוהה. לעומת זאת, אם גם השמש תרמה לשינוי במאזן האנרגיה, אזי השינוי הכולל במאזן האנרגיה במאה ה-20 גדול יותר, וכדי להסביר את ההתחממות שנמדדה, יש צורך ברגישות אקלימית קטנה יותר. המשמעות של רגישות אקלימית נמוכה יותר היא שעם הכפלת הפחמן הדו-חמצני העלייה בטמפרטורה תהיה פחותה.

במודל לתיאור מאזן החום של כדור הארץ במאה ה-20 [26], המביא בחשבון את השפעת פעילות השמש על האקלים דרך אפנון שטף הק"ק המגיע לכדור הארץ, נמצא שנוסף על השפעת הפחמן הדו-חמצני, שאחראית על כמחצית מעליית הטמפרטורה המשוערת של 0.8 מעלות, עלייה של כ-0.4 מעלות מוסברת על-ידי השפעת "רוח השמש" (איור 2). מכאן מגיעים לתחזית של עלייה מתונה של כ-1.2 מעלות בטמפרטורת כדור הארץ במאה ה-21, בניגוד לתחזיות הקיצוניות יותר של ה-IPCC של 3.0-4.5 מעלות.

שינויים אפשריים במשקעים ובטמפרטורה והשפעתם על הביטחון

אם אמנם מתרחשים כיום שינויי אקלים, נוסף על העלייה הברורה בפחמן דו-חמצני, ובלי להתייחס לגורם/גורמים לשינויים אלה, רצוי לבחון את השפעתם על הביטחון, וביחוד באזורים שחונים או שחונים למחצה, כמו ארצנו.

אם טמפרטורות העולם יעלו ב-3-4.5 מעלות והמשקעים יפחתו, יהיו לכך השלכות שליליות מאוד על הצומח והחי בארץ. גבול המדבר עלול לנוע צפונה ומערבה; אולם אין עדיין נתונים ודאיים על מגמה כזו. סמואלס (ידע אישי, 2012) סקרה את נתוני הטמפרטורה של אזור מזרח הים התיכון ב-25 השנים האחרונות;

מכל האמור מעלה אפשר היה לחשוב שהתשובה חיובית, אבל כמובן לא כן היא. עליית הפחמן הדו-חמצני מלווה בהרס יערות העולם ובהפצת גזים רעילים (כגון: אוזון, גפרית דו-חמצנית ו-Peroxyacetyl Nitrate [PAN]). כמו כן, יש לה תרומה חלקית להתחממות העולמית (כמוסבר מעלה), והיא משנה את ההרכב הכימי של מימי האוקיינוסים ובייחוד את החומציות שלהם. יתכן שהתופעה האחרונה היא הבעיה האקולוגית הקשה ביותר הנגרמת מעליית הפחמן הדו-חמצני, אולם המחקר בתחילתו.

האם כדאי לנקוט בפעולה עולמית להקטנת הפחמן הדו-חמצני, כאמצעי זהירות נכון?

במילה אחת – לא; זאת בגלל העלות. עלות ביצוע ההחלטות שהתקבלו מהכנסים בוועידות האקלים הבין-לאומיות בקיוטו (1997) בקופנהגן (2009), בדרבן (2011) ובוורשה (2013), מוערכת ב-100–1,000 מיליארד דולר ב-20 השנים הראשונות למימושן [18].

מקורות

[1] אנגרט א. 2011. ההתחממות הגלובלית – העובדות המדעיות במבט ההיסטורי. אקולוגיה וסביבה 2(3): 174–182.

- [2] Ainsworth EA and Long SP. 2004. What have we learned from 15 years of free air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist* 165: 351–372.
- [3] Cess RD, Potter GL, Blanchet JP, et al. 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models. *Science* 245: 513–516.
- [4] Chepstow-Lusty AJ, Frogley MR, Bauer BS, et al. 2009. Putting the rise of the Inca Empire within a climatic and land management context. *Climate Past* 5: 375–388.
- [5] Christy JR, Norri WB, Spencer RW and Hnilo JJ. 2007. Tropospheric temperature change since 1979 from tropical radiosonde and satellite measurements. *Journal of Geophysical Research* 112: D06102.
- [6] Christy JR. 2011. Testifying before the US Congress house committee on Science, Space and Technology (31/3/11). www.tinyurl.com/Climate-Change-Assessments.
- [7] Dickenson RE. 1975. Solar variability and the lower atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society* 56: 1240–1248.
- [8] Donahue RJ, Roderick ML, McVicar TR, et al. 2013. Impact of CO₂ fertilization on maximum foliage cover across the globe's warm, arid regions. *Geophysical Research Letters* 40(12): 1–5.
- [9] Enzel Y, Bookman (Ken Tor) R, Sharon D, et al. 2003. Late Holocene climates of the Near East deduced from Dead Sea level variations and modern winter rainfall. *Quaternary Research* 60: 263–273.

הפחמן הדו-חמצני גבוה, הפוטוסינתזה המוגברת מספקת אנרגיה זו ומחזקת את ההסתגלות [14]. הקטניות וצמחים בודדים ממשפחות אחרות חיים בסימביוזה עם חיידקים אל-אווירניים המקבעים חנקן אטמוספרי, ובמותם מותירים את החנקן שקובע לצמח. חיידקים אלה נהנים מהפחמימות שמייצרים הצמחים, ולכן פעילותם מוגברת כאשר שיעור הפוטוסינתזה עולה [19].

כדי לוודא תגובת צמחים לפחמן דו-חמצני בשדה, כאשר תנאי הסביבה האחרים אינם מיטביים, נערכו ניסויים ב-12 אתרים במקומות שונים בעולם, שגודלו בהם צמחים כמעט ללא כל הפרעה סביבתית מלבד העלאת ריכוז הפחמן הדו-חמצני: FACE (Free Air CO₂ Enrichment).

סיכום תוצאות מכ-120 מאמרים על ניסויי FACE מראה שרוב ממצאי המעבדה והחממות אומתו [2]. בניסויי FACE הופיעה תגובה חיובית לפחמן דו-חמצני בייחוד אצל עצי יער ושיחים. צומח חד-שנתי הגיב, אבל פחות מהצפוי, בעיקר כתוצאה מחוסר מים. יצוין ששיחים נמוכים הם חלק ניכר ממסת הצומח הרב-שנתי באזורים שחונים.

בניסויי ה-FACE וכן בניסויים אחרים ברמת ה"חצי שדה", נחשפו צמחי הביקורת לאטמוספירה של תקופת הניסויים, שבה ריכוז הפחמן הדו-חמצני עמד על כ-380 חל"מ ולא על 280 חל"מ כפי ששרר לפני המהפכה התעשייתית. הסיבה לכך היא פרגמטית-ניסויית: הקושי בהקטנת ריכוז הפחמן הדו-חמצני באוויר, לעומת הקלות יחסית של העלאתו. ניסויי מעבדה מראים תגובת צמחים חזקה דווקא בריכוזים הנמוכים יותר. לכן, בבואנו להעריך השפעות של העלאת הפחמן הדו-חמצני על הצומח מאז 1850, יש לזכור שתוצאות ניסויי השדה מתייחסות רק לתקופה מהיום ועד ל-50 השנים הבאות, כאשר הפחמן הדו-חמצני צפוי להגיע ל-600 חל"מ. קרוב לוודאי שהצומח הגיב כבר באופן חיובי לעליית הפחמן הדו-חמצני מ-280 חל"מ שמלפני המהפכה התעשייתית ל-400 חל"מ היום. סקרים על הצומח באזורים צפוניים [11] ובאזורים חמים ושחונים [8] בעשורים האחרונים אומנם מצביעים על התגובה הצפויה.

השפעת פחמן דו-חמצני על בעלי חיים

לשינויי פחמן דו-חמצני, בריכוזים הפחותים מכ-10,000 חל"מ, אין כמעט השפעה ישירה על בעלי חיים. בעלי חיים, בין אם הם סומכים על הצומח במישרין (herbivores) או בעקיפין (carnivores), רק ייהנו מהגברת הייצור הראשוני של הצומח, הצפויה מעליית הפחמן הדו-חמצני; אולם הדבר טרם נחקר.

השלכות

האם כדאי לעודד העלאה של ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה?

- [18] Richman H and Richman R. 2009. Climate treaty reparations would cost \$50–200 billion, per year. *American Thinker* Dec 8.
- [19] Runion GB, Torbert HA, Prior SA, Rogers HH. 2004. Elevated atmospheric CO₂ effects on N fertilization in grain sorghum and soybean. *Field Crops Research* **88**: 57–67.
- [20] Shaviv NJ and Veizer J. 2003. Celestial driver of Phanerozoic climate? *GSA Today* **13**: 4–10.
- [21] Shaviv NJ. 2008. Using the oceans as a calorimeter to quantify the solar radiative forcing. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **113**: A11101.
- [22] Svensmark H, Bondo T and Svensmark J. 2009. Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds. *Geophysical Research Letters* **36**: L15101.
- [23] Svensmark H, Pedersen JOP, Marsh ND, et al. 2007. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions. *Proceedings of the Royal Society, Series A* **463**: 385–396.
- [24] Vincens A, Buchet G, Servant M and ECOFIT Mbalang collaborators. 2010. Vegetation response to the “African Humid Period” termination in Central Cameroon (7°N) – New pollen insight from Lake Mbalang. *Climate Past* **6**: 281–294.
- [25] Zelitch I. 1971. Photosynthesis, photorespiration and plant productivity. NY: Academic Press.
- [26] Ziskin S and Shaviv NJ. 2012. Quantifying the role of solar radiative forcing over the 20th Century. *Advances in Space Research* **50**: 762–776.
- [10] Field CB, Jackson RB and Mooney HA. 2006. Stomatal responses to increased CO₂: Implications from the plant to the global scale. *Plant Cell and Environment* **18**: 1214–1225.
- [11] Graven HD, Keeling RF, Piper SC, et al. 2013. Enhanced seasonal exchange of CO₂ by Northern Ecosystems since 1960. *Science* **341**: 1085–1089.
- [12] IPCC. 2013. Summary for policymakers. In: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (UK) and New York (USA): Cambridge University Press.
- [13] Leroux M. 2005. Global warming, myth or reality? The erring ways of climatology. London: Springer-Praxis.
- [14] Li J, Sagi R, Gale J, et al. 1999. Response of tomato plants to saline water as affected by carbon dioxide supplementation. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology* **74**: 232–237 and 238–242.
- [15] Lindzen RS and Giannitsis C. 1998. On the climatic implications of volcanic cooling. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* **103**: 5929–5942.
- [16] Marsh ND and Svensmark H. 2000. Low cloud properties influenced by cosmic rays. *Physical Review Letters* **85**: 5004–5007.
- [17] Morgan JA, Pataki DE, Korner H, et al. 2004. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. *Oecologia* **140**: 11–25.



הרחבה בעולם המדעי, שלפיה שינויי האקלים הנצפים כיום נובעים בחלקם מפעילות אנושית, אין הדבר כך. הידע בנושא שינויי אקלים גלובליים, שעל פיו נבנה הדו"ח המדעי השלישי של ה-IPCC בשנת 2001^[2], היה מוגבל בהשוואה לידע המדעי שיצר את הבסיס לדו"ח הרביעי של ה-IPCC בשנת 2007^[3], וביחס לדו"ח החמישי משנת 2013^[4]. הדו"ח החמישי מציג שוב בצורה סדורה וקוהרנטית את מצב הידע המדעי הנוכחי בנושאי שינויי האקלים, ומחזק את המסקנות של הדו"חות הקודמים: המגמות שנצפו בעבר לא השתנו, והמסקנות קיבלו משנה תוקף. יתרה מכך, בניגוד למשתמע ממאמר הדעה של גיל ושביב, מעולם לא נאמר על-ידי ה-IPCC שכל השינויים הנצפים (טמפרטורה, מפלס הים, אקלים, וכן הלאה) משויכים אך ורק לפעילות אנושית. להפך, ההשפעה של פעילות השמש על שינויי האקלים מדווחת בדו"ח הרביעי של ה-IPCC, אך ערכה ומידת חוסר הוודאות שבה הם כעשירית מתרומת הפעילות האנושית^[1]. כמו כן, מעולם לא נטען על-ידי ה-IPCC שאין היבטים חיוביים לשינויי אקלים באזורים מסוימים, כמו למשל הגברת היצרנות של צמחים.

אדרבא – תגובה למאמר הדעה 'איפכא מסתברא'

דוד ברודאי^[1], יוחאי כרמל^[1] ודן יקיר^[2]

^[1] הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
^[2] המחלקה למדעי כדור הארץ וכוכבי הלכת, מכון וייצמן למדע

כותרת מאמר הדעה עשויה להטעות: בעוד שחלקו הראשון של מאמר הדעה כתוב בשפה מתנצחת, התוכן אינו כה מרדני, ונמצא בתחום הקונצנזוס המדעי. למעשה, אחד הכותבים חוזר וטוען במספר פרסומים מדעיים שעליית הטמפרטורה העולמית במאה השנים האחרונות נובעת, בין היתר, מהפעילות האנושית^[5, 7]. לכן, אף על פי שניתן היה לחשוב שהמחברים מתנגדים להסכמה



כבר מזמן התקדמו מעבר לכל מה שהושג אז. גם הטכנולוגיה להתמודדות עם שינויי אקלים – כולל טכנולוגיה להפחתת פליטות גזי חממה לאטמוספירה, הפקת אנרגיה נקייה, טכנולוגיה שתקל על ההסתגלות לתנאים סביבתיים משתנים, ייצור מזון, מים, תרופות, ועזרה לאוכלוסיות חלשות – צפויה להיטיב את איכות החיים של כלל האנשים ולהפיץ ערכים וקודים התנהגותיים שנשכחו לאורך השנים.

ההכרה בתרומה אנושית לשינויי האקלים (ועלינו לזכור שבניגוד לגיל ושביב, יש עדיין כאלה שמסרבים להכיר בכל תרומה אנושית לתהליכים שאנו חווים כיום) מעלה שאלה פילוסופית מהותית הקשורה למוסר. המין האנושי הוא המין הביולוגי היחיד שמצליח לחולל השפעות אקלימיות בקנה מידה עולמי, ויש לו מודעות לתוצאות המעשים שלו. לכן, יש תוקף לדרישה שהאדם יישא באחריות למעשיו וישאיר לדורות הבאים אחריו עולם ראוי. האנושות חייבת להקטין את המדרך האקולוגי ואת מדרך הפחמן שלה – למען עצמנו ולמען הדורות הבאים. התנגדות לטיעון זה משקפת חשיבה כלכלית צרה וקצרת טווח.

מקורות

- [1] Beniston M. 2013. Grand challenges in climate research. *Frontiers in Environmental Science* 1: 1–4.
- [2] IPCC. 2001. Climate change 2001 – The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001. Cambridge (UK) and New York (USA): Cambridge University Press.
- [3] 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. Cambridge (UK) and New York (USA): Cambridge University Press.
- [4] IPCC. 2013. Summary for policymakers. In: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (UK) and New York (USA): Cambridge University Press.
- [5] Shaviv N. 2005. On climate response to changes in the cosmic ray flux and radiative budget. *Journal of Geophysical Research* 110: A0815.
- [6] Stern N. 2006. Stern review on the economics of climate change. Executive summary. London: HM Treasury.
- [7] Ziskin S and Shaviv NJ. 2012. Quantifying the role of solar radiative forcing over the 20th century. *Advances in Space Research* 50: 762–776.

להפך, השונות המרחבית של השינויים הנצפים והחזויים הודגשה שוב ושוב. אם כן, ברור שיייתכן שהיה אוכלוסיות שירוויחו משינויי האקלים, בייחוד באזורים הצפוניים של כדור הארץ, שרובם מבוססים כלכלית מלכתחילה. אין גם כל ספק שהמפסידים יהיו כנראה אותם המיליארדים החיים באזורים חמים יותר, יובשניים למחצה, ובמדינות חלשות כלכלית. אם נוסיף למאזן ההשפעות של שינויי האקלים גם את ההגירה הנרחבת המתרחשת כיום מהאזורים החמים והיובשניים לאזורים הצפוניים, ואת זו הצפויה בעתיד, נמצא שההשפעות של שינויי האקלים והשפעות הלוואי הכרוכות בהגירה המונית, כמו רעב, אי-יציבות פוליטית ומלחמות, כנראה ירעו את מצבם של רוב בני האדם. יתרה מכך, הדין בשינויי אקלים התרחב, וכיום ברור שצריך לדון גם באמצעים להתמודדות עם שינויי האקלים: כיצד לדאוג לאספקה סדירה של מים ומזון, להגן על מערכות אקולוגיות רגישות, לשמר את המגוון הביולוגי, להתמודד עם גילוי מחצבים חדשים שנחשפים בעקבות הפשרת אזורים שהיו קפואים ולא נגישים בעבר ועוד. כל זאת, בד בבד עם מאמציו להאט ולצמצם את השינויים המתרחשים לנגד עינינו.

קיימת כיום הסכמה מדעית רחבה (שמחברי מאמר הדעה שותפים לה) שהפעילות האנושית אחראית לחלק לא מבוטל משינויי האקלים הנצפים. זאת ועוד, רק את הפעילות האנושית יש באפשרותנו לשנות, בעוד שעל גורמים אחרים התורמים לשינויי האקלים הנצפים אין האדם יכול להשפיע. לאור זאת, אנו סבורים, בניגוד גמור לפרשנות של גיל ושביב, שאי-הוודאות המדעית לגבי הערכים המדויקים של התרומה האנושית לשינויי האקלים הנצפים צריכה להוביל לפעולה אמיצה להפחתת פליטות גזי חממה לאטמוספירה מחד גיסא, ולבניית יכולות להסתגלות לשינויי האקלים העתידיים מאידך גיסא. הטענה שהעלות גבוהה ושהכסף לא יספיק אינה טענה מדעית. היא גם סותרת את דו"ח שטרן^[6], שקבע כי גם מהבחינה הכלכלית גרידא המחיר של אי-פעולה בהווה עלול להיות כבד בהרבה מעלות הפעולות שיידרשו בעתיד. הסיבה לכך היא, בין היתר, שאי-ודאות היא תופעה "דו-כיוונית": אם יוכח בעתיד שהעשייה לא השיגה במלואה את המטרה שלשמה בוצעה, מחיר הטעות (הכלכלית-חברתית) צפוי להיות קטן ביחס לעלות שתילווה לאי-עשייה אם יתברר שהיה באפשרותנו לשנות את מהלך הדברים, ולו באופן חלקי, ולא עשינו זאת. לדוגמה, המרוץ לחלל בשנות ה-60 של המאה הקודמת נחשב בחוגים מסוימים ככזבזב כסף אדיר של משלם המסים, שמטרתו האדרת מדינה אחת על חשבון האחרת. אולם בדיעבד – הפיתוחים הטכנולוגיים והידע האדיר שמחקר החלל הביא עמו (חומרים חדשים, תקשורת, רפואה, מזון, מחשוב, ועוד), נמצאים רובם ככולם בלב חיי היומיום האזרחיים שלנו כיום, וחלק מהם