

פרספקטיבה גאולוגית על שינוי האקלים

איתי הלוי¹

קיימת ודאות לגבי היות ריכוזי ה- CO_2 במאתיים השנים האחרונות חריגים בראי הזמן. ארכיבים גאולוגיים – טבעות עצים, קרח באנטארקטיקה ובגרינלנד, משקעים בקרקעית אגמים ובאוקיינוסים, נטיפים וזקיפים במערות, ועוד – הם מקור חשוב של מידע על התגובה האקלימית והאקולוגית לשינויים בריכוז ה- CO_2 באטמוספירה.

מונע את בריחתה של חלק מקרינת החום הנפלטת מפניו של כוכב הלכת (Arrhenius, 1896). על שום הדמיון לחממת זכוכית, המעבירה אור ולוכדת חום, נקראת התופעה "אפקט החממה". ארהניוס הראה כי אפשר להסביר את הטמפרטורה הממוצעת של כדה"א על ידי מאזן אנרגייה בין קרינת השמש הנכנסת (בתחום הנראה של הספקטרום האלקטרומגנטי) לבין קרינת החום (בתחום האינפרא-אדום) שמצליחה לעבור את החממה האטמוספירית ולצאת לחלל. ככל שנלכד יותר מהחום הנפלט מפני השטח של כדה"א, כך עולה הטמפרטורה של פני השטח עצמם.

מאז עבודתו של ארהניוס נכתבו אלפי מאמרים על השפעתם של גז CO_2 וגזי חממה אחרים על אקלים² כדה"א. בין השאר, התפשט המחקר מתחומי הכימיה הפיזיקלית, שניסתה לכמת את השפעת הרכב האטמוספירה על מעבר קרינה דרכה, לתחומי דינמיקה אטמוספירית ואוקיאנית, שבהם נחקרת השפעת זרימה באטמוספירה ובאוקיינוסים על הסעת חומר ואנרגייה, וכן לתחומי אקולוגיה וביוגאוכימיה, ששמים למטרה את הבנת המאזנים הטבעיים והמלאכותיים של CO_2 ושל חומרים אחרים המשפיעים על מעבר קרינה באטמוספירה. הבנת האקלים של

לפני כמאתיים שנה החלו מדינות אירופה וארצות הברית תהליכי תיעוש, שבעקבותיהם עלה קצב פליטת גז דו-תחמוצת הפחמן (CO_2) עשרות מונים. אוניות מפרש ועגלות רתומות לסוסים הוחלפו בספינות וברכבות קיטור, התעשייה הפכה מידנית לממוכנת, ופותחו תהליכי ייצור שצרכו אנרגייה רבה יותר. את רוב האנרגייה סיפקה שריפה של דלק מאובן, בעיקר פחם. הפחם, וכן מיני דלקים נוספים המופקים מנפט גולמי, נקראים דלק מאובן, מכיוון שנוצרו על ידי קבורה בת מיליוני שנים של חומר אורגני קדום. הדלק המאובן מורכב בעיקר מפחמן ומימן, ותגובתו עם חמצן בטמפרטורה גבוהה יוצרת CO_2 ואדי מים ובתוך כך משחררת חום, אשר שימש, בין השאר, ליצירת קיטור להנעת כלי רכב ומכונות. ניצול החום המופק משריפת דלק מאובן עדיין מהווה את התשתית למשקי התחבורה, האנרגייה והתעשייה של ימינו.

המדען השוודי סוונטה ארהניוס (Svante Arrhenius) היה הראשון אשר כימת את השפעתו האקלימית של CO_2 (במילותיו, חומצה פחמתית באוויר), במאמר שפרסם ב-1896. ארהניוס ציין במאמרו ש- CO_2 אינו מפריע לקרינת השמש לחדור את האטמוספירה ולהגיע לפני כדור הארץ (כדה"א), אולם גז זה

1 פרופ' איתי הלוי, המחלקה למדעי כדור הארץ וכוכבי הלכת, מכון ויצמן למדע.

2 האקלים הוא הממוצע ארוך הטווח (על פני עשרות או מאות שנים) של משתנים מטאורולוגיים, כגון טמפרטורה, לחות, לחץ אטמוספרי, משקעים, ועוד. שנה או אפילו כמה שנים גשומות או שחונות במיוחד, חמות או קרות במיוחד, אינן שינוי אקלים. שינוי אקלים הוא תנודה בממוצע הרב-שנתי, שאפשר לזהותה בוודאות רק על ידי תצפיות המתפרסות על פני עשורים.



ריכוזי CO₂ חריגים במאתיים השנים האחרונות נגרמו על ידי פעילות אנושית

אנו יודעים בוודאות כי: (א) ריכוז ה-CO₂ באטמוספירה עולה בחדות זה כמאתיים שנה לרמות שלא נראו זה כשלושה מיליוני שנה; (ב) העלייה בריכוז ה-CO₂ (וגזי חממה אחרים) אינה טבעית, אלא קשורה לפעילות אנושית; (ג) CO₂ הוא גז חממה, שנוכחותו באטמוספירה לוכדת חלק מקרינת החום הנפלטת מכדור"א. בחלקו הראשון יעסוק המאמר בנתונים שעליהם מתבססות טענות (א) ו-(ב). חלקו השני של המאמר יעסוק בעדויות התורמות להבנת הנושאים שלגביהם קיימת עדיין אי-ודאות – תגובתה הכוללת של מערכת האקלים לעלייה בריכוז גזי החממה באטמוספירה. בשני החלקים יתבסס המאמר על ארכיבי מידע גאולוגיים וגאוכימיים המאפשרים שחזור של הרכב האטמוספירה והטמפרטורה על פני כדור"א (תמונה 1).

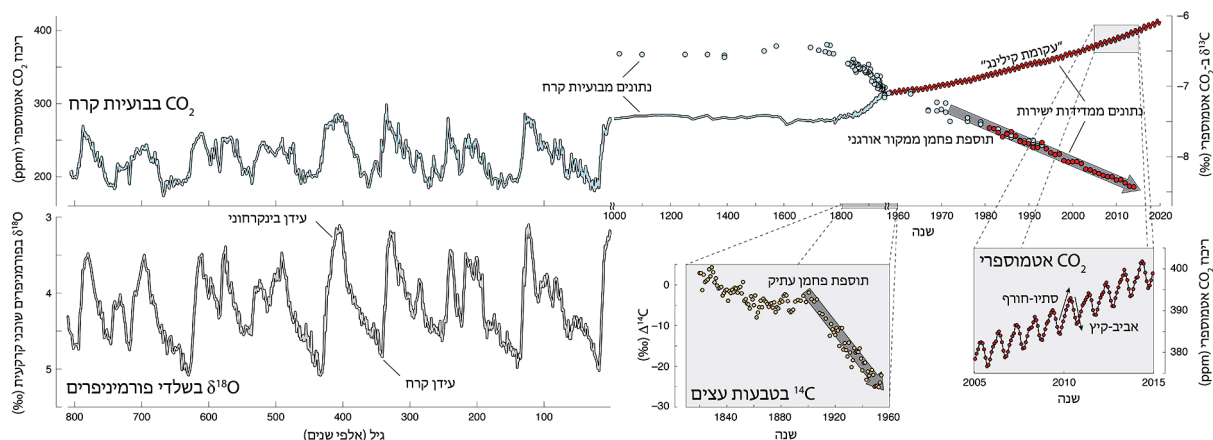
ב-1958 החל המדען צ'ארלס דייויד קילינג (Charles David Keeling) מהמכון האוקיינוגרפי סקריפט שבאוניברסיטת סן דייגו מדידות רציפות של ריכוז ה-CO₂ באטמוספירה בראש הר הגעש מאונה לואה (Mauna Loa) שבהוואי. כשנפטר

כדור"א בהווה מצריכה שילוב מורכב של תחומי מחקר רבים. תחזית האקלים העתידי, בתגובה לפעילות אנושית ולתנודות טבעיות, מורכבת עוד יותר, וזאת משום שנדרשת הבנה מעמיקה של מכלול ההשפעות, התגובות ומנגנוני ההיזון החוזר. מחקר האקלים חושף בהדרגה את אוסף התהליכים הללו, אך לצד הבנה הולכת ומעמיקה מתגלעים חילוקי דעות מדעיים, ואלה באים לידי ביטוי באי-ודאות מצד מדעני האקלים לגבי תחזיותיהם.

דיווח על אי-ודאות הוא חלק בלתי נפרד מדיווח אחראי על תוצאות מדעיות. עם זאת, אותה אי-הוודאות גורמת בציבור לתחושה שאולי כדאי לדחות פעולות יקרות להתמודדות עם שינוי האקלים עד שהמדענים יסכימו בינם לבין עצמם. תחושות אלו מנוצלות לעיתים קרובות על ידי בעלי עניין שפעולה נחרצת לצמצום פליטת גזי חממה צפויה לפגוע בהכנסותיהם או בהשפעתם. לכן חשוב להתחיל את הדיון על שינוי האקלים בהבנת העובדות שאינן ניתנות לערעור, שהקהילה המדעית מסכימה עליהן.



תמונה 1: כמה מארכיבי המידע המוזכרים במאמר; מימין נראים קידוחי קרח באנטארקטיקה, שבועיות אוויר הלכודות בהם מספקות הצצה על הרכב האטמוספירה בעת הילכדות הבעיות (קרדיט: British Antarctic Survey). **במרכז** נראה חתך של גזע עץ ובו טבעות גידול. כל טבעת מייצגת שנה מחיי העץ, ותכולת ה-C¹⁴ בטבעת מעידה על תכולת ה-C¹⁴ ב-CO₂ האטמוספרי בזמן היווצרותה. **משמאל** נראים שלדי CaCO₃ של פורמיניפרים. הרכב האיזוטופים של חמצן בשלדים הנמצאים במשקעים בקרקעית הים ובסלעי משקע מספק מידע על טמפרטורת מי הים ועל כמות הקרח שהיה על היבשות.



איור 1: מידע על פליאו-אקלים (אקלים קדום) מארכיבים גאולוגיים; למעלה מימין נראים הריכוז וההרכב האיזוטופי של CO_2 של אטמוספרי, כפי שנמדדו מאז 1958 בראש הר הגעש מאונה לואה שבהוואי ("עקומת קילינג"). למעלה במרכז ומשמאל נראים הריכוז וההרכב האיזוטופי של CO_2 באטמוספרי בבוטות בקרח אנטארקטי. ירידה ב- $\delta^{13}C$ מעידה על פליטת CO_2 ממקור אורגני. למטה מימין נראה המחזור העונתי בריכוז ה- CO_2 באטמוספירה. למטה במרכז נראית תכולת האיזוטופ הרדיואקטיבי של פחמן (^{14}C), כפי שנמדדה בטבעות גידול של עצים. ירידה בתכולת ^{14}C מעידה על פליטת CO_2 ממקור "עתיק" – דלק מאובן. למטה משמאל נראה ההרכב האיזוטופי של חמצן בשלדי $CaCO_3$ של פורמיניפרים (שימו לב שציר ה-y הפוך). ככל שערך ה- $\delta^{18}O$ גבוה יותר, כך נוצר השלד בטמפרטורה נמוכה יותר או בתקופה שבה היה קרח רב יותר על היבשות (או שילוב של שני הגורמים). האיור מבוסס על נתונים מ: Keeling et al., 2001; Stuiver et al., 1981; Lisiecki & Raymo, 2005; Eggleston et al., 2016; Rubino et al., 2019.

"עקומת קילינג", כפי שמוכר האיור שבו נראית בבירור העלייה בריכוז ה- CO_2 באטמוספירה (איור 1 למעלה מימין), נחשבת לאחד מההישגים המדעיים החשובים של המאה העשרים. עם זאת, העקומה כוללת מידע רק מכשירים שנמדדו, והעלייה הנצפית נטולת הקשר ארוך טווח. האם העלייה בריכוז ה- CO_2 חריגה ביחס לעידנים אחרים? האם היא נגרמת מפעילות אנושית, או שהיא חלק ממחזוריות טבעית, שאולי תתגלה כשתמשכנה המדידות? אם כן, איך אפשר להביט לאחור בזמן ולברר מה היו ריכוזי ה- CO_2 באטמוספירה בתקופות שקדמו למדידות? ובאופן כללי יותר, איך אפשר לדעת מה היו תנאי האקלים בתקופות שקדמו למכשירי מדידה מודרניים?

ארכיבי מידע טבעיים מאפשרים את שחזור התנאים ששררו בעבר על פני כדור הארץ

בחלק זה יציגו שני ארכיבי מידע (מתוך רבים אחרים, שכמה מהם יידונו בהמשך) המאפשרים לשחזר את ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה בתקופות שקדמו למדידות וכן את מקורו: (א) בועיות אוויר בקרח; (ב) איזוטופים של פחמן.

קילינג האב, המשיך את המדידות בנו ראלף, אף הוא פרופסור באוניברסיטת סן דייגו, ואלה נמשכות עד היום (Keeling et al., 2001). מיקום המדידות בראש הר געש חשוף נועד למזער השפעות של צמחייה ופעילות מקומית על מאזן ה- CO_2 , ומדידות באתרים אחרים מראות שהדפוסים שנצפו במאונה לואה מייצגים את ריכוז ה- CO_2 הגלובלי. מריכוז של כ-313 חלקים למיליון (ppm), כשהחלו המדידות ב-1958, עלה ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה בהתמדה, חצה את קו ה-400 חלקים למיליון ב-2013, ונכון לחודש מאי 2020, ניצב על כ-415 ppm (איור 1 למעלה מימין). מעבר לעלייה המתמדת אפשר לראות בבירור דפוס משונן (איור 1 למטה מימין), שנובע ממחזור שנתי בפעילות פוטוסינתטית, שבה עצים וצמחים מקבעים CO_2 אטמוספרי כחומר אורגני. באביב ובקיץ מבלבים הצמחים ומגדלים ענפים, גבעולים ועלים חדשים, וקצב הפוטוסינתזה עולה על קצב פירוק החומר האורגני שעל רצפת היער ובקרקות. כתוצאה מכך יורד ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה בחודשים מאי עד ספטמבר. בחודשי הסתיו והחורף משירים העצים את עליהם ומפסיקים לייצר עלים חדשים, והמשך פירוק של חומר אורגני משחרר CO_2 ומוביל לעלייה בריכוזו בחודשים אוקטובר עד אפריל.



(א) בועיות אוויר בקרח

בקרבת הקטבים של כדה"א מצטבר קרח על היבשה (גרינלנד בצפון, אנטארקטיקה בדרום). מדי שנה יורד שלג, ורובו אינו ניתך, אלא הולך ונקבר תחת שלג חדש. התכה חלקית של השלג וקפיאתו מחדש הופכות אותו לקרח קשה, ובשלב מסוים נלכדות בקרח בועיות אוויר. בועיות אלה שנלכדו בעבר הן מעין קפסולות אטמוספירות, המספקות הצצה להרכב האטמוספירה הקדומה. את הבועיות מוצאים בקידוחי קרח בגרינלנד ובאנטארקטיקה (תמונה 1). הקרח העתיק ביותר באנטארקטיקה, המתאים לשחזור רציף של הרכב האטמוספירה, הוא בן כ-800,000 שנה. בחינת ריכוזי ה- CO_2 בבועיות אוויר בקרח במשך אלף השנים האחרונות מראה בבירור את תחילת העלייה החדה לפני כמאתיים שנה, בעיתוי דומה למהפכה התעשייתית (איור 1 למעלה במרכז). העיתוי הדומה אינו מהווה בפני עצמו עדות לכך שמקור ה- CO_2 הוא אכן שריפת דלק מאובן ושינויים בשימושי קרקע בעקבות המהפכה התעשייתית (על כך בהמשך), ואולם הוא נותן הקשר ארוך טווח יותר ממשך המדידות המודרניות. במבט על כמעט מיליון שנות הארכיב האנטארקטי אפשר לראות שרמות ה- CO_2 במאתיים השנים האחרונות הן חריגות (איור 1 למעלה). במשך כמיליון שנות הארכיב, ריכוזי ה- CO_2 האטמוספרי נע בין כ-180 לכ-280 ppm, ומאתיים השנים האחרונות חריגות הן מבחינת הריכוז והן מבחינת קצב השינוי. בהמשך נדון במשתנים סביבתיים נוספים הנמצאים במתאם עם השינוי בריכוזי ה- CO_2 , למשל, הטמפרטורה וגובה פני הים.

(ב) איזוטופים של פחמן ב- CO_2

מניין לנו שהעלייה בריכוזי ה- CO_2 באטמוספירה נגרמת על ידי פעילות אנושית ולא מסיבות טבעיות? כאן אפשר ללמוד מאיזוטופים³ של פחמן. לפחמן שלושה איזוטופים טבעיים, מתוכם שניים יציבים: ^{12}C , המהווה כ-99% מכלל הפחמן בטבע, ו- ^{13}C , המהווה כ-1% מכלל הפחמן. לפחמן גם איזוטופ

רדיואקטיבי נדיר ביותר, ^{14}C , שנוצר כשקרניים קוסמיות בעלות אנרגייה גבוהה פוגעות באטומי חנקן באטמוספירה. מרגע שנוצר ^{14}C , הוא מתפרק והופך ל- ^{14}N (יציב) תוך פליטת קרינת בטא, עם זמן מחצית חיים של 5,730 שנה. זאת אומרת, בהינתן כמות כלשהי של אטומי ^{14}C , כעבור 5,730 שנה מחצית הכמות תישאר ומחציתה תתפרק. תכונה זו של ^{14}C היא הבסיס לשימוש באיזוטופ זה של פחמן לקביעת גילם של חומרים גאולוגיים וארכיאולוגיים. בזמן שנוצר חומר פחמני כלשהו, אורגני או אי-אורגני, חלק מהפחמן שבו הוא ^{14}C , והכמות המדויקת תלויה בריכוזי ה- ^{14}C באטמוספירה. מאגר ה- ^{14}C בחומר אינו מתחדש, שכן מקור ה- ^{14}C הוא באטמוספירה, ולכן ריכוזו בחומר הולך וקטן ככל שהוא מתפרק. מידיעת ריכוזו ההתחלתי של ^{14}C בחומר וממדידת ריכוזו הנוכחי אפשר לקבוע כמה זמן עבר מאז שהחומר נוצר. מדענים שמדדו את כמות ה- ^{14}C בטבעות גידול שנתיות שבגזעי עצים (דוגמה בתמונה 1) הראו שהחל מתחילת המאה התשע-עשרה (1820), כמות ה- ^{14}C קטנה ככל שגיל הטבעות צעיר יותר (איור 1 למטה במרכז). זאת אומרת, ככל שמתקרבים לימינו, ישנו "דילול" של CO_2 אטמוספרי ב- ^{14}C . דילול זה נובע מתוספת משמעותית לאטמוספירה של CO_2 שמקורו בשריפת דלק מאובן, שהוא עתיק ולכן אינו מכיל כמויות מדידות של ^{14}C . התופעה נקראת אפקט זוס, על שם המדען האוסטרי האנס זוס (Hans Suess), שחקר את השפעתה על דיוק תיארוך באמצעות ^{14}C (Suess, 1955; Tans, De Jong & Mook, 1979).

תמיכה בממצא שלפיו במהלך המאות התשע-עשרה והעשרים "הוזרקו" לאטמוספירה כמויות גדולות של CO_2 שמקורו בשריפת דלק מאובן מגיעה גם מארכיב האיזוטופים היציבים של פחמן, ^{12}C ו- ^{13}C (Keeling, 1979). בתהליך הפוטוסינתזה, שבו צמחים החשופים לאור השמש מקבעים CO_2 מהאטמוספירה כחומר אורגני, ישנה העדפה לקיבוע ^{12}C (Farquhar, Ehleringer

3 תכונותיו הכימיות של יסוד נקבעות לפי מספר הפרוטונים בגרעינו ומספר האלקטרונים מסביבו. איזוטופים הם אטומים של היסוד (ולכן בעלי מספר זהה של פרוטונים), שלהם מספר שונה של נייטרונים בגרעין. כתוצאה מכך איזוטופים שונים הם בעלי מסה שונה, דבר המשפיע על חוזק הקשרים הכימיים שהם יוצרים ועל קצבי תגובות כימיות שבהן הם משתתפים. ההבדלים בחוזק הקשר או בקצב התגובה לרוב אינם עולים על אחוזים בודדים.



ההתחממות, בשל גוונם הבהיר של העננים ותכונתם להחזיר חלק מקרינת השמש לחלל. אולם חשוב להבין אילו עננים בדיוק נוצרים, כי חלקם גורמים דווקא להתחממות, למשל, עננים דקיקים וגבוהים בקרבת הקטבים. חקר העננים ותגובתם לשינויים בטמפרטורה ותכולת הלחות של האטמוספירה הוא אחד ממקורות אי-הוודאות הגדולים ביותר, בעיקר בשל מגוון סדרי הגודל העצום שמעורב בהיווצרות עננים ותכונותיהם הפיזיקליות. נחזור לעלייה בטמפרטורה ובתכולת האדים של האטמוספירה, שגורמת גם לשינוי בדפוסי הזרימה והמשקעים, ואלה גורמים תזוזה של רצועות צמחייה; למשל, ירידה צפויה בכמות המשקעים הכוללת באזורנו תגרום, כנראה, לירידה בצפיפות כיסוי הצמחייה, לשינוי בגוון פני השטח, ולכן לשינוי בחלק היחסי של קרינת השמש שנבלע על ידי פני השטח ומומר לחום. השינויים בדפוסי הצמחייה עשויים לשנות את מאזן הפחמן ולגרום לשינוי (עלייה באזורים מסוימים וירידה באחרים) בקצב הפוטוסינתזה הגלובלי ולקיבוע CO_2 כחומר אורגני. ההתחממות משפיעה בכמה אופנים גם על זרימה באוקיינוסים, ואחת ההשפעות החשובות היא האטה בערבול האוקיינוסים. האטה זו מקטינה את שטפי החום וה- CO_2 מהאטמוספירה לאוקיינוס, ובכך מגבירה את ההתחממות. ההתחממות אף גורמת לירידה בכיסוי הקרח של אוקיינוס הקרח הצפוני (האוקיינוס הארקטי), והחלפת הקרח הבהיר במים כהים גורמת לעלייה בבליעת קרינת השמש והמרתה לקרינת חום.

היחסים שתוארו כאן הם רק קצה הקרחון – מדובר במערכת מורכבת ורב-רבדים. מסיבה זו בעיקר, קיימת אי-הסכמה בין מודלים המנסים לכלול את השפעותיהם של התהליכים שתוארו כאן ורבים אחרים. תיאור מדויק של התהליכים מצריך חישוב על פני סדרי גודל רבים של מרחב (מיקרומטרים עד אלפי קילומטרים) וזמן (שברי שנייה עד עשרות או אפילו מאות שנים), שאיננו מעשי בהינתן כוח החישוב הקיים היום. בהיעדר יכולת חישוב מדויקת של תגובת מערכת האקלים לפעילות אנושית, האם אפשר ללמוד על התגובה הצפויה בעתיד דווקא מהתבוננות לעבר?

(Hubick, 1989). כתוצאה מכך, יחס האיזוטופים $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ בחומר אורגני נמוך מיחס זה ב- CO_2 האטמוספרי בכ-2.5%; ובעת בעירה של חומר אורגני, חדש או מאובן, משתחרר CO_2 דל יחסית ב- ^{13}C . מגוון ארכיבים של פחמן, כולל CO_2 בבוטות בקרח וכן מינרלי קלציום קרבונט (CaCO_3), למשל באלמוגים או בנטיפים וזקיפים במערות, מראים ירידה חדה ביחס האיזוטופים $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, המקבילה לעלייה בריכוזי ה- CO_2 בקרח האנטארקטי (איור 1 למעלה). ירידה זו מעידה על כך שמקור ה- CO_2 שנוסף לאטמוספירה הוא חומר אורגני. מכיוון שהחומר האורגני "עתיק", כפי שמעידים ריכוזי ה- ^{14}C , אפשר להסיק שמדובר בבעירה של דלק מאובן.

מורכבות מערכת האקלים מולידה אי-ודאות לגבי תגובתה לעלייה בריכוז ה- CO_2 באטמוספירה

ארכיבים של ריכוז ה- CO_2 והרכבו האיזוטופי אינם מותירים ספק כי הצטברות ה- CO_2 באטמוספירה במהלך מאתיים השנים האחרונות נובעת מפעילות אנושית, ובעיקר משריפת דלק מאובן. גזי חממה אחרים, כגון מתאן (CH_4) וחמצן דו-חנקני (N_2O), מגיעים אף הם בעיקר מפעילות אנושית והשפעותיה. ואין גם ספק שעלייה בריכוזי גזי החממה באטמוספירה תוביל לעלייה בלכידת קרינת החום הנפלטת מפני כדה"א. אם כן, מה נתון במחלוקת?

את המחלוקת המדעית אפשר לפשט לשאלה: מה תהיה התגובה הכוללת של מערכת האקלים לעלייה בריכוזי ה- CO_2 באטמוספירה? הסיבה שקיימת אי-ודאות היא שהשפעת גזים על מעבר קרינה באטמוספירה היא חלק אחד (וחשוב) מתוך רבים במערכת האקלים. קיימים במערכת האקלים מנגנוני היזון חוזר רבים, חלקם חיוביים וחלקם שליליים, וכן יחסי תלות הדדית בין גורמים. הניסיון להבין יחסים מורכבים אלה נמצא בחזית חקר האקלים כיום, וכדאי להתעכב ולהדגים את המורכבות. נניח כי עלייה בריכוז CO_2 באטמוספירה גרמה להתחממות. כתוצאה מכך, האוויר החם מכיל יותר אדי מים, שהם בעצמם גז חממה, וההתחממות מתעצמת. באותו זמן, לחות רבה יותר באטמוספירה תגרום להיווצרות עננים רבים יותר. בהפשטה גסה, עלייה בשטח כדה"א המכוסה עננים תפעל נגד



– יש העדפה לכניסה למינרל של יוני קרבונט (CO_3^{2-}) המכילים ^{18}O . כתוצאה מכך, יחס האיזוטופים $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ במינרל גבוה בכ-3.5% מיחס זה במים שמהם שקע המינרל.

אבי הגאוכימיה האיזוטופית, הרולד יורי (Harold Urey), היה פרופסור באוניברסיטת שיקגו, שממנה יצאו כמה מהמחקרים הראשונים על איזוטופים יציבים בריכוזים טבעיים (זאת אומרת, לא בריכוזים מועשרים לשימוש כסמנים). במאמר מ-1947 שטח יורי את הבסיס התרמודינמי להתמיינות איזוטופים בשיווי משקל בין חומרים שונים, ובו הראה שההעדפה לריכוז האיזוטופים הכבדים של חמצן במינרלים קרבונטיים (ביחס למים) תלויה בטמפרטורה (Urey, 1947); יורי הציע שההרכב האיזוטופי של מינרלים קרבונטיים יכול לספק מידע על הטמפרטורה שבה נוצרו. בעקבות עבודה זו ורבות אחריה, התבססו מדידות יחס האיזוטופים $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ במינרלים קרבונטיים כפרוקסי משולב לטמפרטורה של מי הים ולכמות הקרח המצוי על היבשה. הסיבה לכך שפרוקסי זה משלב מידע על טמפרטורה ועל כמות הקרח היבשתי היא שלקרח יבשתי יחס $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ נמוך מזה של מי הים, ולכן ככל שמצטבר יותר קרח על היבשה (למשל, בעידני הקרח), נותר האוקיינוס מועשר ב- ^{18}O (Shackleton, 1967). אורגניזמים ימיים רבים יוצרים קונכייה או שלד מקלציום קרבונט (למשל, מיני צדפות, שבלולים, אצות ופלנקטון), וכך ככל שהטמפרטורה שבה חיו האורגניזמים נמוכה יותר, וככל שהיה קיים יותר קרח על היבשה בזמן חייהם, יחס האיזוטופים $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ בשלדיהם גבוה יותר.

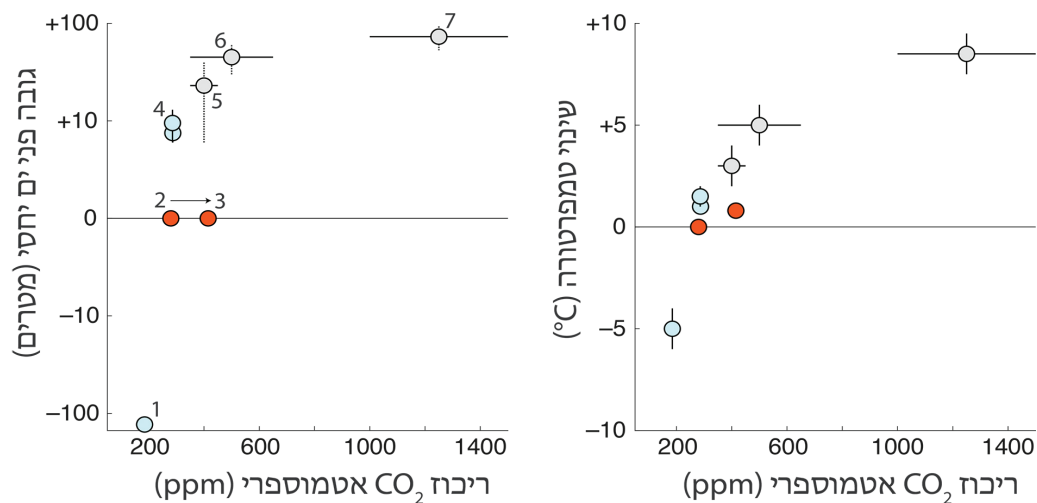
משתנה אקלימי נוסף, שלו השלכות חברתיות וכלכליות מרחיקות לכת, הוא גובה פני הים. די בעלייה של עשרות סנטימטרים כדי להציף שטחי יבשה גדולים, שכיום חיים בהם עשרות מיליוני אנשים (Stocker et al., 2013). מעבר לכך, חדירת מי מלח למי התהום הרדודים תהפוך שטחי חקלאות עצומים לבלתי שמישים, ותפגע באספקת מי שתייה לאוכלוסיות במדינות מתפתחות. גם אוכלוסיות שאינן גרות בשטחים שיוצפו, אך שוכנות בקרבת החוף, תיחשפנה לסכנת הצפה בזמן סערות. מחקרים רבים עוסקים בכימות הנזק של עלייה נתונה בגובה פני הים; הנזק הכלכלי של עלייה בת 50 ס"מ בגובה פני הים מוערך במאות מיליארדי דולרים. עם זאת, קיימת אי-ודאות ביחס למידת העלייה הצפויה בתגובה לשינוי

פרוקסים אקלימיים מאפשרים שחזור מקורב של ריכוזי CO_2 באטמוספירה, טמפרטורה וגובה פני הים

בהיעדר יכולת תצפית ישירה, מדעני אקלים מסתמכים על "פרוקסים אקלימיים" (climate proxies) – תכונות של חומרים טבעיים, שתגובתם לתנודות במשתנים אקלימיים מובנת או מכוונת במחקרים אמפיריים. קיימים יותר פרוקסים משניתן לסקור במאמר זה. בהמשך נבחן את הקשר בין פרוקסים לריכוז ה- CO_2 באטמוספירה, פרוקסי משולב לטמפרטורה באוקיינוס ולכמות הקרח על היבשות, וכן מדדים לגובה פני הים הקדום.

ריכוז ה- CO_2 בבוטות בקרח באנטארקטיקה ובגרינלנד נותן את ריכוזו באטמוספירה בזמן שנוצרו הבוטות. כאמור, הקרח העתיק ביותר המתאים לשחזור ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה הוא בן כ-800,000 שנה. את ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה בתקופות עתיקות יותר אפשר להעריך באמצעים אחרים. נתעכב על אחד, שהוא רלבנטי להשוואה בין ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה לבין הטמפרטורה וגובה פני הים על פני 40 מיליון השנים האחרונות. אצות חד-תאיות מיקרוסקופיות גדלות בחלקו העליון של האוקיינוס, החשוף לאור השמש. כאמור, בתהליך הפוטוסינתזה, ישנה העדפה לקיבוע CO_2 עם האיזוטופ הקל של פחמן, ^{12}C . מסתבר שההעדפה זו תלויה, בין השאר, בריכוז ה- CO_2 במי הים שבהם גדלות האצות. כיוון אמפירי של תלות זו מאפשר שחזור ריכוז ה- CO_2 על ידי מדידת יחס האיזוטופים $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ במולקולות פחמניות הנקראות אלקנונים (alkenones) (Pagani, 2014). למרות חולשותיו, שנידונו בספרות המקצועית, מתאים הפרוקסי מבוסס-האלקנונים לשחזור מקורב של ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה על פני פרקי זמן של מאות אלפי עד עשרות מיליוני שנים.

אחד המשתנים האקלימיים שמעניין ביותר לשחזור הוא הטמפרטורה הממוצעת, ולצורך זה פותחו פרוקסים רבים. הראשון והבולט שבהם הוא ההרכב האיזוטופי של חמצן במינרלים קרבונטיים. לחמצן שלושה איזוטופים יציבים: ^{16}O (כ-99.76% מכל החמצן), ^{17}O (כ-0.04%) ו- ^{18}O (כ-0.20%). נעסוק רק ביחס הריכוזים של שני האיזוטופים הנפוצים יותר, ^{18}O ו- ^{16}O . בעת שקיעת מינרלים קרבונטיים מתמיסה רוויה – ולעניינינו כאן, שקיעת מינרלי קלציום קרבונט (CaCO_3) ממי ים



איור 2: עדויות גאולוגיות לקשר בין ריכוז CO₂ אטמוספרי לבין הטמפרטורה וגובה פני הים; מימין הקשר בין ריכוז CO₂ אטמוספרי לבין הטמפרטורה, כפי שמצטייר מפרוקסים גאוכימיים. משמאל הקשר בין ריכוז ה-CO₂ באטמוספירה לבין גובה פני הים, כפי שמצטייר מפרוקסים גאוכימיים וגאולוגיים. המספרים מציינים את: 1: העידן הקרחוני האחרון; 2: טרום המהפכה התעשייתית; 3: היום (2020); 4: העידן הבינקרחוני האחרון; 5: לפני 3 מיליון שנה; 6: לפני 32 מיליון שנה; 7: לפני 40 מיליון שנה. ריכוז ה-CO₂ הנוכחי (מספר 3) הופיע בעבר, בתקופה שבה היו פני הים גבוהים ביותר מ-10 מטרים מגובהם כיום (מספר 5). מבוסס על נתונים מ: Alley, Clark, Huybrechts & Joughin, 2005; Raymo et al., 2011; Dutton et al., 2015; Dutton & Barlow, 2019.

מכך, אי-הוודאות לגבי שחזורים עתיקים יותר של גובה פני הים היא גדולה.

על הקשר בין ריכוז ה-CO₂ באטמוספירה, הטמפרטורה הממוצעת וגובה פני הים בעבר הגאולוגי

משהוצגו מעט מהפרוקסים ל-CO₂ באטמוספירה (בועיות בקרח, יחס האיזוטופים ¹³C/¹²C באלקנונים) לטמפרטורה (יחס האיזוטופים ¹⁸O/¹⁶O בשלדי CaCO₃) ולגובה פני הים (מדידות גובה של תופעות הנוצרות בפני הים), אפשר לבחון את הקשר בין משתנים אלה בעבר הגאולוגי.

פורמיניפרים הם יצורים חד-תאיים, חלקם שחיינים וחלקם שוכני קרקעית (תמונה 1), שיוצרים שלד חיצוני מקלציום קרבונט. השוואת ארכיב ה-CO₂ בבועיות בקרח האנטארקטי ליחס האיזוטופים ¹⁸O/¹⁶O בשלדי פורמיניפרים שוכני קרקעית חושפת מתאם טוב (איור 2 משמאל). בתקופות שבהן ריכוז ה-CO₂ באטמוספירה נמוך, יחס האיזוטופים ¹⁸O/¹⁶O בשלדים הינו גבוה, ומעיד על טמפרטורה נמוכה ועל מאגרי קרח גדולים על היבשה. בתקופות שבהן ריכוז ה-CO₂ באטמוספירה גבוה, ההרכב האיזוטופי של השלדים מצביע על טמפרטורה גבוהה יותר ועל פחות קרח. שני הארכיבים הללו משקפים את

בריכוז ה-CO₂ באטמוספירה. השוואה בין רמות ה-CO₂ לבין גובה פני הים בעבר יכולה לספק הקשר חשוב, גם אם אינה מספקת הבנה מנגנונית מלאה.

את גובה פני הים בעבר ניתן לשחזר על ידי מדידת גובה הנוכחי של תופעות הנוצרות בפני הים ושגילן ידוע. לשם המחשה, מחזר רומי, שהיה בפני הים כשנבנה לפני כאלפיים שנה וכיום נמצא בעומק חמישה מטרים מתחת לפני הים, מעיד על שינוי בגובה פני הים היחסי. כגורם לטביעת המזח, לא ניתן להבדיל בין עלייה במפלס המים לבין שקיעת יסודות המזח, ולכן אפשר לומר רק שהיה שינוי בגובה פני הים היחסי, לא המוחלט. באופן דומה, אפשר למדוד את הגובה והגיל של תופעות טבעיות שנוצרות בפני הים, כגון סלעים הנוצרים רק בקו החוף או שוניות הגדלות עד לפני המים כמעט. בדומה למזח, גם במקרה של תופעות טבעיות יש להפריד בין השפעות טקטוניות ואחרות ששינו את גובהה של התופעה מבלי להשפיע על מפלס המים הגלובלי, לבין שינויי מפלס של ממש. הפרדה זו לא תמיד קלה, ולעיתים בלתי אפשרית, והיא מדויקת רק עבור תופעות שגילן צעיר יחסית במונחים גאולוגיים – עשרות עד מאות אלפי שנים (Raymo et al., 2011; Dutton & Barlow, 2015). כתוצאה



לאחר שמערכת האקלים הגיבה באופן מלא (בקירוב) לריכוז ה- CO_2 – זאת אומרת, מאזן הקרינה לאחר פעולת מנגנוני ההיזון החוזר האטמוספריים נסגר, ועבר די זמן שבו האוקיינוס ומאגרי הקרח שינו את נפחם ותנועתם, ובכך השפיעו על היבטים נוספים, כמו גוון פני השטח של כדה"א והזרימה באוקיינוסים. האקלים הנוכחי טרם הגיע לשיווי משקל עם ריכוז ה- CO_2 ההולך וגדל. עוד צפויה התחממות, שתוביל להמסת קרחונים בים וביבשה, לשינויים בצמחייה ובעננות, ועוד. ארכיבי הפליאו-אקלים נותנים הצצה לשינוי הצפוי ככל שיתקדם כדה"א לשיווי משקל אקלימי עם ה- CO_2 באטמוספירה.

סיכום

לסיכום, למרות ודאות גמורה לגבי היות ריכוזי ה- CO_2 במאתיים השנים האחרונות חריגים בראי הזמן, ואף שברור שפעילות אנושית היא המקור לעלייה בריכוז ה- CO_2 , קיימת אי-ודאות לגבי עוצמת התגובה האקלימית והאקולוגית לשינויים אלה. אי-הוודאות נובעת בעיקר מהבנה חלקית של התהליכים המעורבים והאינטראקציות המורכבות ביניהם, וכן ממגבלות כוח חישוב, שאינן מאפשרות סימולציה מדויקת של התהליכים. ארכיבים גאולוגיים – טבעות עצים, קרח באנטארקטיקה ובגריןלנד, משקעים בקרקעית אגמים ובאוקיינוסים, נטיפים וזקיפים במערות, ועוד – הם מקור חשוב של מידע על התגובה האקלימית והאקולוגית לשינויים בריכוז ה- CO_2 באטמוספירה.

במאמר זה הובאו מעט מהעדויות לקשר שבין ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה לבין הטמפרטורה הממוצעת וגובה פני הים. מעבר להתחממות ולעלייה בגובה פני הים, לעלייה בריכוז ה- CO_2 באטמוספירה יש השלכות רבות, שבהן לא ניתן להעמיק כאן. עלייה בחומציות האוקיינוסים (CO_2 מומס הוא חומצה פחמתית) צפויה להשפיע על אורגניזמים מסוימים, למשל על שוניות אלמוגים. השינוי בדפוסי משקעים צפוי להוביל באזורים מסוימים לבצורות ושריפות ובאחרים להצפות, שיטפונות ומפולות בוך. הפשרת קרקעות קפואות והחלפתן בביצות, למשל בסיביר, כבר מובילה לייצור מתאן, שהוא בעצמו גז חממה. בתי גידול בים וביבשה משתנים ועימם מגוון המינים. ועוד כהנה וכהנה. על רבים מהשינויים הללו בעבר אפשר ללמוד מארכיבים גאולוגיים, גאוכימיים ופליאונטולוגיים (מאסף מאובנים מקרוסקופיים ומיקרוסקופיים).

המחזוריות האקלימית בין עידני קרח לעידנים בינקרוניים במשך כמיליון השנים האחרונות. למחזוריות האקלים הקרחונית-בינקרונית קשר הדוק למחזוריות במסלול סיבובו של כדה"א סביב השמש וסביב צירו, אך שינויים אלה במסלול כדה"א אינם מספיקים בפני עצמם כדי להסביר את מחזוריות האקלים. ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה מראה מתאם טוב עם המחזוריות הקרחונית-בינקרונית, ונחשב לגורם שהגביר את עוצמת המחזוריות האקלימית מעבר לעוצמתה בהשפעת מסלול כדה"א בלבד. המתאם בין ריכוז ה- CO_2 לטמפרטורה אינו מחייב קשר סיבה-תוצאה. עם זאת, נראה ששינוי מחזורי של כ-100 ppm בריכוז ה- CO_2 בא בד בבד עם שינוי מחזורי ומשמעותי בטמפרטורה ובכמות הקרח על היבשות. מבלי להיכנס לפרטים, מפאת קוצר היריעה, אפשר לשייך כמחצית מהשינוי ביחס האיזוטופים $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ בשלדים לשינויים בכמות הקרח על היבשות וכמחצית לשינויים בטמפרטורה (Schrag, Hampt & Murray, 1996). השינוי המחזורי בטמפרטורה של קרקעית האוקיינוס, שאותה "מקליטים" שלדי הפורמיניפרים, הוא של כ-5 מעלות צלזיוס (איור 2 מימין). עם השינוי בטמפרטורה, בא שינוי קרחוני-בינקרונני בגובה פני הים של כ-120 מטרים (איור 2 משמאל), הנובע ברובו ממחזוריות בכמות הקרח על היבשות ובחלקו מהשפעת הטמפרטורה על נפח המים באוקיינוס.

אם נוסיף להשוואה נקודות זמן עתיקות ממיליון שנה, נראה שהפעם האחרונה שבה היה ריכוז ה- CO_2 קרוב לריכוז הנוכחי (415 ppm) הייתה לפני כ-3 מיליון שנה. את ריכוז ה- CO_2 בתקופה זו אנו יודעים ממדידת ההרכב האיזוטופי של פחמן באלקנונים, שהוזכרו למעלה. הטמפרטורה הממוצעת הייתה חמה בכ-3 מעלות צלזיוס מהטמפרטורה היום (איור 2 מימין), ופני הים היו גבוהים בעשרות מטרים מגובהם היום (איור 2 משמאל). אפשר לראות שהרגישות הן של הטמפרטורה הממוצעת והן של גובה פני הים לריכוז ה- CO_2 גבוהה יותר בעידנים הקרחוניים-בינקרוניים מאשר בתקופות קדומות יותר. ההבדל נובע, בין השאר, מכמות הקרח היבשתי הגדולה יחסית בעידנים הקרחוניים, שבהם היו חלקים גדולים מאירופה ומצפון אמריקה מכוסים בקרח. חשוב לציין שהרגישות שמציגה מערכת האקלים הקדום לריכוז ה- CO_2 היא בקירוב הרגישות בשיווי משקל. אלו הם הטמפרטורה וגובה פני הים

- Raymo, M.E., Mitrovica, J.X., O'Leary, M.J., DeConto, R.M. & Hearty, P.J. (2011). Departures from eustasy in Pliocene sea-level records. *Nature Geoscience* 4: 328-332.
- Rubino, M., Etheridge, D.M., Thornton, D.P., Howden, R., Allison, C.E., Francey, R.J., Langenfelds, R.L., Steele, L.P., Trudinger, C.M., Spencer, D.A., Curran, M.A.J., Van Ommen, T.D. & Smith, A.M. (2019). Revised records of atmospheric trace gases CO₂, CH₄, N₂O and δ¹³CO₂ over the last 2000 years from Law Dome, Antarctica. *Earth Systems Science Data* 11: 473-492.
- Schrag, D.P., Hampt, G. & Murray, D.W. (1996). Pore Fluid Constraints on the Temperature and Oxygen Isotopic Composition of the Glacial Ocean. *Science* 272: 1930-1932.
- Shackleton, N. (1967). Oxygen Isotope Analyses and Pleistocene Temperatures Re-assessed. *Nature* 215: 15-17.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgeley, P.M. (eds.) (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I of the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Stuiver, M. & Quay, P.D. (1981). Atmospheric ¹⁴C changes resulting from fossil fuel CO₂ release and cosmic ray flux variability. *Earth and Planetary Science Letters* 53: 349-362.
- Suess, H.E. (1955). Radiocarbon concentration in modern wood. *Science* 122: 415-417. [10.1126/science.122.3166.415-a](https://doi.org/10.1126/science.122.3166.415-a)
- Tans, P.P., De Jong, A.F.M. & Mook, W.G. (1979). Natural atmospheric ¹⁴C variation and the Suess effect. *Nature* 280: 826-828.
- Urey, H.C. (1947). The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society*: 562-581.
- Alley, R.B., Clark, P.U., Huybrechts, P. & Joughin, I. (2005). Ice-Sheet and Sea-Level Changes. *Science* 310: 456-460.
- Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 41: 237-276. doi.org/10.1080/14786449608620846
- Dutton, A. & Barlow, N.L.M. (2019). What do we know about Last Interglacial sea level? *Pages Magazine* 27: 6-7.
- Dutton, A., Carlson, A.E., Long, A.J., Milne, G.A., Clark, P.U., DeConto, R., Horton, B.P., Rahmstorf, S. & Raymo, M.E. (2015). Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science* 349: aaa4019.
- Eggelston, S., Schmitt, J., Bereiter, B., Schneider, R. & Fischer, H. (2016). Evolution of the stable carbon isotope composition of atmospheric CO₂ over the last glacial cycle. *Paleoceanography* 31. doi.org/10.1002/2015PA002874
- Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R. & Hubick, K.T. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40: 503-537.
- Keeling, D.K., Piper, C.P., Bacastow, R.B., Wahlen, M., Whorf, P.W., Heimann, M. & Meijer, A. (2001). Exchanges of atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects. *SIO Reference Series No 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego*, 88 pages.
- Keeling, C.D. (1979). The Suess effect: ¹³Carbon-¹⁴Carbon interrelations. *Environment International* 2: 229-300. [doi.org/10.1016/0160-4120\(79\)90005-9](https://doi.org/10.1016/0160-4120(79)90005-9)
- Lisiecki, L.E., Raymo, M.E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ¹⁸O records. *Paleoceanography* 20: PA1003.
- Pagani, M. (2014). Biomarker-Based Inferences of Past Climate: The Alkenone pCO₂ Proxy. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)* 12: 361-378.