

האם האוקיינוס מאבד את נשימתו?

Carolyn R. Löscher* | Andreas Canfield

המחלקה לביולוגיה, Nordcee, המכון הדיני למחקר מתקדם, אוניברסיטת דרום דנמרק, אודנסה, דנמרק

סוקרים צעירים

STRETTON
STATE
COLLEGE 
גיל: 12-13

GREG 
גיל: 15

איננו חושבים בדרך כלל על תהליך הנשימה שלנו, אלא אם כן הנשימה כרוכה במאמץ, למשל כשאנו מצוננים או עוסקים בפעילות גופנית. כמוכן, כולנו יודעים שנשימה היא הכרחית לבני האדם, שהרי כך החמצן (O_2) נכנס אל תוך גופנו. למה אנחנו זקוקים לחמצן? כי רק בנוכחות חמצן חומרי המזון יכולים להתפרק ולספק אנרגיה לפעילות התאים. בתהליך זה נוצר בין השאר פחמן דו-חמצני (CO_2), והוא יוצא מהגוף בנשיפה. נדמה שגם האוקיינוס "נושם". חמצן נכנס אל מי האוקיינוס ומאפשר את החיים בו. אך במקום פחמן דו-חמצני האוקיינוס פולט חמצן בתהליכים פיזיקליים וביולוגיים. כיום פעילות בני האדם מייצרת כמויות הולכות וגדלות של CO_2 . אנו שורפים דלקים בתעשייה, נוהגים במכוניות ועושים דברים רבים אחרים המעלים את כמות ה- CO_2 באטמוספירה. הצטברות זו תורמת להתחממות הגלובלית ומשבשת את סדרי הטבע בכדור הארץ. בצורות, שיטפונות והפשרת כיפות הקרח בקטבים הם רק כמה מנזקי ההתחממות הגלובלית. למרבה הצער, ההתחממות הגלובלית גם מקשה על האוקיינוס "לנשום".

חיידקים כחוליים (Cyanobacteria)

חיידקים המסוגלים לבצע פוטוסינתזה ולהפיק חמצן. יש להם צורות שונות; חלקם תאים קטנים ועגולים, אחרים הם מושבות דמויות שרשרת (ראו איור 1) שמם הלועזי הוא ציאנובקטריה.

פיטופלנקטון (Phytoplankton)

אורגניזמים קטנטנים הצפים באוקיינוס ובמקווי מים מתוקים ומסוגלים לבצע פוטוסינתזה. פיטופלנקטון מכילים כלורופיל, פיגמנט המעניק להם את צבעם הירוק. יש להם צורות רבות בעלות תא אחד או יותר. שלא כמו חיידקים כחוליים, בתאי פיטופלנקטון אחרים יש גם גרעין נוסף על דופן תא, וכן אברונים

פוטוסינתזה (Photosynthesis)

תהליך שבו אורגניזמים, כמו צמחים ואצות, ומיקרואורגניזמים, כמו ציאנובקטריה ופיטופלנקטון, משתמשים באור השמש כדי להמיר פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה לחמצן ולסוכר. לכן אורגניזמים שמבצעים פוטוסינתזה נמצאים בדרך כלל ב-10-100 המטרים העליונים של מי האוקיינוס.

איור 1

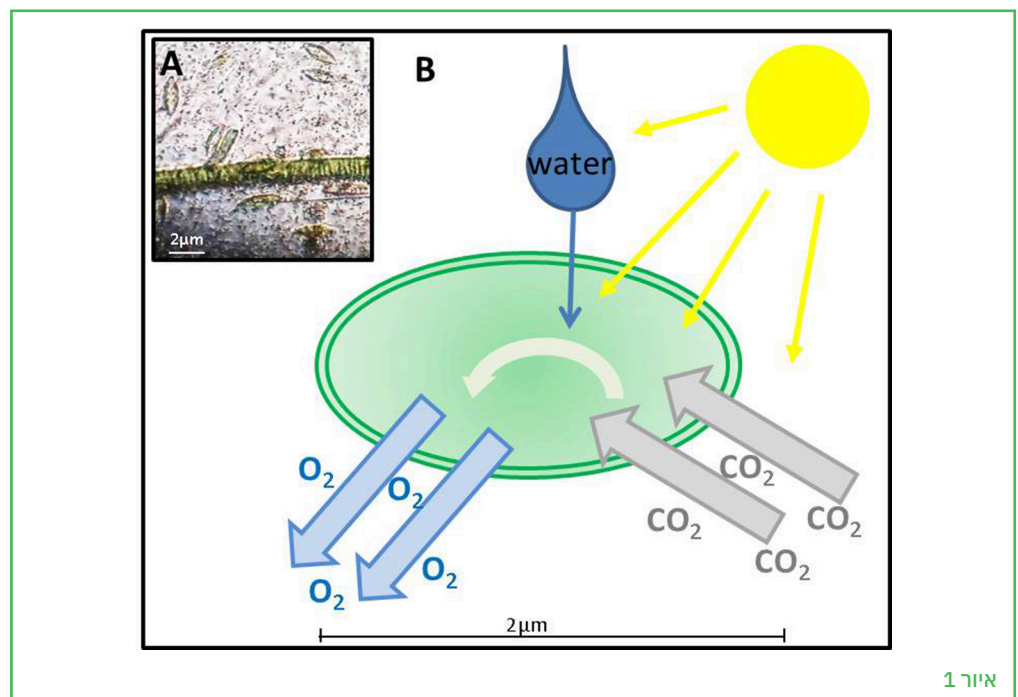
(A) תצלום מיקרוסקופ של טיפת מי ים, ובה חיידקים כחוליים (ציאנובקטריה) ופיטופלנקטון. האורגניזמים האלה מייצרים חמצן בשכבת המים העליונה של האוקיינוס, היכן שיש די אור שמש כדי לספק את האנרגיה לתהליך הזה. (B) תרשים של תא המבצע פוטוסינתזה. תא של חיידק כחולי הוא דוגמה לתא CO₂ מהאטמוספירה, וכך הוא מסלק חלק מה-CO₂ שבני אדם מייצרים ומסייע להפחית את ההתחממות הגלובלית. כדי לבצע פוטוסינתזה התא זקוק למים ולאור שמש, ומהם הוא מייצר סוכר וחמצן. החמצן שנוצר נפלט לסביבה. בתחתית כל תמונה מצוין הגודל. מיקרומטר (µm) אחד הוא אלפית המילימטר.

כיצד חמצן נכנס אל האוקיינוס?

במאמר זה נתאר את הדרכים המאפשרות לחמצן להגיע ליצורים החיים באוקיינוס. דרך אחת היא באמצעות פוטוסינתזה. במי האוקיינוס חיים אורגניזמים קטנטנים, למשל כחוליים (ציאנובקטריה) וסוגים אחרים של פיטופלנקטון מיוחדים אחרים. הקולטים CO₂ מהאטמוספירה ומייצרים חמצן בתהליך הנקרא פוטוסינתזה (איור 1). מאחר שפוטוסינתזה דורשת אור, התהליך הזה יכול להתרחש רק בשכבות המים הקרובות לפני האוקיינוס, ב-10 עד 100 המטרים העליונים של מי האוקיינוס. אפילו שאין זה עומק רב, הפוטוסינתזה המתרחשת באוקיינוס חשובה מאוד לכדור הארץ. מדענים מעריכים שהפיטופלנקטון מייצרים עד 70% מהחמצן שבכדור הארץ [1] ומסלקים מהאטמוספירה 30% מפליטות ה-CO₂ [2]. חשוב שיצורים אלה ימשיכו לבצע פוטוסינתזה כדי שהחיים שאנו מכירים היום יוכלו להמשיך להתקיים גם בעתיד.

דרך אחרת שבה חמצן נכנס לאוקיינוס היא בשבירת הגלים. כאשר הגלים נשברים, בועות אוויר קטנות נדחפות מטה אל תוך המים. המנגנון הזה מתרחש בעיקר על פני האוקיינוס ובסמוך לחופי הים. אגב, בועות האוויר שבמים הן הסיבה העיקרית שגלים נראים לבנים כשהם נשברים על החוף.

עם זאת, חמצן יכול להגיע גם אל מעמקי האוקיינוס ולהישאר שם אלפי שנים. תופעה זו מתרחשת באזור הצפוני ביותר של האוקיינוס האטלנטי, בים גרינלנד ובים לברדור [3] וגם באוקיינוס הדרומי, בים וֶדֶל ובים רוס הסמוכים לאנטארקטיקה (ראו איור 2). באזורים אלה המים קרים מאוד, והחמצן שבאטמוספירה מתמוסס בהם בקלות. מרבית החמצן מתמוסס בחורף, שכן ככל שהמים קרים יותר, כמות החמצן שיכול להתמוסס בהם גדלה (התהליך ההפוך קורה כאשר מרתיחים מים, לדוגמה כשמכינים פסטה. במקרה כזה אתם יכולים לראות גזים, ובהם חמצן, מתחילים לבעבע ולהתאדות. ככל שהמים חמים יותר, ההתאדות



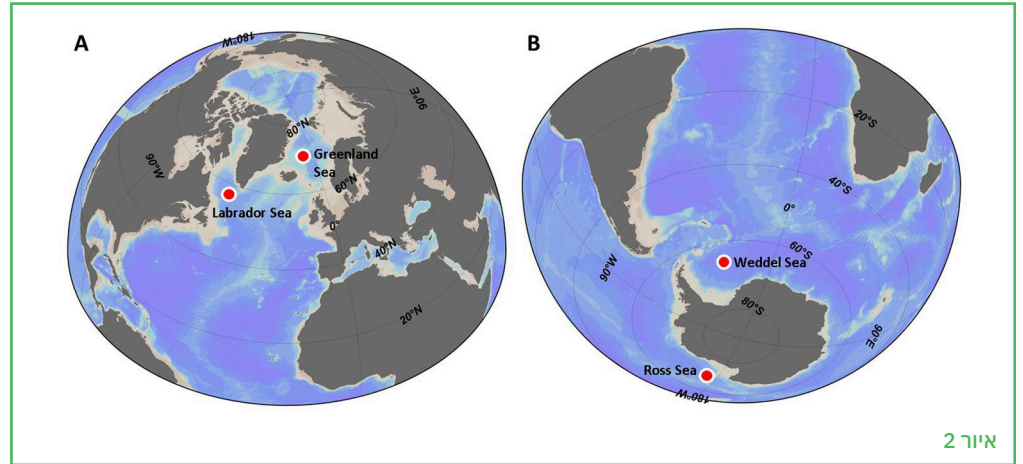
איור 1

הסָּעָה אֲנִיכִית (Deep convection)

כאשר פני המים שבקטבים מתקררים, הם שוקעים אל מעמקי האוקיינוס. התהליך הזה מספק מים עשירים בחמצן לאוקיינוס כולו. בד בבד המים החמים עולים אל פני האוקיינוס. בלועזית: קונוקציה.

איור 2

(A) בחצי הכדור הצפוני, בים גרינלנד ובים לברדור, המים שבפני האוקיינוס שוקעים למעמקים. (B) בחצי הכדור הדרומי המים שבפני האוקיינוס שוקעים בים רוס ובים ודל הסמוכים לאנטארקטיקה. אזורים אלה מסומנים באיור בקודות אדומות.



איור 2

המסוע הימי

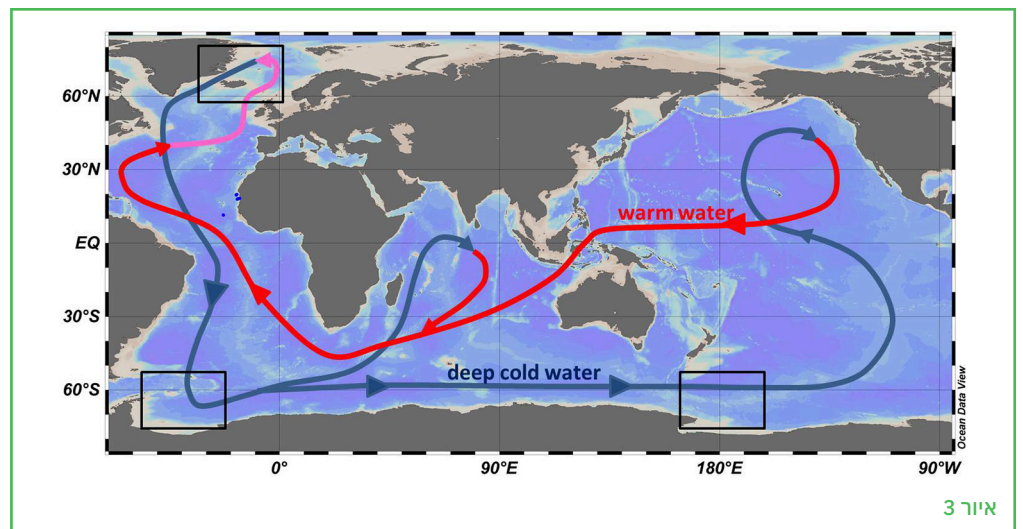
(Global conveyor belt)

המסלול המעגלי שבו המים נעים מהאוקיינוס האטלנטי, דרך האוקיינוס ההודי והאוקיינוס השקט וחזרה אל האוקיינוס האטלנטי. המסוע הימי מספק חמצן למגוון צורות החיים שבאוקיינוס.

איור 3

אחרי שמים עשירים בחמצן שוקעים באזור הקוטב הצפוני, הם מתחילים לנוע במסלול בעומק האוקיינוס (קווים כחולים): החל באוקיינוס האטלנטי, דרך האוקיינוס ההודי וכלה באוקיינוס השקט. כשהמים עולים אל פני האוקיינוס, הם מתחממים ונעים חזרה דרך האוקיינוסים קרוב לפני השטח (קווים אדומים). באוקיינוס האטלנטי זרם הגולף מניע את המים חזרה לים לברדור וליים גרינלנד (קו ורוד), ואז התהליך יכול להתחיל שוב. מערכת הזרמים הגדולה הזו נקראת המסוע הימי, והיא המערכת החשובה ביותר באוקיינוס. החמצן ששקע בתהליך הסעה אנכית מגיע באמצעות המסוע הימי לשכבות העמוקות של האוקיינוס ומאפשר את החיים שם. האזורים שבהם מתרחשת הסעה אנכית מסומנים באיור במלבנים שחורים.

החמצן ששקע בקטבים מגיע בסופו של דבר לאוקיינוס כולו דרך המסוע הימי, מערכת זרמים המקשרת בין כל האוקיינוסים. כפי שתוכלו לראות ב איור 3, המסלול מתחיל מאזורי האוקיינוס שהמים בהם עמוקים (איור 2). כמו ים לברדור. אזורים אלה קרים, ומים חמים מזרם הגולף (ראו איור 3) מחממים בהם את האטמוספירה. עוד ועוד מים חמים מגיעים אל ים לברדור עם הרוחות. כאשר המים מתקררים, הם נעשים צפופים יותר ושוקעים למעמקי האוקיינוס. כך מים חמים יכולים להמשיך לזרום לאזור. כאשר המים הקרים מגיעים לקרקעית האוקיינוס, הם זורמים דרומה ועוברים דרך האוקיינוס האטלנטי לאוקיינוס ההודי, וממנו אל האוקיינוס השקט. בסופו של דבר, מי העומק הקרים עולים אל פני האוקיינוס, מתחממים ונעים שוב אל ים לברדור עם הרוחות.



איור 3

מה מקשה על האוקיינוס לנשום?

אומנם ההסעה האנכית באוקיינוס תלויה בטמפרטורה של המים, אך גם במליחות שלהם. ככל שהמים קרים ומלוחים יותר, חמצן רב יותר יכול להתמוסס בהם. בימים אלה, כאשר כדור הארץ מתחמם, שלג, קרחונים וכיפות הקרח בקטבים עלולים להפשיר. מצב זה חמור במיוחד בקטבים. מים מתוקים מהקרחונים המפשירים זורמים אל הים ויוצרים בו שכבת מים שמליחותה פחותה בהרבה ממי הים. הירידה במליחות האוקיינוס מפחיתה את כמות החמצן המתמוסס בו, ועל כן מפחיתה גם את כמות החמצן הזמין לצורות החיים שבאוקיינוס.

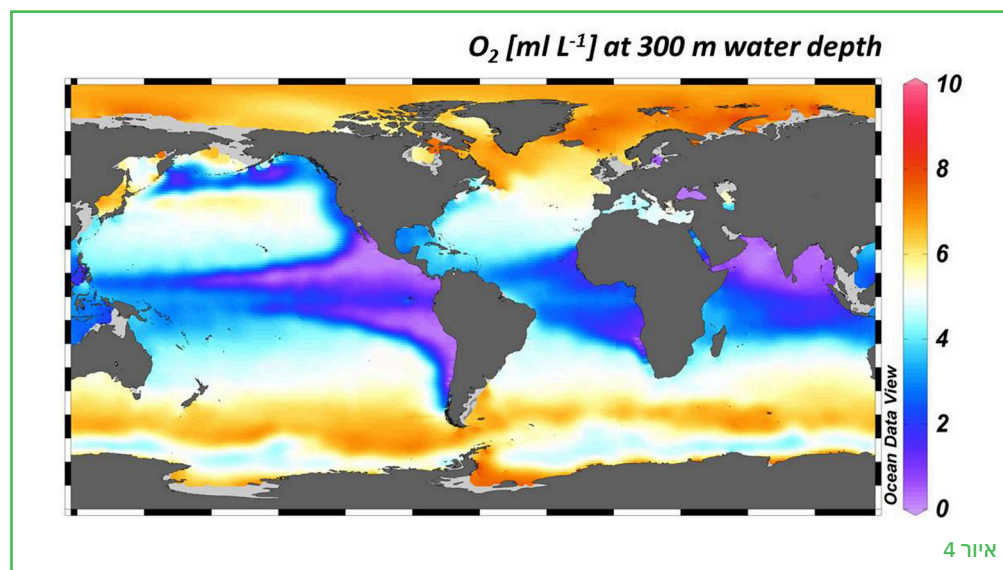
חמצן אינו מצליח להגיע למעמקי האוקיינוס גם בשל שינויים בערבול המים בין השכבות. כאשר שכבת המים העליונה מתחממת, היא אינה מתערבבת היטב בשכבות המים העמוקות ממנה. במצב כזה החמצן שבשכבה העליונה – אם מפוטוסינתזה ואם ממגע באוויר – אינו יכול עוד להגיע אל המים העמוקים. צורות חיים רבות במעמקי האוקיינוס נושמות חמצן, למשל דגים, כוכבי ים, חסילונים, מדוזות וחיידקים. בשל תופעה זו נוצרים בסביבות המחיה שלהם "אזורי חמצן מזערי", כלומר אזורים שהחמצן בהם דל או שאין בהם חמצן כלל (איור 4).

אזורי חמצן מזערי (Oxygen minimum zone)

אזורים באוקיינוס שבהם כמות החמצן מועטה מאוד.

איור 4

התפלגות החמצן במי האוקיינוס בעומק של כ-300 מטרים הסולם שמימין מראה את ריכוזי החמצן במים, כלומר כמה מיליליטרים של חמצן יש בליטר של מים. יש באוקיינוס אזורים עשירים בחמצן, בעיקר בקטבים, והם מסומנים בצבע כתום-אדום. גוני הכחול מסמנים אזורים שריכוז החמצן בהם נמוך. האזורים האלה נקראים "אזורי חמצן מזערי". באזורים נרחבים באוקיינוס השקט ובאוקיינוס ההודי לא נותר חמצן כלל (מסומן בסגול) – אלה הם אזורי החמצן המזערי הגדולים ביותר באוקיינוס. אזור החמצן המזערי באוקיינוס השקט הוא גם אחד מאזורי הדיג החשובים ביותר בעולם.



אזורים אלה שכיחים בעיקר באוקיינוסים הטרופיים, היכן שמרבית הדגים חיים. אם החמצן במים הולך ואוזל, ואם פחות חמצן מגיע למים העמוקים, כמעט שלא יישארו באוקיינוס אזורים שדגים וחיות אחרות יכולים לחיות בהם. מכאן שיהיו גם פחות ופחות דגים למאכל. מאחר ש-16% מהחלבונים מן החי שבני האדם בעולם צורכים מקורו בדגים, ירידה בכמות הדגים היא אכן בעיה גדולה [4]. דגים גם מספקים חומצות שומן בריאות שאינן נמצאות במזונות אחרים. לכן כאשר אספקת החמצן למעמקי האוקיינוס פוחתת, אחד ממקורות המזון העיקריים שלנו נתון בסכנה [5].

מה יקרה אם יפסיק האוקיינוס לנשום?

איננו יודעים מה יקרה. מדענים איששו שריכוז החמצן ברחבי האוקיינוס פוחת, לפחות באזורים מסוימים באוקיינוס. משמעות הדבר היא שאזורי החמצן המזערי מתרחבים [6]. קשה לחזות מה יקרה בעתיד, בעיקר משום שאנו מתבססים על נתונים שאספנו רק ב-50-60 השנים האחרונות. עשרות שנים הם פרק זמן מועט יחסית לזמן שגמי האוקיינוס משלימים את מסלול המסוע הימי (אלפי שנים), או יחסית לגילו של כדור הארץ, שהוא כ-4.6 מיליארדי שנים.

התחממות גלובלית (Global warming)

כאשר גזים מצטברים באטמוספירה של כדור הארץ, תופעה זו ידועה בשם "התחממות גלובלית". אחד הגזים התורם להתחממות הגלובלית הוא CO₂. גז זה יכול להיפלט מהתפרצות הרי געש, אולם כיום הוא נוצר בעיקר משַׁרְפָה של דלקי מאובנים. דלק כזה הוא הדלק המופק מהנפט שבמעמקי האוקיינוס. מדלקי מאובנים מפיקים חשמל, הם משמשים דלק למכוניות ומעורבים בייצור ובהפעלה של מוצרים רבים בחיי היום-יום שלנו, למשל בגדים, מקררים ומחשבים.

קְרֵטִיקוֹן (Cretaceous)

תקופה בהיסטוריה כדור הארץ שהחלה לפני 145 מיליוני שנים והסתיימה לפני כ-66 מיליוני שנים. בתקופה הזו היה כדור הארץ חם מאוד, רמות ה-CO₂ היו גבוהות וכמה פעמים חסר באוקיינוס חמצן.

כדי להעריך מה יקרה במצב זה מדענים משווים את ההווה של כדור הארץ לעֶבֶר שלו: כדור הארץ והאוקיינוסים כבר היו במצב דומה או גרוע יותר מבחינת התחממות גלובלית ומבחינת רמות ה-CO₂. לדוגמה, בקְרֵטִיקוֹן, תקופה בהיסטוריה כדור הארץ שהחלה לפני 145 מיליוני שנים והסתיימה לפני כ-66 מיליוני שנים, התרחשו שינויים גדולים באקלים כדור הארץ. בתקופה זו הייתה באטמוספירת כדור הארץ כמות CO₂ הגדולה ביותר מפי שלושה מכפי שיש היום בגלל התפרצויות געשיות [7]. טמפרטורת פני האוקיינוס הגיעה עד 40°C, יותר מכפליים מטמפרטורת האוקיינוס כיום. בקְרֵטִיקוֹן איבד האוקיינוס כמויות גדולות של חמצן עד שלא נותר בו חמצן כלל. בשני האירועים האנוקסיים שבהם התרוקן האוקיינוס מחמצן נכחדו צורות חיים רבות. לאחר אירועים אלה התפתחו צורות חיים חדשות, וכדור הארץ והאוקיינוסים התאוששו שוב.

לאור כל זאת, תוכלו ודאי להבין מדוע מדענים מנסים לפתור את בעיית ההתחממות הגלובלית ולעצור את ירידת רמות החמצן באוקיינוס. איננו רוצים להיכחד כמובן, ולכן עלינו לפעול כדי לצמצם את ההתחממות הגלובלית. לשם כך אנו צריכים להפחית במידה ניכרת את כמות ה-CO₂ שאנו מייצרים. משימה זו אינה פשוטה כלל וכלל, מאחר שכל אחד מאיתנו מייצר כיום טונות של CO₂ מְדֵי שנה. הרי כל דבר בחיינו מייצר CO₂: מכשירי חשמל, למשל מקררים ומחשבים, מכוניות, ייצור הבגדים שאנו לובשים, הבשר שאנו אוכלים ועוד רבים אחרים.

מה אנו יכולים לעשות כדי לעזור לאוקיינוס להמשיך לנשום?

כדי להבטיח שיישאר חמצן באוקיינוס חשוב להאט את ההתחממות הגלובלית. כמה ארגונים ברחבי העולם פועלים למען מטרה זו. אחד מהם הוא "הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי האקלים" IPCC או (Intergovernmental Panel on Climate Change). ארגון זה עוקב אחר שינוי האקלים, חוקר את השפעות ההתחממות הגלובלית על כדור הארץ ועל האוקיינוסים, מעריך מה יהיו ההשלכות של המשך ההתחממות וממליץ לפוליטיקאים על דרכי פעולה [8]. כך הפאנל מבקש להוביל לצמצום פליטות ה-CO₂ בכדור הארץ. יתרה מזו, מדינות רבות חתמו על הסכם שנקרא פרוטוקול קיוטו [9]. הפרוטוקול הזה מפרט את שיעורי פליטות ה-CO₂ וגזי חממה אחרים שעל כל מדינה לצמצם כדי להאט את ההתחממות הגלובלית. באמצעות פעולות כאלה מדענים ופוליטיקאים מקווים לצמצם את השלכות ההתחממות, ובהם הפשרת הקרחונים בקטבים וירידת רמות החמצן באוקיינוס. אז תיעצר התרחבותם של אזורי החמצן המזערי וימשיכו החיים באוקיינוס.

אם תרצו לבדוק כמה CO₂ אתם מייצרים בחיי היום-יום שלכם וכיצד תוכלו לתרום להפחתת ההתחממות הגלובלית ולסייע לאוקיינוסים להמשיך "לנשום", היכנסו לקישורים האלה: <https://www.earthday.org/take-action/footprint-calculator>, <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>.

מקורות

1. Walker, J. C. G. 1980. "The oxygen cycle," in *The Oxygen Cycle in the Natural Environment and the Biogeochemical Cycles*, ed O. Hutzinger (Berlin: Springer-Verlag), 87–104.
2. Bopp, L., Bowler, C., Guidi, L., Karsenti, E., and de Vargas, C. 2015. "The ocean: a carbon pump," in *Paris 2015 UN Climate Change Conference, COP 21*, ed F. Gaill (CNRS), 12–7.
3. Körtzinger, A., Schimanski, J., Send, U., and Wallace, D. 2004. The ocean takes a deep breath. *Science* 306:1337. doi: 10.1126/science.1102557
4. Tidwell, J. H., and Allan, G. L. 2001. Fish as food: aquaculture's contribution: ecological and economic impacts and contributions of fish farming and capture fisheries. *EMBO Rep.* 2:958–63. doi: 10.1093/embo-reports/kve236
5. FAO. 1997. Review of the State of World Aquaculture. *FAO Fish. Circ.* No. 886, 1–163.
6. Schmidtko, S., Stramma, L., and Visbeck, M. 2017. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature* 542:335–9. doi: 10.1038/nature21399
7. Turgeon, S. C., and Creaser, R. A. 2008. Cretaceous oceanic anoxic event 2 triggered by a massive magmatic episode. *Nature* 454:323–6. doi: 10.1038/nature07076
8. IPCC. 2013. "Climate change 2013: the physical science basis," in *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, et al. (Cambridge; New York, NY: IPCC), 1535.
9. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO, Inland Water Resources and Aquaculture Service, and Fishery Resources Division. 1997. Review of the state of world aquaculture. *FAO Fish Circ.* (1997) 1–163.

פורסם אונליין: 09 ביולי 2020

נערך על ידי: Mark A. Brandon

מנחים מדעיים: Ciaràn D. Beggan | Tina Marie Weier Oldham

ציטוט: Löscher CR | Canfield A (2020) האם האוקיינוס מאבד את נשימתו? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2018.00075-he

תורגם והותאם מ: Löscher CR and Canfield A (2019) Does the Ocean Lose its Breath? Front. Young Minds 6:75. doi: 10.3389/frym.2018.00075

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי

זכויות יוצרים © 2019 © Löscher | Canfield 2023. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

STRETTON STATE COLLEGE, גיל: 12-13

זהו בית ספר אשר נמצא בקרבת בריזביין, אוסטרליה, עם בסיס ערכים מוצק אשר שואף להבטיח תרבות של ציפיות גבוהות מהתלמידים והצוות. בית הספר שלנו הוא בית ספר שבו תלמידים מצפים כל יום לאתגרים ולהזדמנויות, עם מיקוד הולך וגובר בלמידה אלקטרונית (eLearning) ופיתוחים נוספים של למידה דיגיטלית. התלמידים שביצעו בהתלהבות את הסקירה הזו הם בני 12-13.

GREG, גיל: 15

היי, אני בן 15 ונמצא כרגע בבית בשנת מעבר (שנה מחוץ לבית ספר לקראת בחינות מעבר). תחום העניין העיקרי שלי הוא פיזיקה, אבל אני שמח לקרוא את מרבית המידע המדעי שמגיע אליי.

הכותבים

CAROLIN R. LÖSCHER

אני פרופסורית משפחה במחלקה לביוכימיה ימית באוניברסיטת דרום דנמרק, ואני מתעניינת בעיקר באופן שבו שינויי האקלים משפיעים על החיים באוקיינוס, וכיצד הם ישתנו בעתיד. אני מרותקת במיוחד מחקירת ההשפעות של התחממות, החמצה (הפיכה לחומצי יותר) ואובדן החמצן על מיקרואורגניזמים בים מאחר שהם חשובים מאוד לכל צורות החיים באוקיינוס. *cloescher@biology.sdu.dk

ANDREAS CANFIELD

אני סטודנט באוניברסיטת דרום דנמרק, וכיום אני לומד פסיכולוגיה. אין לי הרבה מחשבות מגובשות על תחום המחקר שלי (פסיכולוגיה), אבל אני סקרן ללמוד ולחקור עוד. אני בן 23 ועדיין מרגיש שבקושי גירדתי את פני השטח של מה שאפשר לגלות. אני בנם של דונלד קנפילד, חוקר חשוב במדעי כדור הארץ, ושל מריאן אולסן, שהיא בעלת תואר בביולוגיה. כבנם של השניים אני מוצא את עצמי בנקודת המפגש בין מדע "קשיח" ובין מדע "רך".

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK