

תנועתו של פחמן דו-חמצני בעולם הקפוא של קרח ים

Odile Crabeck^{1,2,3*}, Karley Campbell^{4,5}, Sebastien Moreau⁶, Max Thomas¹

¹המרכז למדעי האוקיינוס והאטמוספירה, אוניברסיטת מזרח אנגליה, נורוויץ', בריטניה

²היחידה לאוקיינוגרפיה כימית, אוניברסיטת לייז', לייז', בלגיה

³המעבדה לגלציוולוגיה, האוניברסיטה החופשית של בריסל, בריסל, בלגיה

⁴המחלקה לביולוגיה ארקטית וימית, האוניברסיטה הארקטית של נורווגיה, טרומסו, נורווגיה

⁵המרכז לגלציוולוגיה של בריסטול, אוניברסיטת בריסטול, בריסטול, בריטניה

⁶המחלקה למגוון ביולוגי, מכון הקוטב הנורווגי, טרומסו, נורווגיה

סוקרת צעירה

JULIETA

גיל: 9



קרח ים (Sea Ice)

מי ים קפואים שצפים על פני השטח של האוקיינוס. קרח הים מורכב מקרח גבישי ומכיס של נוזל מלוח שנקרא מי מלח.

בכל חורף, שמיכה קפואה שידועה כקרח ים מכסה לגמרי את האוקיינוס הארקטי. במשך מאות שנים, קרח ים נצפה כמִכְסָה מוצק על גבי האוקיינוס, שפועל כמו גבול שחוסם גזים אשר נעים בין האוקיינוס לבין האטמוספירה. אולם תגליות מדעיות בשנים האחרונות הראו שקרח הים דומה יותר לספוג, חומר נקבובי שהוא גם ביתן של צורות חיים מיקרוסקופיות. הנקבוביות בקרח הים מלאות נוזל מלוח מאוד שנקרא מי מלח, שהוא עשיר בפחמן דו-חמצני (CO₂). כיוון הנוזל האלה יוצרים רשת של צינוריות או תעלות שמניעות גזים כמו CO₂, בדומה לאופן שבו ורידים ועורקים מניעים דם בגופנו. במאמר זה, תגלו כיצד CO₂ נכנס, יוצא ומותמר באחת הסביבות הקשוחות ביותר על פני כדור הארץ.

קרח ים: מבט מרחוק

בממוצע, קרח ים מכסה כ-23 מיליוני קילומטרים רבועים מאוקיינוס כדור הארץ, או פי כשניים וחצי מהאזור של קנדה [1]. בשל גודלו, ניתן לצפות בקרח הים מהחלל כשמיכה לבנה גדולה

על גבי האוקיינוס. באמצעות התבוננות בקרח הים בקני המידה העצומים האלה, אנו יכולים לראות שינויים דרמטיים בהיקף קרח הים לאורך השנה ובמהלך העשורים – מאז 1978, כאשר בוצעו תצפיות הלווין הראשונות של קרח ים.

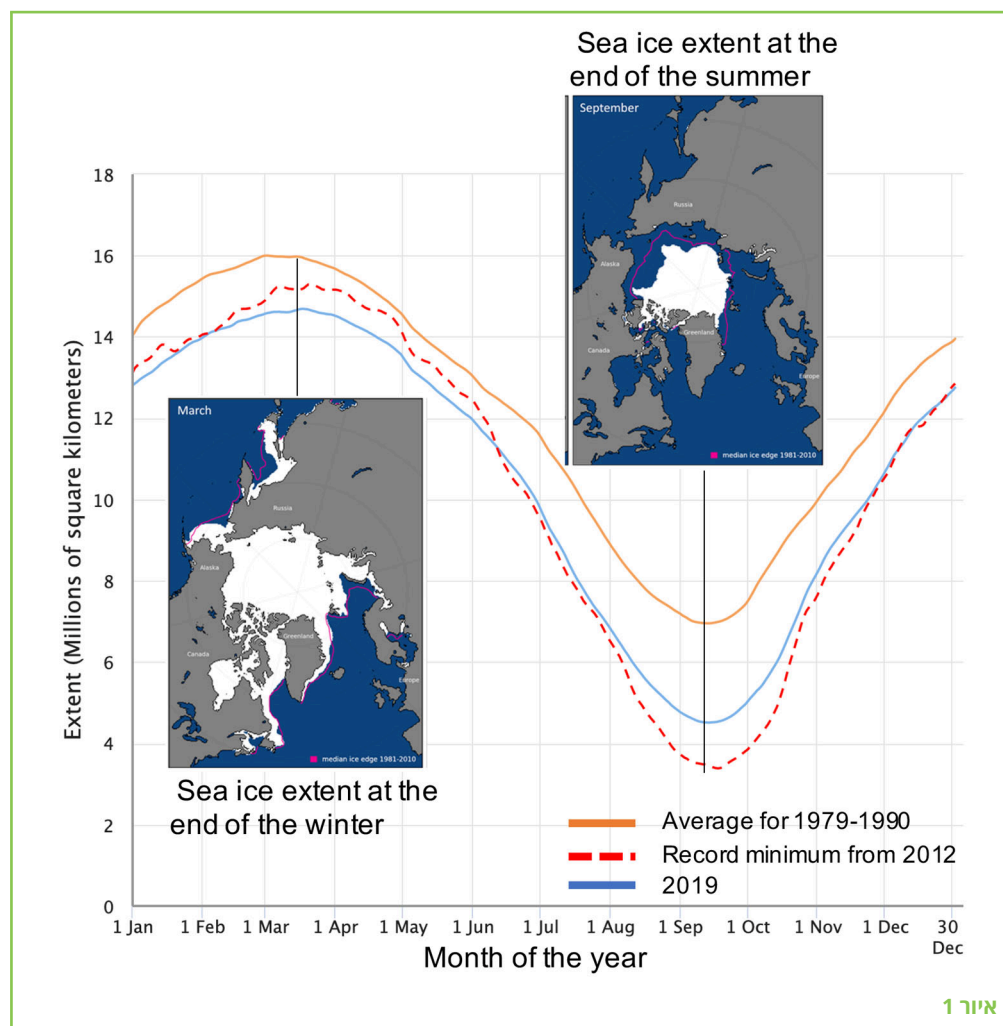
בכל שנה, כאשר השמש שוקעת והחורף מתחיל באוקיינוס הארקטי (בחלק הצפוני הרחוק), או באוקיינוס הדרומי (בחלק הדרומי הרחוק של אנטרקטיקה), קרח ים נוצר כאשר טמפרטורות האוויר יורדות, והאוקיינוס מתחיל לקפוא. כאשר החורף ממשיך, קרח הים מתעבה וגדל, ומכסה אזורים נרחבים של האוקיינוס. במקומות מסוימים באזור הארקטי, קרח הים אפילו גדל לעובי של מטרים רבים! כאשר השמש עולה והאוויר מתחמם באביב, קרח הים מתחיל להימס ולהישבר, וחושף את האוקיינוס הנוזלי שמתחתיו. אנו מכנים את ההתרחבות וההתכווצות האלה של קרח הים – 'מחזור עונתי' (איור 1).

כשמשווים קרח ים משנה לשנה, אנו מוצאים שכמות הקרח שמכסה את האוקיינוס משתנה. השינוי ארוך הטווח הזה מתרחש כאשר קרח הים ממשיך לגדול ולהימס כחלק מהמחזור העונתי השנתי שלו (1 איור, קווים כחול וכתום). באוקיינוס הארקטי, קרח הים נמס בקיץ יותר ממה שנמס בעבר, ואיבדנו כ-30% מקרח הים בקיץ מאז 1990 (2 איור, קו צהוב). מדענים חוזים שעד שנת 2050 כל קרח הים הארקטי יימס לחלוטין במהלך הקיץ, בפעם הראשונה

איור 1

מחזור קרח הים העונתי

באזור הארקטי. הקו הכתום מראה את ממוצע כיסוי הקרח ההיסטורי משנת 1979 ועד היום. הקו הצהוב מראה את הכיסוי ב-2012, כאשר הקרח הגיע לשיא מינימום. שנת 2019 מוצגת בכחול. התמונה משמאל מראה את כיסוי קרח הים בסוף החורף של 2019, והתמונה מימין מראה את הכיסוי בסוף הקיץ. מאז שנת 2000, כיסוי קרח הים בקיץ פחת באופן משמעותי. מפות ותאריכים לקוחים ממרכז הנתונים הלאומי לשלג וקרח (NSIDC), אוניברסיטת קולורדו, בולדר, קולורדו.



איור 1

בהיסטוריה. משמעות הדבר היא, שאף על פי שכיום חוקרים יכולים ללכת לקוטב הצפוני, בעתיד הם יצטרכו להפליג אליו. אחת משאלות המחקר הגדולות ביותר של זמננו היא כיצד השינויים האלה משפיעים על חיים באוקיינוס ועל האקלים המתחמם שלנו.

קרח ים: מבט מקרוב

אם מתקרבים אל קרח הים, עד לקנה מידה של כמה סנטימטרים, הוא מורכב. בקרח הים ישנם כיסים של נוזל מלוח, שנקרא **מי מלח** (איור 2). כיסי קרח ים הם נוזליים בטמפרטורה של מתחת לאפס מעלות, מאחר שהמלח מונע מהנוזל לקפוא, ותמיד ישנו נוזל כלשהו בקרח הים [2]. אם מתקרבים עוד יותר, אנו מוצאים בתוך כיסי מי המלח האלה בועות גז, גבישי מלח וחיים (2 איור, פאנל תחתון). כיסי מי המלח הסביבת מחיה ייחודית עבור אורגניזמים מיקרוסקופיים, ומקום שבו מתרחשות תגובות כימיות. מדענים עבדו על הבנת קרח ים בקני מידה קטנים מאוד, והם מנסים לבדוק כיצד קרח ים משפיע על הטבע הכימי של האוקיינוסים, ואפילו על חיים מעבר לאוקיינוסים.

CO₂ באטמוספירה, באוקיינוסים וביצורים חיים

פחמן הוא אחד היסודות השכיחים ביותר על כדור הארץ, עם חמצן, חנקן ומימן. פחמן נמצא באטמוספירה כגז פחמן דו-חמצני (CO₂), באוקיינוס כ-CO₂ מומס, בסוגים מסוימים של אבנים ובכל האורגניזמים החיים. יסוד זה הוא הכרחי לחיים, ובני האדם מורכבים מכ-20% פחמן.

באטמוספירה, CO₂ הוא גז עיקרי שתורם להתחממות הגלובלית [3]. CO₂ שנפלט מפעילויות אנושיות (מכוניות, תעשיית השמן/ גז וכדומה), יכול לנוע בין האטמוספירה, האוקיינוס והאורגניזמים החיים, ובתנועתו הוא משנה צורה. אם CO₂ נשאב עמוק אל תוך האוקיינוס, הוא יכול להיכלא שם במשך מאות שנים, ולהפחית את ההתחממות הגלובלית. התהליכים שמניעים CO₂ מהאטמוספירה אל האוקיינוס נקראים משאבות. ישנן שתי משאבות עיקריות של CO₂ באוקיינוס: **משאבת מסיסות ומשאבה ביולוגית**. אוקיינוסים כבר ספגו כשליש מה-CO₂ שנפלט על ידי פעילויות אנושיות, הודות למשאבת המסיסות ולמשאבה הביולוגית.

משאבת המסיסות (איור 3, חיצים כחולים) מתייחסת לתהליך שבו CO₂ אטמוספרי נספג על ידי פני השטח של האוקיינוס, ומתמוסס בתוך פני השטח של האוקיינוס. ברגע ש-CO₂ מומס, הוא יכול להיות משונע עמוק אל תוך האוקיינוס על ידי זרמי האוקיינוס. יכולתו של האוקיינוס לקחת CO₂ מהאטמוספירה תלויה בטמפרטורת המים ובמליחות. מים קרים ומתוקים יכולים לספוג יותר CO₂ מאשר מים חמים ומלוחים. לכן, האוקיינוסים הקרים בקוטב, כמו למשל האוקיינוס הארקטי, מעולים בלקיחת CO₂ מהאטמוספירה. אם ה-CO₂ מגיע אל קרקעית האוקיינוס, הוא יכול להישאר שם במשך 1,000 שנים ויותר (איור 3).

המשאבה הביולוגית מתייחסת לשימוש ב-CO₂ על ידי אצות שנקראות **פיטופלנקטון**. אצות הן אורגניזמים חד-תאיים מיקרוסקופיים שגדלים באמצעות אור השמש, חומרי מזון ו-CO₂ בתהליך כימי של **פוטוסינתזה** [4] (3 איור, חיצים ירוקים). אצות פיטופלנקטון רבות חיות כשהן צפות על פני האוקיינוסים של העולם. מאחר שאצות משתמשות ב-CO₂ כדי לגדול,

מי מלח (Brine)

מים עם ריכוז גבוה של מלח מומס.

משאבת מסיסות (Solubility Pump)

תהליך שלוקח CO₂ מהאטמוספירה אל פני השטח של האוקיינוס כ-CO₂ מומס, ומשנע אותו אל קרקעית האוקיינוס.

משאבה ביולוגית (Biological Pump)

תורמת לתפקידו של האוקיינוס בלקיחה של CO₂ מהאטמוספירה ואחסונו. ה-CO₂ מותמר ומאוחסן על ידי מיקרואורגניזמים כמו אצות, שמשמשים בפוטוסינתזה כדי לגדול.

פיטופלנקטון (Phytoplankton)

אצות חד-תאיות שחיות בפני השטח של האוקיינוס ומשתמשות בתהליך של פוטוסינתזה כדי לגדול. הסוגים השכיחים ביותר של פיטופלנקטון הם צורניות. פיטופלנקטון יוצרות את הבסיס של שרשרת המזון הימית, ומשמשות אספקת מזון של דגים קטנים וחיות ימיות אחרות.

פוטוסינתזה (Photosynthesis)

תהליך שבו צמחים ואצות מייצרים מזון. התהליך הכימי הזה משתמש באור שמש, ב-CO₂ ובחומרי מזון כדי להפיק סוכרים שהתא יכול להשתמש בהם כאנרגיה לגדילה.

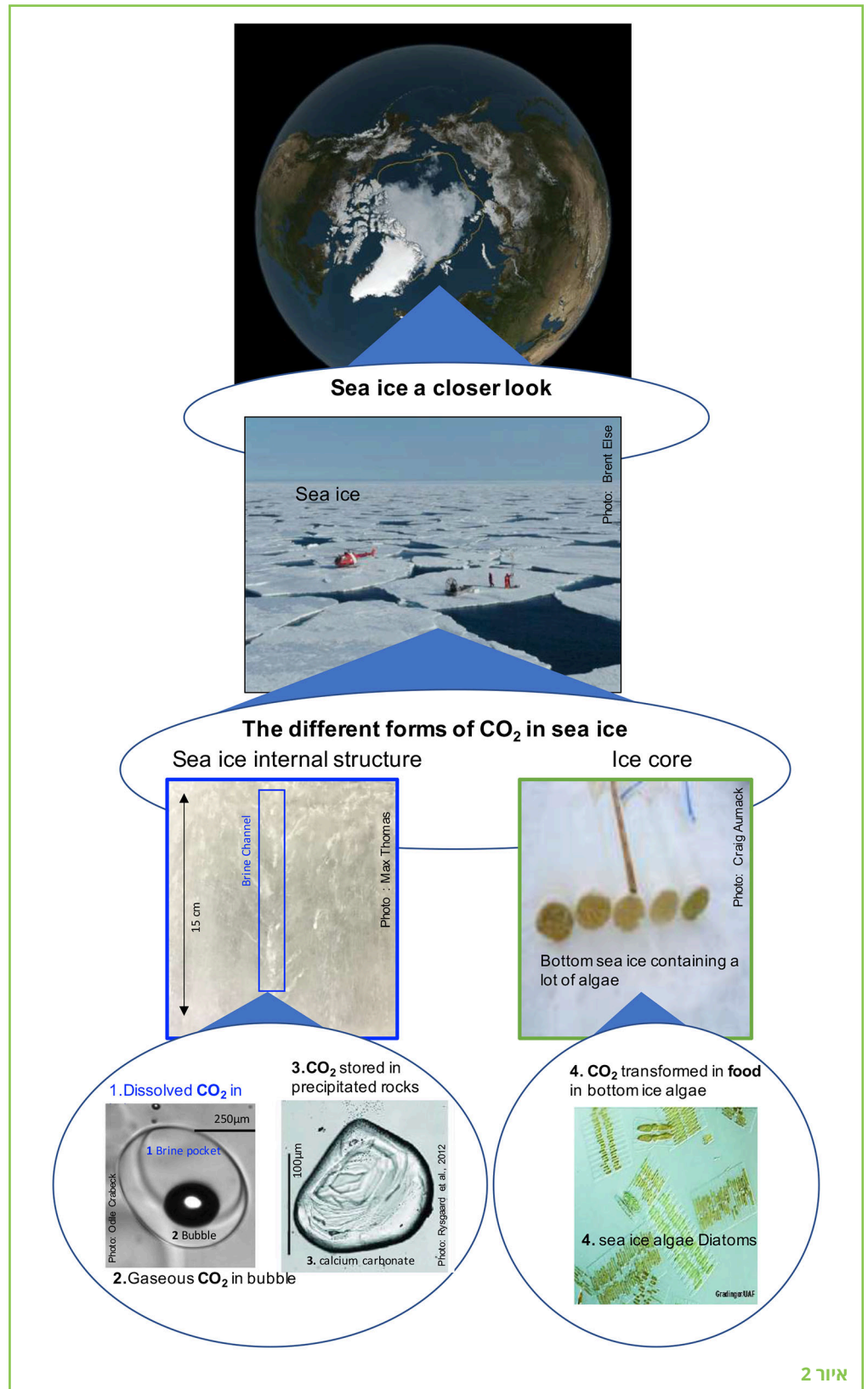
איור 2

קרח ים במבט מקרוב.

בפאנל העליון מוצגת תמונת לוויין של האוקיינוס הארקטי בסוף קיץ 2019. הקו הצהוב מראה את הכיסוי ההיסטורי (1979 עד 1990) של קרח הים בקיץ. אנו יכולים לראות שכעת ישנו פחות קרח באוקיינוס הארקטי במהלך הקיץ. בעבר, כיסוי קרח הים בקיץ הגיע מעבר לקו הצהוב. הפאנל האמצעי מראה מדענים שדוגמים קרח ים במהלך עונת הקיץ. הפאנל התחתון מראה מצד שמאל את המבנה הפנימי של הקרח, ומצד ימין את ליבות הקרח שמכילות הרבה אצות בקרקעית. הפאנל התחתון גם מראה היכן CO_2 נכלא בתוך קרח ים:

1. במי המלח שבהם CO_2 מאוחסן במצב מומס,
2. בבועות שבהן CO_2 מאוחסן בפאזה גזית,
3. בגבישים של קלציום קרבונט שבהם CO_2 מאוחסן בצורה מוצקה כאבנים,
4. באצות קרח ים שבהן CO_2 מאוחסן כפחמן (מזון סוכרי)

<http://www.arcodiv.org/seaice/diatoms/>
[.IceDiatoms.html](http://www.IceDiatoms.html)

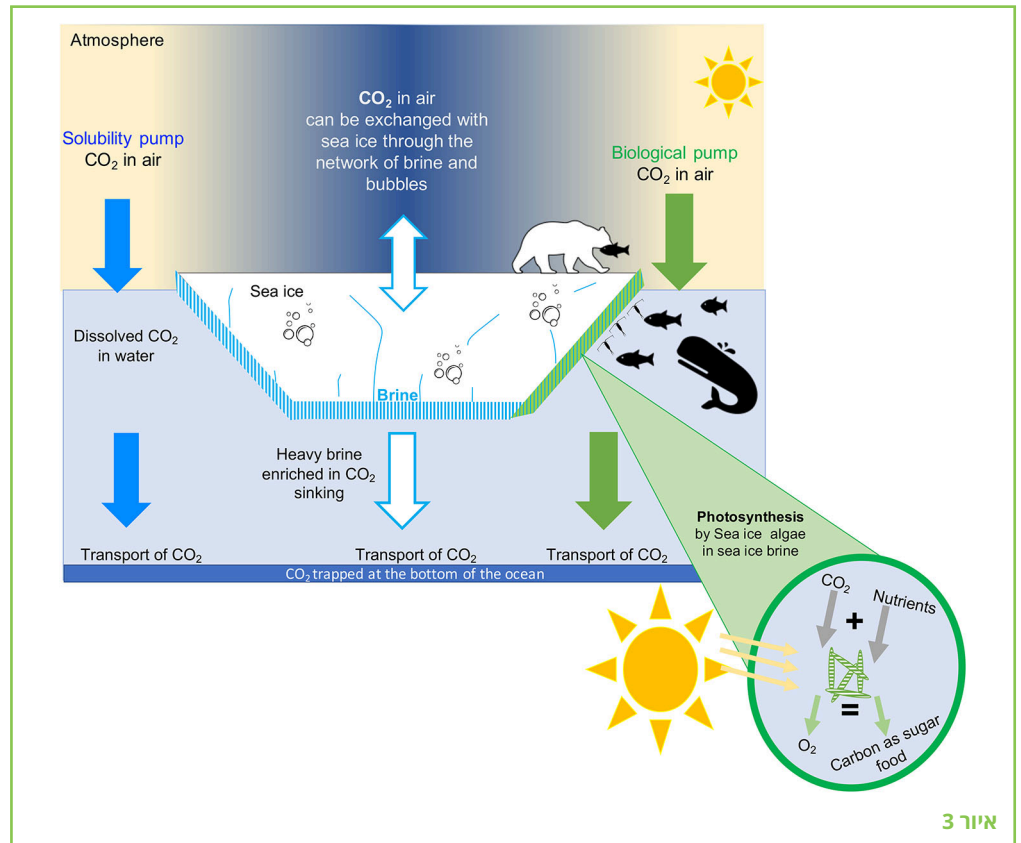


הן מסייעות לקחת CO_2 מהאטמוספירה (3 איור, חיצים ירוקים). חלק מהאצות האלה מתמחות בחיים בסביבה הייחודית שמסופקת על ידי קרח ים לרבות בנוזלי מי המלח.

איור 3

כיצד CO₂ נע מהאטמוספירה אל האוקיינוס?

באטמוספירה כגז, והוא יכול להימס במי הים. ברגע שהוא במי הים, הוא יכול להיות משוּבַע על ידי זרמים על קרקעית האוקיינוס. אנו מכנים זאת 'משאבת מסיסות' (חץ כחול). קרח ים גם יכול להחליף CO₂ עם האטמוספירה. ה-CO₂ בקרח הים מומס בתוך מי המלח, או מאוחסן כגז בבוֹעוֹת, או בפאזה מוצקה כאבני קלציום קרבונט. חלק ממי המלח שמכילים CO₂ נדחים על ידי מי הים שמתחתם, ומשוּבַע אל החלק הפנימי של האוקיינוס. התהליך הזה כולא CO₂ בקרקעית האוקיינוס במשך זמן רב (חץ לבן). אצות קרח ים משתמשות ב-CO₂ כדי לגדול, בתהליך של פוטוסינתזה. אנו מכנים זאת 'משאבה ביולוגית' (חץ ירוק). ה-CO₂ נאגר באצות כמזון, ויכול לנוע במעלה שרשרת המזון כאשר האצות נאכלות על ידי מלחכי עשב, שבתורם נאכלים על ידי חיות גדולות יותר.



איור 3

כיצד אצות קרח ים מתמירות CO₂?

אני קטנה כגודלו של תא. אני שואפת CO₂ ונושפת O₂. אני חייה בכיסי מי מלח, ומקבלת את האנרגיה שלי מאור השמש. מי אני? אצת קרח ים.

אצות קרח גדלות בכיסי מי מלח בתוך הקרח, בבריכות של מים מומסים על פני השטח, והכי חשוב – בבסיסו של קרח הים, שם הקרח נוגע באוקיינוס שמתחתיו. אצות קרח גדלות מהר, או **פורחות**, כאשר האור נעשה זמין עבור פוטוסינתזה באביב (3 איור, חיצים ירוקים). אצות קרח שידועות כצורניות הן טובות מאוד בגדילה מהירה, והן אלה שמרכיבות בעיקר את פריחת אצות הקרח. אף על פי שצורניות קטנות מדי מלהיספר באופן פרטני, מדענים יכולים לראות פריחות כהשחמה של הקרח (2 איור, פאנל תחתון). פריחת אצות קרח נמשכת עד הקיץ המאוחר, כאשר התאים השתמשו בחומרי המזון שנדרשים לגדילה, וכאשר הקרח סביבן מתחיל להימס. הפוטוסינתזה שמבוצעת על ידי אצות הקרח יכולה להשפיע מאוד על כמות ה-CO₂ שקרח הים לוקח באביב (3 איור, חיצים ירוקים). באופן כללי, כאשר הקרח הוא חום מאצות, צפוי שהרבה CO₂ יילקח אל תוך קרח הים (2 איור, פאנל תחתון). אצות קרח ממלאות תפקיד חשוב בשימוש ב-CO₂ אטמוספרי, אולם הן גם חשובות עבור חיות שחיות באוקיינוס הארקטי. גדילתן של אצות קרח מספקת לאורגניזמים אחרים מזון רב – ככל שמידת פריחת האצות גדלה, המשמעות היא שהאורגניזמים יכולים לקבל מזון רב בקלות רבה. חומרי המזון שמתקבלים מאצות הקרח מועברים למעלה בשרשרת המזון כאשר אורגניזם אחד אוכל אחר, כל הדרך אל דוב הקוטב.

פריחה (Bloom)

עלייה מהירה באוכלוסייה של אצות. פריחת אצות לעיתים קרובות מזוהה על ידי צביעה ירוקה או חומה של המים.

מה קורה ל-CO₂ שנכלא בקרח ים?

כאשר קרח הים נוצר בחורף, הוא כולא מלחים ו-CO₂ מהאוקיינוס במי המלח (2 איור, פאנל תחתון). כל כך הרבה CO₂ נכלא בתוך המלח, שהוא מותמר לסלע מוצק על ידי תגובות כימיות. אחד הסלעים השכיחים ביותר שנוצרים מ-CO₂ בתוך קרח הים מורכב מ**קלציום קרבונט**, ונקרא גם אבן סיד, שהוא אותו החומר שמרכיב את שלדיהם של אלמוגים והרבה צדפות ים שאתם עשויים למצוא על חוף הים. חוקרים יכולים לראות את הפיסות הזעירות של קלציום קרבונט במיקרוסקופ (2 איור, פאנל תחתון). ה- CO₂ בקרח הים נכלא גם בבועות (2 איור, פאנל תחתון). הבועות יכולות לעלות מקרקעית קרח הים ועד לפני השטח דרך תעלות מי מלח. ברגע שהם בפני השטח, הגזים יכולים לברוח אל האוויר (3 איור, חיצים לבנים). קרח ים גם שולח חלק מה-CO₂ אל קרקעית האוקיינוס. התהליך הזה מתרחש במהלך החורף, כאשר מי המלח המלוחים מקרח הים משוקעים אל קרקעית האוקיינוס, ומביאים איתם CO₂ (3 איור, חיצים לבנים). לעיתים קרובות מתייחסים לכך כמשאבת קרח ים, באופן דומה למשאבת המסיסות ולמשאבה הביולוגית שתוארו לעיל. דרך עלייתן של בועות ושקיעתם של מי מלח, קרח הים מאבד CO₂ רב שהיה כלוא בתוכו. כתוצאה מכך, כאשר השמש חוזרת באביב, קרח הים כבר לא מחזיק כל כך הרבה CO₂. חוקרים צפו בכך שבאביב קרח הים יכול שוב לספוג הרבה CO₂ מהאטמוספירה. באופן כללי, חוקרים חושבים שקרח הים מסייע לאוקיינוס לספוג CO₂. אם כן, קרח הים מסייע לנו להילחם כנגד שינויי האקלים.

קלציום קרבונט (Calcium Carbonate)

סלע משקע כמו אבן סיד.
קלציום קרבונט מיוצר על ידי שיקוע (התמצקות) של קלציום ו-CO₂ שמומסים במים.

תובנות

כיסוי קרח הים גדל בחורף ונמס בקיץ. הודות למים הקרים ולנוכחותם של אצות ושל קרח ים, האוקיינוס הארקטי הוא משקע של פחמן, ומסייע להפחית את כמות ה-CO₂ באטמוספירה. ראשית, אצות קרח הים משתמשות ב-CO₂ כדי לגדול וליצור מזון לאורגניזמים גדולים יותר. שנית, קרח הים יכול ללכוד CO₂ במי המלח שלו ולתעדף את הובלתו אל קרקעית האוקיינוס. באוקיינוס הארקטי, כיסוי קרח הים בקיץ פוחת באופן משמעותי כתוצאה מההתחממות הגלובלית, אשר מאיימת על ביתן של אצות הקרח, ועל יכולתו של האוקיינוס הארקטי להחליף CO₂ עם האטמוספירה.

תודות

העבודה הזו הייתה תרומה ל-Diatom Autecological Responses) Diatom-ARCTIC (with Changes to Ice Cover Effects of ice stressors and) EISPAC ולפרויקט (pollutants on the Arctic marine cryosphere Biochemical exchange processes at Sea Ice :BEPSII Interfaces).

מקורות

1. Thomas, D. N. (Ed.). 2017. *Sea Ice*. Norwich: John Wiley & Sons.
2. Glessmer, M. 2019. How does ice form in the sea? *Front. Young Minds* 7:79. doi: 10.3389/frym.2019.00079

3. Hubbe, A., and Hubbe, M. 2019. Current climate change and the future of life on the planet. *Front. Young Minds* 7:37. doi: 10.3389/frym.2019.00037
4. Ghosh, T., and Mishra, S. 2017. How does photosynthesis take place in our oceans? *Front. Young Minds* 5:34. doi: 10.3389/frym.2017.00034

פורסם אונליין: 29 בספטמבר 2022

נערך על ידי: Christian März

מנחה מדעי: Ana Torres

ציטוט: Crabeck O, Campbell K, Moreau S and Thomas M (2022) תנועתו של פחמן דו-חמצני בעולם הקפוא של קרח ים. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.516072-he

תורגם והותאם: Crabeck O, Campbell K, Moreau S and Thomas M (2021) The Movement of CO₂ Through the Frozen World of Sea Ice. *Front. Young Minds* 8:516072. doi: 10.3389/frym.2020.516072

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהיעדר כל קשר מסחרי או כלכלי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי..

COPYRIGHT © 2021 © Crabeck, Campbell, Moreau and Thomas 2022. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתיקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתיקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרת צעירה

JULIETA, גיל: 9

היי, קוראים לי Julieta ונולדתי במינסוטה, ארצות הברית, אבל עכשיו עברתי עם משפחתי לאורוגוואי. אני דוברת אנגלית וספרדית. אני אוהבת החלקה על גלגליות וקדרות. בבית הספר, המקצוע האהוב עליי הוא מתמטיקה.

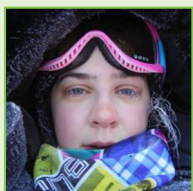
הכותבים

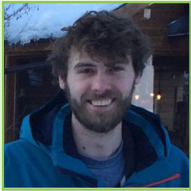
ODILE CRABECK

Odile Crabeck היא חוקרת בקרן למחקר מדעי בבלגיה. היא חוקרת את קרח הים, את המצב הפיזיקלי והביוכימי של מי המלח בקרח הים ובועות, באמצעות נתונים מהשטח ומחקרי מעבדה. *ocrabeck@uliege.be

KARLEY CAMPBELL

Karley Campbell היא פרופסורית לבוטניקה ימית באוניברסיטה הארקטית של נורווגיה, וחוקרת באוניברסיטת בריסטול, בריטניה. המחקר שלה מחבר יחד מחקרי מעבדה ושטח כדי לקבוע כיצד שינוי סביבתי ישפיע על פעילותם של מיקרואורגניזמים בקרח הים, על הרפך המינים שלהם ועל הפיזיולוגיה שלהם.



**SEBASTIEN MOREAU**

Sebastien Moreau הוא ביוכימאי של קרח ים ושל האוקיינוס שעובד במכון הקוטב הנורווגי, טרומסו, נורווגיה. המחקר שלו מתמקד בפיטופלנקטון ובמחזור הביוגיאוכימי של פחמן באוקיינוסים בקוטב. הוא חוקר את השאלות האלה באמצעות שימוש בתצפיות שטח, נתוני לוויין וגם מודלים חד-ממדיים ותלת-ממדיים.

MAX THOMAS

Max Thomas הוא חוקר באוניברסיטת אוטגו, ניו זילנד. הוא משתמש בתצפיות מעבדה ובטווח של כלי מידול כדי לחקור פיזיקה של קרח ים.

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