



תרומתם של נחילי קריל לאקלים הגלובלי

Anna Belcher^{1*}, Emma L. Cavan², Geraint A. Tarling¹

¹קבוצת מערכות אקולוגיות, מכון מחקר אנטרסקטיקה הבריטית, קיימברידג', בריטניה
²המחלקה למדעי החיים, אימפריאל קולג' לונדון, קמפוס סילווד פארק, לונדון, בריטניה

סוקרים צעירים

ST. MARY'S
HIGH
SCHOOL
גיל: 14



חיים באוקיינוס מסייעים לרמות הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה לרדת, על ידי הוצאת פחמן מהאטמוספירה והעברתו לעומק האוקיינוס, באמצעות חלקיקים שוקעים. קריל באנטרסקטיקה חיים באוקיינוס הדרומי, ומתאספים בנחילים עצומים. הם מייצרים כמויות גדולות של צואה ששוקעת מהר (ונקראת "fecal strings", או "מיתרים צואתיים"), כלומר מתחת לנחילים האלה מתקבל גשם של צואה, אשר לוקח פחמן מהר לעומק האוקיינוס. חישובנו כיצד קריל מפחיתים את כמות הפחמן באטמוספירה על ידי הערכת כמות הקריל שישנם, וכמות המיתרים הצואתיים שכל אחד מייצר. החישובים האלה מגלים שקריל באנטרסקטיקה, שחיים ליד קרח הים, מסירים 39 מיליוני טונות של פחמן מפני השטח של האוקיינוס בכל שנה - זה בערך המשקל של 100 מיליון דובי קוטב! פרט לכך שקריל מהווים מקור מזון ללווייתנים ולפינגווינים, הם משמשים מהנדסים חיוניים עבור האקלים שלנו, ולכן חשוב להגן עליהם.

חיים באוקיינוס - ספוג ביולוגי לפחמן

האוקיינוסים שלנו אינם רק מגרש משחקים נפלא שבו אנו יכולים לשחות ולעשות פעילויות מהנות שונות, אלא הם גם ממלאים תפקיד חשוב באקלים שלנו. מלאים בחיים מדהימים,

פיטופלנקטון (Phytoplankton)

אצות מיקרוסקופיות
דמויות צמחים.

זואופלנקטון (Zooplankton)

חיות שיש להן תנועות שחייה
חלשות, ולכן הן נסחפות עם
הזרמים שמונעים על ידי
האוקיינוס או הרוח.

מיתר צואתי (Fecal String)

סוג של צואה שמוצרת על ידי
חיות כמו קריל אנטרקטי, שמכילה הרבה מזון מעובד
חלקית בתוך ממברנה צינורית,
ולעיתים קרובות עשירה בפחמן.

קריל באנטרקטיקה (Antarctic Krill)

סרטנאים שוחים שחיים במים
שמקיפים את אנטרקטיקה.

הצמחים הזעירים (פיטופלנקטון) של האוקיינוס אחראים לחמצן שאנו נושמים! למעשה, ללא חיים באוקיינוס, רמות הפחמן הדו-חמצני היו גבוהות בכ-50% ממה שהן היום [1]. ממש כמו עצים ביבשה, פיטופלנקטון באוקיינוס לוקחים פחמן דו-חמצני ומשתמשים באור השמש במטרה לייצר את המזון שהם צריכים כדי לשרוד. בעודם עושים זאת, פחמן ננעל בתאי הצמחים, שבתורם נאכלים על ידי חיות ימיות כמו למשל זואופלנקטון וקריל. כמו כל החיות ביבשה, חיות ימיות לא משתמשות בכל המזון שהן אוכלות, והמזון שבו הן לא משתמשות מועבר שוב החוצה כצואה! הצואה שלהן (שנקראת **מיתרים צואתיים**) היא כמו טורפדו (טילי נפץ) זעירים שמלאים בפחמן, וכשהם שוקעים באוקיינוס הם לוקחים איתם את אותו הפחמן, ונועלים אותו הרחק מהאטמוספירה. אלה הן חדשות טובות לגבי הפחתה בפחמן הדו-חמצני באטמוספירה שלנו!

לרוע המזל, ישנן חיות רבות במעמקי האוקיינוס אשר מחפשות חטיפים טעימים שמניחים מלמעלה. המיתרים הצואתיים מהקריל, כמו גם שאריות של חיות מתות וצמחים ימיים, שוקעים דרך האוקיינוס ונבלעים ברובם על ידי חיות לאורך הדרך. משמעות הדבר היא שרק 1% מהחלקיקים השוקעים מגיע אל קרקעית הים. ברגע שהם בקרקעית הים, הפחמן שבחלקיקים האלה יכול להיקבר ולהינעל שם למשך מיליוני שנים במשקעים ובאבנים. ככל שהחלקיקים שוקעים מהר יותר, כך יש להם פחות זמן להיאכל על ידי חיות במעמקי האוקיינוס, ולכן יותר פחמן מגיע לקרקעית הים. ככל שאנו מקבלים יותר פחמן במשקעים, כך יש פחות פחמן באטמוספירה, שזה מצוין לאקלים שלנו! מתברר שלא כל החיות זהות במה שנוגע למהירות השקיעה של צואתן!

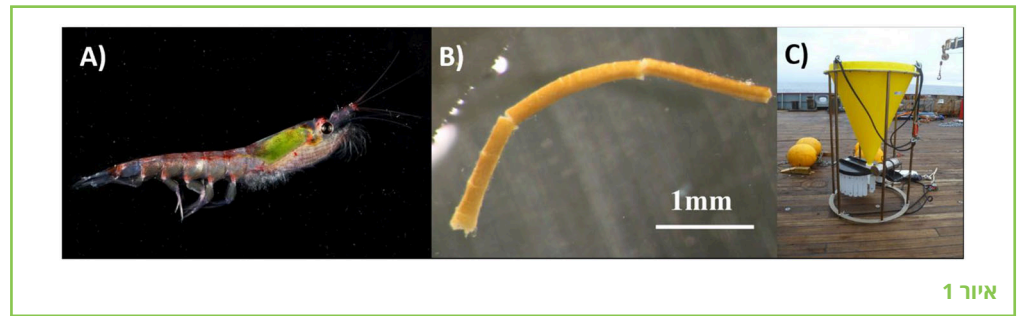
צואת קריל: אלופי השקיעה האולימפיים

קריל באנטרקטיקה הם סרטנאים שוחים (חלק ממשפחה של חיות כמו סרטנים, לובסטרים ושרימפס) שיכולים לגדול לאורך של כשבעה סנטימטרים, ויכולים לחיות עד ל-חמש-שש שנים בטבע (איור 1A). הם נמצאים רק באוקיינוס הדרומי, החלק הגדול של האוקיינוס שמקיף את אנטרקטיקה. קריל הם שחינים מעולים, והם יכולים לשחות כנגד חלק מזרמי האוקיינוס החזקים בעולם. למעשה, קריל מעולם לא מפסיקים לשחות כל חייהם. זה דורש כמות אדירה של אנרגיה, שאותה הם צריכים לתדלק על ידי אכילת כמות מזון של עד 10% ממשקל גופם כל יום – כמות השווה ל-12 ארוחות ביום של בני אדם! אולם במקום המבורגרים וצ'יפס, מזון קריל הוא בעיקר צמחי, במיוחד סוג של פיטופלנקטון שנקרא צורניות, שהן מלאות באנרגיה ובשומנים מזינים.

כל האכילה הזו מייצרת צואה רבה. אחד הדברים המדהימים לגבי קריל הוא שהצואה שלהם מיוצרת בשרשראות ארוכות שנקראות מיתרים צואתיים (איור 1B), שיכולים לשקוע מהר באוקיינוס, בקצבים של מאות מטרים ביום. לא בדיוק המהירות של אצנים אולימפיים, אולם הם היו זוכים במדליה בכל תחרות של שקיעת צואה. באזורים מסוימים באוקיינוס הדרומי, אנו מוצאים הרבה מיתרים צואתיים של קריל במלכודות האיסוף שאנו משאירים באוקיינוס. אנו ממקמים את המלכודות האלה על פני קו ארוך שבדרך כלל מעוגן לקרקעית הים. המלכודת היא תעלה גדולה שתופסת את החלקיקים ששוקעים למטה, ואוספת אותם בכוסות דגימה בתחתית (איור 1C). לעיתים הדגימות יכולות להיות מלאות בעיקר מיתרים צואתיים של קריל,

איור 1

(A) קריל באנטרקטיקה (אורך כולל מהעין לזנב - 60 מילימטרים). (B) האלוף האולימפי של השקיעה: צואת קריל הם קומפקטיים, וצורתם מייצרת התנגדות מעטה לזרימה, לכן הם שוקעים מהר באוקיינוס. לעיתים קרובות הם יוצרים שרשראות ארוכות, כפי שניתן לראות בתמונה. (C) אחת המלכודות שמשמשות לתפיסת צואה שוקעת.



איור 1

ואנו חושבים שהסיבה לכך היא שהיו מיליוני קריל באזור השחייה שמעל למלכודת, בקבוצה גדולה שנקראת נחיל.

נחילי קריל - יתרון הגודל

אחד הדברים המרתקים לגבי קריל, ומה שהופך אותם לטובים אפילו יותר בהעברת פחמן למעמקי האוקיינוס, הוא שהם מבליים עם מיליונים מחבריהם בנחילים. חלק מהנחילים האלה עצומים, ויכולים להתפרש על פני אזורים של כ-100 קמ"ר [2], שזה בערך הגודל של האי ג'רזי בבריטניה. קריל מעדיפים להיות בנחילים מאשר לשחות לבד, ונראה כי ככל שהנחיל גדול יותר כך טוב להם יותר. כ-90% מכל הקריל שחיים באוקיינוס הדרומי מצויים במספר יחסית קטן של נחילים גדולים [3]. התנהלות בנחיל מספקת הגנה מהרבה טורפים שאוכלים קריל, כמו למשל פינגווינים, אריות ים ולווייתנים. זוהי גם דרך טובה יותר למצוא טלאים גדולים (פריחות) של מזון הפיטופלנקטון שלהם, שמפוזר לרוחק ולרוחב באוקיינוס - הרבה זוגות עיניים (ואנטנות) טובים יותר מאחד. הנחילים הנדירים אך העצומים האלה חשובים מאוד לא רק עבור חיי פרא באוקיינוס הדרומי שניזונים מהם, אלא גם להעברת פחמן לעומק האוקיינוס, מאחר שהרבה קריל משמעותו הרבה צואה שוקעת!

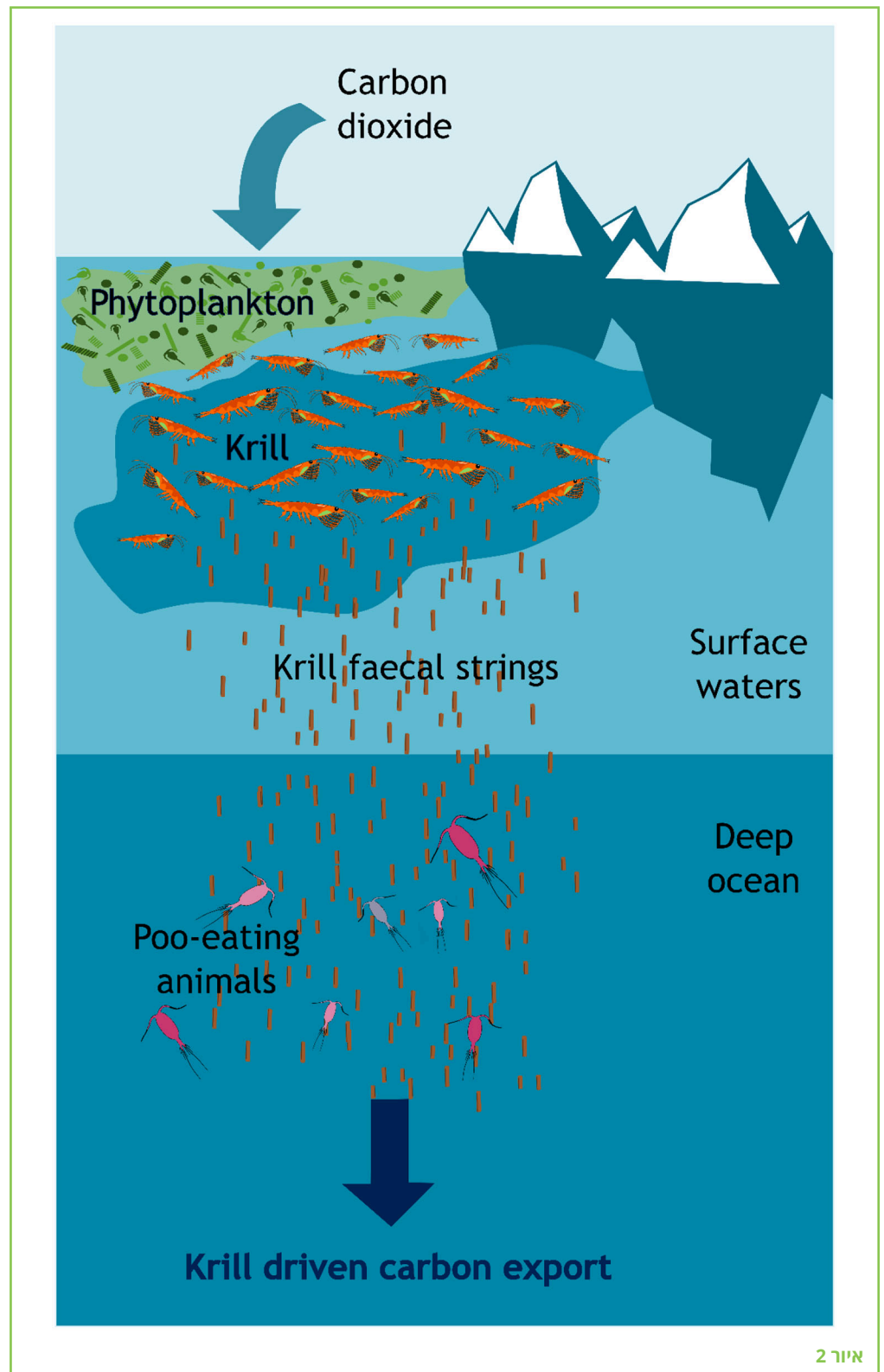
הכביש המהיר של פחמן הקריל

נחילי קריל גדולים שוחים דרך האוקיינוס, ניזונים מכל הפריחות של פיטופלנקטון שחוצות את דרכם. המספר האדיר של קריל בנחילים האלה משמעותו שבמהלך ההזנה המאסיבית הזו, אנו מקבלים מספרים גדולים של מיתרים צואתיים שיוורדים למטה אל מתחת לנחיל. הכמות הגדולה של מיתרים צואתיים משמעותה שאין סיכוי שהחיות אוכלות הצואה (כמו למשל דגים וזואופלנקטון) שמתחתם יוכלו לעמוד בקצב האספקה - זה כמו להיות בבר סושי ולנסות לאכול את הצלחות הגדולות של מזון, בזמן שהן מגיעות הרבה יותר מהר מהקצב הנורמלי! כאשר אוכלי הצואה האלה הלומים, מרבית המיתרים הצואתיים לא נאכלים, שוקעים אל מעמקי האוקיינוס ולוקחים איתם את הפחמן (איור 2).

פחמן רב יכול להגיע אל עומק האוקיינוס כאשר נחילים של קריל ניזונים מפיטופלנקטון ליד פני השטח, ומייצרים מספרים גדולים של מיתרים צואתיים ששוקעים מהר. עשויים להיות הרבה מיתרים צואתיים שלא כולם יכולים להיתפס על ידי חיות אוכלות צואה שחיות עמוק יותר באוקיינוס. משמעות הדבר היא שהרבה מהם יכולים להגיע אל מעמקי האוקיינוס, ולקחת איתם פחמן רב.

איור 2

הנתיב המהיר של הפחמן
בצואת קריל.



מאחר שנחילי הקריל כל כך מעטים ורחוקים זה מזה, קשה מאוד לתפוס את אירועי השקיעה האלה, אולם אנו חושבים שהם יכולים להעביר הרבה פחמן למעמקי האוקיינוס [4]. רצינו למצוא דרך להעריך כמה מיתרים צואתיים מיוצרים, כך שנוכל לחזות כמה פחמן הם מוציאים מפני השטח של האוקיינוס. התמקמנו במיוחד באזור באוקיינוס הדרומי שנקרא **אזור הקרח**

אזור קרח שולי (MIZ - Marginal Ice Zone)

אזור המעבר בין אזור הקרח לים הפתוח, שבו ישנן כמויות משתנות של קרח ושל מים פתוחים.

השולי (MIZ - marginal ice zone). ה-MIZ הוא המקום שבו קרח הים מתחיל להיפתח אל האוקיינוס הפתוח. התמקדנו ב-MIZ מאחר שהתנאים שם מושלמים עבור יצירה של צואה ששוקעת מהר, היות שישנם שם גם הרבה פריחות פיטופלנקטון וגם מספרים גדולים של קריל. מיקום ה-MIZ משתנה מעונה לעונה, מאחר שכיסוי הקרח גדל בחורף ונמס חזרה בקיץ. כחלק מהחישוב שלנו, השתמשנו בתמונות לוויין כדי לפענח את גודל ה-MIZ לאורך מסלול של שנה טיפוסית (איור 3).

השלב הבא היה לקבוע כמה קריל חיים ב-MIZ. במהלך העשור האחרון בוצעו מדידות רבות של כמויות קריל באוקיינוס הדרומי, כשרובן השתמשו ברשתות שקשורות מאחורי ספינות [5]. אנו אספנו את כל הרישומים הזמינים של תפיסות ברשת שבוצעו באזורי MIZ, והערכנו את כמות הקריל באזורים האלה במהלך שנה טיפוסית.

החלק האחרון של החישוב היה לפענח כמה מיתרים צואתיים קריל ממוצע מייצר. השתמשנו במידע מכמה צוותים מדעיים שונים שהאכילו קריל בשבי, ואז מדדו את כמות המיתרים הצואתיים שהם ייצרו, גודלם ומהירות השקיעה שלהם [6].

באמצעות חיבור פיסות המידע האלו יחד, היינו מסוגלים להעריך כמה מיתרים צואתיים הגיעו בהצלחה מחוץ לפני השטח של האוקיינוס, וחשוב יותר מכך, כמה פחמן הם לקחו איתם. ההערכה הטובה ביותר שלנו היא שקריל באנטרקטיקה שחיים ב-MIZ מעבירים 39 מיליוני טונות של פחמן בשנה אל מעמקי האוקיינוס דרך הצואה שלהם. זוהי הערכת מינימום, מאחר שקריל רבים חיים באזורים אחרים מעבר ל-MIZ. בכל זאת, הערכת המינימום הזו מציעה שקריל באנטרקטיקה מעבירים כמות פחמן בצואתם כמו כל הפחמן שנפלט מכל המכונות, האוטובוסים, הרכבות ואפילו המטוסים שטסים בתוך בריטניה! לכן, אכלני הפיטופלנקטון החברותיים והרעבים האלה הם גם מהנדסי אקלים חשובים, באמצעות מה שהם חייבים לעשות בכל יום – לשחרר צואה.

קריל והאקלים שלנו

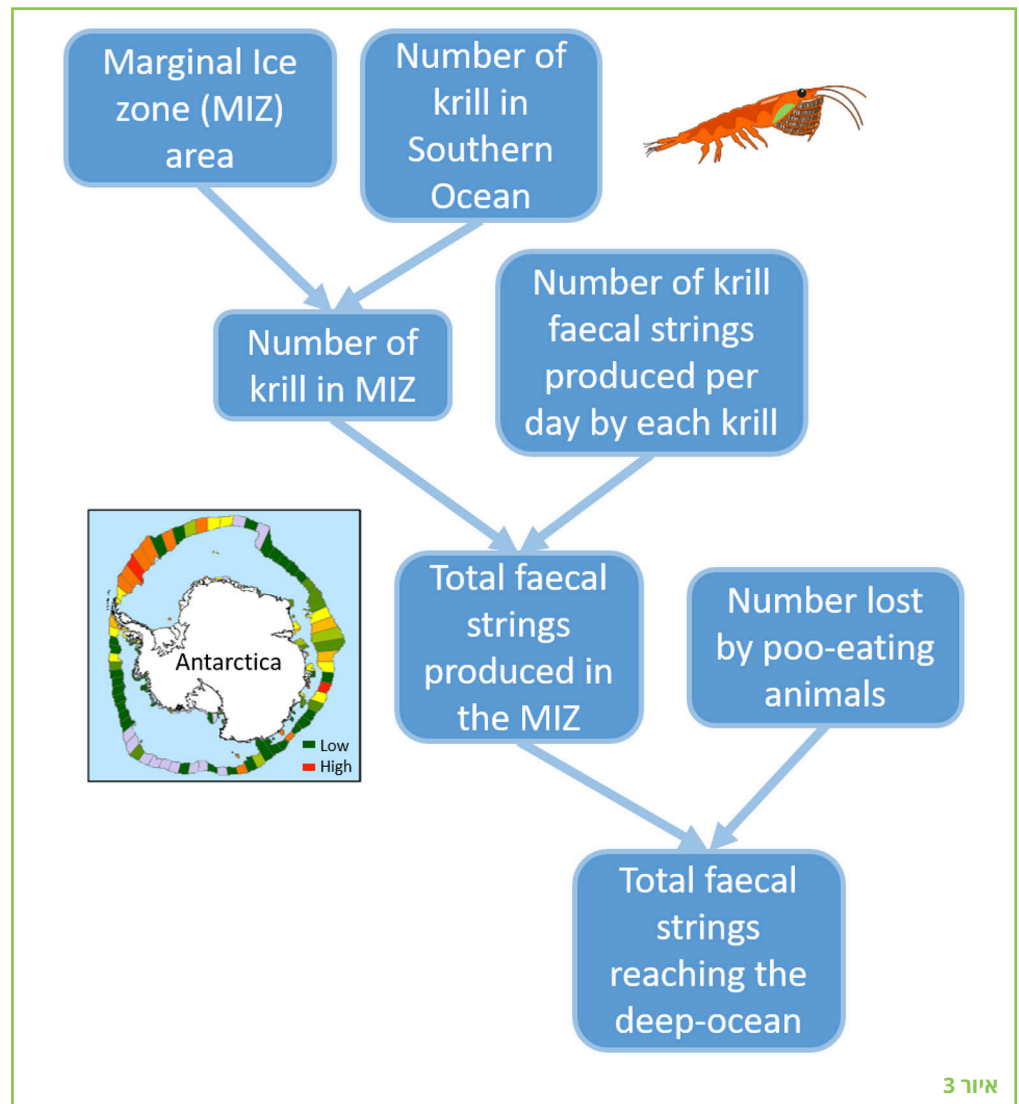
ברגע שצואה, מקריל או מכל חיה או דג אחרים, מגיעה למעמקי האוקיינוס, היא תישאר שם במשך 10, 100, או אפילו 1,000 שנים! זה חשוב מאוד לאקלים, מאחר שזה אומר שפחמן ננעל במעמקי האוקיינוס ולא יכול לחזור לאטמוספירה כפחמן דו-חמצני, אשר גורם להתחממות המהירה של כדור הארץ. עשוי להיות קשה לחקור חיות באוקיינוס, ואנו רק מתחילים ללמוד כמה חשובה הצואה שלהם. לכן, אנו צריכים להיזהר ביחס למה שאנו לוקחים מהאוקיינוס, וביחס להשפעה שיש לנו על חברות באוקיינוס, לא רק מאחר שקריל מהווים מקור מזון חשוב לחיות רבות, אלא גם מאחר שצואתם עשויה להיות חשובה לאקלים! אז בפעם הבאה שאתם נמצאים בסערה, היו אסירי תודה שאלו רק מים (ולא צואה) שנופלים על ראשיכם!

תודות

אנו רוצים להודות לקורא הצעיר שלנו, ארון טארלינג, על קריאה מהותית של כתב היד הזה.

איור 3

צעדים במודל שמטרתו להעריך את מספר המיתרים הצואתיים של קריל שמגיעים בהצלחה אל מחוץ לפני השטח של האוקיינוס ולוקחים פחמן אל קרקעית הים. זה שומר על הפחמן מחוץ לאטמוספירה שלנו! המפה משמאל מראה היכן מצאנו את הכמויות הגדולות (באדום) והקטנות (בירוק) של קריל באזור הקרח השולי סביב לאנטרקטיקה. הצעדים (מלעלה למטה, משמאל לימין): אזור הקרח השולי (MIZ); מספר הקריל באוקיינוס הדרומי; מספר הקריל ב-MIZ; מספר המיתרים הצואתיים שמוצרים על ידי קריל בכל יום; כמות המיתרים הצואתיים הכוללת שמוצרת ב-MIZ; כמות המיתרים שנאבדים על ידי חיות שאוכלות צואה; כמות המיתרים הצואתיים הכוללת שמגיעה למעמקי האוקיינוס.



מאמר המקור

Belcher, A., Henson, S. A., Manno, C., Hill, S. L., Atkinson, A., Thorpe, S. E., et al. 2019. Krill faecal pellets drive hidden pulses of particulate organic carbon in the marginal ice zone. *Nat. Commun.* 10:889. doi: 10.1038/s41467-019-08847-1

מקורות

1. Parekh, P., Dutkiewicz, S., Follows, M. J., and Ito, T. 2006. Atmospheric carbon dioxide in a less dusty world. *Geophys. Res. Lett.* 33:L03610. doi: 10.1029/2005GL025098
2. Tarling, G. A., and Fielding, S. 2016. "Swarming and behaviour in Antarctic krill," in *Biology and Ecology of Antarctic Krill*, ed V. Siegel (Cham: Springer). p. 279-319. doi: 10.1007/978-3-319-29279-3_8
3. Tarling, G. A., Klevjer, T., Fielding, S., Watkins, J., Atkinson, A., Murphy, E., et al. 2009. Variability and predictability of Antarctic krill swarm structure. *Deep Sea Res. Part I*

56:1994–2012. doi: 10.1016/j.dsr.2009.07.004

4. Belcher, A., Henson, S. A., Manno, C., Hill, S. L., Atkinson, A., Thorpe, S. E., et al. 2019. Krill faecal pellets drive hidden pulses of particulate organic carbon in the marginal ice zone. *Nat. Commun.* 10:889. doi: 10.1038/s41467-019-08847-1
5. Atkinson, A., Hill, S. L., Pakhomov, E. A., Siegel, V., Reiss, C. S., Loeb, V. J., et al. 2019. Krill (*Euphausia superba*) distribution contracts southward during rapid regional warming. *Nat. Clim. Change* 9:142–7. doi: 10.1038/s41558-018-0370-z
6. Clarke, A., Quetin, L. B., and Ross, R. M. 1988. Laboratory and field estimates of the rate of faecal pellet production by Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Mar. Biol.* 98:557–63. doi: 10.1007/BF00391547

פורסם אונליין: 29 בספטמבר 2022

נערך על ידי: Laura Lorenzoni

מנחה מדעי: L Allen-Jacobsons

ציטוט: Belcher A, Cavan EL and Tarling GA (2022) תרומתם של נחילי קריל לאקלים הגלובלי. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.518995-he

Belcher A, Cavan EL and Tarling GA (2020) Why Krill Swarms Are **תורנם והותאם:** Important to the Global Climate. *Front. Young Minds* 8:518995. doi: 10.3389/frym.2020.518995

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

COPYRIGHT © 2020 © Belcher, Cavan and Tarling. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). 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

ST. MARY'S HIGH SCHOOL, גיל: 14

St. Mary's הוא בית ספר קתולי שמכין לקולג' ומפתח תלמידים בכיתות ו-יב מיותר מ-30 קהילות בחוף הצפוני של בוסטון. הוא מעצב נשים וגברים אותנטיים, בעלי כשרון ואמונה. הקורס היוקרתי בבילוגיה מתמקד בפיתוח כישורי חקירה מדעיים שיכולים להיות מיושמים בחוויות האקדמיות של התלמידים. הייתה זו חוויה מדהימה עבור התלמידים שלנו לרכוש ניסיון ישיר בתהליך הסקירה, ואנו נרגשים מאוד לראות את התוצר הסופי.



הכותבים

ANNA BELCHER

אני מדענית ימית במכון המחקר אנטרקטיקה הבריטית בקיימברידג', בריטניה. אני מתעניינת מאוד באופן שבו חיים באוקיינוס מעורבים במחזור הפחמן הגלובלי, וכיצד הם מסייעים להסיר פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה. בפרט, אני חוקרת דגי קריל באנטרקטיקה, דגים שחיים באוקיינוס החשוך, ואת החשיבות של מזון ששטרגליים אוכלים עבור בילוי החורף שלהם בעומק האוקיינוס. כשאני במשרד או אוספת נתונים בים, אני מבלה את זמני בטיפוס על סלעים, ברכיבה על אופניים בשטח ובהנאה מהטבע. *annbel@bas.ac.uk



EMMA L. CAVAN

אני חוקרת כיצד חיות וצמחים שחיים בים ובנהרות מתקשרים עם הסביבה. כיום אני עובדת באימפריאל קולג' בלונדון, ובעבר עבדתי שנתיים באוניברסיטת סוזמניה (אוסטרליה). המחקר הראשון שלי כסטודנטית לדוקטורט היה על חשיבותה של צואת פלנקטון במעגל הפחמן באוקיינוס, ולכן לעיתים קרובות אני מְפַרֶת בתור דוקטור צואת פלנקטון! תחום העניין המדעי העיקרי שלי הוא כיצד שינוי האקלים ישפיע על הסביבה שלנו ועל הבריאות של האוקיינוסים שלנו. בזמני הפנוי, אני נהנית למצוא כל תירוץ להגיע לחוף של בריטניה, לעצור את הכלבה שלי מרדיפה אחרי ציפורים, להירגע על הספה ולהנות מפאב אנגלי קלאסי!



GERAINT A. TARLING

אני אוקיינוגרף ביולוג במכון המחקר אנטרקטיקה הבריטית. אני עובד בשני הקטבים, וסוקר טווח של חיות שמאכלסות את אזורי האור והדמדומים של האוקיינוס. האורגניזמים האלה נעים מזואופלנקטון מיקרוסקופי ועד לדגים שחיים במעמקים, וכוללים גם אורגניזמים ג'לטניים, קריל ופטרופודים (פרפרי ים). אני מתעניין במיוחד באופן שבו הם מתנהגים, ובעיקר בהגירות היומיות שלהם ממעמקי האוקיינוס אל פני השטח של הים. אני גם מתעניין בכמה פחמן החברות האלה מניעות מהחלקים העליונים לחלקים התחתונים של האוקיינוס, ועד כמה זהו תהליך יעיל בפיצוי על פליטות CO₂ של בני אדם. כשאני נמצא במסעות ארוכים לקוטב, אני מעביר את הזמן בנגינה על אקורדיון ובאיתור חיות פרא.



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