

הפחתה, שימוש חוזר ומִחזור באוקיינוס הארקטי באמצעות כוחם של מיקרובים

Birthe Zäncker^{1†}, Rowena F. Stern^{1†}, Elliott L. Price^{1,2}, Michael Cunliff^{1,3}

¹האיגוד לביולוגיה ימית, פליימות', בריטניה

²בית הספר למדעי הסביבה, אוניברסיטת ליברפול, ליברפול, בריטניה

³בית הספר למדעי הביולוגיה והים, אוניברסיטת פליימות', פליימות', בריטניה

סוקרים צעירים

MODBURY
PRIMARY
SCHOOL



גיל: 11-10

האם ידעתם כי מיקרובים, שהם קטנים מכדי להיראות בעין אנושית, עולים בהרבה במספרם ובמשקלם הכולל על כל החיות? מיקרובים שחיים באוקיינוס הארקטי מבצעים תפקידים מפתיעים במִחזור מזון. למרות הטמפרטורות הקרות, מים ארקטיים הם עשירים בחומרי מזון, מה שמאפשר לסוג של מיקרוב שנקרא אצה חד-תאית לגדול בכמויות עצומות. רק מיקרובים שהסתגלו לקור יכולים לשרוד במים שמגיעים לעיתים לטמפרטורות שהן מתחת לנקודת הקיפאון! אצות מיקרוסקופיות משתמשות בפחמן דו-חמצני (CO₂) ובאנרגיית השמש כדי לגדול, מה שמסייע להפחית את כמות הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה. חיות מיקרוסקופיות שנקראות זואופלנקטון אוכלות מיקרובים קטנים יותר. כל המיקרובים מפרישים פסולת ובסופו של דבר מתים. אולם התוצרים האלה אינם מבוזבזים. מיקרובים אחרים שנקראים חיידקים ופטריית הם ממחזרים מומחים, והם מפרקים את האורגניזמים המתים לצורות בסיסיות יותר של אנרגיה כימית שנעשה בה שימוש חוזר על ידי אצות חד-תאיות ומיקרובים אחרים.

מדוע מיקרובים כל כך חשובים?

מיקרובים הם אורגניזמים מיקרוסקופיים שנוצרו מתא בודד. האם ידעתם שליטר אחד של מי ים מכיל מיליארדי מיקרובים [1]? בהתאם לגודלם של האוקיינוסים שלנו, משמעות הדבר היא שישנם פי 100 מיליארד מיקרובים באוקיינוסים מאשר שישנם כוכבים ביקום המוכר! ישנם אלפי סוגי מיקרובים שחוקרים עדיין מגלים. חלקם אוכלי בשר, חלקם אוכלי עשב וחלקם אוכלי כול כמו פטריות, חיידקים, **זואופלנקטון** ופיטופלנקטון. מיקרובים מהווים את בסיס שרשרת המזון, ותומכים בכל האורגניזמים הגדולים יותר פשוט בשל מספרם. מיקרובים ימיים מהווים עד ל-70% ממסת היצורים החיים בכל האוקיינוסים! [2]

מיקרובים לא רק תומכים בכל החיים כפי שאנו מכירים אותם, אלא שהם גם ממלאים תפקיד חשוב בסיפוק מחצית מהחמצן שאנו נושמים ובוויסות האקלים של כדור הארץ. חלק מהמיקרובים קולטים פחמן דו-חמצני באטמוספירה, גז שיכול לכלוא חום באטמוספירה שלנו ולתרום להתחממות הגלובלית. הודות למיקרובים, משקעי האוקיינוס העמוק מכילים כמעט מחצית מכמות הפחמן דו-חמצני באטמוספירה. פחמן דו חמצני שכלוא בעומק האוקיינוס לא יכול לתרום להתחממות הגלובלית, ולכן קליטת פחמן דו חמצני על ידי האוקיינוסים טובה לכדור הארץ. קליטת הפחמן הדו חמצני אינה זהה ברחבי כל האוקיינוסים. האוקיינוס הארקטי נוטה לקלוט כמויות גדולות במיוחד של הגז הזה. חרף החשיבות של האוקיינוס הארקטי עבור ויסות הפחמן הדו חמצניבסביבתנו, אנו יודעים מעט מאוד על האוקיינוס הזה.

מדוע אנו יודעים כל כך מעט על החיים באוקיינוס הארקטי?

למידה על האוקיינוס הארקטי ועל האורגניזמים שחיים שם היא קשה מאוד מאחר שהאוקיינוס הזה אינו נגיש ברובו. במשך רוב השנה קרח עבה מונע מספינות מלהיכנס, ומזג האוויר קשה מדי לביצוע הניסויים שלנו. בשל כך, אנו רואים רק תמונות בודדות של התהליך שמתרחש באוקיינוס הארקטי, בעיקר בחודשי הקיץ. התנאים באוקיינוס הארקטי הם עוינים, עם חורפים ארוכים וקפואים, וקיצים קרים. טמפרטורות האוויר הממוצעות בחורף יכולות להגיע ל-34- מעלות צלזיוס, ולעלות עד ל-10 מעלות צלזיוס בקיץ, אף על פי שטמפרטורת האוקיינוס נשארת יציבה בסביבות 1.5- עד 3- מעלות. הרבה מהמים כלואים בתור קרח. כתלות בכמה צפופות אתם נמצאים, יכולה להיות תקופה של עד חצי שנה של חושך מוחלט במהלך החורף, או 24 שעות של אור יום במהלך הקיץ.

הרבה מיקרובים חיים ב- או מחוברים אל- האזור שמתחת לקרח הים. הקרח שנוצר על האוקיינוס הארקטי אינו מוצק כפי שאתם עשויים לחשוב (איור 1). הרבה נתיבי מים קטנים חוזרים את הקרח. הנתיבים האלה נושאים מים מאוד מלוחים, והם נקראים brines. הרבה מיקרובים, כולל **אצות**, פטריות וחיידקים, חיים ואוכלים באזורי ה-brines.

כאשר מדענים מקבלים אפשרות נדירה להגיע לאוקיינוס הארקטי על ספינות מחקר שוברות-קרח גדולות, הם צריכים להכין את עצמם ביסודיות עבור התנאים העוינים (איור 2). נדרשים בגדים עבים, והמדענים והצוות צריכים להגן על עצמם מאור השמש הקשה על ידי הרכבת משקפי שמש מתאימים ושימוש בקרם הגנה. אפילו עם כל אמצעי הזהירות, המדענים עדיין צריכים לעשות הפסקות מעבודה על הקרח או על הסיפון.

מיקרובים (Microbes)

מגוון אורגניזמים חד-תאיים כולל אצות, חיידקים, וירוסים ופטריות. אצות יכולות להשתמש בפוטוסינתזה כדי ליצור חומרי מזון מורכבים כמו סוכרים מאור השמש ופחמן דו-חמצני (CO₂). מיקרובים אוכלי בשר מסייעים למחזור חומרי מזון.

זואופלנקטון (Zooplankton)

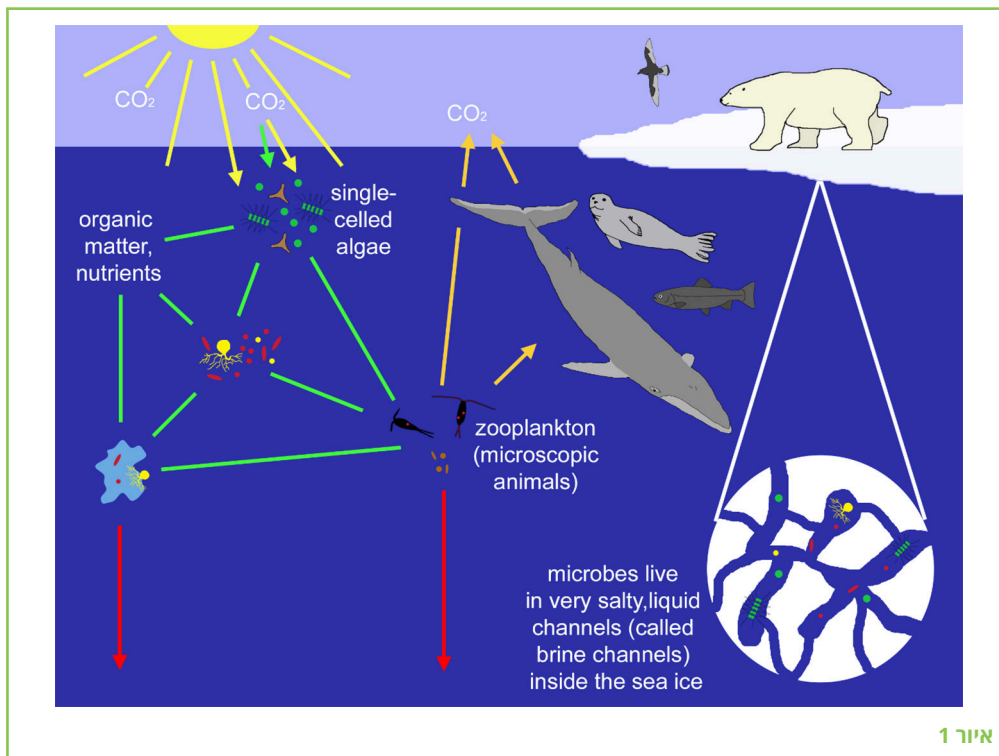
חיות מיקרוסקופיות שאוכלות מיקרובים. זואופלנקטון הם צרכנים ראשיים.

אצה (Algae)

אצות הן צמחים שחיים במים. הן יכולות לבוע מאורגניזמים חד-תאיים (ראו מיקרובים) ועד לצמחים ענקיים שגובהם כמה מטרים. ממש כמו בצמחים על היבשה, הם זקוקים לאור שמש כדי לשרוד.

איור 1

שרשרת מזון טיפוסית באוקיינוס הארקטי. החיצים והקווים מראים קשרים בין חיות, מיקרובים ובין המזון/חומרי מזון שהם צורכים. הלולאה המיקרובית (□) מתחילה עם יצרנים ראשוניים שמייצרים חומר אורגני. הפחתת הפחמן (→) מראה פסולת מזון או חומר שהופרש ושוקע לקרקעית האוקיינוס. חלקיקי אקזופולימר שקופים (TEP) מסייעים עם הפחתת הפחמן ומהווים מקור מזון למיקרובים, מה שמחזור אנרגיה אל תוך הלולאה המיקרובית. צרכנים ראשוניים כמו זואופלנקטון ניזונים ממיקרובים, בתורם נאכלים על ידי חיות גדולות יותר ומעבירים את האנרגיה לטורפי-העל (→) הערה: האורגניזמים לא בסקאלה האמיתית.



איור 1

אם כן, מה המשמעות של התנאים הקשים האלה על מיקרובים שצריכים לחיות באוקיינוס הארקטי כל השנה? מיקרובים רכשו כמה אסטרטגיות הישרדות כדי לשרוד את הקור, כמו למשל ליצור מולקולות שנוגדות קפיאה במטרה למנוע היווצרות של קרח בתוכם, מה שאחרת יכול לגרום להם להתפוצץ. תאי אצות מכילים שומנים שמסייעים להם לצוף על פני השטח כדי לכלוא את אור השמש החלש במהלך עונת החורף. מיקרובים אחרים נכנסים למצב של היברנציה (תרדמת), באופן דומה לדובים. בסתיו ובקיץ, מיקרובים גדלים ומתרבים לכמויות גדולות מאוד במהירות רבה.

כיצד מיקרובים ארקטיים מפחיתים, ממחזרים ומחליטים כמה פחמן דו חמצני מהאטמוספירה יגיע למשקעים, כמה קילומטרים מתחת לפני השטח של האוקיינוס?

אצות חד-תאיות נקראות **יצרנים ראשוניים** מאחר שהן יכולות לחיות ישירות מאור השמש ללא סיוע של חיות או צמחים אחרים. דרך תהליך של **פוטוסינתזה**, האצות האלה יכולות ליצור סוכרים ותרכובות אחרות מפחמן דו חמצני, באמצעות מים ואור שמש. כל האורגניזמים האחרים תלויים באצות האלה כמקור מזון. זואופלנקטון הם **צרכנים ראשוניים**, מה שאומר שהם אוכלים ישירות את האצות, היצרנים הראשוניים (במקום לאכול חיות אחרות), והם גדלים בהמוניהם. לוויתנים, אריות ים ודגים אוכלים זואופלנקטון, ולבסוף, טורפי-על כמו למשל דובי קוטב ניזונים מהדגים ומאריות הים.

איור 1 מראה סיכום של שרשרת מזון ארקטית טיפוסית.

יצרן ראשי

(Primary Producer)

יצרנים ראשיים יכולים להשתמש ישירות באנרגיה של השמש או של כימיקלים, ולהשתמש באנרגיה הזו כדי ליצור אבני בניין של תאים כמו למשל סוכרים וחומרי מזון אחרים.

פוטוסינתזה

(Photosynthesis)

צמחים יכולים להשתמש באנרגיה מאור השמש. בעזרת סיוע של אור השמש הם לוקחים מים, פחמן דו-חמצני ומינרלים ומייצרים חמצן וסוכרים שנדרשים לגדילת התא. התהליך הזה נקרא פוטוסינתזה.

צרכן ראשי

(Primary Consumer)

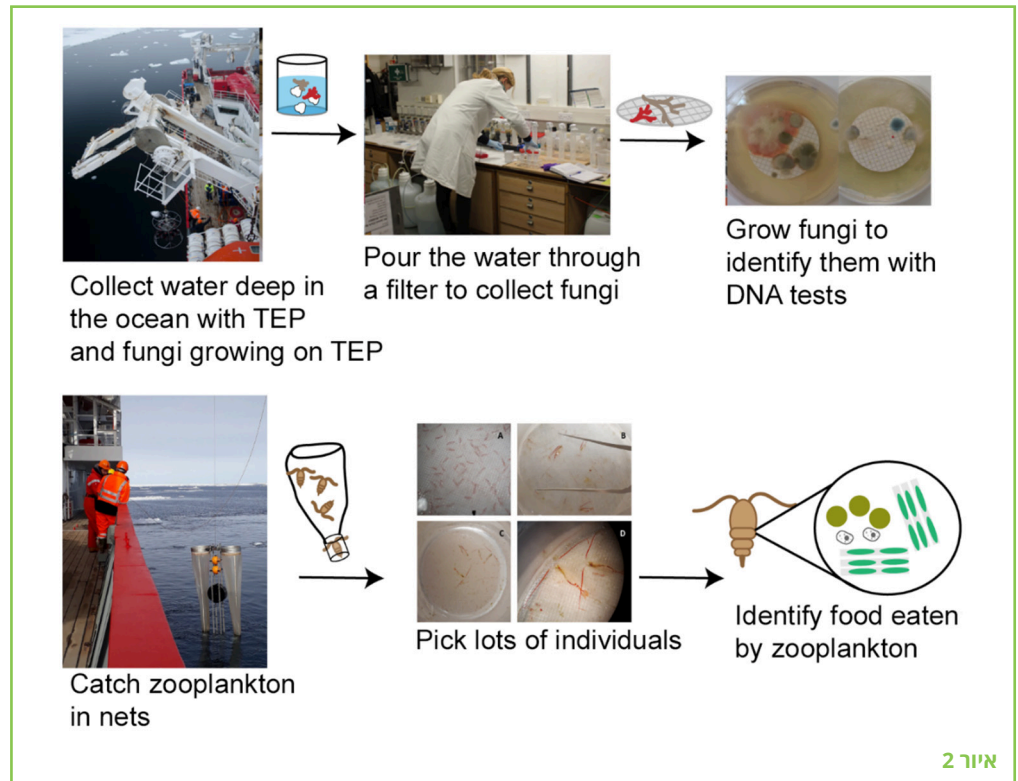
צרכן ראשי שאוכל יצרנים ראשיים.

איור 2

כיצד אנו חוקרים מיקרובים באוקיינוס הארקטי על ספינת

James Clark Ross

Birthe Zäncker (למעלה)
 מוצא אלו סוגי פטריות חיים על חלקיקי אקזופולימר שקופים (TEP) וכיצד הם תורמים להנעת פחמן אל תוך מעמקי האוקיינוס. (למטה)
 Elliott Price משתמש במבחני מעבדה מיוחדים במטרה לזהות איזה זואופלנקטונים אכלו ואלו חומרי מזון הם קיבלו (התמונות באדיבות E. Price, R. Jeffries, J. Hopkins, B. Zäncker, L. Norman, D. Conway-I)



אולם לא כל המזון נאכל, ושאריות המזון הופכות לפסולת. נוסף על כך ממש כמונו, למיקרובים יש צואה. כל הפסולת הזו לא יכולה פשוט להישטף באסלה. מיקרובים מסייעים עם היפטורות מפסולת, במיוחד בקיץ כאשר הגדילה בשיאה. מיקרובים מתמחים, כמו למשל חלק מהחיידיקים ומהפטריות, יכולים לפרק שאריות מזון לחלקיקים קטנים שמכילים חומרי מזון חיוניים. החלקיקים האלה יכולים להיאכל על ידי מיקרובים אחרים, כמו למשל אצות, כך שכל התהליך יכול להתחיל מחדש, ולכן חומרי המזון נמצאים בשימוש חוזר ומפחיתים את הפסולת ששוקעת לקרקעית האוקיינוס.

מה לגבי הפחמן הדו חמצני שמוצר על ידי מיליוני מיקרובים כתוצר פסולת? הוא ממוחזר על ידי אצות כשהן גדלות ומבצעות פוטוסינתזה. הרווח או ההפסד הכולל של פחמן דו חמצני במערכת האקולוגית תלוי באיזון שבין יצירתו כתוצר פסולת לבין שימושו בתהליך של פוטוסינתזה.

האם ידעתם שפטריות לא רק גדלות ביערות, היכן שאתם יכולים לראותן גדלות כפטריות על ענפי עצים עתיקים, אלא שהן גדלות גם בשפע באוקיינוס? ממש כמו ביער, פטריות ימיות מסייעות לפרק אורגניזמים מתים ואת תוצרי הפסולת מיצורים חיים. באוקיינוס, צורות של פטריות נעות מתאים פשוטים ועגולים ועד לתאים עם משושים קטנים שנקראים היפות (hyphae; איור 1), שמסייעות לפטריות להתחבר לאורגניזמים ולחלקיקים אחרים.

אולם מחזור הפסולת לא עובד באופן מושלם. הימסות קרח הים גורמת למים להיות קרים ופחות מלוחים. זה מייצר מים דחוסים מאוד ששוקעים לקרקעית האוקיינוס, ולוקחים איתם חלקיקים ואורגניזמים שמושהים במים הקרים לפני שלמיקרובים בפני השטח יש זמן למחזור אותם. כשהם מגיעים לקרקעית עמוד המים, החלקיקים והאורגניזמים האלה נעשים כלואים

הפחתת פחמן (Carbon Drawdown)

התהליך שבו פחמן יורד למטה אל קרקעית האוקיינוס כאשר מזון או חיות שוקעות (מה שנקרא שלג ימי), ומסיר את הפחמן מפני השטח של האוקיינוס.

במשקעים, והם נתקעים שם במשך מיליוני שנים. זה נקרא **הפחתת פחמן** (איור 1). הפחתת פחמן מועילה מאחר שהפחמן נשמר מחוץ לאטמוספירה, ולא כולא את החום סביב לכדור הארץ.

נוסף על מיקרובים ימיים, חוקרים מצאו שחלקיקים דמויי-ג'לי שנקראים חלקיקי אקזופולימר שקופים (TEP) גם ממלאים תפקיד חשוב מאוד בהפחתת פחמן. ה-TEP דביקים מאוד ויכולים לכלוא תאים וחלקיקים אחרים בפני השטח שלהם. הגושים האלה יכולים להיעשות כבדים ולשקוע די מהר למטה אל מעמקי האוקיינוס, מה שמביא מולקולות שמכילות פחמן אל מעמקי האוקיינוס, ותורם לאטמוספירה.

כיצד אנו עוקבים אחרי המְחזור של פסולת מיקרובית באוקיינוס הארקטי?

אנו צריכים להבין כיצד מְחזור של פחמן בשכבת פני השטח של האוקיינוס פועל במטרה לחזות כיצד שינויי האקלים ישפיעו על התהליך הזה בעתיד. שינוי האקלים מתאר את התחממות כדור הארץ. במהלך המאה האחרונה, כדור הארץ התחמם בממוצע ב-0.87 מעלות [3] כתוצאה מעליית פחמן דו חמצני מפעילות אנושית. זה עשוי שלא להיראות הרבה, אולם יש לכך השלכות משמעותיות על החיים, במיוחד באוקיינוס הארקטי שם טמפרטורות חמות יותר גורמות לקרחונים להימס מהר יותר. כשמרבית הקרחונים ייעלמו, האוקיינוס הארקטי יאבד את מקור הקור שלו, מים טריים מהקרח, ובסופו של דבר האוקיינוס הארקטי יעשה חם ומלוח יותר. אנו יודעים שהימסות קרחונים תהיה בעלת השפעה שלילית על כלבי ים ועל דובי קוטב שתלויים בקרח הים כדי לצוד ולגדל צאצאים. באותו הזמן, פחות קרח משמעותו שיותר אור יכול לעבור דרך המים, מה שמאפשר לסוגי אצות חדשים לגדול, לעשות פוטוסינתזה ולהפחית את גדילתם של סוגי אצות חדשים במים חמים יותר עשויה לאזן את אובדן אצות קרח הים.

המידע שאנו אוספים על מיקרובים דרך הניסויים שלנו יאפשר לנו לזהות מה מיקרובים אוכלים ואיזו כמות של חומרי מזון מועברת מאצות ועד לאריות ים. כמות חומרי המזון שחיות גדולות יותר מסוגלות להשיג תקבע כמה טוב הן מסוגלות להסתגל לשינויים באוקיינוס הארקטי.

סיכום

לסיכום, מיקרובים הכרחיים למערכת האקולוגית הארקטית. הם מבצעים תפקודי מפתח כולל סיפוק מזון לאורגניזמים אחרים ומְחזור חומרי מזון לשימוש מחודש על ידי מיקרובים אחרים. המיקרובים מזינים חיות ארקטיות גדולות יותר, מה שמאפשר לחיות לשרוד את התנאים הקשים. מיקרובים מפחיתים ריכוזי פחמן באטמוספירה דרך הפחתת פחמן. זה מסייע להפחית את ההתחממות של כדור הארץ. עדיין איננו יודעים מספיק על מיהם בדיוק המיקרובים האלה, מה הם עושים, או כיצד שינויי אקלים ישפיעו עליהם. העבודה שלנו היא להבין כמה טוב מיקרובים ארקטיים יכולים להסתגל לשינויי אקלים, ואם מיקרובים עתידיים, כבסיס של שרשרת המזון, יספקו יותר או פחות מזון לטורפים, כמו למשל דגים, לווייתנים ודובי קוטב.

מקורות

1. Whitman, W. B., Coleman, D. C. and Wiebe, W. J. 1998. Prokaryotes: The unseen majority. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 95: 6578–83.

2. Bar-On, Y. N., Phillips, R., and Milo, R. 2018. The biomass distribution on earth. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115:6506–11. doi: 10.1073/pnas.1711842115
3. IPCC. 2018. "Summary for policymakers," in *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, eds V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, et al. (Geneva: World Meteorological Organization). p. 32.

פורסם אונליין: 10 ביוני 2022

נערך על ידי: Penelope Kate Lindeque

מנחה מדעי: Katharine Pemberton

ציטוט: Zäncker B, Stern RF, Price EL and Cunliff M (2022) שימוש חוזר ומחזור באוקיינוס הארקטי באמצעות כוחם של מיקרובים. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2020.00090-he

Zäncker B, Stern RF, Price EL and Cunliffe M (2020) Reduce, Reuse, Recycle in the Arctic Ocean With the Power of Microbes. *Front. Young Minds* 8:90. doi: 10.3389/frym.2020.00090

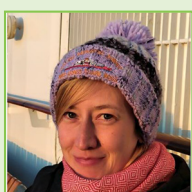
הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2020 © Zäncker, Stern, Price and Cunliff 2022. 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 למחבר(ים) 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

MODBURY PRIMARY SCHOOL, גיל: 10-11

נהנינו מאוד ללמוד על מחקר מדעי בעולם האמיתי ועל האופן שבו הוא חשוב כדי לסייע לנו לטפל בכדור הארץ שלנו. אנחנו Emily, Zoe, Matilda, Jamie, Lizzie, Angus, Maddie, Jay, Jasmine, Tom, Will, Rose, Martha, Ella, Fin, Isaac.



הכותבים

BIRTHE ZÄNCKER

אני עובדת כפוסט-דוקטורנטית באיגוד לביולוגיה ימית בפליימות', בריטניה, ומתמקדת בחיידקים ובפטריות באזורי הקוטב. אני מסתכלת על מה חיידקים ופטריות בים ובקרח אוכלים, וכיצד זה משפיע על מחזור הפחמן. בפרט, אני מתעניינת בחלקיקים דמויי-גלי (TEP) ובמעורבותם בהובלת חומר אורגני. כדי לעשות זאת, אני

זוכה לעשות את מה שאני אוהבת ולהפליג עם ספינות מחקר באוקיינוסים הארקטי והאנטארקטי. כשאיני על ספינה, אני נהנית להיות בטבע וגם לקרוא ולכתוב על מדע ועל האוקיינוסים.



ROWENA F. STERN

אני אקולוגית מיקרובים באיגוד לביולוגיה ימית. קיבלתי תואר בגנטיקה מאוניברסיטת אברדין ודוקטורט בריטולוגיה מאוניברסיטת גלזגו. עבדתי במחקר בתחומי הרפואה והאקולוגיה בבריטניה ובקנדה. אני משתמשת בשיטות גנטיות כדי לזהות מיקרובים מדגימות היסטוריות מהאוקיינוס, מלפני קרוב ל-60 שנה. באמצעות הפרספקטיבה הייחודית ארוכת הטווח הזו, אני מסתכלת על האופן שבו מיקרובים ימיים מגיבים לשינויים סביבתיים במהלך שנים רבות, כמו למשל אלה שנגרמים על ידי שינוי האקלים. *rowena.stern@mba.ac.uk



ELLIOTT L. PRICE

אני אקולוג ימי עם עניין בחקירת ההשפעות של גורמי סטרס על המבנה של רשתות מזון והדינמיקה שלהן. כחלק מקבוצת ARISE בתוך פרויקט Changing Arctic Ocean, אני עובד לקראת הדוקטורט שלי ובוחן את האופן שבו שינוי האקלים העכשווי משפיע על צבירי מזון-זואופלנקטון (זואופלנקטון בגודל בינוני), בעיקר על שטרנגליים, באוקיינוס הארקטי, ועל ההשלכות שעשויות להיות לכך על רשת המזון.



MICHAEL CUNLIFFE

קיבלתי תואר בביולוגיה סביבתית מאוניברסיטת ליברפול, ותארים שני ושלישי במיקרוביולוגיה מאוניברסיטת מנצ'סטר. אחרי פוסט-דוקטורט באוניברסיטת וורוויק, הצטרפתי כחוקר לאיגוד הביולוגיה הימית (MBA) בשנת 2010. מאז 2014, אני חוקר MBA ופרופסור למיקרוביולוגיה ימית. אני מוביל קבוצת מחקר ב-MBA שחוקרת טווח של נושאים בביולוגיה מיקרובית ובאקולוגיה, מאינטראקציות מיקרוב-חסרי חוליות במשקעי חוף ועד לביוגיאוכימיה מיקרובית באוקיינוס הפתוח ובימות הקוטב.

[†]תרומת מחברים אלו למאמר זה היא שווה

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