

## תחתית שרשרת המזון של האוקיינוס הארקטי היא בעלת חשיבות עליונה

Alexander G. Hayward<sup>1,2\*</sup>, Jordan Jack Grigor<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>המחלקה לביוכימיה ימית, המכון הלאומי לחקר מים ואטמוספירה, ולינגטון, ניו-זילנד

<sup>2</sup>האיגוד הסקוטי לחקר הים, אובאן, בריטניה

<sup>3</sup>האגודה הסקוטית למדעי הים, אובן, בריטניה

### סוקרים צעירים

FDR-HB\_PERU  
iGEM TEAM

גיל: 17-14



האקלים של כדור הארץ שלנו מתחמם, והוא משתנה הכי הרבה באזור האוקיינוס הארקטי ובימים שסובבים אותו. התחממות גורמת לשינויים רבים, כולל הימסות של קרח ים וירידה בכמות המים שמכוסים על ידי קרח. השינויים האלה משפיעים על אורגניזמים בכל הרמות של שרשרת המזון. במאמר זה, נסביר כיצד שינויים בטמפרטורה משפיעים על איכות המזון שזמין עבור חיות שחיות באוקיינוס הארקטי. נתמקד בשינויים של תחתית שרשרת המזון, שמערבים צמחים זעירים שחיים בתוך הקרח ומתחתיו, וחיות זעירות שנסחפות בימים הארקטיים. שינויים בשפע של האורגניזמים הקטנים ביותר באוקיינוס הארקטי ובאיכותם, משפיעים על אורגניזמים גדולים יותר, כמו למשל דובי קוטב ולווייתנים. שינויים בבסיס שרשרת המזון צריכים להילקח בחשבון אם אנו רוצים להגן על יצורים שהאוקיינוס הארקטי הוא ביתם.

### כיצד שינויי אקלים משפיעים על האוקיינוס הארקטי

מאז תחילת המהפכה התעשייתית, לפני יותר מ-200 שנים, האקלים של כדור הארץ שלנו השתנה באופן דרסטי. טמפרטורות המריאו בקצב מהיר יותר מכל זמן אחר ב-65 מיליון השנים

האחרונות! בקצה הצפוני והדרומי של כדור הארץ ישנם אזורי קוטב, הארקטי והאנטרקטי. אלה הם האזורים הקרים ביותר בכדור הארץ, שם הטמפרטורות הממוצעות הן הרבה מתחת ל-0 מעלות צלזיוס. בחורף, השכבה העליונה של האוקיינוס קופאת, ויוצרת מה שנקרא "קרח ים". קרח ים יכול לנוע מעובי של דף נייר, שנמס מהר מאוד, ועד לקרח עבה ביותר שמגיע לגובה של שלושה מטרים ויכול לשרוד שנים רבות. לקרח ים יש אפקט של קירור על האקלים, והוא פועל כמו מקרר ששומר על שאר כדור הארץ בטמפרטורות שבהן אורגניזמים יכולים לחיות.

בעוד שהטמפרטורה של כדור הארץ שלנו עלתה, הסביבה הגיבה בדרכים ייחודיות ומדאיגות. באזורי הקוטב, אזורים גדולים של קרח ים נמסים. האזורים שבעבר היו מושלגים ולבנים מותמרים לאזורים גדולים של אוקיינוס כחול פתוח. ההתחממות של אזורי קוטב יצרה הרבה שאלות שדורשות תשובה. אם כן, בואו נסביר את האופן שבו עליית הטמפרטורות יכולה להשפיע על המערכת האקולוגית הימית של האוקיינוס הארקטי.

## מדוע פיטופלנקטון חשובים כל כך?

בבסיס המערכת האקולוגית הימית, אנו מוצאים יצורים דמויי צמח קטנים וחשובים מאוד שנשחפים בכל הימים. היצורים האלה נקראים **פיטופלנקטון**. בשל גודלם המיקרוסקופי, הם נמדדים בסקאלה של מיקרונים ( $\mu\text{m}$ ). מיקרון אחד קטן פי 10,000 מאשר סנטימטר!

באופן טיפוסי, פיטופלנקטון חיים במה שאנחנו מכנים *אזור אפילני*, או במילים פשוטות העומקים שבהם יש מספיק אור לביצוע ה**פוטוסינתזה** שלהם. דרך פוטוסינתזה, הם לוקחים פחמן דו-חמצני ( $\text{CO}_2$ ) מהאטמוספירה ומייצרים חמצן, ממש כמו צמחים על פני היבשה. יחד, כל הפיטופלנקטון באוקיינוסים של העולם מייצרים מחצית מהחמצן של כדור הארץ. זוהי כמות אדירה של חמצן בהתחשב בעובדה שפיטופלנקטון מהווים פחות מ-1% מה**ביומסה** של העולם [1]! בהשוואה, צמחים גדולים כמו עצים מהווים כ-70% מהביומסה הצמחית הגלובלית, ועדיין הם מייצרים אותה כמות חמצן כמו פיטופלנקטון מיקרוסקופיים<sup>1</sup>. כדי להדגים עד כמה פיטופלנקטון איתנים, כדאי לציין שהם היו בסביבה זמן רב. הסימן הראשון לפיטופלנקטון משומר בסלעים במערב אוסטרליה מלפני כ-3.5 מיליארד שנים!

**צורניות** הן הפיטופלנקטון הגדול ביותר באוקיינוס שלנו (איור 1). הן יכולות להיות צמחים מעגליים או מאורכים, והן אחראיות על כמעט 20% מהפוטוסינתזה של כדור הארץ. אף על פי שצורניות חיות בעיקר באוקיינוס הפתוח, הן גם משגשגות במקומות משונים. מסות גדולות של צורניות נמצאות בתוך קרח ים של שני אזורי הקוטב, והן חיות בתוך תעלות קרח נוזליות ומלוחות שיש בהן מספיק חומרי מזון ואור כדי שהן יוכלו לבצע פוטוסינתזה. כאשר צורניות נמצאות בקרח, הן כבר לא מסוגלות כפיטופלנקטון. מאחר שהן מקובעות למקום אחד ולא נסחפות, אנו קוראים להן אצות שחיות בקרח, או פשוט "אצות קרח". לעיתים קרובות הן נכלאות בקרח כאשר השכבה העליונה של האוקיינוס מתחילה לקפוא. כדי למצוא אצות קרח, נקדחות ליבות קרח בקוטר של כ-10 סנטימטרים החוצה מהקרח. איור 2 מראה את התחתית של ליבת קרח שמכילה שפע של אצות בתוכה.

## מי אוכל פיטופלנקטון?

**זואופלנקטון** הם "אנשי האמצע" של האוקיינוס הארקטי, והם מבצעים תפקיד חיוני להפצת חומרי מזון ליצורים ברחבי שרשרת המזון, מאחר שהם נאכלים על ידי טורפים גדולים יותר

### פיטופלנקטון (Phytoplankton)

צמח נסחף  
שמבצע פוטוסינתזה.

### פוטוסינתזה (Photosynthesis)

תהליך שבו צמחים משתמשים  
באנרגיית השמש כדי להמיר  
פחמן דו-חמצני ומים  
לחמצן ולסוכר.

### ביומסה (Biomass)

המשקל הכולל של אורגניזם,  
או של קבוצת אורגניזמים  
באזור מסוים.

<sup>1</sup><https://www.changing-arctic-ocean.ac.uk/>

### צורנית (Diatom)

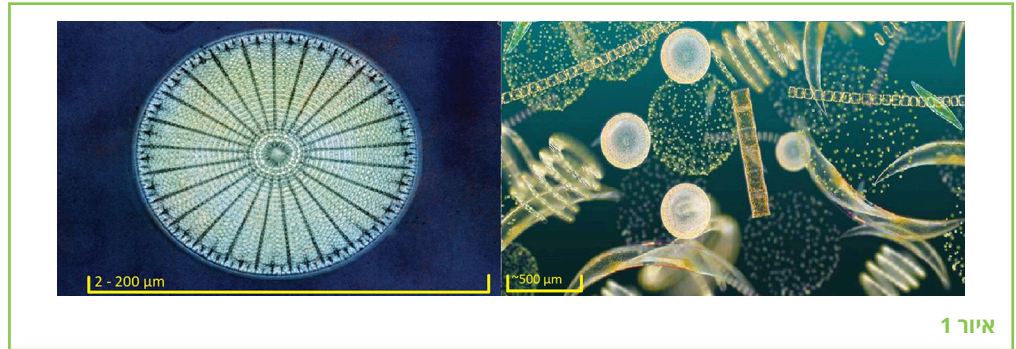
סוג גדול של פיטופלנקטון  
שחשוב כמקור  
מזון לזואופלנקטון.

### זואופלנקטון (Zooplankton)

חיה נסחפת שלא מסוגלת  
לשחות כנגד זרמי האוקיינוס.

**איור 1**

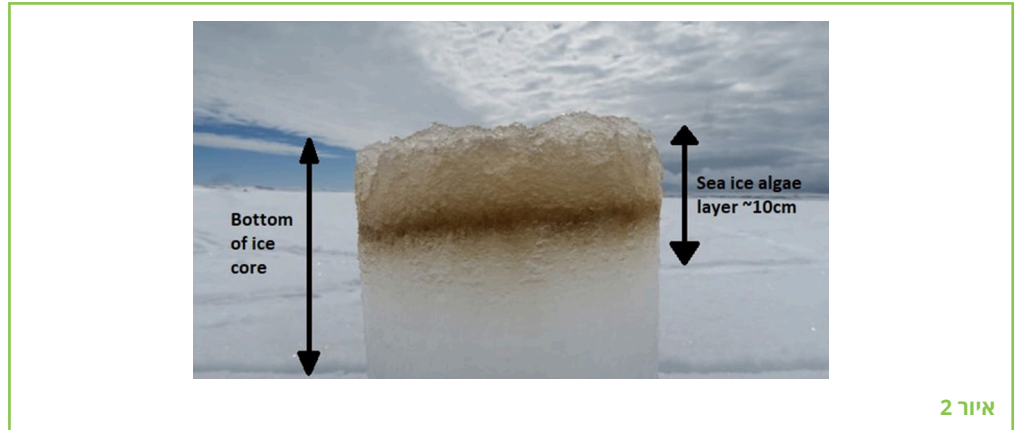
צורנית מעגלית (משמאל)<sup>2</sup>  
וקהילת פיטופלנקטון (מימין)<sup>3</sup>.  
סרגלי הסקאלה הם  
בגודל מקורב.



**איור 1**

**איור 2**

ליבת קרח שמראה אצות קרח  
ים (שכבה חומה בתוך הקרח),  
כולל צורניות, שחיות ב-10  
הסנטימטרים התחתונים  
של הקרח<sup>4</sup>.



**איור 2**

(איור 3). בנקודה מסוימת בחייהם, סרטנים, דגים ותמנונים נסחפים כולם באוקיינוס, ולכן הם נקראים זואופלנקטון. צורניות הן מקור מזון עיקרי של הרבה זואופלנקטון, מאחר שהן מכילות הרבה חומרי מזון שנותנים לזואופלנקטון את האנרגיה ואת החומרים הגולמיים שנדרשים לביצוע פעילויות, כמו למשל גדילה והתרבות.

בזמן שקרח הים נמס בקיץ, חומרי מזון שמאוחסנים בקרח משוחררים חזרה לאוקיינוס. אור נהפך לזמין יותר מאחר שיש פחות קרח ים שמשקף את האור חזרה לאטמוספירה. שינויי האביב האלה מתעדיפים פיטופלנקטון, זואופלנקטון, ואת כל מה שצורך את אלו ששוכנים בתחתית שרשרת המזון. מאחר שזואופלנקטון אוכלים צורניות, הזואופלנקטון עצמם נעשים מזינים לחיות גדולות יותר, כמו למשל דגים, ציפורי ים ולווייתנים [2]. אם זואופלנקטון לא היו נוכחים, שאר המערכת האקולוגית, כולל בני אדם, היו צריכים להתמודד עם אובדן מזון גדול. בני אדם בקהילות אינואיטים סמכו על דגים (זואופלנקטון טורפים) ועל אריות ים (טורפי דגים) באוקיינוס הארקטי במשך יותר שנים!

ישנו היבט מלוכלך של זואופלנקטון שהוא חשוב במיוחד – הצואה שלהם. כאשר זואופלנקטון מפרישים את פסולת גופם, היא נהפכת למקור מזון עבור הרבה יצורים אחרים. אם היא לא נאכלת, היא יכולה להגיע לקרקעית הים שם היא מאחסנת פחמן במשך מיליוני שנים, מאטה את תהליך שינוי האקלים ושומרת על כדור הארץ קריר.

קבוצה אחת של זואופלנקטון שנמצאה במערכות אקולוגיות ימיות ברחבי העולם ראויה לציון במיוחד. ה**שטרנליים** (cocepods) קיבלו את שמם בשל רגליהם (pods), שצורתן כמו של משוטים שמשמשים לחתירה בסירה. רגליהם דמויות המשוט (איור 4) מסייעות לתת לחיות

<https://www.gercek2bilim.com/inanilmaz-elektron-mikroskopu-fotografari-2/diatom-sem/>

<https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2019/05/weltweite-planktonverteilung.html>

<http://www.antarctica.gov.au/science/climate-processes-and-change/oceans-and-marine-ice-in-the-southern-hemisphere/measuring-algae-in-the-fast-ice-research-blog/sea-ice-algae-project-blog/blog-8-first-ice-algae>

**שטרנליים (Copepods)**

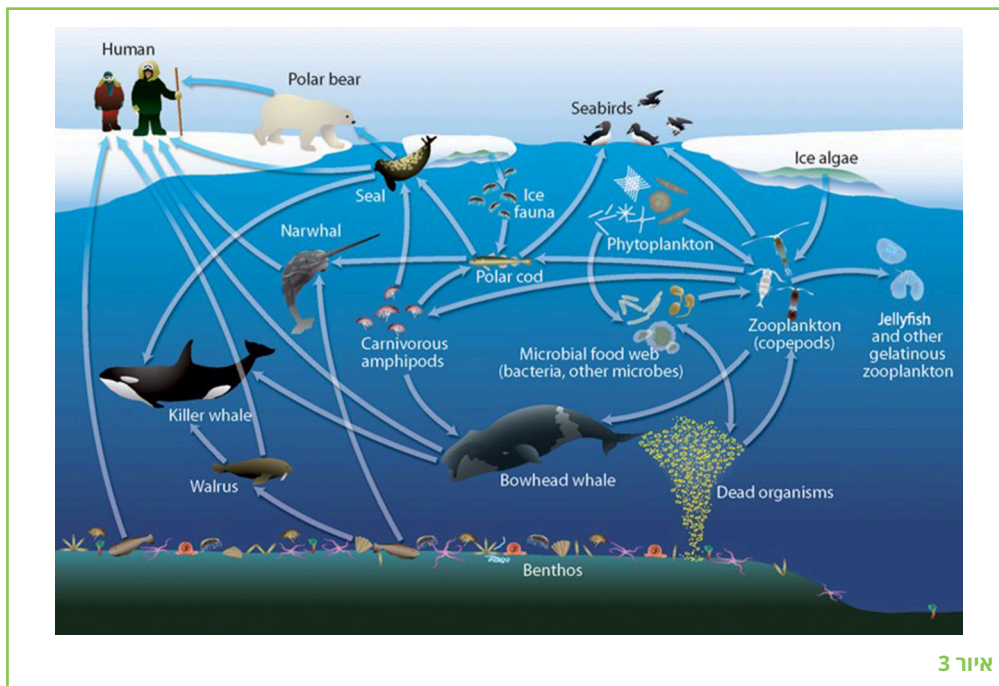
סוג של זואופלנקטון עם רגליים בצורת משוט. סוג שכיה ביותר של שטרנליים נקרא קלנוס.

**איור 3**

**שרשרת המזון של**

**האוקיינוס הארקטי [2].**

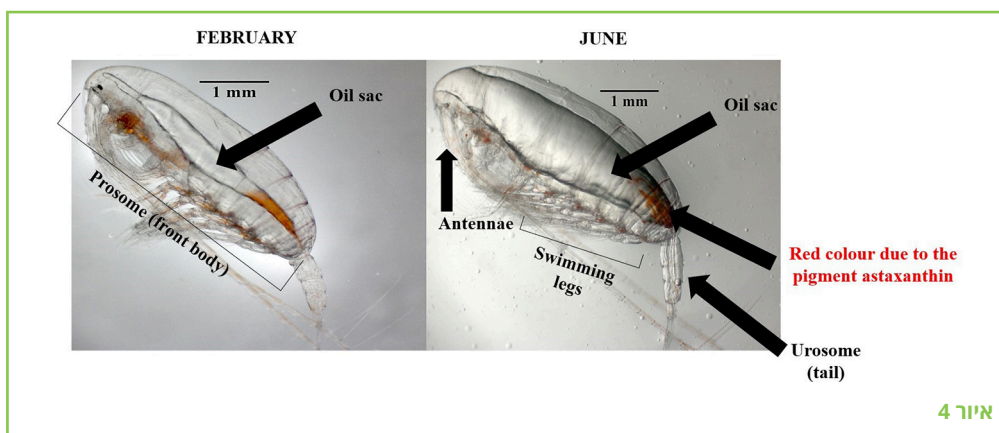
פיטופלנקטון ואצות ים נאכלים על ידי זואופלנקטון, ובתורם בקלה של הקוטב, ציפורי ים ולווייתנים ארקטיים גדולי פה (bowhead whales). עובדה זה מראה כיצד פיטופלנקטון וזואופלנקטון חשובים מאוד לאספקת מזון לשאר המערכת האקולוגית הארקטית.



איור 3

**איור 4**

שטרנליים מסוג קלנוס שנדגמו בפברואר (משמאל) וביוני (מימין). אף על פי שהאורכים של שני השטרנליים דומים יחסית (4.4 ו-4.8 מילימטרים), השטרנלי של פברואר קטן יותר מהשטרנלי של יוני, והחיות של פברואר, שמתקרבות לסוף התרדמת (היברנציה), מכילות פחות שומן בשק השמן שלהן (2019).



איור 4

המיקרוסקופיות האלה כוחות-על! שטרנליים יכולים לזכות בפרסים על כך שיש להם מאפיינים יוצאי דופן בממלכת החיות. שטרנליים הם החיות החזקות ביותר, הקופצים המהירים ביותר, וככל הנראה החיות השכיחות ביותר על פני כדור הארץ במספרן! המזון המועדף על שטרנליים רבים הוא פיטופלנקטון, שצריכים לחיות ליד פני השטח של האוקיינוס שם יש מספיק אור שמש לביצוע פוטוסינתזה. הזנה מפיטופלנקטון היא טובה, אולם היא לא תמיד בטוחה; דגים, ציפורים וטורפים אחרים גם צדים בפני השטח המוארים היטב של המים, והם מחכים לטעות של השטרנליים. בכל יום, שטרנליים מתמודדים עם איום של טורפים על ידי כך שהם נכנסים למים הרדודים רק בחושך, כאשר אין אור. אחרי שהם אוכלים, שטרנליים ממהרים להגר חזרה אל המים העמוקים והחשוכים יותר לפני שטורפי מים רדודים יוכלו לראותם. ההגירה היומית הזו של שטרנליים ושל זואופלנקטון אחרים היא ההגירה הגדולה ביותר של ביומסה בכדור הארץ, תנועה יומית אדירה שנפרשת לעומקים של עשרות, מאות, או אלפי מטרים.

חלק מהשטרנליים השכיחים ביותר באוקיינוס הארקטי חברים בקבוצה שנקראת **קלנוס**. בהיותם מלאים בשומנים מזינים אחרי הזנה אינטנסיבית בסתיו ובקיץ, שטרנליים מסוג

**קלנוס (Calanus)**

חלק מהשטרנליים השכיחים והמזינים ביותר באוקיינוס הארקטי שייכים לקבוצה הזו.

קלנוס הם מזינים במיוחד עבור חלק מציפורי הים, הדגים והלווייתנים שנעים לאורך מרחקים גדולים ברחבי האוקיינוס בכל שנה במטרה לטרוף אותם, לרוב בסתיו ובקיץ. כאשר מרבית הפיטופלנקטון והזואופלנקטון נאכלו, הרבה ציפורים, דגים ויונקים עוזבים את האוקיינוס הארקטי, וחוזרים בשנה הבאה (אולם לא כולם).

## החשיכה

החודשים החשוכים של החורף עשויים שלא להיות הזמן הטוב ביותר להיות בו אוכל עשב שתלוי עבור הישרדותו רק בצמחים שמבצעים פוטוסינתזה! חלק מהשטרנליים נעשים אוכלי-כל בחורף, בעוד שאחרים לגמרי מפסיקים לאכול ונכנסים לתרדמת במים בטוחים הרבה מתחת לקרח הים. הזנה אינטנסיבית במהלך פסגת השפע של פיטופלנקטון הכרחית לבניית מאגרי השומן הנדרשים לביצוע תרדמת החורף. שטרנליים יכולים להיראות שונים מאוד בפברואר (אחרי תרדמת חורף ורעב) בהשוואה ליוני (אחרי הזנה). באוקיינוס הארקטי, התעוררות לפני פריחת פיטופלנקטון יכולה להיות מועילה לשטרנליים. היא מאפשרת להם לאכול צורניות שתלויות ונופלות מקרקעית קרח הים באביב. אחרי חודשי התרדמת, קלנוס בדרך כלל נראים רזים, עם מעט מאגרי שומן. רק אחרי ההזנה של הסתיו והקיץ, שטרנליי הקלנוס יכולים למלא מחדש את מאגרי השומן שלהם למצב המרהיב הקודם (איור 4) [3]. אחרי חזרתם לפני השטח עתירי האצות של המים באביב, הרבה שטרנליים מוצלחים מתרבים במהלך פריחת האצות של האביב, מה שמאפשר לצאצאים שלהם לבקוע במהלך פריחת הפיטופלנקטון שמתרחשת מתחת לקרח כמה חודשים לאחר מכן [3]. זה עשוי להיות הכרחי להישרדות הצאצאים שלהם.

## העתיד

חוקרים מאמינים שאם שטרנליי קלנוס לא יוכלו לאכול אצות קרח, גודל חברת השטרנליים עלול לקטון באופן דרסטי. בעת שקרח הים מתמעט כתוצאה משינוי האקלים, מקור המזון החשוב הזה של שטרנליים מוסר. לאורך תקופות זמן ארוכות, אובדן קרח הים וגורמים אחרים, יכולים להפחית את הזמינות של חומרי מזון עבור פיטופלנקטון שמנסים לגדול מתחת לקרח [4]. ההפחתה הזו במזון עבור פיטופלנקטון יכולה לגרום לכך שפיטופלנקטון קטנים יותר יהפכו לרבים יותר מאשר צורניות גדולות ומזינות יותר. אם כן, במקום שיהיה שפע של מזון באיכות גבוהה כמו צורניות גדולות, שטרנליים באוקיינוס ארקטי חם יותר וללא קרח עשויים להיאלץ לאכול פיטופלנקטון קטנים יותר ופחות מזינים. מדענים כבר רואים אורגניזמים קטנים יותר בחברות של שטרנליים ושל פיטופלנקטון [5].

## שינויים צפויים באוקיינוס הארקטי, ומה אנו יכולים לעשות כדי לעזור

בעוד האזור הארקטי משתנה, סביר שנוכל לראות שמאגרי מזון, כמו למשל צורניות ופיטופלנקטון אחרים, קטנים, תוך כדי שהם גם נעשים קטנים יותר ומזינים פחות. שינויים בחלק התחתון ביותר של שרשרת המזון יכולים לגרום להשלכות אדירות לחיות גדולות יותר. היכחדות של מינים בתחתית שרשרת המזון יכולה להיות חדשות רעות לטורפים מתמחים שהתפתחו כדי לאכול אותם. שינויים בכמות של פיטופלנקטון ובסוגם משפיעים על בני אדם ועל חיות בהרבה דרכים ישירות ועקיפות, החל משינויים באיכות האוויר, ועד לאופן שבו אנו

### פריחה (Bloom)

נדילה מהירה של אצות או פיטופלנקטון.



מתקשרים עם הסביבה ועם המשאבים שלה. עם פחות פיטופלנקטון באוקיינוס הארקטי, ריכוזי פחמן דו חמצני באטמוספירה יכולים לגדול, מה שיגרום לכדור הארץ שלנו להמשיך להתחמם.

כחברה, אנו צריכים להיות מודעים יותר לעובדה שהפעילויות שלנו בבית, בעבודה, או בבית הספר יכולות להשפיע על מערכות אקולוגיות במקומות מרוחקים מאיתנו. שינויים קטנים, כמו למשל הליכה או רכיבה על אופניים במקום נסיעה, יכולים לסייע באופן דרסטי בהגבלה של פליטות פחמן דו חמצני. תוכניות מחקר כמו למשל <sup>1</sup> Changing Arctic Ocean שמבוססת בבריטניה, מספקים לממשלות ולציבור את המידע העדכני ביותר על שינויים ביולוגיים באוקיינוס הארקטי. שתי קבוצות מפרויקט Changing Arctic Ocean שיתפו פעולה כדי לכתוב את המאמר הזה, ויש לנו מקורות נוספים זמינים אם תרצו ללמוד עוד <sup>5</sup>, <sup>6</sup>.

## מקורות

1. Bar-On, Y. M., 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
2. Darnis, G., Robert, D., Pomerleau, C., Link, H., Archambault, P., Nelson, R. J., et al. 2012. Current state and trends in Canadian Arctic marine ecosystems: II. Heterotrophic food web, pelagic-benthic coupling, and biodiversity. *Clim. Change* 115:179–205. doi: 10.1007/s10584-012-0483-8
3. Leu, E., Søreide, J. E., Hessen, D. O., Falk-Petersen, S., and Bergebe, J. 2011. Consequences of changing sea-ice cover for primary and secondary producers in the European Arctic shelf seas: timing, quantity, and quality. *Prog. Oceanogr.* 90:18–32. doi: 10.1016/j.pocean.2011.02.004
4. Li, W. K. W., McLaughlin, F. A., Lovejoy, C., and Carmack, E. C. 2009. Smallest algae thrive as the Arctic Ocean freshens. *Science* 326:539. doi: 10.1126/science.1179798
5. Falk-Petersen, S., Timofeev, S. F., Pavlov, V., and Sargent, J. R. 2007. "Climate variability and possible effects on Arctic food chains. The role of Calanus," in *Arctic-Alpine Ecosystems and People in a Changing Environment*, eds J. B. Ørbæk, T. Tombre, R. Kallenborn, E. N. Hegseth, S. Falk-Petersen, and A. H. Hoel (Berlin: Springer). p. 147–66.

פורסם אונליין: 23 ביוני 2022

נערך על ידי: Roxana Suehring

מנחה מדעי: Nina Markham

**ציטוט:** Hayward AG and Grigor JJ (2022) תחתית שרשרת המזון של האוקיינוס הארקטי היא בעלת חשיבות עליונה. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00122-he

**תורגם והותאם:** Hayward AG and Grigor JJ (2020) The Bottom of the Arctic's Food Web Is of Top Importance. *Front. Young Minds* 8:122. doi: 10.3389/frym.2020.00122

<sup>5</sup> <https://www.changing-arctic-ocean.ac.uk/project/eco-light/>

<sup>6</sup> <https://www.changing-arctic-ocean.ac.uk/project/chase/>

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

© 2020 © **COPYRIGHT** Hayward and Grigor 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 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

### 17-14 גיל: FDR-HB\_PERU iGEM TEAM

אנו קבוצת ביולוגיה סינתטית במכונה הבינלאומית המהונדסת גנטית (iGEM) בלימה, פרו. אנו קבוצת התיכון היחידה באמריקה הלטינית, ואנו גאים בעבודה שלנו של ייצור חיישן לקדמיום באמצעות חיידקים. מרביתנו לומדים שפה שנייה, וטווח הגילים שלנו הוא 14-17. אנחנו אוהבים GMOs!



## הכותבים

### ALEXANDER G. HAYWARD

Alexander G. Hayward הוא דוקטורנט שעובד ב-NIWA באוניברסיטה של אוטאגו בניו-זילנד. הוא חוקר כיצד התפקוד וההרכב של החברה המיקרובית באנטארקטיקה (פיטופלנקטון, מיקרו-זואופלנקטון, ואצות קרח ים) משתנים בתנאי לחץ שנגרמים משינוי אקלים. לפני כן, עבודתו של Alexander התמקדה במדידת הפרודוקטיביות והביומסה של קרח ים באוקיינוס הארקטי. \*alexander.hayward@niwa.co.nz



### JORDAN JACK GRIGOR

Jordan Grigor הוא ביולוג ימי שמתמקד זה כמה שנים באקולוגיה של חיות קטנות, כמו למשל שטרנליים ותולעי חיץ. הוא עובד בתוך האוקיינוס הארקטי, שם הרבה חיות מושפעות משינויים מהירים של האקלים. הוא חשף מידע על מין שהיה מעט מוכר (לדוגמה, <https://www.researchgate.net/project/Ecology-of-chaetognaths-arrow-worms-in-Arctic-waters>), והראה שתולעי חיץ ניוזנות מצורניות (diatoms) ומשטרנליים. כיום הוא עובד על פרויקט CHASE (<https://www.changing-arctic-ocean.ac.uk/project/chase/>) באיגוד הסקוטי למדעי הים, ומנסה להבין את ההשפעה של סביבה ושל גנטיקה על התנהגות השחייה של שטרנליים. \*jordan.grigor@sams.ac.uk



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