

## האם זיהום מיקרופלסטיק יכול לשנות תְּכָרוֹת חיידקים ימיים חשובות?

Meredith Evans Seeley\*, Bongkeun Song | Robert C. Hale

מכון וירג'יניה למדעי הים (VIMS), מכון מחקר גלובלי ויליאם & מרי, גלוקסטר פוינט, וירג'יניה, ארצות הברית

### סוקרים צעירים

LAUREL

גיל: 9



SAMEEN

גיל: 15



ZAINAB

גיל: 12



מדענים גילו כי חלקיקי מיקרופלסטיק מזהמים סביבות רבות ברחבי העולם, בהן האוקיינוסים שלנו והחופים שלנו. חלק מהחלקיקים האלה מוצאים את דרכם לסביבה חשובה במיוחד – משקעי חוף, כלומר שכבת הבוץ שמתחת למים. משקע זה מהווה בית למגוון חיים חיידקיים, אשר ממלאים תפקיד מפתח במחזורי חומרי מזון של המערכת האקולוגית. חיידקים אלה חיוניים עבור סביבות בריאות, אך גם מושפעים בקלות על ידי זיהום סביבתי. לרוע המזל, ידוע מעט על האופן שבו חיידקים מגיבים לזיהום מיקרופלסטיק. אנו חקרנו את ההשפעות של חלקיקי מיקרופלסטיק שונים על חיידקים שחיים במשקעים ימיים, כמו גם את ההשפעות העוקבות על מחזור חומרי מזון. מצאנו, לראשונה, כי חלקיקי מיקרופלסטיק שונים עשויים לשנות באופן משמעותי את תְּכָרוֹת החיידקים האלה ואת מחזור החנקן. עלינו להמשיך לחקור תחום זה במטרה להבין מהן ההשפעות ארוכות הטווח על הסביבות הטבעיות שלנו.

## זיהום מיקרופלסטיק

ייתכן ששמעתם על אודות **חלקיקי מיקרופלסטיק**, אך אולי אינכם יודעים מהם, או מדוע נדמה שכולם מדברים עליהם. חלקיקי מיקרופלסטיק הם פשוטים – מדובר בפיסות קטנות של פלסטיק, בדרך כלל ברוחב 5 מילימטרים (בערך גודלו של מחק בקצה עיפרון), או פחות. ניתן לייצר מוצרי פלסטיק בגודל מיקרופלסטי, כמו למשל חרוזים קטנים שמוספים לתכשירי טיפול בעור או למשחות שיניים. אולם, לעיתים קרובות יותר, חלקיקי מיקרופלסטיק מתקבלים מפירוק של פיסות פלסטיק גדולות יותר. הדבר נכון במיוחד בסביבת האוקיינוס, שם מצטברת פסולת פלסטיק רבה עם הזמן. פסולת זו חשופה לרוח, לגלים ולאור השמש, ובסופו של דבר יוצרת חלקיקי מיקרופלסטיק [1]!

זה אומנם נשמע פשוט, אך חלקיקי מיקרופלסטיק בסביבה הם מורכבים ביותר. הסיבה לכך היא שישנם הרבה סוגי פלסטיק שונים. אבני הבניין, או ה'שלד', של כל פלסטיק נקראות **פולימרים**. לעיתים קרובות סוגי פלסטיק שכיחים נקראים על שם הפולימר שלהם, למשל פוליאיתילן או פוליוויניל כלוריד (המוכר בראשי התיבות PVC). כמו כן לעיתים קרובות מוספים כימיקלים אחרים כדי לסייע למוצר פלסטיק לשרת את מטרתו. תוספים אלה משתנים, לדוגמה הם עשויים לכלול צבעים שונים. ככאלה, אין שני חלקיקי מיקרופלסטיק שהם זהים זה לזה [2].

בשנים האחרונות, מדענים גילו כי זיהום מיקרופלסטיק הוא נרחב, ונגדל כתוצאה מגידול באוכלוסייה ומשימוש גובר בפלסטיק. חלקיקי מיקרופלסטיק נמצאו באוקיינוסים, באגמים, בנהרות ובאדמות, על פסגות הרים מרוחקים, בתוך קרחונים, ואף מרחפים באוויר [1]! בסביבות ימיות, חלקיקי מיקרופלסטיק מצטברים **במשקע** – שכבות של בוץ ואבק ששוקעות בקרקעית, מתחת למים. במשקע חיות מגוון חיות, אשר עשויות להיות באינטרקציה עם המיקרופלסטיק. מדענים עמלו במטרה להבין את ההשפעות האפשריות של מגוון חלקיקי מיקרופלסטיק על יצורים חיים [1].

## חברת החיידקים במשקע

אם תחקרו משקעים בנחלים, באגמים ובנהרות, תגלו אורגניזמים חיים רבים – תולעים, צדפות וסרטנים, בין השאר. אולם, אם תחקרו משקעים באמצעות מיקרוסקופ, תראו שישנה גם חברה מגוונת של מיקרואורגניזמים (כלומר, אורגניזמים שאי אפשר לראותם בעין בלתי מזוינת)! חיידקים הם סוג של מיקרואורגניזם נפוץ מאוד במשקעים. אלפי מיני חיידקים מתקיימים יחד, ויוצרים **חברה חיידקית**. מדענים מתארים חברות של חיידקים במשקעים באמצעות סוגי המינים והכמות של כל אחד מהמינים הנוכחים. חברות חיידקיות אלה מבצעות תפקידים חשובים מאוד עבור המערכת האקולוגית כולה.

אחד מתפקידיהן הוא להתמיר חומרי מזון. חומרי מזון נדרשים על ידי צמחים וחיות, לרבות בני אדם, לבניית ביו-מולקולות חיוניות, בהן חלבונים ודנ"א. אנו מקבלים חומרי מזון ממזון, בסיועם של חיידקים שנמצאים במעי. בעת אכילת מזון, החיידקים במערכת העיכול מסייעים לעבד את המזון ולשחרר את חומרי המזון שהגוף צריך. חיידקי משקע עושים את אותו הדבר עבור אורגניזמים במים. כאשר חומר אורגני, כמו למשל אורגניזמים מתים או

### חלקיקי מיקרופלסטיק (Microplastic)

אלה הם חלקיקי פלסטיק שכיוונם הארוך ביותר אינו עולה על 5 מילימטרים. לעיתים קרובות חלקיקים אלה נוצרים על ידי פירוק של פיסות פלסטיק גדולות יותר בסביבה.

### פולימר (Polymer)

כימיקלים גדולים שיוצרים את אבני הבניין של פלסטיק. לעיתים קרובות הם מכונים ה'שלד' של פלסטיק.

### משקע (Sediment)

שכבות של בוץ וחול שמצויות מתחת למים.

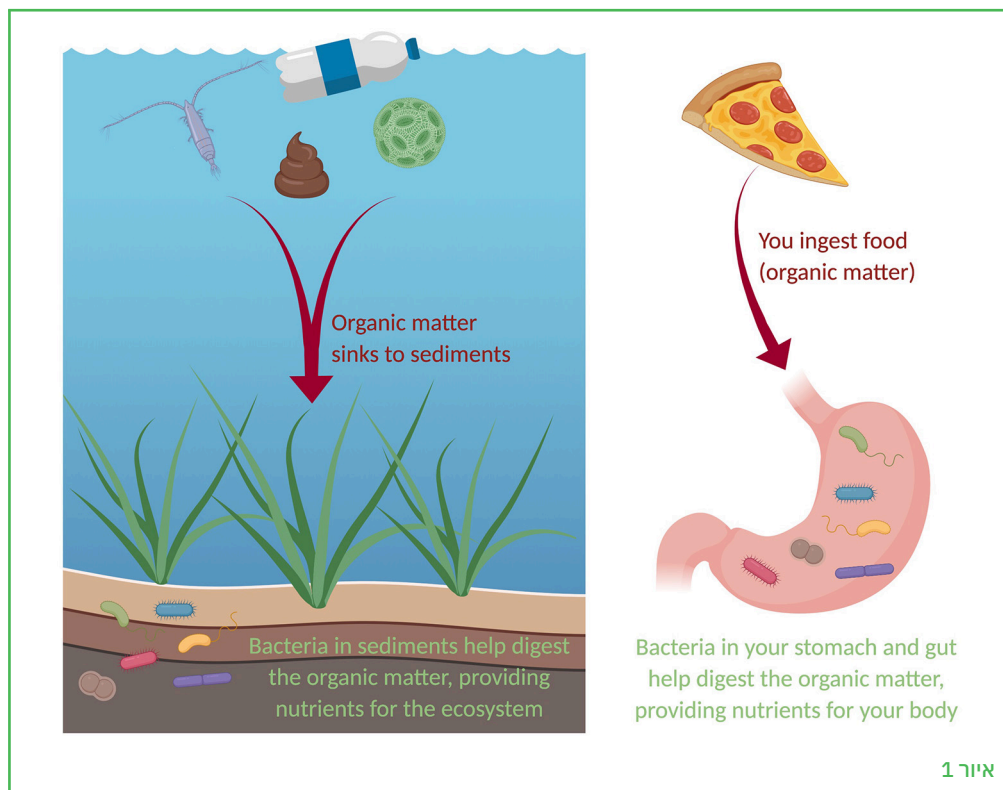
### חברה חיידקית (Bacterial community)

קבוצה של מיני חיידקים שונים שחיים באותה הסביבה.

צואה, שוקע למשקעים, מְרַבֵּית חומרי המזון עדיין כלואים בתוכו, ואינם זמינים לשימוש של אורגניזמים חיים אחרים. החיידקים במשקעים מפרקים חומר אורגני, ומשחררים חומרי מזון עבור עצמם ועבור אורגניזמים אחרים (איור 1). באותו הזמן, הם גם מוודאים שאין עודף מחומר מזון אחד מסוים, מה שעלול לגרום לנזק. אם כן, החברה החיידקית משפיעה על סוגים של אורגניזמים מפותחים יותר שיכולים לחיות באותה הסביבה, ועל בריאותם.

## איור 1

**חיידקים במשקעים וחיידקי מעיים אנושיים מבצעים תפקיד זהה-מסייעים לעבוד חומרי מזון! הצד השמאלי של האיור ממחיש כיצד התהליך פועל בסביבות ימיות, היכן שחומר אורגני (Organic matter) –בדרך כלל אורגניזמים מתים ופסולת, אך לאחרונה גם פלסטיק– שוקע כמשקע (sink to sediments), ומעובד שם על ידי חיידקים (Bacteria). חיידקים במשקעים מסייעים לעכל (digest) את החומר האורגני, ובכך מספקים חומרי מזון (nutrients) למערכת האקולוגית (ecosystem). הצד הימני של האיור מושהה תהליך זה למתרחש בקיבה (Stomach) ובמעיים (Gut) אנושיים, שבהם חיידקים מסייעים לעבד ולעכל את החומר האורגני-כלומר מזון- שאנו אוכלים מְדִי יום! תהליך זה מספק חומרי מזון לגופנו (האיור נוצר באמצעות BioRender.com).**



## מחזור החנקן של המשקע

חומר מזון חשוב שחיידקי משקע מסייעים לווסת הוא **חנקן** [3]. מחזור החנקן הוא מורכב, ולכן נתמקד רק בכמה ממאפייניו. במשקעים ובמים, כימיקלים רבים ומגוונים מכילים חנקן, לרבות אַמוֹניום ( $\text{NH}_4^+$ ) וניטְרָט (חִנְקָה,  $\text{NO}_3^-$ ). חיידקים שונים יכולים להתמיר את התרכובות האלה מצורה אחת לאחרת. שתי התְמָרוֹת חשובות מאוד במשקעים הן **ניטְרִיפִיקָצְיָה** (בעברית חִנְקוֹן) ו**דֵנִיטְרִיפִיקָצְיָה**. שני תהליכים אלה יכולים לפעול באופן משולב במטרה להתמיר אמוניום לניטרט על ידי ניטריפיקציה, וניטרט לחנקן גזי ( $\text{N}_2$ ) באמצעות דה-ניטריפיקציה (איור 2A).

הימצאות החיידקים הנכונים בכמויות הנכונות מבטיחה כי אמוניום וניטרט מצויים ברמות תְּקִינֹת במערכת אקולוגית. אם האיזון שגוי, המערכת האקולוגית יכולה להשתנות או להיפגע. בפרט, צריכים להיות מספיק חיידקים שמבצעים ניטריפיקציה ודה-ניטריפיקציה כדי להסיר עודף אמוניום (אשר יכול לפגוע בסביבה), אך לא יותר מדי, כדי שלא להסיר לגמרי את האמוניום (אשר, בכמויות הנכונות, הוא חומר מזון חשוב עבור אורגניזמים אחרים). לכל מְיִי החיידקים שחשובים עבור שלבים שונים של מחזור החנקן יש קוד גנטי שונה. מדענים יכולים לקרוא את הקוד הזה במטרה לבחון אֵילוּ מְיִי חיידקים נמצאים, ואֵילוּ

## חנקן

### (Nitrogen)

יסוד חיוני המשמש לבניית תרכובות רבות שיצורים חיים זקוקים להן כדי לשרוד.

### ניטריפיקציה

#### (Nitrification)

תהליך שממיר צורה אחת של חנקן-אמוניום ( $\text{NH}_4^+$ ), לצורה אחרת-ניטרט ( $\text{NO}_3^-$ ). תהליך זה מתאפשר באמצעות מיקרואורגניזמים.

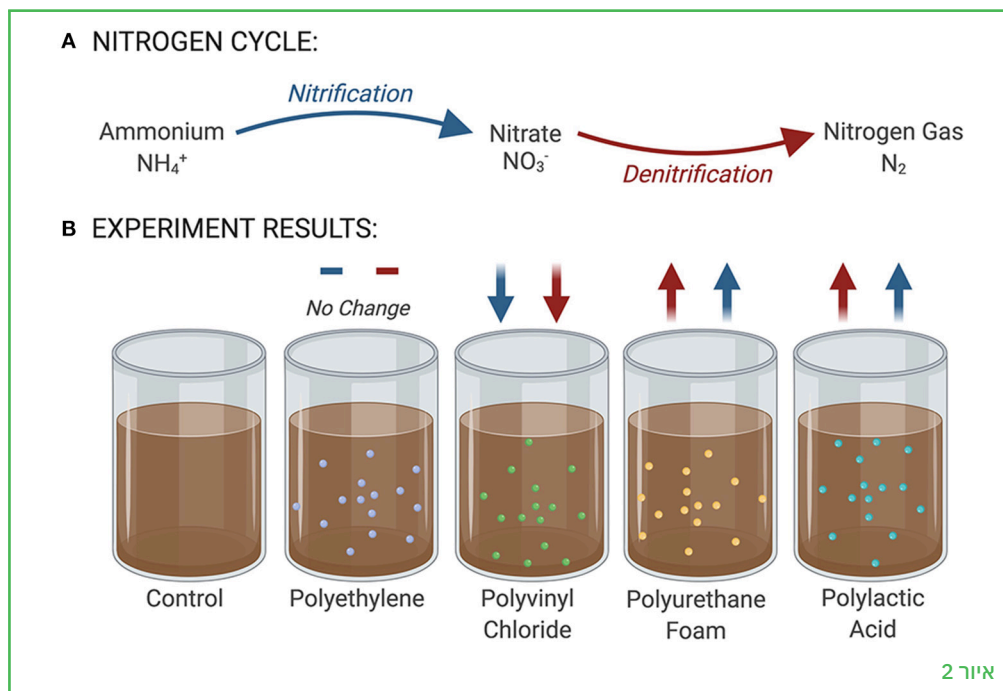
### דה-ניטריפיקציה

#### (Denitrification)

תהליך שממיר צורה אחת של חנקן-ניטרט ( $\text{NO}_3^-$ ), לצורה אחרת-חנקן גזי ( $\text{N}_2$ ). תהליך זה מתאפשר על ידי מיקרואורגניזמים.

## איור 2

מחזור החנקן במשקעים ימיים ותיאור הניסוי שערכנו. (A) רכיבי מפתח של מחזור חנקן במשקעים ימיים. (B) השינויים בניטרופיקציה (חיצים כחולים) ובדה-ניטרופיקציה (חיצים אדומים) שראינו בניסוי שלנו מוצגים מעל למיקרוֹקוֹסְמוֹסִים שמכילים כל סוג של פלסטיק שמוסף למשקעים. תוצאות המחקר, לפי סדר המִכְלִים באיור מימין לשמאל: חלקיקי מיקרופלסטיק של חומצה פולילקטית ושל קצף פוליאקרילטן הגבירו ניטרופיקציה ודה-ניטרופיקציה; פוליוויניל כלוריד הפחית את שני התהליכים; פוליאיתילן לא שינה באופן משמעותי אף אחד מהתהליכים בהשוואה לביקורת, ללא תוספת מיקרופלסטיק (האיור נוצר באמצעות BioRender.com).



תפקידים הם ממלאים במחזור החנקן. אנו החלטנו להשתמש בכלי זה כדי לשאול שתי שאלות חשובות.

## מהלך הניסוי שערכנו

שתי השאלות שהעלינו היו: האם חלקיקי מיקרופלסטיק שונים במשקעים משנים את הרכב החברה החיידקית? ואם כן, האם הדבר גם משפיע על פעילויות התמרת חנקן? כדי לענות על שאלות אלה, ערכנו ניסוי! אספנו משקע מבצה מקומית, חילקנו אותו בין כמה מִכְלִים, והוספנו מים כדי ליצור העתקים קטנים יותר של המערכת האקולוגית הטבעית, שכל אחד מהם מכונה מיקרוֹקוֹסְמוֹס. הוספנו ארבעה סוגים שונים של חלקיקי מיקרופלסטיק למשקעים במכלים השונים: פוליאיתילן; פוליוויניל כלוריד; קצף פוליאורתן וחומצה פולילקטית. חלקיקי המיקרופלסטיק לסוגיהם נוצרו על ידי טחינת פיסות גדולות יותר של פלסטיק במטחנה מיוחדת. חלקיקים אלה משמשים למטרות שונות, ולכן הם מכילים פולימרים ותוספים שונים שעשויים להשפיע על החברה החיידקית באופן שונה. לאחד המכלים לא הוספנו מיקרופלסטיק, כדי שייצג מצב רגיל וישמש כמכל בקרה. המכלים נותרו במשך 16 ימים.

## ממצאי הניסוי

ניתחנו את החברות החיידקיות במשקעים לפני הניסוי, במהלכו ואחריו באמצעות קריאת הקודים הגנטיים של החיידקים שנמצאים בכל מיקרוֹקוֹסְמוֹס. ראשית, השתמשנו במידע זה כדי לאפיין את החברה החיידקית – אילו מינים נמצאים ועד כמה הם נפוצים? לאחר מכן, חיפשנו את האזורים המסוימים בקוד הגנטי שאחראים על ניטרופיקציה

## מיקרוֹקוֹסְמוֹס (Microcosm)

העתק קטן של סביבה טבעית, המשמש מדענים לענות על שאלות מחקר לגבי האופן שבו דברים שונים עשויים לשנות את אותה הסביבה.

ודה-ניטריפיקציה. השווינו את הממצאים שלנו בין מיקרוקוסמוסים שונים במטרה לבחון אם סוגי המיקרופלסטיק שינו את החברה החיידקית או את מחזור החנקן.

גילינו כי החברות שמכילות תוספי מיקרופלסטיק אכן היו שונות מהחברה במכל הבקרה, וסוגי הפולימרים עברו שינויים שונים! מצאנו גם כי חלקיקי מיקרופלסטיק השפיעו על פעילויות מחזור החנקן: כלומר, הן שינו את העושר של מינים שמסוגלים לבצע ניטריפיקציה ודה-ניטריפיקציה. באשר להיקף השינוי, מצאנו כי משקעים שלהם הוסף פוליוניל כלוריד עברו את השינוי הגדול ביותר בחברה החיידקית בסיום הניסוי. במשקעים שהכילו חלקיקי מיקרופלסטיק מסוג זה, ניטריפיקציה ודה-ניטריפיקציה פחתו משמעותית. אולם, במיקרוקוסמוסים עם חלקיקי מיקרופלסטיק מסוג חומצה פולילקטית ומסוג קצף פוליאורתן, ניטריפיקציה ודה-ניטריפיקציה התגברו. המיקרוקוסמוסים שהכילו מיקרופלסטיק של פוליאיתילן היו דומים לממצאים במכל הבקרה שלנו, מה שהציע כי סוג זה של פלסטיק לא השפיע על החברה החיידקית במשקע באותה המידה כמו סוגי הפלסטיק האחרים (איור 2B). הניסוי כולו לימד אותנו כי זיהום מיקרופלסטיק בסביבה עשוי להשפיע על חברות מפתח חיידקיות ועל מחזור החנקן.

## מהי החשיבות של המחקר בתחום?

מדענים ידעו במשך זמן רב כי משקעים ממלאים תפקיד חשוב במחזורי חומרי מזון, שמונעים על ידי חיידקים. מחזורים אלה הם מכריעים עבור אורגניזמים שחיים במשקעים, אך גם לאלה שנמצאים במים שמעליהם ומעבר. לאחרונה מדענים גילו כי כמויות גדולות של מיקרופלסטיק מזהמות משקעים ימיים באופן גלובלי. המחקר שלנו הוא הראשון שדיווח כי חלקיקי מיקרופלסטיק עשויים להשפיע על חברות חיידקים במשקעים, ולכן להשפיע על פעילויות מחזור החנקן שלהן. האיזון של מחזור החנקן במשקעים שומר על חומרי המזון ברמות הנכונות עבור בריאותן של החיות שנמצאות שם, לרבות תולעים, דגים, פִּיטוֹפְּלַנְקְטוֹן ועשבים ימיים. באמצעות הידע הזה, אנו יכולים להמשיך לשאול שאלות מחקר חשובות, כמו: אילו סוגי פלסטיק גורמים להשפעות המזיקות ביותר? האם הנזק הזה נגרם על ידי הפולימר או על ידי התוספים? וכמה פלסטיק צריך להיות במשקעים ימיים כדי להשפיע על החברה החיידקית? כשהידע הזה יהיה בידינו, מדענים יוכלו לעבוד עם קובעי מדיניות במטרה לסייע בהגנה על אזורי חוף מפני ההשפעות המזיקות של זיהום מיקרופלסטיק.

## מה ביכולתנו לעשות כדי להפחית את הזיהום?

מרבית חלקיקי המיקרופלסטיק נוצרים כאשר פיסות גדולות יותר של פלסטיק מפורקות בסביבה. לפיכך, אם אנו מבקשים להפסיק זיהום על ידי מיקרופלסטיק, עלינו לעצור את זיהום הפלסטיק! אולם, זיהום הפלסטיק לא מתרחש רק כשאנו משליכים אשפה. בני אדם מייצרים אשפת פלסטיק רבה, ולעיתים היא 'בורחת' אל הסביבה לפני שהיא מגיעה למטמנה. זה עלול לקרות בגלל פח שעולה על גדותיו; שקית אשפה שנופלת ממשאית, או אשפה אשר נסחפת בסופה ומגיעה לנהר או לאגם המקומיים, או לאוקיינוס. אם נפחית את פסולת הפלסטיק שלנו, תהיה פחות דליפה לסביבה.

תוכלו לחשוב על דרכים שבהן ביכולתכם להפחית את אשפת הפלסטיק שאתם מייצרים מדי יום, או על מקומות שבהם אשפת פלסטיק שדולפת לסביבה יכולה להיכלא. שני אלה הם צעדים משמעותיים לקראת הפחתת זיהום מיקרופלסטיק!

## תודות

אנו מודים לקרן משפחת פרימן על התמיכה, באמצעות מלגת משפחת פרימן מטעם מכון וירג'יניה למדעי הים (VIMS). אנו מבקשים גם להביע הערכה על פרס המצוינות מטעם פקולטת Plumeri מהאוניברסיטה הוותיקה למחקר ציבורי William & Mary והמחלקה ללימודים אקדמיים של VIMS. זוהי תרומה 3965 של מכון וירג'יניה למדעי הים, William & Mary. התמונות נוצרו באופן חלקי באמצעות [biorender.com](https://biorender.com).

## מאמר המקור

Seeley, M. E., Song, B., Passie, R., and Hale, R. C. 2020. Microplastics affect sediment microbial communities and nitrogen cycling. *Nat. Commun.* 11:2372. doi: 10.1038/s41467-020-16235-3

## מקורות

1. Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., and Zeng, E. Y. 2020. A global perspective on microplastics. *J. Geophys. Res. Ocean* 125:e2018JC014719. doi: 10.1029/2018JC014719
2. Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., Earn, A., Bucci, K., et al. 2019. Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environ. Toxicol. Chem.* 38:703–11. doi: 10.1002/etc.4371
3. Ward, B. B., and Jensen, M. M. 2014. The microbial nitrogen cycle. *Front. Microbiol.* 5:553. doi: 10.3389/fmicb.2014.00553

פורסם אונליין: 27 בנובמבר 2023

נערך על ידי: Carolyn Scheurle

מנחים מדעיים: Usman Atique | Lynette Cheah

**ציטוט:** Seeley ME, Song B | Hale RC (2023) האם זיהום מיקרופלסטיק יכול לשנות תְּכָרֹת חיידקים ימיים חשובות? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2021.596923-he

**תורגם והותאם מ:** Seeley ME, Song B and Hale RC (2021) Can Microplastic Pollution Change Important Aquatic Bacterial Communities? *Front. Young Minds* 9:596923. doi: 10.3389/frym.2021.596923

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

**זכויות יוצרים © 2021 © Seeley, Song ו Hale 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

### LAUREL, גיל: 9

אני אוהבת לקרוא ספרים מסדרת הארי פוטר. הדמויות האהובות עליי בסדרה הן ג'יני וקרמיאנה. אני גם אוהבת חיות. המקצועות האהובים עליי בבית הספר הם אומנות, מוזיקה, מדע ומתמטיקה.



### SAMEEN, גיל: 15

היי, אני Sameen מפקיסטן. מגלה עניין רב במדעים, והמקצוע האהוב עליי ביותר בתחום זה הוא ביולוגיה. אני אוהבת לחקור תהליכים טבעיים, במיוחד במערכות אקולוגיות ימיות. אני אוהבת לקרוא מאמרים מדעיים בעיתון וללמוד שפות חדשות. פרט לכך, אני משתתפת בפעילויות מועדונים סביבתיים ויוצאת לטיולי שטח. כשאגדל, ארצה לחקור מערכות אקולוגיות של מים מתוקים, וביולוגיה מולקולרית.



### ZAINAB, גיל: 12

היי, קוראים לי Zainab ואני גרה בכפר קטן. אני נלהבת מקשרים בין מינים ומשינויים סביבתיים, וייתכן שזו הסיבה לכך שאני אוהבת ללמוד על אודות ביולוגיה של מינים ושל מערכות אקולוגיות. פרט לכך, אני רוצה ללמוד לגבי היסטוריה של מינים והסביבות שבהן הם מתקיימים. אני אוהבת לטייל באזורים הכפריים ולצפות במגוון צמחי הקרקע ובמיני החיות. כמו כן אני משתתפת בפעילויות של למידה מקוונת הקשורות לביולוגיה ולמערכות אקולוגיות.



## הכותבים

### MEREDITH EVANS SEELEY

Meredith Evans Seeley היא מדענית ימית שמתעניינת בגורל של מזהמים ובהשפעותיהם, במיוחד מיקרופלסטיק. כיום, היא דוקטורנטית במכון וירג'יניה למדעי הים. לפני כן היא חקרה שפכי שמן כסטודנטית לתואר שני במכון למדעי הים באוניברסיטת טקסס. Meredith מגלה עניין בשימוש במחקר שלה כדי ליידע לגבי מדיניות שתוכל להגן על המערכות האקולוגיות שלנו באוקיינוס אל מול השפעה אנושית גוברת, ולשקן. בזמנה הפנוי, היא אוהבת לטייל ולחקור את החוף. \*[meseeley@vims.edu](mailto:meseeley@vims.edu)



### BONGKEUN SONG

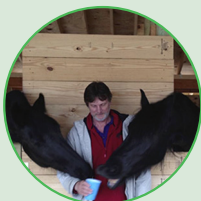
Bongkeun Song הוא פרופסור עמית למדעי הים (Clark and Elizabeth Diamond) במכון וירג'יניה למדעי הים (VIMS) והאוניברסיטה הוותיקה למחקר ציבורי William & Mary. למד לדוקטורט במדעי הסביבה ברוטג'רס, האוניברסיטה המדינית של ניו ג'רזי. Bongkeun חקר טווח רחב של נושאי מחקר, לרבות תגובות מיקרוביום (מערך המיקרואורגניזמים הכולל בגוף האדם) להפרעות אנושיות וטבעיות; תפקידיהם של מיקרוביומים בבריאות אורגניזמים ימיים; מיקרואורגניזמים חדשניים ותהליכים חדשניים



במחזור החנקן הביוגיאוכימי; ויסות מיקרוביאלי של פליטות גזי חממה באדמות, וזיהום מיקרופלסטיק בסביבות טבעיות ומהונדסות.

### ROBERT C. HALE

Robert C. Hale הוא פרופסור למדעי הים במכון וירג'יניה למדעי הים (VIMS), אוניברסיטת William & Mary. במסגרת לימודי הדוקטורט שלו ב-William & Mary הוא בחן את הרמות של זיהומים בסרטנים ימיים, ואת השלכות הזיהומים עליהם. במהלך 37 השנים שבהן הוא עוסק במחקר, התמקד רוברט בעיקר בסביבות ימיות, אך תחומי העניין שלו כוללים מערכות יבשתיות ואנושיות, מאחר שכולן קשורות זו לזו. לעיתים קרובות עבודתו משלבת כימיה, ביולוגיה וטוקסיסולוגיה, ומשתמשת בשיטות של ניתוח כימי במטרה לעקוב אחר מזהמים ישנים וחדשים, כמו למשל חלקיקי מיקרופלסטיק ותוספי פולימרים.



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