

## כיצד פלסטיק על פני השטח של הים יכול להשפיע על האקלים שלנו?

Luisa Galgani<sup>1,2\*</sup>, Steven A. Loiseau<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>המחלקה לביוטכנולוגיה, כימיה ורוקחות אוניברסיטת סיינה, סיינה, איטליה  
<sup>2</sup>CSGI – המרכז לקולואידים ולמדעי פני השטח, ססטו פירנטינו, איטליה

סוקר צעיר

SAMUEL

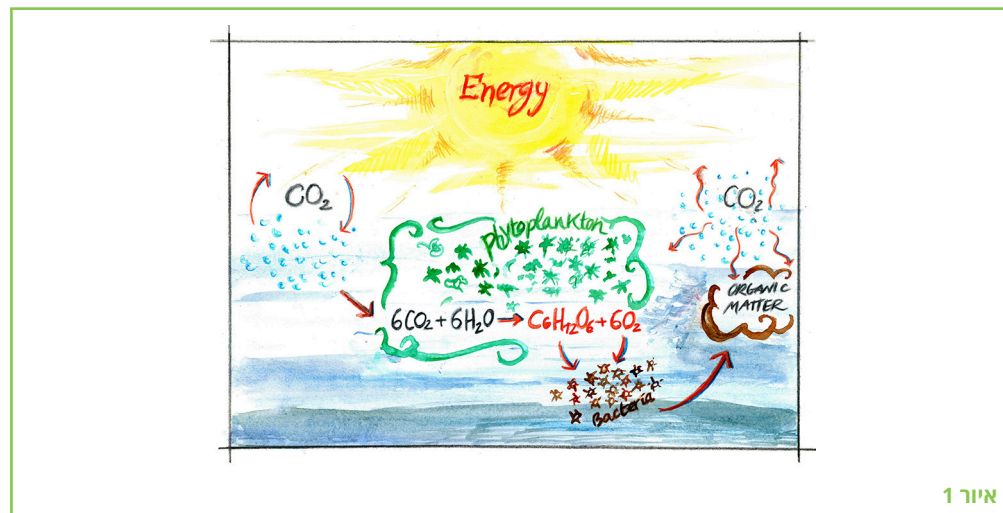
גיל: 12



חלקיקי פלסטיק מאריזות, ממוצרי טיפוח אישי, מביגוד סינתטי ומהרבה יישומים אחרים, מהווים סכנה פוטנציאלית לבריאות האוקיינוס. חלקיקים זעירים וקלים של פלסטיק יכולים לצוף על פני השטח של הים לאורך זמן. פני השטח של הים הם מקום מיוחד: עשיר בתרכובות כימיות שמיוצרות על ידי אורגניזמים ימיים שמתחיתו. לעיתים, החומרים האלה גורמים לפני השטח של הים להיראות כשכבה נוצצת, כהה או בהירה יותר. פני השטח של הים גם מחברים בין האוקיינוס לאטמוספירה, ושולטים בחילופים חשובים בין שתי המערכות האלה, כולל זרימה של חמצן, שהוא יסוד הכרחי עבור החיים, וזרימה של פחמן דו-חמצני, אחד מהגזים העיקריים שאחראיים על שינויי אקלים. חלקיקי פלסטיק יכולים להגדיל את כמות התרכובות הכימיות בשכבת פני השטח של הים מאחר שמיקרואורגניזמים ימיים (כמו חיידקים) עשויים להיות יעילים יותר בנוכחות של חלקיקי פלסטיק מאשר בסביבות נטולות פלסטיק. הייצור והפעילות החיידקית המוגברים האלה יכולים להפחית את תכולת החמצן של המים. אנו ערכנו ניסוי פשוט במטרה לחקור את המנגנון הזה.

**איור 1**

**המחזור הביוגיאוכימי של פחמן באוקיינוס.** פחמן נע בין יצורים חיים לבין דברים שאינם חיים. מהאטמוספירה, בצורה של פחמן דו-חמצני, פחמן נספג על ידי פיטופלנקטון ומשולב בגלוקוז (סוכר, פחמימה) בתהליך של פוטוסינתזה, שמייצר חמצן. דרך פוטוסינתזה, היצורים הימיים האלה יכולים לייצר עד ל-70% מהחמצן שאנו נושמים. במי הים, חיידקים צורכים פחמימות כדי לקבל אנרגיה. בתהליך הזה החיידקים נושמים, משתמשים בחמצן ומשחררים פחמן דו-חמצני. הם גם מתמרים פחמימות לתרכובות אחרות (חומר אורגני). באופן הזה, פחמן "מטייל" דרך החיידקים אל חומר אורגני, ואז חזרה ל- פחמן דו-חמצני כאשר הוא נע שוב אל האטמוספירה.



**פני השטח של האוקיינוס**

ביום רגוע על יד הים, אם תסתכלו על המים מרחוק אתם עשויים להבחין בפני שטח זכוכיתיים ונוצצים. לעיתים זה נראה כאילו שישנה שכבת שמן על פני המים. הכתמים האלה עשויים להיראות כהים או בהירים יותר בהשוואה למים שסביבם. כשהים לא גלי מאוד, כאשר השמש זורחת וכאשר אין הרבה רוח, פני השטח של הים עשויים להיראות כמו מראָה מחזירה חלקה.

האוקיינוס מכיל אזורים שונים, ולשכבת פני השטח יש מאפיינים מיוחדים שמבחינים אותה מהמים שנמצאים כמה סנטימטרים מתחתיה. אולם האוקיינוס מחזיק נפח מסיבי של מים, מפני השטח ולמטה עד למצולות. מדוע שכבת פני שטח דקה שכזו תהיה מעניינת, אם היא נוכחת רק בחלק קטן מהנפח של האוקיינוס כולו? זו הסיבה לכך שהשכבה הדקה הזו חשובה: האוקיינוס מכסה כמעט 70% מפני השטח של כדור הארץ. משמעות הדבר היא ש-70% מפני השטח של כדור הארץ הם פני השטח של האוקיינוס [1]. פני השטח של האוקיינוס נמצאים במיקום חשוב, היות שהם מחברים בין שתי מערכות: המים והאוויר. מאחר שהם באמצע, פני השטח של הים מתווכים את כל החילופים בין האוקיינוס לבין האטמוספירה. אנו חושבים ששכבת פני השטח של הים גם יכולה להיות חשובה מאוד לאקלים של העולם. כדי להבין מדוע, בואו ניקח צעד אחורה ונתבונן על מחזור החיים באוקיינוס.

**מיקרו-חיים באוקיינוס: מעגל הפחמן**

**פיטופלנקטון** וחיידקים הם מיקרואורגניזמים ימיים קטנים שתומכים בכל החיים באוקיינוס. באמצעות אור שמש ופחמן דו-חמצני (CO<sub>2</sub>) בלבד, פיטופלנקטון יכולים לייצר סוכרים. התהליך הזה נקרא **פוטוסינתזה**. סוכרים מכילים אטומי פחמן ומימן, ולכן הם נקראים **פחמימות**. פחמימות הן אבני הבניין של כל היצורים החיים. פיטופלנקטון גם יכולים להפיק חמצן (איור 1). כ-70% מהחמצן שאנו נושמים מגיע מהיצורים הזעירים, דמויי הצמח האלה באוקיינוס. חיידקים צורכים ומתמרים פחמימות וחמצן שמיוצרים על ידי פיטופלנקטון. בתהליך הזה, חיידקים מחזירים פחמן דו-חמצני חזרה למים, לפני השטח של הים, ולבסוף לאטמוספירה.

**פיטופלנקטון (Phytoplankton)**

אצות ימיות מיקרוסקופיות שמהוות מזון למגוון רחב של יצורים ימיים, כולל לווייתנים, שרימפס, חלזונות ומדוזות.

**פוטוסינתזה (Photosynthesis)**

תהליך שמשמש צמחים, וגם צמחים ימיים ואורגניזמים אחרים, כדי להמיר אנרגיית אור שמש לאנרגיה כימית שמייצרת אוכל לשם שרידתו של האורגניזם. פוטוסינתזה דורשת פחמן דו-חמצני (CO<sub>2</sub>), מים ואור כדי להתרחש. דרך אנרגיית האור, התהליך של פוטוסינתזה ממיר פחמן דו-חמצני ומים בפחמימות וחמצן.

**פחמימות (Carbohydrates)**

מולקולות ביולוגיות שמכילות אטומי פחמן (C), מימן (H) וחמצן (O). המונח יכול להיות נרדף לסכרידים, קבוצה שמכילה סוכרים, עמילן וצלולוז.

### מחזור ביוגיאוכימי (Biogeochemical Cycle)

נתיב שחומר כימי, כמו למשל פחמן, נע דרכו. המחזוריים האלה כוללים שלבים שבהם החומר נוכח ביצורים חיים, ושלבים אחרים שבהם הוא נוכח בדברים לא חיים. מחזור הפחמן הוא מחזור ביוכימי חשוב במיוחד.

### חומר אורגני (Organic Matter)

תרכובות מבוססות פחמן שנמצאות בסביבות טבעיות. חומר אורגני מגיע מצמחים ומחיות, ומתוצרי הפסולת שלהם.

### מיקרו-פלסטיקים (Microplastics)

פיסות קטנות של פלסטיק באורך של פחות מחמישה מילימטרים.

ממיקרובים זעירים ללווייתנים גדולים, כל צורות החיים הימיות נשענות על המחזור הזה, שידוע כ**מחזור ביוגיאוכימי** של פחמן. בתנאים מושלמים, הייצור והצריכה של חמצן ושל פחמן דו-חמצני מאוזנים. פיטופלנקטון וחיידקים מייצרים ומתמירים תרכובות כימיות "טובות" שנוצרות עם פחמן, שנקראות **חומר אורגני**. החומר האורגני הזה מצטבר בריכוזים גבוהים בפני השטח של הים, שם הוא משמש כמזון לחיידקים אחרים. חיידקים יכולים לחיות ולשגשג בפני השטח של הים, שבהם יש ריכוזים גבוהים של חומר אורגני. ככל שיש יותר חומר אורגני, כך החיידקים פעילים יותר. כתוצאה מכך, יותר חמצן נצרך ויותר פחמן דו-חמצני משוחרר אל ממשק האוויר-ים [2].

## פלסטיק בפני השטח של הים

לרוע המזל, ישנם גם חומרים "רעים" על פני השטח של הים. מרביתם מגיעים מזיהום מידי אדם, ואחד השכיחים ביותר הוא פלסטיק. פלסטיקים ממלאים תפקיד בסיסי בחיי היומיום שלנו. אולם הרבה מהפלסטיקים החד-פעמיים שמשמשים אותנו, כמו למשל שקיות פלסטיק, כוסות וידיות של מזון וקשי פלסטיק, מגיעים אל הים, אליו הם לא שייכים. פלסטיקים כבר צפו באוקיינוס לפני כמעט 50 שנים [3]. הפלסטיקים שנמצאים על פני השטח של הים הם בדרך כלל חלקיקים קטנים (פחות מחמישה מילימטרים) וקלים שנקראים **מיקרו-פלסטיקים**, שיכולים לצוף בסביבה הימית הזו במשך זמן רב. מרבית המיקרו-פלסטיקים האלה מגיעים מההתפרקות של אובייקטים גדולים יותר דרך פעולת השמש, הגלים ואפילו כרסום על ידי חיות ימיות. סיבי מיקרו-פלסטיקים מגיעים לאוקיינוס דרך המים שמושלכים על ידי מכונות כביסה ביתיות כאשר הן מכבסות בגדים סינתטיים. חלק מהפלסטיקים יכולים בטעות להיות מושלכים או להיאבד בים, כמו למשל רשתות דיג. אולם יותר מ-80% מהפלסטיק באוקיינוס מגיע מהיבשה: נהרות, משקי בית ופסולת שלא מנוהלת כראוי.

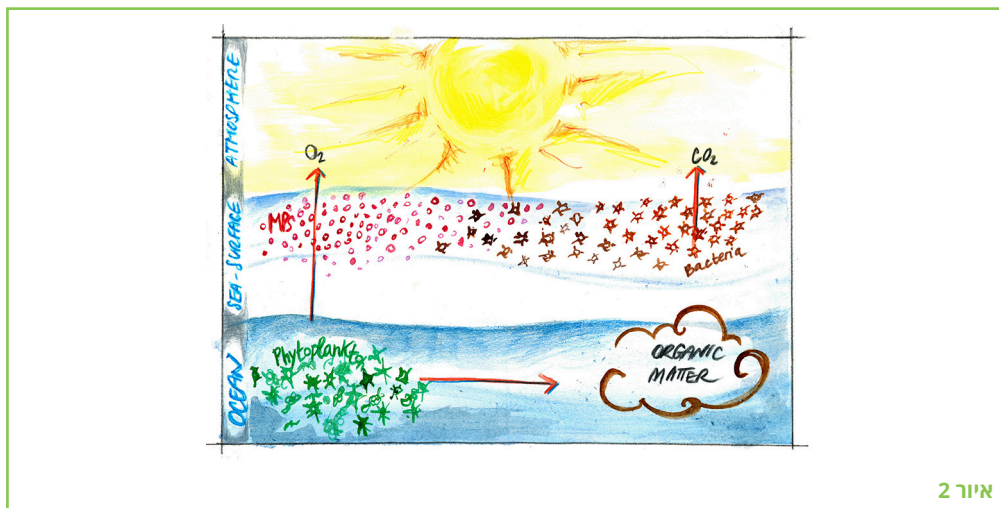
בואו נדמיין מה קורה בפני השטח של הים: יש לנו הרבה חומר אורגני והרבה חיידקים שמתמירים אותו לפחמן דו-חמצני. אז מגיע פלסטיק. מאחר שחיידקים לא יכולים לשחות אלא נסחפים על ידי הזרמים, כל חלקיק שהוא מספיק גדול להיקשרות החיידקים מספק מקום מחיה עבורם. ככל שיש יותר מקומות להיקשר אליהם, כך יותר חיידקים יחיו באותה הסביבה. המשמעות של יותר חיידקים היא שיותר חמצן יהיה בשימוש, ויותר פחמן דו-חמצני ייווצר (איור 2).

## חיידקים מייצרים יותר חומר אורגני וצורכים יותר חמצן בנוכחות של פלסטיק

מורכב לחקור את פני השטח של הים. לכן, כדי לחקור את תגובת החיידקים למיקרו-פלסטיקים, יצרנו גרסה פשוטה של הים במעבדה שלנו. ייצרנו את מי הים שלנו ואז הוספנו להם "מרק" של חומר אורגני וחיידקים. לאחר מכן, חקרנו את החיידקים בנוכחות פלסטיק ובהיעדרו [4]. השתמשנו בשני מכילים קטנים, שכל אחד מהם מכיל 4.5 ליטרים של מי ים מלאכותיים. מִכָּל אחד, שנקרא "ביקורת", לא הכיל מיקרו-פלסטיקים. הוספנו כ-1,300 חלקיקי מיקרו-פלסטיק לכל ליטר למכל השני, שנקרא "טיפול" (איור 3). אספנו דגימות מפני השטח של המים, ומהמים שמתחת לפני השטח במהלך 24 שעות. בכל דגימה מדדנו חמצן, חומר אורגני ואת מספר החיידקים. השווינו את המדידות בין הביקורת לטיפול.

**איור 2**

חלקיקי פלסטיק קטנים (פחות מחמישה מילימטרים) יכולים לצוף על פני השטח של הים במשך זמן רב. כאשר החיידקים פוגשים את החלקיקים האלה על פני השטח של הים, הם יכולים לייצר חומר אורגני ולהתמיר את התרכובות הקיימות שמסייעות להם להידבק לחלקיקים, מה שמייצר פחמן דו-חמצני. באופן הזה, החומר האורגני שמוצא ונצבר בפני השטח של הים יכול להאט את שְׁטָף החמצן והפחמן דו-חמצני בין האוקיינוס לבין האטמוספירה [MPs - קיצור של מיקרו-פלסטיקים].



איור 2

ראינו שהיה יותר חומר אורגני בדגימות שהגיעו מהמכל שהכיל מיקרו-פלסטיקים, וההבדל הזה היה אפילו גדול יותר בדגימות שנלקחו מפני השטח של המים. כאשר חומר אורגני מצטבר בפני השטח של המים, הוא יכול להפריע לזרימת החמצן למים שמתחת. ראינו את זה בניסוי שלנו: ככל שיותר חומר אורגני היה נוכח, כך ריכוז החמצן מתחת לפני השטח של המים היה נמוך יותר (איור 4). אם כן, אנו יכולים להסיק שכאשר מיקרו-פלסטיקים נמצאים, חיידקים מייצרים יותר חומר אורגני. בניסוי שלנו, החיידקים התמירו את החומר האורגני שהוספנו למכל וייצרו תרכובות אורגניות חדשות. התהליך הזה צורך חמצן.

מספר החיידקים לא השתנה במהלך הניסוי. זו הייתה הפתעה. אולם יש לנו הסבר: יכולנו למדוד רק את החיידקים הצפים. ייתכן שהיו מיליארדי חיידקים שהיו תקועים בחלקיקי המיקרו-פלסטיקים שלא יכולנו לספור. החיידקים שמחוברים לחלקיקים ככל הנראה סייעו להקטין את ריכוז החמצן.

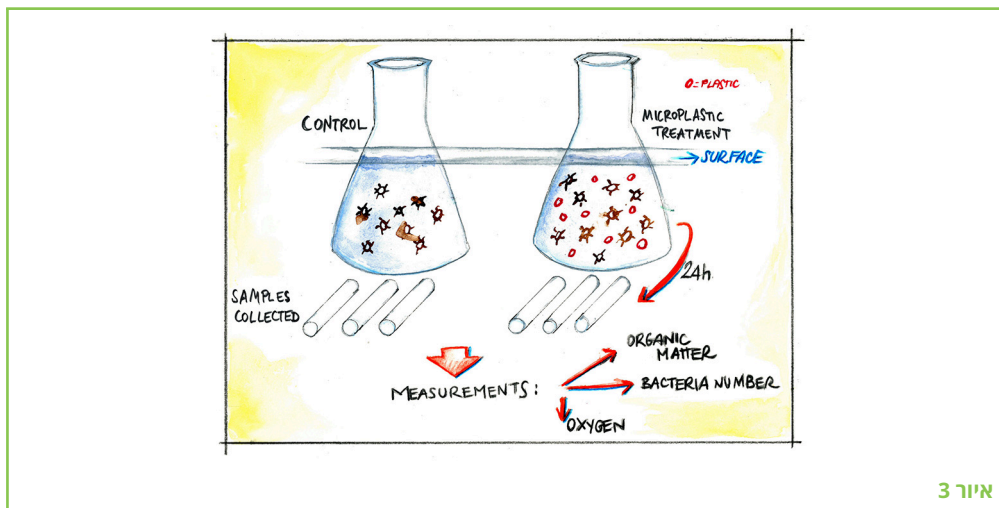
הניסוי שלנו הוכיח רעיון חשוב. כאשר חיידקים מוצאים מיקרו-פלסטיקים, הם מייצרים יותר חומר אורגני וצורכים יותר חמצן. מדוע חיידקים מייצרים יותר חומר אורגני בנוכחות של חלקיקי פלסטיק? חיידקים אוהבים להיקשר לחלקיקים. כשהם מוצאים חלקיקי פלסטיק, הם מייצרים ומתמירים חומר אורגני שמסייע להם להידבק לחלקיקים.

**פלסטיקים באוקיינוס עלולים לתרום לשינוי האקלים**

נוכחותם של מיקרו-פלסטיקים בפני השטח של הים היא בעיה רצינית שיכולה להתערב בתהליכים ביולוגיים יסודיים. התהליכים האלה שולטים על זרימתם של גזים חשובים כמו חמצן, בין פני השטח של הים לבין האטמוספירה. באמצעות חמצן, חיידקים מתמירים חומר אורגני במי הים, וכחלק מהתהליך הם גם מייצרים פחמן דו-חמצני. כאשר ישנו פלסטיק רב, חיידקים צורכים יותר חמצן. זו בעיה מאחר שפחות חמצן יהיה זמין לצורות חיים אחרות. האוקיינוס הוא הריאה הכחולה של כדור הארץ: אם נפחית את יכולתו לייצר חמצן, נשנה את האופן שבו הריאה הזו פועלת. זו בעיה מאחר שכאשר ישנו הרבה חומר אורגני על פני השטח של האוקיינוס, זרימת החמצן מהאוקיינוס לאטמוספירה עשויה להאט. זרימת פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה אל תוך האוקיינוס עלולה להאט גם היא. זו אפילו בעיה גדולה יותר, מאחר שהאוקיינוסים

### איור 3

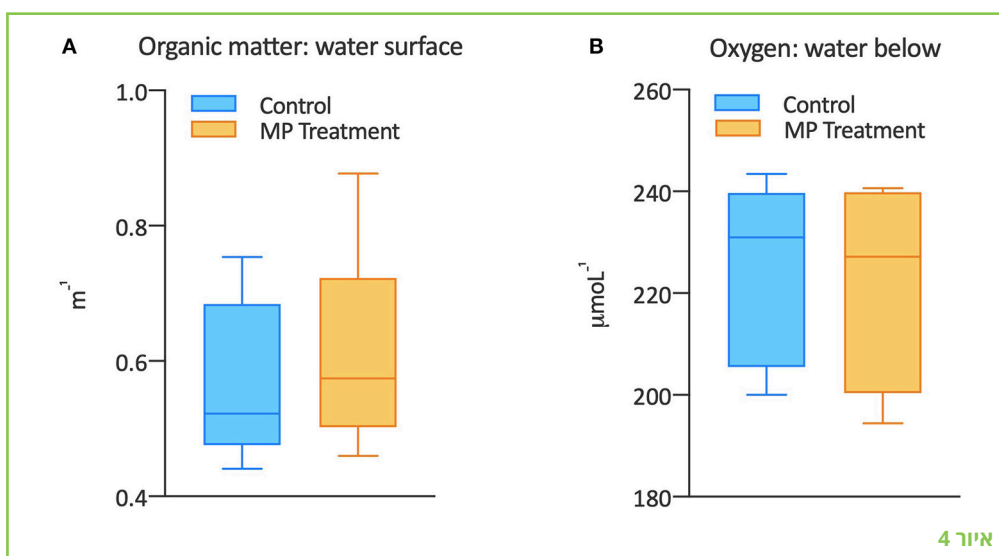
**מערך הניסוי.** במכל הביקורת היו רק חיידקים וחומר אורגני. במכל הטיפול, היו גם חלקיקי פלסטיק. במהלך ניסוי של 24 שעות, אספנו דגימות של פני השטח של המים ושל המים שמתחת לפני השטח. כמויות החומר האורגני, החיידקים והחמצן נמדדו בכל אחת מהדגימות.



איור 3

### איור 4

**(A)** האיור מראה את ריכוז החומר האורגני (שנמדד לפי היבלעות האור שעובר דרך החומר האורגני במרחק של מטר, ולכן היחידות הן  $m^{-1}$ ) במכל הביקורת (בכחול) ובמכל הטיפול (בכתום, MP). אתם יכולים לראות שהיה יותר חומר אורגני בנוכחות של מיקרו-פלסטיקים, כפי שמוצג על ידי ערכי המינימום והמקסימום הגדולים יותר וערכי החציון (הקו האופקי בתוך התיבה). **(B)** ריכוז החמצן (ביחידות של מיקרו-מול, mol של חמצן לליטר של מים:  $L^{-1}$ ) נמדד בדגימות ממכל הביקורת (בכחול) וממכל הטיפול (בכתום). במיקרו-פלסטיקים (בכתום), באופן כללי, ריכוזי חמצן במים מתחת לפני השטח היו נמוכים יותר בנוכחות של מיקרו-פלסטיקים. זה מוצג על ידי ערכי המינימום והמקסימום הנמוכים יותר, וערכי החציון בהשוואה למכל הביקורת.



איור 4

שלנו הם אחד ממקורות השקיעה העיקריים של פחמן דו-חמצני, מה שאומר שהם סופגים הרבה פחמן דו-חמצני שבני אדם פולטים לאטמוספירה בשריפת דלקי מאובנים, וכאשר הוא נמצא בעודף הוא גורם לאפקט החממה ולהתחממות גלובלית. אם האוקיינוס לוקח פחות פחמן דו-חמצני, כדור הארץ עלול להתמוזד עם שינויים בלתי נתפסים לאקלים שלו. כמות הפלסטיק באוקיינוסים שלנו היא עצומה, והיא ממשיכה לעלות. לכן, אנו צריכים לחשוב על התוצאות של הגדלת כמויות הפלסטיקים בנהרות ובאוקיינוסים שלנו. חשוב לכולם לחבור למשפחות, לחברים, למדענים ולחברה שלנו כדי למצוא פתרונות לבעיה הגלובלית הזו.

### תודות

תודה ענקית לטרסה גלגני עבור תרומתה האומנותית החשובה לאיורים. העבודה המקורית התאפשרה הודות לתוכנית Horizon 2020 Research and Innovation Program של האיחוד האירופי תחת מענק Marie Skłodowska-Curie Grant Agreement No. 702747 POSEIDOMM to LG. אנו רוצים להודות לאנה,

לקלרה, לסטפן ולקרינה עבור תובנותיהם והצעותיהם המועילות. החוש הביקורתי וסקרנותם לנושא סייעו מאוד לתהליך הסקירה.

## מאמר המקור

Galgani, L., and Loïselles, S. A. 2019. Plastic accumulation in the sea surface microlayer: an experiment-based perspective for future studies. *Geosciences* 9:66. doi: 10.3390/geosciences9020066

## מקורות

1. MacIntyre, F. 1974. The top millimeter of the ocean. *Sci. Am.* 230:62–77. doi: 10.1038/scientificamerican0574-62
2. Garabétian, F. 1990. Production de CO<sub>2</sub> à l'interface air-mer. Une approche par l'étude des phénomènes respiratoires dans la microcouche de surface [CO<sub>2</sub> production at the sea-air interface. An approach by the study of respiratory processes in surface microlayer]. *Int. Rev. Hydrobiol.* 75:219–29. doi: 10.1002/iroh.19900750208
3. Carpenter, E. J., and Smith, K. L. 1972. Plastics on the Sargasso sea surface. *Science* 175:1240–1. doi: 10.1126/science.175.4027.1240
4. Galgani, L., and Loïselles, S. A. 2019. Plastic accumulation in the sea surface microlayer: an experiment-based perspective for future studies. *Geosciences* 9:66. doi: 10.3390/geosciences9020066

פורסם אונליין: 26 באפריל 2022

נערך על ידי: Jamileh Javidpour

מנחים מדעיים: Gabriella Pantó and Christoph Rameshan

**ציטוט:** Galgani L and Loïselles SA (2022) כיצד פלסטיק על פני השטח של הים יכול להשפיע על האקלים שלנו? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00120-he

**תורגם והותאם:** Galgani L and Loïselles SA (2020) How Can Plastic on the Sea Surface Affect Our Climate? *Front. Young Minds* 8:120. doi: 10.3389/frym.2020.00120

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

**COPYRIGHT** © 2020 © Galgani and Loïselles. 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.

## סוקר צעיר

### SAMUEL, גיל: 12

בזמני הפנוי, אני אוהב לבלות עם חברים. לעיתים קרובות אנו נפגשים במקומות שבהם אפשר לשחק כדורגל. חוץ מזה, אני חלק ממועדון אתלטיקה. אני הולך לאימונים פעמיים-שלוש בשבוע. אחרי שאני מגיע הביתה מבית הספר, אני בדרך כלל מתחיל עם שיעורי הבית שלי כדי שאחר כך יהיה לי זמן פנוי.



## הכותבים

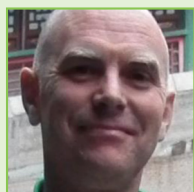
### LUISA GALGANI

Luisa Galgani היא מדענית ימית שמחקרה מתמקד בעיקר בהשפעות של בני אדם על דינמיקות פחמן בסביבות ימיות ובסביבות של מים מתוקים. בין ההשפעות האלה, היא חוקרת את ההשפעות של פלסטיק ושינויי אקלים. היא עבדה באיטליה, גרמניה וארצות הברית. המחקר שלה הוביל אותה לבלות ימים רבים בניווט, שהיא אוהבת. היא חקרה אזורים שונים, מהים התיכון לאוקיינוס הארקטי, לדרום האוקיינוס הפסיפי, למרכז האוקיינוס האטלנטי ולאוקיינוס ההודי. היא גם עורכת ניסויים במעבדה, אולם היא הכי אוהבת להיות בשטח באמצע האוקיינוס. \*luisa.galgani@icloud.com



### STEVEN A. LOISELLE

Steven A. Loielle הוא מדען ימי שמחקרו מתמקד בדינמיקות של מים מתוקים ושל מערכות אקולוגיות ימיות. הוא והקולגות שלו פיתחו גישות חדשות לניטור ולניהול של סביבות ימיות עבור שימורן והפחתת ההשפעה של מגמות גלובליות גדולות כמו שינויי אקלים, עיור והגדילה של חקלאות אינטנסיבית. זה הוביל אותו לבצע מחקרים בנהרות הגדולים של אפריקה, באדמות הרטובות של פארנה, בנהרות עמק ינגטזה ובסביבות החוף בים התיכון, שם הוא חי.



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