



## איך פוטוסינתזה מתרחשת באוקיאנוסים?

Tonmoy Ghosh<sup>1,2\*</sup>, Sandhya Mishra<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>מחלקת מליחות וחומרים כימיים בים, מכון המחקר המרכזי למליחות ולחומרים כימיים בים (CSIR), Gujarat, Bhavnagar, הודו  
<sup>2</sup>האקדמיה למחקר מדעי וחדשני (AcSIR-CSMCRI), מכון המחקר המרכזי למליחות ולחומרים כימיים בים (CSIR), Gujarat, Bhavnagar, הודו

### סוקרים צעירים

**MATILDE**

גיל: 9



**EMILIA**

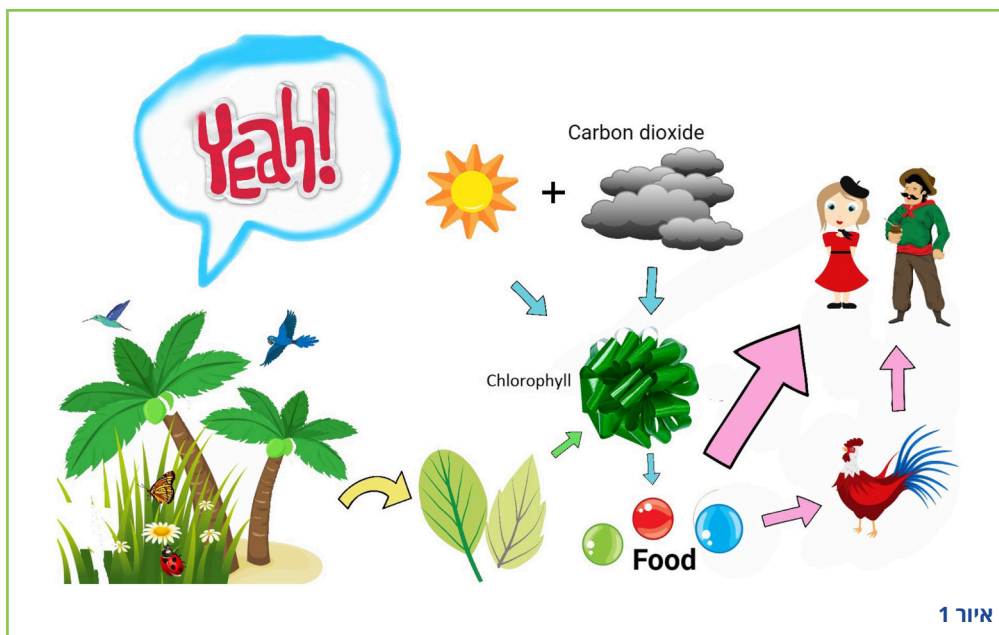
גיל: 15



המזון שאנו אוכלים מגיע בסופו של דבר מצמחים, ישירות או בעקיפין. אסור להמעיט בחשיבותם של הצמחים כמטבח העולמי. באמצעות אור השמש ופחמן דו-חמצני צמחים מייצרים לעצמם את מזונם, ולמיליוני יצורים אחרים התלויים בהם, בתהליך הנקרא פוטוסינתזה. מולקולה שנקראת כלורופיל חיונית לתהליך זה, שכן היא בולעת את אור השמש. עם זה האופן שבו צמחי יבשה מייצרים לעצמם את מזונם שונה מאוד מהאופן שבו צמחים באוקיאנוסים מייצרים לעצמם את מזונם. היות שלקרני האור קשה לחדור אל מתחת למים באוקיאנוסים, תהליך הפוטוסינתזה, ייצור המזון, נהיה איטי מאוד. חלבוני פיקובילין הם חלבונים אשר מקלים על הצמח את העבודה הזו, על-ידי קליטת האור הקָמין והעברתו הלאה לכלורופיל. חלבוני פיקובילין נמצאים ביצורים זעירים ובלתי נראים הנקראים ציאנובקטריה (ידועים גם בשם חיידקים פְּחֹלִיִים). תגובות "ייצור המזון" שלהם חיוניות לקיומם של יצורים חיים רבים כגון דגים, ציפורים ובעלי חיים ימיים נוספים. לכן, חשוב מאוד שכולם יבינו איך הציאנובקטריה יוצרים את מזונם, ומהו התפקיד החשוב של חלבוני פיקובילין בתהליך.

**איור 1**

מבט פשטני על האופן שבו צמחים מייצרים עבורנו מזון העלים של צמחים ירוקים מכילים כלורופיל, שבולע אור שמש לְשֵׁם ייצור מזון. הצמח עצמו משתמש במזון זה, וגם בעלי חיים אחרים, כולל בני האדם.  
 האדם = Carbon dioxide  
 דו־חמצני  
 כלורופיל = Chlorophyll  
 מזון = Food



איור 1

**כיצד יצורים חיים משיגים את מזונם?**

כאשר אתם חושבים על מזון, האם אתם בדרך כלל מדמיינים את המזון האהוב עליכם? זה תהליך טבעי, היות שהמזון חשוב לכל יצור חי. כדי למלא את הצורך הבסיסי הזה, כל היצורים החיים מכינים את מזונם בעצמם או מקבלים אותו ממקור אחר. בני אדם יכולים לאכול גם צמחים וגם בעלי חיים. יש בעלי חיים שצורכים בעלי חיים אחרים, ויש בעלי חיים שאוכלים צמחים כמזון. בסופו של דבר, אנו רואים שכל היצורים על פני כוכב הלכת הזה תלויים בצמחים למזון. אם כך, מה אוכלים הצמחים? למעשה, צמחים "אוכלים" אור שמש וגז הנקרא פחמן דו-חמצני - שני דברים שזמינים כאן בכדור הארץ. התהליך שבו צמחי יבשה מייצרים לעצמם את מזונם תוך שימוש באור השמש ובפחמן דו־חמצני נקרא **פוטוסינתזה** (איור 1). כאשר פחמן דו-חמצני נקלט בְּעֵלִים, אור השמש נכלא במולקולה בצמח הנקראת **כלורופיל**. כל היצורים שמבצעים פוטוסינתזה מכילים כלורופיל.

עם זה, האופן שבו צמחי יבשה מְבַצְעִים פוטוסינתזה אינו עוזר ליצורים החיים באוקיאנוסים, המְכַסִּים כ-70% מפני כדור הארץ. לצמחים החיים באוקיאנוסים יש בעיה של זמינות אור. האור הכחול והאור הירוק חוזרים לתוך המים יותר מאשר האור הצהוב והאור האדום (איור 2). למרבה המזל, לצורך ייצור מזונם מכמות אור מוגבלת זו ומפחמן דו־חמצני, צמחי האוקיאנוסים נעזרים במיקרואורגניזמים זעירים מיקרוסקופיים הנקראים ציאנובקטריה (Cyanobacteria), ידועים גם בשם אֶצוֹת פְּחֹלִיּוֹת-ירוקות). מיקרואורגניזמים אלה עברו התאמה לתנאים של אור מועט, והם מבצעים פוטוסינתזה גם עבור עצמם וגם עבור יצורים חיים אחרים. ציאנובקטריה הם מיקרואורגניזמים עתיקים שחיים על פני כדור הארץ כבר מיליארדי שנים. נאמר על הציאנובקטריה שהם אחראים ליצירת האטמוספירה העשירה בחמצן שבה אנו חיים [1]. לצורך ביצוע פוטוסינתזה בתנאי אור מועט הציאנובקטריה נעזרים בחלבונים הנקראים **חלבוני פיקובילין**, שנמצאים בתוך קרומי התאים (המעטפת החיצונית) של הציאנובקטריה.

**פוטוסינתזה (Photosynthesis)**

תהליך שבו צמחים מייצרים מזון עבור עצמם ועבור יצורים אחרים, תוך שימוש באור השמש ובגז פחמן דו־חמצני.

**כלורופיל (Chlorophyll)**

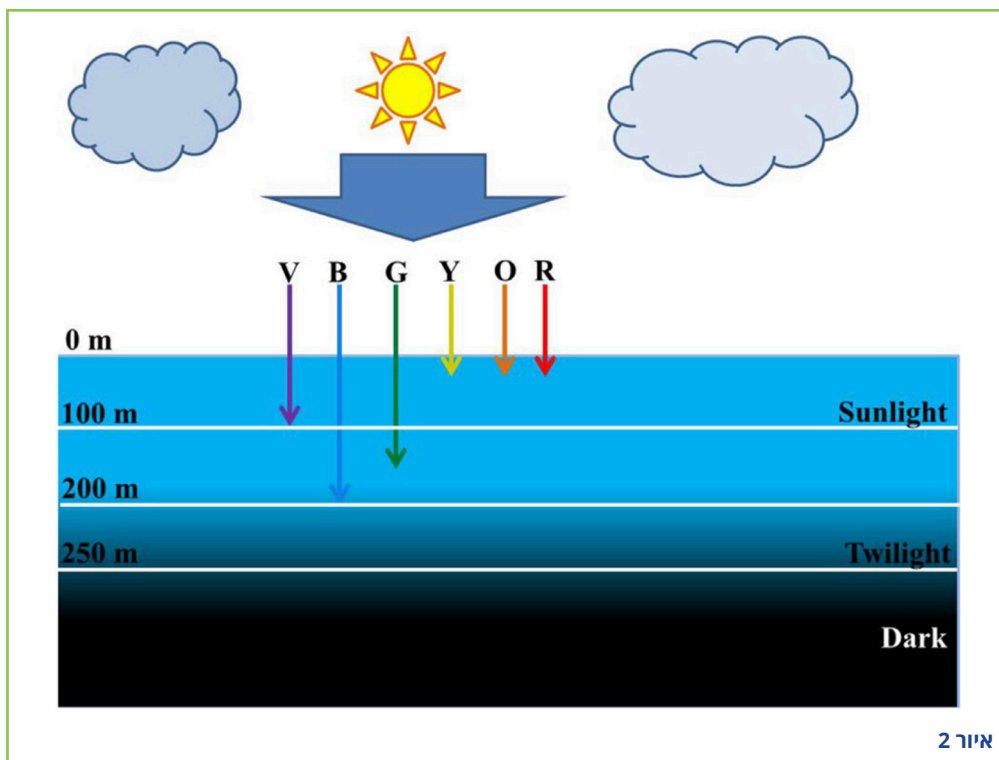
מולקולה בצמחים שבולעת אור שמש עבור תהליך הפוטוסינתזה.

**חלבוני פיקובילין (Phycobiliproteins)**

פיגמנטים צבעוניים הנמצאים בציאנובקטריה וביצורים מסוימים אחרים, העוזרים לתהליך הפוטוסינתזה על-ידי בליעת צבעים מסוימים של האור שהכלורופיל אינו יכול לבלוע.

**איור 2**

חדירת אור השמש לאוקיאנוסים אור השמש מורכב מכמה צבעים: V, סגול; B, כחול; G, ירוק; Y, צהוב; O, כתום; R, אדום. הצבעים הכחול והירוק מגיעים עד לעומק של 200 מטרים לתוך המים, בעוד שכל שאר הצבעים, כולל הסגול, מגיעים רק לעומק של 100 מטרים אל תוך האוקיאנוסים. החיצים מייצגים את העומק שאליה מגיעים הצבעים השונים של האור = Sunlight  
 דמדומים = Twilight  
 חושך = Dark



איור 2

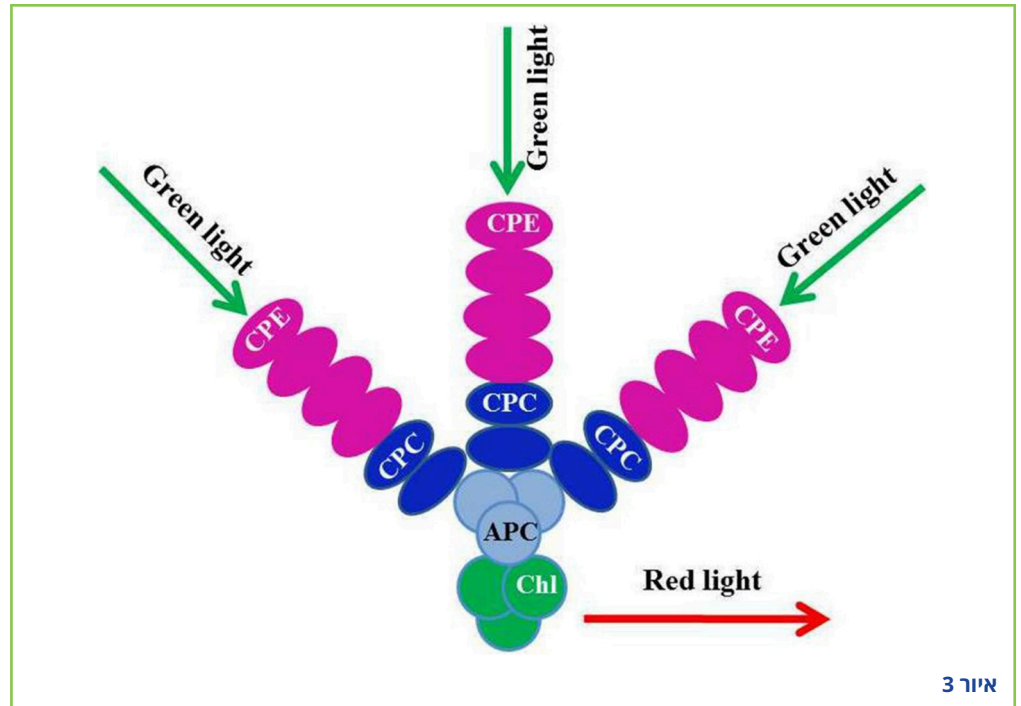
**מהם חלבוני פיקובילין?**

תפקידם של חלבוני פיקובילין הוא לעזור לכלורופיל בסביבות מימיות. היות שקשה לאור לחדור לאוקיאנוסים, חלבוני פיקובילין מקלים על צמחי האוקיאנוס את העבודה, על-ידי בליעת כל אור זמין; הם בולעים את המַקְטַע הירוק של האור והופכים אותו לאור אדום – צבע האור הנחוץ לכלורופיל [2]. עם זה שינוי צבע האור אינו פשוט כל כך. האור הירוק צריך לעבור דרך מולקולות חלבוני פיקובילין שונות, שבולעות אור בצבע אחד ופולטות אור בצבע אחר. אחר כך, האור שנפלט נקלט על-ידי מולקולת חלבון פיקובילין נוספת, שהופכת אותו לצבע שלישי. תהליך זה נמשך עד שהאור המשתחרר הוא אדום, ויכול סוף-סוף להיקלט בכלורופיל. כדי שכל התהליך הזה יתרחש, נדרשות שלוש מולקולות שונות של חלבוני פיקובילין, המסודרות כמעין כובע מעל מולקולת הכלורופיל, כפי שמוצג באיור 3. שלושה סוגי חלבוני פיקובילין אלה הם: (א) C-פיקואריתרין (CPE), צבעו ורדרד-אדום והוא אחראי לבליעת המקטע הירוק של אור השמש; (ב) C-פיקוציאנין (CPC), צבעו כחול כהה והוא אחראי לבליעת המקטע הכתום-אדום של אור השמש; (ג) אלופיקוציאנין (APC), צבעו כחול בהיר והוא אחראי לבליעת המקטע האדום של אור השמש.

הסיבה לכך שחלבוני הפיקובילין בולעים אור בצבעים שונים היא שהם מכילים בתוכם מולקולות הנקראות בִּילִינִים, המעניקות להם את צבעם המבהיק. בילינים אלה אחראים לבליעת אור בצבע אחד ולפליטתו בצבע אחר, וכך הם גורמים לשינוי בצבע האור. מכשור מתקדם מאפשר לנו לנתח את סידור המולקולות והחלבונים האלה בציאנובקטריה. אנו יודעים שצורתם של חלבוני פיקובילין היא כמו דיסק [3], והדיסקים מוערמים זה על גבי זה ליצירת המבנה דמוי הכובע. קצה אחד של הערמה עשוי מ-CPE, והקצה האחר שלה

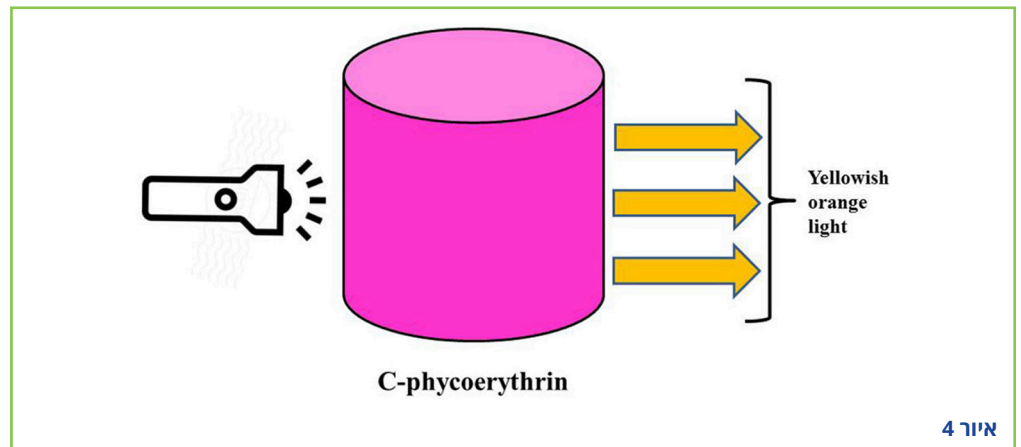
**איור 3**

סידור דמוי כובע של חלבוני פיקובילין ושל כלורופיל (Chl) בציאנובקטריה האור הירוק נקלט תחילה על ידי C-פיקואריתרין (CPE), שמעביר אותו הלאה ל-C-פיקוציאנין (CPC). CPC מעביר הלאה את אנרגיית האור לאלופיקוציאנין (APC), שמעביר אותו לכלורופיל לשם ביצוע פוטוסינתזה, תוך שימוש באור האדום.  
 Green light = אור ירוק  
 Red light = אור אדום



**איור 4**

התכונות הפלואורסצנטיות של C-פיקואריתרין (CPE) הצבע הלבן של האור הנוצר על-ידי הפנס עובר שינוי על ידי לאור צהבהב כתום, שנקלט על-ידי C-פיקוציאנין.  
 = Yellowish orange light  
 אור צהבהב-כתום  
 = C-phycoerythrin  
 פיקואריתרין C-



עשוי מ-CPC. הרכב זה מתחבר לליגנדה העשויה מ-APC. כל המבנה הזה מחובר לכלורופיל, שמקבל את האור האדום שנפלט על-ידי ה-APC. הסידור של המבנה דמוי הכובע מוצג באיור 3.

**איך מתרחשת העברת אנרגיית האור בחלבוני פיקובילין?**

השינוי בצבע האור מירוק לאדום מתבצע בתהליך הנקרא **פְּלוּאוֹרֶסְנֶצְיָה**. בואו נראה מהי פלואורסנציה. דמיינו מְּכָל שקוף שמלא בנוזל ורוד. כשמאירים על נוזל זה בפנס, הוא זוהר בצבע כתום מבהיק! זה בדיוק מה שעושה ה-CPE (איור 4). לכל חלבוני פיקובילין תכונה מלהיבה זו של שחרור אור בתחום הנראה, בצבע שונה מצבע האור שהוקרן עליהם. אחרי שה-CPE משנה את האור הירוק לצהוב-כתום, ה-CPC קולט את האור הצהוב-כתום ומשנה אותו לאדום בהיר. ה-APC קולט את האור האדום בהיר הזה ומשנה אותו לאדום כהה עבור הכלורופיל. כך, האור הירוק הופך לאור אדום – הצבע שהטבע התכוון שהכלורופיל יבלע.

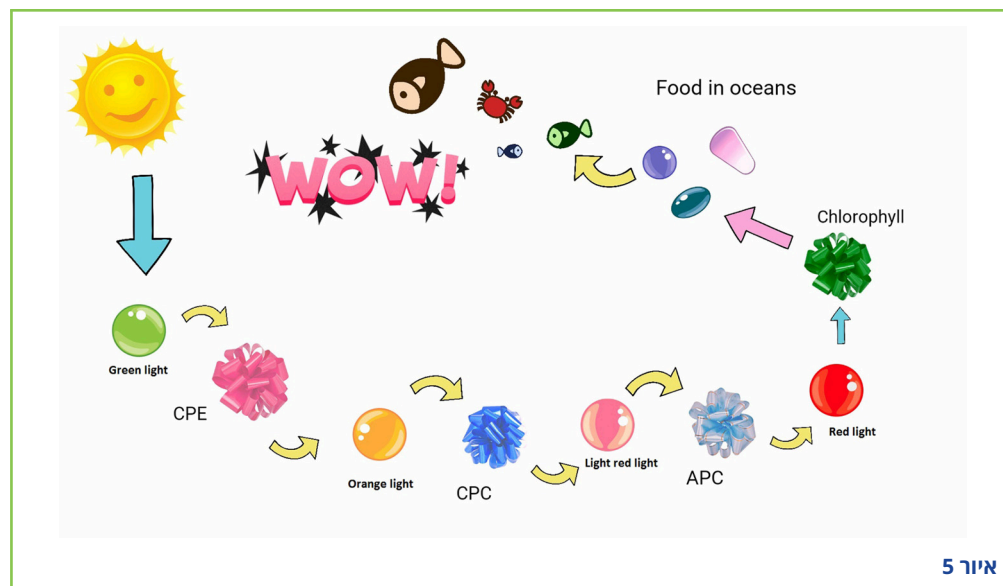
**פְּלוּאוֹרֶסְנֶצְיָה (Fluorescence)**

תכונה של תרכובות מסוימות שבולעות צבע אחד של האור ופולטות צבע אחר. חלבוני פיקובילין מנצלים תכונה זו לשינוי צבע האור שהם בולעים, כדי שהאור יוכל לשמש בתהליך הפוטוסינתזה.

**איור 5**

חלבוני פיקובילין משנים את צבע האור מירוק לאדום, כדי שיוכל לשמש בתהליך הפוטוסינתזה האור הירוק נקלט על-ידי C-פיקואריתרין (CPE), שמשנה את צבע האור לצהבהב-כתום. אחר כך, האור הכתום נקלט על-ידי C-פיקוציאנין (CPC), שממשיך לשנות אותו לאור אדום בהיר. הצבע האדום בהיר נקלט על-ידי אלופיקוציאנין (APC), שמשנה אותו לצבע אדום לבסוף, הצבע האדום נבלע על-ידי הכלורופיל, ליצירת מזון בתהליך הפוטוסינתזה.

אור ירוק = Green light  
 אור כתום = Orange light  
 אור אדום = Light red light  
 בהיר  
 אור אדום = Red light  
 כלורופיל = Chlorophyll  
 מזון = Food in oceans  
 באוקיאנוסים.



התהליך הזה הוא מעין מרוץ שליחים, שבו כל אחד מהמשתתפים ממשיך בנקודה שבה הקודם סיים (איור 5). חלבוני פיקובילין אלה הם חלק חשוב ביצור הזעיר המיקרוסקופי שנקרא ציאנובקטריה, אשר מבצע פוטוסינתזה במידה דומה לזו של צמחי היבשה. ההבדל היחיד הוא שהם משתמשים בסדרת מולקולות שונה – ציאנובקטריה משתמשים בחלבוני פיקובילין, בעוד צמחי יבשה משתמשים בכלורופיל.

**מה למדנו?**

אם כך, כעת אנו יודעים שפוטוסינתזה היא התהליך שבאמצעותו צמחים מייצרים את מזונם, תוך שימוש בכלורופיל. אנו גם יודעים כי כמות האור הזמן המעטה באוקיאנוסים מפחיתה את יעילות תהליך הפוטוסינתזה. במהלך האבולוציה, הטבע יצר מולקולות עזר הנקראות חלבוני פיקובילין, אשר מסוגלות לבלוע את צבעי האור הזמנים באוקיאנוסים ולהפוך אותם לצבע שהכלורופיל יכול לעשות בו שימוש. חלבוני פיקובילין אלה נמצאים בציאנובקטריה הזעירים, שאינם נראים לעין, ושאחראים לייצור מזון עבור היצורים החיים באוקיאנוסים, וגם אחראים לייצור החמצן באטמוספירה שלנו, שאותו אנו נושמים בכל רגע. האין זה מלהיב שיצורים זעירים אלה יכולים לגרום לכזה שינוי עבור כל היצורים החיים בים? בעתיד, אנו מקווים להבין טוב יותר את תפקודיהם של חלבוני פיקובילין, ואת התפקידים שהם עשויים למלא לטובת האנושות.

**מקורות**

1. Sidler, W. A. 1994. Phycobilisome and phycobiliprotein structure. In: Bryant, D. A., editor. *The Molecular Biology of Cyanobacteria*. Dordrecht: Springer. p. 139–216.
2. Ghosh, T., Paliwal, C., Maurya, R., and Mishra, S. 2015. Microalgal rainbow colours for nutraceutical and pharmaceutical applications. In: Bahadur, B., Venkat Rajam, M., Sahijram, L., and Krishnamurthy, K. V., editors. *Plant Biology and Biotechnology: Volume I: Plant Diversity, Organization, Function and Improvement*. New Delhi: Springer. p. 777–91.

3. Satyanarayana, L., Suresh, C. G., Patel, A., Mishra, S., and Ghosh, P. K. 2005. X ray crystallographic studies on C-phycocyanins from cyanobacteria from different habitats: marine and freshwater. *Acta Crystallogr. Sect. F* 61(9):844-7. doi: 10.1107/S1744309105025649

פורסם אונליין: 25 בינואר 2019

נערך על ידי: Berend Smit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland

ציטוט: Ghosh T and Mishra S (2019) איך פוטוסינתזה מתרחשת באוקיאנוסים? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2017.00034-he

#### תורגם והותאם:

Ghosh T and Mishra S (2017) How Does Photosynthesis Take Place in Our Oceans? Front. Young Minds 5:34. doi: 10.3389/frym.2017.00034

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

**COPYRIGHT** © Ghosh and Mishra 2017. 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 (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

### MATILDE, גיל: 9

שמי מתילדה. אני בת 9 ואני אוהבת לשחק שחמט ולקרוא. המקצועות האהובים עליי בבית הספר הם מתמטיקה ומדעים.

### EMILIA, גיל: 15

שמי אמיליה. אני בת 15. אני אוהבת לקרוא ולכתוב. תחומי המדע האהובים עליי הם אסטרונומיה וקוסמולוגיה כללית.

## הכותבים

### TONMOY GHOSH

אני הוכשרתי להיות ביוטכנולוג, ולאחרונה הגשתי את התזה שלי. בזמן שאני ממתין למבחן ההגנה שלי על התזה, חשבתי שיהיה נפלא אם אוכל לחלוק את הידע שלי בעבודה עם הקבוצה של ד"ר Sandhya Mishra, ממחלקת מליחות וחומרים כימיים בים, מכון המחקר המרכזי למליחות ולחומרים כימיים בים, Gujarat, הודו. תחומי העניין שלי במחקר הנוכחי מעורבים במציאת יישומים ביולוגיים וכימיים חדשים ומלהיבים ל-C-פיקואריתרין, שאותו אנו משיגים משניים או שלושה מקורות שונים. בעיסוקי במטרות המחקר



שלי, חשבתי שיהיה נהדר לשתף את ניסיוני בתחום זה עם ניצני המדענים והחוקרים שלנו ברחבי העולם.



### SANDHYA MISHRA

בשנת 1990 סיימתי את תואר הדוקטור שלי בכימיה ביו-אנאורגנית, במעבדתי של פרופסור M. M. Taqui Khan מאוניברסיטת Bhavnagar. זה שני עשורים אני עובדת בנושא חלבוני הפיקובילין ויישומיהם, וקבוצת המחקר שלי מתמקדת כיום בחלבוני פיקובילין ובקרוטנואידים (פיגמנטים צהובים או אדומים שנמצאים בצמחים), שמקורם בציאנובקטריה. היות שבמדינה שלנו רצועת חוף ארוכה, תמיד אפשר למצוא אותנו בנקודה מרוחקת כלשהי ב-Gujarat, וכן – אנו אוהבים את החופים ואת האוקיאנוסים! תמיד ניסיתי לעודד ולהניע את הסטודנטים שלי לשחרר את היצירתיות שלהם במומחיות, ולגבות זאת בניסויים

מדעיים. \*smishra@csmcri.res.in

Hebrew version  
provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ער.)  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem

