

האוקיינוס החשוך מלא באורות

Séverine Martini^{1*}, Warren R. Francis²

¹UMR7093 המעבדה לאוקיינוגרפיה של וילפרנץ', וילפרנץ-סור-מר, צרפת
²המחלקה לביולוגיה, אוניברסיטת דרום דנמרק, אודנס, דנמרק

סוקרים צעירים

JOHN FISKE
ELEMENTARY
SCHOOL
גיל: 12-14



דמיינו שגופכם יכל לפלוט אור מתי שהייתם צריכים. לעולם לא הייתם פוחדים מהחושך בלילה, מאחר שיכולתם להאיר את העולם שסביבכם. יכולתם לירות ענן מהבהב מתחת למיטתכם, כך שמפלצות החשיכה היו מתעוורת, בזמן שהייתם בורחים. חיות רבות באוקיינוס יכולות לעשות זאת; זהו כוח-על שנקרא **בִּיּוֹלוֹמִינֶסְנְצִיָּה**! באוקיינוס הפתוח, בערך שלושה רבעים מכל החיות הן ביולומינסטיות, והחיות האלה יכולות לחיות בכל מקום החל מפני השטח של האוקיינוס ועד לעומק של 4,000 מטרים. פליטת האור הזו היא דרך תקשורת יעילה לצורך מציאת בני זוג, משיכת טרף, או בריחה מפני טורפים בחשכת האוקיינוס.

הקדמה

האם אתם יודעים שלמרבית החיות הימיות יש כוח-על שלנו אין? זה נקרא **בִּיּוֹלוֹמִינֶסְנְצִיָּה** (הארה ביולוגית), מהמילים "ביו" שמשמעותה חיים בלטינית, ו"לומן" שמשמעותה אור בלטינית. **בִּיּוֹלוֹמִינֶסְנְצִיָּה** היא היכולת של חלק מהאורגניזמים החיים לפלוט את האור של עצמם. המילה "ביולומינסנציה" עשויה להישמע דומה למילים אחרות, כמו "פוספורסנציה" (חשבו על צעצועים שזוהרים בחשכה), או "פלואורוסנציה" (חשבו על מרקרים), אולם הן

ביולומינסנציה (Bioluminescence)

פליטת אור על ידי אורגניזמים חיים.

תופעות שונות לחלוטין [1]. ההבדל העיקרי הוא שביולומינסנציה לא דורשת אף מקור אור חיצוני, כמו שמש או פנס. ביולומינסנציה היא למעשה תגובה כימית (יותר כמו מקל זוהר). התגובה הזו תוארה בפעם הראשונה בשנת 1887 על ידי הביולוג הצרפתי רפאל דו בוז. תגובת הביולומינסנציה דורשת שני כימיקלים שנקראים **לוציפרין** (שנצרך כמו סוללות), השני הוא האנזים **לוציפראז**. שני הכימיקלים האלו מגיבים יחד, עם קצת חמצן, כדי לייצר אור.

לוציפרין (Luciferin)

כימיקל שפועל עם לוציפראז במהלך התגובה הכימית של הביולומינסנציה.

לוציפראז (Luciferase)

אנזים שמעורב בתגובה הכימית של הביולומינסנציה.

מדוע לפלוט אור?

מדוע חיות משקיעות אנרגיה בפליטת אור? סיבה אחת לפלוט אור היא שבאוקיינוס אור השמש חוזר בקושי לעומק של מעט יותר מכמה מאות מטרים. מתחת לזה, חשוך לגמרי. במהלך הלילה, כשאפילו פני השטח של האוקיינוס חשוכים, חוץ מהזוהר הדהוי של אור הירח, אור הוא דרך תקשורת מעולה עבור חיות. אולם עם מי הם מתקשרים, ומי עוד רואה את האותות האלה? עבור מינים ימיים, פליטת אור או חיפוש אור בחושך מסייעת להם למצוא בני זוג או אפילו משהו לאכול. לדוגמה, דג פתיונאי משתמש בפתיונות הזוהרים שלו כדי למשוך טרף קטן שללא ספק יסיים בבטנו (איור 1A). כמובן, מאחר שחיות הטרף לא רוצות להיאכל, גם הן יכולות להשתמש בביולומינסנציה, אולם כמנגנון הגנה. אפשר להשתמש בהרבה אסטרטגיות שונות [2]. יריית ענן של ליחה זרחנית היא דרך להשאיר טורפים מבולבלים במשך כמה שניות (איור 1B). דמיינו שאתם בחדר חשוך במשך כמה דקות. אם מישהו מגיע ומכוון פנס לתוך עיניכם, אתם תתעוורו במשך כמה שניות ולא תהיו מסוגלים לראות כלום – שזה בדיוק זמן מספיק לטרף הפוטנציאלי לברוח.

חלק מהדגים ומהדיונונים משתמשים בביולומינסנציה עבור לומינציה-נגד (איור 1C). באופן נורמלי, אם החיות האלה שוחות בפני השטח במהלך היום, הצללית (סילואט) שלהן כנגד השמש הייתה נראית על ידי טורפים ששוחים תחתיהם. אולם חלק מהדגים ומהדיונונים יכולים לייצר אור מהבטנות שלהם במטרה להרוס את הצללית ולהתחבא ממי שעלולים להיות טורפים. אסטרטגיה אחרת שמשמשת חלק מהדיונונים ומהתולעים היא לנתק חלק מגופם כקורבן מטרה זוהר (איור 1D). במקרה כזה, הטורף רודף אחרי האיבר הזוהר המנותק בזמן שהטרף בורח, באופן דומה לדרך שבה חלק מהזוחלים יכולים לנתק את זנבותיהם כדי לברוח מטורפים. לבסוף, חלק מהחיות משתמשות באור במטרה לקרוא לעזרה אם רודפים אחריהן, מה שלעיתים נקרא "אזעקת פורץ" (burglar alarm; איור 1E). חיות שהן איטיות או שברירות יכולות לחוות קשיים בבריחה מטורף בעצמן, ולכן הן משתמשות באור כדי לקרוא למשהו גדול יותר ורשע יותר שעשוי לרצות לאכול את האורגניזם שמטריד את החיה השברירית.

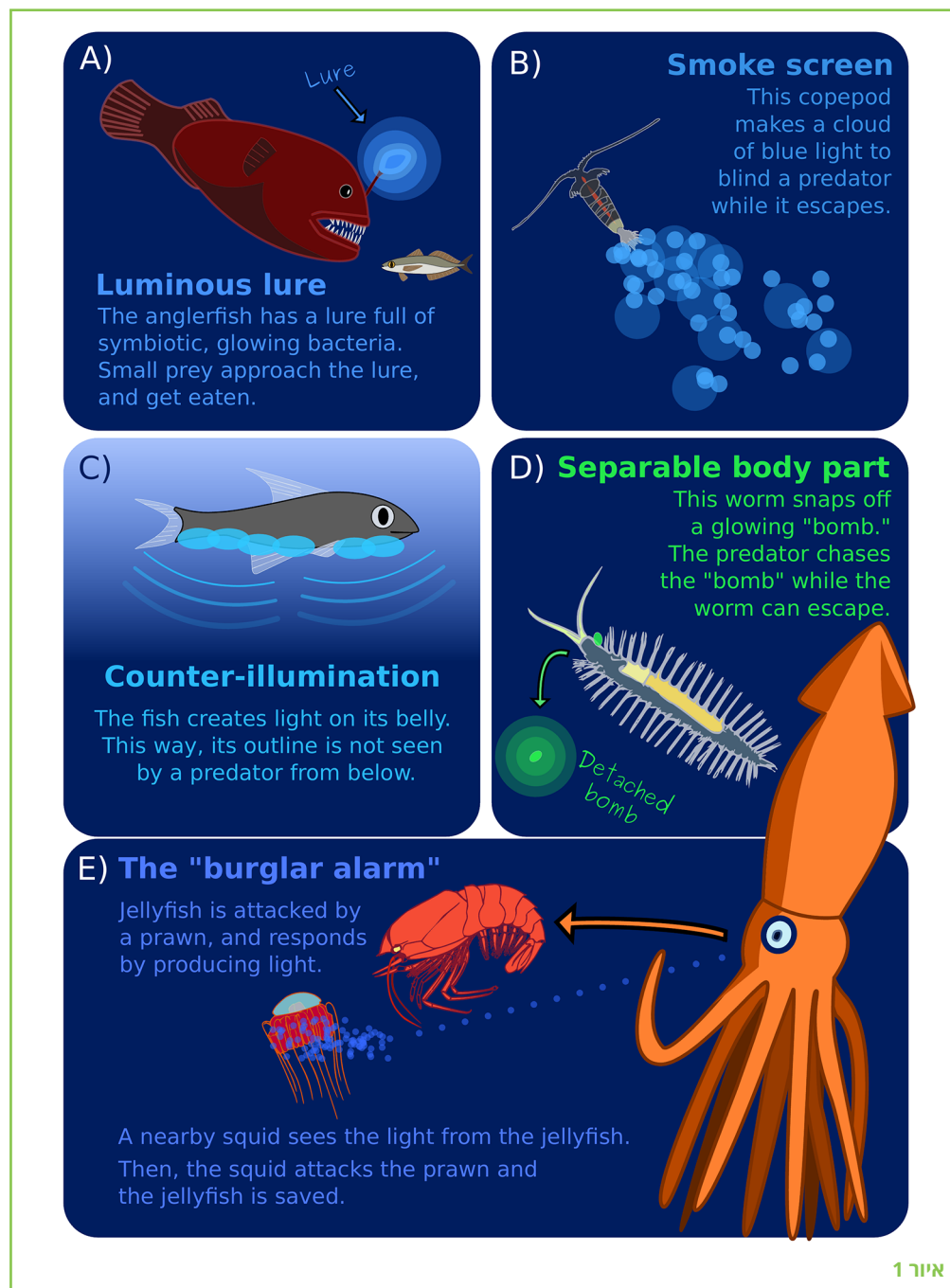
מגוון של אורגניזמים ימיים זוהרים

אורגניזמים של ביולומינסנציה אינם שכיחים על האדמה, אף על פי שאולי ראיתם גחליליות כאלה בגינה שלכם או במושב. באוקיינוס, לעומת זאת, הם נמצאים בכל מקום. ישנו מגוון רחב של חיות עם לומינציה: דגים, דיונונים, מדוזות, אלמוגים מסוימים, סוגים שונים של תולעים ימיות, מסרקניות, כוכבי ים וסרטניים (חלק מהשרימפס, לדוגמה). בקרב חיות לומינציה מוזרות אף יותר, פירוזומים הם אורגניזמים שנראים כמו צינורות ארוכים גלטיניים (איור 2A). הם פולטים אור בוהק לא רגיל ומתמשך, ואפילו מדהים יותר מכך, הם זוהרים בתגובה לגירוי אור חיצוני (איור 2B).

איור 1

דרכים שונות שבהן חיות בעומק הים משתמשות בביולומינסנצייה.

(A) פתיונות זוהרים. לדג פתיונאי יש פתיונות המלאים בחיידקים סימביוטיים זוהרים. טרף קטן מתקרב לדג, ונאכל. (B) מסך עשן. סוג מסוים של סרטן יוצר ענן של אור כחול כדי לעורר את הטורף, בזמן שהוא בורח. (C) לומינציה נגד. הדג יוצר אור בבטנו כך שטורף מתחתיו לא יוכל לראות את קווי המתאר שלו. (D) איבר גוף שניתן להפרדה. תולעת יוצרת "פצצת" אור. הטורף רודף אחרי ה"פצצה" בזמן שהתולעת יכולה לברוח. (E) "אזעקת פורץ". שרימפ תוקף מדוזה שמגיבה ע"י יצירת אור. דיונון בסביבה רואה את האר מהמדוזה ותוקף את השרימפ, בעוד שהמדוזה ניצלת.



איור 1

פלאגי

(Pelagic)

שקשור למים הפתוחים באוקיינוס, בשונה מהאזורים הבנטיים של האוקיינוס.

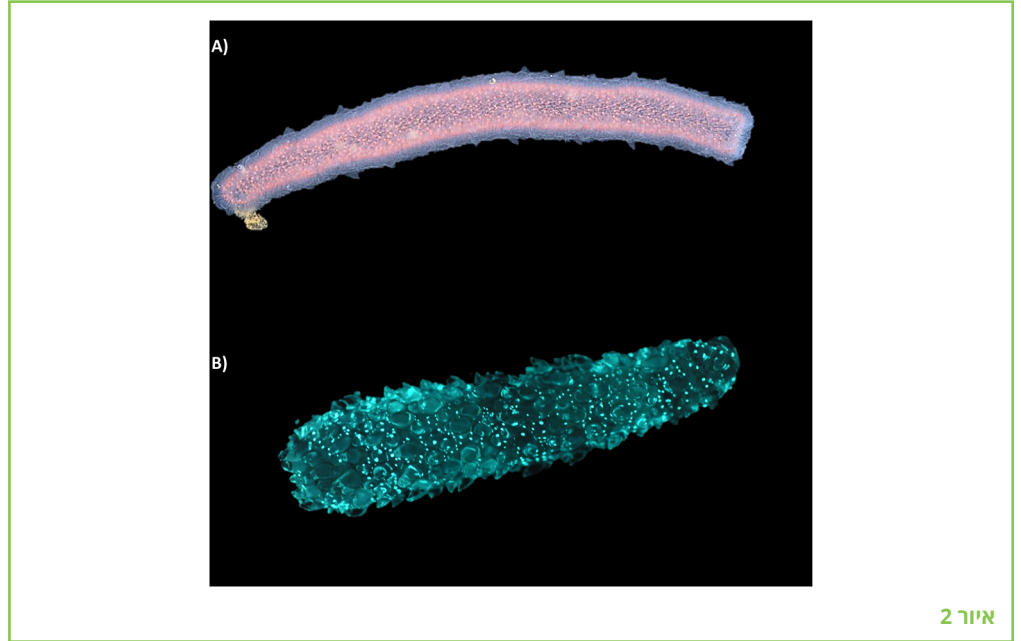
רוב הביולומינסנצייה שנפלטת מחיות אוקיינוס נראית כחולה או ירוקה, שהם הצבעים (או אורכי הגל, בפיזיקה) ש"מטיילים" הכי רחוק מתחת למים. נצפה שפולטי אור ירוק נמצאים בעיקר בסביבות רדודות, בעוד שפולטי אור כחול-טורקיז הם לעיתים קרובות יצורים יותר פלאגים, כלומר הם חיים במים הפתוחים [3]. אולם כל הקשת נמצאת בשימוש על ידי אורגניזמים עם ביולומינסנצייה. חלק מהמדוזות מייצרות אור שנראה סגול. התולעת הימית שנקראת טומופטריס (Tomopteris) פולטת אור צהוב בצורה של חלקיקים בהירים זוהרים, צבע מאוד לא שכיח לפלוט בתוך הים. מדענים עדיין אינם מבינים כיצד או מדוע טומופטריס מייצגת אור צהוב. לבסוף, חלק מהדגים, שנקראים דגי דרקון (dragonfish), מייצרים אור אדום. באורך הגל הקיצוני הזה, העיניים שלנו בקושי רואות את האור האדום, אולם המצלמות שלנו יכולות

איור 2

פירוזומים: חיות

ביולומינסנצייה מעניינות.

פירוזומים הן חיות צפות בצורת צינור. אורכן יכול לנוע ממספר סנטימטרים ועד לכמה מטרים. (A) פירוזום שנצפה תחת אור לבן, שהוא כמו אור השמש, או כמו נורה (© MBARI). (B) פירוזום זוהר, באמצעות ביולומינסנצייה (בהיתר של S.H.D. Haddock, ©biolum.eemb. ucsb.edu/).



איור 2

לראות. האור האדום ככל הנראה משמש לחפש טרף, מאחר שמרבית חיות הטרף של דג הדרקון גם לא רואות אור אדום.

האור שנפלט מחיות עם ביולומינסנצייה בדרך כלל מתקיים לזמן קצר, בין פחות משנייה ועד ל-12 שניות. התבניות של האור מגוונות מאוד. הבהובים מהירים של אור בהיר נפליטים משטרנליים (copepods, סוג של סרטנים), ועננים של ביולומינסנצייה מיוצרים ממסרקניות מסוימות, מסיפונופורים (siphonophores, קרובי משפחה של מדוזות שיוצרים שרשראות ארוכות), או מתולעי חץ (chaetognaths). דוגמה אחרת היא מלפפון ים, שלא נראה יפה מאוד באור רגיל. אולם בחשיכה, כאשר חלקם זוהרים, אנו יכולים לראות תבניות מעגליות מרהיבות של אור מעל לכל גופם, כמו זיקוקים חיים¹. הדבר המדהים ביותר הוא שישנן בהחלט הרבה יותר תבניות ביולומינסנצייה שחבויות עמוק באוקיינוס, שאף אחד אף פעם לא ראה.

<https://www.nature.com/articles/d41586-018-06660-2>

לא רק חיות אוקיינוס גדולות יותר משתמשות באור בדרכים האלה – חלק מהאורגניזמים המיקרוסקופיים גם יכולים להיות עם ביולומינסנצייה. דינופלגלטים (Dinoflagellates) לעיתים קרובות אחראיים לביולומינסנצייה שנצפית בפני השטח של הים. עקבות הלומינסנצייה שלהם יכולים לעיתים להיראות בלילה מאחורי ספינות מפליגות, או אם אתם מפריעים למים עם היד שלכם, בחוף הים. אפילו חיידקים יכולים להיות עם ביולומינסנצייה. בניגוד לאורגניזמים גדולים יותר, האור של חיידקים עם ביולומינסנצייה הוא מתמשך. חיידקים עם ביולומינסנצייה יכולים להימצא בכל מקום באוקיינוס: חופשיים במים, מחוברים לחומרים כמו צואת פלנקטון, או נבלות, או אפילו במעיים של דגים. החיידקים האלה גם יכולים להימצא בקשרים סימביוטיים עם חיות אחרות, ולחיות באיברי אור מסוימים של דגים או של דינונונים. כמו צוות, שבו כל חבר בצוות תורם משהו מועיל, החיות הגדולות יותר מספקות חומרי מזון לחיידקים, ובתמורה משתמשות באור החיידקי כדי למשוך טרף. דוגמה שכיחה היא דג הפתינואי. לדג הזה, שחי עמוק מאוד בתוך האוקיינוס, יש פתיון זוהר שמלא בחיידקים זוהרים על ראשו, ופועל כמו חכה. דג הפתינואי והחיידקים חיים יחד בקשרים סימביוטיים. אולם ביולומינסנצייה דרך **סימביוזה** אינה שכיחה, ומרבית האורגניזמים זוהרים בעצמם, באמצעות תאים מיוחדים שנקראים **פוטופורים**.

סימביוזה

(Symbiosis)

אינטראקציה או קשר של חיים קרובים בין אורגניזמים ממינים שונים, בדרך כלל עם תועלות לאחד האורגניזמים או לשניהם.

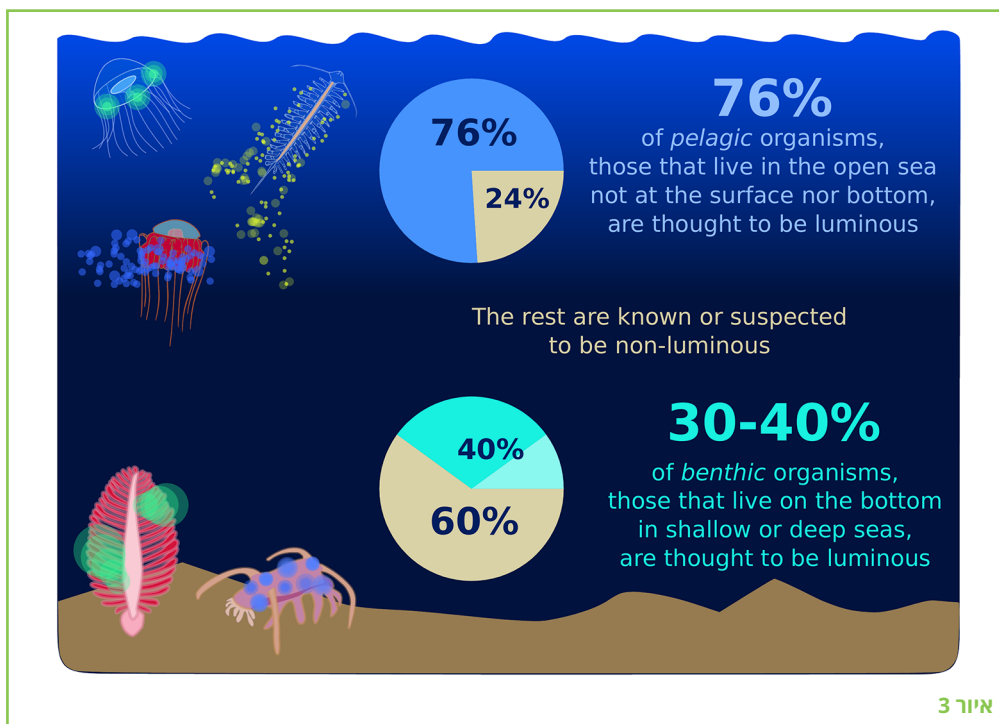
פוטופור

(Photophore)

איבר פולט אור שנוכח בחלק מחיות הביולומינסנצייה.

איור 3

חיות עם ביולומינסנצייה נמצאות בכל האוקיינוס. אורגניזמים פלאגים נמצאים בעמוד המים, ובסביבות 76% מהחיות האלה זוהרות. אורגניזמים בנטיים נמצאים קרוב לקרקעית הים, וכ-30-40% מהם זוהרים.



כמה ביולומינסנצייה שכיחה באוקיינוס?

חוקרים בצוללות דיווחו שבמהלך ירידתם אל מעמקי האוקיינוס, הרבה יצורים שהופרעו על ידי כלי השיט זהרו. אולם, עדיין קשה מאוד להתבונן על החיות האלה בסביבות שלהן, כמה אלפי מטרים מתחת לפני השטח של האוקיינוס. אנליזה עכשווית מעריכה של-76% מהאורגניזמים הפלאגיים (אלה שחיים במים הפתוחים) יש יכולת לפלוט אור [4]. משמעות הדבר היא שלמרבית החיות שחיות בין פני השטח לבין עומק האוקיינוס יש את כוח-העל הזה. עבור אורגניזמים **בנטיים** (אלה שחיים קרוב לרצפת הים), האחוז קצת יותר נמוך – כ-40% מהחיות האלה הן עם ביולומינסנצייה (איור 3). שונות כזו מקושרת לאורכי הגל של האור שהם הכי נראים בסביבות האלה. מדוע יש כזה אחוז שונה של חיות פלאגיות יחסית לחיות בנטיות? השערה מרכזית אחת היא שביולומינסנצייה היא דרך לתקשר. כדי לתקשר עם מישהו רחוק, אור הוא אפקטיבי מאוד בסביבה פלאגית. בניגוד לכך, עבור חיות בנטיות, ישנם הרבה מכשולים כמו אבנים, סדקים ומערות, או המים שיכולים להיות מעוננים כתוצאה ממשקעים שמתערבלים למעלה על ידי זרמי האוקיינוס. כתוצאה מכך, אור הוא ככל הנראה לא אפקטיבי באותה המידה עבור אורגניזמים בנטיים. אור גם עשוי להיות פחות הכרחי עבור שוכני הקרקעית, מאחר ששם יש הרבה מקומות מחבוא.

מסקנות

ביולומינסנצייה היא כוח-על שיש להרבה יצורים ימיים שחיים באוקיינוסים שלנו, ולעיתים קרובות מוצגים בתוכניות טלוויזיה. בעוד שמדענים ערים ליכולת הזו ולמנגנון שלה במשך מאות שנים, אנו עדיין רחוקים מהבנה מלאה של ביולומינסנצייה. אכן, חוקרים לא גילו את כל הסיבות לכך שחיות או חיידקים מפגינים ביולומינסנצייה. נוסף על כך, התגובה הכימית

בנטי

(Benthic)

שקשור לקרקעית הים או לאורגניזמים שחיים שם.

שיוצרת ביולומינסנציה, בעוד שהיא מובנת עבור חיות מסוימות, עדיין נותרה סוד עבור חיות רבות אחרות, כמו למשל תולעים ודגים רבים.

חשוב שמדענים ימשיכו לחקור ביולומינסנציה מאחר שהיכולת המרתקת הזו של אורגניזמים נותרת לא מתוארת, או בלתי מובנת ביחס לחיות רבות, בעוד שיש לה חשיבות מרכזית באוקיינוס החשוך.

מקורות

1. *The Bioluminescence Web Page*. Available online at: <https://biolum.eemb.ucsb.edu/>
2. Haddock, S. H., Moline, M. A., and Case, J. F. 2010. Bioluminescence in the sea. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2:443–93. doi: 10.1146/annurev-marine-120308-081028
3. Widder, E. A. 2010. Bioluminescence in the ocean: origins of biological, chemical, and ecological diversity. *Science* 328:704–8. doi: 10.1126/science.1174269
4. Martini, S., and Haddock, S. H. 2017. Quantification of bioluminescence from the surface to the deep sea demonstrates its predominance as an ecological trait. *Sci. Rep.* 7:45750. doi: 10.1038/srep45750

פורסם אונליין: 20 באפריל 2022

נערך על ידי: Sanae Chiba

מנחה מדעי: Briana Mittleman

ציטוט: Martini S and Francis WR (2022) האוקיינוס החשוך מלא באורות. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2020.00069-he

תורגם והותאם: Martini S and Francis WR (2020) The Dark Ocean Is Full of Lights. *Front. Young Minds* 8:69. doi: 10.3389/frym.2020.00069

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

COPYRIGHT © 2020 © Martini and Francis 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

JOHN FISKE ELEMENTARY SCHOOL, גיל: 12-14

אנו קבוצת תלמידים ב-smart young scientists שמשתתפים במועדון המדע SMART. אנו מתעניינים בכימיקלים ובחומרים שונים. אנו בכיתות ז ו-ח בבית ספר יסודי ג'ון פסק, נרגשים מההזדמנות לעבוד עם



מדענים שחוקרים ביולומינסנציה וכותבים על כך. השמות שלנו הם ג'וי, בריאנה, קינגסלי, טליה, הלל, שמרי, שמר וקמרון.

הכותבים

SÉVERINE MARTINI

התחלתי לעבוד על חיידקי ביולומינסנציה במהלך הדוקטורט שלי במרסיי, צרפת, במכון הים תיכוני לאוקיינוגרפיה. מטרתי היא להבין כיצד המיקרואורגניזמים האלה מסתגלים לעומק הים (לחצים גדולים וחושך). כדי לקדם את המחקר שלי על מינים ימיים גדולים יותר (מדוזות, חסרי חוליות...), עבדתי במשך שנתיים במכון מחקר האקווריום הימי במונטריי (MBARI), בקליפורניה, ארצות הברית. MBARI היא מעבדה מובילה בעולם שמתמחה בחקר הים העמוק ובטכנולוגיות שלו. *martini.severine@gmail.com



WARREN R. FRANCIS

הרקע שלי הוא בביוכימיה. עשיתי את הדוקטורט שלי בקליפורניה במכון מחקר אקווריום ימי במונטריי, וחקרתי ביולומינסנציה בקבוצת חיות שנקראת מסרקניות. יש לי פרויקטים שוטפים על מגוון חיות מאירות, רב-זיפיות, דיונונים, אלמוגים ומדוזות, מפרספקטיבות גנטיות וכימיות.



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