

מה דנ"א בסביבה יכול להגיד לנו על מערכת אקולוגית?

Lena Schallenberg¹, Susie A. Wood², Xavier Pochon^{2,3}, John K. Pearman^{2*}

¹המחלקה לזואולוגיה, אוניברסיטת אוטגו, דונדין, ניו-זילנד

²הקבוצה לחופים ומים מתוקים, מכון קאוותרון, נלסון, ניו-זילנד

³המכון למדעי הים, אוניברסיטת אוקלנד, אוקלנד, ניו-זילנד

מדענים מעריכים שאנחנו חולקים את כדור הארץ עם מיליוני מינים אחרים! אבל כיצד אנו יודעים אלה מינים נמצאים בכדור הארץ, וכיצד אנו יכולים לעקוב אחריהם? לרוע המזל, בני אדם מובילים מינים רבים להיכחדות, ומשבשים מערכות אקולוגיות טבעיות חשובות. כיום יותר חשוב מאי פעם שנבין אלה מינים נמצאים במקומות שונים, ומה התפקידים שהם מבצעים במערכות אקולוגיות. באמצעות הידע הזה, נוכל להבין כיצד להגן על אורגניזמים חשובים בסביבות המחיה שלהם. טכנולוגיה חדשה ומרגשת אפשרה לזהות מינים באמצעות הדנ"א שהם שחררו לסביבה - זה ידוע כדנ"א סביבתי (eDNA). מדענים משתמשים כיום בדנ"א סביבתי כדי לזהות מינים מכל הסוגים במערכות אקולוגיות ברחבי העולם. במאמר הזה נסביר כיצד דנ"א סביבתי משמש לאתר מינים, ונתאר את היתרונות והחסרונות של השיטה הזו.

חשוב לנטר מגוון ביולוגי

לבני אדם יש השפעה הולכת וגוברת על המגוון הביולוגי הגלובלי, מה שאומר שהפעולות שלנו מפחיתות את הכמות הכוללת של מינים שונים שנמצאים בכדור הארץ. הרבה מינים

סוקרים צעירים

MERCY
SCHOOL
גיל: 15-14



מגוון ביולוגי (Biodiversity)

המגוון והשונות של אורגניזמים חיים.

מינים פולשים (Invasive Species)

מינים שלא נמצאים בדרך כלל בסביבה, שיש להם יכולת להתפשט במהירות ולהשתלט על מינים שנמצאים בסביבה באופן טבעי.

בסיסים (Bases)

מולקולות ביולוגיות שיוצרות את מבנה הסליל הכפול של הדנ"א. ארבע מולקולות משמשות ליצירת דנ"א: אדין (A), גואנין (G), ציטוזין (C) ותימין (T).

דנ"א סביבתי (eDNA - Environmental DNA)

שארייות של דנ"א שמשוחרר על-ידי אורגניזמים לסביבה. הדנ"א הזה יכול להגיע מקשקשים, משיער, מעור, מרוק, או ממוצרי פסולת.

תגובת שרשרת של פולימראז

(PCR - Polymerase Chain Reaction)
שיטה שבה ניתן ליצור הרבה עותקים מפיסת דנ"א, כך שאפשר יהיה לרצף ולנתח אותה.

ריצוף דנ"א (DNA Sequencing)

תהליך מציאת רצף הבסיסים לאורך סליל דנ"א.

נדחפים לעבר הכחדה לפני שאנו אפילו יודעים עליהם משהו, או מבינים את התפקידים שהם מבצעים בסביבה. אובדן של מינים מרכזיים, או הגעה של **מינים פולשים**, יכולים לשנות את המערכת האקולוגית לעד [1, 2]. מהסיבה הזו, מחקרים במגוון ביולוגי הולכים ונעשים חשובים, כך שנוכל להבין כיצד מערכות אקולוגיות שונות משתנות.

באופן מסורתי, מדענים ניטרו מערכות אקולוגיות על-ידי חקירה פיזית של אותם מקומות, זיהוי המינים שחיים שם בהתבסס על המראה של האורגניזמים וספירת האורגניזמים [3]. סוג הניטור המסורתי הזה דורש את הידע המקצועי של מדענים שנקראים טקסונומים, אשר מתמחים בזיהוי מינים על-ידי בחינה קרובה שלהם. לרוע המזל, מספר המדענים בעלי המומחיות הזו יורד, במיוחד אלה שיכולים לזהות מינים נדירים, מה שאומר שמחקרים של מגוון ביולוגי לעיתים אינם מספיק עמוקים או נרחבים כפי שהיינו רוצים.

מאז שהטכנולוגיה השתפרה, מדענים מצאו דרך נוספת לזיהוי מינים שנמצאים במערכות אקולוגיות - דנ"א. דנ"א מכיל באופן בסיסי את התוכנית של כל אורגניזם חי, וקובע כיצד האורגניזם ייראה ויתפקד. דנ"א מורכב משני סלילים שמכילים שילוב של ארבעה כימיקלים שנקראים **בסיסים** (אדין (A), גואנין (G), ציטוזין (C) ותימין (T)), אשר מחוברים למבנה סלילי מפותל. חלקים מרצף הדנ"א משמשים כ"ברקודים", אשר יכולים לסייע בזיהוי מינים שונים. משמעות הדבר היא שבאמצעות התבוננות בחלקים מסוימים מהדנ"א של האורגניזם, מדענים יכולים לזהות את האורגניזם.

מהו דנ"א סביבתי?

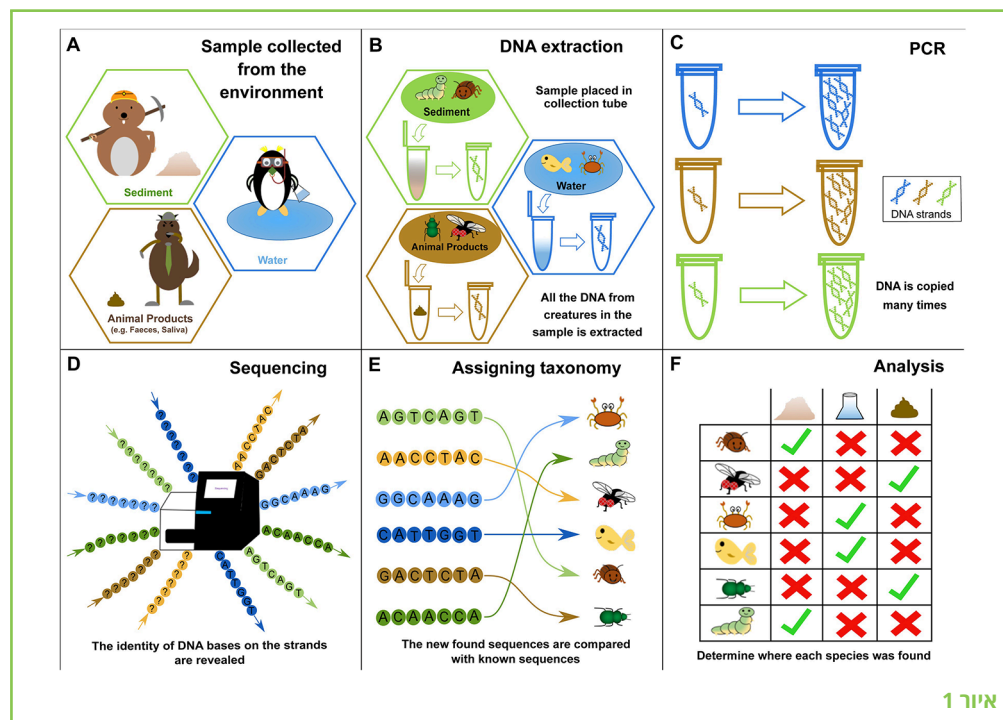
במשך 30 השנים האחרונות, מדענים התחילו להשתמש בברקודים של דנ"א כדי לחקור אלה מינים נמצאים בסביבות שונות. חומרים שנמצאים בסביבה כמו למשל מים, אדמה, רוק, או הפרשות (צואה), יכולים להכיל דנ"א ממינים שחיים שם. הדנ"א הזה יכול להגיע מהשיער, מהקשקשים, מהעור, מהרוק, או ממוצרי הפסולת של אורגניזמים באותה הסביבה. דנ"א שנאסף מהסביבה נקרא **דנ"א סביבתי**. ניתוח של דנ"א סביבתי משנה במהירות את האופן שבו מדענים חוקרים מערכות אקולוגיות ומגוון ביולוגי [4].

כיצד אפשר להשתמש בדנ"א סביבתי לזיהוי אורגניזמים בחברה?

חברה מורכבת מהרבה מינים שונים. כדי לזהות את המינים שמרכיבים חברה במערכת אקולוגית מסוימת, דגימות נלקחות מהסביבה ומנותחות למציאת דנ"א סביבתי. חלקים קצרים מסוימים מהדנ"א הסביבתי מוכפלים באמצעות תהליך שנקרא **תגובת שרשרת של פולימראז (PCR)**, כך שיש מספיק מהם בשביל המחקר. PCR מייצרת אלפי עותקים של רצפי הדנ"א האלה מכל המינים בדגימה. מאחר שלכל מין יש קוד מסוים שמורכב מארבעת הבסיסים (A, C, G, T), הרצפים הקצרים האלה יכולים לשמש כמזהים עבור מינים שונים - כמו ברקוד שמזהה פריט בחנות. מכונות של **ריצוף דנ"א** יכולות לקרוא את סדר הבסיסים בדנ"א. ברנע שרצפי הברקוד ידועים, אפשר להתאים אותם לרצפים בבסיס הנתונים של מינים ידועים. באופן הזה, ניתן לזהות אורגניזמים שנמצאים במערכת האקולוגית (איור 1).

איור 1

כיצד דנ"א סביבתי משמש לזיהוי מינים. (A) דגימות נאספות מהסביבה (לדוגמה, מהמים, מהאדמה ומהפרשות). (B) דנ"א סביבתי מאורגניזמים בכל דגימה מוסר מהדגימה (C) רצף דנ"א שיטה שנקראת PCR, כך שישנם מספיק רצפים שאפשר לחקור. (D) הרצפים האלה נקראים במכונת ריצוף, שמראה את סדר הבסיסים בסלילי הדנ"א. (E) הרצפים מושווים עם רצפים ידועים בבסיסי נתונים ברחבי העולם. (F) יוצרים רשימה של המינים שנמצאים באותה הסביבה!



איור 1

מהם היתרונות של שימוש בדנ"א סביבתי לזיהוי מינים?

שיטות מבוססות דנ"א יצרו מהפכה במחקר של מינים שקשה לראות ולזהות אותם באמצעות שיטות מסורתיות [5]. לדוגמה, מרבית מיני החיידקים נראים אותו הדבר – כמו מקלות או כדורים – מה שגורם לזיהוי שלהם על פי מראה להיות כמעט בלתי אפשרי. אולם מדענים יכולים להבחין בין החיידקים האלה באמצעות דנ"א סביבתי. למעשה, מדענים אפילו לא הבינו כמה מיני חיידקים מגוונים יש, עד שמחקר דנ"א סביבתי נעשו שכיחים. זיהוי מינים כשהם צעירים קשה יותר לעיתים קרובות מאשר התבוננות על השלב הבוגר – חשבו על צפרדעים ועל ראשנים. צפרדעים של מינים שונים יכולות להיראות שונה מאוד, אולם לעיתים קרובות הראשנים שהן מתפתחות מהם נראים דומה מאוד. היכולת לקבוע לאלה מינים החיות הצעירות שייכות חשובה מאוד להבנת סביבות המחיה שהמינים תלויים בהן בשלבי התפתחותם השונים. הידע הזה יכול לסייע למדענים לקבל את ההחלטות הנכונות כדי להגן על סביבות המחיה של המינים, ולשמר את המגוון הביולוגי. ישנן סיבות אחרות לכך שלעיתים קרובות קשה לאתר מינים בסביבה. מינים רבים טובים בלהתחבא. חלק יכולים לשנות את המראה שלהם בתנאי סביבה שונים, או שהם יכולים לחיות בסביבות מחיה שבהן קשה לראות אותם. לדוגמה, חסרי חוליות רבים מסתתרים בשוניות אלמוגים, והרבה מינים חיים במעמקים החשוכים של האוקיינוס או של אגמים. בסיועו של דנ"א סביבתי, מתגלה המגוון שנכח בהרבה מהמערכות האקולוגיות בעולם.

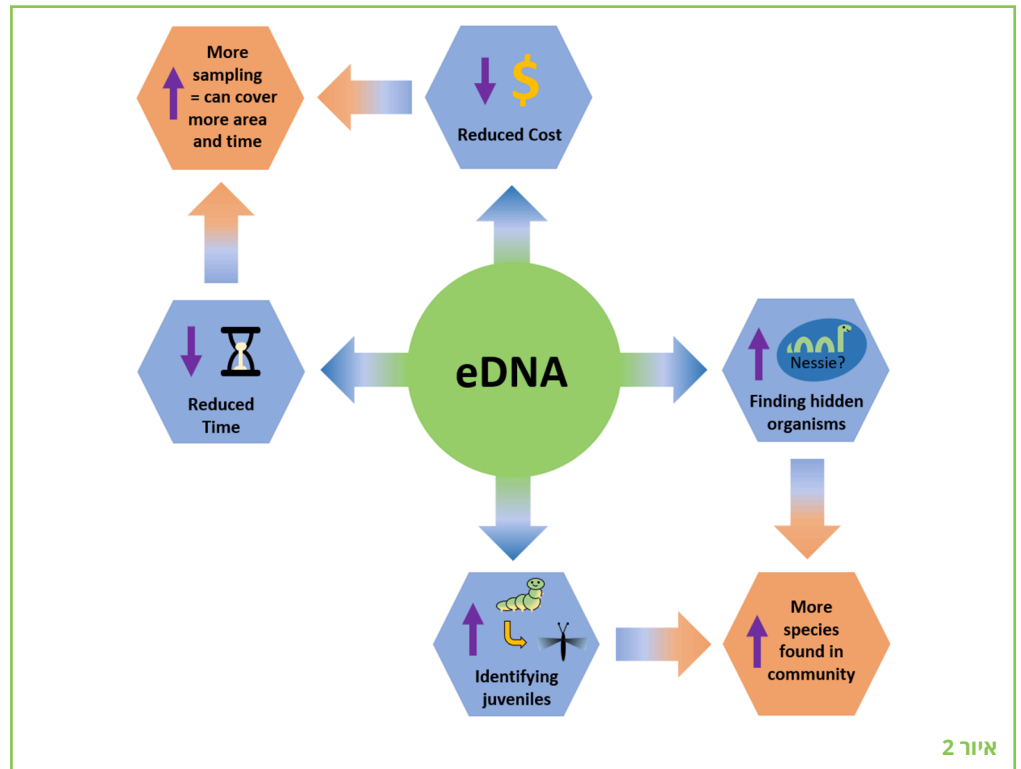
ביולוגיה משמרת היא תחום אחד שבו דנ"א סביבתי נמצא בשימוש. ביולוגיה משמרת היא ההגנה והשימור של מינים ושל סביבות המחיה שלהם. בתחום הזה, דנ"א סביבתי יכול לסייע גם באיתור מינים נדירים, וגם בזיהוי של מינים פולשים שונים. ניטור מסורתי שמטרתו לאתר מינים נדירים צורך זמן רב, ולעיתים קרובות דורש עבודה במקומות מרוחקים בעולם, כך שדנ"א סביבתי מספק יתרון על פניו. אחת הדוגמאות המעניינות לשימוש בדנ"א סביבתי מגיעה מחקר

ביולוגיה משמרת (Conservation Biology)

הגנה ושימור של מינים וסביבות המחיה שלהם.

איור 2

יתרונות של חקר מגוון ביולוגי באמצעות דנ"א סביבתי. שימוש בדנ"א סביבתי יכול להפחית את הזמן והעלות בהשוואה לשיטות זיהוי מסורתיות. משמעות הדבר היא שמחקרי דנ"א סביבתי יכולים להיות מעמיקים יותר ולכסות אזורים גדולים יותר או זמנים ארוכים יותר. דנ"א סביבתי גם יכול להיות טוב יותר בזיהוי אורגניזמים חבויים או צעירים, מה שאומר שלעיתים קרובות יותר מינים נמצאים בשיטה הזו מאשר בשיטות מסורתיות.



איור 2

חוליייתנים נדירים. מציאת החיות הנדירות האלה היא קשה, אולם דנ"א סביבתי יכול להילקח מתכולת בטן של פריטים כמו עלוקות ויתושים, אשר ניזונים מחיות נדירות, וקל יותר למצוא אותם. דנ"א סביבתי יכול להגיד למדענים מאילו מינים הפריטים ניזונים, מה שיכול להעיד אם מין נדיר נמצא באזור. דנ"א סביבתי יכול גם לשמש כמערכת להתרעה מוקדמת לזיהוי מינים פולשים, בזמן שהם מתפשטים בסביבות חדשות. מאחר שדנ"א סביבתי יכול לאתר מינים, אפילו אם ישנם מעט פרטים בסביבה, הוא יכול לסייע לנו להגיב מהר לאיום של מינים פולשים. משמעות הדבר היא שישנו סיכוי גדול יותר לעצור את ההתפשטות של מינים פולשים לפני שהם נעשים מבוססים, ועלולים להזיק למינים המקומיים.

לעיתים קרובות זיהוי אורגניזמים באמצעות דנ"א סביבתי הוא פחות יקר מזיהוי שלהם באמצעות שיטות מסורתיות [6], ואפשר לעבד דגימות דנ"א סביבתי מהר יותר. משמעות הדבר היא שיותר דגימות יכולות להילקח מטווח גדול יותר של מקומות וזמנים, מה שמאפשר לערוך מחקרי עומק ולהבין טוב יותר את המינים שנמצאים במערכת אקולוגית (איור 2).

האם יש בעיות בשימוש בדנ"א סביבתי?

שימוש בדנ"א סביבתי למציאת מינים סייע לנו לקבל תמונה ברורה יותר של היצורים שחיים בכדור הארץ, כמה מינים שונים חיים יחד, וכיצד חברות של אורגניזמים משתנות עם הזמן. אולם לשיטה הזו עדיין יש שלוש מגבלות עיקריות.

המגבלה הראשונה של שימוש בדנ"א סביבתי לזיהוי מינים היא שבמהלך תגובת PCR, או תהליך ריצוף הדנ"א, לעיתים מתרחשות טעויות אשר מונעות מריצוף הדנ"א להיות מועתק

או להיקרא באופן תקין. הטעויות האלה יכולות להוביל לזיהוי שגוי של מינים. לדוגמה, ייתכן שמינים שנמצאים בסביבה לא יזוהו (זיהוי שלילי שגוי), או שמינים שאינם נמצאים בסביבה יזוהו (זיהוי חיובי שגוי).

נוסף על כך שיטות מסורתיות להערכת מגוון ביולוגי בדרך כלל מערבות ספירה של כמה אורגניזמים נמצאים באותה הדגימה, כמו גם זיהוי של המינים שנמצאים. דנ"א סביבתי מסייע למדענים לדעת את מספר המינים השונים שנמצאים בחברה. אולם הוא לא אומר להם כמה פרטים חברים מאותו המין נמצאים במערכת האקולוגית הזו, באופן שספירה מסורתית הייתה עושה. אפילו אם יש יותר דנ"א ממין מסוים, זה לא בהכרח אומר שישנם יותר חברים מאותו המין. לכן, אי אפשר לסמוך על דנ"א סביבתי במתן הערכה מדויקת למספר האורגניזמים בחברה.

מגבלה פוטנציאלית אחרונה של שימוש בדנ"א סביבתי היא שהוא עשוי לגרום למינים להיות מזהוים לא נכון. כדי לזהות נכון מין לא ידוע באמצעות ריצוף דנ"א, הרצף מושווה לבסיס נתונים עצום שמכיל ברוקודים של אורגניזמים ידועים. זה מבוצע על בסיס דמיון – אם הרצף החדש מתאים בדיוק לרצף מוכר, אומרים שהוא שייך לאותו המין. לרוע המזל, בסיסי הנתונים האלה אינם שלמים מאחר שלא כל המינים הידועים רוצפו עדיין, ולכן חלק מהרצפים שמגיעים מדנ"א סביבתי לא יכולים להיות מותאמים בדיוק לרצף ידוע. אם הרצפים לא בדיוק תואמים לאורגניזם בבסיס הנתונים, הם משויכים לרצף הכי דומה שנמצא בבסיס הנתונים, מה שלפעמים יכול להיות אורגניזם די שונה!

עתיד הדנ"א הסביבתי

דנ"א סביבתי סייע לחשוף מגוון ביולוגי עצום שקיים בכדור הארץ. ממחקרים של דנ"א סביבתי, מספר האורגניזמים הידועים שחולקים איתנו את כדור הארץ שלנו עלה באופן משמעותי! שיטות דנ"א סביבתי הן התקדמות מדהימה באיתור מינים, אך עדיין ישנם כמה אתגרים שמדענים צריכים לפתור. אולם, התחום הזה מתקדם במהירות, והשיטות האלה יעשו אפילו יותר חזקות וחשובות בעתיד. עד כה, דנ"א סביבתי סיפק לנו תמונה טובה יותר של המינים שחיים על כדור הארץ, ועל התפקידים שהם מבצעים במערכת האקולוגית שלהם, מה שאומר שיש לנו מושג טוב יותר על האופן שבו נוכל להגן ולשמור על העולם שסביבנו.

תודות

המחברים מודים על תמיכתו של המשרד הניו-זילנדי לעסקים, חדשנות ומחקר יישומי, במסגרת תוכנית בריאות האגמים שלנו; עבר, הווה והעתיד (C05X1707), וארגז כלים למציאה והתאפשרות של מערכת ההגנה הביולוגית הימית בניו-זילנד (CAWX1904), כמו גם למלגת הדוקטורט באוניברסיטת אוטגו שמוחזקת על-ידי LS. אנו מודים לסוקרים, למנטור המדעי ולעורך עבוד ההערות הבונות ויקרות הערך שלהם. לבסוף, אנו רוצים גם להודות לסוזן דבאד על הנגשת כתב היד שלנו לקהל הצעיר.

מקורות

1. Babi, I., Hudina, S., and Bielen, A. 2017. Invasion of the Chinese pond mussels—what makes these harmless-looking animals so dangerous? *Front. Young Minds*. 5:56. doi: 10.3389/frym.2017.00056
2. Giovos, I., Katsanevakis, S., Coll, M., Piroddi, C., Steenbeek, J., Lasram, F. B. R., et al. 2019. Human activities help alien species to invade the Mediterranean sea. *Front. Young Minds*. 7:97. doi: 10.3389/frym.2019.00097
3. Berkes, F., Colding, J., and Folke, C. 2000. Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecol. Appl.* 10:1251–62. doi: 10.2307/2641280
4. Taberlet, P., Bonin, A., Zinger, L., and Coissac, E. 2018. *Environmental DNA: For Biodiversity Research and Monitoring*. Oxford, UK: Oxford University Press.
5. Hebert, P. D. N., and Gregory, T. R. 2005. The promise of DNA barcoding for taxonomy. *Syst. Biol.* 54:852–9. doi: 10.1080/10635150500354886
6. Thomsen, P. F., and Willerslev, E. 2015. Environmental DNA—an emerging tool in conservation for monitoring past and present biodiversity. *Biol. Conserv.* 183:4–18. doi: 10.1016/j.biocon.2014.11.019

פורסם אונליין: 28 בינואר 2022

נערך על ידי: Pedro Morais

מנחה מדעי: Fares Najjar

ציטוט: Schallenberg L, Wood SA, Pochon X and Pearman JK (2022) מה דנ"א בסביבה יכול להגיד לנו על מערכת אקולוגית? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2019.00150-he

Schallenberg L, Wood SA, Pochon X and Pearman JK (2020) What Can DNA in the Environment Tell Us About an Ecosystem? *Front. Young Minds* 7:150. doi: 10.3389/frym.2019.00150

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

COPYRIGHT © 2020 © Schallenberg, Wood, Pochon and Pearman. 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

MERCY SCHOOL, גיל: 14-15

אנחנו כיתה של ממציאנים! אנו אוהבים לבנות וליצור כדי למצוא פתרונות לבעיות בעולם האמיתי. התלמידים שלנו מגיעים לבית הספר מכל רחבי האזור.



הכותבים

LENA SCHALLENBERG

Lena צללה לעולם של דנ"א סביבתי בזמן הדוקטורט שלה באוניברסיטת אוטגו בניו-זילנד. היא מסתכלת על פיקוציאנובקטריה זעירים שחשובים לאורגניזמים פוטוסינתטיים באגמים. בגלל שהחיידיקים האלה קטנים כל כך, קשה מאוד לחקור אותם, וכאן דנ"א סביבתי נכנס לתמונה! השיטה הזו מסייעת לה לגלות את סוגי הפיקוציאנובקטריה הרבים והשונים, היכן הם חיים וכיצד הם מתפקדים. בזמן עריכת המחקר הזה, היא הבינה שלדנ"א סביבתי יש מגבלות חשובות שביולוגים צריכים לשפר לפני השיטה הזו תוכל להחליף שיטות מסורתיות.



SUSIE A. WOOD

Susie היא ביולוגית שעובדת במכון קאוותרון בניו-זילנד. יש לה תשוקה להבנה של סביבות ימיות ולהגנה עליהן. במהלך הדוקטורט שלה היא חקרה את ההתפלגות והמגוון של ציאנובקטריה רעילה באגמי ניו-זילנד. מאז השלמת המחקר הזה היא הייתה פעילה במיוחד בתמיכה בשילוב כלים מבוססי דנ"א בניטור ביולוגי ימי, ובפרויקטים של מגוון ביולוגי. היום היא מובילה במשותף פרויקט מחקר גדול, בשילוב שיטות אחרות, שמשמש בדנ"א סביבתי כדי לחקור את החברות הביולוגיות העכשוויות וההיסטוריות באגמי ניו-זילנד (www.lakes380.com).



XAVIER POCHON

בהיותו במקור משווייץ, זה כנגד כל הסיכויים ש-Xavier הפך לביולוג ימי עם מומחיות בסימביוזה, אקולוגיה ואבולוציה של שוניות אלמוגים. התשוקה שלו לאוקיינוס וההתלהבות המדבקת שלו לתגליות ימיות הובילו את Xavier באופן טבעי לערוך יותר מ-20 שנים של מחקר מוצלח ברחבי האזור ההודו-פסיפי. ממוקם בניו-זילנד מאז 2012, Xavier עובד כיום במכון קאוותרון באוניברסיטת אוקלנד, ומקדם את השימוש בשיטות חדשניות לריצוף דנ"א ורנ"א במטרה להבין את השינויים מעשה ידי אדם במגוון הביולוגי במערכות אקולוגיות ימיות.



JOHN K. PEARMAN

John עשה דוקטורט באוניברסיטת וורוויק, בריטניה, והשתמש בשיטות מבוססות דנ"א כדי לחקור פיסופלנקטון איקריוטי באוקיינוס האטלנטי. לאחר מכן, הוא עבר לאוניברסיטת המלך עבדאללה למדע ולטכנולוגיה בערב הסעודית, שם הוא חקר את המגוון של ים סוף באמצעות שיטות מולקולריות. באמצעות השיטות האלה, הוא חקר אורגניזמים החל מחיידיקים ועד למאקרו-פאונה, ומסביבות פלנקטון לשוניות אלמוגים. לאחרונה, הוא הצטרף למכון קאוותרון בניו-זילנד במטרה ליישם את השיטות המולקולריות האלה לחקור את בריאות העבר וההווה של אגמי ניו-זילנד (www.lakes380.com).
*john.pearman@cawthron.org.nz



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