

האם השלכה של לִבַּת תפוח עץ מחלון הרכב נחשבת השלכת פסולת? – קהילות מיקרוביות בקומפוסט טבעי

Michaeline B. N. Albright*, Jennifer B. H. Martiny

המחלקה לאקולוגיה ולביולוגיה אבולוציונית, אוניברסיטת קליפורניה ב-Irvine, Irvine, קליפורניה, ארצות הברית

האם אי פעם השלכתם ליבת תפוח או קליפת תפוז מחלון הרכב? האם זוהי פסולת? מה קורה אם היא נוחתת על המדרכה? האם זה זָהָה אם היא נוחתת על אדמה או בצד הכביש? ליבות תפוח, קליפות תפוז, עלים וחומרים צמחיים אחרים עשויים מתרכובות פחמן מְרֻכָּבוֹת, שמפורקות עם הזמן לצורות פשוטות יותר של פחמן בתהליך שנקרא הִירְקָבוֹת. הירקבות היא חלק מרכזי מִמְחֻזָּר הפחמן. ההירקבות נעשית בעיקר על-ידי קהילות מיקרוביות, שהן קבוצות של אורגניזמים חיים זעירים – ערים בלתי נראות אשר חיות בכל מקום על פני כדור הארץ. האם אתם מסוגלים לדמיין את הערים הבלתי נראות הללו, שאוכלות את ליבת התפוח שהשלכתם או את ערימת העלים שעל האדמה? באיזו מהירות צמחים מתים נרקבים? ולאן הולך הפחמן הזה?

מהי הירקבות?

היווצרות של קומפוסט (דִּשְׁנָת) על-ידי ערימה או פח של שאריות מזון או פסולת גינה, אשר מתפרקים ומייצרים אדמה, היא אחת מהצורות של הִירְקָבוֹת. הירקבות היא תהליך שבו תרכובות כמו רִקְמָה צמחית, שעשויים מפחמן מורכב, מפורקות ליחידות פשוטות יותר של פחמן. היסוד פחמן (שמסומן באות C) הוא הבסיס לכל צורות החיים על פני כדור הארץ, והוא חלק מהאוקיאנוס, מהאוויר, מהסלעים ואפילו מהגוף שלנו. פחמן עובר בין צורות שונות דרך **מְחֻזָּר הפחמן**. באטמוספירה, פחמן קשור לחמצן, ומייצר גז שנקרא פחמן דו-חמצני (מסומן

סוקר צעיר

PIETRO
גיל: 14



הירקבות

(Decomposition)

תהליך שבו תרכובות כמו חומרים צמחיים שעשויים מתרכובות פחמן מפורקים לצורות פשוטות יותר של פחמן; נקראת גם הִירְקָבָה או רִקְבוֹן.

מחזור הפחמן

(Carbon cycle)

סדרת תהליכים שבאמצעותה פחמן בסביבה משנה צורה. שני מרכיבי מפתח כוללים לקיחת פחמן דו-חמצני (CO₂) מהאטמוספירה על-ידי צמחים, והתְחָרָה של פחמן (C) לאטמוספירה במהלך ההירקבות.

איור 1

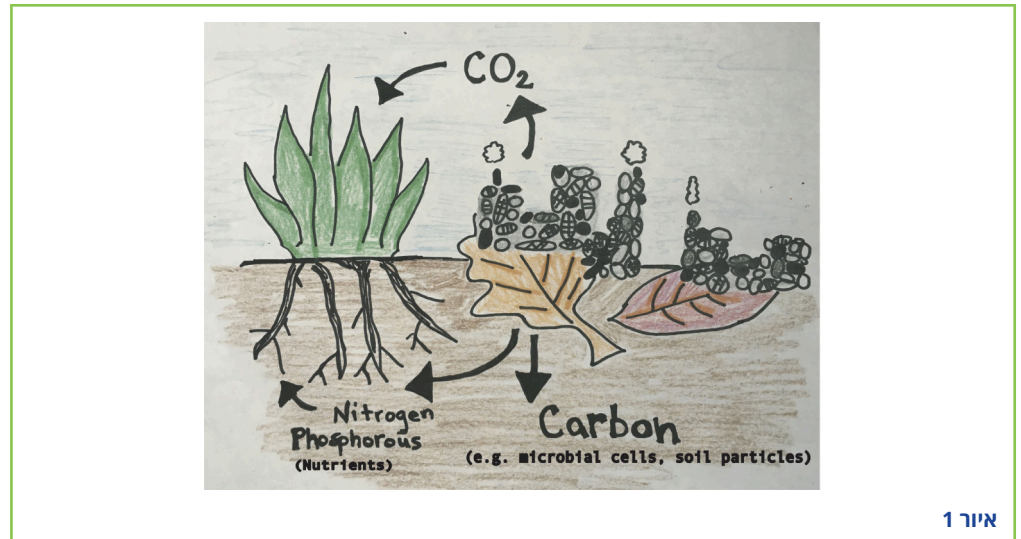
קהילות מיקרוביות חיות על עלי צמחים מתים ומרקיבות את העלים. כאשר מיקרובים משתמשים בפחמן מהצמחים המתים הם משחררים חלק ממנו לאוויר בצורת פחמן דו-חמצני, ומאחסנים חלק ממנו באדמה. מיקרובים משחררים גם חומרי מזון אחרים כמו חנקן וזרחן, מצמחים מתים, ומדשנים את האדמה. צמחים משתמשים בפחמן דו-חמצני, במים, בחומרי מזון ובאור שמש כדי לגדול. איור זה מדגים את מעגל הפחמן ואת הקשר שבין צמחים לבין קהילות מיקרוביות (שמוצגות על העלים).
 CO_2 = פחמן דו-חמצני
 Nitrogen = חנקן
 Phosphorous = זרחן

חומרי מזון (Nutrients)

חומרים שמספקים את ההזנה הדרושה לגדילה ולחיים ביולוגיים.

קהילות מיקרוביות (Microbial communities)

קבוצות של מיקרואורגניזמים (צורות חיים שהן בדרך כלל קטנות יותר ממה שניתן לראות), כמו בקטריות ופטריות, אשר חולקות מרחב מחיה משותף.



באותיות CO_2). צמחים משתמשים בפחמן דו-חמצני, במים, בחומרי מזון ובשמש כדי לגדול. הפחמן משולב במבנה של צמחים בצורה של תרכובות מורכבות. בסופו של דבר, צמחים מתים ונרקבים. כחלק מתהליך ההירקבות, חלק מהפחמן משוחרר לאוויר בתור פחמן דו-חמצני, וחלק מהפחמן מאוחסן באדמה. חומרי מזון אחרים, כמו חנקן וזרחן, משוחררים גם הם מצמחים מתים, ומדשנים את האדמה (איור 1).

האם אתם יודעים כיצד צמחים מתים נרקבים?

מיקרובים, שהם אורגניזמים חיים זעירים כמו חיידקים ופטריות, מפרקים רקמות של צמחים ומשתמשים בהן בתור מזון, כלומר כמקור לאנרגיה. מיקרובים חיים בכל האזורים בכדור הארץ. כאשר סוגים שונים של מיקרובים נמצאים יחד באותו המקום, מדענים מכנים אותם **קהילות מיקרוביות**. קהילות אלה, אף על פי שהן מורכבות ממיליוני מיקרובים יחידים, הן כל כך קטנות שאיננו יכולים לראות אותן; הן כמו ערים בלתי נראות אשר חיות בינינו. אולם, עצם זה שהן קטנות לא אומר שאינן חשובות. קהילות מיקרוביות הן חיוניות לקיום חיים על פני כדור הארץ. אחד התפקידים של קהילות מיקרוביות הוא לפרק חיות וצמחים מתים כדי לסייע בהקצת פחמן במעגל הפחמן, ולשחרר חומרי מזון לתוך האדמה (איור 1). כאשר מיקרובים משתמשים בפחמן מהצמחים המתים, הם משחררים חלק ממנו אל האוויר בתור פחמן דו-חמצני, ומאחסנים חלק ממנו באדמה. הפחמן הזה שמשחרר לאדמה מתגלגל בין הרבה צורות שונות. לדוגמה, חלק מהפחמן משולב בתוך תאים מיקרוביים בזמן שהם גדלים, וחלק מהפחמן מסייע ליצור חלקיקי אדמה חדשים, או מדביק יחד חלקיקי אדמה ישנים.

דשון באמצעות קומפוסט מאיץ את התהליך הטבעי של הירקבות על-ידי יצירת תנאים שמאפשרים לקהילות מיקרוביות לעבוד ביעילות רבה יותר. אולם הירקבות אינה מתרחשת רק בקומפוסט, שכן הוא גם הכרחי לסביבה הטבעית. מה קורה כאשר עלים נופלים מעצים? טוב, בחצר שלכם אתם אולי עורמים אותם וקופצים עליהם. אולם מה אם לא הייתם עושים זאת? הם לא היו פשוט נערמים יותר ויותר גבוה, שנה אחרי שנה. בסופו של דבר הם היו מפורקים על-ידי מיקרובים, בדיוק כמו החומרים שבערימת קומפוסט.

איור 2

שקיות פסולת בשני מקומות שונים בשדה. שקיות הפסולת (הריבועים הלבנים) מורכבות מניילון, דבק ונייר דבק. שקיות הפסולת ממוקמות בתוך כלובי חוטים ומחוברות באמצעות יתדות לאדמה כדי לשחיות (כמו סנאים ועכברים) לא יטרדו אותן. שקיות הפסולת ממוספרות כדי לעקוב אחרי דגמים בודדים. בכל מקום יש כמה שקיות פסולת זהות שמהוות כפילים נסויים. התמונה באדיבות: Alexander Chase



איור 2

מסה (Mass)

מדד לכמות החומר שעצם כלשהו מכיל. מסה אינה תלויה בכוח הכבידה, בעוד שמשקל כן תלוי בכוח הכבידה. משמעות הדבר היא שעל פני כדור הארץ לעצם יש מסה ומשקל מסוימים. על פני הירח, היכן שכוח הכבידה שונה, לעצם יהיה את אותה המסה כמו על פני כדור הארץ, אולם משקל שונה.

שקית פסולת (Litterbag)

מכל, שבדרך כלל עשוי מברד או מרשת, וממולא בחומר צמחי. מדענים משתמשים בשקית הפסולת כדי למדוד שינויים עם הזמן במשקל החומר הצמחי (מדידה של קצב ההירקבות).

מגן מיקרובי (Microbial diversity)

מגוון ושונות בשפע ובסוגים של מיקרואורגניזמים.

האם מדענים מודדים הירקבות?

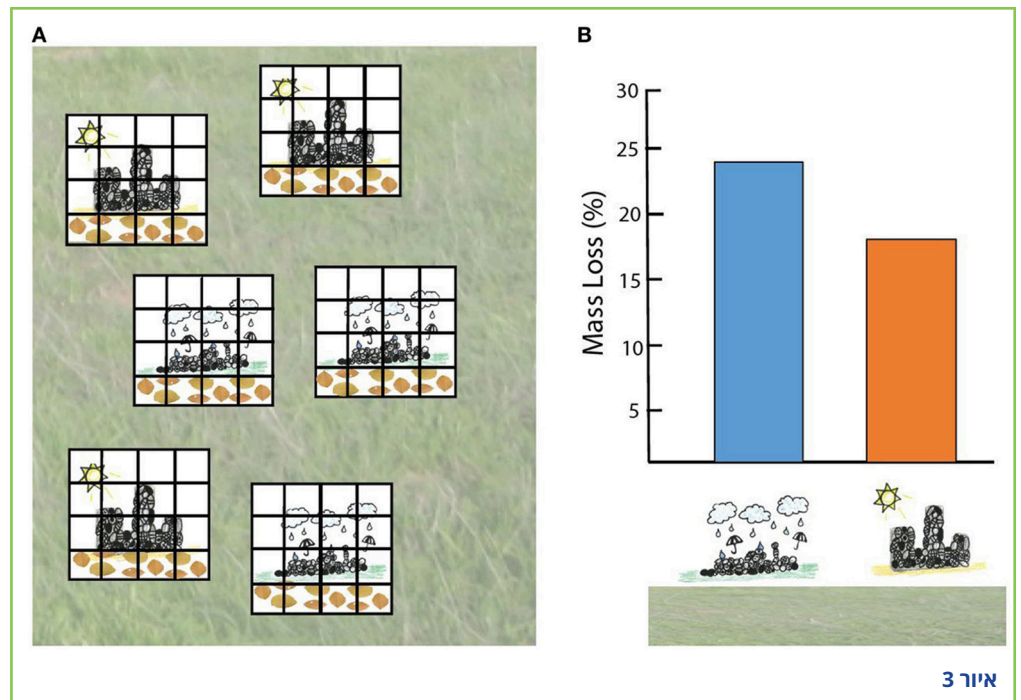
בעוד שאיננו יכולים לראות את ההירקבות מתרחשת, אנו יכולים למדוד את ההשפעה שלה באמצעות שקילה של חומר שמתפרק, ולראות כמה **מסה** אבדה עם הזמן. הכלים שבהם מדענים משתמשים לעיתים קרובות כדי למדוד הירקבות של צמחים נקראים **שקיות פסולת** (איור 2). שקיות פסולת הן מכלים שמורכבים מרשת, חומר שהוא מספיק קדיר כדי לאפשר למים, אוויר וחומרי מזון לעבור דרכו. שקיות פסולת ממולאות בחומר צמחי, נשקלות ומושארות בחוץ בשדה לפרק זמן כלשהו, ואז נאספות ונשקלות מחדש. אפשר להשתמש במדידת כמות המסה שאבדה כדי לחשב את קצב ההירקבות (כמות המסה שאבדה עם הזמן). קצב ההירקבות אומר לנו כמה מהר או לאט החומר נרקב. שקיות פסולת מאפשרות למדענים לבחון אלה גורמים משפיעים על קצבי ההירקבות במערכות אקולוגיות. הגורמים שמדענים מעוניינים לבחון כוללים את מידת הלחות ומידת החומציות של האדמה, סוגי הצמחים שנירקבים והמגן **המיקרובי**, שהוא הסוגים השונים והכמויות של מיקרובים שנמצאים באדמה [1, 2].

האם קהילות מיקרוביות שונות מפרקות חומר צמחי מהר יותר או לאט יותר?

דוגמה אחת שמראה את החשיבות של מיקרובים בהירקבות הייתה ניסוי שהפך לתאונה – אסון צ'רנוביל. זוהי תאונה גרעינית קשה שהתרחשה בשנת 1986 בִּמְה שכיום היא אוקראינה. התאונה שחררה כמויות עצומות של חומר רדיואקטיבי מכור גרעיני, והשפיעה על בני האדם ועל הסביבה. מבחינת המיקרובים, התאונה הפכה את האדמה להיות סטרילית, והרגה את

איור 3

A. ניסוי שדה שנערך כדי לבחון כיצד הבדלים במגוון המיקרובי (קהילות מיקרוביות נאספו במקור מתנאי סביבה של דשא רטוב לעומת יבש) משפיעים על קצבי ההירקבות. הקופסאות הלבנות מייצגות את שקיות הפסולת. בכל שקיות הפסולת ישנו אותו סוג של צמחים מתים. אולם כל שקית פסולת מכילה רק אחד משני הסוגים השונים של קהילות מיקרוביות (שמוצגות על-ידי הצורות השחורות והאפורות – "ערים בלתי נראות"). קהילה מיקרובית אחת נאספה במקור מסביבה יבשה (שמשיה), וקהילה אחרת נאספה מסביבה רטובה (גשומה). ישנן שלוש שקיות פסולת זהות לכל סוג של קהילה מיקרובית. שקיות הפסולת ממוקמות כולן יחד במקום אחד בשדה. **B.** קצב ההירקבות נמדד על-ידי שקילה של שקיות פסולת לפני שממקמים אותן בשדה, ואז שקילה נוספת בזמן מאוחר יותר כדי לראות כמה מהמסה של הצמחים המתים אבדה במהלך אותו הזמן. שקיות הפסולת שמוצגות ב-A נשקלו בתחילת הניסוי, הוצבו בשדה למשך שנה ואז נאספו ונמדדו שוב בסוף. אחוז (%) המסה שאבדה הוא אחוז השינוי במשקל מההתחלה ועד סוף הניסוי [מסה התחלתית-מסה סופית * 100%]. נתונים אלה מראים שהקהילות המיקרוביות שהגיעו במקור מסביבה רטובה (עמודה כחולה) פירקו יותר מהחומר הצמחי מאשר קהילות שהגיעו במקור מסביבה יבשה (עמודה כתומה) (התמונה אומצה מהפניה [2] של Alison et al.



הקהילות המיקרוביות שחיו בה. כמעט 30 שנים מאוחר יותר, אָתֵר התאונה צָבֵר ערימות גדולות של עלים שנפלו ועצים מתים רבים; הצמחים המתים אינם נרקבים. כאשר מדענים ערכו ניסויים עם שקיות פסולת כדי לקבוע מדוע, הם גילו שתהליך ההירקבות האיטי מאוד נגרם בעיקר ממחסור במיקרובים [3].

מדענים יכולים לבצע ניסויים בשדה כאשר יש להם שאלות שהם רוצים לענות עליהן. לדוגמה: כיצד שינויי האקלים ישפיעו על קצבי ההירקבות? במחקר אחד שמטרתו לענות על השאלה הזו, חוקרים הוסיפו קהילות מיקרוביות שונות, האחת מסביבה של דשא יבש והשנייה מסביבה של דשא רטוב, לשקיות פסולת שהכילו חומר צמחי של דשא סטרילי [2] (איור 3A). שקיות הפסולת האלה היו מורכבות מרֶשֶׁת עם חורים קטנים מאוד-מאוד על מנת לכלוא את המיקרובים כדי שלא יוכלו לצאת או להיכנס. שקיות הפסולת נשקלו ואז הוצבו לחימוץ למדשאה ונאספו לאחר חודשים רבים. החוקרים מצאו שבשקיות הפסולת שהכילו קהילות מיקרוביות שהגיעו מתנאים יבשים, קצב ההירקבות היה איטי יותר מאשר אלה שהכילו קהילות מיקרוביות שהגיעו מתנאים רטובים יותר, אף על פי ששקיות הפסולת הונחו באותה הסביבה במהלך הניסוי [2] (איור 3B). הדוגמאות האלה מראות כי סוגי המיקרואורגניזמים שנוכחים בקהילה משפיעים על קצב ההירקבות. החוקרים שֶׁעָרוּ-שֶׁהִקְהִילִים מיקרוביות מהסביבה הַיְבֵשָׁה עבדו לאט יותר מאחר שהמיקרובים האלה התמחו-בהישרדות בתנאים קשים יותר, בעוד שמיקרובים מסביבות רטובות היו טובים יותר בהרקבת צמחים מתים, ועשו זאת בקצב מהיר יותר. ניסויים נוספים ממשיכים לבחון את ההשערה הזאת.

מדוע מדענים מעוניינים ללמוד עוד על הירקבות?

הירקבות היא חלק מתהליך המְחָזֵר של הטבע. זהו לא רק סוף, אלא גם התחלה. זהו חלק ממעגל הפחמן הגלובלי, שהוא חיוני עבור חיים על פני כדור הארץ. במיוחד עבור חומר

צמחי, במערכות אקולוגיות טבעיות, חוקרים רוצים לדעת כיצד הירקבות משפיעה על איכות האדמה, וכיצד היא עשויה להשתנות עם שינויי האקלים. האם טמפרטורות חמות יותר יאיצו את ההירקבות, מה שישחרר כמות רבה יותר של פחמן דו-חמצני לאטמוספירה? אולי, אולם קהילות מיקרוביות עשויות לעבוד מהר יותר באקלים חם יותר, או שהן עשויות להחליף את מה שהן אוהבות לאכול. פיסות מורכבות רבות מתחברות יחד כדי להניע את תהליך ההירקבות, ואיננו יודעים עדיין כיצד הן מתחברות.

להירקבות ישנם תפקודים חשובים נוספים. הירקבות היא מרכיב מפתח ביצירת דלקים טובים יותר מצמחים. כדי להשתמש בגידולים חקלאיים כמו תירס או פולי סויה ליצירת דלק, מדענים צריכים להבין כיצד לפרק את החומר הצמחי בצורה יעילה יותר. פתרון אפשרי אחד הוא להבין אלה מיקרובים או קהילות מיקרוביות עשויים לבצע את העבודה [4]. פירוק מתרחש גם בתוך הגוף שלנו. קהילות מיקרוביות אשר חיות בתוך המעי שלנו מסייעות לנו לפרק את המזון שאנו אוכלים, ולעכל אותו [5]. נשאר הרבה מה ללמוד על האופן שבו הקהילות המיקרוביות האלה משפיעות עלינו ועל הבריאות שלנו.

כיצד אתם יכולים ללמוד עוד על הירקבות?

נחשו מה? אתם יכולים להתנסות בהירקבות בעצמכם! הכלים ההתחלתיים הם פשוטים: חתיכת בד ודבק לבנות מהם שקיות פסולת, צמחים ומשקל למדוד את שינויי המשקל עם הזמן. מה השאלה שלכם? אלה גורמים אתם רוצים לבחון? בפעם הבאה שאתם משליכים משהו מחלון הרכב שלכם, חשבו על השאלה הזו: האם הוא ירקוב? אם הוא ינחת על פיסת אדמה, שעשויה להכיל מגוון מיקרובי גדול, הוא עשוי להרקוב מהר יותר מאשר אם הוא ינחת על בטון. היכן שהמגוון המיקרובי ככל הנראה נמוך יותר. ואם הדבר שאתם משליכים הוא משהו אשר קל יותר למיקרובים לאכול, כמו ליבת תפוח, ההירקבות עשויה להיות מהירה יותר מאשר אם תשליכו משהו שקשה יותר לפרק, כמו קליפה של תפוז. אולם כך או כך, לדבר שאתם זורקים עשוי לקחת כמה חודשים להרקוב. אתם אפילו יכולים להתחיל לחקור הירקבות על-ידי יצירת ערימת קומפוסט עם חתיכות של ירקות מטבח ושאריות דשא, ולצפות בהם בעודם הופכים לאדמה. קדימה, להירקבות!

מאמר המקור

Albright M and Martiny J (2018) Is Throwing an Apple Core Out of the Car Littering?—Microbial Communities in Natural Composting. *Front. Young Minds*. 6:13. doi: 10.3389/frym.2018.00013

תודה

Crystal Cove Alliance ו-Kaitlin Magliano, Sara Ludovise-7 לתמיכה על השותפות בתרגום אקולוגיה מיקרוביאלית לתלמידי בית-ספר ולציבור הרחב. תודה ל-Jessica Pratt על הערותיה

לגרסאות קודמות של המאמר. עבודה זו נתמכה על-ידי תכנית הסיוע לסטודנטים בתחומים של צורך לאומי של משרד החינוך של ארה"ב, משרד האנרגיה של ארה"ב וקרן המחקר של ארה"ב.

מקורות

1. Couteaux, M. M., Bottner, P., and Berg, B. 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends Ecol. Evol.* 10, 63–66. doi: 10.1016/S0169-5347(00)88978-8
2. Allison, S. D., Lu, Y., Weihe, C., Goulden, M. L., Martiny, A. C., Treseder, K. K., et al. 2013. Microbial abundance and composition influence litter decomposition response to environmental change. *Ecology* 94, 714–725. doi: 10.1890/12-1243.1
3. Mousseau, T. A., Milinevsky, G., Kenney-Hunt, J., and Moller, A. P. 2014. Highly reduced mass loss rates and increased litter layer in radioactively contaminated areas. *Oecologia* 175, 429–437. doi: 10.1007/s00442-014-2908-8
4. Rubin, E. M. 2008. Genomics of cellulosic biofuels. *Nature* 454, 841–845. doi: 10.1038/nature07190
5. Gill, S. R., Pop, M., Deboy, R. T., Eckburg, P. B., Turnbaugh, P. J., Samuel, B. S., et al. 2006. Metagenomic analysis of the human distal gut microbiome. *Science* 312, 1355–1359. doi: 10.1126/science.1124234

פורסם אונליין: 31 בינואר 2019

נערך על ידי: Gianpiero Vigani, Università degli Studi di Torino, Italy

ציטוט: Albright MBN and Martiny JBH (2019) האם השלכת של לבת תפוח עץ מחלון הרכב נחשבת השלכת פסולת? – קהילות מיקרוביות בקומפוסט טבעי. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2018.00013-he

תורגם והותאם:

Albright MBN and Martiny JBH (2018) Is Throwing an Apple Core Out of the Car Littering?—Microbial Communities in Natural Composting. *Front. Young Minds* 6:13. doi: 10.3389/frym.2018.00013

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

COPYRIGHT © Albright and Martiny 2018. 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

PIETRO, גיל: 14

נולד 13 שנים אחרי 1990, גר במילנו. הוא הלך לבית הספר היסודי "Casa del Sole", בית ספר נפלא שממוקם בפארק גדול, ולחטיבת הביניים Q. Di Vona. הוא אוהב לקרוא, במיוחד כשהוא אמור לעשות דברים אחרים (כמו למשל לעזור בעריכת השולחן לארוחת ערב, או ללמוד); לדחות את הכנת שיעורי הבית, במיוחד כשהוא עייף ויותר מכול – לאכול. הוא גם מחבב מתמטיקה ופיזיקה, והיה שמח לסקור מאמרים בנושאים האלה.

הכותבים

MICHAELINE B. N. ALBRIGHT

התחלתי לנלות עניין במיקרובים כשלמדתי על הגיוון המטאבולי (של חילוף החומרים) המדהים שלהם. סוגים שונים של מיקרובים יכולים לאכול הכול, החל מצמחים מתים ועד למתכות רעילות! המחקר שלי מתמקד בקשרים שבין גיוון מיקרוביאלי לבין מחזור ביוגיאוכימי (biogeochemical cycling), שהוא התנועה וההתמרה של פחמן וחומרי מזון אחרים דרך מקומות שונים על פני כדור הארץ. *nelsonmb@uci.edu

JENNIFER B. H. MARTINY

הפכתי לאקולוגית מאחר שהייתי מסוקרנת להבין מדוע מגוון של זנים ביולוגיים משתנה בין מערכות אקולוגיות שונות, ורציתי לעבוד בחוץ במקומות יפהפיים! תחילה למדתי על מגוון של צמחים וחיות, אבל אז הבנתי שהתעלמתי ממרבית המגוון הביולוגי על פני כדור הארץ: מיקרואורגניזמים. כעת המעבדה שלי חוקרת כיצד מגוון מיקרובי משתנה בין מקומות שונים, ומה משמעות הדבר לגבי הצמחים, החיות והמערכת האקולוגית.



Hebrew version
provided by

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

