

העולם המרתק של תקשורת מתחת לאדמה

Cristiana Ariotti¹, Elena Giuliano¹, Paolina Garbeva², Gianpiero Vigani^{1,2*}

¹היחידה לפיזיולוגיה של הצמח, המחלקה למדעי החיים ומערכות ביולוגיות, אוניברסיטת טורינו, טורינו, איטליה
²המחלקה לאקולוגיות מיקרובית, המכון ההולנדי לאקולוגיה (NIOO-KNAW), ווגנינגן, הולנד

סוקר צעיר

SHASHI-
PREETHAM

גיל: 13



לו הייתם מיקרו-אורגניזם (יצורון) באדמה, כיצד יכולתם לתקשר עם שכניכם? דיבור באנגלית, בצרפתית, או באיטלקית לא יסייע מתחת לאדמה. במקום זאת, הייתם צריכים להשתמש במולקולות בתור מילים! מיקרובים כמו חיידקים ופטריות מתקשרים זה עם זה ועם אורגניזמים אחרים, כמו למשל חיות וצמחים, על ידי יצירת סוגים שונים של מולקולות. אורגניזמים רבים משתמשים במולקולות האלה בתור "מילים כימיות". המולקולות עשויות להיות נדיפות, כמו גזים. הן יכולות להתקדם בקלות דרך כיסים קטנים של אוויר באדמה, ויכולות גם לנוע למרחקים ארוכים – בדומה לתקשורת מרחוק. מולקולות אחרות הן מסיסות, יכולות להתמוסס במים, מה שמאפשר תקשורת בין מיקרו-אורגניזמים (יצורונים) שנמצאים קרוב זה לזה. המיקרו-אורגניזמים שמקבלים את התקשורת הזו יכולים לענות בצורות שונות, כמו למשל על ידי גדילה מהירה או הפקת מולקולות אחרות בתגובה. במאמר זה, נסביר על העולם המסתורי והמרגש של תקשורת כימית מתחת לאדמה, ועל תפקידו באינטראקציות שמתרחשות בין מיקרובים לצמחים.

חיים באדמה

האדמה היא אחת מהמערכות האקולוגיות המורכבות והמרתקות ביותר על פני כדור הארץ. היא לא רק מהווה את פני השטח החיצוניים שבהם צמחים גדלים, אלא היא גם עולם מרהיב ונסתר שבו חיים סוגים רבים של אורגניזמים. האדמה מורכבת מפיסות של אבנים, מנקבוביות אוויר קטנות ומחומר אורגני (צמחים וחיות מתים). הסביבה הזו היא סביבת מחיה נפלאה עבור מיקרו-אורגניזמים, חרקים וצמחים. האם אתם יכולים להאמין שהאדמה כל כך מלאה בחיים? כתלות במאפייני האדמה (גודל האבנים, סוגי המזון, כמות המים וכדומה), אורגניזמים שונים יכולים לחיות בה. אורגניזמים אלה בונים חברה, שהיא מערך ייחודי של מגוון אורגניזמים שחיים יחד.

מיקרו-אורגניזמים של אדמה הם אורגניזמים קטנים מאוד שחיים בצמוד לחלקיקי אדמה או ליצורים חיים אחרים. ישנן פטריות בעלות צורה דומה לשורשים דקים ועדינים, כך שהן יכולות לגעת בשכניהן ולהחליף עימם מידע. ישנם גם חיידקים, שהם אורגניזמים שמכילים תא בודד שבדרך כלל ניתן לראות רק באמצעות מיקרוסקופ. אם האורגניזמים האלה חיים בריזוספֶּרָה (החלק באדמה שמקיף את שורשי הצמחים), הם נקראים מיקרובים של ריזוספֶּרָה. הם גם יכולים לחיות בפני השטח של השורש או בתוך השורשים [1]. בריזוספֶּרָה, אפשר למצוא מיקרובים מועילים (טובים), אשר מסייעים לצמחים לשרוד ולגדול, או מיקרובים מזיקים (רעים), אשר תוקפים צמחים וגורמים להם לחלות.

כיצד מיקרובים באדמה וצמחים מתקשרים זה עם זה?

מלהיבה במיוחד היכולת של מיקרובים באדמה לתקשר בינם לבין עצמם, כמו גם עם אורגניזמים אחרים לרבות צמחים וחיות. התקשורת בין מיקרובים לצמחים נחקרה על ידי מדענים רבים. תקשורת זו מבוססת על שימוש במולקולות בתור מילים, והיא נקראת **תקשורת כימית**. תוכלו לדמיין מולקולה בתור קבוצה של הרבה כדורים קטנים (שנקראים אטומים), המחוברים זה לזה. האטומים האלה הם יסודות כימיים חשובים דוגמת פחמן (C), מימן (H), חמצן (O) וחנקן (N), שמתחברים יחד (כמו פאזל) כדי ליצור מולקולות כמו מים (H₂O) או פחמן-דו-חמצני (CO₂). שילובים שונים של אטומים יוצר מולקולות בעלות תכונות מגוונות.

מיקרובים באדמה יכולים לייצר הרבה סוגי מולקולות, שאפשר לחלקן לשתי קטגוריות עיקריות: מולקולות **מסיסות** ומולקולות **נדיפות**. מולקולות מסיסות מומסות במים, כמו קוביית סוכר בתה, והן מועברות על ידי מים באדמה. הן משמשות ל"שיחה" בין צמחים שגדלים קרוב למיקרובים. מולקולות נדיפות, שנקראות גם **תרכובות אורגניות נדיפות**, משמשות לתקשורת על פני מרחקים גדולים (איור 1). התרכובות הנדיפות האלה הן גזים שמתקדמים בקלות דרך נקבוביות האוויר באדמה. שורשי צמחים יכולים ל"הריח" את הגזים האלה, כפי שאפכם יכול להריח פרח או לחם טרי [1]. תקשורת כימית לא מתרחשת רק בכיוון אחד (ממיקרובים לצמחים), אלא בשני כיוונים – צמחים גם מייצרים מולקולות שמיקרובים יכולים להבין.

מערכת אקולוגית (Ecosystem)

קבוצה של אורגניזמים שונים (צמחים, חיות ומיקרובים) שמתקשרים עם חומר לא חי באזור מסוים.

ריזוספֶּרָה (Rhizosphere)

החלק באדמה שמקיף את השורשים, שבו צמחים ומיקרובים מתקשרים זה עם זה באמצעות מולקולות.

תקשורת כימית (Chemical Communication)

התקשורת שמתרחשת בין שני אורגניזמים או יותר (צמחים, חיות ומיקרובים) באמצעות שימוש בכימיקלים.

מסיס (Soluble)

חומר שניתן להמיס במים, כמו מלח וסוכר.

נדיף (Volatile)

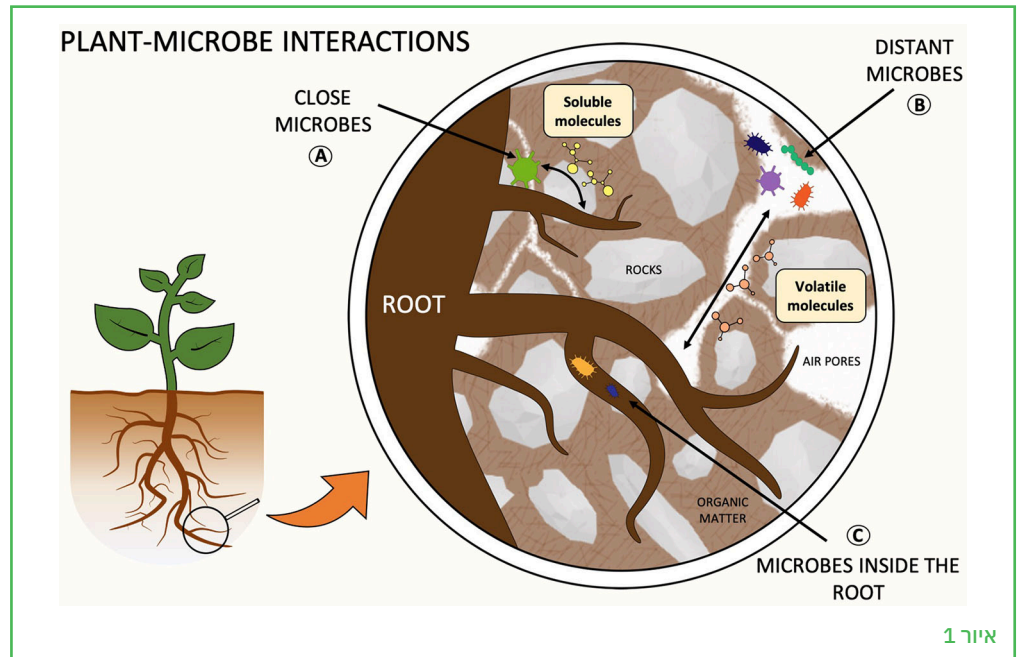
חומר שנוטה להפוך לגז בקלות ולהתפשט באוויר, כמו ריחו של פרח.

תרכובות אורגניות נדיפות (volatile organic compounds - VOCs)

מיוצרות על ידי אורגניזמים שונים, כמו צמחים ומיקרובים, במטרה לתקשר זה עם זה ממרחק.

איור 1

אינטראקציות צמח-מיקרוב בריזוספירה. התמונה מראה שלושה סוגי אינטראקציות: (A) אינטראקציות בין צמחים לבין מיקרובים שחיים על פני השטח של שורשים או ליד השורשים, בסיוען של מולקולות מסיסות; (B) אינטראקציות בין צמחים למיקרובים שחיים הרחק משורשים, בסיוען של מולקולות נדיפות; (C) אינטראקציות עם מיקרובים שחיים בתוך השורשים, ונמצאים במגע ישיר עם תאי השורש. האלה מתרחשות באדמה, שמורכבת מאבנים, מנקבוביות אוויר ומחומר אורגני.



איור 1

מהן ההשפעות של מולקולות תקשורת?

הנה כמה דוגמאות למה שקורה בין מיקרובים לצמחים כשהם מתחילים "לדבר" זה עם זה.

צמחים ומיקרובים מסייעים זה לזה להשיג מזון

מיקרובים רבים באדמה יכולים לסייע לצמחים לגדול, מאחר שהמיקרובים הופכים חומרי מזון הכרחיים למזינים יותר עבור צמחים. לדוגמה, חיידק שנקרא *ריזוביום* יכול להתמיר חנקן באדמה (N_2) למולקולה אחרת: אמוניה (NH_3). ההתמרה הזו נקראת קיבוע חנקן, והיא מתרחשת באדמה. קיבוע חנקן חשוב מאוד עבור צמחים מאחר שהם זקוקים לחנקן כדי לגדול, והם יכולים לקבל אמוניה רק מהאדמה. על ידי התמרת חנקן לאמוניה, *ריזוביום* מסייע לצמחים לגדול והופך אותם חזקים יותר!

מה שמעניין אפילו יותר הוא שריזוביום יכול "לשוחח" עם קבוצה מסוימת של צמחים לרבות שעועית ואפונה. כיצד דו השיח הזה מתרחש? ראשית, הצמח משחרר מולקולות שנקראות איזופלבונים אל תוך הריזוספירה, שיכולים למשוך את הריזוביום. החיידקים "שומעים" את הצמח "מדבר" ונעים לקראתו. במסע של החיידקים אל עבר הצמח, הריזוביום מתחיל לייצר מולקולות אחרות, שידועות בתור גורמי תיווך (nod-factors), אשר מנחות את הצמח ליצור חלל בשורשים, שנקרא קשרית השורש (root nodule), שם הריזוביום יכול לחיות. בתמורה למקום מחיה ומזון (סוכר) מהצמח, הריזוביום נותן לצמח הרבה אמוניה (איור 2). כתוצאה מכך, צמחים שמאפשרים לריזוביום לחיות איתם גדולים הרבה יותר. גם עבור הצמח וגם עבור הריזוביום, חיים משותפים מהווים יתרון מאחר שלשני האורגניזמים יש יותר מזון לאכול מאשר כשהם חיים לבד, ולכן הם יכולים לגדול טוב יותר [2].

גורמים ביוטיים (חיים) (Biotic Factors)

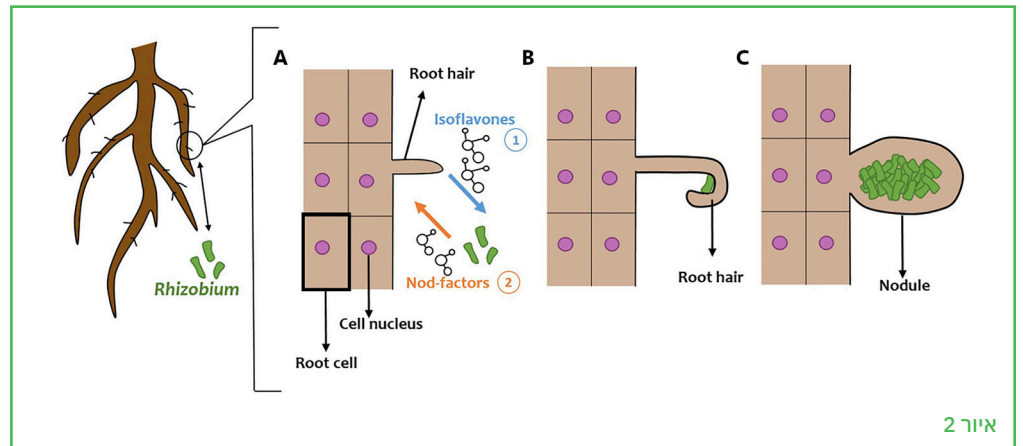
הרכיבים החיים של סביבה מסוימת, כמו צמחים ומיקרובים.

מיקרובים יכולים לסייע להגן על צמחים מפני פתוגנים (מחוללי מחלה) ומזיקים

גורמים ביוטיים (חיים) הם החלקים החיים של הסביבה, כמו למשל צמחים, חיות ומיקרובים (איור 3). סֶטְרָס ביוטי הוא עֶקָה שמורגשת על ידי אורגניזם דוגמת צמח שניזוק על ידי

איור 2

ההשפעות של אינטראקציות צמח-ריזוביום על מבנה השורש. (A) מבנה שורש רגיל ותחילת התקשורת הכימית. ראשית, הצמח מייצר איזופלבונים, אז הריזוביום מגיב על ידי יצירת גורמי תיווך (nod-factors). (B) ריזוביום נע לעבר השורש ונדבק לשערת שורש, שאז משנה את צורתו כדי להכיל את החיידק כך שהחיידק יוכל להיכנס אל תוך השורש. (C) היווצרות של קשריות השורש (root nodule), שהוא חלל שבו החיידקים יכולים להתרבות, ובו סוכר וחנקן מוחלפים.

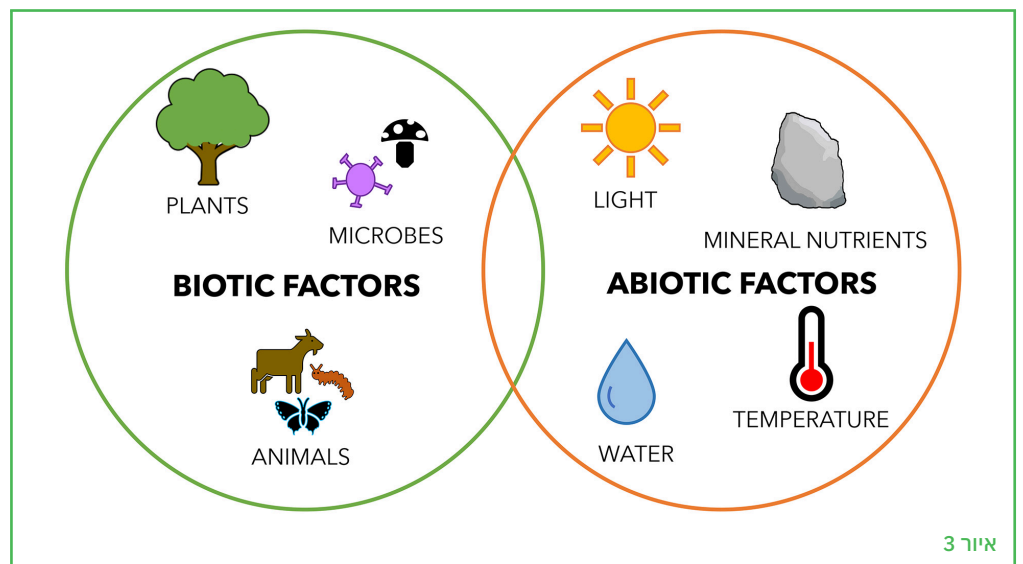


איור 2

גורמים ביוטיים כמו מיקרובים רעים, שנקראים פתוגנים, או על ידי חרקים רעים, שנקראים מזיקים. מיקרובים טובים יכולים לסייע לצמחים להילחם כנגד פתוגנים ומזיקים בשתי דרכים. ראשית, המיקרובים יכולים להדוף את הפתוגן/מזיק הרחק או להרוג אותו. לדוגמה, מיקרובים טובים מסוימים מייצרים תרכובות אורגניות נדיפות שיכולות לעצור את גדילתו של הפתוגן או את מתקפתו של המזיק על הצמח. הדרך השנייה שבה מיקרובים טובים יכולים לסייע לצמחים להילחם בפתוגנים היא על ידי כך שהם מאותתים לצמח להכין את עצמו להילחם על ידי הגברת ההגנות שלו. בדומה לאופן שבו אימכם אומרת לכם במהלך החורף לאכול יותר תפוזים מאחר שהם מכילים מולקולה חשובה, שנקראת ויטמין C, שביכולתה לחזק את ההגנות החיסוניות של גופכם המגינות עליכם מפני מחלות. המנגנון זה עבור מיקרובים וצמחים! לדוגמה, המולקולות שמיצרות על ידי החיידק *Pseudomonas fluorescens* מאפשרות לצמחים לעמוד בפני מתקפת הפתוגן [3].

איור 3

גורמים ביוטיים וא-ביוטיים חשובים שמקושרים בסביבה. גורמים ביוטיים כוללים למשל, עצים, מיקרובים ובעלי חיים, גורמים א-ביוטיים כוללים לדוגמה את אור השמש, חומרים מינרליים, טמפרטורה וזמינות של מים. גורמים אלה משפיעים על גדילת צמחים, ויכולים להשפיע על תקשורת כימית בין צמחים לבין מיקרובים באדמה. אייקון הפטרייה לקוח מ-Flaticon.com.



איור 3

גורמים א-ביוטיים (לא חיים) (Abiotic Factors)

הרכיבים הלא חיים של סביבה מסוימת, כמו אבנים, אור שמש ומים.

מיקרובים יכולים לסייע לצמחים לשרוד באזורים קשים

גורמים א-ביוטיים (לא חיים) הם החלקים הלא חיים בסביבה, שכוללים למשל את אור השמש, טמפרטורה ומים (איור 3). סטרס א-ביוטי מהווה השפעה שלילית של גורמים כאלה על אורגניזמים חיים. דוגמאות לסוגי סטרס א-ביוטי שמחלישים צמחים הן זמינות

מים נמוכה ורמות מלח גבוהות. מיקרובים טובים יכולים לסייע לצמחים לחיות באזורים קשים עם תנאי מחיה ירודים. לדוגמה, החיידק *Pseudomonas chlororaphis* O6 מאפשר לחלק מהצמחים לשרוד כאשר אין מספיק מים [4]. מיקרובים אחרים, כמו החיידק *Bacillus subtilis*, מסייעים לצמחים לשרוד באדמה שבה יש ריכוז גבוה של מלח, על ידי הפחתת כמות המלח הנכנסת לשורשי הצמח [5].

מדוע חשוב להבין תקשורת כימית?

תקשורת כימית בין מיקרובים לאורגניזמים אחרים התחילה להתפתח לפני מיליוני שנים. לפני 450 מיליון שנה, צמחים עברו מהים והחלו לחיות על היבשה. מדענים מאמינים שפטטריות אדמה סייעו לצמחים לבצע את המעבר מהים ליבשה. הפטריות סייעו לצמחים להשתמש בחומרי מזון, כך שהצמחים יוכלו לשרוד ביבשה [6]. עד כה, במשך מיליוני שנים, תקשורת כימית בין אורגניזמים באדמה הייתה חשובה עבור הרווחה של צמחים וגדילתם. במאמר זה, הסברנו כיצד אינטראקציות מיקרוב-צמח יכולות לספק לצמח מזון רב יותר, לסייע לצמחים להילחם כנגד פתוגנים, או לחיות באזורים קשים. לרוע המזל, האינטראקציות האלה נמצאות בסכנה! השימוש הרב באנטיביוטיקות, מדבירים ודשנים בחקלאות יכול לשנות את הרכב האדמה, ובכך גם עלול לשנות את **המערכת האקולוגית** שנמצאת באדמה, ולגרום לחלק מהאורגניזמים באדמה למות, ולאחרים להתרבות. שינויים בחברות המיקרוביות יכולים לגרום להשפעות קשות על צמחים; לדוגמה, המיקרובים שמתרבים עשויים להיות פתוגנים!

האוכלוסייה האנושית עדיין גדלה, ומאחר שאנשים זקוקים למזון כדי לשרוד, צריך למצוא שיטות חדשות לעידוד גדילה של צמחים ולייצור מזון. מיקרובים משמשים באופן הולך וגובר בתור סייעים טבעיים לשיפור גדילת צמחים וייצור מזון. חקר תקשורת מיקרוב-צמח הכרחי להבנת אילו מיקרובים יכולים לסייע לגדילת צמחים. עלינו להקדיש תשומת לב רבה לבחירת המיקרובים הנכונים, לדוגמה, יכולתם לחשוב שהשימוש בפטרייה *Fusarium culmorum* עשוי להיות רעיון טוב, מאחר שהיא מסייעת לצמחים מסוימים לגדול באזורים קשים שהם עשירים במלח. אולם *Fusarium culmorum* היא אורגניזם שלילי עבור תירס – עבורו היא פתוגן! מסיבות אלה, חוקרים רוצים להבין תקשורת כימית כמה שניתן, כדי להגדיל את הידע שלנו לגבי מערכות אקולוגיות באדמה, להבין כיצד אורגניזמים מתקשרים במערכות האקולוגיות האלה ולסייע לנו להשתמש באינטראקציות צמח-מיקרוב במטרה להגביר את גדילת הצמחים עבור מזון, תוך הגנה על מערכות אקולוגיות באדמה.

מקורות

1. van Dam, N. M., Weinhold, A., and Garbeva, P. 2016. Calling in the dark: the role of volatiles for communication in the rhizosphere. *ISME J.* 12:1252–62. doi: 10.1007/978-3-319-33498-1_8
2. Tomer, S., Suyal, D. C., and Goel, R. 2016. "Biofertilizers: a timely approach for sustainable agriculture," in *Plant-Microbe Interaction: An Approach to Sustainable*

- Agriculture*, eds D. Choudhary, A. Varma, and N. Tuteja (Singapore: Springer). p. 375–95. doi: 10.1007/978-981-10-2854-0_17
3. Van Wees, S. C. M., Van der Ent, S., and Pieterse, C. M. J. 2008. Plant immune responses triggered by beneficial microbes. *Curr. Opin. Plant Biol.* 11:443–8. doi: 10.1016/j.pbi.2008.05.005
 4. Garbeva, P., and Weiskopf, L. 2020. Airborne medicine: bacterial volatiles and their influence on plant health. *New Phytol.* 226:32–43. doi: 10.1111/nph.16282
 5. Ortíz-Castro, R., Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., and López-Bucio, J. 2009. The role of microbial signals in plant growth and development. *Plant Signal. Behav.* 4:701–12. doi: 10.4161/psb.4.8.9047
 6. Field, K. J., Pressel, S., Duckett, J. G., Rimington, W. R., and Bidartondo, M. I. 2015. Symbiotic options for the conquest of land. *Trends Ecol. Evol.* 30:477–86. doi: 10.1016/j.tree.2015.05.007

פורסם אונליין: 30 במרץ 2023

עורך: Rémy Beugnon

מנחה מדעי: Sreenivas Ravella

ציטוט: Ariotti C, Giuliano E, Garbeva P and Vigani G (2023) העולם המרתק של תקשורת מתחת לאדמה. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2020.547590-he

Ariotti C, Giuliano E, Garbeva P and Vigani G (2020) The Fascinating World of Belowground Communication. *Front. Young Minds* 8:547590. doi: 10.3389/frym.2020.547590

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

COPYRIGHT © 2020 © Ariotti, Giuliano, Garbeva and Vigani. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(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.

סוקר צעיר

SHASHIPREETHAM, גיל: 13

היי, קוראים לי שָשִׁי, אני בן 13, תלמיד כיתה ח בבית הספר פֶּנְגְּלִיס. אני נהנה לשחק כדורגל וכדורסל. המקצועות האהובים עליי הם מתמטיקה ומחשבים. אני מחזיק ארבע פעמים בשיא גינס במשחק רוקט ליג, ושמי מופיע במהדורת 2018 של שיאי גינס של גיימרים.



הכותבים

CRISTIANA ARIOTTI

לאחרונה סיימתי תואר ראשון בביולוגיה סביבתית באוניברסיטת טורינו. כיום אני דוקטורנטית באוניברסיטת טורינו, שם אני חוקרת תקשורת בין צמחים למיקרובים באדמה שגדלים בתנאים של מחסור בברזל. בזמני הפנוי, אני אוהבת לטפס על הרים (אני גרה ליד האלפים!) ולשיר במקלה.



ELENA GIULIANO

לאחרונה השלמתי תואר ראשון בביולוגיה סביבתית באוניברסיטת טורינו. אני רוצה להגיש מועמדות לדוקטורט במדעי הצמח. אני מתעניינת באינטראקציות צמח-מיקרוב ובהגנת צמחים מפני סטרס בינטי וא-בינטי. אני אוהבת לחלוק ידע ורעיונות עם אנשים מתרבויות שונות, ובזמני הפנוי אוהבת לקרוא ולצלם.



PAOLINA GARBEVA

אני מובילה קבוצה במחלקה לאקולוגיה מיקרובית ב-NIOO בווגנינגן. המחקר שלי מתמקד בהבנת המנגנונים היסודיים של אינטראקציות ותקשורת מיקרוביות.



GIANPIERO VIGANI

אני חוקר באוניברסיטת טורינו (איטליה). המחקר שלי מתמקד בהבנת האופן שבו צמחים לוקחים חומרי מזון ומים מהאדמה, וכיצד מתרחשות אינטראקציות צמח-מיקרוב מתחת לאדמה.

*gianpiero.vigani@unito.it



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