



הקשר המיוחד שבין צמחים למיקרואורגניזמים

Aline Lacaze*, Antoine Zboralski | David L. Joly

המחלקה לביולוגיה, אוניברסיטת מונקטון, מונקטון, ניו ברונזוויק, קנדה

סוקרים צעירים

MEHA

גיל: 15



NIVEDITA

גיל: 14



SHREEYA

גיל: 11



SHRIYA

גיל: 13



מיקרואורגניזמים (Microbes)

אורגניזמים זעירים כמו למשל חיידקים או פטריות. חלק מהמיקרואורגניזמים עלולים לגרום למחלות בצמחים, אולם סוגים אחרים מועילים.

צמחים מקבלים את מזונם מהאדמה שבה הם גדלים. אולם מזון זה זמין רק הודות למגוון רחב של מיקרואורגניזמים, בעיקר חיידקים ופטריות, שיכולים להתמיר את החומרים שבאדמה לחומרי מזון, כימית ומכנית כאחד. מיקרואורגניזמים אלה באדמה קיבלו תשומת לב רבה ממדענים ברחבי העולם, מאחר שביכולתם לשפר את האופן שבו אנו מגדלים את מזוננו, ולעשות את החקלאות בת-קיימה יותר. במאמר זה נציג חלק מהמנגנונים העיקריים שמיקרואורגניזמים אלה משתמשים בהם כדי להזין צמחים.

הקדמה

מתחת לפני השטח של כדור הארץ קיים מגוון עצום של מיקרואורגניזמים, לרבות מינים רבים של חיידקים ופטריות. אורגניזמים אלה שונים בצורתם ובגודלם, ומרביתם דקים פחות מעוביה של שיערה אנושית. איננו יכולים לראות מיקרואורגניזמים של אדמה באמצעות עינינו, אך הם ממלאים תפקיד בסיסי בחיינו: מזינים את הצמחים שאנו מגדלים עבור מזון. במילים אחרות, מיקרואורגניזמים של אדמה חיוניים לקיום חיינו על כדור הארץ. מיקרואורגניזמים אלה פיתחו מגוון דרכים לסייע לצמחים לגדול, כמו למשל שבירת סלעים; מחזור חומר מת

ויצירת קשרי שיתוף פעולה עם צמחים. נבחן כיצד אורגניזמים זעירים אלה מבצעים את מגוון המטלות הללו.

טַעַם זַעִיר לַסְלַעִים

צמחים אינם יכולים לחיות ישירות על סלעים מאחר שחומרי המזון שבסלעים אינם זמינים עבורם. חומרי המזון שצמחים זקוקים להם מצויים באדמה, וכוללים יסודות כמו ברזל ואשלגן, או מולקולות קטנות כמו זָרְקָה או חֶנְקָה. חומרי המזון האלה הם אבני הבניין הדרושות לגדילת צמחים, ממש כשם שהמזון שאנו אוכלים משמש כדלק לגוף.

בתחילת האבולוציה שלהם, צמחים התקיימו רק בתור אצות שחיות באוקיינוסים. לפני 420 מיליון שנים לפחות, הצמחים החלו להתיישב על היבשה [1]. באותו הזמן, היבשה נוצרה מפעילות געשית, כלומר הייתה בעיקר סלעית, ולא נמצאו אדמות שיכלו לסייע לצמחים לגדול. למרבה המזל, מיקרואורגניזמים כבר נמצאו ביבשה, והיו בעלי יכולת לקבל חומרי מזון מסלעים, דרך תהליך שנקרא **בְּלִיַּת סְלַעִים**. המיקרואורגניזמים הפכו את חומרי המזון שקודם לכן היו כלואים בסלעים, זמינים עבור הצמחים היבשתיים החדשים, מה שאִפשר לצמחים אלה לשגשג על היבשה וסייע להם ליצור אדמות עבור דורות עתידיים של צמחים!

מיקרואורגניזמים מבצעים בליית סלעים באמצעות ייצור חלבונים וחומצות מסוימים שמסוגלים להשפיע על השכבות הראשונות של סלעים באמצעות תגובות כימיות. תגובות אלה גורמות לשחרורם של רכיבי סלעים זעירים שאותם מיקרואורגניזמים וצמחים יכולים לצרוך (איור 1). לדוגמה, החיידק *Bacillus subtilis* יכול לשחרר מסלעים את היסוד המתכתי מַנְגָן בצורה שְׁקֵל לצמחים לצרוך [2]. הפטרייה *Talaromyces flavus* היא דוגמה נוספת. פטרייה זו משתמשת בחומצה כדי לשנות סלעים וְלִזְקֵק מגנזיום וברזל. לפטריות יש מבנים ארוכים וצינוריים שנקראים **קוֹרִים**, שבהם הן משתמשות לגדילה וספיגת חומרי מזון. *Talaromyces flavus* משתמשת בלחץ מקצוות הקורים שלה כדי לשבור סלעים ולהגיע למינרלים מעניינים [3]. פטרייה זו גְדֵלָה בחרכים קטנים, ואז דוחפת אותם ומרחיבה אותם. הן פטריות הן חיידקים מייצרים גם מולקולות קטנות שיכולות לקשור ברזל ומסייעות בתהליך בליית סלעים. סוגים רבים של מיקרואורגניזמים יכולים לשנות סלעים. מינים חלוצים אלה היו חיוניים להיווצרות אדמות, ובסופו של דבר ליצירת מערכות אקולוגיות מבוססות-אדמה מורכבות.

מִיקְרוֹאוֹרְגָנִיזְמִים שוֹמְרֵי אֲדָמוֹת

במאה ה-18, הכימאי הצרפתי אנטואן לבואזיה ניסח את חוק שימור המָסָה כך: 'שום דבר לא נאבד, שום דבר לא נוצר, הכול מותמר'. עיקרון זה פֶּקֶק גם לאורגניזמים חיים, ומומחש על ידי מיקרואורגניזמים שנקראים **סַפְרוֹבִּיּוֹנְטִים** (מהמילים היווניות sapros: מרקיבים, ו-biôn: חיים). ספרוביונטים יכולים למחזר יסודות על ידי פירוק חומר מת כמו פסולת צמחים, ואז לצרוך את חומרי המזון שנוצרים [4]. תהליך זה מאפשר להם לקבל חומרי מזון כמו סוכרים, שהם לא יכלו למצוא בדרך אחרת. צמחים הם מפעלי סוכר יעילים שמתפקדים על אנרגיה סוֹלָרִית. הם משלבים מולקולות של פחמן דו-חמצני, באמצעות אור כמקור אנרגיה, בתהליך שנקרא **פוטוסינתזה**. כאשר צמחים מתים, הסוכרים שהם מייצרים יכולים

בליית סלעים (Rock weathering)

הפירוק המכני והכימי של סלעים.

קורים (Hyphae)

מבנים ארוכים, מסתעפים ודמויי צינוריות בפטריות, המשמשים אותן לגדילה ולמציאת חומרי מזון.

ספרוביונטים (Saprobionts)

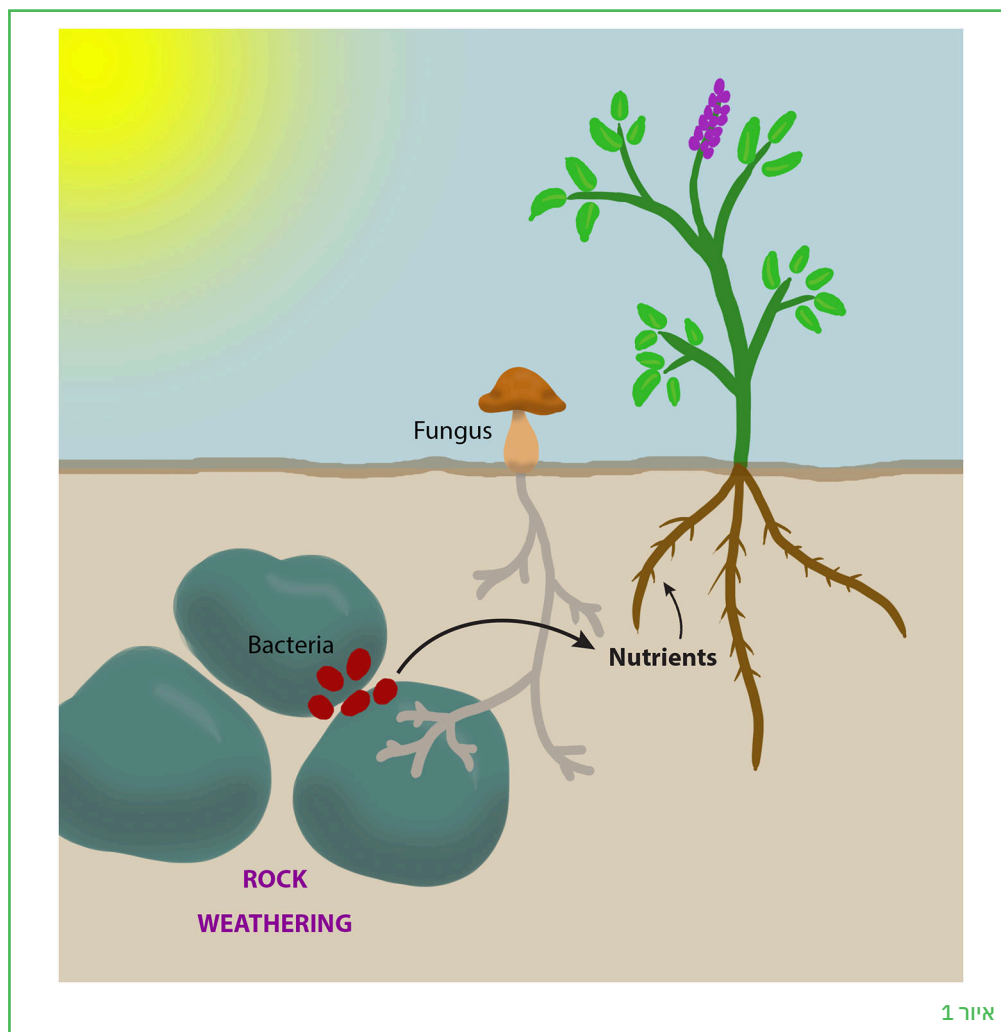
כל אורגניזם, במיוחד פטרייה או חיידק, אשר חי על חומר מת וניזון ממנו.

פוטוסינתזה (Photosynthesis)

התהליך שבו צמחים משתמשים באור שמש כדי לייצר סוכרים מפחמן דו-חמצני.

איור 1

בליית סלעים. חיידקים (Bacteria) ופטריית (Fungus) כאחד מסייעים להזין צמחים באמצעות שבירת סלעים. תהליך זה, המכונה בליית סלעים (Rock weathering), מאפשר להפוך את חומרי המזון (Nutrients) שכלואים בתוך הסלעים זמינים עבור שורשי הצמחים הקרובים. מיקרואורגניזמים שמבצעים בליית סלעים מעשירים אדמות עם חומרי מזון, ומסייעים ליבולים לגדול טוב יותר.



איור 1

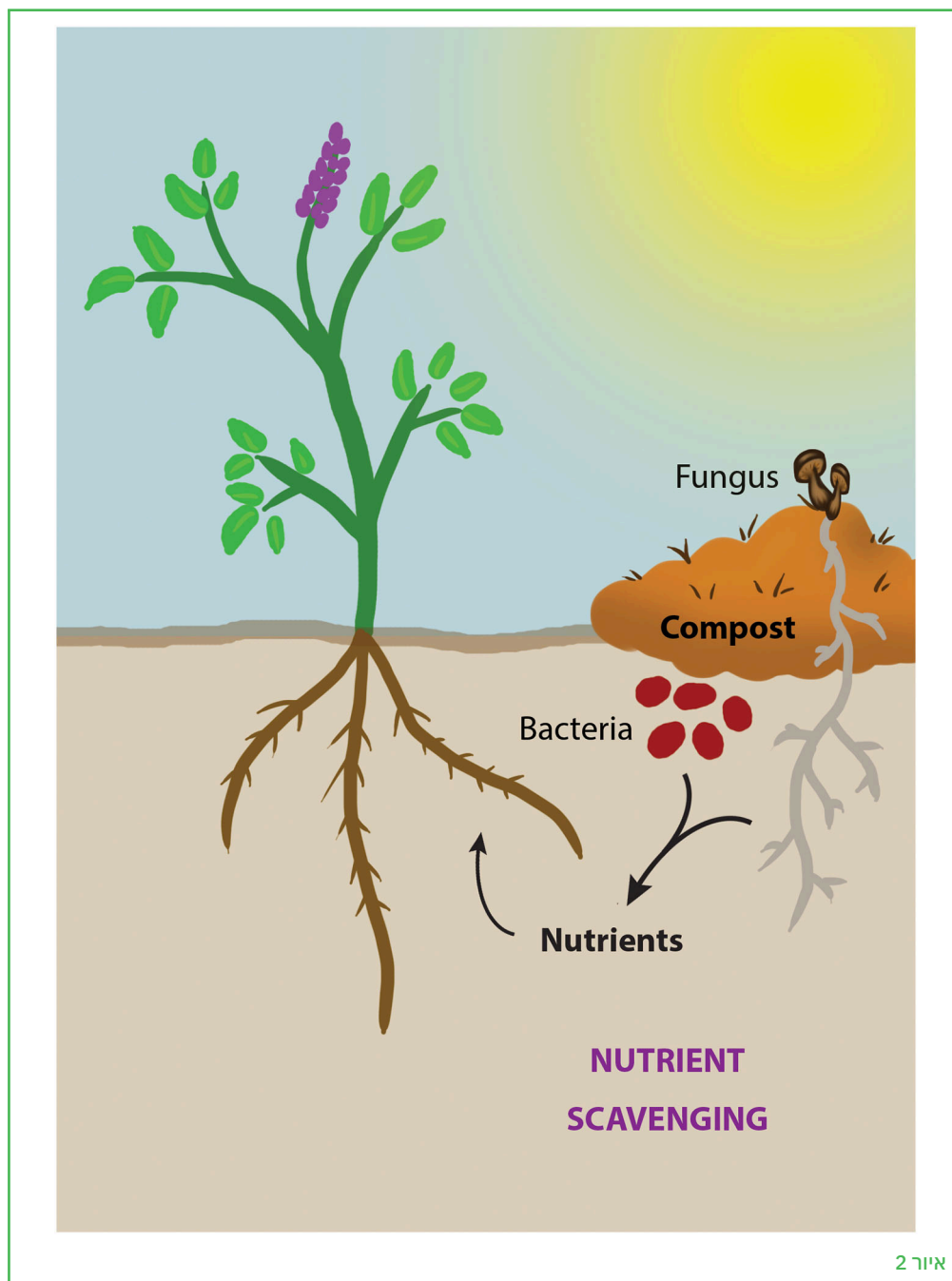
להיות שוב בשימוש על ידי אורגניזמים אחרים. במהלך הזמן, יותר ויותר חומר צמחי מת מצטבר על האדמה וממוחזר על ידי ספרוביונטים ליצירת אדמות.

ספרוביונטים כוללים מגוון עצום של מיני פטריות וחיידקים, ויכולים לחיות בטווח רחב של מקומות. באדמות חקלאיות, ספרוביונטים חיוניים להתמרת קומפוסט לצורות של חומרי מזון שצמחי יבול יכולים להשתמש בהם (איור 2). ללא ספרוביונטים מיקרוביאליים, קומפוסט לא היה דרך מועילה להזין צמחים, מאחר שצמחים אינם יכולים לאסוף חומרי מזון ישירות מחומר מת. בהיעדרם של ספרוביונטים, יבולים לא היו גדלים באופן יעיל, ופחות מזון היה מיוצר.

כאשר מתרחשים אירועי מזג אוויר קיצוניים, כמו למשל תקופות בצורת שנגרמות על ידי שינויי אקלים, ספרוביונטים באדמה עשויים להיות מושפעים מכך, ומידת היעילות שלהם במחזור חומר מת עלולה להיפגע. אולם, אם אוכלוסיית הספרוביונטים מספיק מגוונת, חלק מהמינים לא יושפעו על ידי מזג האוויר הקיצוני באותה המידה כמו אחרים, וימשיכו לפרק חומר מת. אם כן, חשוב לאדמות לְשַׁמֵּר את האוכלוסייה המגוונת של ספרוביונטים, כך שחומר תמיד יוכל להיות מפורק כדי להזין אורגניזמים אחרים ולשמור על זרימה של חומרי מזון דרך המערכות האקולוגיות. תהליך זה תומך ביבולים שאנו זקוקים להם כדי לחיות.

איור 2

ספרוביונטיים. אלה הם חיידקים ופטריית באדמה שמסייעים להזין צמחים על ידי פירוק חומר מת באדמה, כמו למשל קומפוסט (Compost). מיקרואורגניזמים אלה הופכים את חומרי המזון בחומר המת זמינים לספיגה על ידי צמחים, דרך שורשי הצמחים. = Nutrient scavenging 'טיהור' חומרי מזון.



איור 2

נקודה חמה (Biodiversity hotspot)

אזור אקולוגי בכדור הארץ שמכיל מגוון ביולוגי בעל חשיבות גבוהה, אשר פעילות אנושית מאיימת על קיומו. בשל הערך האקולוגי הייחודי שלו, אזור כזה מצריך הגנה מיוחדת.

סימביוזה (Symbiosis)

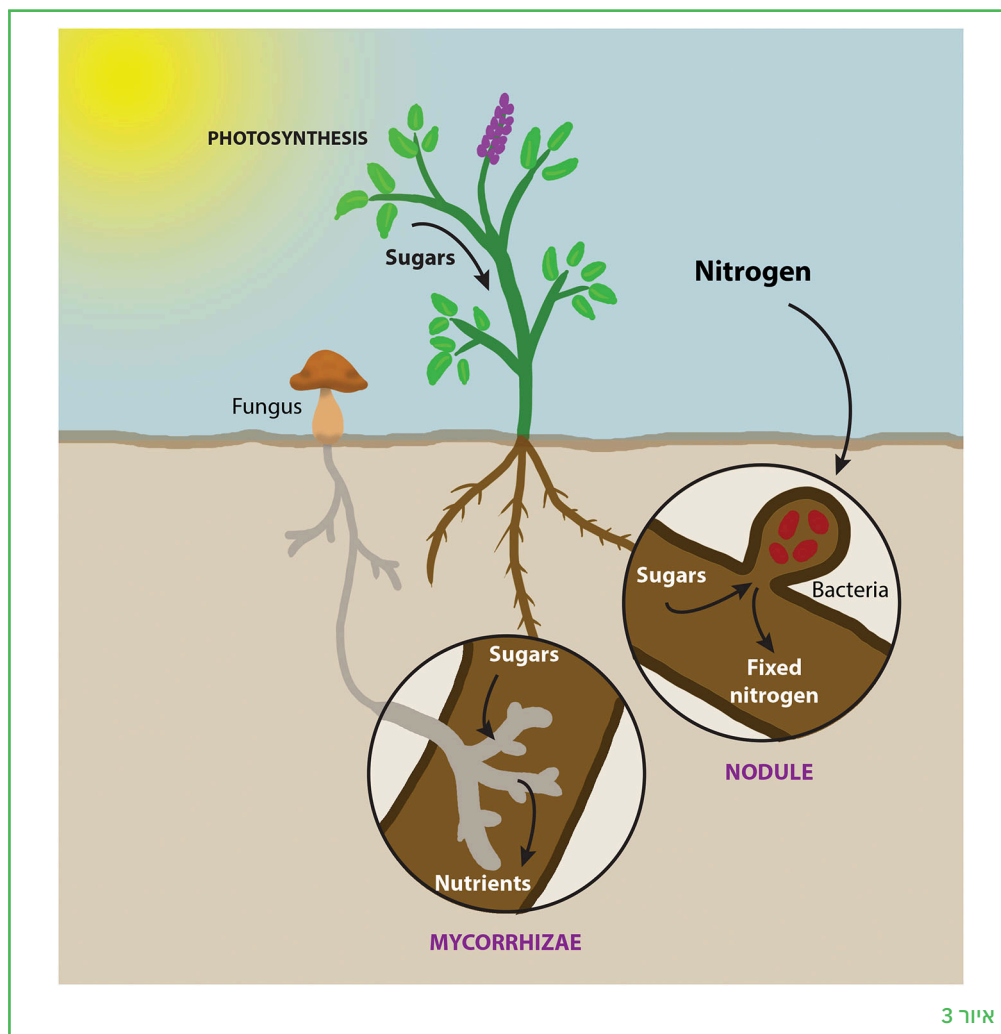
קשר הדוק בין שני אורגניזמים מסוגים שונים, אשר תורם לשני האורגניזמים.

שילובי שורשים חבויים

אזורי האדמה שמצויים סמוך לשורשי צמחים הם **נקודות חמות** למגוון מיקרוביאל. חלק ממיני החיידקים והפטריית מוצאים מקלט בתוך שורשי הצמחים, ומקבלים גישה לסוכרים שמוצרים בתהליך הפוטוסינתזה, בתמורה לאספקת חומרי מזון ושירותים אחרים לצמח. תופעה זו מכונה **סימביוזה**: קשר שבו שני האורגניזמים מרוויחים, בעיקר באמצעות החלפת חומרי מזון (איור 3).

איור 3

סימביוזה יעילה. חיידקים ופטריית גם יחד יכולים ליצור קשר סימביוטי עם שורשי צמחים, אשר מזינים את הצמחים ומביאים תועלת למיקרואורגניזמים. צמחים ממשפחת הקטניות מייצרים קִשְׁרִיּוֹת (Nodules) על השורשים שלהם, שבהן חיידקים מסוימים יכולים לחיות ולספק לצמחים צורה של חנקן שהצמחים יכולים להשתמש בה. מיקוריזות (Mycorrhizae) הן מבנים שנוצרים כאשר שורשי צמחים יוצרים קשרים עם קורים (Hyphae) של פטריות. הקורים מעבירים חומרי מזון מהאדמה אל שורשי הצמחים. סימביוזה זו משפרת מאוד את גדילתם של צמחים, ותורמת לבריאותם. Photosynthesis = פוטוסינתזה
Fixed nitrogen = גז חנקן שהותמר לאמוניה, אמוניום או תחמוצת חנקן אחרת, כדי שאורגניזמים חיים יוכלו להשתמש בו כחומר מזון. זהו רכיב מרכזי במחזור החנקן = סוכרים.



איור 3

קִשְׁרִיּוֹת הן קבוצת צמחים שכוללת יבולים כמו פולי סויה, בוטנים ואפונה. קטניות יכולות ליצור קשר סימביוטי עם חיידקים מסוג *Rhizobia*. הקטניות מייצרות איבר חדש על פני השטח של שורשיהן, שבו חיידקים יכולים לחיות, המכונה **קִשְׁרִיּוֹת**. בתוך קשריות, חיידקי *Rhizobia* מתרבים, ומוגנים מלחצים סביבתיים. החיידקים גם מקבלים חלק מהסוכרים של הצמח, שבהם הם משתמשים לגדילה וְלְהַמְרַת חנקן מהאוויר לְאִמוֹנְיָה, דרך תהליכים כימיים [5]. אמוניה היא מקור לחנקן שצמחים יכולים להשתמש בו. חנקן חשוב לאורגניזמים חיים מאחר שהוא רכיב חיוני במולקולות ביולוגיות רבות, כמו למשל דנ"א וחלבונים. אם כן, צמחים מרוויחים מהחנקן שמסופק על ידי החיידקים המצויים בקשריות שורשי הצמחים. אם מיני *Rhizobia* מצויים באדמה ומתרחשת היווצרות של קשריות, חקלאים אינם צריכים להזין את האדמה בכל כך הרבה תוספי חנקן כְּדֶשֶׁן, כפי שנהוג.

סימביוזה אחרת הנפוצה במערכות אקולוגיות מתקיימת בין שורשי צמחים לפטריות. המבנים שנוצרים מסוג הסימביוזה הזו נקראים **מִיקוֹרִיזָה** (מהמילים ביוונית *mýkēs*: פטרייה, ו-*rhiza*: שורשים). בסוג הסימביוזה הזו משתתפים יותר מ-80% מצמחי האדמה [6]. מיקוריזות הן מרתקות במגוון שלהן ובמורכבותן, ודברים חדשים על אודותיהן מתגלים בקביעות. באופן עקרוני, חומרי מזון מהאדמה מועברים לשורשי צמחים דרך קורי הפטריות. בהשוואה לשורשי צמחים, הקורים יכולים להתפרס על פני נפח אדמה גדול יותר, ולהגיע

קשרית (Nodule)

התנפחות שורש של צמח ממשפחת הקטניות, אשר מכילה חיידקים שמסוגלים לאסוף חנקן מהאוויר ולתת אותו לצמחים.

מיקוריזה (Mycorrhizae)

קשר בין פטרייה לצמח שבו הפטרייה חיה בתוך שורשי הצמח או על צידם החיצוני, תוך יצירת שיתוף סימביוטי בין הצמח לפטרייה.

לאזורים רחוקים יותר באדמה, מה שמגדיל את כמות חומרי המזון שזמינים עבור צמחים. ללא מיקוריזה, צמחים לא היו מסוגלים לאסוף אותה כמות של חומרי מזון מהאדמה, ולא היו גדלים טוב באותה המידה. בתמורה, צמחים חולקים את הסוכרים שלהם עם הפטריות הסימביוטיות. חלק מפטריות המיקוריזה יכולות אף לגרום לבליה של סלעים, כפי שתואר קודם לכן, כדי לספק חומרי מזון כמו זרחן לצמחים המארחים שלהן. בשדות יבול, מיקוריזציה חיונית להגדלת כמות המזון שניתן לייצר ללא שימוש בדשן מלאכותי.

סיכום

נוכחנו כי מיקרואורגניזמים של אדמה חיוניים להזנת צמחים במגוון דרכים. אף על פי שחוקרים למדו רבות על הקשרים המועילים החשובים בין צמחים למיקרואורגניזמים, שאלות רבות נותרו ללא תשובה, כמו למשל 'האם חיידקים ופטריות הם תמיד מזיני הצמחים העיקריים באדמה?'; 'אילו סוגי מיקרואורגניזמים הכי טובים עבור קידום גדילת צמחים ושמירה על בריאותם?'; ו-'כיצד שינויי האקלים ישפיעו על מיקרואורגניזמים של אדמה?'. קשרים בין צמחים למיקרואורגניזמים חיוניים ליצירת סוגי האדמות שיכולים לתחזק את החקלאות שלנו. נוסף על כך חִבְרוֹת מיקרוביאליות צריכות להיות מגוונות כדי להתמודד עם שינויים באדמה, כמו למשל אלו הנגרמים על ידי שינויי אקלים. חשוב שמדענים יבינו טוב יותר את המרכיבות של הזנת צמחים על ידי מיקרואורגניזמים, כדי שנוכל להתמודד עם אתגרים חקלאיים.

מקורות

1. Pennisi, E. 2018. Land plants arose earlier than thought—and may have had a bigger impact on the evolution of animals. *Science Mag.* doi: 10.1126/science.aat3642
2. Samuels, T., Bryce, C., Landenmark, H., Marie-Loudon, C., Nicholson, N., Stevens, A. H., et al. 2020. Microbial weathering of minerals and rocks in natural environments. *Biogeochem. Cycles Ecol. Drivers Environ. Impact* 251:59–79. doi: 10.1007/978-94-009-3071-1_3
3. Hand, E. 2016. Iron-eating fungus disintegrates rocks with acid and cellular knives. *Science Mag.* doi: 10.1126/science.aaf4184
4. Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., and Kopriva, S. 2017. The role of soil microorganisms in plant Mineral nutrition - current knowledge and future directions. *Front. Plant Sci.* 8:1617. doi: 10.3389/fpls.2017.01617
5. Wagner, S. C. 2011. Biological nitrogen fixation. *Nat. Educ. Knowl.* 3:15.
6. Bonfante, P., Genre, A. 2010. Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nat. Commun.* 1:48. doi: 10.1038/ncomms1046

פורסם אונליין: 27 בנובמבר 2023

נערך על ידי: Phillip R. Myer

מנחים מדעיים: Shruti Parikh

ציטוט: Lacaze A, Zboralski A ו Joly DL (2023) הקשר המיוחד שבין צמחים למיקרואורגניזמים. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2021.604096-he

תורגם והותאם מ: Lacaze A, Zboralski A and Joly DL (2021) Who Feeds The Plants? Microbes! Front. Young Minds 9:604096. doi: 10.3389/frym.2021.604096

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

זכויות יוצרים © 2021 © 2023 Lacaze, Zboralski ו Joly. 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 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

MEHA, גיל: 15

הי, אני תלמידת כיתה י בבית ספר תיכון, שואפת לקריירה ברפואה. התחביבים שלי כוללים ציור, טניס וביילוי עם חברים! אני גם אוהבת להתנדב ולהעניק חזרה לקהילה שלי. מתרגשת להיות חלק מפרונטירז – מדע לצעירים, מאחר שאני רוצה שההישגים המדעיים הנפלאים הללו, שמתבצעים מדי יום ביומו, יוגשו לחבריי ולתלמידים אחרים.

NIVEDITA, גיל: 14

הי, אני Nivedita, כינוי הגוף שלי הם היא/שלה/שלהן, ואני נרגשת להתחיל את השנה הזו! קצת עליי – בזמני הפנוי נהנית לצייר ולהאזין למוזיקה (פֶּרְנֶק אֹנְשֶן הוא האהוב עליי 😊). אני אוהבת לבלות עם חברים, והמקצוע האהוב עליי הוא כימיה!

SHREEYA, גיל: 11

הי, קוראים לי Shreeya. אני גרה עם הוריי ואחותי. בזמני הפנוי אני אוהבת לצאת להליכות עם חברים; לשחק משחקי קופסה ולהתאמן בקֶרְטָה. בעיצומה של מגפת הקורונה שמרתי על עצמי עסוקה על ידי ניהול שיחות עם חברים; קריאת ספרי הארי פוטר, וסיום הֶרְכָּבַת פאזל תלת-ממדי של הֶגְוֶרְטס (בית הספר לכישוף ולקוסמות בסדרת הארי פוטר).

SHRIYA, גיל: 13

הי, קוראים לי Shriya, גרה בארצות הברית. אני לומדת בכיתה ח, והמקצועות האהובים עליי הם מדע ומתמטיקה. בזמני הפנוי, אני אוהבת לרקוד ולעסוק באומנות. לאחרונה התחלתי לסקור במסגרת פרונטירז – מדע לצעירים, ואני נרגשת מאוד להמשיך בכך!



הכותבים

ALINE LACAZE

למדתי לתואר שני בגנטיקה של צמחים בצרפת, וכיום אני לומדת לדוקטורט באוניברסיטת מונקטון, ניו ברנזוויק, קנדה. המחקר שלי מתמקד במחלת כְּמִשּׁוֹן תפוחי האדמה שמשפיעה על צמחי תפוחי אדמה. בעתיד, ארצה להשתתף בפעילויות נוספות שמנגישות מדע. [*aline.lacaze@hotmail.fr](mailto:aline.lacaze@hotmail.fr)

ANTOINE ZBORALSKI

אני דוקטורנט באוניברסיטת מונקטון, ניו ברנזוויק, קנדה. חוקר אינטראקציות מיקרואורגניזמים-צמחים תת-קרעיות לשיפור בריאות הצמח. מטרת המחקר, בין השאר, היא לגרום לאופן שבו אנו מגדלים את מזוננו להיות בר-קיימה יותר. אני מנסה להנגיש את מחקרי כדי שאנשים יבינו מדע טוב יותר. כמו כן אני פעיל סביבתי שמעורב בקהילה המקומית מתוך מטרה להפחית את טביעת הרגל האקולוגית שלנו.

DAVID L. JOLY

אני פרופסור חבר באוניברסיטת מונקטון, ניו ברנזוויק, קנדה. במסגרת המחקר שעורכת קבוצתי אנו עוסקים בצמחים ובמיקרואורגניזמים שקשורים אליהם, ומשתמשים בכלים של ביולוגיה מולקולרית וִגְנוֹמִיקָה במטרה להבין את האינטראקציות בין האורגניזמים האלה.



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