



פטריות זעירות באדמה הן כמו תרופה לטבע

Lena Neuenkamp^{1*}, Nadia I. Maaroufi^{1,2}

¹המכון למדעי הצמח, אוניברסיטת ברן, ברן, שווייץ
²המחלקה למיקולוגיית יער ופתולוגיה של הצמח, ביו-סנטר, האוניברסיטה השוודית למדעי החקלאות (SLU), אופסלה, שוודיה

סוקרים צעירים

JOVENA
גיל: 9



KAVIN
גיל: 9



TANISHKAA
גיל: 8



THUVISHA
גיל: 13



VETRIVEL
גיל: 12



YUTHIGA
גיל: 8



בדומה לבני אדם, למיני צמחים וחיות יש סוג מסוים של מקום שבו הם מעדיפים לחיות, שנקרא מערכת אקולוגית. אם המערכת האקולוגית משתנה יותר מדי, חלק מהמינים ייעלמו, ממש באותו האופן שאנשים נמנעים מלחיות במדבר מאחר שהוא חם ויבש מדי. בני אדם משנים מערכות אקולוגיות רבות, לעיתים באופן חמור כל כך שכמעט אף צמח או חיה כבר לא יכולים לחיות בהן. כדי לסייע למערכות אקולוגיות שניזקו להשתקם, לעיתים קרובות אנו מתחילים בשתילת עצים או צמחים. ביולוגים מצאו שפטריות מיקוריזָה, פטריות זעירות שחיות באדמה ובתוך שורשי צמחים, יכולות להאיץ שיקום של מערכת אקולוגית על ידי כך שהן גורמות לצמחים לגדול מהר יותר ולהיות חזקים יותר. במאמר זה, נתאר כיצד השיקום של מערכות אקולוגיות מועצם על ידי פטריות מיקוריזָה, ומתי פטריות אלה מועילות במיוחד.

מערכות אקולוגיות מופרעות זקוקות לעזרתנו

מערכות אקולוגיות טבעיות, כמו למשל יערות, אדמות דשא, או ביצות, מבצעות תפקודים רבים ומהוות בתים לצמחים מקומיים, לחיות ולמיקרואורגניזמים זעירים באדמה. חלק

מערכת אקולוגית (Ecosystem)

סביבה שמאכלסת על ידי אורגניזמים שונים שחיים יחד ומתקשרים זה עם זה.

מערכת אקולוגית מופרעת (Degraded Ecosystem)

מערכת אקולוגית שניזוקה או נהרסה, מה שמשפיע באופן שלילי על האורגניזמים שחיים בה, ומחבל בתפקודה.

אקולוג (Ecologist)

מדען שחוקר כיצד מערכות אקולוגיות מתפקדות, וכיצד האורגניזמים במערכת האקולוגית מתקשרים זה עם זה ועם הסביבה.

מפרקים (Decomposers)

אורגניזמים שניזונים מחומר צמחי מת ומבעלי חיים מתים, ועל ידי כך מפרקים חומר זה לחומרי מזון שונים שהוא מורכב מהם עד שהוא נהפך שוב לאדמה. צמחים, בתורם, לוקחים את חומרי המזון באדמה ומשתמשים בהם כמזון. הרבה מהמפרקים הם פטריות.

פתוגנים/ פטוריות (Pathogens/ Pathogenic Fungi)

אורגניזמים שגורמים למחלות, לדוגמה פטרייה פתוגנית שגורמת לעלי צמחים להפוך לחומים ולא להיות מסוגלים לבצע פוטוסינתזה.

סימביוטים/ פטריות (Symbionts/ Symbiotic Fungi)

אורגניזמים שחיים יחד ומסייעים זה לזה. לדוגמה, פטריות סימביוטיות, כמו למשל פטריות מיקוריזה שחיות בשורשי הצמחים ומסייעות לצמחים בהטמעת חומרי מזון מהאדמה בתמורה לפחמן שמוצר על ידי הצמחים בתוך עליהם.

מהמערכות האקולוגיות גם מסננות ומאחסנות מים, שומרות על עודף של פחמן דו-חמצני מחוץ לאטמוספירה ומשמרות שכבת אדמה בריאה במקום שבו צמחים יכולים לגדול ולייצר פירות וירקות כמזון עבורנו. מערכות אקולוגיות מספקות את התפקודים האלה אם הן בריאות ושלמות, אך לעיתים הן מופרעות ומפסיקות לתפקד בצורה טובה. דוגמאות להפרעות כוללות שריפות, הצפות, או קריסת עצים אחרי סופות. למרבה המזל, מערכות אקולוגיות בריאות יכולות בדרך כלל להתאושש בקלות מההפרעות האלה. אך אם ההפרעות מתרחשות לעיתים קרובות לאורך תקופה ארוכה, או אם הן נעשות אינטנסיביות, למערכות האקולוגיות קשה יותר להתאושש, והן עלולות להשתנות. לדוגמה, יער עשוי להיפך לאדמת דשא לאחר שסופה עוצמתית הפילה את כל העצים. כדוגמה אחרת, לאחר תקופה ארוכה של בצורת, צמחים עשויים להתקשות לגדול חזרה אפילו כאשר מים זמינים שוב. אם בעקבות ההפרעות מערכות אקולוגיות משתנות, נעשות פחות מורכבות ומכילות פחות מינים שחיים בהן, אנו מכנים אותן **מערכות אקולוגיות מופרעות**.

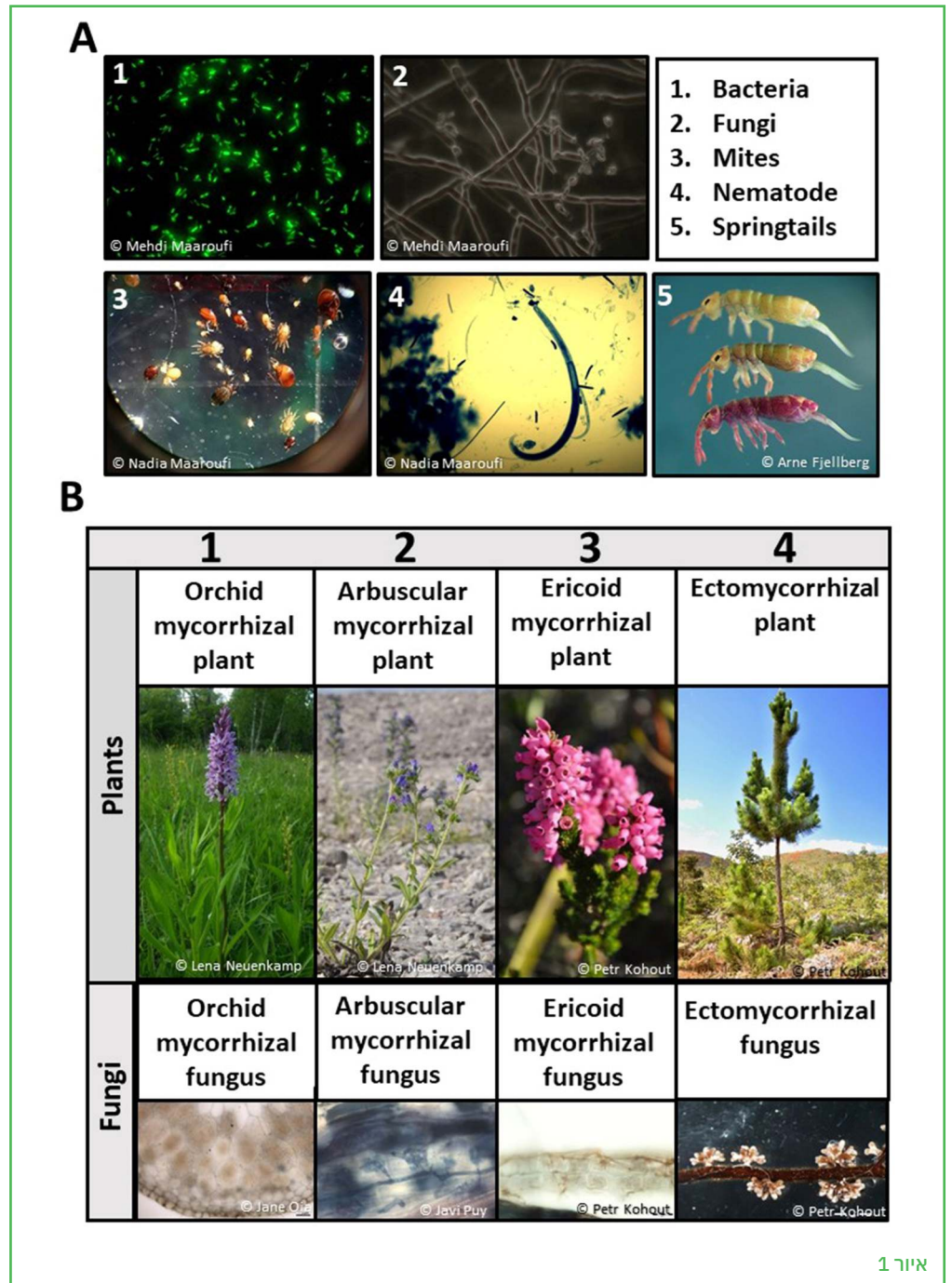
בני אדם משתמשים במערכות אקולוגיות למטרות שונות: ליצור מרחב לערים; לייצר מזון בשדות חקלאיים; או לחצוב אבנים, חול, או מתכות לבנייה ולתעשייה. לעיתים קרובות הפעילויות האנושיות האלה מפריעות למערכות אקולוגיות באופן חמור וממושך כל כך, עד שהמערכות האקולוגיות נדחקות מעבר לקצה, עד למקום שממנו הן לא יכולות להשתקם ללא סיוע. **אקולוגים**, שהם מדענים שחוקרים כיצד מערכות אקולוגיות מתפקדות ויכולות להוות בית למינים רבים, יכולים לסייע לשקם מערכות אקולוגיות מופרעות, ולעזור להשיב את בריאותן ואת תפקודיהן. כשאקולוגים משקמים מערכות אקולוגיות, הם עשויים לנטוע עצים כדי לסייע ליער להשתקם אחרי שעצים נכרתו לייצור מוצרי עץ, או לזרוע זרעים במטרה לסייע לאדמות דשא להשתקם לאחר שהן שימשו בתור שדות חקלאיים. אפילו עם העזרה הזו, לעיתים צמחים חדשים לא גדלים טוב, או שאחרי השיקום המערכת האקולוגית נראית שונה לעומת איך שהייתה לפני ההפרעה. מדוע לעיתים שיקום לא פועל טוב כמו בפעמים אחרות? לאחרונה, אקולוגים התחילו להבין ששיקום מוצלח של מערכת אקולוגית צריך לדאוג הן לצמחים ולחיות שמעל לאדמה הן לאורגניזמים שחיים מתחתיה.

מדוע היצורים הקטנים שחיים באדמה חשובים כל כך?

מאחר שצמחים לא יכולים לנוע, הם משתמשים בשורשיהם כדי לחפש חומרי מזון ומים באדמה. האדמה היא חלק חשוב מהמערכת האקולוגית, והיא סביבת המחיה של הרבה יצורים קטנים [1]. בכפית אחת של אדמה יש יותר אורגניזמים מכמות האנשים שנמצאים על כדור הארץ = בסביבות 7.5 מיליארד [2] (איור 1A)! היצורים הקטנים האלה מתקשרים זה עם זה ותורמים לתפקוד של המערכת האקולוגית, כך שכלל הנראה הבריאות של האורגניזמים שנמצאים באדמה חשובה לשיקום המערכת האקולוגית. האורגניזמים השכיחים ביותר באדמה הם חיידקים ופטריות. חלק מהם, שנקראים **מפרקים**, ניזונים מצמחים מתים ומסייעים לפרק את החומר הצמחי עד שהוא נהפך שוב לאדמה [3]. חלק מהאורגניזמים באדמה, שנקראים **פתוגנים**, יכולים לתקוף שורשי צמחים ולגרום לצמחים לחלות. אורגניזמים אחרים באדמה, שנקראים **סימביוטים**, משתפים פעולה עם צמחים על ידי החלפת חומרי מזון איתם. **פטריות מיקוריזה** הן קבוצה אחת של סימביוטים שחוקרים מאמינים כי היא מסייעת לשיקום של מערכת אקולוגית [4, 5] (איור 1B).

איור 1

היצורים הקטנים שמאכלסים את האדמה. (A) תמונות מיקרוסקופ של חיידקים, פטריות, קרדיות, נמטודות וקפזנבאים. נמטודות הן תולעים עגולות קטנות, קרדיות נראות קצת כמו עכבישים קטנים וקפזנבאים הם חרקים קטנים שלעיתים יכולים לקפוץ (קרדיטים). לתמונות: Mehdi Maaroufi, Nadia I. Maaroufi (B). (Arne Fjellberg ו-Nadia Maaroufi) תמונות סוגים שונים של פטריות מיקוריזה והצמחים המארחים שלהן. (1) סחלב ופטריות מיקוריזה של הסחלב בתוך שורשי הצמח. (2) פטריות מיקוריזה ארבוסקולרית בתוך צמח עכנאי מצוי. (3) צמח אברש ופטריות מיקוריזה אריקואידיות בתוך שורשי הצמח. (4) עץ אורן ופטריות אקטו-מיקוריזה על פני השטח של שורש הצמח (קרדיטים לתמונות: Lena Neuenkamp, Jane Oja, Petr Kohout, Javi Puy).



איור 1

פטריית מיקוריזה – כמו תרופות חזקות לצמחים

פטריית מיקוריזה יכולות לעזור לשורשי צמחים לאסוף יותר חומרי מזון ומים מהאדמה, ובכך לסייע לצמחים לגדול טוב יותר. אם כן, נקרא להן מעתה פטריות סייעות. פטריות סייעות אלה יכולות גם להגן על צמחים כנגד פתוגנים שעשויים לגרום למחלות צמחים! בתמורה לתועלות שפטריית סייעות מספקות, צמחים נותנים לפטריות סייעות חלק מהפחמן שלהם – חומר מזון שצמחים מייצרים בסיוע של אור במהלך פוטוסינתזה. שיתוף פעולה בין צמחים לפטריות הוא מצב שבו שני הצדדים מרוויחים, שמקרא סימביוזה. אקולוגים בחנו את ההשפעות של פטריות סייעות על סיוע לשיקום מערכת אקולוגית (איור 2).

פטריית מיקוריזה (Mycorrhizal Fungi)

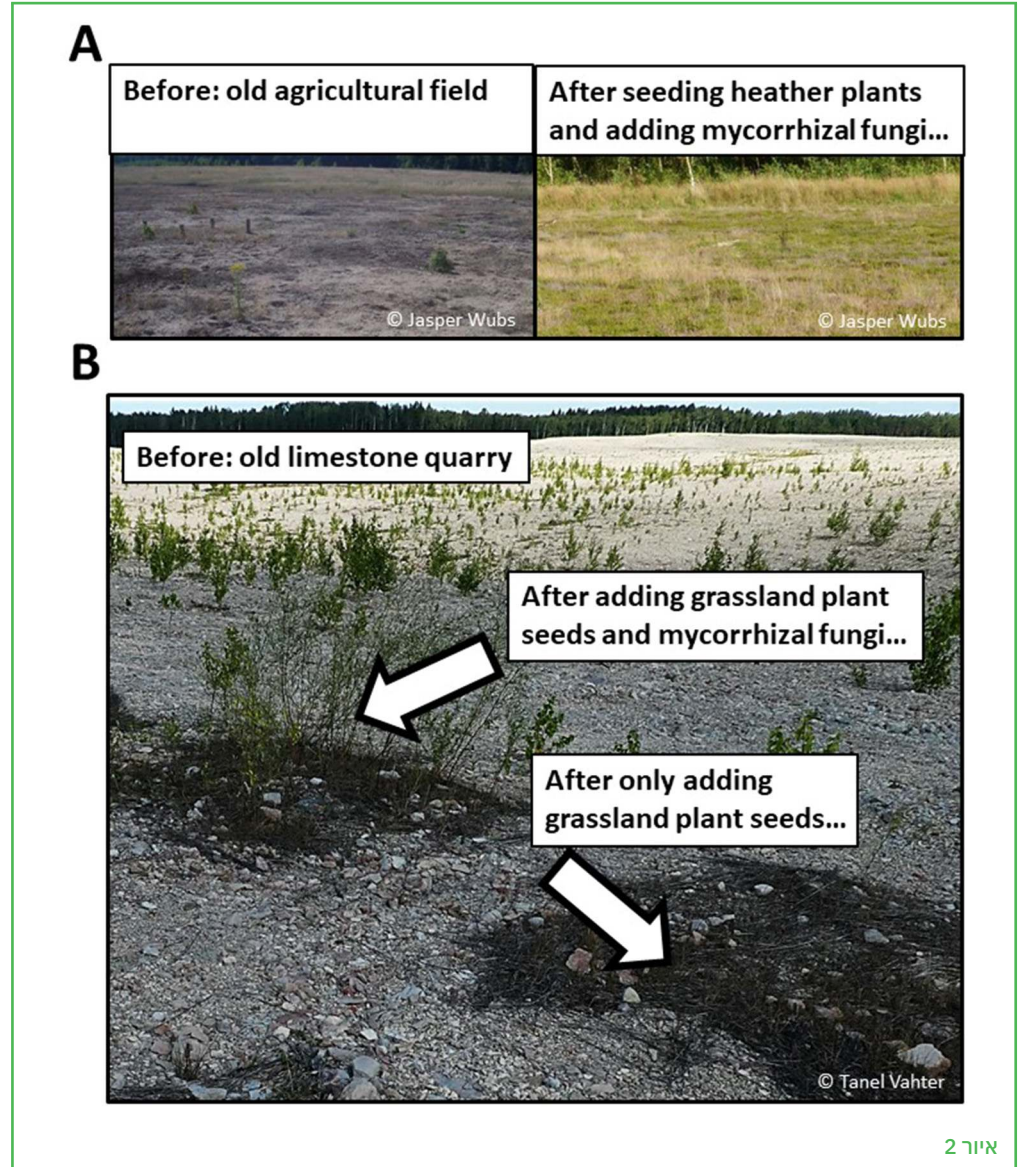
קבוצת פטריות שחיות באדמה ובשורשי צמחים. פטריות מיקוריזה מסייעות לצמחים בהטמעת חומרי מזון ועמידתם כנגד בצורת או מחלה שנגרמות על ידי פטריות אחרות, ובתמורה הן מקבלות מזון מהצמחים.

אינקולציית אדמה (Soil Inoculation)

הוספת אורגניזמים של אדמה (למשל, פטריות מיקוריזה או חיידקים) לאדמה במטרה לגרום לצמחים לגדול מהר יותר.

איור 2

דוגמאות לתוצאות של פרויקטי שיקום מערכות אקולוגיות באמצעות פטריות מיקוריזה. (A) שיקום אדמת בור בהולנד – במטרה לבסס מחדש את אדמת הבור בשדה חקלאי עתיק, בסיוע של צמחי אֶבְרֶש ופטריות מיקוריזה אריקואידית. (B) שיקום של מחצבת אבן סיד באסטוניה – במטרה להאיץ את גדילת הצמחים המחודשת במחצבת אבן סיד, נטושה, בסיוע של זרעי דשא, חציר ופטריות מיקוריזה ארבוסקולרית (קרדיטים, לתמונות: Jasper Wubs, Tanel Vahter).



כוחן המגוון של פטריות סייעות

בין פטריות סייעות לבין צמחים מתקיימים סוגים שונים של שיתופי פעולה, כתלות באילו מיני פטריות הכי שכיחים במערכת אקולוגית מסוימת (איור 1B). צמחים ופטריות סייעות שונים במתי וכמה הם זקוקים זה לזה, ובאיזו מידת הוגנות הם מחליפים משאבים ונתרמים זה מזה. אם כן, שיקום של מערכות אקולוגיות עם צמחים שתלויים מאוד בפטריות סייעות עשוי להזדקק לפטריות מיקוריזה בתור תרופה, יותר ממערכות אקולוגיות אחרות שבהן צמחים עצמאיים יותר ביחס לפטריות הסייעות [5]. כאשר מדענים התבוננו בכל ניסויי שיקום

המערכות האקולוגיות שהשתמשו בפטריות סייעות, הם מצאו שהתועלות של הוספת פטריות סייעות השתנו בין מחקרים שונים [4]. פטריות סייעות הן תרופה טובה עבור צמחים, אך התשובה לשאלה מתי הן הכי מועילות תלויה בצמחים ובמערכת האקולוגית.

המדענים הסיקו שפטריות סייעות היו הכי מועילות בשלושת התנאים האלה:

- עבור צמחים שמספקים מחסה לחיידקים בשורשיהם, מה שהופך את הצמחים לרעבים מספיק בשביל שניים – עבור עצמם ועבור החיידקים (כמו צמחי אפונה ושעועית);
- עבור צמחים שמתקשים למצוא חומרי מזון מאחר ששורשיהם גדולים מדי מכדי להגיע לנקבוביות קטנות באדמה, שם נמצאים חומרי מזון רבים (כמו דשאים קטנים);
- עבור צמחים שגדלים על אדמות שהן גם מופרעות באופן חמור, וגם דלות בחומרי מזון.

רוצים לסייע לצמחי הבית שלכם?

לכ-80% מכל הצמחים – אפילו הצמחים שנמצאים בעציצים בביתכם – יש סימביוזה עם סוג אחד של פטריות סייעות, שנקרא פטריות מיקוריזה ארבוסקולרית. תוכלו לשמור על הצמחים שלכם בריאים על ידי יצירת תרכיב משלכם של פטריות מיקוריזה ארבוסקולרית (איור 3). גננים רבים כבר עושים זאת! תצטרכו את חפירה, דלי של 10 ליטר לערבוב האדמה, 3-5 ליטרים של חול, זרעים של דשא וצמחי תלתן, ו-4-6 עציצים.

הצעדים:

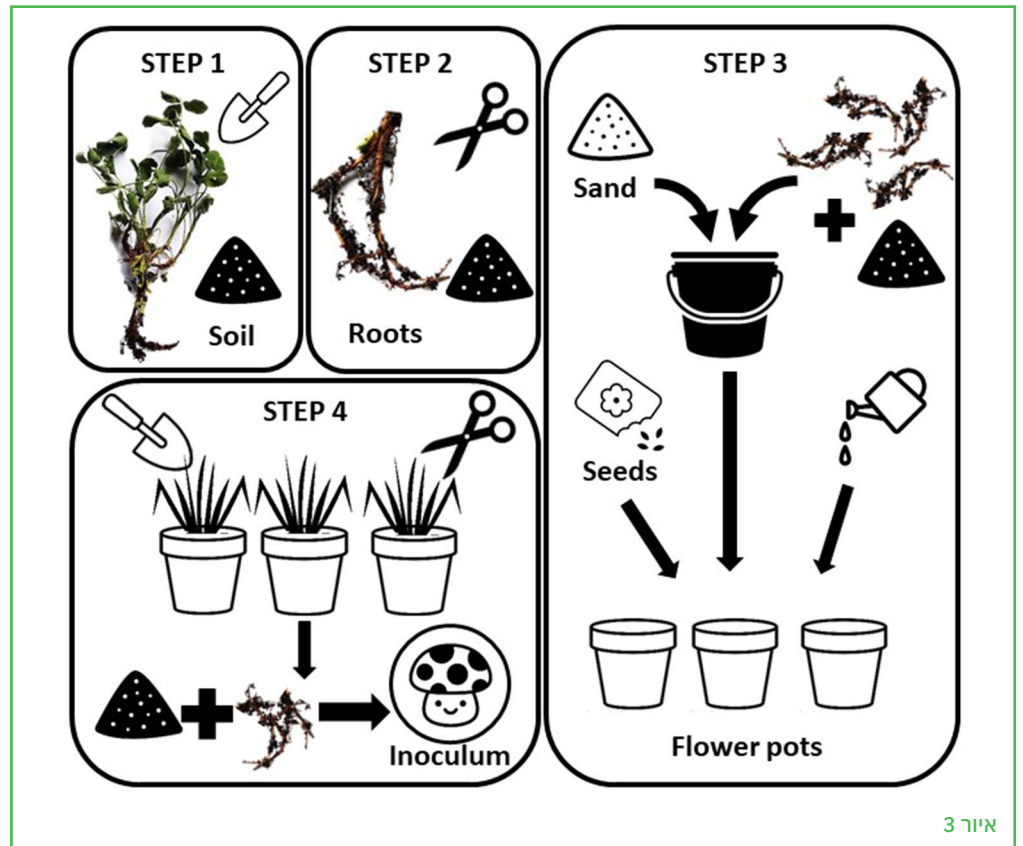
- **בחירת צמחים:** בחרו צמח אחד או שניים מגינתכם שיוצר סימביוזה עם מיקוריזה ארבוסקולרית (דשא או צמח תלתן), ושלפו אותם החוצה עם כמות נאה של אדמה שנמצאת סביב לשורשים.
- **תרכיב המקור:** הסירו עלים וגבעולים משני הצמחים, חתכו את שורשיהם לפיסות קטנות וערבבו היטב גם את כל השורשים והאדמה. זהו תרכיב המקור שלכם, שאותו נכפיל כך שלא נצטרך לעקור יותר מדי צמחי גינה כדי ליצור את התרכיב.
- **הכפלת תרכיב:** ערבבו את תרכיב המקור עם חול (חלק אחד של תרכיב עם חלק אחד של חול, או אפילו חלק אחד של תרכיב עם שני חלקים של חול) ושימו אותו בתוך עציצי הפרחים. הוסיפו את שורשי הדשא והתלתן לעציצים, השקו אותם, ותנו להם לגדול במשך חודשיים-ארבעה חודשים. המינים ששתלתם נקראים **צמחי פתיון** מאחר שהם מושכים פטריות מיקוריזה ארבוסקולרית. כאשר צמחי הפתיון מתחילים לגדול, פטריות המיקוריזה הארבוסקולרית יאכלסו את שורשיהם ואוכלוסיית הפטריות תגדל. ככל שהצמחים גדלים ארוכים יותר, כך יהיו באדמה יותר פטריות.
- **קציר התרכיב:** אחרי בין חודשיים לארבעה חודשים, הסירו את כל העלים מצמחי הפתיון, חתכו את שורשיהם לפיסות קטנות וערבבו אותם עם האדמה. כעת התרכיב מוכן ואפשר להוסיפו בכמויות קטנות לצמחי העציצים שלכם – יבש או מעורבב במים.

צמחי פתיון (Bait Plants)

צמחים שמשמשים כפתיון למשיכת פטריות מיקוריזה לשורשיהן, שם פטריות אלה מתרבות וגדלות. החומר הפטרייתי המוכפל בשורשים ובאדמה הסובבים יכול לשמש לייצור תרכיב פטרייתי.

איור 3

תרכיב "עשו זאת בעצמכם" של מיקוריזה. הצעדים החשובים ביותר לייצור תרכיב (בהתבסס על ההוראות המפורטות בקישור הזה: [https://orgprints.org/35308/1/symanczik-et-al-2018-Mycorrhizal-fungi-as-natural-biofertilizer_\(technical_note.pdf](https://orgprints.org/35308/1/symanczik-et-al-2018-Mycorrhizal-fungi-as-natural-biofertilizer_(technical_note.pdf)



איור 3

סיכום

פעילויות אנושיות יכולות להפריע למערכות אקולוגיות בצורה חמורה כל כך שמערכות אלה יהיו זקוקות לסיוע כדי להשתקם. פטריות מיקוריזה הן פטריות סייעות עבור צמחים שיכולות לתמוך בשיקום של מערכת אקולוגית, מאחר שהן מסוגלות להגדיל את כמות חומרי המזון שהצמחים צורכים, ולהגן על צמחים כנגד מחלות או בצורת. ישנם סוגים שונים של פטריות סייעות עם תכונות שונות, והתשובות לשאלות אילו פטריות סייעות הן הכי חזקות עבור שיקום מערכת אקולוגית ומתי, תלויות בצמחים ובמערכת האקולוגית.

תרומת המחברת

NM ו-LN הגו את הרעיון המקורי וכתבו את הטייטה הראשונה של כתב היד. שתי הכותבות נתנו אישור סופי להגשה.

מקורות

1. Maaroufi, N. I., and De Long, J. R. 2020. Global change impacts on forest soils: linkage between soil biota and carbon-nitrogen-phosphorus stoichiometry. *Front. For. Glob. Change* 3:16. doi: 10.3389/ffgc.2020.00016
2. Available online at: <http://www.soil-net.com/> (accessed November 06, 2020).

3. Maaroufi, N. I., Nordin, A., Palmqvist, K., Hasselquist, N. J., Forsmark, B., Rosentstock, N. P., et al. 2019. Anthropogenic nitrogen enrichment enhances soil carbon accumulation by impacting saprotrophs rather than ectomycorrhizal fungal activity. *Glob. Change Biol.* 25:2900–14. doi: 10.1111/gcb.14722
4. Neuenkamp, L., Prober, S. M., Price, J. N., Zobel, M., and Standish, R. J. 2019. Benefits of mycorrhizal inoculation to ecological restoration depend on plant functional type, restoration context and time. *Fungal Ecol.* 40:140–9. doi: 10.1016/j.funeco.2018.05.004
5. Neuenkamp, L., Moora, M., Öpik, M., Davison, J., Gerz, M., Männistö, M., et al. 2018. The role of mycorrhizal type and status in modulating the relationship between plant and arbuscular mycorrhizal fungal communities. *New Phytol.* 220:1236–47. doi: 10.1111/nph.14995

פורסם אונליין: 30 במרץ 2023

עורכת: Helen Phillips

הנחיה מדעית: Vinuselvi Parisutham

ציטוט: Neuenkamp L and Maaroufi NI (2023) פטריות זעירות באדמה הן כמו תרופה לטבע. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2020.557383-he

Neuenkamp L and Maaroufi NI (2020) Tiny Fungi in the Soil Are Like **מ: תורגם והותאם** Medicine for Nature. *Front. Young Minds* 8:557383. doi: 10.3389/frym.2020.557383

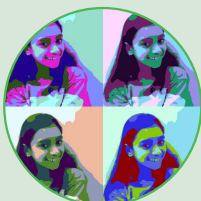
הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2020 © Neuenkamp and Maaroufi 2023. 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 (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.

סוקרים צעירים

JOVENA, גיל: 9

אני אוהבת מאוד לקרוא. בדרך כלל אני קוראת ספרי פנטזיה כמו סדרת הארי פוטר, שאותה אני הכי אוהבת לקרוא, אבל גם ספרי מסתורין. אני אוהבת חיות, לשחק רובלוקס, לשחק עם חברים ולרכוב על סקייטבורד. החלום שלי הוא להיות סקייטריטית מקצועית.



**KAVIN, גיל: 9**

מדע הוא חשוב ומעניין.

**TANISHKAA, גיל: 8**

מילדותי התעניינתי בלמידת מדע, ואני רוצה לחקור כל חלק בו מאחר שהוא מעניין מאוד. החלק האהוב עליי ביותר במדע הוא למידה על גוף האדם. אני רוצה שמדע ילווה אותי כחלק מחיי.

**THUVISHA, גיל: 13**

אני אוהבת מדע מאחר שהוא משהו חדש שגורם לנו לגלות הרבה דברים שקשורים לחיי היומיום שלנו. זה תמיד מעניין. אנו זקוקים למדע בעולמנו.

**VETRIVEL, גיל: 12**

אני אוהב להכין מטוסים מנייר ולערוך ניסויים פשוטים. אני אוהב ללמוד על מדע ולחקור עוד ועוד רעיונות.

**YUTHIGA, גיל: 8**

אני מתעניינת בציור ובמשחק שחמט. בטורניר שחמט מחוזי זכיתי במקום השלישי וקיבלתי גביע. המקצועות האהובים עליי הם אנגלית, מדע ומתמטיקה. אני מבלה את חופשותי בחקירת דברים חדשים.

הכתבות**LENA NEUENKAMP**

אני אקולוגית של הצמח. התחלתי לחקור את האדמה מאחר שהיא יכולה לסייע לי להבין צמחים. לאחר מכן התחלתי להתעניין בפטריות מיקוריזה ובאופן שבו הן מתקשרות עם שורשי צמחים. אני עובדת כחוקרת באוניברסיטת ברן בשווייץ, ומתעניינת בהבנת האופן שבו הפרעות אנושיות ושינויי אקלים משפיעים על צמחים ועל המערכת האקולוגית באדמה, כמו גם על האינטראקציות בין צמחים לבין אורגניזמים באדמה. אני רוצה להשתמש בידע הזה במטרה לחזות באיזו מידה מערכות אקולוגיות יכולות לתפקד ולספק שירותים לבני אדם, אל מול ההפרעות האנושיות ושינויי האקלים הנוכחיים.

* lenna.neuenkamp@ips.unibe.ch



**NADIA I. MAAROUFI**

אני אקולוגית של האדמה שמתעניינת ביצורים קטנים שמאכלסים את האדמה. אני עובדת באוניברסיטת ברן בשווייץ ובאוניברסיטה השוודית למדעי החקלאות, אופסלה, שוודיה. אני מתעניינת במיוחד בהבנת האופן שבו אורגניזמים באדמה מושפעים על ידי בני אדם והפרעות טבעיות, וכיצד ההפרעות האלה משפיעות על תפקוד של מערכות אקולוגיות ביערות ובאדמות דשא.

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