



יחסי הגומלין בין עצים ופטריות בתקופה של שינויי אקלים

Alon Rapaport* | Tamir Klein

המחלקה למדעי הצמח והסביבה, מכון ויצמן למדע, רחובות, ישראל

סוקרים צעירים

ULPANIT
BAR-ILAN,
NETANYA

גיל: 13-14



פטריות יכולות לחיות בשיתוף פעולה עם עצים, ולכן הן תְּבָרוֹת חשובות ביער. לאחרונה התגלה כי הן מאפשרות מְעַבְר חומרים פְּחָמָנִים בין עצים ביער. עד כה, לא היה ידוע אם החומרים משותפים באופן שוויוני בין עצי יער ממינים שונים. במחקר שנערך במעבדתנו בדקנו מעבֵר פחמן (C) בין עצים במערכת מיקרוקוסמוס שִׁמְדָמָה את הסביבה הטבעית ביער. העצים נשתלו בְּמָקְלִים גדולים עם אדמת יער המכילה את הפטריות הטבעיות שלהם. נמצא כי מתקיים מעבֵר בלתי שוויוני בין עצים ממינים שונים: ישנם עצים שתורמים יותר פחמן לעצים סביבם מאשר מקבלים פחמן, כמו עץ האלון, ולהפך, כמו עץ הָאֵלָה. שינויי האקלים צפויים להגביר את קשיי ההישרדות של עצים ברחבי העולם. בעולם חם יובש, חילופי פחמן בין עצי יער יכולים לאפשר שיתוף משאבים מוגבר-מנגנון חיוני שעשוי לתרום לחוסן יערות.

שיתוף פעולה בין עצים ופטריות

לרוב, כשאנו חושבים על פטריות, הדבר הראשון שעולה לראש הוא החֶלֶק העל-אדמתי שלהן המורכב מגופי הפרי של הפטריות, שבהם אנו משתמשים לבישול ולאפייה. אולם

הלכה למעשה את מרבית גוף הפטרייה איננו רואים. הוא נמצא מתחת לאדמה ומורכב מקורים דקים ולבנים הפרושים לאורך מְטָרִים ואף קילומטרים רבים באדמת היער, ומכונים תְּפִטִיר (איור 1). דרך התפטיר עוברים מגוון חומרים בין חלקי הפטרייה. סוגים שונים של פטריות ממלאים תפקידים שונים, וניזונים במגוון דרכים. סוג אחד של פטריות, כמו פטריית האסימונית, ניזון מחומר צמחי מת ומסייע בפירוק שאריות צמחים באדמת היער, וסילוקן.



איור 1

תפטיר (Hypha)

גוף הפטרייה. עשוי קורים דקים רבים, ובעל שטח פנים גדול המאפשר קליטת מינרלים מהסביבה.

איור 1

עציץ אורן עם תפטיר של פטריות מיקוריזה (מניסוי אחר). החלק העליון באדמת העציץ, בצבע לבן, הם הקורים שמרכיבים את תפטיר הפטריות, המצטברים סביב שורשי האורן. בחלק התחתון של העציץ ניתן לראות את שורשי העץ. האיור נלקח מהחומרים המשלימים (Supplementary) ממאמר [1].

שתפניות

(Mycorrhizal fungi)

סוג של פטריות המחוברות לצמחים ומשתפות פעולה איתם. הפטריות נהנות מהפחמימות שהן מקבלות מהצמחים, והצמחים נהנים משטח פנים מוגדל לקליטת מים ומינרלים.

סימביוזה

(Symbiosis)

שותפות בין אורגניזמים. סוג קשר שבו שני הצדדים המעורבים מרוויחים.

סוג אחר של פטריות יכול לשתף פעולה עם צמחים ולהיות מוֹזֵן מהם, והוא מכונה פטריות מיקוריזה, ובעברית שְׁתִּפְנִיּוֹת. פטריות אלה מתחברות לשורשים של צמחים שונים, ונקשרות אליהם. הצמח מעביר לפטרייה מזון בצורת חומרים שמכילים פחמן, ובתמורה הפטרייה מעבירה לצמח מינרלים מהקרקע, שחיוניים עבורו. כמו כן, הפטרייה מאפשרת קליטה משופרת של מים ששורש הצמח אינו מצליח להגיע אליהם, דרך קורי הפטרייה. הקֶשֶׁר בין הפטריות לעצים, שבמסגרתו שני הצדדים מרוויחים, מכונה סִמְבִּיּוֹזָה (צִוְתָאוֹת). כל עץ יכול להתחבר לכמה פטריות ממינים שונים, וכל פטרייה יכולה להתחבר לכמה עצים ממינים שונים. באופן זה הפטריות יוצרות רשת שמאפשרת מעבר חומרים בין העצים.

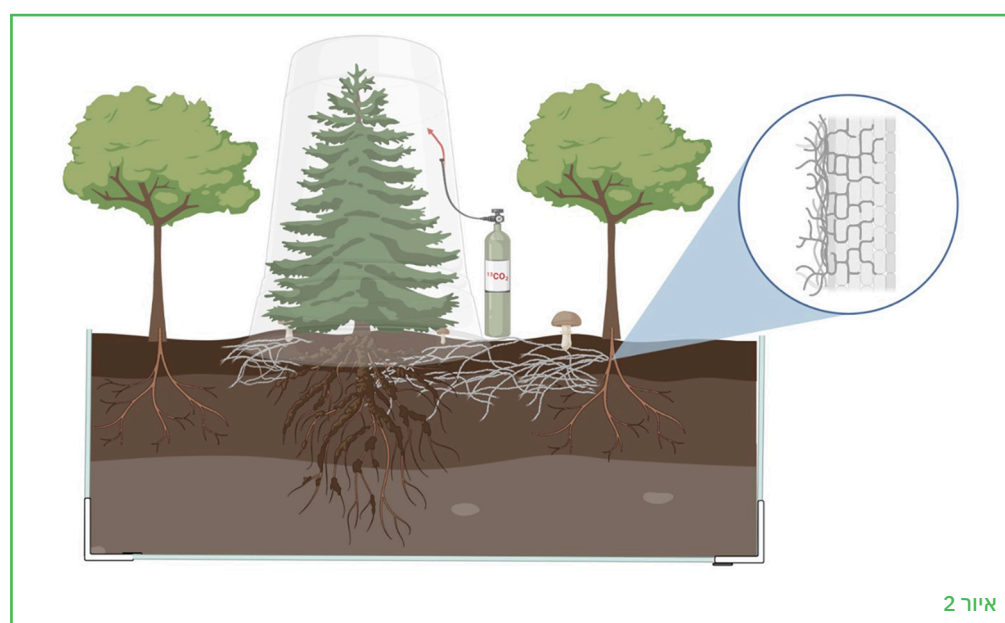
מְעַבֵּר פחמן בין עצים

בשנת 1997 היחסים בין פטריות לעצים נבחנו מחדש. זאת כשפרופסור סוזן סימֶרְד, מהמחלקה למדעי היער והשימור באוניברסיטת קולומביה הבריטית, קנדה, גילתה כי עצים צעירים בעיר יכולים להעביר ביניהם פחמן [2]. כלומר, פחמן אינו עובר רק לפטרייה הסמוכה לעץ אלא גם לעצים הסמוכים. שיערו כי המעבר מתרחש דרך הפטריות שמחוברות לעצים השונים בעיר. ואכן, מחקרים הראו כי ככל שישנן יותר פטריות משותפות בין מיני עצים שונים, כך העברת הפחמן בין העצים גדולה יותר [3]. עוד הצביעו המחקרים

על כך שמעבר הפחמן בין העצים מתרחש הן בעצים בוגרים ביער צפוני (Boreal) הן ביערות אקלים ממוזג (Temperate) [4].

איך עוקבים אחר חומרים שעוברים בין עצים?

במטרה לבדוק אם חומרים עוברים בצורה שוויונית בין עצים ממינים שונים, קבוצת חוקרים ממכון ויצמן למדע גידלו עצים צעירים ממינים ים-תיכוניים. עצים אלה גדלים בדרך כלל באותה סביבה, ועימם נמנו בניסוי עצי אורן, אלון, ברוש, חרוב ואֶלֶת המסטיק. המכלים שבהם העצים גדלו שימשו כמיקרוֹקוֹסְמוֹס שֶהִדְמָה יער ים-תיכוני עם מינים מקומיים. בכל אחד מהמכלים שתלו החוקרים הרפכים שונים של המינים, כך שבכל מכל עץ ממין אחר קיבל פחמן מסומן, ומיני העצים האחרים נשתלו לידו (איור 2).



מיקרוֹקוֹסְמוֹס (Microcosmos)

עולם קטן שמייצג עולם גדול יותר. בניסוי המתואר במאמר זה חוקרים השתמשו במיקרוֹקוֹסְמוֹס כדי להדמות במעבדה את הסביבה המקורית של הצמחים ביער.

איור 2

תיאור מערכת הניסוי שבה השתמשו החוקרים. המכל שבו השתמשו לניסוי מכיל עצים ים-תיכוניים ממינים שונים בהם האורן (במרכז) והאלון (בצדדים). אחד העצים מוקף שקית ומקבל פחמן דו-חמצני איזוטופי (ראו להלן). בקרקע פרוש גוף הפטריות, תפטיר, שמחובר לעצים השונים, ומחוץ לקרקע גדלים גופי הפרי של הפטרייה. בעיגול מימין מתואר תְּקָרִיב שבו גוף הפטרייה פרוש בין דפנות התאים של השורש. האיור נוצר באמצעות BioRender.com.

איזוטופ (Isotope)

אָטוֹם של יסוד בטבע הנבדל במספר הנויטרונים שלו, ולכן ניתן לאתר אותו בעקבות השוני במשקלו. למשל, פחמן שמשקלו שונה מהפחמן הנפוץ בטבע. מקובל להשתמש באיזוטופים למטרת מעקב אחר חומרים.

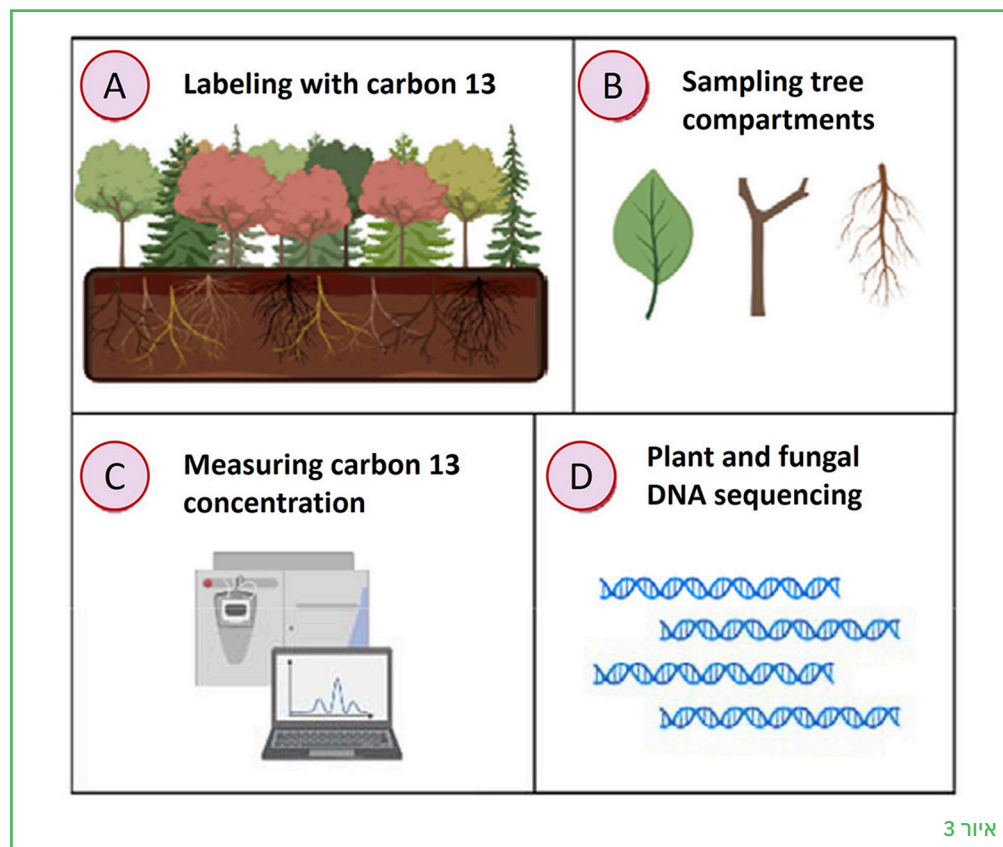
ריצוף דנ"א (DNA sequencing)

דנ"א הוא מערך הוראות ההפעלה של הגוף. מורכב מארבע 'אותיות' –בסיסים חנקניים החוזרים בצירופים שונים: A (אדנין), C (ציטוזין), G (גואנין) ו-T (תימין). קביעת סדר האותיות מכונה ריצוף, ומשמשת לזיהוי אורגניזמים.

במטרה לבדוק לאן החומרים עוברים החוקרים השתמשו בגז פחמן דו-חמצני (CO_2) עם פחמן איזוטופי, כאמצעי המאפשר לעקוב אחר הפחמן שניתן לעץ המסומן (איור 3). העצים קולטים את הפחמן דרך העלים, והופכים אותו לתרכובות כימיות שונות. לאחר מכן נבדק אם הפחמן מגיע לעצים סביבו. חלקים שונים של העצים כמו שורשים, ענפים ועלים נדגמו לאורך שמונה חודשים לאחר הסימון, בנקודות זמן שונות. החוקרים בדקו אם הפחמן שניתן לעץ המסומן הגיע לחלקים השונים של העצים סביבו. כדי לבחון אם רשת הפטריות יכולה להסביר את מעבר הפחמן בין העצים, החוקרים זיהו אילו פטריות נמצאות בשורשים של כל אחד ממיני העצים, זאת בעזרת ריצוף דנ"א של קצוות השורשים. בשלב הבא הם בדקו אם ישנן פטריות משותפות בין העצים שביניהם עבר הפחמן. נוסף על כך החוקרים ריצפו דנ"א של שורשי העץ במטרה לוודא כי הם לקחו ובחנו את השורש של העץ הנכון –משימה לא קלה כלל כשחופרים באדמה.

איור 3

תיאור שלבי הניסוי. (A) סימון עצים מסוימים עם פחמן איזוטופי (פחמן-13 או ^{13}C), ומעקב אחר מעבר הפחמן בעצים סמוכים. (B) דגימת חלקים שונים של העצים: שורשים ועלים. (C) מדידת הרכב הפחמן האיזוטופי ברקמות השונות כדי לבחון את מעבר החומרים בין העצים. (D) ריצוף דנ"א של צמחים ופטריית במטרה לזהות פטריות ושורשים שנלקחו. האיור לקוח ממאמר המקור.



איור 3

האם הפחמן עובר בין עצים באופן שוויוני?

כפי שחוקרים אחרים הראו בעבר, החוקרים בניסוי זה מצאו כי פחמן עבר בין עצים סמוכים. עץ אלה קיבל פחמן מעצי ברזל וחרוב. עץ אלון העביר פחמן לעץ אורן. עצי ברזל, חרוב ואורן העבירו פחמן לעצים שהיו מבני מינם. בדרך כלל הפחמן עבר בין עצים שחלקם פטרייה משותפת עם העץ שסומן. נמצא כי ברוב המקרים הדמיון בין מיני הפטרייה שהיו מחוברים לשורשי העצים השפיע יותר על העברת הפחמן מאשר הקרבה הגנטית בין מיני העצים.

החוקרים גילו כי הפחמן עובר בצורה לא שוויונית. כלומר, חלק מהמינים, כמו הברזל והחרוב, לרוב מקבלים יותר פחמן מאשר תורמים, ולהפך: מינים אחרים, כמו האלון, בעיקר תורמים פחמן לעצים אחרים, ואינם מקבלים פחמן מהעצים סביבם. בניסוי הבחינו החוקרים כי ישנה כמות גדולה של פחמן מסומן בשורש של עץ האלון. כלומר, חלק גדול מהפחמן שהעץ קלט דרך העלים הגיע לשורשים, בהשוואה למיני העצים האחרים. החוקרים משערים כי ייתכן שמעבר הפחמן תלוי בהפרש ריכוזי הפחמן בין שורשי העצים. זה יכול להסביר למה עץ עם ריכוז פחמן גבוה, כמו האלון, מעביר פחמן לעצים אחרים בעלי ריכוז פחמן נמוך יותר. עם זה יש לזכור כי הניסוי נערך בקנה מידה קטן, תוך שימוש במספר נמוך של דוגמאות ובכמות קטנה של פחמן מסומן. בניסויים אחרים שנערכו בעזרת מודל ממוחשב מתקדם, החוקרים גילו כי בין 4 ל-29 אחוזים מהפחמן בשורשי העצים סביב לעץ מסומן הגיעו מהעץ עצמו. דרך אפשרית נוספת למעבר פחמן בין עצים היא מעבר ישירות מהרקע, אלא שדרך זו איטית ואינה יעילה.

תפקוד היער כְּחֵבְרָה

עצים שונים מצליחים לתפקד ברמות שונות ביער. חלקם מתפקדים היטב, וחלקם מתקשים לשרוד לאחר שנחשפו לתנאים קיצוניים או עברו מתקפת חרקים או מחלה. כיוון שתנועת פחמן בין עצים אינה שוויונית, יש כאן הזדמנות לתנועת פחמן מהעצים החזקים לעצים החלשים. עצים מוחלשים ביער, המחוברים דרך קורי הפטרייה, מתחברים לעצים חזקים יותר ומקבלים מהם, בתיווך הפטרייה, חומרים פחמניים החסרים להם. חלוקת משאבים כזו עשויה להוביל לניצול טוב יותר של המשאבים הקיימים ביער, כך שגם עצים חלשים יוכלו להתקיים ולשרוד, ובהמשך אף להתחזק.

רשתות מיקוריזה בסביבה של שינויי אקלים

לאורך מאתיים השנים האחרונות פעילות אנושית הובילה לפליטות פחמן מוגברות לאטמוספירה, אשר גרמו לשינויי אקלים. במקומות רבים עצים חווים לחצים הולכים וגוברים: אירועי יובש נעשים תכופים יותר; גלי חום מתארכים ומתאפיינים בטמפרטורות גבוהות יותר, ומתרחשים יותר אירועי קיצון כמו הצפות. כפי שעולה מהניסוי שְׁהֶדְמָה יער ים-תיכוני מעורב, ייתכן כי מנגנון שיתוף חומרים בין עצים ביער מסוג זה מאפשר מערכת אקולוגית יערנית בריאה יותר, המסוגלת להתמודד עם אירועי הקיצון הללו בצורה טובה יותר. מערכת אקולוגית כזו חשובה גם כיוון שהיא מספקת לאדם שירותים רבים כמו ויסות אקלים וקבוע פחמן, טיהור מים מזיהומים ויצירת חמצן אטמוספרי.

מה הלאה?

החוקרים מציעים כי דרוש מחקר נוסף כדי לעמוד על ההשפעה של מעבר פחמן בין עצים בתנאים שונים. לדוגמה, התבססות עצים צעירים ביער מצויה בסיכון גבוה עקב תקופות יובש ממושכות בעידן של שינויי אקלים, ואף בְּשֶׁל חוסר במינרלים כמו חנקן (N) וזרחן (P). התבססות עצים צעירים ביער היא מפתח להמשכיות היער בטווח הארוך. לכן, למידת ההשפעה של מעבר הפחמן בשלב זה בתקופה של אקלים משתנה, יכולה לסייע לנו לשמור על היערות למען הדורות הבאים.

מאמר המקור

Avital, S., Rog, I., Livne-Luzon, S., Cahanovitc, R., and Klein, T. 2022. Asymmetric belowground carbon transfer in a diverse tree community. *Mol. Ecol.* 31:3481–95. doi: 10.1111/mec.16477

מקורות

1. Cahanovitc, R., Livne-Luzon, S., Angel, R., and Klein, T. 2022. Ectomycorrhizal fungi mediate belowground carbon transfer between pines and oaks. *ISME J.* 16:1420–9. doi: 10.1038/s41396-022-01193-z

קיבוע פחמן

(Carbon fixation)

תהליך חיוני המאפשר חיים ברי-קיימה, של לכידת פחמן ואחסון פחמן דו-חמצני לטווח ארוך במאגר. במסגרתו, פחמן אטמוספרי אי-אורגני נטמע באורגניזמים חיים ועובר המרה לתרכובות אורגניות המשמשות לאגירת אנרגיה כימית.

חמצן אטמוספרי

(Atmospheric oxygen)

שכיחותו באטמוספירה של חמצן מולקולרי (O_2), המאפשר את שגשוג החיים. זהו תוצר לוואי של תהליך הפוטוסינתזה, וכמחציתו מגיעה מהים, שם הוא נוצר בעיקר על ידי פיטופלנקטון-אורגניזמים צמחיים זעירים.

2. Simard, S. W., Perry, D. A., Jones, M. D., Myrold, D. D., Durall, D. M., and Molina, R. 1997. Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. *Nature* 388:579–82. doi: 10.1038/41557
3. Rog, I., Rosenstock, N. P., Körner, C., and Klein, T. 2020. Share the wealth: trees with greater ectomycorrhizal species overlap share more carbon. *Mol. Ecol.* 29:2321–33. doi: 10.1111/mec.15351
4. Klein, T., Siegwolf, R. T. W., and Körner, C. 2016. Belowground carbon trade among tall trees in a temperate forest. *Science* 352:342–4. doi: 10.1126/science.aad6188

פורסם אונליין: 19 ביולי 2023

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Racheli Yaacov

ציטוט: Rapaport A I Klein T (2023) יחסי הגומלין בין עצים ופטריית בתקופה של שינויי אקלים. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2023.1194085-he

Rapaport A and Klein T (2023) Relationships Between Trees and Fungi in a Time of Climate Change. *Front. Young Minds* 11:1194085. doi: 10.3389/frym.2023.1194085

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

זכויות יוצרים © 2023 © Rapaport I Klein 2023. 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

ULPANIT BAR-ILAN, NETANYA, גיל: 13-14

אנו תלמידות שכבת ח באולפנית בר אילן נתניה. במהלך השנה לקחנו חלק בפרויקט 'פרונטירד' בבית הספר, שבמסגרתו למדנו, חקרנו תחומי מדע שונים וסקרנו מאמר שלם. אנו סקרניות, ואוהבות מדע וחדשנות.

הכותבים

ALON RAPAPORT

אני סטודנט לתואר שני במכון ויצמן למדע ברחובות, ישראל. במסגרת לימודי חוקר מעבר חומרים בין עצים המתבצעת בעזרת פטריות. בוגר תואר ראשון במדעי הצמח ואגרונומיה. ברצוני להמשיך במחקר,



ולנסות ליישם את המדע שבו אני עוסק כדי להילחם בשינויי אקלים ולעזור לחקלאים לייצר יותר מזון.
*alonephraim2@gmail.com



TAMIR KLEIN

חוקר במחלקה למדעי הצמח והסביבה במכון ויצמן למדע. מעבדת העצים שאני מוביל חוקרת היבטים שונים של תפקוד עצים ואקולוגיה של יערות תחת שינויי אקלים. בניסויים ובתצפיות שאנחנו עורכים, אנו מנסים להבין כיצד עצים מגיבים לשינויים בסביבתם. ד"ר קליין הוא בוגר האוניברסיטה העברית בירושלים ומכון ויצמן למדע, ובעל פוסט-דוקטורט מאוניברסיטת באזל, שווייץ.

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