

## אקולוגים של אדמה הופכים לבלשים ומגלים מי אוכל את מי או את מה באדמה

Amandine Erktan<sup>1\*</sup>, Melanie M. Pollierer<sup>1</sup>, Stefan Scheu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>מכון ג. פ. בלומנבאך לזואולוגיה ואנתרופולוגיה, אוניברסיטת גוטינגן, גוטינגן, גרמניה  
<sup>2</sup>המכון למגוון ביולוגי ולשימוש בר-קיימא בקרקע, אוניברסיטת גוטינגן, גוטינגן, גרמניה

### סוקרים צעירים

CECÍLIA

גיל: 9



NYNKE

גיל: 12



האם הבחנתם בכך שעלים מתים שנשרו מהעץ אף פעם לא מצטברים על הקרקע ביער? עבור השירות הזה, אנו יכולים להודות לצוות הניקיון של ממחזרים זעירים שחיים באדמה. אורגניזמים מתים הם מקור המזון שלהם, ובאכילתם הם ממחזרים אותם. כדי להבין את מנגנון המְחָזר הזה הכרחי לדעת מי אוכל את מי או את מה באדמה. אולם, קשה לדעת זאת מאחר שחיות רבות באדמה הן זעירות, מתחבאות באדמה, ולא מסוגלות לספר לנו מה הן אוכלות! כדי להתגבר על הקשיים האלה, אקולוגים של אדמה פיתחו שיטה מיוחדת: הם עוקבים אחרי סְמָנִים מסוימים של חיידקים, פטריות וצמחים בשומן של חיות אדמה, וכך הם יכולים לזהות מה החיות אכלו. חלק מחיות האדמה צורכות מגוון גדול של מקורות מזון, אחרות אוכלות מזונות מסוימים. אורגניזמים רבים פיתחו אסטרטגיות מדהימות לאכול בתוך האדמה, מאחר שמציאת מזון במבוך חשוך שכזה אינה קלה כל כך!

## מדוע חשוב להבין מי אוכל את מה באדמה?

האם שמתם לב לכך שאנחנו אף פעם לא רואים ערימות ענקיות של עלים מתים שמצטברות ביער? זה גם נדיר מאד לפגוש חיה מתה שוכבת על אדמת היער. אם כן, נשאלת השאלה "מי מנקה את אדמת היער?". בערים, עובדי העירייה אוספים את כל העלים המתים שמצטברים ברחובות. ביער, העבודה נעשית על ידי קבוצה של ממחזרים זעירים שחיים באדמה. עבור חיות האדמה הקטנות האלה, אורגניזמים מתים מהווים מקור מזון, והם ממחזרים עלים ודברים מתים אחרים על ידי אכילתם. חיות אדמה קטנות נאכלות על ידי חיות גדולות יותר, וזה מאפשר לחיות היותר גדולות לגדול. כמו כן כאשר חיות אדמה מפרישות צואה, הן משחררות חומרי מזון שצמחים יכולים להשתמש בהם כדי לגדול. התהליך הזה מאפשר מחזור של חומרי מזון, והוא הכרחי כדי לסייע לצמחים לגדול. הוא גם חשוב מאוד עבור בני אדם, מאחר שצמחים מספקים לנו הרבה טובין כמו למשל מזונות דוגמת ירקות, דגנים ופירות, וגם עץ לבניית רהיטים ובתים. הבנה של מי צורך את מה באדמה היא הכרחית להבנת מנגנון המחזור יקר הערך הזה.

## איזה סוג מזון נמצא באדמה, ומהו מארג המזון באדמה?

איזה סוג של מזון נמצא באדמה? אם נחפור באדמת היער, לא נמצא צלחת עם ספגטי בולונז! כמובן שאנו לא מדברים על סוג המזון הזה! באדמה, מקורות המזון הבסיסיים הם רקמות מתות מצמחים ומאורגניזמים אחרים (עלים מתים או אורגניזמים מתים באדמה בכל גודל שהוא), ושורשי צמחים (איור 1A). מקורות המזון הבסיסיים האלה נצרכים בעיקר על ידי חיידקים ופטריות, שנקראים **צרכנים ראשוניים**. הפטריות והחיידקים עצמם הם מקור המזון העיקרי עבור אורגניזמים גדולים יותר כמו למשל פרוטיסטים, תולעים נימיות, קפזנבאים וקרדיות (בגודל של כ-0.1-2 מיליטרים; איור 1). האורגניזמים האלה בתורם נאכלים על ידי טורפים גדולים יותר (בגודל של כמה מילימטרים), כמו למשל נדלים ועכבישים (איור 1B). תולעי אדמה גם אוכלות בעיקר חיידקים ופטריות, אולם באופן מיוחד: הן אוכלות אותם עם האדמה (איור 1B). זה קצת כמו לאכול את המזון שעל הצלחת שלכם ביחד עם הצלחת!

אף על פי שחלק מחיות האדמה, כמו תולעים נימיות וקפזנבאים, אוכלות בעיקר יצורים חיים כמו חיידקים ופטריות, הן גם יכולות לאכול רקמת צמחים, במיוחד את השורשים או את הנוזל המזין שהשורשים משחררים. בסך הכל, ישנם הרבה מקורות מזון באדמה, מרקמות צמח ועד לרקמות בעלי חיים, ומאורגניזמים מתים ועד לאורגניזמים חיים, ומרבית האורגניזמים באדמה צורכים כמה ממקורות המזון האלה. כל הקשרים בין מי צורך את מי או את מה באדמה נקראים **מארג המזון באדמה** (איור 1A).

## כיצד חוקרים מארגי מזון באדמה?

למרות המחקר הנרחב שנערך בעשורים האחרונים, חוקרים עדיין יודעים מעט על מי צורך את מי או את מה באדמה. חוסר הידע הזה נובע מכך שחיות אדמה הן זעירות,

### צרכן ראשוני (Primary Consumer)

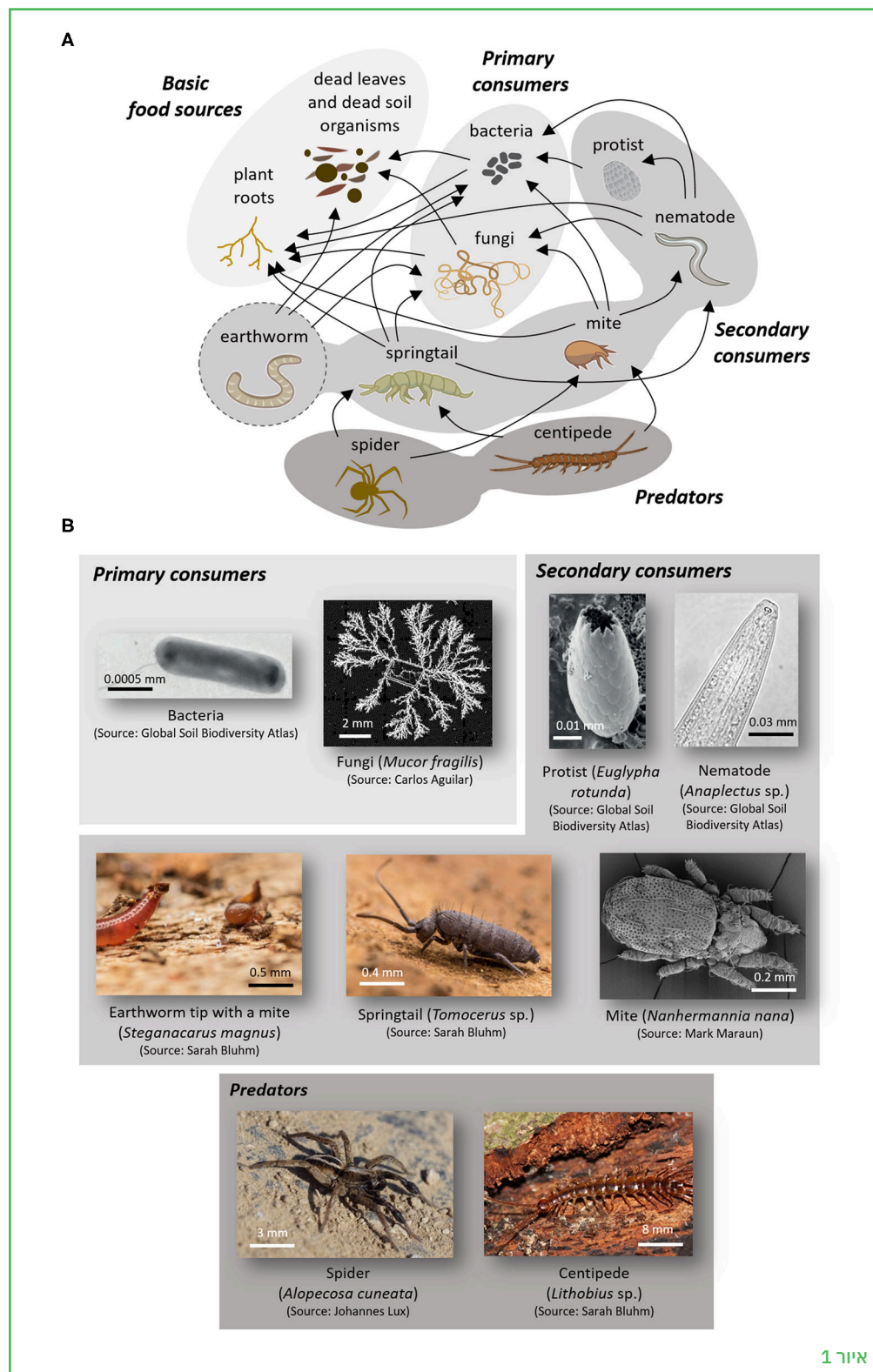
אורגניזמים שצורכים את החומר הצמחי המת באופן ישיר.

### מארג המזון באדמה (Soil Food Web)

כל הקשרים שמצביעים על מי צורך את מי או את מה באדמה.

**איור 1**

אורגניזמים במארג מזון טיפוסי באדמה. (A) מארג מזון מכיל מקורות מזון בסיסיים כמו שורשי צמחים ואורגניזמים מתים, כמו גם צרכנים ראשוניים ומשניים ומבחר טורפים. החיצים מצביעים על מי צורך את מי או את מה. שימו לב לכך שצרכנים ראשוניים מהווים מקור מזון לצרכנים שניוניים, שבעצמם מהווים מקור מזון לטורפים. (B) כאן אתם יכולים לראות דוגמאות לצרכנים ראשוניים ושניוניים באדמה, כמו גם לטורפים.



איור 1

מתחבאות באדמה, ולא יכולות לספר לנו מה הן אוכלות! במטרה לדעת מי צורך את מה באדמה, חוקרים צריכים לפעול כמו בלשים. הם פיתחו שיטה מעניינת: לחקור את השומן של חיות אדמה (איור 2). כשאתם אוכלים משהו, המזון משמש כמקור לאנרגיה,

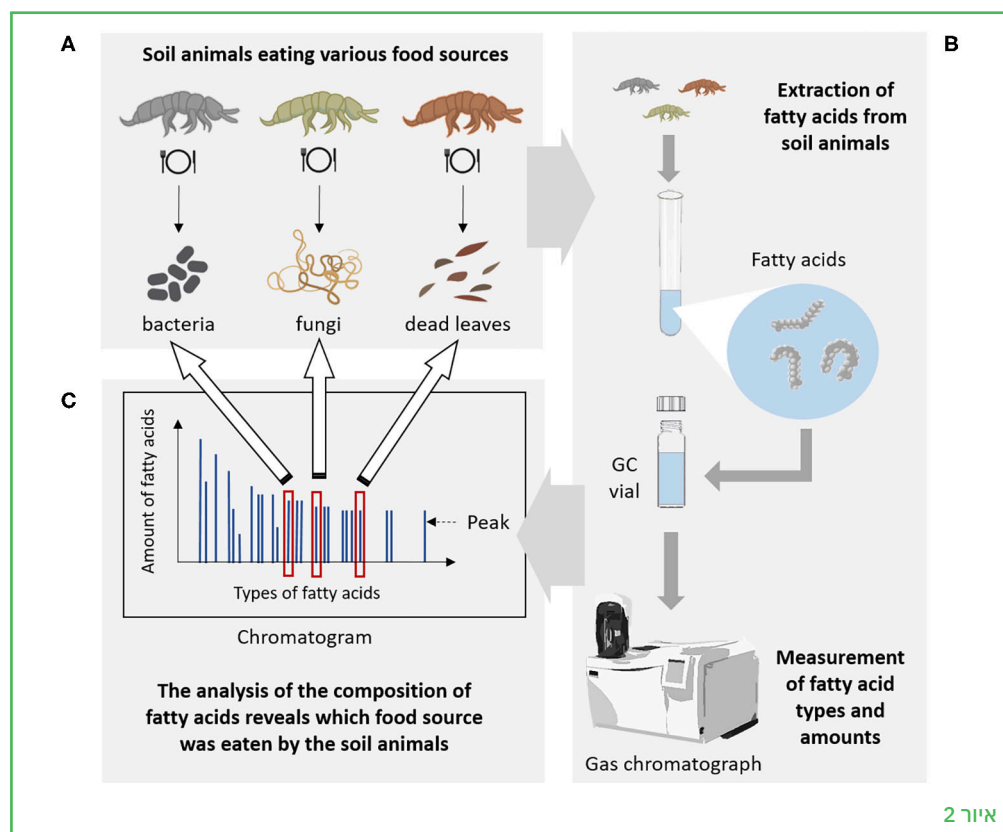
ולכן אתם יכולים לגדול ולהיות פעילים. אך אינכם יכולים להשתמש באנרגיה כולה בבת אחת, ולכן גופכם צריך לאחסן אותה לשימוש מאוחר יותר. כיצד האנרגיה מאוחסנת? כשאנו אוכלים יותר ממה שאנו צריכים באותו הרגע, הגוף מייצר שומן כרקמת אחסון אנרגיה. השומן "יישרף" מאוחר יותר לשם הפקת אנרגיה בעת הצורך. גם עבור בני אדם וגם עבור חיות, קל יותר לגוף לאגור שומן שכבר נמצא במזון ולאחסן אותו, במקום לייצר שומן חדש. ובכן, התכסיס הוא שלא כל השומנים זהים! לחיידקים, לפטריות ולצמחים יש סוגים שונים של שומן, וחוקרים יכולים לאתר את **סמני חומצות השומן** האלה בחיות האדמה שצרכו את מקורות המזון הללו [1]. אם כן, בסופו של דבר, אנו יכולים לזהות אם השומן שאוחסן בחיה הגיע מחיידקים, מפטריות, או מצמחים, ובדרך זו לדעת מה החיות אכלו.

**סמני חומצות השומן (Fatty Acid Markers)**

מולקולות שומן שמגיעות ממקור מזון ספציפי, כלומר חיידקים, פטריות או צמחים.

**איור 2**

התבוננות בסמני חומצות שומן מלמדת אותנו מה אורגניזמים באדמה אוכלים. (A) לחיות אדמה יש סוגי שומן שונים בגופן, כתלות במקורות המזון שהן אוכלות כמו למשל חיידקים, פטריות, או עלים מתים. (B) השומנים יכולים להיות מוסרים מהחיות האלה בצורה של חומצות שומן. ניתן לנתח את חומצות השומן באמצעות ציוד שנקרא כרומטוגרף גז. הנתונים מכרומטוגרף הגז מאפשרים לחוקרים לזהות אילו מקורות מזון האורגניזמים באדמה אוכלים.



**אורגניזמים עם טעם כללי או טעם מסוים**

באמצעות חקירת השומן של חיות אדמה, חוקרים גילו שהרבה קפזנבאים מעדיפים לאכול פטריות, אך הם גם יכולים לאכול חיידקים או צמחים. מאחר שהם יכולים לאכול מקורות מזון שונים, הם נחשבים כ-**"food generalists"** [2]. משמעות הדבר היא שלא קשה לספק אותם אם מזמינים אותם לארוחת ערב! אורגניזמים אחרים הם **"food specialists"**, והם נוטים לאכול רק דבר אחד. לדוגמה, חלק מהתולעים הנימיות מעדיפות לאכול חיידקים, בעוד שאחרות מעדיפות פטריות. ישנן אפילו תולעים נימיות טורפות שאוכלות תולעים

**Food Generalist**

אורגניזמים באדמה שצורכים סוגים רבים של מקורות מזון.

**Food Specialist**

אורגניזמים באדמה שצורכים סוג אחד, או כמה סוגים מסוימים של משאבי מזון.

נימיות אחרות! לכל מחלקה של תולעת נימית יש צורת פה שונה, ספציפית עבור אכילת סוג מזון מסוים.

## מדוע אכילה באדמה מיוחדת כל כך?

האם אי פעם ניסיתם לאכול את ארוחת הערב שלכם בחושך? לא קל למצוא היכן נמצא המזון. האדמה היא חשוכה ולכן חיות אדמה נתקלות באותה הבעיה. עיניים לא פועלות באדמה, ולכן לרוב חיות האדמה אין עיניים. בניגוד לכך, למרבית חיות האדמה יש "אפים" מפותחים מאוד. לדוגמה, תולעים נימיות, קפזנבאים ותולעי אדמה יעילים מאוד בהרחת המזון שלהם. הם יכולים לִאָתֵר את מיקום המזון ולנוע לקראתו. תולעים נימיות יכולות "להריח" חיידקים ממרחק של עד 50 סנטימטרים ולהגיע אליהן בתוך שבועיים [3]. זהו מרחק משמעותי עבור תולעים נימיות, מאחר שתולעת קטנה היא בדרך כלל באורך של כמה מאות מיקרונים (1 מיקרון = 0.001 מילימטרים; לשם השוואה, עובייה של שיער אנושי הוא 100 מיקרונים). זה כאילו שבני אדם היו מסוגלים להריח מזון ממרחק של 70 קילומטרים!

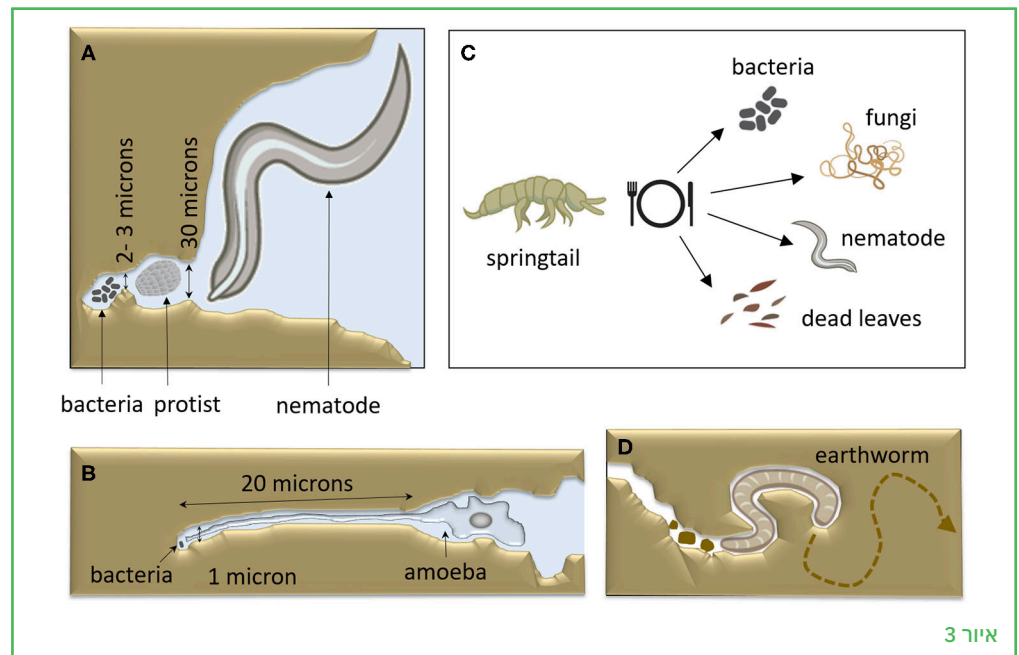
האדמה אינה רק חשוכה, היא גם מבוכ, שדרכו אורגניזמים באדמה לא יכולים לנוע בחופשיות. אדמה היא כמו ספוג עם חורים גדולים וקטנים יותר. אורכם של האורגניזמים הקטנים יותר, כמו למשל החיידקים, הוא בדרך כלל 1-2 מיקרונים, והם יכולים "להתחבא" בחורים קטנים. לדוגמה, אנו יודעים שפרוטיסטים (איור 1) לא יכולים להגיע לטֶרֶפּם החיידקי אם החיידקים ממוקמים בחורים קטנים יותר מ-2-3 מיקרונים [4] (איור 3A). הדבר תקף גם לתולעים נימיות, שלא יכולות לאכול חיידקים שממוקמים בחורים עם מִפְתָּחִים שקטנים מ-30 מיקרונים [4] (איור 3A). ככל שהחורים באדמה קטנים יותר, כך החיידקים יכולים להסתתר יותר בתוכם ולהימנע מלהיתפס ולהיאכל על ידי טורפים. אולם, טורפים פיתחו אסטרטגיות לאכול למרות הבעיות האלה. לדוגמה, אֶמְבּוֹת הן פרוטיסטים עם גופים רכים שיכולים לאמץ כל צורה (איור 3B). אמבות יכולות לשלוח "זרוע" דקה וארוכה מאוד לתוך חורים קטנים באדמה כדי לתפוס חיידקים נסתרים [5]. לקפזנבאים יש אסטרטגיה אחרת: הם פשוט לא כל כך בררנים לגבי מקורות המזון שהם צורכים – food generalists. הם יכולים לאכול חיידקים ופטריות, אך גם עלים מתים ותולעים נימיות (איור 3C). כתלואו במה זמין בחורים הקטנים באדמה שהם זוחלים דרכם, הם אוכלים מקור מזון זה או אחר. הגמישות הזו מסייעת להם למצוא משהו לאכול כל יום. תולעי אדמה פחות מושפעות מהקשיים של גישה למזון באדמה. החיות האלה מעכלות אדמה ישירות, מה שמאפשר להן לחפש מזון ולגשת אליו בקלות יחסית במבוכ האדמה (איור 3D). יתרה מזו, הן יכולות לעכל חיידקים ופטריות, כמו גם חומר צמחי מת שנבלע עם האדמה. כשתולעי אדמה מפרישות צואה, השאריות הבלתי מעוכלות יוצרות קערות אדמה קטנות.

## מבט חדש על תזונה במבוכ חשוך

תזונה באדמה היא כמו מציאת מזון במבוכ חשוך. במטרה להבין מי אוכל את מי בחשכת האדמה מתחת לרגלינו, אקולוגים של אדמה פועלים כבלשים אמיתיים ומשתמשים בסוגים

## איור 3

דרכים שונות שפיתחו חיות להתמודדות עם הקושי של תזונה באדמה החשוכה. (A) חורים קטנים באדמה מספקים מקום לאורגניזמים זעירים באדמה (תולעים נימיות, פרוטיסטים וחיידקים) להסתתר בו מפני חיות שאוכלות אותם. (B) במטרה להגיע לטרף שלה, אמבה (סוג של פרוטיסט) יכולה לשלוח זרוע באורך של 20 מיקרונים ובעובי של מיקרון אחד כדי לתפוס חיידקים שמתחבאים בחורים קטנים באדמה. (C) קפזנבאים גמישים במקורות המזון שהם צורכים, מה שמאפשר להם למצוא משהו לאכול כל יום. (D) תולעי אדמה בולעות אדמה עם המזון שלהן, ומעלות את החיידקים והפטריית שנמצאים באדמה שנבלעה. זה גם יוצר נתיב במבוך האדמה, מה שמקל עליהן להתקדם דרכה. זיכרו שמיקרון אחד קטן פי אלף ממילימטר אחד.



שונים של שיטות מורכבות, בין אם ביער או במעבדה. כעת, כשאתם יודעים איך זה לאכול באדמה, לא תסתכלו עוד על חיות אדמה באותו האופן!

## תודות

המחקר הזה נתמך על ידי הוועדה האירופית – תוכנית המחקר והחדשנות Horizon 2020, פעילויות מארי סקלודובסקה-קירי (מענק מספר 750249). אנו מודים ל-Audrey Marville על ציור חיות האדמה.

## מקורות

1. Ruess, L., and Chamberlain, P. M. 2010. The fat that matters: soil food web analysis using fatty acids and their carbon stable isotope signature. *Soil Biol. Biochem.* 42:1898–910. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.07.020
2. Digel, C., Curtsdotter, A., Riede, J., Klarner, B., and Brose, U. 2014. Unravelling the complex structure of forest soil food webs: higher omnivory and more trophic levels. *Oikos* 123:1157–72. doi: 10.1111/oik.00865
3. Rasmann, S., Köllner, T. G., Degenhardt, J., Hiltbold, I., Toepfer, S., Kuhlmann, U., et al. 2005. Recruitment of entomopathogenic nematodes by insect-damaged maize roots. *Nature* 434:732. doi: 10.1038/nature03451
4. Rønn, R., Vestergård, M., and Ekelund, F. 2012. Interactions between bacteria, protozoa and nematodes in soil. *Acta Protozool.* 51:223–35. doi: 10.4467/16890027AP.12.018.0764
5. Foster, R. C., and Dormaar, J. F. 1991. Bacteria-grazing amoebae *in situ* in the rhizosphere. *Biol. Fertil. Soils* 11:83–7. doi: 10.1007/BF00336368

פורסם אונליין: 28 בפברואר 2023

עורך: Rémy Beugnon

מנחה מדעי: Daniel Garza

**ציטוט:** Erktan A, Pollierer MM and Scheu S (2023) אקולוגים של אדמה הופכים לבלשים ומגלים מי אוכל את מי או את מה באדמה. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2020.544803-he

**תורגם והתאם מ:** Erktan A, Pollierer MM and Scheu S (2020) Soil Ecologists as Detectives: Discovering Who Eats Whom or What in the Soil. Front. Young Minds 8:544803. doi: 10.3389/frym.2020.544803

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

**COPYRIGHT** © 2020 © Erktan, Pollierer and Scheu 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 (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

**CECÍLIA**, גיל: 9

Cecília היא בחורה מבריקה שאוהבת לשחק שחמט, וסקרנית מאוד לגבי כל מיני סוגים של דברים מקריים. היא רוצה לדעת כיצד הכול פועל, ואחר כך אוהבת להפגין את כל הנתונים שהמוח שלה אסף.

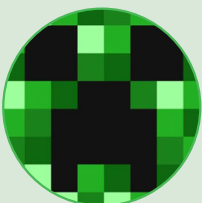
**NYNKE**, גיל: 12

היא, קוראים לי Nynke.

## הכותבים

**AMANDINE ERKTAN**

אני פוסט-דוקטורנטית באוניברסיטת גוטינגן בגרמניה. אני מתעניינת בהבנת האופן שבו אורגניזמים מעצבים את מבנה האדמה, ולהפך. תחילה עבדתי על שורשי צמחים וחקרתי כיצד הם בונים את האדמה. מהר מאוד הבנתי שלא רק השורשים הם המהנדסים של האדמה – ישנם אינספור מיקרובים וחיות באדמה, ותפקידיהם הכרחיים לקביעת מבנה האדמה. כיום אני רוכשת כישורים חדשים בחקר





חיות אדמה, ומקווה לשפוך אור על האופן שבו שורשי צמחים, מיקרובים וחיות אדמה מתקשרים במטריצת האדמה. \*aerktan@gwdg.de



### MELANIE M. POLLIERER

אני פוסט-דוקטורנטית באוניברסיטת גוטינגן, גרמניה. העניין העיקרי שלי נוגע למארגי מזון של חיות אדמה. מאחר שקשה להבחין מה חיות אדמה באמת אוכלות, אני משתמשת בשיטות עקיפות במטרה לגלות יותר. בתזת הדוקטורט שלי, ניתחתי חומצות שומן בחיות אדמה ועקבתי אחרי גורלו של פחמן מסומן מהצמחים ועד לחיות. כעת, אני משתמשת בשיטה חדשה: אני מנתחת צורות יציבות של פחמן ושל חנקן בחומצות אמינו, מה שמאפשר תובנות מפורטות אפילו יותר לגבי הדיאטה של הצרכנים.



### STEFAN SCHEU

בזמן שחקרתי ביולוגיה בטובינגן ובגוטינגן בין 1979 לבין 1986, הייתי מרותק מהמגוון העצום של חסרי חוליות באדמה ומתפקידם החשוב. מאז, חקרתי את המבנה של חברות של חיות אדמה ואת תפקודן, ראשית במהלך הדוקטורט שלי באוניברסיטת גוטינגן, ומאוחר יותר בתור פוסט-דוקטורנט בקלגרי ובגוטינגן. בשנת 1997, ייסדתי את קבוצת המחקר שלי בתור פרופסור לזואולוגיה ולאקולוגיה באוניברסיטת דרמסטאדט לטכנולוגיה, ובשנת 2008 חזרתי לאוניברסיטת גוטינגן בתור יושב ראש המחלקה לאקולוגיה של חיות. כאן, אנו חוקרים את המבנה של חברות של חיות אדמה ומיניהן, תפקודן והאבולוציה שלהן.

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