



מהאדמה לשורשים – מחלת אַצְבֵּעַת הַכְּרוּבִיּים

Edel Pérez-López*

המחלקה לפיזיולוגיה, הפקולטה לחקלאות ולמדעי המזון, המרכז למחקר ולחדשנות של הצמח, אוניברסיטת לאַנְוַאל, קוויבק סיטי, קוויבק, קנדה

סוקרת צעירה

JUNIPER

גיל: 11



בין מיליוני המיקרואורגניזמים שמאכלסים את האדמה, חלקם עשויים להיות פְּתוּגָנִים של צמחים, כלומר הם יכולים לחולל מחלה בצמחים. חלק מהמחלות מוכרות יותר מאחרות, כך למשל אַצְבֵּעַת הַכְּרוּבִיּים (Clubroot) – מיקרואורגניזם מאוד לא טיפוסי שמזהם צמחים ממשפחת המצליבים, דוגמת כרוב, כרוב עלים (קָיֵל), קנולה (לְפִתִית) וצמח המחקר השכיח תוֹדְרָנִית לבנה. במאמר זה נרחיב ונסביר על הפתוגן אצבעת הכרוביים ועל המחלה שהוא גורם לה. עדיין יש הרבה מה לגלות לגביהם, ואולי בעתיד אתם תהיו חלק ממעבדתנו ותחקרו פתוגנים מרתקים שמועברים באדמה.

אגדה על פְּרוֹטִיסְטִים וצמחים

אדמות הן דבר חי. חרקים, תולעים ומיקרואורגניזמים חיים באדמה ורבים מהם מקיימים קשרי גומלין עם צמחים, שאינן תמיד מועילות עבור הצמחים. האדמה גם מאכלסת יצורים המהווים סכנה עבור צמחים חשובים מבחינה אקולוגית וכלכלית. חלק מהפטוריות ומהתולעים ידועים כפתוגנים שנישאים באדמה ביחס לצמחים, אך הם אינם היחידים. ישנם

פתוגן שנישא באדמה (Soil-borne pathogen)

מיקרואורגניזמים ששורדים ונעים באדמה, ויכולים לגרום לצמחים לחלות.

פרוטיסטים שהם פתוגנים הרסניים לצמחים, אף על פי שהם פחות נחקרו והם פחות מוכרים. פרוטיסטים הם אורגניזמים חד-תאיים שאינם בעלי חיים, צמחים, או פטריות.

הפתוגן אצבעת הכרוביים (clubroot), או *Plasmodiophora brassicae* כפי שמדענים נוהגים לכנותו, הוא פרוטיסט שמשפיע על שורשים של **ירקות ממשפחת המצליבים**, כמו למשל ברוקולי, כרוב, כרובית, צמח זרעי השמן שידוע בשם קנולה ותודרנית לבנה שהיא צמח שכיח במחקר מדעי [1]. תודרנית לבנה וקנולה הם צמחים מארחים פגיעים לפתוגן אצבעת הכרוביים, מסיבות שונות (איור 1). תודרנית שימושית מאוד עבור מדענים שחוקרים היבטים שונים של צמחים כמו הגנומים שלהם, האקולוגיה שלהם והקשרים עם מיקרואורגניזמים מועילים או פתוגנים [2]. צמחי תודרנית שנדבקו בפתוגן אצבעת הכרוביים הם המודל המושלם למחקר בנושא האופן שבו פתוגנים משפיעים על צמח. צמח הליפתית, שהוא המקור לשמן קנולה המשמש במטבחים רבים ברחבי העולם, חשוב במיוחד מנקודת מבט כלכלית (איור 1). בקנדה בלבד, קנולה מספקת מדי שנה בסביבות 26 מיליארדי דולרים קנדיים עבור כלכלת המדינה, ולכן פתוגן שמסכן ייצור של קנולה עלול להיות הרסני לכלכלה [1].

פרוטיסטים (Protists)

אורגניזמים חד-תאיים זעירים שאינם בעלי חיים, צמחים, או פטריות.

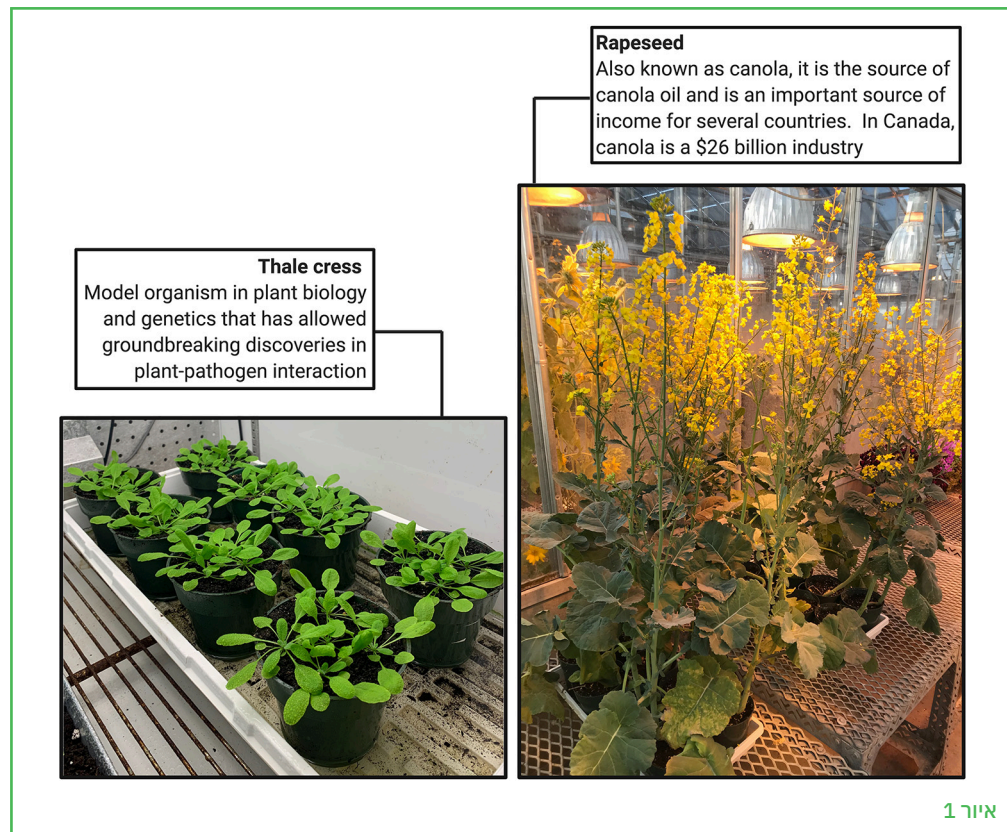
ירקות מצליבים (Cruciferous vegetables)

ירקות ממשפחת המצליבים (Brassicaceae), לרבות מגוון ירקות עליים ירוקים כמו כרובית, כרוב, כרוב עלי (קיייל), שחליים (רשד - גרגיר הגינה), כרוב סיני (באק צ'וי), ברוקולי וכרוב ניצנים.

איור 1

שני צמחים מארחים הפגיעים לפתוגן אצבעת הכרוביים.

צמחים אלה הם: תודרנית לבנה (Thale cress) ולפתית (קנולה, Rapseed). האיור נוצר באמצעות BioRender.



איור 1

מחזור החיים של פתוגן אצבעת הכרוביים

פתוגן זה יכול לחיות באדמה במשך עד 20 שנים כ**נבג** בלתי פעיל. נבגים הם מבנים שנוצרים על ידי פתוגנים מסוימים של צמחים. הנבגים משוחררים לסביבה והם בעלי דופן עבה שמסייעת להם לשרוד במשך שנים רבות באדמה, כשאינן ביכולתם להדביק צמחים. אם צמח פגיע גדל באדמה שמכילה נבגים של פתוגן אצבעת הכרוביים, אז הנבגים "מתעוררים",

נבג (Spore)

מבנה שנוצר על ידי פתוגן של צמח. לנבג דופן עבה שמסייעת לו לשרוד במשך שנים רבות באדמה, כשאינן ביכולתו להדביק צמחים.

הופכים לזואוֹסְפוֹרִים (נבגים א-מיניים של פטריות או אצות, אשר נעים על ידי שוטונים), נצמדים לשורשי הצמח ומתחילים להדביק. תהליך ההדבקה נחלק לשני שלבים: הדבקה ראשונית והדבקה שניונית (איור 2A). במהלך הדבקה ראשונית, פתוגן אצבעת הכרוביים נצמד אל השורשים וחודר אליהם, ומתחיל את ההדבקה. הדבקה שניונית מתרחשת כאשר הפתוגן יוצר עֶפְצִים, שנקראים גם clubs, בשורשים של צמחים פגיעים. עפצים הם התנפחות של רקמת צמח, שנגרמת על ידי פתוגנים של צמח או על ידי חרקים. העפצים מונעים מהצמח לספוג מים וחומרי מזון מהאדמה, ובסופו של דבר גורמים למוות של הצמח. מחזור החיים של הפתוגן מסתיים עם ייצורם של נבגים חדשים, אשר משוחררים חזרה אל האדמה, מוכנים להדביק צמחים חדשים.

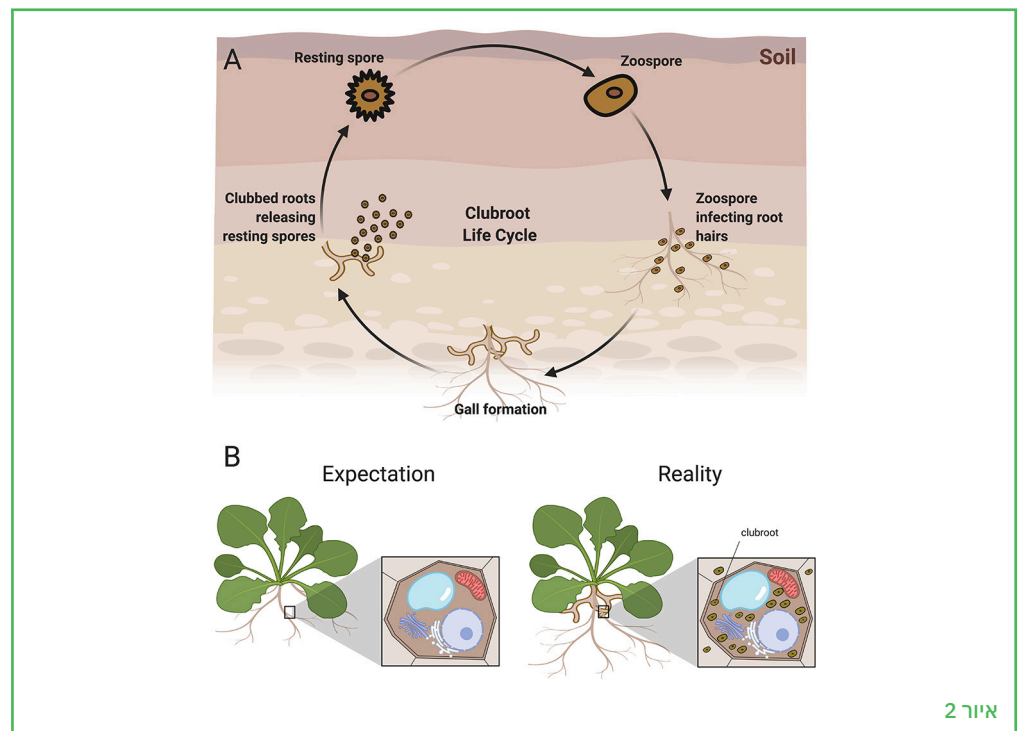
עפצים (Galls)

התנפחות או גדילה אבנורמלית של רקמות צמח שנגרמות על ידי פתוגנים מיקרוביים של צמחים או על ידי חרקים.

איור 2

מחזור החיים של פתוגן אצבעת הכרוביים (A) פתוגן אצבעת הכרוביים יכול להתקיים במשך שנים כנבג שנח באדמה (Resting spore). כאשר הנבג בא במגע עם צמח פגיע, הוא הופך לזואוספור (Zoospore), מדביק את שורשי הצמח ויוצר עפצים. השורשים שנדבקו משחררים נבגים נוספים לאדמה, אשר יכולים להמשיך להדביק צמחים חדשים. מבוסס על Ludwig-Müller ו-Auer [3], נוצר באמצעות BioRender.

(B) צמח בריא (משמאל) לעומת צמח שנדבק על ידי הפתוגן (מימין).



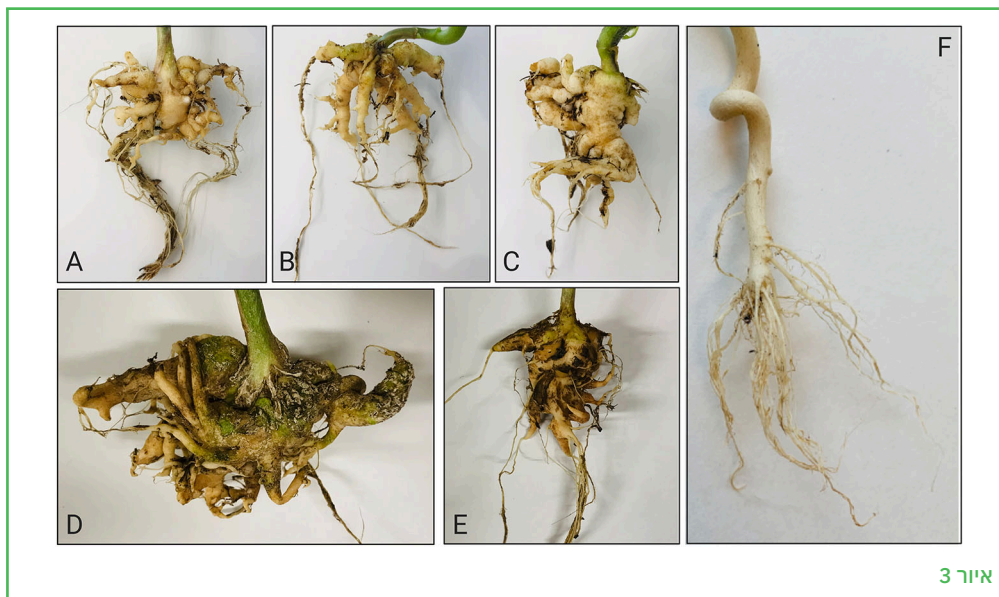
איור 2

אצבעת הכרוביים (CLUBROOT) או מועדון בשורשים (CLUB IN THE ROOTS)?

העפצים (club) הם הסיבה לכך שהמחלה ידועה בשם clubroot. כששמעתי על כך לראשונה, חשבתי שמשמעות השם היא "a club in the roots" (מועדון בשורשים). אך הציפייה הייתה די שונה מהמציאות (איור 2). אם מישהו נהנה מהשורש שנדבק, אין ספק שזה לא הצמח! המציאות היא שהעפצים שמוצרים על ידי הפתוגן הם הרסניים. במעבדה, ראינו ש-21 ימים אחרי הֶסְפַּת פתוגן אצבעת הכרוביים לאדמה, צמחים פגיעים מתחילים למות. מערכות העֶצָה והשִׁפָּה, שהן התעלות שמשמשות צמחים להעברת מים וחומרי מזון, חסומות לגמרי. מעניין גם לשים לב שהעפצים שנגרמים על ידי הפתוגן די דומים בין צמחים מארחים שונים (איור 3).

איור 3

שורשים שנדבקו בפתוגן לעומת שורש בריא. שורשי קנולה (A), ברקולי (B), ארגולה (רוקט) (C) וכרוב עלים (קיל) (D,E) שמושפעים על ידי אצבעת הכרוביים; שורשים בריאים של קנולה (F).



איור 3

כיצד ביכולתנו לווסת את הפתוגן ולהתמודד עם המחלה?

אף על פי שפתוגן אצבעת הכרוביים והמחלה שהוא גורם התגלו כבר במאה ה-17, ישנם הרבה דברים שמדענים אינם יודעים [1]. כדי לווסת את הפתוגן, חקלאים השתמשו בכימיקלים כמו למשל קוטלי פטריות, ונחלו הצלחה מועטה. השיטה הטובה ביותר היא גידול צמחים עמידים למחלת אצבעת הכרוביים. אך אחרי כמה שנים בלבד, הפתוגן מפתח אסטרטגיות חדשות להדביק את הצמחים העמידים, וגורם להם להיות פגיעים למחלה שהוא מחולל.

אנו מנסים להתמודד עם אויב שאיננו מבינים היטב, ולכן הצעד הראשון בהתמודדות כנגד המחלה הוא לחשוף את כל התכסיסים שהפתוגן הזה מסתיר. באוניברסיטת לאןואל (קוויבק סיטי, קנדה), מדענים מבצעים צעדים חשובים לקראת הבנת הפתוגן והמחלה שהוא גורם. הם מעוניינים לדעת כיצד פתוגן זה מתחמק ממערכת החיסון של הצמח, וכיצד הוא גורם לתאים לגדול וליצור עפצים. מטרתם העיקרית היא לפתח צמחים שיהיו עמידים למחלה, ואשר יכולים לשרוד בשדה אף אם הוא מכיל את נבגי הפתוגן. אולי בעוד כמה שנים, מוחות צעירים וסקרנים כמוכם, יהיו חלק מצוות שיתמודד עם הפתוגן המעניין הזה.

מקורות

1. Botero, A., García, C., Gossen, B. D., Strelkov, S. E., Toddd, C. D., Bonham-Smith, P. C., et al. 2019. Clubroot disease in Latin America: distribution and management strategies. *Plant Pathol.* 68:827–33. doi: 10.1111/ppa.13013
2. Krämer, U. 2015. Planting molecular functions in an ecological context with *Arabidopsis thaliana*. *eLife* 4:e06100. doi: 10.7554/eLife.06100

3. Auer, S., and Ludwig-Müller, J. 2015. Biological control of clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) by the endophytic fungus *Acremonium alternatum*. *J. Endocytobiosis Cell Res.* 26:46–9. Available online at: https://zs.thulb.uni-jena.de/receive/jportal_jparticle_00346200

פורסם אונליין: 05 במאי 2023

נערך על ידי: Helen Phillips

מנחה מדעית: Lynette Cheah

ציטוט: Pérez-López E (2023) מהאדמה לשורשים-מחלת אצבעת הכרוביים. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2021.562915-he

תורגם והתאם מ: Pérez-López E (2021) From the Soil to the Club in the Roots: Clubroot. *Front. Young Minds* 9:562915. doi: 10.3389/frym.2021.562915

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

COPYRIGHT © 2021 © Pérez-López 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 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.

סוקרת צעירה

JUNIPER, גיל: 11

אני אוהבת לקרוא ולקודד, וגם אוהבת בעלי חיים. המקצועות האהובים עליי בבית הספר הם מתמטיקה ואומנות.

הכותב

EDEL PÉREZ-LÓPEZ

אני עוזר פרופסור במחלקה למדעי הצמח באוניברסיטת לאוואל, קוויבק סיטי, קנדה. אני מגיע מעיירה חקלאית קטנה בקנדה, וחקלאות תמיד הייתה חלק מחיי. לכן החלטתי ללמוד ביוכימיה ולחקור את הפתוגנים שמשפיעים על צמחים ועל חקלאות. בשנת 2018, כשלמדתי לראשונה על פתוגן אצבעת הכרוביים והמחלה שהוא מחולל, התאהבתי בפתוגן המסקרן הזה, וכעת הוא חלק מרכזי מהמחקר שלי. אני מקווה שיום אחד אתם, המוחות הסקרנים שקוראים את המאמר הזה, תוכלו להיות חלק ממעבדת



Edelab (<https://edelabcriv.com/>) ותסייעו לגלות את התעלומות שמאחורי אינטראקציות פתוגן-צמח.
*edel.perez-lopez.1@ulaval.ca

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