

אגרובקטריום: מיקרוב אדמה, פתוגן צמחי ומהנדס גנטי טבעי

Ryan T. Weir*, Johnathan J. Dalzell

בית הספר למדעי הביולוגיה, אוניברסיטת קווינס בבלפסט, בלפסט, בריטניה

סוקרים צעירים

MERCY
SCHOOL
גיל: 11-10



אגרובקטריום טומפציאנס (אגרובקטריום בקיצור) הוא מיקרוב חד-תאי ומהנדס גנטי טבעי. הוא לוקח חלק מהדנ"א שלו (הוראות המתווה עבור החיים, שנמצאות בכל יצור חי), ומכניס אותו לדנ"א של צמח! זה מתעתע את הצמח וגורם לו להגן על המיקרוב ולהזינו; זה מצוין עבור המיקרוב, אולם לא כל כך עבור הצמח. התגלית שאגרובקטריום מכניס את הדנ"א שלו לתוך הצמח מראה לנו שהנדוס גנטי הוא תהליך טבעי. מדענים יכולים להשתמש בשיטה הזו כדי להכניס בקלות רצפי דנ"א חדשים בתוך צמחי יבולים, מה שנותן ליבולים יכולות חדשות שמסייעות להם להילחם כנגד מזיקים, לגדל מזון מזין יותר ולהפוך לטובים יותר בהתמודדות עם שינוי האקלים! במאמר זה נדון באופן שבו אגרובקטריום יוצר אורגניזם עם שינוי גנטי (GMO), וכיצד התהליך הזה יכול לסייע לנו לשפר צמחי יבול ולגדל יותר מזון תוך שימוש בפחות אדמה וחומרי הדברה.

אגרובקטריום מוצא צמח

אגרובקטריום טומפציאנס (אגרובקטריום בקיצור) הוא מיקרוב חד-תאי שחי באדמה. למיקרוב הזה יש יכולת למצוא מגוון רחב של צמחים שונים באמצעות תזוזה לעבר כימיקלים שמשוחררים באופן טבעי מפצעי הצמחים. אגרובקטריום יכול לשחות דרך שכבות מים באדמה כדי להגיע לצמחים, באמצעות מבנים שנקראים שוטונים, שחובטים כמו זנבות. אף על פי

שלאגרובקטריום אין עיניים או אוזניים (אלה לא ממש היו עוזרים באדמה בכל מקרה), יש לו מספר חלבונים מתמחים שמזהים את הכימיקלים של הצמחים על ידי פעולה שדומה לאף פשוט מאוד, שהמיקרוב משתמש בהם כדי לרחרח את הצמח. החלבונים האלה מאפשרים לאגרובקטריום לזוז בכיוון הנכון, אל עבר הצמח. כאשר אגרובקטריום מבין שהוא נע בכיוון הלא נכון, הוא חובט באמצעות השוטונים שלו באופן אקראי, מסתובב לכיוון חדש, ושוחה בקו ישר. הרצף הזה של שחייה וערבול חוזר עד שהוא מוצא את הצמח.

אגרובקטריום מתמחה בתקשורת עם צמחים, תוך שימוש בכימיקלים ולא במילים! כאשר המיקרוב יוצר קשר עם הצמח, הוא משחרר כמה כימיקלים שונים, אשר אומרים לצמח להפוך את פני השטח שלו ל"דביקים". הדביקות הזו מאפשרת לאגרובקטריום להתחבר לצמח ולהתכונן לפלישה. בנקודה הזו, האגרובקטריום מפעיל משפחה של גני *Vir* (קיצור של המילה *virulence*, או **אלימות** בעברית). גני ה-*vir* האלה מכילים הוראות דנ"א במטרה לגרום לכל הכלים שאגרובקטריום צריך להיכנס לצמח ולהכניס דנ"א חדש לתוך גרעין התא של הצמח (שמכיל את ה**גנום** של הצמח - כל הוראות הדנ"א שלו). כעת התחיל מצור ביולוגי, והסיכון גבוה ביותר!

אגרובקטריום מעביר דנ"א לתוך הצמח

לאגרובקטריום יש סוג דנ"א מעגלי מיוחד, שנקרא **פְּלַסְמִיד**. הפיסה הקטנה של דנ"א שהאגרובקטריום רוצה להעביר לגנום הצמחי (שנקראת T-DNA, קיצור של transfer DNA), נמצאת בתוך הפלסמיד. אחד מגני ה-*vir* שמופעלים כשהמיקרוב נדבק לצד החיצוני של הצמח מייצר חלבון שנקרא VirD2. VirD2 מתפקד כמו מספרים ביולוגיים, וחותר את ה-T-DNA מתוך הפלסמיד המעגלי. לאחר מכן, VirD2 מתחבר לקצה אחד של T-DNA, וגורר אותו לתוך תא הצמח, לכיוון גרעין הצמח (כמו ספינת גרר עשויה חלבון... שגם מתפקדת כמספרים). לפני שזה יכול לקרות, אגרובקטריום צריך לחדור דרך המחסום של דופן תא הצמח. הוא עושה זאת על ידי בניית "מזרק" עם חלבוני אלימות אחרים, שנקראים VirB1 עד VirD4. באמצעות חלבון המזרק הזה, אגרובקטריום מזריק את ה-T-DNA דרך דופן תא הצמח.

אולם צמחים למדו להגן על עצמם כנגד המתקפה הזו. כאשר הצמח מגלה שאגרובקטריום תוקף אותו, צבא של אנזימי צמח מנסים לחתוך את ה-T-DNA של האגרובקטריום לפני שהוא יכול להגיע לגרעין תא הצמח. אולם האגרובקטריום מקדים את הצמח בצעד אחד, מאחר שהוא עטף את ה-T-DNA בשריון שמורכב מחלבון אלימות אחר, שנקרא VirE2, אשר מונע מאנזימי הצמח להגיע אל ה-T-DNA. ברגע שה-T-DNA נכנס לגרעין תא הצמח, הוא מחפש שברים בדנ"א (אלה מתרחשים באופן טבעי) ומכניס את עצמו לתוך הדנ"א בזמן שתא הצמח מתקן את השבר בדנ"א. כאשר זה קורה, תא הצמח נעשה שונה גנטית, וכעת הוא מכיל את הוראות הדנ"א מאורגנים אחר (האגרובקטריום) שישנו את האופן שבו הצמח מתפקד ופועל (איור 1) - הצמח הוא כעת **אורגניזם עם מודיפיקציה גנטית (GMO)**!

אגרובקטריום עושה מניפולציה על הצמח

ה-T-DNA שאגרובקטריום מכניס לתוך גנום הצמח מכיל הוראות שיועתיקו לתוך כל תא שיתפתח מהתא הראשון שעבר מודיפיקציה גנטית. למעשה, חלק מהוראות הדנ"א מגרות

אלימות (Virulence)

היכולת לזהם אורגניזם אחר ולגרום למחלה. המילה "Virulence" היא שנותנת את השם לגני ה-*Vir* שמסייעים לאגרובקטריום לעשות מניפולציות בצמחים.

גנום (Genome)

כל הוראות הדנ"א שאורגניזם זקוק להן כדי לשרוד ולהתרבות.

פלסמיד (Plasmid)

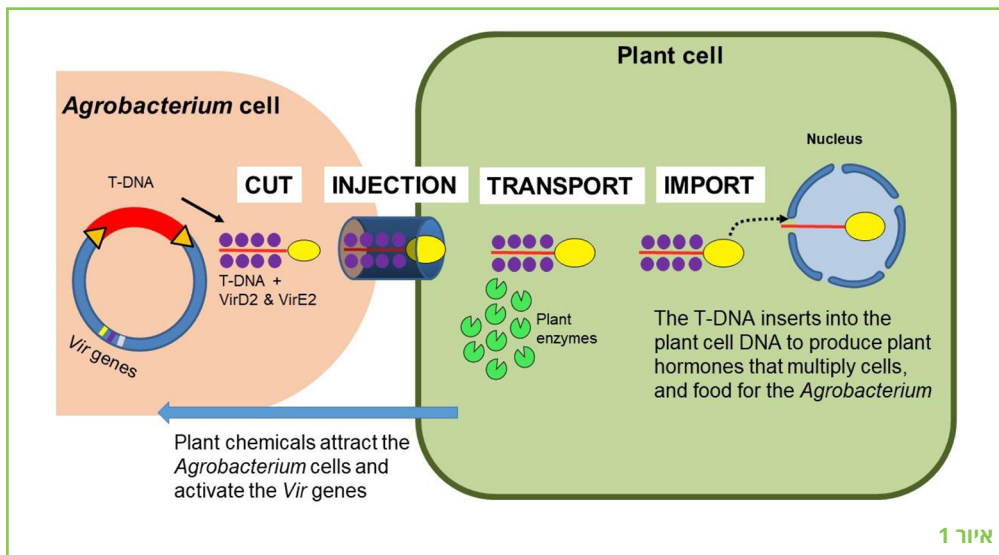
רצף דנ"א שמופרד מהוראות דנ"א אחרות בגנום. הוא מעגלי וניתן להעתיקה ולחלוקה בין מיקרובים.

אורגניזם עם מודיפיקציה גנטית (Genetically Modified Organism)

אורגניזם ששונה באופן מועיל דרך תוספת של הוראות דנ"א חדשות.

איור 1

אגרובקטריום יכול לעשות מניפולציה על תאי צמחים על ידי הכנסת רצפי דנ"א חדשים. כימיקלים מפצעים צמח מושכים אגרובקטריום וגורמים לאתחול של תהליך פלישה. T-DNA נחתך מפלסמיד הדנ"א באגרובקטריום ומוזרק לתוך תא הצמח. מכאן, ה-T-DNA מועבר לכיוון גרעין תא הצמח, שם הוא מיובא ומוזרק לתוך גנום הצמח (לא מצויר בסקאלה הנכונה; נלקח מוויליאמס ויואן [1]).



איור 1

איור 2

אגרובקטריום גורם לעפצי צוואר השורש בצמחים רבים. התמונה מראה רקמת עפצים של עץ מנגו, שנגרמה על ידי זיהום של אגרובקטריום. כאשר המיקרוב מזהם את הצמח ומכניס לתוכו את הדנ"א שלו, זה מאלץ את הצמח לייצר הורמונים שמכפילים את התאים ונותנים לתאי הצמח את כל מה שהם צריכים כדי להזין את הפתוגן. אגרובקטריום חי בתוך העפצים.



איור 2

עפצי צוואר השורש (Crown Gall)

מאפייני הגדילה שאפשר לראות על צמחים כשהם זוהמו על ידי אגרובקטריום.

פתוגן (Pathogen)

פתוגן הוא אורגניזם שגורם למחלות באורגניזמים אחרים. אגרובקטריום הוא פתוגן טבעי של צמחים.

את תא הצמח להתחלק ולהתרבות, מעפצים שאתם יכולים לראות כגדילה לא רגילה בצמח (איור 2). זה למעשה האופן שבו אגרובקטריום התגלה לראשונה – הוא נמצא כגורם לצמח מחלה שנקראת **עפצי צוואר השורש**, שמגבילה את הגדילה של צמחי יבול ואת תפוקתם. ה-T-DNA של אגרובקטריום מתניע היווצרות של עפצים על ידי שינוי כמות מסוימת של הורמונים צמחיים, אשר יוצרת סביבה בטוחה למיקרוב. כמו כן, ה-T-DNA מקודד מתכון: הוראות הכנה למזון המועדף על אגרובקטריום. אגרובקטריום אוכל רק משפחה מסוימת של כימיקלים שהצמח לא יודע איך להכין. כאשר האגרובקטריום מכניס את הוראות ה-T-DNA שלו לתוך הדנ"א של הצמח, הוא למעשה חולק מתכון משפחתי אהוב עם הצמח. לסיכום, אגרובקטריום חוזר לצמח, משנה את הדנ"א שלו ומכניס הוראות חדשות שיגידו לצמח כיצד להגן עליו ולהזין אותו! בעוד שאגרובקטריום מרוויח מהאינטראקציה הזו, הצמח לא. אגרובקטריום מסווג כ**פתוגן**, מאחר שהוא גורם למחלה (שידועה גם כפתולוגיה) בצמח.

איור 3

צמח עגבניה מהונדס
גנטית שמגודל במעבדה.

התמונה מראה צמח עגבניה צעיר שהונדס גנטית. אגרובקטריום שימש להכנסת דנ"א חדש לתוך חתיכות קטנות של רקמת עלה צמח העגבניה. התאים שעברו מודיפיקציה עודדו לגדול לצמח שלם על ידי שינוי כמויות של הורמונים מסוימים בגלל מיוחד שבו אנו מגדלים את תאי הצמח. שורשים החלו לגדול מצמח העגבניה הזה, שתוך זמן קצר ילקח מהמכל המגן הזה ויגודל באדמה.



איור 3

אגרובקטריום יכול לסייע לנו לשפר צמחים

ממה שאמרנו לכם עד כה, אתם יכולים לראות שהנדסה גנטית היא תהליך טבעי שאגרובקטריום משתמש בו כדי לעשות מניפולציות בצמחים. ישנן ראיות טובות לכך שהרבה צמחים שונים שמרו על חלקים מה-T-DNA אחרי זיהום של אגרובקטריום [2]. מדענים יכולים לשנות T-DNA של אגרובקטריום במטרה להסיר את כל ההוראות שפוגעות בצמח, ולהחליף אותן עם הוראות דנ"א חדשות שסייעו לצמח! הרבה צמחים מוצלחים יצאו מהתהליך הזה: יבולים שעמידים בפני חרקים מזיקים [3]; פאפאיה שעמידה לוורוס המזיק שהיה הורס חוות בכל רחבי הוואי [4]; אורז זהוב שמחוזק עם כימיקל שאנו צריכים כדי ליצור ויטמין A שיכול למנוע ממיליוני ילדים להתעורר [5]; תפוחי אדמה בריאים יותר שאינם משחימים ומפחיתים פסולת מזון [6] והרבה אחרים (איור 3).

למרות התועלות הרבות של שימוש באגרובקטריום כדי לשפר את צמחי היבול, קבוצות מסוימות מנסות למנוע את השימוש של הנדסה גנטית, ואפילו מנסות לספק מידע שגוי לקהל הרחב על הגישה הזו. אחד מחוסר ההבנות השכיחים ביותר על הנדסה גנטית הוא האמונה ששינוי הדנ"א של אורגניזם אינו טבעי, ולכן לא נכון לבצע אותו. אולם אגרובקטריום שינה את הדנ"א של צמחים עוד הרבה לפני שבני אדם למדו לעשות זאת. זה מראה לנו ששינוי רצפי הדנ"א הוא תהליך טבעי והוא חלק מהעולם שסביבנו. על ידי שימוש באגרובקטריום לשינוי הדנ"א של הצמח, אנו מנצלים תהליך טבעי כדי לפתח צמחי יבול שיזדקקו לפחות חומרי הדברה, שיהיו מזינים יותר ושיניבו מזון רב יותר תוך שימוש בפחות אדמה. שימוש בפחות אדמה הוא שיקול חשוב מאוד מאחר שאם אנו רוצים להימנע מהרס של מערכות אקולוגיות טבעיות, אנו צריכים לוודא שהחווה שלנו הן כמה שיותר פרודוקטיביות. צמחי יבול מהונדסים גנטית בהחלט יכולים לסייע לנו לגדל מזון רב יותר באמצעות פחות אדמה, כלומר להגן יותר על מערכות אקולוגיות. נוסף על כך מחקרים ארוכי טווח מאשרים כי היבולים ששונו גנטית בטוחים לאכילה [7]. למרות מה שחלק מהקבוצות שמתנגדות ל-GMOs אומרות, יבולים ששונו גנטית אינם מסוכנים יותר מכל יבול אחר שאנו אוכלים!

הנדסה גנטית
(Genetic
Engineering)

תהליך של יצירת שינויים ידועים ברצף הדנ"א של אורגניזם; נקראת גם מודיפיקציה גנטית.

מסקנות

אגרובקטריום הוא מיקרוב אדמה, פתוגן של צמחים ומהנדס גנטי. על ידי הבנת הביולוגיה של מודיפיקציה גנטית טבעית, אנו יכולים להבין טוב יותר את התהליך שמשמש לפיתוח צמחים עם מודיפיקציה גנטית, או סוגים אחרים של GMOs. אגרובקטריום מאפשר לנו לבצע שינויים מועילים בדנ"א של צמחים, מה שבסופו של דבר אומר שאנו יכולים לגדל מזונות מזינים יותר באמצעות פחות אדמה, מה שמגן על סביבתנו. אם אתם רוצים ללמוד עוד על התהליך של יצירת GMO, אתם יכולים לראות וידיאו נהדר של Science IRL בקישור הזה.

מקורות

1. Williams, M. E., and Yuan, Z. C. 2012. A really useful pathogen, *Agrobacterium tumefaciens*. *Plant Cell* 24:tpc.112.tt1012. doi: 10.1105/tpc.112.tt1012
2. Matveeva, T. V., and Otten, L. 2019. Widespread occurrence of natural genetic transformation of plants by *Agrobacterium*. *Plant Mol. Biol.* 101:415. doi: 10.1007/s11103-019-00913-y
3. Vaecck, M., Reynaerts, A., Höfte, H., Jansens, S., De Beuckeleer, M., Dean, C., et al. 1987. Transgenic plants protected from insect attack. *Nature* 328:33–7. doi: 10.1038/328033a0
4. Jia, R., Zhao, H., Huang, J., Kong, H., Zhang, Y., Guo, J., et al. 2017. Use of RNAi technology to develop a PRSV-resistant transgenic papaya. *Sci. Rep.* 7:12636. doi: 10.1038/s41598-017-13049-0
5. Ye, X. D., Al-Babili, S., Klöti, A., Zhang, J., Lucca, P., Beyer, P., et al. 2000. Engineering the provitamin A (beta-carotene) biosynthetic pathway into (carotenoid-free) rice endosperm. *Science* 287:303–5. doi: 10.1126/science.287.5451.303
6. Rommens, C. M., Ye, J., Richael, C., and Swords, K. 2006. Improving potato storage and processing characteristics through all-native DNA transformation. *J. Agric. Food Chem.* 54:9882–7. doi: 10.1021/jf0624771
7. The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. 2016. *Genetically Engineered Crops: Experiences and Prospects*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/23395

פורסם אונליין: 07 בפברואר 2022

נערך על ידי: Phillip R. Myer

מנחה מדעי: Fares Najjar

ציטוט: Weir RT and Dalzell JJ (2022) אגרובקטריום: מיקרוב אדמה, פתוגן צמחי ומהנדס גנטי טבעי. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00064-he

תורגם והותאם: Weir RT and Dalzell JJ (2020) *Agrobacterium*: Soil Microbe, Plant Pathogen, and Natural Genetic Engineer. *Front. Young Minds* 8:64. doi: 10.3389/frym.2020.00064

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

Weir and Dalzell 2022 © 2020 © **COPYRIGHT** 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

MERCY SCHOOL, גיל: 10-11

אנו כיתה של ממציאנים! אנו אוהבים לבנות וליצור כדי למצוא פתרונות לבעיות בעולם האמיתי. התלמידים שלנו מגיעים מכל רחבי האזור ללמוד בבית הספר.



הכותבים

RYAN T. WEIR

Ryan Weir הוא סטודנט בשנה אחרונה של תואר ראשון באוניברסיטת קווינס בבלפסט, והוא משלים תואר במיקרוביולוגיה. הוא לקח שנה מחוץ ללימודים כדי לעבוד עם Johnathan, ותרם לכמה פרויקטי מחקר ומאמרים מדעיים. יש לו ניסיון בשימוש באגרובקטריום כדי להנדס גנטית צמחים, והוא פיתח שיטות למנוע מאגרובקטריום למצוא צמחים באדמה. יש תשוקה לאופן שבו הנדסה גנטית יכולה לתת לצמחי יכול את היתרון במרוץ שבין צמחים לפתוגנים, והוא מקווה להבטיח לעצמו מלגת דוקטורט בשנה הבאה, ולהמשיך לחקור את הנושא הזה. *rweir12@qub.ac.uk

JOHNATHAN J. DALZELL

Johnathan Dalzell הוא חוקר בכיר של אינטראקציות צמח-טפיל, והוא ראש התוכנית לביוכימיה באוניברסיטת קווינס בבלפסט. הוא מתעניין בלחקור כיצד צמחים מתקשרים עם פחיתים ועם מיקרובים. קבוצת המחקר שלו משתמשת באגרובקטריום כדי לפתח צמחים מהונדסים גנטית שסייעו לחקור את האינטראקציות האלה. הוא גם תומך בשינוי ובהנדסה גנטית של יבולים כחלק מהפתרון לחוסר הביטחון הגלובלי במזון, והוא מקווה לשכנע את כולם שזו שיטה בטוחה ומועילה. *j.dalzell@qub.ac.uk



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטיר מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK