



כיצד תא צמח בונה דופן תא חדשה בזמן חלוקת התא?

Mingqin Chang, Georgia Drakakaki*

המחלקה למדעי הצמח, אוניברסיטת קליפורניה דייזיס, דייזיס, קליפורניה, ארצות הברית

סוקר צעיר

TARUN

גיל: 13



בין אם אתם גרים בדירה בבניין משותף, או בבית פרטי, ביתכם בנוי מחדרים שונים המופרדים באמצעות קירות. בדומה לביתכם, צמח גם מכיל חדרים, אולם הם רבים וקטנים. חדרי הצמח נקראים תאים. כמו חדרים בבית, גם תאי צמח מופרדים באמצעות קירות, שנקראים דפנות התא. דפנות אלה הן ייחודיות, ואינן נמצאות בתאים של חיות. מי שמתגורר בבניין ומבקש לפצל חדר אחד גדול לשני חדרים קטנים, בונה קיר חדש במטרה לחלק את החדר. הדבר דומה לאופן שבו תא צמח מתחלק לשני תאים במהלך חלוקת התא. כדי לבנות קיר בבניין צריך להעסיק עובדי בניין, לעצב את תוכנית הבנייה, לקנות את חומרי הבנייה, ולבסוף להרכיב את הקיר. כיצד תא הצמח מטפל בעבודות השונות האלה? במאמר זה נסביר כיצד דופן התא נבנית במהלך חלוקת התא.

מהי דופן תא צמח?

כדי שצמחים וחיות יגדלו, על התאים שלהם להתחלק ליצירת תאים נוספים. בתהליכים של חלוקת התא, תא אחד הופך לשניים. התהליך הזה שונה בתאי צמח ובתאים של חיות, מאחר שלתאי צמח יש דפנות תא. כשמסתכלים על שורש של צמח באמצעות מיקרוסקופ,

דופן תא (Cell wall)

דופן שמקיפה תא צמח, אשר יכולה לספק לתא תמיכה מבנית והגנה.

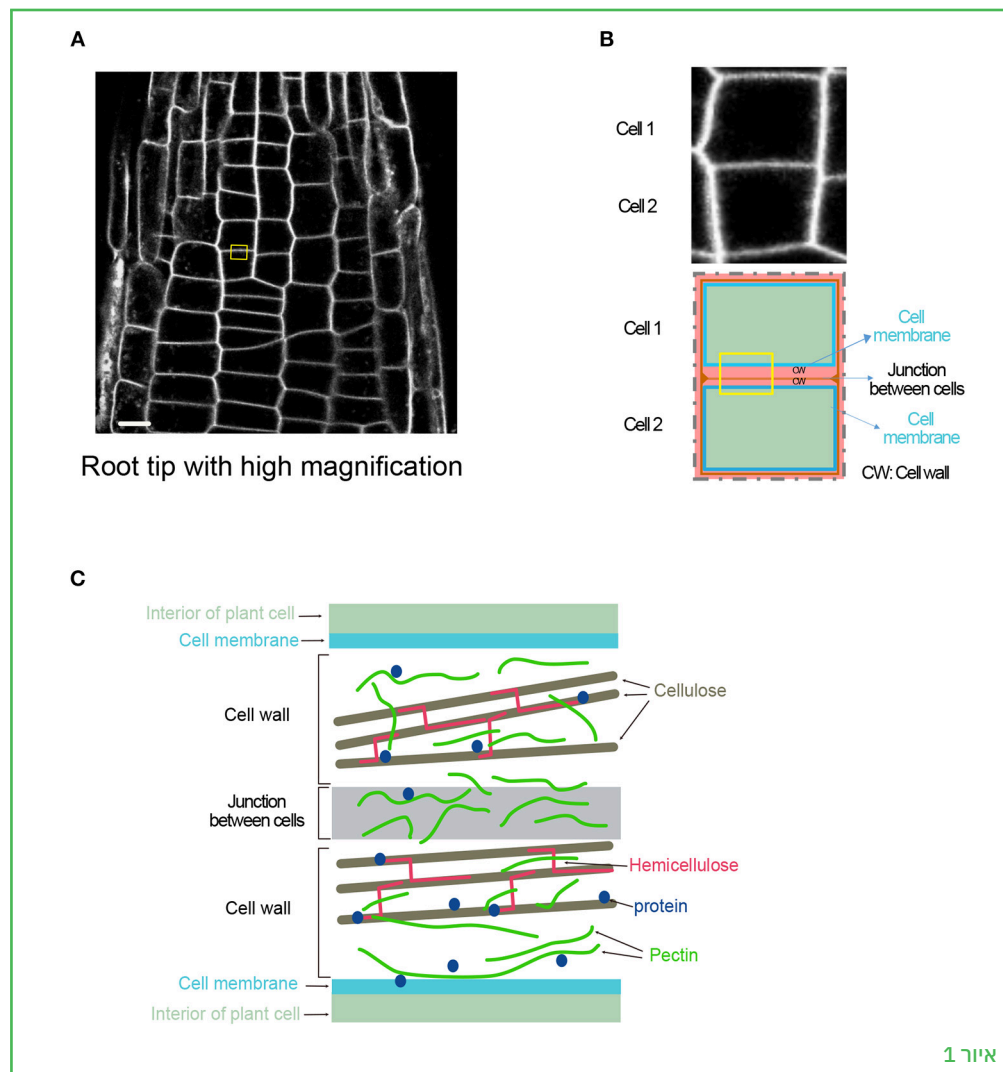
ציטוקינזה של צמח (Plant cytokinesis)

התהליך של בניית דופן תא חדשה להפרדת תא הצמח המתחלק.

איור 1

דפנות תא מפרידות תאי צמח. (A) מתחת

למיקרוסקופ תאים בקצוות שורשים נראים כמו סבכה (grid), בשל דפנות התאים הנראות בבירור. בר הסקאלה בתחתית התמונה מייצג 0.01 מילימטרים. (B) כשמבצעים תקריב על התיבה הצהובה ב-(A), ניתן לראות כי דפנות התא מקיפות כל תא לחלוטין. (C) כשמבצעים תקריב גדול יותר על התיבה הצהובה ב-(A), רואים כי דופן תא מכילה אבני בניין שמורכבות מפולימרים של סוכר, כמו למשל תאית (צלולוזה Cellulose), המיצלולוזה (Hemicellulose), פֶקְטִין (Pectin) וחלבונים (Proteins).



איור 1

Preprophase band

מבנה שמורכב ממיקרו-צינוריות ומיקרו-פילמנטים, אשר מסמן אזור של חלוקה תאית כשהתאים עומדים להתחלק.

מיקרו-צינוריות (Microtubules)

סוג אחד של פולימרים חלבוניים בתאי צמח ותאי חיות, שיכולים לספק תמיכה מבנית לתא וגם לתפקד כנתיב לתעבורה בתוך התא.

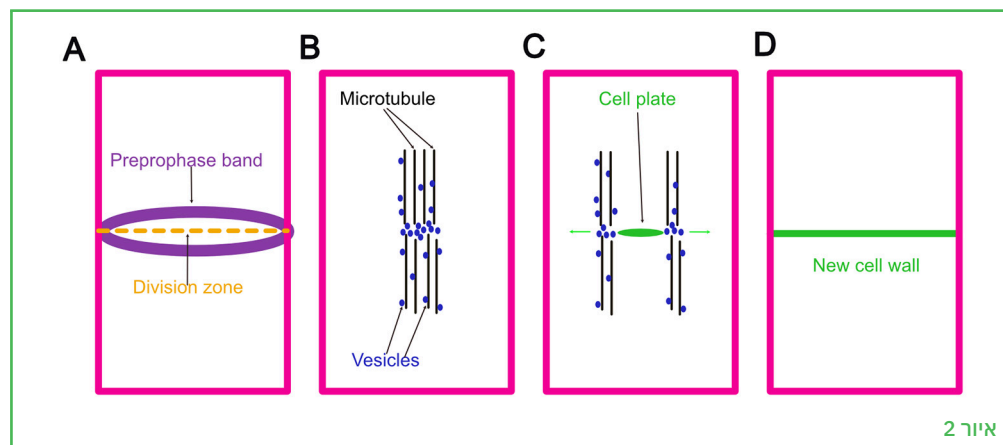
כיצד התא בוחר את אתר הבנייה?

בבנייה, ניתן לצייר סימנים על הקרקע ועל הקירות כדי להראות לפועלים היכן לבנות קיר חדש. בתא צמח, מבנה שנקרא **preprophase band** מסמן את אזור החלוקה כשהתא עומד להתחלק (איור 2A). את ה-preprophase band מרכיבים מבנים שנקראים **מיקרו-צינוריות** ומיקרו-פילמנטים. כאשר אזור החלוקה נוצר, ה-preprophase band נעלם. אולם, התא עדיין "זוכר" את המיקום של אזור החלוקה, כך שהוא יכול להנחות את ה"פועלים" בתא למקום שבו צריכה להיבנות דופן תא חדשה.

איור 2

ציטוקינזה של צמח מושלמת באמצעות בניית דופן תא חדשה. (A)

ה-preprophase band מסמן את אזור החלוקה, כך שהתא יודע היכן לבנות את הדופן החדשה. (B) בועיות (Vesicles, נושאות חומרי בנייה הנחוצים עבור דופן תא, ואת החלבונים ה"פועלים" בנתיבים הנקראים מיקרו-צינוריות (Microtubule) ומובילים לאזור החלוקה. (C) וסיקולות מתחברות יחד במרכז אזור החלוקה ויוצרות את ה-cell plate, שהוא ההתחלה של דופן התא. כאשר חומרים מוספים, ה-cell plate מתרחבת לעבר הדופן הקיימת. (D) כאשר דופן תא חדשה מושלמת, תא גדול אחד מתחלק לשני תאים קטנים.



מהם חומרי הבנייה עבור דופן התא?

אבני בניין הן רכיבים מרכזיים של קירות בחלק מהבנינים, וּבֶטוֹן הוא החומר שמדביק את הֶלְבְּנִים יחד. בדפנות תא צמח ישנן כמה אבני בניין, כמו למשל צלולוז, המיצלולוז ו-callose (רב-סוכר בצמח). בתור בטון, סבורים שהתאים משתמשים בחומר שנקרא פֶּקְטִין. שלוש אבני הבניין והבטון מורכבים מסוגים שונים של סוכרים. תְּאִית (צלולוזה) מהווה חיזוק עיקרי לדופן התא. חומר זה בדופן התא מאורגן בצורת מעין חבל חזק שנקרא מיקרופיברילות. מיקרופיברילות של צלולוז מתפקדות בתור השלד של דופן התא (איור 1C). פקטין, הבטון של דופן תא הצמח, גמיש יותר מצלולוז, ומאפשר לדופן התא להתרחב. הסתעפויות של המיצלולוז מחברות את חבלי הצלולוז, ומוקפות על ידי חוטי פקטין גמישים ליצירת רשת חזקה. אבן בניין מיוחדת שנקרא callose נמצאת בשימוש רק באופן זמני בדופן התא החדשה, לשם ייצוב אתר הבנייה ולצורך ידוא כי אבני בניין אחרות מונחות כראוי [1, 2]. נוסף על לבנים ובטון אלה שמורכבים מסוכר, בדופן התא יש גם חלבונים רבים שמפוזרים לאורכה. חלק מהחלבונים האלה מסייעים לדופן התא להשתנות ולגדול. אולם, תפקודים רבים של החלבונים האלה עדיין אינם ידועים.

הכנת הֶלְבְּנִים, הבטון והפועלים

בבניין, החומרים לבניית הקירות נוצרים על ידי חברות אספקה לבנייה, ומועברים לאתר הבנייה. תאי צמח לא יכולים לקבל חומרי בנייה מבחוץ; במקום זאת, התאים מייצרים את הֶלְבְּנִים והבטון בעצמם. פקטין והמיצלולוז נוצרים במבנה בתוך תא הצמח שנקרא גופיף גולג'י, ופועל כמפעל לייצור פולימרים של סוכר. פקטין והמיצלולוז מועברים לאתר הבנייה בוּוֹסִיקוּלוֹת (בועיות), שהן חבילות שמורכבות מממברנה. צלולוז ו-callose מיוצרים באתרי הבנייה.

ה"פועלים" שבונים את דופן התא הם חלבונים שגם מיוצרים בתא. החלבונים האלה מקבלים תפקידים מסוימים לרבות יצירת חומרי בנייה; העברת חומרים והרכבה של דופן התא. כל חלבון אחראי רק על עבודה אחת מסוימת. לדוגמה, חלבון שנקרא KNOLLE אחראי על החיבור של וסיקולות באתר הבנייה [3] (איור 3A).

פקטין (Pectin)

סוג של פולימר סוכר שניתן למצוא בדפנות התא, ויש לו מאפיינים דביקים.

תאית (צלולוזה) (Cellulose)

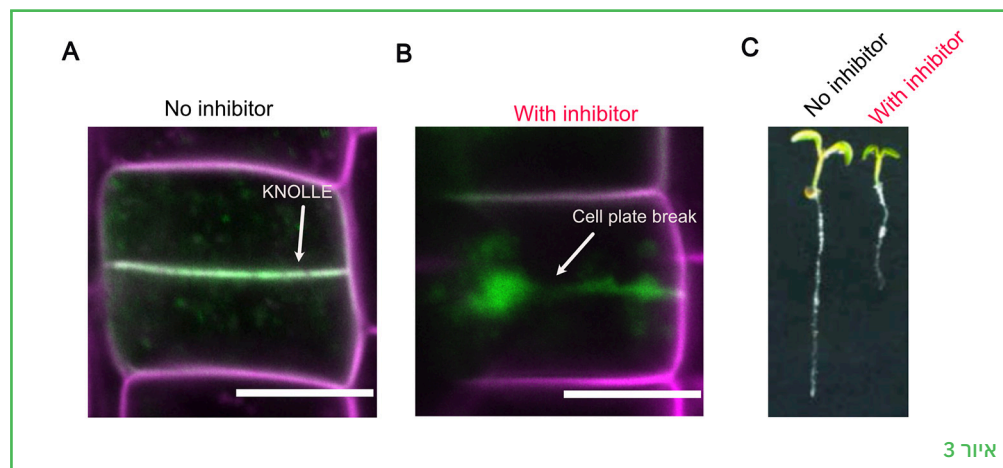
סוג של שרשרת סוכר שמתפקדת כחיזוק לדופן התא.

וסיקולות (בועיות) (Vesicles)

סוג של חבילה שמורכבת מהממברנה, ויכולה לשאת מטען ממקום אחד לאחר בתוך התא.

איור 3

ציטוקינזה חיונית עבור גדילת הצמח. (A) ציטוקינזה מוצלחת ללא מעכב כימי, החלבון הפועל KNOLLE, שמוצג בירוק פלואורסצנטי, נמצא ב-cell plate ובדופן התא החדשה שנוצרת. (B) עם הוספה של מעכב כימי, הציטוקינזה נכשלת ובניית דופן התא החדשה אינה מושלמת. ב-(A,B), סקאלת הבר היא 0.01 מילימטרים. (C) בסך הכול, המעכבים הכימיים של ציטוקינזה מדכאים בבירור את גדילת הצמח (משמאל-צמח ללא מדכא כימי, מימין-צמח עם מדכא כימי).



איור 3

כיצד התא מרכיב את דופן התא?

התא מחלק את ה"פועלים" ואת החומרים לשני אזורים, אחד בכל צד של אתר הבנייה. כל אזור מתחיל בבניית נתיבי העברה שמורכבים ממיקרו-צינוריות. לאחר מכן, לבנים, בטון ו"פועלים" מועברים לאורך נתיבי המיקרו-צינוריות באמצעות וסיקולות לאתר הבנייה (איור 2B). "פועלים" מחברים וסיקולות יחד כדי להתחיל בבניית דופן חדשה. כאשר מספיק וסיקולות מחוברות, הן יוצרות מבנה שנקרא cell plate (איור 2C). תוכלו לחשוב על ה-cell plate בתור דופן תא במצב ביניים, גמישה יותר מהדופן הסופית, אשר נשארת עד שהבנייה מסתיימת.

בבניין, דפנות של לבנים ובטון נבנות מהתחתית כלפי מעלה. באופן מעניין, דפנות של תאי צמח נבנות מהמרכז החוצה. דופן התא החדשה מתפשטת מנקודת האמצע לקצוות של דופן התא הישנה. בתחילת בניית דופן תא, הוסיקולות מועברות לנקודה המרכזית, ומספקות חומרים ל"פועלים". כאשר ה-cell plate מתרחבת, נתיבי העברה ואתרי העברת הוסיקולות מתרחבים (איור 2C). באופן הזה, הוסיקולות תמיד מועברות לקצה של ה-cell plate. ההתרחבות לא עוצרת עד ה-cell plate פוגשת את דופן התא הישנה. לבסוף, הדופן החדשה מושלמת, ותא אחד גדול מתחלק לשני תאים קטנים יותר (איור 2D). כאשר דופן התא ממשיכה להתבגר, השכבה המרכזית של ה-cell plate, שמכילה הרבה פקטין, מסייעת להדביק תאים שכנים יחד [2, 4, 5] (איורים 1B,C).

מדוע חשוב לחקור ציטוקינזה של צמחים?

מדוע חקירת ציטוקינזה של צמחים חשובה כל כך? האם צמחים יכולים לגדול בלעדיה? כדי לענות על השאלות האלה, אנו משתמשים במעכבים כימיים שמפריעים לתהליך הציטוקינזה. מעכב כימי מפריע לתהליך בניית דופן תא חדשה, מה שמותיר חור במרכז אתר הבנייה (איור 3B). אם תסתכלו על הצמח כולו אחרי טיפול עם מעכב כימי, השורש הרבה יותר קצר משורש הצמח ללא מעכב (איור 3C). הניסוי הזה מלמד אותנו כי פגמים בבניית דופן תא חדשה מאטים את גדילת הצמח. צמח אינו יכול לגדול ללא ציטוקינזה. בלעדיה, דופן התא החדשה לא תושלם, התא הגדול לא יתחלק לשני תאים קטנים, והצמחים לא ישרדו.

Cell plate

מבנה ביניים שנוצר במהלך חלוקת תא צמח, ומתבגר להיות דופן תא חדשה.

בהתבסס על מחקרים נוספים, נוכחנו שהמעכב הכימי הזה מפריע רק לשימוש ב-callose [6]—אחת מאבני הבניין של דופן התא. כפי שאתם יודעים, ציטוקינזה של צמח דורשת אבני בניין נוספות על ה-callose. כל טעות בייצור של כל אחד מחומרי דופן התא או ה"פועלים", בהעברתם, או בהרכבתם, תגרום לבעיות בציטוקינזה של הצמח. אחד מהיישומים של ה־callose הזה הוא פיתוח קוטלי עשבים. ישנם מספר קוטלי עשבים המבוססים על דיכוי ציטוקינזה.

תודות

עבודה זו נתמכה על ידי מענק NSF MCB 1818219 ועל ידי פרס המחלקה האמריקאית לחקלאות CA-D-PLS-2132-H שניתן ל-GD. אנו מודים לדוקטור Destiny J. Davis על קריאה של כתב היד הזה ועריכתו.

מקורות

1. Drakakaki, G. 2015. Polysaccharide deposition during cytokinesis: challenges and future perspectives. *Plant Sci.* 236:177–84. doi: 10.1016/j.plantsci.2015.03.018
2. Samuels, A. L., Giddings, T. H., and Staehelin, L. A. 1995. Cytokinesis in tobacco BY-2 and root tip cells: a new model of cell plate formation in higher plants. *J. Cell Biol.* 130:1345–57. doi: 10.1083/jcb.130.6.1345
3. Lauber, M. H., Waizenegger, I., Steinmann, T., Schwarz, H., Mayer, U., Hwang, I., et al. 1997. The Arabidopsis KNOLLE protein is a cytokinesis-specific syntaxin. *J. Cell Biol.* 139:1485–93. doi: 10.1083/jcb.139.6.1485
4. Smertenko, A., Assaad, F., Baluška, F., Bezanilla, M., Buschmann, H., Drakakaki, G., et al. 2017. Plant cytokinesis: terminology for structures and processes. *Trends Cell Biol.* 27:885–94. doi: 10.1016/j.tcb.2017.08.008
5. Corral-Martínez, P., García-Forte, E., Bernard, S., Driouich, A., and Seguí-Simarro, J. M. 2016. Ultrastructural immunolocalization of arabinogalactan protein, pectin and hemicellulose epitopes through another development in *Brassica napus*. *Plant Cell Physiol.* 57:2161–74. doi: 10.1093/pcp/pcw133
6. Park, E., Díaz-Moreno, S. M., Davis, D. J., Wilkop, T. E., Bulone, V., and Drakakaki, G. 2014. Endosidin 7 specifically arrests late cytokinesis and inhibits callose biosynthesis, revealing distinct trafficking events during cell plate maturation. *Plant Physiol.* 165:1019–34. doi: 10.1104/pp.114.241497

פורסם אונליין: 23 במאי 2023

נערך על ידי: Vishal Shah

מנחה מדעית: Vinuselvi Parisutham

ציטוט: Chang M and Drakakaki G (2023) כיצד תא צמח בונה דופן תא חדשה בזמן חלוקת התא? *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2021.570769-he

Chang M and Drakakaki G (2021) How Does a Plant Cell Build a New Cell Wall When Dividing? Front. Young Minds 9:570769. doi: 10.3389/frym.2021.570769

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

© 2021 © COPYRIGHT Chang and Drakakaki 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.

סוקר צעיר

TARUN, גיל: 13

אני שחקן בִּדְמִינְטוֹן ברמת המדינה. יודע היטב איך להשתמש בטכניקה של המשחק. אני גם אוהב לשחק שחמט, ומנצח בכל המשחקים נגד חבר שלי.

הכותבים

MINGQIN CHANG

גדלתי במשפחה של חקלאי ירקות בסין. קיבלתי השראה לחקור כיצד צמחים גדלים ומתרבים. אחרי שסיימתי את לימודי התואר הראשון שלי, החלטתי להתמקד ברמה בסיסית מאוד, ברמה המולקולרית והתאית, במטרה להבין כיצד צמחים שומרים על רווחתם. ערכתי פרויקטים מדעיים שאיתרו תהליכי הפצת מולקולות וחלבונים בתא, גם על הציטוסקלטון (שלד התא) וגם על הממברנה במטרה להבין את התפקידים של חלבונים שונים בגדילת התא ובחלוקתו. אני מרותק מהעובדה שתאי צמח מסוגלים לנהל אירועים מורכבים באופן אוטומטי, ונהנה מהממצא המדעי הזה.

GEORGIA DRAKAKAKI

אני פרופסורית במחלקה למדעי הצמח באוניברסיטת קליפורניה, דיוויס. מובילה קבוצת סטודנטים ומדעני מחקר שחוקרים כיצד רשת הממברנה התאית, שנקראת מערכת האנדוממברנה, שולטת על גדילת הצמח, התפתחותו ותגובתו לִסְטֶרֶס (עָקָה) חיצוני. *gdrakakaki@ucdavis.edu

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