

השימוש הפוטנציאלי בביוטכנולוגיה על מנת למזער את הירידה באיכות ואת הפחת בתוצרת חקלאית טרייה לאחר הקטיף

אמנון לרס¹

אובדן משמעותי מאוד של מזון טרי מתרחש בכל המדינות בעולם עקב פחת רב בתוצרת החקלאית הטרייה במהלך האחסון וחיי המדף. בנוסף מתרחשת ירידה באיכות התזונתית והבריאותית של התוצרת הטרייה - הפירות והירקות. פחת רב מתרחש במיוחד במדינות המתפתחות, שבהן חסרים תשתיות וידע מתאימים, אך קיים גם ברמה משמעותית במדינות המפותחות. כל זאת עקב המגבלות הקיימות ביכולת לשמור על איכות התוצרת החקלאית הטרייה, הפרי והירק, ועקב תהליכי התכלות וריקבונות שמואצים לאחר הקטיף.

רקע

אובדן משמעותי מאוד של מזון טרי מתרחש בכל המדינות בעולם עקב פחת רב בתוצרת החקלאית הטרייה במהלך האחסון וחיי המדף. בנוסף מתרחשת ירידה באיכות התזונתית והבריאותית של התוצרת הטרייה - הפירות והירקות. פחת רב מתרחש במיוחד במדינות המתפתחות, שבהן חסרים תשתיות וידע מתאימים, אך קיים גם ברמה משמעותית במדינות המפותחות. כל זאת עקב המגבלות הקיימות ביכולת לשמור על איכות התוצרת החקלאית הטרייה, הפרי והירק, ועקב תהליכי התכלות וריקבונות שמואצים לאחר הקטיף. לאחר הקטיף הפחת שונה מגידול לגידול וממדינה למדינה. במדינות מפותחות הפחת המשוער יכול לנוע בין 2%-20% כשהממוצע הכללי לאובדן תוצרת טרייה בין השדה לצרכן נאמד בכ-15%. במדינות מתפתחות הפחת יכול להתקרב אפילו ל-50%. ההערכות הגלובליות הן כי כ-30% מהתוצרת החקלאית הטרייה מתכלה לפני שהיא נצרכת, וחלקה אף נאכלת במצב איכותי ירוד אשר יכול להוביל גם לפגיעה תזונתית ובריאותית.

הפחת בתוצרת החקלאית הטרייה מצטבר בשלבים השונים של תהליך הייצור והאספקה: בשלב הגידול התוצרת עשויה להיות חשופה לפגעי אקלים, גידול לקוי ונגיעות בפתוגנים שנזקיהם יבואו לידי ביטוי רק במהלך האחסון או לאחריו; נזק משמעותי

יכול להיגרם מקטיף מוקדם או מאוחר יותר שיוביל לאיכות פגומה וירודה של הפרי/ירק, כגון חוסר הבשלה אופטימאלית.

נזקים עשויים להיגרם במהלך הקטיף והאריזה הראשונית של התוצרת הטרייה, במהלך שרשרת ההובלה, בעת האחסון באתרים הייעודיים אצל החקלאי, בחברות השיווק והיצוא, במחסני הסיטונאים, ברשתות השיווק ובבית הצרכן. הפרי והירק שאינו מתאים יותר לשיווק הופך לעתים קרובות לפסולת ולעתים מופנה לשווקים משניים כגון עיבוד בתעשייה או מזון לבעלי חיים. חלק גדול מהפחת בתוצרת הטרייה לאורך כל שרשרת האספקה הנ"ל נובע מהצטברות של הפגיעות והעקות שהפרי/הירק נחשף להן בשלבים שונים במהלך שרשרת השיווק כגון פגיעות פיזיות ופציעות, לחץ מכאני, חשיפה לטמפרטורה גבוהה או נמוכה מדי, חוסר תאורה, אי קיום אטמוספרת גזים מתאימה ואי קיום תנאי לחות מתאימים. קיים פחת שונה בגידולים השונים, וזאת גם בגלל מגבלות שונות הנובעות מאופיו ומתכונותיו המיוחדות של כל פרי ופרי.

ההשקעה במחקר ובפיתוח לשיפור טכנולוגיות לאחסון תוצרת טרייה היא כדאית מאוד מבחינה כלכלית. הקטנת הפחת ושמירת האיכות של התוצרת הטרייה לאחר הקטיף מאפשרת

¹ ד"ר אמנון לרס - המכון לחקר אחסון ואיכות תוצרת חקלאית ומזון, מנהל המחקר החקלאי מרכז וולקני, בית דגן.



של גן ממין אחר אל גנום הצמח. יתרונות ההנדסה הגנטית הם בעיקר בכך שהיא מייעלת את תהליך ההשבחה הגנטית ומאפשרת שינויים גנטיים שאינם אפשריים בהשבחה גנטית קלאסית. השימוש בהנדסה גנטית מאפשר שינויים גנטיים מדויקים ומהירים לצורך שיפור תכונות הצמח.

בנוסף להעמקת ההבנה המולקולארית ופיתוח הכלים המאפשרים יצירת צמחים טרנסגניים, הובילו המחקרים שנערכו בשנים האחרונות להבנה טובה יותר של התהליכים הביולוגיים הרלוונטיים לקביעת האיכות וליצירת פחת בתוצרת חקלאית טרייה - פירות וירקות - לאחר הקטיפה ובמהלך האחסון. תהליכים אלו הם לדוגמה, הבשלה, התרככות והזדקנות הרקמה, שהתקדמותם, שאף מואצת לעתים קרובות לאחר הקטיפה, משפיעה לרעה על איכות התוצרת. סקירה זו תתמקד במספר דוגמאות לאפשרות השימוש בטכנולוגיית ההנדסה הגנטית על מנת להשפיע על תהליכים שונים המעורבים בקביעת האיכות והמשך של חיי המדף של תוצרת טרייה. בין יתר התהליכים נזכיר את פעולת האתילן האחראי לתהליך ההבשלה בפירות מסוימים, את תהליך ההתרככות שהתקדמותו משפיעה על איכות הפרי ואת תהליך ההזדקנות שהתקדמותו משפיעה בעיקר על איכות ירקות עליים ופרחים.

שיבוש יצירת אתילן וחישתו בפרי להאט תהליך ההבשלה

ההורמון הצמחי אתילן ידוע זה שנים רבות כבעל תפקיד מפתח בבקרת תהליכים ביולוגיים שונים שלאחר הקטיפה המעורבים בקביעת האיכות של מגוון מיני פירות וירקות במהלך חיי המדף. תהליכים ביולוגיים אלו כוללים לדוגמה את תהליך ההבשלה, ההזדקנות, הנשירה, ההתרככות, יצירת חומרי טעם וארומה, איכות תזונתית ותגובה לפתוגנים שונים. פרי - כגון עגבנייה, אבוקדו ובננה, שבהם יש לאתילן תפקיד מרכזי בתהליכי ההבשלה - מכונה פרי קלימקטרי, ובו קיים שיא ביצירת אתילן במהלך ההבשלה. במהלך השנים פותחו שיטות שונות על מנת למזער את השפעתו של האתילן, ועל ידי כך להאט את תהליך ההבשלה של הפרי לאחר הקטיפה ולשמור על איכותו זמן רב יותר. שיטות אלו כוללות לדוגמה החלפת האווירה סביב אריזות הפרי או ספיחת האתילן להורדת ריכוזו באזור הפרי או שימוש

כמובן הגדלת זמינות מזון לאוכלוסייה הגדלה בייחוד במדינות המתפתחות. נושא זה מקבל משנה חשיבות לנוכח האפשרות של התממשות התחזיות למשבר המזון בעולם. במקביל מזעור הפחת לאחר הקטיפה יכול לאפשר הקטנת השטח הדרוש לעיבוד חקלאי. יצירת אפשרות חלופית להגדלת שטח הגידול מקדמת את השמירה על משאבי הטבע והסביבה. סביר מאוד להניח שפיתוח גישות להקטנת הפחת בתוצרת חקלאית טרייה יהיה לעתים יעיל יותר מניסיון להעלות את הייצור כדי לאזן את הפחת.

יש חשיבות רבה להבנה כוללת של הסיבות ליצירת הפחת ומאפייניהן, במדינות השונות ובאתרים השונים, על מנת לפתח גישות לאחסון טוב יותר של פירות וירקות. על כן החשיבות הקריטית בקיום מחקר ופיתוח מתקדמים בהיבטים של שמירת איכות התוצרת החקלאית לאחר הקטיפה ופיתוח אסטרטגיות וטכנולוגיות חדשות שיאפשרו מזעור הפחת. יש להבין כי התוצרת הטרייה היא אורגניזם חי, ולכן חשוב כל כך לקיים מחקר בסיסי מתקדם להבנת התהליכים הביולוגיים המעורבים בקביעת האיכות לאחר הקטיפה. הבנה זו תאפשר גם פיתוח זני צמחים המתאימים יותר לאחסון יעיל וארוך טווח.

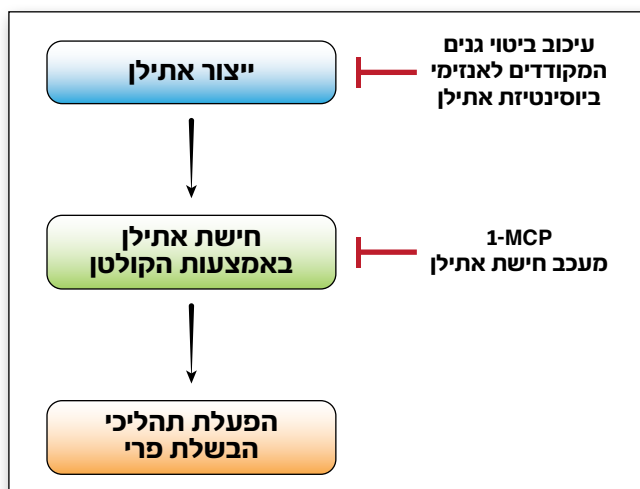
התאמת צמחים לגידול חקלאי התבססה לאורך ההיסטוריה על ההשבחה הגנטית תוך כדי ביצוע הכלאות גנטיות בתוך אותו מין, ליצירת הרכבים גנטיים חדשים, ובירור הצאצאים בעלי התכונות החקלאיות המתאימות. גם עבור שיפור האיכות לאחר הקטיפה ומשך חיי המדף נעשה שימוש בכלי ההשבחה הגנטית לאורך השנים ובמיוחד בתקופה האחרונה. בשנים האחרונות הועמקה ההבנה לגבי הבסיס המולקולארי הגנטי והקשר לפנוטיפ הפיזיולוגי, ופותחו הכלים היישומיים המאפשרים שינוי ממוקד של ביטוי גנים בצמחים או העברת גנים ספציפיים ממיני צמחים אחרים. שימוש בשיטות מולקולאריות מתקדמות המאפשרות שינוי מדויק של הגנום מכונה הנדסה גנטית או התמרה גנטית. התוצר של מניפולציה זו הוא צמח טרנסגני - צמח שעבר שינוי באמצעות הנדסה גנטית מכוונת המאפשרת שינוי ממוקד ומהיר של החומר הגנטי בצמח לשיפור איכות הגידול החקלאי. שינוי זה יכול לכלול הגברה או עיכוב של ביטוי של גן קיים בצמח או העברה



התעכב תהליך ההבשלה וזאת בהתאם למידת עיכוב ביטוי הגן המתאים. המחקרים הראשונים התמקדו בעגבנייה, ובהם נצפה תהליך הבשלה ומעבר מפרי ירוק לפרי אדום בצורה אטית יותר בצמחים הטורנסגניים. אף על פי כן, כשהפירות מצמחים טורנסגניים אלו נחשפו לאתילן חיצוני, ניתן היה לקבל האצה של תהליך ההבשלה, דבר המעיד על כך שמלבד שינוי ברמת האתילן האנדוגני המיוצר על ידי הפרי, לא חלו שינויים נוספים המעכבים את תהליך ההבשלה, ובמיוחד התגובה לאתילן. בשנים האחרונות הוכחה אפשרות השימוש במניפולציה של ביוסינתזת אתילן באמצעות הנדסה גנטית גם בצמחים אחרים כגון פרי המלון שבו ניתן לקבל דחייה של תהליך ההבשלה והנשירה של הפרי, או בפרחים, כגון ציפורן, שבו ניתן לקבל דחייה משמעותית של תהליך ההזדקנות והנבילה של הפרח הקטוף. לצד הפוטנציאל הרב ליצירת צמחים טורנסגניים שבהם יואטו תהליכי ההתכלות של הפרי כתוצאה מרמת אתילן נמוכה יותר, קיימים עדיין אתגרים הדורשים פתרון בדרך לשימוש בהנדסה הגנטית לצורך זה. לאתילן תפקידים חשובים נוספים החיוניים להתפתחות נורמאלית של הצמח ותגובות לעקות סביבתיות. בנוסף, אתילן אחראי למגוון תהליכים המתרחשים בעת ההבשלה, כולל תהליכים שחשובים לשמירת איכות טובה כגון יצירת חומרי טעם וריח או שינויי צבע ומרקם. על כן יש צורך במניפולציה שתשפיע בצורה ממוקדת ככל האפשר כדי למזער השפעות לוואי שיפגעו בהתפתחות הצמח או בתכונות רצויות בפרי. קיימות אפשרויות לכך וביניהן הגבלת השינויים לגנים הספציפיים מתוך משפחות הגנים המקודדות לאנזימים המשתתפים בתהליך יצירת האתילן, ומיקוד ההשפעה של עיכוב הביטוי לגנים הרלוונטיים לזמן ולמקום המתאים ברקמה במהלך התפתחות הפרי והבשלתו.

במקביל, כתוצאה ממחקר בסיסי, הושגה הבנה רבה של מערכת החישה בצמחים אשר מאפשרת להעביר את האות המושרה על ידי ההורמון אתילן למסלול העברת אות זה להפעלת ביטוי גנים ומסלולים ביולוגיים ספציפיים. הגילוי הראשוני שאפשר הבנה זו הוא זיהוי המולקולה המהווה את הקולטן שאליו מתקשרת מולקולת האתילן ובעקבות קישור זה מתחיל מסלול העברת האות. מיקומו של הקולטן לאתילן בתוך התא הצמחי זוהה על גבי הממברנות המרכיבות את הרשת האנדופלסמטית

במעכב המונע את פעולתו (1-methylcyclopropene (1-MCP (ראו איור 1).



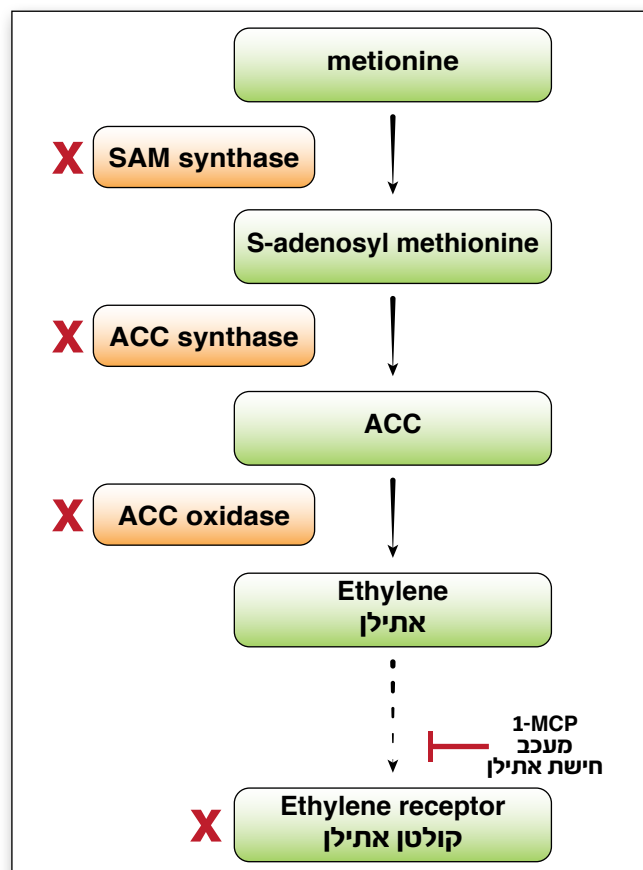
איור 1. מסלול ייצור, חישת אתילן ופעולתו והאפשרות לעכב את התהליך באמצעות עיכוב גנים שתוצריהם חיוניים למסלול ביוסינתזת האתילן או חסימת אפשרות חישת האתילן באמצעות המעכב 1-MCP.

הודות למחקרים רבים שבוצעו, יש היום הבנה טובה של המערכת האנזימטית האחראית לייצור אתילן בצמחים (איור 2). המסלול הביוכימי המוביל ליצירת אתילן מתחיל במולקולת המתיונין אשר עוברת מודיפיקציה באמצעות האנזים S-adenosylmethionine synthase ליצירת חומר הביניים S-adenosylmethionine (SAM). בהמשך SAM עובר מודיפיקציה ל-1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) באמצעות האנזים ACC synthase, וחומר הביניים ACC הופך באמצעות האנזים ACC oxidase לתוצר הסופי אתילן. עבודת המחקר לזיהוי אותם אנזימי מפתח כאחראים לביוסינתזת אתילן התבססה גם על ניסויים שבהם בוצעו שינויים מולקולאריים שהובילו לשינוי רמת הביטוי של הגנים המקודדים לאנזימים אלו. בניסויים אלו נמצאה השפעה על רמת האתילן המיוצר בצמחים הטורנסגניים שבהם בוצעו השינויים. שני אנזימי המפתח שבהם התמקד מחקר רב היו ה-ACC synthase וה-ACC oxidase (איור 2). המחקרים הראשונים הראו שכתוצאה מעיכוב ביטוי הגנים המקודדים לאנזימים אלו, הייתה רמת האנזימים המסונתזת נמוכה, ובעקבות כך נוצר פחות אתילן. בתגובה

האטת תהליך התרככות הפרי באמצעות שיבוש ביטוי גנים המעורבים בתהליך

התרככות המרקם בפרי מהווה את אחד המאפיינים הבולטים של הבשלת הפרי. אף שההתרככות היא מרכיב חשוב הקובע את איכות הפרי והתאמתו לאכילה, התקדמותו נמצאת במתאם שלילי לאפשרות האחסון ולהארכת חיי המדף. בנוסף התרככות הפרי הופכת אותו רגיש יותר לפגיעות פיזיות ולהדבקות של פתוגנים הגורמים לריקבנות. עקב משמעותו הכלכלית הגבוהה של שינוי במוצקות הפרי, היווה תהליך ההתרככות מוקד למחקר לצורך הבנת המכניזם הביוכימי העומד בבסיס שינוי במוצקות הפרי. מחקר זה הוביל להבנה שחלק משמעותי מההתרככות נובע ממודיפיקציות של הפוליסכרידים והחלבונים המרכיבים את הדופן הראשוני ואת לאמלת הביניים הנמצאת בתווך החוץ-תאי והמקשרת בין התאים. שינויים אלו, הכוללים בין היתר תהליכי קטבוליזם לפירוק המאקרומולקולות המרכיבות את שלד דפנות התאים, אחראים במידה משמעותית להחלשת המבנה ובעקבות כך לעלייה בהתרככות. במחקרים המוקדמים זהו פעילויות של אנזימים הידרוליטיים שרמתם וביטוי הגנים המקודדים להם עולים בצורה משמעותית ובמקביל לשינוי במוצקות הפרי כדוגמת העגבנייה שמשמשת פרי מודל למחקר זה. על מנת ללמוד על הקשר הישיר בין ביטוי גנים אלו לבין תהליך ההתרככות, בוצעו מחקרים לייצור צמחים טרנסגניים שבהם עוכב הביטוי של גנים ספציפיים לאותם אנזימים בעזרת טכנולוגיית ההנדסה הגנטית. אנזימים שהיוו מוקד למחקר מסוג זה כללו בין היתר: pectate lyase, polygalacturonase (PG), pectin methylesterase (PME), β -galactosidase, β -1,4-glucanase (cellulase) ועוד. אנזימים אלו אחראים לקטליזת ג'אקציות המובילות לפירוק מאקרומולקולות שונות המהוות מרכיבים בדופן התא כגון מולקולות הפקטין או הצלולוז. המחקרים שבוצעו תחילה בפרי המודל עגבנייה, הורחבו בשנים האחרונות גם לפירות עצים. לדוגמה, מחקר חדש מראה שגם בתפוח, בדומה למה שנמצא בעבר בעגבנייה, עיכוב ביטוי של הגן המקודד לאנזים polygalacturonase מוביל להאטת התרככות הפרי באחסון ולהאטה בקצב איבוד המשקל כתוצאה מאיבוד מים אטי (איור 3).

(endoplasmic reticulum). נמצא שאם סוג מסוים של מוטציה מתרחש בגן לקולטן זה יש עיכוב משמעותי של יכולת הקישור של האתילן לקולטן המקודד. בעקבות כך מתרחשת חסימה מוחלטת של פעולת האתילן, ועל כן גם עיכוב של כל התהליכים תלויי האתילן. בשונה מהמערכת שבה יש דיכוי של ביטוי הגנים המקודדים לאנזימים הביוסינטיים לאתילן, ACC synthase, ACC oxidase, במקרה של הכנסת גן המקודד לרצפטור לאתילן לצמח טרנסגני - לא יהיו פירותיו רגישים גם לאתילן חיצוני. על כן השימוש באסטרטגיה זו מוגבל למקרים שבהם יש מטרה לחסום כליל את השפעת אתילן, כגון מניעת הזדקנות של פרחים.



איור 2. שיבוש יצירת אתילן וחישתו בצמח. ניתן לשבש את יכולת סינתזת אתילן על ידי עיכוב ביטוי הגנים המקודדים לאנזימים המשתתפים בביוסינתזת ההורמון או הכנסת גן הנושא מוטציה בגן לקולטן המקנה לו חוסר רגישות להורמון. השלבים המתאימים מסומנים ב-X אדום.

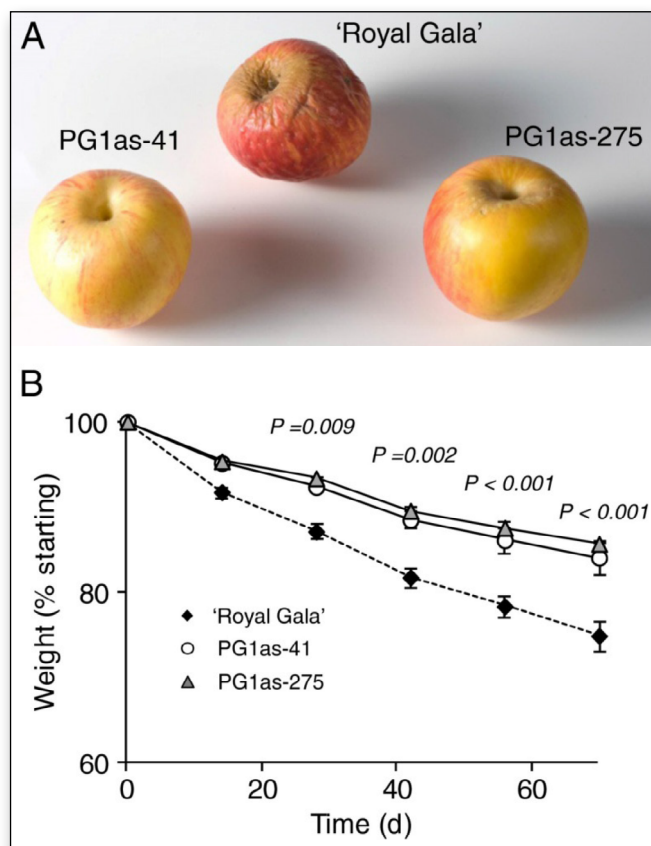


כנראה קיים הצורך בקבוצה רבת משתתפים של אנזימים שונים לפירוק מבנה מורכב זה. עם זאת נמצא שגם למניפולציה של רמת אנזים אחד או של קבוצה קטנה של אנזימים יכולה להיות משמעות מסחרית, והיא עשויה להוביל להאטה של תהליך ההתרככות ולהארכת משך חי המדף של הפרי.

האטת תהליך ההזדקנות באמצעות העלאת רמת ההורמון הצמחי ציטוקינין

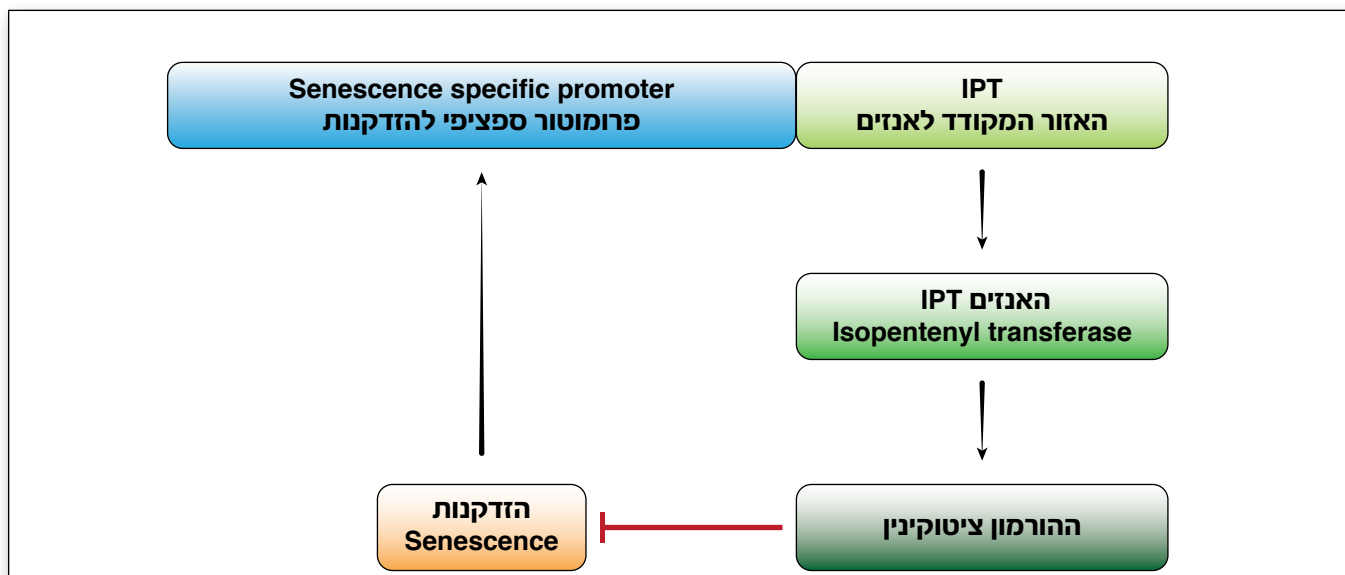
להתקדמות תהליך ההזדקנות בצמחים השפעה חקלאית שלילית משמעותית. בעת האחסון של תוצרת חקלאית טרייה, לעתים קרובות תהליך ההזדקנות הטבעי אף מואץ עקב ניתוק העלה או הפרח מצמח האם וחשיפה לתנאי העקה המלווים באחסון כגון מחסור במים, חושך או טמפרטורה קיצונית. ההזדקנות לאחר הקטיפ מובילה לירידה באיכות ופרחים ואף גורמת לרגישות גבוהה יותר כנגד פתוגנים מחוללי רקבונות. בברוקלי לדוגמה יש צורך בקירור לטמפרטורה נמוכה על מנת להאט את קצב התקדמות תהליך ההזדקנות, וזה מוביל להוצאות גבוהות וסרבול במערכת האחסון והשיווק. להתקדמות תהליך ההזדקנות הטבעי במהלך הגידול יש גם משמעות חקלאית כלכלית גבוהה שכן במחקרים רבים הודגם מתאם שלילי בין קצב התקדמות ההזדקנות לבין הבימססה של הצמח. להורמון הצמחי ציטוקינין נמצאה פעילות מעכבת הזדקנות בצמחים רבים. פעילות זו הודגמה תחילה על ידי שימוש בטיפול ריסוס שבמסגרתם הוביל יישום ההורמון ממקור חיצוני להאטת ההזדקנות. האנזים isopentenyl transferase (IPT) זוהה כאנזים המקטלז שלב קובע מהירות בביוסינתזת ההורמון ציטוקינין הצמחים. מחקרים מוקדמים הראו שהכנסת הגן IPT, ששובט מחיידק בעל יכולת ייצור ציטוקינין, לתוך גנום צמחים טרנסגניים, בשעה שביטוי הגן המוחדר מתרחש בצורה קונסטיטוטבית, מוביל לדחיית תהליך ההזדקנות בעלים. עם זאת העלאת רמת ההורמונים, כולל ציטוקינין, בצורה לא מבוקרת בצמחים גורמת לתופעות לוואי שליליות. על מנת להתגבר על בעיה זו פותחה, תחילה בטבק, מערכת שבה הביטוי של הגן IPT מתבצע תוך כדי התבססות על מערכת משוב הגורמת לעלייה ברמת הציטוקינין רק כשרקמת העלה של הצמח הטרנסגני נכנסת לתהליך ההזדקנות, כפי שמתואר באיור 4.

מערכת זו מתבססת על שימוש במרכיב רגולטורי המפעיל את

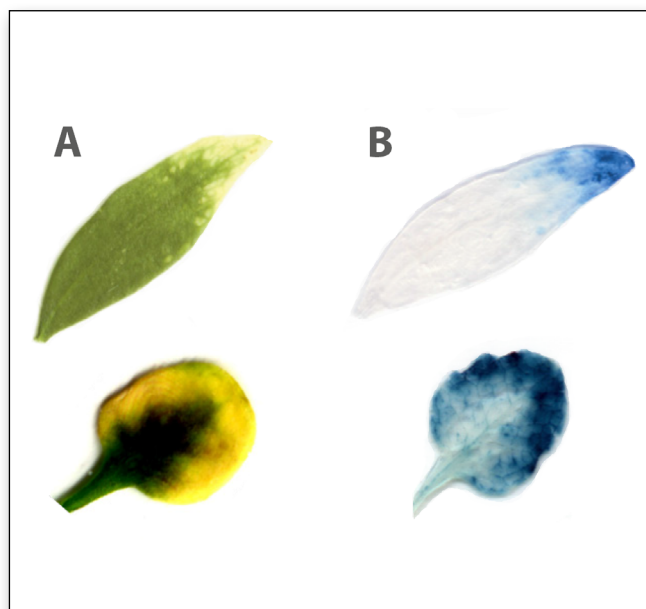


איור 3. השפעת עיכוב ביטוי הגן האנדוגני בתפוח המקודד לאנזים *polygalacturonase 1* על תפוח. בתמונה מובאים פרי הביקורת *Royal Gala* ושני קווים טרנסגניים *PG1as-41*, *PG1as-275* שבהם עוכב ביטוי הגן ל-*PG1*. התמונה (A) צולמה לאחר 9 שבועות אחסון ב-20°C ומראה שמירה טובה יותר של מוצקות הפרי הטרנסגני. בחלקו התחתון של האיור (B) מובא גרף המראה שקצב איבוד המשקל הטרי של הפרי הטרנסגני כתלות בזמן האחסון היה אטי יותר מאשר בפרי הביקורת. האיור לקוח מהמאמר המצוטט (Atkinson et al (2012).

יחד עם התקדמות המחקר בנושא הפעילויות האנזימטיות והגנים המעורבים בתהליך ההתרככות ברור כיום שדרושות פעילויות של מספר משמעותי של אנזימים שונים במקביל על מנת לקדם את תהליך ההתרככות, וכנראה לא קיים אנזים יחיד הממלא את התפקיד העיקרי בתהליך. מסקנה זו נמצאת בהתאמה למבנהו המורכב של דופן התא בצמח הבנוי ממגוון מאקרומוולקולות שונות, פוליסכרידים וחלבונים, כולל קיום קשרים ביניהם, ועל כן



איור 4. מודל תפיסתי למערכת משוב לעיכוב הזדקנות. ביטוי תחת בקרת פרומטור ספציפי להזדקנות של הגן IPT המקודד לאנזים השולט בביוסינתזת ציטוקינין הדוחה את תהליך ההזדקנות.



איור 5. פרומטור של הגן *BFN1* מאפשר ביטוי גן מדווח רק ברקמת העלה העוברת הזדקנות. הגן המדווח מקודד לאנזים הגורם לפירוק חומר מוצא לצבען כחול. מובאות תמונות של העלים לפני ביצוע הצביעה (A) ואחרי ביצוע תהליך הצביעה לחשיפת האזור שבו התבטא הגן המדווח.

ביטוי הגן המוחדר רק כשהעלה נכנס לתחילת תהליך ההזדקנות. מרכיב רגולטורי זה הוא הפרומטור שהוא מקטע ה-DNA הממוקם בתחילת כל גן, ולו תפקיד חשוב בבקרת ביטוי הגן לקביעת המקום והזמן שבהם מופעל הגן הנתון לבקרתו. לצורך בניית הגן הכימארי הכולל את האזור המקודד לאנזים IPT נעשה שימוש בפרומטור של הגן *SAG12* שנמצא במחקר נפרד כבעל יכולת להפעיל ביטוי גן רק במצב שבו הרקמה הצמחית נכנסת לשלב ההזדקנות. על ידי שיבוט פרומטור ה-*SAG12* להפעלת הגן הכימארי וביטוי IPT, מתקבלת עלייה ברמת האנזים ובעקבות כך עלייה ברמת הציטוקינין באופן ספציפי ברקמה העומדת להיכנס לשלב ההזדקנות. לאחר עלייה זו ברמת הציטוקינין ודחיית ההזדקנות יוביל הדבר לירידה בביטוי הגן IPT עקב ירידה בפעילות הפרומטור הפעיל רק במצב הזדקנות. דוגמה לפרומטור בעל תפקיד הדומה לבקרת ביטוי גנים ספציפית לתהליך ההזדקנות מובאת באיור 5. פרומטור זה מבקר באופן טבעי את ביטוי הגן *BFN1* המקודד לנוקליאז המשתתף בתהליך פירוק ה-DNA הגנומי בגרעיני התאים בעת ההזדקנות. שיטה מקובלת המאפשרת מעקב אחר פעילות פרומטורים היא שימוש בגן "מדווח". במקרה זה נעשה שימוש בגן המדווח *GUS* המקודד לאנזים היכול לקטלז β -אקציה ההופכת חומר מוצא לחומר בעל



promoter during senescence, abscission, and programmed cell death-related processes. *Journal of Experimental Botany*. 59: 3247–3258.

Gan, S.S. and Amasino, R.M. (1995) Inhibition of leaf senescence by autoregulated production of cytokinins. *Science*. 270: 1986–1988.

Gan, S.S. and Amasino, R.M. (1996) Cytokinins in plant senescence: From spray and pray to clone and play. *Bioessays*. 18: 557–565.

Hodges, R.J., Buzby, J.C. and Bennett, B. (2011) Postharvest losses and waste in developed and less developed countries: opportunities to improve resource use. *Journal of Agricultural Science*. 149: 37–45.

Lers, A. and Burd, S. (2007) The potential to retard postharvest senescence using biotechnology. *Stewart Postharvest Review*. 3: 2.

Lers, A. (2011) Potential application of biotechnology to maintain fresh produce postharvest quality and reduce losses during storage. In: *Plant biotechnology and Agriculture: prospects for the 21st century* (Altman, A. and Hasegawa, P. M., eds.), pp. 425–442. Elsevier Inc., Academic Press, Oxford.

Li, X., Xu, C.J., Korban, S.S. and Chen, K.S. (2010) Regulatory Mechanisms of Textural Changes in Ripening Fruits. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29:222–243.

Lin, Z., Zhong, S. and Grierson, D. (2009) Recent advances in ethylene research. *Journal of Experimental Botany*. 60: 3311–3336.

Prusky, D. (2011) Reduction of the incidence of postharvest quality losses, and future prospect. *Food Security*. 3: 463–474.

צבע כחול. איחוי גן זה לפרומוטור הנבחן מאפשר את זיהוי התאים שבהם נוצר הצבע עקב הפעלת על ידי הפרומוטור. ניתן לראות שהפרומוטור BFN1 הפעיל את הגן המדווח בצורה ספציפית רק באזורי העלה שנכנסו לשלב ההזדקנות (איור 5).

סיכום

בשנים האחרונות הושגה התקדמות משמעותית בהבנת הרמה המולקולארית של התהליכים הבסיסיים המשפיעים על איכות התוצרת הטרייה ושל המדדים השונים של חיי המדף, כולל זהות, דרך בקרת גנים ותפקידם של גנים שונים המעורבים בתהליכים אלו. במקביל חלה התקדמות בשיטות ההנדסה הגנטית ליצירת צמחים טרנסגניים שבהם מבוצע שינוי ברמת ביטוי של גן אנדוגני או הכנסה של גן חיצוני וחדש לצמח. מחקרים רבים ומשמעותיים כבר מספקים למעשה את הוכחת ההיתכנות של האפשרות להשתמש בהנדסה גנטית לצורך שיפור חיי המדף של תוצרת חקלאית לאחר הקטיפה. בעוד שבמדינות המפותחות יועיל שיפור כזה הן מבחינת הצרכן והן מבחינת חקלאית וכלכלית, הרי שבמדינות המתפתחות שהפחת המתרחש בהן בתחום האחסון ואורך חיי המדף הוא בעל משמעות קריטית - השימוש בהנדסה גנטית בצמחים יכול להוות גורם משמעותי בהקלת המחסור במזון. לאור התחזיות הקיימות לגבי החמרה גלובלית אפשרית במשבר המזון, נראה שחיוני לממש את הפוטנציאל הטמון בביוטכנולוגיה כדי למזער אובדן מזון טרי.

רשימת ספרות

Atkinson, R.G., Sutherland, P.W., Johnston, S.L., Gunaseelan, K., Hallett, I.C.

Mitra, D., Brummell, D.A., Schroder, R. Johnston, J.W. and Schaffer, R.J.

(2012) Down-regulation of POLYGALACTURONASE 1 alters firmness, tensile strength and water loss in apple (*Malus x domestica*) fruit. *BMC Plant Biology*. 12:129.

Farage-Barhom, S., Burd, S., Sonogo, L., Perl-Treves, R., and Lers, A. (2008). Expression analysis of the BFN1 nuclease gene



יישום: המאמר כבסיס לדילמות אתיות בתחום מדעי החיים

בהערות הדיקטיות לציון הדרך שבתכנית הלימודים של סוגיה זו נאמר כי חשוב להביא דוגמאות עדכניות לכיתה ולדון בסוגיות האתיות הנובעות מהן, זאת מאחר ונושא ההנדסה הגנטית הוא תחום המשתנה בקצב מהר. מאמרו של לרס הוא דוגמא מתאימה מחזית המדע המזמנת דיון בשימוש באמצעים ביוטכנולוגיים להפחתת ושמירת איכות התוצרת הטרייה לאחר הקטיפ - מה היתרונות והאם יש הצדקה להשתמש בצמחים טרנסגניים כדי לקדם מטרה זו? מוצע לנהל את הדיון תוך שימוש במונחים שנלמדו בכיתה ומוזכרים במאמר כמו: [ביוטכנולוגיה, גן, הנדסה גנטית, מזון מהונדס גנטית](#).

נציין כי המאמר מיועד למורים למדע וטכנולוגיה ואיננו מיועד ברמתו זו לתלמידי כיתה ט'. אולם חשוב להביא את העובדות המצוינות במאמר ולדון בסוגיות אתיות העולות ממנו.

אחד מהרעיונות המרכזיים של [תכנית הלימודים במדעי החיים לכיתות ט'](#) (רעיון 20) הוא: "להתערבות האדם בתהליכים הקשורים ברבייה ובתורשה יש השפעה מכרעת על איכות חיי האדם על הסביבה".

המאמר "השימוש הפוטנציאלי בביוטכנולוגיה על מנת למזער את הירידה באיכות ואת הפחת בתוצרת חקלאית טרייה לאחר הקטיפ" מאת ד"ר אמנון לרס המופיע בעמודים אלה, עוסק בסוגיה של התערבות האדם על ידי שימוש באמצעים ביוטכנולוגיים על מנת להפחית את אובדן המזון הטרי בעולם.

המאמר עוסק בנושא רלוונטי המופיע גם בעיתונות היומית, לדוגמא הכתבות: [אוכל לא זורקים לפח?](#), [מדענים מתריעים: האנושות עומדת בפני מחסור במזון](#).