الفصل التاسع

التربية لتحسين القدرة التخزينية

العوامل المؤثرة فى مدى صلاحية الثمار للتخزين

يجب – بداية – التمييز بين صفتى صلابة الثمار، وفترة صلاحيتها للتخزين shelf life. فقد تتساوى ثمار صنفين من الطماطم فى الصلابة عند حصادها فى طور النضج الأحمر، ولكن سريعًا ما تظهر اختلافات كبيرة بينهما – فى درجة صلابتها – خلال أسبوع واحد من تخزينها فى درجة حرارة الغرفة.

وتتوقف فترة الصلاحية للتخزين على عاملين رئيسيين، هما:

١- صلابة الثمرة عند الحصاد

حيث تزيد فترة صلاحية الثمار للتخزين بزيادة صلابتها عند الحصاد. وتختلف الصلابة باختلاف الأصناف وباختلاف مرحلة نضج الثمار عند الحصاد. تدوم تلك العلاقة لفترة قصيرة، ويظهر بعدها تأثير العامل الثانى.

٢- مدى نشاط الإنزيمات التى تعمل على تحليل المواد البكتينية pectolytic enzymes فى الثمار:

تزداد فترة صلاحية الثمار للتخزين بانخفاض نشاط هذه الإنزيمات

وتفقد الثمار صلابتها أثناء نضجها بفعل بعض التغيرات الإنزيمية فى المركبات البكتينية، وهذه التغيرات هى:

١- تلتصق خلايا الثمار غير الناضجة بشدة بواسطة مادة البروتوبكتين protipectin التى تتوفر فيها.

٢- يتحول البروتوبكتين – إنزيميًّا – أثناء نضج الثمار إلى بكتين pectin بفعل إنزيم بروتوبكتينيز.

ويعتبر البكتين أقل قدرة على لصق الخلايا من البروتوبكتين.

٣- يتحول البكتين – إنزيميًّا – مع استمرار نضج الثمار إلى مركبات أخرى؛ مثل: الأحماض البكتينية pectic acids بفعل إنزيمات البكتينيز pectinase وبولى جالا كتيورونيز polygalacturonase، وبكتين إستريز pectin-estrase.

ويرجح أن تحلل المواد البكتينية يضعف الشبكة المعقدة للمركبات العديدة التسكر فى الجدر الخلوية، مما يؤدى إلى ضعف الاتصال بين الخلايا وفقد الصلابة بالتالى (Gould ١٩٧٤). وتحدث هذه التغيرات فى المواد البكتينية سواء أكانت الثمار صلبة، أم غير صلبة (Malis-Arad وآخرون ١٩٨٣). إلا أن بعض سلالات التربية تحتوى على جينات توقف بعض هذه التفاعلات الإنزيمية أو تثبطها، مما يترتب عليه عدم فقد الثمار لصلابتها، واستمرارها بحالة صلبة لعدة أشهر، كما فى حالة الطفرات rin، و nor، و Nr، و alc، و Gr. وقد عرف الكثير عن نشاط الإنزيمات – التى تحلل المواد البكتينية – ودورها فى عملية النضج من خلال الدراسات التى أجريت على هذه الطفرات المؤثرة فى نضج الثمار.

ولقد أُجريت دراسة لتحديد المواقع الكروموسومية لإثنين وثلاثين موقعًا جينيًّا مستقلاً تتحكم فى نضج الثمار، أو الاستجابة للإثيلين، أو هما معًا باستخدام الـ RFLP (Giovannoni وآخرون ١٩٩٩).

وفى دراسة أجريت على سلالات حُصِلَ عليها من تهجين بين الطماطم والسلالة LA722 من *S. pimpinellifolium* .. أمكن التعرف على QTLs ذات تأثير متنحٍ – حُصِلَ عليها من النوع البرى – أسهمت فى زيادة فترة صلاحية الثمار للتخزين. كذلك حُصِلَ من النوع البرى على QTLs لصفات الجودة لم يسبق التعرف عليها (da Costa وآخرون ٢٠١٣).

الطفرات المؤثرة فى نضج الثمار

طفرة "مانع النضج" ripening inhibitor (rin)

يتحكم فى هذه الطفرة الجين المتنحى rin. وتتميز ثمار النباتات الأصيلة فى هذا الجين بما يلى:

١- تظل الثمار محتفظة بصلابتها لفترة طويلة بعد الحصاد، ولا تفقدها إلا ببطء شديد.

٢- لا تظهر بها ظاهرة الكلايمكترك climacteric كما فى الثمار الطبيعية.

٣- لا تتكون بها الصبغات الكاروتينية العادية بالكميات أو بالنسب التى توجد فى الأصناف العادية.

لا يمكن الاستفادة من هذا الجين إلا فى الهجن فقد؛ ذلك لأن النباتات الأصلية rin rin لا تتلون ثمارها باللون الأحمر، وأقصى ما يمكن أن تصل إليه هو اللون الأصفر. لا تكون هذه الثمار مستساغة الطعم؛ وعليه فهى لا تصلح للاستهلاك. أما ثمار النباتات الخليطة +/rin .. فيجب ألا تقطف قبل وصولها إلى طور النضج الأحمر. وإذا جمعت – وهى فى طور النضج الأخضر – فإنها لا تصل فى التلوين إلى أكثر من اللون البرتقالى المصفر، وتكون رديئة الطعم. هذا.. إلا أن طعمها يكون مقبولاً إذا قطفت وهى مكتملة التلوين (Kopeliovitch وآخرون ١٩٨٢).

ويبدو أن احتفاظ الثمار الحاملة للجين rin بصلابتها أثناء التخزين مرده إلى أنها تخلو من أى نشاط لإنزيم polygalacturonase. ففى دراسة – قورن فيها نشاط الإنزيمات pectinestrase، و polygalacturonase، و cellulase (وهى الإنزيمات المسئولة عن التغيرات التى تؤدى إلى فقدان ثمار الطماطم لصلابتها) فى ثمار على درجات مختلفة من النضج من سلالتين من الصنف رتجرز Rutgers إحداهما عادية، بينما تحمل الأخرى الجين rin – وجد أن نشاط هذه الإنزيمات فى السلالة الحاملة

للطفرة مقارنة بالسلالة العادية كان كما يلى: لم يتغير نشاط إنزيم pectinestrase أثناء نضج الثمار، وازداد نشاط إنزيم cellulase، بينما لم يلاحظ أى نشاط لإنزيم polygalacturonase (عن Whitaker ١٩٧٩).

طفرة "عدم النضج" non-ripening (nor)

يتحكم فى هذه الطفرة الجين المتنحى nor، وتتميز ثمار النباتات الأصيلة فى الطفرة بأنها تتلون ببطء شديد، وتبقى محتفظة بصلابتها لعدة أشهر بعد الحصاد. يستخدم هذا الجين — كذلك — فى الهجن فقط؛ ذلك لأن النباتات الأصيلة nor nor لا تتلون بأكثر من اللون البرتقالى المصفر بعد أكثر من ٥–٦ شهور من القطف، فضلاً على أن طعمها غير مستساغ ولا تصلح للاستهلاك. أما الثمار الخليطة nor/+ .. فإنها تنضج بصورة طبيعية، وتكتسب لونًا أحمر عاديًّا إذا تركت لتكمل نضجها على النبات؛ ويكون طعمها جيدًا — خاصة إذا أنتجت فى بيئة ملحية — أما إذا قطفت هذه الثمار قبل اكتمال تلوينها.. فإنها لا تكمل نضجها بصورة طبيعية؛ حيث تظل باهتة اللون إذا قطفت فى طور النضج الوردى، ولا تتلون إذا قطفت فى طور النضج الأخضر (Buescher وآخرون ١٩٨١).

وترجع قدرة ثمار هذه الطفرة على الاحتفاظ بصلابتها لفترات طويلة — عند التخزين — إلى ضعف نشاط إنزيم الـ polygalacturonase بها.

لم يظهر بثمار الطفرة nor/nor أىّ كلايمكترك للتنفس أو إنتاج الإثيلين، وفقدت صلابتها ببطء شديد، مع ظهور مستويات شديدة الانخفاض من نشاط الإنزيم polyglacturonase فى الثمار المكتملة التكوين، وكانت أهم الكاروتينات فيها: الـ phytoene، والبيتاكاروتين، والـ neurosporene. وعندما أصبحت الثمار بعمر ١٢٠ يومًا من العقد كانت أهم الكاروتينات فيها الليكوبين والبيتاكاروتين، إلاّ أن نسبة الليكوبين كانت أقل من ١٠٪ (Ng & Tigchelaar ١٩٧٧).

وبينما يؤدى تواجد الجين nor بحالة أصيلة إلى منع نضج الثمار كلية، فإن تواجده بحالة خليطة يؤدى إلى إطالة فترة تخزين الثمار بمقدار ٢–٣ أضعاف مقارنة بالطماطم العادية. ويتوقف تأثير الجين على جودة الثمار على الخلفية الوراثية للصنف؛ فقد يكون إيجابى أو سلبى على خصائص الطعم (Seroczynska & Niemirowicz-Szczytt ١٩٩٨).

وبالمقارنة.. فإن ثمار الهجن nor/+ rin/+ تكتسب لونًا أحمر باهتًا إذا تركت لتكمل نضجها على النبات. وتبقى هذه الثمار محتفظة بجودتها لمدة ٣–٤ أسابيع بعد الحصاد فى درجة حرارة الغرفة، ثم تبدأ البذور – بعد ذلك – فى الإنبات داخل الثمرة. أما إذا قُطفت الثمار فى مرحلة النضج الأخضر.. فإنها لا تكتسب أكثر من اللون البرتقالى المصفر بعد الحصاد.

وقد جرت محاولات لتحسين تلوين ثمار السلالات nor بإضافة الطفرات الأخرى المحسنة للون إليها، وكانت النتائج كما يلى:

١–تميزت ثمار النباتات ذات التركيب الوراثى nornor h_ph_p بصلابتها الشديدة، مع احتفاظها بجودتها لعدة شهور أثناء التخزين، وكان لون هذه الثمار أحمر فاتحاً من الخارج، وطبيعيًّا من الداخل.

٢–تميزت ثمار النباتات ذات التركيب الوراثى nornor h_ph_p og^cog^c بصلابتها الشديدة، مع احتفاظها بجودتها لعدة شهور أثناء التخزين. وكان لون هذه الثمار طبيعيًّا من الخارج، وأكثر احمرارًا من الثمار العادية من الداخل.

أما عن عدم استساغة طعم ثمار النباتات الأصيلة فى أى من الطفرتين rin، أو nor.. فيبدو أن مرده إلى خلوهما من بعض المركبات المتطايرة المسئولة عن النكهة المميزة للطماطم. فقد وجد McGlasson وآخرون (١٩٨٧) أن ثمار الطفرتين rin، و nor تخلوان من ١٥ مركبًا متطايرًا وجدت فى الثمار الطبيعية، وصنفت على أنها ذات

رائحة متوسطة إلى قوية واشتملت على: اثنين من الألدهيدات، وسبعة كحولات، واثنين من الكيتونات، وثلاثة مركبات كبريتية، ومركب فينولى واحد.

مقاومة طفرات النضج nor و rin للبوتريتس

ثبَّطت مستخلصات ثمار طفرات nor، و rin استطالة أنابيب إنبات جراثيم الفطر *Botrytis cinerea*، مقارنة بتأثير مستخلصات الثمار العادية. وقاومت الثمار الطفرية ذاتها الإصابة بالفطر؛ الأمر الذى تمثل فى إطالة فترة الحضانة التى لزمت لحدوث الإصابة، وانخفاض الإصابة أثناء التخزين. وظهر أعلى مستوى من المقاومة فى الطفرة nor وهجين الجيل الأول لها. ولقد أدت معاملة الثمار بحرارة صفرْ م لمدة ٣ أيام، أو بالماء الساخن على ٥٢ ْم لمدة ٥ دقائق — قبل عدواها بالفطر — إلى زيادة القابلية للإصابة فى الثمار العادية، وإلى كسر جزئى للمقاومة فى الثمار الطفرية (Lavy-Meir وآخرون ١٩٨٩).

طفرة "لا تنضج أبدًا" never ripe (Nr)

يتحكم الجين Nr فى هذه الطفرة التى تتميز بأن ثمارها لا تفقد صلابتها إلا ببطء شديد. وقد وجد Hobson (١٩٦٧) أن هذا الجين سائد جزئيًّا، وأن النباتات الحاملة له تنضج ثمارها وتتلون ببطء، كما تفقد صلابتها ببطء كذلك. وتميزت الثمار الحاملة لهذا الجين بقلة ذوبان المواد البكتينية فيها، وضعف نشاط إنزيم الـ polygalacturonase بها.

مقارنة بين طفرات النضج rin، و nor، و Nr

تتضمن طفرات النضج كلاًّ من nor (وهى: non-ripening)، و rin (وهى: ripening inbibitor)، و Nr (وهى: Never ripe). تقع الطفرة nor على الكروموسوم ١٠، بينما تقع rin على الكروموسوم ٥ والطفرة Nr على الكروموسوم ٩. لا تُظهر ثمار الطفرتان nor، و rin كلايمكترك التنفس وإنتاج الإثيلين. وبالمقارنة فإن الطفرة Nr لا تثبط النضج بصورة تامة، وإنما تؤخر بداية تلك المرحلة. ويبلغ كلايمكترك التنفس

وإنتاج الإثيلين فيها ٥٠٪ فقط مما يحدث فى الثمار العادية، ولا يصل فيها التلوين — أبدًا — إلى مستوى التلوين فى الثمار الطبيعية (Terai ١٩٩٠، و Atta-Aly & El-Beltagy ١٩٩٢).

طفرة "ألكوباكو" Alcobaco (alc)

يتحكم فى هذه الطفرة الجين المتنحى alc وتتميز ثمار النباتات الأصيلة فى الطفرة بأنها تحتفظ بصلابتها لفترات طويلة بعد الحصاد، إلا أنها لا تكمل تلونها بصورة طبيعية.

ويتأثر اللون النهائى للثمرة بلونها عند حصادها كما يلى:

لون الثمرة عند الحصاد	اللون النهائى للثمرة فى المخزن
أخضر	أصفر
بداية التلوين	برتقالى
بعد بداية التلوين بأسبوعين	أحمر فاتح
أحمر (الثمار مكتملة النضج)	أحمر فاتح

وتكون الثمار الناضجة — طبيعيًّا — على النبات ذات لون وطعم مقبولين، وتحتفظ بجودتها عند التخزين لفترات طويلة. ولهذا الجين المتنحى تأثير متعدد فى تلون الثمار وصلابتها ونشاط الإنزيمات المحللة للمواد البكتينية بها، وهى الإنزيمات المسئولة عن زيادة ذوبان المواد البكتينية. هذا.. ويظهر فى الجيل الثانى للهجين alc/+ تدرجات فى اللون، يعتقد أنها ترجع إلى بعض الجينات المحورة (Kopeliovitch وآخرون ١٩٨١).

وتأييدًا لذلك.. وجد Lobo وآخرون (١٩٨٤) أن هذه الطفرة يتحكم فيها جين متنح يؤدى إلى بطء كل من التنفس وإنتاج الإثيلين، وتأخير فقد الثمار لصلابتها، ونقص نشاط إنزيم الـ polygalacturonase، وزيادة فترة تخزين الثمار. وقد توصل الباحثون من دراستهم إلى أن هذا الجين آليلى للجين nor، واقترحوا الرمز nor^{A}، علمًا بأنه —

أى nor^A – كان سائدًا على آليله nor. إلا أن Mutschler (١٩٨٤أ) توصلت من دراستها إلى أن الطفرة ألكوباكو والجين nor ليسا آليليّين، ولكنهما مرتبطان ببعضيهما؛ حيث إن المسافة بينهما هى ١٧ وحدة عبور. وقد وجدت أن الجيل الأول الخليط فى كل من alc، و nor تتلون ثماره بعكس النباتات الأصيلة فى أى منهما، وهو سلوك يدل على أن الجينين غير آليليين، كما ظهرت نباتات انعزالية فى الجيل الثانى للتلقيح alc × nor، وهو ما يؤكد نفس الاستنتاج.

وقد أوضحت هذه الدراسة أن الجين alc يقع قرب نهاية الذراع القصيرة للكروموسوم رقم ١٠ على مسافة ٢٠ وحدة عبور من الجين u الخاص بالنضج المتجانس uniform ripening، وعلى نحو ١٤ وحدة عبور من الجين hy الخاص باللون الأصفر المتجانس homogenous yellow.

وفى دراسة على خصائص النضج والتخزين لثمار نباتات الطماطم الحاملة للطفرة ألكوباكو بحالة أصيلة أو خليطة.. وجد ما يلى:

١–أظهرت ثمار النباتات الخليطة فى الطفرة زيادة فى القدرة التخزينية مقدارها ٧٨٪ عما فى الصنف رتجرز.

٢–أظهرت الثمار المكتملة النضج للنباتات الأصيلة فى الطفرة زيادة فى القدرة التخزينية مقدارها ٣٠٠٪ عما فى الصنف رتجرز. كان متوسط فترة التخزين ٤٠ يومًا. هذا.. مع العلم بأن الزيادة فى القدرة التخزينية لم تكن مصاحبة بزيادة مبدئية (أى عند بداية التخزين) فى صلابة الثمار، وإنما كانت مصاحبة بنقص فى معدل فقد الثمار التامة النضج لصلابتها أثناء التخزين، مقارنة بمعدل النقص فى صلابة الثمار العادية.

٣–لم تؤثر الطفرة فى pH الثمار، أو نسبة المواد الصلبة الذائبة بها، أو على المدة من الإزهار لحين وصول الثمرة إلى مرحلة النضج الأخضر؛ إلاّ أن الطفرة أبطأت وصول الثمار – بعد ذلك – إلى مرحلة اكتمال النضج.

٤- توقفت درجة التلوين التى وصلت إليها الثمار أثناء التخزين على مرحلة النضج التى قطفت عندها؛ علمًا بأن مرحلة بداية التلوين كانت هى الحد الأدنى الذى يجب أن تقطف عنده الثمار؛ لكى تكمل نضجها بعد ذلك.

٥- قلّ إنتاج الإثيلين فى الثمار المقطوفة بمقدار ٢٥٪ عما فى الصنف رتجرز. وأثرت مرحلة نضج الثمار عند قطفها فى مدى إنتاجها للإثيلين بعد ذلك (Mutschler ١٩٨٤ ب).

هذا.. ولم تظهر تأثيرات ضارة للتركيب الوراثى الخليط فى الطفرة على لون الثمار أو صلابتها أو حجمها، إلاّ أن الخلفية الوراثية للنباتات الحاملة للجين كانت مؤثرة فى صفات جودة الثمار وقدرتها على التخزين (Mutschler وآخرون ١٩٩٢).

وقد تمكنت Mutschler (١٩٨٤) من إدخال الجين alc فى صنف الطماطم New Yorker، وأنتجت سلالة التربية Cornell 111 التى تميزت بكل صفات الصنف التجارى. غير أن ثمارها كانت أكثر صلابة وأبطأ نضجًا، وأبهت لونًا من الداخل بسبب هذا الجين. وقد توقف مدى تأثير الجين alc فى لون الثمار على الخلفية الوراثية للنبات الذى يوجد به هذا الجين؛ حيث تراوح اللون بين الردئ والمتوسط (كما فى Cornell 111) والطبيعى تقريبًا.

ولا تعرف وسيلة للتنبؤ بلون الثمار قبل إجراء التلقيحات، إلا أن الدراسة أوضحت أن هذا الجين يؤدى مع الجين المسئول عن الكتف الأخضر فى الثمار غير الناضجة إلى أن تصبح أكتاف الثمار صفراء زاهية عند النضج دون أن تكتسب لونًا أحمر. ولهذا اقتُرح إدخال الجين alc فى الأصناف التى تحتوى على الجين u المسئول عن لون الثمار الأخضر المتجانس، وخاصة أنه وجد ارتباط قدره ٢٠ وحدة عبور بين الجينين Alc، و U.

هذا.. ويمكن انتخاب النباتات الأصيلة فى الجين alc باختبار القدرة التخزينية لثمارها بعد أن تنضج طبيعيًّا على النبات. كما يمكن تمييز النباتات الخليطة فى

الجين، لأن ثمارها تتحمل التخزين على درجة ٢٠ °م لمدة تزيد بنحو ٥٠٪ على المدة التى تبقى خلالها الثمار العادية مخزنة بحالة جيدة. وإذا قطفت ثمار النباتات الأصيلة فى الطفرة – وهى خضراء ناضجة – فإنها لا تتلون أبدًا بصورة طبيعية، حيث لا يزيد تلوينها عن اللون البرتقالى المصفر. وبرغم أنه يمكن الاستفادة من هذه الخاصية فى انتخاب النباتات المتنحية الأصيلة مبكرًا.. إلا أنه لا ينصح باتباع هذه الطريقة؛ لأنها لا تسمح بانتخاب التراكيب الوراثية التى يكون لون ثمارها الداخلى جيدًا.

إن الثمار الـ alcobaca تتميز بقدرتها العالية على التخزين، إلاّ إنها لا تتلون بشكل جيد كما أسلفنا. وفى محاولة لتحسين لونها بنقل الجينين og^c (وهو: crimson)، و hp (وهو: high pigment) إلى التركيب الوراثى الحامل للجين alc، وجد أن التراكيب الوراثية التالية مثّلت حلاً وسطًا جيدًا للجمع بين المحصول، والصلاحية للتخزين، وصفات جودة الثمار (de Araújo وآخرون ٢٠٠٢):

$alc^+/alc\ og^{c+}/og^c\ hp^+/hp$

$alc^+/alc\ og^c/og^c\ hp^+/hp^+$

$alc^+/alc\ og^{c+}/og^{c+}\ hp^+/hp$

طفرة "النضج الأخضر" Green Ripe (Gr)

يتحكم فى هذه الطفرة الجين السائد Gr الذى جاء ذكره لأول مرة فى عام ١٩٥٢. وهو جين يؤدى إلى عدم تحلل الكلوروفيل فى الثمار الناضجة. وقد عزلت الطفرة من كيميرا ثمرية ظهرت فيها مقاطع خضراء وأخرى حمراء. وليست هذه الطفرة آليلية لأى من الجينات rin، أو nor، أو Nr.

وقد وجد Jarret وآخرون (١٩٨٤) أن ثمار النباتات الحاملة لهذا الجين يظهر بها الكلايمكترك، وتنتج كميات متزايدة من الإثيلين بعد الحصاد، ولكن مع تأخر كبير؛ حيث يبلغ أقصى إنتاج للإثيلين بعد بداية الزيادة بنحو ٢٠ يومًا. كذلك.. فإن نشاط

إنزيم الـ Polygalacturonase يزيد مع تقدم الثمار فى العمر، إلا أنه لا يصل إلى أكثر من ٣٪-٥٪ من نشاط الإنزيم فى الصنف رتجرز؛ وعليه.. فإن الثمار الحاملة لهذا الجين تظل صلبة لفترة طويلة بعد الحصاد. وقد تبين أن تأثير الجين على كل من معدل إنتاج الإثيلين ونشاط الإنزيم سائد سيادة تامة.

التحويل الوراثى لزيادة القدرة التخزينية

استخدمت أساليب الهندسة الوراثية فى زيادة القدرة التخزينية لثمار الطماطم، وذلك بتحويلها وراثيًّا بجينات تُبطئ من فقدها لصلابتها ومن حدوث التغيرات الفسيولوجية التى تُسهم فى ضعف قدرتها التخزينية.

يُعرف ما لا يقل عن ٢٥ جينًا يظهر تأثيرها أثناء نضج الثمار وتم عزلها (cloned)، وتبين أن غالبيتها – بما فى ذلك الـ polygalacturonase الذى يُحوِّر قوام الثمرة – متخصصة فى النضج. كذلك أمكن عزل جينات للـ ACC synthase، والـ ACC oxidase اللذان يتحكمان فى تمثيل الإثيلين الذى يلعب دورًا حاسمًا فى النضج. ولقد أمكن تثبيط نشاط كلاً من الـ polygalacturonase، والـ pectinesterase، والـ ACC synthase، والـ ACC oxidase، والـ phytoene synthase فى نباتات طماطم محولة وراثيًّا باستعمال تكنولوجيا الشفرة المضادة. كذلك أمكن تثبيط التعبير عن عدة جينات بتثبيط الـ sense genes. وقد أظهرت الشفرة المضادة ذات النشاط المنخفض للإنزيم polygalacturonase تحسنًا فى قوام الثمرة. كذلك أظهرت الثمار ذات الشفرة المضادة لكل من الـ ACC synthase والـ ACC oxidase بُطئًا فى النضج وفى تغيرات بعد النضج. وأظهرت نباتات الشفرة المضادة فى الـ ACC oxidase تأخيرًا – كذلك – فى شيخوخة الأوراق (Grierson & Fray ١٩٩٤).

التحويل بالشفرة المضادة لكل من الإنزيمين PG، و PE

أمكن تحويل الطماطم وراثيًّا بالشفرة المضادة لكل من الإنزيمين polygalacturonase

(اختصارًا: PG)، و pectinestrase (اختصارًا: PE). أدى التحويل الأول إلى غياب إنزيم الـ PG فى الثمار الخضراء، ولكن تمثيله لم يتوقف أثناء النضج، حيث أمكن التعرف على ما لا يقل عن ثلاثة طرز من الـ isoenzymes لهذا الإنزيم، إلاّ أن نشاطها كان ضعيفًا؛ الأمر الذى ترتب عليه تحسن فى قابلية الثمار للتخزين وفى تحملها للشحن. أما التحويل الوراثى الثانى بالشفرة المضادة للـ PE فلم يكن له تأثير ملموس على فسيولوجى الثمار (Tucker وآخرون ١٩٩٢).

وقد انخفض نشاط إنزيم الـ polygalacturonase بأكثر من ٩٩٪ فى ثمار النباتات المحولة وراثيًّا لخفض نشاط الإنزيم، وأظهرت تلك الثمار بطئًا فى فقدها لصلابتها أثناء التخزين، وزيادات فى كل من لزوجة العصير وكمية العصير والمعجون، مقارنة بالوضع فى الثمار غير المحولة وراثيًّا. كذلك ازدادت فى الثمار المحولة وراثيًّا المقاومة للفطرين *Geotrichum candidum*، و *Rhizopus stolonifer* اللذان يصيبا الثمار — عادة — أثناء نضجها (Schuch وآخرون ١٩٩١، و Kramer وآخرون ١٩٩٢).

ولقد أُنتج صنف الطماطم FLAVR SAVR المحول وراثيًّا بالشفرة المضادة للـ RNA؛ لأجل تنظيم التعبير عن جين الـ polygalacturase فى الثمار أثناء نضجها. يُعد هذا الإنزيم أحد أكثر البروتينات تواجدًا فى ثمار الطماطم الناضجة، والذى يُعد مسئولاً عن فقد الثمار الناضجة لصلابتها. ويعد هذا الصنف أول غذاء كامل حُوِّل وراثيًّا وعُرِض للبيع تجاريًّا (Kramer & Redenbaugh ١٩٩٤).

وأظهرت نتائج تسع تجارب حقلية عدم اختلاف FLAVR SAVR عن أصناف أخرى من الطماطم فى أى من صفات النمو والصفات البستانية أو القيمة الغذائية أو صفات الجودة للتصنيع، وكان الاختلاف الوحيد فى الصفات التى تتعلق بالبكتين، وفى تواجد جين المقاومة للكاناميسين ومُنتَجهُ (Redenbaugh & Hiatt ١٩٩٣). وقد حُصِلَ على نتائج مماثلة لِما سبق فى طماطم أخرى حُوِّلت وراثيًّا بخفض مستوى نشاط إنزيم البولى جالاكتيرونيز بها، ولا يُشكل استهلاكها أى خطورة على صحة الإنسان (Poole ١٩٩٣).

التحويل بالشفرة المضادة للإنزيم PME

أظهرت ثمار الطماطم المحولة وراثيًّا بالشفرة المضادة لجين الإنزيم pectin methyl estrase (اختصارًا: PME) انخفاضًا فى نشاط الإنزيم مع تحسن فى صفات الجودة تمثل فى زيادات (مقارنة بالثمار العادية) قدرت بنحو ٥,١٪ فى كمية العصير المستخلصة منها، و ٥,٣٪ فى محتوى المواد الصلبة الكلية، و ٣,٨٪–٦,١٪ فى محتوى المواد الصلبة الذائبة، و٧٠٪ – ٨٠٪ فى اللزوجة المتدفقة efflux viscosity، ١٨٠٪ – ٢٢٠٪ فى لزوجة السيرم serum viscosity. وكانت صفات جودة الكاتشب المجهز من الثمار المحولة وراثيًّا أفضل منها فى الكاتشب المجهز من الثمار العادية. هذا.. ولم يكن لتوقيت الحصاد أهمية فى صفات جودة العصير (Thakur وآخرون ١٩٩٦).

التحويل بالشفرة المضادة للإنزيم ACC synthase

أدى تحويل الطماطم وراثيًّا بالشفرة المضادة للإنزيم ACC synthase إلى تثبيط نضج الثمار، وأدت معاملة تلك الثمار بالإثيلين أو بالبروبلين إلى إعكاس التأثير المثبط للتحويل الوراثى (Oeller وآخرون ١٩٩١).

التحويل بالشفرة المضادة للإنزيم ACC oxidase

بينما نجد أن الصلابة العالية لسلالات الطماطم الحاملة للجين rin أو nor مردها – جزئيًّا – إلى انخفاض نشاط إنزيم الـ polygalacuronase فيها، فإن سلالات الطماطم المحولة وراثيًّا بالشفرة المضادة للإنزيم ACC-oxidase – المسئول عن تمثيل الإثيلين – يحدث فيها تثبيط لتكوين الصبغات اللونية على الرغم من عدم حدوث تثبيط فيها لطراوة الثمار أثناء نضجها. ولم يؤثر الانخفاض الشديد فى إنتاج الإثيلين فى فقد الثمار لصلابتها أو فى مستوى إنزيم الـ polygalacturonase، لكنه ساعد فى تحسين بقاء الثمار صالحة للاستهلاك (Hobson & Murray ١٩٩٤).

التحويل بالجين ACC deaminase

أمكن تحويل الطماطم وراثيًّا بالجين ACC demainase، الذى حُصِلَ عليه من أحد الأنواع البكتيرية التى تعيش فى التربة. تميزت ثمار النباتات التى حُوِّلت وراثيًّا بهذا الجين بانخفاض إنتاجها من الإثيلين، مع تأخير فى نضجها وبقائها صلبة لمدة تزيد بما لا يقل عن ستة أسابيع عن نظيراتها غير المحولة وراثيًّا (Klee وآخرون ١٩٩١).

التحويل بجين الـ expansin

يعمل جين الـ expansin (وهو: LeExp1) على إنتاج الـ expansins، وهى بروتينات تسبب تفكيك الجدر الخلوية، وقد أدى تثبيط عمل هذا الجين إلى إنتاج ثمار أكثر صلابة خلال جميع مراحل النضج، وأكثر قدرة على التخزين على ١٣ °م، حيث ازدادت فترة صلاحيتها للتخزين بنحو ٥–١٠ أيام. كذلك ازدادت لزوجة عصير الثمار المحولة وراثيًّا بمقدار ١٩٪ عما فى الثمار العادية، وذلك دون أن يؤثر التحويل الوراثى على حجم الثمار أو أعدادها (Brummell وآخرون ٢٠٠٢).