من العفن لمدة ١٠ أيام على ٢٠°م، وإن ظهرت إصابات متفرقة بعفن ريزوبس الطرى الذى يسببه الفطر *Rhizopus stolonifer*، هذا فى الوقت الذى أصيبت فيه ٥٠٪ - ١٠٠٪ من الثمار بالعفن إن لم يحتوى ماء التبريد (الملوث بالبكتيريا) على الكلورين. ولم تظهر أى دلائل على حدوث أى أضرار على ثمار الطماطم التى دخلها محلول الكلورين بتركيز ٢٠٠ جزء فى المليون (Vigneault وآخرون ٢٠٠٠).

وغالبًا .. يكون تبريد الطماطم بعد تجهيزها فى بالتات إلى ٢٠°م للإنضاج أو إلى ١٢ °م للتخزين. ويتم التبريد — عادة — فى الحجرات المبردة، ولكن التبريد بطريقة الدفع الجبرى للهواء يعطى نتائج أفضل. وإذا ما كانت حرارة اللب فى الطماطم المعبأة والمجهزة فى بالتات ٢٨°م، فإنها ترتفع بمقدار درجتين — مباشرة — بعد وضع النباتات فى حرارة ٢٠°م، ثم تبرد تدريجيًا إلى ٢٣°م فى خلال ٢٤ ساعة.

وبالمقارنة فإن تلك الطماطم يمكن تبريدها إلى ٢٠°م بطريقة الدفع الجبرى للهواء فى خلال ساعتين ونصف الساعة؛ وبذا .. يكون نضجها أكثر تجانسًا فى مختلف كراتين البالتة.

ويجب فى جميع الأحوال عدم تعريض الثمار لحرارة تقل عن ١٠°م لأكثر من ٢٤ ساعة؛ لكى لا تصاب بأضرار البرودة.

فسيولوجيا الطماطم بعد الحصاد

التغيرات المصاحبة لنضج الثمار

يصاحب نضج ثمار الطماطم، وانتقالها من مرحلة اكتمال النمو وهى خضراء إلى طور النضج الأحمر حدوث تغيرات فى مكونات الثمار تؤثر فى خصائصها، وفى صفات الجودة بها، وتكون بصورة تدريجية، وهى كما يلى:

١ — فقد الكلوروفيل.

٢ — زيادة محتوى الثمار من الصبغات، مثل الليكوبين، والبيتاكاروتين.

٣ — تحلل النشا، وتكوين الجلوكوز والفراكتوز، وزيادة نسبة السكريات، ولكن مع

انخفاض فى تركيز كل من الجالاكتوز galactose والأرابينوز arabinose (Gross & Wallner ١٩٧٩).

٤ – زيادة معدل التنفس حتى مرحلة النضج الوردى – التى تتوافق مع الكلايمكترك Climacteric – ثم انخفاضه قليلا بعد ذلك. وقد كان يُعتقد أن ثمار الطماطم المقطوفة – فقط – هى التى تظهر بها الزيادة الحادة فى معدل التنفس التى تصاحب مرحلة الكلايمكترك؛ الأمر الذى حدا بالبعض إلى القول بأن ثمار الطماطم ليست كلايمكتيرية. إلا أن Andrews (١٩٩٥) وجد أن معدل تنفس ثمار الطماطم يزداد أثناء نضجها بمقدار ١٠٠٪ سواء أكانت الثمار مفصولة عن النبات، أم متصلة به.

٥ – زيادة إنتاج الثمار من غاز الإثيلين.

٦ – انخفاض pH الثمار إلى أدنى مستوى له (حوالى ٤,١) فى طور بداية التلون، ثم ارتفاعه إلى أن يصل إلى أعلى مستوى له (حوالى ٤,٥) فى طور النضج الأحمر.

٧ – نقص صلابة الثمار.

٨ – زيادة محتوى الثمار من البكتينات الذائبة soluble pectins.

٩ – زيادة نشاط إنزيم البولى جالاكتيورونيز Polygalacturonase، وهو الإنزيم الرئيسى المسئول عن طراوة الثمار أثناء نضجها.

١٠ – زيادة تركيز حامض الجلوتامك glutamic acid.

١١ – إنتاج المركبات المسئولة عن النكهة المميزة للطماطم.

١٢ – ارتفاع محتوى الثمار من حامض الأسكوربيك (فيتامين جـ) ابتداءً من طور النضج الوردى.

١٣ – زيادة نسبة حامض الستريك إلى حامض الماليك.

١٤ – زيادة محتوى الثمار من المواد الصلبة الذائبة الكلية.

١٥ – تحلل المادة القلوية السامة ألفا توماتين tomatine.

ويبين جدول (١–٢) التغيرات التى تحدث فى محتوى ثمار الطماطم – من مختلف المركبات – أثناء نضجها.

جدول (١-٢): التغيرات الكمية التى تحدث فى محتوى ثمار الطماطم من مختلف المركبات الكيميائية أثناء نضجها[أ] (عن Salunkhe & Desai ١٩٨٤).

المحتوى[ب]	مرحلة نمو ونضج الثمرة				
	الأخضر المكتمل النمو	بداية التلوين	الوردى	الأحمر	الأحمر التام
المادة الجافة (٪)	٦,٤٠	٦,٢٠	٥,٨١	٥,٨٠	٦,٢٠
الحموضة المعايرة (٪)	٠,٢٨٥	٠,٣١٠	٠,٢٩٥	٠,٢٧٠	٠,٢٨٥
الأحماض العضوية (٪)	٠,٠٥٨	٠,١٢٧	٠,١٤٤	٠,١٦٦	٠,١٩٤
حامض الأسكوربيك (مجم ٪)	١٤,٥	١٧,٠	٢١,٠	٢٣,٠	٢٢,٠
الكلوروفيل (مجم ٪)	٤٥,٠	٢٥,٠	٩,٠	صفر	صفر
بيتاكاروتين (مجم ٪)	٥٠,٠	٢٤٢,٠	٤٤٣,٠	–	–
الليكوبين (مجم ٪)	٨.٠	١٢٤,٠	٢٣٠,٠	٣٧٤,٠	٤١٢,٠
السكريات المختزلة (٪)	٢,٤٠	٢,٩٠	٣,١٠	٣,٤٥	٣,٦٥
البكتينات (٪)	٢,٣٤	٢,٢٠	١,٩٠	١,٧٤	١,٦٢
النشا (٪)	٠,٦١	٠,١٤	٠,١٤	٠.١٨	٠,٠٧
المركبات المتطايرة (جزء فى البليون)	١٧,٠	١٧,٩	٢٢,٣	٢٤,٦	٣١,٢
المركبات المختزلة القابلة للتطاير (جزء فى البليون)	٢٤٨,٠	٢٩٠,٠	٢٥١,٠	٢٧٨,٠	٤٠٠,٠
الأحماض الأمينية (مول ٪)	–	٢٣٥٨,٠	٣٢٥٩,٠	٢٩٤١,٠	٢٧٢٣,٠
النيتروجين البروتينى (مجم نيتروجين لكل جم وزن جاف)	٩,٤٤	١٠,٠٠	١٠,٢٧	١٠,٢٧	٦,٩٤

(أ) أخذت جميع القياسات على الصنف فيربول Fireball، فيما عدا تقدير محتوى الأحماض الأمينية الذى سُجّل على الصنف موسكو Moscow.

(ب) كانت جميع التقديرات على أساس الوزن الجاف إلا فى الحالات المحددة بغير ذلك.

تعد نسبة محتوى ثمرة الطماطم من المواد الصلبة إلى حموضتها المعايرة، أو أى من هذين المحتويين خصائص مهمة فى تحديد مذاق الطماطم. والسكريات الرئيسية هى

الجلوكوز والسكروز بكميات متساوية تقريبًا، بينما حامضى الستريك والماليك هما الحامضان العضويان الرئيسيان، مع سيادة حامض الستريك. ولقد أمكن التعرف على أكثر من ٤٠٠ مركب متطاير فى ثمار الطماطم كان لنحو ١٦ مركبًا منها رائحة تدل على أنها يمكن أن تُسهم فى إضفاء المذاق المميز للطماطم، ولكن دون أن ينفرد أى منها بإضفاء صفة المذاق.

وقد اقتُرِحَ أن خلطة من تسعة مركبات يمكن عند تواجدها بنسب معينة إعطاء المذاق المميز للطماطم، وتلك المركبات هى:

cis-3-hexenal

hexanal

1-penten-3-one

3-methylbutanal

trans-2-hexenal

6-methyl-5-hepten-2-one

methyl silicylate

2-isobutylthiazole

β-ionone

ومن بين تلك المركبات فإن لكل من cis-3-hexenal، و β-ionone وزنًا أكبر فى تحديد نكهة الطماطم المميزة، كما أن الطماطم تنفرد بالمركب 2-isobutylthiazole. كذلك يبدو أن للمركب furaneol أهمية فى تحديد مذاق الطماطم (Baldwin ٢٠٠٤).

ونلقى — فيما يلى — مزيدًا من الضوء على التغيرات التى تحدث فى مكونات خلوية معينة، أو فى أنشطة إنزيمية بعينها.

التغيرات فى السكريات والأحماض العضوية والحموضة المعايرة

تشكل السكريات والأحماض العضوية معظم المادة الجافة فى ثمرة الطماطم. وبينما

تزداد نسبة السكريات بانتظام من مرحلة اكتمال نمو الثمار وهى خضراء إلى طور النضج الاستهلاكى (الأحمر التام)، فإن الحموضة المعايرة تصل إلى أعلى معدلاتها فى طور بداية التلوين، ثم تنخفض – عادةً – فى مراحل النضج الأكثر تقدمًا. كذلك يكون تركيز حامضى الستريك والماليك أعلى ما يمكن فى طور بداية التلوين عنه فى طور النضج الأحمر. وتتشابه الثمار الكريزية الصغيرة مع الثمار العادية الكبيرة فى معظم هذه التحولات.

ففى صنفى الطماطم الكريزيين لارج رد شيرى Large Red Cherry، وسمول فراى Small Fry، وجد Picha (١٩٨٧) أن تركيز كل من الفراكتوز والجلوكوز ازداد تدريجيًا فى الثمار ابتداءً من مرحلة الثمار الخضراء غير مكتملة النمو إلى حين وصولها إلى طور النضج الأحمر، بينما حدث العكس بالنسبة لتركيز السكروز الذى كان أعلى فى الثمار الخضراء مكتملة النمو عنه فى طور النضج الاستهلاكى، إلا أن تركيز السكروز فى جميع مراحل نمو ونضج الثمرة كان أقل كثيرًا من تركيز كلٍّ من الفراكتوز والجلوكوز. وقد كان حامض الستريك أعلى الأحماض العضوية تركيزًا، كما ازداد تركيزه – تدريجيًا – ابتداءً من مرحلة الثمار الخضراء غير مكتملة النمو إلى حين وصولها إلى طور النضج الوردى، حيث ظل تركيزه ثابتًا بعد ذلك إلى أن وصلت الثمار إلى مرحلة النضج الأحمر، هذا بينما لوحظ انخفاضٌ فى تركيز حامض الماليك بداية من مرحلة الثمار الخضراء مكتملة النمو إلى حين وصولها إلى طور النضج الاستهلاكى.

وقد قارن Koutsos وآخرون (١٩٩٤) التغيرات التى تحدث فى الثمار التى تنضج طبيعيًا على النباتات مع تلك التى تحدث فى الثمار التى تنضج أثناء التخزين، ووجدوا أن رقم حموضة الثمار (الـ pH) يرتفع، بينما تنخفض حموضتها المعايرة أثناء النضج فى كلتا الحالتين، إلا أن محتوى الثمار من المواد الصلبة الذائبة ازداد فى الثمار التى تركت لتنضج طبيعيا قبل حصادها، وانخفض فى الثمار التى قطفت وهى خضراء مكتملة النمو، ثم أكملت نضجها أثناء التخزين، سواء أكان التخزين فى الظل، أم فى الضوء المباشر.

ويمكن إيجاز أهم التغيرات التي تطرأ على محتوى ثمار الطماطم من مختلف المواد الكربوهيدراتية والإنزيمات التي تنظم تلك التغيرات – أثناء نضج الثمار – فيما يلي:

١ – اختفاء النشا كلية – تقريبًا – فى مرحلة النضج.

٢ – ازدياد محتوى الثمار من السكريات الكلية والمختزلة بمقدار خمسة أضعاف، وذلك من مرحلة قبل النضج إلى مرحلة النضج.

٣ – انخفاض محتوى الثمار من السكريات غير المختزلة أثناء النضج.

٤ – انخفاض نشاط الإنزيم sucrose synthase بشدة وبصورة متوازية مع الانخفاض فى مستوى النشا فى الثمار خلال مراحل نموها.

٥ – لا يحدث تغير فى نشاط الإنفرتيز invertase (يسمى حاليًا: –‹beta› fructofuranosidase).

٦ – ينخفض محتوى الـ hemicellulose الكلى كثيرًا من ١٦٪ إلى ٥,٥٪ أثناء النضج، بينما لا يحدث تغير واضح فى محتوى عديدات التسكر الأخرى بالجدر الخلوية.

٧ – يزداد نشاط الـ polygalacturonase بمقدار خمسة أضعاف أثناء النضج.

٨ – يبقى نشاط الـ cellulose ثابتًا أثناء النضج (Singh وآخرون ٢٠٠٠).

التغيرات فى الصلابة

تبين لدى مقارنة التغيرات فى المواد الكربوهيدراتية ونشاط الـ glucanases (الـ galactanase، والـ glucanase، والـ mannase) فى الجدر الخلوية لثمار الطماطم العادية والـ rin (وهى الحاملة لطفرة الـ ripening-inhibitor) أثناء نضجها أن النشاط الإنزيمى للـ glucanases كان أعلى فى الثمار العادية عما فى الـ rin، وأقتُرح أن ذلك النشاط الإنزيمى يُسهم فى ليونة الثمار، وأن التغيرات فى نشاط تلك الإنزيمات على صلة وثيقة بتحلل الهيميسيليلوز hemicellulose فى الجدر الخلوية (Hong وآخرون ١٩٩٦).

وقد وجد أن تعريض ثمار الطماطم للضغوط (وهى نوع من الشدِّ الميكانيكى) يتبعه

زيادة كبيرة فى كل من معدل التنفس وإنتاج الإثيلين، مع فقد الثمار لصلابتها قبل ثمار الكنترول – التى لم تعرض للضغوط – بيومين. كذلك ازداد معدل التسرب الأيونى ونشاط الـ polygalacturonase أثناء النضج فى الثمار التى تعرضت للضغوط – أيًا كانت مرحلة النضج التى أجريت المعاملة عندها – مقارنة بثمار الكنترول التى لم تعط تلك المعاملة، وكانت تلك الزيادات ٢٣٪ فى التسرب الأيونى بعد ٦ أيام من المعاملة فى الثمار التى تعرضت للضغوط وهى فى مرحلة النضج الأحمر الفاتح، و ٤٠٪ فى نشاط إنزيم البولى جالاكتورنيز بعد ١٠ أيام من المعاملة فى الثمار التى تعرضت للضغوط وهى فى مرحلة التحول (Lee وآخرون ٢٠٠٧).

يزداد نشاط إنزيم بولى جالاكتورنيز Polygalacturonase كثيرًا أثناء نضج الثمار، وهو الإنزيم الرئيسى المسئول عن فقد الثمار لصلابتها أثناء النضج. وقد وجد Lu وآخرون (١٩٩٥) أن معاملة الثمار الخضراء مكتملة النمو بأى من الإيثيفون أو الـ I-aminocyclopropane-I-carboxylic acid (يكتب اختصارًا ACC، وهو المركب البادئ للإثيلين فى النباتات) أسرعت بنضج الثمار وأدت إلى زيادة إنتاج الإثيلين ونشاط إنزيم البولى جالاكتورنيز بها. وبالمقارنة .. لم تؤثر معاملة ثمار الطماطم التى تحمل الجين nor – بأى من المركبين – على نضجها أو نشاط الإنزيم فيها.

ولكن .. وبعد دراسة مستفيضة على العوامل الرئيسية التى تؤدى إلى فقد ثمار الطماطم لصلابتها، قورنت فيها ثمار الصنف Delayed Fruit Deterioration الذى تحتفظ ثماره – إلى درجة كبيرة – بصلابتها، بينما هى تنضج بصورة طبيعية، مع ثمار الصنف العادى Alisa Craig .. اقتُرح أن أديم الثمرة يؤثر فى فقدها لصلابتها مباشرة بتوفير دعم فيزيائى، وبطريق غير مباشر بتنظيم فقد الثمرة للرطوبة (Saladié وآخرون ٢٠٠٧)، هذا .. مع العلم بأن النظريات القديمة التى سبق أن لاقت قبولاً واسعًا منذ ثمانينيات القرن الماضى – والتى كانت تتبنى فكرة فقد الثمار لصلابتها – مباشرة – على نشاط الإنزيمات المحللة للجدر الخلوية – لم يعد لها ما يؤيدها من خلال دراسات الهندسة الوراثية (Vicente وآخرون ٢٠٠٧).

التنفس وإنتاج الإثيلين

تُنتج ثمار الطماطم الإثيلين بمعدل ١–١٠ ميكروليتر/كجم من الثمار فى الساعة على ٢٠°م، وتعد حساسة للإيثيلين الذى يمكن أن تتعرض له. ويكفى تعرضها للإثيلين بتركيز ٠,٥ حجم فى المليون لحفز نضجها وما يصاحبه من تغيرات أيضية. وعند الإنضاج الصناعى التجارى تعرض الثمار للإثيلين بتركيز ٥٠ حجم فى المليون على ٢٠–٢١°م مع ٩٠٪ رطوبة نسبية؛ إذ يكفى ذلك لتحفيز النضج. وما أن تصل الثمار فى نضجها إلى مراحلة التحول فإنها تنتج – بذاتها – من الإثيلين ما يكفى لاستمرار نضجها ولا تحتاج حينئذٍ إلى أى مصدر خارجى للغاز.

ويتباين معدل تنفس ثمار الطماطم الناضجة (مجم ثانى أكسيد الكربون/كجم من الثمار فى الساعة) حسب ظروف التخزين، كما يلى (عن Sargent & Moretti ٢٠٠٤)،

الحرارة (°م)	فى الهواء	فى ٣٪ أكسجين + ٩٧٪ نيتروجين
١٠	١٣–١٦	٦
١٥	١٦–٢٨	–
٢٠	٢٨–٤١	١٢
٢٥	٣٥–٥١	–

أما الثمار الخضراء المكتملة التكوين فإن معدل تنفسها – فى الهواء – ينخفض إلى النصف – تقريبًا – حيث يكون (بالملليجرام ثانى أكسيد كربون لكل كيلوجرام من الثمار فى الساعة): ٣–٤ على ٥°م، و ٦–٨ على ١٠°م، و ٨–١٥ على ١٥°م، و ١٤–٢٢ على ٢٠°م، و ١٨–٢٦ على ٢٥°م (عن Suslow & Cantwell ٢٠٠٦).

وقد وجد Brecht (١٩٨٧) أن إنتاج ثمار الطماطم لغاز الإثيلين يكون بمعدلات منخفضة فى الثمار الخضراء غير المكتملة التكوين، ويزداد معدل إنتاج الغاز بمقدار ٣ – ٤ أضعاف عند بداية تكوّن المادة الجيلاتينة فى مساكن الثمار، ثم إلى ٢٠ ضعفًا فى

مرحلة بداية التلوين. وقد أدت معاملة الثمار الخضراء غير مكتملة التكوين بالإثيلين — بتركيز ٥٠ ميكرو لترًا / لتر — إلى الإسراع بتكوين المادة شبه الجيلاتينية. وقد تكوَّن غاز الإثيلين — فى الثمار الخضراء — فى المساكن قبل أن يظهر فى الجدر الثمرية.

كما وجد أن المعاملة بمركب ACC (بادئ الإثيلين) تزيد معدل إنتاج الثمار لغاز الإيثيلين، ويحدث نفس التأثير عند معاملة الثمار الخضراء مكتملة النمو بمركب Methyl-jasmonate (يكتب اختصارًا: JA-Me)، الذى يحفز تمثيل الـ ACC فى النباتات. وتؤدى معاملة الثمار الخضراء بمركب Aminooxyacctic acid (يكتب اختصارًا: AOA) — الذى يثبط تمثيل الـ ACC — مع الـ JA-Me إلى انخفاض إنتاج الإثيلين إلى مستواه الطبيعى فى الثمار الناضجة (Saniewski & Czapski ١٩٩٠).

وبالمقارنة .. فإن معاملة ثمار الطماطم بمركب diazocyclopentadine (يكتب اختصارًا: DACP) يثبط اكتسابها اللون الأحمر لتعارضه مع تمثيل الإثيلين. وقد وجد Sisler & Lallu (١٩٩٤) أن المعاملة بهذا المركب أحدثت تأخيرًا فى اكتمال اكتساب اللون الأحمر - فى حرارة ٢٢°م — بنحو ٨ أيام فى الطماطم الحمراء جزئيًّا، و ١٢ يومًا فى الطماطم الوردية، و ١٤-١٦ يومًا فى الطماطم الخضراء مكتملة التكوين، وذلك مقارنة بثمار الكنترول. وقد أدت المعاملة إلى نقص إنتاج الإثيلين فى الثمار الوردية والحمراء، ولكن ارتفع إنتاج الإثيلين مرة أخرى بعد ٣-٤ أيام من المعاملة. وفى الطماطم الخضراء مكتملة النمو ظل إنتاج الإثيلين منخفضًا لمدة ١٠ أيام فى الثمار المعاملة، ولكن ارتفع معدل إنتاج الغاز بعد ذلك إلى أكثر من معدل إنتاجه فى ثمار الشاهد.

ويؤدى تعرض ثمار الطماطم للضغوط (شد ميكانيكى) إلى إحداث زيادة واضحة فى معدل التنفس وفى معدل إنتاج الإثيلين بعد ساعة واحدة، وبعد يوم واحد — على التوالى — من التعرض لتلك الضغوط. وفى خلال ٢٤ ساعة ازداد معدل التنفس بنسبة ٤٠٪-٦٠٪ أيًّا كانت مرحلة نضج الثمار، بينما ازداد معدل إنتاج الإثيلين فى الثمار التى كانت فى مرحلة التحول بعد المعاملة بمقدار ثلاثة أضعاف (Lee وآخرون ٢٠٠٧).

وبدراسة تأثير تغذية الذبابة البيضاء *Bemisia argentifolii* على نباتات الطماطم على التغيرات النضجية للثمار التى تنتجها تلك النباتات، والتى تكون مصابة – جراء تغذية الذبابة – بالنضج غير المنتظم irregular ripening .. وجد أن ثمار صنف الطماطم Florida Petite التى أنتجتها نباتات خالية من الإصابة بالذبابة بدأت الدخول فى كلايمكترك فى إنتاج الإثيلين بين ٤٠، و ٤٥ يومًا من تفتح الزهرة، وكان ذلك مصاحبًا بزيادة سريعة فى التلون بالأحمر وفى فقد الصلابة، بينما بدأ كلايمكترك إنتاج الإثيلين بين ٤٥، و ٥٠ يومًا من تفتح الزهرة بالنباتات التى أصيبت بالذبابة، ولم تتلون ثمارها باللون الأحمر بنفس الدرجة، ولا فقدت تلك الثمار صلابتها بنفس السرعة التى حدثت بها فى ثمار النباتات الخالية من الإصابة بالذبابة. وقد وصلت الثمار التى قطفت من نباتات خالية من الإصابة بالذبابة بعد ٤٥ يومًا من تفتح الزهرة إلى قمة كلايمكترك التنفس وإنتاج الإثيلين بعد ثلاثة أيام من القطف، واكتسبت اللون الأحمر الطبيعى وفقدت صلابتها بصورة مماثلة للثمار التى تركت لتنضج على النبات. وفى المقابل .. فإن الثمار التى حُصدت من النباتات المصابة بالذبابة بعد ٤٥، أو ٥٠، أو ٥٥ يوما من تفتح الزهرة لم تُظهر كلايمكترك تنفسى أو فى إنتاج الإيثيلين، ولم تتلون بشكل جيد، كما لم تفقد صلابتها بنفس درجة فقد الصلابة فى الثمار المماثلة التى قطفت من ثمار خالية من الإصابة بالذبابة (McCollum وآخرون ٢٠٠٤).

التغيرات التى تحدث فى ثمار الطفرات المؤثرة فى النضج

إن عملية نضج ثمرة الطماطم تتضمن عددًا من التحولات الفسيولوجية، والكيميائية الحيوية، تؤدى إلى جعل الثمرة فى حالة مناسبة للاستهلاك، فيما يتعلق بكل من اللون، والقوام، والطعم، والنكهة. وتشتمل هذه التغيرات – كما أسلفنا – على زيادة سريعة فى إنتاج غازى ثانى أكسيد الكربون والإثيلين (مثلما يحدث فى جميع الثمار الكلايمكتيرية)، وتحلل الكلوروفيل، وتمثيل المركبات الكاروتينية وتراكمها، وذوبان المركبات البكتينية، وتكوين المركبات المسئولة عن النكهة المميزة لثمرة الطماطم، وتنتهى هذه التغيرات بشيخوخة الثمرة ثم موتها.

وتعرف فى الطماطم بعض الطفرات التى تؤثر فى نضج الثمرة، ونتناول — فى هذا المقام — تأثير بعض هذه الطفرات على نضج ثمار الطماطم وصفات الجودة فيها بعد الحصاد، ونبدأ بالطفرتين rin (أو مثبط النضج ripening inhibitor)، و nor (أو عدم النضج no ripening).

تفشل ثمار الطماطم التى تحمل الجين rin فى الوصول إلى مرحلة الكلايمكترك فى التنفس، وهى المرحلة التى يصاحبها — كذلك — إنتاج الإثيلين بكثرة، فى الوقت الذى تنضج فيه الثمار غيَر الحاملة لهذا الجين بصورة طبيعية. كذلك فإن الثمار الحاملة لهذا الجين لا يتحلل فيها الكلوروفيل، ولا تتكون فيها الصبغات الكاروتينية بصورة طبيعية، ولا تفقد صلابتها، أو ينشط فيها إنزيم البولى جالاكتورنيز Polygalacturonase، فى الوقت الذى تكمل فيه الثمار غير الحاملة للجين نضجها بصورة طبيعية إلى أن تصل إلى مرحلة الشيخوخة.

كذلك تفشل ثمار الطماطم الحاملة للجين nor فى فقد صلابتها أو فى التلون الطبيعى الكامل. وهى تتشابه مع الثمار الحاملة للجين rin فى كل الخصائص التى سبق بيانها، والتى تقود جميعها إلى زيادة فترة صلاحية الثمار للتخزين. كما لا يمكن إنضاج الثمار الأصيلة فى أى من الطفرتين — بصورة طبيعية — حتى ولو عوملت بالإثيلين. وتختلف الطفرتان فى أن ثمار الطفرة nor تنتج فى نهاية الأمر مستوىً منخفضًا من الإثيلين، ويتراكم فيها الليكوبين والبيتاكاروتين بعد فترة طويلة من التخزين، بينما لا تنتج ثمار الطفرة rin أى إثيلين، ولا تحتوى على أكثر من آثار من الليكوبين حتى بعد ١٨٠ يومًا من تفتح الزهرة (Ng & Tigchelaar ١٩٧٧).

ومن الطفرات الأخرى المؤثرة على نضج ثمار الطماطم الطفرة Nr (أو التى "لا تنضج أبدا" Never ripe)، وهى — على خلاف ما يدل عليه اسمها — لا تمنع نضج ثمار الطماطم كلية، وإنما تؤخر فقط بداية التغيرات التى تقود — فى نهاية الأمر — إلى نضج الثمرة. ونجد فى هذه الطفرة أن الارتفاع فى تنفس الثمار عند الكلايمكترك — وما يصاحبه من إنتاج لغاز الإثيلين — يبلغ ٥٠٪ فقط مما يحدث بالثمار العادية، كما لا

تكتسب الثمار – أبدًا – لونها الكامل. مقارنة بالثمار العادية (عن Atta-Aly & El-Beltagy ١٩٩٢).

ويبين جدول (١-٣) خصائص النضج فى ثمار الطفرات الثلاث (rin، و Nr، و nor) مقارنة بالنضج فى الثمار العادية غير الطفرية.

جدول (١-٣): خصائص النضج فى ثمار طفرات الطماطم rin، و Nr، و nor مقارنة بالنضج فى الثمار العادية (عن Wills ١٩٩٨).

الطفرة	خصائص النضج
Ripening inhibitor (rin)	**نمو طبيعى- تتحول بطيئًا إلى اللون الأصفر الشاحب-يقل إنتاجها كثيرًا من الإيثيلين-لاتفقد صلابتها بصورة تذكر-يقل فيها كثيرًا نشاط الإنزيم بولى جالاكتيرونيز-لا تنضج بعد معاملتها بالإثيلين-يؤدى تعريضها لتركيز عال من الأكسجين إلى تلونها بالوردى.**
Never Ripe (Nr)	**نمو طبيعى- تتحول بطيئًا إلى اللون الأحمر البرتقالى-لا تفقد صلابتها إلاّ بصورة محدودة-يقل إنتاجها للإثيلين-يقل فيها نشاط البولى جالاكتيرونيز- يقل فيها تمثيل الليكوبين.**
Non ripening (nor)	**أكثر انحرافًا عن النضج الطبيعى عن rin-لونها النهائى أصفر قاتم-إنتاجها من الإثيلين منخفض جدًّا-يقل فيها نشاط البولى جالاكتيرونيز عن ١٪ من نشاطه فى الثمار غير الطفرية-يؤدى تعرض النباتات للوحة عالية إلى إسراع نضج الثمار وإلى ظهور لون برتقالى قاتم مع بعض الفقد فى الصلابة.**

كذلك تعرف الطفرة alc (من كلمة الكوباكو alcobaco) – التى تتشابه مع الطفرتين nor، و rin فى غياب الكلايمكترك التنفسى، وكذلك غياب الكلايمترك فى إنتاج الإثيلين من ثمارها، التى تنضج ببطء شديد، والتى لا يظهر بها سوى آثار من نشاط الإنزيم بولى جالاكتورنيز، مع احتفاظها بقدرتها على التخزين لفترة تبلغ ٣ أمثال قدرة الثمار العادية على التخزين. هذا .. وتكون الثمار الخليطة فى أى من هذه الطفرات (الهجين بين الطفرة والصورة العادية) وسطًا بين الأبوين فى نشاط البولى جالاكتورنيز،

وفى صلابة الثمار، كما تحتفظ الثمار الهجين بقدرتها على التخزين لفترة أطول قليلا من الثمار العادية (Lu وآخرون ١٩٩٤).

وفى دراسة على ثمار الطفرة nor بصورتيها الأصيلة (nor nor) والخليطة (nor nor$^+$) مقارنة بالثمار العادية (+nor +nor) — وجد Ng & Tigchelaar (١٩٩٧) أن الثمار الأصيلة فى الطفرة لم يحدث بها كلايمتيرك — لا فى التنفس ولا فى إنتاج الإثيلين — وكان فقدها لصلابتها بطيئًا، ولم يلاحظ بها سوى آثار من نشاط إنزيم البولى جالاكتورنيز فى الثمار مكتملة التكوين، وكانت أهم الكاروتينات فيها: الفيتوين phytoene، والبيتاكاروتين، والنيروسبورين neurosporene، ولكن أصبح الليكوبين والبيتاكاروتين أهم الكاروتينات بعد ١٢٠ يومًا من تفتح الزهرة، مع بقاء الليكوبين أقل من ١٠٪ من المستوى الطبيعى. أما الثمار الخليطة فى الطفرة فقد تأخر نضجها عما فى الثمار العادية، وكان الكلايمتيرك فيها مثبطًا جزئيًا، ولم يزد إنتاجها من الإيثيلين عن ٦٪ إنتاج الثمار العادية. وقد تأخر فقد هذه الثمار لصلابتها وانخفض فيها نشاط إنزيم البولى جالاكتورنيز عن الثمار العادية فى مختلف مراحل النضج، كما تراكم الليكوبين فى الثمار الخليطة فى هذه الطفرة، وكذلك تراكم الجاماكاروتين، والفيتوفلوين phytofluene، والفيتوين ببطء، ولكن تراكم البيتا كاروتين فيها بصورة طبيعية.

ويستدل من دراسات Poovaiah & Nukaya (١٩٧٩) على وجود علاقة وثيقة بين انخفاض نشاط إنزيم بولى جالاكتورنيز وفشل ثمار الطفرة rin فى النضج الطبيعى. فقد لوحظ أن بداية الزيادة فى نشاط الإنزيم حدثت فى الثمار العادية قبل الكلايمكترك التنفسى بنحو ٦ أيام (٤٣ يومًا من تفتح الزهرة)، وأن أعلى نشاط للإنزيم حدث بعدما وصل إنتاج الثمار من غازى ثانى أكسيد الكربون والإيثيلين إلى أعلى معدلاتهما. أما فى ثمار الطفرة nor، فلم يلاحظ أى تغير فى نشاط إنزيم البولى جالاكتورنيز حتى ١٠٠ يوم من تفتح الزهرة. وبالمقارنة كانت التغيرات فى نشاط إنزيم السيليوليز cellulose متماثلة فى الثمار الطبيعية وثمار الطفرة؛ حيث ازداد نشاط الإنزيم تدريجيا مع تقدم نضج الثمار. وبينما أدت معاملة ثمار الطفرة بالإيثيلين — لمدة يومين بعد ٣٦

يومًا من تفتح الزهرة — إلى زيادة نشاط الإنزيم فيها، فإن هذه المعاملة لم تؤثر على نشاط إنزيم البولى جالاكتورنيز.

وبمقارنة ثمار الطفرتين rin، و nor بالثمار العادية، وجد Agar وآخرون (١٩٩٤) أن ثمار الطفرة rin كانت أكثرها صلابة، وحموضة معايرة، وأقلها فى محتوى المواد الصلبة الذائبة الكلية، بينما تميزت ثمار الطفرة nor بأطول فترة صلاحية للتخزين.

وبمقارنة أزواج سلالات من صنف Rutgers ذات أصول وراثية متشابهة isogenic lines يختلف كل زوج منها فى احتوائه او عدم احتوائه على الجينات الطفـرية: nor (non-ripening)، و rin (ripening inhibitor)، و Nr (never ripe) .. كانت السلالات الطفرية أبطأ كثيرًا فى النضج عن نظيراتها غير الطفرية، وخاصة تلك التى احتوت على صفات الـ nor، أو rin اللتان لم تُظهرا أى من التغيرات المميزة للنضج الطبيعى، فيما عدا حدوث زيادة طفيفة فى الـ ACC فى ثمار الـ nor الزائدة النضج، أو فى إنتاج الإثيلين فى الثمار الناضجة من كل من الـ nor، والـ rin. أما ثمار الـ Nr فقد أظهرت تغيرات النضج الطبيعية ولكن بمعدل بلغ حوالى ٥٠٪ من معدلها فى الثمار غير المطفرة، فى الوقت الذى ازداد فيها كثيرًا نشاط الـ ACC، وازداد قليلا إنتاج الإثيلين عما فى حدث فى الثمار غير المطفرة. وقد أدت معاملة نباتات الطماطم — فى المزارع المائية — بالـ EDTA بتركيز ١ جم/لتر من المحلول المغذى إلى خفض إنتاج الإثيلين فى الـ Nr بمقدار حوالى ٣٠٪ أثناء نضج ثمارها، وإلى نضج ثمار الـ nor، والـ rin بصورة اقتربت من الصورة الطبيعية، وبدأت ثمار الـ rin فى فقد صلابتها وازداد فيها إنتاج ثانى أكسيد الكربون والإثيلين ونشاط الـ ACC (Atta-Aly & El-Beltagy ١٩٩٢).

وفى دراسة مقارنة عن تركيز كل من المركب ACC والإنزيم ACC synthase المسئولين عن تمثيل الإثيلين فى الثمار عند النضج — فى ثمار الطماطم العادية وكل من الطفرتين nor، و rin – وجد Terai (١٩٩٣) أن تركيزات المركب والإنزيم، وكذلك إنتاج الإثيلين ازداد أثناء نضج الثمار العادية، ولكن اختلف الأمر فى ثمار الطفرتين: ففى ثمار الطفرة nor حدثت زيادة طفيفة فى إنتاج الإثيلين، وفى نشاط الإنزيم ACC synthase

بعد حوالى ٥٠ يومًا من تفتح الزهرة، ولكن تراكم الـ ACC بوضوح خلال المراحل المتأخرة من تكوين الثمرة. أما فى ثمار الطفرة rin فلم تلاحظ تغيرات تذكر فى تركيز الـ ACC أو الـ ACC synthase خلال جميع مراحل تكوين الثمرة، كما ظل معدل إنتاج الإثيلين ثابتًا تقريبًا. وبينما أدى تجريح الجدر الثمرية إلى زيادة نشاط الـ ACC synthase — بشدة — فى كل من الثمار العادية وثمار الطفرة nor، فإنه أدى إلى ظهور قليل من النشاط للإنزيم فى ثمار الطفرة rin، التى يختفى من ثمارها غير المجروحة نشاط هذا الإنزيم.

ودرس Hong & Lee (١٩٩٥) التغيرات التى تحدث فى المركبات غير القابلة للذوبان فى الكحول (البكتين، والسيليلوز، والهميسيليلوز Hemieellulose) أثناء نضج الثمار فى الطماطم العادية، مقارنة بما يحدث فى الثمار التى تحتوى على الجين rin، ووجدا ان محتوى الثمار من المركبات غير القابلة للذوبان فى الكحول انخفض أثناء النضج فى الطماطم العادية، بينما ظل ثابتا فى الطماطم التى تحتوى على الجين rin، فضلا عن أنه كان مرتفعًا فى تلك الثمار أصلا، منذ البداية — عما فى الطماطم العادية. وقد بلغ النقص فى كل من السيليلوز والهيمسيليلوز فى الطماطم العادية أثناء نضجها حوالى ٢٥٪، و ٥٣٪ على التوالى.

وقد قارن Czapski & Saniewski (١٩٩٢) تأثير معاملة الطفرتين nor، و rin بمركب مثيل جاسمونيت methyl jasmonate على إنتاجها للإثيلين، ووجدا أن ثمار الطفرة nor أنتجت الإثيلين بتركيز منخفض — بصورة طبيعية — فى أطوار النضج المتوسطة والمتقدمة، ولكن معاملتها بالمثيل جاسمونيت أدت إلى زيادة نشاط الإنزيم المسئول عن تمثيل الإثيلين، وزيادة إنتاج الغاز خلال الأسبوع الأول بعد المعاملة، أما ثمار الطفرة rin فكان إنتاجها الطبيعى من الإثيلين منخفضًا جدا حتى مراحل النضج المتقدمة، ولكن المعاملة بالمركب حفزت نشاط الإنزيم المسئول عن تمثيل الإثيلين وزيادة إنتاج الغاز كذلك، ولكن لم يصل مستوى نشاط الإنزيم وإنتاج الغاز فى الطفرة rin إلى أكثر من ١/٢، و ١/٣ نظيريهما — على التوالى — فى الطفرة nor.

وأمكن حثّ ثمار الطفرة nor على النضج الجزئى بتعريض النباتات الحاملة لها لتركيزات مرتفعة نسبيًا من كلوريد الصوديوم، ولكن لم تؤثر هذه المعاملة على نضج ثمار الطفرة rin. وعلى العكس .. أدى تعريض ثمار الطفرة rin لتركيز عالٍ من الأكسجين فى وجود الإثيلين إلى حثها على النضج وتلونها جزئيًا، بينما لم تؤثر هذه المعاملة على نضج وتلون ثمار الطفرة nor (عن Atta-Aly & El-Beltagy ١٩٩٢).

هذا وقد وجد Levy-Meir وآخرون (١٩٨٩) ان مستخلصات ثمار، وجلد ثمار الطفرتين nor، و rin تثبط إنبات جراثيم الفطر *Botrytis cinerea*، مقارنة بالثمار الطبيعية. وقد أحدثت — كذلك — ثمار الطماطم الخضراء مكتملة التكوين العادية تثبيطًا لإنبات جراثيم الفطر مماثلا لتثبيط الثمار الناضجة من الطفرتين. كما ظهرت مقاومة الطفرتين للفطر على صورة زيادة فى فترة الحضانة اللازمة لحدوث الإصابة، ونقص فى حالات أعفان الثمار أثناء التخزين. وكان أعلى مستوى من المقاومة فى ثمار الطفرة nor فى اى من صورتيها الأصيلة أو الخليطة. وقد أدى تعريض ثمار الطماطم لحرارة الصفر المئوى لمدة ٣ أيام، أو معاملتها بالماء الساخن — على حرارة ٥٢°م — لمدة ٥ دقائق إلى إحداث زيادة كبيرة فى قابلية الثمار العادية للإصابة. وإلى كسر جزئى فى مقاومة ثمار الطفرتين للعفن.

التغيرات التى تحدث فى ثمار الطماطم المحمولة وراثياً بهدف التأثير فى النضج

حظيت الطماطم بعديد من الدراسات فى مجال الهندسة الوراثية من أجل إنتاج نباتات محولة وراثيًا تظل ثمارها محتفظة بصلابتها لفترة طويلة بعد نضجها. وقد تركزت معظم الدراسات على نقل الرنا المضاد Antisense RNA لبعض الجينات المؤثرة فى التغيرات التى تصاحب نضج الثمار.

فمثلا .. قام Tucker وآخرون (١٩٩٢) بنقل الرنا المضاد للجينين المسئولين عن تمثيل كل من الإنزيم بولى جالاكتورنيز polyglacturonase (يعطى الرمز PG). وبكتن إستريز Pectinestrase (يعطى الرمز PE). وفى الثمار العادية لا يكون PG موجودًا فى

الثمار الخضراء، ولكن يتم تمثيله أثناء النضج، حيث يتواجد – حينئذ – فيما لا يقل عن ثلاثة نظائر إنزيمية isozymes. وقد وجد أن نقل الرنا المضاد للـ PG منع تحلل البكتين (Pectin depolymerization) أثناء نضج الثمار؛ الأمر الذى أدى إلى زيادة صلاحية الثمار للتخزين وزيادة تحملها للشحن، أما نقل الرنا المضاد للـ PE فقد أدى إلى زيادة معدلات الـ Pectin estrification خلال كل مراحل نضج الثمار، ولكنه لم يؤثر – فيما يبدو – على فسيولوجيا الثمرة. وفيما عدا ذلك، فإن أيض البكتين لم يختلف بين الثمار المحولة وراثيا والثمار العادية. وقد عزل Gaffe وآخرون (١٩٩٤) نظيرين (two isoforms) من هذا الإنزيم.

هذا .. وقد وجد أن نشاط الـ PG فى الثمار المحوَّلة وراثيًا لا يتعدى ١٪ من نشاطه الطبيعى فى الثمار العادية. وبينما لم تختلف درجة صلابة الثمار المحولة وراثيا عن الثمار العادية – خلال مختلف مراحل نضجها – فإنها – أى الثمار المحولة وراثيا – كانت أكثر قدرة على التخزين وعلى تحمل عمليات الشحن والتداول بدون أن تحدث لها أضرار. وفضلا عن ذلك .. كان عصير الثمار المحولة وراثيا أكثر لزوجة عن عصير الثمار العادية (Schuch وآخرون ١٩٩١).

وبالإضافة إلى التأثيرات التى أسلفنا بيانها للرنا المضاد للإنزيم بولى جالاكتورنيز، فإن الثمار المحولة وراثيا أظهرت – كذلك – قدرًا أكبر من المقاومة لكل من الفطرين *Geotrichum candidum*، و *Rhizopus stolonifer* اللذين يصيبان – عادة – ثمار الطماطم أثناء نضجها (Kramer وآخرون ١٩٩٢).

كذلك وجد Oeller وآخرون (١٩٩١) أن نقل الرنا المضاد للجين المسئول عن تمثيل الإنزيم ACC synthase إلى الطماطم العادية ثبط نضج ثمارها، بينما أدت معاملة الثمار المحولة وراثيا بالإثيلين إلى نضجها بصورة طبيعية. ويعنى ذلك أن الإثيلين هو الذى يبدأ بإحداث التغيرات التى تقود إلى نضج الثمار، وليس بناتج لعملية النضج ذاتها.

كما تمكن Klee وآخرون (١٩٩١) من عزل الجين المسئول عن تمثيل الإنزيم ACC deaminase من أحد أنواع بكتيريا التربة (التى أمكن التعرف عليها بقدرتها على النمو فى بيئة تحتوى على ACC كمصدر وحيد للنيتروجين) ونقله إلى الطماطم، حيث ظهر أن النباتات المحولة وراثيا كانت أقل قدرة على إنتاج الإثيلين، وتأخر نضجها بصورة معنوية عن الثمار العادية، واحتفظت الثمار الناضجة بصلابتها لمدة تزيد عن الثمار العادية بما لا يقل عن ستة أسابيع.

وقد أنتجت طماطم محولة وراثيا من الصنف ألزا كريج Ailsa Craig تحتوى على الرنا (آر إن إيه) المضاد antisensé RNA للإنزيم المسئول عن تكوين الإثيلين، وفيها يكون إنتاج الثمار لغاز الإثيلين منخفضًا بشدة. وقد تبين لدى مقارنة ثمار الصنف الأصلى بالصنف المحول الأصيل فى تلك الصفة أنهما يتماثلان فى طول الفترة التى تمر بين تفتح الأزهار وبدء التغير فى لون الثمار، ولكن تقل سرعة تكوين الصبغات – بعد ذلك – فى الثمار المحولة وراثيًا، كما تقل فيها – أيضًا – سرعة فقد الحموضة مقارنة بالثمار العادية. وعلى الرغم من أن الطرازين لم يختلفا فى سرعة فقد الثمار لصلابتها أثناء النضج، إلا أن الثمار المحولة وراثيًا كانت أبطأ فقدًا لصلابتها فى مرحلة "بعد النضج"، مقارنة بالثمار العادية. وأدت المعاملة بالإثيلين إلى إسراع تلون الثمار المحولة وراثيًا بدرجة أكبر عما فى الثمار العادية، ولكن تأثير تلك المعاملة على معدل فقد الثمار لصلابتها كان محدودًا. وعموما .. فقد كانت الثمار المحولة وراثيًا أقل تعرضًا للإصابة بالأضرار أثناء النضج والحصاد، واحتفظت بجودتها لفترة تخزينية أطول، مقارنة بالثمار العادية، إلا أنها – أى الثمار المحولة وراثيًا – فقدت صلابتها بسرعة أكبر عندما حصدت وهى خضراء مكتملة النمو وخزنت فى حرارة ٢٠ °م، عما لو سمح لها بالنضج على النبات (Murray وآخرون ١٩٩٣).

تأثير حالة الثمار وطريقة تداولها عند الحصاد وبعده على نوعيتها

تتأثر نوعية ثمار الطماطم بعد الحصاد بالعوامل التالية:

١ – مدى اكتمال نمو الثمار عند الحصاد:

لا يمكن أن تتلون الثمار التى تقطف قبل اكتمال تكوينها بصورة جيدة حتى لو أعطيت معاملات الإنضاج الصناعى.

٢ – سرعة التخلص من حرارة الحقل field heat بعملية التبريد الأوَّلى:

تؤدى هذه العملية إلى وقف تدهور الثمار سريعًا بعد الحصاد، وتظل محتفظة بجودتها لفترة أطول.

هذا .. إلا أن إجراء التبريد الأوَّلى بالماء البارد، أو قلب حمولة الثمار فى أحواض تحتوى على ماء تقل حرارته عن حرارة الثمار – بهدف تقليل الأضرار الميكانيكية التى يمكن أن تحدث للثمار عند قلبها – يمكن – كما أسلفنا – أن يزيد كثيرًا من إصابة ثمار الطماطم بالأعفان. ويستدل على ذلك من دراسات Showalter (١٩٩٣) التى توصل منها إلى أن ثمار الطماطم تحتوى على فراغات هوائية كثيرة بين الخلايا، ويؤدى قلبها فى ماء تنخفض درجة حرارته عن حرارة الثمار ذاتها إلى انكماش هذه الفراغات الهوائية؛ مما يؤدى إلى اندفاع الماء – مع ما يحمله من كائنات مسببه للأعفان – إلى داخل الثمار من خلال موضع اتصالها السابق بالعنق؛ ذلك لأن جلد الثمار يكون مغطى بطبقة سميكة من الكيوتين، كما أن بشرتها تخلو من الثغور. وقد أدت تدفئة الماء الذى تقلب فيه الثمار إلى الحد من مشكلة الأعفان.

٣ – مدى إصابة الثمار بالأضرار Physical Injuries:

يمكن ان تحدث الأضرار فى أية مرحلة من مراحل تداول الثمار فيما بين الحصاد، ووصولها إلى المستهلك. وتوجد عدة أنواع من هذه الأضرار، منها: القطوع cuts، واختراق أعناق الثمار للثمار المجاورة لها punctures، والخدوش scuffs، والجروح abrasions الناتجة عن الاحتكاكات. تشوه هذه الأضرار مظهر الثمار، وتزيد فقدها للماء، وقابليتها