الشدّ التأكسدى

يحدث الشد التأكسدى oxidative stress حينما يزيد توليد المركبات النشطة فى إعطاء الأكسجين generation active oxygen species (اختصارًا: AOS) عن قدرة النبات على التعامل معها. وتعد الـ AOS صورًا مختزلة من الأكسجين O_2، ومن بين المركبات التى تستهدفها: الدهون، والبروتينات، والمواد الكربوهيدراتية، والأحماض النووية. أما المواقع الرئيسية لإنتاج الـ AOS فهى البلاستيدات الخضراء، والميتوكوندريات، والأنوية، والجليوكسى سومات glyoxysomes، والبيروكسى أيزومات peroxyisomes على الرغم من ضعف أهمية البلاستيدات الخضراء كمصدر للـ AOS فى الثمار الناضجة وفى المنتجات التى تُعرض للظلام.

ومن المعروف أن الظروف البيئية القاسية مثل الانحرافات الحادة فى درجة الحرارة، والملوحة، والجفاف، والتعرض للأوزون وللأشعة فوق البنفسجية تستحث إنتاج الـ AOS؛ مما يقود إلى حالة من شدّ الأكسدة. ومن الأعراض المميزة لهذا الشدّ فى النباتات تثبيط تطور البلاستيدات الخضراء، وظهور الأضرار الفسيولوجية الشائعة بعد الحصاد، مثل الانسفاع (أو الاحتراق) السطحى، والتلون البنى للأنسجة الداخلية، وفقدان الصبغات لألوانها. وإتلاف وتعطيل عمل الأغشية الخلوية، ووقف نشاط عدة أنواع من البروتينات (مثل الإنزيمات) بسبب ما يحدث لها من أضرار وما يلى ذلك من تحلل بفعل إنزيمات الـ proteases، بالإضافة إلى الأضرار والطفرات التى يمكن أن تحدث بالأحماض النووية.

كذلك فإن الـ AOS تلعب دورًا فى تنظيم عملية الشيخوخة سواء أحدثت بصورة طبيعية، أم استحثت. ولعل من أهم السمات المميزة للشيخوخة فى الأنسجة النباتية زيادة أكسدة الدهون، وهى العملية التى يعتقد بأنها تلعب دورًا فى تمثيل الإثيلين، وهو الهرمون الذى يلعب دورًا فى تنظيم عملية الشيخوخة.

تستطيع النباتات التعامل مع الشدّ التأكسدى من خلال استراتيجيتين رئيسيتين،

هما: تجنب الشدّ، وتحمله. هذا تحت ظروف الحقل، أما بعد الحصاد فلا مجال للحديث عن تجنب الشدّ إلا إذا تدخل الإنسان ونقل المنتجات من الظروف التى يمكن أن تحفز زيادة إنتاج الـ AOS. ولكن – وكما هو الحال فى النباتات النامية – فإن المنتجات البستانية بعد الحصاد يمكنها تحمل الـ AOS عن طريق مضادات الأكسدة القابلة للذوبان فى الماء وفى الدهون، وتنظيم إنتاج الـ AOS، وبنية الأغشية الخلوية (Hodges وآخرون ٢٠٠٤).

العوامل المتحكمة فى الشدّ التأكسدى

تُسهم عديد من العوامل مثل ظروف الإنتاج (درجة اكتمال التكوين على سبيل المثال)، وطرق الحصاد، ومدة التخزين، وحرارة التخزين، ومكونات هواء المخزن، وإجراءات التداول، والظروف التى تزيد من الفقد الرطوبى، والشيخوخة، ونضج المنتج، والتركيب الوراثى .. تُسهم جميعها فى حث الشدّ التأكسدى لمنتجات الخضر والفاكهة بعد الحصاد (جدول ٣–٦)، كما يلى:

١– درجة اكتمال التكوين عند الحصاد harvest maturity:

نجد – على سبيل المثال – أن العيوب الفسيولوجية ذات العلاقة بالشدّ التأكسدى مثل انسفاع أو احتراق الثمار سطحيًّا fruit scald ترتبط بدرجة اكتمال تكوينها عند الحصاد.

٢– درجة حرارة التخزين:

تؤدى المعاملة الحرارية لبعض المنتجات البستانية قبل تخزينها إلى الحد من تعرضها للشدّ التأكسدى. ومن المعروف أن تعريض المنتجات البستانية الحساسة لأضرار البرودة للحرارة المنخفضة يضر بأغشيتها الخلوية وزيادة تعرضها للـ AOS، وتكون أكسدة الدهون فى الأغشية الخلوية – عادة – أولى مظاهر أضرار البرودة. ولكن المعاملة الحرارية التى أشرنا إليها تحد من الإضرار بالأغشية الخلوية.

جدول (٣-٦): ملخص لدلائل الشدّ التأكسدى المعروفة فى حاصلات الخضر والفاكهة الطازجة (عن Hodges وآخرين ٢٠٠٤).

العوامل المحدثة للشدّ	الأعراض المشاهدة	محتوى مضادات الأكسدة	الإنزيمات المضادة للأكسدة	نواتج الأكسدة	عناصر الأكسجين النشطة	تدهور الأغشية الخلوية
اكتمال التكوين	احتراق واسمرار سطحى – تلون بنى بالقلب واللب – تنقير	<LSA, < WSA, <anthocyanins, <phenols	<SOD, <CAT, >GR	>Lipid hydroperoxides		
فترة التخزين	تدهور فى النوعية	<tocopherol	±SOD, ±CAT	>Lipid hydroperoxides	$>H_2O_2 > O_2^{\cdot-}, > OH$	يزداد
حرارة التخزين أعلى اصفرار من المثلى		±ascorbate, <carotenoids,	>SOD, ±CAT, >POD	>Lipid hydroperoxides	--	
حرارة التخزين أقل من المثلى	تنقير – نضج غير طبيعى – تلون بنى باللب – زيادة السكر	< ascorbate, <GSH <carotenoids	>SOD, ±CAT, >POD> ASPX تزداد	>peroxides, >MDA		يزداد
الفقد الرطوبى	تدهور فى النوعية					
زيادة الأكسجين	تلون بنى باللب	<LSA, <ascorbate	<ASPX, <CAT, >DHAR			يزداد
نقص الأكسجين	احتراق واسمرار سطحى خفيف	<ascorbate	>SOD, >CAT	<α-Farnesene		ينخفض
الإثيلين	اصفرار – احتراق واسمرار سطحى – تبقع صدئ	<ascorbate	>ASPX,> CAT <DHAR, <GR, <SOD	>Lipid hydroperoxides >MDA, >α=farnesene	$>H_2O_2$	
الإشعاع	تلون بنى – نضج غير طبيعى – احتراق واسمرار سطحى – انهيار الأنسجة	±GSH, ±carotenoids, ±ascorbate		>DNA fragmentation	$>O_3, H_2O_2$	ينخفض

٣- هواء المخزن:

يؤدى التخزين فى هواء متحكم فى مكوناته CA، أو هواء معدل MA إلى إبطاء التنفس والأيض، وتقليل الشدّ التأكسدى، والشيخوخة، والحساسية للإثيلين، وأضرار الحرارة المنخفضة، وأضرار الإصابات المرضية والحشرية. ويهمنا هنا تأثير بكونات الهواء فى خفض الشدّ التأكسدى؛ الأمر الذى لوحظ فى البروكولى المخزن فى ٧,٥٪ ثانى أكسيد الكربون مع ١١,٢٪ أكسجين، حيث قل الشدّ التأكسدى من خلال المحافظة على حامض الأسكوربيك، والكاروتينات، والكلوروفيل، والأحماض الدهنية غير المشبعة.

٤- الشدّ الرطوبى:

تزداد أضرار البرودة بزيادة الفقد الرطوبى من المنتج، وتقل بزيادة الرطوبة النسبية فى هواء المخزن. ولقد لوحظ ارتباط ذبول المنتجات بانخفاض محتواها من مضادات الأكسدة؛ الأمر الذى لوحظ بالنسبة لحامض الأسكوربيك فى كل من الكيل والكرنب والفاصوليا الخضراء، وبالنسبة للكاروتين فى الكيل والكولارد وأوراق اللفت. كذلك وجد أن الفقد الرطوبى يؤدى إلى زيادة إنتاج الـ AOS – وبخاصة فوق أكسيد الأيدروجين – فى الأنسجة النباتية (Hodges وآخرون ٢٠٠٤).

٥- التداول:

إن الخدوش والجروح ودرجات الحرارة التى تتعرض لها المنتجات الطازجة أثناء تداولها يمكن أن تزيد من الشدّ التأكسدى.

٦- الأشعة المؤينة:

يؤدى التعرض للأشعة المؤينة (مثل أشعة جاما) إلى إنتاج مركبات مؤكسدة يمكن أن تضر بالأنسجة فى الخضر والفاكهة. تنتج الأشعة المؤينة الأوزون فى كل من الهواء وأى أنسجة نباتية تحتوى على الأكسجين؛ مما يؤدى إلى الإضرار بالأغشية الخلوية والبروتينات والحامض النووى DNA.

٧- الشيخوخة:

ترتبط الشيخوخة فى الأنسجة النباتية بالإنتاج الزائد من الـ AOS فى مختلف الأجزاء النباتية.

٨- النضج:

تعتبر بداية نضج الثمار هى بداية لدخولها فى مجموعة من التغيرات الفسيولوجية التى تقود فى نهاية الأمر إلى شيخوختها، ويحدث أثناء ذلك زيادة تدريجية ومطردة فى مستويات الـ AOS؛ بسبب حدوث انخفاض فى نشاط إنزيمات أساسية فى آليات عمل مضادات الأكسدة بالخلايا.

٩- الإثيلين:

قد يزداد تمثيل الإثيلين بالـ AOS وبنشاط الـ lipoxygenese أثناء أكسدة دهون الأغشية الخلوية، مما يسرع بدرجة أكبر من كل من النضج والشيخوخة (Hodges وآخرون ٢٠٠٤).

التغيرات غير المرغوبة التالية للحصاد

تشمل التغيرات غير المرغوبة كل ما يؤدى إلى تدهور المحصول وتلفه. وهى فى غالب الأمر امتداد للتغيرات المرغوبة التى سبق بيانها؛ حيث تتخطى الثمار مرحلة النضج المناسبة للاستهلاك وتصبح زائدة النضج. كما أن من التغيرات غير المرغوبة مالا علاقة له بمسألة النضج كما سيأتى بيانه. ومن هذه التغيرات ما يلى:

التغيرات فى اللون

قد تحدث تغيرات غير مرغوبة فى اللون، ومن أمثلتها ما يلى:

١- فقدان الكلوروفيل – أى فقدان اللون الأخضر – فى الخضر التى تؤكل خضراء؛ كالخضر الورقية، والخيار، والفاصوليا، والبسلة الخضراء وغيرها.

٢- تكوُّن لون بنى غير مرغوب فيه نتيجة لأكسدة المواد الفينولية، كما فى البطاطس.

٣- اخضرار درنات البطاطس عند تعرضها للضوء.