الكربون الذى يتراكم فى تجويف الثمار الخضراء. بينما يكون تنفس الجدر الثمرية منخفضًا (Blanke & Holthe ١٩٩٧).

التغيرات فى النشاط الإنزيمى المؤثر فى صلابة الثمار

لوحظ أن التغيرات فى نشاط الإنزيمات المسئولة عن تحلل الجدر الخلوية لثمار الفلفل أثناء نضجها، كانت كما يلى:

١ – ازداد نشاط إنزيم polygalacturonase، وصاحب ذلك تدهور فى بنية (texture) الثمرة.

٢ – نقص نشاط إنزيم pectinestrase (أو methyl esterase).

٣ – لم تفقد الثمار التى خزنت فى حرارة ٨°م (لمدة ٢٠ يومًا) بنيتها بسرعة كتلك التى حدثت فى الثمار التى كان تخزينها فى حرارة الغرفة.

٤ – كذلك تغير نشاط إنزيمات الـ glycanases، وهى: cellulase، و xylan endo-1,3-β-xylanase (أو xylanase)، و mannase، و α-D-mannosidase (أو glucanase)، و β-D-galactosidase (أو galactanase) .. تغير نشاطها أثناء النضج، وكان أقل تغير فى النشاط الإنزيمى فى الثمار التى خزنت فى الحرارة المنخفضة، مقارنة بما كان عليه الحال فى الثمار الطازجة. وقد ازداد نشاط معظم تلك الإنزيمات، وكذلك نشاط إنزيمات laminarinase، و hemicellulase مع النضج، بينما قل نشاط إنزيم xylanase (Sethu وآخرون ١٩٩٦، و Prabha وآخرون ١٩٩٨).

معاملات خاصة تعطاها ثمار الفلفل قبل التخزين والشحن

تعطى ثمار الفلفل بعض المعاملات الخاصة التى تكون بهدف إما المحافظة على صفات الجودة، وإما زيادة فترة الصلاحية للتخزين، وإما الحد من الإصابات المرضية. وإما أى من تلك الأهداف مجتمعة. وبينما تطبق بعض من تلك المعاملات على النطاق التجارى. فإن غالبيتها ما زالت قاصرة على النطاق البحثى.

المعاملة بالماء الساخن قبل التخزين

أمكن الحد من ظهور أضرار البرودة فى ثمار الفلفل الحلو الخضراء المحزنة على ٤°م لمدة يومين، وذلك بمعاملتها قبل التخزين بالغمر فى الماء الدافئ على حرارة ٤٠ أو ٤٥°م لمدة ٤٥ دقيقة، أو بالتدفئة على حرارة ٤٠°م لمدة ٢٠ ساعة، وصاحب تلك المعاملات نقص جوهرى فى التسرب الأيونى من الثمار التى تعرضت للبرودة مقارنة بنظيراتها التى لم تعط المعاملة الحرارية. هذا إلا أن غمر الثمار فى الماء على حرارة ٥٠°م لمدة ٤٥ دقيقة أحدث تلفًا كبيرًا فى الأغشية الخلوية (Mencarelli وآخرون ١٩٩٣).

وأدت معاملة ثمار الفلفل بالماء الساخن على حرارة ٥٠°م لمدة ٣ دقائق إلى مكافحة كلا من العفن الرمادى grey mould الذى يسببه الفطر *Botrytis cinerea*، والعفن الأسود black mould الذى يسببه الفطر *Alternaria alternata*، حيث أمكن مكافحتهما بصورة تامة أو خفض الإصابة بهما بصورة معنوية حتى مع تعريض الثمار للعدوى الصناعية بأى من الفطرين قبل معاملتهما بالماء الساخن. ولم تظهر أضرار على ثمار الفلفل من جرّاء معاملة الماء الساخن إلا إذا استمر التعريض لحرارة ٥٠°م لمدة ٥ دقائق أو كان التعريض لحرارة ٥٥°م لمدة دقيقة واحدة أو أكثر، وكانت الأضرار على صورة شقوق ونقر على سطح الثمار (Fallik وآخرون ١٩٩٦).

وقد قام Fallik وآخرون (١٩٩٩) بغسيل ثمار عدة أصناف من الفلفل الحلو بالماء العادى أولاً، ثم بالماء الساخن على حرارة ٥٤-٥٦°م لمدة ١٠-١٤ ثانية أثناء مرورها على فرش التنظيف، ثم تجفيفها — قبل تعبئتها — وتخزينها على ٧°م لمدة ١٥ يومًا، ثم على ١٦-١٨°م لمدة ٤ أيام إضافية. كانت الثمار المعاملة بهذه الطريقة — التى تناسب التصدير بطريق البحر إلى الأسواق الأوروبية والخليجية — أكثر صلابة ونظافة عن نظيراتها التى نظفت فقط بالفُرَش الجافة، كما كانت خالية تمامًا تقريبًا من الأعفان، وتبين أن المعاملة أدت إلى التخلص من الأتربة الدقيقة والجراثيم الفطرية التى تتواجد فى كأس الثمرة وجلدها.

ولقد كانت أفضل المعاملات الحرارية لثمار الفلفل لأجل خفض الأعفان والتخلص من

الحشرات وإطالة فترة الصلاحية للتخزين، هى ترك الثمار فى هواء ساخن على ٣٨°م لمدة ٤٨–٧٢ ساعة، أو فى الماء الساخن على ٥٠ أو ٥٣°م لمدة ٢–٣ دقائق. أفادت تلك المعاملة فى منع ظهور الأعفان الفطرية، وفى إمكان تخزين الثمار فى حرارة منخفضة دون تعرضها للإصابة بأضرار البرودة، كما منعت الحرارة الجافة تطور بعض الحشرات، مثل *Ceratitis capitata* (Lurie وآخرون ١٩٩٨).

كما أدت معاملة الثمار بالماء الساخن على حرارة ٥٣°م لمدة أربع دقائق إلى تجنب أضرار البرودة وتقليل التحللات بعد ١٤، و ٢٨ يومًا من التخزين على ٨°م، بينما لم تعط المعاملة بالماء على ٤٥°م لمدة ١٥ دقيقة نتيجة مُرضية. كذلك أدت التعبئة فى غشاء بوليثيلين ذى كثافة منخفضة إلى تقليل الفقد فى الوزن وأضرار البرودة جوهريًا، وذلك عندما كان التخزين على حرارة منخفضة، وكان تركيز الأكسجين أكثر انخفاضًا وثانى أكسيد الكربون أكثر ارتفاعًا داخل تلك العبوات عندما عوملت الثمار بالحرارة قبل تعبئتها عما حدث فى ثمار الكنترول. وبالإضافة إلى ذلك فإن الإثيلين لم يلاحظ فى هواء عبوات الثمار التى عوملت بالحرارة، بينما أمكن ملاحظته فى عبوات ثمار الكنترول. ولقد ازدادت مستويات البولى أمينات polyamines بعد المعاملة الحرارية مباشرة، وازداد تركيز البوترسين putrescine أثناء التخزين على ٨°م، وخاصة فى الثمار التى أُعطيت المعاملة الحرارية والتى عبئت فى أغشية البوليثيلين، وكانت الزيادة جوهرية فى الثمار التى عوملت بحرارة ٥٣°م لمدة ٤ دقائق، ثم عبئت فى الأغشية، وذلك بعد ١٤ يوما من التخزين. وبينما انخفض تركيز الاسبرمين spermine فى ثمار الكنترول أثناء التخزين، فإنه لم يتأثر فى الثمار التى أعطيت المعاملة الحرارية وعبئت فى أغشية البوليثيلين (González-Aguilar وآخرون ٢٠٠٠).

التدفئة المتقطعة أثناء التخزين

تبدأ التغيرات الأيضية المصاحبة لأضرار البرودة قبل ظهور أية أعراض مرئية لتلك الأضرار. وتتمثل فى حدوث زيادة فى معدل التنفس، ومعدل إنتاج الإثيلين، ونفاذية

الأغشية الخلوية. هذا إلا أن تبادل تعريض الثمار لحرارة عالية مع الحرارة المنخفضة (صفر إلى ١°م) أثناء تخزينها أبطل التأثير الضار للحرارة المنخفضة، وأدى إلى ضَعف تراكم الكحول، والأسيتالدهيد، والأسيتون، وزيادة نشاط إنزيمات الـ peroxidase، والـ catalase، وتثبيط نشاط إنزيم phenylalnine ammonia-lyase، ونقص التسرب الأيونى، وتقليل أضرار البرودة (Chen وآخرون ١٩٩٤). وعلى الرغم من أن تدفئة ثمار الفلفل المخزنة على ٥°م، و ٩٠٪-٩٥٪ رطوبة نسبية (برفع حرارة الثمار إلى ٢٤-٢٥°م مع ٧٠٪-٧٥٪ رطوبة نسبية لمدة ٢٤ ساعة كل ٢-٥ أيام) أدى إلى تقليل أضرار البرودة، إلا أن ذلك كان مُصاحبًا بزيادة فى الفقد فى الوزن، ونقص فى الصلاحية للتسويق (Kluge وآخرون ١٩٩٨).

المعاملة ببيكربونات البوتاسيوم

كانت معاملة ثمار الفلفل ببيكربونات البوتاسيوم أكثر تأثيرًا فى مكافحة الفطر *Alternaria alternata* – مسبب مرض العفن الأسود – عن استعمال أى من الـ penconazole، أو الزيوت، أو المواد الناشرة (Ziv وآخرون ١٩٩٤). وفى دراسة أخرى (Fallik وآخرون ١٩٩٧) أدى غمس ثمار الفلفل فى محلول من بيكربونات البوتاسيوم بتركيز ١٪ أو ٢٪ إلى إحداث نقص معنوى فى إصابات الثمار بكل من العفن الرمادى (*Botrylis cinerea*)، والعفن الأسود (*Alternaria alternata*)، مقارنة بالكنترول، بينما أدى النقع فى بيكربونات البوتاسيوم بتركيز ٣٪ إلى التأثير سلبيًّا على نوعية الثمار. وقد تبين من الدراسات المختبرية أن تأثير بيكربونات البوتاسيوم على كل من الفطرين كان مثبطًا (وليس قاتلاً)، وذلك من خلال تثبيطه لنمو الغزل الفطرى، وإنبات الجراثيم، واستطالة الأنابيب الجرثومية. ومن المعلوم أن أملاح البيكربونات تستعمل فى الأغذية بتركيزات قد تصل إلى ٢٪.

المعاملة بمضادات الأكسدة

أدى غمس ثمار الفلفل فى محلول من السانوسل Sanosil-25 (وهو يحتوى على

H_2O_2 – أى فوق أكسيد الأيدروجين hydrogen peroxide – بنسبة ٤٨٪) بتركيز ٠,٥٪ .. أدى إلى خفض إصابات الثمار بكل من العفن الرمادى والعفن الأسود إلى المستويات المقبولة تجاريًا، وذلك مقارنة بالكنترول (Fallik وآخرون ١٩٩٤).

ويفيد غمر ثمار الفلفل الأخضر الحلو فى محلول من مضاد الأكسدة diphenylamine بتركيز ١٢ مللى مولار لمدة دقيقتين فى حمايتها من الإصابة بأضرار البرودة لدى تخزينها على ١°م لمدة ٨ أيام بعد ذلك؛ حيث يقل ظهور النقر السطحية وتحلل الكلورفيل (Purvis ٢٠٠٢).

المعاملة بالمثيل جاسمونيت

أمكن الحد من أضرار البرودة فى ثمار الفلفل المخزنة على ٢°م لمدة ٤–١٠ أسابيع بغمرها – قبل التخزين – لمدة ٣٠ ثانية فى محلول المثيل جاسمونيت methyl jasmonate بتركيز ٢٥ مللى مول. كما أعطت المعاملة بالمركب فى صورة غازية لمدة ساعة نتيجة مماثلة لمعاملة الغمر (Meir وآخرون ١٩٩٦).

تغليف الثمار بغشاء رقيق من مواد صالحة للأكل

استعملت فى تغليف coating ثمار الفلفل تحضيرات تجارية صالحة للأكل edible أساسها زيت معدنى (مثل PacRite)، أو السيليلوز (مثل Nature Seal)، أو بروتين الحليب (مصل اللبن Whey البروتينى الذى ينفصل عند صناعة الجبن مع الجليسرول). وبينما لم تؤثر أى من المغلفات coatings على معدل تنفس الثمار أو تلونها، فإن التحضير PacRite كان هو الوحيد الذى قلل الفقد الرطوبى من الثمار وأدى إلى إطالة فترة صلاحيتها للتخزين (Lerdthanangkul & Krochta ١٩٩٦).

وأدت معاملة ثمار الفلفل بالشيتوسان chitosan إلى خفض إنتاج الفطر *Botrytis cinerea* لإنزيمات الـ polygalacturonases (وهى التى تقوم بتحليل البكتين فى الجدر الخلوية للثمار المصابة)، والإضرار البيولوجى الشديد بهيفات الفطر ذاته؛ الأمر الذى أضعف كثيرًا من قدرة الفطر على إصابة الثمار (Ghaouth وآخرون ١٩٩٧).

كذلك أدى تغليف ثمار الفلفل والخيار بالشيتوسان بتركيز ١٪ أو ١,٥٪ ثم تخزينها على ١٣ أو ٢٠°م إلى خفض الفقد فى الوزن فى كل منهما فى كلتا الدرجتين. كما أدت زيادة تركيز الشيتوسان من ١٪ إلى ١,٥٪ (وزن/حجم) إلى إحداث نقص جوهرى فى الفقد فى الوزن، ومعدل التنفس، والفقد فى اللون، والذبول، والإصابة الفطرية (El Ghaouth وآخرون ٢٠٠٧).

المعاملة بثانى أكسيد الكلورين

أدت معاملة ثمار الفلفل بثانى أكسيد الكلورين بأى تركيز بين ٥، و ٥٠ مجم/لتر إلى خفض أعفان الثمار بمقدار ٥٠٪ بعد ٤٠ يومًا من التخزين، وكانت أفضل معاملة هى تركيز ٥٠ مجم/لتر، وهى التى لم يبدأ فيها ظهور الأعفان إلا بعد شهرين من التخزين، بينما كان العفن فيها – بعد ٤٠ يومًا من بدء التخزين – ٢٥٪ مما كان فى ثمار الكنترول التى لم تُعامل بالغاز (Du وآخرون ٢٠٠٧).

المعاملة بأشعة جاما

أحدثت معاملة ثمار الفلفل (صنف ماجده Magda) بأشعة جاما بجرعات تراوحت بين ٢٠٠، و ٨٠٠ Gy (بمعدل ١,٤٦ Gy/ساعة) .. أحدثت زيادة كبيرة فى قدرة ثمار الفلفل على التخزين، حيث بلغت ٤٩–٥٨ يومًا عندما كان تخزين الثمار المعاملة بالإشعاع على حرارة ٧–٩°م، مع ٥٠٪–٥٥٪ رطوبة نسبية (Wiendl وآخرون ١٩٩٦).

المعاملة بالمبيدات الفطرية

أدى غمس ثمار الفلفل الحلو فى محلول من الثيابندازول thiabendazole (اختصارًا: TBZ) بتركيز ١٠٠ جزء فى المليون على حرارة ٥٠°م، ثم تخزينها فى ٤°م .. أدى ذلك إلى تقليل إصابتها بأضرار البرودة مما فى الثمار التى تم غمسها فى الـ TBZ على حرارة ٢٥°م. أدت معاملة الـ TBZ إلى خفض الإصابة بالأعفان جوهريًا. وكانت أفضل

المعاملات هى غمس الثمار فى الـ TBZ على ٥٠°م تم التخزين فى جو متحكم فى مكوناته CA على حرارة ٤°م، وذلك من حيث احتفاظ الثمار بجودتها، وعدم تعرضها للإصابة بالأعفان، وبأضرار البرودة (Yang & Lee ١٩٩٨).

التخزين

التخزين البارد

يناسب الفلفل نفس ظروف التخزين التى تناسب كلا من: الفاصوليا الخضراء، والبامية، والكوسة، والطماطم (الوردية اللون)، والبطيخ؛ لذا .. فإنه يمكن شحنها وتخزينها معًا. ولا يجب – أبدًا – جعل الثلج يلامس أى من تلك المنتجات (Sargent ٢٠٠٦).

يجب تبريد ثمار الفلفل بأسرع ما يمكن لخفض الفقد فى الوزن، علمًا بأن الثمار التى تخزن فى حرارة تزيد عن ٧,٥°م تتعرض لفقد أكبر فى الوزن. ويمكن تخزين الفلفل على ٧,٥°م لمدة ٣–٥ أسابيع. وعلى الرغم من إمكان تخزين الفلفل على ٥°م لمدة أسبوعين مع تعرضه لفقد أقل فى الوزن، فإن بقاءه فى تلك الدرجة لفترة أطول من ذلك تعرضه للإصابة بأضرار البرودة، والتى تتضمن التنقير، والعفن وخاصة بالألترناريا، والتغيرات اللونية لمساكن البذور، والطراوة دون فقد للماء. وتكون الإصابة بأضرار البرودة فى خلال أيام قليلة على صفر°م. وتعد الثمار الناضجة أو الملونة أقل حساسية للبرودة عن الثمار الخضراء. أما الرطوبة النسبية فيجب أن تزيد عن ٩٥٪ للمحافظة على صلابة الثمار، وهى الخاصية التى ترتبط مباشرة بالفقد الرطوبى.

تخزن ثمار الفلفل فى مجال حرارى يتراوح بين ٧ و ٩°م، مع رطوبة نسبية تتراوح بين ٩٠٪ و ٩٥٪. ويمكن لثمار الفلفل أن تحتفظ بجودتها فى هذه الظروف لمدة ٣ أسابيع إن كان التخزين فى أوعية منفذة للرطوبة، ولمدة ٤ أسابيع إن كان التخزين فى أكياس من البوليثيلين المثقب.

وتتعرض ثمار الفلفل للإصابة بأضرار البرودة، إذا خزنت فى حرارة تقل عن ٧°م، وأهم أعراضها تكون نقر سطحية على الثمار (تظهر هذه النقر فى خلال أيام قليلة من