العالية من الغاز عند التخزين لفترات قصيرة وفى درجات الحرارة الأكثر انخفاضًا. فعلى سبيل المثال .. يتحمل الأسبرجس ثانى أكسيد الكربون بنسبة ١٠٪-١٤٪ فى حرارة صفر إلى ٣°م، بينما يصل أقصى ما يتحمله من الغاز إلى تركيز ٥٪-٩٪ فى حرارة ٣ إلى ٦°م، أما الفلفل الحريف فيتحمل تركيز يصل إلى ١٥٪-٢٠٪ فى حرارة ٥°م، بينما لا يزيد التركيز الذى يتحمله عن ٥٪ فى حرارة ١٠°م، ويمكن للأسبرجس أن يتحمل تركيزًا لغاز ثانى أكسيد الكربون يصل إلى ٦٠٪ لفترة قصيرة (Watkins ٢٠٠٠).

وتزداد التأثيرات المفيدة للجو المتحكم فى مكوناته مع الخضر الثمرية المكتملة التكوين عما يكون عليه الحال مع الخضر الثمرية غير المكتملة التكوين؛ بسبب تأثير الـ CA على تأخير النضج. ويمكن لتلك المجموعة من الخضروات تحمل ٣٪-٥٪ أكسجين بدون زيادات فى تركيز ثانى أكسيد الكربون. وتختلف تلك الخضر فى مدى تحملها للزيادة فى تركيز ثانى أكسيد الكربون. وبينما يمكن أن تظهر أضرار على ثمار الطماطم والفلفل الحلو والخيار جراء زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون على ٢٪ لمدة تزيد عن أسبوعين. فإن ثمار الكنتالوب والذرة السكرية يمكنها تحمل تركيزات تصل إلى ١٠٪-١٥٪ من ثانى أكسيد الكربون (Kader ١٩٩٦).

الأساس البيولوجى لتأثيرات الهواء المتحكم فى مكوناته

يوجد – بصورة عامة – تشابهًا بين تأثيرات التركيز المنخفض من الأكسجين والتركيز المرتفع من ثانى أكسيد الكربون على الأيض، والتى غالبًا ما تكون فى صورة تثبيط لمختلف العمليات الأيضية.

ومن أبرز الاستثناءات فى هذا الشأن ما يلى:

١- ينخفض – عادة – معدل التنفس بانخفاض نسبة الأكسجين، ولكنه قد يثبط، أو لا يتأثر، أو يحفز بزيادة نسبة ثانى أكسيد الكربون فى هواء التخزين.

٢- يثبط نشاط الإنزيم ACC synthase فى وجود أى من التركيز المنخفض من

الأكسجين أو المرتفع من ثانى أكسيد الكربون. أما في حالة الإنزيم ACC oxidase فإن التركيز المنخفض للأكسجين يثبِّط نشاطه، بينما يحفِّز التركيز المنخفض من ثانى أكسيد الكربون نشاطه ويثبِّط التركيز المرتفع هذا النشاط.

٣- يثبِّط نشاط الإنزيم phenylalanine ammonia lyase (وهو إنزيم يلعب دورًا فى أيض الفينولات) فى التركيزات المنخفضة من الأكسجين، ولكنه يحفِّز بزيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون فى بعض الأنسجة.

٤- يعد التركيز المرتفع لثانى أكسيد الكربون مثبِّطًا لفعل الإثيلين (Watkins ٢٠٠٠).

إن تعريض المنتجات البستانية لمستويات منخفضة من الأكسجين وأخرى مرتفعة من ثانى أكسيد الكربون – فى المجال الذى يتحمله كل منتَج – يخفض من معدل تنفسها ومعدل إنتاجها للإثيلين، إلاّ أن تخطى المدى الذى يتحمله المنتَج – سواء أكان بانخفاض تركيز الأكسجين، أم بزيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون – يمكن أن يتسبب فى زيادة كل من معدل التنفس وإنتاج الإثيلين؛ مما يعنى تعرض المنتَج لحالة من الشدِّ. ويمكن أن يُسهم هذا الشدِّ فى ظهور عيوب فسيولوجية وفى زيادة القابلية للإصابة بالتحلل. هذا .. علمًا بأن تأثيرات الشدِّ الذى تحدثه زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون تضيف إلى تلك التأثيرات التى يحدثها نقص تركيز الأكسجين، وأحيانًا تكون تأثيراتهما تداؤبية synergistic؛ بالإضافة إلى التأثيرات التى تحدثها الأضرار الكيميائية والفيزيائية، والتعرض لحرارة أو رطوبة نسبية أو لتركيزات من الإثيلين أعلى من المدى الذى يتحمله المنتج.

وحتى نقطة معينة .. يمكن للثمار والخضروات أن تتعافى من التأثيرات الضارة للمستويات المنخفضة من الأكسجين أو المرتفعة من ثانى أكسيد الكربون (التى تنتج من أيض التخمر)، وتستعيد أيض تنفسها الطبيعى بعد نقلها إلى الهواء. كذلك يمكن للأنسجة النباتية التعافى من الشدِّ الذى يحدثه التعرض لفترة قصيرة للجو المثبط لنشاط الفطريات (الذى تزيد فيه نسبة ثانى أكسيد الكربون على ١٠٪)، أو للجو القاتل للحشرات (الذى يحتوى على أقل من ١٪ أكسجين، و ٤٠٪–٨٠٪ ثانى أكسيد الكربون).

وكما أسلفنا .. فإن زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون يثبط نشاط إنزيم ACC synthase الضرورى لتمثيل الإثيلين، بينما ينشّط إنزيم ACC oxidase فى التركيزات المنخفضة من ثانى أكسيد الكربون، ويثبّط فى التركيزات المرتفعة من ثانى أكسيد الكربون والمرتفعة من الأكسجين، ويثبّط فعل الإثيلين فى التركيزات المرتفعة من ثانى أكسيد الكربون.

هذا .. ويعوق الجو المتحكم فى مكوناته تمثيل الكلوروفيل (اللون الأخضر)، وتمثيل الكاروتينات (اللونين الأصفر والبرتقالى)، والأنثوسيانينات (اللونين الأحمر والأزرق). وتمثيل وأكسدة المركبات الفينولية (اللون البنى). كما يبطئ الجو المتحكم فى مكوناته نشاط الإنزيمات المحللة للجدر الخلوية، وهى التى تؤدى إلى فقد الأنسجة لصلابتها؛ والإنزيمات النشطة فى اللجننة التى تؤدى إلى زيادة صلابة أنسجة الخضر.

كذلك يؤدى نقص الأكسجين وزيادة ثانى أكسيد الكربون إلى التأثير فى الطعم؛ حيث يقل فقد الحموضة، وتحول النشا إلى سكر، وتحولات السكر، وتمثيل المركبات المتطايرة المسئولة عن النكهة. هذا .. بالإضافة إلى أن الجو المتحكم فى مكوناته يحافظ على فيتامين جـ والفيتامينات الأخرى من الفقد؛ مما يعنى المحافظة على القيمة الغذائية للمنتَج.

تؤدى حالات الشدّ الشديدة للهواء المتحكم فى مكوناته إلى خفض pH السيتوبلازم، ومستوى الـ ATP، وتقليل نشاط الإنزيم pyruvate dehydrogenase، بينما يزداد نشاط الإنزيمات: pyruvate decarboxylase، و alcohol dehydrogenase، و lactate dehydrogenase. ويؤدى ذلك إلى تراكم الأسيتالدهيد، والكحول الإثيلى، وخلات الإثيل. وحامض اللاكتيك، وهى التى تضر بالمنتجات حسب حساسيتها. وتتوقف استجابة المنتَج للهواء المتحكم فى مكوناته على كل من الصنف، ودرجة اكتمال النمو. ومرحلة النضج. وحرارة التخزين، ومدة التخزين، وتركيز الإثيلين.

يعد النيتروجين أحد المكونات الخاملة للهواء المتحكم فى مكوناته ويؤدى استبداله بغاز الأرجون أو الهليوم إلى احتمال زيادة نفاذية غازى ثانى أكسيد الكربون والإثيلين فى الأنسجة النباتية، إلا أنهما – أى الأرجون والهليوم – ليس لهما تأثير مباشر على

الأنسجة النباتية، كما أنهما أكثر تكلفة عن النيتروجين كمكونات خاملة بالهواء المتحكم في مكوناته.

إن التركيزات العالية جدًّا من الأكسجين التي تصل إلى ٨٠٪ ربما تسرع من عملية اختفاء اللون الأخضر degreening الذى يُحدثه الإثيلين فى الثمار غير الكلايمكتيرية، كما يُسرع نضج الثمار الكلايمكتيرية، ومعدل التنفس وإنتاج الإثيلين، وظهور بعض العيوب الفسيولوجية (مثل التبقع الصدئ فى الخس). وفى مستويات من الأكسجين تزيد على ٨٠٪ تتعرض بعض المنتجات والمسببات المرضية للتسمم. وغالبًا فإن استعمال تلك التركيزات العالية جدًّا من الأكسجين سيبقى مقصورًا على الحالات التي يقلل فيها الأكسجين التأثيرات السلبية للتركيزات العالية من ثانى أكسيد الكربون (التي تستعمل لوقف نمو الفطريات) عندما تكون المنتجات حساسة لزيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون (Kader ٢٠٠٤).

ويمكن إيجاز تأثير انخفاض تركيز الأكسجين وزيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون فيما يلى:

أولاً: تأثير انخفاض تركيز الأكسجين

يكون لانخفاض تركيز الأكسجين التأثيرات التالية:

١- انخفاض معدل التنفس.

٢- انخفاض أكسدة المواد الأولية.

٣- تأخير نضج الثمار الكلايمكتيرية.

٤- زيادة طول فترة الصلاحية للتخزين.

٥- تأخير تحلل الكلوروفيل.

٦- خفض معدل إنتاج الإثيلين.

٧- تغيرات فى تمثيل الأحماض الدهنية.

٨- انخفاض معدل تحلل البكتينات الذائبة.

٩- تكوين طعم وروائح غير مرغوب فيها.

١٠– تغيرات فى القوام.

١١– تكوين عيوب فسيولوجية.

ثانيا: تأثير زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون:

يكون لزيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون التأثيرات التالية:

١– انخفاض تفاعلات التمثيل فى الثمار الكلايمكتيرية.

٢– تأخير بدء النضج.

٣– تثبيط بعض التفاعلات الإنزيمية.

٤–خفض إنتاج بعض المركبات العضوية العطرية.

٥– تغيرات فى أيض بعض الأحماض العضوية.

٦– خفض معدل تحلل المواد البكتينية.

٧– منع تحلل الكلوروفيل.

٨– تكوين طعم غير مقبول.

٩– حث تكوين عيوب فسيولوجية.

١٠– تثبيط النمو الفطرى على المنتج.

١١– تثبيط فعل الإثيلين.

١٢– تغيرات فى محتوى السكر (فى البطاطس).

١٣– تأثيرات على التزريع (البطاطس).

١٤– المحافظة على غضاضة المنتج.

١٥– إبطاء التغيرات التالية للحصاد.

١٦– تقليل التغيرات اللونية.

ومن أهم العيوب الفسيولوجية التى تحدثها زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون ما يلى:

١– القلب البنى، والانهيار الداخلى المصاحب للحرارة المنخفضة فى التفاح.

٢– تنقير الفول الرومى.

٣- إسراع الطراوة وظهور طعم غير مرغوب فيه فى البروكولى.

٤- التلون الداخلى فى الكرنب.

٥- التلون البنى الداخلى فى الفلفل.

٦- تكون طعم غير مرغوب فيه فى الكيوى، والسبانخ، والفراولة.

٧- الصبغة البنية فى الخس.

٨- تغير لون القلنسوة فى عيش الغراب.

٩- منع المعالجة فى البطاطس.

١٠- عدم انتظام النضج وظهور تلطخات سطحية فى الطماطم (Thompson ٢٠٠٣).

تكوين الجو المتحكم فى مكوناته

يمكن تكوين الجو المتحكم فى مكوناته بضخ تيار من الهواء يحتوى على النسب المرغوب فيها من كل من الأكسجين، وثانى أكسيد الكربون، والنيتروجين. ولا تكون المخازن فى هذه الحالة محكمة الإغلاق. ويتم توفير النسب المرغوب فيها من الغازات عن طريق احتراق أى من غازى البروبان propane، أو الميثان methane. ونظرًا لأن خليط هذه الغازات يتخلل المنتج المخزن، ثم يخرج من خلال منافذ التهوية بصورة دائمة؛ لذا .. فإنه لا توجد عند اتباع هذه الطريقة مشاكل تتعلق بتراكم غاز الإثيلين، كما لا توجد حاجة إلى استعمال المركبات التى تمتص غاز ثانى أكسيد الكربون (عن Salunkhe & Desai ١٩٨٤أ).

أما غاز أول أكسيد الكربون فإنه يضاف باستعمال اسطوانات (أنابيب) الغاز المضغوط بعد خلطه مع النيتروجين؛ لكى لا يزيد على ١٠٪.

ويعطى Kader وآخرون (١٩٨٥) مزيدًا من التفاصيل عن خلط الغازات وقياس نسبتها فى هواء المخازن.

وعندما تطول كثيرًا فترة التخزين فى الجو المتحكم فيه، فإنه تلزم – حينئذٍ – إزالة الإثيلين الذى يتراكم فى جو المخزن، ويستعمل لذلك مركبات ماصة للغاز؛ مثل