٢- تجنب مصادر الغاز التى من أهمها:

أ- الجرارات والآلات التى تعمل بالوقود: فيجب عدم تركها فى المخازن دون استعمال. وتفضل استخدام الرافعات forklifts التى تعمل بالكهرباء.

ب- إزالة الثمار الزائدة النضج أولاً بأول.

جـ- إزالة الثمار المجروحة.

د- عدم ترك الثمار المنتجة للإيثيلين مع الثمار الأخرى الأقل إنتاجًا للغاز.

٣- استخدام مادة ماصة ذات مسطح كبير يمكنها ادمصاص برمنجنات البوتاسيوم؛ مثل الفيرميكيوليت، والسيليكاجل، والبرليت؛ حيث تتحول البرمنجنات بواسطة الغاز من صورة MnO_4 ذات اللون القرمزى إلى الصورة MnO_2 ذات اللون البنى (Sherman ١٩٨٥).

٤- المعاملة بمضاد الإثيلين 1-MCP.

تفيد المعاملة بمضاد الإثيلين 1-MCP فى تجنب أضرار الغاز فى بعض محاصيل الخضر. ففى الفلفل كانت المعاملة بالـ 1-MCP بتركيز ١,٠ ميكروليتر/لتر شديدة الفاعلية فى تأخير شيخوخة الثمار، وتحلل الكلوروفيل، والفقد فى الوزن. وقد حافظت المعاملة على محتوى الفلفل من فيتامين جـ، وخفضت من معدل التنفس وإنتاج الإثيلين عما حدث فى ثمار الكنترول، وكان ذلك مصاحبًا بزيادة فى نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة (مثل الـ superoxide dismutase، والـ α-ascorbate peroxidase) ومحتوى الثمار من متعددات الأمين، مثل الـ spermidine، والـ putrescine (Cao وآخرون ٢٠١٢).

تنفس منتجات الخضر بعد الحصاد

يمكن إرجاع غالبية التغيرات التى تطرأ على الخضروات بعد الحصاد إلى تنفس أنسجتها، وما يصاحب ذلك من نشاط إنزيمى وانطلاق للطاقة. فتوجد علاقة طردية مباشرة بين سرعة تدهور الخضروات المخزنة ومعدل تنفس أنسجتها.

تقسيم الخضروات حسب معدل التنفس بعد الحصاد

تقسم الخضروات إلى خمس مجاميع حسب معدل تنفس أنسجتها بعد الحصاد كما يلى (عن Kader وآخرين ١٩٨٥).

المجموعة	معدل التنفس عند ٥°م (مجم CO_2/كجم/ساعة)	الخضر
التنفس منخفض جدًّا	< ٥	الخضر المجففة (ومن الفاكهة التمر والنقل)
التنفس منخفض	٥–١٠	البصل والبطاطس
التنفس متوسط	١٠–٢٠	الكرنب ، والجزر، والخس، والفلفل، والطماطم
التنفس مرتفع	٢٠–٤٠	الفراولة، والقنبيط، وفاصوليا الليما
التنفس مرتفع جدًّا	٤٠–٦٠	الخرشوف، والفاصوليا، وكرنب بروكسل
التفس شديد الارتفاع	> ٦٠	الأسبرجس، والبروكولى، وعيش الغراب، والبسلة، والسبانخ، والذرة السكرية

ويلاحظ من التقسيم السابق لمعدل التنفس فى محاصيل الخضر أنه ينخفض كلما ازدادت درجة نضج الأنسجة فى الأعضاء النباتية التى يتم حصادها سواء أكانت جذورًا، أم سيقانًا، أم أوراقًا، أم أزهارًا، أم بذورًا (عن Snowdon ١٩٩٠).

تأثير درجة الحرارة على معدل تنفس وتدهور الخضر أثناء التخزين

يكون تنفس الخضروات أقل ما يمكن فى درجة الحرارة الأعلى من درجة التجمد مباشرة، ثم يزيد معدل التنفس بمقدار ٢–٣ أضعاف فيما بين الصفر المئوى و ١٠°م، وبمقدار الضعف مع كل زيادة فى الحرارة بعد ذلك مقدارها ١٠ درجات مئوية فيما بين ١٠ و ٣٥°م؛ أى تخضع الزيادة فى معدل التنفس مع ارتفاع درجة الحرارة فى هذا المدى لقانون فانت هوف Van't Hoff.

ويعرف مقدار التضاعف فى معدل التنفس (أو أى من العمليات الحيوية الأخرى) مع كل ارتفاع فى درجة الحرارة قدره ١٠ درجات مئوية باسم Temperature Quotient،

ويعطى الرمز Q_{10}. ويبين جدول (٢١–٨) الـ Q_{10} بالنسبة لمعدل التدهور فى عدد من الخضروات.

جدول (٢١–٩): تأثير التغير فى درجة الحرارة بمقدار ١٠ درجات مئوية على معدل تدهور بعض الخضروات (Q_{10}).

المحصول والتقدير(أ)		الـ (Q_{10}) عند التغير فى درجة الحرارة من – إلى° م		
		صفر–١٠	١٠–٢٠	٢٠–٣٠
الأسبرجس	١ :	٢,٧	٢,٤	١,٨
	٢ :	٥,٨	٢,٧	١,٤
	٣ :	١٠,٠	٢,٠	٢,٠
كرنب بروكسل	١ :	٣,٨	٢,٧	١,٩
الكرفس	١ :	٤,١	٢,٣	١,٩
خس الرؤوس	١ :	٢,٥	٢,٢	١,٩
البسلة	١ :	٣,٣	٢,٨	٢,٠
	٢ :	٢٧,٥	٢,٦	١,٥
الفجل	١ :	٢,٩	٢,٣	١,٦
السبانخ	١ :	٣,٣	٢,٥	١,٨
الذرة السكرية	٢ :	٣,٩	٣,٦	١,٥

(أ) التقدير على أساس الوقت اللازم مروره: ١– لوصول المنتج إلى حالة غير صالحة للبيع، و ٢– لفقد المنتج لـ ٣٠٪ من السكر الموجود به ابتداء، و ٣– لحدوث زيادة مقدارها ٥٠٪ فى نسبة الألياف.

وتتباين قيمة Q_{10} بتغير درجة الحرارة فى عديد من العمليات البيولوجية، بما فى ذلك التنفس، وهى تتراوح بالنسبة للتنفس — عادة — بين ١,٠ و ٥,٠، وتكون أعلى ما يمكن بين صفر، و ١٠° م.

ويجب أن تعتمد قيمة Q_{10} المقدرة على معدل تنفس المنتج فى البداية؛ ذلك لأنه بعد تخزينه فى درجات حرارة مختلفة يصبح المنتج فى أعمار فسيولوجية متباينة، وتصبح معدلات التنفس المقدرة له مضللة.

هذا .. ولا يعنى ارتفاع معدل التنفس الابتدائى لمحصول ما أنه بالضرورة ذو Q_{10} مرتفعة، والعكس – كذلك – صحيح.

ويبين جدول (٢١–٩) مثالاً افتراضيًّا يوضح العلاقة ما بين الـ Q_{10} للتنفس ومعدل تدهور المنتج أثناء التخزين، معبرًا عنه بفترة الصلاحية للتخزين والنسبة المئوية للفقد اليومى.

جدول (٢١–٨): العلاقة بين الـ Q_{10} للتنفس ومعدل تدهور المنتج أثناء التخزين.

التغير فى الحرارة (°م)	Q_{10} المفترضة(أ)	سرعة التدهور النسبية	فترة التخزين النسبية	الفقد اليومى (٪)
حرارة الأساس: صفر	—	١,٠	١٠٠	١
صفر – ١٠	٣,٠	٣,٠	٣٣	٣
١٠–٢٠	٢,٥	٧,٥	١٣	٨
٢٠–٣٠	٢,٠	١٥,٠	٧	١٤
٣٠–٤٠	١,٥	٢٢,٠	٤	٢٥

(أ): Q_{10} = (معدل التدهور عند حرارة T + ١٠°م)/ معدل التدهور عند حرارة T°م.

وتقسم الخضروات حسب معدل تنفسها فى مختلف درجات الحرارة كما يلى:

١– خضروات بطيئة فى معدل تنفسها (أقل من ١٠ مجم ثانى أكسيد كربون/كجم/ساعة عند ١٠°م، أو أقل من ٤٠ مجم CO_2/كجم/ساعة عند ٢٠°م)، وتشمل: البطاطس، والبصل، والخيار.

٢– خضروات ذات معدل تنفس متوسط (١٠–٢٠ مجم CO_2/كجم/ساعة عند ١٠°م، أو ٤٠–٨٠ مجم CO_2/كجم/ساعة عند ٢٠°م) وتشمل: الفلفل، والجزر، والطماطم، والباذنجان.

٣– خضروات ذات معدل تنفس عال (٢٠–٤٠ مجم CO_2/كجم/ساعة عند ١٠°م، أو ٨٠–١٢٠ مجم CO_2/كجم/ساعة عند ٢٠°م)، وتشمل: الفجل.

٤– خضروات ذات معدل تنفس عال جدًّا (أكثر من ٤٠ مجم CO_2/كجم/ساعة عند ١٠°م أو ١٢٠ مجم CO_2/كجم/ساعة عند ٢٠°م)، وتشمل: البصل الأخضر، والقنبيط، والبسلة،

والشبت، والبقدونس، والقاوون، والبامية، وعيش الغراب (عن Salunkhe & Desai ١٩٨٤أ، و ١٩٨٤ب).

تأثير الأكسجين على معدل التنفس

يؤدى خفض نسبة الأكسجين وزيادة نسبة ثانى أكسيد الكربون فى جو المخزن إلى خفض معدل التنفس فى الخضر المخزنة، ويسمى ذلك الإجراء بـ "التخزين فى الجو المعدل" Modified Atmosphere Storage. ويحتوى الجو المعدل عادة على ٣٪-٥٪ أكسجينًا، ونحو ٥٪ ثانى أكسيد الكربون.

ويلزم دائمًا توفر كمية كافية من الأكسجين؛ حتى يستمر التنفس هوائيًّا وينطلق الماء وغاز ثانى أكسيد الكربون؛ لأن غياب الأكسجين يجعل التنفس لا هوائىّ، ويتكون الكحول، وحامض الخليك، وثانى أكسيد الكربون. والكحول ضار بالأنسجة النباتية، ويؤدى إلى موت الخلايا. كما أن المركبات الوسطية الأخرى التى تتكون أثناء عملية التنفس اللاهوائى هذه ضارة أيضًا. فدرنات البطاطس يتكون بها التيروزين tyrosine المسئول عن اللون الأسود فى الدرنات المصابة بحالة القلب الأسود، وتتكون بالكرنب والكرفس مواد تحدث نقرًا وبقعًا صغيرة متناثرة فى أعناق الأوراق والعروق.

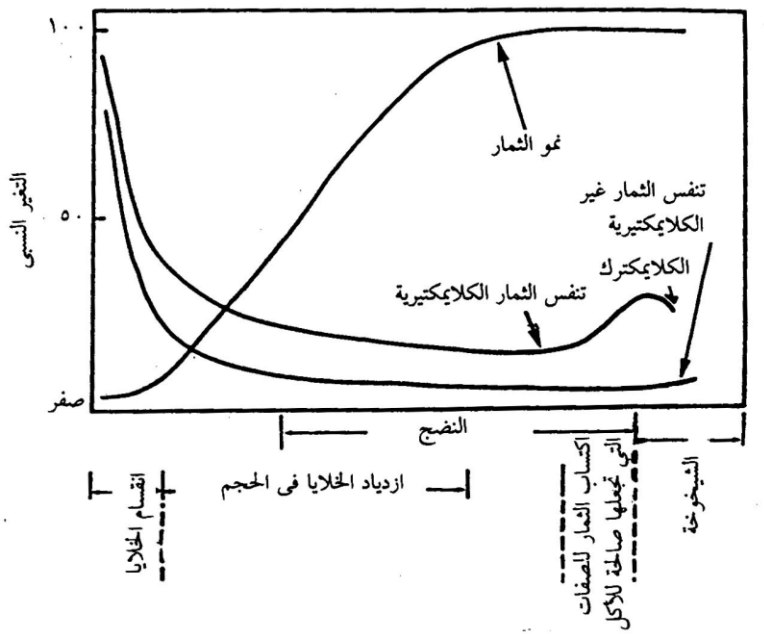
وتتضح من ذلك أهمية التهوية فى حجرات التخزين. كما أنه من الضرورى تحريك الهواء خلال المحصول المخزن لنقل الحرارة الناتجة من التنفس.

ظاهرة الكلايمكتِرك أثناء تنفس الثمار

اكتشف Kidd & West ظاهرة الكلايمكتِريك Climacteric أثناء دراستهما للتغيرات فى معدل تنفس ثمار التفاح عند نضجها؛ فقد لاحظا أن ثمار التفاح تمر بثلاث مراحل كالتالى:

١- فى المرحلة الأولى يحدث انخفاض طفيف فى معدل التنفس، يستمر - تدريجيًّا - مع كبر حجم الثمار، حتى تصل إلى أكبر حجم لها. ويطلق على هذه المرحلة اسم "ما قبل الكلايمكتِريك" Preclimacteric Stage.

٢- تبدأ المرحلة الثانية بعد وصول الثمار إلى أكبر حجم لها، وتستمر أثناء نضجها. ويحدث أثناءها ارتفاع حاد فى معدل التنفس يصل إلى أقصاه عند اكتمال نضج الثمار. ويطلق على هذه المرحلة اسم "الكلايمكتِريك"، أو "ذروة التنفس" Climacteric Stage (شكل ٢١-١).



شكل (٢١-١): طرز نمو وتنفس الثمار أثناء تطورها (عن Wills وآخرين ١٩٨١).

وتقسم الثمار حسب التغيرات التى تلاحظ فى معدل التنفس بها بعد القطف إلى قسمين:

١- ثمار تحدث فيها ظاهرة الكلايمكتِريك، وتسمى الثمار الكلايمكتِرية Climacteric Fruits، ومن أمثلتها: التفاح، والتين، والكمثرى، والمشمش، والخوخ، والبرقوق، والزبدية، والمانجو، والموز، والباباظ، والسابوتا، والبشملة، والطماطم، والقاوون — خاصة الكنتالوب، وكيزان العسل — والبطيخ.

٢- ثمار غير كلايمكتيرية Non-Climacteric Fruits: لا يلاحظ بها تغيرات فى معدل التنفس بعد القطف. ومن أمثلتها: الكريز، والزيتون، والعنب، والموالح، والأناناس، والفراولة، والخيار، والفلفل، والباذنجان (شكل ٢١-١).

وبرغم صحة هذا التقسيم من حيث التغيرات الملاحظة فى معدل التنفس بعد القطف، إلا أنه يمكن القول بأن ظاهرة الكلايمكتِريك تحدث فى جميع الثمار اللحمية إذا قطفت بعد اكتمال نموها مباشرة، لكن ما يحدث هو أن بعض الثمار – كالخيار، والكوسة، والباذنجان – تقطف قبل وصولها إلى أقصى حجم لها؛ فلا تحدث بها الظاهرة؛ لأنها لا تنضج نباتيًّا بعد القطف. والبعض الآخر يقطف بعد اكتمال نموه، ولكنه يستهلك قبل نضجه نباتيًّا، كالفلفل، فلا تلاحظ به الظاهرة. كما أن بعض الثمار تقطف بعد اكتمال نضجها؛ فتكون ظاهرة الكلايمكتِريك قد حدثت بها قبل القطف، كما فى العنب، والتين، والفراولة (النبوى وآخرون ١٩٧٠).

معاملات المحافظة على الجودة والحد من الإصابات المرضية والحشرية

تتنوع كثيرًا المعاملات التى تُجرى على الخضر الطازجة للمحافظة على جودتها والحد من إصاباتها المرضية والحشرية أثناء التخزين، كما يلى:

١- المعاملات الحرارية السابقة للتخزين، وهى التى تجرى بعد الحصاد مباشرة، وتعرف باسم المعالجة curing.

٢- المعاملات الحرارية التجارية لأجل التخلص من الحشرات الحية، وتكون بالهواء الساخن.

٣- المعاملات الحرارية التى تجرى بهدف مكافحة الإصابات المرضية، وتكون غالبًا بالماء الساخن، وقد تجرى بالهواء الساخن: تكون المعاملة بالماء الساخن لفترة قصيرة لا تزيد عن الساعة على حرارة ٤٥-٦٠°م، أما المعاملة بالهواء الساخن فتستمر لمدة ١٢ ساعة حتى أربعة أيام على حرارة ٣٨-٤٦°م.

٤- المعاملات الحرارية التى تهدف إلى الحد من أضرار البرودة فى المحاصيل