ولا تقتصر هذه الأعراض على الفلفل، إذ إن أوراق عديد من الأنواع النباتية تصبح صفراء، ومشوهة، وملتفة، وسهلة التقصف فى وجود تركيزات عالية من ثانى أكسيد الكربون لفترات طويلة، ويرجع ذلك إلى تنشيط تراكم المواد الكربوهيدراتية فى الأوراق لآلية التثبيط الاسترجاعى feedback inhibition، الأمر الذى يؤدى إلى تثبيط عملية البناء الضوئى (عن Aloni & Kami ٢٠٠٢)

٤- يمكن للإثيلين عند تركيز ٠,٠٥ جزءًا فى المليون والبروبلين عند تركيزات أعلى أن يُحدث شيخوخة مبكرة لنباتات الطماطم والخيار. وينتج الإثيلين – عادة – عندما يكون الاحتراق غير كامل، بينما قد يتسرب البروبلين عند استعمال البروبان.

٥- يؤدى الاحتراق غير التام للمحروقات إلى إنتاج غاز أول أكسيد الكربون، وهو غاز سام للإنسان وعديم اللون والرائحة.

٦- عند ازدياد حرارة اللهب قد تتكون أكاسيد النيتروجين nitrous oxides، وهى التى تتسبب فى ضعف النمو وحدوث تحللات.

٧- عند تواجد ثانى أكسيد الكربون مع أكاسيد النيتروجين يمكن أن تزداد الأضرار على النبات عما يكون عليه الحال عند تواجد أى منهما منفردًا.

٨- قد تتسرب المحروقات الغازية – ذاتها – إلى هواء البيت (Blom وآخرون ٢٠٠٣).

الاستجابة للتغذية بثانى أكسيد الكربون فى محاصيل الزراعات المحمية

يزداد معدل البناء الضوئى فى معظم محاصيل البيوت المحمية بزيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون فى هواء الصوبة من ٣٤٠ إلى ١٠٠٠ جزء فى المليون، وغالبًا ما تكون تلك الزيادة فى معدل البناء الضوئى – عند أى مستوى من الإشعاع النشط فى البناء الضوئى – حوالى ٥٠٪، وقد تكون هذه النسبة من الزيادة اقتصادية فى بعض المحاصيل فى حالة المستويات المنخفضة من الإضاءة.

هذا ويتأثر انتقال غاز ثانى أكسيد الكربون من الهواء الخارجى إلى داخل أنسجة الورقة (الذى يحدث من خلال الثغور) بتركيز الغاز فى الهواء (حيث يزداد الانتقال بزيادة التركيز). وبمدى انفتاح الثغور، وهو الأمر الذى يتأثر بكل من مستوى الإضاءة، وحرارة الأوراق والهواء، والرطوبة النسبية، والشدّ الرطوبى، وتركيز ثانى أكسيد الكربون والأكسجين فى كل من الهواء والأوراق

وبقدر تركيز ثانى أكسيد الكربون فى الهواء بنحو ٣٤٠ جزءًا فى المليون، وهو مستوى تنمو عنده جميع النباتات جيدًا، ولكن مع زيادة مستوى الغاز إلى ١٠٠٠ جزء فى المليون يزداد معدل البناء الضوئى كذلك، بما يعنى توفر مزيد من السكريات والمواد الكربوهيدراتية للنمو النباتى. ويحدث الأمر العكسى، فينخفض معدل البناء الضوئى عند انخفاض تركيز ثانى أكسيد الكربون من ٣٤٠ إلى ٢٠٠ جزء فى المليون. وهو الأمر الذى يمكن أن يحدث فى البيوت المحمية المحكمة الإغلاق. وعلى الرغم من أن التهوية شتاءً قد تسمح بزيادة تركيز الغاز مرة أخرى، إلا أنها لا تكفى — وحدها — لوصول الغاز إلى تركيزه الطبيعى وهو ٣٤٠ جزءًا فى المليون، وتكون التغذية بثانى أكسيد الكربون هى السبيل الوحيد لزيادة تركيز الغاز.

ويختلف المستوى الذى يجب أن يصل إليه تركيز الغاز باختلاف المحصول، وشدة الإضاءة، ودرجة الحرارة، والتهوية، ومرحلة النمو النباتى، واقتصاديات المحصول. وفى معظم المحاصيل تكون نقطة التشبع بالغاز حوالى ١٠٠٠–١٣٠٠ جزء فى المليون فى الظروف المثالية ويوصى بمستوى منخفض عن ذلك (٨٠٠–١٠٠٠ جزء فى المليون) لإنتاج الشتلات (مثل شتلات الطماطم والفلفل والخيار)، وكذلك لإنتاج الخس، كما يوصى بتركيز أقل من ذلك (٥٠٠–٨٠٠ جزء فى المليون) عند إنتاج بعض أصناف الجربارة gerbera، والبنفسج الأفريقى African violets. هذا وتؤدى زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون إلى تقصير موسم النمو بنحو ٥٪–١٠٪، وكذلك إلى تحسين نوعية المحصول وكميته، وزيادة حجم الأوراق وسمكها (Blomi وآخرون ٢٠٠٣)

ويمكن تقسيم الخضروات (والنباتات عمومًا) إلى مجموعتين رئيسيتين حسب كفاءتها فى استخدام ثانى أكسيد الكربون، وهما:

١- النباتات الـ C-4، مثل الذرة والذرة السكرية والطماطم، وهذه تبلغ أقصى كفاءة لها فى البناء الضوئى ٥٠-٩٠ مجم من ثانى أكسيد الكربون المثبت لكل ديسيمتر مربع (١٠٠سم٢) من سطح الأوراق فى الساعة

٢- النباتات الـ C-3، مثل الفاصوليا، والبسلة، والبطاطس، والسبانخ، وتلك تبلغ أقصى كفاءة لها فى البناء الضوئى ٢٠-٥٠ مجم من ثانى أكسيد الكربون لكل ديسيمتر مربع من سطح الورقة فى الساعة.

وبينما تستجيب النباتات لزيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون فى الهواء بزيادة معدل البناء الضوئى، فإن تلك الاستجابة تنخفض بعد أسابيع، أو أيام، أو حتى بعد ساعات أحيانًا وقد أُرجعت تلك الظاهرة إلى انتقال الغذاء المجهز الذى يتوقف بسبب تثبيط أماكن التخزين لاستقبال المزيد منه، فيما يُعرف باسم sink limitation-induced feed-back inhibition

كما أدت زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون لفترة طويلة إلى توقف استجابة نمو ثمار الكنتالوب لتلك الزيادة، الأمر الذى أمكن معادلته بالتدفئة ليلاً، وقد أُرجع ذلك التوقف إلى تراكم الكربون غير البنائى فى أنسجة الأوراق (Kenig & Kramer ٢٠٠٠).

ولقد وجد أن النباتات المعرضة لشدٍّ ملحى تُظهر استجابة أكبر لزيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون عن النباتات غير المعرضة لمثل هذا الشدّ. وربما يكون مرد ذلك إلى أن النباتات المعرضة للشدّ الملحى تكون - ابتداءً - عالية فى معدل التنفس (استجابة لزيادة الطلب على الطاقة) ومنخفضة فى معدل البناء الضوئى؛ بما يعنى حاجتها لمزيد من الغذاء المجهز، الذى لا يجد فرصة للتراكم فى الأوراق (عن Li وآخرين ١٩٩٩)

ويُستفاد - عادة - من زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون كبديل للإضاءة الإضافية فى الصوبات، نظرًا لانخفاض تكلفته النسبية، إلا أن استعماله لا يكون اقتصاديًا فى

الصوبات خلال الفترات التى تزداد فيها الحاجة للتهوية (Ferentinos وآخرون ٢٠٠٠)

قد يمكن اللجوء إلى التغذية بثانى أكسيد الكربون فى البيوت المحمية فى المناطق الشمالية الباردة كوسيله لتقصير فترة نمو الشتلات، وزيادة قوة نموها، وربما تحسين النمو لنباتى بعد الشتل فى الحقل المكشوف خلال شهور الربيع ففى تلك المناطق تقل - بشدة - الحاجة إلى تهوية الصوبات فيما عدا فى الأيام الحارة المشمسة. وتستفيد نباتات الشتلات الصغيرة ذات الأنسجة الغضة السريعة النمو من أى تغذية إضافية بثانى أكسيد الكربون هذا إلا إنه مع نضج واكتمال نمو الأوراق الأولى فى التكوين للشتلات فإن تركيز النشا بها يؤدى إلى بطء كلا من معدل البناء الضوئى ومعدل النمو النسبى

ولقد وجد أن الإضاءة الإضافية فى تلك المناطق الشمالية تكون أكثر كفاءة من التغذية بغاز ثانى أكسيد الكربون فى إنتاج الشتلات، فهى يمكن أن تسرع من عمر الشتلات وتزيد من جودتها. وتجعل من الممكن التخطيط للزراعات المتتالية بصورة أفضل. هذا . إلا أن تأثير تلك المعاملة — وكذلك معاملة التغذية بثانى أكسيد الكربون على محصول الشتلات بعد الشتل فى الحقل المكشوف يعد شبه معدوم أو غير منتظم.

وتستفيد الشتلات من زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون والإضاءة الإضافية بالزيادة فى قوة نموها. وفى أوزانها وسمك أوراقها، كما ينخفض فيها معدل النتح (Tremblay & Gosselin ١٩٩٨)

وقد أوضحت دراسات Tremblay وآخرون (١٩٨٧)أن زيادة تركيز غاز ثانى أكسيد الكربون —عند إنتاج شتلات الكرفس فى البيوت المحمية — أدت إلى زيادة مساحة الأوراق والوزن الجاف لكل من النموين الخضرى والجذرى، ولكن لم تكن للمعاملة أية تأثيرات جوهرية على مقاييس النمو عند الحصاد.

وتتشابه كثير من النباتات فى استجابتها لزيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون من ٣٥٠

إلى ١٠٠٠ جزء فى المليون خلال المراحل المبكرة من نموها، ولكن استمرار تلك الاستجابة فيما بعد يتأثر بمدى توفر أعضاء التخزين، ولا يهم موقع تلك الأعضاء (الأجزاء التكاثرية، أم الجذور، أم السيقان) بقدر ما يهم حجم تلك الأعضاء وقدرتها على استيعاب الزيادة فى الغذاء المجهز (Reekie وآخرون ١٩٩٨).

وقد درست الاستجابة للتغذية بغاز ثانى أكسيد الكربون فى عدد من محاصيل الخضر، ومن أمثلة تلك المحاصيل ما يلى:

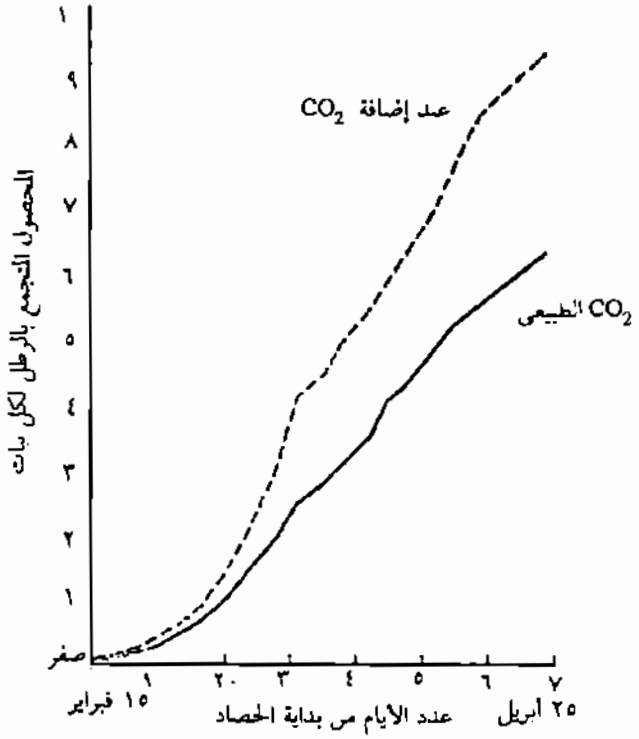
١- الطماطم:

وجد فى دراسة أجريت على الطماطم فى البيوت المحمية أن زيادة تركيز غاز ثانى أكسيد الكربون إلى ١٢٠٠ جزء فى المليون أدت إلى زيادة المحصول المبكر بنسبة ١٥٪، والمحصول الكلى بنسبة ٨٪ (Hand & Soffe ١٩٧١). كما أوضح Knecht O'Leary (١٩٧٤) أن زيادة تركيز الغاز من ٤٠٠ إلى ٨٠٠ جزء فى المليون أحدثت زيادة جوهرية فى المحصول وحجم الثمار. كذلك وجد أن زيادة تركيز الغاز لمدة ٦½ ساعة يوميًا أدت إلى التبكير فى النضج، وزيادة وزن الثمرة، وزيادة المحصول الكلى بنسبة ٣٥٪، وذلك بالمقارنة بزيادة قدرها ٣١٪ و ٢٤٪ فى محصولى الفلفل والباذنجان على التوالى. ويبين شكل (٣-٢٦) تأثير المعاملة بالغاز على محصول الطماطم (عن Wittwer & Honma ١٩٧٩).

وقد أوضحت دراسات Nilsen وآخرون (١٩٨٣) أن الإضاءة العالية ليست ضرورية فى الطماطم لكى تحدث استجابة جيدة لزيادة تركيز غاز ثانى أكسيد الكربون؛ فقد ازداد معدل البناء الضوئى جوهريًا فى كل المعاملات؛ بما فى ذلك أقل المستويات، لكن الحرارة المرتفعة كانت عاملاً محددًا، فازدادت الاستجابة لزيادة تركيز الغاز مع ارتفاع درجة الحرارة. وقد صاحبت الزيادة فى معدل البناء الضوئى زيادة جوهرية فى المحصول الطازج والجاف.

ويستدل من دراسات Behboudian & Lai (١٩٩٤) على أن زيادة تركيز الغاز أدت إلى خفض معدل النتح، وزيادة معدل البناء الضوئى، مقارنة بمعاملة الشاهد، وحدثت

اكبر استجابة عند زيادة تركيز الغاز إلى ٧٠٠ جزء فى المليون مع حرارة ٢٥°م نهارًا، و ١٦°م ليلا



شكل (٣-٢٦) تأثير المعاملة بغاز ثانى أكسيد الكربون على المحصول فى الطماطم.

وفى المقابل وجد Lee & Lee (١٩٩٤أ) أن زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون إلى ٨٠٠ جزء فى المليون – لفترات طويلة – أدت إلى نقص نفاذية الأوراق لبخار الماء. وانحصر معدل النتح منها (وخاصة فى الأوراق الوسطى على الساق)، وارتفاع درجة حرارتها (وخاصه فى الأوراق التى فى قمة النبات). كما أدت المعاملة بالغاز إلى زيادة معدل البناء الضوئى فى البداية. ثم انخفاضه إلى مستوى البناء الضوئى فى نباتات معاملة الشاهد بعد شهر من بداية المعاملة. مع استمرار انخفاضه إلى مستوى أدنى من نباتات الشاهد – غير المعاملة – بعد ذلك

وفى دراسة أخرى (Lee & Lee ١٩٩٤ب) وجد أن معاملة نباتات الطماطم بغاز ثانى أكسيد الكربون (بتركيز ٨٠٠ أو ٢٤٠٠ جزء فى المليون) لفترات طويلة أدت إلى: زيادة محتوى الأوراق من النشا فى الثامنة صباحًا، ونقص محتواها من الكلوروفيل والبروتين الذائب، ونقص نشاط إنزيم RuBPCase، مقارنة بمعاملة الشاهد.

وتتوقف استجابة الطماطم للمعاملة بغاز ثانى أكسيد الكربون بعد فترة من المعاملة، إلا أن التوقف عن التغذية بالغاز لفترة قصيرة يعيد للنباتات قدرتها على الاستجابة للغاز عند التغذية به من جديد (Blom وآخرون ٢٠٠٣).

٢- الخيار:

أوضحت عديد من الدراسات أن نبات الخيار يستجيب لزيادة تركيز غاز ثانى أكسيد الكربون فى البيوت المحمية، بشرط توفر إضاءة جيدة وحرارة مناسبة. وقد كانت الاستجابة فى صورة زيادة فى نمو الأوراق، والتفريع، والإزهار، والمادة الجافة، والمحصول المبكر، والمحصول الكلى. فمثلاً .. وجد Hopen & Ries (١٩٦٢) أن نباتات الخيار استجابت للزيادة فى تركيز الغاز من ٣٥٠ حتى ٢١٥٠ جزءًا فى المليون. وعلى الرغم من أن هذه الاستجابة حدثت أيًا كانت شدة الإضاءة، إلا أن الاستجابة لزيادة تركيز الغاز كانت أكبر مع ازدياد شدة الإضاءة من ٣٠٠ إلى ١٤٠٠ قدم — شمعة. وقد تمثلت هذه الاستجابة على شكل زيادة فى الوزن الطازج، والوزن الجاف للنبات؛ وطول النبات، وعدد الثمار بالنبات. كما أوضحت دراسات Slack & Hand (١٩٨٦) أن نباتات الخيار تستجيب للزيادة فى تركيز الغاز حتى ١٠٠٠ جزء فى المليون شتاءً، وحتى ٤٥٠ جزءًا فى المليون صيفًا، وكانت الاستجابة على شكل زيادة فى المحصول ومتوسط وزن الثمرة. وقد كانت العلاقة طردية بين المحصول ومتوسط تركيز الغاز فى جو البيت، وكانت المعاملات اقتصادية على الرغم من احتياج البيوت إلى التهوية صيفًا.

٣- الخس:

يعتبر الخس من الخضر التى تستجيب بصورة جيدة لزيادة تركيز غاز ثانى أكسيد

الكربون فى البيوت المحمية، دون أن تتأثر نباتات الخس سلبيًّا بنواتج احتراق الوقود المستخدم فى إنتاج الغاز فقد وجد أن زيادة تركيز الغاز إلى ٣-٦ أضعاف التركيز الطبيعى يحدث التأثيرات التالية:

أ- تبكير النضج مدة ١٠ أيام على الأقل، مما يسمح بزراعة محصول إضافى من الخس فى الموسم نفسه

ب- زيادة المحصول بمقدار ٤٠٪ إلى ١٠٠٪، وتكون الزيادة فى المحصول أكبر فى الأصناف السريعة النمو

جـ- زيادة نسبة المادة الجافة.

إلا أن الاستجابة العالية لزيادة تركيز الغاز تتطلب ما يلى:

أ- زيادة درجة الحرارة بمقدار ٦°م-٨°م نهارًا و ٣°م ليلاً

ب- زيادة معدلات الرى

جـ- زيادة معدلات التسميد، خاصة بالنسبة للسماد الآزوتى (Wittwer & Honma ١٩٧٩).

وكان أفضل نمو للخس عندما بلغ تركيز ثانى أكسيد الكربون ١٠٠٠، أو ٢٠٠٠ مجم/لتر وتحت هذه الظروف كانت أفضل شدة إضاءة لنمو الخس > ٢٠٠ ميكرومول/م^{2} فى الثانية، بينما لم تؤثر مستويات العناصر المغذية على معدل النمو (Park & Lee ١٩٩٩).

٤- الفراولة:

أدت زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون إلى زيادة معدل نمو وتطور نباتات الفراولة، حيث بكرت بالإزهار والحصاد، واستغرقت الثمار فترة أقل لحين وصولها إلى مرحلة النضج وأدت المعاملة إلى زيادة امتصاص النباتات للعناصر بنسبة ٣٠٪-٦٠٪ مقارنة بالكنترول، وإلى زيادة المحصول بنسبة ٣٠٪-٥٠٪ حسب بيئة الزراعة، مع حدوث زيادة فى محتوى الثمار من المواد الصلبة الذائبة والحموضة المعايرة. وعلى الرغم من أن المعاملة أدت إلى زيادة المساحة الورقية، فإن معدل امتصاص النباتات لم يتغير (Itani وآخرون ١٩٩٨أ، و ١٩٩٨ب).