ويستدل من فحص الأنسجة المتأثرة بملوثات الهواء بالميكروسكوب الأليكترونى على أن بلزمة الخلايا يصاحبه ظهور أضرار بالغشاء البلازمى؛ وتورمات بالبلاستيدات الخضراء، وتبلور غير عادى بالبلاستيدات.

طبيعة الضرر

يبدأ ظهور أعراض ملوثات الهواء عندما يحدث الضرر فى عددٍ كافٍ من الخلايا. وتُحْدِث الملوثاتُ المختلفةُ أضرارَها فى أنسجة مختلفة؛ فمثلاً يضر الأوزون بالخلايا العمادية، ويظهر التحلل فقط فى السطح العلوى للورقة. أما نترات البيروكسى أسيتيل PAN فإنها تؤدى إلى انفصال البشرة السفلى للورقة عن خلايا النسيج الإسفنجى الذى يليها؛ وبذا تأخذ الورقة مظهرًا برّاقًا. ويُحدث ثانى أكسيد الكبريت وفلوريد الأيدروجين — دائمًا — انهيارًا فى الخلايا بجانبى الورقة، ولكن التحلل necrosis يتناثر — عادة — على نصل الورقة فى حالة ثانى أكسيد الكبريت، بينما يتركز فى قمة وحواف الورقة فى حالة فلوريد الأيدروجين (عن Tibbitts & Kobriger ١٩٨٣).

تراكم الملوثات بمحاصيل الخضر

وُجدت — فى منطقة صناعية باليونان — تراكمات عالية من العناصر الثقيلة: Pb، و Cr، و Cd بالخضر الورقية (الكرنب والخس والكرات والهندباء)، بينما كانت الخضر الجذرية (الجزر) أكثر كفاءة فى تراكم الكادميم من التربة عن غيره من العناصر الثقيلة (Voutsa وآخرون ١٩٩٦).

كما جُمعت عينات من الخس والفجل من حقول قريبة من ثلاثة طرق مرورية بمناطق زراعية وصناعية فى مصر. كانت معظم الأراضى فى المناطق الصناعية ملوثة بوضوح بكل من الرصاص والزنك والكادميم والنحاس والنيكل والحديد، مقارنة بتلوث التربة فى المناطق الزراعية. ولقد تبين أن الأجزاء المأكولة من الخس تراكم فيها كميات أكبر عما تراكم فى جذور الفجل. وكان أكثر تراكم للعناصر فى عينات الخس التى

جُمعت من مناطق قريبة من الطرق المزدحمة بالمرور، حيث بلغ تركيزها (بالجزء فى المليون) ٥٣,٢ للرصاص، و٣٠٩ للزنك، و ١,٠١ للكادميم، بينما كان تركيز تلك العناصر فى جذور الفجل ١٧,٢، و٢٦٧، و٠,٧، على التوالى. وقد توقف مدى تراكم العناصر الثقيلة فى الأنسجة النباتية على مدى ازدحام المرور بالطرق، وعلى المسافة من الطريق. كما تبين أن تلوث الخضر بالعناصر الثقيلة يحدث من خلال الأوراق والجذور على حد سواء، إلاّ أن امتصاصها عن طريق الأوراق كان أكثر وضوحاً فى المواقع القريبة من مصادر انبعاث التلوث (Hassan & Gewifel ١٩٩٨).

وفى دراسة أخرى ... جمعت عينات من التربة ونباتات الفراولة والبصل والطماطم والخس والخيار من زراعات متاخمة لكل من شركة أبو زعبل للأسمدة وشركة البوتاسيوم والألومنيوم وشركة السيراميك والبورسلين، وحُلِّلت للتعرف على محتواها من كل من عناصر: النحاس والزنك والمنجنيز والنيكل والرصاص والكادميم والكوبالت والكروم. وقد تبين احتواء عينات التربة على تركيزات عالية من كل من النحاس والزنك والمنجنيز والرصاص مقارنة بالتركيزات فى التربة الزراعية البعيدة عن تلك المصانع. كذلك كان تركيز الرصاص والكادميم فى العينات النباتية أعلى من تركيزهما فى عينات النباتات التى جمعت من مناطق بعيدة عن تلك المصانع، بينما كان تركيز الزنك والنحاس والمنجنيز فى المدى الطبيعى لها (Eissa & El-Kassas ١٩٩٩).

تأثير ملوثات البيئة على بعض محاصيل الخضر

الطماطم

ملوثات الهواء

تكثر المركبات التى تلوث الهواء الجوى Air Pollutants، وتزداد حدتها فى المدن الكبرى والمناطق الصناعية، وهى تنتج عن احتراق المركبات الهيدروكربونية المستخدمة كمصدر للطاقة. وتحدث هذه المركبات أعراضًا مميزة على نباتات الطماطم، والتى تلاحظ

بوضوح فى الزراعات المكشوفة الموجودة بالقرب من المدن والمناطق الصناعية، وفى الزراعات المحمية التى تحرق فيها المركبات الهيدروكربونية بغرض التدفئة. كما قد تظهر فى الزراعات المحمية أنواع أخرى من الأضرار التى تسببها مركبات تنطلق من الأغشية البلاستيكية المستخدمة فى تغطية الصوبات. وفيما يلى عرض لأهم أنواع المركبات التى تلوث الهواء الجوى، والأضرار التى تحدثها على نباتات الطماطم.

ثانى أكسيد الكبريت Sulphur dioxide (SO_2)

عند تعرض نباتات الطماطم لتركيزات منخفضة من غاز ثانى أكسيد الكبريت لفترة طويلة، تظهر عليها بقع صفراء. ويحدث ذلك فى الحقول المجاورة للمناطق الصناعية غالباً. ويتراوح أقصى تركيز يمكن أن تتحمله نباتات الطماطم- دون أن تظهر عليها أية أعراض غير عادية- من ٠,٢- ٠,٣ حجماً فى المليون (vpm). أما إذا تعرضت الطماطم لتركيزات مرتفعة جداً من الغاز لفترة قصيرة- وهو أمر نادر الحدوث- فإن الأعراض تكون على شكل اصفرار حاد، ثم تحلل بأنسجة الورقة فيما بين العروق.

أكاسيد النيتروجين Oxides of Nitrogen

تنتج أكاسيد النيتروجين من احتراق وقود السيارات؛ ولذا لا تلاحظ أعراض الأضرار التى تحدثها إلا بالقرب من الطرق الرئيسية المزدحمة. ويؤدى التعرض لتركيزات منخفضة منها (حجم واحد إلى حجمين فى المليون) لفترة طويلة إلى انحناء حواف الوريقات لأسفل، مع ازدياد دكنة الأوراق، نظراً لزيادة محتواها من الكلوروفيل، بينما يُحدث التعرض لتركيزات مرتفعة منها (٢-١٠ أحجام فى المليون) لمدة قصيرة (١- ٢ساعة) بقعاً متحللة شبيهة بتلك البقع التى يحدثها التعرض لتركيزات مرتفعة من ثانى أكسيد الكبريت.

الإثيلين Ethylene والبروبيلين Propylene

يعد الإثيلين من منظمات النمو، كما أنه يوجد فى الهواء الجوى بتركيز ٠,١ حجم

فى المليون، إلا أن التركيز قد يرتفع فى المناطق الصناعية إلى ٠,٥ حجم فى المليون، وفى البيوت المحمية إلى حجم واحد فى المليون. ويؤدى التعرض للتركيزات المرتفعة من الغاز- وهو أمر نادر الحدوث- إلى انحناء الأوراق لأسفل leaf epinasty. وأكثر الأضرار التى يحدثها الغاز شيوعًا، هى: بطء النمو، وسقوط الأزهار بدون عقد. أما أضرار البروبيلين، فلا تشاهد إلا فى الزراعات المحمية التى تدفأ بالبروبين Propane التجارى عندما يحدث تسرب من أجهزة التدفئة. ولا تظهر الأعراض إلا عند التعرض لتركيزات مرتفعة من الغاز.

الأوزون

تأثر محصول الطماطم سلبياً بكل من التلوث الهوائى بالأوزون والشدّ الرطوبى، حيث انخفض المحصول الكلى بنسبة ٤٨٪، و٢٩٪ فى حالتى الشدّ- على التوالى- وكان ذلك مصاحباً بانخفاض فى معدل البناء الضوئى بلغت نسبته ١٧٪، و٢١٪، على التوالى. وأدى الجمع بين حالتى الشدّ إلى مزيد من التأثير السلبى على كل من المحصول الكلى ومعدل البناء الضوئى (Hassan وآخرون ١٩٩٩).

وقد وجد أن زيادة تركيز غاز ثانى أكسيد الكربون عن التركيز الطبيعى (٣٧٥ ميكرومول/مول) إلى ٤٥٠، أو ٥٢٥،أو ٦٠٠، أو ٦٧٥ ميكرومول/مول تؤدى إلى تجنب أضرار زيادة تركيز الأوزون إلى ٨٠ نانومول/مول على محصول الثمار فى الطماطم (Reinert وآخرون ١٩٩٧).

سمية المركبات التى تدخل فى صناعة البلاستيك

تحدث بعض المركبات التى تدخل فى صناعة البلاستيك بعض الأضرار فى زراعات الطماطم المحمية التى تظل فيها البيوت مغلقة لفترة طويلة. وتنطلق هذه المركبات من البلاستيك نفسه، وأكثرها شيوعًا الأضرار التى تحدثها مركبات البيوتيل فثاليت butylphthalates التى تدخل فى صناعة شرائح البولى فينايل كلورايد (PVC)

المرنة. ويطلق على مركبات كهذه اسم plasticizers، وتسمى الأضرار التى تحدثها باسم plasticizer toxicity. كما يوجد عديد من مركبات البيوتيل فثاليت التى تختلف فى وزنها الجزيئى، وتختلف تبعًا لذلك فى سرعة تطايرها، حيث تكون أسرع تطايرًا كلما صغر وزنها الجزيئى. وتدخل هذه المركبات إلى الأوراق عن طريق الثغور، حيث توقف تمثيل الكلوروفيل، وتتلون النباتات المصابة بلون أخضر ضارب إلى الصفرة. ومع ضعف أو توقف عملية البناء الضوئى تصبح الأوراق رقيقة وشديدة الحساسية لنقص الرطوبة، حيث تنهار بسرعة، وتجف، وتأخذ الأنسجة المصابة مظهرًا ورقيًّا بلون أبيض، أو بنى باهت (Grimbly ١٩٨٦).

وبينما تتأثر الطماطم سلبيًّا — كغيرها من النباتات — بالتركيزات العالية من مختلف ملوثات الهواء، فإن دراسات Pandey & Agrawal (١٩٩٤) أوضحت أن تعريض نباتات الطماطم لتركيزات منخفضة من ملوثات الهواء (NO_2 بتركيز ٠,٢ جزءًا فى المليون، أو SO_2 بتركيز ٠,١ جزءًا فى المليون، أو كلاهما معًا بنفس هذين التركيزين) بمعدل ٤ ساعات يوميًّا لمدة ٥٠ يومًا أحدث زيادة معنوية فى النمو الخضرى للنباتات، ولكن ذلك كان على حساب نموها الثمرى. ويبدو أن النباتات استفادت من تلك الملوثات — كمغذيات — عند هذه التركيزات المنخفضة.

ملوثات التربة

الألومنيوم

تتسمم نباتات الطماطم من جرّاء تعرضها لعنصر الألومنيوم — حتى فى تركيزاته المنخفضة — سواء أحدث ذلك فى التربة (فى الأراضى الحامضية)، أم فى المزارع اللاأرضية التى تحتوى محاليلها المغذية على شوائب من الألومنيوم. وقد وجد Simon وآخرون (١٩٩٤أ) أن وجود الألومنيوم فى المحاليل المغذية بتركيز ١٠، أو ٢٥، أو ٥٠ ميكرومولا أدى إلى نقص امتصاص نباتات الطماطم لعناصر النحاس، والمنجنيز،

والموليبدنم، والزنك، والبورون، والحديد، وذلك مقارنة بمعاملة الكنترول التى خلت من الألومنيوم. وأدت جميع تركيزات الألومنيوم إلى نقص النمو الجذرى ومحتوى الساق والأوراق من عناصر الكالسيوم، والبوتاسيوم، والمغنيسيوم، والمنجنيز، والحديد، والزنك؛ مع زيادة تراكم عناصر الفوسفور، والموليبدنم، والنحاس فى الجذور، وتثبيط انتقالها إلى السيقان والأوراق.

وقد صاحب زيادة تركيز الألومنيوم فى المحاليل المغذية (فى الحدود الموضحة أعلاه) نقصًا فى معدل تبادل الغازات إلى نحو ثُلث إلى نصف المعدل الطبيعى، ولكن لم يتأثر محتوى الأوراق من الكلوروفيل (Simon وآخرون ١٩٩٤ب).

الكادميوم

يُحدث التسمم بالكادميوم — كذلك تغيرات كثيرة فى نباتات الطماطم. فعندما أضيف العنصر — فى صورة كلوريد الكادميوم — إلى المحاليل المغذية فى المزارع اللاأرضية، وجد أن محتوى الأوراق من كلوروفيل أ، وكلوروفيل ب، والكلوروفيل الكلى — وبدرجة أقل — المواد الكاروتينية ينخفض مع زيادة تركيز الكادميوم فى المحلول المغذى من صفر إلى ٣٠ مجم /لتر، ومع زيادة مدة التعرض للعنصر خلال فترة تسجيل القياسات التى دامت ٢٨ يومًا. كذلك ازدادت نسبة كلوروفيل أ إلى كلوروفيل ب بزيادة تركيز العنصر (Gil وآخرون ١٩٩٥أ). وعندما قيس المحتوى البروتينى للنباتات بعد ٢٨ و٣٥ يومًا من تعرضها للعنصر، وجد أن محتوى الأوراق من الإنزيم روبسكو Rubisco (وهو ribulose biphosphate carboxylase)، والبروتينات الذائبة الكلية انخفض مع الوقت، وبزيادة تركيز العنصر، بينما ازدادت نسبة الروبسكو إلى البروتينات الذائبة الكلية. كذلك ازداد تركيز الفوسفور فى النباتات — مع الوقت — بزيادة تركيز الكادميوم فى المحلول المغذى، بينما انخفض تركيز كل من النحاس، والمنجنيز، والزنك تحت نفس الظروف (Gil وآخرون ١٩٩٥ب).

الزرنيخ

يعتبر الزرنيخ من العناصر التى تلوث البيئة؛ بسبب كثرة استعمال زرنيخات الصوديوم كمبيد حشرى. وعندما دُرِس التلوث بالعنصر على نباتات الطماطم — بإضافته إلى المحاليل المغذية فى المزارع اللاأرضية بتركيزات تراوحت بين صفر، و ١٠ مجم/لتر، وجد أن العنصر أحدث نقصًا كبيرًا وصل — فى التركيز العالى — إلى ٧٧٪ بالنسبة للوزن الطازج للنمو الخضرى، وإلى ٨٠٪ بالنسبة للمحصول. وقد ازداد تركيز عنصر الزرنيخ فى جذور النباتات مع الوقت، ولكنه لم يختلف كثيرًا بزيادة تركيز العنصر فى المحلول المغذى بين جزأين وعشرة أجزاء فى المليون. وعلى الرغم من أن تركيز الزرنيخ ازداد فى بادئ الأمر — فى كل من السيقان، والأوراق، والثمار — مع زيادة تركيز العنصر فى المحلول المغذى، إلا أن انتقال العنصر إلى أعلى النبات توقف بعد ذلك — عند تركيز ١٠ مجم/ لتر- بسبب إحداث هذا التركيز المرتفع لأضرار فى الأغشية الخلوية بالجذور؛ الأمر الذى ترتب عليه عدم وصول تركيز العنصر فى الثمار إلى المستوى الضار للإنسان (Carbonell Barrachina وآخرون ١٩٩٥أ و١٩٩٥ب).

البطاطس

يعتبر غاز الأوزون من أهم ملوثات الهواء، ولكن غاز ثانى أكسيد الكبريت قد يلعب دورًا مهمًّا كذلك فى الإضرار بنباتات البطاطس. وتكون الأعراض فى صورة اصفرارٍ عامٍ، وتلونٍ برونزىٍ، وتحللٍ بالأوراق، يترتب عليها توقف مبكر للنمو النباتى ونقص فى المحصول. تبقى الأوراق الميتة عالقة بالنبات. ويبدأ التحلل فى خلايا النسيج العمادى للورقة، ثم يتقدم نحو النسيج الإسفنجى التالى له.

وتوجد اختلافات كبيرة بين أصناف البطاطس من حيث مدى تحملها للأوزون.

وقد أدى تعريض نباتات البطاطس لغاز ثانى أكسيد الكربون SO_2 بتركيز ٣٠٠ نانوليتر/لتر لمدة ستة أسابيع — مع توفر الرطوبة الأرضية — إلى ظهور أعراض التسمم

على النموات الخضرية، والتأثير سلبيًا على نمو الدرنات، ولكن هذا التأثير لم يكن جوهريًا تحت ظروف نقص الرطوبة الأرضية (Ma & Murray ١٩٩١). كذلك أثر تعريض نباتات البطاطس لخليطٍ من غازى ثانى أكسيد الكبريت، وثانى أكسيد النيتروجين NO_2 بتركيز ١١٠ نانوليترات لكل منهما/لتر.. أثر سلبيًا على النمو الخضرى؛ وذلك فى صورة نقص فى الوزن الطازج، والوزن الجاف للنبات، ونقص فى المساحة الورقية خلال أيام قليلة من بدء المعاملة (Petitte & Ormrod ١٩٩٢).

الثوم

وُجد أن لنبات الثوم قدرة عالية جدًّا على امتصاص الكادميم من المحاليل المغذية وتجميعه فيها؛ حيث ازداد محتوى جذور الثوم من أيون الكادميم Cd^{2+} بزيادة تركيز العنصر بالمحلول المغذى. وعند تركيز $١٠^{-٢}$ مول من الكادميم راكمت الجذور العنصر بما مقداره ١٨٢٦ ضِعف تراكمه فى جذور نباتات الكنترول. وبالمقارنة.. كان تراكم الكادميم بالجذور عند تركيزات $١٠^{-٣}$، و$١٠^{-٤}$، و$١٠^{-٥}$ مول من الكادميم ١١٤، و٥٩، و٢٤، و٤ أضعاف تركيزه فى جذور نباتات الكنترول، على التوالى. هذا.. إلا أن النباتات لم تنقل سوى كميات صغيرة من الكادميم من الجذور إلى كل من الأبصال والنموات الخضرية، وهى التى كان تركيز الكادميم فيها منخفضًا (Jiang وآخرون ٢٠٠١).

الكنتالوب

أدى تعرض نباتات الكنتالوب للأوزون — تحت ظروف الحقل — إلى اصفرار الأوراق بين العروق، ثم اختفاء اللون منها، وتحللها. وكان تأثير الأوزون أشدّ وضوحًا على الأوراق المكتملة النمو منه على الأوراق الأصغر سنًّا. وقد تطابقت تلك الأعراض مع أعراض التسمم من الأوزون تحت ظروف متحكم فيها، كما ظهرت اختلافات بين أصناف الكنتالوب فى مدى حساسيتها للأوزون (Simini وآخرون ١٩٨٩).

الفراولة

دُرس تأثير زيادة تركيز الأوزون عند إنتاج الفراولة، ووجد أن تأثيره يتوقف — جوهريًا — على الصنف ومدى حساسيته لشدِّ الأكسدة. وبصفة عامة.. فإن الأوزون قلل من محتوى الثمار من حامض الأسكوربيك، ورفع من درجة أكسدة الدهون، وخفَّض من حلاوة الثمار،بينما لم يؤثر شدِّ الأوزون على محصول الثمار أو مضادات الأكسدة أو الأنثوسيانينات أو المركبات الفينولية بالثمار. هذا بينما أحدث الأوزون أضرارًا بالسبلات وبمظهر الثمار، مع خفض فى محتواها من الجلوتاثيون. حدث كل ذلك فى الصنف الحساس للأوزون Korona، بينما بقيت صفات جودة الثمار فى الصنف الأقل حساسية Elsanta ثابتة غالبًا (Keutgen & Pawelzik ٢٠٠٨).

مقاومة أضرار ملوثات الهواء

إن أجدى الوسائل للتغلب على أضرار ملوثات الهواء هى زراعة الأصناف المقاومة للملوثات — التى تنتشر فى منطقة الزراعة — والتى تتوفر فى عديد من محاصيل الخضر (حسن ٢٠١٣).

وقد اختبرت عديد من المركبات الكيميائية للحماية من أضرار ملوثات الهواء — وخاصة الأوزون — واستعمل — مثلاً — فيتامين ج كمادة مضادة للأكسدة — رشًّا على النباتات، ولكن استعماله لم يكن عمليًّا لتكلفته العالية. كذلك اختبر البينوميل (وهو مبيد فطرى جهازى)، ووجد أنه يُكسب النباتات حمايةً من أضرار الأوزون تحت ظروف الحقل عندما استخدم رشا أو أضيف مع الماء عن طريق التربة. ولكن لزم إجراء المعاملة ٣-٧ مرات لتوفير الحماية الكافية من الأوزون.

وكان أكثر مضادات الأكسدة فاعلية فى حماية النباتات من أضرار الأوزون مركب الإثيلين دايوريا ethylene diurea.