البناء الضوئى

ازداد معدل البناء الضوئى فى الفاصوليا بارتفاع درجة الحرارة من ٢٠ إلى ٢٥°م، وقدر الـ Q_{10}، لتلك الزيادة بنحو ١,٩. ومع استمرار الزيادة فى الحرارة من ٢٥ إلى ٣٠ °م انخفض الـ Q_{10} وربما كان ذلك مردة إلى تقييد الحرارة العالية إنتاج مستقبلات لثانى أكسيد الكربون. وبالمزيد من الارتفاع فى الحرارة من ٣٠ إلى ٣٥°م ازداد الانخفاض فى الـ Q_{10} نتيجة لعدم قدرة الثيلاكويدات thylakoids على استمرار توفير إمداد كافٍ من الـ NADPH (Pastenes & Horton ١٩٩٥).

وسائل الحد من أضرار الحرارة المنخفضة

معاملات لتحسين إنبات البذور

تتعرض بذور خضر الجو الدافئ، مثل الطماطم والفلفل والباذنجان، وكذلك بذور الذرة السكرية والفاصوليا واللوبيا لأضرار البرودة أثناء إنباتها. كذلك فإن البذور التى تُعد من خضر المواسم الباردة، مثل بنجر المائدة والجزر والبصل يكون إنباتها بطيئًا وضعيفًا فى الحرارة المنخفضة.

وترجع الأضرار التى تحدث أثناء تشرب البذور بالماء (وهى التى تُعرف باسم imbibitional injury) إلى سرعة تشرب البذور بالماء، وتكون تلك الأضرار أشد فى الحرارة المنخفضة.

ولقد اتبعت عدة وسائل لتقليل أضرار الحرارة المنخفضة على إنبات البذور، منها ما يلى:

١- زيادة مستوى الرطوبة بالبذور قبل زراعتها، بتركها لعدة أيام فى هواء رطب.

٢- استخدام بذور ذات أغلفة صلدة لإبطاء تشربها بالماء.

٣- تغليف البذور بمواد طاردة للرطوبة.

٤-تعريض البذور لمحاليل ذات ضغط أسموزى عال، مثل تلك التى تحتوى على بوليثيلين جليكول أو أملاح.

٥-كمر البذور فى مواد صلبة مُرطبة خاليةُ من الأملاح (مثل الفيرميكيوليت) والطين الكلسى calcinated clay)، وهى الطريقة التى عُرفت بالأسماء: moisturizing، وsolid matrix priming، و matriconditioning. وتُحدث هذه الطريقة تغيرات فيزيائية وفسيولوجية وبيوكيميائية بالبذور تُحسّن من نمو الجنين وتجعله أكثر تحملاً للحرارة المنخفضة (Khan وآخرون ١٩٩٥).

معاملة الصدمة الحرارة للبادرات

وجد أن حساسية جذير بادرات الذرة والخيار وفاصوليا المنج والطماطم للبرودة (معبرًا عنها بتثبيط استطالة الجذير على ٢٥°م بعد تعريض البادرات لحرارة ٢,٥°م) كانت أكثر عندما كان الجذير بطول ٥-٧ مم عما كانت عليه عندما كان بطول ١مم. وبالمقارنة.. عانت بادرات البامية بنفس القدر من تثبيط نمو الجذير (٧٠٪ - ٩٠٪) عندما كان الجذير بأى طول بين ١ و ٧ مم. وقد انخفضت القدرة على تكوين الجذور الجانبية فى جميع الأنواع بزيادة فترة التعرض للبرودة. وأدى تعريض البادرات لصدمة حرارية (٤-١٠ دقائق على ٤٥°م) إلى زيادة قدرة جميع الأنواع على تحمل البرودة باستثناء البامية التى لم تنخفض فيها أضرار البرودة جوهريا بزيادة شدة الصدمة الحرارية أو تقليل شدة التعرض للبرودة (درجة الحرارة والمدة) (Rab & Saltveit ١٩٩٦).

معاملات كيميائية للنباتات

لجأ كثير من الباحثين إلى محاولة الحد من أضرار الحرارة المنخفضة - الأعلى من درجة التجمد - بمعاملة النباتات بمختلف المركبات الكيميائية، كما يلى:

١-كان كل من الـ SADH، والـ CCC أكثر المركبات الكيميائية استخدامًا لهذا الغرض، ولكن ذلك كان خلال الستينيات، ولم تستمر محاولات استخدام هذه المركبات

كثيرًا بعد ذلك. ومن بين المحاصيل التى أمكن زيادة قدرتها على تحمل البرودة بالمعاملة بهذين المركبين كل من: الكرنب، والطماطم، وأشجار الكمثرى الصغيرة، والفراولة، والأزاليا، والراسبرى، والقمح. وقد استخدمت لذلك تركيزات عالية (تراوحت بين ١٠٠٠ و١٠٠٠٠ جزء فى المليون) إما بطريق الرش، وإما مع مياه الرى. وتعد معاملة بذور القمح بالـ CCC فى روسيا الاتحادية — لزيادة قدرته على تحمل البرودة — أمرًا روتينيا.

٢-استخدم كذلك الماليك هيدرازيد Maleic Hydrazide لزيادة تحمل الصقيع فى أشجار الموالح؛ لأنه يقلل من سقوط الأوراق والبراعم، كما استخدم أيضًا لتحقيق نفس الهدف فى كل من الراسبرى، والعنب، والتوت. ولكن يعيب الماليك هيدرازيد إحداثه لتشوهات فى النباتات التى تُعامل به.

٣-أمكن أيضًا زيادة قدرة البسلة والفجل على تحمل البرودة بالمعاملة بالبنزيل أدنين benzyladenine؛ وهو سيتوكينين cytokinin مُخلّق. وربما يُحدث البنزيل أدنين تأثيره من خلال تحريكه لمنشطات الأقلمة؛ مثل المثبطات الشبيهة بحامض الأبسيسك، أو السكريات المركبة. وبصورة عامة.. فإن السيتوكينين يزيد القدرة على تحمل الانحرافات الحادة فى درجة الحرارة، سواء أكانت بالارتفاع، أم بالانخفاض.

٤-كما ذكر أن المركبات المتعددة الأمينات Polyamines (مثل الـ long-chain alkylene diamines) تحدّ من أضرار الصقيع فى عديد من النباتات؛ مثل: القمح، والأرز، والشعير، والذرة، والدُخن، وفول الصويا، وفاصوليا الليما، والفاصوليا العادية، والفول السودانى، والسبانخ، والخس، والطماطم، والتوت، والتبغ، وأشجار الفاكهة.

٥-ومن المركبات الأخرى التى ذُكر أنها أفادت فى زيادة القدرة على تحمل البرودة ما يلى (عن Hale & Orcutt ١٩٨٧).

المركب	النباتات التى استجابت له
2-amino-6-methy benzoic acid	القمح – التبغ – العنب
. Naphthalene acetic acid	البرتقال
5-chloro-4-quinolic carboxylic acid	الكوسة
Mepiquat chloride	الموالح

٦– ذكر أن مركب مفليوداید Mefluidide يخفض أضرار البرودة فى كل من الذرة والأرز.

٧– أدى استعمال الترايازولات Triazoles إلى زيادة القدرة على تحمل أضرار البرودة فى النباتات.

٨– عرف تجريبيًا أن القدرة على تحمل أضرار البرودة تزداد بالمعاملة بحامض الأبسيسك Abscisic acid، قبل التعرض للبرودة بنحو ٦ ساعات.

٩– كذلك أعطت النظائر التربينودية terpenoid analogues لحامض الأبسيسك نتائج مماثلة مع كل من الطماطم والخيار.

١٠– أدت معاملة نباتات الفاصوليا – وقت تعرضها لحرارة ٤°م – بمركب GLK-8903 (وهو مركب تجريبى يتكون من هدرجة أحد الكحولات المستخلصة من النباتات) إلى حماية النباتات من أضرار البرودة. وتمثلت الحماية فى خفض التسرب الأيونى electrolyte leakage، بتقليله للأضرار التى تحدث للأغشية الخلوية عند تعرضها للبرودة (Flores-Nimedez وآخرون ١٩٩٣). وتحدث الحماية من البرودة بمجرد المعاملة بالمركب، بخلاف الحالة عند المعاملة بحامض الأبسيسك التى تتطلب مرور ٦ ساعات – على الأقل – بعد المعاملة؛ لكى تكون فعالة فى حماية النباتات من البرودة.

ويستدل من دراسة لاحقة (Zhang وآخرون ١٩٩٤) على أن للحماية التى توفرها المعاملة بمركب GLK-8903 (بتركيز ٠,٥٪) للفاصوليا علاقة بقدرة المركب على الحد من

الزيادة – التى تحدثها الحرارة المنخفضة – فى أكسدة الفوسفوليبيدات Phospholipids التى توجد بالأغشية الخلوية.

معاملات خاصة لمحاصيل معينة

نقدم – فيما يلى – عرضًا لتوصيات المعاملات التى أجريت لمحاولة الحد من أضرار البرودة فى عدد من محاصيل الخضر.

الطماطم

الأقلمة

على الرغم من أن الطماطم من النباتات الحساسة للبرودة، والتى لا يمكن أقلمتها لتحمل البرودة بتعريض شتلاتها لحرارة منخفضة.. إلا أنه يمكن توفير أقلمة جزئية للنباتات بتعريضها لحرارة أعلى بقليل من تلك التى تحدث عندما أضرار البرودة. كذلك يفيد تعريض البادرات لنقص الرطوبة الأرضية مع زيادة الرطوبة النسبية إلى ١٠٠٪ فى الحماية من أضرار الصقيع بعد الشتل. وقد وجد Shen & Li (١٩٨٣) أن تعريض شتلات الطماطم لحرارة ٢٠°م نهارًا، و١٥°م ليلاً جعلها قادرة على تحمل معاملات أقلمة تدرجت فى انخفاض الحرارة من ٥°م إلى ٢°م، ثم إلى الصفر المئوى. وعند الشتل.. تحملت هذه النباتات حرارة بلغت -٣°م، بينما تجمدت نظيراتها – التى لم تسبق أقلمتها – على حرارة – ١,٥°م.

معاملات كيميائية

• يذكر Singer وآخرون (١٩٩٣أ) أن رش نباتات الطماطم بالمركب الكودى GLK-8903 (المُنتج بهدرجة كحول مستخلص من مادة نباتية) بتركيز ٠,٥٪ أو ١٪ قبل تعريضها لحرارة ٥°م لمدة ٧ أيام أدى إلى زيادة تحملها للبرودة، بحدوث تسرب

أيونى فيها أقل مما حدث فى نباتات الشاهد. وبعد الشتل.. كانت النباتات المعاملة بالمركب أطول، وأبكر إزهارًا بنحو ٦-٧ أيام وأكثر محصولاً من النباتات غير المعاملة. وقد حصل Singer وآخرون (١٩٩٣ب) على نتائج أخرى مشابهة لما سبق بيانه عندما رشت النباتات – كذلك – بمركب المفليوديد mefluidide بتركيز ٥ أو ١٠ أجزاء فى المليون قبل تعريضها لمعاملة البرودة.

• وبينما أدى نقع بذور القمح فى مركب يونى كونازول uniconazole (وهو ترايازول triazole شديد الفاعلية) إلى زيادة تحمل البادرات الناتجة للحرارة المنخفضة، فإن المعاملة المماثلة لبذور الطماطم لم تكن لها قيمة عملية فى حماية البادرات الناتجة من أضرار التجمد (Davis وآخرون ١٩٩٠).

• دُرس تأثير المعاملة بثلاثة منظمات للنمو، هى: حامض الأبسيسك، والبوترسين putrescine، والـ 2,4-epibrassinolide على الحماية من أضرار البرودة فى بادرات صنفين من الطماطم، هما: Zhongshu 6 الحساس للبرودة، و SANTIAM المتحمل لها. وقد تبين أن المعاملة بأى من تلك المركبات– بالتركيز المناسب – يمكن أن تُخَفِّض – بكفاءة – من التدهور فى معدل البناء الضوئى، ومن محتوى الكلوروفيل فى الأوراق الناشئ عن التعرض للحرارة المنخفضة فى كلا الصنفين، ويمكن أن تُحفِّز حدوث زيادة فى المركبات العضوية الذائبة: البرولين والسكر. وقد كان أفضل تركيز للمعاملة هو ١,٠ ملى مول، و٠,١ ملى مول، و٠,٠٢ ميكرومول للمركبات الثلاثة، على التوالى (Jiang وآخرون ٢٠١٢).

• وعندما عوملت نباتات الطماطم – النامية تحت ظروف الحرارة المنخفضة ليلاً – بتركيز ٠,٤ ملى مول من حامض السلسيلك acetyl salicylic acid، وهى بعمر أربعة أسابيع، ثم كل خمسة أيام، فإن تلك المعاملة قللت من الانخفاض فى محصول العنقودين

الأول والثانى جراء الحرارة المنخفضة، وصاحب ذلك انخفاض فى الـ malondialdehyde بالأوراق، وزيادة فى محتواها من البرولين وفى النشاط المضاد للأكسدة فيها، وانخفاض فى نفاذية الأغشية الخلوية. ومن بين الإنزيمات التى ازداد نشاطها بالمعاملة السوبر أوكسيد دسميوتيز والبيروكسيديز (Zhang وآخرون ٢٠١٣).

المعاملة بمضادات النتح

على الرغم من أن الدعاية لمضادات النتح Antitranspirants تؤكد أنها توفر حماية للنباتات من الصقيع على اعتبار أنها توفر عازلاً بين النوبات الثلجية التى تتكون خارجيًا على النباتات وبين المحتوى المائى للنبات، إلا أن ذلك لم يؤكّد علميًا. ويُستَدل من دراسات Perry وآخرين (١٩٩٢) التى عاملو فيها نباتات الطماطم والفلفل بمضادين للنتح، هما: Frost Free (يحتوى على ٥٠٪ polyoxyethlene، و٥٠٪ propylene glycol)، و Vapor Gard (يحتوى على ٩٦٪ pinolene– وهو terpenic polymer– و٤٪ مادة خاملة) أن المعاملة بأى منهما لم توفر أى حماية للنباتات من الصقيع، كما لم تؤثر على المحصول لا فى الظروف العادية ولا تحت ظروف التعرض للصقيع.

التطعيم على أنواع برية متحملة للبرودة

أدى تطعيم صنف الطماطم Money Maker على السلالة LA1777 من النوع البرى *Solanum habrochaites* (وهى التى تنمو طبيعيًا على ارتفاعات كبيرة فى موطنها الأصلى، وتعد متحملة للحرارة المنخفضة).. أدى ذلك إلى زيادة معدل نموها الخضرى بمقدار ٢٦٪ على حرارة ٢٥/٢٥°م (هواء/جذور)، و١١٪ على حرارة ١٥/١٥°م. وقد تميز هذا التطعيم بزيادة كتلة النمو الجذرى، وخاصة فى حرارة جذور ١٥°م، علمًا بان تعريض

الجذور للحرارة المنخفضة قلل بشدة من النمو الجذرى للطماطم دون التأثير على النمو الجذرى للنوع البرى. ويُستفاد مما تقدم أن ضعف النمو الخضرى للطماطم فى الحرارة المنخفضة مرده — إلى حد كبير — إلى ضعف نموها الجذرى فى تلك الظروف، وأن تطعيم الطماطم على ذلك النوع البرى يفيد فى التغلب على تلك المشكلة (Venema وآخرون ٢٠٠٨).

وكان الشد التأكسدى فى جذور نباتات الطماطم التى طُعِّمت على السلالة LA1777 من *S. habrochaites* أقل مما فى تلك التى طعمت على الطماطم، وذلك عندما عُرِّضت لحرارة معتدلة (١٧°م) أو منخفضة (١٤,٦°م)، كما أحدث التطعيم على السلالة LA1777 تحسنًا فى مستوى المركبات المضادة للأكسدة فى النموات الخضرية للطماطم النامية فى حرارة منخفضة (Ntatsi وآخرون ٢٠١٤).

إن زيادة قدرة تحمل الطماطم للبرودة بواسطة التطعيم على أصول برية من الأنواع القريبة متحملة للبرودة يمكن أن يوفر حماية للنباتات فى الزراعات الحقلية ويقلل من تكاليف التدفئة فى البيوت المحمية. ويبدو أن الهرمونات النباتية تلعب دورًا فى تحمل الطماطم للبرودة؛ الأمر الذى يتعين الاهتمام به عند اختيار الأصل المناسب لكل طعم. وفى دراسة أجريت واستخدم فيها تطعيمات وتطعيمات عكسية لطماطم قياسية مع أخرى مطفرة ينقصها القدرة على تمثيل أو هدم حامض الأبسيسك أو السيتوكينين أو حامض السلسيلك، أو قليلة الحساسية للإثيلين أو للأكسين، بدا أن حامض الأبسيسك يُسهم فى تعزيز تحمل الطماطم للحرارة المنخفضة (١٧/١٤°م)، وفى التحكم غير المباشر فى مستوى الإثيلين الداخلى، بينما وجد أن إندول حامض الخليك وحامض السلسيلك بالأوراق يحفزان استطالة النمو الخضرى لنباتات الطماطم النامية فى ظروف الحرارة المنخفضة، علمًا بأن الحرارة المنخفضة أنقصت — بشدة — من

معدل استطالة النموات الخضرية ونمو الأوراق فى جميع المعاملات مقارنة بالوضع فى الحرارة المثلى (٢٢/١٨°م) (Ntatsi وآخرون ٢٠١٣).

تحسين عقد الثمار بإحداث اهتزازات فى العناقيد الزهرية

تحتاج نباتات الطماطم فى الزراعات المحمية شتاءً إلى هز العناقيد الزهرية بآلة خاصة مرة واحدة على الأقل كل يومين لضمان عقد الثمار بصورة جيدة، ولا يلزم إجراء ذلك للنباتات النامية صيفًا، وربما كان ذلك بسبب اهتزاز النباتات بصورة طبيعية عند إجراء عملية التهوية أو التبريد صيفًا، وجفاف حبوب اللقاح المنتجة صيفًا بالمقارنة بتلك المنتجة شتاءً، فتكون الأولى مفردة وخفيفة، بينما تكون الثانية متكتلة ولزجة؛ مما يستدعى هز الأزهار للمساعدة على التلقيح. ويفضل إجراء عملية الهز خلال منتصف النهار، كما تزداد فاعليتها عندما تكون الرطوبة النسبية حوالى ٧٠٪، ويتراوح المجال المناسب من ٥٠٪-٩٠٪. ولا تساعد الرطوبة الأقل من ذلك على التصاق حبوب اللقاح بمياسم الأزهار بصورة جيدة، بينما تؤدى الرطوبة الأعلى من ذلك إلى بقاء حبوب اللقاح داخل المتوك (عن Picken ١٩٨٤).

تساعد عملية الاهتزاز على انتقال حبوب اللقاح إلى مياسم الأزهار، وهو أمر مهم بالنسبة لعقد الثمار عند نقص إنتاج حبوب اللقاح تحت ظروف الحرارة المنخفضة شتاء. وإذا لزمت المعاملة بمنظمات النمو لأجل تحسين العقد، فإن ذلك يجب أن يجرى بعد هزّ العناقيد الزهرية بنحو يومين، حتى لا تتعارض منظمات النمو مع نمو الأنابيب اللقاحية.

المعاملة الحرارية للثمار

أدى تعريض ثمار الطماطم للهواء الساخن على حرارة ٣٨°م إلى زيادة إنتاج الثمار من كل من الإنزيم arginase (المسئول عن إنتاجه الجين LeARG1) ونشاطه (المسئول عنه الجين LeARG2)، وكان أكبر حث لنشاط الإنزيمين عندما كانت المعاملة الحرارية لمدة ١٢ ساعة، وصاحب ذلك خفض لأضرار البرودة بالثمار، تمثل فى انخفاض فى دليل أضرار البرودة الظاهرى، وفى التسرب الأيونى من الثمار وفى محتواها من الـ malondialdehyde أثناء التخزين البارد. كذلك أدت المعاملة الحرارية إلى إحداث زيادة فى نشاط كل من السوبر أوكسيد دسميوتيز superoxide dismutase، والكاتاليز catalase، والأسكوربيت بيروكسيديز ascorbate peroxidase، كما ثبطت نشاط البيروكسيدير peroxidase، وحفَّزت تراكم الأرجنين والبرولين والبوترسين (Zhang وآخرون ٢٠١٣).

الخيـــار

المعاملات الحرارية للبادورات والنباتات

تتأقلم بادرات الخيار على الحرارة المنخفضة الأقل من ١°م بتعريضها مسبقًا لدرجات حرارة منخفضة تتراوح بين ٣، و١١°م، وأفضل حرارة للأقلمة ليلاً هى ٦°م عندما تكون الحرارة نهارًا ٢٠°م؛ ففى هذه الظروف.. كانت النباتات المؤقلمة أقل تعرضًا للأضرار عندما عرضت بعد أقلمتها لحرارة تقل عن ١°م لمدة ٤٠ ساعة؛ حيث قل فيها التسرب الأيونى، وتأخَّر ذبول أوراقها، وازداد فيها معدل البناء الضوئى عما فى النباتات التى لم تسبق أقلمتها (Yang & Shen ١٩٩٢). كما وجد أن النباتات التى أقلمت فى حرارة منخفضة ٦°م كانت أقل طولاً، وأسرع إزهارًا بمقدار ٥ أيام، وأعلى محصولاً من النباتات التى لم تؤقلم (Singer وآخرون ١٩٩٣).

وقد ازداد التسرب الأيونى من الأوراق الفلقية للخيار لدى تعريضها لحرارة ٢,٥°م لمدة ٦ أيام، بينما لم يحدث هذا التسرب فى حرارة ١٣°م. وأدى تعريض الأوراق الفلقية

لحرارة ٣٧°م لمدة ٦ ساعات قبل معاملة الحرارة المنخفضة إلى خفض التسرب الأيونى منها بنسبة ٤٠٪ لدى تعريضها لحرارة ٢,٥°م لمدة ١٥ يومًا، بينما أدت معاملتها بالحرارة العالية لمدة ١٨ ساعة مع ١٥٪ ثانى أكسيد كربون إلى خفض التسرب الأيونى منها بنسبة ٥٠٪. وقد حدثت تغيرات فى محتوى الأوراق الفلقية من البولى أمينات من جرّاء معاملة البرودة: فمثلاً.. ازداد محتواها من البوتريسين putrescine بمقدار الضعف، ونقص محتواها من الأسبرمين Spermine، بينما ظل محتواها من الأسبرميدين spermidine ثابتًا فى حرارة ٢,٥°م لمدة ١٥ يومًا. وأدى تعريض الأوراق الفلقية لحرارة ٣٧°م إلى إحداث زيادة ملحوظة فى محتواها من البوترسين والاسبرميدين، مع زيادة طفيفة فى محتواها من الاسبرمين (Sanchez وآخرون ١٩٩٥). وقد حصل Fan وآخرون (١٩٩٦) على نتائج مماثلة لتلك التى أسلفنا بيانها فى دراسة أجريت على ثمار الخيار، وتبين منها أن مستوى البوترسين ازداد فى الثمار بعد ثلاثة أيام من تعريضها لحرارة ٢°م، وأن تلك الزيادة ارتبطت بظهور أعراض البرودة.

المعاملات الكيميائية للباورات والنباتات

• وجد أن رش نباتات الخيار بمحلول ملحى من كلوريد الصوديوم أو كلوريد البوتاسيوم بتركيز ٥٠ ملى مول، أو كلوريد الكالسيوم بتركيز ٢٥ ملى مول، أو كلوريد الزنك بتركيز ١٠ ملى مول قبل تعريض النباتات لحرارة ٦°م ليلاً ونهارًا لمدة ٧ أيام أدى إلى زيادة تحملها لأضرار البرودة، حيث أدت المعاملات إلى خفض التسرب الأيونى من الأوراق، كما احتوت النباتات المعاملة على تركيزات أعلى من الكلوروفيل عن النباتات غير المعاملة.

• وأدى تعريض بادرات الخيار لأبخرة عدد من الكحولات (٣٢٠ ملى مول ميثانول وإيثانول، وبروبانول، وبيوتانول، وبنتانول) أثناء تعرضها للبرودة على حرارة ٢,٥°م لمدة خمسة أيام .. أدى ذلك إلى زيادة تحملها لأضرار البرودة، وكانت السويقة

الجنينية السفلى هى أكثر أجزاء النبات حساسية لأضرار البرودة. ويبدو أن الكحول يقلل أضرار البرودة من خلال إغلاقه للثغور (Saltveit ١٩٩٤).

• وقد أدى تعريض بذور الخيار بعد ٢٤ ساعة من إنباتها — لحرارة منخفضة مقدارها ٢,٥°م لمدة ٦٠ ساعة، ثم نقلها بعد ذلك إلى حرارة مقدارها ٢٥°م لدة ٧٢ ساعة إلى ضعف شديد فى نمو الجذير حيث ازداد طوله من ٠,٢ سم عند بداية معاملة التعريض لحرارة ٢,٥°م إلى ٠,٤–٠,٦ سم عند نهاية فترة الحضانة على ٢٥°م، مقارنة بزيادة فى نمو جذير نباتات المقارنة من ٠,٢ سم عند البداية إلى ٦,٣ سم فى نهاية فترة حضانة مدتها ٧٢ ساعة على حرارة ٢٥°م. وقد أدى تعريض البادرات للكحول الإيثيلى بتركيز ٠,٤ مولار لمدة ٤ ساعات، أو لحرارة ٤٠°م لمدة ساعة واحدة إلى زيادة كبيرة فى تحمل البادرات للبرودة، حيث وصل نمو جذورها النهائى إلى ٤,١، و٣,١ سم فى المعاملتين، على التوالى. كذلك كان لهاتين المعاملتين تأثيرات إيجابية فى تحمل معاملة البرودة التى صاحبتها ظاهرة التسرب الأيونى، وهى تعريض البذور بعد ٢٤ ساعة من إنباتها لحرارة ٢,٥°م لمدة ١٤٤ ساعة. وقد أدت إضافة المركب المانع لتمثيل البروتين سيكلوهكسيميد cyclohexemide فى بيئة معاملة البرودة إلى إلغاء التأثير المفيد لمعاملتى التعريض للكحول الإيثيلى والحرارة العالية، ويبدو أن الحماية التى وفرتها المعاملتان تضمنت تمثيل بروتينات جديدة (Jennings & Saltveit ١٩٩٤ أ ، ب).

• كذلك أدى تعريض بادرات الخيار وهى بعمر خمسة أيام لحرارة ٢°م لمدة ٧٢ ساعة إلى ظهور أعراض أضرار البرودة التى تمثلت فى جفاف السويقة الجنينية السفلى وانهيارها، ثم موت البادرة. وقد أدى تعريض البادرات لنقص فى الأكسجين إلى تراكم الكحول الإيثيلى والأسيتالدهيد فيها، وصاحب ذلك زيادة تحملها لأضرار البرودة عندما تعرضت لها بعد ذلك، وتمثل ذلك فى استمرار نمو السويقة الجنينية السفلى وانعدام أضرار البرودة. كذلك أمكن جعل النباتات أكثر تحملاً لأضرار البرودة بمعاملتها بأبخرة الكحول الإيثيلى، بينما كان تأثير الأسيتالدهيد ضعيفاً؛ الأمر الذى يفيد بأن التأثير

الذى أحدثه تعريض البادرات لنقص فى الأكسجين كان مرده إلى تراكم الكحول الإيثيلى وليس إلى تراكم الأسيتالدهيد. كذلك أمكن زيادة القدرة على تحمل البرودة فى البادرات بتعريضها لأبخرة أى من الـ n-propanol، والـ n-butanol، والكلوروفورم chloroform، والهالوثين halothane؛ مما يفيد احتمال إحداث الكحول الإيثيلى لتأثيره من خلال زيادته لسيولة دهون الأغشية الخلوية. ويتفق ذلك مع ما هو معروف عن ارتباط نشاط الكحول الإيثيلى بأيض الدهون (Frankel & Erza ١٩٩٦).

• وقد وجد أن قدرة تحمل بادرات الخيار للبرودة (٣°م لمدة ٤ ساعات) ترتبط بنشاط مضادات الأكسدة، حيث ازدادت أضرار البرودة عند معاملتها بالمركبات المحفزة للأكسدة (كبريتات الحديدوز + حامض الأسكوربيك بتركيز ٥٠٠ ميكرومول لكل منهما) أثناء معاملة البرودة، بينما قلت أضرار البرودة عند معاملتها بأى من مضادات الأكسدة: حامض الأسكوربيك بتركيز ٧٥٠ ميكرومول، والجلوتاثيون glutathione بتركيز ١٠٠ ميكرومول، وحامض البنزويك benzoic بتركيز ٥٠ ميكرومول (Lukatkin & Levina ١٩٩٧).

• كذلك وجد Boese وآخرون (١٩٩٧) أن الخيار كان أكثر حساسية لأضرار البرودة عن كل من الفاصوليا والذرة السكرية، وأن زيادة تركيز ثانى أكسيد الكربون أدت — فى النباتات الصغيرة — إلى تحسين العلاقات المائية أثناء التعرض للبرودة، وإلى تخفيف الأثر الضار للنقص فى معدل البناء الضوئى الذى كان مصاحبًا لها.

• وقد أدت معاملة بادرات الخيار بأى من حامض الأبسيسك abscisic acid أو 24-epibrassinolide إلى زيادة قدرتها على البناء الضوئى فى الظروف الطبيعية بعد تعريضها لحرارة ٨، أو٤، أو ٢°م لمدة ثلاثة أيام (Yu وآخرون ٢٠٠٢).

• ولقد عُوملت نباتات الخيار وهى فى مرحلة نمو الورقة الحقيقية الثانية بالاسبرميدين spermidine بتركيز ٠,٥ ملى مول من خلال الجذور، قبل تعريضها لبرودة معتدلة (١٠/٧°م) لمدة ثمانية أيام تحت إضاءة مؤثرة فى البناء الضوئى بكثافة

٢٤٠ ميكرومول/م^{٢} فى الثانية. أدت المعاملة إلى زيادة محتوى الاسبيرميدين فى كل من الأوراق وأغشية الـ thylakoid، مقارنة بما فى الكنترول. كما كان معدل النمو ومحتوى الأوراق من الكلوروفيل أعلى فى النباتات المعاملة بالاسبيرميدين أثناء معاملة التعريض للبرودة، وكذلك بعد نقلها إلى حرارة ٢٢/٢٨°م، وذلك مقارنة بالوضع فى نباتات الكنترول. ويعنى ذلك أن سبق المعاملة بالاسبيرميدين قبل التعرض لشدِّ البرودة يُسهم فى تحسين تحمل جهاز البناء الضوئى لأضرار البرودة فى أوراق الخيار (He وآخرون ٢٠٠٢).

• ودُرس تأثير المعاملة بمتعددات الأمين polyamines على حماية الخيار من أضرار الحرارة المنخفضة — من خلال تأثيرها على إنتاج مضادات الأكسدة — وذلك فى صنفى الخيار: المتحمل لشدِّ البرودة Changchun mici، والحساس Beijing jietou. أدى التعرض لشدِّ البرودة إلى حث إنتاج البولى أمينات: اسبرميدين spermidine، واسبرمين spermine، وبُترسين puterscine بوضوح فى أوراق الصنف المتحمل بعد يوم واحد من التعرض للبرودة، ثم انخفاض إنتاج البُترسين بعد ذلك، بينما ازداد إنتاج كل من الاسبيرميدين والاسبرمين بثبات. وأدى التعرض لشدِّ البرودة إلى خفض المحتوى البروتينى، وخفض نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة، متضمنة: السوبر أوكسيد دسميوتيز superoxide dismutase، والبيروكسيديز peroxidase، والأسكوربيت بيروكسيديز ascorbate peroxidase فى الصنف الحساس فقط، إلاّ أن المعاملة بأى من البُترسين أو الاسبرميدين جدَّدت نشاط تلك الإنزيمات (Zhang وآخرون ٢٠٠٩).

• وأحدث رش بادرات الخيار بمحلول من كلوريد الكالسيوم بتركيز ١٠ مللى مول — فى ظروف الإضاءة الضعيفة وانخفاض الحرارة عن الدرجة المثلى — زيادات فى كل من معدل البناء الضوئى، وكفاءة الـ carboxilation، والمحتوى الكلوروفيلى، ونشاط إنزيمات ribulose 1,5-biphosphate carboxylase (اختصارًا: RuBPCase)، والبيروكسيديز peroxidase، والكاتاليز catalase. وقد ساعد ذلك فى تأقلم البادرات على ظروف ضعف الإضاءة وانخفاض الحرارة (Liang وآخرون ٢٠٠٩).

التطعيم

وجد Yu وآخرون (١٩٩٧) أن نباتات الخيار المطعمة على أصل من *Cucurbita ficifolia* تحملت التعرض لحرارة ٥°م لمدة أطول من النباتات غير المطعومة، وكان التسرب الأيونى من الأوراق والجذور أعلى فى النباتات غير المطعومة عما فى النباتات المطعومة بعد ٤ أيام من التعرض لحرارة ٥°م . وبالمقارنة.. كان محتوى الكلوروفيل، ومعدل التنفس، ومقاومة الثغور أعلى فى النباتات المطعومة، بينما كان معدل نتح الأوراق ونشاط إنزيم succinic dehydrogenase — فى الجذور — أقل فى النباتات المطعومة على الجورد مقارنة بالنباتات غير المطعومة.

المعاملة الحرارية للثمار

أدى تخزين ثمار الخيار لمدة أسبوعين على ٥°م إلى ظهور أعراض أضرار البرودة على ٥٠٪ من الثمار بعد إخراجها من المخزن. وقد ازدادت الأعراض خلال ثلاثة أيام من تركها على ٢٠°م. وأدت ثلاث معاملات سبقت التخزين (هى: الحرارة، ومضادات الأكسدة، والإيثانول) إلى الحد من ظهور أضرار البرودة إلى حد ما.

فقد أدى غمس الثمار لمدة ساعة واحدة فى الماء على حرارة ٤٠°م، أو تركها لمدة ١٦ ساعة فى هواء دافئ على حرارة ٣٨°م، والمعاملة ببخار الإيثانول إلى منع الارتفاع فى معدل التنفس وإنتاج الإثيلين اللذان لوحظا فى ثمار معاملة الكنترول. وأدت المعاملة بمضاد الأكسدة Xedefon (وهو: butylated hydroxytoluene formulation) إلى منع الزيادة فى التنفس، إلاّ إنه لم يؤثر فى إنتاج الإثيلين.

وفى ثمار معاملة الكنترول حدثت زيادة فى نسبة الـ sterol إلى الـ phospholipid، وفى نسبة تشبع الأحماض الدهنية فى دهون قشرة الثمرة أثناء التخزين البارد. هذا بينما أدت معاملتا الماء الساخن والـ Xedefon إلى خفض نسبة الـ sterol إلى الـ phospholipid، وحدثت معهما زيادة طفيفة — فقط — فى نسبة تشبع الأحماض الدهنية (Laamim وآخرون ١٩٩٨).

البطيخ

• فى دراسة رُشَّت فيها بادرات البطيخ من صنف Crimson Sweet النامية فى حرارة ٢٠/٢٥°م (نهار/ليل)، وهى بعمر خمسة أيام بحامض الأبسيسك بتركيز ١٠$^{-٤}$ مول قبل ١٥ ساعة من تعريضها لحرارة ١,٥ ± ٠,٥°م لمدة ٢٤ ساعة، ثم قيمت فيها أضرار البرودة بعد أسبوع وأسبوعين من التعرض لمعاملة الحرارة المنخفضة، وجد أن معاملة البرودة أحدثت أضرارًا منظورة بالنباتات التى لم تُعامل بحامض الأبسيسك، وهى التى كانت أقل جوهريًّا فى الوزن الجاف للجذور والنمو الخضرى، مقارنة بالوضع فى النباتات التى عُوملت بحامض الأبسيسك قبل معاملة شدِّ البرودة (Korkmaz ٢٠٠٢).

• وأدت معاملة نباتات البطيخ بحامض السلسيلك salicylic acid بتركيز ١,٠ ملى مول/ لتر إلى تحسين قدرتها على تحمل البرودة، وذلك من خلال زيادة المعاملة لنشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة، مثل: guaiacol peroxidase، وascorbate peroxidase، و superoxide dismutase، و catalase، و glutathione reductase (Yang وآخرون ٢٠٠٨).

• إن المعاملة بالبكلوباترازول paclobutrazol تستحث استجابات فى النباتات تؤدى إلى زيادة تحملها لعدد من حالات الشدِّ البيولوجى والبيئى. وفى دراسة عُوملت فيها بذور البطيخ بالنقع فى محاليل بتركيزات مختلفة من البكلوباترازول (صفر إلى ٧٥ مجم/لتر) أو رشت بها البادرات، ثم تعريض البادرات وهى بعمر ٣٥ يوم لحرارة ٤°م خمس ساعات يوميًّا لمدة خمسة أيام.. أحدثت المعاملة بالبكلوباترازول تحسنًا فى معدل النمو، وزيادة فى محتوى الأوراق من الكلوروفيل، وفى نسبة فلورة الكلوروفيل (Fv/Fm)، مقارنة بما حدث فى نباتات الكنترول بنهاية فترة التعرض لشدِّ البرودة. وقد خففت المعاملة بالبكلوباترازول من أضرار شدِّ البرودة، بمنعها حدوث زيادات فى البرولين مع التسرب الأيونى بالأوراق. وكانت معاملة نقع البذور أكثر كفاءة من معاملة رش النمو الخضرى، وكان أفضل تركيز للبكلوباترازول هو ٥٠ و ٧٥ مجم/لتر (Baninasab ٢٠٠٩).

• تُخزن البادرات لفترة قصيرة – عادة – قبل زراعتها، ويعد فقد المواد الكربوهيدراتية من البادرات خلال تلك الفترة من أهم العوامل التى تحد من قدرتها على تحمل الشتل. وفى دراسة على البطيخ رُشّت الشتلات – وهى فى صوانى إنتاج الشتلات – بالجلوكوز بتركيز ٣٪ أو ٦٪، ثم خُزّنت فى الظلام لمدة ٦ أيام على ١٥°م قبل شتلها. أدت المعاملة بالجلوكوز إلى احتفاظ الشتلات بكتلتها الجافة وأظهرت تحسنًا فى مُعاودتها للنمو بعد الشتل. وقد تميزت النباتات التى عُوملت بالجلوكوز بمحتوى عالٍ من السكر الذائب والنشا، وبتسرب أقل للأيونات، وبمستويات أقل من الـ malondialdehyde، مقارنة بالنباتات التى لم تُعامل، وذلك خلال أيام التخزين البارد الستة. وكانت تلك الاختلافات أكبر مع زيادة فترة التخزين البارد، ومع زيادة تركيز الجلوكوز المعامل به. ويُستفاد مما تقدم بيانه أن معاملة الجلوكوز يمكن أن تؤخر من فقد الكربوهيدرات، وتحافظ على سلامة الأغشية البلازمية، وتعمل على تجنب الدخول فى مرحلة الشيخوخة خلال مرحلة التخزين البارد؛ وبذا فهى تحافظ على جودة الشتلات خلال فترة التخزين البارد (Jiang وآخرون ٢٠١٢).

الفراولة

وجد أن الحرارة المنخفضة وشدّ الجفاف يلعبان – منفردين ومجتمعين – دورًا فعالاً فى تقسية نباتات الفراولة وتحملها للبرودة، وكان التعرض للعاملين – معاً – أكبر تأثيرًا فى تقسية النباتات (Rajashekar & Panda ٢٠١٤).

مظاهر شدّ التجمد

إن السبب الحقيقى لأضرار شدّ التجمد هو تكوين الثلج وليس الحرارة المنخفضة فى حد ذاتها والدليل على ذلك أن التجميد الفائق – الذى يتجمد فيه الماء دون تكوينه لبلورات ثلجية – يستخدم فى حفظ الجيرمبلازم (مثل البذور والجراثيم الفطرية)، فيما يعرف باسم cryopreservation.