الفصل الرابع

تحمل التجمد

أضرار التجمد

إن السبب الحقيقى لأضرار 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.

يبدأ تكوين الثلج فى النباتات فى المسافات بالجدر الخلوية التى يقل محتواها — نسبيًا — من المواد الذائبة. ولأن ضغط بخار الماء الخاص بالثلج أقل منه فى الماء على أى درجة حرارة، فإن تكوين الثلج فى الجدار الخلوى يؤدى إلى ظهور تدرج فى ضغط بخار الماء بين الجدار الخلوى والخلايا المحيطة به. يؤدى ذلك إلى رحيل الماء السيتوبلازمى غير المتجمد عبر التدرج من سيتوبلازم الخلية إلى الجدار الخلوى؛ مما يؤدى إلى تضخم البللورات الثلجية المتواجدة فيه بالفعل؛ مما يُحدث ضغطًا ميكانيكيًا على الجدار الخلوى والغشاء البلازمى؛ مما يؤدى إلى إتلاف وتمزق الخلية. ويؤدى الفقد المائى للخلايا المستحث بفعل التجمد إلى صور متعددة للأضرار بالغشاء البلازمى، متضمنة انهيار الخلايا تحت وطأة تمددها، وتمزق وتشقق الخلايا.

كذلك تُسهم المركبات النشطة فى الأكسدة ROS — التى تنتج استجابة لشدِّ التجمد — فى إتلاف الأغشية البلازمية.

وفى نهاية الأمر تؤدى البرودة إلى فقد الأغشية البلازمية لخصائصها؛ مما يؤدى إلى التسرب الأيونى؛ كذلك تفقد عضيات الخلية قدرتها فيما يدخل إليها أو يخرج منها؛ مما يعنى فقد الخلايا لخاصية التحكم فى الحجيرات compartmentalization،

وانخفاض وتردى البناء الضوئى، وتكوين البروتينات الأيضية العامة (Mahajan & Tuteja ٢٠٠٥).

الأقلمة أو التقسية

تكتسب عديد من النباتات العشبية القدرة على تحمل التجمد إذا عرضت للبرودة لفترة قصيرة (أيام أو أسابيع قليلة) قبل تعرضها للصقيع، فيما يعرف بعملية الأقلمة acclimation؛ وهى العملية التى تعرف فى المجال البستانى التطبيقى باسم التقسية hardening. ويؤدى تعرض النباتات للحرارة العالية بعد تعرضها للحرارة المنخفضة إلى زوال أثر الأقلمة، فيما يعرف بعملية الـ deacclimation. وتؤثر عمليتا الـ acclimation والـ deacclimation على كل من ظاهرتى القدرة على تحمل التجمد freezing tolerance (القدرة على تحمل تكون البللورات الثلجية بين الخلايا)؛ والقدرة على تجنب التجمد freezing avoidance (القدرة على تجنب تكوين البللورات الثلجية خارج الخلايا وداخلها Palta ١٩٩٢).

وبصفة عامة .. فإن التقسية بالبرودة تؤدى إلى حماية الأغشية الخلوية وثباتها، وتحفيز آليات مضادات الأكسدة، وزيادة محتوى الخلايا من السكر، وتراكم حافظات أخرى ضد التجمد cryptoprotectants، متضمنة متعددات الأمين التى تحمى البروتينات التى توجد خارج الخلية بحثٌ نشاط الجينات التى تشفر لتكوين كاسحات (كانسات) chaperons جزيئية. وتعمل جميع هذه التحورات على مساعدة النبات على تحمل الجفاف dehydration الشديد الذى يكون مصاحبًا لشدِّ التجمد.

وتعد الوظيفة الرئيسية لأقلمة البرودة cold acclimation هى تثبيت الأغشية البلازمية ضد أضرار التجمد، حيث ينتج عن الأقلمة زيادة فى نسبة الأحماض الدهنية غير المشبعة؛ ومن ثم انخفاضًا فى حرارة تحولها. وتعمل الأقلمة على منع التحلل الخلوى الناشئ عن تمدد الخلايا، كذلك تؤدى إلى تكوين بروتينات أخرى غير إنزيمية تخفض من درجة تجمد الماء.