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.

ومن بين التحورات الأخرى التى تُحدثها الحرارة المنخفضة فى مكونات الخلية — غير زيادة نسبة الأحماض الدهنية غير المشبعة — تركيب الـ glycerolipids، وتغيرات فى تركيب البروتين والمركبات الكربوهيدراتية، وتنشيط قنوات الأيونات ion channels. كما أن تراكم السكروز وغيره من السكريات البسيطة أثناء تأقلم البرودة يُسهم فى ثبات الأغشية البلازمية؛ نظرًا لأن تلك المركبات يمكنها حماية الأغشية البلازمية من أضرار التجمد (Mahajan & Tuteja ٢٠٠٥).

آليات وطبيعة تحمل شد التجمد

تشترك ثلاث آليات فى إضفاء خاصية المقاومة لشدِّ التجمد فى النباتات، هى: تحمل التجمد freezing tolerance، وتجنب التجمد freezing avoidance، والقدرة على التأقلم بعد التعرض للبرودة capacity to acclimate، وجميعها آليات تورث وتتباين فى مسلك توريثها بين مختلف أصناف وسلالات الأنواع النباتية. ويعنى ذلك أن التربية لتحسين المقاومة لشدِّ التجمد يمكن أن تجمع بين تلك الآليات الثلاث للوصول إلى التركيب الوراثى المرغوب فيه.

وفى الطبيعة يكون الانخفاض فى حرارة النباتات — عادة — بطيئًا وفى حدود ١–٢ °م/ساعة أثناء حدوث الصقيع. ويترتب على ذلك تكوين البلورات الثلجية فى المسافات بين الخلايا مما يسبب جفافًا بالخلايا. ولذا .. فإن تحمل التجمد يعتمد أساسًا على قدرة خلايا النبات على تحمل الجفاف.

وتلعب الأغشية البلازمية دورًا محوريًّا فى تحمل التجمد والقدرة على التأقلم عند التعرض للبرودة. ومن أولى علامات أضرار التفكك بعد التجمد التحورات فى وظائف ATPase الغشاء البلازمى. ويبدو أن تلك التحورات تتضمن اضطرابات فى الكالسيوم الخلوى وتغيرات فى خصائص دهون الأغشية البلازمية.

وتحدث تغيرات مفتاحية فى تركيب دهون الأغشية البلازمية خلال فترة تأقلم البرودة (عن Palta ١٩٩٢).