ج- النمو النباتى:

يتحكم فى النمو النباتى تحت ظروف شدّ البرودة ثلاثة جينات على الأقل.

٢- فى الذرة استخدمت صفتان كما يلى:

أ- إنبات البذور.

تحكم فى القدرة على الإنبات فى الحرارة المنخفضة (تحت ظروف الحقل) جينات ذات تأثير إضافى، مع وجود تأثير أمّى.

ب- تغير لون الأوراق:

تعد هذه الصفة — التى تظهر عند التعرض للحرارة المنخفضة — بسيطة فى وراثتها.

٣- الخيار:

دُرست صفة إنبات البذور فى الحرارة المنخفضة (١٧°م فى حجرات النمو)، وكان التباين الإضافى فيها هو السائد، ودرجة توريثها عالية.

التربية لتحمل الحرارة العالية

الشد الحرارى

يُعْرف الشدّ الحرارى غالبًا بالارتفاع فى درجة الحرارة لأكثر من مستوى معين حرج لمدة من الوقت تكفى لإحداث أضرار لا عودة فيها فى نمو النبات وتطوره وعمومًا.. فإن الارتفاع المؤقت فى الحرارة فى حدود ١٠-١٥°م فوق حرارة الهواء المحيط يعتبر شدًّا حراريًّا أو صدمة حرارية. هذا إلا أن الشدّ الحرارى هو دالة معقدة لكل من شدة الارتفاع الحرارى، ومدته، ومعدل الزيادة فى درجة الحرارة.

أما تحمل الحرارة فيعرف بأنه قدرة النبات على النمو وإنتاج محصول اقتصادى فى ظروف الحرارة العالية. وبينما يعتقد البعض أن حرارة الليل هى العامل الأساسى

المؤثر، فإن البعض الآخر يعتقد فى تأثير كل من حرارة الليل وحرارة النهار، ويعتقدون أن متوسط درجة الحرارة اليومى هو المقياس، ويعد دليلاً أفضل على استجابة النباتات للحرارة العالية، مع تأثير حرارة النهار بدور ثانوى (Wahid وآخرون ٢٠٠٧).

تأثير التغيرات المناخية (الارتفاع فى حرارة الغلاف الجوى) على الجيرمبلازم البرى فى بيئته الطبيعية

يمثل الجيرمبلازم البرى مصدرًا رئيسيًّا لصفات تحمل الظروف البيئية القاسية بالنسبة لمربى النبات، لكن هذا الجيرمبلازم معرض للفقدان بسبب الارتفاع فى حرارة الغلاف الجوى المصاحب للتغيرات المناخية، حيث يستدل من دراسة أجريت على توزيع الفول السودانى البرى فى أمريكا الجنوبية، وأنواع اللوبيا فى أفريقيا، والبطاطا البرية فى أمريكا الوسطى والجنوبية على ما يلى:

١- من المتوقع أن تفقد نصف الأنواع التى شملتها الدراسة مدى انتشارها الطبيعى بحلول منتصف القرن الحادى والعشرين بسبب التغيرات المناخية.

٢- من المتوقع أن تتحرك كل الأنواع إلى ارتفاعات أعلى، كما قد يغير بعضها خطوط العرض التى ينتشر فيها حاليًّا.

٣- من المقدر أن تندثر ١٦٪-٢٢٪ من الأنواع التى شملتها الدراسة.

ويبين ذلك مدى الحاجة إلى زيادة الجهد المبذول فى جميع الجيرمبلازم قبل أن يفقد تنوعه الطبيعى.

هذا.. ويتوقع حدوث المخاطر ذاتها على سلالات المزارعين landraces التى تنتشر زراعتها لدى أكثر من بليون مزرعة بدائية توجد على امتداد الكرة الأرضية، حيث يقوم المزارعين فيها بأنفسهم بإكثار التقاوى التى يستخدمونها فى الزراعة من عام لآخر. ومع التغيرات المناخية سوف ينخفض محصول تلك السلالات تدريجيًّا؛ الأمر الذى يؤدى بالمزارعين إلى تركهم لها فى نهاية الأمر؛ مما يستدعى سرعة جمعها قبل فقدانها (The

conservation of global genetic resources in the face of climate change, Bellagio Meeting — ٢٠٠٧ — الإنترنت).

تحديات التربية لتحمل الحرارة العالية

أوضحت كثير من الدراسات الوراثية أن معظم حالات تحمل ظروف الشدِّ البيئى معقدة، ويتحكم فيها أكثر من جين، وتتأثر بشدة بالتباينات البيئية، وتوجد دائمًا صعوبة تواجه التحمل كميًّا. فنجد أن الانتخاب المباشر تحت ظروف الحقل يؤثر سلبيًّا على مدى دقة المحاولات ومدى قابليتها للتكرار. وغالبًا.. لا يمكن ضمان تكرار ظروف الحرارة العالية فى الدراسات الحقلية. كذلك فإن تحمل الشدِّ حقيقة ترتبط بمراحل معينة من النمو، فالتحمل فى أحد مراحل النمو قد لا يرتبط بالتحمل فى مراحل النمو الأخرى. ويعنى ذلك ضرورة تقييم التحمل فى كل مرحلة من مراحل النمو على حدة، ليس فقط لأجل تقييم التحمل وتعرفه، ولكن — كذلك — لأجل تحديد المكونات الوراثية للتحمل فى مختلف مراحل النمو، وتعرف كيفية تداولها. ويفيد التقييم فى البيوت المحمية التى يمكن التحكم فى درجة حرارتها فى التغلب على مشكلتى عدم ضمان استمرار الحرارة المرتفعة، والتحكم الحرارى فى مختلف مراحل النمو، كما أن البيوت المحمية تيسر — كذلك — التحكم فى حرارة الليل.

وغالبًا ما تتطلب التربية لتحمل الحرارة العالية اللجوء إلى الجيرمبلازم البرى الذى يكون محملاً بصفات كثيرة غير مرغوب فيها. ويجب ألا يقتصر الانتخاب على صفة التحمل فقط، وإنما — كذلك — صفة النمو الجيد والإنتاج العالى فى كل الظروف. ولكن يصعب — أحيانًا الجمع بين كل هذه الصفات؛ ففى الطماطم — مثلاً — نجد أن السلالات والأصناف القادرة على العقد فى الحرارة العالية يكون نموها الخضرى ضعيفًا لاتجاهها نحو النمو الزهرى الغزير، وتكون ثمارها صغيرة الحجم بسبب التأثير السلبى للحرارة العالية على إنتاج الأوكسين بالثمار (Wahid ٢٠٠٧).

طرق التقييم لتحمل الحرارة العالية

بيئات التقييم لتحمل الشدّ الحرارى

يمكن إجراء التقييم لتحمل الحرارة العالية فى أى من البيئات التالية:

١- فى الحقول تحت ظروف الطبيعة:

تلك هى ابسط الطرق وأرخصها، إلا أن كفاءتها تعتمد على مدى تكرارية الشدّ الحرارى من سنة لأخرى، وهى لا تناسب الانتخاب لتحمل الحرارة خلال فترة أو مرحلة معينة من تطور النمو النباتى؛ لأن ذلك امر لا يمكن تأمينه، وخاصة أنه يكون مطلوب استمراره على مدى سنوات برنامج التربية. كما أن مختلف التراكيب الوراثية قد تصل إلى تلك المرحلة — التى يتعين الانتخاب عندها فى ظروف الشدّ الحرارى — فى توقيتات مختلفة. وقد يمكن تعليم النباتات التى وصلت إلى المرحلة المناسبة للانتخاب (مثل مرحلة تفتح الأزهار) عند ارتفاع الحرارة، وقصر الانتخاب عليها بعد ذلك.

ومن العيوب الأخرى للتقييم فى الظروف الطبيعية صعوبة فصل تأثير الحرارة العالية عن تأثير الجفاف الذى يسود — غالبًا — فى تلك الظروف.

٢- فى الظروف الحقلية غير الطبيعية:

يتم التحايل على عدم توفر الظروف المناسبة للتقييم بإجرائه فى مواقع معينة تتوفر فيها تلك الظروف، أو فى غير أوقات الزراعة الطبيعية، مثل زراعة القمح صيفًا فى المناطق المعتدلة.

٣- فى البيئات المتحكم فيها:

ويعنى بذلك البيئات التى يمكن التحكم الحرارى فيها، مثل الصوبات وحجرات النمو، حيث يمكن تحديد مدى الشدّ الحرارى وموعده (عن Singh ١٩٩٣).

تستخدم البيوت المحمية فى دراسات تحمل الحرارة العالية حيث تكون الحرارة بداخلها — صيفًا — أعلى من حرارة الهواء الخارجى، إلا أن فائدة استخدام البيوت المحمية فى هذا المجال تكون أعظم إن كانت البيوت مزودة بنظام للتحكم فى كل من درجة الحرارة (ليلاً ونهارًا) والفترة الضوئية. وقد استخدمت البيوت المحمية فى عمليات التقييم والانتخاب لتحمل الحرارة العالية فى كل من الطماطم واللوبيا (عن Hall ١٩٩٢)

أما حجرات النمو فإنها غالبًا ما تستخدم لإجراء قياسات فسيولوجية معينة ذات صلة بتحمل الشدّ الحرارى.

ويتعين فى جميع البيئات السابقة عدم تعريض النباتات لشدّ جفافى، وهو الذى يصاحب — عادة — الشدّ الحرارى، كما يجب توفير رطوبة عالية (طبيعية) فى البيئات المبرمجة بواسطة أجهزة رفع الرطوبة humidifiers فى حجرات النمو، وبأجهزة توليد الضباب أو الرذاذ فى الصوبات.

٤- فى البيئات الصناعية in vitro:

يمكن إجراء بعض الاختبارات لتحمل الحرارة العالية فى أنابيب اختبار، مثل اختبار ثبات الأغشية البلازمية بطريقة التوصل الكهربائى، ومنها أيضًا الانتخاب فى مزارع الأنسجة.

وقد أمكن — على سبيل المثال — انتخاب نباتات قطن مقاومة للحرارة بمعاملة مزارع الكالس بحرارة عالية وصلت إلى ٤٥°م، حيث تجدد نمو النباتات المقاومة من الخلايا التى تحملت المعاملة الحرارية، إلاّ أن كثرة حدوث المظاهر السيتولوجية غير الطبيعية فى تلك النباتات أحدثت خفضًا شديدًا فى خصوبتها (عن Remotti ١٩٩٨)

٥- النمو تحت ظروف الشدّ الحرارى:

من أهم قياسات النمو الكتلة الحيوية والمحصول، وهما من أهم معايير الانتخاب، ويفضل إجراءهما فى الظروف الطبيعية.

عند إجراء التقييم لتحمل النموات الخضرية للحرارة العالية يجب أن تؤخذ منافسة أعضاء التخزين على الغذاء المجهز فى الحسبان حتى لا تؤثر المنافسة على قوة النمو الخضرى. فمثلاً.. قيم تحمل النموات الخضرية لتحمل الحرارة العالية فى البطاطس فى فترة ضوئية طويلة (١٨ ساعة) غير مهيئة لتكوين الدرنات. وبعد انتخاب السلالات ذات النمو الخضرى القوى فى تلك الظروف فإنها تقيم لتحمل الحرارة العالية فى فترة ضوئية قصيرة تكون مهيئة لتكوين الدرنات (عن Hall ١٩٩٢).

قياسات التقييم لتحمل الشدّ الحرارى

يقيم تحمل الشدّ الحرارى بعدد من القياسات، كما يلى:

١- القدرة على إنبات البذور فى ظروف الشدّ الحرارى:

يفيد هذا الاختبار عند اشتداد الحرارة فى الوقت الطبيعى لزراعة البذور. وتفيد إضافة الشاركول الناعم لسطح التربة للعمل على زيادة درجة حرارتها، ويمكن إجراء التقييم والانتخاب فى المواسم والمواقع الشديدة الحرارة. وقد يمكن إجراء الاختبارات فى ظروف متحكم فيها تُسلط فيها الأشعة تحت الحمراء على سطح التربة لرفع حرارتها. ويمكن كذلك الاستفادة من اختبار البادرات فى التقييم لإنتاج بروتينات الصدمة الحرارية.

٢- استعادة النمو الطبيعى بعد التعرض للشدّ الحرارى:

ويعبر عن استعادة النمو بقياسات المحصول والكتلة الحيوية.. إلخ.

٣- حساسية أطوار النمو التكاثرية:

ومن تلك الأطوار إنتاج الأزهار والقرون والثمار والبذور، وخصوبة حبوب اللقاح (عن Singh ١٩٩٣).

٤- اختبار التسرب الأيونى:

يقدر التسرب الأيونى بقياس الزيادة فى درجة التوصيل الكهربائى، وهو يعد دليلاً

على مدى ثبات الأغشية البلازمية لدى تعرض الأنسجة للحرارة العالية، ويتم القياس بعد تعريض أجزاء من ورقة النبات تؤخذ بثاقبة فلين (leaf discs) للمعاملة الحرارية العالية ويعد هذا الاختبار سهلاً وسريعًا، وهو يرتبط باستجابة عمليات حيوية نباتية أخرى للحرارة العالية (مثل: مقاومة البروتينات الذائبة والإنزيمات للدنترة، وثبات البناء الضوئى فى الأوراق الكاملة)، وكذلك باستجابة النباتات الكاملة لدرجات الحرارة العالية تحت ظروف الحقل.

وقد استخدم هذا الاختبار — بنجاح — فى تقييم أصناف وسلالات فول الصويا والسورجم للحرارة العالية، حيث أفاد فى التمييز بينها، ولكنه لا يفيد كثيرًا عند الرغبة فى إجراء الانتخاب فى الأجيال الانعزالية؛ لأنه — أى الاختبار — يُجرى على عدة أقراص ورقية leaf discs من عدة نباتات تُمثل العشيرة التى يُراد اختبارها؛ الأمر الذى لا يمكن تحقيقه فى الأجيال الانعزالية التى تمثلها نباتات مفردة (عن Marshall ١٩٨٢).

يعد اختبار التسرب الأيونى electrolyte leakage أحد أسرع الاختبارات لتقييم القدرة على تحمل الحرارة العالية، وفيه تقاس درجة التوصل الكهربائى الناشئة عن التسرب الأيونى من الأنسجة الورقية التى عُرِّضت للحرارة العالية جراء تأثير المعاملة على نفاذية أغشيتها البروتوبلازمية. يتم بموجب هذا الاختبار استقبال الأيونات المتسربة من الأنسجة فى ماءٍ خالٍ من الأيونات deionized water، وتقديرها كميًّا بقياس درجة التوصل الكهربائى للماء. ولقد وجدت علاقة قوية بين درجة ثبات الأغشية البروتوبلازمية — معبرًا عنها باختبار التسرب الأيونى — وبين مدى تحمل الحرارة العالية (عن Ibrahim & Quick ٢٠٠١).

عند إجراء هذا الاختبار تؤخذ أقراص ورقية بقطر ١٢ مم من النباتات التى يُراد قياس مدى تحملها للشدِّ الحرارى. ويجب الحرص على أخذ الأقراص من أوراق فى عمر

متقارب. تُغسل الأقراص ٢-٣ مرات فى ماء منزوع الأيونات قبل وضعها فى أنابيب اختبار أو فى قنينات زجاجية. يلزم ١٠ قنينات لكل تركيب وراثى. تغلق القنينات دون إحكام، وتترك ٥ قنينات فى حمام مائى على ٤٢-٤٥°م لمدة ساعة، بينما تترك الخمس قنينات الأخرى فى حرارة الغرفة (الكنترول). يضاف بعد ذلك ١٠-٢٠ مل من الماء المنزوع الأيونات لكل قنينة، وتغلق جيدًا، ثم تُحضَّن على ١٠°م لمدة ٢٤ ساعة.

تقاس درجة التوصل الكهربائى للماء (الذى سيحتوى على المواد الذائبة التى تتسرب من الأقراص الورقية) بغمس القطب الكهربائى (الإلكترود) فى كل قنينة بعد وصول حرارتها إلى ٢٠°م. يلى ذلك تعقيم جميع القنينات فى الأوتوكليف لمدة ١٠-١٥ دقيقة، ثم قياس درجة التوصل الكهربائى فيها بعد وصول حرارتها إلى ٢٠°م.

وتقاس شدة أضرار الحرارة العالية، كما يلى:

$$HI(\%) = \{1-[1-(T_1/T_2)]/[(1-(C_1/C_2)]\} \times 100$$

حيث إن:

HI: أضرار الحرارة العالية.

T_2، T_1: متوسط درجة التوصيل الكهربائى للتركيب الوراثى قبل وبعد التسخين فى الأوتوكليف، على التوالى.

C_2، C_1: متوسط درجة التوصيل الكهربائى لقنينات الكنترول من نفس التركيب الوراثى قبل وبعد التسخين فى الأوتوكليف، على التوالى (Singh ١٩٩٣).

٥- حساسية البناء الضوئى وفلورة الكلورفيل:

يقاس مدى تأثر معدل البناء الضوئى بمعاملة التعريض للحرارة، ويتم تقدير ذلك على الأوراق المفردة - غير المفصولة عن النبات - باستعمال أجهزة خاصة يسهل نقلها واستعمالها فى الحقل (عن Marshall ١٩٨٢).

ويعبر عن تلك الصفة بقياس فلورة الكلورفيل عند ٦٨٥ نانوميتر، وتلك طريقة هامة وإن كان من الصعب إجراءها وتفسير نتائجها.

عندما يكون العامل المحدد للشدّ الحرارى هو التأثير السلبى على عملية البناء الضوئى، يكون من الفضل قياس فلورة الكلورفيل chlorophyll fluorescence كدليل على مدى الضرر الذى يقع على الـ photosystem II وتتوفر أجهزة حقلية للقياس السريع للنسبة F_V/F_M التى تعد دليلاً على مدى الضرر الحادث بالـ photosystem II. لكن يتعين تقدير مدى الارتباط بين نسبة F_V/F_M وتحمل الحرارة، ومدى جدوى الانتخاب لتحمل الحرارة على أساسها (Hall ٢٠١١)

وقد أظهرت أصناف الخيار الأكثر تحملاً للحرارة مستويات من فلورة الكلورفيل بالأوراق – بعد تعرضها لشدّ حرارى (٣٨–٤٨ °م) – أقل مما حدث فى الأصناف الحساسة، بما يعنى إمكان استخدام هذا الاختبار فى تعرف التراكيب الوراثية الأكثر حساسية للحرارة العالية (Aoki ١٩٩٠).

كما أجرى تقييم لتسعة تراكيب وراثية من الفاصوليا لتعرف مدى تحملها للحرارة العالية خلال مرحلة الإزهار، وذلك بدراسة التغيرات التى تحدث فى استشعاع الكلوروفيل chlorophyll fluorescence فيها أثناء وبعد التعرض لحرارة ٤٥ °م لمدة ساعتين، ثم لحرارة ٢٣ °م لمدة ٤ ساعات. ويستدل من الدراسة أن تركيبين وراثيين فقط – هما: السلالة RH26D والصنف Ranit تشابها مع سلالة الكنترول المتحملة للحرارة 83201007 فى عدم إظهارهم لأى تغيرات جوهرية فى شدة استشعاع الكلوروفيل جراء التعرض للحرارة العالية (Stefanov وآخرون ٢٠١١).

٦– اختبار التترازوليم:

يمكن تقدير مستوى الشدّ الحرارى كميًّا بقياس قدرة الميتوكوندريا على اختزال الـ tetrazolium triphenyl chloride (اختصارًا TTC) بأنزيمات الـ dehydrogenase

التنفسية التى تنشط فيها. يُجرى الاختبار فى القمح — على سبيل المثال — بإخضاع النسيج الورقى لحرارة عالية لفترة محددة، ويلى ذلك تشريب أنسجة الورقة بمحلول مثل الـ TTC تحت تفريغ. ويعد المستوى النسبى لاختزال الـ TTC إلى فورمازان formazan دليلاً كميًا على حيوية الخلايا؛ الأمر الذى يتم تقديره بتحليل طيفى spectrophotometric للفورمازان. ويقدِّر هذا الاختبار — مباشرة — نشاط الميتوكوندريا فى إنتقال الإليكترونات.

وقد أمكن عن طريق هذا الاختبار التوصل إلى اختلافات جوهرية بين أصناف القمح فى تحملها للحرارة العالية.

وراثة تحمل الحرارة العالية

تباينت كثيرًا الخصائص التى اتخذت أساسًا لتحمل الحرارة العالية، وتباينت معها وراثة تلك الخصائص فى مختلف المحاصيل، كما يلى:

١- فى الذرة كان الاعتماد على خاصية استعادة الحالة الطبيعية للنبات بعد ٦ ساعات من التعرض لحرارة ٥٢°م، وكانت تلك الصفة سائدة جزئيًا.

٢- فى الطماطم كان الاعتماد على عدد من الصفات تحت ظروف الشدّ الحرارى، كما يلى:

أ- نسبة عقد الثمار: كانت هذه الصفة كمية مع وجود تأثير إضافى للجين ودرجة توريث متوسطة.

ب- عدد الأزهار بالنبات: كانت هذه الصفة كمية وذات درجة توريث عالية، وتحكم فى العدد الكبير من الأزهار جينات متنحية.

ج- عقد البذور: كانت هذه الصفة كمية وكان تأثير السيادة أكثر أهمية، كما ظهر فيها أيضًا التفوق بين الجينات.

د- بزور الميسم: كانت هذه الصفة كمية ويتحكم فيها جينات سائدة جزئيًا، وكانت الصفة ذات درجة توريث عالية.

٣- فى الفاصوليا اتخذت صفة عدد القرون بالنبات (بعد التعرض لحرارة ٣٨-٤٣°م نهارًا فى صوبة زجاجية، مع شد جفافى) كأساس لتحمل الحرارة، وتحكم فى هذه الصفة ١-٢ جين سائد مع وجود تفوق.

كذلك كانت صفة الثبات الحرارى للأغشية البلازمية كمية وتأثير الجينات إضافى بصورة أساسية، كما وجدت ظاهرة التفوق فى بعض التلقيحات وقدرت درجة التوريث بنحو ٦٠٪ (Singh ١٩٩٣).

٤- فى فول الصويا كان الاعتماد على خاصية الثبات الحرارى للأغشية البلازمية (باتباع طريقة التوصيل الكهربائى)، وكانت الصفة كمية وتأثير الجينات إضافى بصورة أساسية، كما كانت درجة توريث الصفة عالية.

٥- الكرنب الصينى:

أمكن إنتاج صنف من الكرنب الصينى قادر على إنتاج رؤوس مندمجة فى ظروف الحرارة العالية، وتبين أن تلك الصفة يتحكم فيها عامل وراثى واحد متنحٍ.

٦- البطاطس:

أمكن انتخاب سلالات خضرية من البطاطس قادرة على إنتاج محصول عالٍ جدًا من الدرنات فى ظروف الحرارة العالية. وفى دراسة قيم فيها ٣١٩ سلالة من ٥٩ نوعًا من الجنس *Solanum* المنتجة للدرنات انتخبت ٦ سلالات من ٤ أنواع كانت قادرة على تحمل حرارة بين ٣٠، و ٤٠°م فيما يتعلق بالنموين الخضرى والدرنى.

التربية لتحمل الجفاف

طبيعة تحمل الجفاف فى النباتات

يتعين التمييز بين حالتى تجنب الجفاف وتحمله. فبالنسبة لتجنب الجفاف Drought Avoidance.. نجد أنه يحدث إما من خلال الإفلات منه Drough Escape،