ولقد أدى تحويل الكرنب الصينى وراثيًا بجين LEA من *Brassica napus* إلى زيادة قدرة النباتات على النمو تحت ظروف الجفاف والملوحة معبرًا عن ذلك بتأخر ظهور أعراض أضرار حالات الشدّ تلك، كما ظهرت — أيضًا — فى صورة تحسن سريع فى استعادة النمو بعد زوال حالة الشدّ (Park وآخرون ٢٠٠٥).

كما وجد أن Em — وهو بروتين LEA من القمح — يعمل كجزئ حامٍ من الضغط الأسموزى العالى فى *S. cerevisiae* المحولة وراثيًا. وأدى التعبير عن HVA1 — وهى مجموعة رقم ٣ من بروتين LEA من الشعير — أدى التعبير عنها فى الأرز إلى إكسابه صفتى القدرة على تحمل شدّ النقص المائى وشد الملوحة العالية، كما أدى التعبير عنها فى القمح إلى زيادة إنتاجه من الكتلة الحيوية، وزيادة كفاءة استخدامه للمياه تحت ظروف شدّ نقص الماء. وتعد مجموعة ٣ لجينات الـ LEA غاية فى الأهمية فى المحاصيل الحقلية بصورة عامة (عن Park وآخرين ٢٠٠٥).

أهمية دراسات الـ QTLs فى تحديد مواقع جينات تحمل الظروف البيئية القاسية

الدراسات على الطماطم كمثال

على الرغم من تحقيق بعض التقدم فى تحسين التحمل لبعض الظروف البيئية القاسية بطرق التربية التقليدية، فإن التقدم لم يكن مشجعًا نظرًا للطبيعة المعقدة لصفات التحمل تلك؛ الأمر الذى يُعطى أهمية كبيرة لدراسات الـ Quantitative Trait Loci (اختصارًا: QTL) التى تمكن الباحثين من تحديد مواقع الجينات التى تتحكم فى مختلف الصفات ذات العلاقة بصفة التحمل. ونتناول — فيما يلى — أهم الدراسات التى أجريت فى هذا الشأن على محصول الطماطم.

تحمل الملوحة

نظرًا لأن تحمل الملوحة فى الطماطم يتباين باختلاف مرحلة النمو، فقد بُذلت

الجهود لتحديد الجينات التى قد تكون مسئولة عن خاصية التحمل فى مراحل نمو مختلفة، مثل مراحل إنبات البذور، والنمو الخضرى والمراحل التالية لذلك؛ الأمر الذى قد يفيد فى تهريم (تجميع) تلك الجينات فى تركيب وراثى واحد يكون أكثر قدرة على تحمل الملوحة.

شملت الدراسة على تحمل إنبات البذور للملوحة تلقيحات بين الطماطم وكل من *L. pennelli*، و *L. pimpinellifolium*، وأظهرت أن بعض الـ QTLs كانت مشتركة بين النوعين (٨ جينات على الكروموسومات ١، ٢، ٣، ٧، ٨، ٩، ١٢ فى كلا النوعين)، بينما كان بعضها الآخر خاص بنوع معين دون الآخر.

ويعتبر تحمل الملوحة خلال مرحلة النمو الخضرى أكثر أهمية، وأكثر تعقيدًا عنه خلال مرحلة إنبات البذور، ويستدل من الدراسات التى أجريت على تلقيحات بين الطماطم والنوع البرى *L. pimpinellifolium* أن تلك الصفة يتحكم فيها أكثر من جين واحد (٤–٧ مواقع جينية). كذلك أوضحت الدراسات على تحمل الملوحة أثناء مرحلة التكاثر الجنسى معبرًا عنها بعدد الثمار ووزن الثمرة ومحصول الثمار — والتى اعتمدت على تلقيحات بين الطماطم والنوع البرى *L. pimpinellifolium* — تحكم عديد من الجينات فيها.

تحمل البرودة

اعتمدت دراسات تحمل البرودة على صفات القدرة على الإنبات (التى استعمل فيها النوع البرى *L. pimpinellifolium* فى تلقيحات مع الطماطم)، والنمو الخضرى وذبول النمو الخضرى وقدرة الجذور على امتصاص الأمونيوم تحت ظروف شد البرودة (التى استعمل فيها النوع البرى *L. pimpinellifolium* فى تلقيحات مع الطماطم)، وتبين وجود ٣–٥ جينات تتحكم فى الصفة الأولى (وتقع على كروموسومات أرقام: ١، ٢، ٣، ٤، ٨، ١٢)، و ٣–١٠ جينات تتحكم فى مجموعة الصفات الثانية (وتقع على كروموسومات أرقام: ١، ٢، ٣، ٤، ٨، ٩، ١٢).

تحمل الجفاف

اعتمدت دراسات تحمل الجفاف على صفتى إنبات البذور (والتى استعمل فيها النوع البرى *L. pimpinellifolium* فى تلقيحات مع الطماطم)، وكفاءة استخدام المياه WUE (والتى استعمل فيها النوع البرى *L. pimpinellifolium* فى تلقيحات مع الطماطم)، وتبين منها تحكم ٤–٨ جينات فى الصفة الأولى (تقع على كروموسومات أرقام: ١، ٢، ٣، ٤، ٨، ٩، ١٢)، وثلاثة جينات فى الصفة الثانية لم تحدد مواقعها.

العلاقة بين صفات التحمل لمختلف حالات الشدّ

أوضحت الدراسات التى أجريت على إنبات البذور كدليل على تحمل حالات الشدّ أن بعض الـ QTLs كانت غير متخصصة لحالة شدّ معينة، حيث أكسبت النباتات تحملاً لكل من شدّ الجفاف وشدّ البرودة وشدّ الملوحة، بينما كانت QTLs أخرى متخصصة لحالة شدٍّ بعينها. ولا شك أن هذه النوعية من الدراسات يمكن أن تفيد — ليس فقط فى تفهم الأساس الفسيولوجى لتحمل مختلف حالات الشدّ — وإنما — كذلك — فى تحديد جينات مماثلة تُكسب النباتات صفة التحمل خلال مختلف مراحل تطورها؛ بما يقود إلى احتمال إنتاج نباتات تتحمل أكثر من حالة شدّ واحدة (Foolad ٢٠٠٧).

أمثلة من دراسات متنوعة

يبين جدول (١٦–١٦) أعداد الـ QTLs التى تستعمل فى تعرف جينات تتحكم فى صفات مرغوب فيها ويراد الانتخاب لها) لبعض الصفات النباتية ذات العلاقة بتحمل بعض ظروف الشدٍّ البيئى.

جدول (١٦-١٦): أعداد الـ quantitative trait loci (اختصارًا: QTL، وهى التى تستعمل فى تعرف جينات تتحكم فى صفات مرغوب فيها ويُراد الانتخاب لها) لبعض الصفات النباتية ذات العلاقة بتحمل بعض ظروف الشدِّ البيئـىَ (QTL) Quantitative trait loci for stress resistance — ٢٠٠٧ —الإنترنت].

الصفة	المحصول	التلقيح	العشيرة المرباة	عدد الـ QTL
أولاً: صفات استجابات النموات الجذرية والخضرية فى ظروف الجفاف				
التركيب البنائى للجذور والحصول على الماء	الخس	Salians x UC92G489	F2	١٣
اتجاه وضع الورقة	الذرة	Ac7643 and Ac7729/TZSR	RIL	٥
طول الجذور وأعدادها وسمكها	الأرز	IR58821 x IR52561	RIL	٢٨
الصفات المظهرية للجذور وتوزيعها	الأرز	IR64 x Azucena	DHL	٣٩
الصفات المظهرية للجذور وطول خلية الجذر	الأرز	Azucena x Bala	F_2	٢٤
سمك الجذور ودليل اختراقها للتربة	الأرز	CT993 x IR62266	DHL	٥
سمك الجذور ودليل اختراقها للتربة	الأرز	IR64 x Azucena	DHL	١٢
عدد الخلفات وعدد الجذور وسمكها ووزنها الجاف	الأرز	CO39 x Moroberekan	RIL	١٨
عدد الخلفات وعدد الجذور وقدرتها على اختراق التربة	الأرز	CO39 x Moroberekan	RIL	٣٩
عدد الخلفات ونسبة عدد الجذور الكلى إلى عدد الجذور المخترقة	الأرز	Azucena x Bala	RIL	١٨
ثانيًا: صفات الضبط الأسموزى				
الضبط الأسموزى فى ظروف الجفاف	الشعير	Tadmor x Er/Amp	RIL	١٢
الضبط الأسموزى فى ظروف الجفاف	الأرز	CT9993 x IR62266	DHL	٥
التنظيم الأسموزى فى ظروف الجفاف	دوار الشمس	'PAC2' x 'RHA266'	RIL	١ رئيسى + ٤
التنظيم الأسموزى فى ظروف الجفاف	القمح	Songlen x Cobdor4/3Ag14	RIL	١

تابع جدول (١٦-١٦).

الصفة	المحصول	التلقيح	العشيرة المرباة	عدد الـ QTL
ثالثًا: صفات تحمل النبات الكامل والمحصول للجفاف				
تحمل البادرات لفقد الرطوبة	الشعير	Mona x *H. spontaneum*	F_4	٧
صفات تجنب الفقد المائى وتحمله	الأرز	IR58821 x IR52561	RIL	١٨-٣٨
التفاف الأوراق وجفافها ومعدل النمو	الأرز	IR64 x Azucena	DHL	٤٢
الصفات المورفولوجية والفسيولوجية	الأرز	IR64 x Azucena	DHL	15
المحصول ومكوناته فى ظروف الجفاف	الأرز	Bala x Azucena	RIL	٣١
رابعًا: الاستجابات الهرمونية فى ظروف الجفاف				
تركيز حامض الأبسيسك فى الأوراق	الأرز	Os420 x IABO78	F3	١٦
حجم الورقة وتراكم حامض الأبسيسك فيها	الأرز	IR20 x 63-83	F2	١٧
تركيز حامض الأبسيسك	القمح	Chimese Spring x Ciano 67	DHL F2	١
خامسًا: استخدام المياه ونشاط البناء الضوئى فى ظروف الجفاف				
تكوين الجذور العرضية تحت ظروف الغدق	الذرة	CV B64 x teosinte	F2	٢
التفاف الأوراق وتوصيل الثغور	الأرز	Azucena x Bala	F2	٨
المحصول والنضج وكفاءة استخدام الماء	فول الصويا	Minsoy x Noir 1	RIL	٣
البناء الضوئى والوضع المائى	دوار الشمس	PAC2 x RHA266	RIL	١٩
سادسًا: ثبات الأغشية الخلوية				
العقم الذكرى السيتوبلازمى فى ظروف الجفاف	الأرز	CT9993 x IR62266	DHL	٩
سابعًا: تحمل الغمر بالماء والغدق والأغراق				
تحمل الغدق وصفات الجذور والنموات الخضرية	الذرة	HZ32 x K12	F2:F3	حتى ٣٤
تكون الخلايا المساعدة على نفاذ الهواء aerenchyma	الذرة	B64 x teosinte	F2	٤

تابع جدول (١٦-١٦).

الصفة	المحصول	التلقيح	العشيرة المرباة	عدد الـ QTL
الإنبات فى ظروف الحرارة المنخفضة ونقص أكسجين الأنسجة	الأرز	USSR5 (japonica) x N22 (indica)	F2	٢ ،١١
استطالة الأوراق والسلاميات فى ظروف الغمر بالماء	الأرز	IR74 x Jalamagna	RIL	٢٥
تحمل الغمر بالماء	الأرز	IR74 x FR13A	RIL	٤
القدرة على البقاء فى ظروف الإغراق	القمح	Forno x Oberkulmer	RIL	٥
ثامناً: تحمل الملوحة				
استبعاد الصوديوم	القمح	Low Na^+/Tamaroi		١
النمو فى الماء الملحى	الأرز	Nipponhare x Kasalath	BIL	٢٧
امتصاص الصوديوم والبوتاسيوم وتركيزهما	الأرز	Nona Bokra x Pokkali //IR4630 x IR10167	RIL	١٦
محصول الثمار	الطماطم	2 *Solanum* populations	RIL	٨
تحمل الملوحة	القمح	Opata85 x W7984	RIL	٤٧
تاسعًا: تحمل البرودة				
تقسية الشتاء والنمو الخريفى وأضرار التحمل	البرسيم الحجازى	Blazer XL 17 x Peruvian 13	BC	١٤
تحمل البرودة	الشعير	Nure x Tremois	DH	١
تحمل التجمد	الموالح	*C. grandis* x *P. trifoliate*	F1	+١
القدرة على البقاء فى الحقل شتاءً	العدس	WA8649090/Precoz	RIL	١-٣
تحمل البرودة فى النمو والتطور	الذرة	Lo964 x Lo1016	F2-F4	٢٠
البناء الضوئى فى ظروف الحرارة المنخفضة	الذرة	Ac7643 x Ac7729/TZSRW	RIL	٨
تحمل التثبيط الضوئى المستحث بالحرارة المنخفضة	الذرة		F2: 3	٣
قوة النمو المبكرة واصفرار الأوراق وتلون الأوراق بالقرمزى وأضرار الصقيع	الذرة	SL x TH	DHL	حتى ٢٨
تحمل البادرات للحرارة المنخفضة	الأرز	M-202 x IR50	RIL and F5:F10	١

تابع جدول (١٦-١٦).

الصفة	المحصول	التلقيح	العشيرة المرباة	عدد الـ QTL
تحمل الحرارة المنخفضة	الأرز	Norin-PL8 x Silewah	NIL	٢
تحمل البادرارت للحرارة المنخفضة	الأرز	Tolerant japonica/Sensitive indica	RIL	٣ + ثانوية
تحمل الحرارة المنخفضة في محصول البذور	فول الصويا	Hayahikari x Toyomusume	RIL	٣
تحمل الحرارة المنخفضة	الطماطم	*L. esculentum* x *L. hirsutum*	NIL	١
ذبول النمو الخضرى وامتصاص الأمونيوم	الطماطم	TS5 x LA1778	BC	١٥
عاشرًا: تحمل الحرارة العالية				
تحمل الحرارة العالية في صفة امتلاء الحبوب	القمح	Ventor/Kari92	F1-F2-F3	٢
حادى عشر: استمرار اللون الأخضر (عدم الشيخوخة)				
استمرار الاخضرار ومحتوى الكلوروفيل	الأرز	Mutagenesis of Hwacheong-wr	طفرة	١
استمرار الاخضرار	السورجم	B35 x Tx7000	RIL	٤
استمرار الاخضرار ومحتوى الكلوروفيل	الذرة الرفيعة	B35 x TX7000	RIL	١٣
استمرار الاخضرار وتحمل الجفاف قبل الإزهار	الذرة الرفيعة	SC56 x TX7000	RIL	٩
ثانى عشر: تحمل نقص العناصر				
نقص المنجنيز	الشعير	Aagi Nijo x W12585	F2	١
كفاءة امتصاص الفوسفور	الفاصوليا	DOR364/G19833	RIL	٦
كفاءة امتصاص الفوسفور وصفات الجذور ذات العلاقة	الفاصوليا	DOR364/G19833	RIL	٢٦
نقص البورون	*Brassica napus*	Qingyou10 x 'Bakow'	F2	٤
نشاط إنزيم الـ acid phosphatase	الأرز	IR20 x IR55178-3B-9-3	RIL	٦
نقص النيتروجين	الأرز	Zhenshan 97 x Minghui 63	RIL	٨-٤
امتصاص الفوسفور	الأرز	Nipponbare/Kasalath	NIL	٤
امتصاص الفوسفور	الأرز	Nipponbare/Kasalath	F2/F3 NIL	١

تابع جدول (١٦-١٦).

الصفة	المحصول	التلقيح	العشيرة المرباة	عدد الـ QTL
تحمل نقص الزنك	الأرز	IR74 x Jalmagna	RIL	٤-٢
اصفرار نقص الحديد	فول الصويا	Pride B216 x A15, Anoka x A7	F2	١٩,١٠
اصفرار نقص الحديد	فول الصويا	Pride B216 x A15, Anoka x A7	F2	٤ ، ٧
تحمل نقص الفوسفور	فول الصويا	Kefeng x Nanong 1138-2	RIL	٧
نقص المنجنيز	القمح	Stojocri 2 x Hazar	F2	١
تحمل نقص الفوسفور	القمح	Lovrin 10 x Chinese Spring	DHL	كثير
ثالث عشر: تحمل سمية العناصر				
تحمل سمية الألومنيوم	البرسيم الحجازى	PI 440501-2 x PI 464724-25	BC1/F1	٣
تحمل سمية الألومنيوم	الشعير	Yambla x WB229	F2	١
تحمل سمية البورون	الشعير	Sahara3771 x Clipper	DHL	٤
تحمل سمية الألومنيوم	الذرة	L53 (susceptible) x L1327 (resistant)	F3/F4	٥
تحمل سمية الألومنيوم	الأرز	Azucena x IR1552	RIL	٨
تحمل سمية الألومنيوم	الأرز	Chiembau x Omon 269-65	F3	٢٠
تحمل سمية الحديد	الأرز	Nipponbare x Kasalath	BC lines	٤
تحمل سمية المنجنيز	الأرز	Azucena x IR1552	RIL	٨
تحمل سمية الزنك	الأرز	Asominori x IR24	RIL	٣
تحمل سمية الألومنيوم	الراى	M39A-1-6 x M77A-1	RIL	٣
تحمل سمية الألومنيوم	فول الصويا	Young x PI416937	F4	١١
تحمل سمية المنجنيز	فول الصويا	Essex x 'Forrest	RIL	١١
تحمل سمية الألومنيوم	القمح	Bh1146 x Anahuac	RIL	١
تحمل سمية النحاس	القمح	W7984 x Opata 85	RIL	١

DHL: أحادى مضاعف double haploid.

RIL: سلالات مرباة داخليًا recombinant inbred lines.

BC: تلقيح رجعى backcross.

BIL: سلالات رجعية مرباة داخليًا backross recombinant inbred lines.

NIL: سلالات ذات أصول وراثية متشابهة تقريبًا near-isogenic lines.

وتفيد تقنية الـ DNA MAS كوسيلة لتحسين سرعة وكفاءة برامج التربية لأن الاختبار لا يعتمد على مرحلة النمو، ولا يتأثر بالعوامل البيئية، ولا توجد تأثيرات سيادة، ويمكن استخدامه بكفاءة فى أجيال التربية المبكرة.

ويتعين توفر عاملين لفاعلية استراتيجية الـ MAS، هما: أن تكون المعلمات مرتبطة بقوة (١-٢ سنتى مورجان cM) بالجينات الرئيسية المرغوب فيها، وأن ترتبط الآليلات المعلمة بالجينات المرغوب فيها بانتظام فى كل عشائر التربية.

ولعل أكثر استخدام للمعلمات هو فى برامج التربية بالتهجين الرجعى؛ ليمكن انتخاب الأنسال التى يقل فيها الارتباط بين الجينات المزغوب فيها وتلك التى تنتقل معها من الأب المعطى، والتى لا يكون مرغوبًا فيها.

كذلك تستعمل استراتيجية الـ MAS فى الانتخاب للصفات الكمية.