وبينما يتواجد الإنزيم CAT فى الجسيمات الصغيرة microbodies لجميع النباتات، فإن باقى الإنزيمات يتوزع وجودها بين البلاستيدات الخضراء، والسيتوبلازم، والميتوكوندريات، والجسيمات الصغيرة (Iba ٢٠٠٢).

تمتلك النباتات القدرة على التخلص من السوبر أوكسيد بمساعدة إنزيم الـ superoxide dismutase (اختصارًا: SOD)، الذى يحفز عملية الـ dismutation للـ superoxide إلى فوق أكسيد الأيدروجين والأكسجين، والذى يُعد هامًا فى منع اختزال الأيونات المعدنية، ومن ثم تمثيل الـ hydroxyl radicals. ويمكن استبعاد فوق أكسيد الأيدروجين بإنزيم الـ ascorbate peroxidase الذى يقع فى أغشية الـ thylakoid.

ولمزيد من التفاصيل عن العناصر النشطة فى الأكسدة ROS ومضادات الأكسدة وإرسال الإشارات فى النباتات (signaling) .. يُراجع Ahmad وآخرون (٢٠٠٨).

كذلك تُنتج النباتات أكسيد النيتريك nitric oxide استجابة لكل من شد الجفاف والملوحة والحرارة، وكذلك عند التعرض للإصابات المرضية، وسريعًا ما يتفاعل أكسيد النيتريك مع كل من العناصر النشطة فى الأكسدة ROS وحامض الأبسيسك والهرمونات الأخرى وينظم تمثيل الإيثلين بصورة مباشرة أو غير مباشرة (Cheng وآخرون ٢٠٠٥).

## معاملات متنوعة للتغلب على أضرار بعض حالات الشدّ البيئى

توصل الباحثون إلى عديد من المعاملات التى تُفيد فى تغلب النباتات على أضرار مختلف حالات الشدّ البيئى؛ الأمر الذى نتناوله بالتفصيل فى الفصول التالية من هذا الكتاب. ونستعرض فيما تبقى من هذا الفصل جانبًا من التأثيرات التى تُحدثها معاملات ذات تأثيرات إيجابية على أضرار أكثر من حالة من حالات الشدّ البيئى، مع تناولها بتفصيلات أكثر تحت مختلف حالات الشدّ فى الفصول التالية.

## المعاملة بالبرولين

لجأ كثير من الباحثين إلى معاملة النباتات بالبرولين proline كوسيلة للتغلب على أضرار بعض عوامل الشدّ البيئى– وخاصة شدّ الملوحة والجفاف – كما يتبين من جدول (١–١).

**جدول (١–١): تأثير المعاملة بالبرولين على تحمل بعض عوامل الشدّ البيئى فى النباتات (عن Ashraf & Foolad ٢٠٠٧).**

| النوع النباتى | حالة الشدّ | تأثير المعاملة بالبرولين |
|---|---|---|
| *Distichlis spicata* | الملوحة | ارتفع تراكم البرولين فى الخلايا المتأقلمة على تركيز من الملح |
| *Glycine max* | الملوحة | زادت المعاملة بالبرولين من إنتاج الإنزيمين: superoxide dismutase ، و peroxidase فى النباتات المعرضة للشدّ. |
| *Allenrolfea occidentalis* | الملوحة والجفاف | حيَّدت للمعاملة بالبرولين الزيادة فى إنتاج الإثيلين فى النباتات المعرضة للشدّ. |
| *Hordeum vulgare* | الملوحة | أحدث البرولين نقصًا فى تراكم الصوديوم والكلورين فى خلايا مزارع الأجنة. |
| *Allium cepa* | الملوحة | خفف البرولين من تأثير كلوريد الصوديوم على تعطيل وإفشال وظيفة الأغشية الخلوية. |
| *Oryza sativa* | الملوحة | لم تغير المعاملة بالبرولين من محتوى الصوديوم والكلورين فى النباتات المعرضة للشدّ الملحى. |
| *Nicotiana tabacum* | الملوحة | حفزت المعاملة بالبرولين نمو الخلايا فى معلق تحت ظروف الشدّ الملحى دون الإبقاء على نسبة عالية من البوتاسيوم إلى الصوديوم. |
| *Arabidpsis thalianta* | لا يوجد عوامل شدّ | أحدث البرولين أضرارًا بالتركيب المجهرى للبلاستيدات الملونة والميتوكوندريات. |

## المعاملة بالسيلينيم

على الرغم من أن النباتات الراقية لا تحتاج إلى السيلينيم فى تغذيتها إلا أنه يعمل كمضاد للأكسدة، وقد ينشط الآليات الدفاعية التى تفيد فى التغلب على الشد التأكسدى فى البلاستيدات الخضراء (Seppanen وآخرون ٢٠٠٣).

## المعاملة بالجليسين بيتين

أدت المعاملة بالجليسين بيتين glycinebetaine إلى تحسين تحمل النباتات لمختلف عوامل الشدّ البيئى، وذلك كما فى الحالات التالية:

| النبات | عوامل الشدّ التى أمكن زيادة تحملها |
|---|---|
| *Arabidopsis thaliana* | الملوحة |
| | التجمد |
| | الشد التأكسدى |
| | البرودة |
| *Avena sativa* | الجفاف |
| | الملوحة |
| لفت الزيت *Brassica rapa* | الجفاف |
| | الملوحة |
| الفراولة | التجمد |
| الشعير | الجفاف |
| | الملوحة |
| الطماطم | البرودة |
| | الجفاف |
| | الملوحة |
| البرسيم الحجازى | التجمد |
| الأرز | الملوحة |
| الفاصوليا | الجفاف |
| القمح | التجمد |
| | الجفاف |
| | الملوحة |
| الذرة | البرودة |

(Chen & Murata ٢٠٠٨).

ويبين جدول (١-٢) مزيدًا من التفاصيل في هذا الشأن.

**جدول (١-٢): تأثير المعاملة بالجليسين بيتين على تحمل بعض النباتات لبعض عوامل الشدّ البيئي (عن Ashraf & Foolad ٢٠٠٧).**

| النوع النباتي | حالة الشدّ | تأثير المعاملة بالجليسين بيتين |
|---|---|---|
| *Nicotiana tabacum* | الجفاف | استحث الجليسين بيتين تحسنًا في النمو والمحصول في النباتات المعرضة لشدّ الجفاف. |
| *Phaseolus vulgaris* | الجفاف | أظهرت النباتات المعاملة بالجليسين بيتين انخفاضًا بطيئًا في الجهد المائي بالأوراق. |
| *Glycine max* | الجفاف | حسّن الجليسين بيتين النمو النباتي. |
| *Triticum aestivum* | الجفاف | حسّن الجليسين بيتين النمو النباتي في إحدى الدراسات ولم يُحسّنه في دراسة أخرى. |
| *Brassica napus* | الجفاف | لم تحسن المعاملة بالجليسين بيتين النمو النباتي. |
| *Zea mays* | الجفاف | حسنت المعاملة بالجليسين بيتين نمو النباتات المعرضة للشدّ. |
| *Solanum lycopersicum* | الملوحة والحرارة العالية | حسنت المعاملة بالجليسين بيتين نمو النباتات المعرضة للشدّ. |
| *Oryza sativa* | الملوحة | حسنت المعاملة بالجليسين بيتين نمو النباتات المعرضة للشدّ الملحي، دون التأثير على النمو الجذري، مع خفض تركيز الصوديوم وزيادة تركيز البوتاسيوم في النمو الخضري. |
| *Arabidopsis thaliana* | حرارة التجمد | حسنت المعاملة بالجليسين بيتين من تحمل التجمد (خفضت حرارة التجمد من — ٣,١ إلى — ٤,٥ °م). |
| *Solanum tuberosum* | الحرارة المنخفضة | حسنت المعاملة بالجليسين بيتين من نمو النباتات المعرضة للشدّ. |
| *Gossypium hirsutum* | الجفاف | بينما حسّنت المعاملة بالجليسين بيتين من النمو والمحصول في النباتات المعرضة للشد في بعض الدراسات، فإنها لم تؤثر على النمو والمحصول في دراسة أخرى. |

## المعاملة بالبراسينوستيرويدات

تستحِث البراسّينوستيرويدات brassinosteroids (اختصارًا: BRs) فى النباتات قدرة على تحمل نوعيات مختلفة من الشدّ. ولقد وجد أن مستويات الـ BRs ترتبط إيجابيًّا بالقدرة على تحمل شدّ الأكسدة الضوئية photo-oxidation وشد البرودة والمقاومة لفيرس موزايك الخيار فى الخيار. كذلك حفَّزت المعاملة بالـ BRs نشاط الإنزيم NADPH oxidase، ورفعت من مستويات الـ $H_2O_2$ فى الجدر الخلوية apoplast. وبينما رفعت المعاملة بالـ BRs مستوياتِ الـ $H_2O_2$ فى خلال ثلاث ساعات من المعاملة، فإن الـ $H_2O_2$ عاد إلى مستواه الأصلى فى خلال ثلاثة أيام بعد المعاملة، وكان هذا التراكم فى الـ $H_2O_2$ المستحث بالـ BRs مصاحبًا بزيادة فى قدرة تحمل شدّ الأكسدة. وعندما ثُبِّط نشاط الـ NADPH oxidase وتم التحرر من الـ $H_2O_2$ كيميائيًّا.. حدث خفض فى كل من القدرة على تحمل شدّ الأكسدة وشدّ البرودة الذى استحثته المعاملة بالـ BRs، وكذلك حدث خفض فى التعبير الجينى الدفاعى. ولقد استحثت معاملة الـ BRs تعبير كلاً من الجينات المنظِّمة (مثل RBOH، وMAPK1، وMAPK3) والجينات ذات الصلة بالدفاع والاستجابات المضادة للأكسدة. ويُستفاد مما تقدم بيانه أن الزيادة فى مستويات الـ $H_2O_2$ التى تنتج عن الزيادة فى نشاط الـ NADPH oxidase وثيقة الصلة بتحمل الشدّ الذى تستحثه المعاملة بالـ BRs (Xia وآخرون ٢٠٠٩).

## المعاملة بالحديد

أمكن زيادة مستوى الحديد الحر فى الفاصوليا بنقع الجذور فى محلول Fe (III)–EDTA بتركيز ٩٠٠ ميكرومول/ لتر لمدة ٢٤ ساعة، حيث ارتفع محتوى الأوراق من الحديد من ١٦٠ إلى ٥٣٠ ملليجرام Fe/كجم وزن جاف. وأدت معاملة الحديد إلى زيادة نشاط إنزيم الـ ascorbate peroxidase من ٥,٣ إلى ١٨,٢ ميكرومول حامض أسكوربيك/جم وزن طازج فى

الدقيقة، وزيادة محتوى حامض الأسكوربيك من ٦,٦ إلى ١٠ مجم/جم وزن طازج، واستحثت زيادة فى نشاط إنزيمى الكاتاليز catalase والجلوتاثيون ردكتيز glutathione reductase بمقدار ٣٨٠٪، و٥٥٪، على التوالى. وساعدت هذه الزيادات فى أنشطة الجهاز المضاد للأكسدة فى أقلمة الفاصوليا المعاملة بالحديد لمعاملة تالية لذلك بالباراكوات paraquat الذى يُحدث شدًّا تأكسديًّا، مقارنة بما حدث فى نباتات الكنترول (Shainberg وآخرون ٢٠٠٠).

## المعاملة بأزرق الميثيلين

من المعروف أن عوامل الشد البيئى مثل الحرارة العالية والملوحة العالية تسبب حالة من الشدّ التأكسدى فى النباتات بتحفيزها لتوليد العناصر النشطة فى الأكسدة reactive oxygen species (اختصارًا: ROS)، وهى التى يكون لها تأثيرات قوية سلبية على التطور النباتى. وتعد الميتوكوندريا أحد أهم مصادر الـ ROS فى الجذور. وقد عُرِف حديثًا فى الثدييات أن المعاملة بأزرق المثيلين methlene blue بتركيزات شديدة الانخفاض يمكن أن تقلل من عملية وَهَنْ الميتوكوندريا من خلال التخلص من الـ ROS. وقد أُجريت دراسة على الطماطم نُميت فيها البادرات فى مزرعة مائية عُرِّضت لشد ملحى (١٥٠ ملل مول كلوريد صوديوم) أو لحرارة جذور عالية (٣٥°م) لمدة ١٤ يومًا، مع المعاملة — أو عدم المعاملة — بأزرق المثيلين بتركيز $١٠^{-٨}$ مول. وأظهرت الدراسة أنه — فى الظروف الطبيعية — حفّزت المعاملة بأزرق الميثلين كل من النمو الجذرى والنمو الخضرى، وأدت إلى زيادة تنفس الجذور وخَفْض تركيز فوق أكسيد الأيدروجين $H_2O_2$ والـ malonyldialdehde، وإلى زيادة نشاط الإنزيم superoxide dismutase فيها. وأدت كل من زيادة الملوحة وارتفاع حرارة الجذور إلى الحد من نمو كل من الجذور والأجزاء الخضرية، وتسببا فى زيادة الشد التأكسدى فى الجذور. هذا.. إلاّ أن المعاملة بأزرق الميثلين أحدثت حماية جوهرية من كلتا حالتى الشدّ البيئى، وأعادت مستويات تركيزات المركبات ذات العلاقة بالشد التأكسدى (الـ $H_2O_2$ والـ

malonyldialdehyde) فى الجذور والأوراق إلى مستواها الطبيعى تقريبًا. ويُستفاد من هذه الدراسة أن المعاملة بأزرق الميثلين يمكن أن توفر حماية من حالتى شدّ الحرارة والملوحة – ليس فقط من خلال التفاعل مع ميتوكوندريا الجذور – ولكن أيضًا من خلال تحقيق أنشطة خلوية إضافية فى الجذور (Aloni وآخرون ٢٠١٠).

## المعاملة ببكتيريا المحيط الجذرى

تُفيد بكتيريا المحيط الجذرى المنشطة للنمو النباتى فى تحسين إنتاجية النباتات ومقاومتها للأمراض، كما أنها تستحث مقاومة جهازية لكل من الملوحة والجفاف، وقد تزيد من امتصاص النباتات للعناصر من التربة؛ بما يفيد فى خفض المعدلات السمادية (Yang وآخرون ٢٠٠٨).

## التطعيم كوسيلة للتغلب على بعض حالات الشدّ البيئى

نتناول موضوع التطعيم بالشرح تحت بعض عوامل الشدّ البيئى. وللاطلاع على التفاصيل المتعلقة باستخدام التطعيم كوسيلة لتحسين تحمل النباتات للشدّ الحرارى وشدّ الجفاف والملوثات العضوية .. يراجع Schwarz وآخرون (٢٠١٠).

## مراجع إضافية فى الشدّ البيئى

- يقدم Hopkins (١٩٩٥) عرضًا علميًّا للحالة الفسيولوجية للنباتات التى تتعرض لشدّ الجفاف، وشدة البرودة، والتجمد، والحرارة العالية، والملوحة، وتلوث الهواء.
- ويعطى Krug (١٩٩٧) بيانًا رياضيًّا وفسيولوجيًّا عن التأثيرات البيئية على النمو والتطور والمحصول فى نباتات الخضر.
- وللاطلاع على تفاصيل شدّ البرودة والملوحة والجفاف.. يراجع Mahajan & Tuteja (٢٠٠٥).