٤- زيادة نسبة الجذور إلى النموات الخضرية.

٥- زيادة كثافة الشعيرات الجذرية وأطوالها (Singh ١٩٩٣).

تحسين كفاءة استخدام العناصر

النيتروجين

إن من أبسط تعريفات كفاءة استخدام النيتروجين NUE أنه كمية المحصول (الحبوب والثمار أو النمو الخضرى ... إلخ) لكل وحدة من النيتروجين المتاح فى التربة. وتوجد مرحلتان لاستعمال النيتروجين خلال دورة حياة النبات. ففى البداية وأثناء تكوين الكتلة البيولوجية يكون هناك امتصاص للنيتروجين وتخزينه واستخدامه فى إنتاج الأحماض الأمينية وغيرها من المركبات النيتروجينية الهامة. وتأتى المرحلة الثانية والتى فيها توزع الكميات المناسبة من النيتروجين لمختلف أجزاء التخزين والتى يتكون منها المحصول الاقتصادى. ونجد خلال مرحلة النمو الخضرى أن الأوراق والجذور الحديثة النامية تكون بمثابة مستودع للنيتروجين الممتص وهى التى تقوم باستخدامه فى تصنيع الأحماض الأمينية وتخزينها من خلال مسار تمثيل النترات. تستخدم هذه الأحماض الأمينية فى تصنيع البروتينات والإنزيمات التى تتطلبها مختلف الأنشطة الأيضية. وفيما بعد — فى أثناء مرحلة النمو التكاثرى — يكون من الضرورى توفر زيادة فى إمدادات المركبات النيتروجينية لأجل الإزهار والمحصول. وفى هذه المرحلة يصبح تمثيل النيتروجين وتحركه حاسمين، وفيه تمثل الأوراق المصدر الذى يوفر الأحماض الأمينية لأعضاء التكاثر والتخزين. ويشكل النيتروجين الذى يتحرك من الأوراق خلال مرحلة شيخوختها جزءًا هامًا مما يخزن فى أعضاء التخزين.

تستخدم الأسمدة النيتروجينية — أساسًا — فى صورتى النترات والأمونيوم، وكلاهما متحرك فى التربة، ولا تستفيد المحاصيل الزراعية بأكثر من ٣٠٪-٤٠٪ من الأسمدة الآزوتية المضافة، بينما يُفقد أكثر من ٦٠٪ من النيتروجين بوسائل متعددة، منها:

الرشح، والجريان السطحى، والزنترة (إزالة النيتروجين) denitrification، والتبخر، واستهلاك كائنات التربة له. ويؤدى العمل على زيادة كفاءة النباتات فى استعمال النيتروجين إلى خفض التلوث البيئى، وتكاليف الزراعة..

إن جهود تربية النبات خلال العقود القليلة الماضية أحدثت زيادة جوهرية فى محصول مختلف المحاصيل الزراعية، ورافق ذلك زيادة فى كفاءة استخدمها للنيتروجين nitrogen use efficiency (اختصارًا: NUE). فعلى سبيل المثال .. تُظهر المقارنة بين هجن الذرة التى أُنتجت بين سبعينيات وتسعينيات القرن الماضى حدوث زيادة مضطردة فى استجابة المحصول لزيادة توفر النيتروجين.

ولقد وجدت اختلافات وراثية فى كل من امتصاص النيتروجين، ومحصول الحبوب لكل وحدة من النيتروجين الممتص فى عديد من المحاصيل، منها: القمح والأرز والذرة والذرة الرفيعة والشعير (Kant وآخرون ٢٠١١).

الفوسفور

طوَّرت النباتات آليتين لتصبح أكثر تحملاً لنقص الفوسفور، وهما:

١- تحسين كفاءة استخدام الفوسفور داخل النبات بإعادة تحريكه، وأقلمة أيض النبات، وبوجود تحورات فى ناقلات الفوسفور وعبر الأغشية البلازمية.

٢- تحسين كفاءة امتصاص الفوسفور من التربة بتحوير بناء المجموع الجذرى؛ ليصل إلى الفوسفور حيث يتواجد.

ومن بين التغيرات المورفولوجية التى تواكب نقص الفوسفور: زيادة نسبة الجذور إلى النموات الهوائية، وزيادة عدد الجذور الجانبية وأطوالها، وكثرة الشعيرات الجذرية. ولقد وجدت تلك التغيرات فى عديد من المحاصيل، منها: الفاصوليا، والأرز، ولفت الزيت، وفول الصويا (Fita وآخرون ٢٠١١).

ونظرًا لأن الفوسفور بطئ الانتشار فى التربة، فإن النباتات تتأقلم على ذلك الأمر —

كما أسلفنا – بزيادة مساحة السطح الجذرى الذى يلامس التربة؛ بهدف زيادة كفاءة امتصاص الفوسفور، ومما يؤيد ذلك ما يلى:

١- نجد فى حالات نقص الفوسفور زيادة كبيرة فى نسبة الجذور إلى النموات الخضرية، مع زيادة فى توجه المركبات الكربونية نحو الجذور.

٢- يُحدِث نقص الفوسفور تغيرات جوهرية فى مورفولوجى وهندسة وبناء المجموع الجذرى. ويميز تلك التغيرات زيادة فى التفرعات الجذرية، ونقص فى قطر الجذور، مما يؤدى إلى زيادة مساحة السطح الجذرى الماص بالنسبة إلى حجمه.

٣- زيادة أعداد وأطوال الشعيرات الجذرية؛ مما يؤدى إلى زيادة السطح الماص (عن Kochian وآخرين ٢٠٠٤)

هذا .. وتتوفر مصادر كثيرة لتحمل نقص الفوسفور فى عديد من المحاصيل الزراعية، والتى تعتمد آليتها – غالبًا – على القدرة على إفراز مركبات كيميائية معينة فى المحيط الجذرى، وتحورات فى بناء وهندسة المجموع الجذرى، والارتباط مع بعض الكائنات الدقيقة. وتتوفر – إلى جانب تلك الآليات – اختلافات بين التراكيب الوراثية للمحصول الواحد فى كفاءة استخدامها للفوسفور؛ أى فى مقدار النمو أو الكتلة البيولوجية التى تتكون مقابل كل وحدة من الفوسفور المتوفر.

تتميز التراكيب الوراثية المتحملة لنقص الفوسفور بإفرازها لمركبات تجعل الفوسفور أكثير تيسرًا من مصادره غير الذائبة مثل صخر الفوسفات فى الأراضى الجيرية، وكذلك يزداد مع بعضها نشاط الـ phosphatases فى المحيط الجذرى.

لقد وجد أن نقص الفوسفور يؤدى إلى تنبيه الجذور لإفراز حامضى الماليك والستريك، وهما اللذان يمكنهما جذب الفوسفور من الأسطح المعدنية التى يتواجد فيها العنصر فى صورة معقدة غير ذائبة متحدًا مع أكاسيد الألومنيوم والحديد والكالسيوم، وكذلك الأيدروكسيدات.

ومن بين أهم مميزات التراكيب الوراثية التى تتحمل نقص الفوسفور تخصيصها لجزء

أكبر – من المواد المعدنية المجهزة – للنمو الجذرى، وزيادة كثافة الجذور الدقيقة ذات المسطح الجذرى الكبير، وزيادة أعداد الشعيرات الجذرية وأطوالها، وزيادة تعمق الجذور بشكل عام.

وتتباين – كذلك – التراكيب الوراثية للمحصول الواحد فى مدى استعمار الميكوريزا لجذورها؛ الأمر الذى يرتبط إيجابيًا بما يمكنها الحصول عليه من الفوسفور، إلا أن تلك العلاقة ليست بهذا الوضوح فى كل المحاصيل (Rengel ١٩٩٩).

الحديد

تسلك النباتات إحدى آليتين لتحمل نقص الحديد، هما كما يلى:

١- الآلية الأولى خاصة بذوات الفلقتين وغير النجيليات من ذوات الفلقة الواحدة، وتتضمن ما يلى:

أ- ازدياد اختزال الحديديك Fe^{3+} إلى حديدوز Fe^{2+} عند الغشاء البلازمى لخلايا الجذر.

ب- زيادة حموضة المحيط الجذرى بزيادة صافى نضح البروتونات.

جـ- زيادة نضح المركبات المختزلة والمخلبية فى المحيط الجذرى.

د- حدوث تغيرات فى هستولوجى ومورفولجى الجذر؛ فيحدث انتفاخ فى القمة النامية الجذرية، ويتكون ما تعرف بالـ rhizodermal transfer cell، وتزداد التفرعات الجذرية، وتكثر الشعيرات الجذرية.

٢- الآلية الثانية خاصة بالنجيليات وتتضمن زيادة إفرازات الـ phytosiderophores فى المحيط الجذرى (Rengel ١٩٩٩).

كما تقوم النباتات التى تتحمل نقص الحديد فى ظروف شدِّ العنصر بإنتاج ما يعرف بالخلايا البشْرية الناقلة epidermal transfer cells فى المنطقة التى تلى القمة النامية للجذر. تقوم هذه الخلايا بنضح بروتونات فى التربة؛ مما يؤدى إلى خفض الـ pH، كما قد تقوم بإنتاج مواد مختزلة؛ مما يؤدى إلى تيسر الحديد. كذلك فإن الشعيرات الجذرية

قد تطور هذه الخلايا. ويمكن التعرف على هذه الخلايا بمحتواها السيتوبلازمى الكثيف وتراكم الميتوكوندريا بها فى الأجزاء القريبة من الجدار الخلوى الخارجى. ولهذه الخلايا آلية ضخ نشطة للبروتونات (Hale & Orcutt ١٩٨٧).

الزنك

تتميز النباتات الكفؤة فى استخدام الزنك وتحمل نقصه بما يلى:

١- توجد بها نسبة أعلى من الجذور الطويلة الدقيقة التى يكون قطرها ≤ ٠,٢ مم عما فى النباتات غير المتحملة لنقص الزنك.

٢- تحدث بها تغيرات فى كيمياء وبيولوجيا المحيط الجذرى، متضمنة إفراز كميات أكبر من الـ phytosiderophores التى تخلب إليها الزنك.

٣- زيادة الحد الأقصى لامتصاصها للزنك؛ مما يؤدى إلى زيادة تراكمه فى النبات.

٤- زيادة كفاءة استخدامها للزنك وتحديد تواجده (compartmentalization) داخل الخلايا والأنسجة والأعضاء، متضمنًا زيادة فى نشاط الـ carbonic anhydrase، والإنزيمات المضادة للأكسدة (مثل superoxide dismutase)، والمحافظة على تواجد مجموعات الـ sulfhydryl فى الأغشية البلازمية لخلايا الجذر فى حالة مختزلة (Rengel ١٩٩٩).

المنجنيز

على الرغم من توفر مصادر متنوعة لتحمل نقص المنجنيز فى محاصيل الحبوب، فإن آلية التحمل غير معروفة جيدًا. ولا يعتقد بأن خصائص معينة، مثل: الاستخدام الجيد للمنجنيز داخليًا، والاحتياج الفسيولوجى الأقل للعنصر، وزيادة معدل امتصاص العنصر، والشكل البنائى للمجموع الجذرى .. لا يعتقد بأن لتلك الصفات علاقة بتحمل نقص المنجنيز، بينما يُعتقد بأن خاصية التحمل تتحدد بأمرين، هما:

١- تحديد أماكن تواجد العنصر compartmentalization، وإعادة تحركه فى النبات بصورة أفضل.

٢- إفراز جذور النباتات المتحملة لكميات أكبر من المواد القادرة على جعل المنجنيز غير الميسر أكثر تيسرًا، مثل البروتونات، والمختزلات، والمحفزات الميكروبية (Rengel ١٩٩٩).

التقييم لتحمل نقص العناصر

طرق إجراء التقييم

يمكن إجراء التقييم لتحمل نقص العناصر الغذائية بأى من الطرق الآتية:

١- التقييم فى أصص، وهى طريقة سريعة وقليلة التكاليف نسبيًا، كما يمكن جعل التربة متجانسة بدرجة عالية فيما يتعلق بالعنصر المعنى. هذا إلاّ أن بيئة التقييم غير عملية، فالنمو الجذرى يكون محدودًا؛ ومن ثم يصبح التباين فى النمو الجذرى عديم الأهمية، خاصة فيما يتعلق بحصول الجذور على العنصر من حجم كبير من التربة، أو من على عمق كبير.

هذا .. ولم يمكن الحصول على ارتباط بين كفاءة امتصاص العنصر فى الأصص وتحت ظروف الحقل سوى فى دراسات محدودة خاصة بكل من الزنك والمنجنيز والفوسفور. يصعب كثيرًا العثور على ذلك الارتباط؛ إلا إنه وجد ارتباط عالٍ فى حالة أصناف القمح المتحملة لنقص الحديد من خلال آلية إفراز الجذور للـ phytosiderophores.

٢- يمكن إجراء التقييم فى الحقل مع زراعة صنف قياسى على مسافات متساوية ومحددة ليمكن مقارنة السلالات والتراكيب الوراثية النامية قريبًا منه به.

ويفضل إجراء التقييم فى حقلين يكون العنصر المعنى غير متوفر أو غير ميسر فى أحدهما ومتوفر فى الآخر؛ لكى لا يكون الانتخاب على أساس سلوك التركيب الوراثى فى التربة الفقيرة فى العنصر فقط؛ فيجب أن يكون التركيب الوراثى المنتخب عالى المحصول فى كلتا الحالتين (Rengel ١٩٩٣).

٣- يمكن إجراء التقييم فى المزارع المائية وهى أدق الطرق لإجراء تلك الاختبارات، حيث يمكن التحكم — بدقة فى تركيز كل عنصر يُراد الانتخاب لتحمل نقصه (Singh ١٩٩٣).