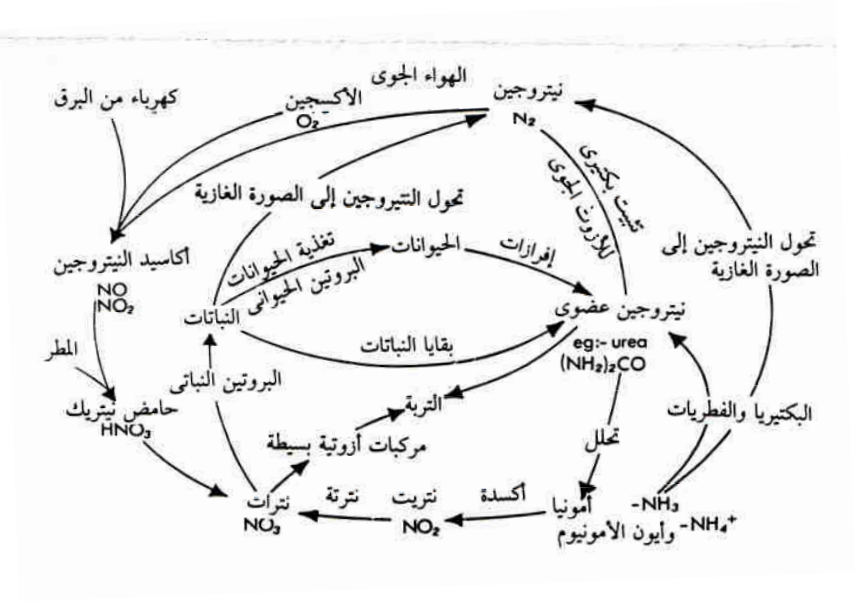

شكل (١-٤): دورة النيتروجين فى الطبيعة

الفوسفور

أهمية الفوسفور للنبات

يدخل الفوسفور فى تركيب الأحماض النووية، ويلعب دورًا كبيرًا فى كثير من التفاعلات الإنزيمية. فهو يدخل فى تركيب كل الأحماض النووية (مثل: الـ DNA، والـ RNA، و tRNA، والـ ribosomal RNA)، بالإضافة إلى دخوله فى تركيب الإنزيمات اللازمة لتفاعلات الطاقة المختلفة فى عمليات التنفس والبناء الضوئى، وكذلك يدخل فى تركيب المركبات الفوسفورية ذات الروابط الغنية بالطاقة (الـ ADP، والـ ATP) وفى مرافقات الإنزيمات NAD و NADP ، وفى تركيب بعض الدهون (الـ phospholipids).

ومن ثم، فإن الفوسفور عنصر أساسى فى النبات، فهو يدخل فى تركيب الأحماض

النووية، وهى أحماض مهمة بالنسبة للكائن الحى. وأهمية الـ ADP والـ ATP فى نقل الطاقة غنية عن البيان. أما مرافقات الإنزيمات NADP, NAD، فلها دورها الهام فى تفاعلات الأكسدة والاختزال، ويُعتمد عليها فى التفاعلات الحيوية الهامة فى البناء الضوئى، والتنفس، والـ glycolysis، وفى تمثيل الأحماض الدهنية وغيرها. أما الـ phospholipids، فمن المعتقد أنها تشكل مع البروتين جزءًا هامًا من الأغشية الخلوية.

ويوجد الفوسفور بتركيزات عالية فى المناطق المرستيمية التى يكون فيها النمو نشيطًا؛ حيث يشترك الفوسفور فى تمثيل البروتينات النووية.

ويعمل الفوسفور على تقليل الأثر الضار لزيادة الآزوت فى التربة، لأن وفرة الفوسفور تقلل من امتصاص النيتروجين غير العضوى، وهو يبكر فى النضج، وبذلك فهو يضاد التأثير الضار لزيادة عنصر الآزوت الذى يؤدى إلى اتجاه النبات نحو النمو الخضرى.

هذا .. ويشجع الفوسفور على نمو الجذور، وخاصة الجذور العرضية والليفية. ويتراكم جزء كبير من الفوسفور الذى يمتصه النبات فى البذور والثمار (Meyer وآخرون ١٩٦٠).

أعراض نقص الفوسفور

تبدأ أعراض نقس الفوسفور بشحوب لون الأوراق لتصبح خضراء باهتة. ومع توقف النمو تتراكم المواد الكربوهيدراتية فى النموات الخضرية؛ الأمر الذى يؤدى — سريعًا — إلى تراكم صبغة الأنثوسيانين الأرجوانية اللون، وهى التى تكسب أوراق النباتات — التى تعانى نقص العنصر — لونًا أرجوانيًا.

وتختلف أعراض نقص الفوسفور فى النباتات ذات الفلقة الواحدة عنها فى النباتات ذات الفلقتين. ففى نباتات الفلقة الواحدة يؤدى نقص العنصر إلى ظهور اللون الأحمر أو الأرجوانى فى مناطق مختلفة من الورقة فى مرحلة النمو الخضرى أما فى ذوات الفلقتين، فإن العروق الرئيسية للأوراق هى التى تأخذ اللون الأرجوانى، بينما

تبقى الأوراق الحديثة بلون أخضر داكن أو أخضر رمادى. ويزداد اللون الأرجوانى على عروق الأوراق وعلى السيقان، وبخاصة على الناحية السفلية للأوراق.

يقل امتصاص الفوسفور فى الحرارة المنخفضة؛ ولذا فإنها يمكن أن تتسبب فى ظهور أعراض متوسطة لنقص العنصر حتى مع توفره للنبات، وتختفى تلك الأعراض بمجرد ارتفاع درجة الحرارة (Jones ١٩٩٧).

ونظرًا لأن الفوسفور يتحرك بسهولة فى النبات، فإن الأعراض تظهر على الأوراق السفلية المسنة أولاً؛ لأن الأوراق الحديثة تسحب احتياجاتها من الفوسفور، حتى لو تطلب الأمر تحرك العنصر من الأوراق المسنة إلى الأوراق الحديثة. ويكون تحرك العنصر فى صورة أيون الفوسفات.

ويَضْعُف تكوينُ الجذور الليفية ونموها فى النباتات التى تعانى نقص الفوسفور.

وبصفة عامة .. يكون نمو النباتات التى تعانى نقص الفوسفور بطيئًا، وسيقانها رفيعة ومتليفة، وتتأخر فى النضج. وقد تسقط البراعم الزهرية والأزهار، وتكون الثمار صغيرة الحجم.

وتزداد حاجة النباتات إلى عنصر الفوسفور خلال مرحلتين من مراحل نموها، هما: مرحلة نمو البادرة، ومرحلة تكوين ونمو الثمار والبذور (عن Purvis & Carolus ١٩٦٤).

وتزيد احتمالات ظهور أعراض نقص الفوسفور عندما ينخفض محتوى الأوراق من العنصر عن ٠,٢٪ على أساس الوزن الجاف (عن Maynard ١٩٧٩).

أعراض زيادة الفوسفور

تؤدى زيادة الفوسفور فى التربة إلى زيادة امتصاصه على حساب عنصرى الزنك والحديد؛ الأمر الذى يؤدى إلى ظهور أعراض نقصهما على النباتات. ويحدث ذلك

بصورة واضحة فى كل من الفاصوليا، والذرة السكرية (Wittwer ١٩٦٩). وتظهر أعراض التسمم بالعنصر عند زيادة تركيزه فى النبات عن ١٪ على أساس الوزن الجاف.

كما أن زيادة الفوسفور فى الأوقات التى تسودها درجات الحرارة المرتفعة قد تؤدى إلى نقص كمية المحصول، ويعزى ذلك إلى أن ارتفاع درجة الحرارة وازدياد الفوسفور يسرعان من نضج النبات، مما ينشأ عنه نقص فى النمو الخضرى الضرورى لإنتاج محصول وافر. وتلاحظ هذه الظاهرة أحيانًا فى الأراضى الرملية (مرسى وآخرون ١٩٥٩).

الصور التى يُمتص عليها الفوسفور

يمتص النبات عنصر الفوسفور فى صورة أيونات الفوسفات فقط، وهى تكون فى إحدى الصور التالية:

$H_2PO_4^-$ (dihydrogen phosphate)

HPO_4^{--} (monohydrogen phosphate)

PO_4^{---} (phosphate)

والصورة الأولى ($H_2PO_4^-$) هى أكثر الصور امتصاصًا؛ لأنها أكثرها ذوبانًا، ولكن يتوقف مدى توفر هذه أو تلك على pH التربة. ويتوفر الفوسفور فى صورة $H_2PO_4^-$، خاصة فى pH من ٥,٥ — ٦,٥.

وعلى الرغم من تسويق مركبات الفوسفيت phosphite (وهى صورة مختزلة من الفوسفات phosphate ذات فائدة مؤكدة فى شحذ المقاومة الطبيعية فى النباتات ضد بعض الأمراض) على أنها أسمدة فوسفاتية، فقد أوضحت الدراسات عدم جدواها — على الإطلاق — فى هذا الشأن سواء أعوملت بها النباتات رشًّا، أم عن طريق التربة، وسواء أضيفت بمستويات عالية، أم منخفضة (Thao وآخرون ٢٠٠٨).

تيسر الفوسفور فى التربة

تأثير pH التربة

يتوفر الفوسفور فى التربة فى pH ٦,٥ – ٧,٥، ويقل نسبيًا فى pH ٦ – ٦,٥، و ٧,٥– ٨ ويصبح النقص خطيرًا فى الأراضى التى يقل فيها الـ pH عن ٦، ولكنه يتوفر مرة أخرى فى الأراضى التى يزيد فيها الـ pH عن ٨,٥.

ويرجع نقص الفوسفور فى الأراضى الحامضية إلى تكوين فوسفات الألمونيوم، وفوسفات الحديد، وكلاهما غير قابل للذوبان. أما فى الأراضى القلوية، فيتكون فوسفات الكالسيوم الثلاثى، وهو أيضًا غير قابل للذوبان. ولا تتجاوز نسبة الفوسفور الميسر لامتصاص النبات ١٪ من الفوسفور الكلى فى الأراضى القلوية والجيرية.

ويتوفر الفوسفور فى الأراضى التى تكون قد سمدت لعدة سنوات سابقة – بغزارة – بالأسمدة الفوسفورية؛ إذ إن الفوسفور يثبت فى التربة بسهولة، ولكن بعد فترة من التسميد الغزير تقل مقدرة التربة على تثبيته. وعمومًا .. فإن كمية الفوسفور المستخدمة فى التسميد تزيد كثيرًا عن حاجة النبات الفعلية من هذا العنصر؛ لأن جانبًا كبيرًا من الفوسفور المضاف يثبت قبل أن يستعمله النبات.

الفوسفور العضوى

يوجد الفوسفور فى التربة فى صورتيه العضوية وغير العضوية. ومن الصور العضوية: الأحماض النووية، والفوسفوليبدات، والـ inositol phosphates. ويعتبر الفوسفور العضوى غير ميسر للنبات؛ لأنه غير قابل للامتصاص، ولكنه يتحلل فى النهاية إلى الصورة غير العضوية.

العوامل التى تزيد من تيسر الفوسفور للنبات

من العوامل التى تزيد من تيسر الفوسفور وتقلل تثبيته فى التربة ما يلى:

١- تركيز الأسمدة الفوسفاتية قريبًا من النبات فى شريط ضيق؛ فتزداد بذلك نسبة الفوسفور السمادى الذى يظل غير مثبت، ويبقى ميسرًا للنبات.

٢- استخدام الأسمدة الفوسفاتية المحببة granular، بدلاً من المسحوقية؛ نظرًا لصغر المساحة التى يتلامس فيها السماد مع حبيبات التربة فى الحالة الأولى؛ فتقل فرصة تثبيت الفوسفور.

٣- خلط الفوسفور غير العضوى مع الأسمدة العضوية؛ فتقل بذلك فرصة تثبيته؛ إذ إن الأحماض العضوية الموجودة بالأسمدة العضوية تعمل على تحويل الفوسفات من صورته الثلاثية إلى صورتيه الثنائية والأحادية؛ وبذلك يزيد التسميد العضوى من تيسر الفوسفور فى الأراضى القلوية.

٤- يتصاعد غاز CO_2 من جذور النباتات أثناء تنفسها، وكذلك نتيجة لتنفس الكائنات الدقيقة فى التربة، ويتكون منه حامض الكربونيك الذى يعمل على تحويل الفوسفات الثلاثى إلى فوسفات ثنائى كما يلى:

$$Ca_3(PO_4)_2 + HCO_3 \longrightarrow Ca_3(H_2PO_4)_2 + CaCO_3$$

٥- بالمحافظة على pH التربة بين ٦-٧ يمكن تقليل تثبيت الفوسفور إلى الحد الأدنى.

هذا .. وتجدر ملاحظة أن الفوسفور المثبت يظل مخزونًا فى التربة، وقد يصبح ميسرًا تحت ظروف أخرى.

وبعد أن ينتشر النمو الجذرى للنباتات بصورة جيدة فى التربة فإنها تصبح أكثر قدرة على الحصول على حاجتها من الفوسفور عما كانت عليه فى طور البادرة؛ لأن تشعب المجموع الجذرى يسمح بوصول الجذور إلى حيث يوجد الفوسفور؛ حيث إنه عنصر غير متحرك فى التربة.

وقد ازداد تركيز الفوسفور بالنموات الخضرية للكرنبيات – كثيرًا – فى كل السلالات المختبرة عندما كان مستوى الزنك فى التربة منخفضًا. وعلى العكس من ذلك فإن بعض التراكيب الوراثية – فقط – هى التى ازداد فيها تركيز الزنك بالنموات الخضرية عندما كان مستوى الفوسفور فى التربة منخفضًا (Broadley وآخرون ٢٠١٠).

مشاكل تثبيت الفوسفور فى التربة

يتأثر تثبيت الفوسفور فى التربة بالعوامل التالية:

١- pH المحلول الأرضى

يوجد أيون الفوسفات فى ثلاث صور حسب المحلول الأرضى. فتحت الظروف الشديدة الحموضة يسود أيون $H_2PO_4^-$، وفى مدى الـ pH المتوسط يسود أيون HPO_4^{--}، بينما يسود الأيون PO_4^{---} فى الأراضى القلوية. وعندما يكون الـ pH وسطًا بين حالتى تأين، فإنه قد توجد صورتا الأيون. فمثلاً.. فى pH ٦ قد يوجد الفوسفور فى المحلول الأرضى فى صورتى $H_2PO_4^-$، و HPO_4^{--}.

ويرجع هذا التأثير للـ pH إلى علاقته بتوفر أيونات الألومنيوم والحديد فى الأراضى الحامضية، وأيون الكالسيوم فى الأراضى القلوية؛ ومن ثم تكوين الفوسفور لأملاح غير ذائبة مع هذه الأيونات.

ففى الأراضى الشديدة الحموضة تتوفر كميات من الحديد والألومنيوم تكفى لترسيب الفوسفات فى صورة فوسفات الحديد والألومنيوم، وكلاهما غير قابل للذوبان، وغير ميسر للنبات. ويتم التفاعل كالتالى:

$$Al(OH)_3 + H_2PO_4^- \longrightarrow Al(OH)_2H_2PO_4$$

$$Fe(OH)_3 + H_2PO_4^- \longrightarrow Fe(OH)_2H_2PO_4$$

ويحدث نفس التفاعل أيضًا مع أيون المنجنيز الذى يتوفر بكثرة فى الأراضى الحامضية، ويتكون فوسفات المنجنيز غير القابل للذوبان.

وفى الأراضى القلوية يتوفر أيون الكالسيوم الذى يمكنه أن يتفاعل مع صور الفوسفات الثلاث ليكون فوسفات أحادى الكالسيوم $Ca\ (H_2PO_4)_2$، وفوسفات ثنائى الكالسيوم $CaHPO_4$، وفوسفات ثلاثى الكالسيوم $Ca_3\ (H_2PO_4)_2$، والأخيرة هى أكثر الصور تكونًا فى الأراضى القلوية، وتعتبر – تقريبًا – غير قابلة للذوبان فى الماء، وغير ميسرة للنبات. أما فوسفات أحادى الكالسيوم، فهى قابلة للذوبان فى الماء والفوسفور فيها صالح للامتصاص. وتعتبر فوسفات ثنائى الكالسيوم قابلة للذوبان، وتوفر الفوسفور للنبات بصورة تدريجية.

وعليه .. فإنه عند تسميد الأراضى القلوية الغنية بكربونات الكالسيوم (الكالسيت $CaCO_3$) بالسوبر فوسفات فإنه تتكون فوسفات ثلاثى الكالسيوم غير القابلة للذوبان؛ وبذلك لا تستفيد النباتات من الفوسفور المضاف. وتجدر ملاحظة أن الفوسفات تتفاعل مع أيون المغنيسيوم بنفس طريقة تفاعلها مع الكالسيوم، وتكون فوسفات أحادى وثنائى وثلاثى المغنيسيوم.

٢- التبادل الأنيونى Anion Exchange

قد يحدث تبادل بين أنيون الفوسفات الموجود فى المحلول الأرضى والأنيونات الأخرى على سطح حبيبات التربة. ويتم معظم التبادل فى الظروف التى تميل قليلاً نحو الحموضة بين أنيون $H_2PO_4^-$، وأنيون OH^- كالتالى:

$$\text{حبيبة طين} - OH + H_2PO_4^- \longrightarrow \text{حبيبة طين} - PO_4H_2 + OH^-$$

ويعتبر أيون الفوسفات المدمص بهذه الطريقة مثبتًا؛ لأنه يدمص بشدة، ولا يستطيع النبات امتصاصه.

وتؤدى إضافة كربونات الكالسيوم للتربة إلى انطلاق أنيون الهيدروكسيل OH^-؛ مما يؤدى إلى عكس التفاعل السابق؛ حيث تحل أيونات الهيدروكسيل المنطلقة محل

أيونات الفوسفات على سطح حبيبات التربة، وتصبح بذلك ميسرة للنبات. وتعمل كربونات الكالسيوم المضافة أيضًا على رفع الـ pH؛ مما يؤدى إلى انطلاق أيون الفوسفات من صورته المترسبة مع الألومنيوم والحديد، إلا أن زيادة إضافة كربونات الكالسيوم بالدرجة التى تؤدى إلى رفع الـ pH عن ٧ قد تؤدى إلى تثبيت الفوسفات ثانيةً فى صورة فوسفات الكالسيوم غير القابلة للذوبان.

٣- النشاط الحيوى بالتربة

قد يثبت جزء كبير من الفوسفور الموجود فى التربة بيولوجيا فى الكائنات الدقيقة التى تعيش فيها، لكن الفوسفور المثبت بهذه الطريقة سرعان ما يعود إلى التربة ثانية عند تحلل هذه الكائنات (Devlin ١٩٧٥).

البوتاسيوم

دور البوتاسيوم فى النبات

يمتص النبات البوتاسيوم بكميات أكبر مما يمتص أى عنصر آخر. ويعتبر هو الكاتيون السائد فى النبات. ومعظم النباتات تمتص كميات من البوتاسيوم أكثر من حاجتها الفعلية إلى النمو وإعطاء محصول جيد. ويسمى الامتصاص الزائد للبوتاسيوم باسم الاستهلاك الترفى. ولا يدخل البوتاسيوم فى التركيب الكيميائى للنبات كالعناصر الأخرى؛ فهو يتواجد كملح غير عضوى، إلا أنه يتواجد أيضًا كملح بوتاسيوم للأحماض العضوية.

ويبدو أن للبوتاسيوم علاقة بتمثيل الأحماض النووية فى النبات، كما أن له أهمية كبيرة فى عملية انقسام الخلايا، وتنظيم نفاذية الأغشية فى النبات. وقد وجد أن نقص البوتاسيوم يؤدى إلى تراكم مركبات النيتروجين الذائبة، بينما يقل محتوى النباتات من النيتروجين؛ ويعنى ذلك أن البوتاسيوم مرتبط بطريقٍ ما بتمثيل البروتين من الأحماض الأمينية. كما وجد أن نقص البوتاسيوم يؤدى أيضًا إلى بطء عملية البناء الضوئى، وزيادة التنفس. وينظم البوتاسيوم تمثيل الكربون فى النبات.