الفصل الخامس

الفوسفور Phosphorus

obeikandl.com

obeikandl.com

الفوسفور Phosphorus

يتشابه الفوسفور مع النتروجين فى مدى أهميته بالنسبة للنبات على الرغم من وجوده فى أنسجة النبات بكميات أقل من عنصرى النيتروجين والبوتاسيوم، حيث يمتص النبات هذا العنصر لسد احتياجاته لمختلف العمليات الحيوية مثل: عمليات التمثيل الضوئى وتكوين النوايا وانقسام الخلايا وتكوين البذور وتنظيم العمليات الخلوية ونقل الصفات الوراثية، كما أن للفوسفور دوراً أساسياً فى تكوين مركبات الطاقة.

الفوسفور فى الأرض Phosphorus in Soil

تختلف الأراضى فى محتواها من الفوسفور الكلى متأثرة بالعديد من العوامل أهمها: مادة الأصل – الاستغلال الزراعى – المناخ.. إلخ. وبصفة عامة يكون محتوي الأراضى من الفوسفور الكلى Total phosphours (P) فى مدى يتراوح بين ٠,٠٢ – ٠,١٥، وهذه الكمية تكون مرتبطة بوجود المادة العضوية حيث يُمثل الفوسفور العضوى من ٢٠ – ٨٠٪ من الفوسفور الكلى.

أوضحت الدراسات على الأراضى المصرية كما ذكرها بلبع سنة ١٩٨٨ بأن الأراضى الطينية الرسوبية تحتوى على نحو ١٢٠٠ جزء / مليون من الفوسفور الكلى، يليها الأراضى الطفلية الجيرية (٦٠٠ جزء / مليون)، بينما الأرض الرملية تحتوى علي (٤٠٠ جزء / مليون). كما يتضح من جدول (٥–١). وتعتبر الصورة المعدنية هى السائدة فى الأراضى المصرية لانخفاض محتوى هذه الأراضى من المادة العضوية.

جدول (٥–١): محتوي الأراضي المصرية من الفوسفور محسوبة بالجزء في المليون

نوع الأرض	الكلى	المعدنى	العضوى
الرسوبية	٦٥٠ – ١٧٨٠	٩٩٠ – ١٢٥٠	٤٠ – ٢٠٠
الرملية	٢٣٠ – ٨٠٠	٢٠٠ – ٤٠٠	٢٠ – ٨٠
الجيرية	٣٠٠ – ٥٨٠	٢٠٠ – ٦٥٠	١٠ – ٤٠

صور الفوسفور فى الأراضى Forms of soil Phosphorus

كما هو معروف أن الفوسفور المعدنى هو المصدر الرئيسى والأساسى للفوسفور فى الأراضى الزراعية. حيث إنه مع بداية تكوين الأراضى لايكون بها إلا الفوسفور المعدنى والناتج من تجوية مادة الأصل التى يكون الفوسفور أحد مكوناتها، ثم بعد ذلك ومع استغلال هذه الأراضى زراعياً يُمتص هذا الفوسفور بواسطة النباتات والكائنات الحية الدقيقة الموجودة بالتربة الزراعية، ويصل أيضاً إلى الحيوانات التى تتغذى على هذه النباتات، وبالتالى يتحول جزء من هذا الفوسفور المعدنى إلى فوسفور عضوى داخل أنسجة هذه الكائنات ضمن المركبات العضوية التى يدخل الفوسفور فى تركيبها. وبعد موت هذه الكائنات الحية وتحلل بقاياها يعود الفوسفور مرة أخرى إلى الأرض فى صورة عضوية وأخرى غير عضوية. وعلي هذا يمكن تقسيم صور الفوسفور فى الأراضى الزراعية بشكل عام إلى قسمين:

١- الفوسفور المعدنى Inorganic Phosphorus

الفوسفور المعدنى فى الأرض الزراعية مصدره الأصلى وبشكل كبير يكون ناتج تجوية وتحلل الصخور المحتوية على الفوسفور. وعلى ذلك فإنه يوجد على هيئة مركبات تحتوى على الكالسيوم، الألومنيوم، الحديد، الفلوريد أو عناصر أخرى. ولخصائص الأرض الطبيعية والكيميائية دور كبير في تحديد سيادة هذه المركبات فى الأرض الزراعية.

وتُعتبر جميع مركبات الفوسفور قليلة الذوبان فى الماء مما يؤثر سلبياً على الكمية الميسرة من هذا العنصر للنبات، حيث تكون هذه الكمية قليلة جداً في المحلول الأرضى أو قد تكون معدومة، وتُمثل مجموعة الأباتايت Apatite group المصدر الرئيسى له مثل الهيدروكسى أباتايت، فلور أباتاتت (والتى تُعتبر أكثر الأنواع شيوعاً)، الكلور أباتيت والكربونات أباتايت (جدول ٥-٢).

جدول (٥-٢): المركبات الفوسفاتية الشائعة الانتشار فى الأراضي

المركب	الرمز
Hydroxy apatite هيدروكسى أباتيت	$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$
Flour apatite فلورو أباتيت	$Ca_{10}(PO_4)_6(F)_2$
Dicalcium phosphate فوسفات ثنائى الكالسيوم	$CaHPO_4$
Tricalcium Phosphate فوسفات ثلاثى الكالسيوم	$Ca_3(PO_4)_2$
Variscite الفيرسيت	$AlH_2PO_4(OH)_2$
Strengite السترنجيت	$FeH_2PO_4(OH)_2$

عن Mengel and Kirkby سنة ١٩٨٧.

وفى الأراضى الحامضية تنتشر معادن الفوسفات المرتبطة بالحديد والألومنيوم وهى أيضاً قليلة الذوبان. وبصفة عامة لايمكن النظر إلي هذه المركبات بأنها ثابتة بل إنها تتأثر بخواص التربة والزمن والظروف الأخرى المحيطة ومما يؤكد ذلك تعدد صور المركبات الفوسفاتية وخصائصها المنتشرة فى الأراضى.

٢- الفوسفور العضوى Organic Phosphorus

يوجد الفوسفور العضوى بالأرض الزراعية إما فى صورة مركبات فوسفورية عضوية أو مركبات فوسفورية غير عضوية مرتبطاً بمركبات عضوية، وتُمثل هذه الصورة كما سبق ذكرها من ٢٠ إلى ٨٠٪ من الفوسفور الكلى بالطبقة السطحية للتربة الزراعية، ومن هذا المدى نجد أن هناك اختلافاً شاسعاً بين الأراضى المختلفة فى محتواها من الفوسفور العضوى.

ومصدر الفوسفور العضوى بالأرض هو المادة العضوية الناتجة من جذور وبقايا النباتات والأسمدة العضوية المضافة. ويضم الفوسفور العضوى بالأرض العديد من المركبات ولكن عدد كبير منها غير معروف حتى الآن. وتتحلل بعض المركبات الفوسفورية العضوية الموجودة بأجزاء النباتات سريعاً بوصولها إلى الأرض مثل: مركبات

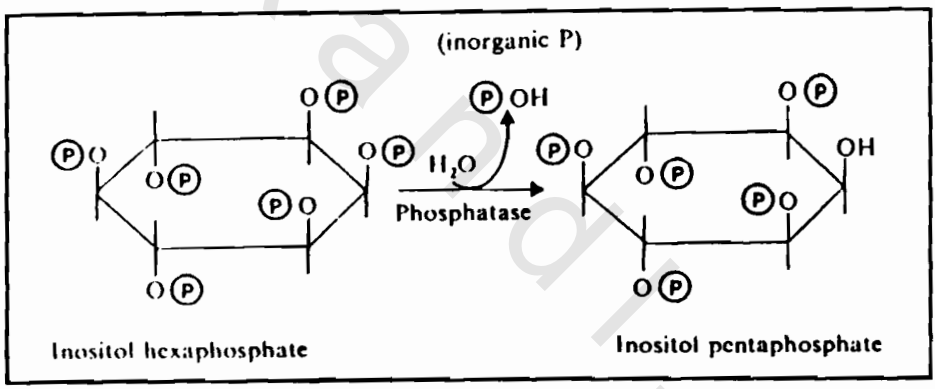
السكر الفسفرة Phosphorylate sugar ولكن الفوسفور العضوى الذى يُستخلص من الأرض يُعتبر شديد المقاومة لفعل الكائنات الأرضية الدقيقة، وأهم هذه المركبات هو الفيتين Phytin وهوأحد أملاح الكالسيوم أو الماغنسيوم لحامض الفايتيك Phytic acid، وينتج حمص الفايتيك من اتحاد حمض الفوسفوريك مع الإينو سيتول Inositol. وبالتالى تكون المركبات الشائعة هى فوسفات الإينو سيتول Inositol phosphate ويُمثل من ٣٠ – ٥٠٪ من الفوسفور العضوى الكلى كما ذكرها Anderson سنة ١٩٦٩، الفوسفوليبيدات Phospholipids وتتراوح نسبته من ٠,٥ – ٧٪ من الفوسفور العضوى الكلى، والحمض النووى Nucleic acids phytin والذى يُعتقد بأنه هو ومشتقاته يُمثل من صفر إلى ١٠٪ من الفوسفور العضوى الكلى بالأرض كما ذكرها بلبع سنة ١٩٨٨.

ونسبة الفوسفور العضوى بالمحلول الأراضى عادة ما تكون صغيرة فأكثره فى الصورة الصلبة وغالباً ما تكون غير صالحة للامتصاص بواسطة النبات، وبالتالى تتوقف صلاحية المركبات العضوية لتغذية النبات على عوامل كثيرة يُعتبر رقم pH الأرض أهمها. وعلى ذلك لكي يستفيد النبات من الفوسفور العضوى يجب أولاً أن يتحول إلى فوسفور معدنى بواسطة عملية يُطلق عليها اسم المعدنة Mineralization والتى بها يتحول الفوسفور العضوي إلى فوسفور معدنى نتيجة تعرض مركبات الفوسفور العضوى بالأرض إلى نشاط أنواع مختلفة من الكائنات الدقيقة. وتعتبر عملية المعدنة أو التمثيل للفوسفور مشابهة لما يحدث للنيتروجين، وكقاعدة عامة فإن معدنة الفوسفور تكون أكثر سرعة تحت الظروف المناسبة لعملية النشدرة Ammonification، حيث أشارت الدراسات بوجود ارتباط معنوى قوى بين معدنة النتروجين والفوسفور. وهناك عدة عوامل تؤثر على معدنة الفوسفور العضوى منها:

١– نسبة الكربون إلى الفوسفور فى المادة العضوية الموجودة بالتربة الزراعية (C/P ratio) حيث إن إضافة المادة العضوية إلى التربة لا يعنى إنها تؤدى إلى سيادة عملية المعدنة للفوسفور العضوى بل قد يكون لعملية التمثيل Immobilization تاثير مباشر على عملية المعدنة. وعلى ذلك تكون نسبة C/P هى المحددة للاتجاه السائد بعد إضافة المادة العضوية، فإذا كانت النسبة ٢٠٠ : ١ أو أقل تكون السيادة لعملية

المعدنة، فى حين أن النسبة ٣٠٠ : ١ أو أكثر تعنى فقد الفوسفور الميسر نتيجة لعميلة التمثيل.

٢- نشاط الكائنات الأرضية المتخصصة (مثل Penicillium, Mucor aspergillus Pseudomonas, Bacillus) وكمية إنزيم الفوسفاتيز Phosphatase enzyme المنطلق من هذه الكائنات وجذور النباتات النامية. ولذلك فإن جميع العوامل المؤثرة على نشاط الأحياء الأرضية وخاصة المتخصصة منها مثل درجة الحرارة- الرطوبة- التهوية- رقم pH التربة - وكثافة الغطاء النباتى يكون لها تاثير كبير على عملية المعدنة. وتوضح المعادلة التالية كيفية انطلاق الفوسفور المعدنى خلال عملية المعدنة ودور إنزيم الفوسفاتيز فى ذلك كما أوضحه Mengel & Kirkby سنة ١٩٨٧.



بعد استعراض الصور المختلفة للفوسفور فى التربة، وبالنظر لتلك الصور من زاوية أخرى عند إدخال عامل الزمن وكذلك معدل تيسر الصور المختلفة للنبات يمكن تقسيم جميع الصور إلى ثلاث مجاميع ذات خصائص كيميائية وفيزيوكيماوية محددة وهى:

١- الفوسفات الذائبة فى المحلول الأرضى Soluble phosphate in soil solution

٢- الفوسفات غير المستقرة (القابل للإحلال أو التغير) Phosphate in the labile pool

٣- الفوسفات المستقر Phosphate of the non- labile fraction.

أولاً: الفوسفات الذائبة فى المحلول الأرضى:

Soluble Phosphate in Soil Solution

تمتص النباتات الفوسفور بشكل رئيسى فى صورة أيونات الفوسفات المعدنية الأحادية والثنائية HPO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$ وهذه الأيونات تكون موجودة فى المحلول الأرضي وفى أى وقت بتركيزات قليلة جداً، وذلك على الرغم من كبر محتوي الأرض من الفوسفور الكلى. وبصفة عامة لايزيد التركيز عن بضعة أجزاء فى المليون، وفي الغالب يكون أقل من واحد جزء فى المليون، ويعزى هذا التركيز المنخفض إلى سرعة تثبيت الفوسفور بالطرق المختلفة فى التربة. ويعتبر الفوسفور الذائب فى محلول التربة علي الرغم من قلة تركيزه مهماً جداً من ناحية تغذية النبات. فهو أول من يتحرك لسد احتياجات النباتات النامية، وعلى ذلك يجب أن يجدد باستمرار وإلا فإن المحصول لن يحصل على الكفاية اللازمة من الفوسفور التى تمكنه من النمو في مرحلة النضج. وعلى ذلك تعتبر السرعة التى يتجدد بها تركيز الفوسفور فى المحلول الأرضى ذا أهمية قصوى. ومن جهة أخرى، فإن النبات يمتص كميات كبيرة من الماء لإنتاج المادة الجافة والتى تقدر بحوالى ٥٠٠ كيلو جرام ماء (محلول أرضى) لكل واحد كيلو جرام مادة جافة، الأمر الذى يجعل كمية الفوسفور الممتصة مع هذه الكمية من الماء قليلة وغير كافية، ولذلك يجب تجديد تركيز الفوسفور الذائب فى المحلول الأرضى. ويمكن توضيح أهمية تجديد محلول التربة من الفوسفور من خلال الأمثلة التالية:

١- إذا كانت كثافة الأرض الظاهرية هى ١,٥ جم/ سم ٣ (١,٥ طن/م٣)، ومحتواها من الرطوبة ٢٥٪ على أساس الوزن الجاف، وتركيز الفوسفور فى المحلول الأرضى ٠,٥ جزء فى المليون، ويلزم المحصول النامى ٢٠ كجم فوسفور خلال موسم النمو. المطلوب حساب عدد المرات التى يلزم أن يتجدد فيها تركيز الفوسفور فى المحلول الأرضي خلال موسم نمو هذا المحصول:

الحل:

وزن الفدان لعمق ١٥ سم = ٤٢٠٠ X ١,٥ X ٠,١٥ = ٩٤٥ طن

= ٩٤٥٠٠٠ كجم

وزن المحلول الأرضي للفدان = ٩٤٥٠٠٠ X ٢٥ ÷ ١٠٠

= ٢٣٦٢٥٠ كجم

كمية الفوسفور الذائبة فى المحلول الأرضى = ٢٣٦٢٥٠ X ٠,٥ = ١١٨١٢٥ مجم

= ٠,١٢ كجم

فإذا كان الامتصاص والتجديد للفوسفور فى المحلول الأرضي متعاقبين ويتم بصورة تامة في الأرض فإن:

عدد المرات التى يلزم أن يتجددها المحلول الأرضى = ٢٠ ÷ ٠,١٢ = ١٦٧ مرة تقريبا

٢- إذا كان معدل النتح Transpitation ratio لنبات ما = ٥٠٠، وتركيز الفوسفور في أنسجة هذا النبات = ٠,٣٪، وتركيز الفوسفور فى المحلول الأرضي = ٠,٣ جزء في المليون.

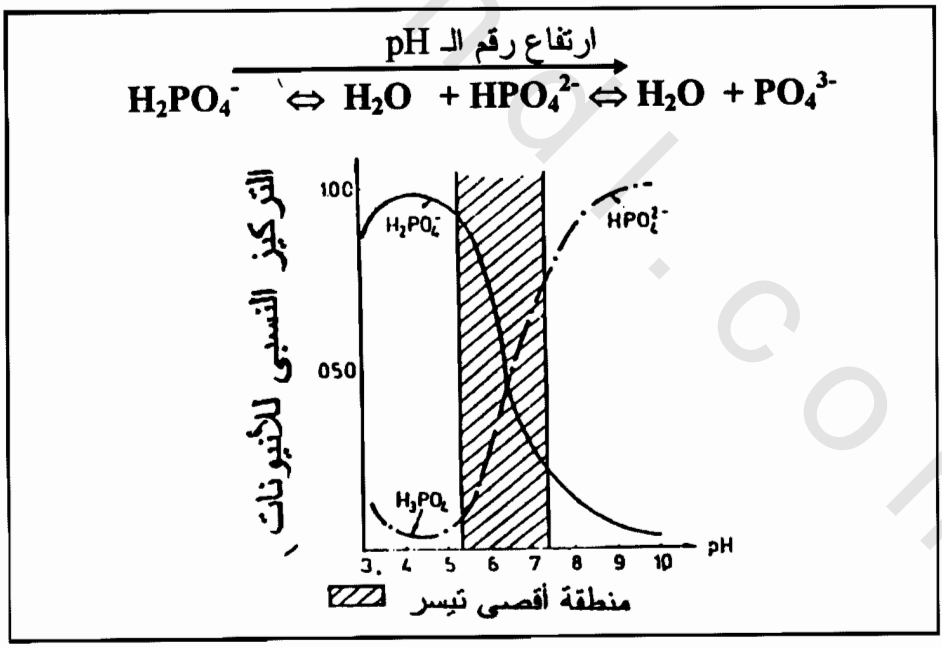
أى أن كل واحد كيلو جرام مادة جافة بها ٠,٣ ٪ X ١٠,٠٠٠ = ٣٠٠٠ ملليجرام فوسفور.

والـ ٥٠٠ كيلو محلول أرضى بها (٥٠٠ X ٠,٠٣ = ١٥,٠٠ ملليجرام فوسفور)، وعلى ذلك يكون من المفروض أن يمتص النبات ١٠٠,٠٠٠ كيلو جرام ماء (٣٠٠X٥٠٠) ÷ ١٥ = ١٠٠,٠٠٠) وهذا لايمكن تحقيقه عملياً لان هذه الكمية أكبر من معدل النتح بـ ٢٠٠ مرة، وبالتالى لابد من تجديد تركيز الفوسفور في المحلول الارضى (والحفاظ عليه ٠,٠٣ جزء فى المليون) ٢٠٠ مرة خلال امتصاص النبات لـ ٥٠٠ كيلو جرام ماء. وهذا يبين أهمية انتشار الفوسفور خلال المحلول الأرضى من على أسطح الغرويات الأرضية ومن المناطق ذات التركيز المرتفع إلى المناطق ذات التركيز المنخفض، وبالتالى يتضح أهمية الماء فى امتصاص النبات لاحتياجاته من الفوسفور. ويطلق على قدرة الأرض على تجديد تركيز الفوسفور الذائب فى المحلول الأرضى عند انخفاضه اسم السعة التنظيمية للفوسفور Phosporus buffering capacity. وتتوقف هذه السعة على كمية الفوسفور القابل للحركة، وعلى السرعة التى يخرج بها هذا الفوسفور من على أسطح الجسم الصلب إلى المحلول الأرضى. وكلما كان معدل خروج الفوسفور إلى المحلول الأرضى سريعاً فإن ذلك يدل على قدرة الأرض على تجديد المحلول. أى أن للأرض

سعة تنظيمية عالية. وتُعتبر السعة التنظيمية من العوامل الهامة فى تحديد كمية السماد الفوسفاتى الواجب إضافتها ، حيث تقل الكمية الواجب إضافتها مع زيادة السعة التنظيمية للأرض، وعادة تكون السعة التنظيمية للأرض ناعمة القوام أعلى منها فى الأراضى خشنة القوام.

وكما هو معروف بأن السطح الفعال للامتصال على جذور النبات هو قمته المرستيمية، وكلما تحركت الجذور في التربة فإنها تلامس مناطق جديدة لم يسبق أن حدث امتصاص فيها (الاعتراض الجذري)؛ لذا فإن إعادة تجهيز المحلول الأرضى بالفوسفور من المحتمل أن يكون سريعاً فى مناطق صغيرة حول نهاية الجذور وبشكل بطئ فى مناطق كبيرة حول الأجزاء القديمة من الجذر حيث يكون الامتصاص بطيئاً.

إن تركيز الأنواع المختلفة من أيونات الفوسفات فى المحلول الأرضي مرتبط بشكل وثيق برقم pH الأرض، فأيون الفوسفات الأحادية $H_2PO_4^-$ يسود في الوسط الحامضى، بينما أيون الفوسفات الثنائى HPO_4^{2-} يسود فى الوسط ذات pH أكثر من ٧. وهذه العلاقة موضحة فى شكل (٥-١).



شكل (٥-١): تأثير رقم الـ pH علي نوع أيون الفوسفات في المحلول الأرضي

ومع افتراض عدم وجود أيونات مثل الحديد والألومنيوم والكالسيوم أو الماغنسيوم، وذلك لأن فى وجود هذه الأيونات تتكون فوسفات الحديد والألومنيوم غير الذائبة والمترسبة وهذا يحدث فى الوسط الحامضى، وأيضا حدث ترسيب لفوسفات الكالسيوم والماغنسيوم فى الوسط القاعدى (pH أكبر من ٧) وتوجد سلسلة من المركبات الفوسفاتية والمختلفة فى درجة ذوبانها تتكون تحت ظروف الأراضى المختلفة سوف نتعرض لها بشيء من التفصيل فى جزء لاحق.

وبصفة عامة وكقاعدة فإن أكبر درجة تيسر فى الأرض لأكثر المحاصيل الزراعية تكون فى مدى pH يتراوح بين (٥,٥ – ٧). وبجانب رقم pH الأرض هناك عوامل أخرى تؤثر على تيسر لفوسفور، وبالتالى تركيز الفوسفور الذائب فى المحلول الأرضى منها:

أ – السعة الادمصاصية للفوسفات بالأرض

The P Adsorption Capacity of soils

فى الأراضى الحامضية تتأثر هذه الخاصية بكمية أكاسيد كل من الحديد والألومنيوم المتأدرتة، بينما فى الأراضى القاعدية والجيرية تتوقف على كمية الكالسيوم المتبادلة وكمية وحجم حبيبات كربونات الكالسيوم. ويعتبر قوام التربة (محتوى التربة من الطين) هو المؤثر الرئيسى على قدرة الأرض على ادمصاص الفوسفور، ويوضح جدول (٥–٣) تأثير قوام التربة على تركيز الفوسفور فى المحلول الأرضى والناتج من التسميد الفوسفاتى لكل من الأراضى القاعدية والحامضية. يمكن ترتيب قيمة السعة الادمصاصية للأراضى مختلفة القوام كما يلى:

الأراضى الرملية < الطمية الرملية < الطمية الطينية السلتية.

جدول (٥-٣): تأثير قوام الأراضي الحامضية الجيرية علي الاحتياجات السمادية الفوسفاتية وفوسفور المحلول الأرضي

صفات الأرض	قوام الأرض	الفسفور المضاف (ppm)	فوسفور المحلول الأرضى (ppm)	
			قبل التسميد	بعد التسميد
أراضى جيرية	طينية	٣٥	٠,٠١٧	٠,٠٥٣
	طمية طينية سلتية	٣٥	٠,٠٣٤	٠,١٦١
	طميية رملية	٢٠	٠,٠٤٥	٠,٣٠٥
أراضى حامضية	طميية طينية سلتية	٢٠٠	٠,٠١	٠,٠٧
	طميية رملية	٧٥	٠,٠١	٠,٢٠

عن Khasawneh سنة ١٩٨٠.

ومن الجدول نجد أن إضافة كمية معينة من السماد الفوسفاتى لكل من الأراضى الحامضية أو القاعدية ينتج عنها زيادة كبيرة فى تركيز الفوسفور فى المحلول الأرضى للأراضى خشنة القوام بالمقارنة بالأراضى ناعمة القوام. وأيضاً نلاحظ أن الاحتياجات السمادية فى الأراضى الحامضية أعلى منها فى الأراضى القاعدية المتشابهة معها فى القوام، حيث أثبتت الدراسات أن الأراضى الحامضية تزيد فى قدرتها الادمصاصية للفوسفات عن الأراضى الجيرية بمقدار ٢,١٧ مرة لكل وحدة سطح ادمصاص.

ب - الحد الحرج للفوسفور فى المحلول الأرضى واللازم لنمو النبات

Critical Levels of Soil Solution P for Plant Growth

يختلف المستوى الحرج للفوسفور الصالح للنبات باختلاف طريقة استخلاص الفوسفور، اختلاف نوع التربة واختلاف المحصول، ويبين جدول (٥-٤) مستوى الفوسفور اللازم تواجده وبصورة صالحة فى محلول بعض الأراضى مختلفة القوام للحصول على أقصى نمو للنبات النامى فى تلك الأراضى. من الجدول يتضح أنه فى الأراضى خشنة القوام يلزم أن يكون تركيز الفوسفور أكثر من ثلاث أضعاف التركيز فى

الأراضى ناعمة القوام لنفس المحصول، وهذا يعنى زيادة الاحتياجات السمادية الفوسفاتية لمحصول معين فى الأراضى الخشنة القوام عنها فى الأراضى نامة القوام، ويرجع ذلك ربما لسببين: أولهما أن معدل الانتشار للفوسفور فى الأراضى الرملية قليل جداً بالمقارنة بالأراضى الطينية نظراً لأن الغشاء المائى الموجود حول الحبيبات فى الأراضى الرملية يكون متقطعاً والعكس فى الأراضى الطينية حيث يكون هذا الغشاء متصلاً، ولقد وجد أن المحتوى الرطوبى تحت ضغط جوى قدره ١٥ بار (نقطة الذبول) يكون موجوداً حول الحبيبات فى الأراضى الطينية وبصورة متصلة. بينما السبب الثانى يرجع إلى أن السعة التنظيمية للفوسفور The buffering capacity P فى الأراضى الرملية أقل منها فى الأراضى الطينية، وعلى هذا يكون تعويض النقص فى تركيز الفوسفور بالمحلول الأرضى والناتج من امتصاص النبات له بطيئاً جداً، مما يلزم المحافظة على تركيز مرتفع من الفوسفور الميسر فى الأراضى الرملية دائماً حتى نضمن وجود الكمية الكافية أثناء النمو.

جدول (٥-٤): المستويات الحرجة من الفوسفور الميسر اللازم لنمو بعض المحاصيل

المنطقة	المحصول	محلول الاستخلاص	المستوى الحرج (ppm)
غرب الولايات المتحدة	شعير	الماء	
أرض طينية			٠,١
طمية طينية سلتية			٠,١٦
طمية رملية			٠,٣٥
كاليفورنيا	حبوب صغيرة	الماء	٠,٤٠
جنوب شرق أمريكا	الدخان	0.01 M $CaCl_2$	
طمية طينية سلتية			٠,٠٧
طمية			٠,٢٠
طمية رملية			٠,٦٨
هاواى	الذرة	0.01 M $CaCl_2$	٠,٠٦
	البطاطا		٠,١٠
	الخس		٠,٤٠

عن Khasaweneh وآخرون سنة ١٩٨٠.

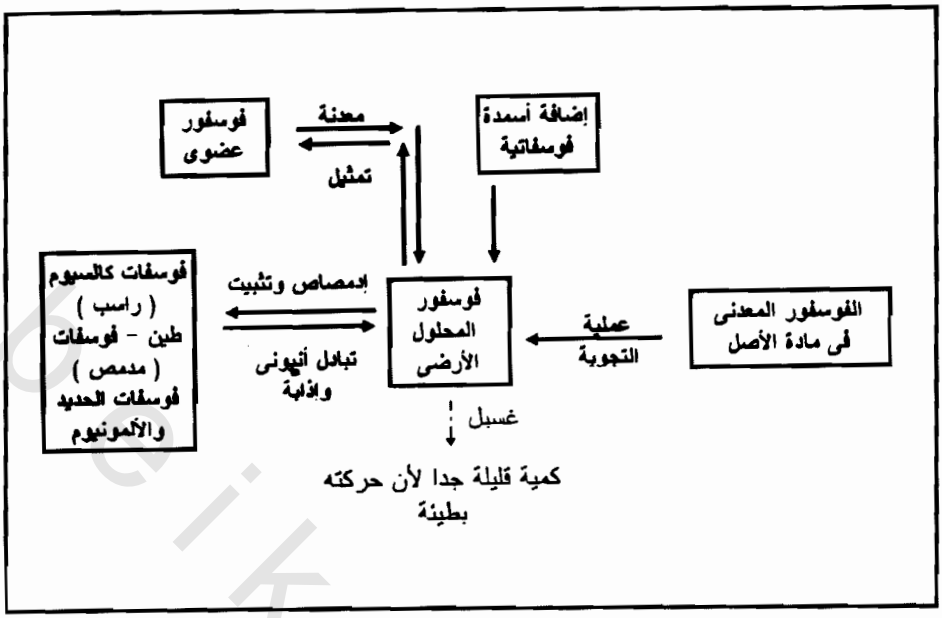
عادة ما يتم استخلاص الفوسفور من الأراضى القاعدية ومنها الأراضى المصرية باستخدام طريقة أولسن Olsen، وتم تحديد المستويات الحرجة للفوسفور الصالح بهذه الطريقة تبعًا لاحتياجات المحاصيل المختلفة (جدول ٥–٥) كما ذكرها أبو الروس وآخرون سنة ١٩٩٢ .

جدول (٥–٥): المستويات الحرجة للفوسفور الصالح بطريقة ولسن لبعض المحاصيل بالجزء في المليون

مجموعات المحاصيل	مستوى الفوسفور الصالح منخفض	مستوى الفوسفور الصالح متوسط	مستوى الفوسفور الصالح مرتفع
المحاصيل ذات الاحتياجات المنخفضة وتشمل: المراعى – الحبوب الصغيرة – فول الصويا – الذرة	أقل من ٤	من ٥ – ٧	أكثر من ٨
المحاصيل ذات الاحتياجات المتوسطة وتشمل: القطن– البرسيم الحجازى – الطماطم	أقل من ٧	من ٨ – ١٣	أكثر من ١٤
المحاصيل ذات الاحتياجات المرتفعة وتشمل: بنجر السكر – البطاطس – البصل	أقل من ١١	من ١١ – ٢٠	أكثر من ٢١

دورة الفوسفور فى الأرض Phosphorus cycle in Soil

إن المحافظة على تركيز ملائم من الفوسفور الذائب فى المحلول الأرضى يعتمد على عوامل عديدة منها سرعة تجوية المعادن الحاملة له، سرعة تكوين وتحلل المادة العضوية، إضافة الأسمدة الفوسفاتية وعلى قابلية الجزء المعدنى من التربة على التفاعل أو تثبيت الفوسفور المعدنى لذائب فى صورة غير ذائيبة أو قليلة الذوبان، ويمكن تمثيل ذلك فيما يعرف بدورة الفوسفور (شكل ٥ – ٢).



شكل (٥-٢): العمليات الأساسية في دورة الفوسفور في الأرض

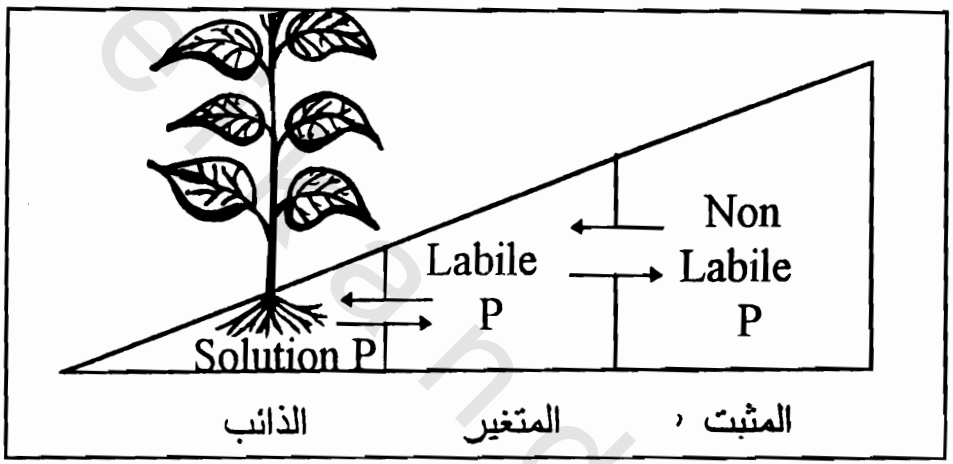
ثانيًا: الفوسفور القابل للإحلال أو التغير Phosphate in the Labile Pool

يعرف Larsen هذه الصورة من الفوسفور بأنها الجزء من الفوسفور الأرضى الذى يمكن أن يتحول إلى المحلول الأرضى نتيجة التبادل مع الفوسفور المشع p^{32} فى فترة زمنية محددة، علمًا بأن التبادل النظيرى (النظير المشع للعنصر) يمكن أن يشمل جميع الفوسفور الأرضى فى الصورة الصلبة إذا امتد الزمن إلى فترة طويلة، ولذا يجب تحديد الفترة الزمنية.

وتشمل هذه الصورة كل من الفوسفور المدمص على اسطح الغرويات الأرضية أو المترسب حديثًا فى صورة مركبات فوسفات الكالسيوم أو الحديد أو الألومنيوم والتى لها قدرة أكبر على الإذابة بالمقارنة بالمركبات قليلة الذوبان مثل: مجموعة الأباتايت. وتختلف هذه الكمية من أرض إلى أخرى حسب توفر العوامل المؤثرة فى قدرة الأرض الادمصاصية منها على سبيل المثال (محتوى الأرض من الغرويات الأرضية والتى تحمل مواقع تبادل ذات شحنة كهربائية موجبة كما فى أكاسيد الحديد والألومنيوم المتادرتة

وأنواع معينة من معادن الطين وغيرها). والجدير بالذكر بأن هذه الصورة مرتبطة مع الصور الأخرى للفوسفور بحالة من الاتزان الكيميائى والشكل (٥–٣) يوضح ذلك.

ومن الشكل نجد أنه قد يحدث أن تتحول صورة الفوسفور الأيونية والذائبة فى المحلول الأرضى إلى الصورة غير المستقرة وذلك نتيجة ترسيب الفوسفور بتفاعله مع الكالسيوم أو الحديد والألومنيوم الذائبة فى المحلول الأرضى وتكون مركبات مترسبة حديثًا. أو قد يحدث ادمصاص لهذه الأيونات على سطح الغرويات الأرضية. فى نفس



شكل (٥–٣): صور الفوسفور في التربة وحالة الاتزان بينهم

الوقت قد ينطلق الفوسفور الموجود فى هذه الصورة خلال عملية التحرر (عكس الادمصاص Desorption) نتيجة التبادل الأنيونى، أو حدوث إذابة لبعض المركبات المترسبة حديثًا. ويلعب الفوسفور الموجود فى هذه الصورة دورًا كبيرًا فى تغذية النبات، حيث يعتبر المستودع الذى يمد المحلول الأرضى باستمرار وبشكل تدريجى بعد نفاذ محتواه نتيجة عملية الامتصاص بواسطة النبات. أيضًا يجب ذكر أن قدرة الفوسفور على البقاء فى هذه الصورة يحددها الفترة الزمنية وصفات الأرض الفيزوكيميائية والظروف البيئية المحيطة. وعمومًا تتحول الصور المختلفة مع الزمن وبصورة تدريجية إلى صور أخرى أقل ذوبانًا تقع ضمن الصورة الثابتة أو المستقرة.

ثالثًا : الفوسفور غير القابل للحركة Non-Labile-phosphours

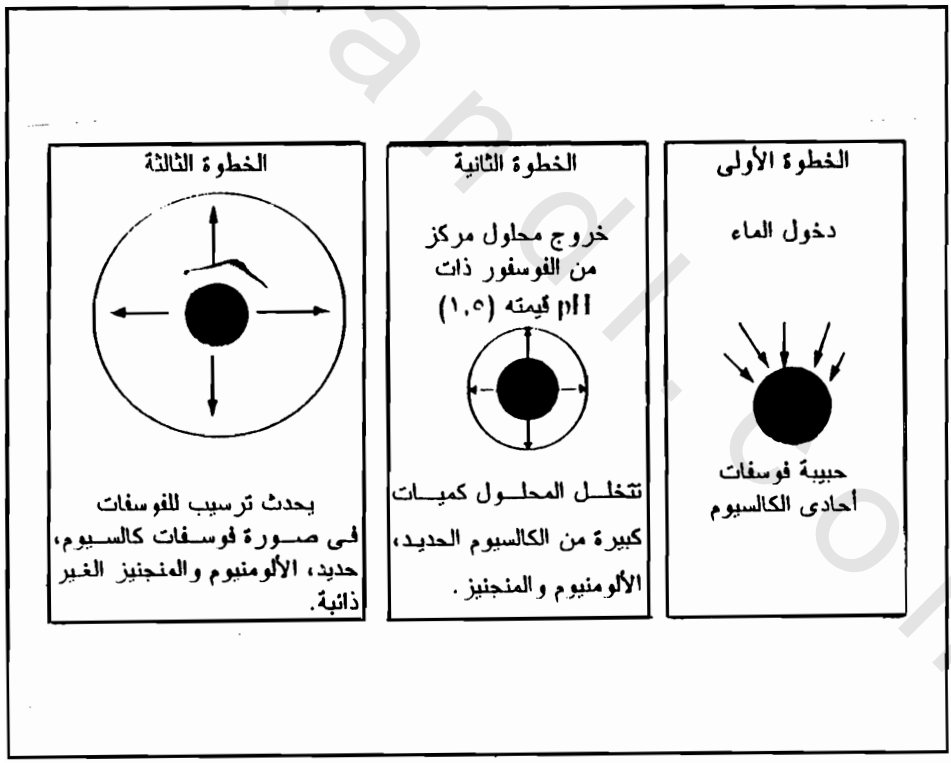
تشمل هذه الصورة المركبات الفوسفاتية قليلة الذوبان والتى ينطلق منها الفوسفور إلى الصور الأخرى ببطء شديد، وتشمل مجموعة معادن الأباتايت، الفاريسيت Varis-cite والسترنجيت Strengite وأيضًا صور الفوسفور العضوى المختلفة والبطيئة التحلل. وعمومًا لا يمكن إهمال دور جميع هذه الصور مجتمعة فى تغذية النبات لوجودها فى حالة اتزان مستمر معًا على الرغم من أن الكمية المنطلقة من الصورة غير القابلة للحركة قليلة جداً وذلك لاحتياجها إلى ظروف خاصة لإذابتها مثل توفر االكائنات الدقيقة المتخصصة فى إذابة الفوسفات من مركباته المعدنية أو المتخصصة فى معدنة الفوسفور العضوى.

تفاعلات الفوسفور فى الأراضى المختلفة :

عند إمرار محلول يحتوى على أحد الأسمدة الفوسفاتية الذائبة مثل فوسفات أحادى الكالسيوم $Ca(H_2Po_4)_2$ خلال عمود من التربة فإن المحلول أثناء مروره يفقد الفوسفور الموجود به جزئيًا أو كليًا. بالإضافة إلى ذلك وجد أن الاستخلاص المتكرر للتربة لهذا الجزء المفقود بالماء أو بالمحاليل الحمضية أو القلوية الضعيفة (المخففة) يؤدى إلى نزع جزء قليل فقط من الفوسفور (المفقود). وهذا النقص فى ذوبان الفوسفات المضاف يعرف بحجز الفوسفات Phosphate retention أو Phosphate adsorption (ويشير هذا الجزء من الفوسفور المحجوز أو المدمص إلى الفوسفور الذى يجذب إلى أسطح معادن الطين والذى يمكن أن يستخلص بواسطة الأحماض أو القلويات الضعيفة ويعتبر هذا الجزء ميسراً بدرجة كبيرة بالنسبة للنبات). بينما الفوسفور المثبت Phosphorus Fixation (يشير إلى الجزء من الفوسفور قليل الذوبان والذى لا يمكن استخلاصه بواسطة الأحماض أو القلويات المخففة.، ولا يعتبر سريع فى درجة تيسره للنبات) ويرجع حجز أو تثبيت الفوسفات إلى تحول فوسفات الكالسيوم الأحادية الذائبة إلى فوسفات غير ذائبة نتيجة تفاعلها مع الكالسيوم فى الأراضى القاعدية أو مع الحديد والألومنيوم فى الأراضى الحامضية.

ويمكن توضيح الميكانيكية التى بها يصبح الفوسفور غير ذائب كما يلى: عند إضافة حبيبات سماد السوبر فوسفات إلى التربة فإن بخار الماء الموجود بالوسط المحيط

للحبيبة يتحرك ويدخل بسرعة إلى داخل الحبيبة مما يؤدى إلى ذوبان المادة الرئيسية للسماد وهى فوسفات الكالسيوم الأحادية، ويتكون محلول داخل الحبيبة يكون مشبعًا بكميات مرتفعة من فوسفات الكالسيوم الأحادية والثنائية بالإضافة إلى حمض الأورثوفوسفوريك، ويكون رقم pH هذا المحلول فى مدى ١-١,٥ أى شديد الحموضة. وعند انطلاق هذا المحلول إلى الوسط المحيط بالحبيبة يؤدى إلى إذابة مكونات حبيبات التربة الملاصقة له. وفى الأراضى القاعدية غالبًا ما يسود الكالسيوم والماغنسيوم بها وخاصة فى الأراضى الجيرية، وعلى ذلك يتفاعل هذا المحلول مع الكالسيوم ويتكون مركبات صعبة الذوبان، فى حين يكون التفاعل مع الحديد والألومنيوم فى الأراضى الحامضية. إن ميكانيكية التفاعلات التى يصبح بها الفوسفور غير ميسر للنبات تحت ظروف الأراضى المختلفة يوضحها شكل (٥-٤) عن White سنة ١٩٨٧ .



شكل (٥ - ٤) يوضح الخطوات المتتالية لذوبان حبيبة فوسفات أحادي الكالسيوم

أولاً: التفاعلات فى الأراضى القاعدية

١- تفاعلات الترسيب:

كما سبق ذكره فإن بارتفاع رقم pH الأرض تزداد أيونات الفوسفات الثنائية والثلاثية، وكما هو معروف بأن درجة الذوبان تقل حسب الترتيب التالى:

$$PO^{3-}_4 < HPO^{2-}_4 < H_2PO^-_4$$

وفى معظم الأراضى القاعدية يكون للكالسيوم فاعلية كبيرة، وبالتالى تتعرض الفوسفات المضافة إلى سلسلة من التفاعلات مع أيون الكالسيوم الذائب فى المحلول الأراضى أو المتبادل على أسطح معادن الطين مكونًا مجموعة من المركبات الفوسفاتية المتفاوتة فى درجة ذوبانها. وبزيادة تركيز الكالسيوم وثبات تركيز الفوسفات يتم التثبيت بسرعة وذلك بالوصول إلى نهاية سلسلة التفاعل كما يلى:

$$Ca(H_2PO_4)_2 + Ca_2+ \Rightarrow 2CaHPO_4 + 2H+$$

Mono-Ca-phosphate Di-Ca-phosphate

$$3CaHPO_4 + Ca^{2+} \Rightarrow Ca_4H(PO_4)_3 + H^+$$ Octa-Ca-phosphate

$$Ca_4H(PO_4)_3 + Ca^{2+} + H_2O \Rightarrow Ca_5(PO_4)_3OH + 2H^+$$ Hydroxy apatite

ومعنى ذلك جزء كبير من الفوسفور المضاف سوف يصبح فى صورة غير ميسرة بالنسبة للنبات وذلك لتحوله إلى إحدى صور الفوسفور غير القابل للحركة Non-Labile-Phosphorus، وهذا التفاعل يحدث أيضًا فى الأراضى الجيرية.

٢- الترسيب السطحى على حبيبات كربونات الكالسيوم:

فى الأراضى القاعدية المحتوية على كربونات الكالسيوم توجد ميكانيكية أخرى مسئولة عن تقليل صلاحية الفوسفور، فعند تلامس أسطح حبيبات كربونات الكالسيوم مع أيونات الفوسفات الذائبة وخاصة عند التركيزات المنخفضة يحدث ادمصاص Adsorption لهذه الأيونات على هذه الأسطح فى طبقة سمكها جزىء واحد من الفوسفات من خلال إحلال أيون الفوسفات $H_2PO^-_4$ محل أيون الكربونات CO_3^{2-}. ومع زيادة تركيز الفوسفات المضافة إلى الأرض، وبمرور الزمن تتفاعل كربونات الكالسيوم أو

الماغنسيوم، وبغض النظر عن طبيعة التفاعلات التى تحدث فإن الناتج النهائى يتكون فوسفات الكالسيوم فى صورة راسب صعب الذوبان، وثانى أكسيد الكربون أو الأيدروكسيل.

٣- الطين المُشبع بالكالسيوم:

يُعتبر الطين المُشبع بالكالسيوم مسئولاً عن ميكانيكية ثالثة لتثبيت الفوسفات بالأرضى القاعدية، وأيضاً فى الأراضى ذات pH حامضى ضعيف (٦,٥)، حيث يقوم الكالسيوم المتبادل بعمل قنطرة تربط بين أيون الفوسفات وسطح الطين، ويمكن تمثيل هذه الرابطة كما يلى:

$$\text{Clay -Ca- } H_2PO_4$$

ومن الطبيعى أن نتوقع أنه كلما زادت كمية الطين ذات السعة التبادلية الكاتيونية C.E.C المرتفعة مثل معادن من نوع ٢ : ١ ازدادت كمية الفوسفات المثبتة بهذه الطريقة.

ومن السابق نجد أن نشاط الفوسفور فى المحلول الأرضى فى الأراضى القاعدية ومنها الأراضى المصرية يكون متوقفاً على ثلاثة عوامل أساسية وهى:

أ – نشاط أيون الكالسيوم Ca^{2+}.

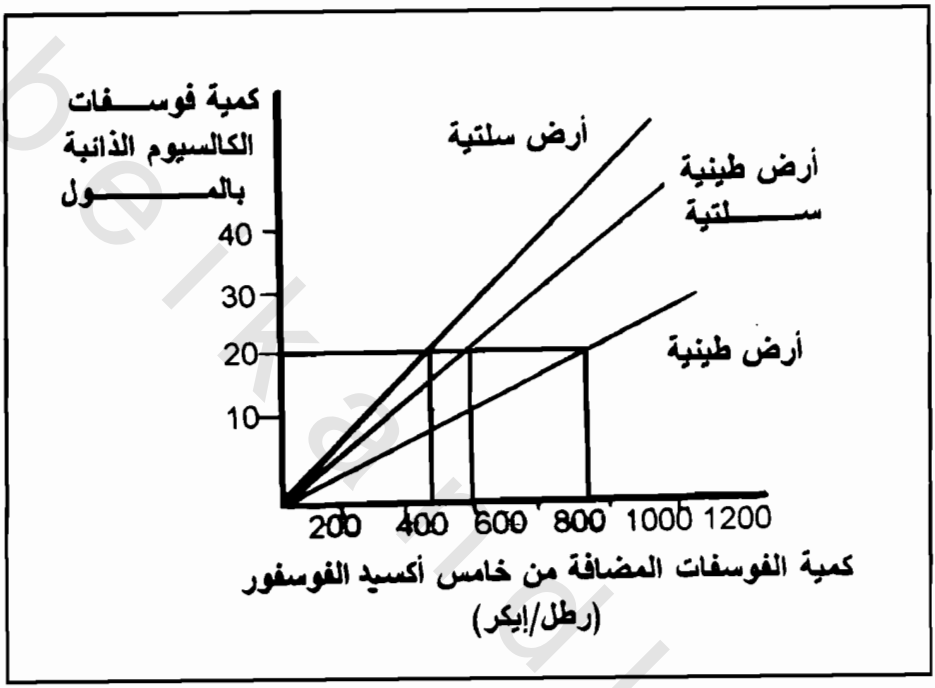
ب– كمية وحجم حبيبات كربونات الكالسيوم الحرة فى الأرض الزراعية.

جـ– كمية ونوع الطين الموجود.

حيث يقل نشاط (تيسر) الفوسفور فى الأراضى ذات نشاط الكالسيوم المرتفع، والمحتوى العالى من كربونات الكالسيوم ناعمة القوام، وكمية كبيرة من الطين المشبع بالكالسيوم. ولهذا يجب إضافة كمية أكبر من الأسمدة الفوسفاتية لمثل هذه الأراضى للحصول على مستوى ملائم من الفوسفور المُيسر فى المحلول الأرضى. ويوضح ذلك إحدى الدراسات بولاية كولورادو بالولايات المتحدة الأمريكية على تأثير كمية الطين (قوام الأرض)، وكمية السوبر فوسفات المضافة على كمية الفوسفور النشط (المُيسر) فى المحلول الأرضى Tisdzle & Nelson سنة ١٩٨٧ (شكل ٥–٥).

من شكل (٥–٥) يمكن إيضاح نقطتين: الأولى أن كمية الفوسفور الذائبة فى

المحلول الأرضى فى الأراضى المختلفة القوام تحت الدراسة تزداد مع زيادة كمية الفوسفات المضافة، والثانية هى لكى يتم الحصول على كمية معينة من الفوسفور النشط (الذائب) فى المحلول الأرضى يلزم إضافة كمية أكبر من السوبر فوسفات فى الأراضى ناعمة القوام عما يلزم إضافته للأرض خشنة القوام للوصول إلى نفس المستوى من النشاط.

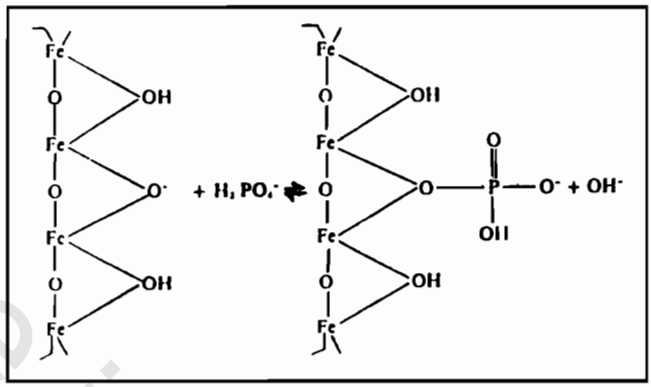


شكل (٥-٥): يبين تأثير قوام التربة الزراعية علي تيسر الفوسفور المضاف إليها

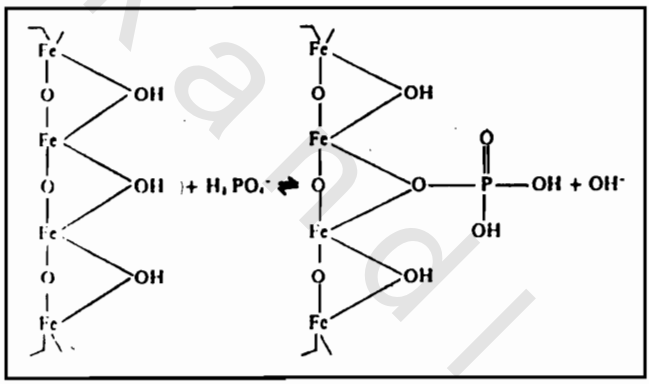
٤ - التفاعل مع الأكاسيد السداسية المتأدرتة:

نتيجة للسلوك الأمفوتيرى Amphoteric behavior للأكاسيد السداسية فإن أسطحها تحمل صافى شحنة كهربائية قد تكون سالبة أو متعادلة أو موجبة. وعلى هذا فإن أيونات الفوسفات الموجودة فى المحلول الأرض تدخل فى تفاعلات تبادل أنيونى مع مجموعات الأيدروكسيل الموجودة على أسطح حبيبات هذه الأكاسيد. ويوجد ثلاثة تفاعلات لأكاسيد الحديد المتأدرت والتى تحدث عند قيم من الـ pH أعلى أو أقل أو عند نقطة التعادل الكهربائية لهذا المركب Zero-point of charge (ZPC) يمكن إيضاحها كما يلى:

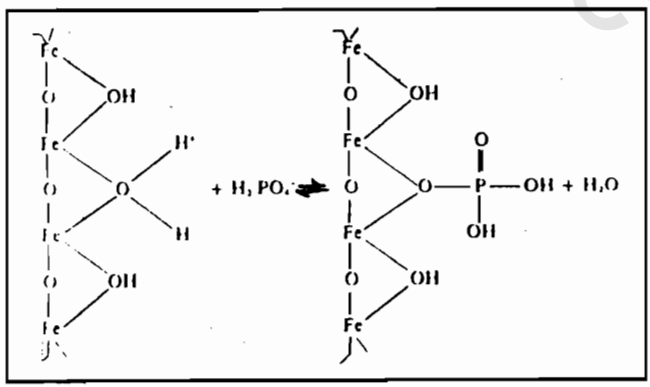
أ – عند نقطة أعلى من نقطة التعادل الكهربية (صافى الشحنة سالب)



ب – عند نقطة التعادل الكهربى (صافى الشحنة صفر)



جـ – عند نقطة أسفل من نقط التعادل الكهربى (صافى الشحنة موجب)



من الخطوات السابقة نجد أنه عند نقطة التعادل الكهربية لأكاسيد الحديد المتأدرتة يحدث إحلال لمجموعة الهيدروكسيل بواسطة مجموعة فوسفات أحادية ، ونفس الشيء يحدث عند ارتفاع رقم الـ pH وتصبح شحنة المركب سالبة . أما عند انخفاض رقم الـ pH تصبح شحنة المركب موجبة، ويحدث إحلال لجزيء الماء بواسطة مجموعة الفوسفات الأحادية .

ثانياً : تفاعلات الفوسفات فى الأراضى الحامضية

١- التثبيت بواسطة الحديد والألومنيوم :

يعتبر تثبيت الفوسفات فى الأراضى الحامضية نتيجة مجموعة تفاعلات مختلفة إلى حد كبير عن تلك الحادثة فى الأراضى القاعدية. حيث يكون غالبة احتجاز الفوسفور أو تثبيته نتيجة تفاعله مع الحديد والألومنيوم، ففى هذه الأراضى تحتوى أسطح التبادل للغرويات الأرضية المعدنية على كميات كبيرة من الألومنيوم، وكميات أقل من الحديد والمنجنيز المتبادل. فعند إضافة الأسمدة الفوسفاتية لهذه الأراضى يحدث ترسيب للفوسفات فى صورة فوسفات الألومنيوم أو الحديد ، ويتم ذلك بأن يقوم أيون الكالسيوم الموجود فى تركيب السماد بالتبادل مع أيون الألومنيوم وينطلق الأخير إلى المحلول الأرضى، ثم يحدث له تحلل مائى ويتكون أيدروكسيل العنصر وأخيراً يتحد أيدروكسيل الألومنيوم مع الفوسفات ويحدث ترسيب للفوسفات كما توضح المعادلات الآتية :

أ - التبادل الكاتيونى Caion Exchange :

$$\text{سطح حبيبة الطين} \begin{bmatrix} Al^{3+} \\ +\ 3Ca^{2+} \\ Al^{3+} \end{bmatrix} \rightleftharpoons \text{سطح حبيبة الطين} \begin{bmatrix} Ca^{2+} \\ Ca^{2+} \\ Ca^{2+} \end{bmatrix} + Al^{3}$$

ب - التأدرت Hydrolysis :

$$Al^{3+} + 2H\,O \rightleftharpoons Al(OH)_2^{+} + 2H^{+}$$

جـ – الترسيب : **Precipitation** :

$$Al(OH)_2^{+} + H_2PO_4^{-} \leftrightarrows Al(OH)_2H_2PO_4$$

Variscite

وبنفس الكيفية يحدث ترسيب للفوسفات بواسطة الحديد كما فى المعادلة التالية :

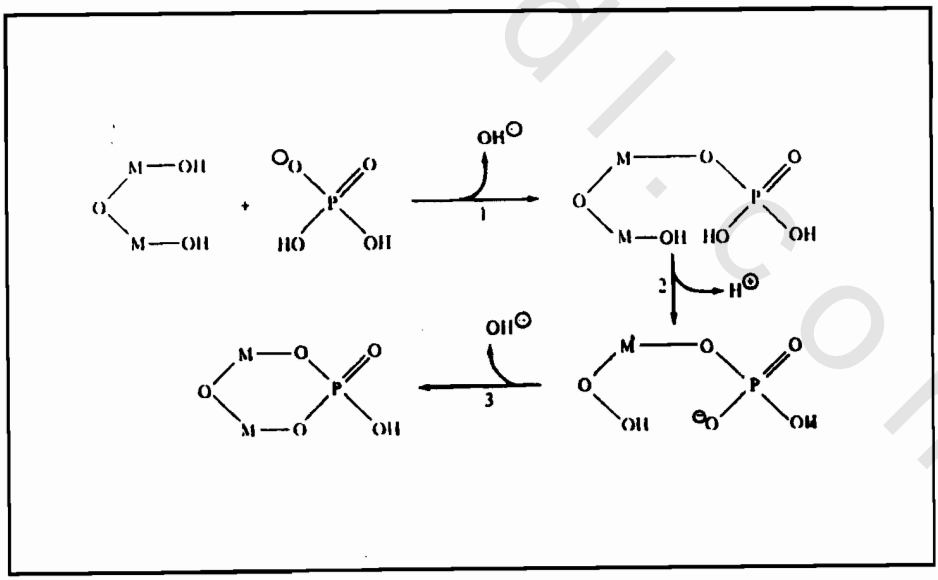
$$Fe^{3+} + H_2PO_4^{-} + 2H_2O \leftrightarrows Fe(OH)_2HPO_4 + 2H$$

Stringite

وهكذا نجد أن واحد مول من الألومنيوم المتبادل والذى حدث له تحلل مائى يرسب واحد مول من أيونات الأورثوفوسفات. وليس من المنتظر أو المحتمل حدوث تحلل مائى لكل الألومنيوم المتبادل تحت الظروف الحقلية، وبالتالى من المتوقع أن يكون إسهام هذه الميكانيكية فى تثبيت الفوسفات تكون أقل عن ما يشير إليه هذا التفاعل .

٢ – الادمصاص الأيونى بواسطة الأكاسيد :

وهنا تتفاعل الفوسفات مع مركبات الحديد والألومنيوم وتتكون معقدات مختلفة. وقد يكون التفاعل مباشراً مكوناً راسب لمكونات الحديد أو الألومنيوم كما سبق ذكره فى



شكل (٥–٦) : يبين خطوات ادمصاص الفوسفات علي أسطح أكاسيد الحديد

الخطوة السابقة. أو يحدث ادمصاص للفوسفات على أسطح تلك الأكاسيد، وتنطلق جزيئات الماء ومجموعات الأيدروكسيل، شكل (٥-٦) يصف هذا التفاعل.

ويمكن أن يحدث ادمصاص للأنيونات على الأسطح التى تحمل شحنة موجبة وتزداد هذه الحالة تحت ظروف الأراضى الحامضية حيث يحدث جذب للأيدروجين على مجموعة الأيدروكسيل الخارجية ، وفى النهاية يكون صافى الشحنة موجب مما يؤدى إلى إدمصاص الأنيونات (An) عن طريق خاصية الجذب بالقوة الإلكتروستاتيكية كما يمثلها التفاعل التالى :

$$Me\text{-}OH + H^+ \longrightarrow Me\text{-}O\begin{bmatrix}H\\H\end{bmatrix}^+$$

$$Me\text{-}O\begin{bmatrix}H\\H\end{bmatrix}^+ + An \longrightarrow Me\text{-}O\begin{bmatrix}H\\H\end{bmatrix}^+ An$$

٣ - التثبيت بواسطة الطين المُشبع بالكالسيوم :

ويحدث ذلك فى الأراضى ذات pH ٦,٥ أو أقل وذلك عن طريق أيون الكالسيوم المبتادل على أسطح معادن الطين، حيث يعمل أيون الكالسيوم كقنطرة بين أيون الفوسفات وسطح الطين.

ومما سبق نجد أن الفوسفور المضاف إلى الأراضى القاعدية أو الأراضى الحامضية يتعرض إلى التثبيت بطرق مختلفة . ويمكن اعتبار الفوسفور المدمص ضمن صورة الفوسفور القابل للحركة **Labile Phosphorus** أى يكون له إمكانية التحرر أو الانطلاق **Desorption** ليكون مُيسراً للنبات. وعملية التحرر هذه تتم بواسطة إحلال أيون مُعين سالب الشحنة له قدرة الادمصاص النوعى مثل : أيون البيكربونات أو الفلوريد محل أنيون الفوسفات المدمص. وقد يتكون أيون البيكربونات فى المحلول الأرضى أثناء انطلاق ثانى أوكسيد الكربون من عملية التنفس للجذور والكائنات الدقيقة وذوبانه فى الماء

مكوناً حمض الكربونيك الذى سرعان ما يتأين إلى بيكربونات وأيدروجين حسب المعادلة التالية :

$$CO_2 + H_2O \Leftrightarrow + H_2CO_3 \Leftrightarrow HCO^-_3 + H^+$$

وهناك بعض الأيونات السالبة الشحنة الأخرى التى يمكن أن تحل محل الفوسفات مثل الأيدروكسيل والسليكات وبعض الأيونات العضوية مثل السترات و الطرطرات والهيومات، وغيرها والتى تساهم فى تحرر الفوسفات المدمصة أو تنافس أيون الفوسفات المضاف على صورة سماد فى الأدمصاص على الأسطح الموجبة الشحنة للغرويات الأرضية مما يزيد من تيسر الفوسفور فى المحلول الأرضى. ولقد أوضحت الدراسات التى قام بها El -Beshbeshy وآخرون خلال الفترة من ١٩٩٠ إلى ١٩٩٤ بأن هناك تأثيراً إيجابياً لأنيونات السليكات على تيسر الفوسفور الأصلى Native phosphorus بالتربة وذلك من خلال عدة تجارب معملية وحقلية وأيضاً فى البيوت الزجاجية. ففى تجربة تحضين Incubation لعينات تربة طينية رسوبية من أرض الوادى، وعينة تربة من أراضى جيرية حديثة الاستصلاح مع مركبات السليكات (سليكات الكالسيوم وهو منتج ثانوى من مصانع الحديد والصلب بحلوان والذى يعرف بإسم جلخ الأفران العالية المحبب والمبرد مائى ويتركب من أكسيد حديديوز ٠,٧ – ١,٢ ٪، أكسيد سليكون ٣٠ – ٣٥٪، أكسيد كالسيوم ٣٤ – ٣٨٪، أكسيد ماغنسيوم ٢ – ٥٪، أكسيد المونيوم ١١ – ١٤٪ ، أكسيد بوتاسيوم ٠,٢ – ٠,٥٪، وأكسيد باريوم ٠,٤ – ٠,٩٪) أوضحت النتائج زيادة كمية الفوسفات الميسرة والمستخلصة من تلك التربة والمعاملة بسليكات الكالسيوم، وفى تجربة فى الصوبة لدراسة تأثير سليكات الكالسيوم والكبريت وزرق الدواجن على تيسر الفوسفور بالتربة وكفاءة استخدام السوبر فوسفات أوضحت النتائج التى حصل عليها El -Beshbeshy وآخرون سنة ١٩٩٣ بأن هناك استجابة واضحة بالنسبة للفوسفور الممتص بواسطة نباتات الذرة وخاصة عند الإضافة مع السوبر فوسفات، وفى تجارب حقلية فى أراضى الوادى أدى استخدام هذه المركبات إلى زيادة كمية الفوسفور الممتص بواسطة نباتات الذرة Zanouny وآخرون سنة ١٩٩٤، وأيضاً بواسطة نباتات الشعير المنزرع فى أراضى حديثة الاستصلاح فى محافظة المنيا وأيضاً زيادة كفاءة استخدام الأسمدة الفوسفاتية El -Beshbeshy سنة ١٩٩٤، وربما يُعزى

ذلك لحدوث تنافس بين كل من أيونات السليكات والفوسفات على مواقع التبادل على سطح الغرويات الأرضية .

العوامل المؤثرة على احتفاظ التربة الزراعية بالفوسفور :

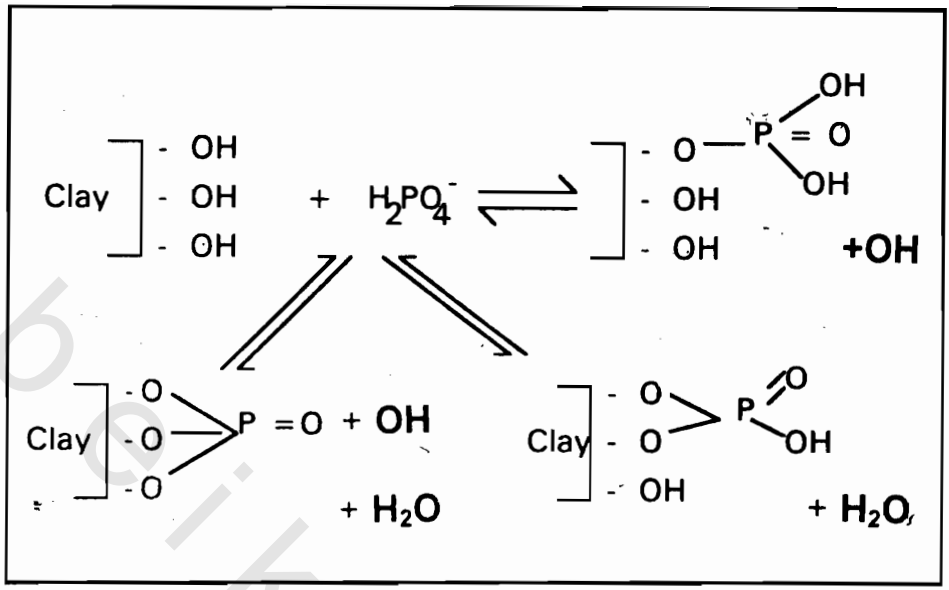
بصفة عامة توجد عدة عوامل تؤثر على مدى صلاحية الفوسفور بالنسبة للنبات ، وهذه العوامل مشتركة فى جميع أنواع الأراضى، وسوف نتناولها بشىء من التفصيل فيما يلى :

١ - **كمية الطين فى الأرض** : بزيادة نسبة الطين فى الأرض تزداد الكمية المثبتة من الفوسفور ويرجع ذلك إلى زيادة السطح النوعى لحبيبات الطين.

٢ - **نوع معدن الطين** : تبين من العديد من الأبحاث بأن الأراضى الغنية فى معادن الطين من نوع ١ : ١ مثل الكاؤولينيت تكون قدرتها على تثبيت الفوسفور مرتفعة عن الأراضى الغنية في معادن من نوع ٢ : ١ . ويرجع ذلك إلى أن عدد أكبر من مجموعات الأيدروكسيل المرتبطة مع ذرة الألومنيوم فى طبقة الأوكتاهيدرا تكون مكشوفة فى معادن من نوع ١ : ١ ولقد وصف عواد ١٩٨٧ سنة طبيعة التفاعل كما يلى :

أ - قد يحدث إحلال متماثل للفوسفات فى طبقة التتراهيدرا محل أيون السليكات إذ لوحظ فى بعض الدراسات أن كمية السيليكات فى معلق التربة تزداد بزيادة كمية الفوسفات المضافة. وغالباً ما يتم هذا الإحلال فى معان الطين من نوع ١ : ١ ولا يُعتبر هذا التفاعل تفاعل ادمصاص حيث يتم تثبيت الفوسفور داخل المعدن ، وبالتالى يصبح غير مُيسر بالنسبة للنبات .

ب - قد يحدث تبادل أنيونى بين مجموعة الفوسفات ومجموعة الأيدروكسيل الموجودة فى الهيكل البنائى لمعدن الطين. هذا بالإضافة إلى أن مثل هذا التفاعل يساعد على زيادة عدد مجاميع الأيدروكسيل المرتبطة بالمعدن مما يؤدى إلى زيادة السعة التبادلية الكاتيونية وخاصة عندما يرتفع رقم الـ pH للأرض عن ٧ كما توضحها المعادلات الآتية.



بينما الأراضى الغنية فى معادن الطين من نوع ٢ : ١، ونظراً لأن السعة التبادلية الكاتيونية لها مرتفعة فتكون كمية الكالسيوم المتبادلة كبيرة وبالتالى يحدث التثبيت أو الاحتفاظ بواسطة أيون الكالسيوم (فوسفات – كالسيوم – طين) .

٣ – **مدة التفاعل** : كلما زاد زمن التلامس بين أيونات الفوسفات ومكونات التربة الزراعية كلما زاد معدل التثبيت، وهذا الزمن يختلف من أرض إلى أخرى. وتُعتبر المدة التى يتمكن فيها النبات من الاستفادة القصوى من السماد الفوسفاتى المضاف مهمة من الناحية العملية. ففى الأراضى ذات القدرة العالية على التثبيت تكون هذه المدة قصيرة، بينما فى أراضى أُخرى قد تطول الفترة لمدة شهر أو أكثر. وهنا ترجع أهمية ما إذا كان السماد يضاف على دفعة واحدة أو على عدة دفعات خلال الدورة الزراعية، كذلك تحديد طريقة الإضافة.

٤ – **رقم الـ pH للتربة الزراعية** : يُعتبر رقم pH التربة من العوامل العالية التأثير على تحديد درجة صلاحية الفوسفور للنبات، كما سبق ذكر أن الصورة الأيونية للفوسفات والتي تكون مفضلة للامتصاص من قبل النبات هى $H_2PO_4^-$ بالمقارنة بالصور الأيونية الأخرى، وذُكر أن تركيز هذه الصورة يقل بارتفاع وانخفاض رقم الـ pH وذلك حسب طريقة التثبيت وتكون أعلى درجة صلاحية للفوسفات فى مدى

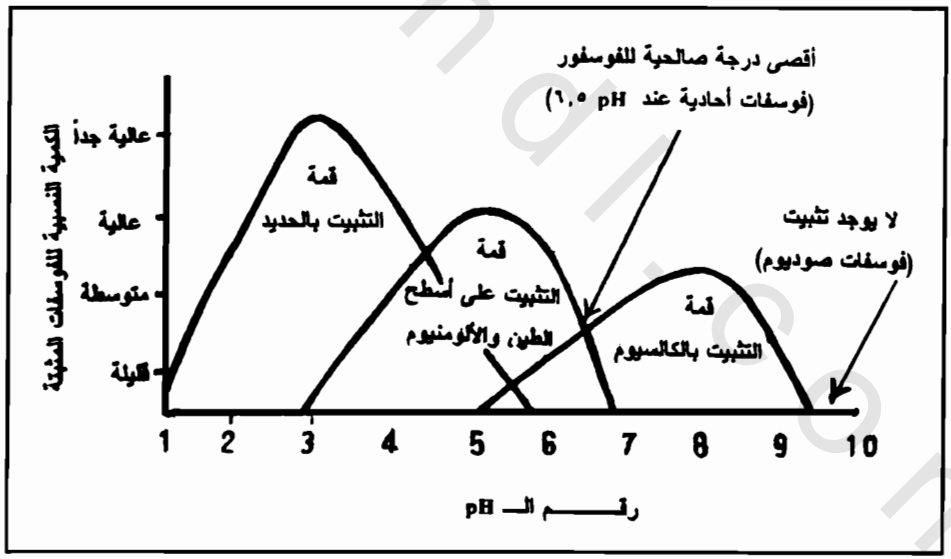
pH من ٦–٧ . والشكل (٥–٧) يبين تأثير رقم الـ pH على كمية وميكانيكية تثبيت الفوسفات .

٥ – **المادة العضوية** : من المعروف بأن الأسمدة العضوية عند إضافتها إلي الأراضى الزراعية تؤدى إلى زيادة خصوبة تلك الأراضى ، سواء كان نتيجة لما تحويه من عناصر ، أو بطريقة غير مباشرة عن طريق زيادة ذوبان بعض العناصر، وجعلها فى صورة ميسرة للنبات ومن تلك العناصر الفوسفور .

ويرجع ذلك إلي عدة أسباب وهى :

أ – انطلاق غاز ثانى أكسيد الكربون أثناء عملية تحليل وأكسدة المادة العضوية وأيضاً نتيجة للنشاط الميكروبى المصاحب لوجود المادة العضوية يعمل على خفض رقم الـ pH للأرض مما يزيد من ذوبان المركبات الفوسفاتية .

ب – تقوم الغرويات العضوية بتغليف الأكاسيد السداسية المتادرتة، وبالتالى تمنع أو تقلل من اتحادها مع الفوسفات .



شكل (٥–٧) : يوضح العلاقة بين رقم الـ pH وميكانيكية تثبيت الفوسفات

جـ – وجود بعض الأيونات العضوية السالبة الشحنة والناتجة من تحلل المادة العضوية مثل الهيومات Humate، الستررات Citrate ، الطرطرات Tartrate، والأوكسلات Oxalate فى المحلول الأرضى يمكن أن تتحد مع الحديد والألومنيوم، أو يمكن أن تتبادل مع أنيونات الفوسفات المدمص، أو تتنافس مع أيونات الفوسفات المضافة وبالتالى تزيد من الفوسفور الميسر للنبات.

د – تعتبر المادة العضوية مصدراً هاماً للفوسفور العضوى والذى يمتاز بقلة تثبيته بالمقارنة بالفوسفور المعدنى، وبفعل الكائنات الأرضية الدقيقة يحدث عملية معدنة لهذا الفوسفور، ويُصبح فى صورة ميسرة للنبات.

هـ – مع تقدم تحلل المادة العضوية ينتج الدبال، وهذا المركب يمكن أن يتحد مع الفوسفات ويتكون معقد الدبال والفوسفات، وهذه المركبات يمكن أن يستفيد منها النبات بسهولة . .

٦ – **درجة الحرارة** : كما هو معروف بأن سرعة التفاعلات الكيميائية تزيد بزيادة درجة الحرارة، وبالتالى وجد فى أراضى المناطق الحارة يكون تثبيت الفوسفور أكبر مما هو عليه فى أراضى المناطق المعتدلة ، وفى المناطق الاستوائية يكون التثبيت بفعل الأكاسيد السداسية المتأدرتة لزيادة محتوى هذه الأراضى من تلك المركبات.

٧ – **نسبة أكسيد السليكون إلى أكاسيد الحديد والألومنيوم $Si_2 : R_2O_3$ ratio**:

تؤثر هذه النسبة على ذوبان الفوسفات، ووجد أن هذه النسبة تقل فى الأراضى الحامضية (نتيجة لزيادة الحديد والألومنيوم) وفقد السيليكا بواسطة ماء المطر، وهذه النسبة تؤيد الرأى القائل بأن معادن الطين من نوع ١ : ١ قدرتها على تثبيت الفوسفات أكبر من معادن ٢ : ١ وذلك لانخفاض هذه النسبة في معادن ١ : ١ .

٨ – **التأثير الفسيولوجي للأسمدة الكيماوية**: كما هو معروف بأن الأسمدة النشادرية ذات تأثير حامضى، وبالتالى تُخفض رقم pH الأرض مما يساعد فى ذوبان الفوسفات.

اختبارات فوسفور التربة

تهدف اختبارات التربة فى هذا المجال إلى محاولة تقدير كمية الفوسفور الميسر فى التربة والتي تكون مرتبطة بمدى استجابة المحاصيل لإضافة الفوسفور لهذه الأرض، وبتفسير نتائج تلك الاختبارات يمكن معرفة الأرض التي قد تستجيب لإضافة الفوسفور من عدمه. ويوجد عدد كبير من الطرق التي بواسطتها يمكن تقدير ما يعرف بالفوسفور الميسر، وجدول (٥-٦) يوضح أهم هذه الطرق والتى عن طريقها يمكن معرفة حالة الفوسفور فى الأراضى :

جدول (٥-٦) : مستويات خصوبة التربة للفوسفور تبعا لطريقة الاستخلاص

الطريقة	محلول الاستخلاص	قيم الفوسفور الميسر (ppm)			الأرض الملائمة
		مرتفع	متوسط	منخفض	
أولسن Olsen	محلول بيكربونات صوديوم ٠,٥ ع عند pH ٨,٥	< ١٥	١٥ – ٥	٥ >	كل أنواع الأراضى وخاصة القاعدية
براى ٢ Bray 2	٠,٣ ع فلوريد أمونيوم + ٠,٠٢٥ ع حمض هيدروكلوريك	< ٥٠	٥٠ – ١٥	١٥ >	الأراضى الحامضية
نيلسون Nelson	حمض $H_2SO4 + HCL$ المخفف	< ٣٠	٣٠ – ١٠	١٠ >	بعض الأراضى الحامضية
تروج Troug	٠,٠٠٢ ع H_2SO_4 عند pH ٣	< ٤٠	٤٠ – ٢٠	٢٠ >	الأراضى الحامضية

عن Landon سنة ١٩٨٤.

وطبيعي يكون عند المستوى المرتفع من الفوسفور المستخلص لا يكون هناك استجابة لإضافة الفوسفور ، وتكون درجة الاستجابة متوسطة عند المستوى المتوسط، فى حين تكون الاستجابة عالية فى حالة المستوى المنخفض من الفوسفور المستخلص.

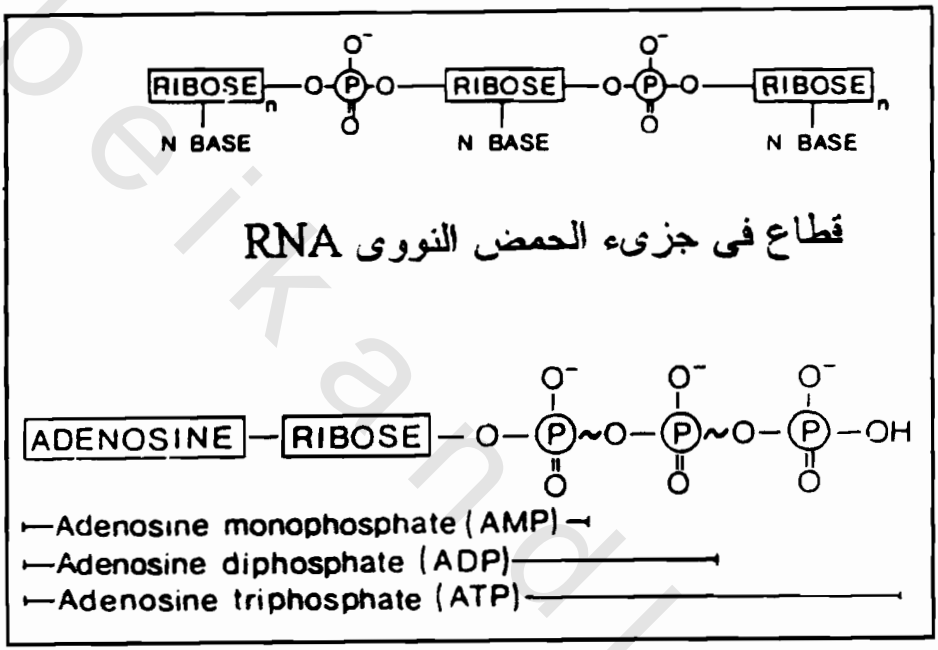
الفوسفور فى النبات Phosphorus in plant

تُعتبر الفوسفات الأحادية $H_2PO_4^-$ هى الصورة الأيونية المُفضلة للامتصاص من قبل النبات بالمقارنة بالصورة الثنائية HPO_4^{2-}. وعلى عكس النيروجين والكبريت لا تُختزل الفوسفات داخل الأنسجة النباتية، بل يدخل الفوسفور فى المركبات العضوية فى أعلى صور التأكسد، فهو عنصر أساسى فى تركيب الليبيدات المفسفرة والأحماض النووية، فإذا اتحدت الأحماض النووية مع البروتينات تكونت البروتينات النووية وهى مكونات هامة لأنوية الخلايا النباتية.

ويتركم الجزء الأكبر من فوسفور النباتات الناضجة فى البذور والثمار أثناء فترة تطورها، كذلك لوحظ وفرة الفوسفور فى الأنسجة المرستيمية للنباتات النامية حيث يستخدم فى تخليف البروتينات النووية والمركبات الفوسفورية الأخرى والتى يُستخدم البعض منها فى عمليات التنفس . ويبدو أن هناك ترابطاً بين دور كل من الفوسفور والنيتروجين فى عملية الأيض Metabolism بالنبات، فقد ظهر أن نقص الفوسفور المُيسر يؤدى إلى سرعة تراكم النيتروجين غير العضوى داخل النبات، ولكن مع توافر هذا العنصر بصورة ميسرة في المحلول الأرضى يقلل من امتصاص النيتروجين. وبالتالى فالتسميد الفوسفاتى بكثرة قد يغير التوازن النيتروجينى للنبات، ويؤدى إلى النضج المبكر للنباتات، فى حين يتأخر نضج النباتات التي تعانى من نقص الفوسفور. كذلك أوضحت الدراسات أنه لا يتم تخليق البروتينات قليلة الفوسفور ويلازم ذلك تراكم السكريات فى الأجزاء النباتية الخضراء مما يؤدى إلى ظهور اللون الأحمر الأرجوانى (قريب من البنفسجى) نتيجة زيادة معدل تخليق صبغة الأنثوسيانين فى الأوراق كما فى نباتات الذرة والطماطم وغيرهما من النباتات الأخرى. وقد ساهم استخدام الفوسفور المشع فى إثبات قدرة هذا العنصر على الحركة داخل النبات، حيث يعاد توزيع الفوسفور بين أعضائه المختلفة وهو على صورته الفوسفاتية، ففى حالة نقص الفوسفور الميسر فى التربة ينتقل هذا العنصر من الأوراق المسنة إلى الأوراق الحديثة، وبالتالى تظهر

أعراض نقصه على الأوراق المسنة. ويمكن إيجاز أهم الوظائف الحيوية للفوسفور فيما يلى :

١- يُعتبر مكون أساسى للفوسفاتيدات، الأحماض النووية RNA, DNA، البروتينات، ومساعدات الإنزيم AMP,ADP & ATP (شكل ٥-٨).



شكل (٥-٨) : رسم تخطيطي يبين تركيب الحمض النووي RNA (لأعلي) ومساعدات الإنزيم ATP, ADP & AMP (لأسفل).

٢ - يدخل فى تركيب العديد من الأحماض الأمينية.

٣ - ضرورى لانقسام الخلايا، والكروموزمات Chromosomes، ونمو الجذور.

٤ - ضرورى لنمو القمة المريستيمية، البذور والثمار، وأيضاً لعملية التزهير.

ويوجد الفوسفور فى الأنسجة المرستيمية وينتقل بسهولة داخل النبات، وعلى ذلك فإنه يتحرك من الأنسجة المسنة إلى الأنسجة الحديثة فى حالة نقص الفوسفور الميسر بالتربة الزراعية (أى أن هذا العنصر مُتحرك داخل النبات).

أعراض نقص الفوسفور :

تختلف الأعراض حسب نوع النبات، ففى النباتات ذات الفلقة الواحدة يؤدى نقص الفوسفور إلى ظهور لون أحمر أو أرجوانى فى مناطق مختلفة من الورقة فى خلال مراحل النمو المختلفة. أما النباتات ذات الفلقتين فإن العروق الرئيسية للأوراق المسنة تأخذ لوناً أحمر أرجوانى. بينما تبقى الأوراق الحديثة بلون أخضر داكن أو أخضر رمادى، ويزداد الأرجوانى على عروق الأوراق وخاصةً على الناحية السفلية للأوراق وعلى السيقان. وكما سبق ذكر أن الفوسفور يتحرك بسهولة داخل النبات فإن الأعراض تظهر أولاً علي الأوراق المسنة، وذلك لتحرك الفوسفور من تلك الأوراق إلى الحديثة لسد احتياجاتها. ويمكن إيجاز هذه الأعراض فى النقاط التالية:

أ – ظهور المجموع الخضرى بلون أخضر داكن غالباً ما يتحول إلى اللون الأحمر أو الأرجوانى.

ب – فى بعض الأحيان تتحول الأوراق السفلية إلى اللون الأصفر، وتجف ثم تتحول إلي اللون البني المخضر.

جـ – تظهر ساق النباتات رفيعة وقصيرة وخاصة إذا نقص هذا العنصر فى المراحل المتأخرة من النمو. ويقل المجموع الجذرى.

د – ظهور الأعراض أولاً على النموات المسنة، وفى حالة النقص الشديد يتأخر النمو لما لهذا العنصر من تأثير على انقسام الخلايا فى القمم النامية. وفيما يلى أعراض نقص الفوسفور على نباتات بعض المحاصيل الاقتصادية :

القمح ، الشعير والأرز: يسود لون أخضر داكن على نصف النصل القاعدى، فى حين يتلون النصف الآخر باللون البرتقالى، يتحول إلى اللون الأحمر ثم البني. ويظهر نقص الفوسفور فى حالة عدم الاهتمام باستخدامه كسماد بكميات كافية.

الذرة : يقل حجم النباتات ويتحول لون الأوراق السفلى إلى البني أو الأحمر (الأرجوانى) وتبدأ الأوراق السفلى فى الموت.

الفول البلدى، السودانى، البرسيم ومحاصيل الخضر البقولية : تظهر الاعراض مع انخفاض درجة الحرارة شتاءً ، وتبدأ بظهور اللون الأخضر الداكن يعقبة ظهور لون محمر

على الأوراق، ويتأثر نمو النبات ويقل حجمه ويتأخر النضج . وقد يظهر النقص رغم توافر كميات عالية من السماد الفوسفاتى فى التربة، ويرجع ذلك لانخفاض معدل انتشار الفوسفور فى المحلول الأرضى بانخفاض درجة الحرارة .

القطن : تظهر الأوراق السفلية بلون أخضر داكن، وتقل مساحتها كثيرا، وتنتقل الأعراض إلى الأوراق العليا، ويتقزم الساق الرئيسى بشكل ملحوظ، ويتأخر الإزهار وتكوين ونضج اللوز، يقل المحصول.

البطاطس : تظهر الأعراض الأولى بشكل أخضر داكن غير طبيعى للنمو الخضرى، وتتخشب السوق، وتنثنى أعناق الأوراق وحوافها، وكذلك الوريقات لأعلى، وتقل مساحة الوريقات التي يصبح لونها أخضر داكن أكثر من المعتاد، ثم تصفر الأوراق العليا ويتحول لون الأوراق السفلى إلى المصفر، ثم يتكون عليها لون بني أو برونزى بادئا من قمة الورقة حتى يشملها كلها ثم تسقط. وتنتج الدرنات مصابة ببقع بنية صدئة فى اللحم يشمل مناطق منفصلة، وقد تتصل ببعضها لتكون مساحة ذات شكل أشعة أو خطوط عريضة ذات قوام متصلب داخل نسيج الدرنة الناعم.

نماذج لأعراض نقص الفوسفور على بعض النباتات صفحة ٤٦٣ - ٤٦٤

الأسمدة المحتوية على الفوسفور :

مما سبق يتضح أن الفوسفور يكاد أن يكون عديم الحركة وخاصة فى الأراضى المتعادلة والقاعدية ومنها الأراضى المصرية، حيث يكون فى صورة فوسفات كالسيوم. ولا يتحرك الفوسفور المضاف أكثر من ٢-٣ مم من جزيئات السماد المضاف، وذلك لترسيبه بسرعة فى صورة فوسفات ثنائى أو رباعى الكالسيوم، كما يمكن أن يدمص على أسطح كربونات الكالسيوم، والفوسفور فى هذه الحالات لا يكون ميسرا بأى صورة للنبات. ومن ذلك يتضح أن غسيل الفوسفات من التربة لا يشكل أى مشكلة.

أن الكمية الميسرة للنبات تكون قليلة كما هو الحال فى الأراضى القاعدية والجيرية بمقارنة تلك الكمية مع المحتوى الكلى من الفوسفور، ويرجع السبب فى ذلك إلى أرتفاع رقم pH الأرض وزيادة محتواها من الكالسيوم مما يسرع ويُزيد من عملية تثبيت الفوسفور. وتعتبر كمية الفوسفات المزالة بواسطة المحاصيل قليلة نسبياً ويمكن تعويضها

عن طريق إضافة كمية أخرى من السماد. ومن ناحية الأسمدة الفوسفاتية نجد أن النباتات المضاف لها هذه الأسمدة تستفيد فقط من ١٠ – ٢٠٪ من الكمية المضافة، وعلى ذلك يجب أن تكون استراتيجية استخدام السماد هي تقليل فرص الاتصال بين التربة وحبيبات السماد ووضعه في منطقة الريز وسفير، حيث يفرز الجذر إفرازات مختلفة ذات تأثير مخلبى وتأثير مختزل ومنها أحماض عضوية وأحماض أمينية وفينولات وسكريات ... وغيرها، مما يؤدى إلي إذابة فوسفات الكالسيوم وكذلك الفوسفات صعبة الذوبان. أيضا وجد أن البقوليات تظهر ميكانيكية فسيولوجية أخري وذلك بإخراج بروتونات (H^+) عند امتصاصها للأمونيوم المثبت ببولوجيا، وذلك للحفاظ على ثبات نسبة الكاتيونات / الأنيونات فى النبات Marschner سنة ١٩٩٥. وفى نفس الوقت يكون من المُهم التفكير فى كيفية زيادة صلاحية الفوسفور الأصلىNative phosphorus وقد يتحقق ذلك بعدة طرق من أهمها تحديد موعد وطريقة إضافة السماد والتي تتوقف على :

١ – **احتياج النبات وطول موسم النمو** : يساهم الفوسفور فى كثير من العمليات الحيوية داخل النبات بما له من ارتباط وثيق بمركبات الطاقة وعمليات انقسام الخلايا. وعلى ذلك يحتاج النبات إليه منذ بداية النمو ويستمر الاحتياج حتى تكون الثمار ودخول النبات مرحلة النضج .

٢ – **درجة ذوبان السماد وحجم حبيباته** : يفضل إضافة السماد سريع الذوبان فى الماء وفى صورة مسحوق بوضعها فى مناطق نمو الجذور وذلك فى حالة المحاصيل ذات فترة النمو القصيرة.

٣ – **خصائص التربة** : في الأراضى الجيرية والأراضى العالية فى محتواها من الكالسيوم يفضل اختيار الأسمدة ذات درجة ذوبان فى الماء مرتفعة وأيضا ذات حبيبات كبيرة. وأيضاً إضافتها بطريقة التلقيم أو التكبيش band بجوار النبات. وفى حالة المحاصيل ذات موسم نمو طويل يفضل إضافة الأسمدة ذات درجة إذابة أقل (٥٠٪) لمثل هذه الأراضى ، ولا يفضل استخدام الأسمدة الناعمة القوام (مسحوق) وذلك لتقليل فرصة تثبيت الفوسفات. وهناك العديد من الأسمدة الفوسفاتية يوضحها جدول (٥–٧). وقد أثبتت التجارب أنه لكي نزيد من كفاءة استخدام السماد

الفوسفاتى فإنه يفضل إضافته فى جور أو شرائح بجوار البذور بدلاً من إضافته نثرا، ويرجع ذلك إلى أنه فى حالة الإضافة فى جور أو خطوط تكون الكمية المعرضة للتلامس مع حبيبات التربة أقل، وبالتالى تقل فرصة حدوث عملية التثبيت.

جدول (٥-٧) : أهم الأسمدة الفوسفاتية

اسم السماد	التركيب الكيميائى	ذوبان السماد	P_2O_5 %
سوبر فوسفات	$Ca(H_2PO_4)_2 + CaSO_4$	فى الماء	١٨ – ٢٢
سوبر فوسفات مكرر (ثلاثى)	$Ca(H_2PO_4)_2$	فى الماء	٤٦ – ٤٧
فوسفات أحادية الأمونيوم	$NH_4H_2PO_4$	فى الماء	٤٨ – ٥٠
خبث المعادن القاعدى	$Ca_3P_2O_5.CaO$ $+CaO.SiO_2$	حمض الستريك	١٠ – ٢٢
صخر الفوسفات المطحون	APatite	حمض الستريك	٢٩

obeikandl.com