الفصل السابع

التحولات الميكروبية للمركبات الفوسفورية فى التربة الزراعية

Microbial Transformations of Phosphorus Compounds in Soil

يعتبر الفوسفور من العناصر الغذائية الضرورية للنبات وذلك لدوره المباشر فى معظم العمليات الحيوية حيث لا يمكن أن تجرى أى من العمليات الحيوية داخل الخلية النباتية بدونه. ويوجد الفوسفور بالتربة الزراعية بكميات أقل بكثير من كمية النيتروجين أو كمية البوتاسيوم. ويوجد الفوسفور فى القشرة الأرضية بنسبة تصل إلى حوالى ٠,١١% تكون مرتبطة بمادة التربة العضوية. وتختلف نسبة الفوسفور فى التربة حسب نوعها ودرجة الحرارة ، والمحتوى الرطوبى وكذلك عمر التربة ، تكون كمية الفوسفور الكلى فى التربة المعدنية قليلة نسبيا . وبصورة عامة يكون محتوى التربة ذات النسيج الخشن من الفوسفور الكلى أقل من محتوى التربة ذات النسيج الناعم الموجودة فى نفس الظروف الجوية . أما التربة العضوية فإن محتواها من الفوسفور الكلى يكون أعلى من محتوى التربة المعدنية وتزداد نسبته فى الطبقة السطحية للتربة بسبب إرتفاع معدل تحلل المادة العضوية فيه . كذلك فإن تربة المناطق الجافة وشبه الجافة يكون محتواها من الفوسفور الكلى أقل من محتوى التربة فى المناطق الرطبة المتشابهة فى التركيب . ويوجد الفوسفور فى التربة الزراعية على صورتين هما الفوسفور المعدنى والفوسفور العضوى .

١- الفوسفور المعدنى Inorganic phosphorous

يوجد الفوسفور المعدنى فى التربة الزراعية فى صورة فوسفات معدنى مرتبط بالكالسيوم أو الحديد أو الألمونيوم أو قد تكون مدمصة على الجزيئات الغروية بالتربة الزراعية.

عند التسميد الفوسفورى للأراضى فإن الفوسفور القابل للاستفادة بواسطة النبات يتعرض لتحولات تتوقف على درجة pH التربة ، ففى الأراضى القاعدية نجد أن فوسفات الكالسيوم الأحادى المضافة الذائبة والصالحة للنباتات تتحول بسرعة إلى الحالة الثلاثية غير الذائبة والتى تترسب مما يجعلها أقل صلاحية للنباتات. ولكن وبالرغم من أنها تترسب فى صورة غشاء رقيق حول الحبيبات فإن لها سطحا نوعيا كبيرا جدا مما يعطى الميكروبات وجذور النباتات فرصة كبيرة لتحولها إلى الصورة الذائبة مرة ثانية. أما الأراضى الحامضية ذات الـpH المنخفض فإن الفوسفات الذائبة تترسب فى صورة فوسفات حديد أو ألمونيوم وهذه تكون شديدة المقاومة لعملية الإذابة مما يؤدى لظهور أعراض نقص الفوسفور وذلك ما لم تسمد بكميات كبيرة من الأسمدة الفوسفاتية أو التسميد الورقى . ويمكن تقسيم مركبات الفوسفور المعدنى المترسبة فى التربة إلى ثلاثة أقسام رئيسية هى :

أ- فوسفات الحديد والألمونيوم Fe-Al phosphate ومن المركبات التابعة لهذا القسم هى : Wavellite $Al_3(PO_4)_2(OH)_3.5H_2O$ ، Variscite Al $PO_4.2H_2O$ و Strengite $FePO_4.2H_2O$ وأن ترسبات هذه المركبات تكون ثابتة فى الأراضى الحامضية وهى غير قابلة للذوبان.

٢- الفوسفور العضوى Organic phosphorous

يوجد فى التربة بنسبة ١٥-٨٥% من الفوسفور الكلى ويوجد الفوسفور على الصورة العضوية في التربة من بقايا النباتات وأجسام الميكروبات ويوجد في العديد من المركبات العضوية مثل الأحماض النووية - الفسفوليبيدات - الفيتين - الليسيثين - المرافقات الإنزيمية . يوجد الفوسفور في المركبات العضوية في الصورة المؤكسدة (PO_4^{---}) ويوجد الفوسفور في الأراضى المصرية في صورة فوسفات كالسيوم ثلاثية $Ca_3(PO_4)_2$ غير الذائبة .

ومن الوظائف الحيوية للفوسفور أنه يشارك في تحليل الكربوهيدارت والمواد الأخرى الناتجة عن عملية التمثيل الضوئى لتحرير الطاقة اللازمة للعمليات الحيوية للنبات . كما أنه يساعد في عملية تكوين وإنقسام الخلايا علاوة على أنه يعمل على المشاركة الفعالة في نقل الصفات الوراثية عن طريق DNA ، حيث يشارك في تركيب العديد من المركبات التى تسهم في تكوين RNA مثل UTP ، ATP ، CTP ، GTP . لذلك فإن نقص الفوسفور يؤدى إلى ظهور أعراض على الأوراق القديمة ذات اللون الأخضر الداكن . ويشوب اللون البنى أوراق أشجار الفاكهة وتسقط قبل إكتمال نضجها وتتلون سيقان النباتات الحولية بلون محمر ناتج عن تكوين مادة الأنثيوسيانين . كما تظهر أشجار الفاكهة تناقصاً في معدلات نمو الأغصان الحديثة . علاوة على تكون ثمار وبذور غير جيدة في حالة نقص الفوسفور .

تحولات الميكروبية للمركبات الفوسفوريه في التربة ::

Microbial Transformations of Phosphorus Compounds in Soil

تقوم الميكروبات بدور حيوى في إذابة الفوسفات المعدنية غير الذائبة في التربة الزراعية وتحويلها إلى الصورة الجاهزية .. للميكروبات الهيتيروتروفية دوراً رئيسياً في معدنة الفوسفور العضوى وتحويله إلى الصورة المعدنية الجاهزة للنبات . وتحتاج الميكروبات إلى فوسفات لبناء أجسامها لذلك تلجأ إلى الفوسفات المعدنية الذائبة في التربة وتحويلها في أجسامها إلى فوسفات عضوية خلال عملية Immobilization علاوة على قيامها بأكسدة أو إختزال المركبات الفوسفورية غير العضوية في التربة .. تعتبر التفاعلات المؤدية إلى معدنة أو تمثيل الفوسفور من أهم الخطوات التى تتم في دورة الفوسفور في الطبيعة.

١- إذابة الفوسفات المعدنية : Solubilization of organic phosphorus

يعتبر Saket *et al*., 1908 أول من تمكن من ملاحظة وجود الميكروبات المذيبة للفوسفات معملياً وهذه الميكروبات يمكنها إذابة فوسفات الكالسيوم الثلاثية وتحويلها إلى الصورة الأحادية القابلة للاستفادة. وتمكن العلماء من تفسير قابلية هذه الميكروبات لإذابة الفوسفات حيث أنها تنتج ثانى أكسيد الكربون أثناء نشاطها بالإضافة إلى إفرازها للعديد من الأحماض العضوية من بينها حامض الفورميك – الخليك – البروبيونيك – الستريك واللاكتيك وغيرها وهذه الأحماض لها القدرة على إذابة الفوسفات المعدنية غير الذائبة . كذلك وجد أن الأحماض العضوية من نوع Alpha hydroxyl acids تكون أفضل من غيرها على إذابة الفوسفات.. وتعمل الأحماض العضوية وغير العضوية على تحويل $Ca_3(PO_4)_2$ إلى فوسفات ثنائى

وأحادى وتكون المحصلة النهائية لذلك هو توفر هذا العنصر في صورة ميسرة للنبات .

ولقد لوحظ أن تكون الإذابة أكثر تحت الظروف الهوائية ، علاوة على أن تحلل المواد العضوية يخفض درجة جهد الأكسدة والإختزال (EH) في التربة مما يؤدى إلى تحول الحديديك إلى حديدوز ذائب وهذا يساعد على قابلية الإستفادة من الفوسفات ويظهر تأثير الظروف اللاهوائية بوضوح على الأراضى المنزرعة بالأرز تحت نظام الغمر .

٢- إذابة الفوسفات غير العضوية :

Solubilization of inorganic phosphorus

وجد أن ١٠% إلى ٥٠% من العزلات البكتيرية المختبرة لديها القدرة على إذابة مركبات فوسفات الكالسيوم وأن أعداد هذه البكتيريا تتراوح بين $١٠^{٥}$-$١٠^{٧}$ جرام تربة جافة . وتتواجد هذه البكتيريا بوفرة على سطوح الجذور وفى منطقة الريزوسفير ، وقد وجد أن أنواع الميكروبات النشطة في هذا المجال هى البكتيريا المتجرثمة مثل *Bacillus* sp. والبكتيريا الكروية مثل *Micrococcus* sp. ، *Mycobacterium* sp. ومن البكتيريا العصوية القصيرة *Flavobacterium* sp. ، *Pseudomonas* sp. ومن الفطريات *Aspergillus* sp. ، *Fusarium* sp. ، *Sclerotium* sp. ، *Penicillium* sp. بالإضافة إلى غيرها من الأجناس الأخرى وتنمو هذه البكتيريا والفطريات في منابت غذائية معملية تحتوى على فوسفات الكالسيوم الثلاثية غير الذائبة $Ca_3(PO_4)_2$ ولا يقتصر فعل هذه الميكروبات على مجرد القيام بتمثيل هذا العنصر بل أنها تقوم بتحويل جزء كبير منه إلى الصورة الذائبة بكميات تتجاوز إحتياجاتها الغذائية منه وبذلك يكون الزائد عن حاجتها موجوداً في

الوسط المحيط بالميكروب . ويعتبر قيام الميكروبات بإنتاج الأحماض العضوية هو الوسيلة الأساسية التى تمكن الكائنات الحية الدقيقة من تحويل مركبات الفوسفور غير الذائبة إلى الصورة الذائبة الصالحة لإحتياج النبات .

ولقد وجد أنه عند تحضير خليط من التربة أو السماد العضوى مع الكبريت المعدنى وصخر الفوسفات فإن إستمرار عملية أكسدة الكبريت إلى حامض كبريتيك بواسطة البكتيريا من جنس *Thiobacillus* يصاحبها زيادة في حموضة المخلوط مع إنتاج الفوسفات الذائبة . وقد يعمل تواجد الكثير من الكائنات الدقيقة المذيبة للفوسفات في منطقة الريزوسفير Rhizosphere على الإسراع من تمثيل النباتات الراقية لعنصر الفوسفور.

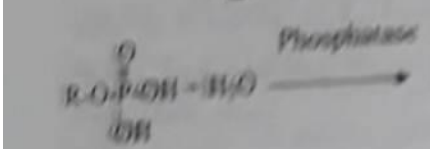
تلقيح التربة بالميكروبات المذيبة للفوسفات :

Soil inoculation with phosphate solubilizing bacteria

قامت دراسات عديدة بغرض تحضير لقاح بكتيرى له تأثير مشجع على نمو النباتات وإذابة الفوسفات غير القابلة للذوبان وأعطى لهذا اللقاح اسم Phosphobacterin . وهو عبارة عن سلالة بكتيرية لميكروب *Bacillus megatherium* var. *phosphaticum* محملة على حامل من الكاؤلينايت Kaolinite أو مادة عضوية ويتم ذلك بتلقيح البذور أو الجذور أو التربة، ولقد طبق ذلك على نطاق واسع وقد أعطى نتائج محمودة واعدة .

تتم معدنة الفوسفور في الأراضى البكر أسرع منها في تلك الأراضى المنزرعة. وبالإضافة إلى زيادة الكمية الكلية التى تتم معدنتها في الأراضى البكر فإن النسبة المئوية للفوسفور العضوى الكلى الذى يتم تحويله تكون الأخرى أكبر في الأراضى البكر عنها في تلك الأراضى المنزرعة. تناسب

وهى قواعد نيتروجينية مثل قواعد البيورين و البيريميدين وسكريات خماسية والتى تقدر الميكروبات على تمثيل الفوسفات المعدنية فى التربة بمعدل سرعة إنزيم Phosphatase تحليل مقدار الميكروبات على إذابة الفوسفات حيث أن هذا الإنزيم يفكك و فضلة الأنشر بين مجموعات الفوسفات وباقى المركبات العضوية مما يحرر الفوسفات إلى صورة معدنية قابلة للإستفادة بواسطة النبات حيث يجرى الإنزيم التفاعل التالى :



تحويل الفوسفور فى أجسام الميكروبات P-immobilization

تحتاج الميكروبات إلى الفوسفور لبناء أجسامها مثل غيرها من الأحياء وذلك فإن تواجد هذا العنصر فى صورة معدنية يكون ضروريا لقيام الميكروبات بوظائفها الحيوية وتحت الظروف العادية فإن كمية الفوسفور الجاهزة فى التربة تكون كافية للنشاط الميكروبى وذلك عند إضافة مادة عضوية غنية بالكربون سهلة التحلل وفقيرة فى الفوسفور فإن الميكروبات لا تجد ما يكفيها من الفوسفور لبناء أجسامها من هذه المادة وبذلك فإنه أثناء التحلل لا يحتمل معدنة تكميلات الفوسفور القليلة الموجودة فى تلك المادة العضوية حيث تمثلها الميكروبات فى أجسامها وإن لم تكفيها فإنها تلجأ إلى الفوسفور المعدنى الذائب والموجود فى التربة لإستكمال إحتياجاتها من الفوسفور مما يقلل الفوسفور الجاهز للنبات فى التربة . وقد يذكر المحصول من ذلك لحد كبير وتسمى هذه العملية بإسم تثبيت الفوسفور فى أجسام الميكروبات Immobilization . أما إذا أضيفت للتربة مادة عضوية غنية

بحامض مخفف ويكون هذا الجزء جاهزاً وميسراً للنبات . ولقد وجد أن ميكانيكية إحتفاظ التربة بالفوسفور تضم تفاعلات عديدة وهى:

أولاً : إحتفاظ التربة الحامضية بالفوسفور

١- صورة أكاسيد الحديد والألمونيوم

إن الأكاسيد المائية لهذه المعادن قد توجد بصورة منفردة أو على شكل مواد مغلفة لحبيبات التربة حيث تتفاعل مع الفوسفور الذائب في محلول التربة الحامضية على صورة H_2PO_4 وينتج عنه فوسفات الحديد أو الألمونيوم المرتبطة بالمعادن وبذلك يتحول الفوسفور الذائب الميسر للنبات إلى فوسفور غير ذائب.

٢- صورة أيونات الحديد والألمونيوم

في التربة الحامضية ذات درجة الـpH المنخفض يزداد تركيز أيونات الحديد والألمونيوم في محلول التربة التى تقوم بدورها بالتفاعل مع الفوسفور الموجود على صورة H_2PO_4 الذى يكون بصورة ذائبة وجاهزة للإمتصاص بواسطة النبات . ونتيجة هذا التفاعل يتحول الفوسفور الذائب والجاهز إلى فوسفور غير ذائب مترسب وغير جاهز للإمتصاص بواسطة النبات على شكل فوسفات الحديد والألمونيوم وبذلك يترسب فوسفور التربة .

٣- التثبيت في الطين السليكاتى

يمكن لفسفور التربة الذائب أن يتحد بمعادن الطين مثل الكاؤلينيت ، المونتمورولنيت والأليت في التربة المتوسطة الحموضة وهذا يحصل إما عن طريق إزاحة مجاميع الهيدروكسيل من على سطح بلورات معادن الطين ويحل محلها الفوسفور الذائب . إن بعض معادن الطين تحتفظ أو تثبت

الفوسفور بكميات أكبر من الكميات التى تثبتها بعض معادن الطين الأخرى . والطريقة الأخرى للإحتفاظ تكون عن طريق إرتباط الكالسيوم الموجود على سطوح معادن الطين بصورة متبادلة مع الفوسفور الذائب في محلول التربة وبذلك تتكون رابطة من الطين-الكالسيوم-الفوسفور . ومثل هذا الإحتفاظ يسود في بعض معادن الطين .

ثانياً : إحتفاظ التربة القاعدية بالفوسفور

وجد أن تفاعلات الفوسفور الموجودة في محلول التربة القاعدية تؤدى إلى إنخفاض جهازية الفوسفور ودرجة تيسره للنبات كما يلى :

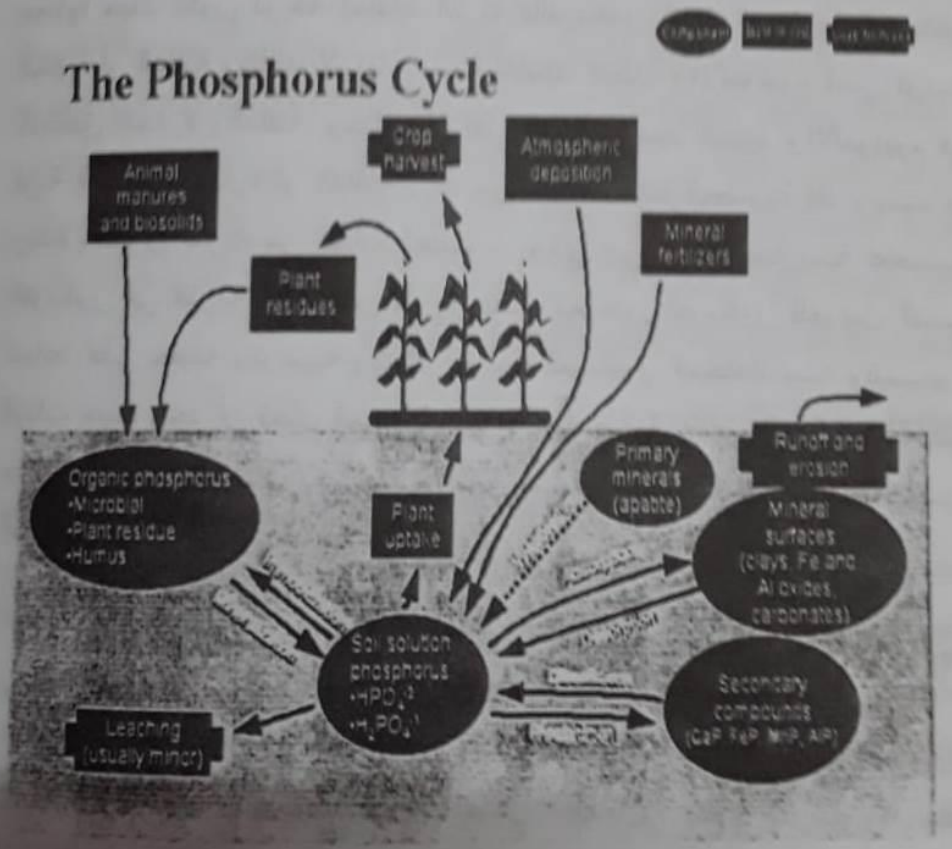
١- الترسيب على شكل فوسفات الكالسيوم الثنائية

يزداد نشاط وتركيز أيونات الكالسيوم في التربة القاعدية التى تؤدى إلى تقليل جهازية الفوسفور وذلك بتحويله من صورة ذائبة إلى صورة غير ذائبة . وهذا يكون عن طريق تفاعل أيونات الكالسيوم الموجودة في محلول التربة مع الفوسفور الموجود بصورة HPO_4 وترسيبه على شكل فوسفات الكالسيوم الثنائية أو فوسفات الكالسيوم الثلاثية وبهذا تقل درجة ذوبان وجهازية الفوسفور في التربة . هذا ومن المعروف أن درجة ذوبان فوسفات الكالسيوم الأحادية تكون أكبر من درجة ذوبان فوسفات الكالسيوم الثنائية التى بدورها تكون درجة ذوبانها أكبر من فوسفات الكالسيوم الثلاثية .

٢- الترسيب على سطح حبيبات كربونات الكالسيوم

تقل جهازية الفوسفور في التربة القاعدية التى تحتوى على كربونات الكالسيوم بصورة حرة وذلك بسبب ترسب أيونات الفوسفور التى تكون قريبة

شكل رقم ٢٢ التحولات الميكروبيولوجية للمركبات الكبريتية فى التربة الزراعية



شكل رقم ٢٢ : التحولات الميكروبيولوجية للمركبات الفوسفورية فى التربة الزراعية