كلية العلوم

القسم : **الكيمياء**

السنة : **الثالثة**

المادة : كيمياء بيئية

المحاضرة :**10+11**/نظري/ د .رهام معلا

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

جامعة طرطوس

كلية العلوم

قسم الكيمياء

الكيمياء البيئية

القسم النظري

المحاضرة 10+11

مدرس المقرر

د. رهام معلا

العام الدراسي

2025/2026

الفصل الخامس عشر

المادة العضوية والمعدنية في التربة

Organic and Mineral Matter in Soil

١٥-١: المادة العضوية: *Organic Matter*

أعطي اهتمام كبير للمادة العضوية في التربة؛ لكونها ذات تأثير كبير في مراحل تشكل التربة وخصوبتها. وتراوح نسبتها في التربة الزراعية بين *(1-10%)*، وقد تصل إلى *(10-40%)* في الترب الطينية الخام *Muck*، وتزيد على *40%* في الترب الخثية *Peat Soils* (ترب تحتوي على خشب صخري نصف متفحم).

تعرف المادة العضوية في التربة بأنها بقايا نباتية وحيوانية، وبقايا أحياء دقيقة متحللة جزئياً أو كلياً في التربة، وتتضمن بناء على تعريف كونونوفا *(Kononava 1966)* المواد الدبالية المقاومة للتحلل، والمنتجات العضوية عبر مراحل التحلل المتقدمة، ثم المواد العضوية المصنعة من قبل الأحياء الدقيقة؛ مثل أشباه البروتينات *Protein-like Substances*، والكربوهيدرات *Carbohydrates*، والشموع *Waxes*، والدهون *Fats*، وحمض التنيك *Tannin*، واللجنينات *Lignins*... إلخ، وتتضمن أيضاً البقايا النباتية والحيوانية المتراكمة حديثاً التي لم يطرأ عليها إلا القليل من التحلل، وقد صنف كونونوفا المادة العضوية في التربة ضمن مجموعتين هما:

المجموعة الأولى: تتضمن المواد ذات الطبيعة غير المحددة وتنتمي، إلى صفوف عدة في الكيمياء العضوية.

المجموعة الثانية: تتضمن المواد الدبالية ذات الوزن الجزيئي المرتفع، والمحدد، وذات الطبيعة المعقدة.

١٥-٢: تشكل الدبال: *Humus Formation*

يشكل الدبال القسم الأكبر من المادة العضوية *(85-90%)* في التربة الناضجة، ويتشكل عبر مرحلتين معقدتين، يتم خلالهما عمليات تحلل البقايا النباتية والحيوانية وتحولها، ثم عمليات التصنيع أو البناء.

تحدث عمليات التحلل والتفكك للمكونات الأصلية للأنسجة بوساطة الأحياء الدقيقة إذ تتحلل إلى مركبات كيميائية أبسط ولدرجة جزئية إلى مركبات تامة التحلل، أو منتجات نهائية $H_2O, CO_2, CH_4, NH_3, NO_3, ...$ ، أما عمليات التصنيع أو البناء فتتم من خلال مركبات عضوية بسيطة، ويتشكل نتيجتها مواد دبالية، مرتفعة الوزن الجزيئي، وذات طبيعة محددة.

يرافق إضافة البقايا النباتية والحيوانية للتربة تضاعف سريع في أعداد الأحياء الدقيقة، وانطلاق كميات من غاز CO_2 الذي يعد دليلاً مباشراً لقياس درجة تحلل المادة العضوية، وتجدر الإشارة أن معدل التحلل ومداه، فيتأثران بعوامل عدة.

١٥-٣: العوامل المؤثرة في تحلل المادة العضوية:

١: تركيب المادة العضوية:

تحتوي البقايا النباتية والحيوانية في التربة على أنواع عدة من المركبات التي تختلف في درجة تحللها، وسهولة مهاجمتها من قبل الأحياء الدقيقة، فالمواد الشمعية والليجنين مادة عضوية تتشكل مع السيللوز النسيج الخشبي تتصف بمقاومتها العالية للتحلل الميكروبي، على حين تتصف البروتينات البسيطة والكربوهيدرات، بسهولة تحللها، وقد أشار روكيت *Lochett 1937* إلى أن معدل تحلل المواد العضوية ذات الأصل، النباتي يتوقف على تركيب النبات الأصل. فكلما كان تركيز المواد العضوية الذوابة بالماء (خصوصاً الآزوتية والكربوهيدراتية) كبيراً كان معدل التحلل سريعاً. أما كونونوفا *(Kononova 1966)* فقد أشارت إلى أنه يمكن حساب معدل التحلل من النسبة بين مجموعة المركبات السهلة التحلل ومجموعة المركبات الليجنينية الصعبة التحلل.

٢: الأحياء الدقيقة:

توجد أعداد كبيرة من الأحياء الدقيقة في التربة، ولكل منها قدرة معينة على مهاجمة المواد العضوية، لكن تحت ظروف معينة يكون أحد الأنواع أكثر نشاطاً من

غيره، وقد تحصل ظروف نمو محيطة الأقل ملاءمة للأنواع الأخرى حتى يبقى هذا النوع مسيطراً لفترة ما.

٣: وفرة العناصر الغذائية:

تحتاج الأحياء الدقيقة التي تحلل المواد العضوية إلى كافة العناصر الغذائية التي تحتاج إليها النباتات العليا، لذا يعد توافر هذه العناصر ضروري، وأي نقص في أحدها قد يؤثر في نشاط الأحياء الدقيقة أو نشاط أنزيماتها، وعلى الأرجح يعد الآزوت أكثر العناصر الغذائية احتياجاً نظراً للحاجة إليه بكميات كبيرة نسبياً من أجل تصنيع البروتين البكتيري.

٤: الرطوبة: *Moisture*

تؤثر كمية الرطوبة التي توجد في التربة على حركة الهواء وكمية غاز CO_2، وأي زيادة لأي منهما على حد معين تكون على حساب الأكسجين المتوافر لنمو الأحياء الدقيقة، ومن ثم ستؤثر في معدل تحلل المادة العضوية.

تتأثر رطوبة التربة بعوامل عدة، أهمها عوامل بيئية، وعوامل تتعلق بالخصائص الفيزيائية للتربة، وكذلك مستوى الماء الأرضي. تؤثر هذه العوامل تؤثر معاً أو بصورة منفصلة في النسبة المئوية للرطوبة في التربة، وبالتالي في النشاط الحيوي داخل التربة.

٥: درجة الحرارة: *Temperature*

تعد درجة الحرارة من أهم العوامل التي تؤثر في معدل تحلل المادة العضوية، فكل نوع من أنواع الأحياء الدقيقة يعمل عند درجة حرارة مفضلة للقيام بأنشطته الحيوية على أحسن وجه، وإن زيادة درجة الحرارة بمقدار $(10\,^{\circ}C)$ ضمن المدى الحراري المفضل لبكتريا معينة يؤدي إلى تضاعف نشاط هذه البكتريا بمعدل (٢-٣) مرات، تماماً كما هي الحال في التفاعلات الكيميائية.

٦: تفاعل التربة: *Soil Reaction*

يؤثر تفاعل التربة في ذوبان العناصر الغذائية فيها، ونوع المحصول الذي يمكن أن ينمو، ومن ثم في نوعية البقايا النباتية المتساقطة على سطح التربة، وهذا يؤثر

بالطبع على معدل هذه البقايا إلى دبال ومداه، ويحدد في الوقت نفسه تفاعل التربة، وكذلك نوع الأحياء الدقيقة التي تنمو وتسيطر في التربة.

٧: التهوية: *Aeration*

تؤثر التهوية في عملية تحلل المادة العضوية عبر تحديدها لطبيعة الأحياء الدقيقة التي تعيش في التربة، والتي تقوم بعملية التحلل. تؤثر التهوية أيضاً في معدل التحلل، وطبيعة منتجاته النهائية.

٨: المواد المنشطة في التحلل: *Active Materials in Decomposition*

يمكن لبعض المركبات العضوية كالتانينات، والمضادات الحيوية، أن تؤثر في نمو الأحياء الدقيقة ونشاطها، وتمنع وتقلل من معدل تحلل المادة العضوية في التربة.

تفرز المضادات الحيوية من قبل بعض الفطور؛ لحماية نفسها، أو تنتج عرضياً كفضلات لهذه الفطور، وفي كلتا الحالتين تنتشر هذه المركبات العضوية في الوسط المحيط، وهذا يؤثر سلبياً في نشاط الأحياء الدقيقة الأخرى خصوصاً البكتريا.

لحظ كل من باسارابا وستاركي *(Basaraea and Starsky 1966)* أن التانينات تشكل معقدات مع الجيلاتين *Gelatin*، والجليادين *Gleadin*، وتزيد مقاومتها للتحلل الميكروبي، أما بنويت وستاركي *(Benoit an Starkey 1968)* فقد وجدا أن الـ *(Wattle Tanin)* قد أثر في نشاط أنزيمات *Polygalactorenase*، و *Cellulose*، و *Urease*، ومنعها من القيام بنشاطها تماماً عند تراكيز معينة.

يتأثر تحلل المادة العضوية بتراكم الأملاح، ونواتج التفاعلات الحيوية في التربة وكذلك ببقايا المبيدات الفطرية ومبيدات الأعشاب.

١٥-٤: النسبة $\frac{C}{N}$: *Ratio* $\frac{C}{N}$

أصبح من المعروف منذ وقت طويل أن نسبة وزن الكربون العضوي إلى وزن الآزوت العضوي $\frac{C}{N}$ في التربة هي رقم ثابت تقريباً.

تتغير هذه النسبة عادةً بين *8,5 – 12,8*، وقد وجد أنها تساوي نحو ١٠ في معظم الأراضي المتعادلة، وحيدة الصرف، في العالم.

يمكن أن تصل النسبة $\frac{C}{N}$ في الأراضي الرطبة، سيئة الصرف، وتحت الظروف الحامضية (١٧)، وتنخفض النسبة $\frac{C}{N}$ مع العمق في التربة، وقد تصل إلى

٤، بسبب آزوت التابع لشاردة الأمونيوم (NH_4^+) المميز على غرويات التربة كجزء من الآزوت العضوي، إضافة إلى أسباب أخرى تتعلق بتغير تركيب المواد الدبالية مع زيادة العمق.

يرافق إضافة البقايا العضوية إلى التربة تحلل هذه البقايا حتى تصل إلى مرحلة تصبح النسبة $\frac{C}{N}$ ثابتة، وفي المجال المألوف، فإذا كانت هذه البقايا مثلاً تحوي نسبة عالية من الكربون بحيث تكون النسبة $\frac{C}{N}$ عالية في هذه البقايا فإن إضافتها إلى التربة سيؤدي إلى تحللها، وإطلاق جزء من الكربون على هيئة غاز CO_2 بحيث تنخفض النسبة $\frac{C}{N}$، حتى تصل إلى المدى الذي ذكر سابقاً، أما إذا كانت البقايا تحوي نسبة عالية من الآزوت فإن عملية التحلل تطلق أيونات الأمونيوم (NH_4^+) في التربة. تجدر الإشارة أنه إذا كانت نسبة الآزوت منخفضة فإن عملية التحلل سوف يرافقها تثبيت الأمونيوم أو النترات على هيئة مركب عضوي، أو يزداد معدل تثبيت الآزوت الجوي حتى تزداد النسبة $\frac{C}{N}$، وتصل إلى الحد الشائع، عندها تستمر عملية التحلل مع المحافظة على نسبة متوازنة من $\frac{C}{N}$.

١٥-٥: أهمية المادة العضوية: *Importance of Organic Matter*

تمزج التربة كما هو شائع في الوقت الحاضر بالمادة العضوية على هيئة سماد بلدي أو سماد أخضر، وذلك بعد إدراك ولحظ الدور المهم الذي تقوم به في تحسين التربة الزراعية.

يمكن تلخيص أهمية المادة العضوية في الزراعة بالبنود الآتية:

١- تعد المادة العضوية مهمة في تكوين تربة خصبة، وتعد مصدراً للعناصر الغذائية التي تتحرر بأشكال قابلة للاستفادة منها خلال التمعدن.

٢- تحسن بناء التربة ومن ثم النفاذية والتهوية.

٣- تزيد من قدرة التربة على حفظ الماء وامتصاص الحرارة.

٤- تؤثر في عملية امتصاص العناصر الغذائية من قبل النبات، وبقائها في التربة؛ كونها تساهم إلى حد ما في تحديد الخصائص الفيزوكيميائية؛ كسعة التبادل الكاتيونية، والخصائص المنظمة.

١٥-٦: أنماط العناصر الغذائية في التربة:

Forms of Nutrient Elements in Soil:

تمد الأرض النبات الذي ينمو فيها بالماء وبالعناصر الغذائية، وتؤثر خصائص الأراضي الزراعية المختلفة في كمية النبات *Amount*، ومدى توافره *Availability*. ويعتبر الماء والعناصر الغذائية من عوامل النمو للنبات، ولقد سبق الحديث عن ذلك وسيتم هنا دراسة سلوك العناصر الغذائية في التربة؛ أي دراسة مايسمى بالسلوك الفيزيوكيميائي *Physicochemical Behaviour* لهذه العناصر ويشمل:

- دراسة صيغ مركبات العناصر في الأرض.
- دراسة درجة الذوبان المتباينة لهذه المركبات.
- متابعة تحول العنصر من صيغة إلى أخرى، ومعدل هذا التحول.

يمكن من خلال دراسة هذه الجوانب الثلاثة معرفة مدى توافر كل عنصر غذائي، ومقدار شدة توافره *Intensity*، ثم قدرة الأرض على إمداد المحاصيل المتتالية بهذا العنصر *Soil Supplying Power*، إذ إن الخصوبة الكامنة للأرض، أو حاجتها للتسميد يتوقف أساساً على معرفة مدى توافر كل عنصر غذائي فيها، وكذلك سلوك هذا العنصر بدءاً من مرحلة تشكله على هيئة مفيدة حتى تثبيته بغية عدم ضياعه من الوسط الذي ينمو فيه النبات.

١٥-٦-١: النتروجين: *Nitrogen*

يعد النتروجين من أكثر العناصر الغذائية تأثيراً في تحديد نمو النبات، لدخوله في العديد من المركبات المهمة داخل النبات مثل البروتينات، والكلوروفيل، والأحماض النووية وغيرها، ولذلك فإن نقص النتروجين في التربة يؤدي إلى نقص كبير في محصول النبات. تجدر الاشارة أن النتروجين لايدخل في تركيب أي معدن من معادن التربة الأولية أو الثانوية التركيب، يعود مصدر كامل النتروجين في التربة إلى النتروجين الهواء الجوي، وتجدر الاشارة إلى أن النباتات لاتستطيع الاستفادة من هذا النتروجين ما عدا بعض نباتات العائلة البقولية التي لها قدرة على تثبيت النتروجين الجوي، أما باقي النباتات فيلزمها ضرورة تحول النتروجين إلى نترات حتى تستطيع امتصاصه.

- تثبيت النتروجين الجوي: *Nitrogen Fixation*

توصف عملية تثبيت النتروجين بأنها عملية تحويل النتروجين الغازي إلى إحدى مركبات النتروجين غير العضوية (المعدنية)، ويوجد نوعان من عملية التثبيت:

تثبيت غير حيوي: يتم إما طبيعياً في أثناء البرق والعواصف، وإما كيماوياً في أثناء صناعة الأسمدة حيث يتم اتحاد النتروجين إما مع الأكسجين لتكوين النترات، وإما مع الهيدروجين لتكوين النشادر.

تثبيت حيوي: ويضم نوعين من البكتريا هما البكتريا العقدية التي تعيش في جذور النباتات البقولية، ثم البكتريا غير العقدية التي تعيش في التربة.

١٥-٦-٣: صيغ النتروجين في التربة:

تنقسم صيغ النتروجين في التربة إلى:

أ- الصيغ المعدنية:

تشمل الصيغ المعدنية أيونات النترات، التي توجد ذائبة في التربة وأيونات الأمونيوم التي توجد بمعظمها في حالة تبادل على سطوح العقد الغروية، كما تحتوي التربة على أيونات النتريت كمرحلة وسطية لعملية ارجاع النترات إلى نتروجين، ولاتمثل الصيغ المعدنية إلا حوالي *1-2%* من الكمية الكلية للعنصر، وتوجد هذه الصيغ داخل المادة العضوية، وهي صيغ ضعيفة الفائدة للنبات، وتمثل حوالي *98-99%* من كمية النتروجين الكلية في التربة، تؤدي العوامل التي تزيد من محتوى التربة من المادة العضوية إلى زيادة محتوى التربة من النتروجين، ويقل عموماً محتوى التربة من المادة العضوية، ومن ثم يقل محتواها من النتروجين كلما كانت التربة خشنة القوام (الأراضي الرملية) ويزداد في الأراضي الطينية.

تحتوي الترب المعدنية على *1-2%* مادة عضوية كما أن الكمية الكلية للنتروجين تراوح بين *1-0,50* كجم/لتر.

ب- الصيغ العضوية:

يوجد النتروجين في المادة العضوية على هيئة أمين (NH_2)، ولاتستطيع النباتات الراقية الاستفادة مباشرةً من هذه الصيغة إلا بعد تحلل المادة العضوية وانطلاق النتروجين منها، وتحويله إلى إحدى صيغ النتروجين المعدنية، تسمى هذه العملية تمعدن (معدنة) النتروجين *Nitrogen Mineralization*، وهناك أنواع عدة من

الكائنات الحية الدقيقة في التربة تقوم بأكسدة كربون المادة العضوية إلى غاز CO_2، في حين يبقى النتروجين على هيئة أمونيوم ويسمى هذا التفاعل بالنشدرة *Ammonification* ويجري على مراحل وفق الآتي:

$$\text{Pr}\,otens \longrightarrow R-NH_2 + CO_2 + \text{طاقة} + \text{نواتج أخرى}$$

$$R-NH_2 + HOH \longrightarrow NH_3 + R-OH + \text{طاقة}$$

يتفاعل النشادر المتشكل مع الماء أو حمض الكربون مكوناً أيونات الأمونيوم NH_4^+ وفق التفاعل:

$$NH_3 + HOH \longrightarrow NH_4OH \longrightarrow NH_4^+ + OH^-$$

$$2NH_3 + H_2CO_3 \longrightarrow (NH_4)_2CO_3 \longrightarrow NH_4^+ + NH_4CO_3^-$$

يمكن أن تخضع أيونات الأمونيوم الناتجة عن العملية السابقة إلى الآتي:

أ- تمتص بوساطة النباتات.

ب- تمتز على سطح الطين مثل أي كاتيون آخر.

ج- يجري تثبيت *Fixation* بين طبقات بعض معادن الطين.

د- تحدث لها عملية نترجة *Nitrification* بفعل البكتريا.

تتم عملية النترجة على مرحلتين:

يتم في المرحلة الأولى أكسدة أيون الأمونيوم إلى أيون النتريت (NO_2)، ويقوم بهذه العملية مجموعة من البكتريا تسمى *Nitrosomons*.

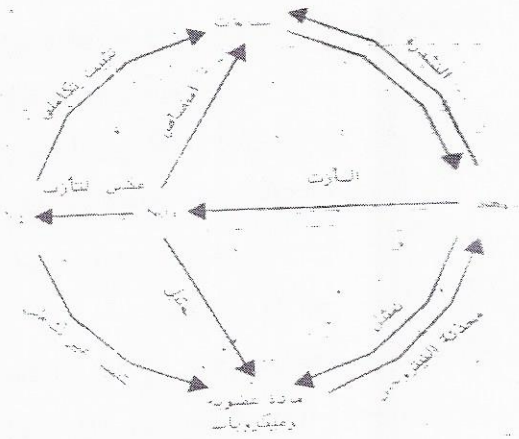
$$2NH_4^+ + 3O_2 \xrightarrow{\text{نتروموناس}} 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+$$

$$2NO_2^- + O_2 \xrightarrow{\text{نترويكتر}} 2NO_3^- + \text{طاقة}$$

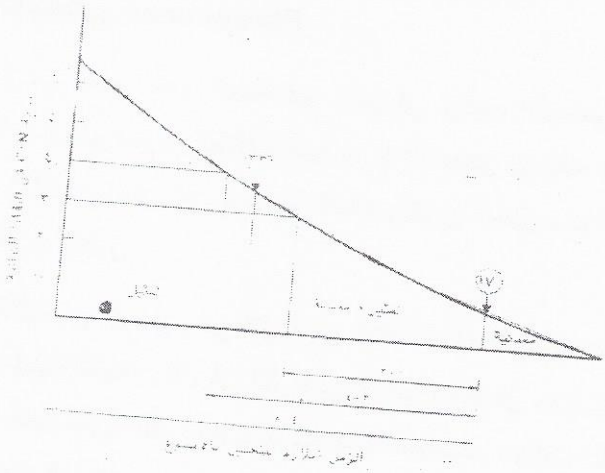
تحتاج عملية النترجة إلى توافر قدر كافٍ من هواء التربة، ووجود رطوبة أرضية مناسبة (*60-70%* من السعة الحقلية)، وأيضاً رقم هيدروجيني مناسب، وفي حالة سوء التهوية، أو رطوبة عالية، أو رقم هيدروجيني غير مناسب، وفي حال وجود أنواع خاصة من البكتريا والفطور فإن النترات الناتجة سوف ترجع إلى نتريت ثم إلى نتروجين غازي يتصاعد في الجو، مما يفقد التربة النتروجين اللازم لنمو النباتات النامية، وتسمى هذه العملية بعملية إزالة النتروجين *Denitrification* وفق الشكل (١٥-١) يتحول النتروجين المعدني من قبل الكائنات الحية الدقيقة إلى النتروجين في المادة العضوية، فكلما كانت نسبة الكربون إلى النتروجين في المادة العضوية كبيرة

(أكبر من *1:33*) تزداد امكانية حدوث عملية التمثيل الضوئي، ويحدث نقص شديد في النتروجين المعدني في الترب عبر تحوله إلى نتروجين عضوي داخل أجسام الكائنات الحية الدقيقة مما يجعل النباتات النامية تعاني من نقص النتروجين القابل للامتصاص، أما إذا كانت نسبة الكربون:النتروجين في المادة العضوية محدودة *(1:17)* فإن ذلك يؤدي إلى الإسراع غي عملية تمعدن النتروجين، فتجد النباتات النامية حاجتها من النتروجين المعدني. تسير كلا العمليتين السابقتين بين النسبتين المذكورتين جنباً إلى جنب بمعدل واحد تقريباً (شكل ١٥-١، ١٥-٢).

يتضح من الرسم أنه يلزم مدة لاتقل عن *8* أسابيع إذا كانت نسبة *C:N* في المادة العضوية حوالي *1:60*، أما إذا زادت النسبة على ذلك كما هو الحال في تين النجيليات التي تبلغ نسبة *C:N* فيها أكثر من *1:100* فلايمكن الزراعة إلا بعد عدة شهور، ويمكن تقصير تلك الفترة بإضافة أي سماد آزوتي معدني إلى التربة؛ بغية العمل على تقليل نسبة *C:N*، أما في حالة البرسيم الذي تكون نسبة *C:N* فيه حوالي *1:20* فيمكن الزراعة بعد *10-15* يوماً.



شكل (١٥-١): دور النتروجين في التربة



شكل (١٥-٢): علاقة نسبة *C:N* بالمادة العضوية بالزمن اللازم لتمعدن النتروجين

يتجلى فقدان النتروجين من التربة بطرائق مختلفة وخاصةً في عمليات الغسل والتطاير.

يمكن حل هذه المشاكل عملياً باتباع الآتي:

١- حرث مخلفات المحاصيل في الأرض بهدف زيادة نسبة المادة العضوية فيها.

٢- إضافة الأسمدة العضوية المختلفة.

٣- إضافة الأسمدة النتروجينية المعدنية.

٤- اتباع دورة زراعية ملائمة يكون أحد محاصيلها من العائلة البقولية، خصوصاً تلك المستخدمة في الرعي (البرسيم والبرسيم الحجازي) لا المستخدمة في إنتاج البذور (الترمس والفول).

٥- عدم الإسراف في استعمال مياه الري خصوصاً في الأراضي الرملية.

٦- إضافة السماد على دفعات وعند الحاجة إليه، خاصةً في الأراضي الخشنة القوام (الرملية).

يفضل عملياً محاولة المحافظة على المستوى المعتاد (المتزن) فقط من النتروجين في الأرض، وفي الوقت نفسه العمل على جعل النتروجين في حالة نشطة مناسبة لزراعة البقوليات وإضافة المادة العضوية ذات نسبة *C:N* محدودة.

١٥-٦-٣: الفوسفور: *Phosphorus*

يوجد الفوسفور في جميع الخلايا الحية، فهو يدخل في تركيب الأحماض النووية *(DNA, RNA)*، كما يدخل في تخزين الطاقة ونقلها من خلال بعض مركباته الفوسفاتية عالية الطاقة *(ATP, ADP)*، ويحفز الفوسفور نمو النبات وتكوين الجذور، كما يسرع من عملية النضج، وتكوين البذور.

تراوح الكمية الكلية من الفوسفور في التربة بين *0,05-0,35%*؛ إذ تزداد هذه الكمية في الأراضي الطينية الثقيلة، وتقل في الأراضي الرملية، وتتركز معظم هذه الكمية في الطبقات السطحية للتربة نظراً لسوء حركة هذا العنصر، ولقلة الكمية المفقودة منه بوساطة الماء المرتشح.

١٥-٦-٢-١: صيغ الفوسفور في التربة، ومصادره:

أ- الصيغ العضوية:

ينتمي إلى هذه الصيغ الفوسفور الذي يرتبط بأصل عضوي في التربة، وتتوقف كميته على مقدار المادة العضوية المتوافرة، وتراوح كمية الفوسفور العضوي بين *30-75%* من الكمية الكلية للفوسفور في التربة ولقد أمكن تمييز مكونات الفوسفور العضوي في الترب وفق الآتي:

١- الفيتين *Pirl/tin* ومشتقاته، ويشكل *40-80%* من محتوى المواد الدبالية من الفوسفور، وهو يوجد على هيئة أملاح كالسيوم ومغنزيوم في الأراضي القلوية، أو أملاح حديد وألمنيوم في الأراضي الحامضية، ويعد هذا المركب مخزون الفوسفور داخل النبات، ومصدراً مهماً للفوسفور العضوي في التربة.

٢- الأحماض النووية: تشكل *0-10%* من الفوسفور العضوي.

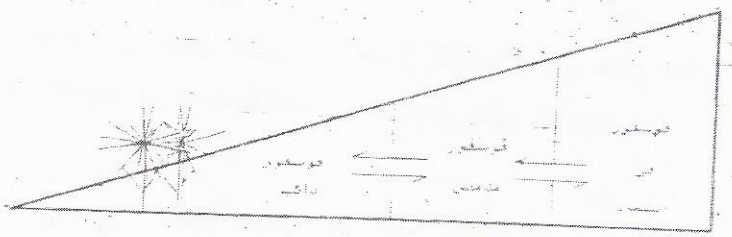
٣- الفوسفوليبيدات: تشكل *0,3%* من الفوسفور العضوي.

تتوقف عملية انطلاق الفوسفور العضوي إلى محلول التربة على ظروف التربة نفسها حيث يسير موازياً لتحلل كل من النتروجين والكربون، كما يعد الفوسفور أكثر حساسية للتغيرات الطارئة على رقم *pH* التربة.

ب- الصيغ المعدنية:

١- المعادن المحتوية على الكالسيوم: تسود في الأراضي القلوية والكلسية، وأهمها معدن الأباتيت *Apatite*، ورمزه $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$.

٢- المعادن المحتوية على الحديد والألمنيوم: تسود تحت الظروف الحامضة؛ مثل الإسترانجيت *Strengite*، ورمزه $Fe(OH)_2H_2PO_4$ والفارسكيت *Variscite*، ورمزه $Al(OH)_2H_2PO_4$، وتوجد معظم الكمية الكلية للفوسفور في التربة على هيئة المعادن السابقة الذكر، وهي ضعيفة الذوبان في الماء، أما الجزء القليل المتبقي منها فيوجد إما على هيئة فوسفات ممتزة على سطح الطين، والأكاسيد السداسية، وكربونات الكالسيوم، أو على هيئة ذائبة في محلول التربة. وتوجد الصيغ المختلفة للفوسفور في حالة توازن مستمر، حيث يعوض النقص في إحدى هذه الصيغ إمداد من الصيغ الأخرى، وإن كان معدل التعويض يختلف من صيغة إلى أخرى (شكل ١٥-٣).



شكل (١٥-٣): الاتزان بين صيغ الفوسفور المختلفة في التربة

١٥-٦-٢-٢: تثبيت الفوسفات: *Phosphate Fixation*

يبلغ تركيز الفوسفور الذائب في محلول الترب في حدود *0.1-1.0%* جزء في المليون، ولايزداد هذا التركيز كثيراً حتى عقب إضافة الأسمدة الفوسفاتية الذائبة إلى التربة بكميات كبيرة، ويعود سبب ذلك إلى حدوث عملية تثبيت الفوسفات *Phosphate Fixation* حيث تتحول الفوسفات الذائبة إلى فوسفات غير ذائبة نتيجة لتفاعلها مع العديد من المركبات في التربة، تعد عملية التثبيت عملية مفيدة حيث أنها تحفظ العنصر من الضياع تحت تأثير عمليات الغسل مع ماء الصرف، كما أنها عملية ضارة أيضاً حيث تقلل صلاحية العنصر للامتصاص بوساطة النباتات، ويتم تثبيت الفوسفور في التربة على النحو الآتي:

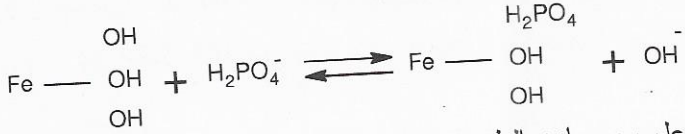
أ- الترسيب في محلول التربة:

يترسب الفوسفات الذائبة في محلول التربة في الأراضي الحامضية عن طريق التفاعل مع أيونات الحديد والألمنيوم مكوناً مركبات فوسفات حديد وألمنيوم، أما في الترب القلوية والكلسية (كما هو الحال في الأراضي المصرية) فيتم الترسيب بوساطة

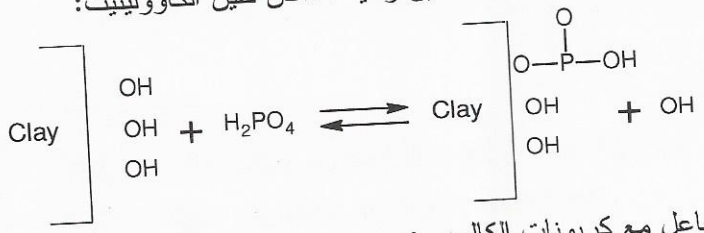
أيونات الكالسيوم مكونةً العديد من مركبات فوسفات الكالسيوم المختلفة في درجة ذوبانها حيث يتوقف ذلك على نسبة $Ca:P$ في محلول الترب.

$$Ca^{++} + H_2PO_4^- \rightleftharpoons CaHPO_4 + H^+$$

ب- التفاعل مع الأكاسيد السداسية: يتم امتزاز الفوسفات على سطح الأكاسيد السداسية؛ نظراً لوجودها على هيئة غروية *Gels* في التربة، ثم تحولها مع مرور الوقت إلى مركبات الفارسكيت أو الإسترانجيت:



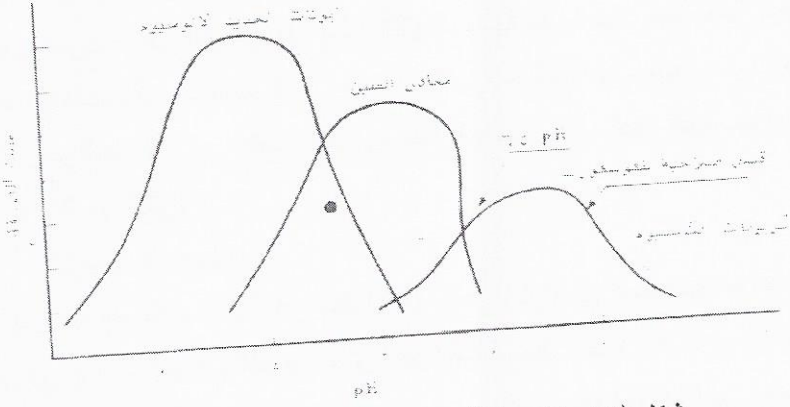
ج- التفاعل مع معادن الطين: يتم امتزاز الفوسفات على سطح معادن الطين ويزداد معدل الامتزاز بزيادة كمية الطين وسيادة معدن طين الكاؤولينيت:



د- التفاعل مع كربونات الكالسيوم:

يتم إمتزاز الفوسفات على سطح كربونات الكالسيوم، ويزداد معدل الإمتزاز بزيادة كمية كربونات الكالسيوم في التربة، وصغر قطر حبيباتها.

يوضح الشكل (١٥-٤) علاقة رقم pH في التربة بتثبيت الفوسفور.



شكل (١٥-٤): علاقة pH بتثبيت الفوسفور في التربة

١٥-٧: المادة المعدنية: *Mineral Matter*

يمكن الآن الانتقال إلى التحري بعض الخصائص الكيميائية للتربة، ذات الأهمية في الدراسة الشاملة للكيمياء البيئية لاسيما المادة المعدنية متجلية في عناصرها الكلية والثانوية والمتوافرة في المكون المعدني.

١٥-٧-١: العناصر الكلية: *Total Minerals*

تعد نقطة البداية المنطقية في هذا السياق هي معاينة التحليل الشامل للعناصر في التربة. يتضمن الجدول (١٥-٣) مجالات قيم نسب العناصر الرئسية وبعض العناصر الثانوية الموجودة في الجزء المعدني من التربة. يتحدد التركيب الكيميائي للتربة من خلال طبيعة المواد الأصلية التي تكونت منها، وبالسيبرورات التي خضعت لها مع مرور الوقت.

الجدول (١٥-٣): مجالات قيم العناصر الرئيسة والثانوية في المكون المعدني للتربة:

العناصر الرئيسة		العناصر الثانوية	
العنصر	%	العنصر	$mg\ kg^{-1}$
Si	*30-45*	*Zn*	*10-250*
Al	*2,4-7,4*	*Cu*	*5-15*
Fe	*1,2-4,3*	*Ni*	*20-30*
Ti	*0,3-0,7*	*Mn*	*400-*
Ca	*0,01-3,9*	*Co*	*1-20*
Mg	*0,01-1,6*	*Cr*	*10-50*
K	*0,2-2,5*	*Pb*	*1-50*
Nu	ضئيلة جداً –*1.5*	*As*	*1-20*

تجدر الإشارة أنه في كثير من الأحيان، لاتكون بيانات التركيب الكيميائي مفيدة، كونها لاتعطي صورة واضحة عما إذا كان العنصر مكوناً للشبكة المعدنية أو مقترناً بظاهرة الامتزاز السطحي. يلحظ في الحالة الأولى، وخاصةً فيما يخص معادن السليكا أن هذه العناصر تكون صعبة الذوبان في الماء إلا على مدى أحقاب جيولوجية، مما يجعل دورها ثانوياً في نمو النباتات أو فيما يخص معظم السرورات البيئية، أما العناصر التي تحتل مواقع مبادلة أيونات على جسيمات التربة، أو التي خضعت لامتزاز ضعيف، فهي متوافرة للتفاعلات الكيميائية والبيئية على نحو أكبر.تجدر الإشارة أن الكلمتان "متوافر" و "قابل للاستخلاص" واسعتا الاستعمال لدى علماء التربة،

وثمة تعاريف عملية واجراءات تحليلية لتحديد العناصر الموجـــودة بصـــيغة متـــوافرة للتفاعل. وهذا ماسيبحث لاحقاً.

تمثل المادة العضوية مكوناً صغيراً نسبياً (من حيث الكتلة) لمعظم أنواع الترب، لكنها تؤدي دوراً رئيساً يتجاوز نسبتها المحدودة. تمتزج المادة العضوية علـــى نحـــو وثيق مع التربة المعدنية، وتتحد معها كيميائياً في بعض الحالات، ومع أن هنـــاك ثمـــة استثناءات، فقد لحظ عادةً ميل عام نحو تناقص نسبة المادة العضوية مع ازدياد العمق. يتضمن الجدول (١٥-٤) قيماً تخص نسبة المادة العضوية في أنواع مختلفة من التربة القريبة من السطح. تعطي الطرائق التحليلية عادةً نسب مقادير الكربون العضوي فـــي التربة،إلا أنه وبناءً على فرضية تلقى قبولاً واسعاً، وتنص على أن الكربون يمثل نحو 60% من المادة العضوية، يستعمل عامل يساوي 1.7 لتحويل نسب الكربون العضـــوي إلى مادة عضوية.

الجدول (١٥-٤) مجالات نسب المادة العضوية في معظم أنواع التربة:

نوع التربة	نسبة المادة العضوية (%)
تربة زراعية في مناطق معتدلة	1-5
تربة زراعية في مناطق مدارية	0.1-2
تربة غابة (الطبقة السطحية)	>10
تربة حثية	>20

١٥-٧-٣: العناصر المتوفرة: *Available Elements*

يعدّ وفقاً لما أشير سابقاً أن العنصر المتوافر هو مقداره الموجـــود فـــي التربـــة والذي يمكن أن يشارك في تفاعلاتها الكيميائية والحيوية. وتحمل العبارتـــان "عنصـــر متوافر" و "عنصر قابل للاستخلاص" المدلول نفسه إلى حد ما من حيث المشاركة فـــي التفاعلات. يجري تحديد العناصر القابلة للاستخلاص بأخذ عينة من التربة في محلـــول مائي، يحتوي على كيماويات، تستطيع أن تحل محل جزء العنصر الذي يفتـــرض أنـــه متوافر بسهولة؛ لاستهلاكه من قبل النباتات، وتبعاً لطبيعة التربة والظـــروف البيئيـــة، اقترح كثير من مذيبات الاستخلاص *(Extractants)* والطرائق اللازمة للاســـتخلاص. يقوم معظم تلك الطرائق على مبدأ العمل الجماعي التضافري بغية إقصـــاء الأيونـــات الموجبة عن مواقع المبادلة (على غرار ما يحصل حين اســـتعمال خـــلات الأمونيـــوم

بتركيز يساوي $1 mol\ L^{-1}$ للاستخلاص). تتضمن بعض مذيبات الاستخلاص عوامل مخلبية تلتقط العنصر المشلول وتساعد على انحلاله في الماء (على غرار الاستخلاص بمحلول خماسي خلات ثلاثي أمين ثنائي الإثلين *diethylenetriaminepentaacetate DTPA*). ويمكن أن يؤدي استعمال عوامل التعقيد أيضاً إلى اذابة جزء أكبر من المعادن الانتقالية في الماء (الجدول ١٥-٥).

الجدول (١٥-٥): النسبة المئوية للمعدن الكلي المستخلص من التربة باستعمال مذيبي الاستخلاص الواردين في الجدول:

المستخلص	النسبة المئوية المستخلصة من التربة %				
	Co	*Ni*	*Cu*	*Pb*	*Cr*
$NH_4Oac\ (pH\ 7)$	1,3	2,7	5,0	8,7	0,11
DTPA					

١٥-٧-٣: نزر المعادن في التربة:

Trace Metals in Soil:

انصب الاهتمام عند استقصاء التربة الملوثة بالأملاح، على تراكم الأيونات المعدنية وفق صيغ أملاح مذابة بالقرب من سطح التربة. تعد أكثر أيونات المعادن وجوداً في التربة هي أيونات الصوديوم، والبوتاسيوم، والكالسيوم، والمغنزيوم، يمكن في ظروف بيئية مختلفة، أن تتراكم أيونات معدنية أخرى في التربة، إلا أن مقاديرها تكون عادةً أصغر بكثير من مقادير طائفة المعادن القلوية الترابية، والمعادن القلوية. يمكن لبعض هذه المعادن أن تكون معادن من النوع *B* ذات خصائص سامة، ويمثل وجودها في التربة، وتناولها من قبل النبات، أو تسربها إلى المياه الجوفية قضية بيئية مهمة.

يمكن لتراكيز المعادن المفرطة أن تكون ناتجة عن رواسب فلزات طبيعية، إلا أنها غالباً ما تكون نتيجة لأنشطة بشرية. يناقش الفصل التالي بعض الحالات التي ترمى فيها فضلات تحتوي على معادن على الأرض في التربة، في حين يناقش هذا الفصل المبادىء العامة التي تحدد مصير الأيونات المعدنية في التربة. يجري التعامل دوماً مع العلاقات بين التربة والماء، لذا فإن جميع المبادئ التي نوقشت سابقاً تنطبق على الحالة الراهنة أيضاً.

تجدر الإشارة إلى أن جميع العينات المائية حتى تلك التي تعد "نقيـــة"، تحتـــوي على مقادير ضئيلة من "الملونات". وليس من المفاجيء أن تظهر هذه الحالة على نحـــو أشد في التربة، فقد لحظ أن ثمة تركيزاً ضئيلاً لمعادن أقل شيوعاً إضافة إلى عناصـــر أخرى أيضاً. توجد المستويات المرصودة في كامل سطح التربة، وهي تعتمد على كثير من العوامل. يتضمن الجدول (١٥-٦) بعض مجالات التراكيز الشـــائعة مـــع قيمهـــا الوسطى (باستعمال $\mu g\ g^{-1}$ أو ppm في جميع الحالات) التي قام بقياسها عـــدد مـــن الباحثين في أنواع من الترب غير الملوثة بطرائق مختلفة. تجدر الإشارة أنـــه لايوجـــد إجماع، حول تعريف التلوث يمكن تطبيقه على التربة، إلا أنه غالباً ما توصف التربـــة الملوثة بأنها تلك التي تحتوي على تراكيز معدنية تزيد بـــ 3 مرات عن القيمة الوسطى الموصى بها.

الجدول (١٥-٦): تراكيز المعادن الثانوية، ومن ضمنها بعض أشباه المعـــادن فـــي تربة غير ملوثة، مقدرة بـــ $\mu g\ g^{-1}$:

العنصر	التركيز $\mu g\ g^{-1}$			
	الوسطي العالمي (المجال)	الوسطي العالمي (المجال)	الوسطي في الولايات المتحدة	الوسطى في كندا (المجال)
زرنيخ		6(0,1-40)		
كادميوم	0,5	0,06(0,01-7)		<1
كروم	200(00-300)	100(5-3000)	53	43(10-100)
كوبالت	8(10-15)	8(1-40)	10	21(5-10)
نحاس	20(15-40)	8(1-40)	10	21(5-50)
رصاص	10(15-25)	10(2-200)	20	20(5-50)
منغنيز	850(500-1000)	850(100-4000)	560	520(100-1200)
زئبق	0,01		0,071	0,059(0,005-0,1)
نيكل	40(20-50)	40(10-1000)	20	20(5-50)
سلينيوم	0,1	0,5(0,1-2)	0,45	0,26(0,03-2)
سترونسيوم	350	300(50-1000)	240	210(30-500)
زنك	50(50-100)	50(10-300)	54	74(10-200)

يطرح السؤال الآتي نفسه، من أين تأتي نزر العناصر إلى التربة؟ تشتق نزر المعادن إلى حد ما من المركبات المعدنية التي تعرضت لمفاعيل العوامل الجوية، وكونت التربة المعدنية، هذا لايعني أنها تعبر بالضرورة عن تركيب القاعدة الصخرية التي حولها؛ لأن كثيراً من التربة ينتقل من أماكن أخرى بوساطة الريح، أو الماء، أو الجليد. تحتوي المكونات العضوية للتربة على مقادير ضئيلة من معادن كثيرة يمكن أن تعود إلى مصادر محلية أو بعيدة. تنضم إلى مصادر معادن التربة "الأساسية" المهمة هذه مصادر أخرى، يعود أحداها إلى معلقات جوية متساقطة. يلحظ من لائحة تفصيلية، لأصل المعادن في الجو، أن المصادر المهمة تتضمن جسيمات تربة محمولة مع الرياح (غبار)، وغبار البراكين، ومواد عضوية طيارة أو جسيمية واردة من مناطق الغابات ومن ماء اليابسة، أما المصادر الحيوية فهي مهمة على وجه الخصوص لكثير من المعادن (التي تزيد نسبة انبعاثاتها السنوية إلى الجو عن *30%*)، ومن ضمنها معظم المعادن المدرجة في الجدول (١٥-٦). تمثل الانبعاثات الصناعية معظم ما ينبعث من الرصاص، والكادميوم، والزنك إلى الجو.

توجد المعادن في التربة بصيغ متنوعة، وفي بعض الحالات، توجد أيضاً على هيئة بنيوية لمعادن التربة، أو مكونات ثانوية متضمنة في مادة التربة العضوية. يمكن للمعادن أيضاً أن تتمتع بسيرورات امتزاز نوعية على سطوح أنواع مختلفة من مركبات معدنية متوافرة. يعد الالتقاط الكهرساكن بالأيونات سبباً لوجود نسبة إضافية من نزر المعادن على مواقع المبادلة المعدنية أو العضوية. يمكن أخيراً القول أنه يوجد تركيز(صغير جداً عادةً) لأصناف المعادن في ماء مسامات أية تربة.

تتمركز غالباً القضايا البيئية الناجمة عن نزر المعادن المتوافرة في التربة، في قابليتها للحركة، وهذه تعتمد على الصيغة التي يوجد فيها المعدن، وعلى الحالة البيئية. وأهم هذه العوامل البيئية هي المقدار، والطبيعة الكيميائية، وحركة الماء عبر التربة، وقد يكون المعدن الموجود في المادة اللاعضوية الأصلية غير متوافر بسهولة للتناول والتسرب، وتكون تلك المعادن، خاصةً في حالة أنواع السليكات، مقاومة للعوامل الجوية، ويمكن أن تبقى في الحالة الصلبة، مما يجعلها غير قابلة للحركة مقارنةً مع حالتها المذابة في محلول. يبقى الألمنيوم، الموجود في الصيغ المعدنية لسليكات الألمنيوم التي من قبل الفلسبار، خاملاً من حيث الجوهر على مدى سنوات أو عقود،

ولاتصبح مفاعيل العوامل الجوية التي أشرنا إليها سابقاً ملحوظة إلا بعد مدة زمنية أطول من تلك المدد بكثير.

توجد ثمة ارتباطات أخرى تتضمن الطور المعدني، وعلى وجه الخصوص المعادن المرتبطة كيميائياً ونوعياً بسطوح المعادن المختلفة، ووفقاً لما تم ذكره تعد أكاسيد الحديد والألمنيوم المائية مواقع امتزاز نشطة. يمكن أن تجعل انتقال المعادن في تلك المرتبطات نتيجة لظروف حمضية أو لتغيرات في حالة إرجاع التربة وأكسدتها. تعد ظروف الإرجاع مهمة جداً في هذا السياق، فحين إغراق تربة كانت توجد سابقاً في بيئة مؤكسدة ضمن ظروف جيدة للتهوية، تتقيد حركة الأكسجين مؤديةً إلى استهلاك الأكسجين الموجود سابقاً وفق تفاعلات هوائية تقوم بها كائنات حية دقيقة، وعندما ينضب الأكسجين، يمكن لأنواع أخرى أن تلعب دور مستقبلات للإلكترونات إلى جانب أنواع لاهوائية، مطواعة في التربة، وقد لحظ سابقاً أن الكبريتات والنترات هما نوعان من هذا النوع. يمكن لأطوار معدنية صلبة أن تحقق الغرض نفسه. يعد أكسيد المنغنيز *(IV)*، وأكسيد الحديد *(III)*، بصيغتهما المميأة مستقبلان مهمان للإلكترونات، وقد بينت دراسات ضمن ظروف محددة أن عبر سلسلة من تفاعلات الإرجاع حدوث ذلك عن إغراق التربة بالماء، وفيما يلي ترتيب تلك التفاعلات ومجالات قيم pE المقترنة بها:

$$O_2(aq)+3H_2O(aq.) \rightleftarrows 2H_2O_2(aq.)+H_2O \quad pE=6,3 to 5,8$$

$$H_2O_2(aq)+2H_3O^+(aq.)+2e^- \rightleftarrows 4H_2O$$

$$2NO_3^-(aq)+12H_3O^+(aq.)+10e^- \rightleftarrows N_2(aq.)+18H_2O \quad pE=4,2 to 3,6$$

$$MnO_2(s)+4H_3O^+(aq.)+2e^- \rightleftarrows Mn^{2+}(aq.)+6H_2O \quad pE=3,6 to 3,1$$

$$Fe_2O_3(s)+6H_3O^+(aq.)+2e^- \rightleftarrows 2Fe^{2+}(aq.)+9H_2O \quad pE=1,9 to 1,4$$

$$SO_4^{2-}(aq)+8H_3O^+(aq.)+8e^- \rightleftarrows S^{2-}(aq.)+12H_2O \quad pE=-0,7 to -1,4$$

تعد هذه التفاعلات عكوسة على الرغم من أن الأكسدة تحصل عند مجال لـ pE، يزيد بـ $0,8$ وحدة تقريباً على ذاك اللازم للإرجاع المعاكس. يلحظ من نتيجة

التفاعلين الرابع والخامس أن معدني أكسيد الحديد والمنغنيز المميأة في التربة تكون عرضةً للإرجاع، وهي التي تحول المعدنين إلى صغية الصنف $+2$.

يعد المنغنيز، والحديد على وجه الخصوص، مكونين مهمين كمياً للتربة، وتكون نزر العناصر عرضةً لظاهرة تحريك وشل مشابهة. تعد بعض تلك الظواهر مفاعيل من المرتبة الثانية، ذات صلة بسلوك العناصر الرئيسة، والزرنيخ مثال جيد عنها، فعندما تكون قيم PE مرتفعة، يوجد الزرنيخ وفق النوعين $H_2AsO_4^-$ و $HAsO_4^{2-}$، اللذان يمتزان بقوة بوساطة أكاسيد الحديد المائية في التربة، إلا أنه وضمن ظروف الإرجاع وخلافاً له يؤدي إلى جعل الحديد قليل الذوبان وفق التفاعل الخامس، إلى تحرير الحديد مع زرنيخ كان قد امتز على سطح أكسيد الحديد. يحول الإرجاع أيضاً الزرنيخ *(V)* إلى زرنيخ *(III)* بصيغة الحمض الضعيف H_2AsO_3 ضمن معظم الظروف البيئية، ومن العوامل الأخرى التي تؤثر في قابلية المعدن للذوبان ترسيبه على هيئة كبريتيدات المعدن، وتجدر الإشارة أنه عندما تكون قيم pE منخفضة انخفاضاً كافياً لإرجاع الكبريتات الى كبريتيد (التفاعل السادس)، يشكل الأيون الـ S^{2-} مع عدة معادن؛ منها النحاس، والنيكل، والزنك، مركبات صعبة الذوبان جداً في الماء، وهذا ما يفسر ضعف قابليتها للذوبان في ماء مسامات التربة، وتجدر الإشارة أنه إذا حدثت عملية أكسدة لاحقة للتربة الحاضنة تحررت نزر المعادن وعادت من جديد إلى المحلول الذي يحتويها.

يمكن للمادة العضوية أن تساعد أيونات المعادن على الحركة، أو شلها، وتتحدد قابلية ذوبان المعادن، التي تمثل مكونات بنيوية للمادة العضوية، أو تلك التي تكون معها معقدات قوية، من خلال قابلية تلك المادة العضوية للذوبان. يعد التفكك الذي يحدث غالباً بغية تكوين نواتج أصغر، وأكثر قابلية للذوبان عاملاً مهماً في زيادة قابلية ذوبان تلك المعادن في مناطق الغابات المعتدلة. تغطى الطبقة المعدنية عموماً بطبقة من النفايات العضوية التي تتجدد سنوياً، تخضع هذه النفايات للتفكك؛ معطيةً نواتج تتضمن جزيئات صغيرة من الحموض العضوية ومادة دبالية مستقرة، غير قابلة للذوبان. تشكل الحموض العضوية مرتبطات مع كثير من المعادن، محسنة حركتها في الماء المتغلغل نحو الأسفل عبر التربة.

تجدر الإشارة إلى أن المعادن المقترنة بمعقد المبادلة، أكان معدنياً أم عضوياً، لاتمثل في معظم الحالات، سوى نسبة صغيرة من مقدار المعادن الكلي. ومع ذلك فإن هذه النسبة متاحة بيسر للنبات كي يتناولها، وهذه إيجابية عندما يكون المعدن مغذياً مكروياً ضرورياً، وسلبية إذا أدى إلى مفعول سمي. تعد المعادن الحرة الحركة قابلة للتبادل هي تلك الحرة الانتقال. والتي يمكن لأيونات أخرى، موجودة بتركيز كبير في محلول التربة، أن تحل محلها، ومنها أيونات الهيدرونيوم، وهو يمثل الجزء من معادن التربة الذي يصبح أكثر ذوبانيةً بوجود مضافات حمضية، وفقاً لما تمت الإشارة إليه في مقطع سابق.

يبدو من الواضح إذاً أن كثيراً من العوامل تتحكم بقدرة المعدن على الانتقال مع الماء إلى أسفل التربة. وإلى جانب القضايا الكيميائية، تلعب النفوذية الجيدة للماء أيضاً دوراً رئيساً. مما يعزز من قدرة المعادن على التسرب عندما تكون هناك ثمة أمطار غزيرة مترافقة مع بنيان خشن للتربة، يسمح للماء بالانسياب عبره إلى الأسفل بسهولة، وهذا مايفسر تكون التربة.

مكتبة A to Z