جامعة حماه
كلية الهندسة الزراعية – السلمية
السنة الثالثة

المحاضرة النظرية الرابعة في خصوبة التربة وتغذية النبات

The Nitrogen

22/4/2026

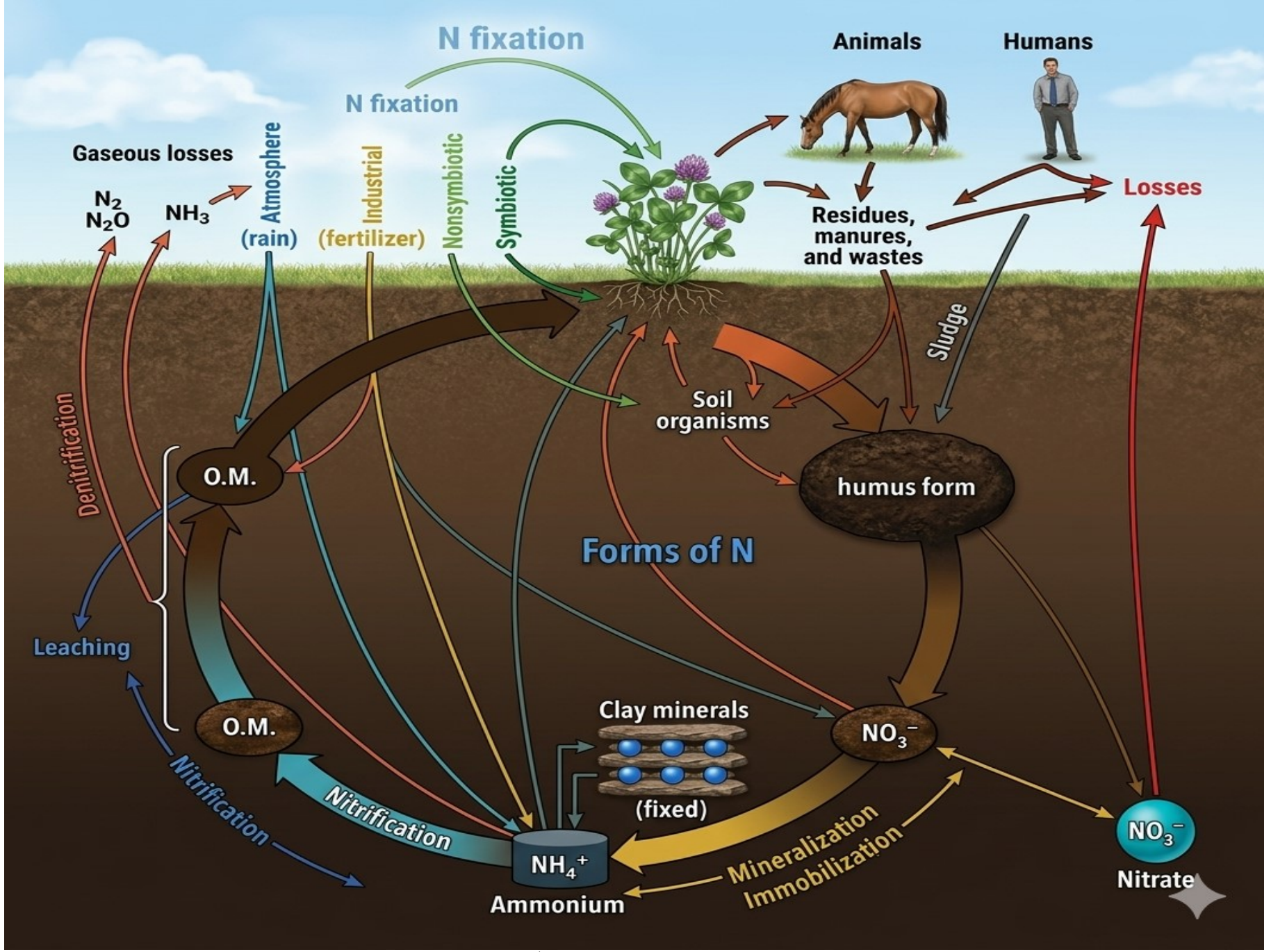
مقدمة

يعد النتروجين أحد أهم وأكثر العناصر الغذائية الأساسية طلباً من قبل النبات، لكن هذا العنصر **نادر** الوجود في الصخور والفلزات المكوِّنة للتربة، كما أنه يتعرض للفقد من التربة بكميات ملموسة وبطرائق شتى مما يفاقم من مشكلة هذا العنصر في التربة.

1-4 دورة النتروجين The Nitrogen Cycle

يطلق على التداخل بين الأشكال المختلفة للنتروجين في التربة والنبات والحيوان والغلاف الجوي تعبير " **دورة النتروجين Nitrogen Cycle"** (الشكل 4-1).

يصل النتروجين التربة الزراعية من خلال الأسمدة المعدنية التجارية، وبقايا ومخلفات المحاصيل، والسماد العضوي، والنترات والأمونيوم المحمولة بمياه الأمطار والثلوج. إضافة إلى ذلك تستطيع بعض الكائنات الحية الدقيقة أن تضمِّن النتروجين الجوي في مركبات متاحة للنبات. مقابل ذلك تفقد التربة النتروجين نتيجة الإزاحة من قبل النباتات النامية Plant uptake ، وعن طريق الغسل Leaching، والانجراف Erosion، وبأشكال غازية مختلفة.



الشكل (4-1): دورة النتروجين في التربة (عن Brady, 1996)

يتحول النتروجين المضمَّن في مركبات عضوية إلى مركبات آمينية بسيطة ($R\text{-}NH_2$) أولاً، ومن ثم إلى أمونيوم NH_4^+ ، وأخيراً إلى نترات NO_3^-.

وتتعرض النترات المتشكلة للامتصاص الحيوي من قبل النبات أو الكائنات الحية الدقيقة، أو للفقد بالغسل، أو التحول إلى غاز والفقد من التربة بعملية **عكس النترجة Denitrification.**

ويطلق على التحولات التي تقود إلى تحول النتروجين من صورة عضوية إلى صورة معدنية اسم " **معدنة النتروجين Nitrogen Mineralization**".

في حين تدعى العملية التي يتحول من خلالها النتروجين من صورة معدنية إلى صورة عضوية اسم "الوقف (التسكين) الحيوي للنتروجين **Nitrogen Immobilization**". وتجدر الإشارة إلى أن دورة النتروجين في التربة تكون مرافقة عموماً لدورة **الكربون** فيها.

2-4 - النتروجين في التربة Nitrogen in Soil

1-2-4 محتوى التربة من النتروجين Soil Nitrogen Content

يتراوح محتوى الطبقة السطحية للترب المعدنية من النتروجين بين **(0.5-0.02 %)** وبمتوسط قدره 0.15 %). ويتأثر محتوى التربة من النتروجين بمجموعة من العوامل أهمها: (المناخ (Cl)، الغطاء النباتي (V)، الطبوغرافيا (T) مادة الأصل (P)، وعامل الزمن (t) هذه العوامل تعد دالة لمحتوى التربة من النتروجين، حيث:

$$N = f(Cl, T, V, P, t, ect.)$$

وتعد هذه العوامل غير مستقلة في تأثيرها بل متداخلة، وتحدِّد محصلة هذا التداخل محتوى التربة الزراعية من النتروجين.

يكون الجزء الأعظم من نتروجين التربة مضمَّناً في مركبات عضوية، إذ يقدر محتوى المادة العضوية في التربة من النتروجين بـ (5%). لذلك فإن توزع النتروجين في التربة يكون عادة مترابطاً، بل متلازماً مع توزع المادة العضوية فيها. **ويمكن إيجاز العوامل المؤثرة في محتوى التربة من المادة العضوية، وبالتالي في محتواها من النتروجين على النحو التالي:**

1-**الغطاء النباتي:** لنوع الغطاء النباتي وكثافته تأثير **مباشر** في محتوى التربة من المادة العضوية والنتروجين، حيث يزداد تراكم المادة العضوية في التربة بزيادة كثافة الغطاء النباتي، وهذا يزيد من الكمية الكلية للنتروجين في التربة.

2- الطبوغرافيا: كلما كان سطح الأرض مستوياً كلما زادت كمية المياه النافذة في التربة وزاد محتواها من الرطوبة تبعاً لذلك مما ينعكس زيادة في الغطاء النباتي، بينما ينخفض محتوى التربة من النتروجين في المناطق المنحدرة بسبب الانجراف Erosion المائى والهوائى الذي تتعرض له الطبقة السطحية من التربة.

3-المناخ: تُعد درجة الحرارة ومعدل الهطول المطري السنوي من أكثر عوامل المناخ تأثيراً في محتوى التربة من المادة العضوية والنتروجين. ويمكن القول إنه ومع ثبات درجة الحرارة يكون محتوى ترب المناطق الرطبة وشبه الرطبة من النتروجين **أعلى** من محتوى ترب المناطق الجافة وشبه الجافة، بينما يكون محتوى ترب المناطق الباردة منه **أعلى** من محتوى ترب المناطق الحارة مع ثبات كمية الهطول المطري السنوي.

4-نسيج التربة وعمق القطاع الأرضي: عادة يكون محتوى الترب الخفيفة القوام (الرملية) من النتروجين **أخفض** من محتوى الترب الثقيلة القوام (الطينية). ويزداد محتوى التربة من النتروجين في الطبقة السطحية للتربة نتيجة لتراكم المادة العضوية فيها، ثم ينخفض هذا المحتوى بشكل ملموس مع العمق في القطاع الأرضي.

يعود نتروجين التربة في مصدره أساساً إلى النتروجين الجوي (N_2)، حيث يشكل النتروجين حوالي 78%) (من حجم الهواء الجوي و(75%) من وزنه

بينما **تفتقر** الصخور النارية وحتى الرسوبية كما الفلزات المكونة للتربة إلى هذا العنصر، على الرغم من وجود بعض المناطق الغنية بترسبات جيدة من النتروجين كالمناطق الصحراوية بين تشيلي والبيرو التي يوجد فيها النتروجين على شكل $\mathbf{NaNO_3}$(Chile saltpeter).

كما تحتوي بعض المناطق في الهند وفي بعض بلدان الشرق الأقصى على ترسبات كبيرة من ($\mathbf{KNO_3}$) التي تدعى (Bengal saltpeter).

على الرغم من توفر النتروجين في الهواء الجوي، فإنّ النباتات لا تستطيع الاستفادة من النتروجين الغازي مباشرة إلا بعد دخوله في سلسلة من التفاعلات التي تقوم بها الكثير من الأحياء الدقيقة الموجودة في التربة التي تعيش إما حرةً أو متعايشة مع جذور النبات، حيث تثبّت النتروجين الغازي وتحوله إلى نتروجين عضوي (أحماض آمينيه وبروتينات) داخل أجسامها.

وعند موت هذه الكائنات فإنّ النتروجين العضوي الداخل في تركيب أنسجتها يتحرّر في الظروف المناسبة بأشكال معدنية(NO_3^-، NH_4^+) قابلة للامتصاص من قبل النبات.

فالنتروجين لا يصبح جاهزاً للنبات إلا عند ارتباطه بالهيدروجين أو الأكسيجين أو الكربون، ويطلق على عملية ارتباط النتروجين بأحد العناصر الآنفة الذكر اسم **تثبيت النتروجين Nitrogen Fixation.**

ولحدوث هذا الارتباط، لابد من تكسير الروابط بين ذرتي النتروجين في جزيء (N2)الأمر الذي يتطلب **طاقة عالية لا تتوافر للنبات،**

كما تتوافر مثل هذه الطاقة عند حدوث البرق، فنتيجة التفريغ الكهربائي الناتج عن البرق يتأكسد (N_2) وفق التالي: $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$ وتستمر عملية الأكسدة وفق التالي: $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$

حيث يصل (NO_2) التربة ذائباً في ماء المطر.

2-2-4 صور النتروجين في التربة Nitrogen Forms in Soil

4-2-2-1 – الصورة العضوية Organic Form

يشكّل النتروجين العضوي (95-98%) من محتوى التربة الكلّي من هذا العنصر، ويوجد النتروجين في هذه الصورة على شكل مجموعة أمين ($-NH_2$) تدخل في تكوين الحموض الآمينية المختلفة والبروتينات وكثير من المركبات العضوية مثل الأحماض النووية والفيتامينات وغيرها من المعقدات العضوية ذات التركيب غير المتجانس.

ويعتقد أن النتروجين العضوي في التربة يتكون أساساً من أحماض أمينية (20-40%)، وسكريات آمينية (5 - 10 %)، وأمونيا مرتبطة بشكل غير قابل للتبادل (5–8%). أمّا الجزء المتبقي من النتروجين العضوي (- NH - , - N = -) فيكون مضمَّناً في مركبات عطرية مختلفة ذات أوزان جزئية ضخمة، ويُعتقد بأن لهذا الجزء دوراً مهماً في تكوين الدبال Humus . وتُعد المركبات العضوية للنتروجين مقاومة نسبياً لفعل الكائنات الحية الدقيقة التحليلي، إذ يُعتقد أن (2-3%) فقط من محتوى التربة من النتروجين العضوي يتمعدن في كل سنة تحت الظروف الطبيعية.

4-2-2-2 - الصورة المعدنية Inorganic Form

تشكّل هذه الصورة 2 -5 % فقط من محتوى التربة الكلي من النتروجين، ويمكن أن يوجد النتروجين في هذه الصورة على شكل **أمونيوم**(NH_4^+)في محلول التربة، أو مدمصاً على سطوح غروياتها بشكل قابل للتبادل Exchangeable، أو مدمصاً على السطوح الداخلية لبعض فلزّات الطين بشكل غير قابل للتبادل Non exchangeable.

كما يوجد النتروجين المعدني في التربة على شكل أيونات نترات (NO_3^-) ونتريت ذائبة في محلول التربة.

4-2-2-3 - الصورة الغازية Gaseous Form

يوجد النتروجين في الحالة الغازية في الهواء الأرضي على شكل نتروجين جزيئي(N_2) وأكاسيد نتروجينية مختلفة مثل NO (أوكسي النتريك)، وN_2O (أوكسيد النتروز)، وNO_2 (ثاني أوكسيد النتروجين)، بالإضافة إلى النشادر NH_3.

3-2-4 معدنة النتروجين العضوي Organic – N Mineralization

يمكن القول إنّ معدنة النتروجين العضوي في التربة تمر بالمراحل التالية:

1-3-2-4 التحلل إلى أحماض أمينية Aminization:

يحصل هذا التحول للنتروجين العضوي نتيجة فعل كائنات حية دقيقة مختلفة (بكتريا، فطور) **متغايرة التغذية Heterotrophic**، وحيث يكون الناتج النهائي لتحلل البروتينات عبارة عن **أحماض آمينية** مختلفة:

$$protins + H_2O \longrightarrow R - NH_2 + Energy + other\ \ products$$

2-3-2-4 النشدرة Ammonification:

يتحوّل، عبر هذه العملية، النتروجين الآميني إلى أمونيا (NH_3)، ويتم ذلك بمساعدة كائنات حية دقيقة (بكتريا، فطور، اكتينومايسيز) متغايرة التغذية Heterotrophic تستخدم الأحماض الأمينية مصدراً للكربون والنتروجين. وتتحول الأمونيا الناتجة عند توفر قدر مناسب من رطوبة التربة إلى **أمونيوم** NH_4^+

$$R - NH_2 + H_2O \longrightarrow R - OH + NH_3 + E$$

$$NH_3 + H_2O \longrightarrow NH_4^+ + OH^-$$

$$2NH_3 + H_2O + CO_2 \longrightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-}$$

وبالإضافة للبروتينات، تتعرض اليوريا أيضاً لعملية النشدرة. ومن المعلوم أن اليوريا تضاف للتربة كسماد كيميائي، أو تصل إليها من خلال مفرزات الحيوانات المتطورة، وقد تتشكّل فيها نتيجة لتحلل القواعد النتروجينية (Guanine، Adenine، Cytosine). وتتم نشدرة اليوريا بواسطة أنزيم Urease.

بغض النظر عن مصدر الأمونيوم سواء أكان ناتجاً عن عملية النشدرة، أو متحرراً من الأسمدة النتروجينية الأمونياكية واليوريا فإنه يمكن أن يتعرض إلى:

1. الامتصاص من قبل النباتات المتطورة.
2. الامتصاص الحيوي من قبل الكائنات الحية الدقيقة في التربة واستخدامه في بناء أنسجة ميكروبية جديدة بعد تضمينه في مركبات عضوية.
3. الادمصاص على السطوح الخارجية لفلزات الطين والمادة العضوية والدبال بشكل قابل للتبادل Exchangeable.
4. الادمصاص على السطوح الداخلية لبعض فلزات الطين من نموذج (1 : 2)كالفيرميكوليت والاياللیت بشكل غير **قابل للتبادل Nonexchangeable**، ويطلق على هذه العملية "تثبيت الأمونيوم Ammonium fixation".
5. الفقد من التربة بالتطاير على شكل **غاز نشادر** وبخاصة في الترب الكلسية والقلوية، وعند الإضافة السطحية والزائدة للأسمدة الأمونياكية للتربة.
6. الأكسدة بواسطة بكتريا متخصصة إلى نتريت، ومن ثم إلى نترات من خلال عملية النترجة Nitrification.

4-2-3-2-1 - العوامل المؤثرة في عملية النشدرة:

هناك عوامل عديدة تؤثر في عملية النشدرة، بعضها يتعلق بتركيب المادة العضوية موضوع النشدرة، وبعضها الآخر يتعلق بالظروف البيئية.

آ – العوامل البيئية:

تؤثر الظروف البيئية (درجة حرارة ورطوبة التربة، والتهوية، ورقم الـ pH) بشكل ملموس في نشاط الكائنات الحية الدقيقة القائمة على عملية النشدرة. ولقد أشارت نتائج العديد من الدراسات إلى أن تفاعل التربة (الـ pH) المفضل لعملية النشدرة يتراوح بين (6.5) و(8)، ورطوبة التربة المفضلة لهذه العملية تتراوح بين (60– 70%) من رطوبة السعة الحقلية. أما أفضل درجة حرارة فتلك التي تتراوح بين (35) و(45) مْ، وأي ارتفاع أو انخفاض عن هذه الدرجة يؤدي إلى خفض وتيرة نشاط الكائنات الحية الدقيقة القائمة على ذلك.

ب – نسبة الكربون إلى النتروجين C/N ratio

تؤدّي نسبة الكربون إلى النتروجين C/N ratio دوراً أساسياً في عملية تحلل المادة العضوية وبالتالي في معدنة العناصر الموجودة في هذه المادة. وتختلف هذه النسبة باختلاف نوع البقايا النباتية (الجدول 4-1)، حيث تتصف بقايا النباتات النجيلية مثل قش القمح والشعير باتساع نسبة الكربون إلى النتروجين فيها حيث تصل إلى أكثر من (1/ 60 - 50)، بينما تضيق هذه النسبة في بقايا النباتات البقولية(برسيم ، فول) لتصل إلى – 25 (30/1.

الجدول (4-1): نسبة الـ (C/N) في بعض المواد العضوية

المادة	C/N
أنسجة ميكروبية	6 – 12 / 1
حمأة صرف صحي	5 – 14 / 1
دبال	10 – 12 / 1
سماد بلدي	13 – 25 / 1
بقايا نباتات بقولية	15 – 25 / 1
بقايل نباتات نجيلية	60 – 80 / 1
أفرع وأغصان أشجار مثمرة	40 – 80 / 1

تجدر الإشارة هنا إلى أن اتساع نسبة الـ C/N، أي انخفاض محتوى المادة العضوية من النتروجين، يعني استهلاكاً للنتروجين المعدني الموجود أساساً في التربة من قبل الكائنات الحية الدقيقة المحلة للمادة العضوية مستخدمة إياه في بناء أنسجتها، مما يعني **حدوث عملية "وقف (تثبيت، تسكين) Immobilization" حيوي للنتروجين**، الأمر الذي يؤدي إلى خفض الكمية الميسرة من النتروجين في التربة، وقد يعاني النبات النامي من **نقص** النتروجين نتيجةً لذلك.

وعلى ذلك ترتبط سيادة عملية المعدنة، أو التثبيت الحيوي للنتروجين في التربة بنسبة إلى **(C/N)** في المادة العضوية المضافة للتربة أو الموجودة أساساً فيها.

إذ تكون السيادة لعملية **الوقف الحيوي** إذا زادت النسبة (C/N) عن (30/1)، وبالتالي يختفي النتروجين المعدني من التربة نتيجة تمثيله في أجسام الكائنات الحية الدقيقة الأمر الذي يؤدي إلى معاناة النباتات النامية في مثل هذه التربة من **نقص النتروجين.**

وبشكل مخالف لذلك، يؤدّي **ضيق** هذه النسبة إلى أقل من (C/N < 30/1) إلى **الإسراع في عملية المعدنة.**

بينما يتساوى معدل العمليتين إذا كانت النسبة (C/N) تتراوح بين (C/N=20-30/1)، وبالتالي تجد النباتات حاجتها من النتروجين المعدني. ويستمر تحلّل المادة العضوية حتى تصل النسبة (C/N = 10/1)، ثم تقف هذه العملية بعدها حيث تصل المادة العضوية عند هذه النسبة من الـ (C/N) إلى درجة متقدمة من تحللها أي تصبح في **صورة دبال Humus.**

تكتسب نسبة الـ (C/N) أهمية كبيرة في التسميد العضوي، حيث تساعد هذه النسبة على تحديد نوع السماد العضوي وموعد إضافته. فإذا كان السماد العضوي (أو البقايا النباتية) المراد إضافته ذا نسبة (C/N) واسعة (أكبر من 30/1) فإن مثل هذا السماد لا يمكن إضافته للتربة وخلطه معها قبل (أو أثناء) زراعة المحصول مباشرة وإلا سادت عملية الوقف الحيوي، وبالتالي ستعاني البادرات النامية من نقص النتروجين المعدني لفترة زمنية قد تطول أو تقصر تبعاً للنسبة (C/N).

ولذلك يُنصح في مثل هذه الحالة بإضافة السماد العضوي إلى التربة وخلطه معها جيداً **قبل** موعد الزراعة بمدة كافية بحيث تحدث عملية التمثيل الحيوي والتربة خالية من النبات. وإذا لم تتوفر إمكانية ذلك فيمكن تضييق النسبة (C/N) من خلال خلط البقايا النباتية مع سماد نتروجيني معدني **بمعدل1 كغ نتروجين (N) لكل 100 كغ قش**، كي تضيق هذه النسبة مما يساعد على اختصار الزمن اللازم لبدء عملية المعدنة.

2-2-3-2-4 تثبيت الأمونيوم Ammonium Fixation:

يتعرّض كاتيون **الأمونيوم** الناتج عن عملية النشدرة أو المتحرّر من الأسمدة النتروجينية المضافة للتربة للتثبيت Fixation بواسطة المكونات اللاعضوية (فلزات الطين) والعضوية للتربة. ويعتقد أن (5-20%) من محتوى التربة الكلي من النتروجين يكون مثبتاً في التربة على شكل أمونيوم، وأن هذا الشكل من النتروجين **يكون بطيء الإفادة Slowly available للنبات.**

آ – التثبيت بواسطة فلزات الطين:

هناك العديد من فلزات الطين من نموذج (2:1) لديها القدرة على تثبيت كاتيونات الأمونيوم والبوتاسيوم، ويعد **فلز الفرميكيوليت Vermiculite** أكثر هذه الفلزات ميلاً للتثبيت يليه فلز الأيلليت فالسمكتيت. وتتم هذه العملية بأن تُدمص كاتيونات الأمونيوم والبوتاسيوم (K^+) بشكل غير قابل للتبادل على السطوح الداخلية لفلزات الطين آنفة الذكر كون قطرها الأيوني يسمح لها بالدخول بين طبقات الفلز. وتتحرّر الكاتيونات المثبتة ببطء لتمتص حيوياً من قبل النباتات الراقية والكائنات الحية الدقيقة.

يتأثر تثبيت الأمونيوم في التربة بعوامل عديدة، أهمها:

1-العمق: يكون تثبيت الأمونيوم بواسطة فلزات الطين أعلى عموماً في الطبقة تحت السطحية للتربة مقارنة بالطبقة السطحية لارتفاع محتوى الطبقة تحت السطحية من الطين. فبينما تقدّر الكمية المثبتة من الأمونيوم بحوالي **(8%)** من النتروجين الكلي في الطبقة السطحية للتربة، قد تصل هذه النسبة إلى حوالي **(40%)** في الطبقة تحت السطحية.

2 - الزمن: يكون تثبيت الأمونيوم في أعلى معدل له بعد إضافة **الأمونيوم مباشرة، ويقل** معدل التثبيت مع مرور الزمن حتى الوصول إلى نقطة الاتزان.

3 - الكمية المضافة من الأمونيوم: تزداد الكمية المثبتة من الأمونيوم بزيادة الكمية المضافة أو المتحرّرة منه، لكن النسبة المئوية للكمية المثبتة **تنخفض.**

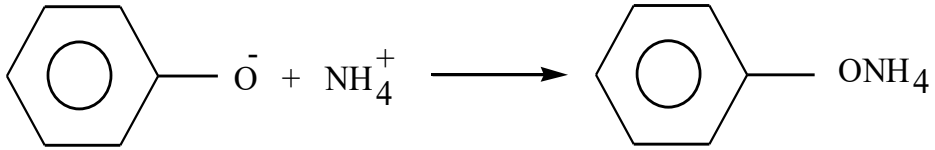
4 - التجفيف: تزداد الكمية المثبتة من الأمونيوم مع جفاف التربة، ويفسر ذلك بازدياد تركيز الأمونيوم في محلول التربة بانخفاض رطوبتها. كما أنّ جفاف التربة يترافق مع نقصان المسافة البينية بين الوحدات البلورية لفلزات الطين لفقدها الماء، مما يزيد من الكمية المثبتة من هذا الكاتيون.

5 - نسبة الطين ونوع فلز الطين السائد: تزداد قدرة التربة على تثبيت الأمونيوم بازدياد محتواها من الطين، وبخاصة فلزات الطين من نموذج (1:2) كالفرميكيوليت والأيلليت والسمكتيت.

ب – التثبيت بواسطة المادة العضوية

يمكن لكاتيون الأمونيوم أن يتفاعل مع المادة العضوية في التربة ليشكل **مركبات مقاومة للتفكك الحيوي.**

ويُعتقد أن عملية التثبيت هذه تحصل بفعل انجذاب كاتيون الأمونيوم إلى المجموعات الوظيفية الكربوكسيلية والفينولية المتأينة عند **قيم مرتفة من الـ pH (وسط قاعدي):**



$$-COO^- + NH_4^+ \longrightarrow -COONH_4$$

يُعتقد، من ناحية أخرى، أن **زيادة** محتوى التربة من المادة العضوية يمكن أن **يقلل** من كمية الأمونيوم المثبتة. ويفسّر ذلك **بادمصاص** بعض نواتج تحلل المادة العضوية على **السطوح الداخلية لفلزات الطين** ما يقلل من فرص دخول **الأمونيوم** إلى مواقع التثبيت على السطوح الداخلية لهذه الفلزات.

وفي كافة الأحوال، لا يمكن اعتبار **تثبيت الأمونيوم بواسطة المادة العضوية** عملية ضارة كون النتروجين الأمونيومي المثبت عضوياً يتحرر ببطء بشكل متاح للنبات (NO_3^-)عبر عملية المعدنة.

3-3-2-4 النترجة (التأزت) Nitrification

يطلق على الأكسدة الأنزيمية للأمونيوم إلى نترات اسم "النترجة (التأزت) Nitrification"، وتحدث هذه العملية في التربة بواسطة كائنات حية دقيقة (بكتريا) متخصصة ذاتية التغذية Autotrophic في مرحلتين متعاقبتين. يتم في المرحلة الأولى أكسدة الأمونيوم إلى نتريت (NO_2^-) بواسطة بكتريا Nitrosomonas، بينما يتم في المرحلة الثانية أكسدة لأيونات النتريت المتشكلة في المرحلة الأولى إلى أيونات نترات (NO_3^- بواسطة بكتريا Nitrobacter):

$$\text{I)}\ NH_4^+ \xrightarrow[-H^+]{+1/2\ O_2} NH_2OH \xrightarrow{-2H^+} NOH \xrightarrow[-H^+]{+1/2O_2} NO_2^- + \text{Energy}$$

Ammonium **Hydroxylamine** **Nitroxyl** **Nitrite**

$$\text{II)}\ NO_2^- + 1/2O_2 \longrightarrow NO_3^- + \text{Energy}$$

Nitrite **Ntirate**

في الظروف المناسبة، تعقب المرحلة الثانية المرحلة الأولى مباشرة وبذلك لا يحدث أي تراكم لأيونات النتريت، وهذا أمر مفيد كون هذا الأيون ساماً للنباتات الراقية.

يتضح من التفاعلين (I) و (II) ما يلي:

1. يشكّل أيون الأمونيوم المادة الأساسية لعملية النترجة، وعلى ذلك فإن تيسر هذا الأيون بكمية كافية يعد ضرورياً لاستمرار هذه العملية، لكن وجود مستوى عالٍ جداً من الأمونيوم يؤثر سلباً في عملية النترجة كونه يسبب السمية لبكتريا Nitrobacter مما ينتج عنه تراكم للنتريت في التربة.

2. إنّ عملية النترجة عبارة عن عملية أكسدة تتطلب كمية وافرة من الأوكسجين كي تتم. لذلك فإنّ كافة العمليات الزراعية التي من شأنها زيادة تهوية التربة كالحراثة والعزيق تؤثر إيجاباً في هذه العملية، بينما يؤدي غمر التربة بالماء وسوء التهوية إلى تخفيض وتيرة هذه العملية ويمكن أن يوقفها تماماً.

3. تترافق هذه العملية مع تحرّر لأيونات الهيدروجين، مما ينتج عنه انخفاض في (pH) التربة. وقد لا يظهر هذا التأثير بشكل واضح في الترب الغنية بكربونات الكالسيوم.

4. **إن عملية النترجة عملية بيولوجية تتم بواسطة بكتريا متخصصة، يتوقف نشاطها على مجموعة من العوامل، أهمها:**

أ- **تفاعل التربة (الـpH):** يعدّ (pH) التربة من العوامل البيئية الأساسية المؤثّرة في نشاط بكتريا النترجة، والـ (pH) المناسب لنشاط هذه الكائنات الدقيقة يتراوح بين (7– 9)، على الرغم من أن هذه العملية يمكن أن تتم في مدى(pH) أوسع من ذلك (4.5 – 10).

ب-رطوبة التربة: تتطلّب النترجة توفر قدر مناسب من الرطوبة في التربة، وتصل عملية النترجة إلى أقصى درجاتها عندما تكون رطوبة التربة مساوية لـ (60-70%)من رطوبة السعة الحقلية. ويؤدّي انخفاض رطوبة التربة حتى نقطة الذبول إلى انخفاض معدل النترجة بمقدار (50%) لكنه لا يوقفها، ويُعتقد أن بكتريا النترجة أكثر حساسية لزيادة رطوبة التربة من نقصانها. ويمكن القول عموماً إن رطوبة التربة المثلى للنمو النباتي تعد مثلى لنشاط بكتريا النترجة أيضاً.

ت- درجة الحرارة: يُعتقد بأنّ درجة الحرارة المثلى لعملية النترجة تتراوح بين **(25-35م)**، وتنخفض وتيرة هذه العملية بازدياد درجة الحرارة أو انخفاضها عن ذلك، وتقف عند ارتفاع درجة الحرارة إلى أكثر من 50 درجة مئوية.

4-2-3-3-1 مصير النترات: تتعرّض النترات سواء المتكوّنة منها بعملية النترجة أو المضافة للتربة عبر الأسمدة النتروجينية النتراتية إلى:

1. الامتصاص من قبل الكائنات الحية الدقيقة والاستخدام في بناء أنسجة ميكروبية جديدة.
2. الامتصاص من قبل النباتات الراقية واستخدامها في عملية التمثيل (Assimilation).
3. الفقد من التربة بالغسل Leaching مع مياه الصرف كون هذا الأيون لا يُدمص على غرويات التربة السالبة الشحنة السطحية غالباً.
4. الفقد من التربة على شكل غاز بعملية عكس النترجة.

4-2-4 -فقد النتروجين من التربة Loss of Soil Nitrogen

يعدّ عنصر النتروجين من أكثر العناصر المغذية عرضةً للفقد من التربة، حيث يتعرّض هذا العنصر للفقد من التربة بصور وأشكال شتى، **أهمها**:

1-4-2-4 إزالة النتروجين بواسطة المحاصيل Crop Removal

يمكن القول إن معظم النتروجين الممتص بواسطة المحاصيل المختلفة يفقد من التربة الزراعية عند حصاد تلك المحاصيل كما هو مبين في الجدول رقم (الجدول 4-2)، ويستثنى من ذلك المحاصيل التي تزرع كمحاصيل مراعي، إذ تبين أن حوالي (85%) من النتروجين الممتص من قبل هذه المحاصيل يعود مرة أخرى للتربة كمخلفات حيوانية للحيوانات التى ترعى تلك المحاصيل.

2-4-2-4 فقد النتروجين بصورة غازية Gaseous Losses

تشير المراجع العلمية إلى أن جزءاً كبيراً من محتوى التربة الزراعية من النتروجين يُفقد بصورة غازية على شكل أكاسيد نتروجينية مختلفة، أو نشادر، أو نتروجين جزيئي وذلك بطرائق بيولوجية أو كيميائية.

1-2-4-2-4 عكس النترجة Denitrification

تعبّر عملية عكس النترجة (عكس التأزت) عن فقد النتروجين النتراتي (NO_3-N) من التربة بصورة غازية.

وتبرز هذه العملية تحت الظروف سيئة التهوية للتربة، حيث تقوم بعض الكائنات الحية الدقيقة بإرجاع النترات (NO_3^-) إلى نتريت (NO_2^-)، ومن ثم إرجاع النتريت إلى أكاسيد نتروجينية N_2O ,NO)) ومن ثم إلى نتروجين جزيئي (N_2):

الجدول (4-2): كمية النتروجين المستنزفة من التربة بواسطة بعض المحاصيل

المحصول	الإنتاج (طن/هـ)	الكمية المستنزفة (كغ N / هـ)
القمح	5.0	125
الذرة	6.0	132
البطاطا	15.0	60
الشوندر السكري	40.0	160
بازلاء	3.0	150
الفول	2.4	155
البصل	35.0	120
البندورة	40.0	110
القطن	5	180

فعند سيادة الظروف الهوائية في التربة، تستخدم الكائنات الحية الدقيقة أوكسيجين الهواء الأرضي في أكسدة المادة العضوية:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + Energy$$

أما في حال نقص الأوكسجين، أو عند غيابه كلياً فإنها تستخدم أوكسجين النترات في هذه العملية:

$$C_6H_{12}O_6 + 4NO_3^- \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2N_2 + Energy$$

$$5CH_3COOH + 8NO_3^- \rightarrow 10CO_2 + 6H_2O + 4N_2 + 8OH^- + Energy$$

والأحياء الدقيقة المسؤولة عن هذه العملية هي أنواع بكتيرية من قبيل: Micrococcus, Pseudomonas, Bacillus , Achromobacter. ومن الممكن تقدير الكمية المفقودة من النتروجين بهذه العملية بطرائق شتى منها: حساب الفرق في الوزن بين ما يصل التربة وما يفقد منها (بما في ذلك امتصاص النبات والغسل)، ومن خلال معدل اختفاء أيون النترات من النظام تحت الدراسة، أو من خلال تقدير النتروجين الجزيئي (N_2) واكسيد النتروز (N_2O) المتشكلين ... الخ. وبغض النظر عن الطريقة المتبعة، فإن الدراسات تشير إلى أن كمية النتروجين المفقودة من التربة من خلال هذه العملية تتراوح بين (5 – 50 %) من كمية النتروجين المضافة للتربة.

تتأثّر عملية عكس النترجة عموماً بعدد من العوامل، أهمها:

أ- **مستوى النترات والنتريت في التربة:** تنشط هذه العملية عند توفر مستويات مرتفعة من النترات والنتريت في التربة.

أ- **سوء التهوية:** تزداد وتيرة هذه العملية مع انخفاض مستوى التهوية في التربة وسيادة الظروف اللاهوائية. وترتبط هذه الظروف بمحتوى التربة من الرطوبة، وذلك على الرغم من كون العامل المؤثر هنا هو انخفاض كمية الهواء الأرضي نتيجة زيادة الرطوبة، وليس زيادة الرطوبة بحد ذاتها. ولهذا السبب لا ينصح باستخدام الأسمدة النتراتية في مزارع الأرز تجنباً لفقد النتروجين منها بهذه الآلية، بالإضافة إلى ما يفقد منه بالغسل Leaching.

أ- **درجة الحرارة:** يُعتقد بأن درجة الحرارة المناسبة لعملية عكس النترجة هي أعلى من (25°C)، وينخفض معدل هذه العملية عند انخفاض درجة الحرارة عن ذلك، ويتوقف نهائياً عندما تصل درجة الحرارة إلى (2°C).

ب- **تفاعل التربة (الـ pH):** يؤدي ارتفاع (pH) التربة عن (5) إلى تسريع هذه العملية، وتصل كمية النتروجين المفقودة بهذه العملية إلى أقصاها عندما يكون (pH) التربة قريباً من المتعادل (7).

ت- **المادة العضوية:** تنشط هذه العملية عند توفر كمية كبيرة من المواد العضوية البسيطة (سكريات أحادية وثنائية، أحماض عضوية ...) القابلة للأكسدة .

2-2-4-2-4 - تطاير الأمونيا Ammonia Volatilization

تشير نتائج العديد من الدراسات إلى أن جزءاً من نتروجين التربة ومن نتروجين الأسمدة النتروجينية المختلفة يمكن أن يُفقد من التربة، في ظروف محددة، بالتطاير على شكل أمونيا (NH_3). وتتراوح كمية النتروجين المفقودة بالتطاير بين (3-50%) من النتروجين المضاف على شكل أسمدة نتروجينية (يوريا، سلفات أمونيوم، نترات أمونيوم)، وذلك تبعاً لعوامل عديدة كنسيج التربة، والـ pH، ومعدل السماد المضاف.

وتشكّل قابلية أيون الأمونيوم NH_4^+ لتشكيل روابط الكتروستاتيكية مع فلزات الطين والغرويات العضوية عاملاً على درجة كبيرة من الأهمية يساعد في التقليل، أو الحد من فقد نتروجين التربة والسماد بالتطاير على شكل أمونيا. ويعتمد التفاعل الأساسي في هذه العملية على ضم الأمونيا لبروتون ليتشكل كاتيون الأمونيوم الذي يقوم بعملية تبادل كاتيوني مع أحد الكاتيونات المدمصة على الطين والدبال:

$$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^- \qquad (1)$$

$$NH_4^+ + CX \rightarrow NH_4X + C^+ \qquad (2)$$

حيث (C) يعبّر عن أحد الكاتيونات المتبادلة على الطين أو المادة العضوية (X).

ففي الترب الحمضية يمكن أن يتفاعل (NH_3) مباشرة مع (H^+) الموجود على معقد الادمصاص:

$$NH_3 + HX \rightarrow NH_4X$$

كما أن أيونات الأمونيوم الموجودة في الطور السائل للتربة تكون على توازن مع NH_3:

$$NH_4^+ \rightleftharpoons NH_3 + H^+$$

ويتعرّض $NH_{3\,(aq)}$ بدوره للفقد بشكل غازي من التربة وفق التفاعل التالي:

$$NH_{3\,(aq)} \longrightarrow NH_{3\,(air)}$$

لقد ازداد الاهتمام مؤخراً بالفقد الحاصل بتطاير الأمونيا عند استخدام الأسمدة النتروجينية الحاوية أو المولِّدة لأيون الأمونيوم (NH_4^+) **ومن المؤكد أن هذا الفقد يكون أكبر في الترب الكلسية مقارنة بالترب غير الكلسية**، فعند إضافة سماد سلفات الأمونيوم مثلاً إلى تربة كلسية يمكن أن يحصل تحلل مائي لكربونات الكالسيوم وفق التالي:

$$CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^-$$

حيث يتفاعل أيون(Ca^{2+}) وأيون (OH^-) مع السماد:

$$(NH_4)_2SO_4 + Ca^{2+} + 2OH^- \rightarrow CaSO_4 + 2NH_3\uparrow + 2H_2O$$

وقد يحدث تفاعل مباشر بين كربونات الكالسيوم وكبريتات الأمونيوم:

$$(NH_4)_2SO_4 + CaCO_3 \rightarrow (NH_4)_2CO_3 + CaSO_4$$

ثم يحدث تحلل مائي لكربونات الأمونيوم:

$$(NH_4)_2CO_3 + H_2O \rightarrow 2NH_3 \uparrow + 2H_2O + CO_2$$

تشير التفاعلات السابقة إلى تكون المزيد من كربونات الأمونيوم في حال كون المركب الناتج عن اتحاد كاتيون (Ca^{2+}) مع الأنيون المرافق للأمونيوم في السماد ضعيف الذوبان، فالأسمدة التي تكِّون نواتج ضعيفة الذوبان مع(Ca^{2+}) مثل $Ca(SO_4^{2-}, H_2PO_4^-)$ تفقد كمية كبيرة من (NH_3). بينما الأسمدة التي تكِّون نواتج جيدة الذوبان مع (Ca^{2+}) مثل $Ca(NO_3^-, Cl^-)$ تفقد كمية قليلة من الأمونيا.

هناك العديد من العوامل المؤثرة في تطاير الأمونيا من الأسمدة الحاوية على الأمونيوم (الأسمدة الأمونياكية، اليوريا، الأسمدة العضوية)، أهمها:

أ ـ تفاعل التربة(الـ pH): يزداد تطاير الأمونيا بشكل ملموس من الأسمدة الأمونياكية واليوريا مع ارتفاع (pH) التربة عن(7) ، والمعادلة التالية تبين تأثير الـ (pH) القلوي في تطاير الأمونيا:

$$NH_4^+ + OH^- \rightleftharpoons NH_4OH \qquad NH_4OH \longrightarrow NH_3 \uparrow + H_2O$$

ب – **محتوى التربة من الكربونات الكلية:** يزداد تطاير الأمونيا عموماً في الترب الكلسية، وبخاصة عندما تتم إضافة الأسمدة الأمونياكية واليوريا إلى التربة بطريقة سطحية.

ج – **درجة الحرارة:** يزداد تطاير الأمونيا مع **ارتفاع درجة الحرارة** وانخفاض مستوى رطوبة التربة.

د – **سعة التبادل الكاتيوني:** تزداد كمية النتروجين المفقودة من التربة من خلال تطاير الأمونيا مع **انخفاض** سعة التبادل الكاتيوني، كما هو الحال في الترب الرملية. فكاتيون الـ(NH_4^+) يمكن أن يدمص على الطين والدبال وبالتالي لا يتعرض للتطاير. ومما لا شك فيه أن **وجود النبات** يخفّض من وطأة فقد النتروجين عبر تطاير الأمونيا من التربة والسماد النتروجيني، نظراً لانخفاض مستوى (NH_4^+) في التربة بفعل امتصاص النبات لهذا الكاتيون.

4-2-4-3 الفقد بالغسل Leaching

من المعروف أن أيون النترات يحمل شحنة سالبة (NO_3^-) ، وبناء على ذلك فإن احتمال ادمصاصه على سطوح غرويات التربة يكون قليلاً كون الشحنة السطحية لهذه الغرويات سالبة عموماً، لذلك غالباً يبقى هذا الأنيون متحركاً في التربة مما يسهل غسله إلى الطبقات تحت السطحية وفقده من التربة مع مياه الصرف. وتتوقف كمية النترات المفقودة بالغسل على معدل الهطول المطري، أو كمية المياه المستعملة في الري وعدد مرات الري، وعلى نسيج التربة. إذ يزداد الفقد بانخفاض محتوى التربة من الطين، كما **يزداد** هذا الفقد أيضاً مع انخفاض محتوى التربة من الغرويات موجبة الشحنة السطحية (هيدروكسيدات الحديد والألمنيوم) التي يمكن أن يُدمص أنيون النترات على سطوحها. وأنَّ (25-50 %)من محتوى السماد من النتروجين يمكن أن يُفقد بالغسل في نظام الزراعة المروية.

يمكن تقليل فقد النترات بالغسل من خلال:

أ- تجنب الري الزائد وترشيد استهلاك مياه الري.

ب-استخدام الأسمدة النتراتية تحت المحاصيل متعمقة الجذور.

ت-الاستخدام المناسب للأسمدة النتراتية من حيث الكمية والتوقيت. حيث أن تجزئة كمية السماد النتراتي، وإضافته أثناء موسم النمو يقلل كثيراً من الكمية المفقودة بالغسل.

4-4-2-4 فقد النتروجين بالانجراف N – losses by Erosion

يمكن القول إن هذا الفقد للنتروجين من التربة يخص الصورة العضوية للنتروجين أكثر من الصورة المعدنية. ويحصل هذا الفقد نتيجة لفقد المادة العضوية من الطبقة السطحية للتربة نتيجة تعرض التربة للانجراف Erosion المائي أو الريحي. وتتوقف الكمية المفقودة من النتروجين بهذه الطريقة على عوامل عديدة أهمها: المناخ، نسيج التربة، الغطاء النباتي، الطبوغرافيا.... الخ. وبشكل عام تتراوح كمية النتروجين المفقودة من التربة بالانجراف بين (1 -50) كغ N/هـ/ سنة.

5-2-4 كسب النتروجين في التربة Gains in Soil Nitrogen

باستثناء ما يصل التربة من خلال مياه الري، يمكن القول عملياً إن كل النتروجين الذي يصل التربة بطرائق طبيعية يتم عن طريق التثبيت الحيوي للنتروجين Biological N_2 fixation ، والترسّب الجوي لـ NH_3 وNH_4^+ وNO_3^-. كما يضاف النتروجين للتربة من خلال البقايا النباتية والأسمدة العضوية الحيوانية أيضاً.

1-5-2-4 التثبيت الحيوي للنتروجين Biological N_2 fixation

من المعلوم أن تثبيت النتروجين الجوي كيميائياً يحتاج إلى درجة حرارة مرتفعة (500 °C)، وضغط مرتفع (250 atm)، ويتم بوجود عوامل مساعدة مثل أوكسيد الحديد النشط ... وهذا ما يحصل في التفاعل المعروف بتفاعل Haber Bosch :

$$N_2 + 3H_2 \xrightarrow[500\ ^oC\ at\ 250atm]{FerricOxide} 2NH_3$$

لكن عملية تثبيت النتروجين الجوي تتم طبيعياً أيضاً في درجة حرارة منخفضة وتحت ضغط جوي عادي بواسطة خلايا بعض الكائنات الحية الدقيقة، وهذا ما يعرف **بالتثبيت الحيوي للنتروجين الجوي Biological N_2 fixation.**

ويقصد بالتثبيت الحيوي للنتروجين تلك العملية البيوكيميائية التي تقود إلى تضمين النتروجين العنصري في مركبات عضوية. وتتم هذه العملية بواسطة عدد من الكائنات الحية بما في ذلك العديد من الأنواع البكتيرية، وبعض من الأكتينومايس، والطحالب الخضراء المزرقة.

وعادة تفوق الكمية المثبتة حيوياً من النتروجين تلك المضافة للتربة على شكل أسمدة كيميائية، وذلك على مستوى الكرة الأرضية بمجملها. ولا عجب إذاً من اعتبار عملية التثبيت الحيوي للنتروجين من أهم العمليات الحيوية التي تجري في الأرض، ولا يفوقها من حيث الأهمية سوى عملية التركيب الضوئي.

بغض النظر عن نوع الكائنات الحية التي تقوم بعملية التثبيت الحيوي، فإن الآلية التي يتم فيها هذا التثبيت واحدة، والخطوة الأولى في هذه العملية تكمن في إرجاع النتروجين العنصري (N_2) إلى نشادر:

$$N_2 + 6H + 6e^- \xrightarrow[(Fe, Mo)]{(nitrogenase)} 2NH_3$$

وفي خطوة لاحقة، يتم تضمين الأمونيا الناتجة مع الأحماض العضوية لتشكيل الأحماض الأمينية والبروتينات:

$$\text{Amino Acids} \longrightarrow \text{Proteins } NH_3 + \text{Organic Acids} \longrightarrow$$

بروتينات أحماض آمينية أحماض عضوية نشادر

4-2-5-1-1التثبيت اللاتكافلي للنتروجين Non Symbiotic Nitrogen Fixation

تمّ التعرف على عدد كبير من الكائنات الحية الدقيقة القادرة على تثبيت نتروجين الهواء الجوي في التربة بطريقة لاتكافلية، **ومن أهم هذه الكائنات:**

أ – مجموعات متغايرة التغذية Heterotrophs

هناك مجموعات بكتيرية متنوعة قادرة على تثبيت النتروجين بطريقة لاتكافلية، نذكر منها:

- **بكتريا هوائية:** مثل بكتريا Azotobacter التي تنتشر في ترب المناطق المعتدلة

- **بكتريا لا هوائية: مثل بكتريا Clostridium**

تختلف كمية النتروجين المثبتة بواسطة البكتريا متغايرة التغذية تبعاً لـ (pH) التربة، ومحتوى التربة من النتروجين، ومصدر الكربون المتوفر للبكتريا من أجل الحصول على الطاقة. وفي كافة الأحوال، وفي ظل الظروف الزراعية الطبيعية فإنّ معدل النتروجين المثبّت بواسطة هذه الأجناس البكتيرية **أخفض** منه فى حالة التثبيت التكافلي للنتروجين، ويقدر عادة بـ (3-15)كغ /N/ هـ / سنة.

ب – مجموعات ذاتية التغذية Autotrophs

تشكّل الطحالب الخضراء المزرقة Blue-green algae المجموعة الأهم ضمن هذه المجموعات، فبوجود الضوء تكون هذه الطحالب قادرة على تثبيت النتروجين، كما ثاني أوكسيد الكربون الجوي. ويكون دور هذه الطحالب في تثبيت النتروجين الجوي ملموساً في الترب المزروعة بالرز. عموماً تقدّر الكمية المثبتة من النتروجين بواسطة هذه الطحالب بـ (20 – 30) كغ/N/هـ في السنة.

4-2-5-1-1-1 العوامل المؤثرة في معدل تثبيت النتروجين لا تكافلياً :

1- **محتوى التربة من النتروجين المعدني:** إن وفرة النتروجين المعدني (NH_4^+, NO_3^-) وبخاصة أملاح الأمونيوم، في التربة يُحبط عملية تثبيت النتروجين.

2- العناصر المعدنية: تتطلّب الكائنات الحية المثبتة للنتروجين من أجل نموها وقيامها بعملية التثبيت توفر بعض العناصر المعدنية التي من أهمها: Mo , Fe , Ca , Co.

3- توفر مصادر الطاقة: يعدّ توفّر مصدر مناسب للطاقة من أهم العوامل المؤثرة في تثبيت النتروجين في التربة. ولقد وجِدَ أن إضافة سكريات بسيطة أو سيللوز أو قش ذي نسبة (C/N) كبيرة **يزيد** من وتيرة عملية التثبيت تحت الظروف الهوائية واللاهوائية على حدٍ سواء.

pH-4 التربة: يعدّ جنس Azotobacter شديد الحساسية للحموضة، لذلك نادراً ما يلاحظ وجوده في الترب الحامضية. كما تتأثر الطحالب الخضراء المزرقة بـ (pH) التربة بطريقة مشابهة لبكتريا الـ Azotobacter، بينما يناسب بكتريا Clostridium الـ pH المعتدل. وعلى العموم يمكن القول **إن الـ (pH) المتعادل، أو المائل قليلاً نحو القلوية** هو الأنسب لتثبيت النتروجين بطريقة **لا تكافلية**.

5- الرطوبة: يتوقف تثبيت النتروجين في الترب الجافة، ويزداد بزيادة مستوى رطوبة التربة، وأعلى معدل للتثبيت يلاحظ عندما يكون محتوى التربة من الرطوبة **قريباً** من رطوبة السعة الحقلية Field Capacity .

6- درجة الحرارة: يكون معدل تثبيت النتروجين منخفضاً في درجات الحرارة المنخفضة، ويزداد مع ارتفاع درجة الحرارة إلى أن يصل إلى أعلى حدٍ له عند (° 25 – 30م)، ثم لا يلبث أن ينخفض من جديد بارتفاع درجة الحرارة إلى أعلى من ذلك.

4-2-5-2-1 التثبيت التكافلي للنتروجين Symbiotic N Fixation

يمكن للتكافل Symbiosis أن يحصل بين نباتات العائلة البقولية والبكتريا من جنس Rhizobium، أو بين نباتات لا تتبع العائلة البقولية والبكتريا المثبتة للنتروجين الجوي. إذ تتشكل على جذور بعض النباتات البقولية تحت تأثير بكتريا الـ Rhizobium، عقد جذرية يتم فيها تثبيت النتروجين الجوي. حيث يقدم النبات العائل لبكتريا الرايزوبيوم المواد الكربوهيدراتية كمصدر للطاقة، بينما تقدم بكتريا الرايزوبيوم للنبات مركبات النتروجين المثبت حيوياً من قبلها.

تشير المراجع العلمية المختصة إلى كون أنواع الرايزوبيوم متخصصة إلى حد ما في تعايشها مع نباتات العائلة البقولية، فالنوع الواحد من الرايزوبيوم يمكن أن يتعايش مع بعض الأنواع البقولية دون الأخرى. وتصنف الرايزوبيوم تبعاً لذلك إلى ما يدعى مجموعات تلقيح تبادلية Cross-inoculation Groups رئيسية عددها سبع مجموعات، وهي مجموعات البرسيم الحجازي، والبرسيم، والفاصولياء، وفول الصويا، والبازلاء، والترمس، واللوبياء (الجدول 4-3).

يتعلّق معدل تثبيت النتروجين أساساً بخصائص التربة، وبنوع النبات البقولي، علاوةً على كفاءة البكتريا العقدية. فلقد وجِدَ أن هناك علاقة **وطيدة** بين الكمية المثبتة من النتروجين وتهوية التربة، ودرجة الحرارة، ونسبة الرطوبة فيها، كما محتواها من الأملاح الذائبة، ودرجة تفاعلها.

الجدول (4-3): كمية النتروجين المثبَّتة بواسطة بعض الأنواع البقولية

المحصول	Kg N/ ha / year
البرسيم الحجازي	450 – 50
البرسيم	300 - 50
البازلاء	140 – 30
اللوبياء	116 – 58
الترمس	100 – 50
الفاصولياء	71 – 30
فول الصويا	160 – 58
الفول	148 – 51

وبشكل عام يمكن القول إن كافة العوامل التي تزيد من نمو النبات البقولي تساعد أيضاً على تكوين العقد الجذرية وتثبيت النتروجين الجوي، فمثلاً تجود معظم النباتات البقولية عندما يكون (pH)التربة قريباً من المتعادل(7)، وعند هذه الدرجة من الـ (pH) تصل كمية النتروجين المثبتة إلى حدها الأقصى. كما لوحظ في حالة النباتات البقولية التي يناسبها الوسط الحامضي، إن أعلى معدل لتثبيت النتروجين يكون عند هذا الوسط. وتبين أن العقد البكتيرية **حساسة** للجفاف الزائد، وللملوحة وللحرارة العالية، كما للرطوبة الزائدة.

من المؤكد أنّ للعناصر الغذائية تأثير واضح في تثبيت النتروجين بواسطة الرايزوبيوم. فلقد بنيت التجارب أن إضافة مركبات الكالسيوم والمنغنيز والفوسفور والبوتاسيوم تنشِّط تكوين العقد الجذرية، وتزيد من قدرتها على تثبيت النتروجين الجوي. ولقد لوحظ أن لعنصر الموليبدنم أهمية خاصة في عملية التثبيت نفسها لدخوله في تركيب أنزيم Nitrogenase، لذلك فإن غياب هذا العنصر لا يمنع تكون العقد الجذرية، بل يخفِّض من كفاءتها وقدرتها على تثبيت النتروجين الجوي. أما عنصر البورون فهو ضروري لتكوين العقد الجذرية، بينما يعد عنصر الكوبالت ضرورياً لعملية التثبيت كونه يؤثر في بعض الأنزيمات التي تؤدي دوراً أثناء تكوين العقد الجذرية وأثناء عملية التثبيت.

يمكن للنتروجين المثبت بواسطة بكتريا الرايزوبيوم أن يأخذ واحداً أو أكثر من الاتجاهات التالية:

1– يستعمل مباشرة من قبل النبات العائل.

2– يتعرض جزء من النتروجين المنتقل من جذور النبات والعقد الجذرية لعملية معدنة Mineralization ليتحول إلى أشكال متاحة للنبات(NH_4^+ , NO_3^-).

3– يستخدم في بناء أنسجة ميكروبية جديدة، أي أنه يتعرض لعملية وقف أو تسكين حيوي.

4-2-5-2 الأمطار والثلوج

تحدث أثناء عملية البرق شرارة كهربائية تؤدي إلى أكسدة بعض من نتروجين الهواء الجوي (N_2) إلى أكاسيد نتروجينية (NO, NO_2). ويمكن أن تتنحل الأكاسيد الناتجة فى مياه الأمطار والثلوج وتصل التربة ذائبة فيها:

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$$

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$

$$3NO_2 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 + NO$$

كما تساعد الأشعة فوق البنفسجية على اتحاد النتروجين الجوي مع الهيدروجين الموجود في الجو ليتكون غاز النشادر:

$$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$$

وفي كافة الأحوال، فإن كمية النتروجين التي تصل التربة بهذه الطريقة قليلة جداً ولا تتعدى (1 – 20) كغ N/هـ في السنة الواحدة.

4-2-5-3 التسميد العضوي

تؤدي إضافة الأسمدة العضوية المختلفة للتربة إلى زيادة محتواها من المادة العضوية ومن النتروجين الكلي، لكن مدى مساهمة التسميد العضوي في تحسين مستوى خصوبة التربة بالنتروجين يختلف كثيراً من سماد عضوي لآخر، الأمر الذي ينعكس بشكل مباشر على نمو النبات وإنتاجه (عودة والعيسى، 2002).

3-4 - النتروجين في النبات Nitrogen in Plant

يتراوح محتوى المادة النباتية الجافة من النتروجين بين (2-4%). ويمتص النبات النتروجين بصورة معدنية إما على شكل أيون أمونيوم (NH_4^+) أو على شكل أيون نترات (NO_3^-) بآليات فعالة وغير فعالة.

وتجدر الإشارة هنا إلى أن أيون الأمونيوم يدخل بعد امتصاصه مباشرة في تفاعلات بيوكيميائية مع الأحماض العضوية لتكوين الأحماض الأمينية، في حين لا بد لأيون النترات أن يُرجع إلى أمونيا أولاً قبل استخدامه في تصنيع الأحماض الأمينية. وتتم عملية الإرجاع على مرحلتين، يتم في المرحلة الأولى إرجاع النترات بواسطة أنزيم Nitrate reductase إلى نتريت، لا يلبث أن يُرجع النتريت بدوره في المرحلة الثانية إلى نشادر بواسطة أنزيم Nitrite reductase:

$$NO_3^- + 2e^- \xrightarrow{\text{Nitrate reductase}} NO_2^-$$

$$NO_2^- + 6e^- \xrightarrow{\text{Nitrite reductase}} NH_3$$

تحصل عملية الإرجاع آنفة الذكر في الجذور، كما في الأجزاء الهوائية للنبات. وفي كافة الأحوال، تتحد الأمونيا الممتصة أو الناتجة عن إرجاع النترات مع الأحماض العضوية لإعطاء طلائع الأحماض الأمينية وهما حمض الاسبارتيك وحمض الغلوتاميك، وانطلاقاً من هذين الحمضين الأمينيين يمكن للنبات أن يشتق الأحماض الأمينية الأخرى التي تكون أساساً لبناء البروتينات:

يمكن أن تشارك الأمونيا الناتجة عن إرجاع النترات في تكوين القواعد الآزوتية كالبيورين والبيريميدين (Purine, Pyrimidine) ومشتقاتها التي تدخل مع السكر الخماسي ومجموعة الفوسفات لتكوين النيكلوتيدات (Nucleotides) التي تعد أساساً لتكوين الأحماض النووية. ويمكن أن تستخدم الأمونيا أيضاً في تركيب المركبات النتروجينية الأخرى كالأميدات والأمينات وغيرها.

2-3-4 الوظائف الفيزولوجية Physiological Functions

1- يدخل في تركيب الكلوروفيل، لذلك فإن نقصه يؤدي إلى اصفرار الأوراق.

2- يعد بمثابة حجر الأساس في بناء البروتينات والأحماض النووية كونه يدخل في تركيب الحموض الأمينية.

3- ضروري من أجل استقلاب الكربوهيدرات.

4- يدخل في تركيب الأميدات مثل الأسبارجين والغلوتامين، ولهذا أهمية في تخليص النبات من سمية الأمونيا.

5- يدخل في تركيب الأنزيمات والفيتامينات والهرمونات ومركبات حفظ الطاقة مثل ATP , $NADPH_2$, $NADH_2$.

6- يدخل في تركيب مشتقات الأمينات مثل الكولين (Choline)، الذي يشتق منه منظم النمو (CCC) Cycocol المستخدم في تقليل رقاد القمح.

7- يشجع نمو المجموع الجذري وتطوره.

8- يحسّن من جودة الخضار الورقية ومحاصيل الأعلاف، مما يساعد على امتلاء الحبوب ورفع محتواها من البروتين.

3-3-4 نقص النتروجين Nitrogen Deficiency

يمكن أن تظهر أعراض نقص النتروجين على النباتات النامية في الترب الخفيفة لانخفاض قدرتها على الاحتفاظ بالنتروجين وتعرضه للفقد منها بالغسل، كما يمكن أن تظهر هذه الأعراض في الترب الفقيرة بالمادة العضوية لانخفاض محتواها من النتروجين أيضاً.

من المتوقع ظهور أعراض نقص النتروجين على النبات عندما ينخفض محتوى المادة النباتية الجافة من هذا العنصر عن **(1.5%)**. ولما كان النتروجين سريع الحركة في النبات (Mobile element)، فإن أعراض نقصه تظهر على الجزء السفلي للنبات بدايةً أي على الأوراق والنموات القديمة للنبات. **وتتجلّى أعراض نقص النتروجين عموماً بالآتي:**

1. انخفاض معدل النمو، حيث تصبح النباتات صغيرة ومتقزمة.
2. تكون الجذور طويلة وقليلة التفرع، ومع ذلك تزداد النسبة (مجموع جذري: مجموع خضري).
3. تكتسب الأوراق القديمة اللون الأخضر الفاتح، أو الأخضر المصفر، أو الأصفر.
4. ينخفض محتوى النبات من البروتين، بينما يزداد محتواه من المواد الكربوهيدراتية.
5. تتساقط الأزهار والثمار العاقدة.
6. تبقى الثمار صغيرة، وتنضج مبكراً، وتنخفض الإنتاجية وتسوء النوعية.

يعالج نقص النتروجين بإضافة الأسمدة النتروجينية للتربة، أو رشاً على المجموع الخضري للنبات. وأكثر هذه الأسمدة شيوعاً هي: اليوريا (46 % N) ونترات الأمونيوم (33 % N)، وكبريتات الأمونيوم (21 % N). ويمكن إضافة اليوريا رشاً على المجموع الخضري للنبات على ألا يزيد تركيز محلول الرش عن (0.2 – 0.5 %).

4-3-4 زيادة النتروجين N-Excess

قد يؤدّي الاستعمال **زيادة** غير المناسب للأسمدة النتروجينية، سواء من حيث الكمية المضافة أو من حيث موعد التسميد، إلى ظهور أعراض النتروجين على النبات. وتكون هذه الأعراض أكثر وضوحاً عند عدم مواكبة إضافة الأسمدة النتروجينية مع إضافة مركبات العناصر المغذية الأساسية الكبرى وبخاصة الفوسفور والبوتاسيوم (عودة، 2002). **وتتجلى أعراض زيادة النتروجين بالآتي:**

1. تتلون الأوراق باللون الداكن، وتموت أنسجة قمم الأوراق وحوافها.
2. تصبح النباتات غنية بالعصارة، وغضّة، وقليلة المحتوى من الألياف.
3. يتأخر النضج، وتصبح النباتات (المحاصيل النجيلية) ميّالة للرقاد.
4. تتعرض الأشجار متساقطة الأوراق إلى خطر الصقيع المبكر نظراً لتأخر دخولها في طور السكون الشتوي.
5. قد تؤدي زيادة النتروجين إلى ظهور أعراض نقص بعض العناصر المغذية (مثل: K, B, Cu) على النبات.

من بعض أعراض نقص النتروجين على بعض النباتات

إلى اللقاء في المحاضرة القادمة

المرجع: - عودة وشمشم(2011) : كتاب خصوبة التربة وتغذية النبات- منشورات جامعة حمص.

ملاحظة: تمَّ تطوير بعض الرسوم البيانية بالاستعانة بالذكاء الصنعي .