كلية العلوم

القسم : **الكيمياء**

السنة : **الثالثة**

المادة : كيمياء بيئية

المحاضرة : **السادسة/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 السادسة

العام الدراسي

٢٠٢٥-٢٠٢٦

مدرس المقرر

د. رهام معلا

الفصل التاسع

العمليات الميكروبيولوجية في الماء

Microbiological Processes in Water

٩-١: مقدمة: *Introduction*

تحدث تحولات عديدة في المسطحات المائية نتيجة لعوامل كيميائية، أو فيزيائية، وغيرها من العوامل غير الحيوية، أما العمليات الحيوية فهي التي يتدخل في آلية عملها عامل حيوي.

تقوم الكائنات الحية الدقيقة بعمل مهم أحياناً في التفاعلات الكيميائية التي تحدث في البيئة؛ مثال على ذلك: تفاعل النترتة الذي يجري عبره تحول أيونات الأمونيوم هوائياً إلى نترات، وفق التفاعل الآتي:

$$NH^{+}_{4(aq)} + 2O_2 + H_2O \longrightarrow NO^{-}_{3(aq)} + 2H_3O^{+}_{aq}$$

يحتاج حدوث التفاعل لأكثر من خطوة واحدة، وهو لايحدث بدرجة طاقية في بيئة لاحيوية.

هناك الكثير من التحولات الكيميائية الحيوية يشترك فيها عدداً كبيراً من المركبات المحتوية على الكربون، والنتروجين، والفوسفور، والكبريت، وبعض المعادن؛ مثل الحديد، والمنغنيز، أما الكائنات الحية الدقيقة التي توجد في المسطحات المائية فهي كثيرة ومتعددة، ولعل أكثرها وجوداً في البيئة المائية، والتربة، البكتريا التي تتمتع بحجوم مختلفة، ولكن أغلبها يقل قطرها عن $5\,\mu m$، ولهذا فهي تقع ضمن نطاق الجسيمات الفيزيائية، ويكون سطحها مشحوناً بشحنة سالبة في ظروف البيئة العادية، فيجمع حوله كمونات حمضية آخذة للبروتون.

توجد البكتريا في البيئة الهوائية، واللاهوائية، وتتغذى على أنواع مختلفة من الكيماويات المحتوية على الكربون، والنتروجين، والفوسفور، والبوتاسيوم.

تتأثر البكتريا بعدة عوامل؛ منها درجة الحرارة، وتركيز – pH، وتوفر المادة الغذائية في حالة الماء، أما في حالة التربة فيضاف إليها عامل الرطوبة.

تصل أعداد البكتريا في عمود الماء إلى 5.10^4، وأحياناً 5.10^7. ويعتمد هذا على نوعية المياه، أما في التربة، والرواسب، فيصل عددها إلى ملايين، أو إلى مئات الملايين في الغرام الواحد. أما وزنها فلايزيد على 0.1% من وزن المادة الصلبة.

يوجد نوع آخر هي الفطريات التي تفضل البيئة الهوائية الجافة، كما أن هناك فطر يعيش في بعض المستنقعات، والبرك، والبحيرات، والأنهار، والمحيطات.

تختلف الفطريات في أنواعها؛ فمنها عديدة الخلايا؛ مثل عش الغراب؛ وهي فطريات تستهلك في نموها؛ إذ تحلل الكربون وتستخدم أنواع منها في غذائها، لذلك تلعب الفطريات دوراً في تحلل النفايات في التربة، وتشارك في تكوين الدبال من خلال مساهمتها في سلسلة التفاعلات المؤدية إلى تكوينها، كما أنها قادرة على العمل في أوساط حمضية على عكس البكتريا التي تعمل في أوساط معتدلة، أو قلوية ضعيفة.

تعد الفطريات أكبر حجماً، من ناحية الكتلة، من البكتريا، إلا أنها أقل عدداً.

يوجد نوع ثالث هو الطحالب وهي كائنات حية تقوم بتحويل الكلوروفيل، ويراوح حجمها بين جسيمات ميكروسكوبية، وكائنات تشبه النباتات توجد في المياه التي حدث فيها تشبع غذائي، كما توجد في الأشنيات السطحية الرطبة من التربة، وهي تؤدي وظيفة مهمة في تحويل الكربونات غير العضوية إلى عضوية مما يجعلها حلقة وصل في دورة الكربون العالمية.

تستطيع الطحالب تحمل تغييرات كبيرة في درجات الحرارة، وهي توجد في البحيرات، والأنهار، وفي كل مكان من سطح الكرة الأرضية حتى في الينابيع والقطبين.

تعد بعض أنواع هذه الكائنات مقياساً للتلوث لاسيما التلوث بالعناصر الثقيلة؛ مثل: الرصاص، والكادميوم، ولعل أهمها الطحالب، والفطريات.

٩-٣: تصنيف الكائنات الحية الدقيقة:

Classification of Microorganisms:

تصنف الكائنات الحية الدقيقة بناءً على أسس ومعايير بيئية وشكلية مختلفة؛ من

أهمها:

١: التصنيف البيئي.

٢: التصنيف على أساس المصدر الكربوني.

٣: التصنيف على أساس استقبال الإلكترونات – والتصنيف الحراري والشكل الخارجي.

٩-٣: العمليات الميكروبيولوجية البيئية:

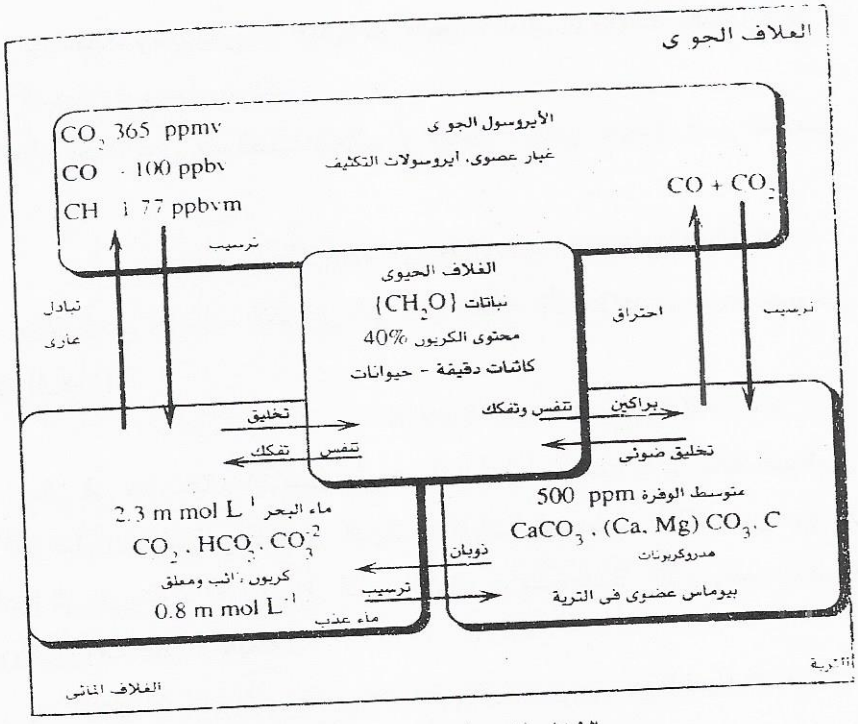
Enivronmental Microbiological Processes:

تميل العناصر الكيميائية، ومنها العناصر الأساسية في البروتوبلازم إلى الانتقال في الغلاف الحي بطرق مميزة، وذلك من الوسط إلى الكائنات الحية، ثم إلى الوسط ثانيةً. يطلق على هذا التنقل اسم "الحلقات العضوية اللاعضوية"، أو "الحلقات الحيوية الجيولوجية الكيميائية".

٩-٣-١: دورة الكربون: *Carbon Cycle*

تؤدي الكائنات الحية الدقيقة في كثير من الدورات البيئية الطبيعية وظيفةً مهمةً من خلال التفاعلات التي تحدث في البيئة.

وتعد دورة الكربون كما في الشكل (٩-١) إحدى الدورات المهمة التي تتحكم في أشكال الحياة على سطح الأرض؛ لأن الكربون يوجد بأشكال عضوية ولاعضوية في الماء، وفي التربة، وفي الجو، وهي تتبادل مع بعضها عن طريق التحول، والتحلل، أو التفكك، ... إلخ.



الشكل (٩-١): دورة الكربون البيئية

توجد أشكال الكربون في البيئة الأرضية والمائية وفق ثلاثة مصادر رئيسة، ولعل أكبرها الصخور الكربوناتية؛ مثل كربونات الكالسيوم $(CaCO_3)$، والدولوميت $CaMgCO_3$ ، وثانيها المادة المدفونة في الأرض والمياه وذلك على هيئة وقود أحفوري (فحم، بترول، غاز طبيعي)، أما ثالثها فهو المادة العضوية التي توجد على سطح الأرض، أو داخل التربة، أو في الماء.

تقوم بعض الكائنات الدقيقة بخلق بعض المواد العضوية على سطح المحيطات، بوجود ضوء الشمس، وهذا يجعل المياه السطحية تأخذ رقماً هيدروجينياً أعلى، ألا أن قلويتها تبقى أقل من المياه التي تقع تحتها كما في التفاعل.

$$CaCO_3 + CO_{2(aq)} + H_2O \rightleftarrows Ca^{2+}_{(aq)} + 2HCO^-_{3\,(aq)}$$

تكون عادةً قيمة pH (8.2) عند سطح المحيط. هناك عملية أخرى في دورة الكربون هي أكسدة البيوماس الذي يتكون من نسبة عالية من الكربوهيدرات وخاصةً

السللوز، ومشتقاته، والبيوماس هو عبارة عن النباتات الميتة، والأعشاب، والقش، وأوراق الشجر، وفروعها،... إلخ.

يطلق أحياناً على هذه العملية التحلل، أو التدهور، ويعبر عنها وفق التفاعل الآتي:

$$\{CH_2O\}+5H_2O \longrightarrow CO_{2(g)}+4H_3O^+_{(aq)}+4e^-$$

يرافق وجود جزيئات الأكسجين التي تقوم بعملية الأكسدة حدوث تفاعل نصفي مترافق (إرجاع):

$$O_2+4H_3O^+_{(aq)}+4e^- \longrightarrow 6H_2O$$

يمكن في حال غياب الأكسجين أن تتم أكسدة المادة العضوية بوساطة أكسدة من نوع آخر مثل الإسهام الذي تقوم فيه النترات بوظيفة المستقبل للإلكترون، ويتم إرجاعها إلى نتريت، أو أمونيوم، أو أكسيد نتروز، أو حتى غاز النتروجين، وهذا مرهون بظروف البيئة المحيطة.

يعد تفاعل الارجاع الذي يتكون فيه غاز النتروجين من أهم التفاعلات؛ لأنه يمثل حلقة وصل في دورة النتروجين؛ والتفاعل هو:

$$2NO^-_{3(aq)}+12H_3O^+_{(aq)}+10e^- \longrightarrow N_2+18H_2O$$

نحصل بضم هذا التفاعل إلى تفاعل أكسدة الكربوهيدرات على التفاعل الكلي الآتي:

$$4NO^-_{3(aq)}+5\{CH_2O\}+4H_3O^+_{(aq)} \longrightarrow 2N_2+5CO_2+11H_2O$$

يلحظ مما سبق أن النترات تملك قدرة على أكسدة المادة العضوية في غياب الأكسجين، ويتم وفق هذا التفاعل إزالة النترتة، ويحدث هذا التفاعل في المياه الراكدة التي تحتوي على قدر كبير من البيوماس.

تحل الكبريتات في حال غياب كل من الأكسجين والنترات لتؤدي وظيفة المستقبل للإلكترونات في عملية الأكسدة للمادة العضوية:

$$SO^{2-}_{4(aq)}+9H_3O^+_{(aq)}+8e^- \longrightarrow HS^-_{(aq)}+13H_2O$$

وبالجمع مع تفاعل الأكسدة ⇐

$$2\{CH_2O\}+H_3O^+_{(aq)}+SO^{2-}_{4(aq)} \longrightarrow HS^-_{(aq)}+2CO_2+3H_2O$$

يرافق غياب العوامل المؤكسدة، وخلو البيئة من الأكسجين، والنترات، والكبريتات، تأكسد المادة العضوية تأكسداً لاهوائياً يطلق على هذه العملية اسم التخمر معطيةً نواتج متنوعة، أهمها الميثان بحسب التفاعل:

$$CO_2 + 8H_3O^+_{(aq)} + 8e^- \longrightarrow CH_4 + 10H_2O$$

يتم بجمع هذا التفاعل هذا مع الأكسدة السابقة الحصول على التفاعل الإجمالي الآتي:

$$2\{CH_2O\} \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

يسمى غاز الميثان بغاز المستنقعات؛ لأنه يتكون كثيراً في قاع المستنقعات، والمياه الراكدة والأراضي المغمورة بالمياه.

يحدث أحياناً تفاعل التخمر ليعطي نواتج أخرى؛ مثل: الأحماض الكربوكسيلية، وغاز الهيدروجين؛ كما في التفاعل الآتي:

$$3\{CH_2O\} + 4H_2O \longrightarrow CH_3COO^-_{(aq)} + HCO^-_{3(aq)} + 2H_2 + 2H_3O^+_{(aq)}$$

لايؤدي هذا التفاعل إلى انحلال كامل كما في حالة الانحلال الذي ينتج منه الميثان وغاز ثنائي أكسيد الكربون.

تحدث مثل هذه التفاعلات السابقة في الماء، وفي التربة، خاصةً تلك المغمورة بالمياه، وفي حالة الرواسب البحرية، والمحيطات، والمياه العذبة.

٩-٣-٣: دورة النتروجين: *Nitrogen Cycle*

تؤثر دورة النتروجين في الحياة على سطح الأرض، وتعد من أهم الدورات الطبيعية، كونه يوجد بأشكال مختلفة متعددة في كل من الأرض والماء، كما أنه يعد غذاء مهماً للنباتات والحيوانات.

يمكن أن يؤدي وجوده بتراكيز مرتفعة إلى حالة من التشبع الغذائي، وإلى تسمم بعض الكائنات الحية. يتأكسد النتروجين في الظروف الهوائية عند توافرها في التربة، والماء متحولاً إلى النترات، في حين يتم ارجاعه بغياب الظروف الهوائية إلى نتريت، ثم إلى نشادر، ويبين الشكل (٩-٢) دورة النتروجين البيئية.

يلحظ من خلال دورة النتروجين أن بعض العمليات المهمة مثل: تثبيت النتروجين: وهي العملية التي يتحول فيها غاز النتروجين إلى النترات، أو إلى أيونات

الأمونيوم، وهي عملية تحتاج إلى كسر الرابطة $N \equiv N$ الثلاثية التي تقدر بـ $945\ KJ\ mol^{-1}$، وتحتاج هذه العملية إلى طاقة كبيرة.

تعد الصواعق، والبرق، مصادر الطاقة في الجو، ويعتمد التثبيت الصناعي على طريقة هابر كما في التفاعل الآتي:

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

يستخدم أغلب النشادر الناتج في صناعة اليوريا $(NH_3)_2CO$ التي تستخدم في تسميد الأراضي الزراعية.

يتثبت النتروجين بيولوجياً بوساطة الكائنات الدقيقة التي تعيش في بعض العقد الآزوتية في النباتات خاصةً؛ مثل البقوليات (الفول).

يمكن أن تقوم الكائنات الحية الدقيقة البحرية بتثبيت النتروجين؛ مثل الطحالب الزرقاء.

- إزالة النتروجين: تشمل هذه العملية إعادة النتروجين من الماء والتربة إلى الجو، ويحدث هذا التفاعل في المياه الراكدة، وفي المياه العميقة الغنية بالمواد العضوية في البحار، والبحيرات، والمحيطات.

تعد عملية إرجاع النترات إلى غاز النتروجين، أحد أهم هذه التفاعلات وتتكون خلاله بعض المواد الوسيطة؛ مثل النتريت، وأكسيد النتريل، وتقوم به أنواع من البكتريا:

$$4NO_{3(aq)}^{-} + 5\{CH_2O\} + 4H_3O_{(aq)}^{+} + \longrightarrow 2N_2 + 5CO_2 + 11H_2O$$

يؤدي النقص في الأكسجين إلى تشكل أوكسيد النتروز:

$$NO_{3(aq)}^{-} + 2\{CH_2O\} + 2H_3O_{(aq)}^{+} + \longrightarrow NH_4 + 2CO_2 + 3H_2O$$

ينتج النتروجين أيضاً عن احتراق الوقود، والبيوماس القابل للاشتعال الذي ينطلق إلى الجو بكميات متفاوتة على هيئة مركبات NO_x.

ينبعث النتروجين بنسب متغايرة من المادة العضوية، فيكون على هيئة أحماض أمينية في البروتينات.

يرافق ذوبان المادة العضوية في الماء أو التربة انطلاق النتروجين في شكله المرجع على هيئة أيونات أمونيا، أو نشادر؛ كما في التفاعل الآتي:

$$2CH_3NHCOOH + 3O_2 + 2H_3O_{(aq)}^{+} + \longrightarrow 2NH_{4(aq)_2}^{+} + 4CO_2 + 4H_2O$$

النترجة: *Nitrification*

يتأكسد أيون الأمونيوم الموجود في التربة، أو الماء، أو الناتج من الأسمدة الآزوتية؛ مثل اليوريا، أو نترات الأمونيوم، أو كبريتات الأمونيوم في البيئة الهوائية في وسط من الـ *pH* يقع بين *(2-8)*،وتقل سرعة النترجة عندما تكون الـ *pH* أقل من *6*.

يتم التفاعل عبر خطوتين يجريان بوساطة بكتريا هوائية:

$$2NH^{+}_{4(aq)} + 3O_2 + 2H_2O \longrightarrow 2NO^{-}_{2(aq)} + 4H_3O^{+}_{(aq)}$$

$$2NO^{-}_{2(aq)} + O_2 + \longrightarrow 2NO^{-}_{3(aq)}$$

وبدمج التفاعلين: ⇐

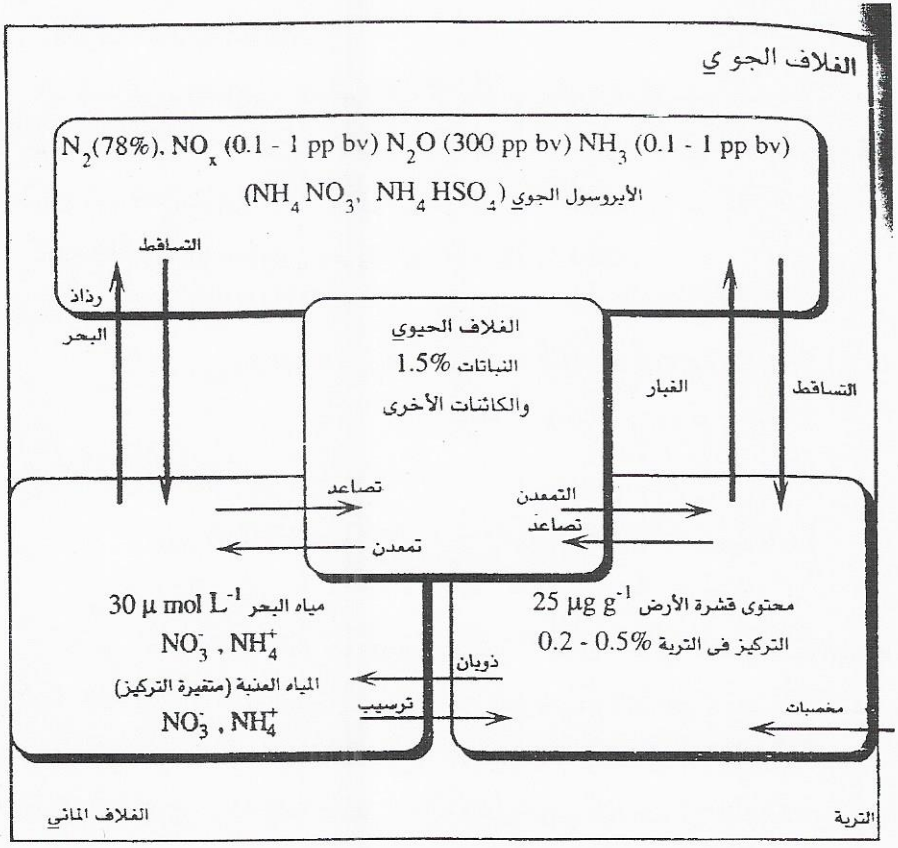
$$2NH^{+}_{4(aq)} + 4O_2 + 2H_2O \longrightarrow 2NO^{-}_{3(aq)} + 4H_3O^{+}_{(aq)}$$

يعد من أهم تفاعلات النترات تفاعل مايسمى بالتمثيل الغذائي الذي تقوم به النباتات؛ كونه يعد من أهم العناصر بعد كل من الكربون، والأكسجين؛ حيث يصل النتروجين إلى النبات على هيئة النشادر، والأمونيوم، والنترات، وأول خطوات امتصاص النترات بوساطة النباتات هي عملية تبادل أيوني عند جذر النبات، وهي عملية معادلة للحمض؛ لأن الأيون المستبدل من الخلية عادةً مايكون أنيوناً لحمض ضعيف؛ مثل الكربونات التي تصبح مستقبلاً للبروتونات عند انطلاقه إلى المحلول؛ كما في التفاعل:

$$Root\,CO^{2-}_3 + 2NO^{-}_{3(aq)} \longrightarrow CO^{2-}_{3(aq)} + Root\,(NO^{-}_3)_2$$

$$CO^{2-}_{3(aq)} + 2H_3O^{+}_{(aq)} \longrightarrow CO_{2(aq)} + 3H_2O$$

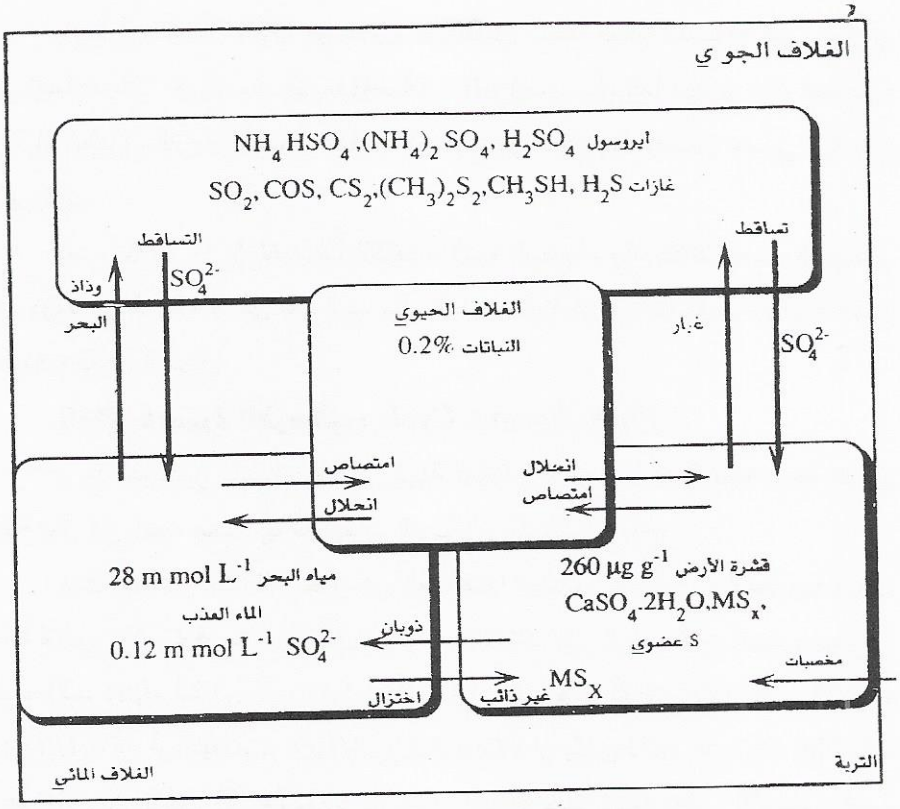
يمكن أن تمتز أيونات الأمونيوم الموجبة على أغلب السطوح الغروية التي تحمل شحنات سالبة، وهذا يجعلها صالحة للتبادل الأيوني وعلى عكس ذلك لاتميل أيونات النترات السالبة إلى الدخول في تفاعلات الامتزاز كونها لاتتمتع بقدرة عالية على الحركة.



شكل (٩-٢): دورة النتروجين البيئية

٩-٣-٣: دورة الكبريت: *Sulfur Cycle*

يوجد الكبريت في كل من الماء والتربة على هيئة مركبات عضوية ولاعضوية تتمتع بحالات أكسدة تتراوح بين (2- إلى 6+) وهو يؤدي وظيفة مهمة في العمليات البيئية، وفي غذاء النباتات، والكائنات الدقيقة، وتقدر كمية الكبريت التي يحتاج إليها الكائن الحي أقل من كمية النتروجين؛ حيث توجد على هيئة كبريتات في ظروف هوائية وعلى هيئة كبريتيد الهيدروجين في ظروف لاهوائية. يوضح الشكل (٩-٣) دورة الكبريت بعناصرها المختلفة.



الشكل (٩-٣): دورة الكبريت البيئية

أكسدة الكبريتيد: يتأكسد الكبريتيد على نحو سريع في البيئة الهوائية؛ كونه غير ثابت وذلك حسب التفاعل الآتي:

$$HS^-_{(aq)} + 2O_2 + H_2O \longrightarrow SO^{2-}_{4(aq)} + H_3O^+_{(aq)}$$

يحدث هذا التفاعل بوساطة بكتريا توجد في أغلب المياه التي تحتوي على الأكسجين، وفي الترب، ويرافق هذا التفاعل رفع حموضة الوسط، بما يتوافق مع نسبة تكوين أيون الهيدرونيوم في الوسط.

ارجاع الكبريتات: *Reduction of Sulphate*

ترجع الكبريتات بسهولة في البيئة المائية خاصةً، إذا كانت غنية بالمواد العضوية، وذلك إلى حالة أكسدة الصفر، أو 2-؛ كما في التفاعل الآتي:

$$SO^{2-}_{4(aq)} + 2\{CH_2O\} + H_3O^+_{(aq)} + \longrightarrow HS^-_{(aq)} + 2CO_2 + 3H_2O$$

$$2SO^{2-}_{4(aq)} + 3\{CH_2O\} + 4H_3O^+_{(aq)} + \longrightarrow 2S^-_{(aq)} + 3CO_2 + 9H_2O$$

يلحظ أن التفاعل الأول هو عبارة عن تفاعل أكسدة المادة العضوية الذي يؤدي إلى تصاعد غاز H_2S عند قيم منخفضة لـ pH (حمضي)، كما تحتوي مياه البحار، والمياه العذبة، والتربة المشبعة بالماء، على نوع من البكتريا تعمل على إرجاع الكبريتات.

يعد HS^-، أو H_2S ساماً للكائنات الحية البحرية، وقد يتفاعل مع المعادن الموجودة في التربة، أو في الرواسب مثل الحديد مكوناً كبريتيدات غير ذوابة من مكونات الطفل البحري.

٩-٣-٤: دورة الفوسفور: *Phosphorous Cycle*

يوجد الفوسفور بأشكال عدة في البيئة المائية والقشرة الأرضية لكنه يوجد على هيئة غاز في الجو، مصحوباً لجسيمات التربة التي تحملها الرياح.

هناك مصادر عدة للفوسفور في الماء منها مصادر عضوية – لاعضوية تتحلل مائياً لتعطي الأورثوفوسفات بأشكال أيونية عدة تعتمد على تركيز أيون الهيدروجين في الماء (الـ pH)، أما في التربة فيكون الفوسفور على هيئة فلزات خام؛ مثل: الأباتيت، $Ca_5(PO_4)_2$، أو الفيفانايت $Fe_5(PO_4)_2.8H_2O$، أو يكون ناتجاً عن تحلل النباتات وغيرها، يبين الشكل (٩-٤) دورة الفوسفور البيئية، حيث تسهم بعض الأيونات في ذوبان الفوسفور في الماء؛ مثل: الحديد، أو الألمنيوم في الأوساط الحمضية، أو الكالسيوم في الأوساط القلوية حيث يشكل كل أيون منها مركبات فوسفاتية غير ذوابة.

تؤدي درجة الـ pH وظيفةً مهمةً عندما تكون قريبة إلى حد ما من الوسط الحمضي الذي يكون ذوبان الفوسفور فيه أعلى مايمكن وعلى هيئة $H_2PO_4^-$.

– تكمن أهمية وجود الفوسفور في البيئة كونه مادة غذائية مهمة لكل من النباتات والكائنات الحية الدقيقة، إذ يمكن الاستفادة من الفوسفور والبوتاسيوم بيئياً عند التراكيز المقبولة؛ لكنه إذا مازاد ووجد بتراكيز كبيرة خاصة في الماء؛ أدى إلى نمو الطحالب، وبعض الكائنات الدقيقة المائية بشكل كبير.

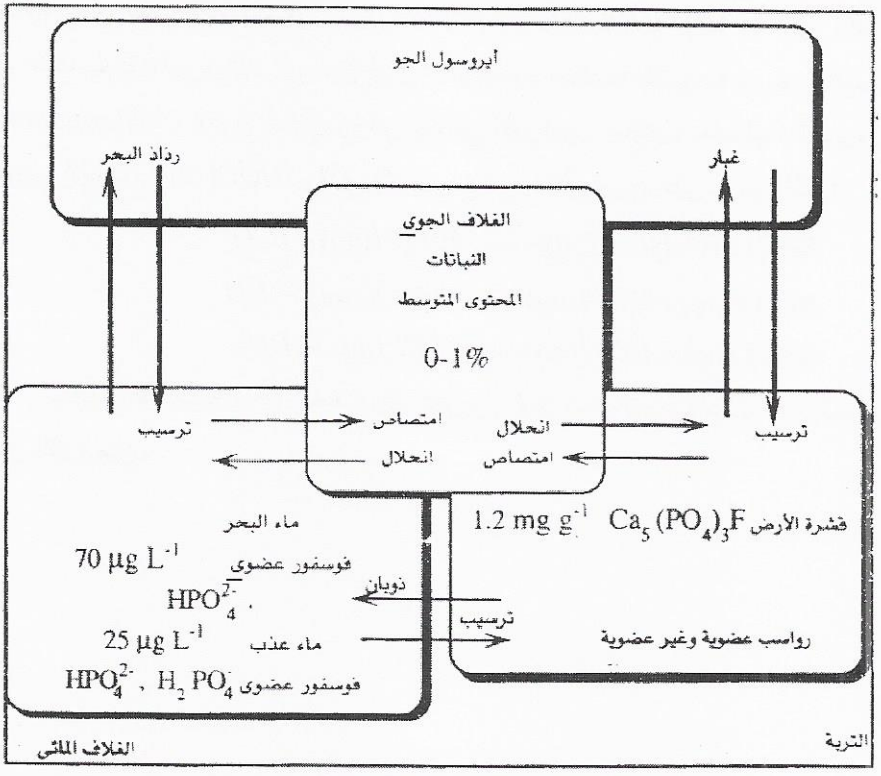
يرافق عملية التركيب الضوئي في هذه النباتات إطلاق لغاز الأكسجين، في حين يؤدي موتها وتحللها إلى استهلاك الأكسجين، وانطلاق لغاز ثنائي أكسيد الكربون، ومايرافق ذلك من بيئة سامة وحمضية كما في التفاعل المتوازن الآتي:

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons [CH_2O] + O_2$$

تقسم مصادر الفوسفور في الأنهار والبحيرات إلى نوعين: يعود المصدر الأول إلى المياه العادمة الصناعية، والمياه العادمة المنزلية، والناتج عن المدن، أما النوع الثاني فيأتي من المياه العادمة الزراعية.

تعد المياه العادمة المصدر الأساس للفوسفور، وأهم مكوناتها هي مخلفات المنظفات الصناعية التي تحتوي على الفوسفات والتي تستخدم في إزالة أيونات الكالسيوم من مياه الغسيل؛ أي تمنع المواد ذات النشاط السطحي من الترسيب.

تؤدي عدم معالجة مصادر المياه من الفوسفور، إلى حالة التشبع الغذائي، لذا يجب معالجة المياه بطرائق كيميائية، أو بيولوجية، للتخفيف من هذه الحالة؛ حيث يصعب التحكم في بعض مصادره خاصةً المياه العادمة الزراعية التي يجرف فيها الفوسفور بوساطة الأمطار عبر التربة ومنها إلى المياه السطحية والجوفية.



الشكل (٩-٤): دورة الفوسفور في البيئة

ويتضح مما سبق أن الفوسفور يمثل عنصراً مهماً يجب إزالته من خليط المخلفات السائلة، وهناك عنصراً آخر لايقل أهمية عنه، وهو عنصر النتروجين، لأنه يعد أيضاً غذاءً مهماً للطحالب، والبكتريا، وغيرها.

تعد إزالة المواد النتروجينية أمراً صعباً لعدم إمكانية ترسيبها في أي شكل من الأشكال؛ كما في حالة الفوسفور. وإذا وجد النتروجين على هيئة أيون أمونيوم، فإنه يمكن إزالته بسهولة عبر تعديل قيمة *pH* المحلول؛ بإضافة هيدروكسيد الكالسيوم (يعمل أيضاً على ترسيب الفوسفور كما سبق ذكره)، ثم يمرر المحلول خلال برج على هيئة رذاذ للتخلص من غاز النشادر.

$$NH_4^+(aq) + OH^-(aq) \longrightarrow NH_3(g) + H_2O$$

هناك طريقة أخرى بديلة لاتحتاج إلى تغيير *pH* المحلول، يمكن من خلالها التخلص من أيون الأمونيوم في وسط متعادل؛ باستخدام مبادلات أيونية صناعية، كما أن هناك طريقة أخرى للتخلص من أيون الأمونيوم بعملية كلورة بغاز الكلور *"Chlorination"*، لتكون أحادي وثنائي وثلاثي كلورامين. يستخدم عادةً لهذا الغرض حمض الهيبوكلوريك *HOCl*، والذي يتفاعل مع أيون الأمونيوم، على النحو الآتي:

$$NH_4^+(aq) + HOCl(aq) \longrightarrow NH_2Cl(aq) + H_3O$$

$$NH_2Cl(aq) + HOCl(aq) \longrightarrow NHCl_2(aq) + H_2O$$

$$NHCl_2(aq) + HOCl(aq) \longrightarrow NCl_3(aq) + H_2O$$

يحدث عند استخدام مرشحات مثل الكربون امتزاز لنواتج التفاعل، وانطلاق لغاز النتروجين.

مكتبة A to Z