مفهوم الدورات الكيمياوية الارضية الحياتية Concepts of Biogeochemical Cycles (بايوجيوكيميائية)

ان العناصر الكيمياوية ويضمنها العناصر الضرورية للبروتو بلازم تميل الى الدوران في البيئة الحياتية بممرات خاصة، من البيئة الى الكائنات ثم ترجع الى البيئة، تعرف هذه الممرات الدائرية لحد ما **بالدورات الحياتية الارضية الكيمياوية.** من الملائم ان يشار الى حركة تلك العناصر والمركبات اللاعضوية الضرورية للحياة بالتدوير الغذائي Nutrient cycle ، كذلك من الملائم نعين لكل دورة قسمين او مجمعين:

1- المجمع الاحتياط Reservoir Pool المكون الواسع البطيء الحركة وغير الحياتي عادة .
2- مجمع التبادل أو التدوير ، القسم الاصغر ولكنه أكثر فاعلية ، المتبادل (أي يتحرك خلفا واماما) بسرعة بين الكائنات الحية وبيئتها الوسطية.

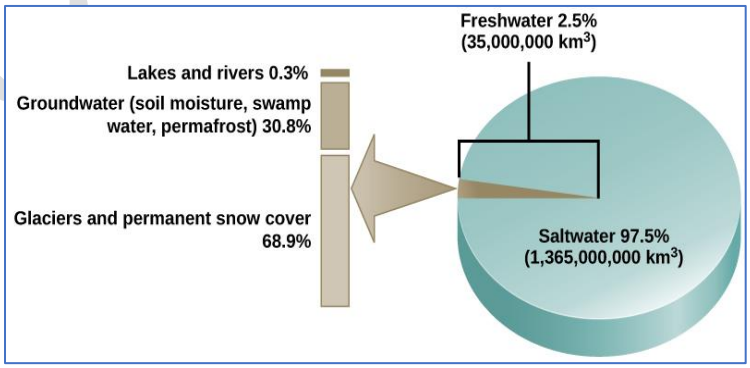
تتدفق الطاقة بشكل مباشر عبر النظم البيئية، وتدخل كضوء الشمس (أو جزيئات غير عضوية) وتغادر كحرارة أثناء عمليات النقل بين المستويات الغذائية بدلاً من التدفق عبر النظام البيئي، يتم الحفاظ على المادة التي تشكل الكائنات الحية وإعادة تدويرها. تتخذ العناصر الستة الأكثر شيوعًا المرتبطة بالجزيئات العضوية – الكربون والنيتروجين والهيدروجين والأوكسجين والفوسفور والكبريت - مجموعة متنوعة من الأشكال الكيميائية وقد توجد لفترات طويلة في الغلاف الجوي أو على الأرض أو في الماء أو تحت سطح الأرض.
وتحصل الأحياء على هذه العناصر بواسطة السلسلة الغذائية وتبدأ النباتات بامتصاصها من التربة او المياه او الهواء . سميت هذه الدورات بهذه التسمية أي الدورات البايوجيوكيميائية بسبب ان هذه العناصر اغلبها ذات منشأ ارضي وتتحول بالعمليات كيميائية ثم تدخل أجسام الكائنات الحية مكونة جسم الكائن الحي . هنالك ثلاثة أنواع رئيسية من الدورات التي يمكن ملاحظتها في النظام البيئي وهي :-

1- **الدورة المائية Hydrologic cycle**
2- **الدورة الغازية Gaseous cycle :** سنتطرق الى دورة النتروجين
3- **الدورة الرسوبية Sedimentary cycle :** سنتطرق الى دورة الفوسفور.

اضافة الى ان دورة الكبريت خير مثال يوضح الارتباط بين الهواء والماء وقشرة الأرض، ان كلا من الدورتي النايتروجين والكبريت توضح الوظيفية الاساسية التي ادتها الأحياء المجهرية وكذلك التعقيد المسبب عن تلوث الهواء الصناعي .

الدورة المائية Hydrologic cycle

الماء ضروري لجميع العمليات الحية، يتكون جسم الإنسان من أكثر من نصف الماء والخلايا البشرية أكثر من 70 % من الماء. وبالتالي، تحتاج معظم الحيوانات البرية إلى إمدادات المياه العذبة للبقاء على قيد الحياة. يوضح الشكل 1 مخازن المياه على الأرض 97.5 % هي مياه مالحة من المياه المتبقية، يتم حبس 99 % منها كمياه جوفية أو ثلج وبالتالي، يوجد أقل من 1% من المياه العذبة في البحيرات والأنهار. تعتمد العديد من الكائنات الحية على هذه الكمية الصغيرة من إمدادات المياه العذبة السطحية، والتي يمكن أن يكون لنقص هذه الكمية تأثيرات مهمة على ديناميكيات النظام البيئي.
لقد طور البشر بالطبع تقنيات لزيادة توافر المياه، مثل حفر الآبار لحصاد المياه الجوفية، وتخزين مياه الأمطار، واستخدام تحلية المياه للحصول على مياه صالحة للشرب من المحيط. على الرغم من أن هذا السعي وراء المياه الصالحة للشرب كان مستمرًا طوال تاريخ البشرية، إلا أن إمدادات المياه العذبة لا تزال تمثل مشكلة رئيسية في العصر الحديث.

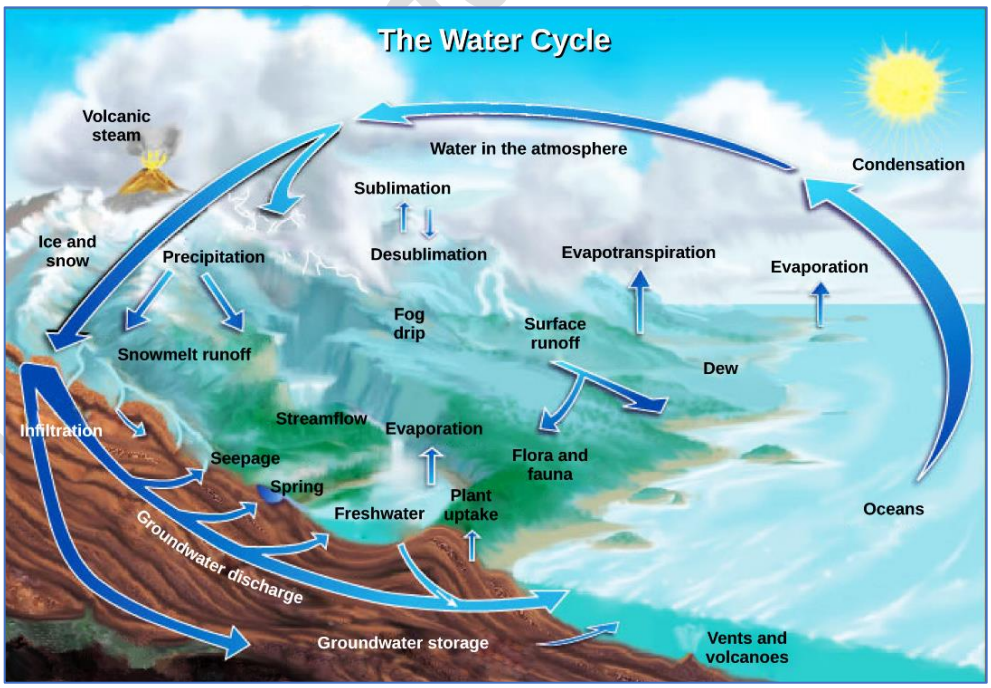


الشكل1: يوضح كمية ونسب المياه على الكرة الارضية

يتم تشغيل دورة المياه بواسطة طاقة الشمس لأنها تدفئ المحيطات والمياه السطحية الأخرى. وهذا يؤدي إلى تبخر Evaporation (الماء إلى بخار الماء) للمياه السطحية السائلة وتسامي sublimation الماء المتجمد (الثلج snow إلى بخار الماء)، وبالتالي نقل كميات كبيرة من الماء إلى الغلاف الجوي كبخار ماء. مع مرور الوقت، يتكثف بخار الماء condensation هذا في السحب على شكل قطرات سائلة أو مجمدة ويؤدي في النهاية إلى هطول الأمطار (المطر أو الثلج)، مما يعيد الماء إلى سطح الأرض. قد تتبخر الأمطار التي تصل إلى سطح الأرض مرة أخرى أو تتدفق فوق السطح أو تتسرب إلى الأرض. أكثر ما يمكن ملاحظته هو جريان السطحي Surface runoff: تدفق المياه العذبة إما من المطر أو الجليد الذائب. يمكن أن يشق الجريان السطحي طريقه عبر الجداول والبحيرات إلى المحيطات أو يتدفق مباشرة إلى المحيطات نفسها.

في معظم البيئات الأرضية الطبيعية، يواجه المطر الغطاء النباتي قبل أن يصل إلى سطح التربة، تتبخر نسبة كبيرة من الماء على الفور من أسطح النباتات، ما تبقى يصل إلى التربة ويبدأ في التحرك لأسفل. لن يحدث الجريان السطحي إلا إذا أصبحت التربة مشبعة بالماء في هطول الأمطار الغزيرة سوف تمتص جذور النباتات معظم المياه في التربة. سيستخدم النبات بعضًا من هذه المياه لعملية التمثيل الغذائي الخاصة به، وسيجد بعضها طريقه إلى الحيوانات التي تأكل النباتات، ولكن الكثير منها سيضيع مرة أخرى في الغلاف الجوي من خلال عملية تعرف باسم التبخر والنتح. يدخل الماء إلى نظام الأوعية الدموية للنبات من خلال الجذور ويتبخر، أو يتدفق، من خلال ثغور الأوراق. يمكن للمياه الموجودة في التربة التي لا تمتصها النباتات والتي لا تتبخر أن تتسرب إلى باطن الأرض والصخور. هنا تشكل المياه الجوفية.

تعتبر المياه الجوفية ground water خزانًا مهمًا للمياه العذبة، يوجد في المسام بين الجسيمات في الرمل والحصى، أو في الشقوق في الصخور. تتدفق المياه الجوفية الضحلة ببطء عبر هذه المسام والشقوق وتجد طريقها في النهاية إلى مجرى مائي أو بحيرة حيث تصبح جزءًا من المياه السطحية مرة أخرى. لا تتدفق تيارات المياه لأنها تتجدد من مياه الأمطار مباشرة؛ فهي تتدفق بسبب وجود تدفق مستمر من المياه الجوفية في الأسفل. توجد بعض المياه الجوفية في أعماق الصخور ويمكن أن تستمر هناك لآلاف السنين. معظم خزانات المياه الجوفية، أو طبقات المياه الجوفية، هي مصدر مياه الشرب أو الري التي يتم سحبها من خلال الآبار. في كثير من الحالات يتم استنزاف طبقات المياه الجوفية هذه بشكل أسرع من تجديدها عن طريق تسرب المياه من الأعلى. يعتبر المطر والجريان السطحي من الطرق الرئيسية التي يتم من خلالها تدوير المعادن، بما في ذلك الكاربون والنيتروجين والفوسفور والكبريت، من الأرض إلى الماء.



الشكل (2) : يوضح الشكل العمليات المختلفة التي تحدث أثناء دورة المياه

(تدخل المياه من الأرض والمحيطات إلى الغلاف الجوي عن طريق التبخر أو التسامي، حيث تتكثف في السحب وتسقط كمطر أو ثلج. قد تدخل المياه المترسبة مسطحات المياه العذبة أو تتسلل إلى التربة، تكتمل الدورة عندما تعود المياه السطحية أو الجوفية إلى المحيط).

الدورة الغازية : مثال عليه دورة النايتروجين Nitrogen cycle

من الصعب إدخال النيتروجين إلى الكائن الحي، فالنباتات والعوالق النباتية ليست مجهزة لدمج النيتروجين من الغلاف الجوي (الموجود في صورة غاز النايتروجين N_2) على الرغم من أن هذا الجزيء يضم حوالي 78 % من الغلاف الجوي. يدخل النيتروجين للكائن الحي عن طريق البكتيريا المحللة والتكافلية، التي تدمج النيتروجين في جزيئاتها الكبيرة من خلال:

- **تثبيت النيتروجين** (تحويل N_2) تعيش السيانوبكتريا في معظم النظم البيئية المائية حيث يوجد ضوء الشمس؛ فهي تلعب دورًا رئيسيًا في تثبيت النيتروجين. تستطيع بعض سيانوبكتريا استخدام مصادر غير عضوية للنيتروجين. وتعد البكتيريا التي تعيش بحرية، مثل *Azotobacter*، من مثبتات النيتروجين المهمة أيضًا.
- تعيش بكتيريا *Rhizobium* **بشكل تكافلي** في العقيدات الجذرية للبقوليات (مثل البازلاء والفاصوليا والفول السوداني) وتزودها بالنيتروجين العضوي الذي تحتاجه.

يعتبر النيتروجين العضوي مهمًا بشكل خاص لدراسة ديناميكيات النظام البيئي نظرًا لأن العديد من عمليات النظام البيئي، مثل الإنتاج الأولي والتحلل، محدودة بسبب الإمداد المتاح من النيتروجين. كما هو موضح في الشكل 2 ، ان النايتروجين في البروتوبلازم يتحطم من حالة عضوية الى اخرى لاعضوية بوساطة سلسلة من البكتريا المحللة ، تخصص كل منها في جزء من العمل . ينتهي جزء من هذا النايتروجين الى نترات وهي الحالة الاكثر سهولة للاستعمال من قبل النباتات الخضراء (بالرغم من أن بعض الاحياء تستطيع الاستفادة من النايتروجين باشكال اخرى كما هو موضح) وبهذا تكتمل الدورة.

فإن النيتروجين الذي يدخل البروتوبلازم عن طريق تثبيت النيتروجين يتم تحويله في النهاية من النيتروجين العضوي مرة أخرى إلى غاز النيتروجين بواسطة سلسلة من البكتيريا المحللة للنايتروجين ويرجع بالاستمرار الى الدورة بفعل البكتريا المثبتة للنايتريجين او بفعل الطحالب الخضر المزرقة او خلال فعل البرق (اي الكهربة electrification). فالخطوات من البروتينات فنازلاً الى النترات تقدم طاقة للكائنات التي تقوم بانجاز التحليل ، في حين تحتاج الخطوات الراجعة الى طاقة من مصادراخرى كالمادة العضوية أو ضوء الشمس وغيرها.

تحدث هذه العملية في ثلاث خطوات في الأنظمة الأرضية: التسميد والنترجة ونزع النتروجين. **أولاً**، تقوم عملية التسميد بالأمونيا بتحويل النفايات النيتروجينية من الحيوانات الحية أو من بقايا الحيوانات الميتة إلى أمونيوم (NH_4^+) بواسطة بعض البكتيريا والفطريات. **ثانيًا**، يتم تحويل هذا الأمونيوم بعد ذلك إلى النتريت (NO_2^-) عن طريق إزالة النترجة من البكتيريا، مثل*Nitrosomonas* ، من خلال النترجة. **بعد ذلك**، يتم تحويل النتريت إلى نترات (NO_3^-) بواسطة بكتريا *Nitrobacter*. **أخيرًا**، تحدث عملية نزع النتروجين، حيث تقوم البكتيريا، مثل *Pseudomonas*و *Clostridium* بتحويل النترات إلى غاز نيتروجين، مما يسمح لها بإعادة دخول الغلاف الجوي.

في عام ١٩٥٠ تقريباً كان يعتقد ان القابلية على تثبيت نايتروجين الجو مقصورة على القليلة من الكائنات ولكن الوافرة الاعداد : البكتريا حرة المعيشة (لا هوائية) *Clostridium* و (هوائية) *Azotobacter* وبكتريا العقد الجذرية *Rhizobium* و الطحالب الخضر المزرقة *Anabaena* و *Nostoc* /لتابعة لرتبة Nostocales وعندئذ اكتشف ان البكتريا الارجوانية*Rhodospirillum* وانواع اخرى من بكتريا البناء الضوئي هي مثبتات النايتروجين، وكذلك نوع من بكتريا التربة شبيهة بـ Pseudomonas لها ايضا هذه القدرة .وهذا يبين ان القابلية لتثبيت النايتروجين واسعة الانتشار بين الكائنات الدقيقة التي تقوم بعملية التركيب الضوئي والتركيب الكيميائي ومعتمدي التغذية.

يمكن للنشاط البشري إطلاق النيتروجين في البيئة بوسيلتين أساسيتين: احتراق الوقود الأحفوري، الذي يطلق أكاسيد النيتروجين NO_X المختلفة، واستخدام الأسمدة الكيميائية (التي تحتوي على مركبات النيتروجين والفوسفور) في الزراعة، والتي يتم غسلها بعد ذلك في البحيرات والجداول والأنهار عن طريق الجريان السطحي .يرتبط النيتروجين في الغلاف الجوي (بخلاف N_2) بالعديد من التأثيرات على النظم البيئية للأرض بما في ذلك إنتاج المطر الحمضي (مثل حمض النيتريك HNO_3) وتأثيرات غازات الاحتباس الحراري (مثل أوكسيد النيتروز N_2O)، مما قد يسبب المناخ تغيير. يتمثل أحد الآثار الرئيسية لجريان الأسمدة في إغناء المياه المالحة والمياه العذبة بالمغذيات، وهي عملية يؤدي فيها جريان المغذيات إلى فرط نمو الطحالب وعدد من المشاكل اللاحقة.

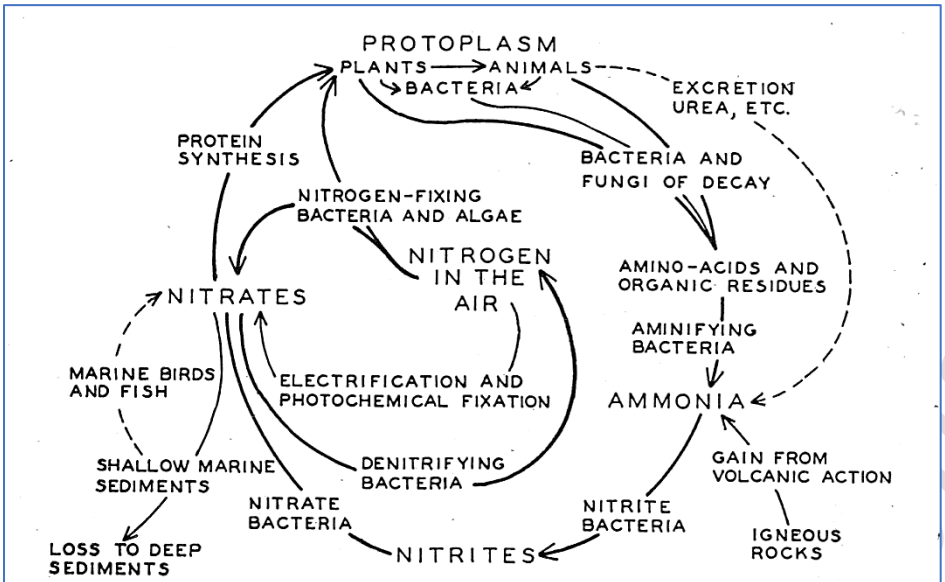


Figure 2. The nitrogen biogeochemical cycle, an example of a relatively perfect, self-regulating cycle in which there is little over-all change in available nitrogen in *large* ecosystems or in the biosphere as a whole, despite rapid circulation of materials. Some quantitative estimates of interest are as follows:

تحدث عملية مماثلة في دورة النيتروجين البحري، حيث تتم عمليات التسميد والنترجة ونزع النتروجين بواسطة البكتريا البحرية والمحللة للنايتروجين، اذ يسقط بعض هذا النيتروجين في قاع المحيط كرواسب والتي يمكن بعد ذلك نقلها إلى الأرض في الوقت الجيولوجي عن طريق رفع سطح الأرض، وبالتالي دمجها في الصخور الأرضية. على الرغم من أن حركة النيتروجين من الصخور مباشرة إلى الأنظمة الحية يُنظر إليها تقليديًا على أنها غير مهمة مقارنة بالنيتروجين الثابت من الغلاف الجوي، فقد أظهرت دراسة حديثة أن هذه العملية قد تكون مهمة بالفعل ويجب تضمينها في أي دراسة لدورة النيتروجين العالمية.

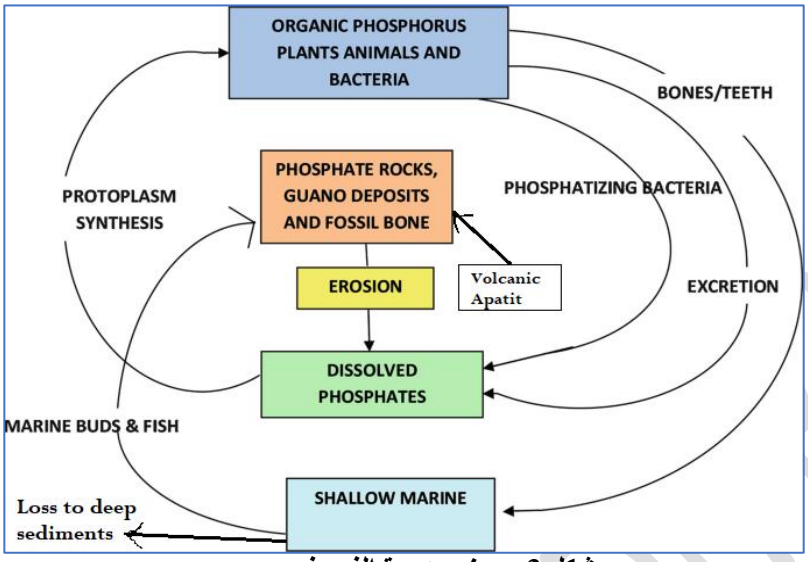
دورة الفسفور Phosphorous cycle

الفوسفورعنصر نادر مقابلة بالنايتروجين، نسبته إلى النايتروجين في المياه الطبيعية حوالي 1 :3. الفوسفور عنصر غذائي أساسي للعمليات الحية، إنه مكون رئيسي للأحماض النووية والفوسفوليبيدات Phospholipids، وباعتباره فوسفات الكالسيوم، يشكل المكونات الداعمة لعظامنا، غالبًا ما يكون الفوسفور هو العنصر الغذائي المحدود (العامل المحدد) في النظم البيئية المائية، وخاصة المياه العذبة.

يوجد الفوسفور في الطبيعة كأيون الفوسفات (PO_4^{3-}) بالإضافة إلى جريان الفوسفات نتيجة للنشاط البشري، يحدث الجريان السطحي الطبيعي عندما يتم ترشيحه من الصخور المحتوية على الفوسفات عن طريق التجوية، وبالتالي إرسال الفوسفات إلى الأنهار والبحيرات والمحيطات. تعود أصول هذه الصخرة إلى المحيط،تتكون رواسب المحيطات المحتوية على الفوسفات بشكل أساسي من أجسام الكائنات الحية في المحيطات ومن إفرازاتها، ثم يتم نقل هذه الرواسب إلى الأرض على مر الزمن الجيولوجي عن طريق رفع سطح الأرض. ومع ذلك، قد يكون الرماد البركاني والهباء الجوي والغبار المعدني أيضًا مصادر فوسفات مهمة، اذ يؤدي تجوية الصخور والنشاط البركاني إلى إطلاق الفوسفات في التربة والماء والهواء، حيث يصبح متاحًا لشبكات الغذاء الأرضية.

الفوسفورهو المكون المهم والضروري للبروتوبلازم ، يميل الى الدوران ، فالمركبات العضوية تتجزأ اخيراً إلى فوسفات والتي تصبح مرة ثانية في متناول النباتات في ذلك (الشكل 3) ، فالهواء ليس المستودع الكبير للفوسفور ولكن الصخور او الترسبات الأخرى المتكونة في العصور الجيولوجية القديمة. وهذه تتعرى بالتدريج مطلقة الفوسفات الى الانظمة البيئية، غير ان كثير من الفرسفات يتسرب الى البحر، حيث يستقر جزء منه في الترميات الضحلة وينقد جزء منه في الترسبات العميقة . ان الوسائل التي يرجع بها الفوسفور إلى الدورة في الحال الحاضر لا تكفي لتعويض الخسارة. ولا يوجد سحب للترسبات على نطاق واسع في بعض اجزاء العالم وان فعل الاسماك والطيور البحرية (التي يؤتى بها الى الأرض من قبل الحيوانات والانسان) غير كاف. وللطيور البحرية أثر مهم في ارجاع الفوسفور إلى الدورة، ان هذا النقل للفوسفور والمواد الأخرى بوساطة الطيور من البحر إلى الأرض مستمر ولكن يبدو انه ليس في المعدل الذي حصل فيه في بعض العصور الماضية . ويبدو ان الانسان لسوء الحظ يعجل في معدل فقدان الفوسفور وهكذا يجعل دورة الفوسفور اقل

اكتمالاً.كما يتم تبادل الفوسفور بشكل متبادل بين الفوسفات الذائب في المحيط والكائنات البحرية. وتتسم حركة الفوسفات من المحيط إلى الأرض وعبر التربة بالبطء الشديد، حيث تتراوح مدة بقاء أيون الفوسفات في المحيطات بين 20,000 و100,000 سنة.



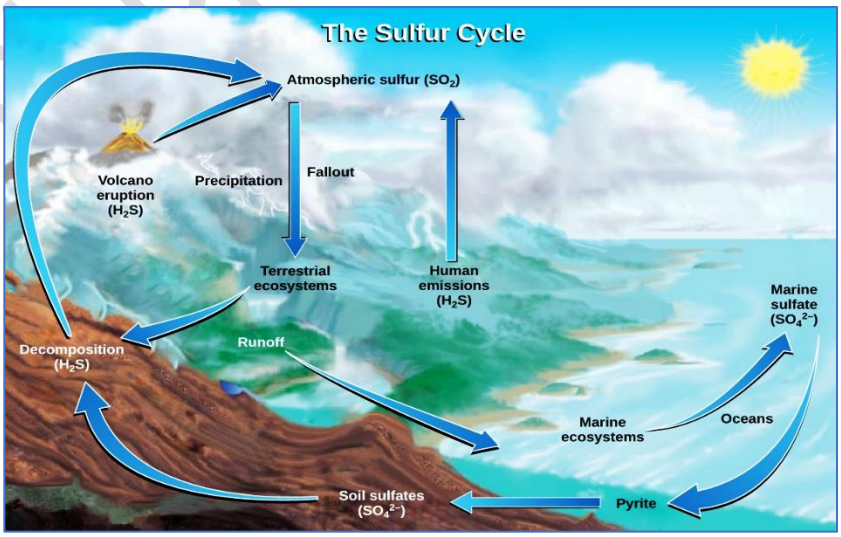
شكل 3: يوضح دورة الفوسفور

يتسبب الفسفور والنايتروجين الزائدان اللذان يدخلان هذه النظم البيئية من جريان الأسمدة ومن مياه الصرف الصحي بتكوين ظاهرة الاثراء الغذائي Eutrophication يؤدي الى نمو مفرط للطحالب، ويؤدي الموت والانحلال اللاحقين لهذه الكائنات إلى استنفاد الأوكسجين الذائب، وبالتالي يؤدي إلى موت الكائنات المائية، مثل المحار والأسماك وغيرها.

دورة الكبريت Sulfide cycle

الكبريت هو عنصر مهم للخلية الحية، فإنه يشارك في تكوين البروتينات كجزء من الحمض الأميني على شكل سيستين Cystine وميثيونين methionine وهو مطلوب في عملية التمثيل الغذائي للكائنات الحية الدقيقة.

دورة الكبريت مثال يربط بين الهواء والماء والتربة، اذ يدور الكبريت بين البيئة المائية والأرض والغلاف الجوي، يوجد الكبريت في الغلاف الجوي بشكل ثنائي أوكسيد الكبريت(SO_2) ، الذي يدخل الغلاف الجوي بثلاث طرق: أولاً، من تحلل الجزيئات العضوية، ثانياً: من النشاط البركاني وفتحات الطاقة الحرارية الأرضية، وثالثاً: من حرق الوقود الأحفوري من قبل البشر، كما موضح في الشكل (4).



شكل (4): دورة الكبريت Sulfide cycle (يصبح SO_2 من الغلاف الجوي متاحًا للنظم البيئية الأرضية والمائيةعندما يذوب في هطول الأمطار كحمض كبريتيك أو عندما يسقط مباشرة على الأرض كمتساقط. كما أن تجوية الصخور تجعل الكبريتات متاحة للنظم البيئية الأرضية. يؤدي تحلل الكائنات الحية إلى إرجاع الكبريتات إلى المحيط والتربة والغلاف الجوي) .

على الأرض، يترسب الكبريت بأربع طرق رئيسية: هطول الأمطار، والتساقط المباشر من الغلاف الجوي، وتجوية الصخور، وفتحات الطاقة الحرارية الأرضية يوجد الكبريت في الغلاف الجوي على شكل ثاني أكسيد الكبريت(SO_2) ، وعندما يسقط المطر عبر الغلاف الجوي، يذوب الكبريت في شكل حمض الكبريتيك (H_2SO_4) (ضعيف او قوي حسب درجة التلوث) يمكن أن يسقط الكبريت أيضًا مباشرة من الغلاف الجوي في عملية تسمى التداعيات. أيضًا، مع طقس الصخور المحتوية على الكبريت، يتم إطلاق الكبريت في التربة. تنشأ هذه الصخور من رواسب المحيطات التي يتم نقلها إلى الأرض عن طريق الارتفاع الجيولوجي لرواسب المحيطات. يمكن للنظم البيئية الأرضية بعد ذلك الاستفادة من كبريتات التربة هذه(SO_4^{2-}) ، التي تدخل الشبكة الغذائية عن طريق امتصاصها من قبل جذور النباتات. عندما تتحلل هذه النباتات وتموت، يتم إطلاق الكبريت مرة أخرى إلى الغلاف الجوي كغاز كبريتيد الهيدروجين(H_2S) .

يدخل الكبريت البيئة المائية في الجريان السطحي من الأرض، ومن تداعيات الغلاف الجوي، ومن فتحات الطاقة الحرارية الأرضية تحت الماء. تعتمد بعض النظم البيئية على المواد الكيميائية باستخدام الكبريت كمصدر للطاقة البيولوجية. ثم يدعم هذا الكبريت النظم البيئية البحرية في شكل كبريتات.

تلعب الأنشطة البشرية دورًا رئيسيًا في تغيير توازن دورة الكبريت العالمية، اذ يؤدي حرق كميات كبيرة من الوقود الأحفوري، وخاصة من الفحم، إلى إطلاق كميات أكبر من غاز كبريتيد الهيدروجين في الغلاف الجوي. عندما يسقط المطر من خلال هذا الغاز، فإنه يخلق ظاهرة تعرف باسم المطر الحمضي Rain acid، والتي تضر بالبيئة الطبيعية عن طريق خفض درجة الحموضة في البحيرات، وبالتالي قتل العديد من النباتات والحيوانات المقيمة. الأمطار الحمضية هي أمطار مسببة للتآكل ناتجة عن سقوط مياه الأمطار على الأرض من خلال غاز ثاني أكسيد الكبريت، مما يحولها إلى حمض كبريتيك ضعيف، مما يتسبب في تلف النظم البيئية المائية. يؤثر المطر الحمضي أيضًا على البيئة الاصطناعية من خلال التدهور الكيميائي للمباني.

لذا نلاحظ من دورة الكبريت ان المجمع الاحتياطي الكبير للكبريت في التربة والترسبات والاحتياطي الاصغر يكون في الجو. ان الوظيفة الرئيسة في المجمع سريع الجريان تؤديها الاحياء المجهرية المتخصصة التي تعمل كفريق متناوب ، كل منها يتحمل عملية اكسدة او اختزال كيميائي معين. الاستعادة الجرثومية من الترسبات العميقة الناتجة من الحركة العلوية للحالة الغازية لكبريتيد الهايدروجين (H_2S)، هي تداخل العمليات الارضية الكيمياوية والجوية (والتآكل والترسيب والتصويل Elutriation والمطر والامتزاز..لخ) والعمليات الحياتية (الانتاج والتحلل) وتوافق الهواء والماء والتربة في تنظيم الدورة على المستوى العالمي. الكبريتات (SO_4) كالنترات والفوسفات هي الحالة الرئيسة المتاحة التي تختزل بوساطة ذاتية التغذية المتحدة في البروتينات ، والكبريت مكون اساسي لاحماض امينية معينة ، ان الانظمة البيئية ليست بحاجة الى كمية من الكبريت بقدر حاجتها الى كل من النايتروجين والفوسفور، ولا يكون عاملاً محدداً في احوال كثيرة لنمو النباتات والحيوانات ، ومع ذلك فان دورة الكبريت هي المفتاح في احد الانماط العامة في الانتاج والتحلل، وعلى سبيل المثال ، عندما يتكون كبريتيد الحديد في الترسبات يتحول الفوسفور من الشكل غير الذائب الى آخر ذائب وبذا يصبح في متناول الكائنات الحية.

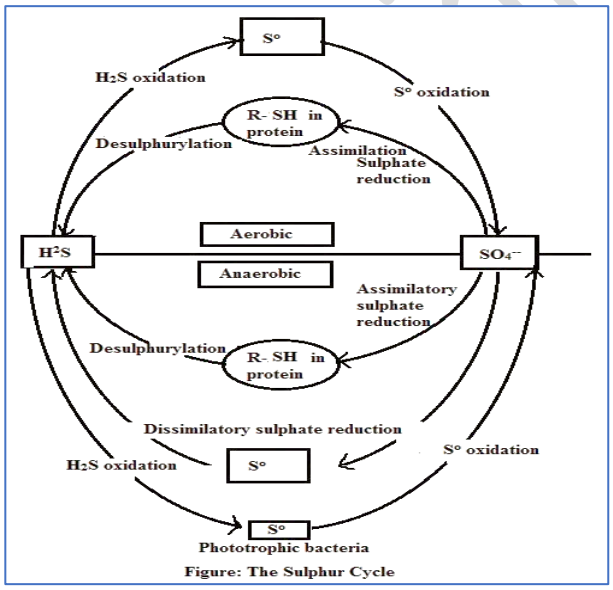
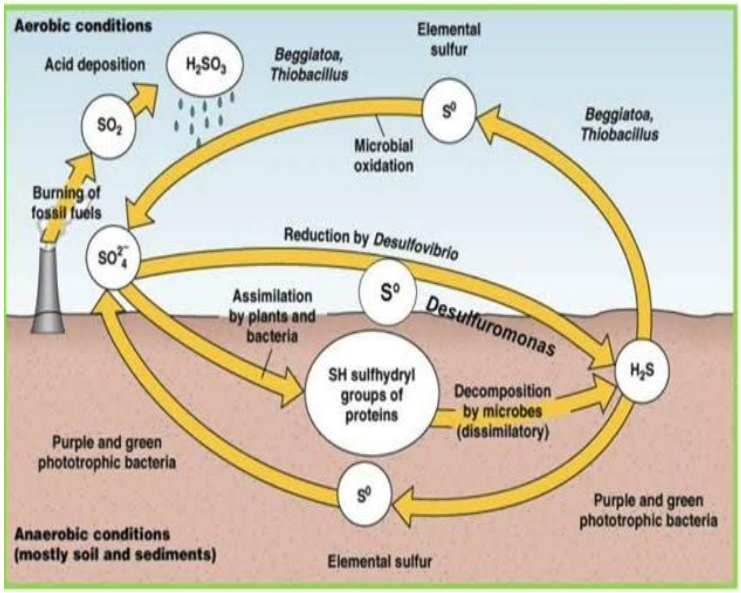


Figure: The Sulphur Cycle



مخطط (1): التبادلات الرئيسية بين مجمع الكبريتات الجاهزة (SO_4) وبين مستودع تجمع كبريتيد الحديد عميقاً في التربة والترسبات

المخطط (1) يبين المخطط المركزي والشبيهة بالعجلة الاكسدة (٥) والاختزال (R) التي تحدث تبادلات رئيسة بين مجمع الكبريتات الجاهزة (SO_4) وبين مستودع تجمع كبريتيد الحديد عميقاً في التربة والترسبات.

تكون الاحياء الدقيقة المتخصصة مسؤولة لدرجة كبيرة عن التحولات التالية : SO_4 - S - H - ، بكتريا الضمات المختزلة للكبريت *Desulfovibrio* و SO_4 الى H_2S (اختزال الكبريتات اللاهوائي) ، و H_2S الى SO_4 (مؤكسدات الكبريتيد الهوائية) ببكتريا *Thiobacilli*، والكبريت العضوي S الى SO_4 و H_2S ، احياء دقيقة معتمدة التغذية هوائية ولا هوائية على التوالي.

للحصول على الشكل البسيط من الكبريت، تمر الكائنات الحية الدقيقة بتفاعلات الأكسدة والاختزال البيولوجية (مخطط2).

- تساهم الكائنات الحية الدقيقة الضوئية والكيميائية Photosynthetic & Chemosynthetic microorganisms في دورة الكبريت وتحول الكبريت بكميات كبيرة عن طريق تفاعلات الأكسدة والاختزال Biological oxidation-reduction reactions.

-الكائنات الحية الدقيقة المسؤولة عن اختزال الكبريتات غير المتماثلة هي *Desulfovibrio, Desulfotomaculum,* الموجودة في التربة، سواء في المياه المشبعة وبالرواسب، وبكتريا *Desulfuromonas* الموجودة في المياه الحاوية على كبريتيد الهيدروجين والطين البحري.

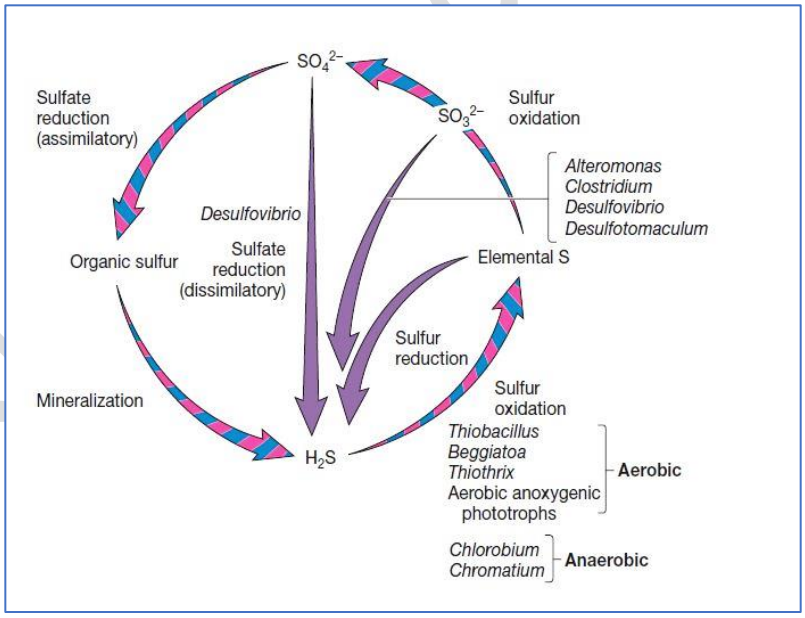
-تتم عملية اختزال الكبريتات المتماثلة Assimilatory sulfate reduction بواسطة النباتات والطحالب والفطريات والبكتيريا.

تتم أكسدة الكبريت بواسطة الكائنات الكيميائية chemolithotrophs مثل *Thiobacillus* و *Beggiatoa* والكائنات الضوئية photolithotrophs مثل *Chloribium* و*Chromatium*

-يتحول الكبريت العنصري (S) إلى كبريتات (SO_4^{-2}) عن طريق التمثيل الضوئي photosynthetic و ذاتية التغذية الكيميائية chemolithoautotrophy مثل *Thiobacillus*، يمثل الكبريت sulfide كمصدر للطاقة.

-عندما تدخل الكبريتات إلى الموائل habitats المختزلة، يتم إجراء اختزال الكبريتات بواسطة كائنات دقيقة أخرى.

على سبيل المثال، أثناء التنفس اللاهوائي، تستخدم Desulfovibrio الكبريتات كمستقبل للطاقة الخارجية external e^- acceptor، وتسمى عملية الاختزال هذه اختزال الكبريتات غير المتماثلة Dissimilatory sulfate reduction والتي تسبب تراكم الكبريت في المناطق المحيطة.



مخطط (2): تفاعلات الأكسدة والاختزال البيولوجية للكبريت التي تمربها الكائنات الحية الدقيقة

ان كلا من دورتي النايتروجين والكبريت تتأثر بشكل متزايد من تلوث الهواء الصناعي، ان اكاسيد النايتروجين (NO) و (NO2) والكبريت (SO_2) هي خطوات طبيعية الا انها انتقالية كل في دورته وتوجد في معظم البيئات بتراكيز واطئة جدا، مع ذلك يزيد تراكيز الاكاسيد المتطايرة في الهواء عادة وخاصة في مناطق المدن ، لدرجة انها تصبح سامة للمكونات الحياتية للانظمة البيئية.