جامعة الفرات

كلية العلوم الثالثة بالحسكة

مقرر الأحياء الدقيقة البيئية

السنة الرابعة

القسم النظري

إعداد

الدكتور محمد فرحان إسماعيل

العام الدراسي

2026/2025

الفصل الأول

الأحياء الدقيقة في التربة

Soil Microorganisms

1-نبذة تاريخية عن الأحياء الدقيقة في التربة History of Soil Microorganisms

في الفترة التي بدأت فيها دراسة الأحياء الدقيقة من الناحية المرضية، ظهرت محاولات ودراسات عديدة للتعرف على الأحياء الدقيقة الترابية من الناحية البيئية-الفيزيولوجية. ويعد العلم الفرنسي لويس باستور Louis Pasteur (1822 -1895) أول من أشار لعلم أحياء التربة الدقيقة حيث بين أن الأحياء الدقيقة تسبب التخمر والتعفن والتحلل. وأكد على الطبيعة الحيوية لعمليات تحول المادة العضوية في التربة، وأن الأحياء الدقيقة هي التي تعمل على معدنة المخلفات العضوية فيها، وهي التي تحول العناصر الغذائية إلى أشكالٍ جاهزة للنبات وبالعكس. كما أكد أن هذه العمليات لا تعتمد على طبيعة الأحياء ونوعها بل تعتمد على الظروف المحيطة بها. فبوجود الأكسجين (في الظروف الهوائية) سوف تتحلل الكربوهيدرات إلى ثاني أكسيد الكربون، وبغياب الأكسجين (في الظروف اللاهوائية) فلن تكتمل عملية التحلل. ويصاحب إنتاج غاز CO_2 تكوين غازات أخرى كالهيدروجين والميثان والكحولات وأحماض عضوية، بعملية تسمى بالتخمر Fermentation.

كما أشار العالمان Muntz & Schloesing عام 1877 لأول مرة إلى دور الأحياء الدقيقة في النترجة في التربة، فقد بينا بأن عملية النترجة (أكسدة الأمونيوم إلى نترات) هي عملية حيوية لا يمكن أن تتم إلا بواسطة الأحياء الدقيقة في التربة. وفي عام 1885 اثبت العالمان Hellrigel & Wilforth بأن البقوليات تأخذ الآزوت الجوي بواسطة البكتريا الموجودة داخل العقد الجذرية وتحوله إلى مركبات نيتروجينية. وتمكن العالم الروسي وينوكرادسكي (Winogradisky) في عام 1890 من عزل البكتيرية *Nitrosomonas* وعصيات البكتريا *Nitrobacter* المسؤولة عن عملية أكسدة الأمونيوم وبين أنهما تقومان بأكسدة النتريت إلى نترات. واكتشف نوعاً آخر من التثبيت لغاز النيتروجين أسماه بالتثبيت اللا تعايشي Non-Symbiotic N_2 fixation. كما عزل في عام 1892 مكورات الجنس *Nitrosococcus* إضافة لعزله بكتيريا لا هوائية في عام 1895 تقوم بتثبيت الآزوت الجوي، وأنواع أخرى حرة المعيشة في التربة أسماها *Clostridium pasteurianum* تتبع للجنس *Clostridium*.

كما درس العالم الأمريكي Lipman في الفترة ما بين 1847-1939 أهمية الأحياء الدقيقة في خصوبة التربة، وعزل في عام 1903 البكتيرية *Azotobacter vinelandi* المثبتة للنيتروجين.

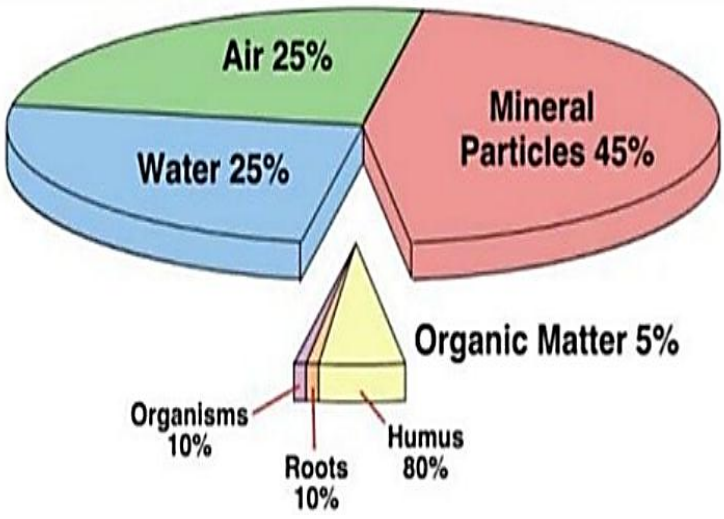
واستعمل العالم الهولندي Beijerinck الأوساط الغذائية المنتخبة لتنمية مزرعة نقية من البكتريا المسؤولة عن تكوين العقد والتي تعرف باسم *Rhizobium* وأطلق على عملية التثبيت هذه اسم التثبيت التعايشي للنيتروجين لأنها عملية تعايشية بين البكتريا والنباتات البقولية. وقام بتصنيف النوع *Azotobacter chroococcum*. كما تمكن العالم الأمريكي Waksman من عزل الكثير من أجناس الإكتينومايسس (البكتريا الخيطية) المنتجة للمضادات الحيوية من التربة ومن أشهرها المضاد الحيوي Streptomycin. وفي عام 1950 عزل العالم Derx أحد أنواع البكتيريا يقوم بتثبيت النيتروجين وأسماه Beijerinckia نسبة إلى العالم Beijerinck، وفي عام 1962 قاما العالمان Day & Dobereiner بعزل بكتريا حلزونية يمكنها تثبيت النيتروجين هي *Spirillium lipoferum*.

2-الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة

The Physical and Chemical Characters of Soil

تعرف التربة على أنها خليط من المادة المعدنية والعضوية والماء والهواء، إضافة إلى الكائنات الحية. فالحجم الذي يشغله كل من هذه المكونات في تربة سطحية خليطة مثالية لنمو النبات يختلف تبعاً لهذه المكونات، فقد بينت الدراسات أن مثل هذه الترب تحتوي على ما يقارب 45% مادة معدنية 5% مادة عضوية، 25% ماء، و25% هواء (الشكل 1). أما الكائنات الحية المسجلة في التربة بما فيها من حيوانات صغيرة، وكائنات دقيقة، فإنها تشغل حيزاً لا يتعدى 1% من الحجم الكلي لها ويعتبر وجودها عاملا هاماً في خصوبة التربة وإنتاج المحاصيل.

وعلى العموم، تتكون التربة من مجموعتين أساسيتين من الخصائص التي تؤثر في الأحياء الدقيقة حيث تعيش هذه الكائنات وتتغذى وتتكاثر، وتتمثل في الخصائص الفيزيائية Physical Characters والخصائص الكيمائية Chemical Characters.



الشكل (1): مكونات التربة الرئيسة.

أولاً: الخصائص الفيزيائية للتربة Physical Characters of Soil

تشمل الخصائص الفيزيائية للتربة على اللون قوام التربة والبنية والمسامية والنفاذية ودرجة الحرارة والكثافة ويمكن قياسها إما باستخدام بعض الأجهزة والوسائل كالمناخل أو اللمس أو بالنظر، ولكل خاصية منها أهميتها الخاصة. ويمكن تبيان أهم الخصائص الفيزيائية للتربة والتي تؤثر في نمو ونشاط الأحياء الدقيقة فيها كما يلي:

1-لون التربة Soil Color:

يعد لون التربة من أكثر الخصائص الفيزيائية وضوحاً، لأن تميز ألوان التربة يتم بسهولة عبر النظر، ويعتمد لون التربة على عدة عوامل منها المادة الأصل التي تكونت منها التربة وما تحتويه من معادن ونسبة ما تحتويه من المواد العضوية، وفيما إذا كانت ذات تهوية جيدة أم أنها من الترب اللاهوائية، فضلاً عن عامل المناخ لاسيما من أمطار وحرارة ودورهما في حصول عملية الغسيل أو الرشح.

2-قوام التربة Soil Texture:

وهو حجم حبيبات التربة من رمل Sand وسلت Silt وطين Clay ونسبة كل منها. وعادة ما تكون أبعاد حبيبات الرمل ما بين 0.05 – 2.0 ملم، وتتباين تبعاً لأنواع هذه الحبيبات فيما إذا كانت خشنة الملمس أم ناعمة، وتتباين حبيبات السلت ما بين 0.002 – 0.05 ملم، في حين تكون حبيبات الطين أقلها حجماً لصغرها إذ تبلغ أقطارها أقل من 0.002 ملم.

3-بناء التربة Soil Structure:

يمثل بناء التربة النمط أو الشكل أو التنظيم الذي تتوضع وتنتظم فيه ذرات التربة بوجود مادة لاحمة. ويمكن ملاحظة سبعة أنماط بنائية للتربة وهي: الحبيبي، الفتاتي، العقدي، الأنبوبي، الكتلي، الصفيحي والمنشوري.

4-مسامية التربة Soil Porosity:

تشير مسامية التربة إلى الفراغات الموجودة فيها، وهي على هيئة مسامات شعرية توجد بين تجمعات حبيباتها. ويمكن للماء والهواء التوغل إلى داخل التربة عن طريق هذه المسامات وذلك اعتماداً على مساحة هذه المسام وحجمها.

5-نفاذية التربة Soil Permeability:

وتمثل مقدرة التربة أو قابليتها على تمرير الماء والهواء، وتعتمد نفاذية التربة على وجود المسام غير الشعرية، وتزداد النفاذية في التربة الرملية، بينما تقل في الترب الطينية. وتقاس نفاذية التربة بمعدل سرعة حركة الماء بواحدة سم/ساعة. وتتراوح درجات النفاذية ما بين 0.215 سم/ساعة وهي حركة بطيئة جداً، إلى أكثر من 25 سم/ساعة ونعد حركة سريعة جداً.

6-درجة حرارة التربة Soil Temperature:

حرارة التربة هي كمية الوحدات الحرارية التي تختزنها التربة وتستفيد منها الأحياء كمصدر من مصادر الطاقة، وتتلقى التربة حرارتها من أشعة الشمس والأمطار الساخنة والمواد العضوية المتحللة. وتتركز الحرارة العالية أو الدافئة في الطبقات السطحية من التربة صيفاً وفي الطبقات السفلى شتاءً.

7-كثافة التربة Soil Density:

تعرف كثافة التربة على أنها كتلة المادة الصلبة من التربة إلى حجم معين منها ويعبر عنها بطريقتين هما:

7-1-الكثافة الحقيقية Particle Density:

وهي كتلة المادة الصلبة في التربة بالنسبة إلى حجم الحبيبات دون الفراغات أو المسامات.

7-2- الكثافة الظاهرية Bulk Density:

وهي نسبة كتلة المادة الصلبة من التربة بعد تجفيفها إلى حجمها الكلي بما في ذلك الفراغات.

ثانياً: الخصائص الكيميائية للتربة Chemical Characters of Soil:

تتباين الخصائص الكيميائية للتربة تبعاً لنوعها وخصائصها الفيزيائية، ومحتواها من المادة العضوية، والغطاء النباتي فيها، والسعة التبادلية للكاتيونات، ودرجة حموضة التربة، ومحتواها من العناصر الغذائية، إضافة إلى تركيب الصخرة الأم التي نشأت منها.

3-ميكربيولوجيا التربة Soil Microbiology:

يعرَّف علم الأحياء الدقيقة في التربة أو ميكروبيولوجيا التربة على أنه العلم الذي يهتم بدراسة الأحياء الدقيقة التي تعيش في التربة ودورها فيها نتيجة لفعاليتها الحيوية وأهميتها في جريان الطاقة ودورة العناصر الغذائية تأثيراتها في الإنتاج الزراعي. تتمثل أهم مجاميع الأحياء التي تعيش في التربة بكل من الفطريات Fungi والبكتريا Bacteria والطحالب Algae والبروتوزوا Protozoa وكذلك ديدان الأرض Earthworms. تلعب الأحياء الدقيقة دوراً مهما في تحليل المخلفات العضوية وطرح منتجاتها المتعددة التي تساهم في بناء التربة وزيادة الإنتاج الزراعي. وتساهم ديدان الأرض في توزيع المخلفات العضوية بين طبقات التربة وطرح منتجاتها المسماة مخلفات ديدان الأرض Earthworm Cast وهي خليط من التربة والمخلفات العضوية والتي تعتبر مخزنا للعناصر الغذائية وتساهم في زيادة الإنتاج الزراعي كماٍ ونوعاً (الشكل 2).



الشكل (2): منتجات ديدان الأرض Earthworm Cast

4-أهمية الأحياء الدقيقة في التربة:

ترافقت بدايات دراسة الأحياء الدقيقة الممرضة للإنسان وحيواناته المختلفة محاولات عديدة لدراسة الأحياء ترابية المنشأ من الناحية البيئية الفيزيولوجية. وكان من بين العلماء الذين برعوا في هذا المجال العالم الروسي (Winogadsky) فينوجرادسكي (1856-1953)، حيث اكتشف ظاهرة التغذية الكيميائية Chemotrophism والتي تمثل نموذجاً خاصاً من التمثيل الغذائي عند مجموعة من البكتيرية التي تعيش في التربة والمياه. واكتشف ظاهرة تثبيت الآزوت الجوي عند مجموعة من البكتيرية وأنجز أعمالاً مهمة في مجال الأحياء الدقيقة في التربة. كما درس العالم أومليانسكي في الفترة ما بين 1867-1928 عملية تحلل السيليلوز في التربة، وقام بدراسات أخرى حول هذه الأحياء الترابية. كما بين Rao في عام 1999 بأن للأحياء الدقيقة فوائد عدة للتربة، فهي تقوم بزيادة خصوبتها وتعزز بنيتها، وتقوم بتفكيك كافة المواد العضوية الطبيعية، وتحسين خصوبة التربة بتحطيم أنسجة النباتات والحيوانات فيها، ودمج النواتج والمعادن المحررة مع التربة. كما أن لبعض أنواعها القدرة على حلّ بعض المنتجات المصنعة من الإنسان، وتحوّلها إلى معقد عضوي مهم في التربة هو الدبال Humus الذي يتركب من حوالي 60٪ كربون ونحو 6٪ من الآزوت، إضافة إلى مركبات فينولية وفوسفاتية عضوية وسكريات معقدة وغيرها. تمزج حيوانات التربة بحركتها الدبال مع التربة، مما يساعد على تحسين خواص التربة بتفتيت حبيباتها وتهويتها وحركة الماء فيها وتجعل الدبال المتكون في متناول الأحياء الدقيقة. وتقوم الأحياء الدقيقة بهدم الدبال وحلّه ويتم هذا التحلل بصورة بطيئة محررة منه المغذيات النباتية بعد موت هذه الأحياء.

5-توزع الأحياء الدقيقة في التربة:

تتوزع الأحياء الدقيقة في التربة وفق نموذجين من التوزع هما:

5-1-التوزع الرأسي: تتوزع الأحياء الدقيقة بصورة غير متجانسة في قطاع التربة الرأسي نحو الأعلى والأسفل، حيث يتركز معظمها في طبقة البقايا العضوية، وهي السنتمترات الخمس العلوية في أراضي الغابات، أو الطبقة التي تلي الطبقة السطحية مباشرة في الأراضي الأخرى. وقد قدر أن حوالي 90% منها تنتشر في الطبقة العلوية.

5-2-التوزع الأفقي: يختلف هذا التوزع تبعاً لاختلاف محتوى التربة من المواد العضوية ومستوى جفاف الأرض أو غمرها بالماء، كما يؤثر وجود النبات أو المحصول في أعداد الأحياء الدقيقة وأنواعها المنتشرة في المحيط الجذري Rizosphere.

6-مجموعات الأحياء الدقيقة وتوزعها في التربة:

يمكن تقسيم الأحياء الدقيقة في التربة إلى عدة مجموعات تضم كلاً من البكتيريا وبدائيات النوى Actinobacteria والطحالب والفطريات، والأوليات، ولكل من هذه المجموعات خصائص ووظائف محددة في التربة. ويمكن تبيان عدة أشكال من الأحياء الدقيقة في التربة وفق التالي (الشكل 3):

6-1-الأوليات Protists:

كائنات أولية ميكرونية الحجم تتميز بانخفاض مستوى التعضّي والتميّز فيها، تؤدي دوراً رئيسياً في التحولات البيوكيميائية وتسهم في تحطيم المواد العضوية وإعادة العناصر المعدنية.

6-2-طلائعيات (بدائيات) النوى Prokaryotes:

نواتها غير محاطة بغشاء نووي وتضم البكتريا وهي الكائنات الأصغر حجماً والأكثر عدداً وتنوعاً من بين أحياء التربة، وتتكاثر رئيسياً بالانشطار. خلاياها مكورة أو عصوية أو حلزونية تعيش منفردة أو متجمعة. وتقوم بالعديد من الوظائف الحيوية الهامة للتربة بما في ذلك تثبيت النتروجين الجوي. ويعتبر القيام بعمليات التحويل الكيميائي الحيوي إحدى سمات الكيمياء الحيوية الهامة للبكتيريا. فقد بين Wood في عام 1989 بأنه يمكن للبكتيريا Pseudomonas تحويل مجموعة واسعة من المواد الكيميائية والأسمدة، ويمكن للبكتيريا Nitrobacter المحولة للنترات أن تستمد الطاقة فقط من خلال تحويل النتريت إلى نترات وهو ما يسمى بالأكسدة الحيوية. ويعد الجنس Clostridium مثالاً للتنوع البكتيري، إذ له القدرة على النمو في بيئة خالية من الأكسجين وهو ما يعرف بالتنفس اللاهوائي. وتجدر الإشارة إلى وجود أنواعاً من البكتيريا كالنوع *Pseudomonas aeruginosa* تمتلك القدرة على العيش الأوساط الهوائية واللاهوائية أي التنفس الهوائي واللاهوائي باستخدام النترات كمستقبل للإلكترون الحر.

كما بين Rao في عام 1999 بأن البكتيريا هي المسؤولة عن تثبيت الآزوت الجوي في التربة بتحويل نتروجين الغلاف الجوي إلى مركبات النتروجين كالأمونيا، والتي يمكن للنبات الاستفادة منها مثل أفراد الجنس *Nitrobacter*، وهي من البكتيريا ذاتية التغذية الكيميائية. وتعتبر مثل هذه البكتيريا قليلة جداً مقارنة بالبكتيريا المحللة، أو غير ذاتية التغذية. حيث تكتسب طاقتها عبر تحليل النواتج النباتية، أو الكائنات الحية الدقيقة الأخرى، وتعتبر ذات أهمية للتربة لحاجة كل نبات أو كائن حي إلى النتروجين بطريقة ما.

6-3-الفيروسات Virus:

تنتشر الفيروسات في التربة ولكنها سرعان ما تفقد قدرتها على الحياة بسبب توافر شروط غير مناسبة لها في التربة، كغياب المضيف، وكونها إجبارية التطفل. إذ تعيش هذه الفيروسات في خلايا الكائنات الحية ولا يمكن أن تؤدي أي وظيفة عندما تكون بمعزل عن هذه الخلايا.

6-4-حقيقيات النوى Eukaryotes:

تكون نواتها محاطة بغشاء نووي وهي وحيدة الخلية أو خيطية متعددة الخلايا، واسعة الانتشار في التربة. وتشمل الفطريات Fungi والطحالب Algae والأوليات الحيوانية Protozoa والفطريات الرمية أو المتطفلة.

6-4-1-الفطور Fungi

تنتشر بكثرة في التربة، وتكمن أهميتها فيها كمصدر غذائي للعديد من الكائنات الحية الأخرى وإن كان البعض منها يسبب أمراضاً للنباتات، ويكون بعضها علاقات تشاركية مع النباتات والكائنات الحية الأخرى والمفيدة للتربة. وتقسم الفطريات إلى أنواع وأشكال متعددة، ويتأثر لون جراثيمها الناتجة عن التكاثر الجنسي بالعوامل البيئية نفسها المؤثرة في نمو وتوزيع البكتيريا والأكتينومايسس. ويعتبر وجود وكمية المادة العضوية في التربة معياراً لكثافة النمو الفطري، لأن معظم الفطريات تتغذى على المادة العضوية فيها، ويزدهر نموها في البيئات الحمضية. في حين لا تنمو البكتيريا والأكتينومايسس في الترب عالية الحموضة مقارنة مع الفطريات. كما تنمو الفطريات بشكل جيد في الترب الجافة والقاحلة كونها هوائية التنفس وتمتلك القدرة على امتصاص الأكسجين من الجو، ومع زيادة الرطوبة في التربة ينخفض معدل الأكسجين المتاح للتنفس فيها.

6-4-2-الطحالب Algae

توجد الطحالب في التربة على هيئة خلايا مفردة أو مستعمرات، أو تكون خيطية الشكل، وهي إما متحركة أو غير متحركة، تحتوي صبغات التمثيل الضوئي، وهي أكثر انتشاراً قرب سطح التربة. ويمكنها العيش بصورة رمية عند عدم توفر الطاقة المناسبة. وتعتبر الطحالب كائنات ذاتية التغذية تستطيع القيام بتصنيع غذائها بنفسها من خلال عملية التمثيل الضوئي فتحول

الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية يمكن تخزينها في أنسجتها كمواد مغذية مفيدة لنموها. ومن المعروف أن هذه العملية تعتمد كلياً على الضوء، لذلك تنتشر الطحالب حيثما تتوفر أشعة الشمس والرطوبة المعتدلة، لكنها لا تستطيع التعرض مباشرة للشمس، لذلك فهي تعيش تحت سطح التربة مع توفر درجة الحرارة والرطوبة المعتدلة، كما أن لديها القدرة على تثبيت الآزوت الجوي كما هو الحال لدى البكتيريا. وتقسم الطحالب إلى ثلاث فصائل رئيسة وهي:

1- فصيلة Cyanophyceae. 2- فصيلة Chlorophyceae. 3-فصيلة Bacillariaceae.

تسمى الفصيلة الأولى Cyanophyceae بالطحالب الخضراء المزرقة وتحتوي على الكلوروفيل وصبغات أخرى تعطيها اللون الأخضر المزرق، وهو الجزء الذي يمتص أشعة الشمس وتستخدمه في إنتاج الكربوهيدرات من ثاني أكسيد الكربون والماء. وقد أشار Sylvia *et al.*, 1999 إلى أن الطحالب الخضراء المزرقة مسؤولة عن تثبيت الآزوت الجوي، وتعتمد كمية النيتروجين الذي تقوم بتثبيته بشكل كبير على العوامل الفيسيولوجية والبيئية، عوضاً عن قدرة الكائن الحي الدقيق، ومن هذه العوامل الشدة الضوئية، وتركيز مصدر النتروجين غير العضوي والعضوي ودرجة حرارة الوسط المحيط، والاستقرار البيئي. أما الفصيلة الثانية Chlorophyceae فتحتوي على الكوروفيل فقط مما يجعلها خضراء اللون، في حين تحتوي الفصيلة الثالثة Bacillariaceae على الكلوروفيل إضافة إلى أصباغ أخرى تجعل الطحالب بنية اللون.

6-4-3-الأوليات Protozoa:

تعتبر البروتوزوا كائنات حية من حقيقيات النوى تعيش حرة أو متطفلة أو رمية على المادة العضوية المتحللة، أو متطفلة أو مفترسة للبكتيريا أو الأحياء الدقيقة الأخرى. وقد كانت من أوائل الكائنات الحية الدقيقة التي تتكاثر عن طريق الاتصال الجنسي، وهي خطوة تطورية مهمة في هذا النوع من الكائنات حيث تكوّن الأبواغ الزقية، وتتأثر بنفس الظروف البيئية التي تعتمد عليها العديد من الكائنات الحية الدقيقة في التربة. ويمكن تقسيم البروتوزوا تبعاً Sylvia *et al.*, 1999 إلى ثلاث فئات وهي:

6-4-3-1-السوطيات Flagellates

تعد السوطيات أصغر فصائل البروتوزوا، ويمكن تقسيمها تبعاً لإمكانية مشاركة الجنس في عملية التمثيل الضوئي. وغالباً ما توجد في الماء الملوثة أو في الحمأة المنشطة غير الفعالة، وتعيش بصورة منفردة أو على هيئة مستعمرات. وتصنف تبعاً لسوطها، فبعضها يمتلك عدة سياط وبعضها الآخر لها سوطاً واحداً يشبه فرعاً طويلاً يمتد من أحد أطرافها. والسياط هي الوسيلة المستخدمة للحركة. تتغذى تغذية متباينة، بعضها يمتص علاوة المواد المنحلة والبكتيريا

والطحالب أحادية الخلية، وبعضها متطفل كمسببات أمراض الجهاز الهضمي عند الإنسان لا سيما المتسببة عن *Giardia lamblia*، ومسبب مرض الاضطرابات العصبية والنوم الأفريقي *Trypanosoma gambiense* الذي ينتقل للإنسان عن طريق ذبابة تسي تسي.

6-4-3-2-الأميبيات Amoebae

تعتبر الأميبيات أحياء أكبر من السوطيات وتتحرك بطريقة مختلفة، ويمكن تمييزها عن غيرها من البروتوزوا بخصائصها الشبيهة بكائنات Pseudopodia أو ما يسمى بكائنات القدم الكاذبة وهي اللزوجة العالية. وتعد القدم الكاذبة (البسودوبوديوم Pseudopodium) بمثابة انكماش أو نتوء مؤقت على هيئة انسياب مؤقت للسيتوبلازم يظهر من جسم الأميبيا يساعدها في الانزلاق على الأسطح للحركة ويساعدها أيضاً في الحصول على الغذاء، ولا تحتوي الأميبيا على السياط وتتميز بلزوجة وتناسق يشبه الوحل أكثر من السوطيات. تعيش هذه الكائنات في المياه العذبة والمالحة، ويعيش بعضها معيشة حرة وبعضها معيشة تطفلية وبعضها الآخر معيشة تكافلية. وهي متباينة التغذية ما بين امتصاص المواد العضوية المنحلة إلى متغذيات على البكتيريا.

6-4-3-3- البراميسيوم (الهدبيات) Ciliata / Ciliates

تُعد الهدبيات ومنها البراميسيوم Paramecium من أكبر فصائل البروتوزوا، وتتحرك بواسطة أهداب قصيرة عديدة تنتج حركاتها اهتزازات خفيفة، وتشبه أهدابها الشعيرات القصيرة تحيط بها من جميع الجهات، لذلك يمكنها التحرك في كافة الاتجاهات، وهذا ما يميز سرعة حركتها عن باقي الأوليات ويساعد في انتشارها مقارنة مع السوطيات والأميبيات. غالبيتها تعيش بصورة حرة كالبراميسيوم وبعضها زاحفة أو متعلقة بالقاعيات. توجد بأعداد كبيرة في المياه الملوثة أو والمخلفات النشطة، وبعضها طفيليات تسبب مرض الزحار للإنسان والحيوان *Balantidum coli*.

6-4-3-4-الفطريات الشّعّية (الأكتينومايسس) Actinomycetes

تنتشر الفطريات الشعاعية في التربة، وتصنف مع البكتيريا، لكنها تشترك مع الفطريات في بعض الخصائص، كالتشابه في الشكل والتفرع، وتكوين الأبواغ، وعمليات الاستقلاب الثانوية. وتمتلك غزلاً فطرياً يشبه الميسيليوم الفطري، وتكوّن أبواغاً كونيدية Conidia، وتنمو في البيئة السائلة على هيئة حبيبات متميزة وليس كمعلق عكر كما في البكتيريا.

ويعتبر إنتاج المضادات الحيوية من أكثر خصائصها الهامة مثل Streptomycin و Neomycin و Erythromycin و Tetracycline، حيث يستخدم الستربتومايسين في علاج أمراض السل وبعض الالتهابات الأخرى، والنيومايسين في الحد من خطر العدوى البكتيرية أثناء الجراحة، والأريثرومايسين في علاج بعض الالتهابات التي تسببها بعض البكتيريا كالتهاب الشعب الهوائية والسعال الديكي والتهاب الرئة والإذن والأمعاء والمسالك البولية والجلد.

6-4-3-5-الفونا الدقيقة Microfauna:

وهي حيوانات صغيرة مجهرية تشمل الأوليات الحيوانية وبعض الديدان الخيطية Nematoda الصغيرة، والديدان المسطحة صغيرة الحجم، والدوارات، ويتغذى معظم أفرادها على الأحياء الدقيقة، وبعضها رمي، وعلى بعض الحيوانات الكبيرة والصغيرة من اللافقاريات مثل ديدان الأرض وعديدات الأرجل (أم أربع وأربعين)، والحلزون، وبعض الحشرات ومن الفقاريات كبعض الأفاعي والعظايا والخلد والفئران وغيرها.

6-4-3-6-الميكوريزا (الجذريات الفطرية) Mycorrhizae:

تسمى بالفطر الجذري وتشكل جذوراً أو خيوطاً رقيقة تمتد في التربة إلى حدٍ بعيد، ويمكن وصفها على أنها امتدادات لجذور النباتات التي تعيش فيها أو معها، وهذا النوع من العلاقة التكافلية يسهل للنبات امتصاص الماء بالإضافة إلى مجموعة واسعة من المواد الغذائية من التربة.

وقد أشار Vrieze في عام 2015 إلى أنه يتم إطلاق ما يقارب 30% من الكربون المثبت من قبل جذور النبات على هيئة إفرازات تتضمن كلاً من السكريات والأحماض الأمينية والفلافونيدات والأحماض الأليفاتية والأحماض الدهنية والتي قد تجذب وتغذي بعض الأنواع الميكروبية المفيدة لحماية النبات من الأنواع الضارة.



الشكل (3): بعض أشكال الأحياء الدقيقة في التربة.

الفصل الثاني
ميكروبيولوجيا التربة
Soil Microbiology

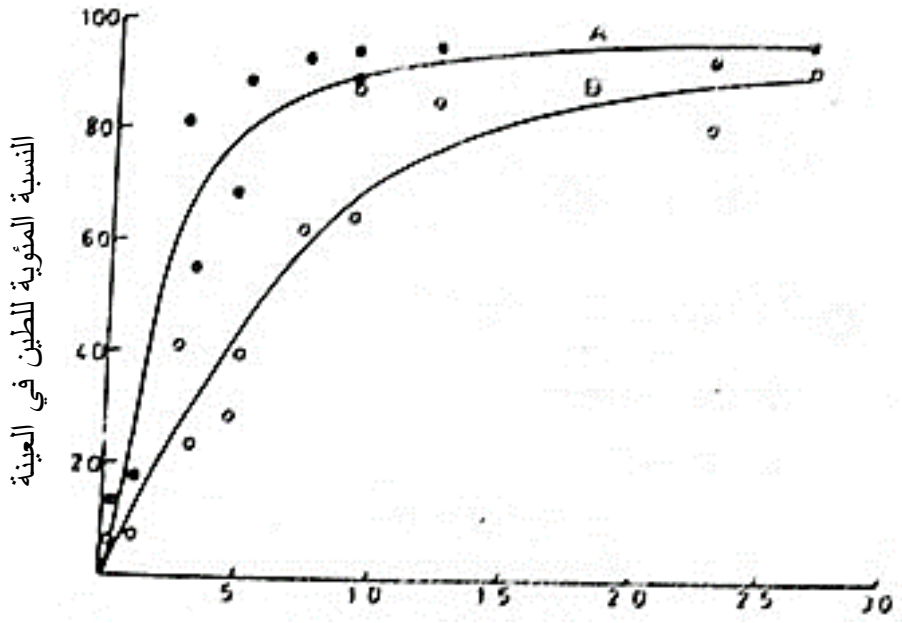
أولاً–العوامل المؤثرة في نمو الأحياء الدقيقة في التربة
Factors Effecting Soil Microorganisms

يتأثر نمو وتطور الأحياء الدقيقة في التربة بمجموعة من العوامل الهامة، يؤثر كل منها بصورة منفردة، وبصورة مجتمعة، كمؤثرات عامة في هذه الأحياء من قاطنات التربة، ومن أهم هذه العوامل نذكر:

1–نوع التربة Soil Type:

تختلف أحياء التربة وأشكالها وأعدادها بحسب تركيب التربة الميكانيكي، وتكون الترب متوسطة القوام المزيجية أغنى بالأحياء الدقيقة من الترب الرملية أو الطينية الثقيلة. إذ تحتوي هذه الترب على نسب متوازنة من الطين والرمل والسلت، وتعمل الغرويات الطينية التي تحمل شحنات سالبة على ادمصاص (Adsorption) العناصر موجبة الشحنة (Cations)، إضافة إلى توفير نظام رطوبي هوائي جيد يسمح بنمو الأحياء الدقيقة. فقد بين Minenkow بأن نسبة الخلايا الميكروبية المدمصة من كل من البكتيرية *Bacillus cereus* var *mycoides* والبكتيرية *Serratia marscens* تزداد في التربة مع زيادة نسبة الطين (الشكل 4)، ويعود ذلك إلى المساحة العالية لغرويات الطين.

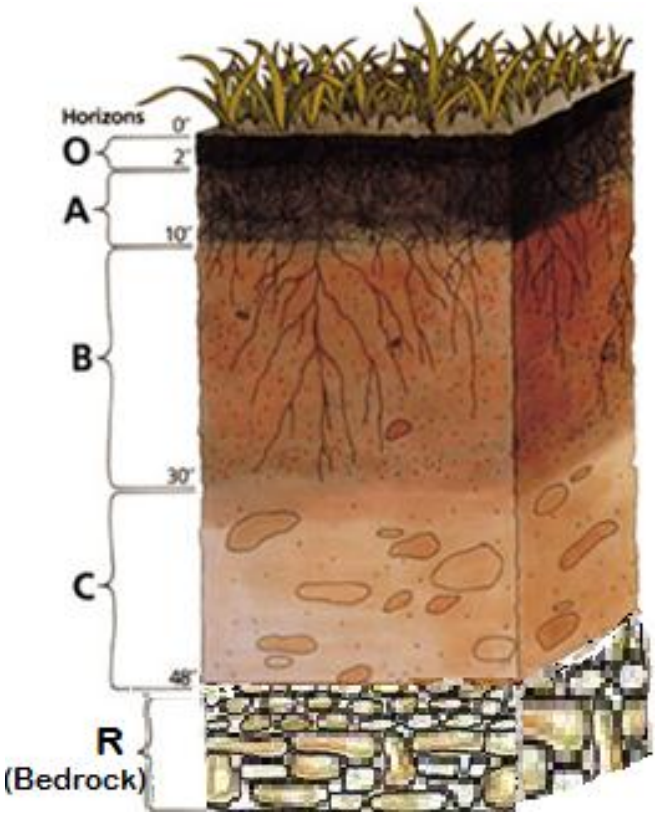
وتحتوي ترب الغابات على مجموعة كبيرة ومتنوعة من الأحياء الدقيقة مقارنة مع الترب المحروثة أو المزروعة حديثاً، ويعود الاختلاف لوجود تراكيب مختلفة من النباتات في ترب الغابات تجذب أنواعاً مختلفة من الأحياء الدقيقة. كما ويؤثر عمق التربة في أعداد الأحياء الدقيقة فيها، إذ تحتوي التربة السطحية على أعداد هائلة من الأحياء الدقيقة مقارنة مع العميقة، ويعود السبب في ذلك إلى وجود مخلفات النبات والمادة العضوية المساندة لنمو الأحياء الدقيقة.



الشكل (4): الزيادة في نسبة ادمصاص البكتريا بزيادة محتوى الطين A تمثل *B. cereus* var. *mycoides* و B تمثل *S. marcescens* عن (Marshal, 1971).

2-عمق وقطاع التربة Depth and Soil Section:

تقسم التربة إلى عدة آفاق، وتصنف إلى تحت قطاعات وآفاق O, A, B, C، وتشكل طبقة المادة العضوية المجموعة O، التي تتكون فوق الجزء المعدني من التربة، من المواد العضوية النباتية والحيوانية. وتنتشر مثل هذه الآفاق عادة في ترب الغابات. ويقع الأفق A في الجزء السطحي من التربة، ويتميز بتعرضه المستمر لعمليات الغسيل. وتتميز هذه الطبقة بالنشاط الحيوي لجذور النباتات والكثافة العالية للأحياء الدقيقة فيها. حيث يقع النشاط والكثافة العالية للأحياء الدقيقة على عمق 10 سم الأولى من التربة، تبعاً لمعقد التربة (الشكل 5). وبسبب زيادة تركيز المادة العضوية في هذا الأفق، يمكن اعتباره مخزناً للعناصر الغذائية للميكروبات. أما الأفق B الذي يضم طبقات تتكون عن عمليات الغسيل، أو التجميع من الطبقات العليا، وتتراكم فيه أكاسيد الحديد والألمنيوم وطين السيليكات، وكذلك كربونات الكالسيوم وغيرها من الأملاح، وتقل فيه كمية المادة العضوية وجذور النبات وأعداد الأحياء الدقيقة. ويعد الأفق C آخر طبقات التربة ويحتوي على المادة الأم ويكون خارج نطاق الفعاليات البيولوجية.



الشكل (5): معقد التربة وآفاقها المختلفة.

3-التهوية Aeration:

تعتبر معظم أحياء التربة من الأنواع الهوائية، التي تنمو بوجود الهواء، وبعضها لاهوائي Anaerobic يتوقف نموها بوجود الهواء، وبعضها الآخر اختياري ينمو بوجود الهواء أو بغيابه. وتختلف أعداد هذه الأحياء وأشكالها وتوزعها في الترب تبعاً لدرجة تهويتها. ففي الترب الطينية ذات أقطار مسامات أقل من 0.2 µm، تحمي مساماتها الصغيرة المادة العضوية من هجوم البكتيريا على عكس الترب الخليطة والرملية. وتكون أعداد البكتيريا في الترب ذات أقطار مسامات تتراوح ما بين 0.2 –0.6 µm عالية نتيجة لبقائها بين تجمعات التربة Soil Aggregates التي تحمي بدورها البكتيريا من هجوم حيوانات التربة، فقد أثبتت الدراسات وجود علاقة وثيقة بين أعداد البكتيريا ونسبة حجم المسامات في التربة والتي تتراوح ما بين 0.2 –1.2 µm.

4-الرطوبة Moisture:

يعتبر وجود الرطوبة ضرورياً لأحياء التربة، فلا يمكن للأحياء الدقيقة الاستفادة من الماء المرتبط وإنما تنمو وتتكاثر بوجود الماء الحر فقط. وقد بينت الدراسات العديدة وجود علاقة وطيدة بين رطوبة التربة ودرجة تهويتها، وتأثيرهما المشترك في الأحياء جميعاً. ومن ناحية أخرى، تستطيع العديد من الأحياء بما فيها الأنواع المكونة للأبواغ، تحمل الجفاف، ويمكنها

العيش والتكاثر في الأوساط الجافة. لقد بينت الدراسات العديدة بأن معدلات الرطوبة تؤثر في تركيز المحاليل الغذائية أو ما يسمى بالضغط الحلولي الذي يؤثر بدوره بشدة في الأحياء الدقيقة. فعند انخفاض التركيز الحلولي يدخل الماء إلى داخل الخلايا مسبباً انتباجها وقد يفجرها، ويسبب ارتفاعه إلى خروج مائها وانكماش السيتوبلازما وتخربها.

5-الحرارة Temperature:

تنتشر الأحياء الدقيقة في جميع ترب العالم، وتنمو وتتكاثر عند مجال حراري معين، فإذا تعدت درجات الحرارة هذا المجال زيادة أو نقصاناً، فقدت تلك الأحياء قدرتها على النشاط والتكاثر. ويمكن تقسيم الأحياء تبعاً لدرجات الحرارة المفضلة لديها إلى ثلاث مجموعات وهي:

5-1-أحياء محبة للحرارة العالية Thermophiles:

يوجد عدداً قليلاً من الأحياء ينمو ويتكاثر عند درجات حرارة تتراوح ما بين 40-75°س وتنتشر في تربة المناطق الحارة، وتزدهر عند مجال حراري مثالي يتراوح ما بين 50-55°س، ولا يمكنها العيش عند انخفاض درجات الحرارة إلى حوالي 37°س. وتتمكن مثل هذه الأحياء من العيش تحت هذه الظروف بسبب تركيب بروتينها الخاص، الذي لا يتخرب إلا عند درجات حرارة تزيد عن 90°س، على خلاف أشكال البروتينات في الأحياء الأخرى.

5-2-أحياء محبة للحرارة المعتدلة Misophiles:

تعيش أفراد هذه المجموعة ضمن مجال حراري يتراوح ما بين 25 – 45°س وتعد الدرجة المثلى ما بين 25 – 37°س، وتضم غالبية الأحياء الدقيقة المتطفلة على النبات والحيوان والإنسان.

5-3-أحياء محبة للبرودة Psychrophiles:

يمكن لأفراد هذه المجموعة العيش عند درجات حرارة منخفضة، وبصورة مثالية عند درجات حرارة تتراوح ما بين 15 – 20°س، وتنتشر في الترب الباردة والمناطق البحرية. كما أن هناك أنواعاً من البكتيريا والبكتيريا الخضراء المزرقة، وبعض أنواع الفطريات يمكنها العيش عند درجات حرارة منخفضة جداً قد تصل إلى -190°س في الهواء السائل أو -252°س للهيدروجين السائل.

6-درجة الحموضة Acidity (pH):

تعد الترب ذات pH المتعادل الأغنى بالأحياء الدقيقة من حيث العدد والتنوع، وتختلف أنواع تلك الأحياء في التربة بحسب درجة حموضتها.

7-نوع المغذيات وكميتها Type of Nutrients:

تصنف أحياء التربة إما مفترسة أو متطفلة أو رمّية أو متعايشة، وهناك أنواع ذاتية التغذية الضوئية أو الكيمياوية أو غيرية التغذية، وترتبط كثافتها بمدى توفر غذائها الخاص.

ويؤدي توفر الآزوت والفوسفور والكربون والسليلوز واللجنين، إلى زيادة نشاط الأحياء الدقيقة، ومنتجاتها التي تساهم بزيادة خصوبة التربة. ويؤثر استعمال المبيدات الحشرية أو العشبية أو الفطرية أو المعقمات الكيماوية تأثيراً سلبياً وبدرجات متفاوتة في هذه الأحياء.

8-العمليات الزراعية ووجود الجذور Agricultural Practices and Roots existence:

تؤثر العمليات الزراعية من فلاحة وزراعة وري وتعشيب وتسميد وغيرها في نشاط ونمو الأحياء الدقيقة بشكل مباشر وغير مباشر من خلال تأثيرها في تهوية التربة، وتوزيع وجاهزية العناصر الغذائية فيها، ودرجة تحلل مادتها العضوية. ويلعب وجود جذور النبات دوراً مهماً في هذا النشاط، حيث تقوم بتجهيز العناصر الغذائية والكربون، وتستخدمها كطاقة. وبصورة عامة، فقد بينت الدراسات العديدة زيادة أعداد الأحياء الدقيقة في الترب المزروعة مقارنة مع غير المزروعة.

9-الضوء Light:

يعتبر الضوء عاملاً أساسياً وهاماً للأحياء الدقيقة، لاسيما بعض الطحالب والأشنيات التي تفضل العيش على سطح التربة أو قربه، وتقوم بعمليات التمثيل الضوئي، لاحتوائها على صبغات تساعدها في تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية تستخدمها في التغذية. إلا أنه وعلى العموم، تفضل معظم أحياء التربة الابتعاد عن الضوء.

10-ملوحة التربة Soil Salinity:

يؤدي ارتفاع ملوحة التربة إلى خفض نشاط الأحياء الدقيقة فيها. ومن المعلوم أن بعض أنواع البكتيريا تستطيع النمو والتكاثر في تربة عالية الملوحة، قد تصل إلى 30%، تصنف كأنواع محبة للملوحة العالية Halophiles، مثل البكتيرية *Seratia salinaria* التي تسبب فساد الأسماك المملحة في المصانع، وفساد المخللات والجلود المدبوغة. ويمكن للفطريات الشعاعية Actinomycetes أن تتغلب أعدادها ونشاطها الحيوي على البكتيريا الأخرى عند ارتفاع ملوحة التربة.

11-فصول السنة Year Seasons:

تتباين أعداد ونشاطات الأحياء الدقيقة الحيوية بشكل ملحوظ تبعاً لفصول السنة، حيث تلاحظ زيادة أعدادها ونشاطاتها خلال فصلي الربيع والخريف، وذلك لتوفر الحرارة والرطوبة الملائمين لها، ووجود بقايا المحاصيل والنباتات في التربة. وتنخفض أعدادها ويقل نشاطها الحيوي خلال فصلي الصيف والشتاء.

ثانياً–العلاقات البيئية للأحياء الدقيقة في التربة Micoorganisms Relationship in Soil:

توجد الأحياء الدقيقة مختلطة مع بعضها البعض، ويندر وجود ميكروب ما بصورة منفردة في بيئته الطبيعية ولا سيما التربة، فقد سجل انتشار أعدادٌ كبيرة متباينة الحجم فيها، ما بين خلايا مجهرية مفردة، يقل قطرها عن الميكرون، إلى حيوانات صغيرة، تختلف في أشكالها وأنواعها وتبعيتها التصنيفية. فقد أشار Vrieze في عام 2015 إلى وجود حوالي 10 مليار خلية جرثومية/غ تربة، تعيش داخل وحول جذور النباتات في منطقة انتشار الجذور Rhizosphere. كما واكتُشِف مؤخراً وجود أكثر من 33000 عائلة من الجراثيم وغيرها على جذور الشوندر السكري، تتفاعل مع بعضها البعض، وتسهم في الدورات البيئية التي تجعل الحياة ممكنة. تنشأ بين هذه الأحياء علاقات متباينة، منها المفيد ومنها الضار، يحدث بمجملها تغيرات مستمرة في الوسط البيئي، مسببة التوازن الحيوي فيه عبر علاقاتها المختلفة.

ومن العلاقات البيئية التي يمكن مشاهدتها في التربة هي العلاقات المتبادلة فيما بين نوعين من الأحياء ويمكن تبيانها وفق الآتي:

أ) العلاقات المفيدة:

من العلاقات المهمة والمفيدة والتي يمكن مشاهدتها بين الأحياء في التربة نذكر:

1- المؤاكلة:

وهي علاقة منفعة لجهة واحدة من الأحياء، والمؤاكلة تتضمن نوعين من الأحياء يستفيد فيها أحد الأنواع من النوع الثاني، ولا يستفيد النوع الثاني من الأول ولا يتأثر منه. وبالتالي تكون المنفعة هنا لجهة واحدة، حيث لا يستطيع النوع الأول استخدام المواد الغذائية بصورتها الحالية ولكنه يستخدم نواتج تحللها الناتجة عن نشاط النوع الثاني. ويمكن ملاحظة هذه العلاقة في جسم الإنسان، كالعلاقة بين الجراثيم اللبنية، والخمائر، والعصيات المعوية، وميكروبات أخرى وجسم الإنسان أو الحيوان، وكذلك النباتات. فأثناء تطور العصيات المعوية في الأمعاء الغليظة تحص على المواد الغذائية الضرورية دون أن تسبب أي أذى أو ضرر للكائن، بل تقدم له منفعة هامة تتمثل في منع نمو وتطور الجراثيم الممرضة، ويُعدّ بذلك أقرب ما يكون إلى المنفعة المتبادلة أو التعايش منه إلى التطفل.

كما تعتمد بعض الأحياء في تطورها ونموها على ما تفرزه أحياء دقيقة أخرى من فيتامينات ومواد منشطة للنمو، حيث تقوم بعض الأحياء بإنتاج هذه المواد وإفرازها في الوسط المحيط، مما يؤدي إلى تنشيط نمو كائنات التربة الأخرى التي تحتاج هذه المواد لنموها وتطورها.

2- التبادل أو المشاركة:

يستفيد من هذه العلاقة كل نوع من الآخر إلا أنه ليس إجبارياً، إذ أن غياب أحدهما لا يؤثر في وجود واستمرار النوع الآخر. كما هو الحال في تبادل العناصر الغذائية بين الجرثومة Azotobacter والأحياء الدقيقة المحللة للنشاء، وبين الإشنيات الخضراء أو الزرقاء وما يحيط بها من جراثيم. وتسمى حالة التعاون التي يحدث فيها تبادل المواد الغذائية بين الأحياء الدقيقة باسم التغذية المتبادلة. وبالتالي نلاحظ أن التأثير في هذه العلاقة غير متخصص، إذ ليس من الضروري مرافقة أحياء دقيقة محددة في هذه المنفعة، إلا أن هذه المرافقة قد تكون عرضية وليست إجبارية، حيث تحتاج العديد من أنواع الأحياء أثناء نموها إلى واحد أو أكثر من الفيتامينات أو عناصر النمو، بينما تقوم العديد من الأحياء بإفراز مثل هذه المواد.

3- التعايش Symbiosis

يستفيد في هذا النوع من العلاقات كلا النوعين من بعضهما البعض ويعتمد كل منهما على الآخر، وبالتالي العلاقة بينهما وثيقة الصلة ومتخصصة، وكمثال عنها العلاقة بين جذور النباتات البقولية وجراثيم Rhizobium، بحيث يستفيد النبات من الآزوت الجوي الذي تقوم بتثبيته هذه الجراثيم وتستفيد جراثيم هذه الجنس من الكربون العضوي الذي يصنعه النبات بدءاً من غاز CO_2. فالعلاقة المنفعة هنا تكمن في المساعدة على نمو كلا النوعين من حيث تجهيز المواد المغذية اللازمة للنوع الآخر، بحيث يحصل الجرثوم أو الفطر على المواد العضوية المغذية وغيرها من الاحتياجات الغذائية لنموها المترافق مع نمو الجذور، وحيث لا تتوفر هذه المواد في التربة بشكل عام، وتزداد معدلات امتصاص النبات للمواد المغذية الفوسفورية والآزوتية وغيرها من المواد المغذية المعدنية.

4-التعاون أو التعاضد Cooperation:

تعتبر عملية **التحلل البيولوجي Biodegradation** مثالاً جيداً عن هذه العلاقة وهي عملية متعددة المراحل، تحدث نتيجة لعدد من التفاعلات المتعاقبة بواسطة الأحياء الدقيقة المختلفة. وتمنع هذه العملية من تجميع النواتج الاستقلابية العرضية. ونتيجة لهذا التعاون يصبح التحلل البيولوجي لكثير من المركبات الضرورية أمراً هاماً كتحلل الكيتين والسيللوز.

ب) العلاقات الضارة بين الأحياء الدقيقة:

من أكثر العلاقات البيئية الضارة أهمية بين الأحياء الدقيقة في التربة نذكر:

1-التنافس Competition:

يعرَّف التنافس على أنه علاقة غذائية ضارة تظهر نتيجة الاستخدام المتبادل للموارد الطبيعية المحدودة في التربة ذاتها، ويرتبط هذا التنافس بعنصرين رئيسين يوضحان مدى ارتباط التنافس بالتنوع الحيوي وهما:

1-1-مدى اتساع الوحدة البيئية لكلا النوعين.

1-2-حجم التداخل في الوحدة البيئية لكلا النوعين.

وعلى العموم، تتنافس الأحياء الدقيقة على نوع من الغذاء أو الأكسجين أو الحيز المكاني مما يؤدي إلى سيادة النوع الأكثر تأقلماً وقدرة على استغلال هذه الموارد من النوع الآخر، كما هو الحال عند المنافسة ما بين كثير من جراثيم التربة وفطر *Fusarium* على مصدر الآزوت، فعندما تكون كميته قليلة في التربة فإن الجراثيم هي التي تسود. كما أن التنافس لا يؤدي فقط إلى موت النوع الآخر الذي يتسم بالبطء في النمو بل وتتلاشى أعداد كبيرة منها لحرمانها من المواد الغذائية في ظل الظروف القاسية من نقص الغذاء.

وبما أن التنافس يكون على مواد محددة، فيمكن تحديد أي من عوامل النقص التي تسود في التربة، فمثلاً نقص عنصر المغنيزيوم في الوسط الغذائي يؤدي إلى تناقص جراثيم الجنس Bacillus وأنواع جراثيم الجنس Aerobacter، حيث تكون جراثيم الجنس Aerobacter ذات منافسة عالية في حصولها على المغنيزيوم مقارنة بجراثيم Bacillus. وبذلك نجد أن هذه الأنواع التي تعيش مع بعضها البعض في منطقة معينة وتتداخل في الوحدة المكانية، يقوم أحد نوعيها بإبعاد النوع الآخر وهذا ما يسمى بظاهرة **الإقصاء التنافسي Competitive exclusion**.

ويُعرّف **الإقصاء التنافسي Competitive exclusion** على أنه علاقة سلبية بين مجموعتين أو نوعين من الأحياء يعيشان مع بعضهما البعض في منطقة واحدة ويتداخلان في الوحدة المكانية ويتنافسان على الموارد ذاتها تؤدي في النهاية إلى إبعاد أحدهما للنوع الآخر أو المجموعة الأخرى.

2- التضاد Antagonistic

يُعدّ التضاد نوع من العلاقات المتبادلة الضارة بين الأحياء الدقيقة، يؤثر فيها كائن حي بشكل سلبي في النوع الآخر ويثبط نموه وتكاثره وقد يسبب موته. ويرتبط ظهور هذه العلاقة بعوامل مختلفة، قد تظهر عند منافسة عدة أنواع من الأحياء الدقيقة على المواد الغذائية، ينتج عنه سيطرة نوعاً منها على الوسط بسبب نموه الأسرع ويثبط الأنواع الأخرى. وقد تظهر هذه العلاقة عند تغيير الخصائص الفيزيائية والكيميائية للوسط من قبل أحد هذه الأنواع المسيطرة نتيجة

لتراكم تراكيز نواتج عملياته الاستقلابية. فمثلاً، حمض اللبن الذي تنتجه الجراثيم اللبنية يمنع نمو أنواع الجراثيم الأخرى في الوسط. كما تظهر علاقة التضاد بسبب إفراز بعض المضادات الحيوية من قبل بعض الأنواع أو بسبب إفرازها للمواد السامة (التوكسينات) والمثبطات التي تؤثر في نمو الأحياء الدقيقة الأخرى وقد تسبب موتها.

وتُعدّ جراثيم الأكتينومايسس (الشِّعيّات) Streptomyces من أكثر الشعيات إنتاجاً للصَّادات الحيوية في التربةوتحد من انتشار الأحياء الدقيقة الممرضة، ومن هذه الصَّادات المهمة التي تنتجها مثل هذه الجراثيم نذكر الستربتومايسين والكلورامفينيكول والتتراسيكلين والكلورتتراسيكلين.

3-الافتراس Predation:

عملية اقتناص كائن حي وهو المفترس Predator لكائن حي آخر يدعى بالفريسة Prey من أجل الغذاء والنمو والتطور. فالحيوانات الأولية تتغذى على الإسفنجيات التي تتغذى بدورها على البكتيريا. ويتبلور دور الافتراس في التنوع الحيوي في اتجاهين رئيسين هما:

الاتجاه الأول: يدعم توفر الفرائس انتشار فرائس جديدة تؤثر بشكل إيجابي في التنوع الحيوي للتربة.

الاتجاه الثاني: تلعب المفترسات دوراً مهماً في حفظ أعداد الفرائس عند مستوياتها الدنيا وبالتالي حفظ شدة التنافس إلى أدنى حدٍ له، إضافة إلى دخول فرائس أخرى في مجال المنافسة تدعم وجود أعداد جديدة من المفترسات في التربة.

4-التطفل Parasitism:

تُعدُّ هذه العلاقة إحدى العلاقات المتبادلة بين الأحياء، وتتمثل في تطفل كائن حي (الطفيلي) ويعيش على حساب كائن حي آخر (العائل أو المضيف) ويسبب له الضرر. إذ تُهاجَمُ الأحياء الدقيقة في التربة من قبل العديد من المفترسات والبكتيريا والفطور وتسبب تحللها. ولعل تطفل البكتيريا *Bacillus thuringiensis* على يرقات معظم حشرات حرشفية الأجنحة في التربة، ودخولها إلى داخل أجسامها وتخريب محتوياتها وتكاثرها بداخلها، ثم تهتك جدار جسمها المريض لتخرج أبواغها وتهاجم يرقات أخرى، أفضل مثال عن هذه العلاقة. إضافة لوجود الـ Bacteriophages التي تلتهم الخلايا البكتيرية، وهي فيروسات تهاجم البكتيريا في التربة والمياه وتقتلها، وتلعب بذلك دوراً مهماً في التوازن الحيوي في التربة والبحار والأنهار وغيرها.

ثالثاً-تصنيف الكائنات الحية الدقيقة في التربة:

تمتاز الأحياء الدقيقة في التربة بصغر حجمها وسرعة تكاثرها وقدرتها الفائقة على تحليل أو تفكيك أنواعاً عديدة من المواد العضوية. ويمكن تقسيمها اعتماداً على عدة نقاط أهمها:

1- اعتماداً على الموطن:

درج تقسيم الأحياء الدقيقة تبعاً لطبيعة وجودها وفقاً للعالم الروسي Winogradsky إلى مجموعتين رئيستين هما:

1-1-كائنات حية مستوطنة Autochthonous Organisms:

وتضم الأحياء التي يكون موطنها الأصلي هو التربة، وعادة ما تستطيع العيش والنمو والتكاثر فيها. ولها دور مهم وأساسي في التغيرات الكيميائية الحيوية التي تحدث فيها.

1-2-كائنات حية دخيلة Allochthonous Organisms:

وهي كائنات تصل إلى التربة عن طريق مياه الأمطار، أو عند إضافة المخصبات العضوية أو عند تلوث التربة بمياه المجاري. وتبقى مثل هذه الأحياء حية لفترة من الزمن، وعادة ما تدخل في حالة سكون، ولا تقوم غالباً بدور فعال في التحولات الكيميائية في التربة.

2- اعتماداً على الحاجة للأكسجين:

يمكن تقسيم الأحياء لا سيما البكتيرية منها تبعاً لحاجتها للأكسجين وطبيعة نظم إنتاج الطاقة لديها إلى ثلاث مجموعات وهي:

2-1-البكتيريا الهوائية Aerobic Bacteria:

وهي البكتيريا التي لا تستطيع النمو والتكاثر إلا بوجود الأكسجين، وعندما يكون الهواء المصدر الوحيد لإنتاج الطاقة، يكون الكائن الحي من النوع الهوائي الإجباري. وتعتبر أغلب أحياء التربة من هذا النوع، ومن أهم أجناسها نذكر: *Nitrobacter* والبكتيريا المؤكسدة للكبريت *Thiobacillus* وبكتيريا التأزت *Nitrosomonas*.

2-2-بكتيريا لا هوائية Anaerobic Bacteria:

وهي كائنات تنمو وتتكاثر فقط بغياب الأكسجين، وتقوم باختزال المركبات النيتروجينية أو الكبريتية للحصول على الطاقة اللازمة لعملياتها الحيوية. وكمثال عنها البكتيريا *Pseudomonas denitrificans* التي تقوم باختزال النترات إلى أمونيا وثاني أكسيد النتروز. في حين ترجع البكتيريا *P. desulfuricans* الكبريتات إلى كبريتيت، وتقوم البكتيريا *Clostridium* بالنترجة في التربة.

2-3-بكتيريا لا هوائية اختيارية Facultative Anaerobic Bacteria:

وهي بكتيريا تستطيع النمو والتكاثر والحصول على الطاقة بوجود أو بغياب الأكسجين، ويكون نموها عادة أفضل في الظروف الهوائية. ويقع تحت هذه المجموعة أنواع تتبع كل من *Bacillus* و *Pseudomonas*، وبعض أنواع البروتوزوا والفطور.

3- اعتماداً على المتطلبات الحرارية:

تتحكم الحرارة في أغلب العمليات الحيوية في الكائنات الحية، ولكل نوع من الأحياء درجة حرارة مثلى وحدود دنيا وعليا للنمو والنشاط، يتوقف نشاطها ونموها خارج هذه الحدود. وبصورة عامة، يمكن تقسيم الأحياء الدقيقة إلى ثلاث مجاميع رئيسة اعتماداً على متطلباتها الحرارية وهي:

3-1-كائنات محبة للحرارة المعتدلة Misophilic Organisms:

وتضم أغلب أنواع البكتيريا، وعادة تقع درجة الحرارة المثلى لنموها ونشاطها ما بين 25-35 ْس، ويتراوح مجال نموها بين 15-45 ْس.

3-2-كائنات محبة للبرودة Psychrophilic Organisms:

تنمو هذه الأنواع بشكل جيد عند درجات حرارة ما بين 10-15 ْس، وهي غير شائعة الوجود في التربة، وتنشط في فصل الشتاء وخاصة تلك الأنواع المتحملة للبرودة. كما وتوجد العديد من أحياء التربة تستطيع النمو عند درجات حرارة منخفضة تقع ما بين درجة التجمد والدرجة 5 ْس.

3-3-أحياء محبة للحرارة العالية Thermophilic Organisms:

وهذه المجموعة من الأحياء واسعة الانتشار، وتنمو بشكل جيد عند درجات حرارة أعلى من 40 ْس، وعند مجال حراري يتراوح ما بين 45 – 65 ْس. ويستطيع بعضها العيش عند درجات حرارة عالية تصل إلى 80 ْس.

4- اعتماداً على مصدر الطاقة والكربون:

يمكن تقسيم أحياء التربة تبعاً لمصدر حصولها على الطاقة والكربون إلى عدة مجموعات وهي:

4-1-كائنات ذاتية التغذية الضوئية Photoautrotrophic Organisms:

تستخدم هذه الكائنات غاز Co_2 كمصدر للكربون، والضوء كمصدر للطاقة، ومثال عن هذه الأنواع البكتيريا الخضراء Green Bacteria والبكتيريا الأرجوانية Popular Bacteria وهذا النوع شائع الوجود في الطحالب.

4-2-كائنات ذاتية التغذية الكيميائية Chemoautotrophic Organisms:

تستخدم هذه الأحياء غاز Co_2 كمصدراً للكربون، وتحصل على الطاقة عن طريق أكسدة المركبات الكيميائية الموجودة في التربة. وتشمل هذه المجموعة أحياء ذات أهمية كبيرة في التربة مثل البكتيريا *Nitrosomonas* التي تقوم بأكسدة الأمونيوم إلى نتريت للحصول على الطاقة.

4-3-كائنات متغايرة التغذية الكيميائية Chemoheterotrophic Organisms:

وهي كائنات تستخدم المركبات العضوية كمصدر للكربون والطاقة في آن واحد، مثل البكتيريا *Rhizobium* المثبتة للآزوت الجوي تكافلياً والبكتيريا *Azobacter* المثبتة للآزوت الجوي لا تكافلياً.

4-4-كائنات غيرية التغذية Heterotrophic Organisms:

وهي كائنات لا تستطيع صنع غذائها بنفسها، لذلك تعتمد على المركبات العضوية الحية والميتة للحصول على الطاقة والكربون. ولهذه الأحياء أهمية كبيرة في تحلل المادة العضوية الموجودة أو حتى المضافة إلى التربة ودورة العناصر. ومثال عنها العديد من أنواع البكتيريا، والفطور وغالبية الفطريات الشعاعية Actinomycetes (البكتيريا الخيطية) والبروتوزوا، والنيماتودا وديدان الأرض.

5- تصنيف بيرجي Bergy's Manual:

يتم هذا التصنيف على أساس تجميع الكائنات الحية المتشابهة في الصفات، اعتماداً على الفحوصات الكيموحيوية والجينية في مجاميع خاصة تضم صفوفاً، ورتباً وعوائل وأجناس وأنواعاً وتحت أنواع. ومن أشهر رتب بكتيريا التربة نذكر: Eubacteriales ورتبة Pseudomonales ورتبة Actinomycetales.

رابعاً-التطبيقات الحيوية للكائنات الحية في التربة:

1-التلقيح بالبكتريا المثبتة للآزوت:

تستعمل أنواع البكتريا التابعة إلى الجنسين *Rhizobium* و *Bradyrhizobium* بعد تنميتها في أجهزة خاصة (مخمرات fermenters) وتحميلها على مواد عضوية مناسبة، لتلقيح النباتات البقولية المتوافقة معها بهدف زيادة كمية الآزوت المثبت وخصوبة الترب.

2-التلقيح بالأحياء المثبتة للآزوت على نحو حر:

يعود الفضل في محافظة أراضي الصين وجنوب شرق آسيا على خصوبتها إلى نمو الأحياء الدقيقة في الوسط المائي الذي يغمر الأرز أو على سطح تربتها، وتتميز هذه الأحياء بقدرتها على تثبيت الآزوت الجوي على نحو حر، فتقوم بذلك بتعويض الفاقد منه في التربة. وبالتالي فإن تشجيع انتشار هذه البكتريا ونموها أو التلقيح بها له أثر بيئي مهم في توفير الآزوت ورفع خصوبة التربة. كما أن إضافة بعض أشكال البكتريا غير ذاتية التغذية، المثبتة للآزوت بصورة حرة مثل *Azospirillum* و *Beijerinckia* و *Azotobacter* قد أعطت نتائج إيجابية في كثير من الحالات وبخاصة في الترب التي تتميز بنقص الآزوت وارتفاع نسبة الكربوهيدرات فيها.

3-التلقيح بالبكتيرية المحلّة للفوسفات:

تمتاز بعض أنواع البكترية الموجودة في التربة بقدرتها على تحويل الفوسفات الثلاثية غير المتاحة للنبات إلى فوسفات ثنائية أو أحادية، وترتبط معظم التحولات الجرثومية للفوسفات بالتحول من الصيغة غير الذائبة إلى الذائبة المتحركة. والصيغة الأكثر شيوعاً للفوسفات هي فوسفات الكالسيوم الثلاثية التي تستطيع بعض الأحياء إذابتها لتمثيلها أو جعلها صالحة للاستعمال من قبل أحياء أخرى. وتعتمد آلية الإذابة على إنتاج الكائن الحي لأحماض عضوية أو معدنية.

4-التلقيح بفطريات الميكوريزا:

تستفيد النباتات نتيجة تعايش فطريات الميكوريزا على جذورها وبخاصة في مجال التغذية الفوسفورية وتحمّل الجفاف وغيرها. وتحتل هذه العملية أهمية خاصة في مناطق التحريج الصناعي الجديدة.

5-استعمال خلائط جرثومية وعضوية لإخصاب التربة وتحليل المخلفات:

تصنع بعض الشركات أو المؤسسات خلائط من جراثيم التربة النافعة المختلفة، وتحمّلها على مواد عضوية نصف متحللة للمحافظة على حيويتها أثناء التخزين والنقل، ونظراً لارتفاع تكلفتها تستعمل هذه الخلائط في الإنتاج الزراعي المكثف.

6-استعمال التقانات الحديثة في الهندسة الوراثية:

تستخدم هذه التقانة بهدف الحصول على سلالات جرثومية لأغراض معينة كزيادة قدرة السلالات على تثبيت الآزوت الجوي، أو تحطيم الخشب. وتطوير سلالات منافسة للسلالات المرضية من الجراثيم أو تحليل المبيدات وبقاياها، أو التخلص من ملوثات التربة.

7-استعمال الأحياء الدقيقة في المجال الزراعي:

يمكن لأحياء التربة الدقيقة إتاحة المواد الغذائية المهمة للنبات في التربة مثل المعادن وغيرها، وقد تساهم في إنتاج الهرمونات المحفزة للنمو، وتحفيز جهازه المناعي، وقد تحفّز أو تضعف استجابة النبات لإجهاد الجفاف أو الرطوبة. وبشكل عام، ينتج عن النمو الحيوي للأحياء الدقيقة في التربة، تنوعاً نباتياً يقلل الإصابة بالأمراض ويسبب زيادة المحصول.

خامساً-تأثير الأحياء الدقيقة في التربة:

تؤثر النظم الزراعية في الكائنات الحية وأنشطتها الحيوية وتنوعها البيولوجي في التربة. إذ أن انخفاض عدد الأنواع النباتية ذات الجذور مختلفة العمق والانتشار في التربة، وما تخلفه من مخلفات نباتية، إضافة إلى محتواها من المادة العضوية والعناصر الغذائية، والممارسات الزراعية، لا سيما الأسمدة والمبيدات المختلفة، تؤثر بشكل كبير في صحة النبات والكائنات

الحية في التربة. فقد بينت الدراسات العديدة أن الكائنات الدقيقة في التربة مسؤولة عن أداء وظائف حيوية في النظام البيئي للتربة، وتتفاعل مع النظم البيولوجية والجوية والمائية وتعمل على تدوير المغذيات وتنظيم ديناميكة المادة العضوية للتربة. ويشكل تفاعلها مع بعضها البعض، ومع النباتات والحيوانات في النظام البيئي شبكة معقدة من النشاط تعرف بشبكة العناصر الغذائية. ومن أهم تأثيرات الأحياء الدقيقة في التربة نذكر:

1-التأثيرات النافعة:

تحلل الأحياء الدقيقة البقايا النباتية والحيوانية، وتساعد في تحويلها إلى الصيغة المفيدة لتغذية النباتات. وتظهر هذه الأحياء أكثر عدداً ونشاطاً في ترب الغابات مقارنة مع ترب المروج والترب المفلوحة. وعموماً، تتحقق الأدوار المفيدة لهذه الأحياء عن طريق الدورات البيوجيوكيمياوية: كدورة الكربون ودورة الآزوت، ودورة الكبريت والفسفور والحديد وغيرها.

2-التأثيرات الضارة للأحياء الدقيقة في التربة:

يمكن لبعض الأحياء الدقيقة في التربة أن تسبب أمراضاً للإنسان والحيوان، وتصل جراثيمها إلى التربة عن طريق مياه الري أو جثث الحيوانات المصابة، ومن أمثلتها: البكتريا المسببة لمرض الجمرة الخبيثة والكزاز وغيرهما. ويسبب بعضها الآخر أمراضاً للنبات، ومن أمثلتها البكتريا المسببة للتدرن التاجي *Agrobacterium tumefaciens* وجرب البطاطا *Streptomyces scabis*، وعدداً كبيراً من الفطريات التي تسبب تعفن الجذور كأجناس *Fusarium* و *Rhizoctonia* والفطر *Pythium* وغيرها. ويمكن أن تقوم بعض الأحياء بقضم جذور النباتات أو التطفل عليها مسببة أضراراً كبيرة للمحصول. وقد يفرز بعضها الآخر مواداً سامة للنباتات أو لأحياء أخرى، وتظهر أهمية هذه الإفرازات في الظروف غير الهوائية كما في الميثان وكبريت الهدروجين وغيرهما.

3-تأثير إضافة المخصبات المعدنية أو العضوية:

تؤثر إضافة المخصبات إلى التربة في أعداد الأحياء وتوزعها وتنوعها فيها، كما أن التسميد العضوي يضيف بحد ذاته أعداداً جديدة من الأحياء إلى التربة. ويؤثر استعمال المبيدات الحشرية أو العشبية أو الفطرية أو المعقمات الكيمياوية تأثيراً سلبياً وبدرجات متفاوتة في أحياء التربة إضافة إلى تأثير إفرازات جذور النباتات المختلفة تبعاً لمراحل نموها إلى جانب الخدمات الزراعية للتربة.

الفصل الثالث

الأحياء الدقيقة في البيئات المائية
Aquatic Microorganisms

تلعب الأحياء الدقيقة دوراً مهماً في حياة الإنسان والبيئة بشكل عام ومنها البيئة المائية، وتُعدّ حلقة أساسية في السلسلة الغذائية في الطبيعة من خلال إمداد الكائنات المائية والنباتية والحيوانية بالمواد الغذائية، كما تقوم بتحليل المواد العضوية والمخلفات والملوثات المختلفة في البيئة ومنها المائية. وتتعلق الأحياء الدقيقة في البيئة المائية، بدراسة أنواعها وأعدادها ونشاطاتها المختلفة ويعد في أقسام المياه المتعددة في البيئة. حيث يشكل الماء نسبة تتراوح ما بين 70 – 90% من الخلية الحية، ويُعدّ العنصر الرئيس في مجريات العمليات الاستقلابية، والنشاطات الحيوية المختلفة فيها.

يختص **علم الأحياء الدقيقة المائية Aquatic Microbiology** بدراسة الأحياء الدقيقة من جراثيم وفطريات وطحالب وأوليات وفيروسات وغيرها من الأحياء التي تعيش وتنتشر في البيئات المائية البحرية والبحيرات، وفي التجمعات المائية العذبة السطحية والجوفية، من حيث أعدادها وأنواعها، ووظائفها وطرائق تكاثرها، ونشاطاتها الحيوية، والعوامل البيئية المؤثرة فيها، والعلاقات السائدة فيما بينها.

أولاً: أقسام المياه: تقسم المياه وفقاً لمعايير عديدة إلى عدة أقسام أهمها:

1- تبعاً لمصدرها في الطبيعة: تقسم المياه تبعاً لمصدرها في الطبيعة إلى عدة أقسام وهي:

1-1-المياه السطحية Surface Water:

تتكون المياه السطحية عند نزول الأمطار والثلوج إلى سطح التربة، وتتلوث عند سقوطها إلى التربة بميكروباتها بدرجات متفاوتة، تعتمد على ظروف التربة البيولوجية والجغرافية والمناخية.

وتقسم إلى مجموعتين:

أ) المياه غير المستقرة Unstable Water:

تشمل هذه المياه كلاً من مياه الأنهار Rivers، والجداول Streams، والبحار Seas، والمحيطات Oceans، وهي مياه غير مستقرة أو متغيرة نتيجة جريانها وحركتها. وتقسم بدورها إلى مجموعتين: المياه العذبة والمالحة التي تحتوي على تراكيز عالية من الأملاح المعدنية الذائبة فيها. وتقطن هذه المياه العديد من الكائنات أهمها: النباتات الصغيرة (Flora) والحيوانية

(Fauna). وتتباين الأحياء في هذه المياه بشكل واسع، وتتلوث بالكائنات والملوثات الأخرى عبر رشح التربة ومخلفات المجاري القادمة من الصرف الزراعي أو الصحي أو الصناعي.

ب) المياه المخزّنة Stored Water:

تشمل مياه هذه المجموعة كلاً من البحيرات Lakes، والبرك Ponds والخزانات، ويؤدي تخزين المياه أو تجميعها إلى تقليل أعداد الكائنات الحية الدقيقة فيها، وذلك نتيجة لعمليات الترسيب الدائمة، ونشاطات الأحياء الأخرى التي تتغذى على المجهريات، علاوة على تأثير بعض العوامل الجوية كالحرارة والأشعة فوق البنفسجية في أشعة الشمس. يمكن أن تصلها عن طريق الأراضي الزراعية أو النباتات العديد من الأحياء الدقيقة من فطور، وجراثيم، ووحيدات الخلية مما يسبب زيادة تركيزها فيها فيصبح لونها داكناً، وعند تحلل تلك المخلفات تطلق روائح كريهة ويصبح لون الماء فيها وطعمه غير مقبول وغير مستساغ.

1-2- المياه تحت أرضية Subterranean Water:

تشمل هذه المياه كلاً من المياه الجوفية Ground Water والآبار Wells، والينابيع Springs (الحارة والمعدنية). وبسبب نقص وقلة المغذيات فيها تُعدُّ موطناً للقليل من النباتات الصغيرة وبأنواع قليلة جداً، وتفتقر إلى الأحياء الراقية والحيوانات، وبذلك تكون شبه خالية من الجراثيم والجزيئات العضوية نتيجة رشح تلك المياه ومرورها عبر طبقات الأرض المختلفة. وكلما كانت هذه المياه عميقة كلما كانت أكثر نقاوة. وهناك آبار تختلف في محتواها من المواد المعدنية أو غير المعدنية تساعد في نمو بعض الأنواع من الأحياء. فمنها مياه تحتوي نسبة عالية من الكبريت تحتوي بكتيريا الكبريت، ومنها مياه تحتوي نسبة مرتفعة من الحديد تنتشر فيها بكتيريا الحديد، وينابيع تحتوي بكتيريا محبة للحرارة في ينابيع المياه الحارة.

1-3-المياه الجوية Atmospheric Water:

تشمل مياه الأمطار والثلوج، تكون مياهها في بداية تساقطها من السحب خالية من الجراثيم، لا سيما وأنها تتشكل من بخار الماء، وبنزولها عبر طبقات الجو تتلوث بالأحياء العالقة فيها فيصبح الجو منعشاً ورائقاً نقياً خالياً من الميكروبات، لما يحدث له من غسيل وترسيب للجزيئات العالقة فيه. وعند اختلاطها في التربة تتلوث بالأحياء المختلطة فيها، وسرعان ما تختلط مع المياه السطحية، أو تدخل جوف الأرض إلى المياه الجوفية لتصبح جزءاً منها، ولم يتم الاهتمام بها من الناحية البيولوجية كثيراً وذلك لكونها بيئة غير مستقرة.

ثانياً: الخصائص الفيزيائية والكيميائية للبيئات المائية وتأثيرها في الأحياء المائية:

يتوقف نمو ونشاط الأحياء الدقيقة وأعدادها وانتشارها في البيئات المائية على عدة عوامل، منها العوامل المرتبطة بالوسط المائي كتوفر المغذيات، والعوامل الأحيائية Biotic Factors كعلاقات الأحياء مع بعضها البعض ومع النباتات أو الحيوانات الموجودة معها، والعوامل اللا أحيائية Abiotic Factors، كالعوامل الفيزيائية والكيميائية التي تؤثر في أعداد وأنواع ونشاطات هذه الأحياء. إذ تؤثر هذه العوامل في شكل ونشاط الأحياء الدقيقة وقدرتها على تكوين الإنزيمات المختلفة.

ومن الخصائص المهمة التي تؤثر في نشاط وكثافة وتنوع الأحياء في البيئة المائية نذكر:

1-الضوء Light: تقوم الأحياء ذاتية التغذية بوجود الضوء كالطحالب مثلاً بتكوين المواد العضوية، حيث تمثل الحلقة الأساسية في السلاسل والشبكات الغذائية في البيئة المائية. ويتأثر نموها وقدرتها على التمثيل الضوئي بكثافة الضوء ولونه وشدته وطول موجته، وعمق الطبقة المضيئة Photic Zone. وبصورة عامة، تمتلك معظم الطحالب القدرة على تغيير تلونها تبعاً لظروف الإضاءة، ومع ذلك، ينخفض وجودها بوجود الضوء الخافت، ويقتصر وجودها على الطبقات العليا من المياه، ويزدهر نموها الأعظمي عند عمق يتراوح ما بين 0.5 – 2.0 م. ويتأثر عمق الطبقة المضيئة Photic Zone بعدة عوامل منها: شدة الإضاءة وزاوية سقوط الأشعة الضوئية وعكارة الماء، والفصل من العام وغيرها.

تستطيع بعض الموجات الضوئية الوصول لأعماق تتراوح ما بين 10 – 150 م. لذلك تنحصر عملية التمثيل الضوئي التي تقوم بها الطحالب بهذا العمق ولا تتعداه. وتعتمد الأحياء الهوائية على الأكسجين المنحل في الماء فقط، وبالمقابل يتأثر وجود الأحياء اللاهوائية الاختيارية والإجبارية فيها. ومن ناحية أخرى، يُعدّ الضوء ضاراً بالأحياء التي تخلو من الصبغة، وقد يكون لكلا الأشعة فوق البنفسجية والموجات الضوئية الطويلة تأثيراً ضاراً. فعلى سبيل المثال: يمنع الضوء الأزرق ذي أطوال موجات ما بين 366 – 436 نانومتر من أكسدة النتريت من قبل البكتيريا *Nitrobacter vinogradskyi*.

تمتلك بعض أنواع الجراثيم القدرة على البناء الضوئي وتسمى بكتيريا التمثيل الضوئي، تستخدم الضوء كمصدر للطاقة، لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى مواد عضوية. ومنها جرثومة الكبريت البنفسجية من عائلة Thiorhodaceae وغير الكبريتية البنفسجية Athiorhodaceae والبكتيرية الخضراء الكبريتية Chlorobacteriaceae. وتختلف هذه الجراثيم عن النباتات بأنها لا هوائية، ولا يمكنها تحليل جزيئة الماء للحصول على الهيدروجين. لذلك تستخدم غاز كبريت الهيدروجين H_2S أو مواد عضوية مختلفة للحصول على الهيدروجين بوجود الضوء مكونة الفورمالديهيد والماء والكبريت كما في المعادلة التالية:

$$CO_2 + 2H_2S \longrightarrow CH_2O + H_2O + 2S$$

2-الحرارة Temperature:

يتميز الماء بحرارة نوعية عالية، ما يعني أن ارتفاع حرارة الماء يتطلب امتصاص كميات كبيرة من الحرارة، وبالمقابل يتطلب خفض حرارتها فقدان كميات كبيرة منها. لذلك تكون حدة التغيرات الحرارية في البيئة المائية أقل وأبطئ مقارنة مع الهواء أو اليابسة. ومن المعروف أن أقصى كثافة للماء العذب عند الضغط الجوي النظامي تكون عند درجة الحرارة 3.98 ْس، وذلك بسبب الرابطة الكيميائية للماء، وعلى الرغم من ضعف هذه الرابطة، إلا أنها على درجة كبيرة من الأهمية، تجعل منه مركباً كيميائياً ذا خصائص مميزة. إذ تستطيع الأسماك وغيرها من الأحياء المائية الأخرى البقاء على قيد الحياة فيه بفضل هذه الرابطة. فعند الانخفاض الشديد لحرارة البرك والبحيرات والأنهار، تتجمد الطبقات العليا منه فقط، لأن الماء عند وصوله إلى درجة حرارة 3.98 ْس يغطس إلى الأسفل مكوناً ظاهرة التطبُّق الحراري، فيحافظ على حرارة الطبقات السفلى، ويحمي بذلك الأحياء المائية ومنها الأسماك من خطر التجمد والموت.

وينتج عن تغير درجات الحرارة الفصلية دوران الوسط المائي، وإحداث تغيرات واضحة في النشاط الميكروبي. ففي الشتاء مثلاً، تتباطأ مع انخفاض الحرارة جميع التفاعلات، ويزداد زمن التكاثر لا سيما عند الجراثيم. وبذلك تنتشر الأحياء المحبة للبرودة في الطبقات السفلى أو العميقة، والأحياء المحبة للحرارة المعتدلة في المياه الداخلية الدافئة، والأحياء المحبة للحرارة العالية في الينابيع الحارة.

3-الضغط الهيدروستاتيكي Hydrostatic Pressure:

يسمى الضغط الناتج عن عمود الماء بالثقل النوعي أو الهيدروستاتيكي، ويُعدّ عاملاً بيئياً مهماً يؤثر في وجود الأحياء الدقيقة، ونموها في البيئات المائية بشكل خاص. وتبين الدراسات ازدياد الضغط مع زيادة العمق بصورة منتظمة، وبمعدل 1 ضغط جوي (وهذه تعادل 110 كيلو باسكال) لكل زيادة بالعمق تعادل 10 أمتار، فيعادل الضغط عند هذا العمق 2 ضغط جوي، وعلى عمق 50 م يبلغ 6 ضغط جوي. وبإضافة ضغط الهواء الجوي يصبح مجموع الضغط الواقع عليه 7 ضغط جوي. ويؤثر الضغط الهيدروستاتيكي في ذوبان CO_2 مما ينعكس على قيمة درجة الحموضة pH لماء البحر، إذ ينخفض pH البحر مع زيادة ذوبان غاز CO_2.

ويعبر عن الضغط الهيدروستاتيكي بالمعادلة التالية:

الضغط الهيدروستاتيكي = الضغط الجوي + ضغط عمود الماء

3-1- أقسام الكائنات الحية تبعاً لتحملها للضغط:

تقسم الأحياء حسب قدرتها على العيش والتكاثر تحت الضغوط المختلفة كالتالي:

1) **أحياء محبة للضغط العالي (للأعماق) Barophilic Organisms:** وهي أحياء تكيفت للعيش تحت ضغوط عالية، ولا تستطيع النمو والتكاثر عند الضغط الجوي العادي. فهي لا تنمو وتتكاثر في أعماق تزيد عن 1000 م، حيث يزيد الضغط الهيدروستاتيكي عن 100 ضغط جوي فحسب، وإنما عند درجات حرارة منخفضة جداً تتراوح ما بين 3 – 5 ْس ولكنها تنمو عندها ببطء شديد.
2) **أحياء متحملة للضغط (للأعماق) Barotolerant Organisms:** وهي أحياء تستطيع النمو والتكاثر عن الضغط الجوي العادي إضافة إلى قدرتها على النمو والتكاثر عند ضغط هيدروستاتيكي عال.
3) **أحياء كارهة للضغط (للأعماق) Barophobic Organisms:** تسمى الأحياء الدقيقة التي لا يمكنها النمو والتكاثر عند ضغط يزيد عن 20 ضغط جوي بالأحياء الكارهة للأعماق وتُعدّ حساسة جداً للضغط المرتفع. وتشمل معظم جراثيم المياه العذبة وجراثيم والفطور البحرية السطحية.

4-العكارة Turbidity:

يستخدم مصطلح العكارة للتعبير عن كمية المواد الصلبة العضوية وغير العضوية والمجهريات والعوالق العالقة في المياه. وتؤثر عكارة المياه في كمية الضوء النافذ والممتص والمنعكس. تختلف عكارة المياه بدرجة كبيرة من موقع لآخر، وبالتالي يؤثر في عمق الطبقة المضيئة التي تحصل فيها عملية التمثيل الضوئي، مما يؤثر في توزيع ونشاط الأحياء الدقيقة كماً نوعاً.

وتنشأ العكارة عادة عن:

أ) جزيئات من المواد المعدنية كالرمل والطين وغيرها والتي غالباً ما يكون مصدرها سطح الأرض وتنتقل منه إلى المياه.

ب) المواد العضوية: وتشمل السيليلوز والهيميسيليلوز والمواد الكيتينية.

ج) الأحياء الدقيقة والهائمات النباتية والحيوانية صغيرة الحجم والطافية على سطح الماء.

تعتبر الجزيئات العالقة في الماء سواء كانت عضوية أو غير عضوية أسطح سائدة تلتصق بها الأحياء الدقيقة المجهرية، وبذلك تحميها من التأثير الضار للضوء. وتسمى جراثيم المياه التي تنمو وتتكاثر وهي ملتصقة بالأسطح الصلبة باسم Epibacteria.

5-درجة حموضة الماء Water pH:

يمتلك الماء في الحالة النقية درجة حموضة متعادلة (ما بين 7 – 8.5) تسمح بنمو الأحياء الدقيقة المائية، وتتأثر درجة حموضته (pH) بالظروف المحلية، وبما يصل إليها من مخلفات. تميل درجة حموضة الأمطار للحموضة وذلك لاحتوائها على CO_2، وثاني أكسيد الكبريت SO_2 بصورة منحلة، إذ تبلغ حموضتها حوالي 5.6، وفي مياه البحر ما بين 7.5 –8.5، وتعد الدرجة 7.2 الحدود الدنيا للمياه التي تنمو عندها الأحياء الدقيقة. وتتراوح تلك الدرجة في مياه البحيرات جيدة التغذية ما بين 7– 10، وهو ما يسبب الاختلافات المورفولوجية والفسيولوجية بين الأحياء الدقيقة.

6-الملوحة Salinity:

تؤثر ملوحة المياه بشكل كبير في تنوع التجمعات الميكروبية السائدة في البيئات المائية، حيث تختلف التجمعات المائية تبعاً لشدة ملوحة مياهها. فهي في الأنهار والبرك والبحيرات العذبة صفر أو قليلة الملوحة، في حين تكون عالية الملوحة في البحار والمحيطات وقد تصل إلى حد التشبُّع في بعض البحيرات المالحة. وأهم هذه الأملاح كلوريدات وكبريتات وكربونات الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم والمغنيزيوم. وإن معظم الأحياء الدقيقة التي تعيش في مياه الأنهار والبحيرات النظيفة تعتبر كارهة للملوحة، ولا يمكنها تحت الظروف الطبيعية العيش في المياه التي تزيد ملوحتها عن 10%.

6-1- أقسام الأحياء حسب درجة تحملها للملوحة:

يمكن تصنيف الأحياء تبعاً لدرجة تحملها لملوحة المياه إلى:

1) **أحياء كارهة للملوحة Halophobic Organisms:** لا تستطيع هذه الأحياء النمو والتكاثر عند زيادة تركيز الملوحة عن 1%.
2) **أحياء متحملة للملوحة Halotolerant Organisms:** تنمو هذه الأحياء في بيئات لا تزيد ملوحتها عن 1%، إلا أنها تستطيع تحمل الملوحة العالية.
3) **أحياء محبة للملوحة القليلة Weakly Halophilic Organisms:** تستطيع أحياء هذه المجموعة النمو والتكاثر عند معدل ملوحة يتراوح ما بين 2–4%.
4) **أحياء محبة للملوحة المعتدلة Moderately Halophilic Organisms:** تنمو مثل هذه الأحياء وتتكاثر عند درجات ملوحة ما بين 5–20%.
5) **أحياء محبة للملوحة العالية Extremely Halophilic Organisms:** تفضل هذه الأحياء الانتشار تحت درجات ملوحة عالية تتراوح ما بين 25–40%.

6-2-تأثير الملوحة في الأحياء:

يؤدي تغير الملوحة في أوساط معيشة الأحياء الدقيقة إلى إحداث تغيرات عديدة، فقد تؤدي إلى: إطالة زمن النمو والتكاثر عند الجراثيم والفطور، وقد تحدث تغيرات فيزيولوجية ومورفولوجية لديها، وقد تنمو الجراثيم لكنها تعجز عن الانقسام والتكاثر، وقد يسبب نقل الأحياء المحبة للملوحة إلى مياه ذات تراكيز ملحية منخفضة إلى تحللها، بحيث يضعف جدارها الخلوي لدرجة تسمح بدخول الماء إلى داخل الخلية، وبالتالي انتباج الخلية وتحطم جدارها الخلوي.

7-المواد المغذية العضوية واللاعضوية Organic and Non organic Materials:

تلعب أنواع المواد العضوية واللاعضوية الموجودة في المياه سواء كانت ذائبة أو معلقة دوراً كبيراً في أنواع ونشاط الأحياء السائدة، وتنتج من الخلايا الحية، أو منتجات انحلالها الذاتي، وتأتي كميتها الأكبر من المخلفات، وقد تكون على هيئة محاليل أو مواد معلقة. فمثلاً تكون مياه الصرف الصحي المحملة بالقاذورات غنية بالبروتين، مما يسبب نشاط البكتيريا المحللة للبروتين. وفي المياه الحاوية على كميات كبيرة من السيليلوز تنشط الأحياء المحللة للسيليلوز وهكذا. ويتأثر تطور ونشاط التفاعلات الاستقلابية للأحياء، بمحتوى المواد العضوية وسهولة إتاحتها مثل الكربوهيدرات، والأحماض العضوية، والمواد البروتينية والدهون، ويتم استنزافها من الماء. وعند انخفاض مثل هذه المواد لا تصل البكتيرية إلى حجمها المناسب، ويتباطأ انقسامها.

يؤثر محتوى الماء من المركبات اللاعضوية بشدة في تنشيط أو كبح الأحياء الدقيقة فيها. فوجود ملح كلوريد الصوديوم ومركبات النيتروجين كالنتريت والنترات والأمونيوم، ومركبات الفوسفات اللاعضوية يُعدُّ من العوامل المحددة لوجود الأحياء لا سيما الطحالب. ويندر عادة وجود مثل هذه المركبات في البحيرات رديئة التغذية، لاستهلاكها من قبل الهائمات عند تحررها.

ويعتبر وجود كميات قليلة من الحديد والقصدير ضروري لدخولها في تركيب بعض الأنزيمات. أما المعادن الثقيلة كالزئبق والنحاس والتي تتسرب إلى المياه عن طريق مياه الصرف الصحي فتؤدي إلى قتل العديد من الأنواع. ويشكل السيانيد خطراً على الحياة النباتية والحيوانية ويعتبر من السموم الخطرة.

8-الغازات الذائبة Dissolved Gases:

يحتوي الماء إلى جانب الأملاح والمواد العضوية واللاعضوية، القليل من الغازات الذائبة أهمها: الأكسجين، والنيتروجين، وكبريتيد الهيدروجين إضافة إلى الميثان. وتتأثر قابلية ذوبانها بدرجة حرارة وملوحة الماء. إذ يمكن للمياه الباردة قليلة الملوحة، إذابة كميات أكبر من الأكسجين مقارنة مع المياه الدافئة، وتحتوي المياه العذبة كميات أكبر من الغازات الذائبة مقارنة مع مياه البحر. ويُعدّ الهواء الجوي أهم مصدر لهذه الغازات، تنتشر منه وتتوزع في طبقاته العليا وصولاً إلى

تشبع سطحه بها، إضافة إلى نواتج العمليات الكيميائية الحيوية. حيث يتحرر الأكسجين من النباتات الخضراء نتيجة لعملية التمثيل الضوئي، وغاز CO_2 بفعل التنفس، ويتحرر النيتروجين بفعل عملية عكس التأزت، وكبريت الهيدروجين نتيجة نزع الكبريت، والهيدروكربونات كغاز الميثان نتيجة عملية التخمر.

ويُعدّ انخفاض الأكسجين في البيئات المائية عاملاً محدداً لنمو وتكاثر الأحياء الهوائية، ولا يوجد تأثير كبير للنيتروجين الجزيئي N_2 في ذلك، في حين يُعدّ غاز CO_2 عاملاً مهماً للأحياء ذاتية التغذية الضوئية. وينتشر غاز كبريت الهيدروجين H_2S في البيئات اللاهوائية، وتؤدي زيادة تركيزه إلى موت الكائنات الراقية النباتية والحيوانية ومعظم الأحياء المجهرية تدريجياً، باستثناء الأحياء المتحملة له. وينطلق غاز الميتان كأحد نواتج التحلل اللاهوائي للسيليلوز، ويشجع وجوده تكاثر الجراثيم المؤكسدة للميتان مثل *Pseudomonas methanica* وبعض أنواع Nocardia.

9-الكائنات الأخرى Other Organisms:

تتوقف كثافة وأنواع الميكروبات في المياه إلى حدٍ كبير على أنواع وأعداد الأحياء الأخرى المنتشرة في المياه فمثلاً: كثير من الأحياء الدقيقة الطافية والعائمة على سطح المياه (البلانكتون) تتغذى على البكتيريا والطحالب، كما تفتك وحيدات الخلية (البروتوزوا) والبكتريوفاج بملايين من البكتيريا، وفي المقابل فإن بعض أنواع الجراثيم تفرز مضادات حيوية تؤثر في كائنات أخرى، كما تتغذى أنواع كثيرة من الأحياء الدقيقة الرمية على الأحياء الأخرى الميتة.

ثالثاً: توزع الأحياء الدقيقة في البيئات المائية

Distribution of Microorganisms in Aquatic Environments

تحتل الأحياء الدقيقة كافة طبقات المسطحات المائية، بعضها يتعلق في المياه وتسمى العوالق (Planktons)، أو تغطي المواد والنباتات بشكل ثابت وتسمى بالطحالب العالقة أو المحمولة (Periphyton)، أو تعيش في رسوبيات القاع وتسمى بالقاعيات (Benthos).

وكما هو الحال في التربة فقد قسم الباحث Okafor الأحياء الدقيقة في الماء في عام 2011 إلى مجموعتين وهما الأحياء الدقيقة المستوطنة (الأصلية) Autochthonous Organisms والأحياء الدخيلة Allochthonous Organisms. وقسم Jones تجمعات الأحياء الدقيقة المائية عام 2008 **إلى ثلاث مجموعات وهي:**

1-الأحياء التي تطفو فوق سطح الماء وأطلق عليها اسم العوالق (الهائمات) Plankton.

2-الأحياء التي تنمو فوق السطوح الصلبة المغمورة بالماء وأطلق عليها اسم Haptobenthos.

3-الأحياء التي تنمو في أو على الترسبات الطينية وأطلق عليها اسم Herbobenthos.

2-مجموعات الأحياء الدقيقة في البيئات المائية Aquatic Microorganisms Groups

تتباين الأحياء الدقيقة في أنواعها وكثافاتها وتوزعها في المياه تبعاً لنوع المياه وحركتها وسرعة جريانها، بدءاً من بيئة البرك والبحيرات والبحار والمحيطات والأنهار. ويمكن عرض مجموعات الأحياء في البيئات المائية وفق التالي (شكل 6):

أولاً: <u>العوالق Plankton:</u>

وهي مجموعة من الأحياء تطفو فوق سطح الماء، وغير قادرة على مقاومة حركة وتيار الماء وتسمى بالعوالق أو الهائمات، وتقسم إلى خمس مجموعات وهي:

1-العوالق النباتية Phytoplankton:

تعرف العوالق النباتية على أنها مجتمع متباين من الناحية التصنيفية يضم المُنتِجات الأوليّة مثل الطحالب المجهرية والطحالب الخضراء والبكتيريا الخضراء المزرقة، التي تقوم بعملية التركيب الضوئي وتثبيت غاز CO_2 وتحويله إلى مركبات عضوية تغني المياه. وتضم هذه العوالق أشكالاً بأحجام أصغر من 50 µm، تشمل الطحالب المجهرية والطحالب الخضراء المزرقة، والعوالق النباتية البحرية الدياتومات، أما العوالق النباتية في الماء العذب فغالبيتها الدياتومات، والطحالب الخضراء والخضراء المزرقة.

2-العوالق الحيوانية Zooplankton:

حيوانات مائية صغيرة من البروتوزوا واللافقاريات المائية منتشرة في عمود الماء. تضم ثلاث مجموعات تصنيفية، وتعتبر مصدراً مهماً لتغذية الحيوانات الأخرى. ففي المياه العذبة تضم: الدوارات المائية، خيشوميات، والجادوفات (Copepods). وفي مياه البحر الجوادف، والمشطيات الغلاليات، والديدان السهمية. إضافة إلى أنواع الحلزونيات ومعظمها شافطات أو مفترسات.

3-العوالق الأوالي (وحيدات الخلية) Protozoa Plankton:

تشمل الأوالي التي تحتل طبقات الماء السطحية مثل السوطيات والهدبيات وهي المستهلكة الرئيسة للجراثيم، كما أن معظم الهدبيات تتغذى على السوطيات والطحالب والهدبيات الأصغر حجماً. وتتغذى الأوالي ذاتها على العوالق الحيوانية.

4-العوالق الجرثومية (البكتيرية) Bacteria Plankton:

وتشتمل على العوالق الجرثومية غيرية التغذية، وتلعب دوراً بارزاً في تحليل المواد العضوية الطافية أو العالقة على السطح أو في عمود الماء. ويبرز دورها الكبير في المياه الملوثة، وتكثر أعدادها في المياه الغنية بالمركبات العضوية. فقد وجد أن الميليلتر الواحد في المياه المفتوحة يحتوي على ما بين 10^5 – 10^7 خلية بكتيرية.

5-العوالق الفيروسية Virus Plankton:

تتكون هذه العوالق من الفيروسات، وهي من أصغر مجموعات العوالق. وقد تنتشر بأعداد كبيرة جداً (حوالي 10^8/مل) وفي مختلف أنواع المياه. وتلي الأوالي، وتعتبر عوامل حاسمة في موت الجراثيم. تعود إمكانية طفو وتأرجح الأحياء في المياه إلى وجود الأغشية المخاطية حول الخلية والفجوات الهوائية، والمحتوى الدهني داخل الخلية. وتتباين أنواعها وأعدادها وتوزعها بشكل كبير بتأثير العوامل الحيوية واللا حيوية تبعاً للمجمعات المائية. كما أن التوزع في الماء الجاري، مثل الأنهار والجداول والينابيع، يكون متماثلاً إلى حدٍ ما، وتتوزع بأعداد كبيرة وبخاصة في منتصف مسارها، ويكون القاع ومركز الجدول مناسبين لتطورها لبطء سرعة جريان المياه.

ثانياً: <u>الطحالب العالقة (المحمولة) Periphyton:</u>

الطحالب العالقة أو المحمولة Periphyton هي مجموعة من الأحياء تعطي نموات زائدة فوق أجزاء مختلفة في الماء، أو تعيش ملتصقة بكائنات مغمورة تحت سطح الماء، أو محمولة أو ملتصقة على سطح الماء، وتحتل منطقة الضفة أو الشاطئ. تتكون على الأغلب من الطحالب الصغيرة، والدياتومات، والطحالب الخضراء، والجراثيم فضلاً عن الأوالي المستوطنة وشبه المستوطنة، والنيماتودا وحبليات الذيل (Oligochaeta)، وبرقات الحشرات، وحتى القشريات.

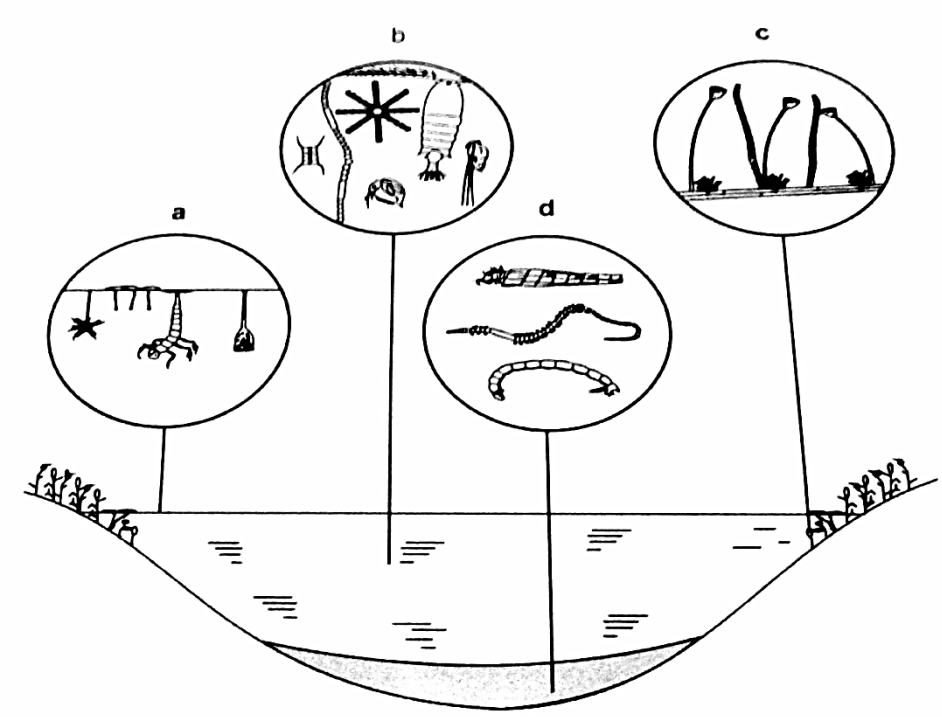
ووفقاً لطبيعة الأسطح الملتصقة بها، فقد قسم Okafor الطحالب المحمولة في عام 2011 إلى خمس مجموعات وهي:

1) **عوالق النبت الخارجي Epiphytic:** وهي الأحياء الملتصقة بأسطح النباتات.
2) **ما يتعلق بالحيوانات Epizootic:** وهي مجموعة الأحياء الملتصقة أو المحمولة على الحيوانات.
3) **الزوائد الصخرية Epilithon:** وهو مجموعة من الأحياء الملتصقة على الصخور والحجارة في البيئة المائية.
4) **العوالق الغاطسة Epixylon:** وهي مجموعة الأحياء الملتصقة بالأخشاب الغاطسة في الماء.
5) **العوالق الرملية Episammon:** وهي مجتمعات الأحياء الدقيقة الملتصقة بحبيبات الرمل.

ثالثاً: القاعيات Benthos:

القاعيات Benthos مجموعة من الأحياء والمواد العضوية تتكون من تحلل الأجسام الميتة من الحيوانات والنباتات التي تترسب من السطح إلى القاع. تحتوي القاع الموحلة على العديد من المواد العضوية التي تتشكل نتيجة تحلل المادة الميتة التي تترسب من السطح إلى القاع، إضافة

للمواد القادمة من البيئات الأرضية المجاورة، أو بجريان مياه الأمطار، وتشمل المخلفات النباتية، والحيوانية، والمعادن، والمواد الكيمائية. ويُعدّ القاع في الأعماق الكبيرة خالياً من النباتات لقلة الضوء، فضلاً عن استهلاك الأكسجين بسرعة بسبب النشاط الكبير للأحياء مما يدعم قيام حياة لا هوائية، وتطور مسببات التعفن، أو المحللات اللاهوائية. إضافة إلى بعض الحيوانات الملتهمة، وتتعاون كلا المجموعتين في تحلل المادة العضوية وتدوير عناصر الكربون، والنيتروجين والكبريت. وقد تحتوي قاع الأحواض المائية السطحية أيضاً على بعض أنواع الطحالب.



شكل 6: مجموعات الأحياء الدقيقة في مياه البحيرة. (عن Kolwzan *et al*., 2006)
a) الأحياء السطحية وتحت السطحية. b) العوالق. C) القاعيات.

خامساً–الأحياء الممرضة المنقولة بالماء

:Pathogenic Microorganisms Transmitted by Water

إضافة إلى الأحياء الدقيقة المستوطنة في المياه الملوثة بالملوثات المختلفة، تنقل المياه العديد من الأحياء المسببة للأمراض، سواء كان للإنسان أو الحيوان أو النبات على حدٍ سواء. ومن أهم الأحياء الدقيقة المنقولة مع المياه نذكر:

1- الجراثيم (البكتيريا) Bacteria:

تشمل الأحياء المنقولة بالمياه مجموعة البكتيريا الممرضة العصوية المسببة لمرض التيفوئيد والمتسبب عن الجرثومة *Salmonella typhi*، وجرثومة الجهاز الهضمي، وهي جراثيم سالبة لغرام تسبب العديد من أمراض الجهاز الهضمي، وجرثومة السل *Mycobacterium tuberculosis*. كما تنتشر العديد من أجناس الجراثيم السالبة لغرام والتي تعد أحياء ممرضة اختيارية من أهمها: *Pseudomonas* و *Aeromonas* و *Klebsiella* و *Flavobacterium* و *Enterobacter* و *Citrobacter* و *Serratia* و *Acinetobacter* و *Proteus* وأنواع الجنس *Providencia*. وهي أحياء تصيب الجهاز الهضمي وتسبب أمراضاً مختلفة كالتهاب الجهاز البولي وجهاز التنفس، وتسبب تعفن الدم الذي يعد إصابة عامة لكافة الأعضاء الداخلية.

2-الفيروسات Viruses:

يحتوي الماء الملوث بالمخلفات الصناعية والمنزلية العديد من الفيروسات، فقد سجل وجود أكثر من 100 نوع فيروسي في مثل هذه المياه، مسببة العديد من الأمراض للإنسان، لا سيما الأمراض السارية كأمراض الحمى والأمراض المعوية. ومن أمثلة هذه الفيروسات نذكر: مرض التهاب سنجابية النخاع (شلل الأطفال) أو داء Heine-Medina المتسبب عن Polio Virus الذي ينتقل بشكل رئيس عن طريق الملامسة والمياه، والفيروسات المعوية التي تصيب الأمعاء حتى عند مستويات التلوث المنخفضة بها. كما تنقل بعض الأمراض الفيروسية المسببة للأمراض الكبدية من فصيلة Picornaviridae وهي من الفيروسات غير المغلفة، تتكون من سلسلة RNA تصيب الكبد وتنتقل بسهولة عن طريق المياه.

3-الأوليات (البروتوزوا) Protozoa:

وهي أحياء تصيب الجهاز الهضمي وتكون حويصلات تحميها داخل عائلها من الظروف غير المناسبة لنشاطها، وعند تحسن ظروف الوسط في الأمعاء تتحول إلى الطور النشط وهو الشكل الخضري الخطر في جسم الأنسان. وكمثال عنها نذكر مرض الجيارديات المتسبب عن حيوان من الأوليات سوطي *Giardia lamblia* مسبباً لأعراض الإسهال وانتفاخ البطن وتكوين براز دهني وأخيراً قلبان المعدة والغثيان.

4-الفطور الطفيلية Parasitic Fungi:

يمكن للفطريات المتطفلة الانتقال مع المياه السطحية وأهمها الفطريات الجلدية والتي تشمل كلاً من: *Microsporum* sp.، *Trichophyton* sp. و *Epidermophyton* sp. مسببة لمرض القوباء الحلقية (مرض السفعة) أو الثعلبة، وغيرها من الإصابات الجلدية.

5-الديدان الطفيلية Parasitic Worms:

لا تعتبر الطفيليات البشرية مشمولة عادة بالأبحاث الميكروبية مع أنها تسبب إلى جانب الممرضات الأخرى البكتيرية والفيروسية والأوليات أمراضاً خطيرة لصحة الإنسان. وهي تنتشر مع مياه المجاري ويمكن أن تصل إلى المياه عبر التربة كنتيجة لرشح أو جريان مياه الأمطار. ويعتبر البيض الجزء المعدي والذي يطرح بأعداد كبيرة خارج جسم العائل عبر البراز أو عبر مجاري الصرف الصحي أو التربة ويعد الجزء المقاوم جداً للظروف والعوامل الخارجية. وعليه فإنها تعتبر صعبة الإزالة من المخلفات عبر عمليات إضافة الكلور عند معالجة المياه للشرب. ومن أهم الديدان الطفيلية المنقولة مع المياه نذكر: البلهارسيا .spp *Schistosoma* والدودة الشريطية .spp *Taenia* والإسكاريس .spp *Ascaris* والمستديرة .spp *Enterobius*.

الفصل الرابع

النشاطات الحيوية والكيميائية للأحياء الدقيقة في البيئات المائية

Biological and chemical activities of Aquatic Microorganisms

تلعب الأحياء الدقيقة المائية دوراً بالغ الأهمية في البيئات المائية، وتظهر تأثيراتها في المياه النقية، والملوثة على حدٍ سواء. إلا أن هذه التأثيرات تكون أكثر وضوحاً وتأثيراً في المياه الملوثة لذلك سيتم التركيز على تلك النشاطات في البيئات المائية الملوثة.

1- خصوبة المياه Water Trophicity:

يقصد بتعبير خصوبة المياه معدل غزارة العناصر ذات المنشأ البيولوجي، والمركبات العضوية البسيطة الذائبة في الماء. ويحدد خصوبة واغتذاء المياه معدلات المُنتِجات الأولية، وحجم الكتلة الحيوية. وتشمل العناصر الرئيسة الدالة على خصوبة المياه كلاً من: الفوسفور، وتراكيز كل من النيتروجين، والكلوروفيل، وشفافية المياه، وحالة الأكسجين قرب القاع.

2- أقسام التجمعات المائية تبعاً لخصوبتها:

قسمت الباحثة kolwzan وزملاؤها في عام 2006 التجمعات المائية وفقاً لمعدل غناها بالمواد الغذائية ومحتوى المليليتر الواحد من الجراثيم عند ركود المياه في الطبقة السطحية وخلال فصل الصيف إلى الأقسام التالية:

2-1- مياه قليلة الخصوبة Oligotrophic Waters: وهي مياه تحتوي تراكيز منخفضة من المواد الغذائية ويتراوح فيها عدد خلايا الجراثيم/مل ما بين 50-340 × 10^3 خلية جرثومية/مل.

2- 2- مياه متوسطة الخصوبة Mesotrophic Waters: تحتوي تراكيز متوسطة من المغذيات، بمعدل عدد خلايا جرثومية يتراوح ما بين 42 – 140 × 10^4 خلية جرثومية/مل.

2-3- مياه خصبة Eutrophic Waters: وهي تجمعات مياه غنية بالمواد الغذائية، وتتراوح فيها أعداد الجراثيم ما بين 22 – 80 × 10^5 خلية جرثومية/مل.

2-4-مياه مفرطة الخصوبة Hypertrophic Waters: وتسمى تجمعات مفرطة التغذية، وهي مياه غنية جداً بالمواد الغذائية، وتزيد فيها أعداد الجراثيم عن 80 × 10^5 خلية جرثومية/مل.

تتغير غزارة المغذيات في المياه مع مرور الزمن، وتزداد خصوبة المياه بدءاً من قليلة التغذية إلى المتوسطة فالخصبة والمفرطة وصولاً إلى ما يسمى بظاهرة الإثراء الغذائي.

3- طبيعة ومصادر ملوثات الماء Source and Type of Aquatic Pollutants

تتلوث المياه بسبب رمي المخلفات المنزلية والصناعية، التي تحتوي على كميات كبيرة ومتنوعة من المركبات في التجمعات المائية والتي تؤثر بدورها في تعايش ووجود الأحياء. وإلى جانب المخلفات، يحدث تلوث المياه من خلال جريان مياه الأمطار، ومعه غسيل الأسمدة المختلفة ومنتجات وقاية النبات من الحقول الزراعية. إضافة لما يحمله الغلاف الجوي المحيط من ملوثات كالغبار الصناعي الذي يتساقط في المياه، أو بوصول غسيله إليها عبر جريان مياه الأمطار.

ويمكن أن يصل العديد من الغازات الضارة إلى الماء مثل: SO_2، وNO_2، وCO_2، وأول أكسيد الكربون CO، وبخاصة عبر المخلفات الصحية، وصرف المناطق الصناعية، بعضها قابل للتحلل من قبل الأحياء الدقيقة المحللة بسهولة نسبياً، وتصبح غذاءً للأحياء الدقيقة غيرية التغذية، وبعضها الآخر مقاوم لعمليات التحلل، وبذلك تكون ضارة أو سامة للأحياء الدقيقة. ومن أمثلة هذه المركبات نذكر: المركبات المعاد تصنيعها، وزيوت المحركات، والشحوم والهيدروكربونات المكلورة والمبيدات. ومن أمثال التلوث المعدني التلوث بأملاح العناصر الثقيلة.

4- ظاهرة الإثراء الغذائي Eutrophication:

يعرف الإثراء الغذائي Eutrophication على أنه نمو كثيف وغزير جداً للمُنتِجات كالطحالب والجراثيم الخضراء المزرقة، والأدغال المائية في المياه الجارية والراكدة، لوصول كميات كبيرة من المغذيات كالفوسفات والمركبات النيتروجينية مع مياه الصرف الزراعي والصحي عند توفر الظروف المناسبة من حرارة وضوء ورطوبة.

تصبح المياه بسبب هذه الظاهرة غير ملائمة للسباحة والاستحمام أو الاستجمام والاستهلاك البشري، وذلك بسبب تفسخ هذه الكائنات وتحللها، مسببة إطلاق روائح كريهة ولزوجة في المياه غير مرغوبين. وفي بعض الأحيان تفرز الطحالب سموماً تسبب موتاً لعدد كبيرٍ من الأحياء المائية وتغيراً في طعم ونكهة الماء.

تنتج ظاهرة الإثراء الغذائي عن حدوث خلل في الموازنة البيئية الطبيعية، والسلسلة الغذائية الطبيعية. ففي الظروف الطبيعية، هناك توازن بين نشاط الأحياء المنتجة والمستهلكة، يعتمد هذا التوازن عملية التمثيل الضوئي كعملية إنتاجية يرمز لها بالحرف P، وعملية التنفس كعملية استهلاكية يرمز لها بالرمز R. تبقى العلاقة بين إنتاج المادة العضوية في التركيب الضوئي والتحلل الهوائي لها (التنفس) ثابتة تقريباً، وفي حالة الإثراء الغذائي وبسبب النمو الغزير للطحالب وموتها وتحللها تصبح قيمة P أكبر من R، فتختل هذه الموازنة (أي R = P) مما يسبب تلوث المياه. ويُعدّ إضافة الفوسفور والنيتروجين للمياه، إلى جانب درجات الحرارة، وكمية الأكسجين، وعكارة الماء (وأثرها في كمية الضوء) عوامل مشجعة تؤثر في الإثراء الغذائي.

ولعلاج هذه الظاهرة في البحيرات المصابة مثلاً، 1) يتم اللجوء إلى الخلط الصناعي Artificial mixing، بحيث تقلّب المياه لرفع المياه الباردة من قعر البحيرة إلى السطح مما يُؤدي إلى خفّض درجة الحرارة وتعطيل نمو الطحالب، وإيصال الأكسجين إلى القعر، وبالتالي تقليل التحلل اللاهوائي وإنتاج المواد العفنة. لذلك تستخدم آلات خلط المياه والتهوية عند حدوث تلوث شديد في مصب المجاري في الأنهار، إذ أنّ عملية الخلط تسرع من إعادة التهوية، ورفع درجة حرارة المياه. و2) تقوم بعض الدول بمد شبكة أنابيب لضخ الهواء في قعر البحيرات، أو 3) تستخدم حاصدات الطحالب، أو 4) مواد كيميائية مثل كبريتات النحاس للسيطرة على نمو الطحالب، أو 5) ضخ مياه نقية في البحيرة وسحب المياه القديمة الغنية بالمغذيات. ويتم 6) في بعض الأحيان استخدام تقنيات لخفض تراكيز الفوسفور والنيتروجين بهدف السيطرة على هذه الظاهرة السلبية ومنع حدوثها كإحدى طرائق العلاج الصناعية المتبعة للحفاظ على المياه نظيفة وغير ملوثة.

5- التنقية الذاتية Self-Purification:

التنقية الذاتية Self-Purification: عملية يتم من خلالها تخليص المياه من الملوثات المُلقاة فيها بطرائق طبيعية فيزيائية وكيميائية وحيوية دون تدخل الإنسان. ويمكن القول إنه لولا التنقية الذاتية لما تمكن الإنسان من السيطرة على تلوث المياه بسبب معاملاته المختلفة، لا سيما إلقاء مخلفات الصرف الصحي إلى الأنهار. وتختلف القابلية للتنقية الذاتية تبعاً لمواصفات المياه ذاتها. ففي الأنهار العميقة ذات الالتواءات العديدة وبطيئة الجريان، تكون التهوية في مياهها ضعيفة، وبذلك تحتاج المخلفات فيها إلى وقت طويل كي تتحلل وتنقى ذاتياً. وفي المناطق التي تتجمد فيها المياه وتتحول إلى ثلوج، فلا تصلح الأنهار والجداول فيها للتنقية الذاتية. في حين تكون إعادة التهوية Reaeration جيدة في الأنهار سريعة الجريان قليلة الالتواءات، والمنحدرة غير العميقة، فيكون التحلل سريع وبخاصة في المناطق الدافئة أو عند الحرارة العالية.

يحدث في عملية التنقية الذاتية تعاقبٌ وتغيرٌ في المجتمعات الميكروبية للمياه تبعاً لنوع المخلفات وسرعة تحللها. فقد تسود في البداية محللات البروتين والنشاء، وبعدها محللات السيليلوز، ثم محللات اللجنين، وقد تبقى مواد لا تتحلل كالشموع وبعض الدهون.

ويبقى النشاط الميكروبي محكوم بالظروف البيئية. فدرجة الحرارة العالية تُسرّع النشاط الحيوي للأحياء، لذلك تكون التنقية الذاتية أكبر وأسرع في الصيف، فيحدث انخفاض في المادة العضوية، وتعود أعداد الجراثيم إلى الانخفاض بسبب تحلل واختفاء تلك المخلفات بسرعة من الماء. وبناءً عليه، يتباين التنوع في الأحياء الدقيقة قبل وأثناء وبعد التلوث، فلا يبقى في التَّلوث سوى الأنواع التي تقاوم التّلوث، وينخفض التّنوع بعد إزالة التلوث، وتزداد أعداد وأنواع أحياء

المياه غير الملوثة. تكون العمليات التي تحدث عند التنقية الذاتية ذات طابع فيزيائي وكيميائي وحيوي وتعد مهمة جداً للتجمع المائي بالكامل. **فنلاحظ الآتي:**

1) العمليات الفيزيائية Physical Processes: تشمل العمليات الفيزيائية ترسيب المواد العالقة ثقيلة الوزن إلى القعر، أو ادمصاص بعض الملوثات السامة على حبيبات الطين والسلت ومن ثم تكتلها وترسبها إلى الأسفل.

2) العمليات الكيميائية Chemical Processes: تتمثل العمليات الكيميائية في أكسدة المواد العضوية وتحللها إلى مواد أولية غير سامة، وإعادة التهوية بإذابة أكسجين الهواء في الماء.

3) العمليات الحيوية Biological Processes: تتضمن غالبية العمليات الحيوية حدوث نشاط ميكروبي يسبب أكسدة وتحلل المواد العضوية، نتيجة نمو وتكاثر ميكروبات المياه بسبب توفر مواد عضوية كبيرة عند رمي مخلفات الإنسان في المياه، كما تعمل بعض المجاميع الميكروبية على إزالة بعض الملوثات اللاعضوية السامة.

يمكن شرح عملية التنقية الذاتية وفق مجاميع المياه الآتية:

5-1-التنقية الذاتية لسطح المياه Self-Purification of Water Surface:

تتضمن التنقية الذاتية تعاوناً وثيقاً بين العوامل الفيزيائية والبيوكيميائية مثل الرسوبيات (المستوطنات)، وعمليات الأكسدة، وتبادل المواد المتطايرة بين الهواء الجوي والمياه، وإطلاق المنتجات الغازية الناتجة عن عمليات الاستقلاب إلى الغلاف الجوي. على أن الدور الحاسم في ذلك يعود للعوامل الحيوية، إذ تشارك العديد من الأحياء الدقيقة الدنيا والراقية منها على حدٍ سواء في عمليات التنقية هذه. وتعد الجراثيم والفطريات الأكثر أهمية بين هذه الأحياء لكونها قادرة على معدنة العديد من المركبات المعدنية والبروتينات والسكريات البسيطة والمعقدة والسيليلوز واللجنين، والشموع وغيرها أثناء عمليات التحلل خلال التنقية الذاتية، وينتج عنها العديد من المركبات أهمها: NO_3، وCO_2، وH_2O، وSO_4، وPO_4، ومركبات بسيطة أخرى.

تُستَهلك أثناء عمليات التنقية الذاتية كميات كبيرة من الأكسجين من خلال العمليات البيوكيميائية، وتُعرف كمية الأكسجين المستهلكة من قبل الأحياء المائية **بالأكسجين الحيوي المستهلك** Biological Oxygen Demand (BOD)، يمكن من خلال معرفة كميته تحديد تراكيز المركبات العضوية المنحلة الحساسة للأكسدة الحيوية، وبذلك تحديد كثافة الملوثات في الماء.

- **العوامل المؤثرة في التنقية الذاتية للمياه:**

هناك عوامل عديدة تؤثر في التنقية الذاتية للمياه يمكن تبيان أهمها وفق الآتي:

1- كمية مخلفات الصرف الصحي المرمية بالنسبة لكمية المياه.

2- سرعة حركة أو جريان المياه.

3- درجة حرارة المياه.

4- سرعة إعادة تهوية المياه.

5-2-التنقية الذاتية في المياه الجارية Self-Purification of Lotic Water

إن تتابع عمليات التنقية الذاتية لمياه تصب فيها مخالفات الصرف الصحي أو الزراعي أو الصناعي بشكل ثابت ودائم، وبخاصة عند وجود حقول زراعية، أو مصانع أو مزارع ثابتة لتربية الحيوان قرب النهر، تسبب تغيراً في الظروف الكيميائية والبيولوجية والفيزيائية لها. وتتم التنقية الذاتية في المياه الجارية وفق مستويات متعددة ومختلفة من التلوث، تتوزع فيها المواد العضوية والأحياء الدقيقة بشكل متباين، تدعى بالمناطق الرميّة. ويمكن تعريف **المناطق الرميّة Saprobic Zones:** على أنها مناطق تتكون في المياه الجارية تضم مستويات متعددة ومختلفة من التلوث، وتتوزع فيها المواد العضوية والأحياء الدقيقة بشكل متباين. تتلوث هذه المناطق بالمادة العضوية على صورة محاليل ناتجة من أحياء ميتة أو متحللة عبر إفراز أنزيمات يليها امتصاص المادة المتحللة. وتسود هذه المناطق أنواعاً دون غيرها من الجراثيم والفطريات تتأقلم للتعايش مع ظروف هذه المناطق. وتتباين في ديناميكية عمليات التفكك أو التحلل، وكثافة الأكسجين المستهلك ومظهر الماء. تأخذ هذه المناطق صفة الثبات نوعاً ما وبخاصة عند ثبات كمية الملوثات المرمية، وثبات مواصفات المياه (الشكل 7).

يمكن توضيح مناطق التنقية الذاتية في المياه الجارية وفق التالي:

أ) منطقة عديدة الرمية (التلوث) Polisaprobic Zone:

منطقة تصب فيها فتحات أنابيب الصرف أو مخلفات التصنيع والصرف الزراعي Sewer outfall، فتحتوي هذه المنطقة على أعلى تراكيز للملوثات، وتظهر المياه رمادية اللون قاتمة، قذرة وكثيفة، تضم تركيز عالٍ من المركبات العضوية المختلفة. وتتطور فيها أحياء دقيقة غير ذاتية التغذية Heterotroph تقوم بعمليات التفكك أو التحلل الحيوي، فيحدث فيها تحلل سريع للمخلفات، واستهلاك سريع للأكسجين مما يسبب نقصه، فتسود الظروف اللاهوائية. ويحدث تحلل لا هوائي في ترسبات وطين قعر المياه، فتنطلق روائح كريهة نتيجة النشاط الحيوي لهذه الأحياء تتسبب عن غازات: H_2S وNH_3 وCH_4 وN_2 وغيرها. وبذلك تعتبر هذه المنطقة غير ملائمة لحياة وتكاثر الأسماك والأحياء الكبيرة، مع قلة النباتات الخضراء فيها. علاوة على تكاثر الجراثيم غيرية التغذية في هذه المنطقة، وتزداد أعدادها بسرعة وبشكل كبير. ومن أهم أنواعها *Zooglea ramigera* و*Sphaerotilus natans*، إضافة إلى بكتيرية الكبريت، بوجود غاز كبريتيد الهيدروجين وبخاصة جراثيم *Beggiatoa* و*Thiothrix* والبروتوزوا في هذه المنطقة.

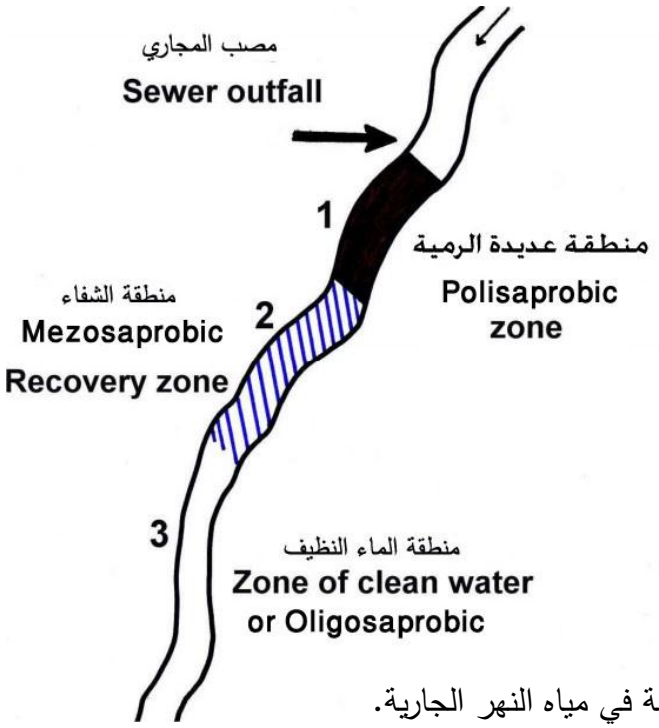
ب) منطقة متوسطة الرمية (الشفاء) Mezosaprobic (Recovery) Zone:

تلي المنطقة السابقة، تتدهور فيها المادة العضوية تدهوراً سريعاً، لتبدأ عملية إعادة التهوية بشكل أسرع من إزالة الأكسجين أو استنفاذه، وتبدأ زيادة الأكسجين المذاب ببطء، وتتحول الأمونيا المتكونة في منطقة التلوث تدريجياً إلى نترات نتيجة الأكسدة بتأثير نشاط بكتيريا التأزت. وبقدر ما تكون الجراثيم سائدة في المنطقة الأولى، يبدأ في هذه المنطقة ظهور القشريات والأسماك المتحملة للتلوث. وتبدأ الطحالب بالنمو لوفرة عناصر غذائية لا عضوية تكونت من المنطقة الأولى، ويسود فيها غالباً اللون الأخضر، لغزارة نمو الطحالب الخضراء، ويصبح الماء نقياً. يتناقص في هذه المنطقة عدد المحللات مقارنة مع المنطقة السابقة، فتظهر فطور الفضلات مثل *Leptomitus lacteus* والطحالب الخضراء المزرقة، وبعض الدياتومات المتناثرة، وتنتهي فيها معدنة المركبات العضوية، باستثناء مركبات الدبال التي يصعب تحللها.

يمكن تقسيم هذه المنطقة إلى قسمين: إلفا وبيتا، تعتبر المنطقة إلفا غير ذاتية التغذية مقارنة بالمنطقة بيتا ذاتية التغذية، والأكثر نظافة، وتظهر فيها أعداد أكبر من أنواع الطحالب.

ج) منطقة المياه النظيفة أو قليلة الرمية Oligosaprobic or Clean Water Zone

يتوقف تدفق الملوثات في هذه المنطقة وتعود طبيعة الماء إلى حالتها السابقة قبل حدوث التلوث ويرتفع تركيز الأكسجين، وينخفض استنفاذه إلى الصفر، أو على الأقل إلى قيمته الأولى قبل التلوث، ويصبح نقياً وعديم الرائحة. وتظهر العديد من الأحياء المائية من حيوانات ونباتات، لا يمكنها العيش في المنطقتين الأولى والثانية وهي أساساً حساسة جداً للتلوث، مثل جراثيم النترات والحديد (جراثيم التمثيل الكيميائي)، وبعض الطحالب الخضراء المزرقة المتناثرة والعديد من طحالب الدياتوما، والطحالب الخضراء والقليل من الأوالي. إلا أنه لا تزال هناك زيادة في تركيز النترات والفوسفات، التي تكونت نتيجة تحلل المواد العضوية في المنطقتين السابقتين، ويرجع تركيز هذه المركبات إلى حالتها الطبيعية تدريجياً كلما ابتعدنا عن مصدر التلوث.



الشكل (6): مناطق التنقية الذاتية المتكونة في مياه النهر الجارية.

5-3-التنقية الذاتية للمياه الراكدة Self-Purification of Lentic Water:

أ- خصائص المياه الراكدة:

تمثل البحار والمحيطات مثالاً نموذجياً عن المياه الراكدة قليلة الحركة، وتحتوي هذه المياه على أملاح منحلة بكميات كبيرة، يشكل منها كلوريد الصوديوم النسبة الأكبر بمعدل يصل إلى 35 غ/لتر. وتصل المنطقة المضاءة فيها إلى عمق حوالي 200 م تخترقها أشعة الشمس، ويمكن أن تحدث فيها عمليات التمثيل الضوئي. تتميز هذه المياه بانخفاض درجات الحرارة إلى حوالي 4 ْس، وضغط عالٍ يصل لأعلى من 500 بار تبعاً للعمق.

يمكن تقسيم ملوحة هذه المياه إلى ثلاث مجموعات هي:

1- مياه قليلة الملوحة: تحتوي معدل ملوحة يتراوح ما بين 1 – 3 غ/لتر.

2- مياه متوسطة الملوحة: تحتوي معدل ملوحة يتراوح ما بين 3 – 10 غ/لتر.

3- مياه عالية الملوحة: تشكل الملوحة فيها معدل يتراوح ما بين 10-35 غ/لتر.

وبذلك تختلف الأحياء الدقيقة التي تعيش في مثل هذه البيئة جذرياً عن غيرها من أحياء المياه الأخرى. فقد وجد بأن 70% من جراثيم المحيطات والبحار لا يمكن زراعتها على الأوساط المغذية، وليس لها مثيل بين الجراثيم المعروفة، تحتل منها الجراثيم الخضراء المزرقة Cyanobacteria حوالي 15%، ومن بين الجراثيم التي يمكن زراعتها على الأوساط المغذية، تشكل الجراثيم .*Roseobacteria* spp نسبة 15%.

ب – التنقية الذاتية في المياه الراكدة:

تكون التنقية الذاتية القائمة على نشاط الجراثيم البحرية في هذه مياه البحار والمحيطات أبطأ مما هي عليه في المياه الداخلية والجارية بسبب درجات الحرارة المنخفضة، وتثبيط ملوحة مياه البحر لنمو وتكاثر العديد من الأحياء التي تلعب دوراً في عملية التحلل، والتي تأتي مع المخلفات المرمية فيه. ويحتاج ظهور فلورا ميكروبية بحرية متخصصة بتحطيم هذه الملوثات إلى وقت طويل. وقد تشارك أحياء أخرى غير الأحياء الدقيقة في عملية التنقية، كالديدان والحشرات والأوليات التي تأكل الدقائق الصغيرة من الملوثات في المياه. وحتى الطيور والأسماك تساهم في التهام مثل هذه الدقائق، إلا أن دورها بسيطٌ جداً مقارنة بدور الجراثيم والفطريات التي تحلل المواد الملوثة المختلفة إلى مكوناتها الأولية.

تظهر التنقية الذاتية في المياه الراكدة بأشكال تختلف عن المياه الجارية، فلا تشاهد المناطق الرّمية في هذه المياه، مع بقاء آلية التنقية ذاتها. تترسب الملوثات الملقاة فيها إلى القاع بسبب كثافتها الأعلى من كثافة المياه ويبدأ تحللها فيه. تتضمن العمليات الحيوية البيولوجية في رسوبيات القاع حدوث عمليات فيزيائية وكيميائية وبيولوجية معقدة فيما بينها وبين الماء، والتي تعتبر بالإجمال مهمة للماء. تبدأ عمليات التحلل الهوائي في الطبقة العلوية من رسوبيات القاع بدءاً من أجزاء المليمتر إلى عدة مليمترات، وتعتبر مصدراً لأملاح المعادن الذائبة. وتحدث عمليات التحلل البيولوجي اللاهوائي أسفل هذه الطبقات مسببة إطلاق غازات غالباً ما تكون سامة للأحياء، تشمل على سبيل المثال: H_2S والميتان (CH_4).

تلعب مخلفات القاع دوراً مهماً في عملية التنقية الذاتية للماء الراكد، إذ تسقط المادة العضوية المعلقة إلى القاع لقلة حركة الماء. ويُعدّ معدل الأكسجين المنحل قرب القاع العامل الأكثر أهمية في سرعة نفاذ النيتروجين والفوسفور، والحديد والمغنيزيوم من الرسوبيات إلى الماء. حيث يبدأ النشر النشط للفوسفور في الماء عند انخفاض الأكسجين المنحل في الماء (O_2) إلى أقل من 1 ملغ/دسم^3. وتلعب درجة الحرارة، والمركبات العضوية المتحللة، ودرجة حموضة الماء (pH)، وعمليات الأكسدة والاختزال تأثيراً مهماً في إطلاق الفوسفور.

تُعدّ أجناس الجراثيم الهوائية المحللة للسيليلوز *Sporocytophaga* و *Cytophaga* و *Pseudomonas* و *Achromobacter* و *Flavobacterium*، والجراثيم اللاهوائية التي تحلل المواد شبيهة السيليلوز من جنس *Clostridium* أكثر انتشاراً في رسوبيات قاع العديد من الأحواض المائية. وتنتشر في الظروف اللاهوائية العديد من جراثيم المحررة لغاز كبريت الهيدروجين من البروتينات، وجراثيم خفض الكبريتات، والجراثيم المنتجة النيتروجين، والجراثيم المنتجة للميثان (CH_4) عبر تحليل المواد العضوية للحصول على الطاقة اللازمة لأنشطتها الحيوية محررة غاز الميثان من غاز CO2 والهيدروجين وفق المعادلة:

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

إضافة إلى جراثيم تحرير الهيدروجين، فإن الجراثيم المنتجة للأمونيا شائعة الانتشار في رسوبيات القاع، وتنتشر جراثيم النترات بأعداد قليلة في الطبقات العليا من الرسوبيات كأحياء هوائية إجبارية. ويعتمد وجود الجراثيم الهوائية المؤكسدة للميثان في رسوبيات القاع أيضاً على تركيز الأكسجين والحديد.

الفصل الخامس

الأحياء الدقيقة في الهواء
Airborne Microorganisms

تنتشر العديد من الأحياء الدقيقة في الهواء مشكلة ما يسمى الضباب (الهباء) الحيوي Bio aerosols وتشمل مجموعاتها كلاً من: الفيروسات، البكتيريا، الفطور، الخمائر والأوليات. ومن المهم لهذه الأحياء كي تتمكن من العيش في الهواء الجوي أن تتأقلم مع بعض صفات المناخ الخارجي القاسية أو غير المناسبة بما فيها درجات الحرارة، والغازات والرطوبة.

- الأحياء والغلاف الجوي:

تتوزع الأحياء الدقيقة بشكل طبيعي في الغلاف الجوي على ارتفاع يتراوح ما بين 90 -3000 م فوق سطح الأرض، وقد بينت العديد من الدراسات انتشار كلٌ من *Alternaria*، *Cladosporium*، *Penicillium* ووجدت أفراد الجنس *Aspergillus* على ارتفاع يصل إلى 1200 م فوق سطح الأرض في كتلة كلا هوائي المنطقة القطبية وغير القطبية. وشملت الأبواغ التي سجلت بكثرة على ارتفاع أقل من 150 م كلاً من: *Bacillus*، *Clostridium*، والأبواغ الأسكية للخمائر، إضافة إلى قطعاً من الميسيليوم، وعائلة Streptomycetaceae، غبار الطلع، حوصلات الكائنات وحيدة الخلية الطحالب، المكورات، والبكتيرية *Corynebacterium*. كما وجد في هواء المدارس والمشافي أو أماكن معيشة الأشخاص لا سيما المصابين بالأمراض المعدية بعض الأحياء مثل: عصيات السل المكورات العقدية، والمكورات الرئوية.

يحتوي الغلاف الجوي الذي تقطنه الأحياء الدقيقة عدة تباينات: حرارة متطرفة، الإضاءة، الحرارة، كميات محدودة من الماء والماء العضوي، تجعل من الغلاف الجوي غير ملائم لنمو الأحياء الدقيقة. إلا أن أغلب مجموعات الأحياء الدقيقة تسجل عادة في الطبقة السفلية من الغلاف الجوي. ومع ذلك فإن الغلاف الجوي يكون معرضاً لضوء الشمس وبذلك يحتوي نسبة رطوبة أقل ودرجات حرارة أعلى وبذلك تكون الأحياء الدقيقة فيه غير محمية من تأثير التجفيف وبالتالي فإن معظمها سيموت. توجد الفطريات في الهواء على هيئة أبواغ كونيدية، ويوريدينية، وكلاميدية، وبازيدية، وأكياس أسكية والقليل منها بصورة ميسيليوم. وتتوقف كثافتها في الهواء على ارتفاع طبقة الهواء عن سطح التربة، وخصائص المكان، وفصول السنة، وتركيب الغطاء النباتي والعوامل المناخية ....إلخ.

لقد سجل في المتر المكعب هواء وعلى ارتفاع 2 م من سطح الأرض في المناطق الزراعية ما يقارب 12500 نوع من الفطريات 47% منها من فطر *Cladosporium*، وحوالي 31% فطور

Sporolomyces و3% أبواغ بازيدية، و2% من كلٍ من فطريات البياض الدقيقي والتفحمات و *Alternaria*. ويزداد عدد الأبواغ كلما اقتربنا من سطح الأرض، ويقل كلما ارتفعنا عنه، ويشاهد الحد الأقصى من الأبواغ في منتصف النهار، والحد الأدنى في منتصف الليل. كما ويزداد عدد الأبواغ في الهواء خلال فترة الحصاد، وخاصة حصاد النجيليات، ويقل أثناء المطر. ويعتبر الهواء فوق سطح المحيطات والبحار وفوق القطبين الجنوبي والشمالي فقير بالأبواغ، وتعتبر النباتات المزروعة والبرية وبقايا المحاصيل الموجودة على سطح التربة المصدر الرئيس للأبواغ الفطرية في الغلاف الجوي.

ينتهي انتشار الأبواغ في الهواء بترسبها بفعل الجاذبية الأرضية، أو بالتصاقها فوق سطح بارز كالغبار أو ورقة نبات، أو بماء المطر، أو بالترسب الكهربائي الساكن، حيث تعاكس شحنة البوغة شحنة الوسط.

علم الأحياء الدقيقة الهوائية Aero Microbiology

يمكن تعريف علم الأحياء الدقيقة الهوائية على أنه العلم الذي يهتم بدراسة الأحياء الدقيقة التي تعيش معلقة في الهواء والتي يُشار إليها باسم الضباب الحيوي أو الهباء الجوي Aerosols.

ينتشر عدداً غير قليل من الأحياء الدقيقة في الهواء، إلا أن هذا العدد يعتبر أقل بكثير إذا ما قورن مع أعدادها في التربة والمياه. ويعد هذا العدد كافياً لإحداث تأثيراً ما في الغلاف الجوي بمجرد وصوله إلى عمود الهواء، ويكون لديها الفرصة للانتقال بيئياً إلى مسافات بعيدة بمساعدة الرياح والهطولات المطرية مما يزيد من معدل انتشار الأمراض الناتجة عن مثل هذه الأحياء والتي تصيب الإنسان والحيوان والنبات على حدٍ سواء. كما ويمكن أن تنتقل الأحياء الدقيقة بواسطة الغيوم وتكون قادرة على القيام بنشاطها الحيوي فيها، وتُغيِّر مكوناتها الكيميائية ويمكنها أيضاً أن تشجع هطول الأمطار.

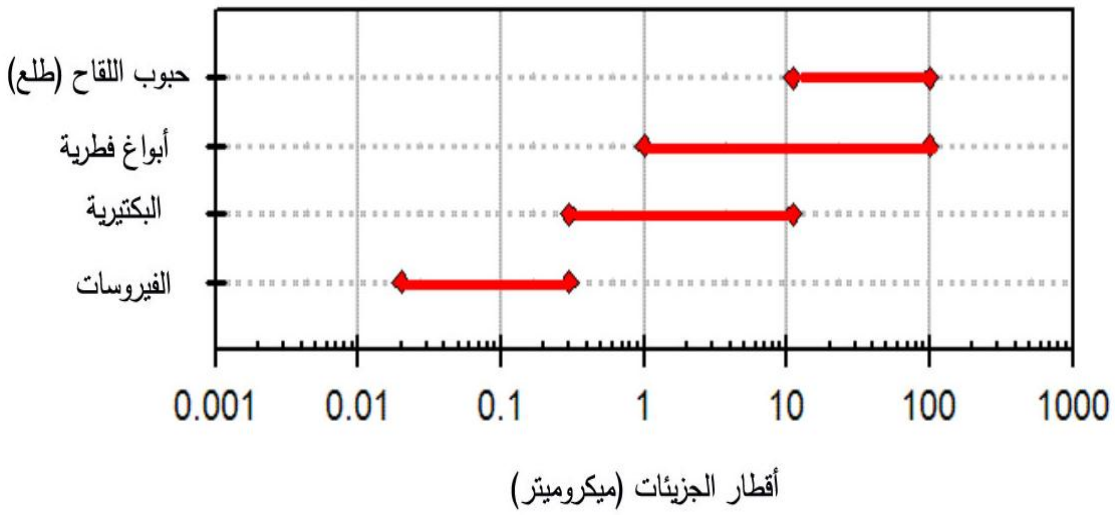
الهباء (الضباب) الجوي Aerosols: يمكن تعريف الهباء أو الضباب الجوي Aerosols على أنه مجموعة الجزيئات أو الذرات العالقة في الهواء وتضم هذه الجزيئات كلاً من حبوب الطلع وذرات الغبار إلى جانب العديد من الأحياء الدقيقة أو وحدات تكاثرها.

ويسمى الهباء أو الضباب الجوي بالهباء الحيوي (Bio aerosol) عندما تتعلق مجموعة الأحياء الدقيقة في عمود الهواء، أما طبيعة هذا الهباء الحيوي، فيتكون من جزيئات تتراوح أقطارها ما بين 0.02 – 100 ميكروميتر ويمكن تقسيمها تبعاً لحجمها إلى:

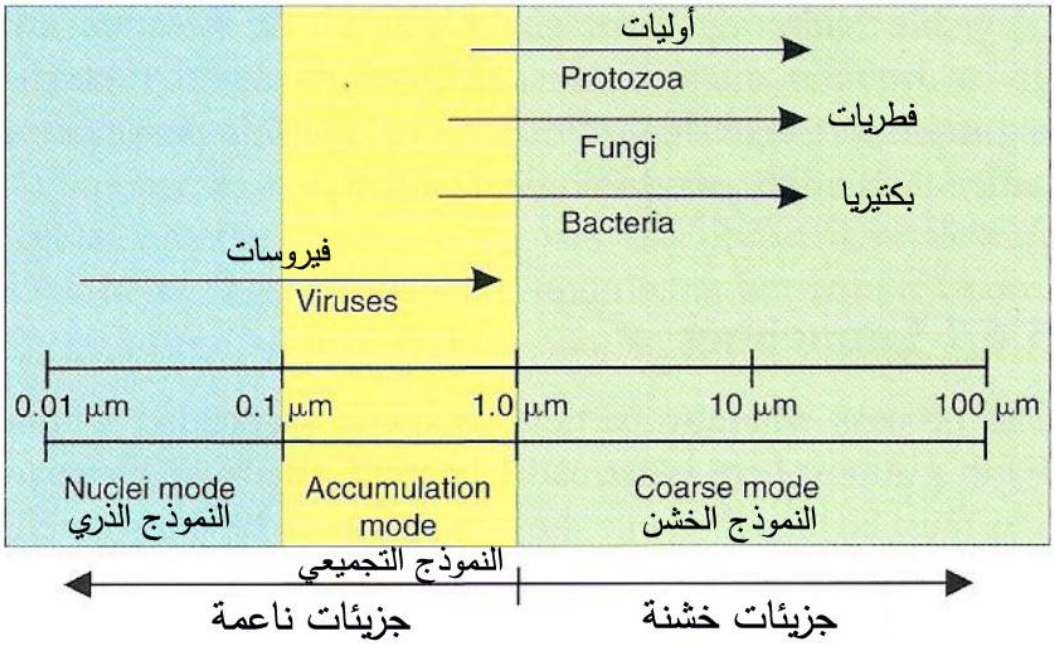
1) **النموذج الذري Nuclei mode:** ويبلغ قطر جزيئاتها أقل من 0.1 ميكروميتر وتضم بعض الفيروسات.

2) **النمط التجميعي Accumulation mode:** ويبلغ متوسط أقطار جزيئاتها ما بين 0.1 – 2 ميكروميتر وتضم بعض الفيروسات والبكتيريا وأبواغ الفطريات.

3) **النمط الخشن Coarse mode:** وتكون أقطار جزيئاتها أكبر من 2 ميكروميتر، وتضم بعض الأنواع البكتيرية وأبواغ بعض الفطريات وصولاً إلى حبوب اللقاح والتي تصل أقطار جزيئاتها إلى 100 ميكروميتر (شكل 8 و9).



شكل (8): طبيعة الهباء (الضباب) الجوي ومكوناته. (عن Husam, 2020)



شكل (9): رسم تخطيطي للأحجام النسبية لمكونات الهباء الجوي. (عن Husam, 2020)

البيئة الفيزيائية للهواء Physical Environment of Air:

يمتلك الهواء العديد من العوامل الفيزيائية تؤثر في عوم وانتقال وترسب الضباب الحيوي والتي تصل مكوناته من الأحياء الدقيقة وغيرها بشكل رئيس لتتعلق في عمود الهواء من البيئات البرية والمائية، وذلك بتأثير اضطرابات الهواء. وتعتبر الرياح الوسيلة الرئيسة لنقل تلك الأحياء التي يتم دفعها بعدد من الآليات بما فيها سحب الثقل النوعي لها مسببة اتصالها بالأسطح أو تتجمع في الأمطار التي تدفع بهذه الجزيئات للأسفل إلى سطح الأرض.

الغلاف الجوي Atmosphere:

يحتوي الغلاف الجوي إلى جانب قطرات الماء وذرات الغبار والمواد الأخرى على الأحياء الدقيقة والتي تتبع طريق ذرات الغبار وتتجمع بينها ضمن الهواء. وتأتي هذه الأحياء عن نشاطات الإنسان، الحيوان والنبات ومن ثم تنقل بطرائق متنوعة منها الرياح وأخرى ميكانيكية وبشرية وأخيراً تترسب في مكان ما آخر جديد.

الغيوم Clouds:

تعتبر الغيوم المنطقة التي تحتوي الأحياء الدقيقة، وهي بدورها مزيجاً من المركبات العضوية وغير العضوية معلقة في الرطوبة (وهي إسهامات الأحياء الدقيقة في الغيوم)، وتعتبر الظروف البيئية في الغيوم غير مشجعة على استمرارية بقاء الأحياء حية فيها حيث أن على هذه الأحياء مقاومة درجات حرارة التجمد، وتهديد التجفيف، وشدة الأشعة فوق البنفسجية. إضافة إلى أن الغيوم تعد وسطاً حمضياً بمعدل درجة حموضة pH يتراوح ما بين 3 – 7 درجات، وعلى الرغم من ذلك فإن هناك أحياء متطرفة يمكنها مقاومة جميع هذه الإجهادات البيئية. وتلعب الغيوم بذلك دور الناقل لهذه الأحياء وتنشرها على مسافات واسعة.

الإجهادات البيئية الفيزيائية Physical Environment Stresses:

يمتلك الهواء صفات فيزيائية متعددة تشمل كلا من الرطوبة النسبية، والحرارة والإشعاع والمحتوى من الأكسجين، وبعض الأيونات والإشعاعات فوق البنفسجية، إضافة إلى الملوثات المختلفة وجميعها عوامل تؤثر في حيوية ونشاط الكائنات الحية الدقيقة، وتحدد نوع أو أنواع الأحياء الدقيقة التي يمكنها البقاء حية في الهواء.

لقد بين Pepper في عام 2011 بأن للهواء عوامل متعددة ضارة في الأحياء الدقيقة، تلعب دوراً هاماً في تحديد وجودها فيه، ويمكن نقلها ضمن الغيوم. ومن هذه العوامل نذكر:

1-التجفيف Desiccation:

يعتبر التجفيف عامل الإعاقة الرئيس الذي تواجهه الأحياء الدقيقة، ويحدد الوقت الذي تستطيع فيه هذه الأحياء البقاء على قيد الحياة وهي معلقة فيه.

2-رطوبة الهواء Air Humidity:

تحتل رطوبة الهواء أو محتوى الهواء من الماء أهمية كبيرة في حياة الأحياء الدقيقة، ويعد العامل الرئيس الثاني الذي يعيق انتشارها وتعلقها وبقائها على قيد الحياة فيه. فقد بينت (Barbara *et al.*, 2006) بأن الأحياء الدقيقة عند مستويات الرطوبة المنخفضة، ودرجات الحرارة العالية تعاني من مشكلة التجفيف. إضافة لذلك فقد تمنح الرطوبة العالية حماية جيدة لتلك الأحياء ضد الإشعاع الشمسي. وبذلك ترد هذه الأحياء بطريقة مختلفة تبعاً لاختلافات الرطوبة في الهواء. ويعتبر شكل الجدار الخلوي والكيمياء الحيوية للبنى المحيطة بالأحياء المنقولة بالهواء ذات أهمية كبيرة في مقاومتها للظروف غير الملائمة. ويعتبر تكوين الأبواغ الداخلية أو المستريحة أو الأحياء ذات المحفظة النووية السميكة كالبكتيرية المكونة للأبواغ الداخلية، غير حساسة كثيراً لاختلافات الرطوبة وتعتبر البكتيرية السالبة لغرام والفيروسات المغلفة كفيروس الأنفلونزا أكثر تحملاً لانخفاض الرطوبة على عكس البكتيريا الموجبة لغرام والفيروسات غير المغلفة كالفيروسات المعوية التي تمتلك قدرة بقاء عالية بوجود الرطوبة النسبية العالية في الهواء. وبذلك تعد أنواع البكتيرية الموجبة لغرام أكثر تحملاً للرطوبة العالية في الهواء، في حين يعتبر بعضها الآخر أكثر تحملاً لظروف الجفاف والتجفيف.

3-الحرارة Temperature:

تؤثر درجات الحرارة بطريقة غير مباشرة في كبح أو تنشيط الأحياء الدقيقة، من خلال تأثيرها في الرطوبة الجوية النسبية، أو بشكل مباشر من خلال تجفيف خلايا الأحياء، أو تخريب البروتين أو تجمد الماء الموجود فيها. ووفقاً للدراسات الحديثة فإن درجات الحرارة المثلى لمثل هذه الأحياء في الهواء الجوي هي أعلى من 15 ْس، وتشجع الحرارة المنخفضة للهواء بقاء بعض الأحياء حية لفترة أطول، إلا أن البرودة العالية يمكن أن تسبب تشكل بلورات ثلجية تضر بهذه الأحياء.

4-الإشعاعات الشمسية Solar Radiations:

تلعب الإشعاعات الشمسية دوراً سلبياً في معدل الأحياء الدقيقة القادرة على البقاء حية في الهواء بما فيها الإشعاعات المرئية والأشعة فوق البنفسجية والأشعة فوق الحمراء والأشعة المتأينة أو أشعة X وذلك لأسباب منها:

1) أنها تسب الطفرات.
2) تؤدي إلى تكوين جذور حرة تسبب تكوين جزيئات متضخمة ضارة.
3) تسبب تجفيفاً خطيراً للأحياء.

لقد وُجِدَ أنَّ الأطوال الموجية للأشعة الضوئية المرئية ما بين 400 – 700 ن م تنتج ما يسمى بالتأثير الضوئي المقوَّى (Photodynamic) مسببة تكوين جذور حرة ضمن خلايا الأحياء كجذور الأوكسجين (O_2^-) أو جذور هيدروكسيلية (OH^-) تكون نشاطات أكسدة وإرجاع قوية تسبب أضرار كبيرة للجزيئات الكبيرة مثل الحمض النووي DNA أو البروتينات.

يمكن تعريف التأثير الضوئي المقوّى Photodynamic على أنه تأثير موجات الأشعة الضوئية المرئية ما بين 400 – 700 ن م في إنتاج جذوراً حرة تسبب نشاطات أكسدة وإرجاع قوية في خلايا الأحياء الدقيقة تخرّب جزيئاتها الكبيرة مثل الحمض النووي DNA أو البروتينات.

كما أن للأشعة فوق البنفسجية أو الأشعة المتأينة (أشعة X) تأثيراً أكبر في خلايا الأحياء الدقيقة مقارنة بالأشعة المرئية، وبخاصة عند أطوال موجية ما بين 230 – 275 ن م. ويتمثل الضرر الرئيس للأشعة فوق البنفسجية في إلحاق الضرر في نيكليوتيدات شريط الحمض النووي DNA فتحطم السلاسل الفردية والمزدوجة، وتحدث تبدلات في بنية قواعد الحمض النووي. كأن تقوم مثلاً بربط جزيئين ثايمين، تسبب بتكرار الربط الطفرات، أو تغير في بنية وتركيب الحمض النووي. إضافة إلى تأثيرات غير المباشرة للأشعة المرئية، من خلال تكوين الجذور الحرة وإحداث التجفيف نتيجة التسخين المستمر لخلايا الأحياء الدقيقة.

تمتلك بعض الأحياء الدقيقة آليات خاصة لتصحيح مثل هذا الضرر في الحمض النووي DNA المتسبب عن الأشعة فوق البنفسجية. ومن الأمثلة عن الأحياء التي تمتلك آلية مقاومة للإشعاع البكتيرية *Dienococcus radiodurans* وهي من بكتيرية التربة التي تعد الأكثر مقاومة للإشعاع والتي تم عزلها حتى وقتنا الراهن، حيث تخصص معظم الطاقة الناتجة عن عمليات الاستقلاب لإنجاز هذه الوظيفة بكفاءة عالية.

5–محتوى الهواء من الأكسجين والأيونات Air Oxygen and Ion Content:

لا ترتبط سمية الأكسجين بشكله ثنائي الجزيء، وإنما عند عكس O_2 إلى أشكال أكثر أكسدة وإرجاع بعمليات الأكسدة والإرجاع، ويتضمن ذلك جذور الأكسجين (O_2^-) والماء الأكسجيني H_2O_2 وجذور الهيدروكسيل (OH^-). حيث ترتفع هذه الجذور بشكل طبيعي في الهواء من خلال أنشطة الإضاءة والأشعة فوق البنفسجية والتلوث، الأمر الذي يسبب ضرراً للحمض النووي في الأحياء، وتكوين الطفرات التي قد تتراكم مع الزمن مشابهة بذلك تأثير الإشعاعات.

مقاومة الأحياء الدقيقة للظروف القاسية في الهواء:

تمتلك العديد من الأحياء الدقيقة القادرة عل البقاء في الهواء في الظروف غير المناسبة والتي تَحدْ أو توقف نشاطها الحيوي. فعلى سبيل المثال تمتلك البكتيريا المكونة للأبواغ الداخلية والأعفان، والفطريات، والأوليات المكونة للحوصلات آليات متخصصة لحمايتها من تأثير

العوامل غير الملائمة، وتؤمن زيادة قدرتها على العيش في الهباء الجوي. وبالتالي تمكنها من العيش لفترة غير محدودة في الهباء الجوي. وتترافق مع أمراض خاصة أو عامة ومن أهم هذه المجموعات نذكر:

1-البكتيريا Bacteria:

كمثال عن البكتيريا المقاومة للإجهادات الفيزيائية الهوائية نذكر مرض الجمرة الخبيثة المتسبب عن البكتيرية *Bacillus anthracis* وهو من الأمراض التنفسية المزعجة للإنسان، وهي بكتيرية عصوية موجبة لغرام تقوم بتكوين الأبواغ لمقاومة إجهادات البيئة. وهذه الأبواغ عبارة عن خلايا قليلة المحتوى المائي وذات جدار سميك، تبقى ساكنة لعدة سنوات مما يجعل من هذه البكتيرية شديدة المقاومة، وتمكنها من العيش تحت درجات حرارة متطرفة وبيئات ذات تلوث كيميائي عالي ونقص شديد في المواد الغذائية.

2-الفطريات Fungi:

من الأمثلة عن الفطريات المقاومة للإجهادات الفيزيائية للهواء نذكر الفطر الرشاشي *Aspergillus fumigatus* الذي يعد الفطر الرئيس المنقول بالهواء، وهو قادر على إحداث العديد من الأمراض البشرية عند استنشاق أبواغه الكونيدية، ووصولها إلى الرئتين. وهو أكثر تأقلماً مع تغير الظروف البيئية ويبقى قادراً على إحداث عدوى كبيرة.

3-الفيروسات Viral:

من الأمثلة عن الفيروسات الهوائية نذكر فيروس أنفلونزا الطيور وهو من الفيروسات ذات حمض نووي وحيد السلسلة RNA ويمكنه إصابة مجال واسع من أنواع الحيوانات، إضافة إلى إصابة الإنسان ويسبب مرض أنفلونزا الطيور.

مصادر تلوث الهواء بالأحياء الدقيقة Sources of Air Contamination with Organisms

يتلوث الهواء بالأحياء الدقيقة بطرائق مختلفة، وتعتبر التربة إحدى أهم مصادر نقل هذه الأحياء للغلاف الجوي. فعندما تهب الرياح تحمل معها الأحياء الدقيقة وتطلقها في الهواء، وتبقى معلقة فيه لفترة طويلة. فضلاً عن نشاطات الإنسان كحفر وإثارة التربة. إضافة لإطلاق مثل هذه الأحياء على شكل قطرات من الماء أو ضباب حيوي، أو يتم حملها ونشرها من قبل الرياح أو أعمال المد والجزر. ويعتبر نشر الأحياء الدقيقة من أسطح كل من النبات والحيوانات عبر تيارات الهواء المصدر الرئيس للأحياء الدقيقة في الهواء.

الفصل السادس

النشاطات الحيوية الكيميائية للأحياء الدقيقة

Biochemical Activities of Microorganisms

أولاً: التمثيل الغذائي Metabolism:

لضمان بقاء وتكاثر الأحياء الدقيقة لا بد من قيامها بمجموعة من العمليات الحيوية والحيوية الكيميائية، يتم من خلالها تحليل المواد الغذائية أو مخلفات الانسان أو ملوثات البيئة المتعددة من خلال آليات التمثيل الغذائي وطرائق التحلل المختلفة. وتسمى التفاعلات الكيميائية التي تشارك فيها المواد الغذائية، ومجمل الظواهر البيوكيميائية للأعمال الحيوية في خلاياها بعمليات التمثيل الغذائي Metabolism، وتتكون من مجموعتين من العمليات الحيوية الهامة وهما البناء Anabolism والهدم Catabolism، يسهم بعضاً منها في دورة العناصر في البيئة.

1-عملية الهدم أو التخريب Catabolism: وهي عملية تؤدي في النهاية إلى تفكيك المواد الغذائية الكربوهيدراتية والدهنية والبروتينية، وتحليلها عبر أكسدتها من قبل الأحياء الدقيقة. ويحدث في الخلايا نوعان من الهدم، هدم عن طريق التنفس، وهدم عن طريق التخمر. تتحلل المواد الغذائية بشكل كامل في عملية التنفس مع إنتاج كمية كبيرة من الطاقة وH_2O وCO_2، تستخدمها الخلية في عمليات تركيب وتمثيل أخرى. أما في عملية التخمر، فتتحلل المواد الغذائية جزئياً، وينتج عنها كمية قليلة من الطاقة، إلى جانب مركبات أخرى غنية بالطاقة، مثل الكحول الإيتيلي والحموض العضوية. ويتم الاحتفاظ بالطاقة الناتجة خلال عمليتي التنفس والتخمر على شكل روابط بيروفوسفاتية في المركب أدينوزين ثلاثي الفسفات (ATP).

2-عملية البناء أو التمثيل Anabolism: تقوم الخلية بعمليات البناء بهدف تركيب مواد معقدة بدءاً من مواد بسيطة، من خلال عمليات التصنيع، كتصنيع الحموض النووية، والبروتينات، والسكريات المتعددة، مستخدمة في ذلك الطاقة المتحررة أثناء عملية الهدم، والمحفوظة في الخلية بشكل ATP. ومن الجدير ذكره أن عمليتي البناء الهدم تتم في وقت واحد وتشارك فيهما عدد من التفاعلات والمواد الوسيطة.

3-دخول المواد الغذائية خلية الكائن الدقيق:

يشكل الجدار الخلوي للأحياء الدقيقة حاجزاً اصطفائياً حقيقياً يحول دون دخول المواد المختلفة وخروجها من الخلية عشوائياً. كما أن الخلايا الحية لا تقع أبدا في حالة توازن مع المواد المحيطة بها، والداخلة إليها عبر أغلفتها، ويتم دخول الماء والمحاليل الغذائية، إلى خلايا الأحياء الدقيقة وفق أحد الأنماط التالية:

3-1- الانتشار Dispersal: يتم دخول المواد الغذائية المنحلة بالماء بواسطة فرق التركيز (في حالة المحاليل غير الكهربائية) بين عصارة الخلية والوسط المغذي المحيط بها، أو بواسطة فرق الجهد الكهربائي (في حالة الايونات) بين سطحي الغشاء السيتوبلازمي الخارجي والداخلي. وتكون سرعة نقل المواد بهذه الطريقة بطيئة جداً، وتتضمن هذه الآلية جزئيات خاصة ناقلة تدور ما بين سطحي الغشاء السيتوبلازمي، بحيث ترتبط جزيئة الناقل مع جزيئة المادة المتاخمة للسطحه الخارجي وتسحبها لتتحرر في السيتوبلازما، ومن ثم تعود لربط جزيئات مغذية أخرى. وهذه النواقل عبارة عن جزئيات من البروتين وتدعى Permea. وبهذه الطريقة لا تصرف الخلية أي جهد أو طاقة في هذا النقل، كما ويتم نقل مخلفات الاستقلاب بهذه الآلية ولكن من الداخل إلى الخارج.

3-2- النقل الفعال Effective Transport: تنتقل المواد المغذية من الوسط الخارجي إلى داخل خلايا الأحياء الدقيقة بواسطة التدرج الكهربائي، وتُنفّذ هذه العملية عبر النقل الفعال يتم فيه استخدام طاقة (ATP) تستمدها الخلية أثناء عملية التنفس أو التخمر. وبذلك فإن متطلبات الأحياء الدقيقة من الأغذية لا تتوقف على جهازها الإنزيمي فقط، بل وعلى آلية النقل الموجودة فيها أيضاً.

4- تجمع الطاقة في الأحياء الدقيقة:

يتم الاحتفاظ بالطاقة في الأحياء الدقيقة على شكل روابط بيروفوسفاتية، وتتحرر منها عند تحللها. ومن المركبات التي تحفظ بالطاقة نذكر: أدينوزين ثلاثي الفوسفات ATP، أدينوزين ثنائي الفوسفات ADP، سيتوزين ثلاثي الفوسفات CTP، اليوريدين ثلاثي الفوسفات UTP، والجوانين ثلاثي الفوسفات GTP. ويعتبر المركب ATP من أكثر هذه المركبات أهمية.

5- مفهوم الاكسدة والإرجاع للمركبات العضوية:

عُرفت الأكسدة البيولوجية منذ عام 1780، عندما اكتشف العالم لافوازيه بأن الحيوانات والنباتات الرَّاقية تأخذ الأوكسجين من الهواء وتطلق غاز CO_2، وأَسماها بالتنفس. ثم أُطلِقَت لاحقاً تمسية الأكسدة على عملية أخذ الأكسجين، والإرجاع على نزعه من المادة. وأطلقت فيما بعد على عمليات نزع الهيدرجين من المادة والإرجاع على إضافته إليها.

كما وتُدعى عملية فَقد الالكترونات (e^-) أثناء تفاعلات الذّرّات أو الجزئيات بالأكسدة، وارتباطها بها بالإرجاع، وتتم هاتين العمليتين في الوقت ذاته، وعلى اعتبار أن الإلكترونات أو الهيدروجين لا يمكنها التجمع في الوسط بمفردها، فلابد أن تُستَقبَل من قبل مركب كيميائي آخر، وبذلك يترافق تفاعل الأكسدة بتفاعل إرجاع، ويتم تنظيم ذلك في خلايا الأحياء الدقيقة من خلال آلية خاصة تساعدها في إتمام هذه التفاعلات وهي الأنزيمات.

6- الإنزيمات Enzymes:

تستخدم الخلية حوافز بيولوجية تقوم بتنشيط وتسريع آلاف التفاعلات الكيميائية داخل خلايا الأحياء الدقيقة دون أن تدخل في التفاعلات، يكون لها صفة نوعية، يُشبَّهُ عملها بالقفل والمفتاح. فيكون لكل مادة متفاعلة أنزيم نوعي خاص، وقد يكون للمادة الواحدة أكثر من إنزيم. ويعود التأثير النوعي للإنزيم إلى تركيبه الفراغي الذي يُثبِّتُ المادة المتفاعلة عليه. والإنزيمات عبارة عن جزئيات بروتينية ذات وزن جزيئي كبير يتراوح ما بين 10000 والملايين، ويأخذ اسم المادة التي يتوسط تفاعلاتها مضافاً إليه المقطع (ase) في النهاية. وهي وسيط نشط جداً يتكون من جزأين، الأول بروتيني يدعى AboEnzyme، والثاني مادة معقدة غير بروتينية تدعى بالإنزيم المساعد أو مساعد الإنزيم CoEnzyme يتألف من جزيء واحد أو عدة جزئيات بسيطة يسمى Prosthetic Groups ولكي يستمر الإنزيم في نشاطه يجب أن يبقى الجزأين معاً ليُكوِّنا الإنزيم الكامل.

ثانياً: التنفس Respiration

تحتاج جميع الأحياء للعيش في وسط تتوفر فيه العناصر الغذائية الضرورية كافة، إلى جانب الشروط الفيزيائية والكيميائية، وهي بحاجة إلى بعض العناصر مثل الكربون والآزوت والفوسفور والكبريت. لاستخدامها في تصنيع الأنزيمات والفيتامينات والأصبغة المختلفة. لذلك تقوم الأحياء بالمبادلات مع الوسط المحيط لاستمرار نشاطها الاستقلابي، أو التكاثر، من خلال مجموعتين من العمليات الحيوية تتضمن التنفس والتخمر.

يتحقق التنفس بعدة وسائل يمكن تبيانها وفق الآتي:

1- أنماط التنفس عند الأحياء Respiration Types of Organisms:

1-1- التنفس الهوائي Aerobic respiration:

يسمى التنفس الذي تتم فيه أكسدة المركبات العضوية بأكسجين الهواء بالتنفس الهوائي. ويتشابه بذلك مع الكثير من الكائنات الرَّاقية. ويتكون من طورين: يضم الطور الأول سلسلة من التفاعلات تتأكسد بفضلها المادة العضوية إلى CO_2، وتصل ذرات الهيدروجين المتحررة إلى المستقبل، وهو ما يسمى بحلقة كربس Krebs's cycle، أو دورة الحموض ثلاثية الكاربوكسيل. ويتم في الطور الثاني أكسدة الهيدروجين المتحرر بالأكسجين وتكوين الطاقة ATP. ويتم في هذين الطورين أكسدة المادة الغذائية إلى CO_2 وH_2O، وإنتاج الطاقة البيولوجية المفيدة على شكل ATP.

1-2- التنفس اللاهوائي Anaerobic Respiration:

يُعرّف التَّنفس اللاهوائي على أنه استغلال بعض الأحياء الدقيقة للأكسجين المرتبط بالمركبات المؤكسدة كأملاح حمضي الآزوت والكبريت فتصبح أكثر إرجاعاً. كما في المعادلتين التاليتين:

1) $2HNO_3 + 12H \longrightarrow N_2 + 6H_2O + 2H^+$
2) $H_2SO_4 + 8H \longrightarrow H_2S + 4H_2O$

يستقبل الهيدروجين المنزوع من المادة العضوية بواسطة إنزيم الهيدروجيناز من قبل النترات أو الكبريتات. وتسمى الأحياء الدقيقة التي تقوم بالتنفس على حساب النترات أحياء ذات تنفس نتراتي وهي جراثيم (بكتيريا) لا هوائية اختيارية تتبع إلى جنسي *Pseudomonas* و *Bacillus*، والأحياء الدقيقة التي تستخدم الكبريتات (السلفات) بالأحياء ذات التنفس السُّلفاتي وهي جراثيم لا هوائية سالبة لغرام تتبع جنسي *Desulfovibrio* و *Desulfotomaculum*.

3-1- التنفس باستعمال المواد اللاعضوية Non- Organic Respiration:

تمتلك مجموعة من جراثيم التربة والماء القدرة على استخدام المواد غير العضوية كمصدر للطاقة، ومنها الأمونياك والنتريت وغاز H_2S وكل من Fe^{++}، Mg^{++} وS^{--} والهيدروجين. وقد تتم عملية الأكسدة في الشروط الهوائية واللاهوائية (تنفس هوائي ولا هوائي)، ويرافق هذا النمط من التنفس تثبيت غاز CO_2 مشابهة في ذلك النباتات الخضراء.

4-1- الأكسدة غير التامة للمواد العضوية:

تتأكسد المركبات العضوية عادة في التنفس الهوائي أكسدة تامة، وتتكون المواد النهائية من CO_2 وH_2O وطاقة، إلا أن هناك أحياء دقيقة تقوم بأكسدة المواد العضوية أكسدة غير تامة، وبخاصة جراثيم الجنس *Pseudomonas* وبعض الفطور، ومن المركبات الناتجة عن الأكسدة غير التامة للسكريات حمض الليمون، وحمض الفيوماريك وحمض الخل. وتتم الأكسدة غير التامة بوجود الأكسجين فقط، مختلفة بذلك عن التخمر الذي لا يحتاج إلى الأكسجين إطلاقاً. وتُعدّ الأكسدة غير التامة من التفاعلات الهامة في مجال الصناعة.

ثالثاً: التخمر Fermentation

يُعرّف التخمر: على أنه عملية يتم من خلالها إنتاج الطاقة في الأحياء من خلال تفاعلات الأكسدة والإرجاع للمواد الغذائية ومنها الكربوهيدرات أثناء عملية التنفس في الظروف اللاهوائية بواسطة التحلل. وتمثل السكريات الركيزة الأساسية والأكثر شيوعاً لعملية التخمر حيث تستخدم الأحياء الدقيقة ماءات الكربون في عملية التّخمر بما فيها السُّكريات المعقدة، ويُعدّ سُكر الغلوكوز مثالاً نموذجياً لعملية التخمر. ويقوم بكل نوع من أنواع التخمر مجموعة من الأحياء الدقيقة لتُعطي في النِّهاية مواد خاصة بهذا التخمر. ويُعدّ الكثير من أنواع التخمر ذو أهمية اقتصادية وصناعية. وتتم التخمرات على مرحلتين: يتحوَّل الغلوكوز في المرحلة الأولى إلى حمض البيروفيك، ويتم في المرحلة الثانية استخدام الهيدروجين المنزوع في إرجاع حمض البيروفيك أو المركبات الأخرى

المتكونة عنه. ففي التخمر اللبني مثلاً، يُرجع حمض البيروفيك بواسطة الهيدروجين المنزوع إلى حمض اللبن.

المرحلة الأولى: $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3COCOOH + 2H_2$

المرحلة الثانية: $2CH_3COCOOH + 2H_2 \longrightarrow 2CH_3CHOHCOOH$

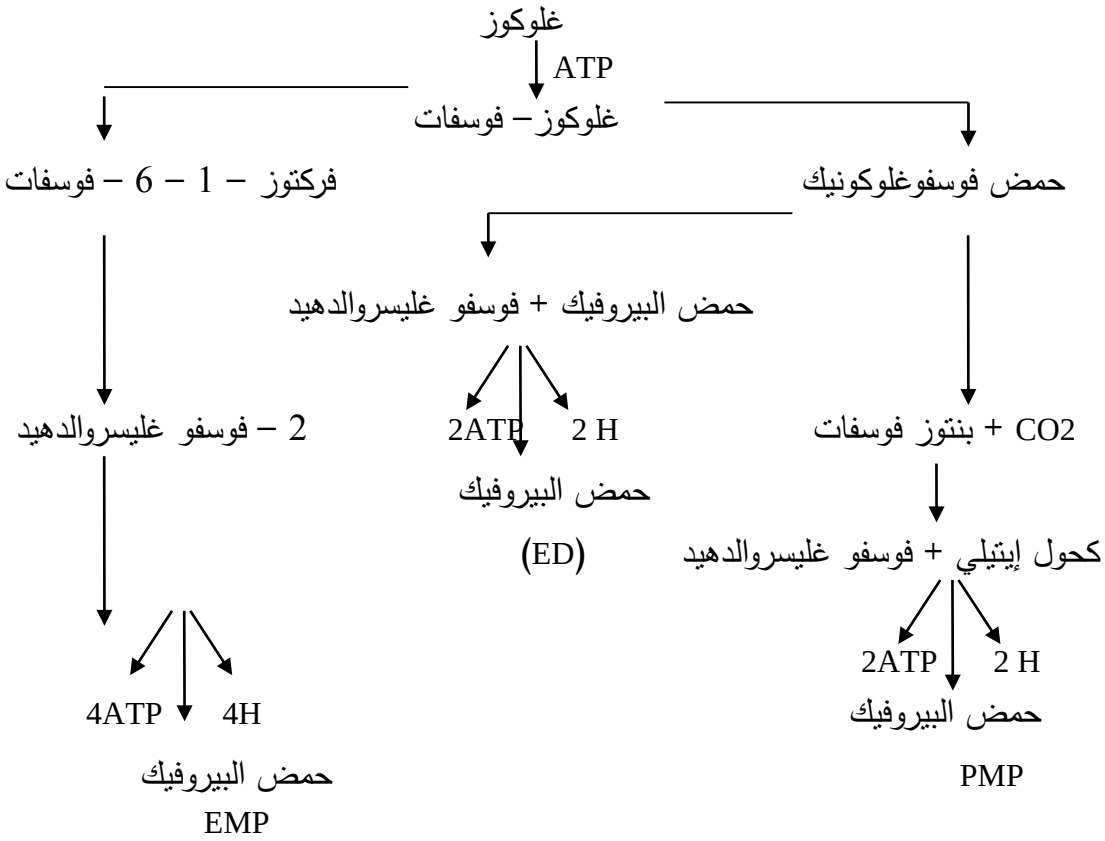
وتوجد ثلاث طرائق لتكوين حمض البيروفيك عند الأحياء الدقيقة بدءاً من الغلوكوز:

1– طريق إمبدين – مايرهوف – بارنا EMP ويسود هذا الأسلوب أولاً في الخمائر والعضلات ومن ثم في البكتيريا وفي كافة الكائنات الحية.

2– طريق إنترا – دودورفا ED وينتشر في الأحياء الدقيقة فقط.

3– طريق البنتوز وحيد الفوسفات PMP وينتشر في النباتات وعدد من الأحياء الدقيقة.

ويمكن توضيح هذه الطرائق الثلاث بالمخطط التوضيحي (2).



مخطط (2): رسم تخطيطي يبين طرق تمثيل الغلوكوز وتحويله إلى حمض البيروفيك.

- أنواع التخمر في الأحياء الدقيقة:

1 – التخمر الكحولي Alcoholic Fermentation:

تستطيع الأحياء الدقيقة تحطيم جزيئات الكربوهيدرات وتكوين الكحول الإيتيلي كناتج رئيس لعملية التخمر الكحولي. وينتشر هذا النوع من التخمر في العديد من الخمائر أهمها أفراد الجنس Saccharomyces، كما تقوم الأنسجة النباتية عموماً بهذا النوع من التَّخمر أيضاً وفي بعض أنواع الفطور والجراثيم.

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2OH + 2CO_2 + \text{طاقة}$$

تستطيع الخمائر أكسدة ماءات الكربون إلى CO_2 وماء بوجود الأكسجين، ما يعني أن عملية التخمر التي تتم بمعزل عن الأكسجين، تتحول إلى عملية تنفس بوجود الأكسجين، يرافقها استعمال كميات كبيرة من ماءات الكربون. وعندما يُراد الحصول على كميات كبيرة من الكحول، يتم تنمية الخمائر لا هوائياً. وتتكون إلى جانب الكحول الإيتيلي في هذا التخمر منتجات أخرى كالكحول الإميلي وحمض الساكسينيك. وتتم تفاعلات التخمر عادة في وسط حامضي (pH=5-4)، ويتراكم الغليسيرين في الوسط القلوي (pH=8)، ويمكن الحصول على كميات كبيرة من الغليسيرين Glycerol بإضافة كمية من كبريتات الصوديوم Na_2SO_4 إلى وسط التخمر.

2 – التخمر اللاكتيكي Lactic acid Fermentation:

تقوم بهذا النوع من التخمر مجموعة من الجراثيم وأنسجة الثدييات وبعض الأوليات، وفيه ينشطر السكر البسيط إلى حمض اللبن Lactic acid، ويعبر عن هذا التفاعل بالمعادلة الإجمالية الآتية:

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3CHOHCOOH + \text{طاقة}$$

يتكوّن في وسط التَّخمّر إلى جانب حمض اللبن كناتج رئيس للتخمر اللاكتيكي، كميات كبيرة أو قليلة من المركبات الثانوية كحمض الخل، وغاز CO_2، وأحياناً الكحول الإيتيلي. وتختلف هذه المركبات باختلاف الجراثيم المُسبِّبة، **وتقسم الجراثيم (البكتيريا) المسببة لهذا التَّخمّر تبعاً لنواتجه إلى مجموعتين:**

أ– جراثيم التخمر اللبني المتجانس: يكون الناتج الرئيس لهذا النوع من التخمر هو حمض اللبن، والقليل جداً من المركبات الثّانوية. يحدث هذا النوع في أنسجة الثدييات، ومن أهم أنواع الجراثيم التي تقوم بمثل هذا التخمر *Lactobacillus lactis* و *Streptococcus lactis*.

ب– جراثيم التخمر اللبني غير المتجانس: يكون الناتج النهائي لعملية التخمر إلى جانب حمض اللبن مركبات ثانوية بكميات كبيرة، كحمض الخل، والكحول الإيتيلي والغليسيرين وغاز CO_2.

3 – التخمر البربيوني Propionic Fermentation:

تنتسب الجراثيم المسببة لهذا النوع من التخمر إلى الجنس *Propionobacterium* ويكون ناتجه النهائي هو حمض البروبيونيك، وجراثيم هذا الجنس شبيه بجراثيم حمض اللبن غير متجانسة

التخمر. وهي عصوية الشكل غير متحركة وغير متبوِّغة وهي هوائية اختيارياً، وتوجد هذه الأنواع من الجراثيم في الحليب مع جراثيم حمض اللبن. وهي جراثيم قادرة على تحويل حمض اللبن إلى حمض الخل وحمض البروبيونيك، ويمكن استغلال هذه الجراثيم للحصول على فيتامين B_{12}. ويتم هذا التخمر وفق المعادلة التالية:

$$3C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 4CH_3CH_2COOH + 2CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2O + \text{طاقة}$$

4 – التخمر الميتاني Methane Fermentation:

توجد مجموعة من الجراثيم لاهوائية إجبارياً قادرة على تكوين غاز الميتان CH_4 بدءاً من الكحول، والحموض العضوية. كما ويمكن الحصول على الميتان، بواسطة هذه الجراثيم نتيجة إرجاعها CO_2، ويكون غاز ثاني أكسيد الكربون في هذه الحالة مستقبلاً لعنصر الهيدروجين ومصدراً للإلكترونات كما هو حال مع الجرثومة *Methanobacteria omelianskii* وفق المعادلة:

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

كما توجد بعض الأنواع قادرة على تحويل أول أكسيد الكربون إلى ميتان ومن المواد الناتجة CO_2 والهيدروجين كالنوع *Methanosarcina barkeri*، كما في المعادلة التالية:

$$4CO + 4H_2O \longrightarrow 4CO_2 + 4H_2$$
$$CO_2 + 2H_4 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$
$$4CO + 2H_2O \longrightarrow CH_4 + 3CO_2$$

وينتشر هذا النوع من التخمر بكثرة في طمي المياه الحاوية على غاز الكبريت H_2S، ومياه المجاري. وتتكون في هذا الطمي كميات كبيرة من B_{12}، ومن المعتقد بأن هذا الفيتامين يلعب دور المستقبل للإلكترونات في عملية تخمر CO_2 إلى ميتان CH_4.

5 – أنواع أخرى من التخمر:

توجد أنواع أخرى من الجراثيم قادرة على إحداث مجموعة من التخمرات وبخاصة أفراد الجنس *Clostridium* من أهمها:

أ– جراثيم تخمر حمض الزبدة: تقوم مجموعة من الأنواع التابعة للجنس السابق مثل *C. butylicum* بتخمير الغلوكوز والنشاء إلى حمض الزبدة وحمض الخل.

ب– جراثيم تخمر البوتانول: مثل الجرثومة *C. butylicum* و *C. acitobutylicum* تقوم بتخمير الغلوكوز والبيروفات والغليسيرين إلى أسيتون، إيثانول وبوتانول، وكذلك إلى حمض الزبدة، وحمض الخل، والبوتانول والإيزوبروبان.

رابعاً: الأحياء ودورة بعض العناصر

تلعب الأحياء الدقيقة دوراً كبير الأهمية في دورة بعض العناصر المهمة في الطبيعة ومن هذه العناصر نذكر:

1- دورة الكربون:

يدخل الكربون كعنصر ومكوّن رئيس للمركبات العضوية عامة، ومصدره الطبيعي بشكل عام CO_2 الذي ينتشر في الغلاف الجوي، وتتم دورته في الطبيعة وفق مرحلتين، تتمثل المرحلة الأولى في استعماله في عملية التمثيل الضوئي من قبل النباتات الخضراء، والأشنات والجراثيم الخضراء، والكبريتية الحمراء. وتتمثل المرحلة الثانية في نشاط الأحياء غيرية التغذية، التي تُفكّك المواد العضوية، فتنتقل ذرات الكربون من كائن لآخر. تستخدم الأحياء غيرية التغذية المركبات العضوية للحصول على الطاقة اللازمة لحياتها، ويتحرر CO_2 أثناء عملية التنفس في الوسط المحيط ويصبح في متناول الأحياء الأخرى مباشرة ليعود إلى دورة الكربون، ويبقى القسم الأكبر منه في متناول المتعضيات حتى موتها. تستمر المواد العضوية في الطبيعية كالتربة والمياه ثم تتحلل بفعل الأحياء من جراثيم وفطور وينتشر ثاني أكسيد الكربون مرة ثانية ليعود لدورة الكربون.

2- دورة الآزوت Cycle of Nitrogen:

يعد الآزوت عنصراً مهماً جدا وضروري لبناء البروتين والحمض النووي والمركبات الأخرى للأحياء جميعاً. ويشكل الآزوت الحر حوالي 80% من الهواء. وعلى الرغم من أن نسبته مرتفعة في الهواء إلا أن الأحياء من حقيقيات النوى لا تستطيع استخدامه بشكل حر ما لم يتحد مع الأكسجين أو الهيدروجين على شكل شوارد نترات NO_3 وأمونيوم NH_4 لكي يصبح صالحاً للاستخدام من قبل بقية الأحياء وبذلك تعدّ العمليات الكيميائية والفيزيائية التي تقوم بها الأحياء الدقيقة في التربة والماء والهواء عوامل كبيرة الأهمية في هذا التحويل.

2-1- تثبيت الآزوت الجوي:

يوجد القسم الأكبر من الآزوت في التربة على صورة جزيئات عضوية كالبروتينات وبعد موت المتعضيات تتفكك أجسامها لتشكل حموضاً أمينية، وتتحر الزمر الأمينية من هذه الحموض بعملية تسمى النشدرة **Ammonification** على شكل أمونيا NH_3 وذلك بتأثير الجراثيم الهوائية واللاهوائية والفطور التي تقوم بإفراز أنزيمات تفكك البروتين على الشكل التالي:

متعضيات ميتة (بروتينات) ⟵ أحماض أمينية

أحماض أمينية ⟵ NH_3 (أمونيا)

وعلى اعتبار أن الأمونيا غاز فإنه يتعرض للضياع من التربة الجافة، لكنه ينحل في الترب الرطبة ويشكل أيونات الأمونيوم كما في المعادلة الآتية:

$$NH_3 + H_2O \longrightarrow NH_4OH \longrightarrow NH_4 + OH^-$$

تُستخدم أيونات الأمونيوم من قبل الجراثيم والنبات لتركيب الحموض الأمينية، ثم تأتي المرحلة الثانية في دورة الآزوت وهي عملية النترجة **Nitrification** وفيها يتم أكسدة أيونات الأمونيوم إلى نترات تحت تأثير جراثيم التربة *Nitrosomonas* وجراثيم *Nitrobacter* وذلك على مرحلتين:

المرحلة الأولى: تتأكسد الأمونيا إلى نتريت بتأثير جراثيم *Nitrosomonas* وفق المعادلة:

$$NH_4 \longrightarrow NO_2$$

المرحلة الثانية: يتأكسد النتريت إلى نترات بتأثير جراثيم *Nitrobacter* وفق الآتي:

$$NO_2 \longrightarrow NO_3$$

وتعتبر النترات الشكل الأكثر شيوعاً من أشكال الآزوت التي تستخدمها النباتات في تركيب بروتيناتها. تسهم عملية تثبيت الآزوت الجوي في إغناء التربة بالآزوت، مما يؤدي إلى زيادة خصوبة التربة، ويقوم بهذه العملية نوعان من الأحياء الدقيقة:

أ- الأحياء الدقيقة اللاتعايشية (لا تكافلية) Non Symbiotic Microorganisms: وهي كائنات تعيش حرة في التربة وتقوم بتثبيت الآزوت.

ب- الأحياء الدقيقة التعايشية (التكافلية) Symbiotic Organisms: وتعيش هذه الأحياء في جذور النباتات البقولية وتقوم بتثبيت الآزوت.

2-2- عكس التأزت والعوامل المؤثرة فيها:

يتم ضياع آزوت التربة بعملية تدعى بالتحلل النتراتي أو عكس التأزت تتفكك فيها النترات إلى آزوت حر وفق المعادلة الآتية:

$$NO3 \longrightarrow NO2 \longrightarrow N2O \longrightarrow N$$

يسهم في هذه العملية أنواع من جراثيم الجنس *Pseudomonas* وعدد من الأجناس الكبريتية مثل *Paracoccus* وجراثيم *Thiobacillus* وغيرها، وهي جراثيم هوائية ولكنها في الظروف اللاهوائية تستخدم النترات بدلاً عن الأكسجين كمستقبل نهائي للإلكترون. تنشط مثل هذه الجراثيم في التربة الغدقة حيث ينعدم فيها الأكسجين. تُعدُّ عملية عكس التأزت عملية ضارة بالتربة لأنها تفقدها قسماً من الآزوت اللازم لنمو النبات، وتتم هذه العملية عند توفر عدة عوامل وهي:

أ) توفر ظروف لا هوائية.

ب) توفر المواد العضوية القابلة للأكسدة.

ج) سيادة درجات حرارة في التربة تتراوح ما بين 25 – 65 ْس.

د) في الوسط المعتدل أو المائل إلى القلوية.

وتتمثل العوامل البيئية الأساسية التي تؤثر في الأحياء الدقيقة التي تقوم بعملية عكس التأزت وإرجاع النترات إلى نتريت ثم إلى آزوت حر أو إلى نشادر في الطبيعة بمجوعة من العوامل منها:

1- المادة العضوية:

يرتبط فقد الآزوت من التربة طرداً مع محتواها من المادة العضوية، حيث يزداد فقد آزوت التربة مع غناها بالمادة العضوية، وينخفض فقده في التربة الفقيرة بالكربون.

2- الأكسجين:

يُعدّ الأكسجين من العوامل البيئية المحددة لنمو الجراثيم التي تسبب انطلاق الآزوت، وتؤثر التهوية في جراثيم هذا النشاط وفقد الآزوت بطريقتين:

أ) يزداد فقد الآزوت عند وجود كمية قليلة من الأكسجين لا تكفي لسد احتياجات الجراثيم.

ب) إنتاج النترات والنتريت بوجود الأكسجين ضروري لحدوث عملية فقد الآزوت.

3- الرطوبة:

يرتبط فقد الآزوت في التربة ارتباطاً واضحاً بمستوى الرطوبة، إذ تزداد عملية انطلاق الآزوت من النترات المضافة مع ارتفاع نسبة الرطوبة. ويحدث أدنى فقد عند معدل رطوبة نسبية للتربة بحوالي 60%، ويزداد مع ارتفاع نسبتها عن هذا المعدل.

4- درجة الحموضة pH:

لا تفضل غالبية الجراثيم المسببة لإطلاق الآزوت درجات حموضة منخفضة في التربة، وتحتوي الأراضي الحامضية على أعداد قليلة من هذه الجراثيم، لذلك يكون فقد الآزوت في مثل هذه الترب قليل الأهمية.

5-درجة الحرارة:

يتأثر فقد الآزوت من التربة بدرجة حرارتها، إذ تبدأ ببطء عند الدرجة 2 ْس، ويزداد مع ارتفاعها ليصل أقصى معدل لها عند الدرجة 25 ْس، ويستمر فقده حتى الدرجة ما بين 60 – 65 ْس، وتتوقف عند حدود ما بين 70 – 75 ْس.

- مفاهيم عامة في تثبيت الآزوت الجوي:

1) تشترك الأحياء الدقيقة المثبتة للآزوت بقدرتها على استخدام الآزوت الجوي بسبب احتوائها على أنزيم النتروجيناز وتحويله إلى مركبات آزوتية تستخدمها في بناء خلاياها، وهو ما يعرف بتثبيت الآزوت الجوي، ولا تستطيع النباتات استخدامه لعدم احتوائها على هذا الأنزيم اللازم لهذه العملية.

2) يثبط الهيدروجين (H_2) عملية تثبيت الآزوت الجوي عند العديد من الأحياء الدقيقة المثبتة له لا تعايشياً، بسبب التنافس بين ذرات H_2 وN_2. إذ تقوم هذه الأحياء بتمثيل غاز الهيدروجين كما تقوم بتمثيل غاز الآزوت، مستخدمة أنزيم الهيدروجيناز لتمثيل الهيدروجين، وأنزيم النتروجيناز لتمثيل الآزوت.

3) تثبط إضافة الأمونيوم إلى التربة عملية تثبيت الآزوت الجوي وذلك لأن الجراثيم والطحالب تفضل استخدام الأمونيوم على الآزوت الغازي.
4) تمنع أملاح الأمونيوم تشكل أنزيم النتروجيناز عند الأحياء الدقيقة، فلا تتمكن هذه الأحياء من استخدام الآزوت الجوي. ومع ذلك تستطيع الأحياء الدقيقة أثناء نموها استخدام مركبات الآزوت المرتبطة، وتعمل في النهاية على خفض تراكيزها أو اختفائها نهائياً حيث تبدأ هذه الأحياء بتكوين أنزيم النتروجيناز والبدء باستخدام الآزوت الجوي.
5) يثبط الأكسجين أنزيم النتروجيناز عند الجراثيم الهوائية واللاهوائية والطحالب، لكنها تستطيع تثبيت الآزوت الجوي في الترب والأوساط المغذية الحاوية على الأكسجين، مما يؤكد وجود طرائق تمكنها من حماية أنزيم النتروجيناز داخلها من تأثير الأكسجين.

1- التثبيت اللاتعايشي (اللاتكافلي) Non Symbiotic Fixation

تقوم مجموعات عديدة ومتنوعة من الأحياء الدقيقة ذاتية وغيرية التغذية بتثبيت الآزوت الجوي بطريقة لا تعايشية، وبمعدل يتراوح ما بين 25–70 كغ/هكتار سنوياً، تبعاً لظروف وشروط التربة.
من أهم مجموعات الأحياء التي تقوم بعملية التثبيت اللاتعايشي للآزوت الجوي نذكر:

a) مجموعة الجراثيم الهوائية الإجبارية مثل: *Azotobacter* و *Spirillium*. وتُعدّ أنواع الجنس *Azotobacter* من أكثر الأحياء الدقيقة أهمية في هذه العملية.
b) مجموعة الجراثيم اللاهوائية الاختيارية مثل: *Enterobacter* – E. coli.
c) مجموعة الجراثيم اللاهوائية الإجبارية مثل: *Clostridium*.
d) مجموعة الجراثيم التي تقوم بعملية التمثيل الضوئي مثل: الجراثيم الحمراء اللاكبريتية *Rhodomicrobium*، والحمراء الكبريتية *Chromatium* والكبريتية الخضراء *Chlorobium*.
e) مجموعة الطحالب الخضراء المزرقة مثل: Nostoc.

2- التثبيت التعايشي (التكافلي) Sympiotic Fixation

تحدث عملية تعايش Symbiosis بين أحد أنواع الأحياء الدقيقة وجذور بعض أنواع النباتات، يتم بموجبه الاستفادة من الآزوت الجوي. ويمكن أن يُعرَّف التعايش Symbiosis على أنه نوع من الشراكة المستمرة أو المؤقتة بين نوعين من الكائنات الحية غالباً ما يكون أحدهما ملائماً وضرورياً للنوع الآخر أو لكليهما معاً. ويعتمد التعايش في التربة على الاستخدام المتبادل لمنتجات الاستقلاب، حيث يستخدم أحد الشريكين نواتج استقلاب الشريك الآخر.

من الأمثلة المهمة التي تجسِّد هذا النوع من التعايش العلاقة التعايشية بين النباتات البقولية كالفول أو البرسيم، أو الفاصولياء، أو فول الصويا، وأنواع جراثيم كلٍ من الجنسين *Rhizobium*

و *Nitrosomonas* التي تقوم بأكسدة الأمونيوم إلى نتريت، إلا أن تركيز النتريت العالي في التربة يُعدُّ ساماً للأجناس الأخرى، لذلك تتم أكسدته إلى صيغة غير سامة من قبل أفراد الجنس *Nitrobacter* هي النترات.

تُعد جراثيم الجنس *Rhizobium* عبارة عن عصيات متحركة سالبة لغرام، هوائية غير متبوغة يتراوح عرضها ما بين 0.5 – 0.9 ميكرون وطولها 1.2 – 3 ميكرون. وهي جراثيم لا تستطيع تثبيت الآزوت الجوي بوجودها حرة ومنفردة في التربة، لذلك تقوم بغزو جذور النباتات البقولية ومن ثم تشكيل العقد الآزوتية الجذرية.

تؤكد الدراسات وجود نوع من التخصص بين جراثيم *Rhizobium* والنبات البقولي العائل، فلكل نبات بقولي أو مجموعة نباتات بقولية نوع أو سلالة معينة من أفراد هذا الجنس تقوم بتكوين العقد الجذرية على جذورها وتثبيت الآزوت الجوي، ولا تستطيع أنواع أو سلالات أخرى القيام بهذا الدور عليها. وبذلك تمنح هذه الجراثيم النبات الذي تتعايش معه الآزوت الجوي المثبّت وتأخذ منها بالمقابل بعض المواد الغذائية اللازمة لنموها وتكاثرها. تتكون العقد على الجذور خلال مدة لا تقل عن أسبوعين من بدء الإصابة، وتستمر في كل عقدة مدة تصل إلى 50 يوماً ثم تنفجر تلك العقد لتخرج منها الجراثيم لتعيش حرة في التربة وتقوم بغزو شعيرات جذرية أخرى سليمة.

خامساً: المواد المغذية للأحياء الدقيقة:

يشكل الماء الجزء الاكبر من وزن خلية الكائن الدقيق، بمعدل تتراوح كميته ما بين 70 - 80%، وتتكون المادة الجافة للكائنات من مجموعة من العناصر تتمثل غالبيتها في: 50% كربون، 20% أكسجين، 15% آزوت، 8% هيدروجين، 3% كبريت، 1% فوسفور، 3% عناصر أخرى. كما توجد بعض العناصر بكميات قليلة كالبوتاسيوم والصوديوم والكالسيوم والمغنزيوم والحديد والكلور. ويكون بعضها الآخر بكميات بسيطة لا تتعدى الآثار وهي ما تسمى بالعناصر النادرة أو الصغرى (الزنك والنحاس والكوباليت ... وغيرها). ويظهر الجدول الآتي دور العناصر الرئيسة وأهميتها في تغذية الأحياء الدقيقة.

جدول 1: الوظيفة البيولوجية للعناصر الرئيسية في تغذية الأحياء الدقيقة.

العنصر	الوظيفة الفيزيولوجية
الهيدروجين	أ- أحد مكونات الماء الخلوي والمواد العضوية
	ب- H2 واهب للإلكترونات في التمثيل الغذائي لبعض مجموعات البكتريا
الاوكسجين	أ- أحد مكونات الماء الخلوي والمواد الخلوية
	ب-O2 مستقبل للالكترونات في التنفس الهوائي
الكربون	أ- أحد مكونات المادة الخلوية
	ب- واهب للالكترونات في التخمر والاكسدة "استقلابات الطاقة"
	ج- مستقبل للالكترونات كما في حالةتخمر المثيان
النتروجين	أ- أحد مكونات البروتين الاحماض النووية والمساعدات الانزيمية
	ب- واهب للالكترونات كما في حالة التأزت
	ج- مستقبل للالكترونات كما هو الحال في التنفس النتراتي
الكبريت	أ- أحد مكونات البروتين و بعض المساعدات الانزيمية
	ب- واهب للالكترونات في استقلاب بكتريا الكبريت
	ج- مستقبل للالكترونات في التنفس السلفاتي
الفوسفور	أ- أحد مكونات الحموض النووية، الليبيدات الفوسفورية
	ب- عامل رئيسي في ربط الطاقة للتفاعلات كما في ATP
البوتاسيوم	مساعد أنزيمي هام في بعض التفاعلات كاتيون رئيسي
المغنزيوم	أ- مساعد أنزيمي هام كاتيون رئيسي
	ب- أحد مكونات الكلوروفيل
المنغنيز	مساعد أنزيمي وخاصة في الأكسدة الاستقلابية
الكالسيوم	مساعد أنزيمي، أحد مكونات الأبواغ البكتيرية
الحديد	أ- أحد مكونات السيتوكرومات
	ب- مساعد أنزيمي
	ج- واهب للالكترونات في استقلاب بكتريا الحديد
الكوبالت، النحاس	مكونات لا عضوية لبعض الانزيمات (التوتياء في حالة)
التوتياء ، المولبدنيوم	Alcohol dehydrogenase، المولبدنيوم في استقلاب النتروجين

الفصل السابع

المعالجة الحيوية للتلوث البيئي

Bioremediation of Environmental Pollution

التلوث Pollution: تغير مباشر أو غير مباشر في أي جزء من أجزاء البيئة الهوائية والمائية والترابية، وذلك بسبب تصريف أو انبعاث أو ترسب فضلات أو مواد بكميات تؤثر سلباً فيها وتسبب خطورة على الصحة وتهدد سلامة الأحياء النباتية والحيوانية بشتى أشكالها وصنوفها.

الملوثات Pollutants: وهي مواد تسبب التلوث في النظام البيئي وتنتج عن مصادر مختلفة يسبب طرحها في البيئة بأية طريقة تدهور نوعيتها وتعطل خدماتها.

أنواع ومصادر التلوث Pollution Types and Sources:

تتنوع ملوثات البيئة تبعاً لمصدر نشوئها، فهي إما طبيعية أو صناعية، أو تبعاً لتركيبها الكيميائي فهي فيزيائية أو كيميائية أو جرثومية، أو بحسب شكلها فهي غازية أو سائلة أو صلبة أو إشعاعية. تسبب آثاراً ضارة لمختلف مفاصل الحياة تبعاً لنوع الملوثات المطروحة.

يمكن تقسيم الملوثات وفقاً للمكون البيئي الملوث إلى:

I- ملوثات التربة Soil Pollutants:

يقصد بتلوث التربة تدهور سطح الأرض جراء مسببات التلوث المختلفة، ويمكن إجمال أهم مسببات التلوث لبيئة التربة بالنقاط التالية:

1-تؤدي الممارسات الخاطئة في الزراعة، والاستخدام المكثف وغير الصحيح للمبيدات الزراعية والأسمدة المتعددة، والري الخاطئ إلى تعرية التربة، وإزالة مادتها العضوية، إضافة إلى تجريد الأرض من مغذياتها وزيادة ملوثاتها.

2-تسبب عمليات التعدين والتنقيب عن المعادن والفحم والنفط تراكم مخلفات تمتد على مساحات واسعة فوق الأرض سنوياً.

3-يسبب التوسع الحضري مزيداً من العمليات المؤدية لتعرية التربة، وزيادة حمولة الأنهار، من رواسب ومخلفات المدن، من مواد صلبة أو سائلة عبر الصرف الصحي وغيرها.

4-تعتبر عمليات الطمر الصحي والمكبات، من أكثر طرائق التخلص من النفايات الصلبة البلدية، وتجذب إليها أعداداً كبيرة من القوارض والحشرات المختلفة، فضلاً عن كونها مبعثاً للروائح الكريهة، وتسبب ترشيح المواد الكيميائية السامة إلى المياه الجوفية.

5-يعتبر تدوير المخلفات والاستفادة منها إحدى طرائق التخلص منها، إلا أن خلط النفايات تجعل عملية تدويرها صعبة ومكلفة للغاية، مع احتوائها على الورق، والزجاج والبلاستيك ومواد عضوية وبقايا طعام وغيرها، مما يصعِّبُ تحللها.

6-تسبب عمليات الحرق والتكرير البدائي للنفط مزيداً من تلوث التربة بالنفايات السامة فضلاً عن الغازات كالدوكسين والكبريت، والأبخرة والرماد الناتج عنها، إضافة للمعادن الثقيلة كالرصاص والزرنيخ وغيرها.

7-يعد التلوث الإشعاعي شكلاً من أشكال الإشعاع الناتج عن الفعاليات البشرية، والإشعاعات المنبعثة من الأجهزة المنزلية، والتجارب المخبرية، ومفاعلات ومحطات توليد الطاقة، واختبارات الأسلحة النووية، وما قد يرافقها من تسرب إشعاعي، مما يزيد من تلوث التربة والبيئة عموماً.

II- تلوث الماء Water Pollutions:

يقصد بتلوث المياه طرح مواد كيميائية وفيزيائية وبيولوجية في المياه العذبة، من آبار وأنهار وبحيرات وغيرها، أو في مياه البحار، والمحيطات. مما يسبب تردي نوعية المياه ويؤثر في الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش فيها.

تتراوح ملوثات المياه ما بين ملوثات بسيطة كالمواد الصلبة الذائبة أو المعلقة إلى ملوثات معقدة سامة تتصف بخطورتها، وطول مدة بقائها في الوسط المائي، كالمبيدات والمعادن الثقيلة والمركبات الكيميائية غير القابلة للتحلل، أو تلك المواد القابلة للتراكم في أجسام الكائنات الحية.

يمكن تقسيم ملوثات المياه وفق التالي:

أولاً: اعتماداً على طبيعتها:

1-الملوثات التقليدية Conventional Pollutants:

تشمل هذه الملوثات كلاً من:

1-1-صرف المدينة: تضم المخلفات البشرية التي تنتج عن النمو الحضري والزيادة السكانية السريعة، إضافة إلى المخلفات الفيزيائية والكيميائية والمخلفات الطبية والأحيائية الناتجة عن المشافي وغيرها.

1-2-مخلفات الريف: تشمل صرف المزارع بما فيها مزارع تربية الحيوانات المختلفة والحقول المسمدة بكثافة عالية، والمبيدات الزراعية المختلفة وغسيل التربة وغيرها.

2-الموثات غير التقليدية Nonconventional Pollutants:

تشمل كلاً من:

2-1-المخلفات الصناعية: تعتبر المنشآت الصناعية بمختلف أشكالها، المصدر الرئيس للمخلفات السامة، بما فيها المياه الثقيلة. ومع عدم ترافقها بزيادة محطات المعالجة فإنها تضيف كميات كبيرة من الأملاح، والمواد الصلبة العالقة والذائبة كالبروتينات والكربوهيدرات والزيوت والشحوم والمعادن الثقيلة، كالزرنيخ والزئبق والرصاص والكروم والحديد والمنغنيز فضلاً عن الكربون العضوي وطرحها إلى المياه.

2-2-المخلفات الإشعاعية: تشمل مخلفات المنشآت الصحية، والعلمية وما تنتجه من مواد سامة وغير سامة بشقيها الذائب والمعلق. فضلاً عن المركبات الكربونية العضوية القابلة وغير القابلة للتحلل، ومخلفات المفاعلات النووية التي تعتبر خطرة بصورة خاصة للبيئة، إلى جانب الترسب والانسكاب النفطي بكميات مختلفة.

2-3-مخلفات تعدين الفحم: تطرح عمليات تعدين الفحم كميات كبيرة من المخلفات الحمضية، والعديد من الغازات كالأكسجين، وكبريت الهيدروجين H_2S وCO_2 والنتروجين إلى المياه.

2-4-مخلفات كيميائية: تحتوي مواد معدنية غير قابلة للذوبان كالفوسفات، والكلوريدات والحموض وكربونات محايدة، والكالسيوم، والمغنيزيوم، والصوديوم، والنترات، والفوسفات. إضافة إلى مخلفات فيزيائية وبيولوجية أخرى.

ثانياً: <u>اعتماداً على مصدرها:</u>

1-صرف صحي بلدي: يتضمن كميات كبيرة من مخلفات دورات المياه، ونباتات ومخلفات الحيوانات واليوريا، وتأتي بالدرجة الأولى من المنازل والمنافع العامة، والمنشآت الصناعية التي تطرح مسببات مرضية خطيرة.

2-صرف صناعي: تتكون خلال كافة أشكال العمليات الصناعية.

3-الجريان المطري: يضم جريان كل من الهطولات المطرية، ومياه الغسيل، ويحتوي العديد من الملوثات كالغبار، والأحياء الدقيقة، والمواد الغازية، والجريان السطحي للشوارع والأسطح المعبدة والنفط والجزيئات الصغيرة الأخرى.

ثالثاً: <u>اعتماداً على معدل ضررها:</u>

تقسم الملوثات تبعاً للضرر الذي يمكن أن تحدثه إلى:

1-ملوثات ضارة بشكل مباشر.

2-ملوثات ضارة بشكل غير مباشر تؤدي إلى خفض الأكسجين في الماء إلى أقل من الحد الأدنى المطلوب من قبل الأحياء الدقيقة.

رابعاً: <u>اعتماداً على ثبات التلوث:</u>

1-ملوثات قابلة للتحلل: وتضم المواد العضوية الخاضعة للتحولات الكيميائية لتعطي مركبات بسيطة.

2-ملوثات غير قابلة للتحلل: وتضم مواد لا تنتج أي تحولات كيميائية وهي غير قابلة للتفكك من قبل الأحياء الدقيقة.

3-ملوثات ثابتة: وتضم مواد تخضع بدرجة قليلة جداً للتحلل الحيوي وتبقى في البيئة بأشكال ثابتة لفترة طويلة.

III- تلوث الهواء Air Pollution:

يقصد بتلوث الهواء، تراكم مواد ضارة في الغلاف الجوي، بتراكيز خطرة على الصحة العامة للأحياء، وباقي مكونات البيئة الأخرى. وتعد محطات توليد الطاقة، ومعامل تكرير النفط، وحرق النفايات الصلبة، والعمليات الصناعية المختلفة، ووسائط النقل من أهم مصادر تلوث الهواء الجوي.

ومن أهم ملوثات الهواء نذكر: أول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد الكربون (CO_2) وأكاسيد الآزوت (NO_X) وثاني أكسيد الكبريت (SO_2) والهيدروكربونات (HCS) وذرات الغبار وغيرها. إلى جانب إطلاق العديد من الغازات من عوادم السيارات، المتمثلة بأول أكسيد الكربون والذي يعد من أكثر الغازات سمية. وتكوين الضباب الدخاني الذي يؤثر وبشكل خطير، لسعة انتشاره وتعدد مصادره في أجواء المدن، والضباب الجليدي، وما ينتج عنه من تجمع للدخان فوق بلورات الجليد عند انخفاض درجات الحرارة الشديد. كما يشكل وجود ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) في الجو حمض الكبريت، الذي يصبح جزءاً من الجزيئات العالقة في الجو، ويسبب هطول الأمطار الحمضية.

دور الأحياء الدقيقة في المعالجة الحيوية لتلوث البيئة:

المعالجة الحيوية Bioremediation: يمكن تعريف المعالجة الحيوية على أنها مجموعة من العمليات مصممة لتحسين التحلل الميكروبي الطبيعي أو الصناعي للملوثات العضوية إلى حالة أقل أو غير سامة.

تنفذ الميكروبات عملية تحلل الملوثات الضارة إلى حالة أقل أو عديمة السمية، باستخدام المركبات العضوية الذائبة أو العالقة كمواد غذائية أساسية، وتتحول إلى غازات متطايرة وأنسجة أو خلايا حيوية يتم إزالتها بترسيبها، وعند انخفاض المادة العضوية فإن هذه الأحياء وخلاياها تتحلل إلى غازات ومتطلبات طاقة للمحافظة على بقاء النوع.

أولاً: المعالجة الحيوية لتلوث التربة Bioremediation of Soil Pollution:

يعتبر الهدف الرئيس من المعالجة الحيوية للتربة هو تحييد التلوث العضوي للوصول إلى تراكيز منخفضة جداً أو ضمن المسموح بها وفق المقاييس الدولية الخاصة بكل بلد.

تتم المعالجة الحيوية للتربة الملوثة باستخدام الأحياء الدقيقة الأصيلة التي تستوطن البيئة والمدخلة من المناطق أو الحقول المجاورة على حدٍ سواء. ويعتمد اختيار أحياء متخصصة في التحلل على عمليات تكيفها وتكوينها الجيني. وعلى اعتبار أن ملوثات التربة تتكون من مركبات عديدة، فإن تنظيفها الكامل من هذه الملوثات، يتطلب عناية خاصة في اختيار مجموعة الأحياء المستخدمة في المعالجة. ويرتبط التغلب على مشكلة إدخال الأحياء من مزرعة أو مجموعة مزارع للتربة بالتحسين المستمر لتقنيات الإلقاح، للسماح لهذه الأحياء بالتأقلم مع ظروف البيئة.

يتم تنفيذ عملية الإلقاح الاصطناعي للتربة بعد تنمية الأحياء على بيئة مناسبة ضمن ظروف متحكم بها من تهوية، وحرارة، وباستخدام محقن ذو ضغط عالٍ. إذ أنه للحصول على تحلل فعال للملوثات العضوية، لابد من وصول البكتيرية المحللة إلى طبقات التربة الملوثة. ومن المعروف أن انتقال الأحياء الدقيقة في التربة يعتمد على كثافة الأحياء المضافة، وطبيعة التربة وطريقة حقن هذه الأحياء، ومعدل انتشارها ضمن التربة، ووضعها على اتصال مع الملوثات المراد تحللها. فلا يعتبر الحقن السطحي لها فعالاً بسبب حركتها البطيئة في التربة.

1-تنشيط المعالجة الحيوية Bioremediation Stimulation:

تعتمد تنشيط المعالجة الحيوية، وبدء تدهور الملوثات، على تأمين الظروف البيئية الملائمة للنمو الميكروبي. ويتطلب نمو هذه الأحياء واستقلاب الملوثات، تبعاً لمراحل تطورها على توفر العناصر الغذائية الكبرى، كالفوسفور والآزوت، وبعض العناصر النادرة. ويتم التحكم بتراكيز النيتروجين والفوسفور عبر إضافة الأسمدة المعدنية. ومن الأسمدة المفضلة لهذا الغرض سلفات الأمونيوم أو فوسفات الصوديوم. كما وتستخدم سلفات المغنيزيوم، أو كربونات الصوديوم أو كلوريد الكالسيوم، أو سلفات الحديد للغرض ذاته. مع ملاحظة أن زيادة مركبات الآزوت يبطء عملية التحلل البيولوجي. ويتم عادة تحديد الكميات المثالية من المغذيات اللازمة لتنشيط المعالجة الحيوية في المختبرات. وتعوض الأحياء المتطورة العنصر المفقود من مصادره ذات المنشأ الحيوي، وعبر العناية الدقيقة بنموها. ويتم قياس حاجتها للمغذيات من خلال قياس معدل خفض التلوث، وكمية الأكسجين المستخدم، وغاز CO_2 المحرر.

2- المعالجة الحيوية في الترب:

تقسم المعالجة الحيوية للتربة تبعاً لمستوى الأكسدة البيئية، وموقع المعالجة. واعتماداً على مستوى الأكسدة، يمكن تقسيم المعالجة الحيوية لملوثات التربة إلى: معالجة هوائية، وهوائية لا هوائية وأخيراً لا هوائية بحتة. تستخدم الأحياء الهوائية الأكسجين كعنصر مستقبل، وتستخدم

الأحياء الاختيارية الأكسجين عند وجوده، أو مستقبلات إلكترون أخرى عند غيابه. في حين تستخدم الأحياء اللاهوائية إلكترونات أخرى كمستقبل مثل النترات، الكبريت، الحديد، المنغنيز، أو مركبات عضوية معينة.

تعتبر المعالجة الحيوية للتربة هوائية، تحصل فيها الأحياء الدقيقة على الأكسجين من الهواء الجوي، الذي يدخل التربة بشكل طبيعي أو صناعي. ويعتمد الدخول الإيجابي للأكسجين على التغلغل الطبيعي للهواء الجوي بين حبيبات التربة، ويمكن تقويته عبر الخلط الميكانيكي لطبقات التربة السطحية بالمحراث القرصي (الهارو) أو القلاب (سكة). أو إدخال الهواء مباشرة بواسطة مسبر خاص أجوف ومثقب أو مراوح تضغطه في التربة (شكل 10).



نظام التهوية النشط بالحراب المثقبة



تهوية سلبية باستخدام نظام الحربة والحفر

الشكل (10): نظام التهوية في المعالجة الحيوية لملوثات التربة.

2-تنفيذ المعالجة الحيوية للتربة:

يمكن تنفيذ المعالجة الحيوية للتربة بطريقتين داخل الموقع الطبيعي (In Situ) وخارجه (Ex Situ) وذلك اعتماداً على مستوى تلوثها، إضافة إلى إمكانية إعادة زراعتها. ففي الطريقة الأولى يتم إزالة التلوث مباشرة في مكان حدوثه، ويتم الكشف عن تلوث التربة أو المياه في الطريقة الثانية قبل تنفيذ خطوات المعالجة. ولا توجد حاجة للكشف عن تلوث التربة في الطريقة الأولى لذلك فهي أقل تكلفة، وتنتج غباراً أقل، وتساعد في معالجة مساحة أو حجم كبير من التربة، وهي أكثر كفاءة في الترب النفوذة، وتطلق ملوثات أقل مقارنة مع الطريقة الثانية (خارج الموقع الطبيعي)، وقد يكون من الصعب إدارتها ومتابعتها بدقة. ويتم اللجوء للطريقة الثانية (خارج الموقع الطبيعي) عند وجود خطر انتقال تلوث سام إلى ماء التربة، وعندما يكون من الضروري إزالة السمية خلال فترة قصيرة من الزمن.

2-1-المعالجة الحيوية للتربة داخل الموقع الطبيعي In Situ, Soil Bioremediation

تعتمد المعالجة الحيوية للتربة في الموقع الطبيعي بشكل رئيس على التنشيط الحيوي لعملية تحلل التلوث العضوي، من خلال تدعيم التربة، أو الماء، بالعناصر حيوية المنشأ، وتعديل حموضة الوسط وتهويته، ويتم اللجوء إليها عندما يكون هناك حاجة لإزالة التلوث في مكان حدوثه مباشرة. وتنفذ هذه الطريقة من المعالجة وفق الطرائق التالية:

2-1-1-الطريقة الزراعية Agricultural Method:

تعتبر أكثر استخداماً لإزالة تلوث التربة، وهي فعالة غالباً عند التلوث بالمركبات النفطية ومنتجاتها الأخطر، كالبنزين، ووقود الديزل والكيروسين. حيث يتم خفضها إلى أدنى حدٍ لها عبر التحلل الحيوي. وتوجد عدة طرائق زراعية، تبعاً للاختلاف في انتشار التلوث. فعند انتشار التلوث ضمن طبقة رقيقة لا تزيد سماكتها عن 0.5 م، يتم تهوية التربة بالمحراث القرصي (الهارو)، وتنشيط أحياء التربة، بإضافة المغذيات الأساسية، وأكسدة التربة أو إعادة إزالة حموضتها عند الحاجة. تتم إضافة الأسمدة الآزوتية والفوسفاتية والبوتاسية عند الحاجة لتأمين النقص بالمغذيات. وتتم إزالة أو تعديل الحموضة عند الحاجة، بإضافة الكلس. كما أن زراعة النباتات العشبية، أو نباتات العائلة البقولية في الأرض الملوثة، تساعد في عملية المعالجة وتنظيف التربة.

2-1-2-الاستخلاص الحيوي Bioextraction:

تعتبر هذه الطريقة أكثر تعقيداً، وتستخدم عند الحاجة لإزالة التلوث من طبقات التربة العميقة وبشكل خاص عند تسرب المنتجات النفطية. ومن المهم في هذه الحالة، تأمين المغذيات الناقصة، وتقديم الأكسجين، وتلقيح التربة بالأحياء الدقيقة القادرة على تحليل الملوثات بكفاءة عالية، عند الضرورة. ويمكن اللجوء إلى عمليات صرف التربة، وغسيلها بالمحاليل الحاوية على المغذيات، أو مزارع البكتيرية النشطة. ولتحقيق ذلك لابد من توفر المعدات التقنية التالية: المضخات الماصة والنقل السلبي، فتحات الصرف، ألواح منع التسرب وانتشار التلوث في التربة. ويعتبر تشكيل حجرة تسمح بالتحكم بتدفق الوسط المعالج من هواء، وبخار ماء ومحاليل من العوامل الهامة في التنظيف الفعال للتربة. نفذ عملية التحلل الطبيعي بطريقة الاستخلاص الحيوي مثالياً عبر غسيل التربة، والارتشاح القسري للماء الأرضي (المعالجة الحيوية بالماء المنشط في الموقع الطبيعي)، وتهوية التربة (تهوية حيوية). وتضاف الأحياء الدقيقة والمغذيات للمنتجات النفطية، أثناء دعم هواء للتربة بالأكسجين مع الماء المنشط للتحلل الحيوي، وبالتالي مساعدة التحلل الحيوي.

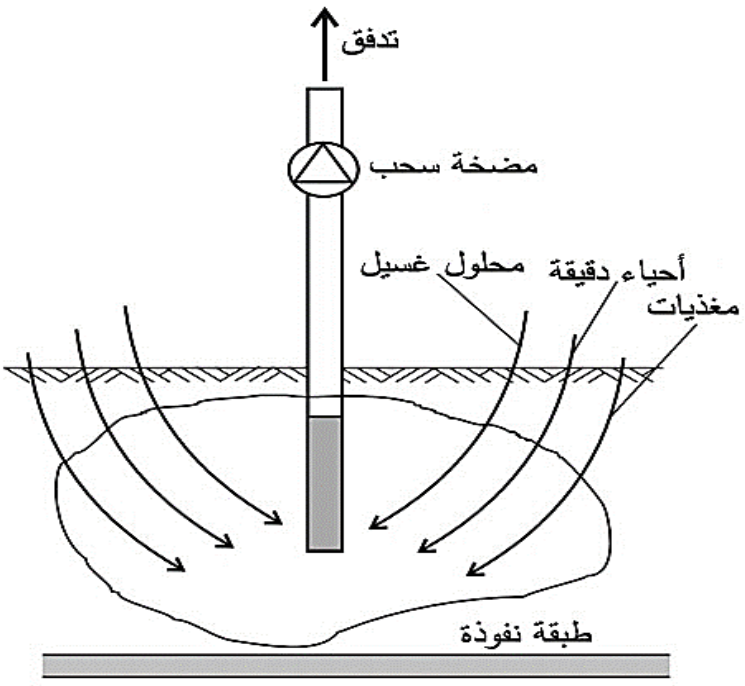
2-1-3-الماء المنشط للمعالجة الحيوية Water Stimulating Bioremediation:

يعد الهدف من الماء المنشط دفع التدفق العمودي ومن ثم الأفقي للماء برفقة الملوثات في بيئة كل من الماء والتربة (شكل 11). وتستخدم هذه الطريقة لمعالجة البيئة من المواد الصلبة غير الذائبة والمرتبطة بالمنتجات البترولية والمتجمعة على سطح ماء التربة. يتم خلال العملية سحب الماء الأرضي إلى السطح، ومن ثم يرشح ويؤكسد، ثم يعاد إلى مصدره بعد إضافة المغذيات. ويمكن أن يؤخذ الماء من بئر في أخفض نقطة ومن ثم يرسل لينشط حيوياً، ثم يعاد الماء إلى مصدره. وتعتبر هذه الطريقة توليفة بين طريقتي داخل الموطن الطبيعي وخارجه بحيث تكمِّلُ بعضها البعض وتسمح بإنجاح العملية. ويمكن تقوية الماء المنشط للمعالجة الحيوية عبر التفعيل السطحي، والتفعيل الحيوي السطحي.

ميزات التفعيل السطحي:

وجد أن التفعيل السطحي والتفعيل الحيوي السطحي، يؤمن فوائد عديدة أهمها:

1) يسرع من عملية تحلل الملوثات غير المحبة للماء وبخاصة الأجزاء الثقيلة للمنتجات النفطية.
2) تساعد في زيادة القابلية للذوبان وتكوين المستحلبات.
3) يساعد بتحرك أفضل للمنتجات النفطية في التربة.
4) يؤمن دعم أكبر بالأحياء الدقيقة في التربة.
5) يزيد من نفاذية التربة.



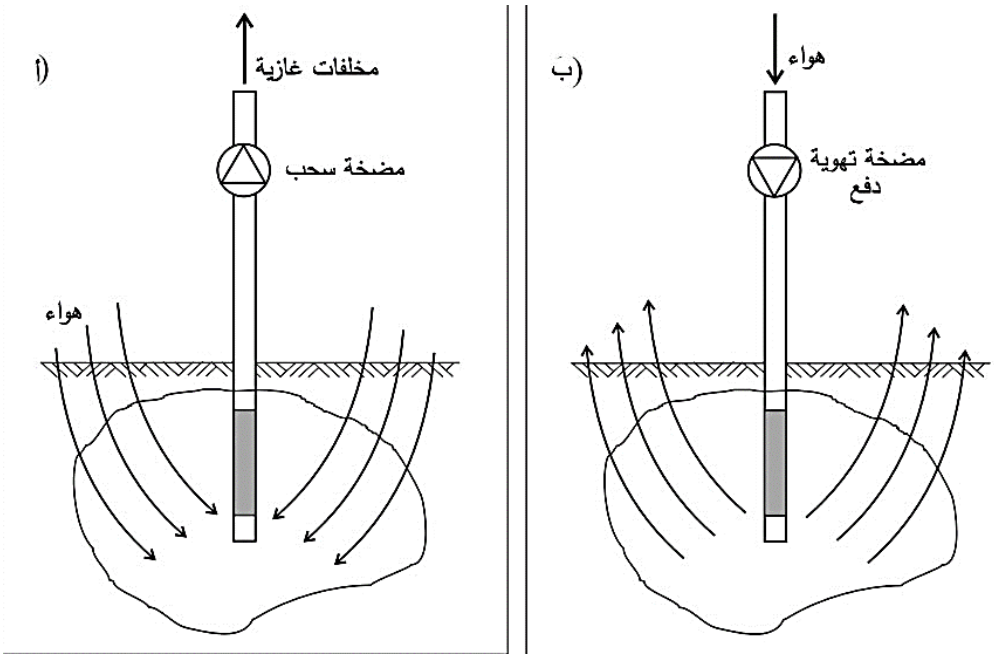
الشكل (11): مخطط تمثيلي للماء المنشط للمعالجة الحيوية للتربة.

2-1-4-التهوية الحيوية Bioventilation:

يمكن تشجيع المعالجة الحيوية الطبيعية للتربة، بتهويتها. والتهوية الحيوية عبارة عن عملية فيزيائية، تستخدم كطريقة مستقلة لإزالة التلوث من التربة الملوثة من خلال تزويدها بالهواء ورفع معدل الأكسدة فيها، وزيادة كتلة الكربوهيدرات المتكونة إلى أقصى حدٍ لها. كما في المنتجات التي تنشأ من البنزين أو المذيبات، على أنه يحدث في هذه العملية تحلل حيوي بنسبة ضئيلة جداً. تساعد التهوية في إزالة المنتجات البترولية المتطايرة من القسم المشبع والمهواة من التربة، وفي الوقت ذاته تزويد التربة بالهواء وترفع معدل الأكسدة. ويمكن أن تكون التهوية سلبية بتكوين ضغط سلبي يسحب الهواء الأرضي من خلال شبكة من الأنابيب المثقبة، أو فعالة (إيجابية) عبر ضغط أو حقن الهواء في التربة (شكل 12).

وتعتمد كفاءة التهوية الحيوية للتربة على مستوى الأكسجين في هواء التربة، ومستوى الملوثات الحيوية، وشروط الأكسدة والإرجاع، ووجود عوامل السطح الفعالة، ومعدل التشبع (الرطوبة) بالماء، ودرجة الحموضة (pH)، والحرارة.

ويعتبر الهواء المضغوط الطريقة الأكثر كفاءة في تزويد التربة الملوثة بالأكسجين. ويمكن استخدام غاز الأوزون (O3) كمصدر بديل للأكسجين. مع ملاحظة احتمال وجود خطر لاستخدام غاز الأوزن، نظراً لامتلاكه بعض الخصائص السامة.



الشكل (12): رسم تخطيطي للمعالجة الحيوية لتلوث التربة بطريقة التهوية الحيوية.

أ: سحب الهواء الأرضي. ب: حقن الهواء الأرضي.

2-2-طرائق خارج الموقع الطبيعي Ex Situ Methods:

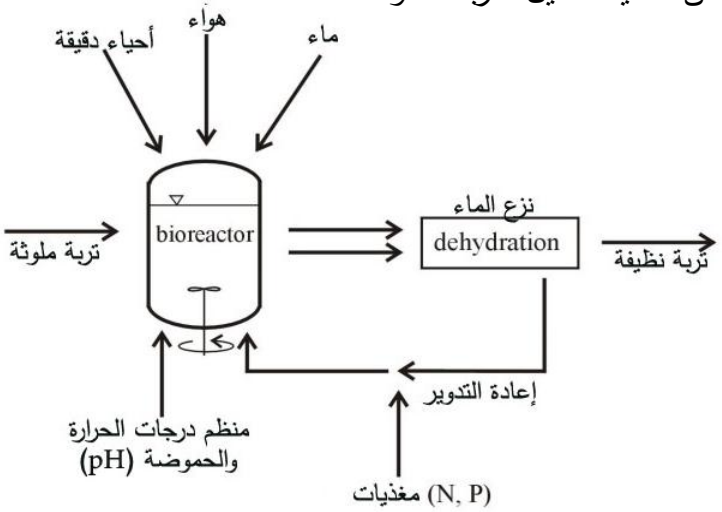
تنفذ طرائق المعالجة خارج الموقع الطبيعي عند انتقال الملوثات السامة في الماء الأرضي، أو عند الحاجة لإزالة التسمم بشكل كامل خلال فترة زمنية قصيرة. وتشمل كلاً من الطرائق التالية:

2-2-1- إعادة التنشيط الحيوي Bioreactor Methods:

تعتبر طريقة إعادة التنشيط الحيوي الطريقة الأكثر كفاءة في إزالة التلوث (شكل 13)، فهي تؤمن تحكماً جيداً بكافة مكوناتها، من تقديم الأكسجين اللازم، إلى إلقاح التربة بالأحياء الدقيقة. ونظراً لكلفتها العالية نوعاً ما، بسبب التقانات المستخدمة، وحاجتها إلى نقل الكتل الثقيلة، فلا تطبق دائماً، وهي تنفذ عموماً، مع كميات التربة القليلة. ومن التقانات التي تعتمد عليها هذه الطريقة معيدات التنشيط الحيوية، والأحواض الضحلة المستخدمة في إزالة التلوث بفضلات الصرف الدسمة أو الدهنية، ومعيدات التنشيط لمعالجة التربة الملوثة بالكتل نصف السائلة، والحمأة (رسابة مياه الصرف الصحي) والترسبات، وخلط المواد الصلبة بعد التهوية. يتم في كلتا حالتي التنشيط الحيوي التحكم في مستوى الأكسجين المنحل تماماً إلى جانب التحكم بدرجة الحموضة (pH)، وتركيز المغذيات المعدنية. وتعد هذه الطريقة مشابهة لمعالجة الملوثات المحلية باستخدام طريقة الحمأة المنشطة.

يمكن تقوية هذه الطريقة في المعالجة من خلال التنشيط السطحي أو المشتتات وذلك لإزالة الهيدروكربونات من جزيئات التربة، ورفع درجة بعثرة وقشع الملوثات الدهنية غير القابلة للذوبان بالماء، ويمكن استخدام عوامل التنشيط السطحي في هذه الطرائق صناعياً أو طبيعياً.

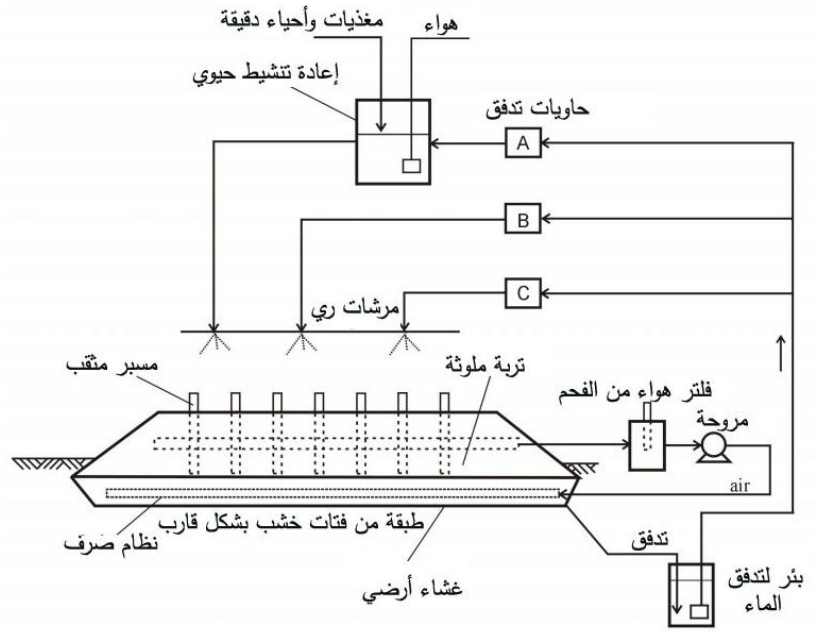
تعتبر طريقة إعادة التنشيط الحيوي ثابتة أو متنقلة مما يجعل من هذه الطريقة سهلة وأقل تكلفة. وتستخدم الطريقة المتنقلة لإزالة ملوثات ماء التربة بعد سحبه إلى خارج مكان وجوده أو لإزالة تلوث الماء المسحوب من عملية غسيل التربة الملوثة.



الشكل (13): رسم تخطيطي للمعالجة الحيوية لتلوث التربة بطريقة إعادة التنشيط الحيوي Bioreactor.

2-2-2-طريقة الكومات (الأكداس) الحيوية Biopile Methods:

تنفذ هذه الطريقة بنقل التربة إلى أماكن محضرة مسبقاً، وتكدس على شكل كومات ثم يوضع لكل كدس نظام صرف وتهوية، بإضافة مسابر مثقبة، ويتم إضافة المغذيات للأكداس وضخ الهواء ضمن الثقوب لداخل الأكداس، باستخدام مراوح ضخ تدفع الهواء والمغذيات ضمنها أسفل الكومات. ويتم عادة تغطية الأكداس، وتركيب مرشات لإضافة الماء والمغذيات. ويتم في النظام الحديث مؤخراً، تدوير الماء بنظام مغلق، حيث يسحب الماء، أو الماء الأرضي، وبعد ترشيحه وتمريره إلى معيدات التنشيط الحيوي وإضافة المغذيات والأحياء الدقيقة إليه يضخ مرة أخرى داخل الأكداس، أو الأحواض عبر المرشات المثبتة فوق الكومات (شكل 14 و15).



الشكل (14): رسم تخطيطي للمعالجة الحيوية للتربة بطريقة الكومات الحيوية.



الشكل (15): تحضير الكومات الحيوية مع نظام الصرف.

ثانياً: المعالجة الحيوية لتلوث مياه الصرف Bioremediation of Wastewater

تشكل المعالجة الحيوية لمياه الصرف التي تتضمن إزالة كافة أشكال التلوث من الماء، ومن ثم تجديد الماء وجعله صالحاً للاستخدامات العديدة، الوسيلة الأكثر أهمية لا سيما في المناطق التي تعاني من شح المياه. وسنبين فيما يلي أهم الطرائق المستعملة في المعالجة الحيوية لمياه الصرف بأشكاله العديدة.

1-الطرائق البيولوجية في معالجة مياه الصرف الصحي:

تلعب البكتيريا التي تكوّن تجمعات دبقة (مخاطية) دوراً حاسماً في المعالجة الحيوية لمخلفات الصرف. وتتضمن آلية المعالجة تنشيط العمليات الأنزيمية للأحياء الدقيقة الرميّة، التي تُحدث أكسدة جزئية للمواد العضوية، المصدر الرئيس للكربون في المخلفات الصحية. مما يسبب زيادة كتلة الأحياء الدقيقة النشطة، إذ تزدهر هذه الأحياء عندما تكون نسبة الكربون إلى الآزوت إلى الفوسفور 1:10:100 بالوزن. وتنفذ هذه المعالجة بطريقتين: تحت الظروف الطبيعية أو الصناعية باستخدام معدات مصممة بشكل خاص لهذه الغاية. وتتم بوجود أو بغياب الأكسجين، فهي عملية أكسدة ومعدنة للمركبات العضوية في المخلفات.

1-1-المعالجة الحيوية للمخلفات بالطرائق الطبيعية:

وتتضمن الطرائق الطبيعية لمعالجة مخلفات الصرف كلاً من:

1-1-1-التنقية في التربة Purification in Soil:

تتضمن هذه الطريقة ري مخلفات الصرف في تربة الحقول، وتسبب المواد ذات المنشأ الحيوي زيادة في الغلة بمعدل 20%، ويمكن أن تتلقى الحقول المستخدمة للتنقية معدل تدفق سنوي بحدود 600 مم. وبعد نشر المخلفات تتشرب في التربة، ويتم امتصاص الملوثات من قبل جزيئاتها. وينبغي قبل إدخال المخلفات في الحقول تصفيتها ميكانيكياً بالغرابيل أو بمصائد الرمل أو أحواض الترسيب الأولي، حيث يطهّر أو يعقّم. ويتم ري الحقول بمياه الصرف الملوثة خلال مرحلة النمو الخضري للنباتات فقط، على ان يتم تعديل كميتها المضافة في أوقات مختلفة، وفحص التربة المروية بها باستمرار لتحديد محتواها من المعادن. بعد فترة قصيرة، تشكل الأحياء الدقيقة في جزيئات التربة غشاءً مجهرياً حول المركبات العضوية الممتصة تعمل مع طبقة التربة السطحية كمرشح بيولوجي. وتتكون في هذه المنطقة المنتجات النهائية لعملية المعدنة، وتعمل كسماد للتربة. إلا أنه يؤخذ على هذه الطريقة، تصفية كمية قليلة من المخلفات، وإلا فإن الحقل سيصبح مثقلاً بشدة بالمخلفات. كما أنها تتم ضمن الظروف اللاهوائية وتترافق مع تشكل مواد سامة، وإطلاق روائح قد تسبب وقف نمو النباتات. ولأسباب صحية لابد قبل استخدام هذه المياه المعالجة في الري من تنظيف وإزالة أي بيض للديدان الطفيلية. ومن خلال هذه التصفية تصبح المخلفات نقية ومن ثم توزع بخزانات استقبال للماء بنظام الصرف.

1-1-2-ترشيح التربة Soil Filters:

تستخدم الحقول غير المزروعة في هذه الطريقة من المعالجة، حيث تشجع مثل هذه الحقول، تنقية كميات كبيرة من المخلفات المضافة، بمعدل قد يصل إلى 3000 مم سنوياً. وتعتبر التربة المفككة والرملية، ذات أقطار حبيبات ما بين 0.2 – 0.5 مم، وسماكة 1.5–2 م، ومعدل مستوى ماء أرضي منخفض أكثر مناسبة لهذا الغرض. حيث يقسم الحقل إلى شرائح (مساكب) بمساحة 0.5 هكتار، وتنشر المخلفات فوق سطح التربة. مع ملاحظة تنظيف المخلفات ميكانيكياً بإزالة المعلقات الدسمة (دهنية، أو زيتية، أو شحمية) التي تعيق عملية التنقية. تغمر تربة الحقول المخصصة وهي بحالة جافة بمخلفات مياه الصرف بسماكة تتراوح ما بين 5 – 10 سم، بفاصل 0.5 – 4 أيام، وتُصرف نواتج المعالجة بنظام الصرف الموزع في الحقل. لابد من الإشارة إلى أنه بعد فترة من الزمن، تفقد التربة المستخدمة في التصفية قدرتها على الترشيح، لذلك يجب استبعادها دورياً من الاستخدام في التنقية لإعادة إصلاحها ذاتياً.

كما يمكن تنفيذ معالجة المخلفات في الشتاء، وعندها يمكن تخفيض عدد المساكب المستخدمة لخفض الفقد، ويعوَّض عنها بزيادة سماكة غمر التربة ما بين 20 – 30 سم، ويغطى سطح المخلفات بالجليد، حيث تحدث تحته عملية التنقية وزيادة نوعية مخرجاتها.

1-1-3-برك المخلفات Sewage Ponds:

برك المخلفات هي أحواض ضحلة في الأرض تحدث فيها عمليات التنقية البيولوجية لمخلفات الصرف الصحي طبيعياً باستخدام الميكروبات الهوائية. وعليه، فإنها تنفذ في البلدات الصغيرة، حيث لا يزيد عدد مساكنها عن 2000 مسكن. وهي كذلك إما طبيعية أو صناعية ضمن أحواض تصل فيها أشعة الشمس إلى القاع، وقبل إدخال المخلفات في برك المخلفات يجب تنظيفها أولياً من المواد العالقة. تقوم البكتيريا الهوائية بتحليل المواد العضوية في الطبقة العليا من البركة متخذة من الطحالب والأكسجين الجوي مصدراً للأكسجين، ويتم تحليل المواد العضوية في الجزء السفلي عن طريق البكتيرية اللاهوائية. وتعتمد فعالية البرك على الخلط والرياح ودرجة حرارة الجو. وتتكون هذه الطريقة من سلسلة من البرك تضم: البكتيريا والطحالب وأخرى القشريات.

وتتم التنقية في هذه الطريقة، بأكسدة المركبات العضوية من قبل البكتيريا في برك البكتيرية، فتسبب معدنتها وتحولها إلى مركبات غير عضوية، تعرف بالأملاح ذات المنشأ الحيوي. ثم تنقل المخلفات إلى بركة أخرى وهكذا، وتنفذ الخطوة الأخيرة في هذه المعالجة في برك القشريات حيث تأكل الطحالب القشريات المزدهرة. لا تسبب هذه التنقية إزالة الملوثات العضوية فقط، وإنما النواتج العضوية الفائضة والموجودة في الماء المستقبل أيضاً، والتي قد تسبب ظاهرة الإثراء

الغذائي للماء، وتَعاقُب ازدهاره، وخفض محتواه من الأكسجين. كما يمكن تربية الأسماك والبط في هذه البرك دون الحاجة لتغذيتها الصناعية.

1-1-4-المعالجة بالنباتات المائية Hydrobotanic Purification:

تعتمد المعالجة بالنباتات المائية على التنقية الذاتية التي تحدث في النظم البيئية الغدقة (المشبعة بالماء)، وهكذا تنتمي هذه المعالجة لما يسمى بنظم الأراضي الرطبة. وتتم التنقية هنا كنتيجة للمشاركة بين الأحياء الدقيقة في التربة من جهة، ونباتات المستنقعات من جهة ثانية. إذ تفكك الأحياء الدقيقة المواد العضوية في مياه الصرف وتحولها إلى مركبات لا عضوية تمتصها النباتات، مما يشجع تكون كتلة نباتية ضخمة، وتحسن ادمصاص الملوثات على حبيبات التربة بسبب وجود الجزيئات المعدنية الصغيرة متمثلة في الرمل في قوام طبقات المستنقعات. ومن أهم النباتات المستخدمة في هذه المعالجة نذكر: نباتات القصب العادي والصولجاني والصفاف المتفرع والبردي، وبعض النباتات العائمة في البرك المغلقة. حيث تتطلب هذه النباتات كمية مغذيات عالية تمتصها من الأملاح المعدنية الناتجة، وبالنتيجة تزيل النباتات ملوحة المخلفات ولا تسبب ظاهرة الإثراء الغذائي في أحواض الماء.

2-الطرائق الصناعية في المعالجة الحيوية لمياه الصرف

Artificial Methods of Wastewater Purification

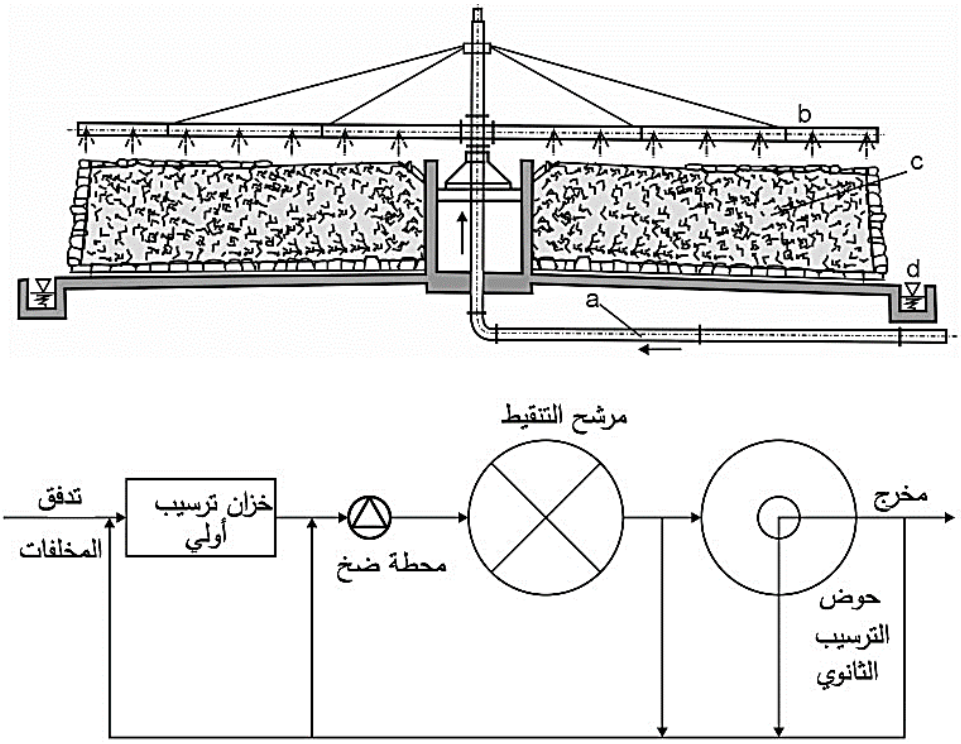
تتضمن الطرائق الصناعية للمعالجة الحيوية لمياه الصرف كلاً من الطرائق التالية:

2-1-الرشح بالتقطير أو التنقيط Trickling Filters:

تم تطوير هذا النظام في بريطانيا عام 1893 (شكل 16)، وهو عبارة عن خزان يحتوي أحجاراً صغيرة بأقطار ما بين 25 – 100 مم، وبعمق ما بين 0.9 – 2.5 م، أو مادة حبيبية مسامية مفككة. تتم فيه معالجة مياه الصرف بطريقة التصفية، حيث يتم نشر المخلفات أعلى طبقة من المرشح، وتترك للتترسب، أو تنزل عبر مكونات المرشح. تتحلل المادة العضوية من قبل الأحياء الدقيقة الملتصقة بوسط الترشيح، فتتشكل طبقة حيوية غشائية مخاطية، فوق طبقة المرشح، تضم عدة أحياء مثل البكتيريا، الأوالي، والفطور. يتركز دور المرشح في تأمين تدفق ثابت للمخلفات عبر فلتر التقطير، مع المحافظة على الاتصال مع الغشاء البيولوجي. تخضع المخلفات أثناء التدفق للتمعدن كنتيجة للتحلل الهوائي من قبل الأحياء.

يتكون الغشاء البيولوجي أساساً من البكتيرية الدبقة التي تنتج الصفائح المخاطية. ومع الزمن يتغير تركيب الأغشية المخاطية بسبب تعاقبها، فتظهر الفطور والأوالي والديدان الحلقية واليرقات الطائرة إلى جانب البكتيريا. ومع نمو وتكاثر الكائنات الحية تزداد سماكة صفائح الأغشية الحيوية ويزداد بالتالي استهلاك الأكسجين قبل وصوله إلى داخل الصفائح. فتتكون بيئة لاهوائية

قريبة من سطح محتويات المرشح، ومع زيادة سماكة الطبقة اللزجة في شرائح الأغشية الحيوية، يتم استهلاك المادة العضوية أثناء امتصاصها، وقبل وصولها إلى الكائنات الحية قرب قاع المرشح، لذلك تموت هذه الأحياء وتفقد قدرتها على الالتصاق بمخرجات المرشح وتتم إزالتها مع السائل، ليبدأ تكوين طبقة أخرى وهكذا. واعتماداً على كمية المخلفات المعالجة، تقسم هذه الطريقة إلى مرشحات التنقيط ومرشحات الدفق الفيضي.



الشكل (16): المعالجة الحيوية لمياه الصرف بطريقة الرشح بالتقطير Trickling Felter.

a: دفع الماء. b: نظام رش الماء. c: حزمة مرشحة. d: مضخة سحب ودفع الماء.

2-2-الحمأة (الرسابة) المنشطة Activated Sludge:

يمكن تعريف الحمأة أو الرسابة المنشطة على أنها معلق كثيف من الأحياء الدقيقة، تكون على هيئة كتلة نشطة قادرة على تثبيت ومعالجة المخلفات. لقد تم تطوير هذه الطريقة في المعالجة في بريطانيا عام 1914، وتعتمد تنقية المخلفات عبر المادة المعلقة بحرية، والتي تتكون من إنتاج شوائب بكمية تتراوح ما بين 50 – 100 ميكروميتر، وتشكيل مناطق سطحية متطورة. تتكون الشوائب من نواة معدنية بنية أو بيجية اللون تحتوي على سطحها بكتيرية غيرية التغذية ضمن أغلفة مخاطية. تتطلب هذه الطريقة التزويد بالأكسجين في طبقاتها من أجل الأكسدة البيولوجية للملوثات العضوية، والتي يجب أن تكون بمعدل أكبر من 0.5 ملغ/دسم^3 لضمان توفر الأكسجين للبكتيرية.

خصائص الحمأة المنشطة Activated Sludge Characteristics

تعتبر الحمأة المنشطة نوعاً من تلبد المادة المعلقة الناتج عند تهويتها. وتتضمن هذه المعالجة معدنة المركبات العضوية، من قبل البكتيرية، واتباع خطوات المعالجة الكيميائية ذاتها المشاهدة بطريقة التنقية الذاتية، على أن سرعة المعالجة أكبر بكثير. وذلك من حقيقة أن ظروف التهوية المكثفة تساعد خلال تدفق المخلفات عبر أحواض التهوية في تطور البكتيرية المحللة للمخلفات. وهذه الكتل المكونة من بكتيرية غيرية التغذية متجمعة مع المادة المخاطية خلال عملية التهوية في أحواض التهوية تمتص الملوثات الموجودة في مياه الصرف وتحللها.

تمتلك الحمأة المنشطة بنية إسفنجية تتكون من فتحات صغيرة بأشكال متنوعة، تسمح بفصل الحمأة المنشطة عن المخلفات. تتكون الحمأة المنشطة من مجموعة من الأحياء تسود فيما بينها علاقة تعايش، تضم بكتيرية غيرية التغذية، وفي بعض الظروف، بكتيرية كيميائية التغذية بنسب صغيرة مثل بكتيرية التأزت. ومن الأنواع الأكثر شيوعاً: *Zooglea ramigera* (شكل 17)، *Pseudomonas fluorescens*، *P. putida*، إضافة إلى الأجناس *Achromobacter*، *Bacillus*، *Flavobacterium*، و*Alcaligenes*. وتحدد الظروف الكيميائية لخزان التهوية، ودرجة الحموضة (pH)، وشروط الهواء عوامل تنوع المعقد البكتيري.

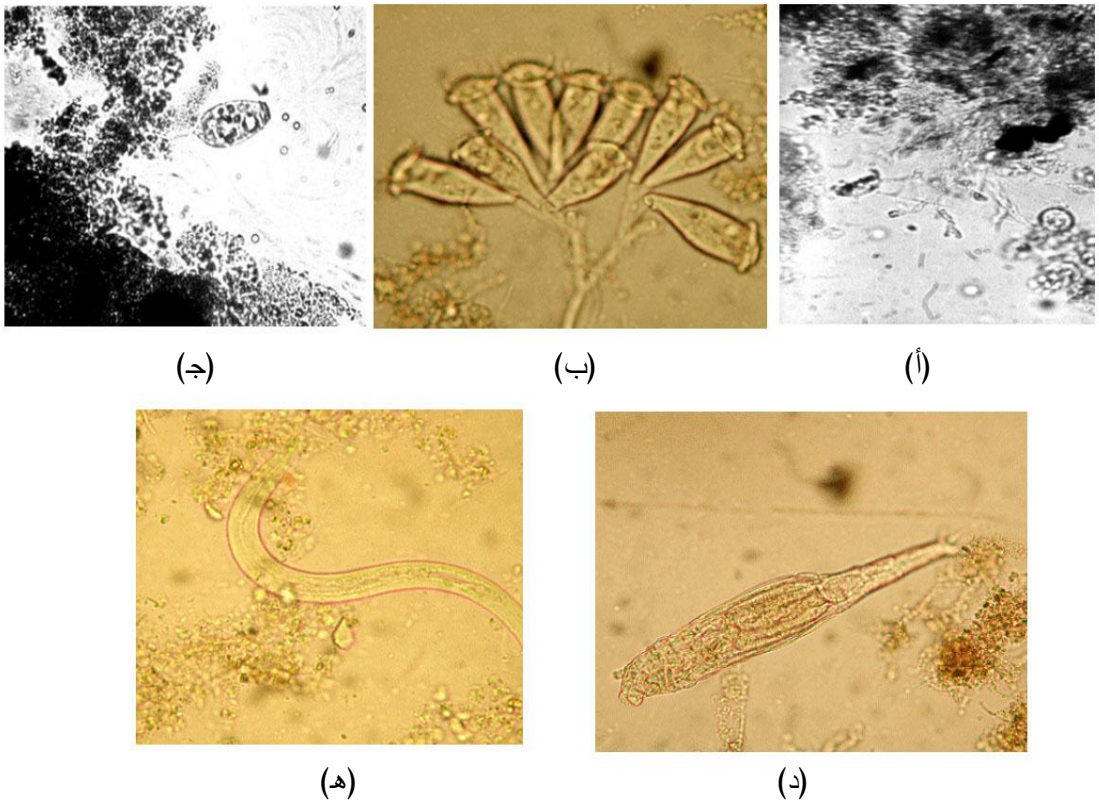
تحت ظروف زيادة حمولة خزان التهوية بالمخلفات، ومع نقص الأكسجين الحاد، تحدث زيادة في تطور كتل الحمأة، مسببة نوعين مما يسمى بالحمأة النشطة المنتفخة، وهما: الانتفاخ الليفي وغير الليفي. يحدث الانتفاخ الليفي بسبب زيادة البكتيرية الخيطية: *Sphaerotilus natans*، والبكتيرية *Beggiatoa alba* أو البكتيرية *Thiothrix nivea* أو تطور الفطور. ويحدث الانتفاخ غير الليفي بسبب تطور البكتيرية المكونة للمادة المخاطية وزيادة كمية هذه المادة.

إلى جانب البكتيرية، تضم بيئة التعايش هذه كلاً من الأوليات والنيماتودا والدوارات، وهي حيوانات مجهرية مائية (شكل 17). تلعب الأوالي دوراً مهماً جداً في عملية المعالجة، حيث تتغذى على البكتيرية وتجبرها على التطور والإنتاج بسرعة، مما يزيد أهميتها وتجددها وتجديد الحمأة المنشطة. ومن أهم الأوالي المسجلة في هذه البيئة: *Vorticella*، *Carchesium*، و*Opercularia* إضافة إلى *Oxytrichia Anthophysa* و*Lionotus*. كما تشير الدراسات إلى وجود علاقة عكسية بين السوطيات والهدبيات ضمن الحمأة المنشطة. ففي الوقت الذي يدل وجود العدد الكبير من السوطيات على زيادة حمولة الحمأة، يدل وجود الهدبيات على دورها الوظيفي الصحيح. ويلاحظ تعاقب الخصائص التعايشية للحمأة المنشطة خلال تنفيذ عملية المعالجة بالحمأة المنشطة.

يتم توجيه المخلفات في هذه الطريقة من المعالجة إلى خزان التهوية المملوء بالحماة المنشطة (معلق الأحياء الدقيقة) بعد تصفيتها ميكانيكياً (شكل 17). ويتم تهوية محتوى حوض التهوية

بشكل مستمر لتأمين كمية كافية من الأكسجين للمحافظة على الحمأة المنشطة بحالة معلق والتأكيد على عملية الخلط المستمر.

يتم في حوض التهوية، استمرار تطور الحمأة المنشطة بسبب الاستنبات المستمر، من خلال خلق حالة توازن بين كل من معدل تدفق المخلفات، وتركيز المغذيات، ومعدل تكاثر البكتيرية، ومعدل المخلفات الخارجة الحاملة معها الحمأة المنشطة. وتحدث عملية التحلل عبر اتصال المخلفات مع الحمأة المنشطة، بالتزامن مع تأكيد تطور كتلتها الحيوية. ويتم فصل المخلفات المعالجة في خزان الترسيب الثانوي، وإخراج المخلفات واضحة المعالجة إلى موضع استقبال الماء في الجهاز (شكل 18).



(أ) (ب) (جـ)

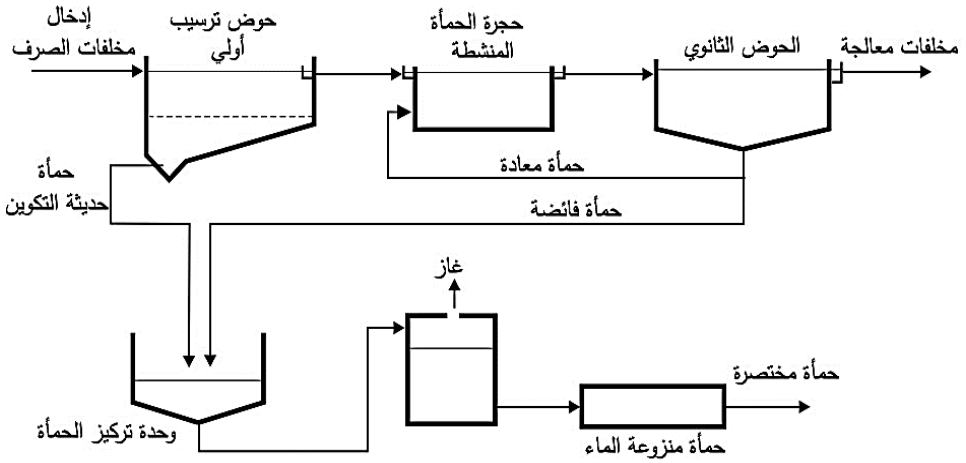
(د) (هـ)

الشكل (17): بعض الأحياء المتعايشة في الحمأة المنشطة.

أ: البكتيرية *Z. ramigera*. ب: الهدبية *E. umbellaria*. جـ: الهدبية *Opercularia* sp.

د: الدوارة *Rotifer vulgaris*. هـ: النيماتودا *Plectus* sp.

يمكن استخدام الحمأة المنشطة مرة أخرى في المعالجة، بحيث يتم إعادتها لحوض التهوية، أو على الأغلب، يتم توجيهها إلى حوض التجديد قبل استخدامها مرة أخرى. ويتم تهويتها لاستعادة خصائصها الفيزيائية الخاصة، عند جمع الحمأة في حوض الترسيب الثانوي، وهي غير مدورة تعتبر حمأة أو رسابة فائضة تزال أو تعرَّض لعمليات معالجة إضافية (شكل 18).



الشكل (18): المعالجة الحيوية لتلوث مياه الصرف بطريقة الحمأة المنشطة Activated Sludge Methods.