استكتاب أكاديمي جماعي

تكامل العلوم الحيوية والتطبيقية

دراسات في الأحياء والوراثة والتقنيات الأحيائية والعلوم البيئية والصحية

تأليف مجموعة من الباحثين



الناشر

دار الرقيم السومري للنشر والتوزيع

إعداد واشراف الهيئة العلمية في

مؤسسة أجيال الرافدين لتطوير التعليم

ISBN: 978-9922-7964-82 | 2026

استكتاب أكاديمي جماعي

تكامل العلوم الحيوية و التطبيقية

دراسات في الأحياء والوراثة و التقنيات الأحيائية والعلوم البيئية و الصحية

استكتاب أكاديمي جماعي
تكامل العلوم الحيوية والتطبيقية
دراسات في الأحياء والوراثة والتقنيات الأحيائية والعلوم البيئية والصحية
نخبة من الباحثين
التصنيف : دراسات في الأحياء والوراثة والتقنيات الأحيائية والعلوم البيئية والصحية
الطبعة: الاولى

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق في بغداد (بلا) لسنة (بلا)

ISBN:978-9922-7964-82

DOI:10.62909/978.9922.7964.82



دار تركيب الرقيم السومري للطباعة والتوزيع والنشر الالكتروني
العراق – ديالى – بعقوبه – شارع الاوقاف
هاتف : 07775262892
manager@sss-publisher.com

جميع حقوق النشر محفوظة، ولا يحق لأي مؤسسة أو جهة إعادة إصدار هذا الكتاب، أو جزء منه، أو نقله، بأي شكل أو وساطة من وسائط نقل المعلومات، سواء أكانت إلكترونية أو ميكانيكية، بما في ذلك النسخ أو التسجيل أو التخزين والاسترجاع، دون إذن خطي من المؤلف.

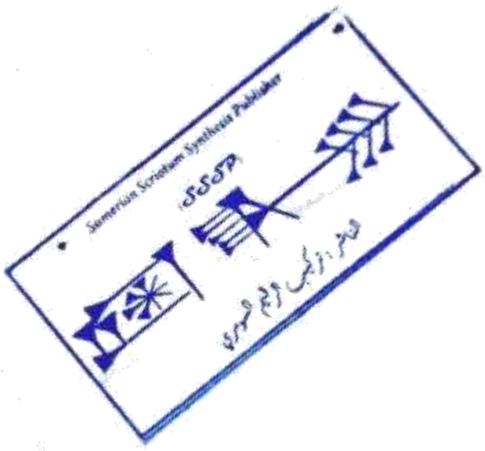
جميع الآراء الواردة في هذا الكتاب تعبر عن رأي كاتبها ولا تعبر بالضرورة عن رأي الناشر.

استكتاب أكاديمي جماعي

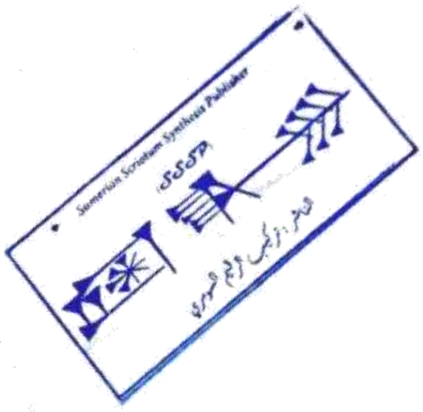
تكامل العلوم الحيوية والتطبيقية

دراسات في الأحياء والوراثة والتقنيات الأحيائية والعلوم البيئية والصحية

نخبة من الباحثين



2026



تنضيد الكتاب

معهد الترجمة والكتاب

«ماليزيا»

إعداد واشراف الهيئة العلمية في

مؤسسة أجيال الرافدين لتطوير التعليم

«العراق»

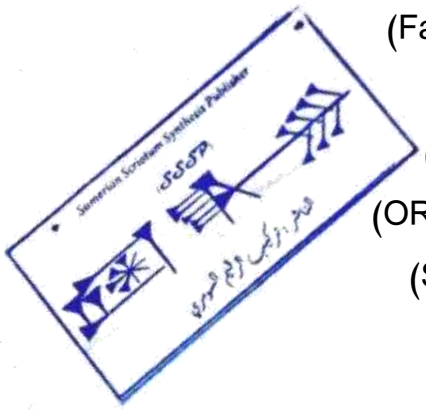
تصميم الغلاف

معهد التكنالوجيا

«الهند»

التوزيـــع والنشـــر الإلكترونـــي ، تمـــت فهرســـة هـــذا الكتـــاب فـــي عـــدد مـــن الفهارس والمنصات الدولية، منها:

كروس ريف	(CrossRef)
أوبن ألكس	(OpenAlex)
مؤشر الاقتباس المفتوح الأوكراني	(OUCI)
سجل مستودعات الوصول المفتوح	(ROAR)
سيمنتك سكولار	(Semantic Scholar)
دايمنشنز	(Dimensions)
ريسرش غيت	(ResearchGate)
فات كات	(Fatcat)
المعيار الدولي للترقيم	(IAS)
مؤشر الاستشهاد العلمي	(SCI)
أوركيد	(ORCID)
سايليت	(Scilit)



الموقع الرسمي لدار النشر الرقيم السومري للنشر والتوزيع

يتوفر هذا الكتاب عبر الموقع الرسمي لدار النشر، مع تخصيص مُعرّف رقمي دائم (DOI) خاص به

https://doi.org/10.62909/978.9922.7964.82

978-9922-7964-82

مقدمة الكتاب

يضم كتاب «تكامل العلوم الحيوية والتطبيقية: دراسات في الأحياء والوراثة والتقنيات الأحيائية والعلوم البيئية والصحية» عشر مشاركات تتناول الكائنات الدقيقة والوراثة والتطبيقات الحيوية والبيئة، وتمتد إلى تعليم الأحياء وإلى نموذج تحليلي في الممارسة التمريضية القائمة على الدليل. وينتظم هذا التنوع في فصول مستقلة تتيح للقارئ تمييز موضوع كل دراسة ومنهجها ومجال تطبيقها، مع المحافظة على إسناد المشاركات إلى أصحابها وعدم الخلط بين المراجعة العلمية والبحث التجريبي والبيانات المحاكاة.

تبدأ المجموعة بأربع مشاركات في الأحياء المجهرية والوراثة. وتشترك هذه المشاركات في عناوينها العامة، لكن لكل منها نصه وبناؤه وتفاصيله وأمثلته ومراجعه؛ ولذلك أُبقيت مستقلة مع إظهار أسماء مؤلفيها في الفهرس وافتتاحيات الفصول. وتتناول هذه الدراسات تنوع الكائنات الدقيقة ووظائفها، والمادة الوراثية وانتقال الصفات وتنظيم التعبير الجيني، ثم التقنيات والتطبيقات التي تصل المعرفة الأساسية بالبيئة والزراعة والصناعة والصحة. وتبرز الرسوم والجداول والأسئلة في عدد منها طبيعتها التعليمية والتفسيرية.

ويتابع الكتاب هذا المسار بدراسة للبكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة في البيئات القاسية، ثم دراسة لتقنيات استخلاص الأحماض الدهنية من الطحالب واستعمالاتها البيئية وغير الطبية. وتليهما مشاركة في التطبيقات الأحيائية والبيئية غير الطبية، تعرض المعالجة الحيوية وإدارة الملوثات والمخلفات وتطبيقات الغذاء والزراعة وحدود الانتقال من المختبر إلى الاستخدام. ويصل هذا القسم بين البحث عن الخصائص الحيوية وتقويم إمكان توظيفها وشروط سلامة التطبيق وكفاءته.

وتتناول مشاركة الاستدامة والتغير المناخي المفاهيم والأبعاد والآثار البيئية، مع معالجة تفصيلية لبعض تطبيقات الطحالب والمفاعلات الحيوية الضوئية والتقاط الكربون وإنتاج الكتلة الحيوية. ثم يأتي بحث استراتيجية التنبؤ والملاحظة والتفسير في تحصيل طالبات المرحلة المتوسطة في الأحياء. ويختتم الكتاب بدراسة في الممارسة التمريضية وسلامة المرضى، تصف بياناتها صراحة بأنها محاكاة؛ ومن ثم تُقرأ نتائجها ضمن هذا الوصف، ولا تدمج مع البيانات التجريبية الفعلية في المشاركة التعليمية السابقة.

يهدف هذا التنظيم إلى تيسير القراءة والرجوع إلى المادة، لا إلى إلغاء الفروق بين الموضوعات أو تحويل كل مساهمة إلى المنهج نفسه. وترد في صدر كل فصل بيانات الباحثين والملخصان والكلمات المفتاحية، مع الاحتفاظ بالنصوص والجداول والصور والمراجع والمادة التعليمية المساندة في سياقها. ويتيح الفهرس والبيان المستقل للمشاركين الوصول إلى عناوين المساهمات وأصحابها، بينما تدعم المراجع الخاصة بكل فصل تتبع مصادره. ومن خلال هذا البناء يبقى الكتاب مساحة لعرض مسارات متعددة في دراسة الحياة والبيئة والتطبيق، مع وضوح الحدود التي تحكم تفسير كل نتيجة أو مثال.

المشاركون في الكتاب

1	م.م. إسراء جاسم محمد الصويلي - المديرية العامة لتربية ذي قار - قسم الإشراف الاختصاصي - العراق
2	م.د. خديجة عباس صحن - جامعة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - العراق
3	م. قاسم حمادي عبد جامعة كربلاء - كلية العلوم الطبية التطبيقية - العراق
4	م.د. وداد سمير جعاز - جامعة كربلاء - العراق
5	م.م. إنعام عبد الله فياض - المديرية العامة لتربية ذي قار - قسم الإشراف - العراق
6	م.م. زهراء محمد عبد الكاظم المديرية العامة لتربية ذي قار - الكلية التربوية المفتوحة - العراق
7	م. إيمان حسين عبد خضير - هيئة البحث العلمي - وزارة التعليم العالي والبحث العلمي - العراق
8	م.م. أحمد عيدان مطرود - هيئة البحث العلمي - العراق
9	م.م. رشا طارق هاشم جامعة بغداد - كلية التربية للعلوم الصرفة ابن الهيثم - قسم علوم الحياة - العراق
10	د. محمود عادل فاضل عباس - دائرة مدينة الطب - مستشفى بغداد التعليمي – العراق
11	م.د. إيمان عباس محسن الربيعي - هيئة البحث العلمي
12	م. حامد محسن غياض الزيدي – الجامعة التقنية الجنوبية – الكلية التقنية الشطرة

فهرس المحتويات

ت	الفصل والباحث	ص.
1	الأحياء المجهرية والوراثة م.م. إسراء جاسم محمد الصويلي	7
2	الأحياء المجهرية والوراثة م.د. خديجة عباس صحن	59
3	الأحياء المجهرية والوراثة م. قاسم حمادي عبد	180
4	الأحياء المجهرية والوراثة م.د. وداد سمير جعاز	247
5	استكشاف البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة من البيئات القاسية وتطبيقاتها الحيوية م.م. إنعام عبد الله فياض	268
6	تقنيات استخلاص الأحماض الدهنية من الطحالب وتطبيقاتها في الصناعات البيئية وغير الطبية م.م. زهراء محمد عبد الكاظم	304
7	التطبيقات الأحيائية والبيئية غير الطبية م. إيمان حسين عبد خضير	327
8	الاستدامة والتغير المناخي م.م. أحمد عيدان مطرود	383
9	فاعلية استراتيجية (POE) في تحصيل طالبات الثاني المتوسط في مادة علم الأحياء م.م. رشا طارق هاشم	434
10	التطبيق المتقدم للممارسة التمريضية القائمة على الدليل وأثره في نتائج سلامة المرضى بوحدات الرعاية الحرجة: دراسة تحليلية متعددة المراكز ببيانات محاكاة د. محمود عادل فاضل عباس	459

الفصل الأول

الأحياء المجهرية والوراثة

Microbiology and Genetics

م.م. إسراء جاسم محمد الصويلي
المديرية العامة لتربية ذي قار - قسم الإشراف الاختصاصي - العراق
israa.jasim.mohammed@ec.edu.iq

الملخص

يتناول الفصل الأحياء المجهرية والوراثة من منظور يصل الكائنات الدقيقة بانتقال الصفات والوظائف الحيوية وتفاعلات البيئة. ويعرض تنوع الأحياء المجهرية وتصنيفها وانتشارها وأدوارها في التحلل ودورات العناصر والعلاقات التكافلية وتوازن الأنظمة الطبيعية. ويناقش الميكروبيوم بوصفه مجالًا يوضح الترابط بين الكائن الحي والمجتمعات الدقيقة المرتبطة به، بدل حصر الأحياء المجهرية في مسببات الأمراض.

وينتقل الفصل إلى الوراثة وانتقال الصفات، فيعرض المادة الوراثية والجينات والكروموسومات والقوانين والأنماط التي تساعد على تفسير التشابه والاختلاف بين الأجيال. كما يناقش الطفرات وتنظيم التعبير الجيني والتفاعل بين العوامل الوراثية والبيئية، مع التأكيد على أن ظهور الصفة لا يفسر دائمًا بعلاقة بسيطة بين جين واحد ونتيجة واحدة. وتساعد الجداول والأمثلة على المقارنة بين المفاهيم والمستويات المختلفة للتحليل.

ويخصص الفصل محورًا للتطبيقات العلمية عند التقاء الأحياء المجهرية بالوراثة، ومنها دراسة التنوع الميكروبي والتقنيات الجزيئية والتكنولوجيا الحيوية والتطبيقات البيئية والزراعية والصناعية والصحية التي يعرضها. وتتضمن الخلاصة مناقشة للثقافة الوراثية والخصوصية والمسؤولية والسلامة، ولأهمية تفسير النتائج في سياقها بدل تحويلها إلى أحكام حتمية. وتتمثل مساهمة الفصل في بناء معالجة تعليمية تكاملية تربط الخلية والكائن والبيئة والتطبيق، مع إبقاء المراجع والأمثلة والجداول أساسًا للعرض. ولا يقدم الفصل تجربة ميدانية واحدة تختبر جميع هذه المسارات، بل ينظم موضوعاتها وصلاتها العلمية ويوضح الأسئلة والمتطلبات التي توجه الإفادة منها.

الكلمات المفتاحية: الأحياء المجهرية؛ الوراثة؛ الميكروبيوم؛ التنوع الحيوي؛ التكنولوجيا الحيوية

Abstract

This chapter examines microbiology and genetics through relationships among microorganisms, inheritance, biological functions, and environmental interactions. It reviews microbial diversity, classification, distribution, decomposition, elemental cycles, symbiosis, and ecosystem balance. The microbiome is discussed as a way of understanding connections between a host organism and associated microbial communities, rather than restricting microorganisms to their role as pathogens.

The chapter then addresses inheritance through genetic material, genes, chromosomes, and patterns explaining similarities and differences across generations. Mutation, regulation of gene expression, and interactions between heredity and environment are considered. The discussion emphasizes that a visible characteristic cannot always be explained by a simple relationship between one gene and one outcome. Tables and examples support comparison among concepts and levels of analysis.

A further section considers scientific applications where microbiology and genetics intersect, including microbial diversity assessment, molecular techniques, biotechnology, and environmental, agricultural, industrial, and health applications discussed in the source. The conclusion addresses genetic literacy, privacy, responsibility, and safety, emphasizing interpretation within context rather than deterministic judgments. The contribution is an integrative educational treatment connecting cells, organisms, environments, and applications, supported by references, examples, and tables. It does not report one field experiment testing all of these pathways. Instead, it organizes their scientific relationships and identifies questions and requirements relevant to their use.

Keywords: Microbiology; Genetics; Microbiome; Biodiversity; Biotechnology

محتويات الفصل

المبحث الأول: الأحياء المجهرية ودورها في البيئة والحياة

المبحث الثاني: الوراثة وانتقال الصفات

المبحث الثالث: التطبيقات العلمية للأحياء المجهرية والوراثة

المبحث الأول: الأحياء المجهرية ودورها في البيئة والحياة

تُمثّل الأحياء المجهرية العالم الخفي الذي يُشكّل الأساس الحيوي لجميع النظم البيئية على كوكب الأرض، حيث تُعدّ هذه الكائنات الدقيقة المحرك الرئيسي للعمليات البيوكيميائية والبيئية التي تدعم الحياة بأشكالها المختلفة. على الرغم من صغر حجمها الذي يجعلها غير مرئية بالعين المجردة، إلا أن تأثيرها الهائل يمتد من أعماق المحيطات إلى قمم الجبال، ومن التربة الخصبة إلى البيئات القاسية التي تتحدى حدود الحياة (Falkowski et al., 2008, pp. 1034-1039).

وتُشكّل الأحياء المجهرية الغالبية العظمى من التنوع البيولوجي على الأرض، وتلعب أدوارًا محورية في الحفاظ على التوازن البيئي وصحة الكائنات الحية (Fierer, 2017, pp. 579-590). إن فهم الأحياء المجهرية وتفاعلاتها مع البيئة المحيطة يُعتبر ضرورة علمية ملحة في عصرنا الحالي، خاصة في ظل التحديات البيئية المتزايدة والتغيرات المناخية العالمية. فهذه الكائنات الدقيقة لا تقتصر وظيفتها على التحلل وإعادة تدوير المواد العضوية فحسب، بل تمتد لتشمل تثبيت النيتروجين الجوي، وإنتاج الأكسجين، والمساهمة في دورات العناصر الكيميائية الأساسية، والتأثير على المناخ العالمي (Falkowski et al., 2008, pp. 1034-1039). كما أن العلاقات التكافلية بين الأحياء المجهرية والكائنات الحية الأخرى تُظهر مدى التعقيد والترابط في الشبكات البيئية (Moran, 2015, pp. 699-702).

يهدف هذا المبحث إلى تقديم رؤية شاملة ومتعمقة حول الأحياء المجهرية ودورها الحيوي في البيئة والحياة، من خلال استعراض تصنيفاتها المختلفة، وتوزيعها في البيئات الطبيعية المتنوعة، ومساهمتها في العمليات البيئية الأساسية، وتأثيرها على صحة الإنسان والحيوان والنبات. سنستكشف كيف تُشكّل هذه الكائنات الدقيقة الأساس الوظيفي للنظم البيئية، وكيف يرتبط تنوعها

البيولوجي بالوظائف البيئية المتعددة التي تدعم استمرارية الحياة على الأرض (Delgado-Baquerizo et al., 2016, pp. 373-390).

1. تعريف الأحياء المجهرية وتصنيفها

1.1 التعريف العام للأحياء المجهرية

تُعرّف الأحياء المجهرية (Microorganisms) بأنها كائنات حية دقيقة لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة، وتتطلب استخدام المجهر لدراستها ومشاهدتها. يتراوح حجم هذه الكائنات عادة من بضعة ميكرومترات إلى أجزاء من الميكرومتر، وتشمل مجموعة واسعة ومتنوعة من الكائنات الحية التي تنتمي إلى ممالك حيوية مختلفة (Madigan et al., 2019). تتميز الأحياء المجهرية بقدرتها الفائقة على التكيف مع مختلف الظروف البيئية، وسرعة تكاثرها، وتنوعها الأيضي الهائل الذي يمكّنها من استغلال مصادر طاقة ومواد غذائية متنوعة.

تُمثّل الأحياء المجهرية أقدم أشكال الحياة على الأرض، حيث ظهرت قبل حوالي 3.5 مليار سنة، وقد لعبت دورًا أساسيًا في تشكيل الغلاف الجوي والمحيط الحيوي للكوكب. إن التنوع الجيني والوظيفي للأحياء المجهرية يفوق بكثير تنوع الكائنات الحية الأكبر حجمًا، مما يجعلها موضوعًا محوريًا في دراسات علم البيئة والتطور والتنوع البيولوجي (Fierer, 2017, pp. 579-590). وقد أثبتت الدراسات الحديثة المعتمدة على تقنيات التسلسل الجيني أن الكتلة الحيوية الميكروبية الكلية على الأرض تفوق بشكل كبير الكتلة الحيوية لجميع النباتات والحيوانات مجتمعة، وهو ما يُبرز أهميتها القصوى في دورة المادة والطاقة على مستوى المحيط الحيوي.

1.2 البكتيريا (Bacteria)

تُعدّ البكتيريا من أكثر الأحياء المجهرية انتشارًا وتنوعًا على سطح الأرض، وهي كائنات وحيدة الخلية بدائية النواة (Prokaryotic) تفتقر إلى نواة محددة بغشاء نووي. تتميز البكتيريا بتنوعها الأيضي الاستثنائي، حيث تشمل أنواعًا ذاتية التغذية وأخرى غيرية التغذية، وبعضها يستطيع العيش في ظروف هوائية بينما يعيش البعض الآخر في بيئات لاهوائية (Madigan et al., 2019). تتراوح أحجام البكتيريا عادة بين 0.5 إلى 5 ميكرومتر، وتتخذ أشكالًا متعددة منها الكروية (Cocci)، والعصوية (Bacilli)، والحلزونية (Spirilla)

وتلعب البكتيريا أدوارًا بيئية حيوية متعددة؛ فهي المسؤولة الرئيسية عن تحلل المواد العضوية وإعادة تدوير العناصر الغذائية في النظم البيئية. كما تُساهم أنواع عديدة منها في تثبيت النيتروجين الجوي وتحويله إلى أمونيا أو نترات يمكن للنباتات الاستفادة منها (Falkowski et al., 2008, pp. 1034-1039). ومن الناحية الصحية، تتواجد البكتيريا النافعة في الجهاز الهضمي للإنسان والحيوان، حيث تُساعد في عمليات الهضم وتصنيع الفيتامينات، بينما تتسبب أنواع ممرضة أخرى في أمراض خطيرة كالسل والكوليرا والسالمونيلا.

يُقدَّر عدد أنواع البكتيريا المعروفة حاليًا بأكثر من مليار نوع، غير أنه لم يُتمكّن حتى الآن من تصنيف سوى نسبة ضئيلة منها. ويُعزى ذلك أساسًا إلى عدم قابلية معظم هذه الأنواع للنمو على الأوساط الاصطناعية في المختبر، ومن هنا تأتي أهمية تقنيات الجينومية البيئية (Metagenomics) في الكشف عن هذا التنوع الهائل.

1.3 الفطريات (Fungi)

الفطريات هي كائنات حقيقية النواة Eukaryotic يمكن أن تكون وحيدة الخلية مثل الخمائر(Yeasts) أو متعددة الخلايا مثل العفن والأبواغ. تتميز الفطريات بجدار خلوي يحتوي على الكيتين، وتتغذى بطريقة امتصاصية من خلال إفراز إنزيمات خارجية تُحلل المواد العضوية المعقدة إلى مركبات بسيطة يمكن امتصاصها (Madigan et al., 2019) وتُعتبر الفطريات من أهم المُحلِّلات في النظم البيئية، حيث تُساهم بشكل كبير في تفكيك المواد النباتية الميتة وإعادة تدوير العناصر الغذائية.

تُقيم الفطريات علاقات تكافلية بالغة الأهمية مع النباتات، أبرزها الفطريات الجذرية (Mycorrhizae) التي تُشكّل ارتباطات رمزية مع جذور النباتات وتُساعدها في امتصاص الماء والعناصر المعدنية، لا سيما الفوسفور والنيتروجين، مقابل الحصول على السكريات التي تُنتجها النباتات عبر عملية التمثيل الضوئي (Moran, 2015, pp. 699-702) تُقدَّر نسبة النباتات المرتبطة بفطريات جذرية بأكثر من 80% من مجموع النباتات الوعائية على وجه الأرض، مما يجعل هذه العلاقة التكافلية من أكثر العلاقات البيولوجية انتشارًا وأهمية.

1.4 الفيروسات (Viruses)

تُمثّل الفيروسات حالة استثنائية بين الأحياء المجهرية، إذ تقع على الحدود الفاصلة بين الحياة وغير الحياة. فهي تفتقر إلى الخلية كوحدة بنائية، وتعجز عن التكاثر إلا داخل خلايا حية تستخدمها لتضاعف جيناتها. تتكوّن الفيروسات أساسًا من مادة وراثية DNA) أو(RNA مُغلَّفة بغلاف بروتيني يُعرف بالقفيصة (Capsid)، وقد تحاط ببعض الأنواع بغلاف دهني إضافي (Envelope) ويتراوح حجمها عادة بين 20 و300 نانومتر، مما يجعلها أصغر بكثير من معظم الأحياء المجهرية الأخرى (Suttle, 2007, pp. 801-812).

تُسبب الفيروسات طيفًا واسعًا من الأمراض في الإنسان والحيوان والنبات، من نزلات البرد الخفيفة إلى الإيبولا والإيدز وكوفيد19-. ومن المنظور البيئي، تلعب الفيروسات دورًا بيئيًا حاسمًا في تنظيم أعداد المجتمعات الميكروبية في المحيطات والتربة، وتُساهم في نقل المواد الوراثية بين الكائنات الدقيقة عبر ظاهرة النقل الجيني الأفقي (Horizontal Gene Transfer)، مما يُعزز التنوع الجيني ويدفع عجلة التطور(Suttle, 2007, pp. 801-812) وقد كشفت الدراسات الحديثة أن العاثيات (Bacteriophages) تُدمّر ما يصل إلى 40% من إجمالي الكتلة الحيوية البكتيرية في المحيطات يوميًا، وهو ما يجعلها عاملًا تنظيميًا بالغ الأثر في دورات العناصر البحرية.

1.5 الطحالب (Algae) والأوليات (Protozoa)

الطحالب هي كائنات حقيقية النواة ذاتية التغذية تعتمد على التمثيل الضوئي لتصنيع غذائها، وتُوجد في بيئات مائية وبرية متنوعة. تتراوح بين الطحالب الخضراء المزرقة وحيدة الخلية)كالكلوريلا(إلى الأعشاب البحرية العملاقة. تُؤدي الطحالب دورًا محوريًا في الإنتاجية الأولية للمحيطات، إذ تُنتج نحو 50% من الأكسجين الكوني عبر عملية التمثيل الضوئي (Field et al., 1998, pp. 237-240). أما العوالق النباتية Phytoplankton(فهي في حقيقتها كائنات طحلبية دقيقة مجهرية تُشكّل قاعدة الهرم الغذائي في البيئات المائية، وتُعدّ من أكثر الكائنات إنتاجًا للأكسجين على مستوى الكرة الأرضية.

الأوليات Protozoa((أو الطلائعيات هي كائنات حقيقية النواة وحيدة الخلية غيرية التغذية، وتشمل مجموعات متنوعة كالأميبات والأسواط والهدبيات. تلعب الأوليات دورًا فعالًا في تنظيم أعداد البكتيريا في التربة والمياه، وتُساهم في تدوير العناصر الغذائية من خلال تغذيتها على

المنتجين والمُحلّلين الآخرين. كما تنتمي إلى الأوليات بعض الكائنات المُمرضة كالبلازموديوم المُسبّب للملاريا وإنتاميبا هيستوليتيكا المُسبّبة للدوسنتاريا الأميبية.

1.6 الأركيا (Archaea)

تُمثّل الأركيا مجموعة من الكائنات بدائية النواة كانت تُصنَّف تاريخيًا ضمن البكتيريا، غير أن الأبحاث الجزيئية الحديثة أثبتت أنها تُشكّل مملكة مستقلة بذاتها. تتميز الأركيا بتراكيب كيميائية خاصة في أغشيتها الخلوية وجدرانها، وبتنوع أيضي استثنائي يُمكّنها من الحياة في أشد البيئات قسوةً على وجه الأرض. تُوجد الأركيا في الينابيع الحارة الحمضية، والملاحات المُشبّعة بالملح، والقاع المحيطي العميق، وفي أمعاء الحيوانات المجترة حيث تُشارك في إنتاج الميثان (Offre et al., 2013, pp. 437-457).

تُسهم الأركيا مُسهمةً بارزة في دورة النيتروجين العالمية عبر عمليات الأكسدة الأمونيوية (Ammonia Oxidation)، وفي دورة الكربون عبر إنتاج الميثان في البيئات اللاهوائية. وقد كشفت الدراسات الجينومية أن الأركيا تُشكّل مجموعة متشعبة جينيًا تنتشر في جميع النظم البيئية، بما في ذلك البيئات المعتدلة، ولا تقتصر على البيئات المتطرفة كما كان يُعتقد في السابق (Offre et al., 2013, pp. 437-457).

2. الأحياء المجهرية في البيئات الطبيعية

2.1 الأحياء المجهرية في التربة

تُعدّ التربة من أكثر بيئات الأرض ثراءً بالأحياء المجهرية وتنوعًا لها، إذ يوجد في جرام واحد من التربة الجيدة ما بين مليار وعشرة مليارات خلية بكتيرية، فضلًا عن ملايين الخلايا الفطرية وعشرات الملايين من الأوليات. يرتبط هذا التنوع الهائل ارتباطًا وثيقًا بالتنوع الكيميائي والفيزيائي لبيئة التربة، حيث تتباين التراكيب البيئية الدقيقة (Microhabitats) بشكل كبير ضمن حجم التربة نفسه (Fierer, 2017, pp. 579-590). تؤدي الأحياء المجهرية في التربة وظائف لا غنى عنها؛ تشمل تحليل المواد العضوية، وتدوير العناصر الغذائية، وتثبيت النيتروجين، وتشكيل البنية التجميعية للتربة، وتكوين الدبال، وتفكيك السموم.

تُشكّل منطقة محيط الجذر (Rhizosphere) بيئة ميكروبية فريدة من نوعها، تتجمع فيها الأحياء المجهرية بكثافة عالية نتيجة للمواد العضوية والإفرازات الجذرية الغنية التي تُوفرها النباتات. تُشير الدراسات الحديثة إلى أن الكتلة الحيوية الميكروبية في محيط الجذر يمكن أن تكون أعلى بعشرة إلى مئة مرة من كثافتها في التربة البعيدة عن الجذور، وهو ما يُعكس غنى هذه البيئة الدقيقة بمصادر الغذاء والطاقة (Berendsen et al., 2012, pp. 478-486). يُفيد التفاعل بين مجتمع الأحياء المجهرية في منطقة محيط الجذر وجذور النباتات كلتا الجانبين، إذ تستفيد النباتات من تحسّن إمدادها بالعناصر الغذائية، وتطوّر الأحياء المجهرية آليات لمقاومة المسببات المرضية في التربة.

2.2 الأحياء المجهرية في البيئات المائية

تُمثّل البيئات المائية موطنًا رئيسيًا للأحياء المجهرية، سواء في المياه العذبة أو مياه البحار والمحيطات. تُشكّل العوالق الميكروبية (Microbial Plankton) المحيطية جزءًا أساسيًا من شبكة الغذاء البحرية، وتُسهم بشكل كبير في تدوير الكربون والعناصر الغذائية في المحيطات (Azam & (Malfatti, 2007). تُصنَّف هذه الكائنات وفق أحجامها إلى: بيكوبلانكتون (0.2-2 ميكرومتر(، ونانوبلانكتون (2-20 ميكرومتر(، وميكروبلانكتون (20-200 ميكرومتر(. يُهيمن على التنوع الميكروبي في المحيطات أنواع بكتيرية من شعبة Proteobacteria وCyanobacteria، إلى جانب طيف واسع من العاثيات والأوليات.

في البيئات المائية العذبة، تُؤدي الأحياء المجهرية أدوارًا محورية في معالجة المواد العضوية الذائبة وتنقية المياه والمساهمة في دورة العناصر المغذية كالنيتروجين والفوسفور. وتُعدّ نسبة N/P)نيتروجين/فوسفور(المتاحة في الوسط المائي من أهم العوامل التي تُحدد تركيبة المجتمعات الميكروبية في هذه البيئات (Dodds & (Welch, 2000). كما تلعب الأحياء المجهرية في البيئات المائية دورًا في معالجة ملوثات المياه من مواد عضوية ومعادن ثقيلة.

تُوجد في أعماق المحيطات الشديدة، وخاصة حول الفتحات الحرارية المائية (Hydrothermal Vents)، مجتمعات ميكروبية فريدة تعتمد على الكيميائية التغذية (Chemolithotrophy) بدلًا من الضوء كمصدر للطاقة. تُمثّل هذه المجتمعات نماذج رائدة لفهم حدود الحياة في الظروف القاسية، وتُوفر رؤى قيّمة حول احتمالية وجود حياة على الكواكب الأخرى في المنظومة الشمسية.

2.3 الأحياء المجهرية في الهواء

يُعدّ الهواء الجوي بيئة معادية للأحياء المجهرية بسبب الإشعاع فوق البنفسجي والجفاف وانخفاض تركيزات المواد العضوية، ومع ذلك تُوجد فيه كميات كبيرة ومتنوعة من الميكروبات في حالة انتشار مستمر. يُقدَّر عدد الخلايا الميكروبية في متر مكعب واحد من الهواء بما يتراوح بين بضعة آلاف وعدة ملايين خلية، اعتمادًا على الموقع الجغرافي والفصل وأنماط الاستخدام البشري (Després et al., 2012). تُشكّل الجراثيم البكتيرية (Bacterial Endospores) والأبواغ الفطرية الغالبية العظمى من الأحياء المجهرية الهوائية نظرًا لقدرتها الاستثنائية على تحمّل الجفاف والإشعاع.

تنتقل الأحياء المجهرية عبر الهواء لمسافات شاسعة قد تتجاوز آلاف الكيلومترات، مما يُؤثر على التنوع البيولوجي الميكروبي في المناطق البعيدة من خلال ظاهرة الاستعمار الهوائي (Aerial Dispersal). وهو ما يُفسّر التشابه النسبي في تراكيب المجتمعات الميكروبية لمناطق جغرافية متباعدة. كما تُشكّل الأحياء المجهرية الهوائية نواة تكثيف السحب ونقاط بدء تشكل المطر في ما يُسمى بظاهرة التلقيح الحيوي للغيوم (Bioprecipitation).

2.4 الأحياء المجهرية في البيئات المتطرفة

تُعدّ الأحياء المجهرية المتعيشة في البيئات القاسية (Extremophiles) من أكثر الكائنات إثارة للاهتمام في علم الأحياء الدقيقة، إذ تتحدى حدود الحياة كما هو مفهوم تقليديًا. تشمل هذه البيئات:

- البيئات شديدة الحرارة (Thermophiles/Hyperthermophiles): توجد أنواع بكتيرية وأركية قادرة على النمو عند درجات حرارة تتجاوز 80 و100 درجة مئوية على التوالي، كما هو الحال في الينابيع الحارة وفتحات الحرارة البركانية. وقد كانت اكتشاف إنزيم Taq Polymerase من بكتيريا Thermus aquaticus التي تعيش في ينابيع حارة، الأساسَ الذي قامت عليه تقنية تفاعل البوليميراز المتسلسل (PCR) التي غيّرت مسيرة علم الأحياء الجزيئي.

- البيئات المتجمدة (Psychrophiles): تنمو بعض الأنواع الميكروبية في درجات حرارة دون الصفر المئوي، كالتي توجد في الجليد القطبي والثلوج الدائمة، وتنتج إنزيمات نشطة في البرودة تجد تطبيقات صناعية واعدة.

- البيئات عالية الملوحة (Halophiles): تُزدهر الأحياء المجهرية الملحية في البحيرات والمستنقعات المُشبّعة بالملح كالبحر الميت وبحيرة Great Salt Lake، وتُنتج مركبات مثيرة للاهتمام من الناحية الصناعية والطبية.
- البيئات شديدة الحموضة أو القاعدية (Acidophiles/Alkaliphiles): توجد بعض الأنواع في بيئات ذات درجة حموضة أقل من 2 أو أعلى من 11، مما يجعلها كائنات استثنائية من حيث قدرتها على تنظيم توازن الأس الهيدروجيني داخليًا.

يُقدّم التطرف الحيوي (Extremophily) أدلة قوية على المرونة التطورية الهائلة للأحياء المجهرية، كما يُوفر رؤى قيّمة حول احتمال وجود الحياة في بيئات قاسية خارج الأرض (Rothschild & (Mancinelli, 2001).

2.5 لمحة تاريخية في علم الأحياء المجهرية

2.5.1 نشأة علم الأحياء المجهرية

يعود الفضل في ولادة علم الأحياء المجهرية إلى العالم الهولندي أنتوني فان ليوونهوك (Antonie van Leeuwenhoek) الذي طوّر عدسات مجهرية عالية الدقة في القرن السابع عشر 1674)م(وكان أول من شاهد الأحياء المجهرية وصنّفها، إذ أسماها »الحيوانات الصغيرة(Animalcules) «. فتح هذا الاكتشاف الثوري نافذةً على عالم حي كامل لم يكن للإنسان علم به من قبل. غير أن الفهم العلمي لدور هذه الكائنات في الأمراض والعمليات الطبيعية لم يتبلور إلا في القرن التاسع عشر على يد علماء كلويس باستور وروبرت كوخ.

أرسى لويس باستور الفرنسي (1822-1895) دعائم النظرية الجرثومية للأمراض (Germ Theory of Disease) بعد أن أثبت تجريبيًا أن التخمر والتعفن تُسبّبها كائنات دقيقة حية، وليست ظاهرتَي تعفن تلقائي. كما طوّر باستور أولى اللقاحات الحديثة ضد الكوليرا الدجاجية وداء الكلب والجمرة الخبيثة، فضلًا عن عملية البسترة التي لا تزال تُستخدم حتى اليوم لحفظ الأغذية السائلة. أما روبرت كوخ الألماني (1843-1910) فقد وضع مسلّماته الأربع الشهيرة (Koch's Postulates) كمعيار منهجي لإثبات العلاقة السببية بين الميكروب والمرض، واكتشف المتسببات في داء السل والكوليرا والجمرة الخبيثة، وحصل على جائزة نوبل في الفيزيولوجيا والطب عام 1905.

2.5.2 التطورات الحديثة في علم الأحياء المجهرية

شهد القرن العشرون ثورة حقيقية في علم الأحياء المجهرية، كان أبرزها اكتشاف DNA بوصفه المادة الوراثية، واكتشاف البنسلين على يد فلمنج عام 1928، واكتشاف البنية الجزيئية للحمض النووي من قِبَل واتسون وكريك عام 1953. في الجانب الإيكولوجي، أسهم كارل وويز (Carl Woese) في ستينيات وسبعينيات القرن الماضي في وضع تصنيف الحياة الثلاثي النطاقات (Three-Domain System) المُعتمَد حاليًا، بتمييزه مجموعة الأركيا عن البكتيريا استنادًا إلى الفروق الجزيئية في جين الـ 16S rRNA. وفي مطلع الألفية الثالثة، أحدث ظهور تقنيات التسلسل الجيني عالي الإنتاجية (Next-Generation Sequencing) ثورةً في علم الجينومية البيئية (Metagenomics)، مكّنت العلماء من دراسة المجتمعات الميكروبية مباشرةً في بيئاتها الطبيعية دون الحاجة إلى زراعتها في المختبر.

في السنوات الأخيرة، كشف مشروع الميكروبيوم البشري (Human Microbiome Project) والمبادرات البحثية الكبرى الأخرى عن مستويات غير مسبوقة من التعقيد والتنوع في المجتمعات الميكروبية المرتبطة بجسم الإنسان وبيئاته الطبيعية. وتتواصل الاكتشافات العلمية في هذا المجال بوتيرة متسارعة، مما يُنبئ بفصول جديدة مثيرة في مسيرة فهم الإنسان للأحياء المجهرية ودورها في الحياة.

3. دور الأحياء المجهرية في دورات العناصر

3.1 دورة الكربون

تُعدّ الأحياء المجهرية اللاعب الرئيسي في دورة الكربون العالمية، وهي الدورة التي تُحكم تدفق الكربون بين الغلاف الجوي والمحيطات والتربة والكائنات الحية. يُعيد المُحلِّلون الميكروبيون (Microbial Decomposers) الكربونَ المُثبَّت في المادة العضوية إلى الغلاف الجوي على شكل ثاني أكسيد الكربون من خلال عملية التنفس الخلوي (Falkowski et al., 2008, pp. 1034-1039). وفي البيئات اللاهوائية، يُفرز الأرشيا الميثاني (Methanogenic Archaea) غازَ الميثان (CH_4) أثناء تحليل المادة العضوية، مما يُؤدي دورًا مهمًا في دورة الكربون العالمية.

تُمثّل الطحالب والبكتيريا الزرقاء (Cyanobacteria) المُنتجين الأوليين الرئيسيين في الأنظمة البيئية المائية، إذ تُثبّت الكربون الجوي عبر عملية التمثيل الضوئي وتُدخله في سلاسل الغذاء المائية. يُقدَّر أن العوالق النباتية المحيطية تُثبّت نحو 48 مليار طن من الكربون سنويًا، وهو ما يُعادل تقريبًا إجمالي الكربون الذي تُثبّته النباتات البرية (Field et al., 1998, pp. 237-240). وتُسهم الأحياء المجهرية أيضًا في تدوير الكربون العضوي الذائب في المحيطات من خلال ما يُعرف بالحلقة الميكروبية (Microbial Loop)، التي تُحوّل الكربون العضوي المُذاب غير القابل لاستهلاك الحيوانات إلى كتلة حيوية ميكروبية يمكن أن تُستهلك بعد ذلك من قِبَل الكائنات الأعلى في الهرم الغذائي.

3.2 دورة النيتروجين

تُعدّ دورة النيتروجين من أكثر الدورات البيوجيوكيميائية اعتمادًا على الأحياء المجهرية، إذ تتحكم الميكروبات في كل مرحلة رئيسية من مراحلها. تُمثّل مرحلة التثبيت البيولوجي للنيتروجين (Biological Nitrogen Fixation) الخطوة الأولى والأكثر أهمية، حيث تحوّل بكتيريا مثبّتة للنيتروجين من أجناس Rhizobium وAzotobacter وAnabaena وغيرها غازَ النيتروجين الجوي (N_2) إلى أمونيا (NH_3) يمكن للكائنات الحية الاستفادة منها (Vitousek et al., 2013). يُعدّ هذا التثبيت البيولوجي المسار الرئيسي لإدخال النيتروجين في النظم البيئية الطبيعية، وتُقدَّر كميته بنحو 120 مليون طن سنويًا عالميًا.

تتوالى بعد ذلك مراحل أخرى تقوم بها الأحياء المجهرية المتخصصة:

- التمثيل الغذائي للأمونيا (Ammonification): تُحوّل بكتيريا مُحلِّلة البروتينات النيتروجينَ العضوي من البروتينات والأحماض الأمينية والنيوكليوتيدات الموجودة في المادة العضوية الميتة إلى أمونيوم (NH_4^+).
- النترجة (Nitrification): تُحوّل بكتيريا مُؤكسِدة للأمونيا من جنس Nitrosomonas الأمونيومَ إلى نتريت (NO_2^-)، ثم تحوّل بكتيريا أخرى من جنس Nitrobacter النتريتَ إلى نترات (NO_3^-).

- إزالة النترجة (Denitrification): تُحوّل بكتيريا مُزيلة للنتروجين مثل Pseudomonas وParacoccus النتراتَ في ظروف لاهوائية إلى غازي N_2O و N_2 وتُعيدهما إلى الغلاف الجوي.

تُظهر هذه الدورة الدقيقة كيف تعمل مجتمعات الأحياء المجهرية بصورة تكاملية ومتسلسلة لإعادة تدوير النيتروجين وتدفقه بين مكوّنات النظام البيئي (Vitousek et al., 2013).

3.3 دورة الكبريت

تلعب الأحياء المجهرية أيضًا دورًا محوريًا في دورة الكبريت، وإن كانت هذه الدورة أقل شهرةً من سابقتيها. تُحلّل البكتيريا المُؤكسِدة للكبريت المركباتِ الكبريتية المُختزَلة ككبريتيد الهيدروجين (H_2S) وتُحوّلها إلى كبريتات (SO_4^{2-}) في وجود الأكسجين، بينما تُختزل البكتيريا المُختزِلة للكبريتات هذه الكبريتاتِ في الظروف اللاهوائية إلى كبريتيد الهيدروجين. ويُعتبر كبريتيد ثنائي الميثيل (DMS) الذي يُنتجه العوالق النباتية من أهم الغازات الكبريتية التي تنطلق من المحيطات إلى الغلاف الجوي، ويُسهم في تشكيل نوى تكثيف الغيوم وبالتالي في تأثير مناخي لافت (Charlson et al., 1987, pp. 655-661).

3.4 دورة الفوسفور

على الرغم من أن الفوسفور لا يملك شكلًا غازيًا يجعله يتداول في الغلاف الجوي كالكربون والنيتروجين، تُؤدي الأحياء المجهرية دورًا جوهريًا في إذابة الفوسفور وإتاحته للنباتات. تُفرز البكتيريا الموجودة في التربة أحماضًا عضوية تُذيب الفوسفور الصخري وتجعله ذائبًا ومتاحًا للنباتات. كما تُسهم الفطريات الجذرية (Mycorrhizae) في امتصاص الفوسفور من مسافات بعيدة عبر شبكاتها الهيفية الدقيقة التي تمتد خارج مناطق النضوب المحيطة بالجذور مباشرة (Smith & (Read, 2008). وفي البيئات المائية، تُتنافس الأحياء المجهرية مع النباتات المائية والطحالب على الفوسفور المتاح، وهو عنصر شحيح في كثير من الأنظمة المائية.

4. الأحياء المجهرية والسلاسل الغذائية والشبكات البيئية

4.1 الأحياء المجهرية كمُنتجين أوليين

تُشكّل الأحياء المجهرية الضوئية كالطحالب والبكتيريا الزرقاء قاعدة الهرم الغذائي في كثير من النظم البيئية المائية والأرضية. تُنتج هذه الكائنات الكتلةَ الحيوية العضوية من الكربون الجوي واستغلال الطاقة الضوئية أو الطاقة الكيميائية، وتُمثّل نقطة الدخول الرئيسية للطاقة والكربون في شبكات الغذاء (Field et al., 1998, pp. 237-240). في المحيطات، تُقدَّر الإنتاجية الأولية للعوالق النباتية بما يعادل الإنتاجية الأولية لجميع الغابات المدارية مجتمعةً، مما يُبيّن الدور الهائل لهذه الكائنات الدقيقة في دعم الحياة على الأرض.

4.2 الأحياء المجهرية كمُحلِّلين

يُعدّ دور الأحياء المجهرية كمُحلِّلين من أهم الأدوار التي تؤديها في النظم البيئية، إذ تضطلع بتحليل المادة العضوية الميتة وإعادة تدوير العناصر الغذائية إلى صورة يمكن للكائنات الحية الأخرى الاستفادة منها. تقوم البكتيريا والفطريات بتفكيك الجزيئات العضوية المعقدة كالسليلوز واللجنين والكيراتين وغيرها من المواد المستعصية على التحلل إلى جزيئات بسيطة، مما يُمنع تراكم المواد الميتة ويضمن استمرارية تدفق العناصر الغذائية في النظام البيئي (Falkowski et al., 2008, pp. 1034-1039). وبدون هذه الخدمة الأساسية، ستتوقف دورات العناصر الغذائية وينهار النظام البيئي بأسره.

4.3 الحلقة الميكروبية في المحيطات

مفهوم الحلقة الميكروبية (Microbial Loop) الذي طُرح في ثمانينيات القرن الماضي ثوّر فهم شبكات الغذاء المحيطية، حيث يصف هذا المفهوم كيف تُعيد البكتيريا المحيطية الكربونَ العضوي الذائب (DOC) الذي تُطلقه العوالق النباتية والحيوانية إلى مسار الشبكة الغذائية عبر امتصاصه وتحويله إلى كتلة حيوية بكتيرية تُستهلَك بعد ذلك من قِبَل العوالق الحيوانية الأولية كالأوليات والقشريات الصغيرة. تُمثّل الحلقة الميكروبية قناةً أساسية لإعادة تدوير الكربون والعناصر الغذائية في المحيطات، وتُقدَّر مساهمتها بنحو 20-50% من تدفق الكربون في الأنظمة البحرية (Azam & (Malfatti, 2007).

4.4 التفاعلات بين الأحياء المجهرية والكائنات الأكبر حجمًا

تُقيم الأحياء المجهرية علاقات متعددة ومعقدة مع الكائنات الحية الأكبر حجمًا، من التكافل والتنافس والتطفل. تُعدّ علاقة البكتيريا الجذرية (Rhizobia) مع النباتات البقولية من أبرز أمثلة

التكافل الإلزامي، حيث تُوفر البكتيريا للنبات النيتروجين المُثبَّت مقابل السكريات الكربونية (Moran, 2015, pp. 699-702). كذلك تُقيم الفطريات الجذرية علاقة تكافلية حيوية مع النباتات تُعزز قدرتها على امتصاص المياه والمعادن، خاصة في الظروف الجافة والتربة الفقيرة بالعناصر المغذية.

في مقابل التكافل، تُعدّ الطفيلية (Parasitism) من أكثر علاقات الأحياء المجهرية مع الكائنات الحية الكبيرة انتشارًا، وتُمثّل الأمراض المعدية تجليًا مباشرًا لها. كذلك يُوجد ما يُسمى بالتنافس الميكروبي (Microbial Competition)، حيث تتنافس مجتمعات الأحياء المجهرية على الموارد المتاحة من غذاء ومساحة، مما يُؤثر على هيكل ووظيفة هذه المجتمعات.

5. الأحياء المجهرية وصحة الإنسان والحيوان والنبات

5.1 الأحياء المجهرية الممرضة

تُسبّب الأحياء المجهرية الممرضة طيفًا واسعًا من الأمراض التي أثّرت تأثيرًا بالغًا على الحضارة الإنسانية عبر التاريخ. تشمل الأمراض البكتيرية التاريخية المُدمِّرة: الطاعون الدبلي (Yersinia pestis) الذي أودى بحياة ما يُقدَّر بثلث سكان أوروبا في القرن الرابع عشر الميلادي، والسل (Mycobacterium tuberculosis) الذي لا يزال أحد أبرز أسباب الوفاة بسبب الأمراض المعدية على مستوى العالم، والكوليرا (Vibrio cholerae) الذي تفشّى في موجات وبائية متعددة عبر التاريخ. أما على صعيد الأمراض الفيروسية، فيكفي استحضار وباء الإنفلونزا الإسبانية عام 1918 الذي أودى بحياة ما بين 50 و100 مليون شخص، وجائحة كوفيد19- الأخيرة، للتدليل على الأثر التاريخي الهائل للأحياء المجهرية الممرضة (Lederberg, 2000, pp. 287-293).

تتميز الأحياء المجهرية الممرضة بآليات إمراضية (Virulence Mechanisms) متنوعة تُمكّنها من الإفلات من الجهاز المناعي للعائل وإحداث المرض. تشمل هذه الآليات إنتاج السموم (Toxins)، والقدرة على الاختفاء داخل خلايا العائل، وتشكيل الأغشية الحيوية (Biofilms)، والنقل الجيني الأفقي لجينات المقاومة. وتُمثّل مشكلة مقاومة المضادات الحيوية تحديًا صحيًا عالميًا خطيرًا ناجمًا عن هذه الآليات التكيفية، إذ يُقدَّر أن 700,000 شخص يموتون سنويًا جراء العدوى بالبكتيريا المقاومة (W(HO, 2019).

5.2 الأحياء المجهرية النافعة للصحة البشرية

على النقيض من المُمرّضات، تؤدي الأحياء المجهرية النافعة أدوارًا لا غنى عنها في الحفاظ على صحة الإنسان. يُنتج التخمير الميكروبي الأغذيةَ والمشروبات المخمّرة المغذية كالزبادي والجبن والكفير والكيمتشي والخبز المُخمَّر، وهي أغذية ذات قيمة غذائية وصحية عالية يعتمد عليها الإنسان منذ آلاف السنين. كما تُنتج الأحياء المجهرية الصناعية المُضادات الحيوية والأنسولين والإنترفيرون وغيرها من الأدوية الحيوية الأساسية (Madigan et al., 2019).

تُعدّ المضادات الحيوية من أبرز الإسهامات الميكروبية في الطب الحديث، وقد غيّرت مسيرة الطب البشري تغييرًا جوهريًا منذ اكتشاف البنسلين عام 1928 على يد ألكسندر فلمنج من فطريات البنيسيليوم (Penicillium). تُنتج البكتيريا والفطريات مضادات حيوية طبيعية كآلية دفاعية في تنافسها على الموارد مع الكائنات الدقيقة الأخرى، ويستغل الإنسان هذه المركبات لعلاج الأمراض البكتيرية. تشمل أبرز هذه المضادات البيولوجية المشتقة من أحياء مجهرية: الأمبيسيلين والتتراسيكلين والسيفالوسبورين والإريثروميسين والستربتوميسين، وغيرها من المركبات التي أنقذت ملايين الأرواح على مدى عقود.

تجدر الإشارة أيضًا إلى المنتجات الحيوية (Probiotics) التي هي عبارة عن مستحضرات تحتوي على أحياء مجهرية حيّة تُدار بكميات كافية لتُعطي الإنسان فائدة صحية معيّنة. من أبرز الكائنات الدقيقة المُستخدمة كمنتجات حيوية: بكتيريا اللاكتوباسيلس (Lactobacillus) والبيفيدوباكتيريوم (Bifidobacterium)، إذ تُساعد على تحسين صحة الجهاز الهضمي وتعزيز المناعة ومنع الإسهال المصاحب للمضادات الحيوية. وقد أثبتت الدراسات السريرية فعالية المنتجات الحيوية في تقليل أعراض متلازمة القولون العصبي وداء كرون والتهاب القولون التقرحي.

5.3 الأحياء المجهرية وصحة الحيوان

تُسبّب الأحياء المجهرية أمراضًا وبائية خطيرة تؤثر على الثروة الحيوانية وتُلحق أضرارًا اقتصادية فادحة بقطاع الزراعة والإنتاج الحيواني. من أبرز هذه الأمراض: حمى القلاع والحافر (Foot and Mouth Disease) الناجمة عن فيروس من عائلة Picornaviridae، وجدري الطيور والإنفلونزا الطيرية (H5N1, H7N9) التي تُشكّل تهديدًا للثروة الداجنة وخطرًا

محتملًا على الصحة العامة. كما تُسبب بعض البكتيريا كـ Brucella abortus داء البروسيلات في الأبقار والأغنام والماعز، وقد تنتقل إلى الإنسان عبر منتجات الألبان غير المبسترة.

في المقابل، يعتمد قطاع الإنتاج الحيواني على الأحياء المجهرية في تعزيز كفاءة التحويل الغذائي لدى المجترات. تلعب الأحياء المجهرية في الكرش (Rumen) دورًا لا غنى عنه في هضم الألياف النباتية الصعبة التحلل كالسيليلوز والهيميسيليلوز وتحويلها إلى أحماض دهنية طيارة يمتصها الحيوان ويستخدمها مصدرًا للطاقة. يُعدّ هذا التكافل الميكروبي في الكرش من أروع أمثلة التشارك الوظيفي بين الكائنات الحية والميكروبات، إذ تحتوي الحيوانات المجترة كالأبقار والأغنام على مئات الأنواع الميكروبية في كرشها يتشارك كل منها في جانب من جوانب هضم الغذاء وتخميره.

5.4 الأحياء المجهرية وصحة النبات

تُعدّ الأمراض النباتية الميكروبية من أبرز أسباب خسائر المحاصيل الزراعية عالميًا، إذ تُقدَّر الخسائر الاقتصادية الناجمة عنها بعشرات المليارات من الدولارات سنويًا. تشمل الأمراض البكتيرية النباتية: مرض اللفحة النارية في التفاح والكمثرى الناجم عن بكتيريا Erwinia amylovora، ومرض عفن البطاطس الناجم عن بكتيريا Ralstonia solanacearum التي أودت بحياة الملايين في مجاعة أيرلندا عام 1840. كما تُسبّب الفطريات أمراضًا نباتية متعددة كالصدأ والبياض الدقيقي والذبول الفيوزاري (Fusarium wilt) التي تُهدد محاصيل الحبوب والخضروات والفاكهة.

في المقابل، تُقدّم الأحياء المجهرية خدمات جليلة للزراعة عبر تعزيز نمو النباتات وحمايتها من الأمراض. تُصنَّف بكتيريا معززة نمو النبات (Plant Growth Promoting Rhizobacteria PGPR) من أهم المدخلات الحيوية في الزراعة المستدامة، وتشمل أجناسًا كـ Azospirillum وPseudomonas وBacillus وTrichoderma، التي تُحسّن امتصاص النبات للعناصر الغذائية، وتُنشّط مقاومته الجهازية للمسببات المرضية، وتُفرز مركبات تُنظّم نمو النبات كالأوكسينات والسيتوكينينات والجبريلينات (Berendsen et al., 2012, pp. 478-486).

5.5 الأغشية الحيوية (Biofilms) وأهميتها

تُمثّل الأغشية الحيوية (Biofilms) أحد أكثر أشكال النمو الميكروبي انتشارًا وأهمية في الطبيعة وفي الوسط الصحي. تُعرَّف الأغشية الحيوية بأنها مجتمعات منظمة من الأحياء المجهرية تلتصق بالأسطح وتُغلَّف بمصفوفة من البوليمرات العضوية خارج الخلوية (EPS). تُوجد الأغشية الحيوية على أسطح الأسنان كما في ترسبات اللويحات السنية، وعلى الأجهزة الطبية المزروعة كالقسطرات والصمامات الاصطناعية وتركيبات المفاصل، وفي شبكات توزيع المياه، وعلى الصخور في قيعان الأنهار، وفي مجاري الصرف الصحي والبيئات الصناعية (Costerton et al., 1999, pp. 1318-1322).

تتميز الأغشية الحيوية بمقاومة أعلى بكثير من مقاومة الخلايا العائمة (Planktonic Cells) للمضادات الحيوية وعوامل التعقيم ودفاعات الجهاز المناعي، إذ يُقدَّر أن الخلايا داخل الغشاء الحيوي قد تكون أكثر مقاومة بما يتراوح بين 10 و1000 مرة مقارنةً بالخلايا الحرة. ويُعزى ذلك إلى عدة عوامل منها: انخفاض معدل نمو الخلايا داخل الغشاء، وتغيير التعبير الجيني، والانتشار المحدود للمضادات الحيوية عبر مصفوفة EPS، وتطور الخلايا المستمرة (Persister Cells) المقاومة. تُسبّب الأغشية الحيوية ما يزيد على 65% من جميع الالتهابات البشرية المرتبطة بالرعاية الصحية، وهو ما يجعل مكافحتها تحديًا طبيًا راهنًا.

في السياق الإيجابي، تُستغل الأغشية الحيوية في عمليات معالجة مياه الصرف الصحي ضمن المفاعلات الحيوية، وفي تعزيز خصوبة التربة عبر الأغشية الحيوية الجذرية التي تُشكّل واجهة نشطة بين الميكروبيوم والجذور. كما تُطوَّر تطبيقات حيوية تقوم على توجيه سلوك الأغشية الحيوية لتحسين كفاءة المفاعلات الميكروبية الكهروحيوية في إنتاج الكهرباء من المادة العضوية.

6. الميكروبيوم البشري: العالم الداخلي الخفي

6.1 تعريف الميكروبيوم وأهميته

يُشير مصطلح الميكروبيوم (Microbiome) إلى المجتمع الكامل من الأحياء المجهرية التي تعيش على جسم الإنسان وداخله، وتشمل البكتيريا والفطريات والفيروسات والأركيا. يُقدَّر عدد الخلايا الميكروبية في جسم الإنسان بنحو 38 تريليون خلية، مقارنةً بنحو 30 تريليون خلية بشرية، مما يُعني أن كل إنسان هو في حقيقته نظام بيئي متكامل يشتمل على كميات هائلة من الأحياء المجهرية (Sender et al., 2016, pp. 337-340). يحمل الميكروبيوم البشري

معلوماتٍ وراثيةً تُقدَّر بأكثر من 3 ملايين جين ميكروبي، وهو ما يتجاوز بكثير عدد الجينات البشرية البالغة نحو 20,000 جين.

6.2 الميكروبيوم المعوي

يُعدّ الميكروبيوم المعوي (Gut Microbiome) الأكثر دراسةً وفهمًا من بين جميع أجزاء الميكروبيوم البشري، وتتضمن وظائفه الأساسية:

- الهضم وامتصاص الغذاء: تُساعد الميكروبات المعوية في هضم الألياف الغذائية وإنتاج الأحماض الدهنية القصيرة السلسلة (SCFAs) كالبيوتيرات والبروبيونات والأسيتات، التي تُوفّر طاقةً لخلايا الجدار المعوي وتُنظّم عمليات الاستقلاب (Turnbaugh et al., 2006, pp. 1027-1031).
- تصنيع الفيتامينات: تُصنّع ميكروبات الأمعاء فيتامينات K وB_{12} والبيوتين والفولات التي لا يستطيع الإنسان تصنيعها بنفسه.
- تطوير الجهاز المناعي: تُدرَّب خلايا الجهاز المناعي في مرحلة الطفولة على التمييز بين مسببات الأمراض والميكروبات النافعة بفضل التفاعل المستمر مع ميكروبات الأمعاء، مما يُعزز التسامح المناعي ويُقلل من خطر أمراض المناعة الذاتية (Belkaid & Hand, 2014).
- محور الأمعاء والدماغ (Gut-Brain Axis): كشفت الأبحاث الحديثة عن صلة وثيقة بين الميكروبيوم المعوي وصحة الدماغ والسلوك، إذ تُنتج بعض ميكروبات الأمعاء ناقلات عصبية كالسيروتونين والدوبامين تُؤثر على المزاج والإدراك. وقد ربطت دراسات عديدة بين اضطرابات الميكروبيوم المعوي والأمراض النفسية كالاكتئاب والقلق والتوحد (Cryan & Dinan, 2012).

6.3 العوامل المؤثرة على الميكروبيوم

يتأثر تركيب الميكروبيوم البشري بعوامل متعددة تشمل: طريقة الولادة)طبيعية أو قيصرية(، والرضاعة الطبيعية مقابل الصناعية، والتركيبة الغذائية، واستخدام المضادات الحيوية، والبيئة المحيطة، والتغيرات العمرية، والجينات الخاصة بالفرد. يرتبط استخدام المضادات الحيوية

بانخفاض ملحوظ في تنوع الميكروبيوم، وقد يستغرق التعافي التام أسابيع أو أشهرًا. ويُقال إن الميكروبيوم يُمثّل "بصمة حيوية" فريدة لكل فرد تعكس تاريخه الصحي وأنماط حياته.

7. الأحياء المجهرية والمناخ العالمي

7.1 تأثير الأحياء المجهرية على الغلاف الجوي

تُؤدي الأحياء المجهرية دورًا محوريًا في تنظيم تركيبة الغلاف الجوي وبالتالي في تنظيم المناخ العالمي. ويُعتبر ثاني أكسيد الكربون (CO_2) والميثان (CH_4) وأكسيد النيتروز (N_2O) من أهم الغازات الدفيئة التي تُساهم الأحياء المجهرية في إنتاجها أو استهلاكها. تُنتج الأركيا الميثانية في البيئات اللاهوائية كالمستنقعات والتربة الجليدية (Permafrost) وأمعاء الحيوانات كميات كبيرة من الميثان، وهو غاز دفيئة أشد تأثيرًا من CO_2 بمقدار 28 مرة على مدى مئة عام (IPCC, 2021).

7.2 التغير المناخي وأثره على الأحياء المجهرية

يُؤثّر التغير المناخي على مجتمعات الأحياء المجهرية من خلال تغيير درجات الحرارة والهطول والجفاف وحموضة المحيطات، مما قد يُؤدي إلى تحولات في تركيبة المجتمعات الميكروبية ووظائفها البيئية. وتُشير الدراسات إلى أن ذوبان التربة الجليدية في المناطق القطبية جراء الاحترار العالمي يُحرّر كميات ضخمة من المادة العضوية كانت محبوسة فيها لآلاف السنين، وتبدأ الأحياء المجهرية فورًا في تحليلها وإطلاق غازات دفيئة تُسرّع بدورها وتيرة الاحترار في حلقة مفرغة خطيرة (Schuur et al., 2015, pp. 171-179).

7.3 التنوع الميكروبي وحفظ البيئة

7.3.1 التنوع الميكروبي كركيزة للتنوع البيولوجي

يُشكّل التنوع الميكروبي المكوّنَ الأكبر والأكثر أهمية في التنوع البيولوجي الكلي على الأرض، غغير أنه يظل الأقل فهمًا والأقل تمثيلًا في استراتيجيات الحفاظ على البيئة. تُقدَّر الكتلة الحيوية للبكتيريا وحدها بنحو 70 جيجا طن من الكربون، مقارنةً بنحو 2 جيجا طن للحيوانات بأسرها، وهو ما يُبيّن بجلاء حجم الحضور الميكروبي في المحيط الحيوي (Bar-On et al, 2018).

يرتبط التنوع الميكروبي بصحة النظم البيئية ومرونتها، إذ تُسهم الأنواع الميكروبية المختلفة في وظائف بيئية لا يمكن لنوع واحد أن يؤديها بمفرده.

7.3.2 التلوث البيئي وتأثيره على الأحياء المجهرية

يُؤدي التلوث البيئي بالمواد الكيميائية الصناعية والمعادن الثقيلة والمبيدات الحشرية والمضادات الحيوية إلى اختلال بنية المجتمعات الميكروبية وتقليص تنوعها. تُقدّم تقنية التسلسل الجيني الشامل (Metagenomics) أداةً علمية قوية لرصد هذه التغيرات وتتبع تأثيرات التلوث على التنوع الميكروبي في التربة والمياه. وقد ربطت دراسات عديدة بين انخفاض التنوع الميكروبي في التربة المُلوَّثة وتراجع إنتاجيتها الزراعية ووظائفها البيئية (Atlas & Hazen, 2011).

8. خاتمة المبحث

يتضح من خلال هذا المبحث أن الأحياء المجهرية تُمثّل العمود الفقري للحياة على كوكب الأرض، حيث تلعب أدوارًا حيوية ومتعددة في جميع النظم البيئية تقريبًا. من تثبيت النيتروجين الجوي وإنتاج الأكسجين، إلى تحليل المواد العضوية وإعادة تدوير العناصر الغذائية، إلى تنظيم المناخ العالمي ودعم صحة الكائنات الحية، تُظهر الأحياء المجهرية تنوعًا وظيفيًا هائلًا يفوق بكثير ما يمكن توقعه من كائنات بهذا الحجم الدقيق (Falkowski et al., 2008, pp. 1034-1039).

إن التنوع البيولوجي الميكروبي يُعتبر أساسًا للتنوع البيولوجي الإجمالي على الأرض، ويرتبط ارتباطًا وثيقًا بالوظائف البيئية المتعددة التي تدعم استمرارية الحياة (Fierer, 2017, pp. 579-590). تُظهر الأبحاث الحديثة أن فهم الأحياء المجهرية وتفاعلاتها مع البيئة المحيطة ومع الكائنات الحية الأخرى أصبح ضروريًا لمواجهة التحديات البيئية والصحية والزراعية المعاصرة. من التغير المناخي إلى الأمراض المعدية الناشئة، ومن الأمن الغذائي إلى جودة المياه، تلعب الأحياء المجهرية دورًا محوريًا في جميع هذه القضايا.

على الرغم من التقدم الكبير في تقنيات دراسة الأحياء المجهرية، خاصة من خلال تقنيات التسلسل الجيني الحديثة والجينومية البيئية (Metagenomics)، إلا أن معظم التنوع الميكروبي على الأرض لا يزال غير مكتشف أو مدروس بشكل كافٍ. تُشير التقديرات إلى أن أقل من 1% من الأنواع الميكروبية قد تمت زراعتها ودراستها في المختبر، مما يُبرز الحاجة إلى مزيد من البحث

والاستكشاف. إن سد هذه الفجوة المعرفية سيُساهم في فهم أعمق للعمليات البيئية، وفي تطوير تطبيقات جديدة في الطب والزراعة والصناعة والحفاظ على البيئة.

يتطلب الحفاظ على الأحياء المجهرية ووظائفها البيئية نهجًا شاملًا يُدمج الاعتبارات الميكروبية في استراتيجيات الحفاظ على التنوع البيولوجي والإدارة البيئية. في النهاية، فإن مستقبل الحياة على الأرض يعتمد بشكل كبير على قدرتنا على فهم وحماية هذا العالم الخفي للأحياء المجهرية الذي يُشكّل الأساس الحيوي لكل ما نعرفه ونعتمد عليه.

المبحث الثاني: الوراثة وانتقال الصفات

مقدمة المبحث

ثمة سؤال لازم الإنسان منذ فجر وعيه، لم يجد له إجابة شافية حتى وقت قريب من تاريخه العلمي: لماذا يشبه الأبناء آباءهم؟ ولماذا تتوارث الأسر بعض السمات جيلًا بعد جيل؟ ولماذا يختلف إخوة في السمات على الرغم من انحدارهم من أبوين واحدين؟ كانت هذه الأسئلة تُحيّر العقول وتُلهم الخيال، وتدفع الفلاسفة قبل العلماء إلى تأملات لا تنتهي، حتى جاء القرن التاسع عشر بالرهبان والمختبرات ليضع الأُسس الأولى لعلم بالغ الدقة والعمق، هو علم الوراثة (Genetics).

الوراثة ليست مجرد باب من أبواب الأحياء، بل هي الخيط الذي يربط الأجيال ببعضها، ويُفسّر استمرارية الأنواع وتطورها. وعلى الرغم من أن كلمة "جين" لم تُصَكّ إلا في عام 1909 على يد العالم الدنماركي فيلهلم يوهانسن، فإن مضمونها كان يسري في الطبيعة منذ ملايين السنين قبل أن يُدركه عقل بشري. من حدائق غريغور مندل في دير برنو، إلى مختبر موريس ويلكنز وروزاليند فرانكلين وواتسون وكريك في كامبريدج، وصولًا إلى المشاريع الجينومية الكبرى في مطلع الألفية الثالثة ـــ كان كل اكتشاف يكشف عن طبقة أعمق من التعقيد، ويُجيب عن سؤال ليفتح أمامنا عشرة أسئلة جديدة.

يسعى هذا المبحث إلى تناول علم الوراثة بأسلوب يُوازن بين العمق العلمي وسلاسة الطرح، مبتدئًا بالمفاهيم الأساسية، ومرورًا بقوانين مندل وآليات الانتقال الوراثي، ثم صعودًا إلى مستوى

الجزيئات والجينوم، ومُختتمًا بالأبعاد المعاصرة للوراثة وتداعياتها على صحة الإنسان والتنوع البيولوجي.

1. المفاهيم الأساسية في علم الوراثة

1.1 تعريف علم الوراثة ومحاوره الكبرى

علم الوراثة (Genetics) هو فرع الأحياء المعني بدراسة الجينات والوراثة والتباين الوراثي في الكائنات الحية. يتقاطع هذا العلم مع ميادين معرفية متعددة كعلم الأحياء الجزيئي، والأحياء الخلوية، وعلم الأحياء التطوري، والطب، والزراعة (Griffiths et al., 2015). ويمكن تصنيف محاوره الكبرى في ثلاثة مستويات متكاملة:

- المستوى الكلاسيكي (Classical Genetics): يهتم بدراسة أنماط انتقال الصفات الوراثية عبر الأجيال وفق القواعد التي وضعها مندل وخلفاؤه.
- المستوى الخلوي (Cytogenetics): يدرس الكروموسومات بنيةً ووظيفةً وسلوكًا أثناء الانقسامات الخلوية، وارتباطها بالصفات الوراثية.
- المستوى الجزيئي (Molecular Genetics): يُعنى بالبنية الكيميائية للمادة الوراثية وآليات تعبيرها، ويُعدّ الأكثر نشاطًا وتطورًا في الأبحاث المعاصرة (Watson et al., 2014).

شكل مفاهيمي: المحاور الكبرى لعلم الوراثة

- الوراثة الكلاسيكية: قوانين الفصل والتوزيع وما تلا من توسعات.
- الوراثة الخلوية: بنية الكروموسومات وسلوكها في الانقسامات الخلوية.
- الوراثة الجزيئية: تضاعف DNA والنسخ والترجمة وتنظيم التعبير الجيني.

1.2 المصطلحات الجوهرية في علم الوراثة

لا يمكن الخوض في تفاصيل الوراثة دون استيعاب جهازها المصطلحي، الذي يُشكّل لغةً دقيقة تُتيح التواصل العلمي بلا لبس. والجدول التالي يجمع أبرز هذه المصطلحات مع تعريفها الموجز:

جدول (1): المصطلحات الجوهرية في علم الوراثة

المصطلح العربي	المصطلح الإنجليزي	التعريف
الجين	Gene	الوحدة الوظيفية للمادة الوراثية التي تُحدد صفةً معينة
الأليل	Allele	الأشكال البديلة للجين الواحد على نفس الموقع الكروموسومي
النمط الجيني	Genotype	التركيب الجيني للكائن الحي)ما يحمله من أليلات(
النمط الظاهري	Phenotype	الصفات الظاهرة الناجمة عن التفاعل بين الجينوم والبيئة
السيادة	Dominance	ظهور أثر أليل واحد في الأفراد ثنائية الأليل)هجينة(
التنحي	Recessiveness	عدم ظهور أثر الأليل إلا في حالة النقاء الجيني)متماثل الأليلات(
متماثل الأليلات	Homozygous	امتلاك أليلين متطابقين للجين الواحد
متباين الأليلات	Heterozygous	امتلاك أليلين مختلفين للجين الواحد
الكروموسوم	Chromosome	الهيكل الخيطي المحمّل بالمادة الوراثية في نواة الخلية
الجينوم	Genome	مجموع المادة الوراثية الكاملة لكائن حي
الطفرة	Mutation	تغيير دائم في تسلسل الحمض النووي
التعبير الجيني	Gene Expression	العملية التي تُترجَم فيها المعلومة الجينية إلى بروتين

2. النشأة التاريخية لعلم الوراثة

2.1 ما قبل مندل: تراكم الملاحظات دون نظرية

قبل أن يُرسي مندل قواعد الوراثة، كانت الفلاحة والتربية الحيوانية تُشير منذ آلاف السنين إلى أن الصفات تنتقل من الآباء إلى الأبناء. زرع المصريون القدماء والرومان والعرب نظريات أولية حول التوارث، وإن افتقرت إلى الصرامة التجريبية. كان أبقراط يُعزو التوارث إلى "بذور" تُطلقها جميع أعضاء الجسم، بينما رأى أرسطو أن الأب يُورّث الصفة والأم تُورّث المادة. ظلت هذه

الآراء تتناوش بعضها قرونًا طويلة دون أن تخضع لاختبار منهجي، حتى أصبحت الفلسفة الطبيعية في القرن التاسع عشر مُهيَّأة لتقبّل تفسير تجريبي.

2.2 غريغور مندل: ميلاد علم الوراثة

في الفترة الممتدة بين عامي 1856 و1863، أجرى الراهب النمساوي غريغور يوهان مندل (Gregor Johann Mendel) تجارب تهجين على نبات البازلاء (Pisum sativum) في حديقة دير القديس توما في برنو. اختار مندل سبع صفات متمايزة تمامًا ذات مظهرين متعارضين، وراقبها عبر ثلاث سنوات على أكثر من 10,000 نبتة، ودوّن نتائجه بدقة رياضية لافتة (Mendel, 1866).

ما يُميّز مندل عن سابقيه ليس فقط صرامته التجريبية، بل انتباهه الحاد لنسب الأعداد في أجيال الهجين. حين لاحظ أن الجيل الثاني (F_2) يُنتج ثلاثة أفراد بالصفة السائدة مقابل فرد بالصفة المتنحية، لم يكتفِ بتسجيل الملاحظة، بل نسج منها نظرية رياضية متماسكة. نشر مندل نتائجه عام 1866 في مجلة الجمعية العلمية لمورافيا، لكنها ظلت طي النسيان ستةً وثلاثين عامًا حتى اكتشفها ثلاثة علماء مستقلون في آنٍ واحد عام 1900: هوغو دي فريس وكارل كورينس وإيريك فون تشيرماك.

3. قوانين مندل في الوراثة

3.1 القانون الأول: قانون الفصل (Law of Segregation)

ينص القانون الأول لمندل على أن كل فرد يحمل زوجًا من العوامل الوراثية)الأليلات(لكل صفة، وأن هذين العاملين يُفصلان عند تكوين الأمشاج (Gametes) بحيث يحمل كل مشيج عاملًا واحدًا فقط. هذا الفصل يحدث أثناء الانقسام الاختزالي (Meiosis) حين تنفصل الكروموسومات المتماثلة إلى خلايا مختلفة (Griffiths et al., 2015).

مثال توضيحي: تهجين أحادي الهجين (Monohybrid Cross)

ليكن (A) أليل السيادة للون البذرة الأصفر، و(a) الأليل المتنحي للون الأخضر.

الجيل الأبوي) AA :(P)أصفر نقي) aa × (أخضر نقي(

الجيل الأول (F_1): جميع الأفراد Aa)أصفر ظاهريًا(

الجيل الثاني (F_2): AA: Aa: aa بنسبة 1:2:1 جينيًا، و3 صفراء:1 خضراء ظاهريًا

جدول (2): مربع بانيت (Punnett Square) لتهجين أحادي الهجين في الجيل الثاني

	a	A
A	) AAأصفر - نقي(	) Aaأصفر - هجين(
a	) Aaأصفر - هجين(	) aaأخضر - نقي(

النتيجة: النسبة الظاهرية) 3:1أصفر: أخضر(، والنسبة الجينية 1:2:1

3.2 القانون الثاني: قانون التوزيع الحر (Law of Independent Assortment)

يُقرّر القانون الثاني لمندل أن عوامل الصفات المختلفة تتوزع بصورة مستقلة عند تكوين الأمشاج، أي أن انتقال أليلات جين معين لا يؤثر على انتقال أليلات جين آخر يقع على كروموسوم مختلف. وقد أثبت مندل ذلك من خلال تجارب التهجين الثنائي (Dihybrid Cross)، حين تتبّع صفتين في وقت واحد: لون البذرة وشكلها (Griffiths et al., 2015).

جدول (3): النسب المتوقعة في التهجين الثنائي (F_2)

النمط الظاهري	الأنماط الجينية المحتملة	النسبة المتوقعة	النسبة المئوية
أصفر ناعم (A_B_)	AABB, AABb, AaBB, AaBb	9	56.25%
أصفر مجعّد (A_bb)	AAbb, Aabb	3	18.75%
أخضر ناعم (aaB_)	aaBB, aaBb	3	18.75%
أخضر مجعّد (aabb)	aabb	1	6.25%

الملاحظة: لا يسري هذا القانون إلا على الجينات الموجودة على كروموسومات مختلفة، أما الجينات المرتبطة (Linked Genes) فتنتقل معًا بنسب تختلف عن الـ 9:3:3:1.

3.3 حدود قوانين مندل وما تجاوزتها

أثبتت الأبحاث اللاحقة أن قوانين مندل ليست مطلقة، وأن ثمة استثناءات مهمة تُثري الصورة بدلًا من أن تنقضها:

شكل مفاهيمي: حالات الوراثة التي تتجاوز النموذج المندلي البسيط

- السيادة غير الكاملة والسيادة المشتركة تغيران النسب الظاهرية المتوقعة.
- الارتباط الجيني يجعل بعض الجينات تنتقل معًا على الكروموسوم نفسه.
- التفاعل الجيني قد يجعل جينًا يخفي أثر جين آخر أو يعدله.
- الصفات الكمية، مثل الطول والوزن، تتأثر بجينات متعددة وبالبيئة.

4. المادة الوراثية: الحمض النووي DNA

4.1 رحلة الاكتشاف: من غريفيث إلى واتسون وكريك

كان الجدل في أربعينيات القرن الماضي محتدمًا حول طبيعة المادة الوراثية؛ هل هي البروتينات أم الحمض النووي؟ أجرى فريدريك غريفيث عام 1928 تجربته الشهيرة التي أثبتت وجود "مادة محوّلة" قادرة على نقل الصفات الوراثية بين بكتيريا المكورات الرئوية، وأكد أفيري وماكليود وماكارتي عام 1944 أن هذه المادة هي DNA وليس البروتين (Avery et al., 1944, pp. 137-158). ثم جاءت تجارب هيرشي وتشيس عام 1952 لتُزيل آخر شكوك المتشككين، قبل أن يُنشر النموذج الشهير للحلزون المزدوج على يد واتسون وكريك عام 1953، مستفيدَين من الصورة الحيودية للأشعة السينية التي التقطتها روزاليند فرانكلين (Watson & Crick, 1953).

4.2 بنية الحمض النووي DNA

يتركب الحمض النووي الريبوزي المنزوع الأكسجين (DNA) من وحدات بنائية تُسمى النيوكليوتيدات (Nucleotides)، تتكوّن كل منها من ثلاثة مكوّنات:

- سكر الديوكسيريبوز (Deoxyribose)
- مجموعة فوسفات (Phosphate Group)
- قاعدة نيتروجينية (Nitrogenous Base)

تتنوع القواعد النيتروجينية في أربعة أنواع: الأدينين (A)، والثيامين (T)، والجوانين (G)، والسيتوزين (C). تترابط القواعد وفق قاعدة التكامل: A مع T برابطتين هيدروجينيتين، وG مع C بثلاث روابط، مُشكِّلةً شريطَي الحلزون المتضامَّين (Watson & Crick, 1953).

جدول (4): مقارنة بين DNA و RNA

الخاصية	DNA	RNA
موقعه الرئيسي	نواة الخلية +) الميتوكوندريا والبلاستيد(	نواة الخلية والسيتوبلازما
نوع السكر	ديوكسيريبوز	ريبوز
القواعد النيتروجينية	A, T, G, C	A, U, G, C
الشريطية	مزدوج الشريط	أحادي الشريط)في الغالب(
الوظيفة	تخزين المعلومة الوراثية	نقل المعلومة وترجمتها إلى بروتين
الاستقرار	عالي الاستقرار	أقل استقرارًا)أعمر أقصر(
الأنواع	نوع واحد رئيسي	mRNA, tRNA, rRNA, miRNA...

4.3 تضاعف DNA: ضمان الاستمرارية

تضمن عملية التضاعف (Replication) أن تحمل كل خلية وليدة نسخةً كاملةً ودقيقةً من الجينوم. تنطوي العملية على انفصال شريطَي الحلزون بفعل إنزيم الهيليكاز (Helicase)، ثم يعمل إنزيم DNA بوليميراز على قراءة كل شريط كقالب ويبني عليه شريطًا تكميليًا جديدًا وفق قاعدة الأزواج المتكاملة (Alberts et al., 2015). تبلغ سرعة التضاعف في الخلايا البشرية نحو 50 نيوكليوتيدًا في الثانية، بينما تصل في بعض بكتيريا القولون (E. coli) إلى 1000 نيوكليوتيد في الثانية.

شكل مفاهيمي: مراحل تضاعف الحمض النووي DNA

- يفك إنزيم الهيليكاز الحلزون المزدوج ويكشف الشريطين القالبين.
- يبني DNA بوليميراز الشريط الأمامي بصورة متواصلة.
- يبنى الشريط المتأخر على هيئة قطع أوكازاكي ثم توصل معًا.
- ينتج جزيئان مزدوجان، يحتوي كل منهما على شريط قديم وآخر جديد.

5. الكروموسومات والوراثة الخلوية

5.1 الكروموسومات: رفوف المادة الوراثية

الكروموسومات (Chromosomes) هي الهياكل الخيطية الموجودة في نواة الخلية، المُركَّبة من DNA ملتفٍّ حول بروتينات الهيستون (Histones) في هيكل متراتب يُتيح تعبئة خيط DNA الطويل — الذي يبلغ طوله في الخلية البشرية نحو مترَين — داخل نواة لا يتجاوز قطرها بضعة ميكرومترات. يحمل الإنسان السليم 46 كروموسومًا في 23 زوجًا:22 زوجًا جسديًا (Autosomes) وزوجًا واحدًا جنسيًا)XX للإناث، XY للذكور (Nussbaum et al., 2016).

جدول (5): المقارنة بين الانقسام المتساوي والانقسام الاختزالي

الخاصية	الانقسام المتساوي (Mitosis)	الانقسام الاختزالي (Meiosis)
مكان الحدوث	خلايا الجسم عامة	الغدد التناسلية فقط
عدد الانقسامات	انقسام واحد	انقسامان متتاليان
عدد الخلايا الناتجة	خليتان	أربع خلايا
عدد الكروموسومات في النتيجة	مزدوج (2n)	مفرد (n)
الوظيفة	النمو، الإصلاح، التكاثر اللاجنسي	تكوين الأمشاج)البيضة والحيوان المنوي(
التنوع الجيني	لا يُنتج تنوعًا	يُنتج تنوعًا بالغًا)عبر العبور والتوزيع الحر(
النسبة الجينية مع الأم	متطابقة	نصف المادة الوراثية

5.2 الوراثة المرتبطة بالجنس

اكتشف توماس هنت مورغان في الفترة بين 1910-1915 أن بعض الصفات ترتبط بالكروموسومات الجنسية (Sex-Linked Traits)، من خلال ملاحظاته على ذبابة الفاكهة (Drosophila melanogaster). أثبت مورغان أن لون عين الذبابة يُورَّث بطريقة مختلفة بين الذكور والإناث، وأن الجين المسؤول عنه يقع على الكروموسوم X. وقد أسّس بذلك لمفهوم الوراثة المرتبطة بالجنس (X-linked Inheritance)، وحصل على جائزة نوبل عام 1933 (Morgan, 1915).

من أبرز الأمراض البشرية المرتبطة بالكروموسوم X: عمى الألوان (Color Blindness)، والهيموفيليا A ((Hemophilia A، وضمور العضلات دوشين (Duchenne Muscular Dystrophy). تُصيب هذه الأمراض الذكور بنسبة أعلى بكثير، إذ يكفي لديهم الأليل المرضي على كروموسوم X الوحيد لظهور المرض، بينما تحتاج الأنثى التي تملك كروموسومَي X إلى أليل مرضي على كلَيهما لتُصاب بالمرض.

جدول (6): أبرز الأمراض الوراثية المرتبطة بالجنس

الاضطراب	الكروموسوم المرتبط	معدل الانتشار في الذكور	الأعراض الرئيسية
عمى الألوان الأحمر-الأخضر	X	8% من الذكور، 0.5% إناث	عدم التمييز بين الأحمر والأخضر
الهيموفيليا A	X	1 من كل 5,000 ذكر	اضطراب تخثر الدم
ضمور دوشين العضلي	X	1 من كل 3,500 ذكر	ضعف عضلي تدريجي
متلازمة هنتر	X	1 من كل 100,000	تلف في الأعضاء وتأخر عقلي
متلازمة كلاينفيلتر	X إضافي (XXY)	1 من كل 500 ذكر	عقم وضعف في التطور الجنسي

6. الطفرات الجينية وتأثيرها

6.1 مفهوم الطفرة ومستوياتها

الطفرة (Mutation) تغيير دائم في التسلسل النيوكليوتيدي للحمض النووي. قد تكون الطفرة مفيدة أو محايدة أو ضارة، وهي وقود التطور من ناحية، وسبب الأمراض الوراثية من ناحية أخرى. تُصنَّف الطفرات وفق مستوياتها:

جدول (7): تصنيف الطفرات الجينية وأمثلتها

نوع الطفرة	المستوى	الوصف	مثال
طفرة نقطية (Point Mutation)	جزيئي	تغيير قاعدة واحدة	مرض فقر الدم المنجلي (HbS)
حذف (Deletion)	جزيئي أو صبغي	حذف قاعدة أو جزء من كروموسوم	متلازمة Cri-du-chat

نوع الطفرة	المستوى	الوصف	مثال
إدراج (Insertion)	جزيئي	إضافة قاعدة أو أكثر	إطالة مرض هنتنغتون
انعكاس (Inversion)	صبغي	انعكاس جزء من الكروموسوم	بعض حالات العقم
انتقال (Translocation)	صبغي	نقل جزء من كروموسوم لآخر	سرطان الدم النقوي المزمن (Philadelphia Chr)
عدم انفصال (Non-disjunction)	صبغي	بقاء كروموسومات غير مفصولة	متلازمة داون (Trisomy 21)

6.2 الطفرات وعلاقتها بالأمراض الوراثية

تُقدَّر الأمراض الوراثية المعروفة اليوم بأكثر من 10,000 مرض، وهو رقم يتزايد مع توسّع قدرات التشخيص الجزيئي. وفيما يلي إحصاء تقريبي يعكس الأعباء الوراثية على الصحة الإنسانية:

جدول (8): إحصاء أهمية الأمراض الوراثية عالميًا

الفئة	التقدير العالمي	نسبة الأعباء الصحية
الأمراض ذات الجين الواحد (Monogenic)	10,000~ مرض	2-3% من المواليد
الأمراض الصبغية (Chromosomal)	400~ نمط	0.5-0.7% من المواليد
الأمراض متعددة الجينات (Polygenic)	غير محددة العدد	60% من الأمراض المزمنة
التشوهات الخلقية ذات أساس وراثي	3%~ من المواليد	20-30% من وفيات الرضع
السرطانات ذات الطفرات الجرثومية	5-10%~ من كل السرطانات	تفاوت حسب النوع

المصدر: منظمة الصحة العالمية (WHO, 2022) وقاعدة بيانات OMIM (2023,

7. آليات التعبير الجيني: من الجين إلى البروتين

7.1 الفرضية التسلسلية: DNA → RNA → بروتين

صاغ فرانسيس كريك عام 1958 ما أسماه "المبدأ المركزي لعلم الأحياء الجزيئي (Central Dogma of Molecular Biology)"، الذي يُجسّد التسلسل الوظيفي للمعلومة الجينية: تُنسخ

المعلومة من DNA إلى RNA الرسول (mRNA) في عملية النسخ (Transcription)، ثم تُترجم المعلومة المحمولة في mRNA إلى تسلسل أحماض أمينية يُشكّل البروتين في عملية الترجمة (Translation Crick, 1970, pp. 561-563).

شكل مفاهيمي: المبدأ المركزي للتعبير الجيني

- التضاعف: DNA ينتج نسخة جديدة من DNA.
- النسخ: تنتقل المعلومة من DNA إلى mRNA داخل النواة.
- الترجمة: يقرأ الريبوسوم mRNA لبناء البروتين.
- استثناء معروف: النسخ العكسي من RNA إلى DNA في الفيروسات القهقرية.

7.2 الشفرة الوراثية: قاموس الحياة

الشفرة الوراثية (Genetic Code) هي النظام الذي يُحدد العلاقة بين تسلسل النيوكليوتيدات في mRNA وتسلسل الأحماض الأمينية في البروتين. تُقرأ نيوكليوتيدات mRNA في وحدات ثلاثية تُسمى الرامزات (Codons)، ولمّا كان عدد القواعد النيتروجينية أربعة، فإن عدد الرامزات الممكنة هو $4^3 = 64$ رامزة، تُرمّز لـ 20 حمضًا أمينيًا فقط (Nirenberg & Matthaei , 1961). هذا الفائض يُعطي الشفرة الوراثية خاصية الانحلالية (Degeneracy)؛ أي أن للحمض الأميني الواحد عادةً أكثر من رامزة.

جدول (9): خصائص الشفرة الوراثية

الخاصية	التفسير	الأهمية
عالمية (Universal)	نفس الشفرة في كل الكائنات الحية تقريبًا	دليل قاطع على وحدة الأصل التطوري
انحلالية (Degenerate)	أكثر من رامزة لنفس الحمض الأميني	تخفيف أثر الطفرات الصامتة
غير متداخلة (Non-overlapping)	تُقرأ الرامزات بالتتابع دون تداخل	قراءة واضحة لا لبس فيها
بدون فواصل (Commaless)	لا يوجد فاصل بين الرامزات	إطار القراءة محدد بدقة من موضع البداية
رامزات الإيقاف	UAA, UAG, UGA	وضع نهاية للسلسلة البروتينية

الخاصية	التفسير	الأهمية
رامزة البدء	AUG (الميثيونين)	تُحدد نقطة البداية وإطار القراءة

8. ما وراء الجينات: علم التعبير الجيني والإيبيجينيتيكس

8.1 مفهوم التعبير الجيني المُنظَّم

لا تُفصح جميع الجينات عن نفسها في كل وقت وفي كل خلية؛ فالجين الحامل لتعليمات صنع الأنسولين يعمل في خلايا البنكرياس دون غيرها، والجين المسؤول عن الهيموغلوبين يعمل في الكريات الحمراء. تُنظَّم عملية التعبير الجيني (Gene Expression) بآليات متعددة وفق احتياجات الخلية وظروف البيئة، وتشمل: التحكم في بدء النسخ عبر بروتينات التنظيم (Transcription Factors)، وإسكات بعض الجينات عبر الـ RNA الدقيق (microRNA)، وتعديل تشكيل الكروماتين (Chromatin Remodeling) (Alberts et al., 2015).

8.2 علم الإيبيجينيتيكس: الطبقة الخفية فوق الجينات

شكّل علم الإيبيجينيتيكس (Epigenetics) تحديًا جوهريًا للتصور الكلاسيكي للوراثة. يدرس هذا العلم التغيرات في التعبير الجيني التي لا تنطوي على تغيير في تسلسل DNA نفسه، لكنها توارَث بين الخلايا أو حتى بين الأجيال في بعض الحالات (Bird, 2007, pp. 396-398).

من أبرز الآليات الإيبيجينيتيكية:

- مثيلة DNA (DNA Methylation): إضافة مجموعة ميثيل ($-CH_3$) إلى القواعد السيتوزينية، مما يُصمّت الجين المُضاف إليه عادةً.
- تعديلات الهيستون (Histone Modifications): إضافة مجموعات أسيتيل أو ميثيل أو فوسفات إلى بروتينات الهيستون، مما يُغيّر قابلية الكروماتين للنسخ.
- RNA غير المُرمِّز (Non-coding RNA): مثل الـ lncRNA والـ miRNA، وتلعب أدوارًا تنظيمية بالغة التعقيد.

وقد تبيّن أن التغذية والتوتر النفسي والتعرض للملوثات البيئية تترك بصمات إبيجينيتيكية قد تُورَّث للأجيال التالية، وهو ما يُعرف بالوراثة الإبيجينيتيكية عبر الأجيال (Transgenerational Epigenetic Inheritance Bird, 2007, pp. 396-398).

9. الوراثة في السياق التطوري

9.1 مندل وداروين: اللقاء المتأخر

في غرابة تاريخية مثيرة، عاش غريغور مندل وتشارلز داروين في الحقبة نفسها، وكلاهما يُمسك بقطعة حيوية من لغز الحياة، لكنهما لم يلتقيا فكريًا قط. داروين وضع آلية التطور بالانتقاء الطبيعي دون أن يُفهم كيف تنتقل الصفات، ومندل كشف قوانين انتقال الصفات دون أن يربطها بالتطور. جاء التوليف الكبير (Modern Synthesis) في أربعينيات القرن العشرين على يد علماء أمثال ثيودوسيوس دوبجانسكي ورونالد فيشر ليُدمج علم الوراثة المندلية بنظرية التطور الداروينية في إطار موحّد متماسك (Dobzhansky, 1937).

9.2 الوراثة السكانية: ديناميكية الجينات في المجتمعات

تعتمد الوراثة السكانية (Population Genetics) على مبدأ هاردي-واينبرغ (Hardy-Weinberg Principle) الذي يصف التوازن الجيني في مجتمع مثالي (كبير، عشوائي التزاوج، بلا طفرات أو هجرة أو انتقاء). يُعطي هذا المبدأ المعادلة التالية لتوزيع ترددات الأليلات:

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

حيث: p = تردد الأليل السائد، q = تردد الأليل المتنحي، p^2 = تردد متماثل سائد (AA)، $2pq$ = تردد متباين (Aa)، q^2 = تردد متماثل متنحٍ (aa)

مثال تطبيقي: إذا كان تردد مرض وراثي متنحٍ $q^2 = 1/10,000$، فإن:

$$q = 1/100 = 0.01$$

$$p = 1 - q = 0.99$$

نسبة حاملي الأليل المرضي $(2pq) = 2 \times 0.99 \times 0.01 \approx 1.98\%$ من السكان

جدول (10): أمثلة على ترددات الأمراض الوراثية المتنحية في السكان

المرض	الأثني	التردد المقدر (q^2)	نسبة الحاملين (2pq)
التليف الكيسي	القوقازيون	1/2,500	~4%
فقر الدم المنجلي	أفارقة جنوب الصحراء	1/625	~8%
فينيل كيتون يوريا (PKU)	أوروبيون	1/10,000	~2%
مرض تاي ساكس	الأشكناز اليهود	1/3,600	~5.3%
مرض ويلسون	عالمي	1/30,000	~1.1%

10. الوراثة والتنوع البشري

10.1 التباين الجيني البشري والمجموعات السكانية

كشفت الدراسات الجينومية الحديثة أن التنوع الجيني بين الأفراد من المجموعة السكانية الواحدة يفوق التنوع الجيني بين المجموعات السكانية المختلفة، مما يُفنّد أي أساس جيني لمفهوم "العرق" بمعناه البيولوجي الكلاسيكي (Lewontin, 1972; (Rosenberg et al., 2002, pp. 2381-2385). الإنسانية جمعاء تُشترك في 99.9% من جينومها، والـ0.1% الباقية هي التي تُشكّل التباين الفردي الذي نُلاحظه في لون الجلد والشعر والعيون والاستعداد لبعض الأمراض.

جدول (11): توزيع التنوع الجيني البشري

مستوى المقارنة	نسبة التباين الجيني
بين أفراد المجموعة السكانية الواحدة	~85-90% من إجمالي التباين
بين المجموعات السكانية ضمن القارة الواحدة	~5-8%
بين القارات المختلفة	~10-15%
نسبة التشابه الجيني بين أي إنسانين	99.9%

11. الوراثة الكمية والصفات متعددة الجينات

كثير من الصفات الأكثر أهمية في الإنسان والحيوان والنبات — كالطول والوزن ولون البشرة والذكاء وضغط الدم — لا تنتقل وفق نمط مندلي بسيط، بل تُحكمها عشرات أو مئات الجينات تتفاعل معًا ومع البيئة في ما يُعرف بالصفات الكمية (Quantitative Traits). تتوزع هذه

الصفات في السكان توزيعًا طبيعيًا)منحنى الجرس(، مما يجعل التنبؤ بنتائج التهجين فيها أمرًا إحصائيًا لا جبريًا (Falconer & (Mackay, 1996).

يُستخدم في تحليل الصفات الكمية مفهوم القابلية للتوريث (h^2 - Heritability)، وهو النسبة المئوية للتباين الظاهري التي تُعزى إلى التباين الجيني. تتراوح قيم القابلية للتوريث بين) 0لا دور للجينات(و) 1الجينات تُفسّر التباين كله(.

جدول (12): تقديرات قابلية التوريث لبعض الصفات البشرية

الصفة	قابلية التوريث المقدرة (h^2)	تأثير البيئة
الطول	0.80 - 0.90	التغذية في مرحلة الطفولة
مؤشر كتلة الجسم (BMI)	0.40 - 0.70	النظام الغذائي والنشاط الحركي
ضغط الدم الانبساطي	0.35 - 0.60	الملح والتوتر والوزن
حدة الذكاء العام (IQ)	0.50 - 0.80	التعليم والمحيط الأسري
اضطراب فرط الحركة (ADHD)	0.70 - 0.80	البيئة الأسرية والاجتماعية
الفصام (Schizophrenia)	0.60 - 0.80	الضغوط النفسية والمخدرات

تنبيه تفسيري: قابلية توريث مرتفعة لا تعني أن البيئة لا تؤثر، بل تعني أن التباين ضمن المجموعة المدروسة يُفسَّر أساسًا بالتباين الجيني. تغيير البيئة يُغيّر الصفة حتى في الصفات عالية القابلية.

11.1 التفاعل بين الجينات والبيئة (Gene-Environment Interaction)

ما يزيد الأمر تعقيدًا وإثارةً في آنٍ واحد هو أن الجين لا يعمل في فراغ؛ فالبيئة تؤثر في كيفية تعبيره، والجين بدوره يُحدد مدى حساسية الكائن للبيئة. يُعدّ هذا التفاعل (Gene × Environment Interaction - GxE) من أخصب الميادين البحثية الراهنة في علم الوراثة البشرية والنفسية.

تكشف الدراسات الطولية على التوائم المتطابقة (Identical Twins) عن نافذة مُثلى لفصل الأثر الجيني عن الأثر البيئي، إذ يمتلك توأمان متطابقان نفس الجينوم تمامًا لكن قد يختلفان اختلافًا ملحوظًا إذا ترعرعا في بيئتين مختلفتين. وتُشير الدراسات المقارنة بين التوائم المتطابقة والتوائم

غير المتطابقة إلى معادلة معقدة تتداخل فيها الجينات مع التجارب الشخصية والثقافة والتغذية والتعليم (Plomin et al., 2016).

11.2 التكيف والانتقاء الطبيعي على المستوى الجيني

يعمل الانتقاء الطبيعي على مستوى الجين من خلال التأثير على البقاء والتكاثر، فالأليلات التي تزيد من لياقة الفرد (Fitness) تزداد ترددًا في السكان عبر الأجيال، بينما تتراجع الأليلات المُضعِفة. يُشكّل هذا المنطق البسيط في ظاهره جوهرَ التطور الجيني، ويُفسّر ظواهر بالغة التعقيد كتطور الجهاز المناعي، وانتشار مقاومة المضادات الحيوية في بعض الأنواع البكتيرية، وتطور الجينات الخاصة بتحمّل اللاكتوز في المجتمعات الرعوية (Dobzhansky, 1937).

جدول (13): أمثلة على الانتقاء الطبيعي على مستوى الأليلات البشرية

الأليل	المنطقة الجغرافية	الضغط الانتقائي	الميزة التكيفية
أليل فقر الدم المنجلي (HbS)	أفريقيا جنوب الصحراء	الملاريا	الأفراد غير المتجانسة الأليلات (HbA/HbS) أكثر مقاومةً للملاريا
أليل تحمل اللاكتوز	أوروبا وأفريقيا الرعوية	توافر الحليب الحيواني	تضاعف أعداد البالغين القادرين على هضم اللاكتوز
التصبغ الجلدي المنخفض	خطوط العرض الشمالية	شح الإشعاع الشمسي	تعزيز تصنيع فيتامين D في البيئات الغائمة
أليل مقاومة 5CCR لـ HIV	أوروبا الشمالية	وبائيات تاريخية	نسبة 1% من الأوروبيين محصّنون ضد HIV بفضل هذا الأليل

12. خاتمة المبحث

يقف المتأمل في مسيرة علم الوراثة — من حديقة مندل الصغيرة في برنو إلى مختبرات CRISPR في أرقى جامعات العالم — أمام شعور يصعب وصفه بدقة؛ مزيج من الإجلال لعظمة الطبيعة، والدهشة من قدرة العقل البشري على كشف أسرارها. في أقل من قرن ونصف، انتقلنا من مجرد ملاحظة أن الأبناء يُشبهون آباءهم، إلى القدرة على قراءة ثلاثة مليارات حرف من الشفرة الوراثية وتحريرها بدقة جراحية.

الوراثة ليست فقط علم الماضي والتوارث؛ بل هي بالقدر ذاته علم الحاضر والمستقبل. الطب الشخصي يُعيد رسم تعريف العلاج، وتقنية CRISPR تُوفر أملًا حقيقيًا لملايين المرضى بأمراض وراثية خانتهم حوادث التضاعف. ومع ذلك، يبقى الحذر واجبًا أمام إغراء التحكم الكامل بالجينوم، ذلك الإغراء الذي قد يُعيدنا — إن أُسيء استخدامه — إلى أشباح الإيجينيا (Eugenics) التي خلّف تطبيقها في القرن الماضي جراحات لا تزال تؤلم الضمير الإنساني.

يُذكّرنا علم الوراثة في نهاية المطاف بحقيقة يُحسن بنا أن نتمثّلها دائمًا: أن التنوع ليس عيبًا في الطبيعة بل هو مصدر ثرائها وقوتها، وأن كل جينوم — مهما صغر أو بسُط — يُخبئ قصةً لا تُعاد وتاريخًا لا يُكرر (Dobzhansky, 1937; Griffiths et al., 2015 .)

المبحث الثالث: التطبيقات العلمية للأحياء المجهرية والوراثة

مقدمة المبحث

ينتقل هذا المبحث من عرض المبادئ والآليات إلى بيان مجالات توظيفها عمليًا. ويجمع التطبيقات البيئية والزراعية للأحياء المجهرية مع تقنيات الجينوم الحديثة، والطب الشخصي، وتحرير الجينات، ضمن رؤية تكاملية تراعي الفائدة العلمية والمسؤولية الأخلاقية.

1. التطبيقات البيئية للأحياء المجهرية

1.1 المعالجة الحيوية وحماية البيئة

تُمثّل الأحياء المجهرية أدواتٍ بيولوجية فعّالة لمعالجة التلوث البيئي عبر ما يُعرف بالمعالجة الأحيائية (Bioremediation)، وهي تقنية تعتمد على قدرة بعض الأحياء المجهرية على تحليل أو تحويل الملوثات العضوية الخطرة كالهيدروكربونات والمبيدات الحشرية والمواد الكيميائية الصناعية إلى مركبات غير ضارة أو أقل ضررًا (Atlas & (Hazen, 2011). وقد طُبّقت تقنية المعالجة الأحيائية بنجاح في تنظيف التلوث النفطي عقب كوارث انسكاب النفط في البحار وفي معالجة التربة الملوثة والمياه الجوفية.

1.2 الأحياء المجهرية في الزراعة المستدامة

- تُسهم الأحياء المجهرية مساهمةً جوهرية في دعم الإنتاج الزراعي المستدام من خلال جملة من الآليات:

- المُخصّبات الحيوية (Biofertilizers): تتضمن بكتيريا مثبّتة للنيتروجين كـ Rhizobium وAzotobacter وCyanobacteria، وبكتيريا مُذيبة للفوسفور، وفطريات جذرية، وتُستخدم بديلًا مستدامًا أو مُكمّلًا للأسمدة الكيميائية.
- مبيدات الآفات الحيوية (Biopesticides): تشمل بكتيريا Bacillus thuringiensis (Bt) التي تُنتج بروتينات ذات سمية انتقائية لحشرات آفات المحاصيل، وفطريات Beauveria bassiana وMetarhizium anisopliae المُمرِضة للحشرات الضارة.
- عوامل المكافحة الحيوية (Biocontrol Agents): تستخدم بعض الأحياء المجهرية كمُضادات طبيعية للمسببات المرضية النباتية عبر التنافس على الموارد، أو إنتاج مُضادات حيوية، أو تحفيز مقاومة النبات الجهازية.

تُمثّل هذه التطبيقات نهجًا واعدًا في التحول نحو أنظمة زراعية أكثر استدامةً وأقل اعتمادًا على المدخلات الكيميائية، في إطار ما يُعرف بالزراعة الحيوية أو الزراعة بالمدخلات المتكاملة (Integrated Pest Management - IPM).

1.3 الأحياء المجهرية وجودة المياه

تُعدّ جودة المياه ذات الصلة الوثيقة بالأحياء المجهرية إذ تُسهم هذه الأخيرة في معالجة مياه الصرف الصحي بصورة طبيعية ومدعومة. تعتمد محطات معالجة مياه الصرف الصحي الحيوية على مجتمعات ميكروبية نشطة لتحليل المادة العضوية وإزالة المركبات النيتروجينية والفوسفورية من المياه. يُعدّ نظام الحمأة المنشطة (Activated Sludge) الأكثر شيوعًا، حيث تتنوع فيه بكتيريا هوائية ولاهوائية وفطريات وأوليات تعمل مجتمعةً لتحقيق معالجة فعالة للمياه.

تُسهم الأحياء المجهرية كذلك في تنقية المياه الطبيعية في الأراضي الرطبة والبحيرات والأنهار عبر عمليات التحليل الأحيائي الطبيعي (Natural Attenuation) للملوثات العضوية. غير أن التلوث بالكائنات الممرضة كبكتيريا Escherichia coli والفيروسات المعوية يُمثّل خطرًا صحيًا حقيقيًا يستوجب مراقبة مستمرة لجودة مياه الشرب والبيئات المائية المُستخدمة في الترفيه والزراعة.

2. الجينوميات وتقنيات التحليل الحديثة

2.1 مشروع الجينوم البشري: الخريطة الكاملة

أُطلق مشروع الجينوم البشري (Human Genome Project - HGP) رسميًا عام 1990، وأعلن في أبريل 2003 عن اكتمال تسلسل الجينوم البشري بنسبة 99% من مناطقه المُرمِّزة (Collins et al., 2003, pp. 835-847). كشف المشروع عن حقائق مفاجئة بدّلت تصورات كثيرة:

جدول (14): الأرقام الرئيسية لمشروع الجينوم البشري

المعلمة	القيمة المكتشفة
عدد جينات الإنسان المُرمِّزة للبروتين	20,000 - 25,000~ جين
طول الجينوم البشري	3.2~ مليار زوج قاعدي
نسبة التشابه الجيني بين الأفراد	99.9%
النسبة المئوية للجينات المُرمِّزة من إجمالي الجينوم	1.5-2%~
نسبة الـ"DNA غير المُرمِّز(Junk DNA) " المعاد تقييمها	98%~ غير مُرمِّز لكن ليس عديم الوظيفة
نسبة التشابه مع الشمبانزي	98.7%~
التكلفة الإجمالية للمشروع	3~ مليارات دولار
تكلفة تسلسل جينوم فرد اليوم (2024)	أقل من 200 دولار

2.2 الثورة التقنية: تسلسل الجيل التالي

أحدثت تقنيات تسلسل الجيل التالي (Next-Generation Sequencing - NGS) ثورة في قدرة علماء الوراثة على دراسة الجينوم. باتت هذه التقنية تُتيح تسلسل الجينوم الكامل لفرد في يومين أو أقل، مقارنةً بـ 13 عامًا كاملة استغرقها تسلسل الجينوم الأول (Mardis, 2011, pp. 198-203). ومن الناحية الإحصائية:

- تُعالَج اليوم بيانات جينومية تبلغ مئات التيرابايتات يوميًا على مستوى العالم.
- تُضاف إلى قواعد البيانات الجينومية العالمية أكثر من 10 ملايين تسلسل جديد سنويًا.
- أتاحت الـ NGS اكتشاف 68 مليون تباين جيني (SNPs) في جينوم الإنسان حتى الآن.

3. تحرير الجينوم بتقنية CRISPR-Cas9

في عام 2012 أعلنت جنيفر دودنا وإيمانويل شاربانتيه عن توظيف نظام 9CRISPR-Cas البكتيري أداةً لتحرير الجينوم في الخلايا حقيقية النواة، وهو ما أُسفر عن منحهما جائزة نوبل في الكيمياء عام 2020 (Doudna & (Charpentier, 2012. تعتمد التقنية على:

- RNA دليل (Guide RNA): يقود البروتين 9Cas إلى الموضع المستهدف في الجينوم بدقة بالغة.
- بروتين 9Cas: نوكلياز يقطع شريطَي DNA في الموضع المحدد.
- ترميم DNA: تُعيد الخلية تضميم الجرح إما بإدخال طفرة)لإسكات الجين(أو بإدراج تسلسل جديد)لتصحيح الجين(.

شكل مفاهيمي: آلية تقنية 9CRISPR-Cas

- يوجه RNA الدليل بروتين 9Cas إلى التسلسل المستهدف.
- يقطع 9Cas شريطي DNA في الموضع المحدد.
- قد يؤدي الإصلاح غير المتماثل إلى إسكات الجين.
- قد يستخدم الإصلاح الموجه لإدراج تسلسل محدد وتصحيح طفرة.

4. الطب الشخصي والتطبيقات السريرية

يمثل الطب الشخصي (Personalized Medicine) أو الطب الدقيق (Precision Medicine) أحد أبرز التطبيقات المستقبلية لعلم الجينومية، إذ يسعى إلى تفصيل القرارات الطبية — التشخيص، والوقاية، والعلاج — وفق التركيب الجيني لكل مريض على حدة (Hamburg & (Collins, 2010. من التطبيقات العملية الراهنة:

- علم الصيدلة الجيني (Pharmacogenomics): دراسة كيفية تأثير التركيب الجيني على استجابة الفرد للأدوية.
- اختبارات الاستعداد الوراثي: كاختبارات جين 1/2BRCA للكشف المبكر عن الاستعداد لسرطان الثدي.

- العلاج الجيني (Gene Therapy): إدخال نسخ سليمة من الجينات للتعويض عن الجينات المعيبة.
- تشخيص الأجنة قبل الزراعة (PGD): تحليل الجينوم لأجنة أطفال الأنابيب قبل نقلها.

5. الأبعاد الأخلاقية لتحرير الجينوم

5.1 هندسة الجينوم: الحدود والمجالات المثيرة للجدل

لم تُقابَل التطورات التقنية في علم الوراثة بترحيب مطلق في أي مجتمع، فقد رافقتها دومًا تساؤلات أخلاقية حادة. يُثير التدخل في جينوم الإنسان — لا سيما في الخلايا الجرثومية (Germline Editing) التي تؤثر على الأجيال القادمة — نقاشات جوهرية حول المسؤولية الأخلاقية للعلماء ومجتمعاتهم. وقد أشعل الإعلان عام 2018 عن وضع المولودتين لولو ونانا Nana أول أجنة بشرية مُعدَّلة جينيًا باستخدام CRISPR على يد الباحث الصيني هي جيانكوي موجةً واسعة من الانتقادات الأخلاقية والعلمية من المجتمع الدولي (Lander et al., 2019, pp. 165-168).

تتمحور الإشكاليات الأخلاقية الكبرى في:

- مسألة الموافقة: لا يستطيع الجنين أو المولود الإذن بتعديل جينومه.
- العدالة الاجتماعية: قد يصبح التعديل الجيني امتيازًا حكرًا على الأثرياء.
- الخط الفاصل: من يُحدد ما هو مرض يستوجب التصحيح وما هو تنوع يستوجب الاحترام؟
- المخاطر غير المعروفة: آثار التعديل الجيني على المدى البعيد مجهولة تمامًا.

6. الآفاق المستقبلية والتكامل بين الأحياء المجهرية والوراثة

يبدو مستقبل علم الوراثة مسكونًا بإمكانيات مذهلة قد تُعيد تشكيل فهمنا للحياة وممارستنا للطب. ثمة محاور بحثية تتسارع فيها وتيرة الاكتشافات:

- تحرير الجينوم العلاجي: باتت التجارب السريرية لتطبيق CRISPR في علاج أمراض كفقر الدم المنجلي وبيتا ثلاسيميا والعمى الوراثي تُقدّم نتائج واعدة تُغذّي الأمل بتحقيق علاجات شافية لأمراض لم يكن لها علاج قبل عقد واحد. وقد وافقت هيئة الدواء الأمريكية (FDA) في

ديسمبر 2023 على أول علاج جيني بتقنية CRISPR لمرض فقر الدم المنجلي، في سابقة تاريخية (F(DA, 2023).

- الميتاجينومية الطبية (Medical Metagenomics): تعتمد مستشفيات رائدة اليوم على تسلسل الجيل التالي لتشخيص الأمراض المعدية النادرة في غضون ساعات، بدلًا من أيام أو أسابيع قد لا تُجدي.
- الحوسبة الجينومية والذكاء الاصطناعي: تُعالج خوارزميات التعلم العميق اليوم بيانات الجينومية الضخمة لاكتشاف أنماط غير مرئية بالعين البشرية، وتُنبئ بالاستعداد للأمراض وبالاستجابة للعلاجات بدقة تفوق الأساليب التقليدية (Topol, 2019, pp. 44-56).

جدول (15): إحصاءات تُلخص التحولات في علم الوراثة (1953-2024)

المحطة التاريخية	السنة	الأثر
اكتشاف بنية DNA)واتسون وكريك(	1953	أرسى أساس الأحياء الجزيئية
تحديد الشفرة الوراثية الكاملة	1966	فهم العلاقة بين الجينات والبروتينات
فن الاستنساخ الجيني (Recombinant DNA)	1973	انطلاق الهندسة الوراثية
إطلاق مشروع الجينوم البشري	1990	أكبر مشروع بيولوجي في التاريخ
اكتمال تسلسل الجينوم البشري	2003	خريطة كاملة للبيولوجيا البشرية
ثورة CRISPR-Cas9	2012	تحرير الجينوم بدقة غير مسبوقة
أول علاج جيني بـ CRISPR مُعتمَد	2023	بداية حقبة جديدة في الطب الجيني
الجينوم البشري الكامل التسلسل (T2T)	2022	تسلسل آخر 8% كانت مجهولة

7. خاتمة المبحث

تُظهر التطبيقات المعاصرة أن الأحياء المجهرية والوراثة ليستا مجالين منفصلين، بل منظومة علمية واحدة تتقاطع فيها البيئة والصحة والزراعة والتقنية. ويظل نجاح هذه التطبيقات مرهونًا بالدقة المنهجية، وجودة البيانات، والتقييم الأخلاقي، والقدرة على تحويل المعرفة إلى حلول مستدامة وآمنة.

الخاتمة العامة للفصل

يفضي العرض الذي قدّمه هذا الفصل إلى حقيقة مركزية مفادها أن فهم الحياة لا يكتمل بالنظر إلى الكائنات الحية بوصفها وحدات منفصلة، بل يتطلب دراستها ضمن شبكة واسعة من العلاقات الوراثية والميكروبية والبيئية. فالأحياء المجهرية، على الرغم من ضآلة أحجامها، تشارك في بناء شروط الحياة واستمرارها، بينما تحفظ المادة الوراثية المعلومات التي تنظّم بنية الكائن ووظائفه وقدرته على التكيف. وعندما يُجمع هذان المجالان في إطار تحليلي واحد، تتضح صورة أكثر شمولًا للعمليات التي تربط الخلية بالكائن، والكائن ببيئته، والبيئة بمستقبل المجتمعات البشرية.

وقد أظهر الفصل أن الأحياء المجهرية ليست مجرد مسببات محتملة للأمراض، كما قد توحي النظرة التقليدية، وإنما هي عناصر بنائية ووظيفية في التربة والمياه والهواء وأجسام الكائنات الحية. فهي تسهم في تدوير العناصر، وتحليل المواد العضوية، ودعم خصوبة التربة، وتنظيم المجتمعات الحيوية، والمحافظة على توازن عدد كبير من الأنظمة الطبيعية. وفي المقابل، يبيّن علم الوراثة كيف تنتقل الصفات، وكيف ينشأ الاختلاف بين الأفراد، وكيف تؤثر الطفرات والتفاعلات الجينية والظروف البيئية في المظهر والوظيفة والاستجابة. وبذلك يقدّم المجالان معًا تفسيرًا متكاملًا للاستقرار والتغير في العالم الحي.

إن القيمة العلمية لهذا التكامل لا تقتصر على توسيع المعرفة النظرية، بل تمتد إلى تحسين طريقة صياغة الأسئلة البحثية. فبدل الاكتفاء بالسؤال عن وجود كائن مجهري أو صفة وراثية معينة، يصبح من الممكن البحث في الآليات التي تحدد نشاطهما، والظروف التي تضبط أثرهما، والنتائج التي تظهر عند اختلال التوازن بينهما وبين الوسط المحيط. وهذا الانتقال من الوصف إلى تفسير العلاقات السببية يمنح البحث العلمي قدرة أكبر على بناء حلول واقعية يمكن اختبارها وتطويرها.

ومن ثمّ، يمكن النظر إلى هذا الفصل بوصفه دعوة إلى تجاوز الحدود الضيقة بين التخصصات. فالتحديات المتعلقة بالصحة والغذاء والمياه والتلوث والتنوع الحيوي لا تستجيب لمعالجة أحادية، بل تحتاج إلى تعاون يجمع الأحياء المجهرية والوراثة والكيمياء والبيئة والإحصاء وتقنيات تحليل البيانات. ويشكّل هذا المنظور التكاملي الأساس الذي ينبغي أن تنطلق منه الدراسات المستقبلية الراغبة في تحويل المعرفة البيولوجية إلى أثر نافع ومستدام.

أولًا: الحصيلة العلمية لدراسة الأحياء المجهرية

تكشف دراسة الأحياء المجهرية أن الجزء الأكبر من النشاط الحيوي المؤثر في البيئة يحدث بعيدًا عن الملاحظة المباشرة. فالمجتمعات الميكروبية تعمل في طبقات التربة، وفي أعماق المياه، وعلى أسطح الكائنات وداخل أنسجتها، وتؤدي وظائف متداخلة يصعب فصل إحداها عن الأخرى. ويشير ذلك إلى أن سلامة النظام البيئي لا تعتمد على عدد الأنواع الكبيرة الظاهرة فحسب، وإنما ترتبط كذلك بتنوع الكائنات الدقيقة واستقرار شبكاتها الوظيفية وقدرتها على الاستجابة للتغيرات.

وقد بيّن الفصل أن الدور الميكروبي يتخذ صورًا متعددة؛ فهو إنتاج وتحليل وتنظيم في الوقت نفسه. فبعض الكائنات الدقيقة يشارك في بناء المادة العضوية، وبعضها يعيد تفكيكها وإطلاق عناصرها، وبعضها ينظّم أعداد كائنات أخرى أو يدخل معها في علاقات تكافلية. وتوضح هذه الأدوار أن مفهوم التوازن البيئي ليس حالة ساكنة، بل عملية مستمرة من التبادل والتحول وإعادة التوزيع. وكلما ازدادت معرفتنا بهذه العمليات، أصبحت قدرتنا أفضل على تفسير تدهور التربة، وتغير جودة المياه، واضطراب السلاسل الغذائية، وانتقال بعض الملوثات أو العوامل الممرضة.

كما أن دراسة الميكروبيوم غيّرت فهم العلاقة بين الكائن الحي وبيئته الداخلية. فالإنسان والحيوان والنبات لا يعمل أيّ منها بمعزل عن المجتمعات الدقيقة المرتبطة به، بل تنشأ الوظائف الحيوية من تفاعل متبادل بين أنسجة الكائن ومكوناته الميكروبية. ويقود هذا الفهم إلى ضرورة التعامل بحذر مع التدخلات التي قد تخلّ بهذا التوازن، وإلى تقدير أكبر لأهمية التنوع الميكروبي في الوقاية ودعم الوظائف الطبيعية.

وتخلص هذه الحصيلة إلى أن المحافظة على الأحياء المجهرية النافعة جزء أساسي من حماية البيئة، وليست قضية مخبرية منفصلة عنها. ولذلك ينبغي أن تتجه البحوث إلى رصد التنوع الميكروبي على المدى الطويل، وربطه بالتغيرات المناخية وأنماط استخدام الأراضي وجودة المياه، مع تطوير مؤشرات حيوية تساعد على اكتشاف الاختلال قبل تحوله إلى ضرر واسع. فالمعرفة المبكرة ببنية المجتمع الميكروبي ووظائفه تمنح صانع القرار فرصة أكبر للتدخل الوقائي بدل الاكتفاء بمعالجة النتائج بعد وقوعها.

ثانيًا: دلالات الوراثة وانتقال الصفات

يؤكد المسار الذي عرضه الفصل أن الوراثة ليست عملية نقل آلي لصفات ثابتة، وإنما منظومة ديناميكية تتداخل فيها بنية الجين، وتنظيم التعبير عنه، وسلوك الكروموسومات، وتأثير البيئة. وقد

أسهمت القوانين الكلاسيكية في تأسيس الفهم الأول لانتقال الصفات، غير أن التطورات اللاحقة بيّنت أن كثيرًا من السمات لا يخضع لنمط بسيط، وأن النتيجة الظاهرة قد تنشأ عن تفاعل عدد كبير من الجينات مع ظروف النمو والتغذية والتعرضات البيئية.

ومن أهم الاستنتاجات أن الاختلاف الوراثي ليس خروجًا عن النظام، بل مكوّن أصيل من مكونات الحياة. فهو الذي يتيح ظهور التنوع داخل النوع الواحد، ويوفر المادة التي يعمل عليها الانتقاء الطبيعي، ويساعد المجتمعات الحيوية على مواجهة التغير. وفي الوقت نفسه، قد تؤدي بعض التغيرات الجينية إلى اضطرابات أو قابلية متزايدة للإصابة، وهو ما يستلزم قراءة متوازنة لا تختزل الجين في كونه حكمًا نهائيًا على مستقبل الفرد. فالمعلومة الوراثية تعبّر عن احتمالات واستعدادات في كثير من الحالات، ولا يمكن تفسيرها تفسيرًا سليمًا خارج سياقها الخلوي والبيئي والاجتماعي.

كما يبرز من الفصل أن فهم التعبير الجيني يضيف طبقة ضرورية إلى فهم بنية الحمض النووي. فامتلاك الجين لا يعني نشاطه الدائم، لأن الخلية تضبط تشغيل الجينات وإيقافها وتعديل مستوى إنتاجها وفق حاجاتها وإشاراتها الداخلية والخارجية. ومن هنا تظهر أهمية الآليات التنظيمية والتغيرات فوق الجينية في تفسير الفروق بين الخلايا والأفراد، وفي بيان الكيفية التي يمكن بها للبيئة أن تترك أثرًا وظيفيًا من دون تغيير تسلسل المادة الوراثية ذاته.

وتقود هذه النتائج إلى ضرورة تعزيز الثقافة الوراثية لدى الباحثين والعاملين في الصحة والتعليم والمجتمع. فالتوسع في الاختبارات الجينية من دون فهم حدودها قد يفتح الباب لتفسيرات مبالغ فيها أو أحكام تمييزية. أما الاستخدام المسؤول فيتطلب تفسير النتائج ضمن احتمالاتها العلمية، وحماية خصوصية البيانات، واحترام حق الفرد في المعرفة أو عدمها، وتجنب تحويل التنوع الطبيعي إلى وصمة. وبذلك يصبح علم الوراثة وسيلة لفهم الإنسان وحمايته، لا أداة لتصنيفه أو اختزاله في مجموعة من المؤشرات.

ثالثًا: التكامل التطبيقي بين الأحياء المجهرية والوراثة

تتجلى القوة التطبيقية للفصل عند نقطة التقاء الأحياء المجهرية بالوراثة، حيث يصبح بالإمكان فهم الكائنات الدقيقة من خلال مادتها الجينية، وفهم الجينات من خلال الوظائف التي تؤديها داخل الخلايا والمجتمعات الحيوية. وقد جعل هذا التكامل دراسة البيئات المعقدة أكثر دقة، إذ لم يعد

الباحث مضطرًا إلى الاعتماد على الكائنات التي يمكن تنميتها في المختبر وحدها، بل أصبح قادرًا على تحليل المادة الوراثية الموجودة في العينة للكشف عن تنوع أوسع ووظائف محتملة لم تكن مرئية بالطرائق التقليدية.

وفي المجال البيئي، يتيح هذا المنظور اختيار مجتمعات ميكروبية أو سلالات مناسبة لمعالجة بعض الملوثات، ومتابعة كفاءتها، وتقدير أثرها في مكونات النظام البيئي قبل التوسع في استخدامها. وفي الزراعة، يساعد فهم الصفات الوراثية للكائنات الدقيقة النافعة على تطوير وسائل أكثر دقة لدعم نمو النبات وتحسين الاستفادة من العناصر الغذائية وتقليل الاعتماد على المدخلات الكيميائية. أما في معالجة المياه، فيسهم التحليل الجيني للمجتمعات الميكروبية في متابعة استقرار عمليات التنقية والكشف المبكر عن التغيرات التي قد تؤثر في الجودة أو السلامة.

وفي المجال الصحي، يفتح الجمع بين بيانات الميكروبيوم والمعلومات الوراثية آفاقًا لفهم أسباب اختلاف الاستجابة بين الأفراد. إلا أن القيمة الحقيقية لهذه البيانات لا تتحقق بمجرد جمعها، بل بربطها بالسياق السريري والبيئي، والتحقق من جودة العينات، واستخدام نماذج تحليلية قابلة للتفسير. فوفرة البيانات قد تتحول إلى مصدر للالتباس إذا لم ترافقها أسئلة واضحة وضوابط منهجية تمنع الخلط بين الارتباط والسببية.

ويؤكد ذلك أن التطبيق الناجح يحتاج إلى سلسلة مترابطة تبدأ بتحديد المشكلة، ثم اختيار التصميم البحثي المناسب، وضبط المتغيرات، وتوثيق خطوات العمل، وتحليل النتائج إحصائيًا، ومراجعة الآثار الجانبية المحتملة. كما يحتاج إلى مشاركة خبرات متعددة تشمل المختبر والمعلوماتية الحيوية والإحصاء والأخلاقيات والاختصاص التطبيقي المعني. إن الحلول الناتجة عن هذا التعاون تكون أكثر قدرة على الانتقال من التجربة المحدودة إلى الاستخدام الواقعي، وأكثر قابلية للتقييم والمساءلة والتطوير المستمر.

رابعًا: المسؤولية العلمية والرؤية المستقبلية

إن اتساع القدرة على قراءة المادة الوراثية وتعديلها وتوظيف الكائنات الدقيقة يفرض مسؤولية توازي حجم الإمكانات المتاحة. فليس كل ما يمكن تنفيذه تقنيًا مناسبًا للتطبيق المباشر، ولا تكفي النتيجة الإيجابية في المختبر للحكم على الأمان أو العدالة أو الاستدامة. ويجب أن تسبق القراراتَ

دراسةٌ دقيقة للفائدة المتوقعة واحتمالات الضرر وإمكان انتقال الأثر إلى أفراد أو أنواع أو بيئات لم تكن جزءًا من التجربة الأصلية.

وتبدأ المسؤولية من جودة السؤال والبيانات؛ فالعينة غير الممثلة، أو القياس غير الدقيق، أو تجاهل المتغيرات المصاحبة قد يقود إلى استنتاجات تبدو قوية لكنها تضعف عند التحقق. ولذلك ينبغي اعتماد إجراءات واضحة لضبط الجودة، ووصف المنهج بصورة تسمح بتكراره، ومقارنة النتائج بأدلة مستقلة، وعرض حدود الدراسة بوضوح. فالاعتراف بما لا تثبته البيانات جزء من النزاهة العلمية، وليس نقصًا في قيمة البحث.

وتشمل المسؤولية الأخلاقية حماية الخصوصية، والحصول على الموافقة المستنيرة، ومنع الاستخدام التمييزي للمعلومات الجينية، ومراعاة العدالة في الوصول إلى التقنيات. وفي التطبيقات البيئية والزراعية تمتد المسؤولية إلى مراقبة أثر الكائنات المستخدمة في الأنواع غير المستهدفة وفي التوازن المحلي، ووضع خطط للاحتواء والتوقف إذا ظهرت نتائج غير متوقعة. إن وضوح قواعد الحوكمة واستقلال المراجعة يعززان الثقة، ويحميان الابتكار من القرارات المتعجلة.

وفي المستقبل، ينبغي دعم قواعد بيانات محلية تصف التنوع الميكروبي والوراثي في البيئات المختلفة، وتطوير قدرات المختبرات، وتدريب الباحثين على المعلوماتية الحيوية والإحصاء، وتعزيز التعاون بين الجامعات والمؤسسات الصحية والزراعية والبيئية. كما يُستحسن إعطاء الأولوية لتطبيقات قابلة للقياس تمس حاجات المجتمع، مثل مراقبة المياه، وتحسين صحة التربة، والحد من الملوثات، ودعم التشخيص الدقيق، مع تقييم مرحلي يبدأ بنطاق محدود ويتوسع بعد ثبوت الكفاءة والأمان.

وفي ضوء ذلك، يخلص الفصل إلى أن الأحياء المجهرية والوراثة تمثلان معًا مفتاحًا لفهم عدد من أكثر قضايا الحياة تعقيدًا. غير أن هذا المفتاح لا يحقق فائدته إلا حين يُستخدم بعلم متين، وتواضع معرفي، ومسؤولية واضحة. فالمستقبل المنشود ليس مستقبل السيطرة غير المشروطة على الطبيعة، بل مستقبل الشراكة الواعية معها: نفهم قوانينها، ونحترم تنوعها، ونطوّر حلولًا تحسن حياة الإنسان من دون الإضرار بحق الأجيال القادمة في بيئة سليمة ومعرفة موثوقة. وبهذه الرؤية يصبح التكامل بين الأحياء المجهرية والوراثة أساسًا لبحث أكثر نضجًا وتطبيق أكثر أمانًا وتنمية أكثر اتزانًا واستدامة.

المصادر والمراجع

1. Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2015). Molecular biology of the cell (6th ed.). W. W. Norton & Company.

2. Atlas, R. M., & Hazen, T. C. (2011). Oil biodegradation and bioremediation: A tale of the two worst spills in U.S. history. Environmental Science & Technology, 45(16), 6709-6715. https://doi.org/10.1021/es2013227

3. Avery, O. T., MacLeod, C. M., & McCarty, M. (1944). Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types. Journal of Experimental Medicine, 79(2), 137-158. https://doi.org/10.1084/jem.79.2.137

4. Azam, F., & Malfatti, F. (2007). Microbial structuring of marine ecosystems. Nature Reviews Microbiology, 5(10), 782-791. https://doi.org/10.1038/nrmicro1747

5. Bar-On, Y. M., Phillips, R., & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(25), 6506-6511. https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115

6. Belkaid, Y., & Hand, T. W. (2014). Role of the microbiota in immunity and inflammation. Cell, 157(1), 121-141. https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.03.011

7. Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. Trends in Plant Science, 17(8), 478-486. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001

8. Bird, A. (2007). Perceptions of epigenetics. Nature, 447(7143), 396-398. https://doi.org/10.1038/nature05913

9. Charlson, R. J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O., & Warren, S. G. (1987). Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. Nature, 326, 655-661. https://doi.org/10.1038/326655a0

10. Collins, F. S., Green, E. D., Guttmacher, A. E., & Guyer, M. S. (2003). A vision for the future of genomics research. Nature, 422(6934), 835-847. https://doi.org/10.1038/nature01626

11. Costerton, J. W., Stewart, P. S., & Greenberg, E. P. (1999). Bacterial biofilms: A common cause of persistent infections. Science, 284(5418), 1318-1322. https://doi.org/10.1126/science.284.5418.1318

12. Crick, F. (1970). Central dogma of molecular biology. Nature, 227(5258), 561-563. https://doi.org/10.1038/227561a0

13. Cryan, J. F., & Dinan, T. G. (2012). Mind-altering microorganisms: The impact of the gut microbiota on brain and behaviour. Nature Reviews Neuroscience, 13(10), 701-712. https://doi.org/10.1038/nrn3346

14. Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F. T., Reich, P. B., Trivedi, P., Osanai, Y., Liu, Y. R., Hamonts, K., Jeffries, T. C., & Singh, B. K. (2016). Carbon content and climate variability drive global soil bacterial diversity patterns. Ecological Monographs, 86(3), 373-390. https://doi.org/10.1890/15-1908.1

15. Després, V. R., Huffman, J. A., Burrows, S. M., Hoose, C., Safatov, A. S., Buryak, G., Fröhlich-Nowoisky, J., Elbert, W., Andreae, M. O., Pöschl, U., & Jaenicke, R. (2012). Primary biological aerosol particles in the atmosphere: A review. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 64(1), 15598. https://doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.15598

16. Dobzhansky, T. (1937). Genetics and the origin of species. Columbia University Press.

17. Dodds, W. K., & Welch, E. B. (2000). Establishing nutrient criteria in streams. Journal of the North American Benthological Society, 19(1), 186-196. https://doi.org/10.2307/1468291

18. Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2012). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. Science, 346(6213), 1258096. https://doi.org/10.1126/science.1258096

19. Falconer, D. S., & Mackay, T. F. C. (1996). Introduction to quantitative genetics (4th ed.). Longman.

20. Falkowski, P. G., Fenchel, T., & Delong, E. F. (2008). The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. Science, 320(5879), 1034-1039. https://doi.org/10.1126/science.1153213

21. FDA. (2023). FDA approves first gene therapies to treat patients with sickle cell disease. U.S. Food and Drug Administration. https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapies-treat-patients-sickle-cell-disease

22. Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. Science, 281(5374), 237-240. https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237

23. Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. Nature Reviews Microbiology, 15(10), 579-590. https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87

24. Griffiths, A. J. F., Wessler, S. R., Carroll, S. B., & Doebley, J. (2015). Introduction to genetic analysis (11th ed.). W. H. Freeman and Company.

25. Hamburg, M. A., & Collins, F. S. (2010). The path to personalized medicine. New England Journal of Medicine, 363(4), 301-304. https://doi.org/10.1056/NEJMp1006304

26. IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

27. Lander, E. S., Baylis, F., Zhang, F., Charpentier, E., Berg, P., Liu, C., Bhatt, D., & Winnacker, E. L. (2019). Adopt a moratorium on heritable genome editing. Nature, 567(7747), 165-168. https://doi.org/10.1038/d41586-019-00726-5

28. Lederberg, J. (2000). Infectious history. Science, 288(5464), 287-293. https://doi.org/10.1126/science.288.5464.287

29. Lewontin, R. C. (1972). The apportionment of human diversity. Evolutionary Biology, 6, 381-398. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-9063-3_14

30. Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2019). Brock biology of microorganisms (15th ed.). Pearson Education.

31. Mardis, E. R. (2011). A decade's perspective on DNA sequencing technology. Nature, 470(7333), 198-203. https://doi.org/10.1038/nature09796

32. Mendel, G. J. (1866). Versuche über Pflanzenhybriden [Experiments on plant hybridization]. Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn, 4, 3-47. (Reprinted in Genetics, 1950, 35(5 Pt 2), 33-41)

33. Moran, N. A. (2015). Microbial minimalism: Genome reduction in bacterial pathogens. Cell, 121(5), 699-702. https://doi.org/10.1016/j.cell.2005.05.002

34. Morgan, T. H. (1915). The mechanism of Mendelian heredity. Henry Holt and Company.

35. Nirenberg, M. W., & Matthaei, J. H. (1961). The dependence of cell-free protein synthesis in E. coli upon naturally occurring or synthetic polyribonucleotides. Proceedings of the National Academy of Sciences, 47(10), 1588-1602. https://doi.org/10.1073/pnas.47.10.1588

36. Nussbaum, R. L., McInnes, R. R., & Willard, H. F. (2016). Thompson & Thompson genetics in medicine (8th ed.). Elsevier.

37. Offre, P., Spang, A., & Schleper, C. (2013). Archaea in biogeochemical cycles. Annual Review of Microbiology, 67, 437-457. https://doi.org/10.1146/annurev-micro-092412-155614

38. Plomin, R., DeFries, J. C., Knopik, V. S., & Neiderhiser, J. M. (2016). Behavioral genetics (7th ed.). Worth Publishers.

39. Rosenberg, N. A., Pritchard, J. K., Weber, J. L., Cann, H. M., Kidd, K. K., Zhivotovsky, L. A., & Feldman, M. W. (2002). Genetic structure of human populations. Science, 298(5602), 2381-2385. https://doi.org/10.1126/science.1078311

40. Rothschild, L. J., & Mancinelli, R. L. (2001). Life in extreme environments. Nature, 409, 1092-1101. https://doi.org/10.1038/35059215

41. Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C.,

& Vonk, J. E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature, 520(7546), 171-179. https://doi.org/10.1038/nature14338

42. Sender, R., Fuchs, S., & Milo, R. (2016). Revised estimates for the number of human and bacteria cells in the body. Cell, 164(3), 337-340. https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.01.013

43. Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). Mycorrhizal symbiosis (3rd ed.). Academic Press.

44. Suttle, C. A. (2007). Marine viruses - Major players in the global ecosystem. Nature Reviews Microbiology, 5(10), 801-812. https://doi.org/10.1038/nrmicro1750

45. Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. Nature Medicine, 25(1), 44-56. https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7

46. Turnbaugh, P. J., Ley, R. E., Mahowald, M. A., Magrini, V., Mardis, E. R., & Gordon, J. I. (2006). An obesity-associated gut microbiome with increased capacity for energy harvest. Nature, 444(7122), 1027-1031. https://doi.org/10.1038/nature05414

47. Vitousek, P. M., Menge, D. N. L., Reed, S. C., & Cleveland, C. C. (2013). Biological nitrogen fixation: Rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 368(1621), 20130119. https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0119

48. Watson, J. D., & Crick, F. H. C. (1953). A structure for deoxyribose nucleic acid. Nature, 171(4356), 737-738. https://doi.org/10.1038/171737a0

49. Watson, J. D., Baker, T. A., Bell, S. P., Gann, A., Levine, M., & Losick, R. (2014). Molecular biology of the gene (7th ed.). Pearson Education.

50. World Health Organization (WHO). (2019). Antibiotic resistance [Fact sheet]. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antibiotic-resistance

51. World Health Organization (WHO). (2022). Genes and human disease. https://www.who.int/genomics/public/geneticdiseases/en/

الفصل الثاني

الأحياء المجهرية والوراثة

Microbiology and Genetics

م.د. خديجة عباس صحن
جامعة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - العراق

الملخص

يعرض الفصل الأحياء المجهرية والوراثة عبر ثلاثة مسارات مترابطة: الكائنات الدقيقة ودورها في البيئة والحياة، والوراثة وانتقال الصفات، والتطبيقات العلمية للمجالين. ويبدأ بالتعريف بالأحياء المجهرية وفئاتها وخصائصها وطرق دراستها، مع بيان تنوع البيئات التي تعيش فيها والعلاقات التي تنشأ بينها وبين الكائنات الأخرى. ويبرز دورها في العمليات البيئية والأنشطة الحيوية، إلى جانب الأوجه النافعة والضارة التي تتناولها المادة.

ويعالج المسار الوراثي بنية المادة الوراثية والجينات والكروموسومات والانقسام وانتقال الصفات، ثم يناقش المفاهيم الجزيئية المرتبطة بتضاعف المعلومات والتعبير عنها وتغيرها. وتربط المعالجة بين القواعد التفسيرية والأمثلة، وتوضح كيف تساعد دراسة الوراثة على فهم التنوع والاختلاف والوظيفة الحيوية. وتُستخدم الرسوم والجداول في بيان البنى والمراحل والعلاقات التي يصعب اختزالها في الوصف اللفظي وحده.

ويتناول الفصل تطبيقات في التشخيص والتكنولوجيا الحيوية والزراعة والصناعة والبيئة، مع عرض التقنيات التي تتيح التعرف إلى الكائنات والمادة الوراثية أو توظيفها. كما يناقش جوانب السلامة والمسؤولية وحدود الاستخدام، ويصل المعرفة الأساسية بالإمكانات التطبيقية دون إلغاء الحاجة إلى الضبط والتحقق. وتخلص المشاركة إلى أهمية الجمع بين الفهم الميكروبي والفهم الوراثي في قراءة العمليات الحيوية وتطوير تطبيقاتها. وتتمثل مساهمتها في عرض تعليمي موسع يحافظ على تتابع المفاهيم والتفاصيل والرسوم والمراجع، وليس في نسبة جميع التطبيقات الموصوفة إلى تجربة واحدة أو إلى نتائج جديدة أجريت ضمن الفصل.

الكلمات المفتاحية: الأحياء المجهرية؛ المادة الوراثية؛ انتقال الصفات؛ التقنيات الجزيئية؛ التطبيقات الحيوية

Abstract

This chapter presents microbiology and genetics through three connected pathways: microorganisms and their roles in environment and life, inheritance and transmission of characteristics, and scientific applications of the two fields. It introduces microbial groups, characteristics, and methods of study, considering the environments they occupy and their relationships with other organisms. Beneficial and harmful activities are discussed alongside their contributions to environmental and biological processes.

The genetics pathway examines genetic material, genes, chromosomes, cell division, and inheritance, followed by molecular concepts concerning replication, expression, and change of information. Explanatory principles are linked with examples to show how genetics contributes to understanding diversity, variation, and biological function. Diagrams and tables clarify structures, stages, and relationships that are difficult to convey through verbal description alone.

Applications include diagnosis, biotechnology, agriculture, industry, and environmental management, together with techniques for identifying or using microorganisms and genetic material. The chapter also discusses safety, responsibility, and limits of application, retaining the need for controlled procedures and verification. Its conclusion emphasizes the value of combining microbiological and genetic understanding when interpreting living processes and developing applications. The contribution is an extended educational treatment that maintains the progression of concepts, details, illustrations, and references. It does not attribute all described uses to a single experiment or present them collectively as new results generated within the chapter.

Keywords: Microbiology; Genetic material; Inheritance; Molecular techniques; Biological applications

Section I: Microbiology and Its Role in Environment and Life

Section II: Genetics and Inheritance

Section III: Scientific Applications of Microbiology and Genetics

---

Section I

Microbiology and Its Role in Environment and Life

Introduction to Microbiology

1. **Definition and Scope**
2. **Historical Development**
3. **Classification of Microorganisms**
4. **Modern Taxonomy**

Microbiology is a part of the biological sciences that focuses on the study of microorganisms, living organisms and acellular biological elements that are not visible to the naked eye. They include bacteria, archaea, fungi, protozoa, microscopic algae and viruses. While microorganisms are very tiny, they are the largest reservoir of biological diversity on earth and crucially important to the structure and function of all systems of life (Alberts *et al.,* 2022). In recent years molecular biology, genomics and high throughput sequencing

have revolutionized the study of microbiology making it a multi-disciplinary and integrative study of genetics, bioinformatics, ecology, medicine, biotechnology and systems biology. Microbiology is more than just infectious diseases. Modern Microbiology is the study of the structure, physiology, metabolism, genetics, evolution and ecological interactions of microorganisms in various environments. They are found in virtually all habitats on earth ranging from soil, fresh water, marine life, desert, glaciers and deep-sea hydrothermal vents to highly acidic, alkaline, radioactive and high-pressure environments. Their extraordinary metabolic diversity allows them to thrive in environments that are inhospitable to most complex life forms, making them very adaptable to evolution (Brock *et al*., 2024).

Biological processes are at the heart of many ecological roles that microorganisms carry out to help maintain biogeochemical cycles such as carbon, nitrogen, sulfur, phosphorous, and other elemental cycles. They control nutrient availability, soil fertility, atmospheric composition and terrestrial and aquatic ecosystem production through these processes. Numerous microorganisms form beneficial relationships with plants and animals, which include improved nutrient uptake, improved growth, and increased resistance to environmental stress and pathogens. The Human Microbiome is a new frontier in understanding human health or disease, as it plays a significant role in the development of the immune system, metabolism, neurological function and disease susceptibility.

Microbiology has found many new applications due to the new molecular technologies which have developed very quickly. The development of whole genome sequencing, metagenomics, transcriptomics, proteomics, metabolomics, and single cell analysis have led to an investigation of uncultivated microorganisms and to the characterization of entire microbial communities directly from environmental samples. The application of AI and machine learning to microbiological research has grown in relevance to analyze vast biological data, forecast interactions between microbes, uncover antimicrobial resistance, and speed pathogen monitoring.

Nowadays, microbiology has become a key discipline of many scientific fields such as clinical medicine, pharmaceutical research, environmental sciences, agriculture, food sciences, industrial biotechnology, synthetic biology and precision medicine. The identification of novel microorganisms, metabolic pathways, and genetic mechanisms is changing our view of life and offering new sources to address global problems like new infectious diseases, antimicrobial resistance, climate change, food security, and sustainable bioeconomy (Chowdhury *et al*., 2024). For this reason, microbiology is one of the most rapidly changing and dynamic areas of modern biological science.

Classification of Microorganisms

Microorganisms are classified in a systematic manner based on their common structural, physiological, biochemical, genetic and

evolutionary properties that enable the classification of the enormous variety of microorganisms. Microbial classification is one of the essential tools in microbiology that has many applications including identification of microorganisms, prediction of microorganisms' biological properties and improvement of communication between microbiologists, clinicians and biotechnologists. The recent developments in molecular biology and genomics have revolutionized the classification of microorganisms from morphology to an all-round classification system incorporating phenotypic and genotypic data. There are two types of microorganisms – cellular and acellular. Cellular microorganisms are members of the domains Bacteria, Archaea and some microbial eukaryotes, while acellular microorganisms are mainly composed of viruses, viroids and prions. Bacteria are prokaryotic organisms which are unicellular, lacking organelles and a membrane-bound nucleus. They are very polymorphous: cocci, bacilli, spirilla, vibrios and filamentous forms. They generally have peptidoglycan in their cell walls, a unique structure that is also an important taxonomic characteristic. Bacteria are found in most habitats and carry out a variety of vital roles in nitrogen fixation, degradation, industrial fermentation and symbiosis within the host.

Archae are prokaryotic microorganisms that are different from bacteria with respect to their membrane lipids, cell wall structure, ribosomal RNA sequences, and gene expression mechanisms. Most of the species of archaeans are found in extreme conditions, such

as high temperature, salinity, acidity or pressure but many representatives also live in moderate environments, such as oceans, soils, and the gastrointestinal tract of humans (Brown *et al*., 2023). They have distinct metabolic pathways, which play a significant role in global cycling of carbon and methane. Examples of microbial eukaryotes include fungi, protozoa and microscopic algae. Fungi are more complex, multicellular organisms that are also unicellular yeasts, and are important decomposers in the environment, as well as in food production, pharmaceuticals, and biotechnology. Protozoa are mostly unicells with varied locomotion, nutrition and reproduction mechanisms. Malaria, amoebiasis and leishmaniasis are diseases caused by several protozoan species that are important pathogenic species. Aquatic (microscopic) algae are photosynthetic eukaryotes, which are primary producers in aquatic ecosystems, and play a significant role in the production of oxygen and the fixation of carbon on a global scale. A virus is a unique life form, consisting of a nucleic acid surrounded by a protein capsid, some of which also have a lipid envelope. The virus is smaller and has no metabolism and cannot replicate without the help of living host cells. They have unique and high genetic diversity and are able to evolve very quickly, making them significant agents of ecology, medicine, agriculture and biotechnology. Other noncellular infectious agents are viroids, small circular RNA viruses that infect plants, and prions, infectious proteins that are related to a collection of neurodegenerative diseases. Figure (15-1).

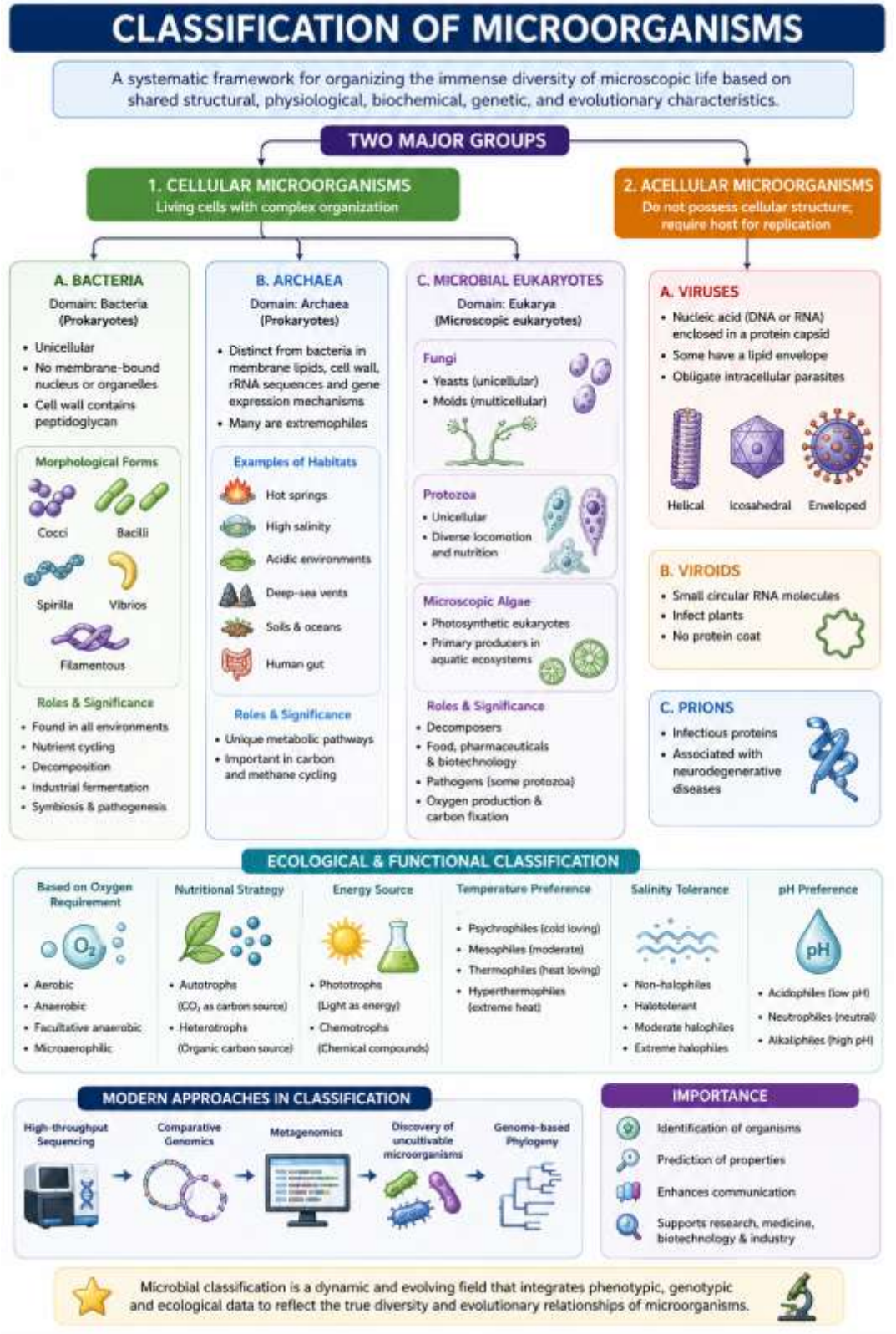


Figure (15-1): Classification of microorganisms.

Ecological function and metabolic ability are also included in modern microbial classification. Microorganisms can be classified based on

their oxygen requirement (aerobic, anaerobic, facultative anaerobic, microaerophilic), dependence for energy source (phototrophs, chemotrophs), temperature preference (psychrophiles, mesophiles, thermophiles, hyperthermophiles), dependence on salty environment (halophiles), and dependence on pH (acidophiles, alkaliphiles). These functional classes are especially useful in environmental microbiology, biotechnology industries, and medical diagnostics. Advances in high throughput sequencing, comparative genomics and metagenomics in recent years have uncovered an unprecedented diversity of microorganisms that cannot be cultivated in the laboratory, resulting in the discovery of many new bacterial and archaeal lineages. Therefore, microbial classification is an evolving field, and the classification of microorganisms has been continually updated to include the most recent genome evidence that matches the evolutionary relationships between microorganisms (Karp, 2009).

Modern Taxonomy

Microbial taxonomy is an interdisciplinary scientific method for recognizing, naming and categorizing microorganisms based on their evolutionary relations, by means of phenotypic, molecular genetics, genomics and bioinformatics. While the traditional taxonomy was based mainly on cell morphology, staining properties, metabolic activity and biochemical tests, the current taxonomy is based on genome based approaches that reflect the microbial

diversity and evolutionary history much more accurately. Next generation sequencing technologies have transformed the microbial systematics by providing detailed genomic comparisons of thousands of microbial species. The three-domain system, which recognizes Bacteria, Archaea and Eukarya as evolutionary lineages, is the basis of modern taxonomy (Eslami *et al*., 2025). The classification, along with comparative analyses of sequences of the genes for rRNA, revolutionised the understanding of microbial evolution, revealing that the archaea are a separate domain and closer to eukaryotes than to bacteria. Phylogenetic analysis is still one of the strongest methods for elucidating evolutionary relationships today among microorganisms. The modern taxonomy of microbes is based on genome sequencing. Whole genome analysis enables analysis of entire genetic repertoire, providing much greater taxonomic resolution than single gene-based analysis. Recently, Average Nucleotide Identity (ANI), digital DNA–DNA hybridization (dDDH), Average Amino Acid Identity (AAI) and phylogenomic analyses are increasingly used for the definition of microbial species and higher taxonomic ranks. Traditional methods of DNA hybridization are replaced by these genome-based criteria, as they are more reproducible, accurate and easily available (Oday *et al*., 2025).

In the past, novel microbial taxa have been described using the polyphasic taxonomy approach. This integrated approach integrates phenotypic characteristics, chemotaxonomic markers, ecological

information, physiological properties, molecular phylogeny and whole genome sequencing data. This extensive evaluation provides a classification that reflects both the observable biological characteristics and evolutionary relationships. Polyphasic taxonomy has gained additional significance in the description of micromorphogens in the environment, where there is little morphological variation but a significant genomic variation. Microbial taxonomy is undergoing a transformation with the ever increasing use of metagenomics for identification of microorganisms straight from the environment without the need for laboratory cultivation. However, most microorganisms cannot be cultured using traditional methods, and new microorganisms have been discovered by metagenomic sequencing, which has greatly added to the scope of the microbial tree of life. Single-cell genomics also complements metagenomics as it allows detailed characterization of previously unknown microbial lineages by genome reconstruction of individual uncultured cells.

In the field of microbial taxonomy, the use of artificial intelligence and advanced bioinformatics has become more and more prominent. Machine learning algorithms support genome annotation, phylogenetic reconstruction, automated species identification and prediction of microbial functions from genomic data. As new microbial genomes are sequenced, new classifications are added to the databases on the cloud and can be updated in near real time. Beyond classification, modern taxonomy is used for a myriad of

applications such as medicine, agriculture, biotechnology, environmental monitoring and public health. Microbiological identification allows speedy diagnosis of infectious diseases, tracking of emerging pathogens, tracking of antimicrobial resistance, optimizing industrial microbial processes, and conserving microbial biodiversity. With the further development of sequencing technology and computational biology, microbial taxonomy is anticipated to become more genome-centric, data-based, and evolution-oriented, offering more and more complete insights into microbial diversity in Earth's ecosystems (Vilhekar & Rawekar, 2024).

Microbial Cell Structure

1. **Prokaryotic Cells**
2. **Eukaryotic Microorganisms**
3. **Viruses and Viroids**
4. **Archaea**

Prokaryotic Cells

Prokaryotic cells are the most primitive and simple in the world, found in organisms of the domains Bacteria and Archaea. A prokaryote does not have a membrane enclosed nucleus and membrane enclosed organelles. Their genetic material is generally situated in a nucleoid region, and is usually arranged in a single circle of DNA, but many species also possess plasmids carrying accessory genes that are related to antibiotic resistance, virulence,

or some other specialized metabolic function. Prokaryotes are extremely metabolically diverse and ecologically adaptable, although they are relatively simple in their cellular organization. In prokaryotes, the cell envelope is made up of the plasma membrane and for most bacteria, a tough cell wall that gives the cell its shape and protects against osmotic stress. Peptidoglycan is a component of the bacterial cell wall and is used to divide the bacteria into Gram-positive and Gram-negative. Other external structures like capsules, pili, fimbriae and flagella are also involved in adhesion, motility, biofilm formation and host colonization. Prokaryotic ribosomes (70S) are efficient in the synthesis of protein and the cytoplasm contains enzymes for various metabolic pathways. In recent years, genomic and proteomic analyses have identified that prokaryotes, as well, have very complex mechanisms for rapid responses to environmental changes. Transformation, conjugation, and transduction enable microorganisms to adapt their genes quickly and add to their evolution. The ability of bacteria to communicate via quorum sensing, are also relevant to the formation of biofilms, the virulence of bacteria and their symbiotic relationship. Today, prokaryotic cells are known to be highly dynamic organisms with essential roles in biotechnology, medicine, biogeochemical cycling of the global environment and ecosystem functioning (Huang & Sun, 2026).

Eukaryotic Microorganisms

Eukaryotic microorganisms are a diverse group of microscopic organisms, having a membrane-bound nucleus as well as special intracellular organelles. This group is made up mainly of fungi, protozoa and microalgae which are more structurally complex than prokaryotic organisms. They are also organized into compartments at the cellular level allowing for highly regulated metabolic activities and very complex growth, differentiation and environmental adaptation mechanisms. Eukaryotic microorganisms are characterized by having the nucleus with several linear chromosomes surrounded by a nuclear membrane. Specialized cellular structures (organelles) like mitochondria, endoplasmic reticulum, Golgi apparatus, lysosomes, vacuoles, and chloroplasts (only in photosynthetic algae) increase the efficiency of metabolism. They attach to one another with proteins produced by their ribosomes (80S), and have an extensive cytoskeleton that helps the cells to keep their shape, move around, and to transport materials between different parts of the cell. The fungi consist of unicellular yeasts and multicellular filamentous molds which are important decomposers, industrial microorganisms, and opportunistic pathogens. Protozoa are mainly unicellular, heterotrophs, and move actively by means of flagella, cilia or pseudopodia, and some species cause important human diseases. Phytoplankton are microscopic photosynthetic organisms that make a significant contribution to the world's primary productivity, oxygen production, and carbon fixation in water bodies. Recent genomic research has

shown that microbial eukaryotes are extremely diverse, and that they have evolved complex relationships with one another (and with other life forms), and that there is a huge amount of genetic variation. There are continued advances in understanding transcriptomics, metabolomics and single cell sequencing that are revealing novel cellular mechanisms that underlie stress adaptation, host interactions and environmental resilience. These findings have broadened their medical, agricultural, environmental biotechnological, renewable energy, and synthetic biology applications with eukaryotes (Yap *et al*., 2026).

Viruses and Viroids

Viruses and viroids are acellular infectious agents which are very different from cellular microorganisms in structure and biological function. Viruses are composed of either DNA or RNA enclosed in a protein capsid and some have an additional lipid envelope from the host cell membrane. The viruses are also obligate intracellular parasites that depend solely on host cell metabolic enzymes and ribosome for reproduction, as they do not possess ribosomes, metabolic enzymes, or energy generating system. The diversity of viruses is huge and includes viruses of bacteria, archaeal viruses, plant viruses, animal viruses, and pathogens of human beings. These replicate in the following fashion: attachment, entry, genome replication, assembly, and release of progeny virions. Viral populations are highly mutable, with especially high mutation rates

in RNA viruses, which allows for the ability to adapt to new hosts and the emergence of new infectious diseases (Nichkoohi & Moradi, 2026). A number of recent developments in structural biology and cryo-electron microscopy have significantly contributed to the understanding of viral structure and virus-host interactions. Viroids are the smallest known infectious agents consisting of short circular, single-stranded RNA molecule without a protein coat. They cause severe diseases in plants by interfering with the regulation of normal genes, and usually infect plants. Viroids differ from viruses because they lack a protein component, and they replicate by using host RNA polymerases and by a unique rolling-circle mechanism. Figure (15-2).

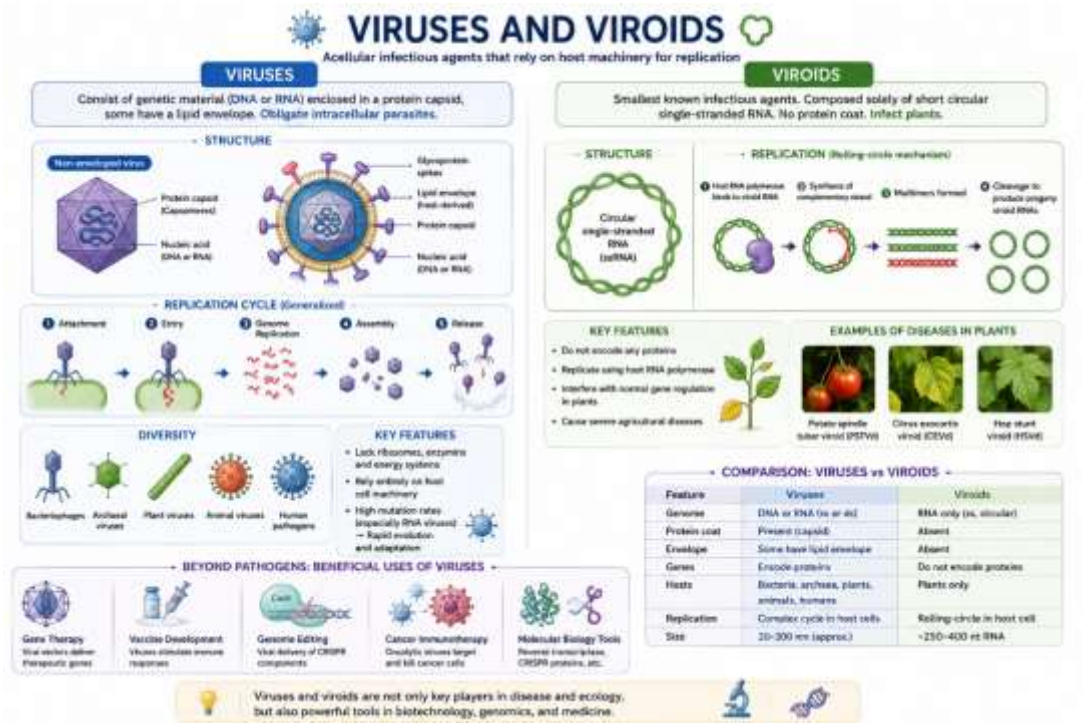


Figure (15-2): Structure of Viruses and Viroids.

Today, the understanding of viruses and viroids is broadened and extended beyond their pathogenic aspects by modern molecular

biology. Viral vectors are increasingly used in the fields of cancer immunotherapy, genome editing, vaccine development, and gene therapy. Reverse transcriptase and CRISPR-associated proteins are essential tools in molecular biology. These advances demonstrate that viruses and viroids are more than just infectious agents, but useful biological systems essential in biotechnology, genomics and biomedical research (Doudna & Charpentier, 2014).

Microbial Metabolism

1. **Energy Production**
2. **Carbon and Nitrogen Metabolism**
3. **Bioenergetics**
4. **Microbial Growth Factors**

Energy Production

Production of energy is a basic process in the metabolism of microorganisms that allows them to maintain their cellular activities, grow and reproduce, and adjust to the changing environments. Microorganisms have an amazing metabolic diversity, which enables them to use and convert a much wider variety of energy sources than can most multi-cellular organisms. Energy is stored mainly in the form of adenosine triphosphate (ATP) that is used for biosynthetic reactions, active transport, motility and maintenance of the cell. There are three main ways in which microbes generate energy: respiration, fermentation and photosynthesis. In aerobic

respiration, microorganisms use oxygen as the final electron acceptor in the electron transport chain to generate ATP with high energy efficiency by oxidative phosphorylation. Anaerobic respiration uses alternative electron acceptors like nitrate, sulfate, ferric iron, or carbon dioxide to help microbes survive when oxygen is absent. Fermentation is another ATP generating process that involves the use of organic compounds as electron donors and/or acceptors. Fermentation is not as effective as respiration, but can help microbial growth under anaerobic conditions, and is important in the food industry and industrial biotechnology. Photosynthetic microorganisms like cyanobacteria and microalgae produce chemical energy from the sun's energy via oxygenic or anoxygenic photosynthesis. They play an important role in carbon fixation and oxygen production, as well as in the aquatic food webs, worldwide. New microbial pathways for energy harvesting from inorganic compounds like hydrogen, sulfur, ammonia, methane, and iron have also recently been identified, showcasing the metabolic versatility of microorganisms. Recent developments in genomics, metabolomics and systems biology have increased our understanding of microbial energy metabolism, which has led to a greater understanding of the complex regulatory networks that ensure efficient production of ATP in response to changes in the environment. These findings have led to improved use in renewable bioenergy, in microbial fuel cells, in wastewater treatment and sustainable industrial biotechnology.

Carbon and Nitrogen Metabolism

Two interconnected processes of carbon and nitrogen metabolism contribute to microbial growth, biosynthesis, and ecosystem functioning. Carbon is the main constituent building block of all cellular macromolecules and nitrogen is needed to form amino acids, nucleic acids, proteins, coenzymes, and many metabolites. The metabolic versatility of microorganisms allows them to use a wide range of carbon and nitrogen sources and keep global biogeochemical cycles in check. Carbon is obtained by the microorganisms via autotrophism or heterotrophism. The carbon source of autotrophic microorganisms is CO_2, inorganic carbon is fixed by these microorganisms by pathways including Calvin-Benson cycle, reverse TCA cycle or Wood-Ljungdahl pathway. Heterotrophic microorganisms, however, use organic compounds such as carbohydrates, lipids, proteins and organic acids as carbon sources. These compounds undergo metabolism by glycolysis, tricarboxylic acid cycle and related metabolic pathways to produce energy and biosynthetic intermediates. Nitrogen metabolism includes nitrogen fixation, nitrification, denitrification, ammonification and nitrogen assimilation. Some bacteria and archaea include the enzyme nitrogenase, which is able to fix atmospheric nitrogen into ammonia that's accessible to other organisms, providing nitrogen to ecosystems. Nitrogen cycle is completed by nitrifying microorganisms that convert ammonia to nitrite and nitrate, and denitrifying bacteria that convert nitrate back to gaseous nitrogen.

Nitrogen fixed or ammonia from the breakdown of organic matter is incorporated into amino acids by glutamine synthetase and glutamate synthase pathways. In recent years, metagenomic and transcriptomic studies have shown that microbial carbon and N metabolism is highly sensitive to the environment, microbial interactions and nutrient availability. These metabolic networks affect soil fertility, greenhouse gas emissions, climate control, wastewater disposal, and sustainable agriculture. The comprehension of microbial carbon and nitrogen transformations has thus gained a growing significance in environmental management, ecosystem restoration and development of carbon neutral biotechnologies (Nasution, 2024).

Bioenergetics

Bioenergetics involves the study of the transformation of energy in a living system, and serves as the basis for understanding the metabolism of microorganisms. Bioenergetic processes in microorganisms refer to the mechanism of trapping and converting chemical or light energy, storing it, and using energy to synthesize and sustain key cellular functions. In order to survive in very different environments, from nutrient-rich habitats to extreme environments with high temperature, salinity, acidity, or pressure, microorganisms have to convert energy efficiently. The key concept in microbial bioenergetics is that exergonic reactions (those that release free energy) are coupled with endergonic reactions (those that need an

input of energy). The ATP is the main energy carrier and connects catabolic pathways which produce energy to anabolic pathways that lead to biosynthesis in cells. Electrochemical gradients across bio-membranes are produced during electron transfer reactions that take place inside respiratory or photosynthetic electron transport chains. This proton motive force is used in chemiosmotic production of ATP, using ATP synthase. There is great diversity among microorganisms in their bioenergetic strategies. Anaerobic microorganisms rely on alternative electron acceptors or fermentation reactions to produce ATP, while aerobic organisms use oxidative phosphorylation with oxygen. Chemolithotrophic microorganisms can gain energy from the oxidation of inorganic compounds (hydrogen, sulfur, ammonia, ferrous iron) and photo trophic microorganisms can gain energy from the photosynthetic electron transport of the sun's energy. New advances in structural biology, cryo-electron microscopy, and computer modeling have recently yielded detailed information about the molecular architecture of respiratory complexes and ATP synthase. Systems biology approaches have also identified the complex mechanisms that optimize energy use under environmental stress. The discoveries have paved the way for applications in metabolic engineering, synthetic biology, bioenergy production, and microbial fuel cells, highlighting the vital role of microbial bioenergetics in biotechnology and sustainable development. Nitrogen metabolism includes nitrogen fixation, nitrification, denitrification, ammonification

and nitrogen assimilation. Some bacteria and archaea can use the nitrogenase enzymes to take advantage of atmospheric nitrogen and reduce it into ammonia, which is usable by ecosystems. Nitrifying microorganisms convert ammonia to nitrite and nitrate and denitrifying bacteria convert nitrate back into gaseous nitrogen, thus completing the nitrogen cycle. The nitrogen from ammonia produced by nitrogen fixation or from decomposition of organic matter is incorporated into amino acids by glutamine synthetase and glutamate synthase. In recent metagenomic and transcriptomic studies, it has been shown that microbial carbon and nitrogen metabolism is highly responsive to environmental factors, interactions between the microorganisms, and nutrient availability. Such metabolic networks impact soil fertility, greenhouse gas emissions, climate control, wastewater treatment and sustainable farming. Hence, it is more important to understand the microbial transformation of carbon and nitrogen for environmental management, ecosystem restoration and development of carbon neutral biotechnologies (Mashrafi, 2026).

Microbial Growth Factors

Microbial growth factors are organic compounds which the microorganisms need in small amounts for the growth, metabolism and reproduction of the microorganisms but cannot produce them in adequate amounts. These compounds are mainly cofactors of enzymes, metabolic precursors or structural components of key

biochemical reactions. Growth factors play an important role in microbial physiology, ecological distribution, industrial culturing and pathogenicity.

Vitamins, amino acids, purines, pyrimidines and certain fatty acids are the major types of microbial growth factors. Biotin, thiamine, riboflavin, niacin, pantothenic acid, folic acid, and cobalamin are all vitamins which act as coenzymes or factors in many metabolic reactions related to carbohydrate metabolism, nucleic acid synthesis and production of energy. Some microorganisms have full biosynthetic pathways for these compounds, while others rely on environmental sources or symbiotic partners for these compounds.

Microbial growth needs are very much influenced by environmental conditions. All of the above parameters interact to produce a combination of effects on microbial proliferation. So, culture media for the laboratory are designed with a balanced and exact nutrient and growth factors to provide the optimum conditions for microbial growth and physiology. These fastidious organisms, such as several clinically important pathogens, need highly enriched media that include blood, serum or special nutritional supplements.

With the recent developments in metabolomics and genome-scale metabolic modelling, the nutritional needs of microorganisms have been better understood and novel biosynthetic pathways and metabolic dependencies unraveled. These findings enable the formulation of better optimized culture media, increase industrial fermentation processes, development of probiotics and precision

microbiology. Moreover, the knowledge of requirements for microbial growth has gained growing significance in the research of antimicrobial drugs, host-microbe relationships, the study of the microbiomes, and synthetic biology, where nutritional engineering is employed to facilitate regulation of microbial growth and metabolic activity.

Microbial Ecology

1. **Soil Microbiome**
2. **Marine Microbiology**
3. **Freshwater Microbiology**
4. **Plant Microbiome**
5. **Human Microbiome**

Soil Microbiome

Soil microbiomes are a diverse group of bacteria, archaea, fungi, viruses, protozoa and other microorganisms present in soil ecosystems. It is one of the most complex environments on earth – every gram of it contains billions of microbial cells and thousands of species. These microorganisms continuously interact with plants, animals and with each other, creating very complicated ecological networks that control the cycling of nutrients, decomposition of organic matter and productivity of the ecosystem.

Soil microorganisms are key components of the biogeochemical cycles as they break down organic residues and transform complex organic compounds into plant available nutrients. The nitrogen-fixing bacteria converts atmospheric N2 to NH4, and the nitrifying and denitrifying microorganisms control the availability of N2 and GHGs. Plants form mutualistic relationships with mycorrhizal fungi, which increases their uptake of nutrients, drought resistance, and resistance to soil-borne diseases. Beneficial rhizobacteria also stimulate plants by producing phyto-hormones, and solubilizing phosphate and biological control of plant diseases (Shukla & Choudhary, 2026).

Recent developments in metagenomics, meta transcriptomics, and metabolomics have shown that most soil microorganisms are not able to be cultured in the laboratory. The large taxonomic and functional diversity revealed by high-throughput sequencing shows that microbial communities are very dynamic, and quickly reflect changes in their environment, including climate change, land-use, pollution, and agricultural management. The knowledge of soil microbiome is gaining importance in sustainable agriculture, carbon sequestration, ecosystem restoration, and the production of environmentally friendly biofertilizers and biopesticides.

Marine Microbiology

Marine microbiology is the science of the microorganisms that live in oceans, seas and other marine environments; microbial

communities are the base of the marine ecosystems of the world. Marine micro-organisms comprise a majority of the biomass and biochemical activity of the ocean and consist of bacteria, archaea, small algae, fungi, viruses, and protists. These microbes play a vital role in maintaining ocean health, climate and marine food webs. Photosynthetic microorganisms, including cyanobacteria and phytoplankton, account for almost half of photosynthesis in the world and generate a sizable fraction of oxygen in the world's atmosphere. Dissolved organic matter is mineralized by marine heterotrophic bacteria, which recycle nutrients and provide energy for higher trophozooic levels via the microbial loop. The energy for chemolithotrophic microorganisms residing in hydrothermal vents is acquired from inorganic compounds, which highlights their incredible metabolism in extreme environments. Marine viruses are the most prevalent component of the oceans, and have important ecological functions, including microbial control, microbial horizontal gene transfer and nutrient recycling via viral lysis. It has recently been demonstrated that the biological carbon pump (BCP) by marine microorganisms is a major driver of global carbon sequestration, affecting atmospheric carbon dioxide concentrations and climate regulation. The advances in sequencing technology, remote sensing and ocean metagenomics have revolutionized the understanding of the diversity and number of microbes that inhabit the ocean, and have identified thousands of new species and metabolic pathways. The findings have implications for marine biotechnology, drug

development, renewable biofuels, environmental surveillance, and climate change studies, among others, underscoring the crucial role of marine microorganisms in the Earth's biosphere (Gifford, 2026).

Freshwater Microbiology

The study of the microorganisms found in the water of rivers, lakes, wetlands, reservoirs, groundwater, and other bodies of freshwater is called fresh water microbiology. They harbor extremely diverse microbial communities that help to maintain the quality of the water, the cycling of nutrients and ecological stability. Freshwater microorganisms include bacteria, archaea, fungi, algae, protozoa, and viruses, all of which are part of dynamic aquatic ecosystems, and are influenced by seasonal and environmental fluctuations. Photosynthetic microorganisms, in particular cyanobacteria and microalgae, act as primary producers and use the energy of the sun to create organic matter and release oxygen into an aquatic system. Heterotrophic bacteria break down organic matter and recycle nutrients like carbon, nitrogen and phosphorus, ensuring the productivity of the ecosystem. Microbial communities are also involved in natural purification mechanisms that help to degrade organic contaminants and convert harmful substances into less harmful compounds. Anthropogenic activities, such as agricultural runoff, industrial pollution, urbanization and climate change, can have a very adverse effect on freshwater ecosystems. Too many nutrients can lead to the growth of blooms of harmful algae that release toxins harmful to wildlife and humans, as well as aquatic life.

Environmental disturbances can also disrupt microbial community composition, decreasing biodiversity and ecosystem resilience. Microbial ecology in freshwaters has been greatly advanced by recent developments in metagenomics, microbial network analysis and environmental DNA sequencing. These technologies allow for the analysis of microbial diversity, discovery of new pathogens, and measurement of ecosystem health in a short time. The study of freshwater microbiology has gained great significance in the management of water resources, public health monitoring, wastewater treatment, conservation of biodiversity and sustainable environmental protection.

Plant Microbiome

The plant microbiome includes the varied microbial communities found on the roots, leaves, stems, flowers, seeds and in the plant's vascular tissues. These include bacteria, fungi, archaea, viruses, and protists that form complex interactions with each other, from mutualistic symbiosis to pathogenic infection (Casadevall *et al*., 2000). Today, the plant microbiome is acknowledged as a vital factor of plant health, productivity and environmental adaptation. The soil surrounding the root system of the plants (rhizosphere) is one of the most dynamic environments for microbial life. The plant growth promoting rhizobacteria optimize nutrient availability by nitrogen fixing, phosphate solubilization, iron mobilization and production of phytohormones which induce root growth. The

mycorrhizal fungi are able to increase the ability of the roots to absorb water and minerals, especially when the environment is stressful. Endophytic microorganisms inhabit internal plant tissues without causing disease and play a role in improving stress tolerance, pathogen resistance and the production of secondary metabolites. Recent studies have shown that plants actively select their associated microbiome by emitting certain chemicals from the roots, which recruit beneficial microbes and inhibit pathogenic microbes. Recent developments in multi-omics technologies such as metagenomics, transcriptomics, proteomics, and metabolomics, have uncovered complex networks of communication between plants and their microbial associates. The knowledge of plant microbiomes has led to the creation of new tools that promote sustainable farming practices, such as microbial inoculants, biofertilizers, and biological control agents. Harvesting beneficial microbial communities holds great potential for boosting crop productivity, decreasing reliance on chemical fertilizers, strengthening stress resilience to climate change, and ultimately benefiting global food security.

Human Microbiome

The human microbiome refers to microorganisms that reside on the surface of the skin and in the gastrointestinal tract, oral cavity, respiratory tract, and urogenital system. They are composed of bacteria, archaea, fungi, viruses and protozoa, with a genetic

repertoire that is much greater than the human genome. The human microbiome is not a static collection of organisms residing within the body, but rather an active system that plays a crucial role in the body's physiology and health (Eloe-Fadrosh *et al.*, 2013). The gut microbiome is the most extensive and studied microbial ecosystem in humans. Functions in growth, digestion, vitamin secretion, maturation of the immune system, metabolism and colonization resistance against pathogenic microorganisms. Short-chain fatty acids are produced by the intestinal microorganisms and play a role in maintaining intestinal integrity, inflammatory responses, and metabolic homeostasis. There is emerging evidence of a microbiota–gut–brain axis in which microbial metabolites affect neurological development, cognition and mental health (Goodman *et al.,* 2009). Numerous diseases, such as inflammatory bowel disease, obesity, diabetes mellitus, cardiovascular disorders, autoimmune diseases, allergies and several types of cancer have been linked with microbial dysbiosis, which is defined as an imbalance in the microbial diversity and composition. Rapid developments in metagenomics, single-cell sequencing, metabolomics, and artificial intelligence have made it possible to precisely characterize microbial communities and their activities (Turnbaugh & Gordon, 2009). New treatments, such as precision probiotics, prebiotics, microbiome targeted therapeutics and faecal microbiota transplantation, are developed by the current research on the microbiome, which is paving the way for individualized medicine

treatments. The present research on the microbiome is leading to the development of personalised medicine approaches such as precision probiotics, prebiotics, microbiome targeted therapeutics and faecal microbiota transplantation (Gilbert *et al*., 2018). The human microbiome has an increasing role in health and disease, and is becoming an important target for prevention, diagnosis and personalized treatment and therapy; Table (15-1).

Table (15-1): Comparative Characteristics of Major Microbial Ecosystems and Their Ecological Functions.

Microbial Ecosystem	Dominant Microorganisms (%)	Major Functions	Representative Organisms	Key Applications / Importance
Soil Microbiome	Bacteria (70–90%), Fungi (5–20%), Archaea (1–5%), Protozoa (1–5%), Viruses (Highly abundant, >10^7 particles/g soil)	Nutrient cycling, organic matter decomposition, nitrogen fixation, phosphorus solubilization, plant growth promotion	*Bacillus, Pseudomonas, Rhizobium, Azotobacter, Streptomyces, Glomus*	Sustainable agriculture, carbon sequestration, biofertilizers, bioremediation
Marine Microbiology	Bacteria (60–80%), Archaea (10–20%), Phytoplankton & Microalgae (5–15%), Viruses (>10^7 particles/mL seawater)	Carbon fixation, oxygen production, nutrient recycling, biological carbon pump	*Prochlorococcus, Synechococcus, Pelagibacter, Nitrosopumilus*	Climate regulation, marine biotechnology, pharmaceuticals, biofuels
Freshwater	Bacteria (60–80%),	Water purification,	*Microcystis, Limnohabitans*	Water quality monitoring,

Microbial Ecosystem	Dominant Microorganisms (%)	Major Functions	Representative Organisms	Key Applications / Importance
Microbiology	Microalgae (10–20%), Archaea (1–10%), Protozoa (1–5%), Viruses (Highly abundant)	nutrient cycling, pollutant degradation, oxygen production	, *Flavobacterium*	wastewater treatment, ecosystem management
Plant Microbiome	Bacteria (70–90%), Fungi (5–20%), Archaea (<5%), Viruses & Protists (Low abundance)	Plant growth promotion, nitrogen fixation, phytohormone production, disease suppression	*Rhizobium, Azospirillum, Bacillus, Pseudomonas, Trichoderma*	Biofertilizers, biopesticides, crop productivity, climate resilience
Human Microbiome	Bacteria (95–99%), Archaea (<1%), Fungi (<1%), Viruses (Bacteriophages predominant), Protozoa (Rare)	Digestion, vitamin synthesis, immune modulation, colonization resistance, metabolic regulation	*Bacteroides, Faecalibacterium, Lactobacillus, Bifidobacterium*	Precision medicine, probiotics, microbiome therapeutics, disease prevention

Microorganisms in Biogeochemical Cycles

1. **Carbon Cycle**
2. **Nitrogen Cycle**
3. **Sulfur Cycle**
4. **Phosphorus Cycle**

Carbon Cycle

One of the most basic biogeochemical cycles of carbon between the atmosphere, biosphere, hydrosphere and lithosphere is the microbial carbon cycle. The role microorganisms have in both fixing and decomposing carbon plays a central role in maintaining the balance of CO2 reservoirs in the world. Most microorganisms (cyanobacteria, microalgae, and some chemosynthetic bacteria) can fix carbon dioxide (CO_2) from the atmosphere using photosynthesis or chemosynthesis to produce organic compounds that can be used as their main source of energy for living. Fungi and heterotrophic bacteria break down dead plants, animals and organic wastes and return the carbon to the environment as carbon dioxide by aerobic respiration. Under anaerobic conditions, methanogenic archaea will convert carbon containing compounds back into methane (CH_4) while methanotrophic bacteria will oxidize methane to carbon dioxide, thus reducing greenhouse gases. The response of these microbes to each other affects the levels of carbon in the atmosphere and plays a large role in stabilizing it. There is increasing evidence from recent studies using metagenomics and stable isotope analysis that the microbial community is very sensitive to climate change, soil management and environmental perturbations. Alteration of micro-biological diversity directly affects the processes of carbon sequestration, decomposition of organic matter and production of greenhouse gases (Allison *et al*., 2014).

Thus, knowledge of microbial carbon metabolism is vital to the implementation of sustainable agriculture, improving soil quality, better carbon capture technologies and solutions to global climate change through nature; Figure (15-3).

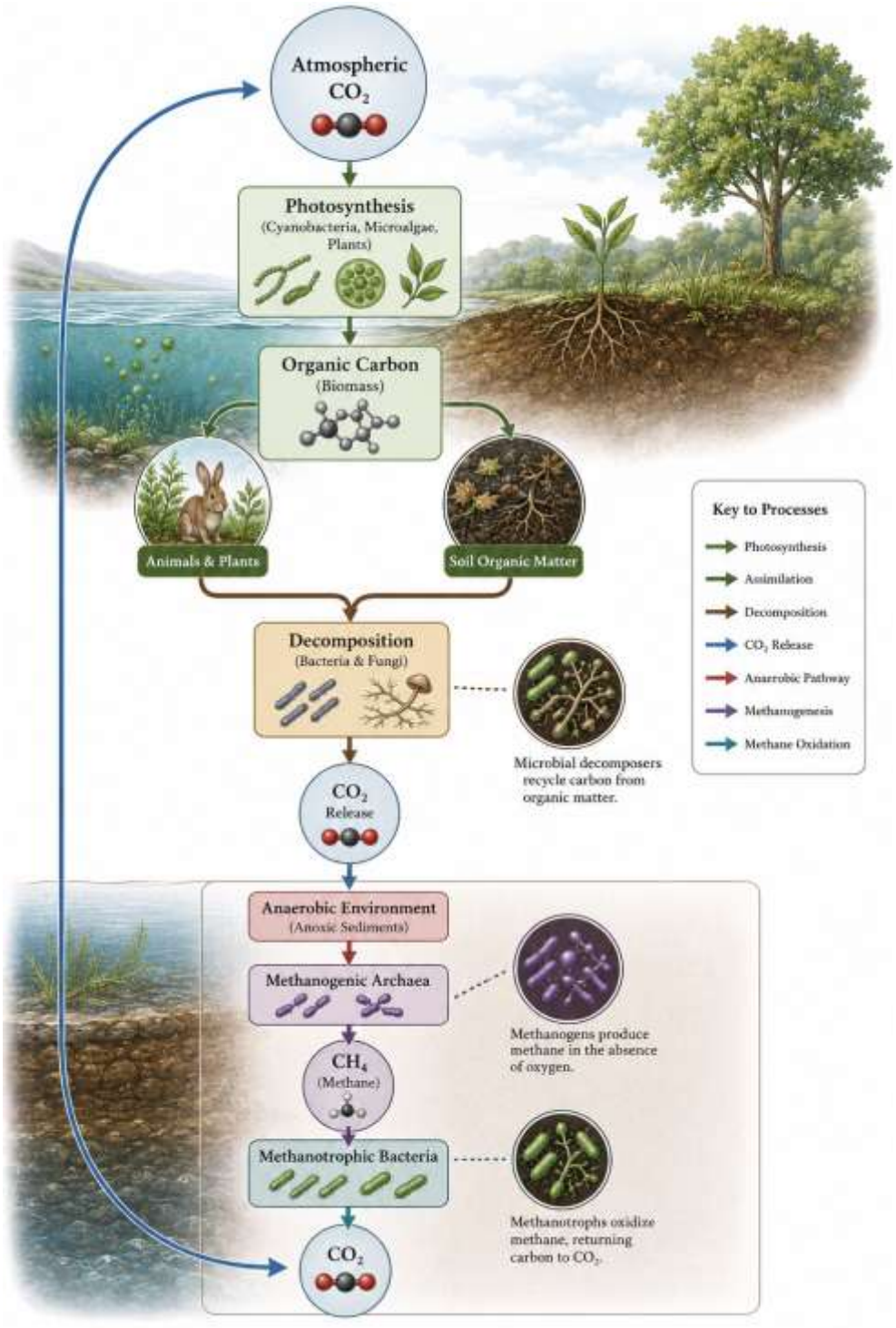


Figure (15-3): Simplified Scientific Diagram – Carbon Cycle.

Nitrogen Cycle

Nitrogen cycle is a highly complex microbial process in which nitrogen is transformed into biological forms needed for the synthesis of proteins, nucleic acids, amino acids etc. Nitrogen is present in the atmosphere in the form of diatomic N_2, which makes up about 78% of the earth's atmosphere, but most organisms are not able to use this. Specialized microorganisms consequently undergo several biochemical transformations, rendering the nitrogen available to living organisms. Nitrogen fixation is performed mainly by diazotrophic bacteria and archaea that have the enzyme nitrogenase that reduces nitrogen gas (N_2) to ammonia (NH_3) from the atmosphere (Hoang *et al*., 2022). In addition to symbiotic bacteria which develop a mutualistic relationship with leguminous plants, free-living bacteria like Azotobacter and cyanobacteria are also important contributors of nitrogen fixation. Nitrogen fixed or decomposed ammonia is oxidized by nitrifying bacteria to nitrite (NO_2^-) and then nitrate (NO_3^-), which can easily be absorbed by plants. Under oxygen deficient conditions, denitrifying bacteria return nitrate to atmospheric N, avoiding excess of N in the system. Nitrogen availability is also regulated and ecosystem productivity by other microbial processes including ammonia oxidation (ammox) and ammonification. Recent metagenomic research has found that nitrogen cycling is performed by very complex microbial

communities that rapidly change depending on soil moisture, temperature, oxygen availability, and the cultural practices of the farmer. The knowledge of the microbial N metabolism is gaining importance in sustainable agriculture, wastewater treatment, fertilizer management and reduction of nitrous oxide emissions, a strong greenhouse gas which is linked to climate change; Figure (15-4).

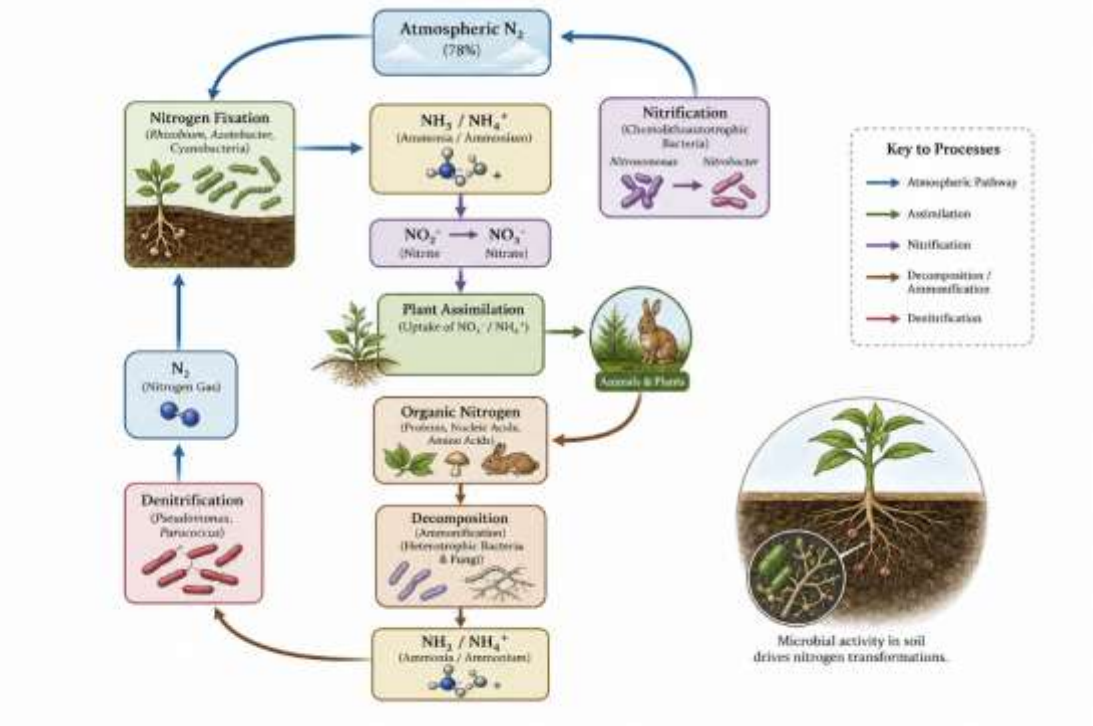


Figure (15-4): Simplified Scientific Diagram – Nitrogen Cycle.

Sulfur Cycle

The sulfur cycle is a biogeochemical process in which microorganisms play an important role in the reduction of sulfur to the sulfite, sulfate, and sulfide and the oxidation of sulfur to the sulfite, sulfate, and sulfide. Sulfur is essential for the production of amino acids, coenzymes, vitamins, and various proteins in the cells.

Microbial sulfur metabolism plays a special role in the marine sediments, wetlands, geothermal systems, and soils of agriculture, where oxygen levels are dynamic. Sulfur-oxidizing bacteria, such as Thiobacillus sp. and Beggiatoa sp., also oxidize hydrogen sulfide (H_2S), elemental sulfur and other reduced sulfur compounds to sulfate (SO_4^{2-}) and produce energy by chemolithotrophic metabolism. Under anaerobic conditions, sulfate reducing bacteria (e.g. Desulfovibrio spp.) will use sulfate as the final electron acceptor, generating hydrogen sulfide. This hydrogen sulfide can then be re-oxidized, thus completing the sulfur cycle. Marine microorganisms play an important role in the global sulfur cycle, metabolizing dimethyl sulfoniopropionate (DMSP) and producing dimethyl sulfide (DMS), which is a volatile sulfur compound with a role in cloud formation and climate regulation. In recent metagenomic studies, new microorganisms that could cycle sulfur have been discovered, highlighting the vast array of sulfur cycling pathways found in both terrestrial and aquatic environments. Knowing how the microbes in the soil process sulfur has a number of practical uses in biomining, wastewater treatment, remediation of acid mine drainage, bioenergy production and environmental monitoring. The transformations of microbial sulfur will become more prominent in regulating the health and atmospheric chemistry of wetlands and marine environments as they change due to the effects of climate change (Fakhraee *et al*., 2025). The phosphorus cycle is unlike the carbon and nitrogen cycles because there is no

large atmospheric component; it is mainly geologic and microbial in soils and water. Phosphorus is a nutrient that is necessary for the production of nucleic acids, phospholipids, ATP and nutrients which act as signaling molecules in the cell. But most phosphorus in soil is in mineral form which is unassimilable by plants; Figure (15-5).

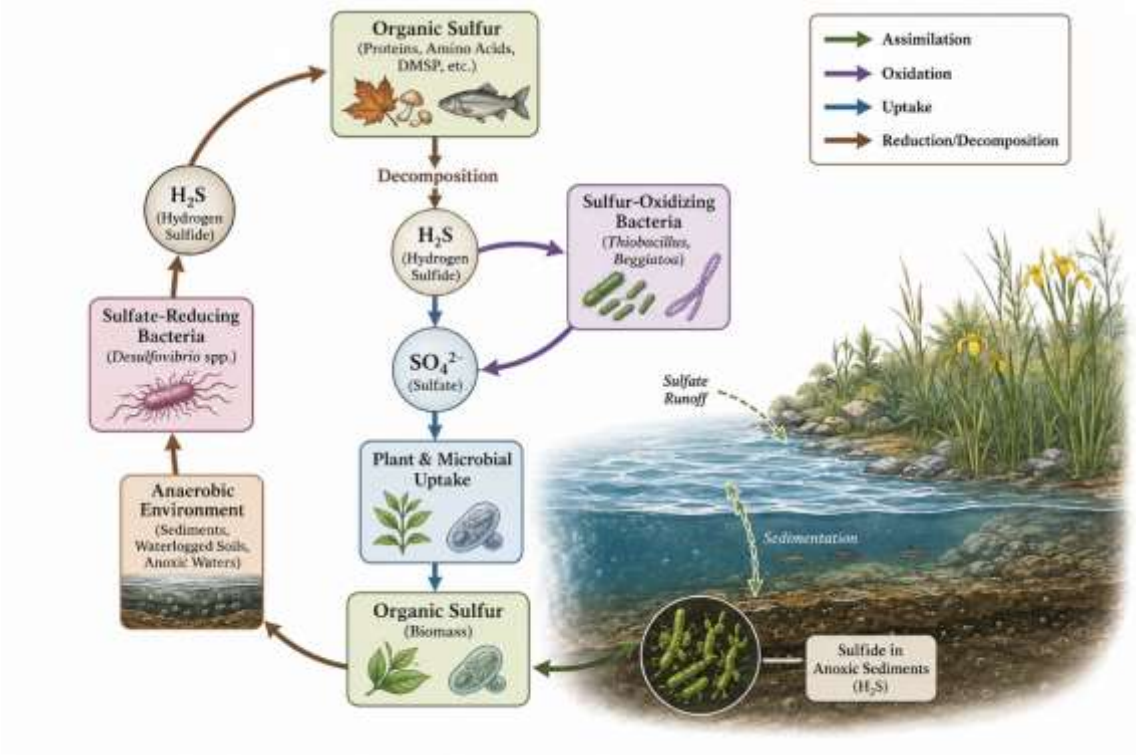


Figure (15-5): Simplified Scientific Diagram – Sulfur Cycle.

Phosphorus Cycle

Microorganisms like Bacillus, Pseudomonas, Aspergillus, and Penicillium bacteria produce organic acids and phosphatase enzymes which break down insoluble phosphate minerals to soluble phosphate ions that can easily be absorbed by plants. Mycorrhizal fungi also aid in the uptake of phosphorus by increasing the root absorbing surface and by moving phosphate from remote soil areas (Silva *et al*., 2023).

After the plants and animals die, microbial decomposers mineralize organic phosphorus compounds, releasing inorganic phosphate to the soil. Some phosphate is carried to rivers and oceans, where the microbial communities involve in the aquatic food webs recycle the phosphorus before long-term sediment deposition can take places.

The recent development of metagenomics and functional genomics has led to the discovery of many genes related to the acquisition, transportation and regulation of phosphorus in microbial communities. These findings have paved the way for the study and development of microbial biofertilizers to enhance the use efficiency of phosphorus and reduce reliance on chemical fertilizers. The management of phosphorus for sustainable food production and to protect the environment and freshwater systems has become a growing concern for global phosphorus security; Figure (15-6).

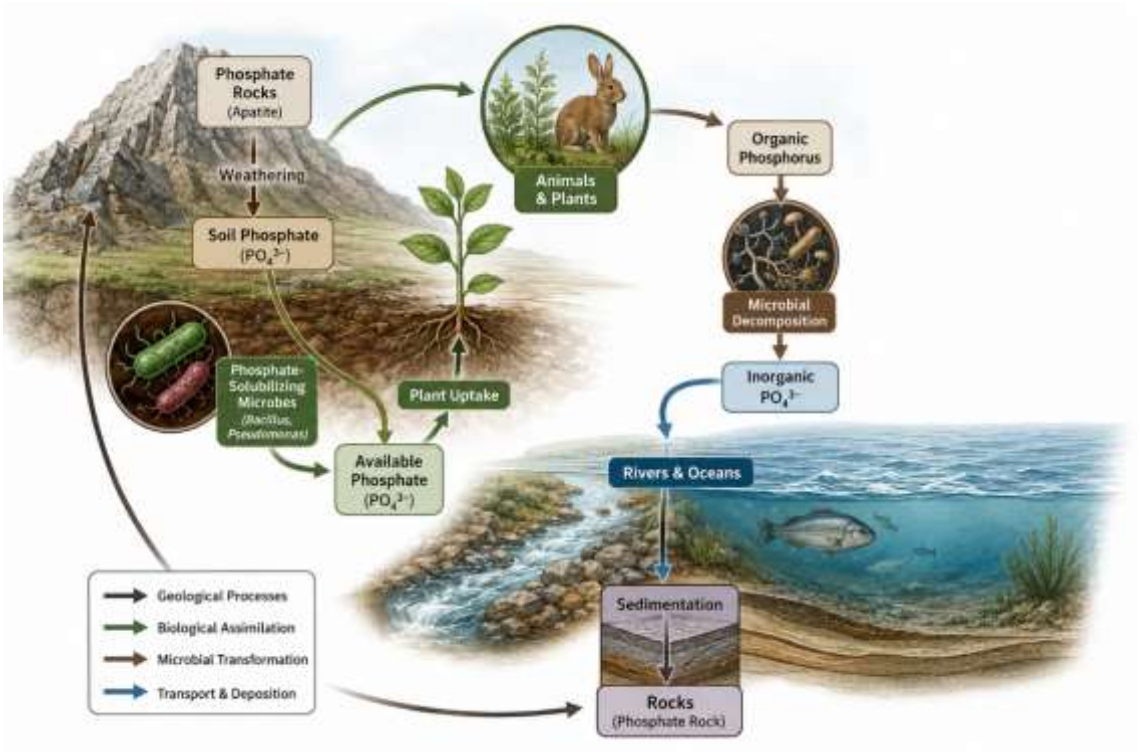


Figure (15-6): Simplified Scientific Diagram – Phosphorus Cycle.

Beneficial Microorganisms

1. **Agriculture**
2. **Food Industry**
3. **Environmental Sustainability**
4. **Biotechnology**

Beneficial Microorganisms in Agriculture

The beneficial microorganisms are essential parts of sustainable agriculture because they play an important role in improving soil fertility, plant growth, reducing the presence of phytopathogens and in controlling the efficiency of nutrient use. In the rhizosphere, there is complex interactions among bacteria, fungi and archaea (Plant Growth-Promoting Microorganisms, PGPM) which play significant roles in plant physiology and ecosystem productivity. Rhizobium, Azospirillum, Azotobacter, Bacillus, Pseudomonas and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are among the most studied taxa that act on complementary biochemical mechanisms leading to enhanced crop performance. Bioavailable ammonia is produced from the atmospheric nitrogen (N_2) by diazotrophic bacteria, which decreases the need for the application of synthetic nitrogen fertilizers (Flint *et al*., 2020). Phosphate-solubilizing microorganisms are able to break down mineral forms of phosphate by producing organic acids and phosphatases, while potential K-solubilization bacteria help to increase the bioavailability of mineral K through acidification and

chelation processes. In addition, many rhizobacteria produce phytohormones like indole-3-acetic acid (IAA), gibberellins, and cytokinins that control root architecture, nutrient uptake and stress tolerance. The beneficial microorganisms also play a role in biological control through the production of antimicrobial metabolites, siderophores, lytic enzymes and volatile organic compounds which inhibit fungal, bacterial and nematode pathogens. Microbial signaling molecules elicit Induced Systemic Resistance (ISR) which makes the plants more resistant to a wide range of diseases without requiring a large metabolic burden. The improvement of multifunctional bio-fertilizers and bio-pesticides based on microbial consortia engineering, metagenomics and precision agriculture has made it possible to develop bio-fertilizers and bio-pesticides according to crop and environment. Microbial Biotechnology (MB) is thus emerging as a key element of a comprehensive strategy for climate-smart agriculture and regenerative farming for enhanced production and reduction of environmental damage (Timofeeva *et al*., 2022).

Beneficial Microorganisms in the Food Industry

The use of beneficial microorganisms is an integral part of sustainable agriculture and they hold an important place in the soil's fertility, plant growth, control of phytopathogens and efficiency of nutrient use. In the rhizosphere, complex interactions between bacteria, fungi and archaea (Plant Growth-Promoting

Microorganisms, PGPM) are found that are important for plant physiology and productivity of the ecosystem. Some of the most studied taxa that operate complementary biochemical mechanisms impacting on enhanced crop performance are rhizobium, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), azospirillum, azotobacter and bacillus. Bioavailable ammonia is produced from the atmospheric nitrogen (N_2) by diazotrophic bacteria, which decreases the need for the application of synthetic nitrogen fertilisers. Phosphate solubilizing microorganisms have the ability to transform the mineral forms of phosphate by releasing organic acids and phosphatases, and the potential K-solubilization bacteria can stimulate mineral K through acidification and chelation processes. In addition, many rhizobacteria produce phytohormones like indole-3-acetic acid (IAA), gibberellins, and cytokinins that control root architecture, nutrient uptake and stress tolerance. The beneficial microorganisms also play a role in biological control through the production of antimicrobial metabolites, siderophores, lytic enzymes and volatile organic compounds which inhibit fungal, bacterial and nematode pathogens. Microbial signaling molecules elicit Induced Systemic Resistance (ISR) which makes the plants more resistant to a wide range of diseases without requiring a large metabolic burden. Due to advancement of microbial consortia engineering, metagenomics and precision agriculture, it has become possible to develop bio-fertilizers and bio-pesticides with respect to crop and environment. Microbial Biotechnology (MB) is therefore becoming a key

component of an integrated approach to climate smart agriculture and regenerative farming to improve production and minimize environmental effects (Todorov *et al* ., 2022).

Beneficial Microorganisms in Environmental Sustainability

The beneficial microorganisms are a key and important component in ecosystem stability as they are involved in biogeochemical cycles, in the degradation of environmental pollutants, and ecosystem restoration from contamination. A wide array of microbial communities are involved in the cycling of carbon, nitrogen, sulfur, and phosphorus that contribute to the fertility of soil and the balance of the nutrients in the global ecosystem through the action of highly specialized metabolic pathways. Bioremediation technologies are environmentally friendly methods based on the degradation of organic contaminants, petroleum hydrocarbons, pesticides, plastics and industrial contaminants by microorganisms. Wastewater treatment systems rely on a coordinated biological process where bacteria, archaea, fungi and micro-algae remove excess nutrients, organic matter and toxic substances by working together with a complex sequence of reactions, including nitrification, denitrification, anaerobic digestion, and enhanced biological phosphorus removal (EBPR). Organic wastes are used by methanogenic archaea to produce methane-containing biogas, which can also be used in circular bioeconomy to generate renewable energy. The combined use of metagenomics, synthetic biology and microbiome engineering

allows the design of microbial consortia with improved degradation capacities, pollutant specificity and adaptability to varying environmental conditions, thus helping to create sustainable environmental management and climate change mitigation (Kaushal *et al* ., 2023).

Beneficial Microorganisms in Biotechnology

Microorganisms are the beginning of modern biotechnology because of their remarkable metabolic diversity, rapid growth, their genetic tractability and their ability to produce a wide variety of industrially useful biomolecules. A variety of microbial cell factories, such as bacteria, yeasts, filamentous fungi and microalgae, are used to produce recombinant proteins, therapeutic enzymes, antibiotics, vaccines, organic acids, amino acids, vitamins, and biofuels. Recombinant DNA technologies, genome editing using the CRISPR-Cas system, synthetic biology, and systems biology have greatly increased the potential to modify microbial metabolism for increased productivity and specificity of the products. Microbiological fermentation platforms are an emerging technology in industrial biotechnology that offer alternatives to the petrochemical industry in creating sustainable bioprocesses that require less energy and produce fewer greenhouse gases. In addition, microorganisms play an essential role in enzyme technology, development of biosensors, biomining, synthesis of biodegradable polymers, and precision medicine. The merging of artificial intelligence, genome-scale

metabolic modelling, and multi-omics analyses has sped up the strain optimization and process engineering, which led to the creation of highly efficient microbial platforms for pharmaceutical, agricultural, environmental and industrial applications. Beneficial microorganisms are thus key instruments for sustaining technological progress in the fast-changing bioeconomy, and will continue to lead innovation (Ushakiran *et al*., 2025).

Harmful Microorganisms

1. **Pathogenic Bacteria**
2. **Emerging Infectious Diseases**
3. **Antibiotic Resistance**
4. **Biofilm Formation**

Pathogenic Bacteria

Pathogenic bacteria are microorganisms that are able to cause disease using very specialized virulence factors that enable the microorganism to colonize the host, evade the host immune system, invade tissues, and produce toxins. They have virulence factors such as adhesins, invasins, exotoxins, endotoxins, secretion systems, capsules, biofilm-forming ability which determine their pathogenic potential. The outcome of infection is determined by intricate interactions between the microbial virulence and host immune responses that contribute to the severity of the infection and clinical outcome. Major bacterial pathogens including

Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Salmonella enterica, Mycobacterium tuberculosis, Pseudomonas aeruginosa and Clostridioides difficile continue to be significant causes of morbidity and mortality globally. Hyper virulent and multidrug resistant variants have emerged thanks to horizontal gene transfer through plasmids, bacteriophages, transposon and integrative conjugative elements. Moreover, the genetic variations and plasticity observed in pathogenic bacteria have been demonstrated by the use of comparative genomics and whole genome sequencing to allow rapid adaptation to the host environment and against antimicrobial pressure. The rapid identification of bacterial pathogens and resistance determinants has been significantly enhanced by the application of modern molecular diagnostic technologies such as real-time PCR, metagenomic sequencing and CRISPR-based detection platforms. Exploring the mechanisms by which bacteria are pathogenic at the genomic, transcriptomic, and proteomic levels has become essential for the design of novel anti-virulence strategies, vaccines, and rationally targeted antimicrobial therapies which would not create selective pressures for resistance (Michaels & Olaleye, 2026).

Emerging Infectious Diseases

Emerging infectious diseases (EIDs) are a large public health issue worldwide because they have become more common and spread rapidly across geographic areas, and have a large socioeconomic

impact. These diseases can result from new pathogens, the re-emergence of pathogens that were previously controlled, or emergence or modification of existing pathogens that can be transmitted to new host species and cause more severe or widespread disease. Pathogen emergence and cross-species transmission can be attributed to environmental changes, globalization, urbanization, climate change, inappropriate antimicrobial use, and increased human-animal contacts. The One Health approach which combines human, animal and environmental health is vital given that three quarters of emerging infectious diseases are zoonotic in origin. Recently, modern tools in genomic epidemiology have become available for the real-time surveillance of pathogen evolution using whole genome sequencing, phylogenetic analysis, and metagenomic monitoring. AI, machine learning and predictive epidemiological modeling are becoming more common tools to detect outbreak hotspots, predict disease transmission and aid in rapid public health responses. The international surveillance systems, under the World Health Organization (WHO), Centers for Disease Control and Prevention (CDC) and other global networks are key in early detection and coordinated response. Investment in pathogen surveillance, genome monitoring, vaccine development and preparedness on a global scale continues to be critical for the reduction of future threats from infectious disease.

Antibiotic Resistance

One of the biggest challenges to global health is the emergence of resistant bacteria, which limits the effectiveness of antimicrobial treatment, and contributes to high rates of morbidity, mortality and economic cost of health care-associated infections. Resistance arises either as a natural resistance or due to genetic changes in the bacteria that make it less sensitive to the antimicrobial agent. This occurs through several mechanisms, such as enzymatic antibiotic degradation, target site modification, decreased permeability of the bacterial cell membrane, active efflux systems and alterations of metabolic pathways. Amicrobial resistance genes (ARGs) have been spread around the world more quickly due to horizontal gene transfer (conjugation, transformation, and transduction), leading to the emergence of multidrug-resistant (MDR), extensively drug-resistant (XDR), and pan-drug-resistant (PDR) bacterial pathogens. Most significantly, the ESKAPE group (Enterococcus faecium, Staphylococcus aureus, Klebsiella pneumoniae, Acinetobacter baumannii, Pseudomonas aeruginosa and Enterobacter spp.) which account for the bulk of healthcare-associated infections are especially resistant to various classes of antibiotics. The modern approaches fighting AMR are antimicrobial stewardship programs, rapid molecular diagnostics, bacteriophage therapy, antimicrobial peptides, antimicrobial systems based on CRISPR-Cas, anti-virulence therapeutics, microbiome-based intervention and AI-assisted antibiotic discovery. Integrated genomic surveillance and responsible use of antimicrobial agents are crucial to ensure the

effectiveness of current antimicrobials and to support the development of new antimicrobials (Kerek *et al.,* 2026).

Biofilm Formation

Biofilms are highly structured microbial communities surrounded by a self-produced extracellular polymeric substance (EPS) matrix, which is made up of polysaccharides, proteins, extracellular DNA and lipids. Biofilm formation can improve the survival of microbial organisms under adverse environmental conditions by giving them structural stability, enabling intercellular communication via quorum sensing, and also leading to a resistance towards host immune response and antimicrobial drugs. Biofilm formation can be broken down into five steps: reversible attachment, irreversible adhesion, microcolony formation, maturation, and dispersal. Biofilms are easily formed by opportunistic pathogens like Pseudomonas aeruginosa, Staphylococcus aureus, Escherichia coli, and Candida albicans on host tissues and medical devices like prosthetic implants, heart valves, endotracheal tubes and catheters. Biofilm-associated infections are usually chronic, recurrent, and highly resistant to standard antimicrobial treatment because of limited penetration of antibiotics, low metabolic activity of persister cells and the protective EPS matrix. Anti-biofilm strategies have recently been the subject of research on quorum sensing inhibition, matrix degradation enzymes, antimicrobial nanoparticles, antimicrobial enzymes derived from bacteriophage, antimicrobial peptides, and CRISPR-mediated

disruption of biofilm. The emerging and dynamic understanding of the regulatory networks that control biofilm formation provided by high throughput transcriptomics, proteomics, metabolomics, and single-cell imaging will provide innovative opportunities in the design of therapeutic approaches to combat persistent microbial infections (Pompilio & Di Bonaventura, 2026).

Environmental Microbiology

1. **Wastewater Treatment**
2. **Bioremediation**
3. **Plastic Degradation**
4. **Climate Change and Microorganisms**

Wastewater Treatment

The biological component of the modern wastewater treatment systems is based on microorganisms, which accelerate the destruction of soiled organic matter, convert nutrients, and limit the levels of pathogens before discharge of the water or its reuse. The microbial consortium contains multiple microbial communities that are responsible for the elimination of contaminants by various metabolic pathways, which work synergically together. The activated sludge systems, trickling filters, membrane bioreactors (MBRs) and anaerobic digesters are highly specialized microbial communities that can mineralize organic matter and still maintain ecosystem

stability. Nitrogen removal is primarily by nitrification and denitrification which are carried out by ammonia-oxidizing bacteria (AOB), nitrite-oxidizing bacteria (NOB) and denitrifying microorganisms. Biological phosphorus removal relies on the polyphosphate-accumulating organisms (PAOs) that are capable of taking up excess phosphate inside their cells and reducing eutrophication. In anaerobic digestion, methanogenic archaea break down organic waste to produce methane-laden biogas, thereby also reducing waste and producing renewables. The microbiomes of wastewater systems have been recently characterized in detail using metagenomics, meta transcriptomics and high through-put sequencing, which has opened the door to optimize wastewater processes and to monitor them at real time. Wastewater treatment plants now incorporate artificial intelligence, digital twin technology and machine learning to forecast the dynamics of microorganisms, optimize performance and increase the clean-up of contaminants through fluctuating environmental conditions.

Bioremediation

Bioremediation involves a metabolic versatility of microorganisms that can be used to break down, convert, or mineralize environmental contaminants to less hazardous forms. Indigenous and engineered microbial populations can degrade a wide range of contaminants such as petroleum hydrocarbons, chlorinated solvents, pesticides, pharmaceutical contaminants, heavy metals and emerging contaminants. Microbial bioremediation is

environmentally friendly, cost-effective and can restore the functionality of the ecosystems in a way that causes minimum ecological disturbance to the environment when compared with the conventional physicochemical remediation methods. Biodegradation is a process of oxidation reduction, hydrolysis or mineralization of pollutants by sequential oxidation-reduction reaction through the enzymatic pathway which is mediated by oxygenases, dehydrogenases, peroxidases, laccases, and reductases. Aerobic and anaerobic microorganisms are involved in the removal of contaminants depending on environmental conditions and the availability of substrates. Bioaugmentation, biostimulation, phytoremediation-assisted microbial degradation and microbial consortia engineering are some of the strategies that have contributed to improved remediation efficiency in contaminated soils, sediments and aquatic ecosystems. The engineered microorganisms with improved catabolic abilities have been designed with recent advances in synthetic biology, genome editing and systems biology, and interactions among functions of complex environmental microbiomes are continuously uncovered using multi-omics technologies. These innovations place microbial bioremediation as one of the technologies essential to sustainable environmental restoration and contribute to the bioeconomy in a global perspective (Raheema *et al*., 2026).

Plastic Degradation

The presence of plastic waste in the environment and its impact have become a major concern of the 21st century, and research has emerged on the potential use of microbial degradation as a viable method of waste management. Some bacteria, fungi and actinomycetes have enzymes that can depolymerize synthetic polymers to biodegradable intermediate products. PETase, MHETase, cutinases, esterases, laccases and peroxidases are enzymes that catalyse the hydrolysis and oxidative degradation of polyethylene terephthalate (PET), polyurethane (PU) and polyethylene (PE). Ideonella sakaiensis, Pseudomonas, Bacillus, Rhodococcus, Streptomyces, and fungal genera such as Aspergillus and Penicillium are among the microorganisms that have been studied the most. Polymer depolymerization products are then transported to the central metabolic pathways in which they become carbon and energy sources in the assimilation process. The development of enzyme engineering, directed evolution, synthetic enzymes, and metagenomic discovery has led to significant improvements in enzyme stability, catalytic activity, and substrate specificity for the industrial environment. In addition, microbial consortia and enzyme cocktails have shown to degrade mixed plastic wastes more effectively, offering great potential to integrate microbial biotechnology for the efficient recycling of plastics in a circular economy and to decrease the environmental burden of persistent polymeric wastes.

Climate Change and Microorganisms

Microorganisms are dual players in climate change, not only as regulators of fluxes of greenhouse gasses, but also as players reacting to changing environmental conditions. Microbial communities have a significant effect on the concentrations of carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) in the atmosphere by their involvement with global carbon, nitrogen, sulfur and methane cycles. Photosynthetic microorganisms (cyanobacteria and microalgae) play a major role in CO2 fixation on a global scale, while heterotrophic decomposers, methanogens, methanotrophs, nitrifiers, and denitrifiers control greenhouse gas production and consumption in terrestrial and aquatic ecosystems. Changes in temperature, precipitation, ocean acidification, and permafrost thaw significantly drive changes in microbial community composition, activity, and ecosystem functions. Increased degradation rates and methanogenesis in thawing permafrost result in increased greenhouse gas emissions, which are positive climate feedbacks. On the other hand, microbial carbon sequestration, biological carbon capture and methane oxidation are important natural processes that can help reduce climate change. Predictions of microbial responses to environmental perturbations have greatly benefited from recent advances in metagenomics, Earth system modeling, environmental metabolomics, and artificial intelligence. To be able to develop evidence-based mitigation strategies, optimise carbon sequestration technologies, and to enhance global climate models, an

understanding of the microbial contribution to climate processes is therefore essential (Webster, 2026).

Future Trends in Microbiology

1. **Artificial Intelligence in Microbiology**
2. **Single-cell Microbiology**
3. **Metagenomics**
4. **Synthetic Microbiology.**

Artificial Intelligence in Microbiology

The advent of artificial intelligence (AI) in the field of microbiology has been a groundbreaking development that has allowed for the processing of complex biological data sets that are not capable of being processed by a traditional computational method. Machine learning (ML), deep learning (DL), and generative artificial intelligence (AI) are increasingly used to characterize microbial species, predict antimicrobial resistance (AMR), and identify bacterial virulence factors, and to speed up the discovery of biomarkers in high dimensional multi-omics data. Automated microbial identification based on microscopy, digital pathology, and matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry (MALDI-TOF MS) has been greatly aided by image analysis techniques powered by artificial intelligence (AI), ultimately improving the accuracy of diagnosis and decreasing the turnaround time. Microbial genomics focuses on the use AI algorithms to annotate genomes, predict gene functions, model protein structures,

and perform evolutionary analyses by incorporating genomic, transcriptomic, proteomic, and metabolomic data. Also, predictive models are used for optimization of microbial fermentation, simulation of metabolic networks, drug target identification and discovery of novel antimicrobial compounds. Moreover, explainable artificial intelligence (XAI) has emerged as a growing area of focus as it makes AI predictive models more interpretable and clinically applicable. AI is anticipated to transform microbial diagnostics and epidemiological surveillance, precision medicine, and industrial biotechnology through integration with laboratory automation, robotic platforms, cloud computing, and digital microbiology laboratories. With the increasing capacity of computation and biological databases, AI is expected to play an increasingly important role in future microbiological research and translation (Oliveira *et al*., 2024).

Single-cell Microbiology

The understanding of microbial physiology has been revolutionized by single-cell microbiology, which allows study of single microbial cells instead of the average of a population. While conventional bulk analyses fail to detect cellular variation, single-cell technologies can detect phenotypic heterogeneity, stochastic gene expression, metabolic specialization, and adaptive responses in genetically identical microbial communities. This has proven useful for the study of unculturable microorganisms, microbial persistence, antimicrobial tolerance, and complex microbial interactions. New technologies,

such as fluorescence activated cell sorting (FACS), microfluidics, laser capture microdissection, Raman micro spectroscopy and high-resolution imaging, have facilitated the precise isolation and characterization of individual microbial cells. These along with single cell genomics, transcriptomics, proteomics and metabolomics offer a new glimpse into microbial evolution, functional diversity, quorum sensing and host – microbe interactions. From an environmental microbiology perspective, single-cell sequencing has led to the identification of previously un-known microbial lineages and metabolic pathways that were missed by culture-based approaches. Furthermore, linking with spatial transcriptomics and artificial intelligence has improved the reconstruction of microbial community architecture and cellular communication networks. Single-cell microbiology is thus changing the paradigms in microbial ecology, infectious disease study and systems microbiology, as biological complexity is being understood at the highest possible resolution at the cellular level.

Metagenomics

Metagenomics has transformed microbiology and is now used to analyze the genomes of microbial communities without the need to culture them from a variety of environmental, clinical, agricultural and industrial samples. Metagenomic sequencing is able to detect culturable and unculturable microorganisms and offers a comprehensive understanding of microbial diversity, taxonomic

composition, microbial functions and interactions. Significant improvements have been achieved in the genome assembly, classification and functional annotation of complex microbial ecosystems with high throughput next generation sequencing (NGS), long read sequencing technologies and advanced bioinformatics pipelines. Shotgun metagenomics allows for detailed characterization of microbial communities for metabolic pathways, antimicrobial resistance genes (ARGs), virulence determinants, biosynthetic gene clusters and mobile genetic elements. With integration of metatranscriptomics, metaproteomics and metabolomics, functional interpretation of microbial activity under dynamic environmental condition is possible. Metagenomic technologies are essential in human microbiome studies, pathogen surveillance, wastewater epidemiology, food safety surveillance, environmental assessment and precision agriculture. Advancements in bioinformatics, metagenomics using the genome sequence and Artificial Intelligence (AI) enhanced taxonomic classification further enhance analytical accuracy and computation efficiency. As a result, metagenomics has emerged as one of the most influential technologies for understanding the microbial ecosystems and for the development of therapeutic and environmental applications based on the microbiome (Franzosa *et al*.,2015).

Synthetic Microbiology

Synthetic microbiology is an emerging interdisciplinary area that combines synthetic biology, molecular genetics, systems biology, metabolic engineering and computational modelling to design microorganisms with programmable biological function. Synthetic microbiology is different from conventional genetic engineering, in which the components are discrete and easily exchanged into a cell, relying on standard components, modular genetic circuits, and genome-scale engineering to create microbial systems that exhibit predictable behaviors for medical, industrial, agricultural, and environmental applications. The pace of microbial engineering is significantly accelerated thanks to recent breakthroughs in the CRISPR–Cas genome editing technology, DNA synthesis, genome minimization, synthetic chromosomes, and automated design–build–test–learn (DBTL) workflows. Synthetic microorganisms are increasingly used for biosynthesis of pharmaceuticals, vaccines, recombinant proteins, biodegradable polymers, biofuels, specialty chemicals, and production of high value metabolites. There has also been the creation of engineered consortiums of microorganisms designed for environmental bioremediation, carbon capture, nitrogen fixation, and sustainable biomanufacturing. Combining AI and synthetic biology provides predictive optimization of metabolic pathways, regulatory networks, and gene circuit performance, greatly decreasing the complexity and time of experiments. The use of engineered microorganisms has achieved striking advances in technology, but biosafety and biosecurity, genetic stability, and

ethical considerations are important issues to take into account when using engineered microorganisms responsibly. The future bioeconomy and precision biotechnology are therefore expected to be one of the major driving forces of synthetic microbiology (Orebaugh *et al*., 2026).

Section II

Genetics and Inheritance

Foundations of Genetics

1. **DNA Structure**
2. **RNA Types**
3. **Chromosomes**
4. **Genome Organization**

DNA Structure

Deoxyribonucleic acid (DNA) is the major constituent of the genome in most microorganisms and is the molecule that stores the genetic information needed for the duplication of cells, metabolism, adaptation, and evolution. The canonical DNA is a right-handed double helix of two antiparallel polynucleotide strands held together by hydrogen bonding between complementary bases and by hydrophobic base-stacking interactions. Nucleotides contain a deoxyribose sugar, a phosphate group and one of four nitrogenous

bases (Adenine, Thymine, Guanine or Cytosine) and Watson–Crick base pairing ensures that A pairs with T and G pairs with C; **Figure (15-7)**.

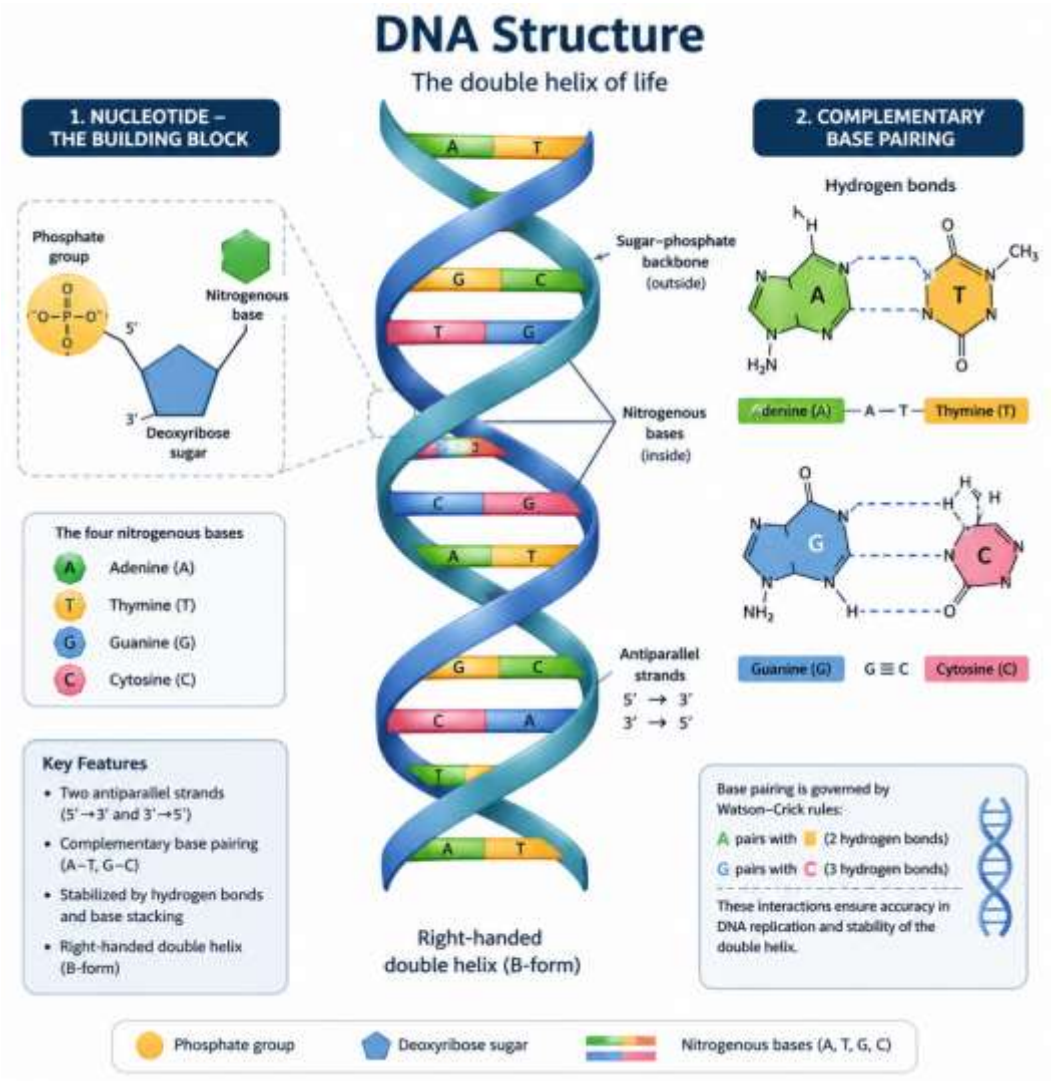


Figure (15-7): DNA Structure.

In prokaryotic microorganisms, genomic DNA usually exists in a single circular chromosome that is situated within the nucleoid, but there are a few taxa of bacteria with linear chromosomes, including Borrelia and Streptomyces. Many bacteria and archaea also contain plasmids, small molecules of autonomous extrachromosomal DNA, that contain accessory genes that contribute to antimicrobial

resistance, virulence, metabolic specialization and environmental adaptation. Viral genomes are very variable in structure, ranging from double-stranded DNA to single-stranded DNA, linear to circular, as well as segmented viruses, depending on the viral taxonomy. The organization of the structure of microbial DNA is dynamic and is modulated by nucleoid-associated proteins (NAPs) – such as HU, H-NS, Fis and IHF – that act in the control of DNA compaction, DNA topology, replication, recombination, transcription and genome stability. Recent improvements in the techniques of cryo-electron microscopy, long-read sequencing, chromosome conformation capture (Hi-C), and single molecule imaging have greatly contributed to the knowledge of the structure of microbial chromosomes and its connection to gene regulation, pathogenicity and adaptive evolution (Joshi, 2026).

RNA Types

Ribonucleic acid (RNA) has a key function in microbial gene expression, cellular regulation, adaptation to the environment, and host–pathogen interactions. The messenger RNA (mRNA) is an unstable intermediate between the genomic DNA and the protein synthesis while the ribosomal RNA (rRNA) is the catalytic and structural component of bacterial and archaeal ribosome. The role of transfer RNA (tRNA) is to act as a molecular adaptor that can recognize the codon in the mRNA precisely during translation by the interaction of the anticodon and the codon regions; **Figure (15-8)**.

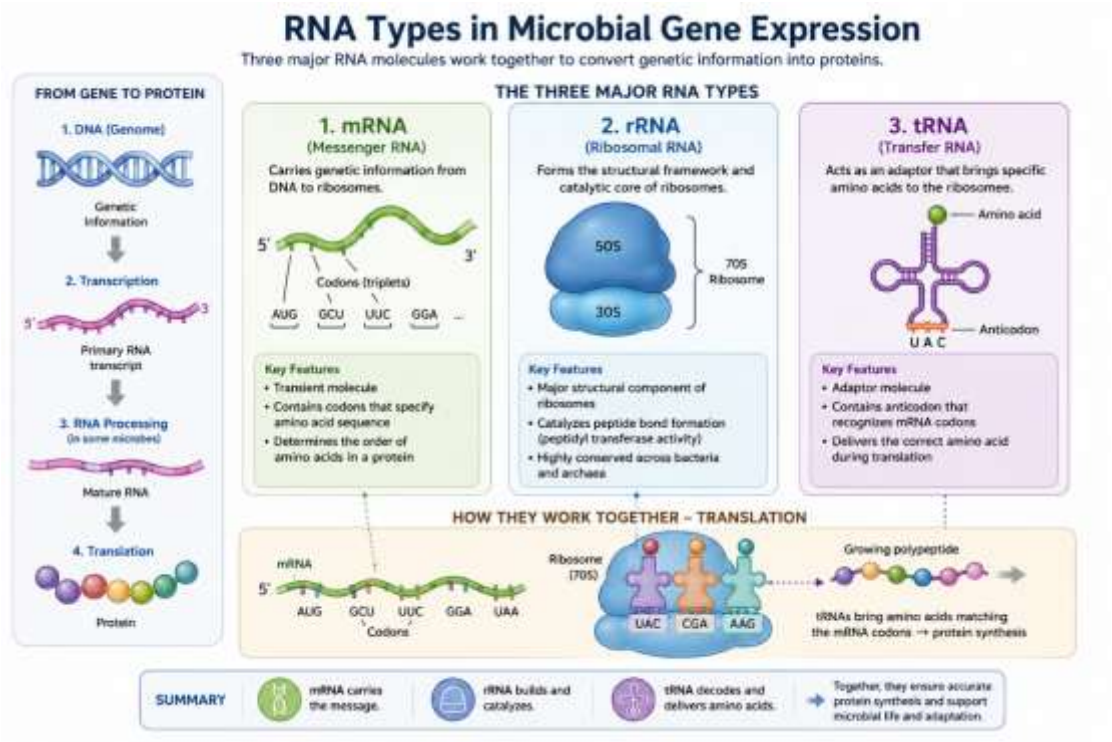


Figure (15-8): RNA Structure, types and function.

In addition to these canonical RNA classes, there are also many regulatory non-coding RNAs (ncRNAs) that are produced by microorganisms such as small RNAs (sRNAs), antisense RNAs, CRISPR RNAs (crRNAs), transfer-messenger RNA (tmRNA), riboswitches and ribozymes. These regulatory molecules affect transcription, translation, RNA stability, stress response, quorum sensing, biofilm formation, metabolism and antimicrobial resistance. The CRISPR-derived RNAs are the adaptive immune system of bacteria and archaea that allow it to recognize and degrade nucleic acid sequences from invading bacteriophage and plasmid. The discovery of an unexpected diversity of microbial RNA molecules and regulatory networks was enabled by advances in high throughput transcriptomics (RNA-seq), direct RNA sequencing, and single cell transcriptomics. Lately, two other types of

epitranscriptomic modifications have attracted the attention of scientists, namely N6-methyladenosine (m^6A) and pseudouridylation, which are shown to affect RNA stability, translation efficiency and microbial adaptation. Altogether, RNA molecules are not only intermediates in the process of gene expression, but also dynamic regulators of microbial physiology and evolution (Nawaz *et al.*, 2026).

Chromosomes

The genetic material of a microbial chromosome consists of all of the necessary information for the viability, replication and inheritance of the cell. Most bacteria have a single circular chromosome whose size is between 0.5 and more than 10 Mb, while many archaeal species have one or more circular chromosomes with molecular features that are both bacterial and eukaryotic. Several genera of bacteria, such as Vibrio, Burkholderia and Brucella, however, have multipartite genomes with multiple chromosomes containing different replication origins. Bacterial chromosomes do not have membrane-enclosed nuclei, and the DNA is packaged into the nucleoid by DNA supercoiling, facilitated by DNA gyrase and topoisomerases, as well as nucleoid-associated proteins that control the structure of the chromosomes and the accessibility of their DNA to transcription. Archaeal chromosomes are more complex than bacterial chromosomes due to the presence of some histone-like proteins in them. DNA replication begins at origin sequences (oriC) and

proceeds in both directions in an orchestrated manner by highly conserved replisome complexes. Proper chromosome segregation is achieved by proteins including ParA, ParB and SMC complexes, which result in faithful inheritance during binary fission. Studies of microbial chromosome conformation, through Hi-C sequencing, super-resolution microscopy, and long-read genome assembly, have uncovered extremely organized three-dimensional structures of chromosomes that are directly linked to microbial gene expression, DNA replication, and genome evolution; **Figure (15-9)**.

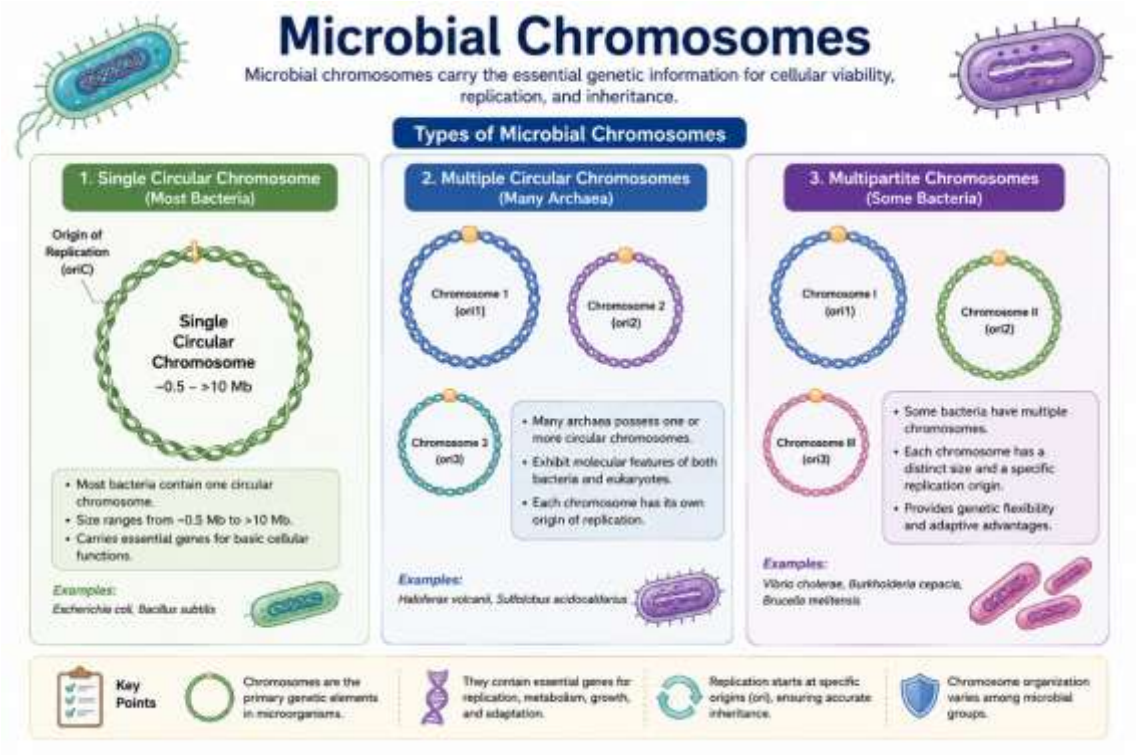


Figure (15-9): Microbial Chromosome structure.

Genome Organization

The organization of genomes in microorganisms demonstrates a very efficient genetic organization, designed for quick growth, adaptation to the environment, and adaptive evolution. The microbial

genome is typically divided into a conserved core genome that contains genes for essential housekeeping functions and an accessory genome that includes plasmids, genomic islands, prophages, transposons, insertion sequences and integrative conjugative elements. The genomic plasticity allows microorganisms to quickly gain new phenotypic traits through horizontal gene transfer, so as to adapt to new ecological niches. Bacterial genes that specify proteins are often clustered in groups, with each group of genes under a single regulator for coordinated transcription. The control of gene expression is multi-layered and depends on the presence of regulatory elements such as promoters, operators, binding sites for transcription factors, sigma factors, riboswitches and non-coding RNAs in response to environmental conditions. The genes of the archaeal genome share some features with those of bacteria, and also contain some features similar to those found in eukaryotes, such as DNA replication and control of transcription. Comparative genomics has led to the concept of the pan genome, consisting of core, accessory, and strain specific genes, which has enabled insights into microbial diversity, pathogenicity, host adaptation and evolution of antimicrobial resistance. The combination of long-read sequencing, metagenomics, single-cell genomics, chromosome conformation mapping and the use of artificial intelligence has significantly improved our knowledge of microbial genome structure at a nucleotide and population level. The technology continues to uncover the incredible structural and

functional complexity of the genomes of microorganisms and their central role in the evolution of life within cells (Zhang *et al*., 2026).

Genetic Processes and Regulation in Microorganisms

1. **DNA Replication**
2. **Gene Expression (Transcription and Translation)**
3. **Horizontal Gene Transfer**
4. **Microbial Mutations and DNA Repair**
5. **Microbial Evolution and Genome Plasticity**

DNA Replication

Replication of DNA is a semi-conservative process that is very strictly coordinated and makes sure that the genetic information is passed from one microbial cell to another cell in an accurate manner. In bacteria, replication begins at a special origin of replication (oriC) where the conserved nucleotide pattern is recognized and unwound by the initiator protein DnaA. Parental strands are separated by the action of DNA Helicase (DnaB) with the help of DnaC and single-stranded DNA-binding proteins (SSBs) stabilize the exposed parental strands, and DNA gyrase relieves the torsional stresses created by the separation of the parental strands. Replication forks move in both directions and the synthesis of DNA is continuous at the replication forks in one direction (the leading strand) and discontinuous in the other (the lagging strand) by synthesizing DNA in Okazaki fragments. Primase (DnaG) uses RNA primers to supply free 3′-hydroxyl groups needed for DNA

polymerization; DNA polymerase I degrades RNA primers and replaces them with DNA. The discontinuity of daughter chromosomes is then healed by the activity of DNA ligase. DNA polymerases are extremely accurate in their replication activity and post-replication mismatch repair systems also contribute to maintenance of replication fidelity, leading to mutation rates that are very low. In recent years, single-molecule sequencing, cryo-electron microscopy and replisome structural analyses have uncovered dynamic interactions between the replication proteins that have deepened our understanding of chromosome duplication, genome stability and adaptation in bacteria; **Figure (15-10)**.

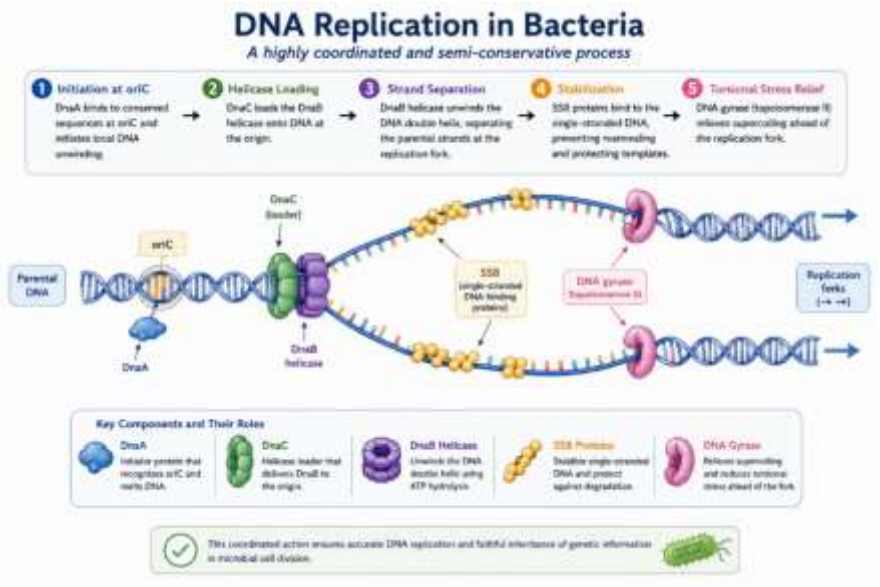


Figure (15-10): DNA replication in bacteria.

Gene Expression (Transcription and Translation)

Microorganisms regulate the expression of their genes to convert the coded information from DNA into functional proteins, controlling physiology and adaptation to the environment. Promoter sequences

are recognized by RNA polymerase in the presence of sigma (σ) factors and messenger RNA is synthesized by RNA polymerase, which is a template. Microorganisms use alternative sigma factors to quickly shift the expression of genes when subjected to environmental stresses like nutrient limitation, oxidative stress, heat shock, or host immune pressure. Translation is carried out on 70S ribosomes (30S + 50S) with the help of tRNAs that have specific amino acids attached to them and that recognize specific codons on the mRNA. Ribosomal RNA serves not only as the structural framework for the ribosome, but also as the catalytic substrates that catalyse the formation of peptide bonds by a peptidyl transferase (ribosomal peptidyl transferase) activity. In bacteria, transcription and translation are often not separated and protein is synthesized as soon as mRNA is synthesized. Other factors involved in the regulation of gene expression include operons, the presence of transcriptional repressors and activators, riboswitches, attenuation mechanisms, quorum sensing, CRISPR-associated regulation and various non-coding RNAs. The use of novel technologies such as RNA sequencing, ribosome profiling and single-cell transcriptomics has significantly increased our knowledge of gene-regulatory networks that control microbial metabolism, pathogenicity, stress response and resistance to antibiotics (Kim *et al*., 2026).

Horizontal Gene Transfer

The horizontal gene transfer (HGT) is an evolutionary process allowing microorganisms to gain genetic material without any vertical

inheritance to speed up adaptation and genomic diversification. While mutation can spread resistance genes and virulence factors slowly from one microbial species to another, HGT can enable the spread of these genes from one phylogenetically different microbial species to another at a much faster rate and the acquisition of metabolic pathways and ecological fitness. Horizontal gene transfers are mediated by three main mechanisms: transformation, transduction and conjugation. Transformation is the process of extracellular DNA being taken up and incorporated into the chromosomes of naturally competent bacteria. Bacteriophage-mediated transfer of DNA from one bacterium to another during the infective cycle of a virus. One of the most efficient ways of disseminating multidrug resistance is by direct cell-to-cell contact and plasmid mediated DNA transfer via conjugative pili. This microbial genome plasticity is further accentuated by the presence of additional mobile genetic elements, such as transposons, insertion sequences, genomic islands, integrative conjugative elements and integrons, which promote the rapid acquisition of adaptive features (Koonin, 2016). The horizontal transfer of genes has been shown to play a significant role in microbial evolution, ecological adaptation, pathogenicity, and the emergence of multidrug-resistant bacterial lineages by modern long-read sequencing, comparative genomics, and metagenomic analyses; **Figure (15-11)**.

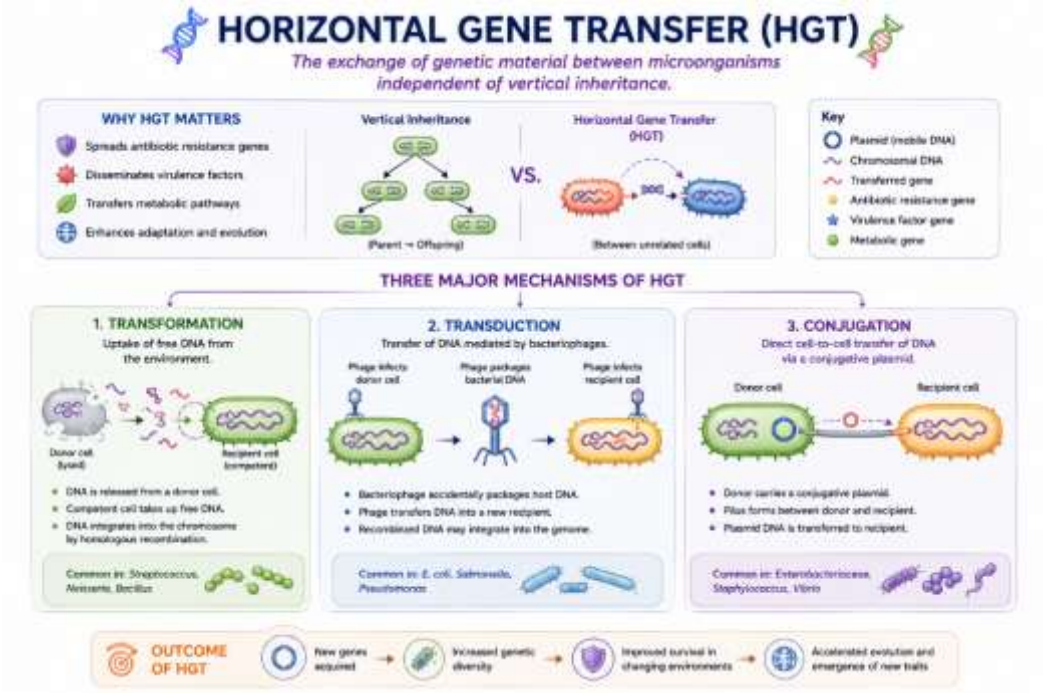


Figure (15-11): Horizontal Gene Transfer in microorganisms.

Microbial Mutations and DNA Repair

Mutations are permanent changes in nucleotide sequences which create genetic variation and serve as raw material for microbial evolution. Mutations can happen randomly during DNA replications or after exposure to a physical, chemical or biological mutagen. These involve point mutations, insertions, deletions, duplications, inversions, and larger chromosomal rearrangements that could affect gene function, cellular fitness or pathogenicity. Microorganisms have highly conserved DNA repair systems that they use to detect and repair DNA damage to prevent the irreversible accumulation of mutations that can lead to genome degradation (Sahan *et al*., 2025). The primary level of quality control on the genome is proofreading activity of replicative DNA

polymerases. There are a number of other repair pathways such as mismatch repair (MMR), base excision repair (BER), nucleotide excision repair (NER), homologous recombination, non-homologous end joining (NHEJ), and the SOS response which involves co-ordinating repair in the cell when there is serious DNA damage. These mechanisms preserve genome stability, while full genome repair or stress-induced mutagenesis leads to adaptive evolution and antibiotic resistance and host adaptation. Recent structural biology, genome-wide mutation mapping and single cell sequencing advances have greatly contributed to knowledge of the dynamics and mechanisms of mutations and DNA repair pathways across a variety of microbial taxa.

Microbial Evolution and Genome Plasticity

Microbial evolution occurs as a result of the ongoing spread and selection of variants and mutations, which can be generated by micro-recombination, genome rearrangements, horizontal gene transfer and mutation. The ability of microbial genomes to reorganize, acquire, lose or modify is remarkable and is called genome plasticity. This dynamic genomic architecture allows microorganisms to quickly adjust to fluctuations in ecological conditions, anti-microbial exposure, host immune responses and nutrient availability. The core genome is responsible for basic housekeeping functions while the accessory genome consists of plasmids, prophages, genomic islands, transposable elements and

other mobile genetic elements that may give rise to phenotypic variation. Comparative genomics has shown that microorganisms have open or closed pan-genomes that indicate their ability to acquire new genes and their evolutionary diversification. Selective pressures that favour mutations to a species' genes that are beneficial and lead to the elimination of those that are deleterious also play a role in adaptive evolution. The use of contemporary methods such as comparative genomics, pangenomics, metagenomics, single-cell sequencing, and the use of artificial intelligence (AI) has significantly contributed to the understanding of evolutionary trajectories and population dynamics of microbial communities. These advances have brought important knowledge about the emergence of pathogens, the dissemination of antimicrobial resistance, the ecology of microorganisms and the rational design of microorganisms for industrial and biomedical applications (Sahan *et al*., 2025).

Genetic Variation

1. **Mutations**
2. **Polymorphisms**
3. **Recombination**
4. **Epigenetic Modifications**

Mutations

The most important source of genetic variation and innovation is permanent change in the sequence of nucleotides in the genome of microorganisms, called mutations. They are generated naturally as a result of errors in DNA replication or as a result of environmental mutagens such as: UV radiation, ionizing radiation, reactive oxygen species and chemical agents.

In microorganisms, mutations include single-nucleotide substitutions, insertions, deletions, duplications, inversions, and large-scale chromosomal rearrangements, with each type having distinct impacts on the function of the genes and fitness of the cells. Mutations can be neutral, harmful or advantageous depending on the environment and location of the mutation. Positive mutations could increase the efficiency of a particular nutrient's use, help the organism cope with stress, boost its disease-causing ability, or help it become resistant to drugs that fight pathogens and diseases. Positive mutations may make the organism more efficient at utilizing a given nutrient, withstand stressors, become more virulent, or become resistant to antimicrobial agents. On the other hand, deleterious mutations are kept at a minimum by highly conserved proofreading activities of DNA polymerases and by several DNA repair pathways, such as mismatch repair, base excision repair and nucleotide excision repair. Transiently higher mutation rates, driven by stress-induced mutagenesis, e.g. by the SOS response of bacteria, can lead to an increase in mutation rates during adverse environmental conditions and thereby favor adaptive evolution.

Advances in mutation accumulation experiments, long-read sequencing and single-cell genomics over the past few years have revealed that mutation rates are shaped by genome architecture, the timing of replication and ecological niche. There is therefore no need to reorder the importance of mutations as the basic substrates of diversification and genome evolution in microbial populations and of the development of antimicrobial resistance (Lee *et al*., 2025).

Polymorphisms

Genetic polymorphisms are naturally occurring polymorphisms in the DNA sequence that exists in microbial populations and are important factors in intraspecies diversity and ecological adaptation. Polymorphisms exist in the population and are not random mutations occurring in individual cells and are maintained in the population at appreciable frequency by natural selection, genetic drift or population expansion. These are typically single nucleotide polymorphisms (SNPs), short insertions and deletions (indels), variable number tandem repeats (VNTRs), copy number variations (CNVs) and structural genomic variants. Polymorphisms affect many biological characteristics in microorganisms such as metabolic efficiency, environmental fitness, virulence, host specificity and antimicrobial agent resistance. SNPs in non-coding regions of the genome have been shown to be important in comparative genomic studies for altering promoter function, transcription factor binding, and gene expression. The analysis of microbiological

polymorphisms at the whole genome level is now essential and essential for molecular epidemiology, for phylogenetic analysis, for outbreak investigation and for antimicrobial resistance surveillance. The characterization of genomic diversity of microorganisms across environmental and clinical isolates has been greatly enhanced by whole genome sequencing, pangenome analysis and population genomics. Combined with the use of comparative genomics, the integration of artificial intelligence with these polymorphic variants enables the prediction of functional consequences, thus enhancing our understanding of microbial adaptation and evolution (Motlhanka *et al.,*2026).

Recombination

Genetic recombination is one of the basic mechanisms which can lead to the exchange or rearrangement of DNA molecules, thus creating diversity at the genetic level. For microorganisms, recombination is a mechanism that allows the construction of new combinations of genetic information that can be used to provide genome repair, chromosome segregation, adaptation and evolutionary innovation. Homologous recombination is between highly similar DNA sequences and is mostly mediated by the RecA protein recombinase and proteins that help catalyze strand invasion and Holliday junction resolution. This pathway is crucial to repair double-strand DNA breaks and to preserve chromosome integrity. Genomic rearrangements can occur without much homology; this is

the case for non-homologous recombination, which involves site-specific recombination and transposition. In addition, recombination is linked to horizontal gene transfer (HGT) via transformation, transduction and conjugation, facilitating the stable integration of foreign DNA into microbial genomes. These processes enable the transfer of antimicrobial resistance genes, virulence factors and specialized metabolic pathways within and between phylogenetically distinct microbes. Comparative genomics, long-read sequencing and chromosome conformation analysis of recent applications have shown that recombination is a major force in the pangenome expansion and genome plasticity of microbes. Therefore, recombination is a significant evolutionary mechanism that increases adaptability, ecological diversification and long-term survival in different microbial ecosystems (Perveen *et al*., 2025).

Epigenetic Modifications

Epigenetic changes are molecular changes that alter the expression of genes but do not alter the nucleotide sequence of the DNA itself and are passed down through generations. In microorganisms, epigenetic regulation occurs mainly through DNA methylation, nucleoid-associated proteins and regulatory non-coding RNA, which allows a rapid adaptation to changing environmental conditions. DNA methylation involves the modification of DNA-by-DNA methyltransferases, which can modify either adenine (N6-methyladenine; 6mA) or cytosine (5-methylcytosine; 5mC and N4-

methylcytosine; 4mC), and affects DNA replication, chromosome segregation, mismatch repair, and transcriptional regulation. DNA methylation is not only involved in the restriction–modification systems to defend against invading bacteriophages in bacteria, but also a global regulatory mechanism of virulence, biofilm formation, quorum sensing, sporulation, and host colonization. Epigenetic heterogeneity can induce phenotypic diversity in genetically identical cells, increasing microbial survival in stress conditions and aiding in microbial persistence during infection. The development of single-molecule real-time (SMRT) sequencing, nanopore sequencing, epigenomics and the integration of multi-omics has led to the development of microbial DNA methylation maps spanning the whole genome and their regulation. New research also indicates that epigenetic processes play a role in adaptive responses, host–microbiome interactions, and bacterial memory. As a result, microbial epigenetics has emerged as a burgeoning field with significant implications for infectious disease biology, antimicrobial resistance, synthetic biology and precision microbiology (Bu *et al*., 2025).

Microbial Epigenetics

1. **Definition of microbial epigenetics**
2. **Historical development**
3. **Differences between microbial and eukaryotic epigenetics**
4. **Biological significance**

Definition of Microbial Epigenetics

Microbial epigenetics is an emerging field of research focused on the study of heritable and reversible changes to the molecular structure of genes that control the expression of genes and phenotypes in the cell, without changing the sequence of the underlying genome. Epigenetics is an area of study that looks at changes in the activity of the genome in response to environmental or physiological factors, whereas classical genetics examines permanent changes in the sequence of DNA. Epigenetic regulation in microorganisms is mainly controlled by DNA methylation, nucleoid associated proteins (NAPs), regulatory non-coding RNAs and more recently RNA modifications (so-called epitranscriptomics). These mechanisms affect the regulation of chromosome replication, DNA repair, transcription control, virulence, metabolic changes, and host–microbe interactions; **Figure (15-12)**.

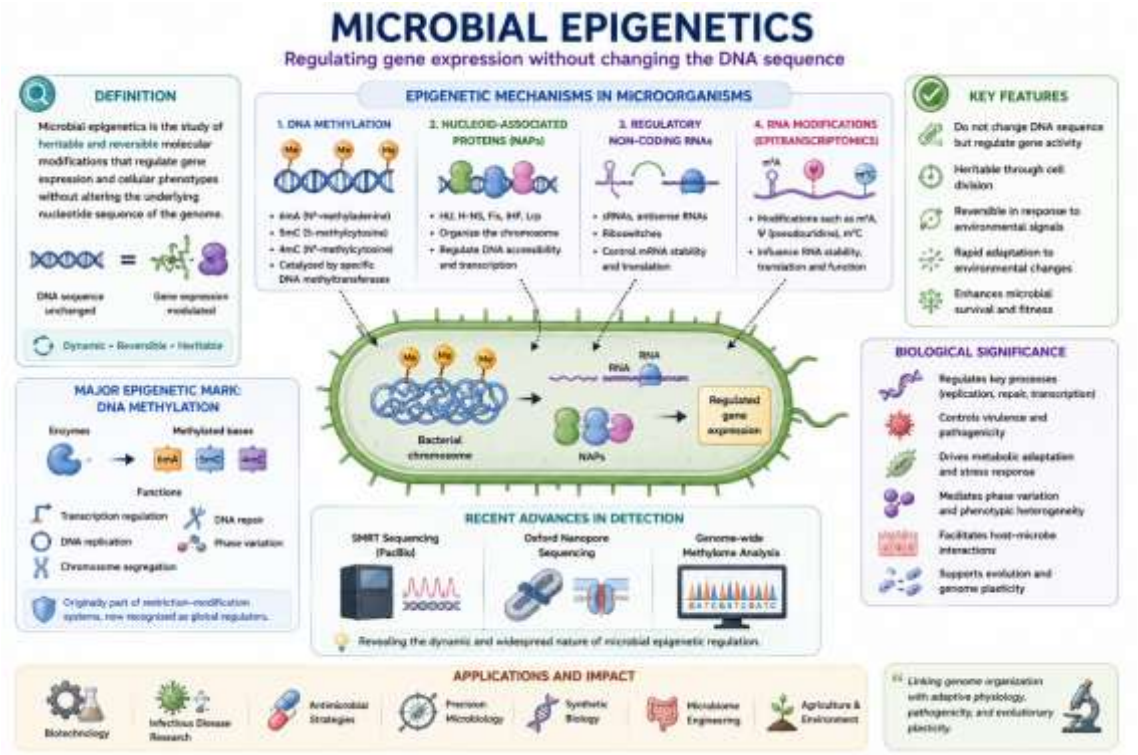


Figure (15-12): Microbial Epigenetics and its mechanism.

DNA methylation is the most well-studied microbial epigenetic modification, and is typically mediated by sequence-specific DNA methyltransferases that methylate adenine (N6-methyladenine, 6mA), cytosine (5-methylcytosine, 5mC), or cytosine (N4-methylcytosine, 4mC). They are first known for their involvement in restriction–modification systems and are now known to be global regulators of transcription, DNA replication, chromosome segregation, and phase variation. In recent years, the dynamic and widespread nature of microbial epigenetic regulation has been revealed by advances in single-molecule real-time (SMRT) sequencing, Oxford Nanopore sequencing and genome-wide methylome analysis. Therefore, the study of microbial epigenetics has become a new and indispensable field of biology that integrates genome organization with adaptive physiology, pathogenicity and

evolutionary plasticity, with new possibilities in precision microbiology, infectious disease research and biotechnology (Bu *et al*., 2025).

Historical Development

The term epigenetics was first used in the 1940s by Conrad Waddington to refer to interactions between genes and developmental processes. Epigenetic studies were mostly restricted to studies in multicellular eukaryotes where epigenetic modifications (DNA methylation and histone modifications) of the genome were known to play a major role in differentiation and development for several decades (Waddington, 1940).

In microorganisms, however, the study of DNA methylation had been confined largely to restriction–modification systems, which identify self from non-self-DNA of bacteria in order to prevent them from being infected by bacteriophages. In the late 1990s, molecular genetic analysis discovered that bacterial DNA methyltransferases, including the Dam and CcrM methyltransferases, also play roles in chromosome replication, mismatch repair, gene regulation and control of the cell cycle. With the discovery of the full genome sequences of microbial organisms in the early 2000s, conserved MFs and methylation motifs were found in a wide range of bacteria and archaea. Advances have been made with the advent of Pacific Biosciences (PacBio) Single-Molecule Real-Time (SMRT) sequencing and Oxford Nanopore sequencing that were able to

detect DNA methylation genome-wide without chemical modification or antibody enrichment. The technologies revealed large microbial methylomes and that the regulation of epigenetics affects virulence, biofilm formation, antimicrobial resistance, environmental adaptation, and phenotypic heterogeneity (Lindon *et al*., 2011). In more recent years, the combination of epigenomics with the other omics, namely transcriptomics, proteomics, metabolomics and artificial intelligence, has ushered in a new era of microbial epigenetics that has wide-ranging implications for microbiology, biotechnology and precision medicine.

Differences between Microbial and Eukaryotic Epigenetics

While there are important differences between the molecular components, biological functions, and complexity of the regulatory systems involved in epigenetic control of gene expression in both microorganisms and eukaryotes, the epigenetic mechanisms themselves are similar. Epigenetic regulation in eukaryotes is mainly achieved by DNA methylation, post-translational modification of histones, chromatin remodeling complexes and regulatory non-coding RNAs. Multilayered control of genome accessibility and transcription is achieved by the presence of nucleosomes and higher order chromatin architecture. Bacteria, on the other hand, have no canonical histones or nucleosomal chromatin. They are mainly epigenetically regulated by DNA methylation, nucleoid

associated proteins (HU, H-NS, Fis, IHF), small regulatory RNAs and RNA modifications. In microorganisms, methylation is primarily of N6-methyladenine (6mA) and N4-methylcytosine (4mC) while in eukaryotes the main target is 5-methylcytosine (5mC). Additionally, microbial methylation can be used in two different ways: as part of a restriction–modification system, or as a regulator of DNA replication, chromosome segregation, mismatch repair, phase variation and expression of virulence genes. Microbial responses to epigenetics are typically short term, adaptive, and reversible to environmental changes, allowing for fast adaptation to changes in ecological conditions. In contrast, the epigenetic changes in eukaryotes are often involved in long-term developmental programming and cell differentiation (Miller *et al.,* 2026). While these differences exist, emerging insights into comparative epigenomics are identifying conserved mechanisms that regulate gene expression across all domains of life, suggesting epigenetics as a universal mechanism that bridges the environment and the genome with cellular phenotype; **Table (15-2)**.

Table (15-2): Comparison Between Microbial and Eukaryotic Epigenetics.

Feature	Microbial Epigenetics	Eukaryotic Epigenetics
Primary Epigenetic Mechanisms	DNA methylation (6mA, 4mC), nucleoid-associated proteins (HU, H-NS, Fis, IHF), regulatory small RNAs (sRNAs), RNA modifications	DNA methylation (5mC), histone modifications, chromatin remodeling, regulatory non-coding RNAs
DNA Packaging	No canonical histones or nucleosomes (except histone-	DNA wrapped around histones forming

Feature	Microbial Epigenetics	Eukaryotic Epigenetics
	like proteins in Archaea); chromosome organized by NAPs	nucleosomes and higher-order chromatin
Major DNA Methylation Types	N6-methyladenine (6mA), N4-methylcytosine (4mC), limited 5mC	Predominantly 5-methylcytosine (5mC)
Main Biological Functions	Regulation of DNA replication, chromosome segregation, mismatch repair, phase variation, virulence, restriction–modification systems	Regulation of gene expression, embryonic development, cell differentiation, genomic imprinting, X-chromosome inactivation
Regulatory Complexity	Relatively simple and highly responsive to environmental changes	Highly complex and multilayered due to chromatin organization
Response to Environmental Signals	Rapid, reversible, and adaptive	Generally slower, supporting long-term developmental programs and stable cellular identity
Gene Regulation Components	DNA methyltransferases, transcription factors, NAPs, sRNAs, RNA modifications	DNA methyltransferases, histone-modifying enzymes, chromatin remodelers, miRNAs, lncRNAs
Evolutionary Role	Enhances adaptation, genome plasticity, antimicrobial resistance, and host–pathogen interactions	Maintains tissue-specific gene expression, developmental regulation, and organismal homeostasis
Representative Epigenetic Marks	6mA, 4mC, RNA modifications	5mC, histone acetylation, histone methylation, histone phosphorylation
Research Technologie	SMRT sequencing, Oxford Nanopore sequencing, methylome analysis, bacterial	Bisulfite sequencing, ChIP-seq, ATAC-seq, single-cell

Feature	Microbial Epigenetics	Eukaryotic Epigenetics
s	epigenomics	epigenomics

Biological Significance

Epigenetic regulation is intrinsic to the physiology of microorganisms and allows them to adjust gene expression in a short time without changing the genomic DNA. The regulatory flexibility enables the microbial populations to adapt to environmental changes, nutrient deficiency, oxidative stress, exposure to antimicrobials and host immune response efficiently. The methylation of DNA, the presence of regulatory RNAs and nucleoid-associated proteins are important to coordinate vital cellular functions such as DNA replication, DNA repair, cell division, metabolic regulation and stress adaptation. Epigenetic regulation of virulence genes, adhesins, secretion systems, toxins and proteins associated with biofilm in pathogenic microorganisms. Phenotypic heterogeneity (phenotypic differences) within genetically identical populations is established by reversible DNA methylation, enabling subpopulations of cells to escape host defence or resist antimicrobial therapy. Epigenetic regulation has also been linked to quorum sensing, sporulation, persistence, colonization of the host, and microbial community dynamics. Epigenetic changes in environmental microorganisms enable them to adapt to extreme temperature, salinity, pH, nutrient availability and oxidative stress, thereby improving their ecological resilience; **Figure (15-13)**.

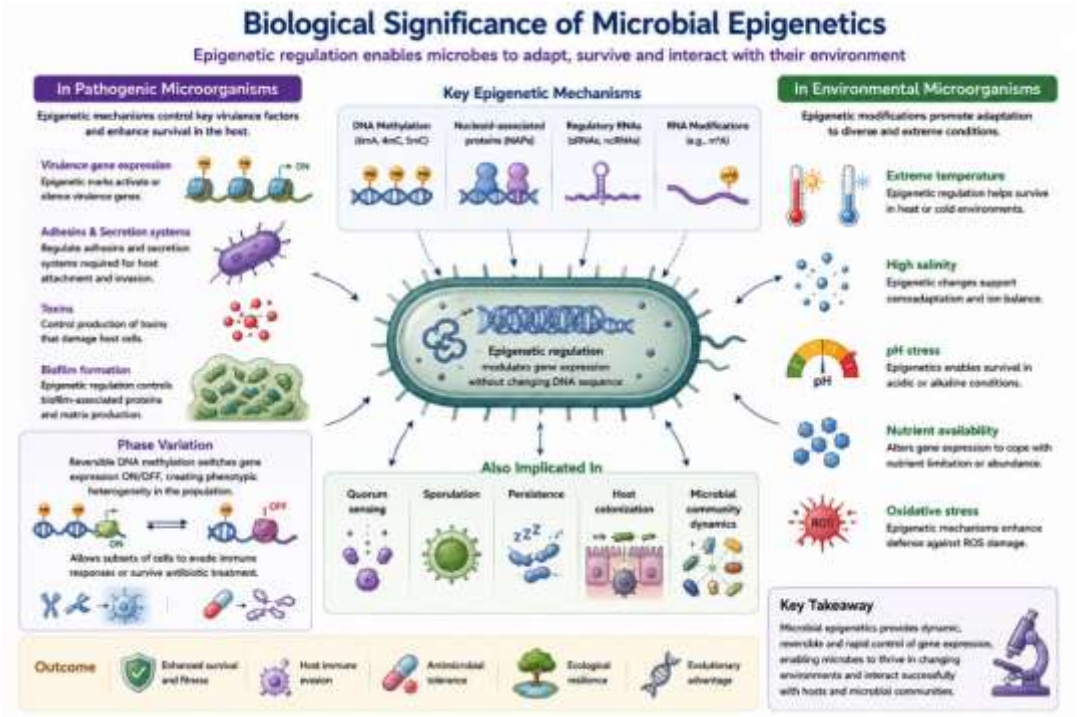


Figure (15-13): Biological Significance of microbial epigenetics.

Epigenetic variation has also been shown to play a role in microbial evolution in recent studies, affecting horizontal gene transfer, mutation rates and genome plasticity. Recent advances in high-resolution methylome mapping, single-cell epigenomics and multi-omics integration have shed light on the complexity of microbial epigenetic networks, which are much more intricate than thought. In this regard, microbial epigenetics is an emerging area of research for the creation of new antimicrobial drugs, precision diagnostics, synthetic biology systems, microbiome engineering, and industrial biotechnology, revealing epigenetic regulation as a key component of microbial adaptability, evolution and functional diversity.

Functional Genomics

1. Transcriptomics

2. **Proteomics**
3. **Metabolomics**
4. **Systems Biology**

Functional Genomics

Functional genomics is a post-genomic branch of the genome studies that aims to understand the biological activity of the genome at the levels of the cell and of the whole system. In contrast to classical genetics that are mostly concerned with gene structure, inheritance and variation in gene sequence, the goal of functional genomics is to understand the dynamic interactions of genes, transcripts, proteins, metabolites and phenotypic traits. In microorganisms, functional genomics combines the new high throughput technologies with computational biology to determine what functions are carried out by different genes, how they regulate one another, and what molecular pathways are followed in the physiology, environmental adaptation, pathogenicity and metabolic diversity of microorganisms. Many genome sequences of bacteria, archaea, fungi, and viruses have been sequenced, and the focus of microbiological research has now shifted from sequencing to functional interpretation. New methods integrate transcriptomics, proteomics, metabolomics, comparative genomics and systems biology to describe responses of the genome under different environmental and physiological conditions. With functional genomic analysis, key genes, regulatory pathways, virulence factors,

resistance genes, and metabolic pathways can be identified that cannot be fully understood based on sequence analysis alone. The analytical capacity of functional genomics has grown significantly with the development of next-generation sequencing (NGS), single-cell omics, long-read sequencing, and the development of CRISPR-based functional screening, as well as with the advent of artificial intelligence (AI). This discipline has thus been made essential for precision microbiology, synthetic biology, industrial biotechnology, microbial engineering and the creation of new antimicrobial therapeutics by connecting genotype with phenotype through comprehensive integration of multi-omics (Pant *et al*.,2026).

Transcriptomics

Transcriptomics is the profiling of all the RNA molecules generated from the microbial genome under specific physiological or environmental conditions. Together these are called the transcriptome, which includes messenger RNAs (mRNA), ribosomal RNAs (rRNA), transfer RNAs (tRNA), small regulatory RNAs (sRNAs), antisense RNAs, CRISPR RNAs, and other non-coding RNAs that regulate microbe gene expression. The transcriptome is more dynamic and sensitive to environmental signals, nutrients, host interactions and cellular stress than genomic DNA. Due to its high sensitivity, wide dynamic range and ability to resolve the nucleotide level, RNA sequencing (RNA-seq) is currently the main technology used for transcriptomic studies. Recent developments have led to

the characterization of transcriptional heterogeneity in microbial populations and enhanced operon identification and characterization of transcript isoforms and regulatory RNAs with the aid of single-cell transcriptomics and long-read RNA sequencing. Transcriptomic data is essential for understanding virulence regulation, quorum sensing, antimicrobial resistance, metabolic adaptation and interactions among microbial communities. Combination of transcriptomic data with genomic, proteomic and metabolomic data allows the reconstruction of regulatory networks and the prediction of gene functions (Ju & Liu, 2026).

Proteomics

Proteomics is an undertaking that involves studying the whole set of proteins that the microorganism produces in a specific physiological condition. Proteome represents the direct picture of microbial phenotype and biological activity as proteins perform almost all the cellular functions. In contrast to the genome, which is relatively stable, the microbial proteome is rather dynamic and changes depending on the environmental conditions, developmental stage, nutrient status and cellular stress. In this sense, proteomic analysis can give information on the function that can not be deduced only from the genomic or transcriptomic information. The field of modern microbial proteomics is mostly dependent on high-resolution mass spectrometry, LC–MS/MS, quantitative labeling strategies and bioinformatics pipelines, to identify, quantify and characterize

proteins and their post-translational modifications. Proteomic studies have greatly contributed to understanding microbial metabolism, virulence factors, secretion systems, proteins associated with biofilm, antimicrobial resistance, stress-response pathways and host/pathogen interaction. Comparative Proteomics can also be used to identify vaccine candidates, therapeutic targets and biomarkers by comparing the expression of proteins from various strains or environmental conditions. Integration of proteomic data with transcriptomic and metabolomic data using multi-omics approaches has helped to better reconstruct regulatory networks and to predict microbial cellular behavior. Thus, proteomics is an important part of functional genomics and systems microbiology (Ogunjobi *et al*.,2026).

Metabolomics

Metabolomics is an analytical technique that investigates the entire set of low molecular weight products of microbial cell metabolism. The metabolites, such as amino acids, organic acids, sugars, nucleotides, lipids and secondary metabolites, are the ultimate result of gene expression and enzymatic activity and thus the most direct molecular reflection of the microbial phenotype. Metabolomics can provide useful information for understanding physiological adaptation, nutrient utilization, stress responses and microbial interactions, since metabolic profiles change rapidly in response to environmental fluctuations. The metabolome of microorganisms can

be characterized with high sensitivity and specificity by using analytical platforms like nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy, gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS), liquid chromatography–mass spectrometry (LC–MS) and capillary electrophoresis–mass spectrometry (CE–MS). Metabolomics has helped to discover new antibiotics, microbial signaling molecules, industrial metabolites and pathogenicity and antimicrobial resistance biomarkers in microorganisms. Combining metabolomics with genomics, transcriptomics, and proteomics facilitates the detailed mapping of metabolic pathways and identification of the regulatory bottlenecks that affect microbial physiology. As a result, metabolomics is now widely being used as a key tool in systems microbiology and functional genomics, and is applicable to metabolics engineering, synthetic biology, environmental biotechnology, microbiome studies, and precision medicine (D'Agostino *et al*.,2026).

Systems Biology

Systems biology is an integrative discipline aimed at understanding microorganism Systems biology is an integrative discipline aimed at understanding microorganisms as a whole system of biological components instead of as a set of genes or proteins. Systems biology integrates genomics, transcriptomics, proteomics, metabolomics, computational modelling and network biology to create a reconstruction of the way that microbial physiology,

metabolism, adaptation and evolution are regulated by complex molecular interactions. This comprehensive approach allows the prediction of cell behavior under various environmental and genetic conditions. Systems biology has greatly contributed to the understanding of (i) gene regulatory networks, (ii) metabolic fluxes, (iii) signaling pathways, (iv) quorum sensing, (v) stress responses, and (vi) host–microbe interactions in microorganisms. More and more, genome-scale metabolic models (GEMs), constraint-based modeling, machine learning and artificial intelligence are being used to simulate microbial metabolism, to predict genes that are essential to the cell and to optimize microbial metabolic processes for industrial bioprocesses. Combination of multi-omics datasets enables detailed understanding of genotype–phenotype connections, including rational strain design, synthetic biology, discovery of new antimicrobial targets, and microbiome research. The predictive power of systems biology has been further improved by recent developments in single-cell multi-omics, spatial transcriptomics, and digital twin modelling. Systems biology has thus emerged as an important tool for the modern study of microorganisms and is being used in a number of ways, including the ability to integrate molecular genetics with computational science to allow for precision microbiology and the speeding up of innovations in biotechnology, environmental microbiology and biomedical research.s as a whole system of biological components instead of as a set of genes or proteins. Systems biology integrates

genomics, transcriptomics, proteomics, metabolomics, computational modelling and network biology to create a reconstruction of the way that microbial physiology, metabolism, adaptation and evolution are regulated by complex molecular interactions. This comprehensive approach allows the prediction of cell behavior under various environmental and genetic conditions. Systems biology has greatly contributed to the understanding of (i) gene regulatory networks, (ii) metabolic fluxes, (iii) signaling pathways, (iv) quorum sensing, (v) stress responses, and (vi) host–microbe interactions in microorganisms. More and more, genome-scale metabolic models (GEMs), constraint-based modeling, machine learning and artificial intelligence are being used to simulate microbial metabolism, to predict genes that are essential to the cell and to optimize microbial metabolic processes for industrial bioprocesses. Combination of multi-omics datasets enables detailed understanding of genotype–phenotype connections, including rational strain design, synthetic biology, discovery of new antimicrobial targets, and microbiome research. The predictive power of systems biology has been further improved by recent developments in single-cell multi-omics, spatial transcriptomics, and digital twin modelling. Systems biology has thus emerged as an important tool for the modern study of microorganisms and is being used in a number of ways, including the ability to integrate molecular genetics with computational science to allow for precision microbiology and the speeding up of innovations in biotechnology,

environmental microbiology and biomedical research (Suhail *et al*.,2026).

Modern Genome Technologies

1. **Whole Genome Sequencing**
2. **Long-read Sequencing**
3. **Single-cell Sequencing**
4. **Spatial Transcriptomics**

Whole Genome Sequencing

Whole Genome Sequencing (WGS) is the ability to obtain the complete nucleotide sequence of an organism's genome at a single base resolution. WGS has transformed microbial genetics by allowing the simultaneous identification of coding sequences, regulatory elements, mobile genetic elements, antimicrobial resistance determinants and virulence-associated genes in bacteria, archaea, fungi and viruses. WGS can be performed without targeting particular genes, giving a comprehensive and unbiased view of the whole microbial genome and enabling high-level analyses of genetic diversity, genome organization and evolutionary relationships; **Figure (15-14)**.

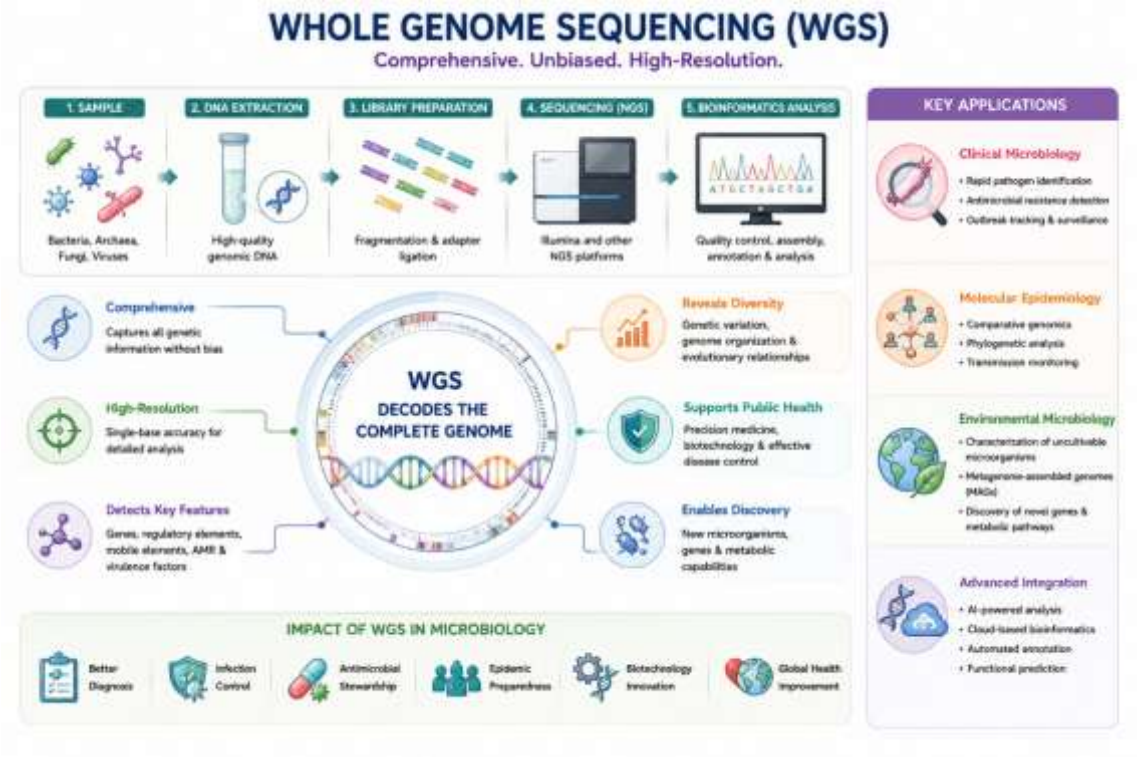


Figure (15-14): Whole Genome Sequencing and its applications.

Next generation sequencing (NGS) platforms, such as Illumina, have made sequencing much cheaper, faster and more precise than ever before. Comparative genomics, molecular epidemiology, outbreak surveillance and phylogenetic reconstruction have become essential applications of the whole genome sequencing. In clinical microbiology, WGS can be used to rapidly identify pathogenic microbes, detect the presence of genes that confer resistance against antimicrobial drugs, and track the spreading of a pathogen in relation to an outbreak in health care settings. WGS is used in environmental microbiology to describe unculturable microorganisms and discover new metabolic pathways via metagenome-assembled genomes (MAGs). With the recent integration of WGS, artificial intelligence, cloud-based bioinformatics, and automated genome annotation, genome

interpretation and functional prediction have been speeded up. Thus, WGS has emerged as a key tool in modern microbial genomics, offering detailed genome information for microbial diversity, adaptation, and evolution, and aiding applications ranging from precision medicine to biotechnology and public health (Singh *et al*., 2026).

Long-read Sequencing

Long-read sequencing is a sophisticated genomic sequencing technology that can produce longer DNA sequence reads (up to hundreds of kilobases) to address many of the short-read sequencing limitations. The two major long-read platforms, Pacific Biosciences Single-Molecule Real-Time (SMRT) sequencing and Oxford Nanopore sequencing, have the ability to sequence long DNA molecules continuously while retaining the structural and epigenetic information. These technologies have helped to significantly advance the microbial genome assembly, as they have been able to assemble repetitive DNA, plasmids, genomic islands, insertion sequences, and complex chromosomal rearrangements that are often split between short read assemblies. In addition to genome assembly, long-read sequencing allows for direct detection of DNA methylation and other epigenetic modifications without chemical modification, especially valuable for microbial epigenomics. The accurate characterization of operons, transcription start sites and regulatory RNA molecules can also be achieved by

full-length transcript sequencing. Long-read sequencing aids in the full reconstruction of antimicrobial resistance plasmids, mobile genetic elements, and horizontal gene transfer events in clinical and environmental microbiology. Hybrid assembly methods that integrate long and short reads yield very high quality, near-complete microbial genomes for comparative and evolutionary analysis (Waris *et al*., 2026). Accuracy is continually increasing through sequencing chemistry, base-calling algorithms and artificial intelligence, offering cost reduction and reduced complexity. As a result, long-read sequencing is now an essential tool for the in-depth analysis of the microbial genome and functional genomics; **Figure (15-15)**.

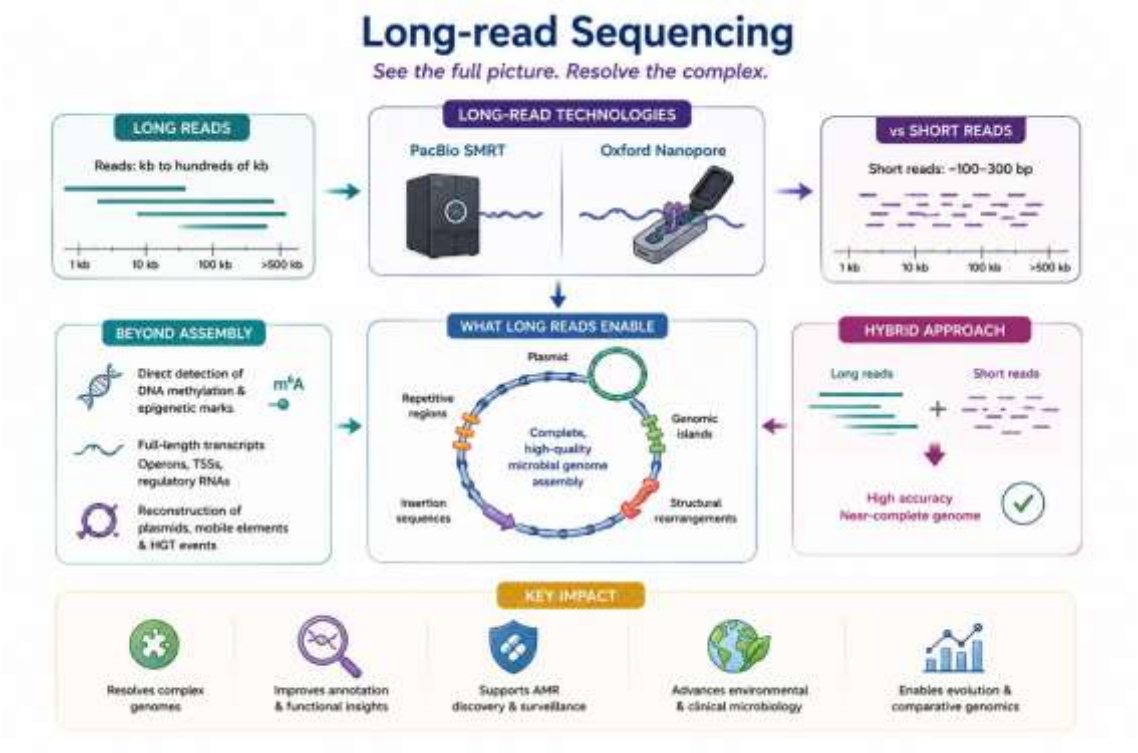


Figure (15-15): Long read sequencing.

Single-cell Sequencing

Single-cell sequencing is a revolutionary genomic technology that can be used to study the total molecular content of a single cell instead of a diverse population of microorganisms. Typical genomic and transcriptomic assays capture an average signal from millions of cells that can obscure phenotypic heterogeneity and rare subpopulations. However, single-cell sequencing shows that the genome, gene expression, and regulation of a cell vary from one cell to another, offering unprecedented understanding of microbial diversity and population dynamics. With recent developments in microfluidics, whole genome amplification, fluorescence-activated cell sorting (FACS) and droplet-based technologies, the sensitivity and accuracy of microbial single cell analyses have significantly benefitted. Single-cell genomics has enabled the recovery of genomes of microorganisms that were once unculturable from environments and host-associated ecosystems, thereby adding to the known microbial tree of life. Single-cell transcriptomics can also be used to study stress adaptation, biofilm formation, quorum sensing, host-pathogen interactions, and exposure to antimicrobials to assess the transcriptional heterogeneity of the cells. Linkage to long-read sequencing and multi-omics approaches enables simultaneous characterization of genomic, transcriptomic, epigenomic and metabolic features in individual cells. They have implications in microbial ecology, infectious diseases, synthetic biology, and microbiome research. As such, single-cell sequencing

is one of the most versatile technologies available to reveal the function, evolution and ecological interactions of microorganisms at the highest biological resolution.

Spatial Transcriptomics

Spatial transcriptomics is an emerging technology that can be used to identify the spatial expression of genes in intact biological structures, using high throughput RNA sequencing and spatial information. Unlike traditional transcriptomic techniques that require tissue or sample homogenization, spatial transcriptomics maintains the spatial structure of microbial communities and host tissue, while at the same time providing a spatial map of gene expression. This allows researchers to understand the interaction between a microbial cell and other cells in its natural environment. Spatial transcriptomics was first applied to eukaryotic tissues, but recent advances in imaging technologies, RNA capture platforms, fluorescence in situ hybridization (FISH), multiplexed sequencing, and computational image analysis are making it more suitable for microbiological studies. These advances have allowed for detailed study of biofilm architecture, polymicrobial infections, microbial colonization, host–microbiome interactions, and metabolic specialization among complex microbial communities. Comprehensive multidimensional maps of microbial function and ecological organization that integrate spatial transcriptomics with metagenomics, proteomics, metabolomics and artificial intelligence.

Possible emerging applications include precision diagnostics, microbial ecology, infectious disease research and synthetic microbial consortia engineering (Liu *et al*., 2026). With the development of more powerful sequencing technologies and improved computational approaches, spatial transcriptomics will be a key technology to elucidate the spatial regulation of microbial gene expression and the spatial structure of microbial ecosystems; **Figure (15-16)**.

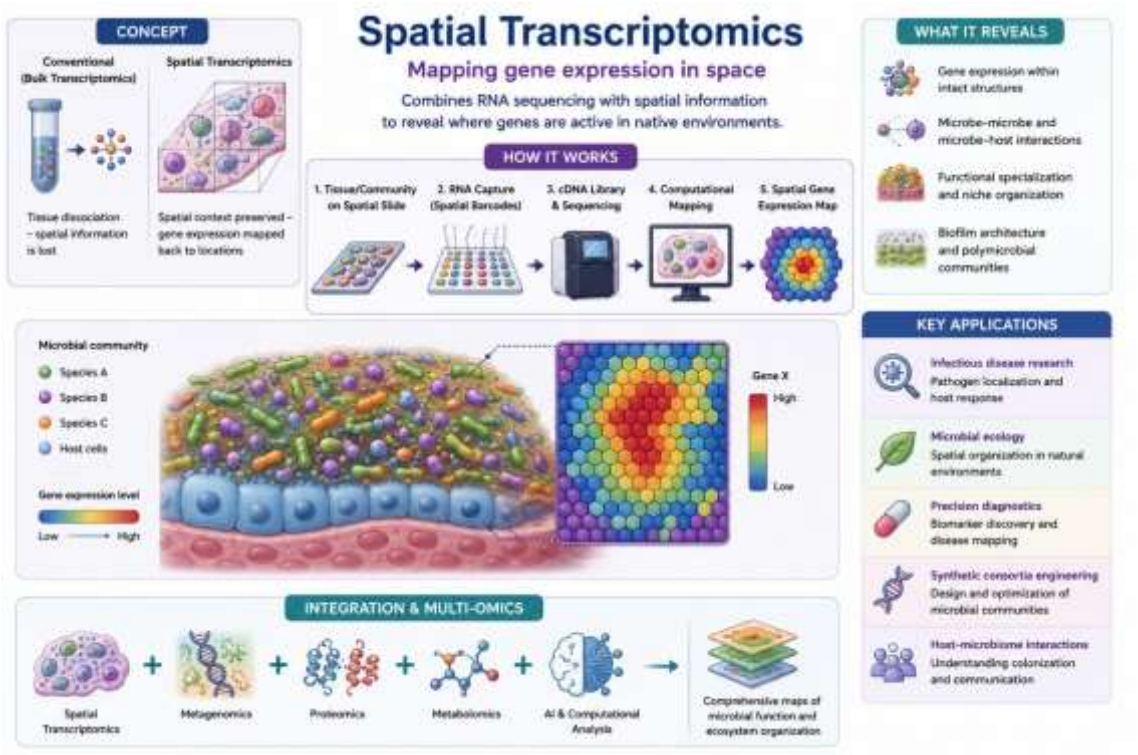


Figure (15-16): Spatial Transcriptomics

AI and Bioinformatics in Genetics

1. **Machine Learning**
2. **Variant Interpretation**
3. **Gene Network Analysis**

4. Precision Genomics

Machine Learning

This rise of machine learning (ML) has made it one of the most groundbreaking computational techniques in microbial genetics, allowing for the discovery of biological meaningful patterns from the rapidly growing omics and genome data. Machine learning is a subfield of AI that uses statistical algorithms that can learn complex relationships from data without being explicitly programmed. Supervised, unsupervised and deep learning models are increasingly being used in microbial genomics for gene function prediction, microbial species classification, identification of antimicrobial resistance determinants, identification of virulence associated genes, and evolutionary relationship inference from large genome scale. With the advent of so-called next generation sequencing (NGS) technology it is now possible to obtain vast amounts of microbial genome data that surpass the analytical capabilities of traditional approaches to bioinformatics. To tackle this challenge, machine learning has been successfully used to leverage genomic, transcriptomic, proteomic, metabolomic, and phenotypic data to discover hidden biological signatures and predictive biomarkers. Deep neural networks, random forests, support vector machines, and graph-based learning algorithms have shown outstanding performance in protein function prediction, regulatory elements identification, pathogenic potential and horizontal gene

transfer events prediction. Additionally, machine learning can be used to automate genome annotation, metagenomic classification, outbreak surveillance, and synthetic biology applications optimization. The adoption of explainable artificial intelligence (XAI) has also further promoted the biological interpretability of predictive models, boosting confidence in both clinical and research applications. As such, machine learning has emerged as a critical tool in microbial genetics, rapidly advancing the field's understanding of genomes, gene function, and precision microbiology (Pandey *et al*.,2026).

Variant Interpretation

Variants are systematically assessed and characterized for their biological significance and potential functional consequences, which is known as variant interpretation. This is a fundamental process in microbial genetics that differentiates neutral polymorphisms from mutations that affect pathogenicity, antimicrobial resistance, metabolic potential, environmental adaptability and evolutionary fitness. The high number of genomic variants found in microbial populations is commonplace in modern sequencing technologies and requires sophisticated computation methods to accurately interpret the biological significance of these variants. Variant interpretation combines comparative genomics, evolutionary conservation, structural biology, functional annotation and machine learning to evaluate the importance of single nucleotide polymorphisms (SNPs), insertions, deletions, copy number variation,

structural rearrangement and mobile genetic elements. For example, using specific databases and predictive algorithms, one can assess the effects of particular variants on protein stability, enzyme activity, regulatory sequences, transcription factor binding sites and RNA secondary structure. In pathogenic microorganisms, accurate variant interpretation aids in defining the correct trends of resistance-conferring mutations, virulence-associated alleles and outbreak-specific genetic markers to guide molecular epidemiology and clinical decisions. The analysis of complex genomic variants has greatly benefited from new technologies in long read sequencing, pangenome analysis and artificial intelligence, especially in repetitive regions and accessory genomes. Advances in microbial genomic databases will mean that an increasing number of microbes will have their genomes sequenced, and with this will come an increasing amount of data on what may constitute a microbial variant and its implications (Pandey *et al*.,2026). Variant interpretation is becoming a significant part of precision microbiology, which will enable detailed genotype–phenotype correlation and enhance the diagnostic and surveillance value and target identification in therapies.

Gene Network Analysis

Systems-level analysis of gene networks to address how genes regulate microbial cellular processes in a coordinated manner. Network analysis is not just about single genes, but it helps to

identify complex interactions between different genes that play a role in metabolism, stress responses, pathogenicity, cell division and environmental adaptation. Such a comprehensive view is becoming even more critical as microbial genomes are understood as highly interconnected regulatory systems. Datasets from transcriptomics, proteomics, epigenomics, metabolomics and comparative genomics are combined in an advanced manner in order to reconstruct gene regulatory networks. Network topology helps to pinpoint regulatory hubs, signaling cascades, transcription factors, and key genes that stabilize cellular activities. The prediction of regulatory interactions and dynamic cellular responses has been much improved in recent years through the use of graph theory, Bayesian inference, machine learning, and the use of artificial intelligence. In the field of microbial genetics, analysis of gene networks has helped identify quorum-sensing pathways, antimicrobial resistance networks, virulence regulatory pathways, genes associated with biofilms, and metabolic adaptation pathways. Combined with CRISPR-based functional screening and single-cell transcriptomics, it can further validate the predicted regulatory interactions at an unprecedented resolution (Ali & Siraj, 2026). Consequently, gene network analysis provides a comprehensive framework for understanding microbial genome function, supporting rational drug discovery, metabolic engineering, synthetic biology, and systems microbiology; **Figure (15-17)**.

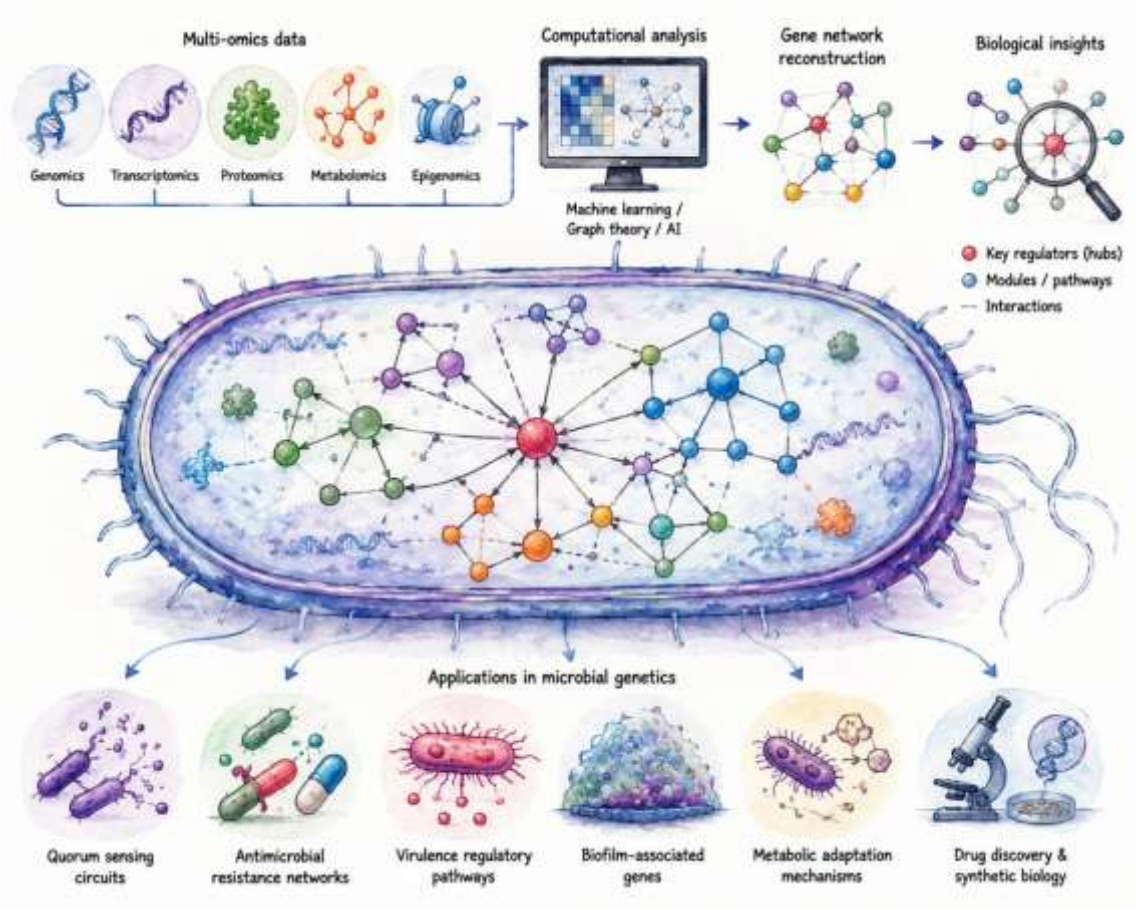


Figure (15-17): Gene Network Analysis.

Precision Genomics

Precision genomics is an emerging, super personalized genomics system that combines whole genome sequencing, multi-omics technologies, bioinformatics and artificial intelligence to provide very personalized genomic insights for microbial identification, surveillance, diagnosis, and therapeutic intervention. Precision genomics explores strain-level genomic variation, regulation, resistance determinants to antimicrobial agents, virulence factors, and evolution with single nucleotide resolution, in contrast to the species-level characterization that is the main focus of traditional

genomic analyses. Precision genomics has revolutionized clinical microbiology in microbial genetics, enabling the speedy identification of pathogens, the ability to track outbreaks in real-time, to predict antimicrobial resistance, and to conduct genomic epidemiology. Accurate genotype-phenotype correlation and personalized antimicrobial drug therapy can be achieved through the integration of genomic, transcriptomic, epigenomic, proteomic and metabolomic data. Additional methods of complex microbial population characterization and characterization of host–microbiome interactions include long-read sequencing, single-cell genomics, pangenome analysis and spatial transcriptomics. AI and cloud-based bioinformatics systems speed-up automated genome interpretation, predictive modeling, and clinical decision support, enhance scalability, and ensure analytical reproducibility. In addition to infectious disease research, precision genomics has a significant impact on industrial biotechnology, synthetic biology, environmental microbiology, microbiome engineering and microbial strain optimization. With the continued evolution of sequencing technologies and the development of more sophisticated computational approaches, precision genomics will be the foundation of next-generation microbial genetics and will allow for more accurate prediction of microbial behavior, evolution and functional diversity in a variety of biological systems (Singh *et al*., 2026).

Section III

Scientific Applications of Microbiology and Genetics

Medical Microbiology

1. **Infectious Disease Diagnosis**
2. **Vaccines**
3. **Antimicrobial Therapy**
4. **Rapid Molecular Diagnostics**

Infectious Disease Diagnosis

Microbiology and genetics have played a crucial role in the correct diagnosis of infectious diseases, one of the most relevant applications in modern medicine. Accurate and timely diagnosis of microbial pathogens is critical for the proper treatment of infection, control, surveillance for public health and prevention of antimicrobial resistance. The traditional techniques such as microscopy, microbial culture, biochemical characterization, and others are still essential in clinical microbiology as they offer direct evidence of the viability of the pathogen and susceptibility to antimicrobial agents (Ryan *et al.,* 2022). However, these methods can be labour-intensive and are not successful for fastidious, slow growing or non-cultivable microorganisms. In recent years, molecular genetics has brought about significant advances in the diagnosis of infectious diseases with the introduction of genome-based pathogen identification and

nucleic acid amplification technologies. The polymerase chain reaction (PCR), quantitative PCR (qPCR), digital PCR, multiplex PCR and isothermal amplification methods are able to detect microbial DNA or RNA extremely quickly, sensitively and with great specificity. Comprehensive identification of bacterial, viral, fungal and parasitic pathogens without prior culture can also be achieved through next-generation sequencing (NGS), whole genome sequencing (WGS), metagenomic sequencing and diagnostic platforms based on " Crispr. These technologies simultaneously detect antimicrobial resistance genes, virulence determinants, and genomic epidemiological markers, facilitating precision diagnostics and outbreak investigations. The applications of AI and bioinformatics have also bolstered diagnostics, using genomic, transcriptomic and clinical data to automate pathogen identification and anticipate antimicrobial susceptibility profiles (Gajic *et al*., 2022). In the field of emergency medicine and in resource-limited environments, point-of-care molecular diagnostics (POCD) are becoming more and more used, which significantly shortens the time to results and enhances the quality of patient care. Infectious disease diagnosis has thus grown to become a precision medicine, genomics, computational biology, and rapid, accurate, and actionable science; **Figure (15-18)**.

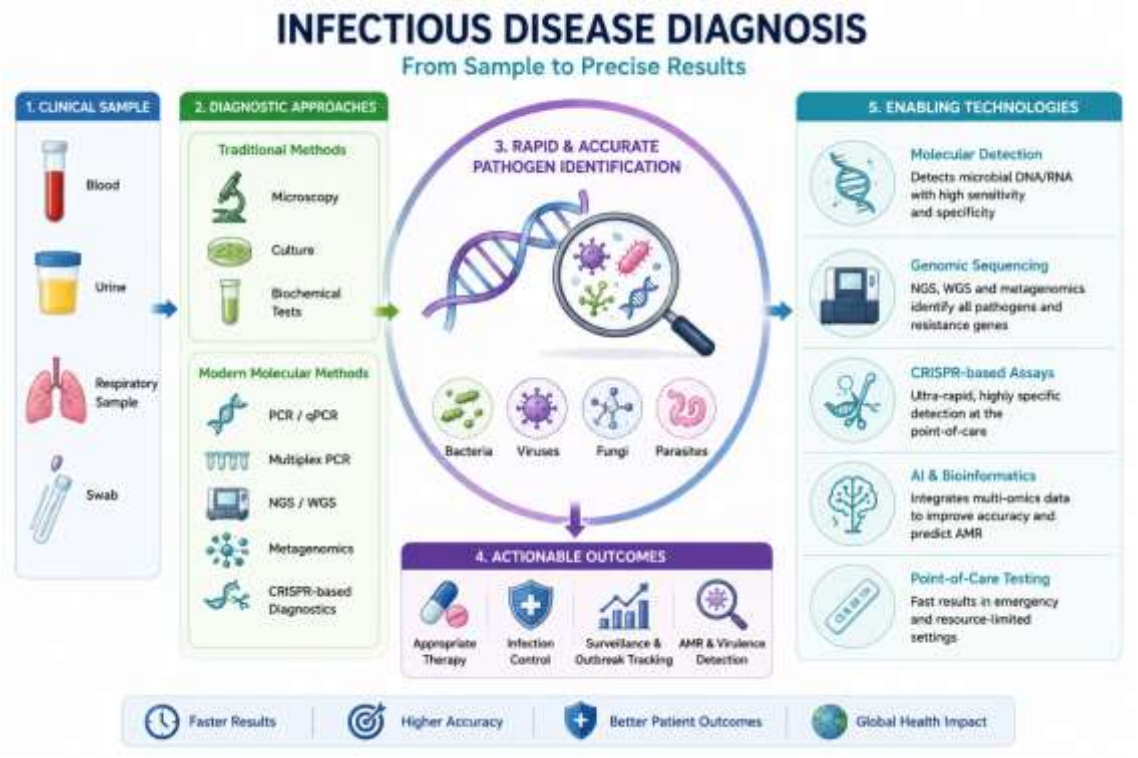


Figure (15-18): Infectious Disease Diagnosis.

Vaccines

Preventing infectious diseases and reducing morbidity and mortality worldwide, through the use of vaccination, is one of the most successful applications of microbiology and genetics. Vaccines elicit adaptive immune responses to microbial antigens, which results in long-lasting immunological memory that can protect against future infection. There are several traditional vaccine platforms such as live-attenuated, inactivated, toxoid vaccines and subunit vaccines, which have significantly lowered the incidence of poliomyelitis, measles, diphtheria and hepatitis. The new molecular microbiology and microbial genomics have transformed the process of vaccine design by genome-based antigen discovery and reverse

vaccinology. By using whole genome sequencing, conserved immunogenic proteins, virulence factors, and surface-exposed antigens are identifiable for vaccine development. The development of highly targeted vaccines with better efficacy and safety profiles has been accelerated by the use of recombinant DNA technology, synthetic biology, structural vaccinology and computational immunology. More recently, the development of messenger RNA (mRNA) vaccines, viral vector vaccines, DNA vaccines and nanoparticles-based delivery systems have proven to be very successful, especially in the context of the COVID-19 Pandemic, setting a new standard in vaccine development for emerging pathogens. Microbial genetics is also playing a role in ongoing tracking of pathogen changes, allowing for vaccine modification when changes occur in the pathogen, such as antigenic drift or shift, or novel variants. These are now made possible through the power of artificial intelligence and immunoinformatics, allowing the prediction of antigenicity, the selection of epitopes, immune response prediction and vaccine optimization prior to experimental proof (Koolaee, 2026). Thus, modern vaccinology combines microbiology, genomics and bioinformatics with systems immunology to create next generation vaccines that are more specific, scalable and impactful for global public health; **Figure (15-19)**.

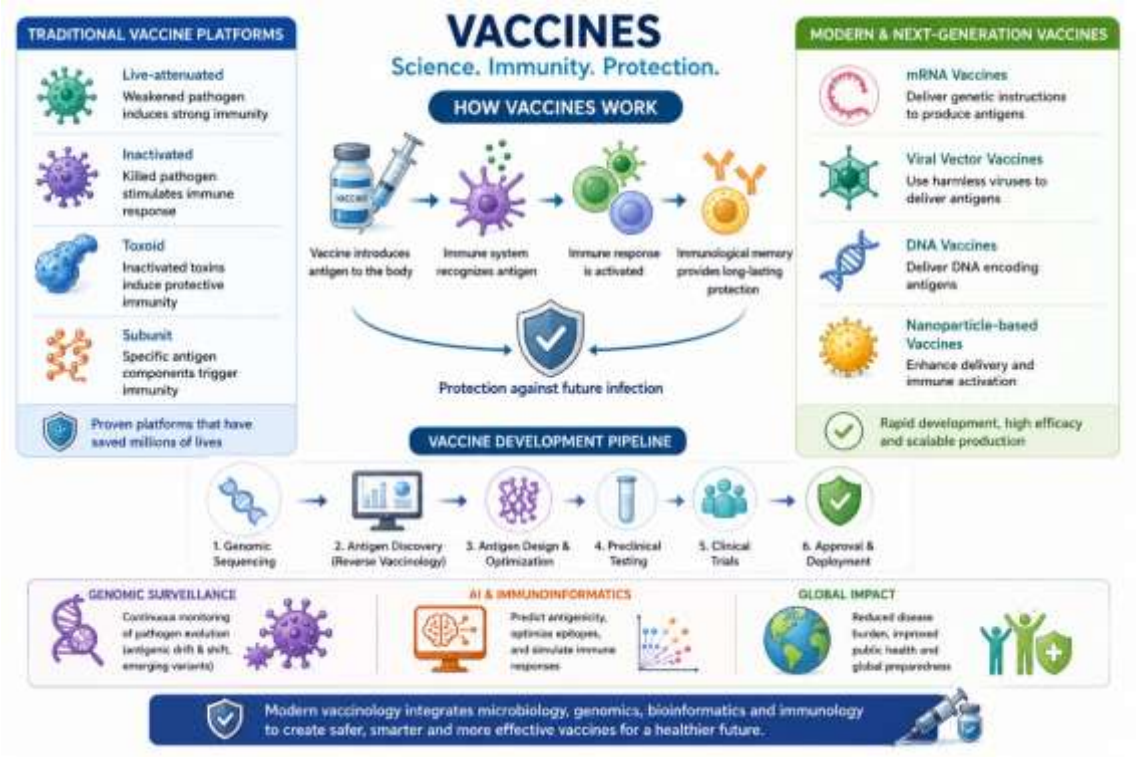


Figure (15-19): Types of Vaccines.

Antimicrobial Therapy

Antimicrobial therapy is one of the pillars of current clinical microbiology and infectious diseases. Antimicrobial agents are chemicals that inhibit the growth of one or more groups of microorganisms or destroy them, but do not significantly harm the body of the host, such as antibiotics, anti-virals, anti-fungal and anti-parasites, that specifically relate to the structures or metabolic pathways of microorganisms. All of these are dependent on proper microbiological diagnosis, antimicrobial susceptibility testing, pharmacokinetic/pharmacodynamic optimization, and host factor considerations for the efficacy of antimicrobial therapy. Antimicrobial resistance (AMR) is now one of the greatest threats to public health

today, having emerged quickly. Resistance determinants are spread across microbial populations by genetic mechanisms such as spontaneous mutations, horizontal gene transfer, acquisition of plasmid genes, transposons, integrons, and gene transfer via bacteriophage. Presently, molecular diagnostics and whole genome sequencing have become increasingly used in microbiology laboratories for the detection of resistance genes, identification of resistance mechanisms and to guide precision antimicrobial therapy. The availability of new technologies in microbial genomics has enabled the identification of novel antimicrobial targets using comparative genome analysis, functional genome analysis, genetic screening using CRISPR, and systems biology. New anti-infective strategies involve antimicrobial peptides, bacteriophage therapy, interventions using the microbiome, anti-virulence agents, quorum sensing inhibitors, antimicrobial CRISPR-Cas systems, and the use of nanoparticles to target drugs. AI systems have also been applied to the discovery of antimicrobial drugs, helping to predict drug-target interactions, optimize lead compounds, and identify potential drug repurposing opportunities (Usman *et al*.,2026). These multi-disciplinary strategies are shifting from empirical treatment to precision medicine, not only to make therapy more effective but also to decrease the development of antimicrobial resistance and retain the ongoing efficacy of antimicrobial agents; **Figure (15-20)**.

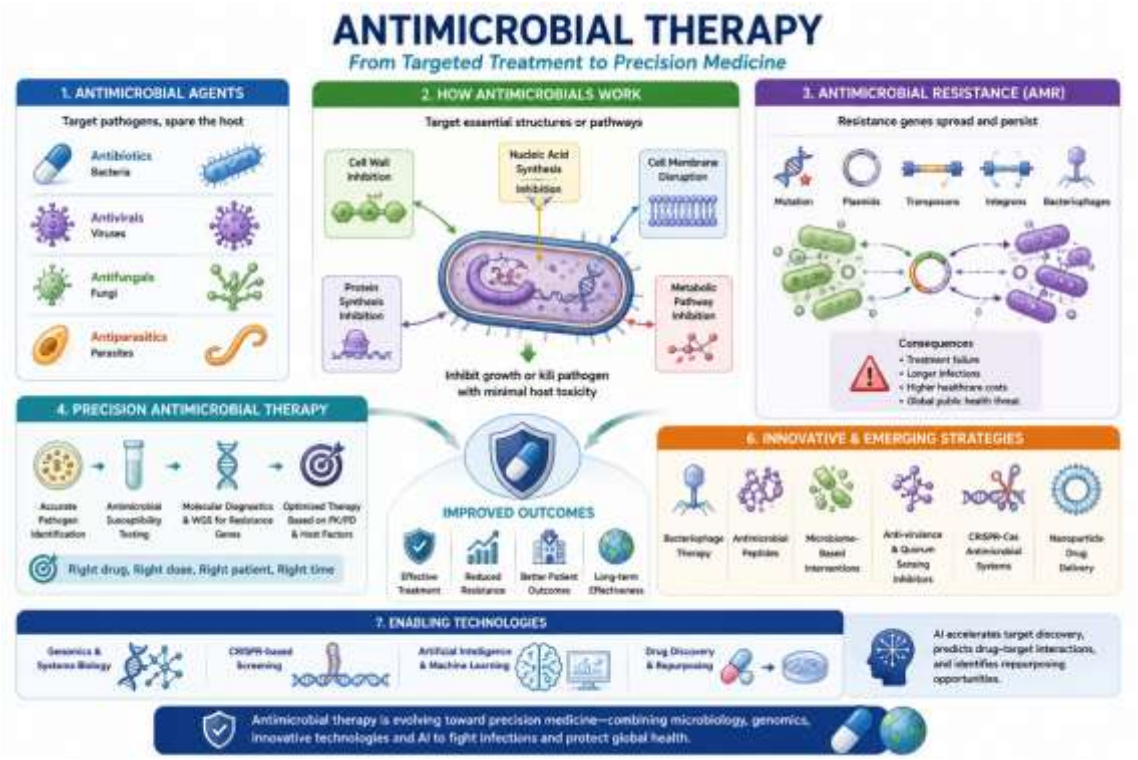


Figure (15-20): Modern Approaches to Antimicrobial Therapy and Precision Medicine.

Rapid Molecular Diagnostics

Rapid molecular diagnostics include state-of-the-art nucleic acid based technologies that are able to diagnose microbial pathogens within minutes or hours, thereby significantly cutting the diagnostic lag time typically experienced with culture-based methods. These technologies are sensitive and specific for the detection of pathogen-specific DNA and RNA sequences, and help with early diagnosis, targeted antimicrobial treatment, and infection control.

In clinical microbiology, rapid molecular diagnostics are essential, especially for severe infections, for immunocompromised patients, for emerging infectious diseases and for outbreaks in the healthcare setting. The main molecular platforms which are currently used in

clinical laboratories are polymerase chain reaction (PCR), real-time PCR (qPCR), digital PCR, loop-mediated isothermal amplification (LAMP), recombinase polymerase amplification (RPA), and CRISPR-based diagnostic systems. In recent years, nanopore sequencing has become available, as well as metagenomic next-generation sequencing (mNGS), and microfluidic devices in the lab, that allow the identification of all the pathogens within a clinical specimen without any prior cultivation of microorganisms. These technologies can detect multiple genes responsible for antimicrobial resistance, virulence factors, and strain-specific genome markers, all at once, enabling precision diagnostics and real-time epidemiological surveillance. The use of artificial intelligence and cloud-based bio-informatics is becoming more common to assist in the automated interpretation of molecular diagnostic results, to enhance analytical accuracy and shorten reporting time. Portable point-of-care devices have integrated with the availability of rapid diagnostics (RODs) in hard-to-reach and resource-poor areas. New technologies will be developed that are expected to integrate multiplex molecular detection, biosensors, CRISPR technology, nanotechnology, and artificial intelligence to create a fully automated diagnostic platform with the capacity for comprehensive pathogen detection in one workflow (Goraya *et al*.,2026). Therefore, the use of rapid molecular diagnostics is one of the most important applications of microbiology and genetics that could potentially change the face

of clinical decision, antimicrobial treatment and international control of infectious diseases; **Figure (15-21).**

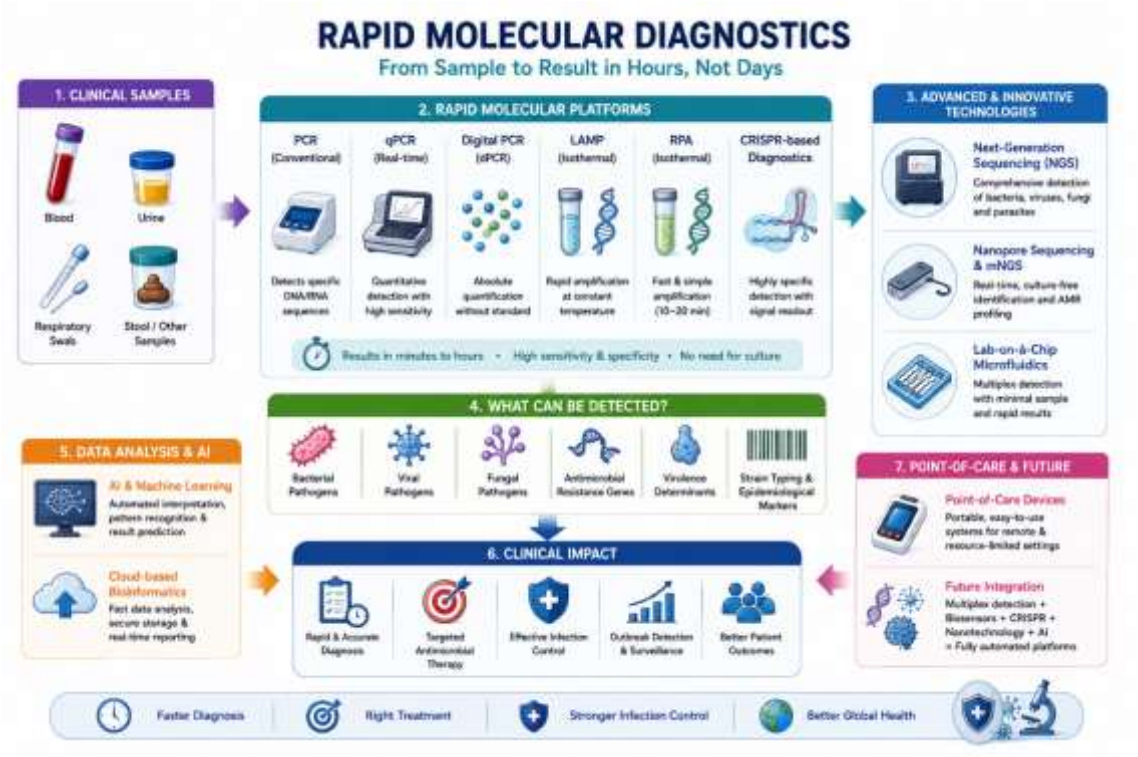


Figure (15-21): Overview of Rapid Molecular Diagnostic Technologies for Infectious Disease Detection.

Conclusion

Microbiology and genetics have become very integrated sciences, explaining biological processes from the molecular and genomic level up to the ecosystem scale. Advances in genomics, metagenomics, transcriptomics, proteomics, metabolomics, single-cell technologies and bioinformatics have significantly broadened our understanding of the diversity, functional potential, genetic regulation, adaptation and host–microbe interactions of microbes, including those that have proved to be difficult or impossible to isolate and grow in culture. Most importantly, microorganisms should not be considered mainly as disease causing agents but as key

players in the biological processes of nutrient cycling, ecosystem stability, bioremediation, sustainable agriculture, industrial biotechnology and human health. Their metabolism versatility enables them to play a crucial role in solving challenges faced by the world, such as antimicrobial resistance, environmental pollution, climate change, food security and sustainable bioeconomy. Experimental biology and computational intelligence are becoming increasingly important in the future of microbiology and genetics. The application of AI, machine learning, systems biology, and multi-omics integration holds promise to revolutionize how complex biological information is converted into predictive models of microbial behavior, metabolic function, disease risk, and responses to environmental factors, all of which are unprecedented. Thus, the science of the individual microorganism or gene is not the most effective scientific paradigm, but rather, the science that integrates the community of microorganisms, the genetic information, molecular networks, the environmental context, and the ability to predict. A systems-level approach could hasten precision medicine, sustainable biotechnology, environmental restoration, and rational microbial engineering, and make microbiology and genetics central science for the future of science and sustainability in the world.

References

1. Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2022). *Molecular Biology of the Cell* (7th ed.). Garland Science.

2. Ali, S., & Siraj, M. (2026). Systems-Level Approaches to Decoding Chemical Communication Between Crop Plants and Rhizosphere Microbes in Health and Disease. *Rhizosphere*, 101459.

3. Allison, S. D. (2014). Modeling adaptation of carbon use efficiency in microbial communities. *Frontiers in Microbiology*, *5*, 571.

4. Brock, T. D., Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2024). *Brock Biology of Microorganisms* (17th ed.).

5. Brown, T. A. (2023). *Genomes 5*. Garland Science.

6. Bu, X., Dou, X., Chen, Z., Liu, L., Mei, Y., & Ren, M. (2025). DNA methylation confers epigenetic changes in cold-adapted microorganisms in response to cold stress. *Extremophiles*, *29*(1), 16.

7. Casadevall, A., & Pirofski, L. A. (2000). Host-pathogen interactions: basic concepts of microbial commensalism, colonization, infection, and disease. *Infection and immunity*, *68*(12), 6511-6518.

8. Chowdhury, L., Jogi, J., & Dey, M. P. A. (2024). *Introduction to micro biology*. Addition Publishing House.

9. D'Agostino, G. D., Kim, C. H., Park, J., Zhang, Y., Amer, B., Franzosa, E. A., ... & Devlin, A. S. (2026). Comparative Metabolomics Reveals the Production of Sulfated Metabolites by Human Gut Bacteria. *Journal of the American Chemical Society*.

10. Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. Science, 346(6213), 1258096.

11. Eloe-Fadrosh, E. A., & Rasko, D. A. (2013). The human microbiome: from symbiosis to pathogenesis. *Annual review of medicine*, *64*(1), 145-163.

12. Eslami, M., Fadaee Dowlat, B., Yaghmayee, S., Habibian, A., Keshavarzi, S., Oksenych, V., & Naderian, R. (2025). Next-generation vaccine platforms: integrating synthetic biology, nanotechnology, and systems immunology for improved immunogenicity. *Vaccines*, *13*(6), 588.

13. Fakhraee, M., Crockford, P. W., Bauer, K. W., Pasquier, V., Sugiyama, I., Katsev, S., ... & Planavsky, N. (2025). The history of Earth's sulfur cycle. *Nature Reviews Earth & Environment*, *6*(2), 106-125.

14. Flint, J., Racaniello, V. R., Rall, G. F., Hatziioannou, T., & Skalka, A. M. (2020). *Principles of virology*. John Wiley & Sons.

15. Franzosa, E. A., Hsu, T., Sirota-Madi, A., Shafquat, A., Abu-Ali, G., Morgan, X. C., & Huttenhower, C. (2015). Sequencing and beyond: integrating molecular'omics' for microbial community profiling. *Nature Reviews Microbiology*, *13*(6), 360-372.

16. Gajic, I., Kabic, J., Kekic, D., Jovicevic, M., Milenkovic, M., Mitic Culafic, D., ... & Opavski, N. (2022). Antimicrobial susceptibility testing: a comprehensive review of currently used methods. *Antibiotics*, *11*(4), 427.

17. Gifford, S. (2026). Mapping an ocean metabolite's path: Marine microbiology. *Nature Microbiology*, 1-2.

18. Gilbert, J. A., Blaser, M. J., Caporaso, J. G., Jansson, J. K., Lynch, S. V., & Knight, R. (2018). Current understanding of the human microbiome. *Nature medicine*, *24*(4), 392-400.

19. Goodman, A. L., McNulty, N. P., Zhao, Y., Leip, D., Mitra, R. D., Lozupone, C. A., ... & Gordon, J. I. (2009). Identifying genetic determinants needed to establish a human gut symbiont in its habitat. *Cell host & microbe*, *6*(3), 279-289.

20. Goraya, M. U., Fatima, G., Hayat, K., Raza, A., & Yong, D. (2026). The evolution of diagnostic microbiology: integrating culture-based methods and genomic advances. *PeerJ*, *14*, e21411.

21. Hoang, H. G., Thuy, B. T. P., Lin, C., Vo, D. V. N., Tran, H. T., Bahari, M. B., ... & Vu, C. T. (2022). The nitrogen cycle and mitigation strategies for nitrogen loss during organic waste composting: A review. *Chemosphere*, *300*, 134514.

22. Huang, S., & Sun, D. (2026). Structure-based prokaryotic transcription shapes adaptation and host–invader interplay. *Trends in Microbiology*.

23. Joshi, M. (2026). *Molecular Life Sciences*. Educohack Press.

24. Ju, X., & Liu, S. (2026). High-resolution profiling of bacterial transcriptomes by SEnd-seq. *Biochemical Journal*, *483*(9), 1713-1727.

25. Karp, G. (2009). *Cell and molecular biology: concepts and experiments*. John Wiley & Sons.

26. Kaushal, J. B., Raut, P., & Kumar, S. (2023). Organic electronics in biosensing: a promising frontier for medical and environmental applications. *Biosensors*, *13*(11), 976.

27. Kerek, Á., Román, I., Szabó, Á., Kovács, D., Kardos, G., Kovács, L., & Jerzsele, Á. (2026). Antibiotic resistance genes in Escherichia coli–literature review. *Critical reviews in microbiology*, *52*(1), 1-35.

28. Kim, S., Zhang, Y., Ju, X., Hassan, A., Wang, Y. H., Liu, S., & Kim, S. (2026). Spatial and genetic constraints govern transcription–translation coupling and mRNA degradation in bacteria. *Nature Microbiology*, 1-14.

29. Koolaee, M. (2026). *Microbiology & Immunology Case Reports-E-BOOK: Microbiology & Immunology Case Reports-E-BOOK*. Elsevier Health Sciences.

30. Koonin, E. V. (2016). Horizontal gene transfer: essentiality and evolvability in prokaryotes, and roles in evolutionary transitions. F1000Research, 5, F1000-Faculty.

31. Lee, J., Yu, H. E., & Lee, S. Y. (2025). Metabolic engineering of microorganisms for carbon dioxide utilization. *Current opinion in biotechnology*, *91*, 103244.

32. Lindon, J. C., Nicholson, J. K., & Holmes, E. (2011). Metabolite Profiling and Cardiovascular. *The Handbook of Metabonomics and Metabolomics*, 327.

33. Liu, Y., Dai, Y., & Wang, L. (2026). Spatial omics at the forefront: emerging technologies, analytical innovations, and clinical applications. *Cancer cell*.

34. Mashrafi, M. (2026). Universal life energy–growth framework and equation. *International Journal of Research*, *13*(1), 79-91.

35. Michaels, A., & Olaleye, E. O. (2026). Mechanisms and Triggers of Pathogenic Transformation in Human Commensal Microbiota. *SVOA Microbiology*.

36. Miller Jr, W. B., Baluška, F., Slijepčević, P., & Reber, A. S. (2026). Cellular Problem-Solving: Exaptations, Epigenetic Adaptations, and Phenotype. In *Cognition-Based Biology: Cellular Sentience, Communication, and Symbiosis* (pp. 195-214). Cham: Springer Nature Switzerland.

37. Motlhanka, K., Setlhoka, M. D., Zhou, N., Mochankana, E., Machete, J., Mareko, M. H., & Malambane, G. (2026). Genetic diversity and sequence polymorphism of bacterial 16S rRNA isolates from beef tripe from Gaborone, Botswana.

38. Nasution, E. S. (2024). Environmental microbiology: microbes and their roles in ecosystems. *International Journal of Natural Science Studies and Development (IJOSS)*, *1*(2), 95-102.

39. Nawaz, M. A., Nawaz, M. Z., Haider, S. Z., Alghamdi, H. A., & Yan, W. (2026). Small Regulatory RNAs in Prokaryotes: Key Features, Identification, Environmental Roles, and Applications. *Microorganisms*, *14*(7), 1561.

40. Nichkoohi, M. S., & Moradi, Z. (2026). Plant Interactions with Viruses and Viroids: A Review of the Regulatory Roles of Secondary Metabolites and Phytohormones. *Iranian Plant Protection Research*, *40*(1), 469.

41. Oday, A. (2025). Pattern Recognition of Core-Promoter DNA Sequences Based on Recurrent Neural Network.

42. Ogunjobi, T. T., Ohaeri, P. N., Akintola, O. T., Atanda, D. O., Orji, F. P., Adebayo, J. O., ... & Adedeji, O. O. (2026). Bioinformatics applications in chronic diseases: a comprehensive review of genomic, transcriptomics, proteomic, metabolomics, and machine learning approaches. *Medinformatics*, *3*(2), 110-127.

43. Oliveira, M., Antunes, W., Mota, S., Madureira-Carvalho, Á., Dinis-Oliveira, R. J., & Dias da Silva, D. (2024). An overview of the recent advances in antimicrobial resistance. *Microorganisms*, *12*(9), 1920.

44. Orebaugh, J., Carrell, A. A., York, L. M., Cregger, M. A., & Del Valle Kessra, I. (2026). Synthetic soils for ecological and synthetic biology applications. *FEMS Microbiology Reviews*, *50*, fuag012.

45. Pandey, K., Suryavanshi, M., & Patel, R. (2026). Microbial biotechnology in the era of big data and AI. In *Bioinformatics, AI, and Machine Learning in Microbial Drug Development* (pp. 91-112). Academic Press.

46. Pant, S., Choudhari, J. K., Pathak, R. K., Yadav, A. K., & Singh, D. B. (2026). Biological big data analysis in the post-genomic era: Applications and limitations. *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*, *15*(1), 62.

47. Perveen, S., Yasmeen, N., Hafeez, K., & Akhtar, F. (2025). Recombination and Evolution. *Molecular Genetics, Structures, Mechanisms, and Functions: Volume 2: Applications and Exploring the Nucleus*, 121.

48. Pompilio, A., & Di Bonaventura, G. (2026). An unexpected inverse relationship between biofilm formation and antibiotic resistance in Stenotrophomonas maltophilia. *Antibiotics*, *15*(1), 85.

49. Raheema, R., Hadi, S., & Dirwal, A. (2026). Microbial Bioremediation for Sustainable Development. *The Microbe*, 100699.

50. Ryan, K. J., Ahmad, N., Alspaugh, J. A., Drew, W. L., Lagunoff, M., Pottinger, P., ... & Weissman, S. (2022). *Ryan & Sherris Medical Microbiology*. McGraw Hill Professional.

51. Sahan, K., & Sahan, Z. (2025). Occurrence of antimicrobial resistance and extended spectrum beta lactamase in gram negative bacteria in Baghdad city for three years (2019-2021), A review study. 7th Scientific International Conference of Tunisia.

52. Sahan, K., & Sahan, Z. (2025). DNA Damage prevention by the use of Computational Designed Microlpastics adsorbing Chemicals. *Baghdad Journal of Biochemistry and Applied Biological Sciences*, *6*(3), 127-138.

53. Shukla, A., & Choudhary, A. (2026). Artificial Intelligence and Machine Learning for Analysis of Microbiomes. In *Microbiome Innovations* (pp. 39-47). CRC Press.

54. Silva, L. I. D., Pereira, M. C., Carvalho, A. M. X. D., Buttrós, V. H., Pasqual, M., & Dória, J. (2023). Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. *Agriculture*, *13*(2), 462.

55. Singh, S., Al-Zharani, M., Barasarathi, J., Tan, C. S., Jaiswal, S. K., Srivastava, U., ... & Sayyed, R. (2026). Integrative multi-omics and bioinformatics in the post-genomic era: From high-throughput sequencing to microbial systems biology. *Current Genomics*.

56. Singh, T., Taufiq, A., Jawed, A., Akhter, N., & Dar, S. A. (2026). Near-real-time whole-genome sequencing in hospital infection control: a narrative review. *Infection*, 1-14.

57. Suhail, S., Khatoon, K., Tripathi, A., Awasthi, P., Vishvakarma, R., & Sharma, S. (2026). Biology as an Interdisciplinary Subject: Bridging Disciplines

for a Deeper Understanding of Life. In *Bridging Disciplines: Interdisciplinary Approaches for Transforming Education* (pp. 141-156). Bentham Science Publishers.

58. Timofeeva, A., Galyamova, M., & Sedykh, S. (2022). Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. *Plants*, *11*(16), 2119.

59. Todorov, S. D., Popov, I., Weeks, R., & Chikindas, M. L. (2022). Use of bacteriocins and bacteriocinogenic beneficial organisms in food products: benefits, challenges, concerns. *Foods*, *11*(19), 3145.

60. Turnbaugh, P. J., & Gordon, J. I. (2009). The core gut microbiome, energy balance and obesity. *The Journal of physiology*, *587*(17), 4153-4158.

61. Ushakiran, P., Haria, J., Kumar, A., & Singh, S. (2025). Advances in metagenomic sequencing technologies enabling the study of microbial communities. *Journal of Cellular Biotechnology*, 23523689261442516.

62. Usman, L., Masokano, D. S., & Ahuruonye, P. I. (2026). Potentials of metallodrugs as next-generation antimicrobial agents. *Discover Chemistry*, *3*(1), 429.

63. Vilhekar, R. S., & Rawekar, A. (2024). Artificial intelligence in genetics. *Cureus*, *16*(1).

64. Waddington, C. H. (1940). Organisers and genes.

65. Waris, M., Jabeen, Z., Ali, S. Z., Jamali, A. Z., Ullah, A., Ahmed, H. A., ... & Habib, Z. (2026). Next-Generation Sequencing Techniques. In *Molecular Biology Methods* (pp. 127-148). Singapore: Springer Nature Singapore.

66. Webster, N. S. (2026). Microorganisms as architects of a sustainable future. *Nature Reviews Genetics*, *27*(1), 5-6.

67. Yap, K., Ramakumar, S., Hamid, F., & Makeyev, E. V. (2026). Regulation of eukaryotic gene expression through functional coupling between alternative splicing and nonsense-mediated decay. *Journal of Molecular Biology*, 169764.

68. Zhang, Z., Huang, Z., Wang, Y., Li, Z., Wen, Z., & Gu, Y. (2026). Transposon-based genome editing of industrial microorganisms: advances, challenges, and prospects. *Synthetic and Systems Biotechnology*, *14*, 388-398.

الفصل الثالث

الأحياء المجهرية والوراثة

Microbiology and Genetics

م. قاسم حمادي عبد
جامعة كربلاء - كلية العلوم الطبية التطبيقية - العراق
qassim.h@uokerbala.edu.iq

الملخص

يتناول الفصل الأحياء المجهرية والوراثة في بناء تعليمي يجمع التعريف بالمفاهيم والشرح المصور والجداول المقارنة والأسئلة والتطبيقات. ويعرض الكائنات الدقيقة وتصنيفها وخصائصها وأهميتها في البيئة والصناعة والصحة، مع توضيح العلاقات بين نموها ونشاطها وشروط الوسط. ويناقش دور المجتمعات الميكروبية في التوازن الحيوي، بما يسمح بفهم الأحياء المجهرية خارج التصور الذي يحصرها في المرض.

ويعالج الفصل الوراثة من الجينات والكروموسومات والانقسام وقوانين مندل إلى أنماط الوراثة الأكثر تعقيدًا والارتباط والعبور والتخلق. ثم يعرض تضاعف الحمض النووي والنسخ والترجمة والشفرة الوراثية وتنظيم التعبير الجيني. وترد تقنيات PCR والتسلسل الجيني وتحرير الجينات ضمن شرح يربط المبدأ العلمي بمجالات الاستخدام، مع المحافظة على الفروق بين التقنيات وغاياتها وحدودها.

ويتناول المسار التطبيقي التشخيص الميكروبيولوجي والوراثي والزراعة والأسمدة والمكافحة الحيوية والصناعات الحيوية ومعالجة الملوثات والمخلفات. كما يناقش الميكروبيوم والطب الدقيق وأخلاقيات المعلومات الوراثية، ومنها الخصوصية والموافقة المستنيرة والاستخدام المسؤول. ويختتم الفصل باستنتاجات وتوصيات وأسئلة ومادة مساندة تساعد على مراجعة المفاهيم وتطبيقها. وتتمثل المساهمة في تنظيم معرفة أساسية وتطبيقية مترابطة، تتيح الانتقال من وصف البنى إلى فهم العمليات واستخداماتها. ولا تُعرض التقنيات المتنوعة باعتبارها إجراءً واحدًا أو اعتمادًا تطبيقيًا غير مشروط؛ بل تبقى قيمتها مرتبطة بسلامة الإجراءات وجودة التفسير والالتزام بالضوابط العلمية والأخلاقية التي يتناولها الفصل.

الكلمات المفتاحية: الأحياء المجهرية؛ الوراثة الجزيئية؛ التعبير الجيني؛ التقنيات الحيوية؛ السلامة الحيوية

Abstract

This chapter offers an educational treatment of microbiology and genetics integrating concepts, illustrations, comparative tables, questions, and applications. It introduces microorganisms, their classification and characteristics, and their significance in the environment, industry, and health. Growth and activity are related to surrounding conditions, while microbial communities are considered through their contribution to biological balance rather than only through disease.

The genetics discussion moves from genes, chromosomes, cell division, and Mendelian principles to more complex inheritance patterns, linkage, crossing over, and epigenetics. DNA replication, transcription, translation, the genetic code, and regulation of expression are then explained. PCR, sequencing, and gene editing are introduced by connecting their scientific principles with application areas while maintaining distinctions among purposes and limitations.

Applications include microbiological and genetic diagnosis, agriculture, biofertilizers, biological control, bioprocess industries, and treatment of pollutants and wastes. The chapter also discusses the microbiome, precision medicine, and ethical issues concerning genetic information, including privacy, informed consent, and responsible use. Conclusions, recommendations, review questions, and supporting material assist consolidation and application of knowledge. The contribution is an organized account linking biological foundations with practical possibilities and moving from structures to processes and uses. Diverse technologies are not treated as a single procedure or as unconditionally validated applications. Their value remains connected to appropriate

procedures, sound interpretation, and the scientific and ethical conditions discussed in the text.

Keywords: Microbiology; Molecular genetics; Gene expression; Biotechnology; Biosafety

المبحث الأول: الاحياء المجهرية ودورها في البيئة والحياة

ويتضمن:

مفهوم الأحياء المجهرية.

نبذة تاريخية عن علم الأحياء المجهرية.

تصنيف الأحياء المجهرية.

خصائص الكائنات المجهرية.

نمو وتكاثر الكائنات المجهرية.

العوامل المؤثرة في نموها.

دور الأحياء المجهرية في البيئة.

دورها في دورات العناصر (الكربون، النيتروجين، الكبريت، الفوسفور).

الأحياء المجهرية في التربة.

الأحياء المجهرية في المياه.

الأحياء المجهرية في الهواء.

الميكروبيوم البشري.

العلاقة بين الأحياء المجهرية وصحة الإنسان.

الأحياء المجهرية في الصناعات الغذائية.

إنتاج المضادات الحيوية والإنزيمات.

المعالجة الحيوية للتلوث ((Bioremediation.

دور الأحياء المجهرية في التنمية المستدامة.

ملخص المبحث.

المبحث الثاني: الوراثة وانتقال الصفات (15–16 صفحة)

ويتضمن:

مفهوم الوراثة.

تاريخ علم الوراثة.

الحمض النووي DNA وRNA.

الجينات والكروموسومات.

قوانين مندل.

الوراثة المندلية وغير المندلية.

الطفرات الوراثية.

الأمراض الوراثية.

الوراثة الجزيئية.

التعبير الجيني.

علم التخلق ((Epigenetics.

التقنيات الحديثة في دراسة الجينات.

ملخص المبحث.

المبحث الثالث: التطبيقات العلمية للأحياء المجهرية والوراثة

ويتضمن:

التطبيقات الطبية.

التطبيقات الزراعية.

التطبيقات البيئية.

التطبيقات الصناعية.

التكنولوجيا الحيوية.

الهندسة الوراثية.

تقنية CRISPR-Cas9.

العلاج الجيني.

البصمة الوراثية.

الميتاجينوم.

مستقبل الأحياء المجهرية والوراثة.

ملخص المبحث.

خاتمة الفصل (صفحتان)

وتتضمن:

أهم الاستنتاجات.

التوصيات.

آفاق البحث المستقبلي.

أهداف التعلم ((Learning Objectives

بعد دراسة هذا الفصل، ينبغي أن يكون الطالب قادرًا على أن:

-1تعريف المفاهيم الأساسية المتعلقة بموضوع الفصل.

-2تفسير المبادئ العلمية والآليات الحيوية المرتبطة بالموضوع.

-3التمييز بين الأنواع أو العمليات أو التطبيقات المختلفة.

-4ربط المعرفة النظرية بالتطبيقات الطبية والزراعية والصناعية والبيئية.

-5تحليل المشكلات العلمية واقتراح الحلول المناسبة.

-6توظيف المصطلحات العلمية بصورة صحيحة.

-7تطبيق المعرفة المكتسبة في الممارسة العملية والبحث العلمي.

المصطلحات الرئيسة ((Key Terms

English	العربية
Microbiology	الأحياء المجهرية
Bacteria	البكتيريا
Fungi	الفطريات
Viruses	الفيروسات
Parasites	الطفيليات
Sterilization	التعقيم
Disinfection	التطهير
Autoclaving	التعقيم بالبخار
Microbial Growth	النمو الميكروبي
Culture Medium	الوسط الغذائي

المبحث الأول

الأحياء المجهرية ودورها في البيئة والحياة

أولًا: مفهوم الأحياء المجهرية

الأحياء المجهرية (Microorganisms) هي كائنات حية دقيقة لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة، وإنما تحتاج إلى المجهر لدراستها. وتضم هذه المجموعة البكتيريا، والفطريات المجهرية، والطحالب المجهرية، والأوليات، وبعض الطفيليات الدقيقة، بينما تُدرج الفيروسات ضمن علم الأحياء المجهرية على الرغم من أنها لا تُعد كائنات حية كاملة وفق كثير من التصنيفات، لاعتمادها الكامل على الخلايا الحية في التكاثر (Willey et al., 2011).

تتميز الأحياء المجهرية بتنوعها الكبير من حيث الشكل والحجم والتركيب الخلوي والوظائف الحيوية، إذ توجد في جميع البيئات الطبيعية تقريبًا، بما في ذلك التربة، والمياه العذبة والمالحة، والغلاف الجوي، والينابيع الحارة، والمناطق الجليدية، كما تعيش داخل أجسام الإنسان والحيوان والنبات، وتكوّن مجتمعات ميكروبية معقدة تؤدي وظائف أساسية في المحافظة على صحة الكائنات الحية (Madigan et al., 1997).

تتراوح أحجام معظم البكتيريا بين 0.2 و10 ميكرومتر، بينما تكون الفيروسات أصغر من ذلك بكثير، إذ يتراوح قطرها بين 20 و300 نانومتر، أما الفطريات المجهرية فتتميز بخلايا أكبر نسبيًا وتتكاثر بالأبواغ أو بالتبرعم كما في الخمائر(Tortora et al., 2024).

ثانيًا: نبذة تاريخية عن علم الأحياء المجهرية

بدأ الاهتمام بالكائنات المجهرية في القرن السابع عشر عندما تمكن العالم الهولندي أنطوني فان ليفينهوك من تصنيع مجاهر بسيطة مكّنته من مشاهدة كائنات دقيقة في قطرات الماء ولويحات الأسنان، وكان أول من وصفها وصفًا علميًا. وقد شكّل هذا الاكتشاف نقطة البداية لعلم الأحياء المجهرية .وفي القرن التاسع عشر، أثبت العالم الفرنسي لويس باستور أن الكائنات الدقيقة مسؤولة عن عمليات التخمر، ودحض نظرية التولد الذاتي من خلال تجاربه الشهيرة باستخدام القوارير ذات العنق الإوزي، كما وضع أسس التعقيم والبسترة، وأسهم في تطوير اللقاحات ضد عدد من الأمراض(Ray & Ryan, 2014).

أما العالم الألماني روبرت كوخ فقد وضع القواعد الأساسية لإثبات العلاقة بين الكائنات المجهرية والأمراض المعدية، والمعروفة بمسلّمات كوخ، والتي ما زالت تُعد أساسًا في علم الأحياء الدقيقة الطبية. وخلال القرن العشرين، تطور هذا العلم بصورة كبيرة مع ظهور المجهر الإلكتروني وتقنيات زراعة الخلايا والبيولوجيا الجزيئية والتسلسل الجيني، مما مكّن العلماء من دراسة تركيب الكائنات المجهرية ووظائفها على المستوى الجزيئي (Biology, 2004).

أهداف الفصل

بعد دراسة هذا الفصل يتوقع من القارئ أن يكون قادرًا على:

-1التعرف على مفهوم الأحياء المجهرية وأهم خصائصها.

-2تمييز الأنواع الرئيسة للكائنات المجهرية.

-3تفسير دور الكائنات المجهرية في التوازن البيئي.

-4فهم مبادئ علم الوراثة وآليات انتقال الصفات.

-5التعرف على التركيب الجزيئي للمادة الوراثية.

-6توضيح تطبيقات الأحياء المجهرية والوراثة في المجالات الطبية والزراعية والصناعية.

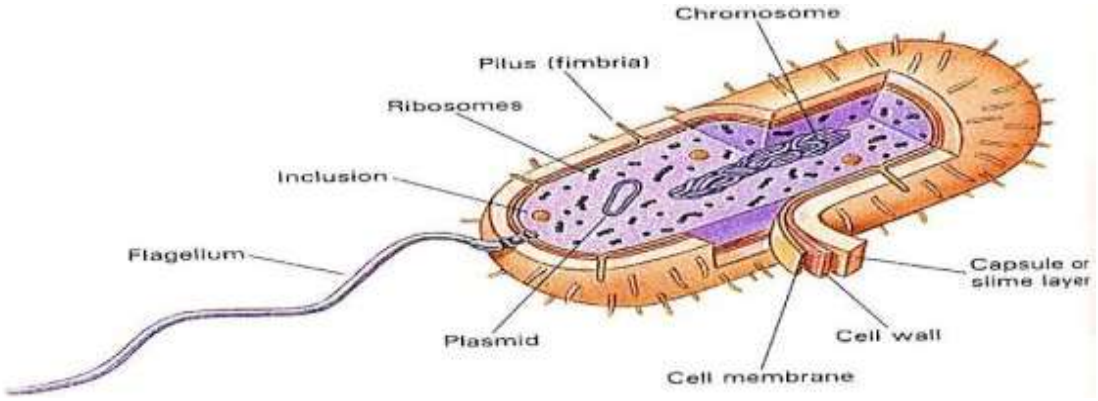
-7استيعاب دور التكنولوجيا الحيوية والهندسة الوراثية في خدمة الإنسان.

ثالثًا: تصنيف الأحياء المجهرية

تتميز الأحياء المجهرية بتنوعها الكبير من حيث التركيب الخلوي، وطرائق التغذية، ووسائل التكاثر، والبيئات التي تعيش فيها، لذلك صنفها العلماء إلى مجموعات رئيسة اعتمادًا على خصائصها المورفولوجية والفسيولوجية والجزيئية. وقد أصبح التصنيف الحديث يعتمد بصورة كبيرة على تحليل تسلسل الحمض النووي الريبوزي الريبوسومي 16S rRNA)) في بدائيات النوى، إضافة إلى التقنيات الجينومية الحديثة التي ساعدت في إعادة تصنيف العديد من الكائنات الدقيقة (Brown, 2023).

1. البكتيريا ((Bacteria

البكتيريا كائنات وحيدة الخلية، بدائية النواة (Prokaryotic)، تفتقر إلى غشاء نووي يحيط بالمادة الوراثية، كما لا تحتوي على عضيات غشائية مثل الميتوكوندريا وجهاز كولجي. تمتلك جدارًا خلويًا يتكون أساسًا من الببتيدوغلايكان، ويمنحها الشكل والصلابة. تتكاثر البكتيريا غالبًا بالانشطار الثنائي، وقد تتبادل المادة الوراثية بوسائل مثل الاقتران (Conjugation)، والتحول (Transformation)، والنقل بالعاثيات (Transduction))، مما يسهم في اكتساب صفات جديدة مثل مقاومة المضادات الحيوية(Tortora et al., 2024).



الشكل (1): التركيب العام للخلية البكتيرية

أشكال البكتيريا

كروية (Cocci): مثل المكورات العنقودية.

عصوية (Bacilli): مثل العصيات القولونية.

حلزونية (Spirilla): مثل اللولبيات.

منحنية (Vibrios): مثل ضمة الكوليرا.

وتؤدي البكتيريا أدوارًا متعددة؛ فمنها النافع الذي يشارك في تثبيت النيتروجين وتحليل المواد العضوية وإنتاج الفيتامينات وتُستخدم أنواع عديدة من البكتيريا في إنتاج المضادات الحيوية والإنزيمات واللقاحات والهرمونات،، ومنها الممرض الذي يسبب أمراضًا مثل السل والكوليرا والتيفوئيد(Glick & Patten, 2022).

2. الفطريات المجهرية ((Microscopic Fungi

الفطريات كائنات حقيقية النواة (Eukaryotic)، تمتلك جدارًا خلويًا غنيًا بمادة الكيتين، وتستمد غذاءها بالامتصاص من المواد العضوية. وتنقسم إلى:

الخمائر ((Yeasts: كائنات وحيدة الخلية تتكاثر بالتبرعم، وتستخدم في صناعة الخبز والمشروبات المخمرة.

الأعفان (Molds): تتكون من خيوط فطرية (Hyphae) تتجمع لتكوّن الغزل الفطري (Mycelium)، وتلعب دورًا مهمًا في تحليل المواد العضوية وإنتاج المضادات الحيوية مثل البنسلين(Willey et al., 2011).

3. الطحالب المجهرية ((Microalgae

الطحالب المجهرية كائنات حقيقية النواة تحتوي على صبغة الكلوروفيل، وتقوم بعملية البناء الضوئي، لذا تُعد من أهم المنتجات الأولية في البيئات المائية. وتسهم في إنتاج نسبة كبيرة من الأكسجين الجوي، كما تدخل في الصناعات الغذائية والدوائية وإنتاج الوقود الحيوي (Madigan et al., 1997).

4. الأوليات ((Protozoa

الأوليات كائنات حقيقية النواة وحيدة الخلية، تتحرك بواسطة الأهداب أو الأسواط أو الأقدام الكاذبة، وتعيش في المياه والتربة والأنسجة الحيوانية. ومن أشهرها الأميبا والبراميسيوم، بينما تسبب أنواع أخرى أمراضًا مثل الملاريا وداء الليشمانيات (Ray & Ryan, 2014).

5. الفيروسات ((Viruses

الفيروسات جسيمات دقيقة تتكون من مادة وراثية (DNA أو RNA) محاطة بغلاف بروتيني يسمى القفيصة (Capsid))، وقد يحيط بها غلاف دهني في بعض الأنواع. ولا تستطيع التكاثر إلا داخل الخلايا الحية، لذا تُعد طفيليات داخل خلوية إجبارية. تسبب الفيروسات العديد من الأمراض في الإنسان والحيوان والنبات، كما تُستخدم في التطبيقات البحثية والعلاج الجيني وصناعة اللقاحات(Koolaee, 2026).



الشكل (2): تصنيف الكائنات الحية الدقيقة (البكتيريا، الفطريات، الفيروسات، الأوليات).

رابعًا: خصائص الأحياء المجهرية

تمتلك الأحياء المجهرية مجموعة من الخصائص التي تميزها عن الكائنات الحية الأخرى، والتي مكنتها من الانتشار في مختلف البيئات الطبيعية والصناعية والطبية، وأسهمت في نجاحها التطوري وتنوعها الحيوي (Organization, 2023).

-1صغر الحجم: يسمح لها بالانتشار في معظم البيئات، بما في ذلك الماء، والتربة، والهواء، وجسم الإنسان، كما يزيد من كفاءة تبادل المواد الغذائية والفضلات عبر الغشاء الخلوي.

-2سرعة النمو والتكاثر: إذ يمكن لبعض البكتيريا، مثل Escherichia coli، أن تنقسم كل 20 دقيقة في الظروف البيئية المناسبة، مما يجعلها نموذجًا مهمًا للدراسات الوراثية والبيولوجية.

-3التنوع الأيضي: تستخدم الكائنات المجهرية مصادر مختلفة للطاقة والكربون، إذ توجد أنواع ذاتية التغذية وأخرى غير ذاتية التغذية، كما تعتمد بعض الأنواع على التنفس الهوائي، بينما تعتمد أنواع أخرى على التنفس اللاهوائي أو التخمر لإنتاج الطاقة.

-4القدرة على التكيف: تمتلك الكائنات المجهرية قدرة كبيرة على العيش في البيئات المعتدلة والقاسية، مثل الينابيع الحارة، والبحيرات شديدة الملوحة، والبيئات الحمضية والقلوية، وذلك بفضل تكيفاتها الفسيولوجية والجزيئية.

-5التنوع الوراثي: يحدث نتيجة الطفرات الوراثية، وإعادة التركيب الجيني، وانتقال الجينات أفقيًا بواسطة الاقتران (Conjugation)، أو التحول (Transformation)، أو النقل بالعاثيات (Transduction))، مما يزيد من قدرة الكائنات الدقيقة على التكيف واكتساب صفات جديدة مثل مقاومة المضادات الحيوية (Brown, 2025)

-5الأهمية البيئية: تسهم الأحياء المجهرية في إعادة تدوير العناصر الغذائية، وتثبيت النيتروجين، وتحليل المواد العضوية، والمحافظة على التوازن البيئي، كما تشارك في العديد من التطبيقات البيئية والصناعية الحديثة.

خامسًا: نمو الأحياء المجهرية

يعرف النمو الميكروبي بأنه زيادة عدد الخلايا نتيجة الانقسام، وليس زيادة حجم الخلية فقط. ويُدرس النمو عادةً في المزارع البكتيرية، حيث يمر بأربع مراحل رئيسية:

1. طور التأقلم ((Lag Phase

تتكيف الخلايا مع الوسط الجديد، وتبدأ بتصنيع الإنزيمات والبروتينات اللازمة للنمو، دون زيادة ملحوظة في عددها.

2. طور النمو اللوغاريتمي ((Log Phase

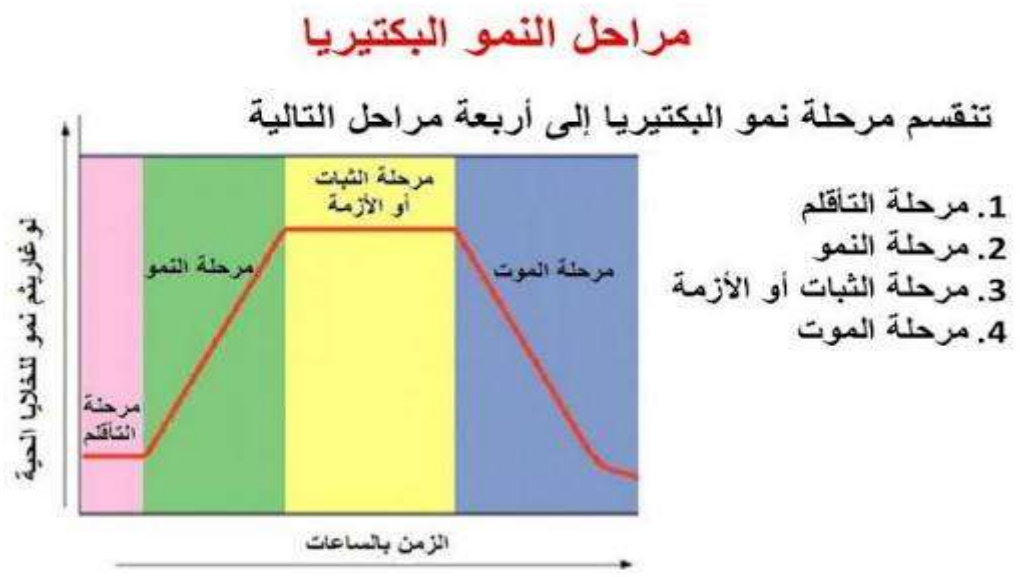
يتميز بانقسام سريع ومنتظم للخلايا، وتكون الخلايا في أعلى نشاط أيضي، وهي المرحلة المثالية لدراسة تأثير المضادات الحيوية.

3. الطور الثابت ((Stationary Phase

يتساوى معدل انقسام الخلايا مع معدل موتها نتيجة نقص المغذيات وتراكم الفضلات.

4. طور الموت ((Death Phase

يبدأ عدد الخلايا الحية بالانخفاض تدريجيًا بسبب استنزاف المواد الغذائية وازدياد تركيز المواد السامة (Cappuccino, 2018).



الشكل (3): منحنى نمو البكتيريا

الجدول (1): **تصنيف الكائنات المجهرية**.

المجموعة	نوع الخلية	المادة الوراثية	طريقة التكاثر	الأهمية
البكتيريا	بدائية النواة	DNA	الانشطار الثنائي	البيئة، الصناعة، الطب
الفطريات	حقيقية النواة	DNA	الأبواغ أو التبرعم	الغذاء، الأدوية
الطحالب المجهرية	حقيقية النواة	DNA	الانقسام أو الأبواغ	البناء الضوئي
الأوليات	حقيقية النواة	DNA	الانقسام	البيئة وبعضها ممرض
الفيروسات	غير خلوية	DNA أو RNA	داخل الخلية الحية	الأمراض والتقنيات الحيوية

سادسًا: العوامل المؤثرة في نمو الأحياء المجهرية

يعتمد نمو الكائنات المجهرية على مجموعة من العوامل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تؤثر في نشاطها الأيضي وقدرتها على الانقسام والتكاثر. ويعد فهم هذه العوامل أساسًا في مجالات علم الأحياء المجهرية الطبية، والصناعية، والبيئية، إذ يساعد في تحسين ظروف زراعة الكائنات الدقيقة أو الحد من نمو الكائنات الممرضة (Cappuccino, 2018; Willey et al., 2011).

1. درجة الحرارة ((Temperature

تعد درجة الحرارة من أهم العوامل المحددة لنمو الكائنات المجهرية، إذ تؤثر بصورة مباشرة في نشاط الإنزيمات وسرعة التفاعلات الحيوية داخل الخلية. ولكل نوع من الكائنات المجهرية ثلاث درجات حرارة رئيسة:

الدرجة الدنيا (Minimum Temperature): وهي أقل درجة حرارة تسمح بحدوث النمو.

الدرجة المثلى (Optimum Temperature): وهي الدرجة التي يتحقق عندها أعلى معدل للنمو والانقسام.

الدرجة العليا (Maximum Temperature): وهي أعلى درجة حرارة يمكن أن تتحملها الخلية قبل توقف النمو أو موتها.

وبناءً على ذلك تصنف الكائنات المجهرية إلى:

الكائنات المحبة للبرودة ((Psychrophiles أقل من 20°م

الكائنات المتوسطة الحرارة (Mesophiles) 20–45°م

الكائنات المحبة للحرارة (Thermophiles) 45–80°م

الكائنات فائقة المحبة للحرارة ((Hyperthermophiles أكثر من 80°م

وتعد البكتيريا الممرضة للإنسان غالبًا من الكائنات المتوسطة الحرارة، حيث يكون أفضل نمو لها عند 37°م، وهي درجة حرارة جسم الإنسان.

2. الرقم الهيدروجيني ((pH

يؤثر تركيز أيونات الهيدروجين في نشاط الإنزيمات وسلامة الأغشية الخلوية، ولذلك تختلف الكائنات المجهرية في مدى تحملها للحموضة أو القلوية.

وتصنف إلى:

محبة للحموضة ((Acidophiles.

متعادلة ((Neutrophiles.

محبة للقلوية ((Alkaliphiles.

وتنمو معظم البكتيريا الطبية عند رقم هيدروجيني يتراوح بين 6.5 و7.5، بينما تستطيع بعض الفطريات النمو في أوساط أكثر حموضة.

3. الماء والنشاط المائي ((Water Activity

يمثل الماء الوسط الذي تتم فيه جميع العمليات الحيوية داخل الخلية، ولذلك فإن انخفاض النشاط المائي يؤدي إلى تثبيط النمو الميكروبي. وتستطيع بعض الفطريات والخمائر النمو في البيئات مرتفعة التركيز بالسكر أو الملح، بينما تتأثر معظم البكتيريا سريعًا بانخفاض الماء المتاح.

4. الأوكسجين ((Oxygen

تختلف احتياجات الكائنات المجهرية للأكسجين تبعًا لنوعها، ويمكن تقسيمها إلى:

هوائية إجبارية ((Obligate aerobes.

لاهوائية إجبارية ((Obligate anaerobes.

لاهوائية اختيارية ((Facultative anaerobes.

محبة للتركيزات المنخفضة من الأكسجين ((Microaerophiles.

ويعد هذا التصنيف ذا أهمية كبيرة في المختبرات التشخيصية، إذ تختلف طرائق زراعة كل مجموعة.

5. العناصر الغذائية

تحتاج الكائنات المجهرية إلى مصادر للكربون والنيتروجين والكبريت والفوسفور، إضافة إلى العناصر النزرة مثل الحديد والزنك والمغنيسيوم، والتي تدخل في تركيب الإنزيمات والأحماض النووية والبروتينات.

الجدول (4): العوامل المؤثرة في نمو الكائنات المجهرية

العامل	التأثير في نمو الكائنات المجهرية	الأمثلة
درجة الحرارة	تؤثر في نشاط الإنزيمات وسرعة التمثيل الغذائي، ولكل كائن درجة حرارة دنيا ومثلى وعليا للنمو	البكتيريا المحبة للبرودة (0–20°C)، والمتوسطة (20–45°C)، والمحبة للحرارة (45–80°C) أو أكثر).
الرقم الهيدروجيني (pH)	يؤثر الرقم الهيدروجيني في نفاذية الغشاء الخلوي ونشاط الإنزيمات	معظم البكتيريا تنمو عند pH 6.5–7.5، بينما تفضل الفطريات الوسط الحمضي (pH 4–6).
الماء (الرطوبة)	الماء ضروري للتفاعلات الحيوية ونقل المغذيات داخل الخلية	يزداد النمو في البيئات الرطبة ويقل في البيئات الجافة.
الأكسجين	يحدد نوع التنفس وإنتاج الطاقة داخل الخلية	البكتيريا الهوائية الإجبارية، واللاهوائية الإجبارية، واللاهوائية الاختيارية، والمحبة للهواء القليل (Microaerophiles).
المواد الغذائية	توفر المغذيات مصادر الكربون والطاقة والنيتروجين والعناصر الضرورية للنمو والانقسام.	الجلوكوز، والأحماض الأمينية، والأملاح المعدنية، والفيتامينات.
الضغط الأسموزي	يؤثر الضغط الأسموزي في حركة الماء عبر الغشاء الخلوي وقد يسبب انكماش أو انتفاخ الخلايا	البكتيريا المحبة للملوحة مثل *Halobacterium*.
الضوء	يعد الضوء مصدرًا للطاقة في الكائنات الضوئية، بينما قد تثبط الأشعة فوق البنفسجية نمو الكائنات الدقيقة أو تقضي عليها	الطحالب والبكتيريا الضوئية، وتأثير الأشعة فوق البنفسجية في التعقيم.
ثاني أكسيد الكربون (CO_2)	تحتاج بعض الكائنات إلى تراكيز مرتفعة من ثاني أكسيد الكربون لتحفيز نموها	البكتيريا المحبة لثاني أكسيد الكربون (Capnophiles) مثل *Neisseria* spp.

المواد المثبطة للنمو	تؤدي المواد المثبطة إلى إبطاء النمو أو القضاء على الكائنات المجهرية	المضادات الحيوية، والمطهرات، والمعادن الثقيلة.
العوامل البيولوجية	تؤثر العلاقات البيولوجية، مثل المنافسة والتكافل والافتراس، في كثافة وتنوع المجتمعات الميكروبية	المنافسة بين الأنواع المختلفة أو إنتاج البكتريوسينات

سابعًا: دور الأحياء المجهرية في التربة

تعد التربة من أغنى البيئات بالأحياء المجهرية، إذ يحتوي الغرام الواحد منها على ملايين إلى مليارات الخلايا الميكروبية. وتؤدي هذه الكائنات دورًا جوهريًا في الحفاظ على خصوبة التربة واستدامة النظم الزراعية (Reece et al., 2014).

ومن أهم وظائفها:

1. تحلل المواد العضوية

تقوم البكتيريا والفطريات بتحليل بقايا النباتات والحيوانات وتحويلها إلى مركبات بسيطة، مما يؤدي إلى تكوين الدبال (Humus) وزيادة خصوبة التربة.

2. تثبيت النيتروجين

يعد النيتروجين عنصرًا أساسيًا لنمو النبات، إلا أن معظم النباتات لا تستطيع استخدامه مباشرة من الهواء. لذلك تقوم بكتيريا مثل Rhizobium وAzotobacter بتحويل النيتروجين الجوي إلى مركبات قابلة للامتصاص بواسطة النبات.

3. إذابة الفوسفات

تعمل بعض البكتيريا والفطريات على تحويل مركبات الفوسفات غير الذائبة إلى أشكال قابلة للامتصاص، مما يقلل الحاجة إلى الأسمدة الكيميائية.

4. حماية النباتات

تنتج بعض الكائنات المجهرية موادًا مضادة للكائنات الممرضة، كما تنافسها على الغذاء والمساحة، مما يقلل من الإصابة بالأمراض النباتية.

ثامنًا: دور الأحياء المجهرية في المياه

تؤدي الكائنات المجهرية وظائف متعددة في البيئات المائية، من أهمها:

-1تحليل المواد العضوية.

-2إعادة تدوير العناصر الغذائية.

-3إنتاج الأكسجين بواسطة الطحالب المجهرية.

-4المحافظة على التوازن البيئي.

-5المساهمة في معالجة مياه الصرف الصحي.

كما تستخدم بعض أنواع البكتيريا في إزالة الملوثات النفطية والمعادن الثقيلة من المياه من خلال عمليات المعالجة الحيوية.

تاسعًا: دور الأحياء المجهرية في الهواء

على الرغم من أن الهواء ليس بيئة مناسبة لتكاثر معظم الكائنات المجهرية، فإنه يمثل وسيلة مهمة لانتقالها. وتحمل تيارات الهواء البكتيريا والفطريات والفيروسات لمسافات طويلة، وقد يؤدي ذلك إلى انتشار الأمراض أو تلويث الأغذية والمنتجات الطبية.

ولهذا تُطبق إجراءات التعقيم والترشيح الهوائي في المستشفيات والمختبرات وغرف العمليات والصناعات الدوائية للحد من انتقال الملوثات الميكروبية(Glick & Patten, 2022).

عاشرًا: دور الأحياء المجهرية في دورات العناصر

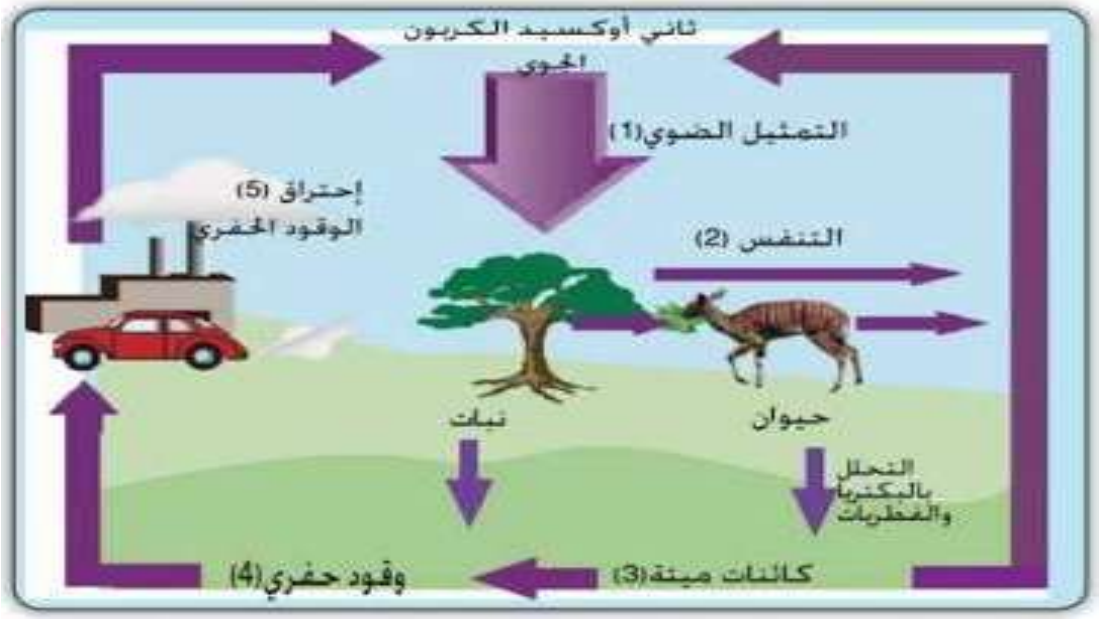
تشارك الكائنات المجهرية بصورة أساسية في الدورات البيوجيوكيميائية التي تضمن استمرار الحياة على الأرض، وتشمل:

1. دورة الكربون

تحلل البكتيريا والفطريات المواد العضوية وتطلق ثاني أكسيد الكربون، بينما تثبت الطحالب المجهرية هذا الغاز بعملية البناء الضوئي. تعدّ دورة الكربون في الكائنات الدقيقة جزءًا من دورة كربون أوسع نطاقًا تحدث على مستوى العالم. وتساعد أنشطة الكائنات الدقيقة في استخلاص الكربون من مصادر غير حية، وتوفيره للكائنات الحية (بما فيها الكائنات الدقيقة نفسها)

(Siboni, 2023). تحدث دورة الكربون بواسطة الكائنات الدقيقة، بما في ذلك مجموعة متنوعة من البكتيريا والفطريات، في البيئات المائية. حتى المناطق الخالية نسبياً من الأوكسجين، مثل الطين العميق في البحيرات والبرك وغيرها من المسطحات المائية، يمكن أن تكون مناطق يحدث فيها التحويل اللاهوائي للكربون (Kaçar, 2024). يشكل ثاني أكسيد الكربون جزءًا كبيرًا من الكربون الذي يدخل دورة الكربون في الكائنات الدقيقة. يوجد هذا الشكل من الكربون في الغلاف الجوي على هيئة غاز، ويمكن إذابته في الماء. ويمكن تحويل ثاني أكسيد الكربون الجوي إلى مواد عضوية في عملية التمثيل الضوئي. وتُعد الطحالب الضوئية من الكائنات الدقيقة المهمة في هذا الصدد. كما أن الكائنات الكيميائية ذاتية التغذية، وخاصة البكتيريا والعتائق، قادرة على تحويل ثاني أكسيد الكربون. في كلا النظامين، يتحول ثاني أكسيد الكربون إلى سلاسل تتكون من سكريات ذات بنية CH_2O. يحدث كلا نوعي التحويل في وجود الأكسجين وغيابه. وتُعدّ مشاركة الطحالب عملية هوائية. أما تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى سكر فهو عملية تتطلب طاقة وتُنتج الأكسجين كمنتج ثانوي. ويحدث هذا التطور للأكسجين أيضًا في النباتات، وهو من الفوائد الحيوية المعروفة للأشجار للحياة على الأرض. يُعاد تدوير الكربون الموجود في جزيئات سكر الكربوهيدرات بواسطة الكائنات الدقيقة في سلسلة من التفاعلات التي تُشكل ما يُعرف بدورة حمض الستريك (دورة كريبس) (Nelson & Cox, 2022). يُوفر تحلل الكربوهيدرات الطاقة للكائنات الدقيقة، وتُعرف هذه العملية أيضًا بالتنفس. في البيئات اللاهوائية، تستطيع الكائنات الدقيقة إعادة تدوير مركبات الكربون لإنتاج الطاقة في عملية تُعرف بالتخمر. يمكن تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى غاز آخر يُسمى الميثان (CH_4). يحدث هذا في البيئات اللاهوائية، مثل الطين المضغوط العميق، وتتم هذه العملية بواسطة بكتيريا تُعرف بالبكتيريا المنتجة للميثان. ينتج عن هذا التحويل، الذي يتطلب الهيدروجين، الماء والطاقة اللازمة لهذه البكتيريا. ولإكمال دورة إعادة التدوير، تقوم مجموعة أخرى من بكتيريا الميثان، تُسمى البكتيريا المؤكسدة للميثان أو الميثانوترافات (وتعني حرفيًا "آكلات الميثان")، بتحويل الميثان إلى ثاني أكسيد الكربون. ينتج عن هذا التحويل، وهو عملية هوائية (تتطلب الأكسجين)، الماء والطاقة أيضًا. تميل الميثانوترافات إلى العيش على الحدود بين المناطق الهوائية واللاهوائية، حيث يتوفر لها الميثان الذي تنتجه البكتيريا المنتجة للميثان اللاهوائية، بالإضافة إلى الأكسجين اللازم لتحويل الميثان (Gilbert et

(al., 2018. تستطيع كائنات دقيقة أخرى المشاركة في دورة الكربون. فعلى سبيل المثال، تستخدم بكتيريا الكبريت الخضراء والبنفسجية الطاقة التي تكتسبها من تحلل مركب كبريتيد الهيدروجين لتحليل مركبات الكربون. كما تستخدم بكتيريا أخرى، مثل بكتيريا ثيوباسيلوس فيروأوكسيدانز، الطاقة المكتسبة من إزالة إلكترون من المركبات المحتوية على الحديد لتحويل الكربون. لا تتم عملية التحلل اللاهوائي للكربون إلا بواسطة الكائنات الدقيقة. ويُعد هذا التحلل جهدًا تعاونيًا تشارك فيه أنواع عديدة من البكتيريا، مثل بكتيريا Bacteroides succinogenes و Clostridium butyricum و Syntrophomonas sp. ويُعرف هذا التعاون البكتيري بنقل الهيدروجين بين الأنواع، وهو المسؤول عن الجزء الأكبر من ثاني أكسيد الكربون والميثان المنبعثين إلى الغلاف الجوي (Kaçar, 2024).

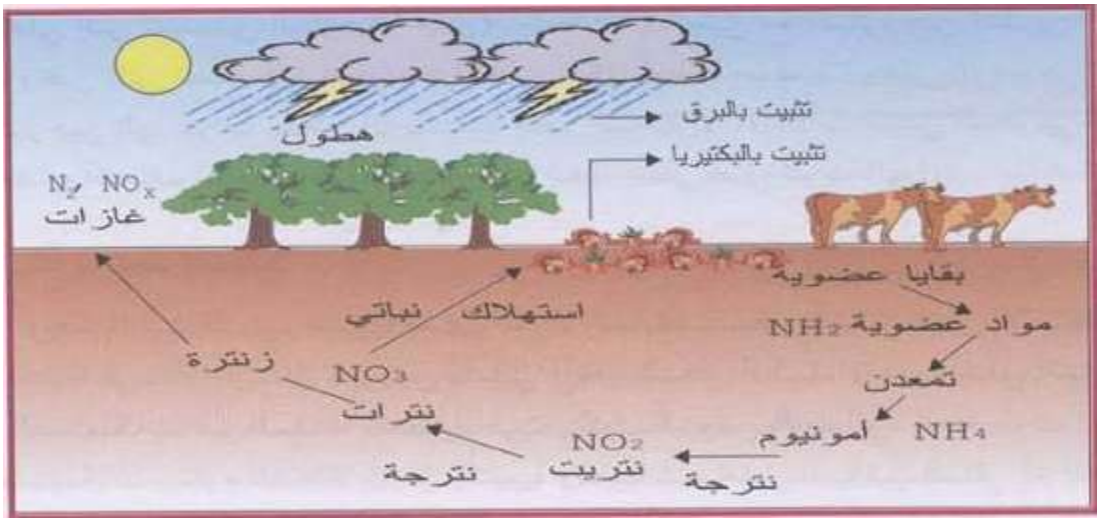


الشكل (4): دور الكائنات المجهرية في دورة الكربون

2. دورة النيتروجين

تشمل تثبيت النيتروجين، والأمونة، والنترتة، ونزع النيتروجين، وتعد البكتيريا العنصر الرئيس في جميع هذه المراحل. يُعدّ النيتروجين عنصرًا أساسيًا في الأحماض النووية والبروتينات، وله دور بالغ الأهمية في الزراعة البشرية. ويُمثّل إدخال النيتروجين إلى الكائنات الحية تحديًا كبيرًا. فالنباتات والعوالق النباتية غير مُهيأة لامتصاص النيتروجين من الغلاف الجوي (الموجود على

شكل N_2 بروابط تساهمية ثلاثية قوية) ، على الرغم من أن هذا الجزيء يُشكّل ما يقارب 78% من الغلاف الجوي. يدخل النيتروجين إلى الكائنات الحية عبر البكتيريا الحرة والمتعايشة، التي تُدمجه في جزيئاتها الكبيرة من خلال تثبيت النيتروجين (تحويل (N_2 . تعيش البكتيريا الزرقاء في معظم النظم البيئية المائية المُعرّضة لأشعة الشمس، وتلعب دورًا محوريًا في تثبيت النيتروجين. تستطيع البكتيريا الزرقاء استخدام مصادر النيتروجين غير العضوية لتثبيته (Fao, 2018). تعيش بكتيريا الريزوبيوم بشكل تكافلي في عُقيدات جذور البقوليات (مثل البازلاء والفاصوليا والفول السوداني) وتُزوّدها بالنيتروجين العضوي الذي تحتاجه. كما تُعدّ البكتيريا الحرة، مثل بكتيريا الأزوتوباكتر ، من مُثبّتات النيتروجين المهمة.يُعدّ النيتروجين العضوي ذا أهمية بالغة لدراسة ديناميكيات النظام البيئي، إذ إنّ العديد من عمليات النظام البيئي، كالإنتاج الأولي والتحلل، محدودة بكمية النيتروجين المتاحة. وكما هو موضح في الشكل 1، يتحوّل النيتروجين الذي يدخل الأنظمة الحية عبر تثبيت النيتروجين تدريجيًا من نيتروجين عضوي إلى غاز النيتروجين بواسطة البكتيريا. وتحدث هذه العملية على ثلاث مراحل في الأنظمة الأرضية: التَأْمُونَة، والتَنَتْرِج، والتَخْضِع (Mekouar, 2023). أولًا، تُحوّل عملية التَأْمُونَة النفايات النيتروجينية من الحيوانات الحية أو من بقايا الحيوانات النافقة إلى أيون الأمونيوم (NH_4^+) بواسطة أنواع معينة من البكتيريا والفطريات. ثانيًا، يُحوَّل الأمونيوم إلى نتريت (NO_2^-) بواسطة بكتيريا التَنَتْرِج، مثل بكتيريا النيتروسوموناس ، من خلال عملية التَنَتْرِج. بعد ذلك، تُحوَّل النتريت إلى نترات (NO_3^-) بواسطة كائنات حية مماثلة. ثالثًا، تحدث عملية نزع النيتروجين، حيث تقوم البكتيريا، مثل الزائفة والكلوستريديوم، بتحويل النترات إلى غاز النيتروجين، مما يسمح لها بالعودة إلى الغلاف الجوي (Mekouar, 2023).



الشكل (5): دور الكائنات المجهرية في دورة النيتروجين

3. دورة الكبريت

تحول البكتيريا مركبات الكبريت بين صورها المختلفة، مما يسهم في الحفاظ على توازن هذا العنصر في البيئة. دورة الكبريت هو مجموعة من العمليات التي ينتقل فيها الكبريت والمعادن (بما في ذلك الممرات المائية) والمنظومات الحية مثل دورة البيوجيوكيميائية وهي مهمة في الجيولوجيا لأنها تؤثر على العديد من المعادن. الدورات البيولوجية الكيميائية مهمة للحياة أيضا لأن الكبريت هو عنصر أساسي، لكونها المكونة من العديد من بروتين والعامل المساعد (الكيمياء الحيوية)(Kaçar, 2024).

خطوات دورة الكبريت هي:

1-تمعدن الكبريت العضوي إلى أشكال غير العضوية، مثل كبريتيد الهيدروجين (H2S)، الكبريت، فضلا عن المعادن كبريتيد.

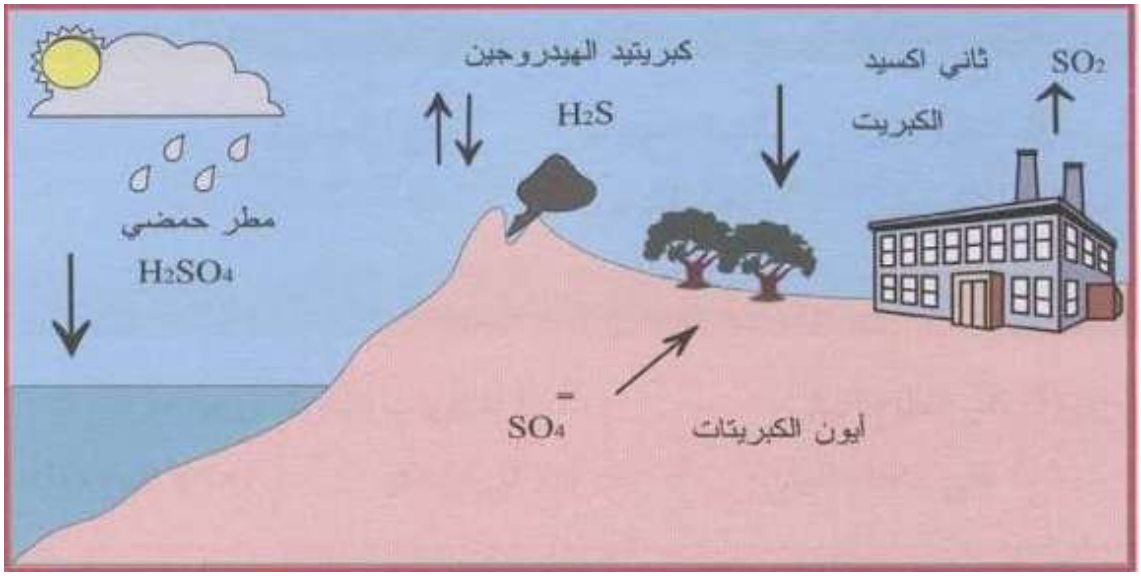
2-أكسدة كبريتيد الهيدروجين، كبريتيد، والكبريت (S) لكبريتات ((-SO42.

3-الحد من كبريتات الكبريتيد.

4-إدراج كبريتيد إلى مركبات عضوية (بما في ذلك المشتقات التي تحتوي على المعادن)

وغالبا ما يطلق على هذه النحو التالي: الحد من كبريتات الاستيعابية (انظر أيضا الاستيعاب الكبريت) التي كبريتات (-SO42) يتم تقليل من النباتات والفطريات ومختلف بدائيات النوى. الدول أكسدة الكبريت هي +6 في كبريتات و-2 في R-SH. إزالة الكبريت فيه الجزيئات

العضوية المحتوية على الكبريت يمكن desulfurized، وإنتاج غاز كبريتيد الهيدروجين (H2S، حالة الأكسدة = -2). عملية مماثلة لمركبات النيتروجين العضوي هو نزع الأمين. أكسدة كبريتيد الهيدروجين تنتج الكبريت (S8)، والأكسدة الدولة = 0. يحدث هذا التفاعل في البكتيريا الكبريت الأخضر والأرجواني الضوئي وبعض chemolithotrophs. غالبا ما يتم تخزين الكبريت كما polysulfides. أكسدة الكبريت التي كتبها المؤكسدات الكبريت تنتج كبريتات. خفض الكبريت في Dissimilative التي يمكن تقليصها الكبريت إلى كبريتيد الهيدروجين. الحد من كبريتات Dissimilative التي مخفضات سلفات توليد كبريتيد الهيدروجين من كبريتات (Citaristi, 2022).

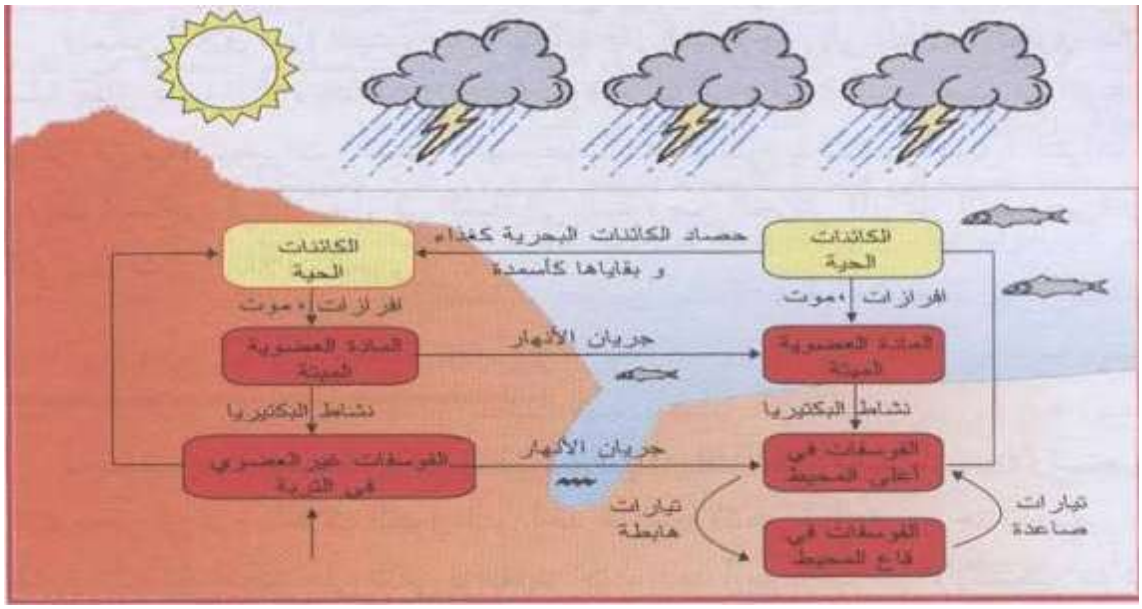


الشكل (6): دور الكائنات المجهرية في دورة الكبريت

4. دورة الفوسفور

تذيب الكائنات المجهرية مركبات الفوسفور غير الذائبة وتعيدها إلى الدورة الحيوية، مما يعزز خصوبة التربة. يُعدّ الفوسفور عنصرًا أساسيًا للحياة، ودورة الفوسفور ضرورية لاستدامة الحياة على كوكب الأرض. في البيئات المائية، تُشكّل الكائنات الدقيقة عنصرًا رئيسيًا في دورة الفوسفور، حيث تُحوّل بسرعة الأشكال الكيميائية المتنوعة للفوسفور عبر مسارات امتصاص واستيعاب وإطلاق مختلفة. وقد كشفت الاكتشافات الحديثة عن دورة فوسفور ميكروبية مائية أكثر ديناميكية وتعقيدًا مما كان يُعتقد سابقًا. وقد تبيّن أن بعض الكائنات الدقيقة تستخدم وتُنتج مركبات

فوسفور جديدة، بما في ذلك تلك الموجودة في صورها المُختزلة. كما أثارت النتائج الجديدة العديد من التساؤلات التي لم تُجب بعد، والتي تستدعي مزيدًا من البحث. ويتزايد تأثير النشاط البشري على النظم البيئية المائية. وتُتيح التطورات في فهم الكيمياء الحيوية للفوسفور في البيئات المائية المتطورة فرصة فريدة لفهم تأثير الأنشطة البشرية والتنبؤ به والتخفيف من حدّته. في هذه المراجعة، أناقش ثراء الأبحاث الجديدة حول دورة الفوسفور في البيئة المائية، والتي تشمل تخصصاتٍ متنوعة من علم الجينوم وعلم وظائف الأعضاء إلى النمذجة البيوجيوكيميائية العالمية، مع التركيز على الفهم الحالي لكيفية استشعار الكائنات الحية الدقيقة المائية للفوسفور ونقله واستيعابه وتخزينه وإنتاجه وإطلاقه. ومن الجدير بالذكر أنني أتطرق إلى توزيع الفوسفور داخل الخلايا، وهو موضوع لم يُستكشف بشكل كافٍ وله آثار واسعة النطاق على تدفق الطاقة والعناصر في النظم البيئية المائية (Siboni, 2023).



الشكل (7): دور الكائنات المجهرية في دورة الفسفور

الجدول (5) مساهمة الاحياء المجهرية في المجالات المختلفة

المجال	الوظيفة
التربة	تثبيت النيتروجين وتحليل المواد العضوية
المياه	تنقية المياه وإعادة تدوير العناصر
الهواء	انتقال الكائنات الدقيقة والمساهمة في الدورات

البيئية	
الزراعة	تحسين خصوبة التربة وحماية النباتات
البيئة	إزالة الملوثات والمعالجة الحيوية

الحادي عشر: الميكروبيوم البشري ((Human Microbiome

يشير مصطلح الميكروبيوم البشري إلى المجتمع المتكامل من الكائنات المجهرية التي تستوطن جسم الإنسان، بما في ذلك البكتيريا والفطريات والفيروسات والأوليات، إضافة إلى المادة الوراثية الخاصة بها. وقد أحدثت الدراسات الحديثة تحولًا كبيرًا في فهم العلاقة بين الإنسان وهذه الكائنات، إذ لم تُعد مجرد كائنات متعايشة، بل أصبحت تُعرف بأنها عضو وظيفي يسهم في الحفاظ على الصحة العامة وتنظيم العديد من العمليات الحيوية(Bautista et al., 2025).

تستوطن الكائنات الدقيقة الجلد، وتجويف الفم، والجهاز التنفسي، والجهاز البولي التناسلي، إلا أن أكبر تجمع لها يوجد في القناة الهضمية، ولا سيما القولون، حيث يتجاوز عدد الخلايا الميكروبية عدد خلايا جسم الإنسان في بعض التقديرات، وتضم آلاف الأنواع المختلفة.

وظائف الميكروبيوم البشري

-1المساهمة في هضم الغذاء من خلال تحليل المركبات الغذائية المعقدة التي يصعب على الإنزيمات البشرية هضمها.

-2إنتاج الفيتامينات مثل فيتامين K وبعض فيتامينات B.

-3تنظيم الجهاز المناعي عبر تحفيز نضج الخلايا المناعية والحفاظ على التوازن المناعي.

-4منع استعمار الممرضات من خلال منافستها على الغذاء ومواقع الالتصاق وإنتاج مواد مثبطة لنموها.

-5الحفاظ على سلامة الغشاء المخاطي للأمعاء وتقليل نفاذية الأمعاء للمواد الضارة.

وقد ربطت دراسات حديثة اختلال توازن الميكروبيوم Dysbiosis)) بزيادة خطر الإصابة بالسمنة، ومرض السكري من النوع الثاني، وأمراض الأمعاء الالتهابية، وبعض اضطرابات المناعة، إضافة إلى وجود ارتباطات محتملة مع بعض الاضطرابات العصبية والنفسية (Curtis et al., 2012).

الثاني عشر: الأحياء المجهرية في الصناعات الغذائية

تؤدي الكائنات المجهرية دورًا محوريًا في تصنيع العديد من المنتجات الغذائية، وذلك بفضل قدرتها على إجراء عمليات التخمر وإنتاج المركبات الحيوية .

أولًا: صناعة الألبان

تستخدم بكتيريا حمض اللاكتيك مثل Lactobacillus وStreptococcus thermophilus في تصنيع اللبن والزبادي والأجبان، إذ تحول سكر اللاكتوز إلى حمض اللاكتيك، مما يحسن القوام والطعم ويحد من نمو الكائنات الممرضة (Lowe et al., 2024).

ثانيًا: صناعة الخبز

تُستخدم خميرة الخبز Saccharomyces cerevisiae لإنتاج غاز ثاني أكسيد الكربون، الذي يؤدي إلى انتفاخ العجين وتحسين قوامه (Wang et al., 2024).

ثالثًا: صناعة الأغذية المخمرة

تدخل الكائنات الدقيقة في إنتاج المخللات، والخل، وصلصة الصويا، والعديد من المنتجات التقليدية، حيث تُكسبها نكهة مميزة وتُطيل مدة حفظها (Glick & Patten, 2022).

رابعًا: إنتاج الإنزيمات الغذائية

تُنتج الفطريات والبكتيريا إنزيمات تُستخدم في تصنيع العصائر، والألبان، والمخبوزات، وتحسين جودة المنتجات الغذائية (Brown, 2025).

جدول (6): أهم استخدامات الأحياء المجهرية في الصناعات الغذائية

الكائن الدقيق	المنتج	الفائدة
Lactobacillus spp	اللبن والزبادي	تحسين الهضم وإطالة مدة الحفظ
Saccharomyces cerevisiae	الخبز	تخمير العجين
Acetobacter spp	الخل	أكسدة الإيثانول إلى حمض الخليك

Penicillium spp	بعض أنواع الأجبان	تحسين النكهة والقوام

الثالث عشر: الأحياء المجهرية في الصناعات الدوائية

أسهمت الكائنات المجهرية في إحداث ثورة في الصناعات الدوائية، إذ تُستخدم لإنتاج العديد من المركبات العلاجية المهمة (Phillip, 2026).

1-إنتاج المضادات الحيوية

يُعد اكتشاف البنسلين نقطة تحول في الطب الحديث، إذ أنتجه فطر Penicillium chrysogenum، وتبع ذلك اكتشاف العديد من المضادات الحيوية المنتجة بواسطة بكتيريا Streptomyces.

2-إنتاج اللقاحات

تُستخدم تقنيات زراعة الخلايا والكائنات المجهرية في إنتاج اللقاحات التقليدية والحديثة، بما في ذلك اللقاحات المعتمدة على الحمض النووي الريبوزي الرسول ((mRNA.

3-إنتاج البروتينات العلاجية

أصبحت البكتيريا والخمائر المهندسة وراثيًا تُستخدم لإنتاج الإنسولين البشري، وهرمون النمو، والإنترفيرونات، وعوامل تخثر الدم، وغيرها من البروتينات العلاجية (Organization, 2025).

الرابع عشر: المعالجة الحيوية ((Bioremediation

تعرف المعالجة الحيوية بأنها استخدام الكائنات المجهرية أو منتجاتها لإزالة الملوثات أو تقليل سميتها في البيئة. وتُعد من أكثر التقنيات استدامة لمعالجة التلوث.

مجالات الاستخدام

1-إزالة بقع النفط من البحار.

2-تحليل المبيدات الزراعية.

3-معالجة مياه الصرف الصحي.

4-إزالة المعادن الثقيلة.

-5التخلص من المذيبات الصناعية.

وتتميز هذه التقنية بانخفاض تكلفتها مقارنة بالطرق الكيميائية والفيزيائية، كما أنها تقلل من التأثيرات البيئية السلبية (Lowe et al., 2024).

الخامس عشر: الأحياء المجهرية والتنمية المستدامة

تُسهم الأحياء المجهرية بصورة مباشرة في تحقيق العديد من أهداف التنمية المستدامة (Denison & Wauchope, 2024)، من خلال:

-1تحسين إنتاج الغذاء باستخدام الأسمدة الحيوية.

-2الحد من استخدام المبيدات والأسمدة الكيميائية.

-3إنتاج الطاقة الحيوية مثل الغاز الحيوي والإيثانول الحيوي.

-4إعادة تدوير المخلفات العضوية.

-5حماية الموارد المائية من التلوث.

-6دعم الاقتصاد الدائري عبر الاستفادة من النفايات الزراعية والصناعية.

جدول (7): مساهمة الأحياء المجهرية في التنمية المستدامة

المجال	التطبيقات
الزراعة	الأسمدة الحيوية والمكافحة الحيوية
البيئة	معالجة التلوث وإعادة تدوير المخلفات
الطاقة	إنتاج الغاز الحيوي والإيثانول
الصحة	إنتاج اللقاحات والمضادات الحيوية
الصناعة	تصنيع الإنزيمات والمنتجات الحيوية

خاتمة المبحث الأول

يتضح مما سبق أن الأحياء المجهرية ليست مجرد كائنات دقيقة تعيش في البيئات المختلفة، بل هي عنصر أساسي في استدامة الحياة على الأرض. فهي تشارك في تدوير العناصر، وتحسين خصوبة التربة، وتنقية المياه، وإنتاج الغذاء والدواء، كما تؤدي دورًا مهمًا في صحة الإنسان من

خلال الميكروبيوم البشري. وقد أدت التطورات الحديثة في البيولوجيا الجزيئية والتكنولوجيا الحيوية إلى توسيع نطاق تطبيقات الأحياء المجهرية، مما جعلها أحد أهم محاور البحث العلمي والابتكار في القرن الحادي والعشرين.

المبحث الثاني: الوراثة وانتقال الصفات (Genetics and Inheritance of Traits)

مقدمة

يُعد علم الوراثة (Genetics) أحد أهم فروع العلوم الحياتية، إذ يهتم بدراسة انتقال الصفات الوراثية من الآباء إلى الأبناء، وتفسير آليات التعبير الجيني والتباين الوراثي بين الأفراد. وقد أسهم هذا العلم في تفسير العديد من الظواهر البيولوجية، مثل تشابه أفراد العائلة، وظهور الأمراض الوراثية، والتنوع الحيوي بين الكائنات الحية، كما أصبح أساسًا للتطورات الحديثة في البيولوجيا الجزيئية والهندسة الوراثية والتكنولوجيا الحيوية.

يرجع الفضل في تأسيس علم الوراثة الحديث إلى العالم Gregor Mendel، الذي أجرى في منتصف القرن التاسع عشر تجارب دقيقة على نبات البازلاء، ووضع القوانين الأساسية التي تفسر انتقال الصفات الوراثية. ومع اكتشاف الحمض النووي (DNA) في القرن العشرين، تطور علم الوراثة بصورة متسارعة، وأصبح بالإمكان تفسير الظواهر الوراثية على المستوى الجزيئي، مما أدى إلى ظهور علوم حديثة مثل علم الجينوم (Genomics)، وعلم الوراثة الجزيئية (Molecular Genetics)، وعلم التخلق (Epigenetics) (Denny, 2025).

أولاً: مفهوم علم الوراثة

علم الوراثة هو العلم الذي يدرس انتقال الصفات الوراثية من جيل إلى آخر، وآلية حفظ المعلومات الوراثية داخل الخلايا، وكيفية تنظيم التعبير الجيني، والعوامل المؤثرة في ظهور الصفات المختلفة.

وتُعرَّف الصفة الوراثية بأنها أي خاصية أو ميزة تنتقل من الآباء إلى الأبناء نتيجة انتقال الجينات، مثل لون العينين، وفصيلة الدم، والطول، وبعض الأمراض الوراثية.

ثانياً: تاريخ علم الوراثة

مر علم الوراثة بعدة مراحل رئيسة أسهمت في تطوره، ومن أبرزها:

1. مرحلة مندل (1865)

أجرى مندل تجاربه على نبات البازلاء، ولاحظ أن الصفات تنتقل وفق أنماط محددة، وصاغ قانوني الانعزال والتوزيع المستقل.

2. اكتشاف الكروموسومات

في أواخر القرن التاسع عشر، أثبت العلماء أن الكروموسومات الموجودة داخل نواة الخلية تحمل العوامل الوراثية.

3. اكتشاف DNA

في عام 1953، توصل كل من James Watson و**Francis Crick** إلى نموذج اللولب المزدوج للحمض النووي، بالاستناد إلى بيانات حيود الأشعة السينية التي ساهمت في جمعها Rosalind Franklin، وهو اكتشاف مثّل نقطة تحول في علم الوراثة الحديث.

4. عصر الجينوم

أدى إنجاز Human Genome Project إلى رسم الخريطة الكاملة للجينوم البشري، مما فتح آفاقًا جديدة في تشخيص الأمراض وتطوير الطب الشخصي (Vagneron & Kirchhelle, 2026).

ثالثاً: المادة الوراثية (DNA وRNA)

1. الحمض النووي الريبوزي منقوص الأكسجين ((DNA

يعد الحمض النووي (DNA) المادة الوراثية الرئيسة في معظم الكائنات الحية، ويقع داخل نواة الخلية في الكروموسومات، كما يوجد أيضًا في الميتوكوندريا، وفي البلاستيدات الخضراء لدى النباتات.

يتكون DNA من وحدات بنائية تُعرف بالنيوكليوتيدات، ويتألف كل نيوكليوتيد من:

-1سكر ديوكسي ريبوز.

-2مجموعة فوسفات.

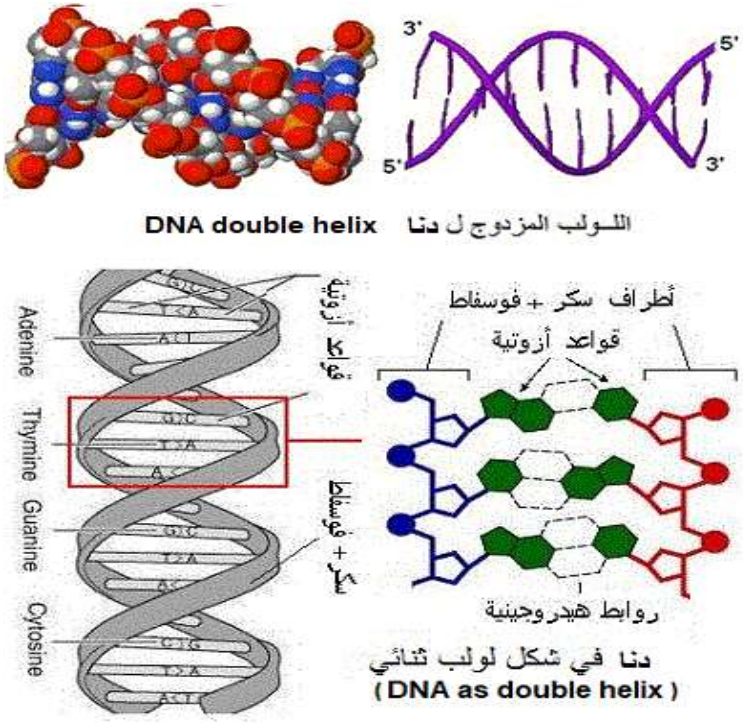
-3قاعدة نيتروجينية (أدينين، ثايمين، جوانين، سيتوسين(.

ترتبط القواعد النيتروجينية وفق مبدأ التكامل:

-1الأدينين (A) مع الثايمين (T).

-2الجوانين (G) مع السيتوسين (C).

ويأخذ DNA شكل اللولب المزدوج، الذي يمنحه الاستقرار والقدرة على حفظ المعلومات الوراثية ونقلها بدقة أثناء انقسام الخلايا (Alberts et al., 2018).



الشكل (8) التركيب الحلزوني المزدوج للحمض النووي ((DNA.

2. الحمض النووي الريبوزي (RNA)

يختلف RNA عن DNA في عدة جوانب:

-1يحتوي على سكر الريبوز.

-2يستبدل قاعدة الثايمين بقاعدة اليوراسيل.

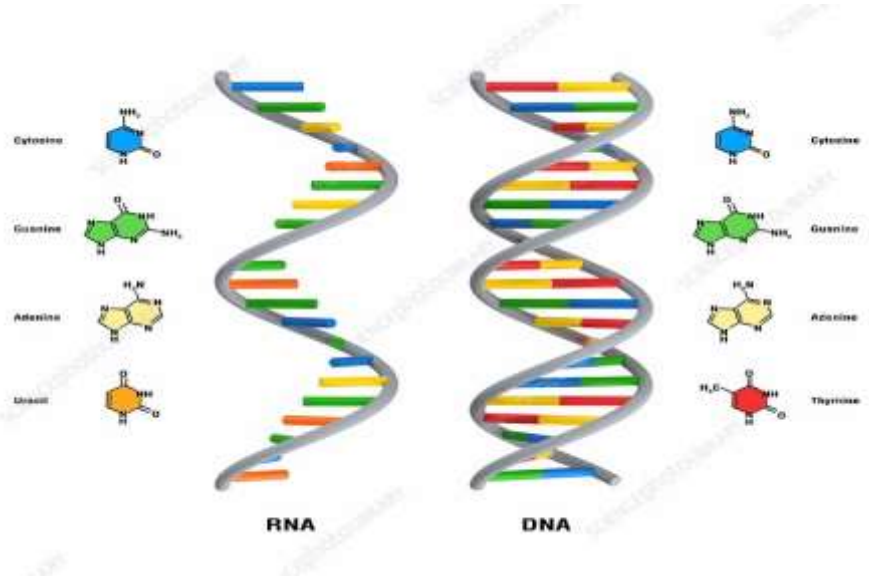
-3يكون غالبًا أحادي السلسلة.

وينقسم إلى ثلاثة أنواع رئيسة:

mRNA-1: ينقل الشفرة الوراثية من DNA إلى الريبوسومات.

tRNA-2: ينقل الأحماض الأمينية لتكوين البروتين.

rRNA-3: يدخل في تركيب الريبوسومات ويشارك في تصنيع البروتين (Nelson et al., 2008).



الشكل (9) مقارنة بين DNA وRNA.

جدول (8): مقارنة بين DNA وRNA

وجه المقارنة	DNA	RNA
السكر	ديوكسي ريبوز	ريبوز
عدد السلاسل	مزدوج	غالبًا مفرد
القواعد النتروجينية	A, T, G, C	A, U, G, C
الوظيفة	حفظ المعلومات الوراثية	التعبير الجيني وتصنيع البروتين
الموقع	النواة والميتوكوندريا	النواة والسيتوبلازم

رابعاً: الجينات والكروموسومات

الجين ((Gene

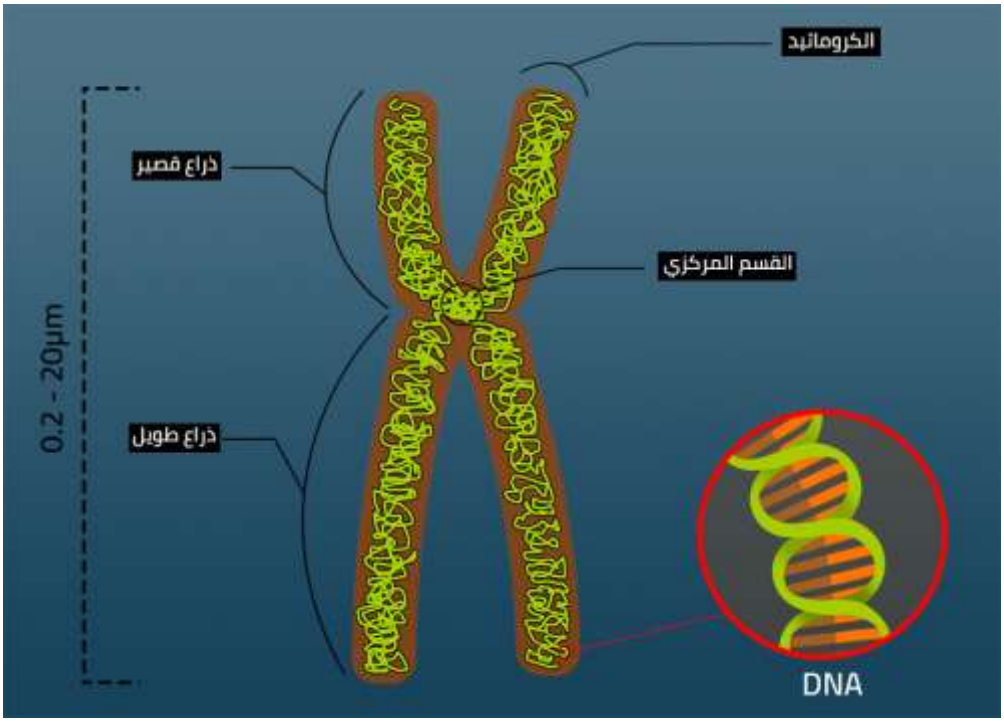
الجين هو وحدة الوراثة الأساسية، ويتكون من تسلسل محدد من قواعد DNA يحمل المعلومات اللازمة لإنتاج بروتين أو جزيء RNA وظيفي. وتحدد الجينات معظم الصفات الوراثية، كما تؤثر في الاستجابة للأمراض والأدوية.

الكروموسومات ((Chromosomes

الكروموسومات تراكيب خيطية تتكون من DNA ملتف حول بروتينات الهيستون، وتحمل آلاف الجينات. ويبلغ عددها في الإنسان 46 كروموسومًا مرتبة في 23 زوجًا، منها 22 زوجًا جسميًا وزوج واحد من الكروموسومات الجنسية (XX في الإناث وXY في الذكور) (Manolio et al., 2024).

جدول (9): تصنيف الكروموسومات البشرية وعددها ووظيفتها في الخلايا الجسدية.

نوع الكروموسومات	عدد الأزواج	عدد الكروموسومات	الوظيفة
الكروموسومات الجسمية (Autosomes)	22 زوجًا	44 كروموسومًا	تحمل معظم الجينات المسؤولة عن الصفات الجسمية ووظائف الأعضاء المختلفة
الكروموسومات الجنسية (Sex Chromosomes)	زوج واحد	2 كروموسومان	تحدد الجنس البيولوجي للفرد وتحمل جينات مرتبطة بالنمو والتكاثر وبعض الصفات الوراثية
المجموع	23 زوجًا	46 كروموسومًا	تمثل المجموعة الكروموسومية الكاملة في الخلايا الجسدية للإنسان



الشكل (10) :تركيب الكروموسوم وموقع الجين.

خامسا: قوانين مندل في الوراثة ((Mendel's Laws of Inheritance

يُعد العالم Gregor Mendel المؤسس الحقيقي لعلم الوراثة الحديث، إذ أجرى بين عامي 1856 و1863 سلسلة من التجارب الدقيقة على نبات البازلاء (Pisum sativum)، واختاره لعدة أسباب، منها سهولة زراعته، وقصر دورة حياته، ووضوح صفاته الوراثية، وإمكانية إجراء التلقيح الذاتي والخلطي بسهولة.

اعتمد مندل في تجاربه على دراسة سبع صفات متقابلة، مثل لون البذور، وشكلها، ولون الأزهار، وطول الساق، واستنتج منها القوانين الأساسية للوراثة التي لا تزال تمثل حجر الأساس في علم الوراثة (Brown, 2023).

أولًا: الصفات التي درسها مندل

جدول (10) الصفات التي درسها مندل

الصفة	الصفة السائدة	الصفة المتنحية
شكل البذور	مستديرة	مجعدة
لون البذور	صفراء	خضراء

لون الأزهار	بنفسجية	بيضاء
شكل القرن	منتفخ	منكمش
لون القرن	أخضر	أصفر
موضع الزهرة	جانبي	طرفي
طول الساق	طويل	قصير

ثانيًا: القانون الأول لمندل (قانون انعزال العوامل)

ينص هذا القانون على أن:

لكل صفة وراثية زوج من العوامل (الأليلات)، ينفصلان عند تكوين الأمشاج بحيث يحمل كل مشيج أليلًا واحدًا فقط، ثم يجتمعان مرة أخرى عند الإخصاب.

مثال

إذا رمزنا إلى:

A = أليل الطول (سائد).

a = أليل القصر (متنحٍ).

فإن تزاوج نباتين هجينين:

$$Aa \times Aa$$

يعطي النتائج الآتية:

الأمشاج	A	a
A	AA	Aa
a	Aa	aa

النتائج

النسبة الجينية

1 AA : 2 Aa : 1 aa

النسبة المظهرية

3 طويل : 1 قصير

وهذه النسبة تعد من أشهر النتائج في علم الوراثة.

ثالثًا: القانون الثاني لمندل (قانون التوزيع المستقل)

ينص هذا القانون على أن:

تتوزع أزواج الأليلات الخاصة بالصفات المختلفة بصورة مستقلة أثناء تكوين الأمشاج، إذا كانت الجينات تقع على كروموسومات مختلفة أو متباعدة على الكروموسوم نفسه.

مثال:

دراسة لون البذور وشكلها معًا.

اللون:

Y أصفر (سائد)

y أخضر (متنح)

الشكل:

R مستدير (سائد)

r مجعد (متنح)

عند تزاوج:

YyRr × YyRr

تكون النسبة المظهرية:

9 : 3 : 3 : 1

وهي:

9 صفراء مستديرة

3 صفراء مجعدة

3 خضراء مستديرة

1 خضراء مجعدة



الشكل (11): مربع بانيت (Punnett Square) لتوضيح قوانين مندل.

رابعًا: السيادة والتنحي

الجينات ليست جميعها متساوية في قوة التعبير.

لذلك تقسم إلى:

1. السيادة التامة (Complete Dominance)

يعبر الأليل السائد عن نفسه بالكامل ويخفي تأثير الأليل المتنحي.

مثال:

لون بذور البازلاء.

2. السيادة غير التامة (Incomplete Dominance)

لا يسيطر أحد الأليلين بصورة كاملة، فيظهر نمط ظاهري وسط بين الأبوين.

مثال:

أحمر × أبيض

↓

وردي

3. السيادة المشتركة (Codominance)

يعبر كلا الأليلين عن نفسيهما بصورة كاملة.

أشهر مثال:

فصيلة الدم AB

حيث يظهر المستضدان A وB معًا.

خامسًا: الأليلات المتعددة ((Multiple Alleles

في بعض الصفات يوجد أكثر من أليل للجين الواحد داخل المجتمع.

أفضل مثال:

فصائل الدم ABO

وتوجد ثلاثة أليلات:

IA

IB

i

ويؤدي اتحادها إلى ظهور أربع فصائل دم:

النمط الجيني	فصيلة الدم
IAIA أو IAi	A
IBIB أو IBi	B
IAIB	AB
ii	O

وتعد هذه الفصائل ذات أهمية كبيرة في نقل الدم، والطب العدلي، وزراعة الأعضاء.

سادسًا: الوراثة المرتبطة بالجنس

تقع بعض الجينات على الكروموسومات الجنسية، ولذلك تختلف طريقة انتقالها بين الذكور والإناث.

ومن أشهر الأمراض المرتبطة بالكروموسوم X:

عمى الألوان.

الناعور (الهيموفيليا).

حثل دوشين العضلي.

بينما تنتقل الجينات الموجودة على الكروموسوم Y من الأب إلى الأبناء الذكور فقط.

سابعًا: الانقسام المتساوي ((Mitosis

الانقسام المتساوي هو العملية التي تنقسم فيها الخلية الجسدية لإنتاج خليتين متماثلتين وراثيًا (Pierce, 2012).

يمر بالمراحل الآتية:

-1الطور التمهيدي.

-2الطور الاستوائي.

-3الطور الانفصالي.

-4الطور النهائي.

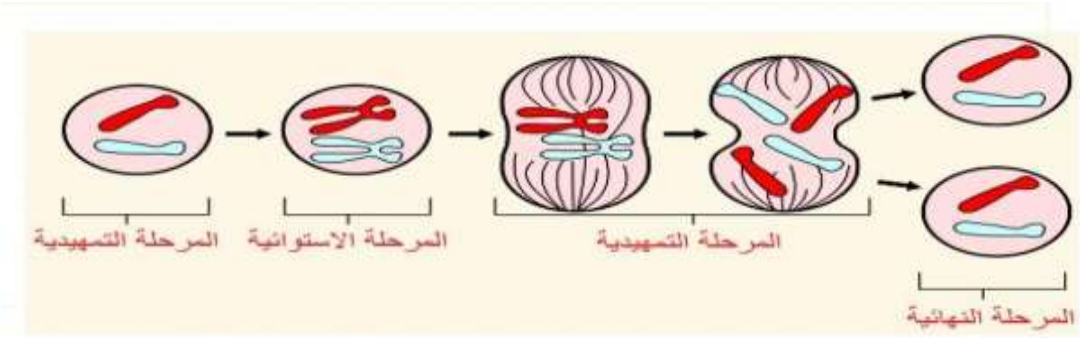
أهمية الانقسام المتساوي

-1نمو الجسم.

-2تعويض الخلايا التالفة.

-3التئام الجروح.

-4المحافظة على ثبات عدد الكروموسومات.



الشكل(12(: مراحل الانقسام المتساوي ((Mitosis.

ثامنًا: الانقسام المنصف ((Meiosis

يُعد الانقسام المنصف أو الاختزالي عملية حيوية تحدث في الخلايا الجنسية داخل المناسل، ويهدف إلى إنتاج الأمشاج (الحيوانات المنوية والبويضات) التي تحتوي على نصف العدد الأصلي من الكروموسومات، مما يحافظ على ثبات العدد الكروموسومي عند الإخصاب (Watson, 2004).

أهداف الانقسام المنصف

1-إنتاج أمشاج أحادية المجموعة الكروموسومية (n).

2-المحافظة على ثبات عدد الكروموسومات عبر الأجيال.

3-زيادة التنوع الوراثي بين الأفراد.

4-توفير المادة الوراثية اللازمة للتكاثر الجنسي.

مراحل الانقسام المنصف

يتكون الانقسام المنصف من قسمين متتاليين:

أولًا: الانقسام المنصف الأول ((Meiosis I

1-الطور التمهيدي الأول ((Prophase I

يُعد أطول مراحل الانقسام وأكثرها أهمية، وفيه:

1-تتكثف الكروموسومات.

2-يقترن الكروموسومان المتماثلان.

3-يحدث العبور الوراثي (Crossing Over) بين الكروماتيدات غير الشقيقة، مما يؤدي إلى تبادل أجزاء من المادة الوراثية وزيادة التنوع الجيني.

2-الطور الاستوائي الأول

تصطف أزواج الكروموسومات المتماثلة في منتصف الخلية.

3-الطور الانفصالي الأول

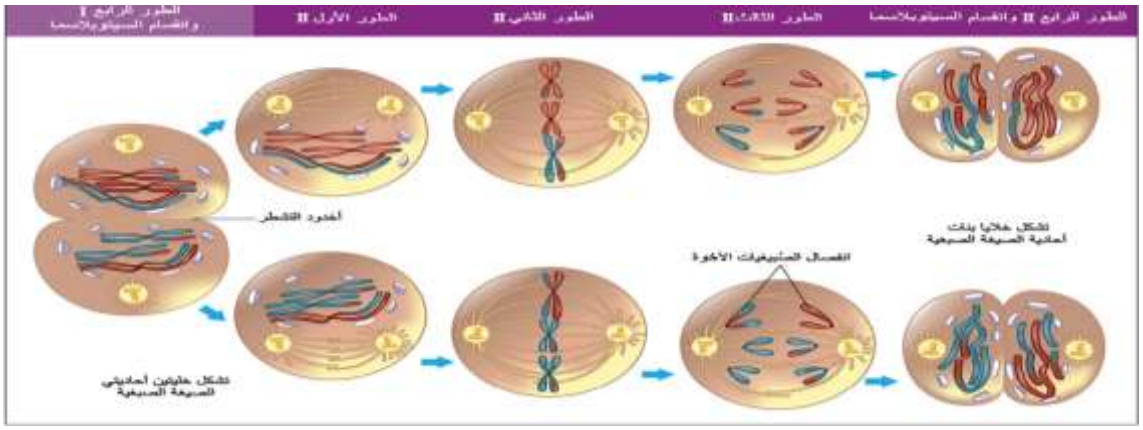
تنفصل الكروموسومات المتماثلة وتتجه نحو قطبي الخلية.

4-الطور النهائي الأول

تتكون خليتان تحتوي كل منهما على نصف العدد الكروموسومي.

ثانيًا: الانقسام المنصف الثاني ((Meiosis II

يشبه الانقسام المتساوي، ويؤدي إلى انفصال الكروماتيدات الشقيقة، وينتج عنه أربع خلايا أحادية المجموعة الكروموسومية تختلف وراثيًا عن بعضها.



الشكل (31): مراحل الانقسام المنصف ((Meiosis.

جدول (11): مقارنة بين الانقسام المتساوي والانقسام المنصف

وجه المقارنة	الانقسام المتساوي	الانقسام المنصف
عدد الانقسامات	واحد	اثنان
عدد الخلايا الناتجة	2	4
عدد الكروموسومات	ثابت	نصف العدد
التنوع الوراثي	محدود	مرتفع
الوظيفة	النمو وتجديد الأنسجة	إنتاج الأمشاج
مكان الحدوث	الخلايا الجسدية	الخلايا الجنسية
عدد الانقسامات	واحد	اثنان
عدد الخلايا الناتجة	2	4
عدد الكروموسومات	ثابت	نصف العدد
التشابه الوراثي	متطابقة	مختلفة

تاسعًا: الطفرات الوراثية ((Genetic Mutations

الطفرة هي تغير دائم في تسلسل الحمض النووي (DNA)، وقد تؤثر في جين واحد أو في كروموسوم كامل أو في الجينوم بأكمله (Brown, 2025).

أسباب الطفرات

أولًا: الطفرات التلقائية

تحدث نتيجة أخطاء أثناء تضاعف DNA أو إصلاحه.

ثانيًا: الطفرات المستحثة

تنتج عن عوامل خارجية مثل:

1-الأشعة السينية.

2-الأشعة فوق البنفسجية.

3-بعض المواد الكيميائية.

4-بعض الفيروسات.

أنواع الطفرات

1. الطفرات الجينية

تشمل:

1-الاستبدال ((Substitution.

2-الحذف ((Deletion.

3-الإضافة ((Insertion.

وقد تؤدي إلى تغير في البروتين الناتج أو فقدان وظيفته.

2. الطفرات الكروموسومية

تشمل:

1-الحذف.

-2التضاعف.

-3الانقلاب.

-4الانتقال.

3. الطفرات العددية

تنتج عن خلل في انفصال الكروموسومات أثناء الانقسام المنصف.

ومن أشهر الأمثلة:

Down syndrome (وجود ثلاث نسخ من الكروموسوم 21).

Turner syndrome.

Klinefelter syndrome.

الجدول (1(2: أنواع الطفرات الوراثية

نوع الطفرة	الوصف	التأثير	أمثلة
طفرة الاستبدال (Substitution)	استبدال قاعدة نيتروجينية بأخرى دون تغيير عدد القواعد	قد يؤدي إلى تغيير حمض أميني واحد أو أكثر، مما يؤثر في وظيفة البروتين	فقر الدم المنجلي (استبدال قاعدة واحدة في جين الهيموغلوبين)
طفرة الحذف (Deletion)	حذف قاعدة أو عدة قواعد من تسلسل DNA	يؤدي إلى فقدان قاعدة أو أكثر، وقد يغير إطار القراءة إذا لم يكن الحذف من مضاعفات	بعض حالات التليف الكيسي

		الثلاثيات	
طفرة الإضافة (Insertion)	إدخال قاعدة أو عدة قواعد في تسلسل DNA	يؤدي إلى إضافة قاعدة أو أكثر، مما قد يغير إطار القراءة ويؤثر في تركيب البروتين	بعض أنواع مرض تاي ساكس أو اضطرابات إطار القراءة
طفرة الانتقال الكروموسومي (Translocation)	انتقال جزء من كروموسوم إلى كروموسوم آخر	قد يسبب إنتاج بروتينات غير طبيعية أو تعطيل وظائف الجينات	بعض أنواع سرطان الدم (مثل الانتقال بين الكروموسومين 9 و22)
طفرة الحذف الكروموسومي (Chromosomal Deletion)	فقد جزء من الكروموسوم	فقدان مجموعة من الجينات وما يرافقه من اضطرابات نمائية ووظيفية	بعض المتلازمات الوراثية الناتجة عن فقد أجزاء من الكروموسومات
الطفرات العددية (Numerical Chromosomal Mutations)	خلل في عدد الكروموسومات نتيجة عدم الانفصال أثناء الانقسام المنصف	يسبب زيادة أو نقصان عدد الكروموسومات، مؤديًا إلى اضطرابات وراثية	متلازمة داون (تثلث الصبغي 21)، ومتلازمة كلاينفلتر (XXY)

عاشرًا: الوراثة غير المندلية (Non-Mendelian Inheritance)

لا تخضع جميع الصفات لقوانين مندل، إذ توجد أنماط وراثية أكثر تعقيدًا.

1. السيادة غير التامة

ينتج نمط ظاهري متوسط بين الأبوين.

مثال:

أزهار حمراء × أزهار بيضاء

↓

أزهار وردية.

2. السيادة المشتركة

يعبر كلا الأليلين عن نفسيهما بالكامل.

مثال:

فصيلة الدم AB.

3. تعدد الجينات ((Polygenic Inheritance

تتحكم عدة جينات في ظهور الصفة الواحدة، ويُعرف هذا النمط من التوارث باسم التوارث متعدد الجينات (Polygenic Inheritance)، إذ يسهم كل جين بجزء صغير من التأثير النهائي، مما يؤدي إلى ظهور تدرج مستمر في الصفات بين الأفراد بدلاً من وجود فئات منفصلة (Franks et al., 2025).

أمثلة:

الطول.

لون الجلد.

وزن الجسم.

4. تأثير البيئة

ا يعتمد ظهور الصفات الوراثية على الجينات وحدها، بل تؤثر العوامل البيئية بصورة مباشرة في مستوى التعبير الجيني، من خلال تنظيم نشاط الجينات أو إحداث تغيرات فوق جينية (Epigenetic Changes)، وهو ما يفسر اختلاف المظاهر الوراثية بين الأفراد رغم تشابههم الجيني (Forbes et al., 2007).

أمثلة:

التغذية.

النشاط البدني.

التعرض للإشعاع.

التدخين.

الحادي عشر: الارتباط الجيني والعبور الوراثي

تقع بعض الجينات على الكروموسوم نفسه، ولذلك تميل إلى الانتقال معًا أثناء عملية الانقسام المنصف، وتسمى هذه الظاهرة الارتباط الجيني (Genetic Linkage)، وقد أسهم اكتشافها في تفسير أنماط التوارث التي لا تتبع قوانين مندل بصورة كاملة .

إلا أن حدوث العبور الوراثي (Crossing Over) خلال الطور التمهيدي الأول من الانقسام المنصف يؤدي إلى تبادل أجزاء من الكروماتيدات غير الشقيقة، مما يعيد ترتيب الأليلات ويزيد من التنوع الوراثي، ويقلل من قوة الارتباط بين الجينات الواقعة على الكروموسوم نفسه (Sayers et al., 2025).



الشكل (14): العبور الوراثي ((Crossing Over.

الثاني عشر: علم التخلق ((Epigenetics

يُعرف علم التخلق بأنه دراسة التغيرات في التعبير الجيني التي لا تنتج عن تغير في تسلسل DNA نفسه، وإنما عن تعديلات كيميائية مثل:

مثيلة DNA (DNA Methylation).

تعديل بروتينات الهيستون.

تنظيم الجينات بواسطة RNA غير المشفر.

وقد أصبح هذا المجال من أسرع مجالات البحث نموًا، لما له من دور في تطور العديد من الأمراض، مثل السرطان، والسكري، وبعض الاضطرابات العصبية، كما يُعد هدفًا واعدًا للعلاجات الحديثة (Raghavan et al., 2024).

الثالث عشر: الوراثة الجزيئية ((Molecular Genetics

تمثل الوراثة الجزيئية أحد أهم فروع علم الوراثة، إذ تركز على دراسة الجينات على المستوى الجزيئي، وآليات تضاعف الحمض النووي (DNA)، ونسخ المعلومات الوراثية (Transcription)، وترجمتها إلى بروتينات (Translation)، وكيفية تنظيم التعبير الجيني. وقد أسهم هذا الفرع في فهم العديد من الأمراض الوراثية، وتطوير وسائل التشخيص والعلاج الجزيئي، كما أصبح أساسًا للتكنولوجيا الحيوية الحديثة (Qu et al., 2024).

أولًا: تضاعف الحمض النووي ((DNA Replication

يحدث تضاعف الحمض النووي قبل انقسام الخلية لضمان انتقال نسخة كاملة من المادة الوراثية إلى كل خلية بنت. تتميز هذه العملية بأنها شبه محافظة (Semi-conservative)، إذ يحتوي كل جزيء DNA جديد على شريط أصلي وآخر مُصنَّع حديثًا.

خطوات تضاعف DNA

1-فك اللولب المزدوج بواسطة إنزيم Helicase.

2-تثبيت السلاسل المفصولة بواسطة بروتينات الارتباط بالشريط المفرد.

3-تصنيع بادئات RNA بواسطة إنزيم Primase.

4-إضافة النيوكليوتيدات الجديدة بواسطة إنزيم DNA Polymerase.

5-ربط أجزاء أوكازاكي على الشريط المتأخر بواسطة إنزيم DNA Ligase.

6-مراجعة الأخطاء وإصلاحها لضمان دقة تضاعف المادة الوراثية.

ثانيًا: النسخ ((Transcription

النسخ هو عملية نقل المعلومات الوراثية من DNA إلى RNA الرسول (mRNA)، وتتم داخل نواة الخلية في حقيقيات النوى.

مراحل النسخ

1-البدء (Initiation): ارتباط إنزيم RNA Polymerase بمنطقة المحفز ((Promoter.

2-الاستطالة (Elongation): بناء سلسلة mRNA وفق تسلسل DNA.

3-الإنهاء (Termination): توقف النسخ عند الوصول إلى تسلسل الإنهاء.

بعد ذلك يخضع mRNA لعدة تعديلات تشمل إضافة القبعة الطرفية (Cap '5)، وذيل متعدد الأدينين (Poly-A Tail))، وإزالة الإنترونات (Splicing))، قبل انتقاله إلى السيتوبلازم.

ثالثًا: الترجمة ((Translation

الترجمة هي عملية تصنيع البروتين داخل الريبوسومات اعتمادًا على الشفرة الموجودة في mRNA.

مكونات عملية الترجمة

mRNA-1.

2-الريبوسومات ((Ribosomes.

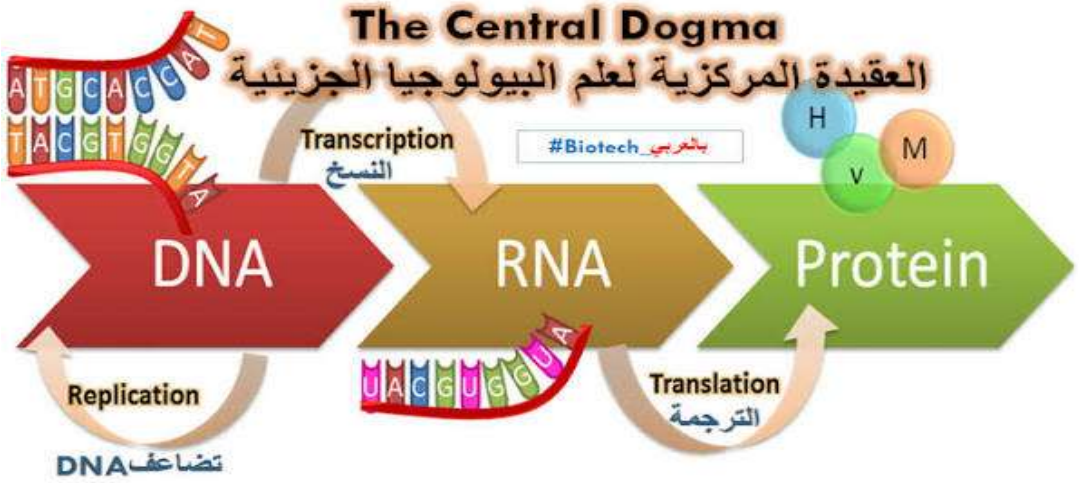
3-RNA الناقل ((tRNA.

4-الأحماض الأمينية.

5-عوامل البدء والاستطالة والإنهاء.

تبدأ الترجمة عادةً بكودون البدء AUG الذي يرمز للحمض الأميني ميثيونين، وتنتهي عند أحد كودونات الإيقاف (UAA، UAG، UGA).

DNA ⟶ RNA ⟶ Protein



الشكل (15): العقيدة المركزية للأحياء الجزيئية:

الرابع عشر: الشفرة الوراثية ((Genetic Code

الشفرة الوراثية هي النظام الذي يحدد كيفية ترجمة تسلسل النيوكليوتيدات في الحمض النووي أو الحمض النووي الريبوزي الرسول (mRNA) إلى تسلسل من الأحماض الأمينية اللازمة لتكوين البروتينات، وتمثل الأساس الجزيئي لنقل المعلومات الوراثية داخل الخلية (Denny, 2025).

خصائص الشفرة الوراثية

1- ثلاثية: يتكون كل كودون من ثلاث قواعد نيتروجينية

2- عالمية: تتشابه الشفرة الوراثية في معظم الكائنات الحية مع وجود استثناءات محدودة

3- غير متداخلة: تُقرأ الكودونات بصورة متتابعة دون تداخل

4- تحتوي على 64 كودونًا

5- منها 61 كودونًا ترمز للأحماض الأمينية، و3 كودونات توقف تنهي عملية الترجمة

.الخامس عشر: تنظيم التعبير الجيني ((Gene Expression Regulation

لا تعمل جميع الجينات في الوقت نفسه، بل تخضع لآليات تنظيم دقيقة تسمح للخلية بإنتاج البروتينات عند الحاجة فقط (Phillip, 2026).

في بدائيات النوى

يُعد نموذج أوبيرون اللاكتوز (Lac Operon) من أشهر نماذج تنظيم الجينات، حيث تتحكم البروتينات المنظمة في تشغيل أو إيقاف التعبير الجيني تبعًا لوجود اللاكتوز.

في حقيقيات النوى

يكون التنظيم أكثر تعقيدًا ويشمل:

-1عوامل النسخ ((Transcription Factors.

-2المحفزات ((Promoters.

-3المعززات ((Enhancers.

-4مثبطات النسخ.

-5التعديلات فوق الجينية ((Epigenetic Modifications.

السادس عشر: التقنيات الحديثة في الوراثة الجزيئية

1. تفاعل البوليميراز المتسلسل ((PCR

يُستخدم لتضخيم أجزاء محددة من DNA، ويُعد من أهم تقنيات البيولوجيا الجزيئية (Cantelli et al., 2022).

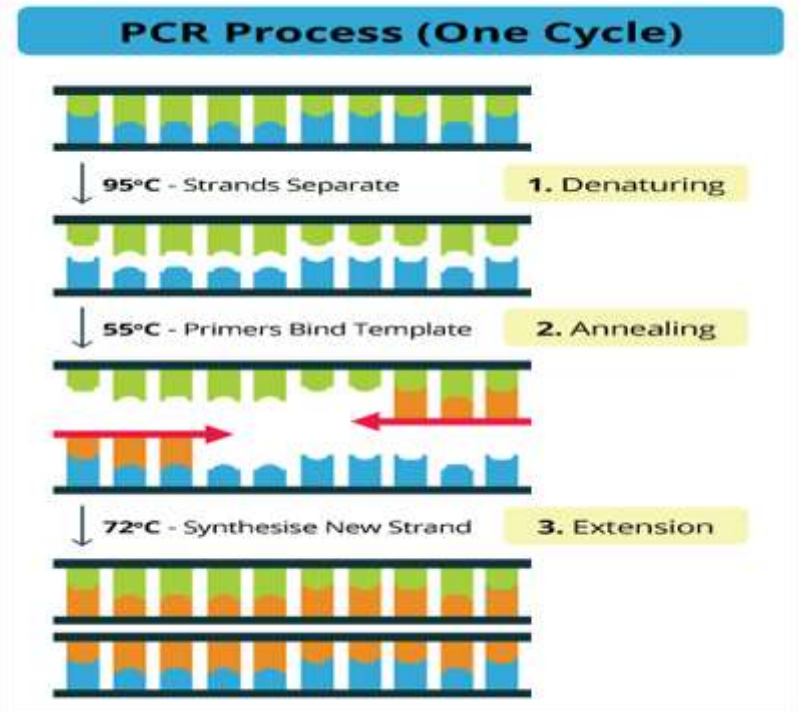
الاستخدامات:

-1تشخيص الأمراض المعدية.

-2الكشف عن الطفرات.

-3الطب العدلي.

-4البحوث العلمية.



الشكل (16): خطوات تفاعل البوليميراز المتسلسل ((PCR.

2. تفاعل البوليميراز المتسلسل الآني ((Real-Time PCR

يتميز بإمكانية قياس كمية الحمض النووي أثناء عملية التضخيم، ويستخدم في:

1-تقدير الحمل الفيروسي.

2-قياس مستوى التعبير الجيني.

3-تشخيص الأمراض بدقة عالية.

3. التسلسل الجيني ((Next-Generation Sequencing - NGS

أتاحت هذه التقنية قراءة ملايين المقاطع الوراثية في وقت واحد، وأسهمت في:

1-تحليل الجينوم الكامل.

2-اكتشاف الطفرات.

3-دراسة الميكروبيوم.

4-تشخيص الأمراض الوراثية والسرطانية.

4. تقنية CRISPR-Cas9

تُعد من أحدث تقنيات تحرير الجينات، وتعتمد على توجيه إنزيم Cas9 إلى موقع محدد في DNA لإحداث تعديل دقيق (Du et al., 2026).

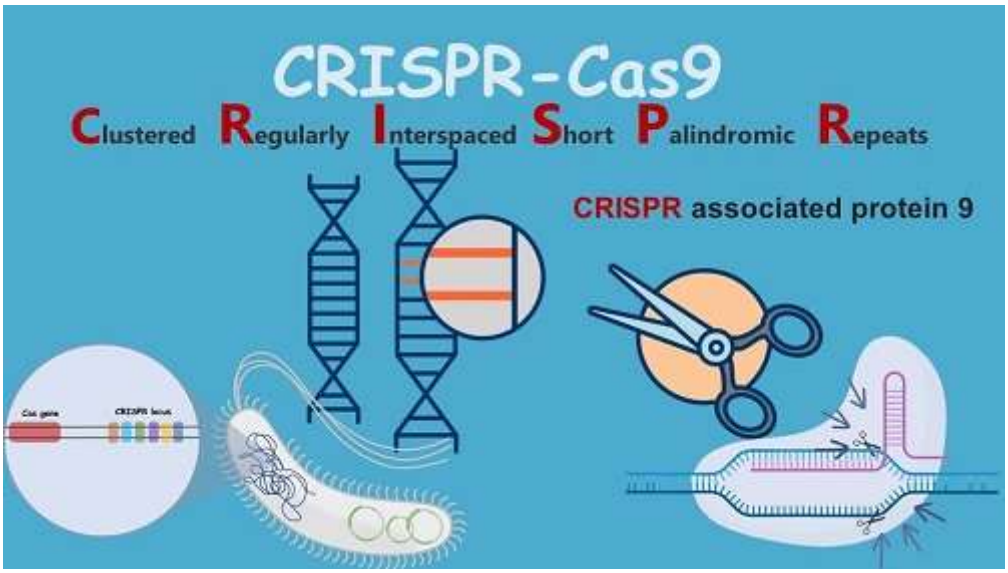
أهم التطبيقات:

-1تصحيح بعض الطفرات الوراثية.

-2تطوير نماذج حيوانية للأمراض.

-3تحسين المحاصيل الزراعية.

-4دراسة وظيفة الجينات.



الشكل (17): **آلية عمل تقنية CRISPR-Cas9.**

جدول (13): مقارنة بين أهم تقنيات الوراثة الجزيئية

التقنية	الاستخدام الرئيسي	أهم المزايا
PCR	تضخيم DNA	سريع وحساس
Real-Time PCR	قياس كمية DNA/RNA	دقة وقياس كمي
NGS	تسلسل الجينوم	إنتاجية عالية
CRISPR-Cas9	تحرير الجينات	تعديل دقيق للجينوم

خلاصة

أصبحت الوراثة الجزيئية حجر الأساس في فهم وظائف الجينات وآليات حدوث الأمراض، كما مهدت الطريق لتطوير تقنيات حديثة أحدثت ثورة في التشخيص والعلاج والبحث العلمي. ويُتوقع أن تستمر هذه التقنيات في إحداث تطورات كبيرة في مجالات الطب الشخصي، والعلاج الجيني، والتكنولوجيا الحيوية.

المبحث الثالث

التطبيقات العلمية للأحياء المجهرية والوراثة

(Scientific Applications of Microbiology and Genetics)

مقدمة

شهدت العقود الأخيرة تطورًا غير مسبوق في تطبيقات الأحياء المجهرية والوراثة، نتيجة التقدم في البيولوجيا الجزيئية والتكنولوجيا الحيوية وتقنيات تحليل الجينوم. وقد انعكس هذا التطور على العديد من المجالات، مثل الطب، والزراعة، والصناعة، والبيئة، والأمن الغذائي، والطب الشرعي، والطاقة الحيوية. ولم تعد الكائنات المجهرية تقتصر على كونها مسببات للأمراض أو عناصر في النظام البيئي، بل أصبحت أدوات رئيسية لإنتاج الأدوية واللقاحات والإنزيمات والمنتجات الصناعية، في حين أسهمت تطبيقات علم الوراثة في تحسين التشخيص والعلاج، وتطوير المحاصيل الزراعية، وفهم الأمراض الوراثية، والارتقاء بمستوى الرعاية الصحية.

أولًا: التطبيقات الطبية للأحياء المجهرية

تُعد التطبيقات الطبية من أهم المجالات التي استفادت من علم الأحياء المجهرية، إذ تعتمد المختبرات السريرية على الكائنات المجهرية وتقنيات البيولوجيا الجزيئية في تشخيص الأمراض ومتابعة العلاج والوقاية منها (Cruz et al., 2026).

1. التشخيص الميكروبيولوجي

يعتمد التشخيص على التعرف على العامل المسبب للمرض باستخدام وسائل متعددة، منها:

-1الفحص المجهري المباشر.

-2الزراعة الميكروبية على الأوساط الغذائية.

-3الاختبارات الكيميائية الحيوية.

-4الاختبارات المصلية.

-5التقنيات الجزيئية مثل PCR وReal-Time PCR.

وقد أسهمت هذه الوسائل في تقليل زمن التشخيص وزيادة دقته، مما ينعكس على تحسين رعاية المرضى.

2. إنتاج المضادات الحيوية

أحدث اكتشاف المضادات الحيوية ثورة في علاج الأمراض البكتيرية، إذ تُنتج العديد منها بواسطة الكائنات المجهرية، ومن أبرز الأمثلة:

الجدول (41) التطبيقات الطبية للأحياء المجهرية

الكائن المنتج	المضاد الحيوي
Penicillium chrysogenum	البنسلين
Streptomyces griseus	الستربتومايسين
Streptomyces aureofaciens	التتراسيكلين
Cephalosporium acremonium	السيفالوسبورينات

وتتطلب المحافظة على فعالية هذه الأدوية الاستخدام الرشيد لها للحد من تطور مقاومة المضادات الحيوية.

3. إنتاج اللقاحات

تعتمد اللقاحات الحديثة على تقنيات متعددة، مثل:

-1اللقاحات الحية المضعفة.

-2اللقاحات المعطلة.

-3اللقاحات البروتينية.

-4اللقاحات المعتمدة على النواقل الفيروسية.

-5لقاحات الحمض النووي الريبوزي الرسول ((mRNA.

وقد أسهمت هذه التقنيات في الوقاية من العديد من الأمراض المعدية وتقليل معدلات الوفيات.

4. التشخيص الجزيئي

أصبحت التقنيات الجزيئية جزءًا أساسيًا من المختبرات الطبية، وتشمل:

PCR-1.

Real-Time PCR-2.

3-التسلسل الجيني ((NGS.

4-تحليل الطفرات.

5-تحديد الأنماط الجينية للممرضات.

وتتميز هذه التقنيات بسرعة النتائج، والحساسية العالية، وإمكانية الكشف المبكر عن العدوى.

ثانيًا: التطبيقات الوراثية في الطب

1. الطب الشخصي ((Personalized Medicine

يعتمد الطب الشخصي على تحليل المعلومات الوراثية لكل مريض لاختيار العلاج الأنسب وتقليل الآثار الجانبية للأدوية، وهو من الاتجاهات الحديثة التي تسهم في تحسين جودة الرعاية الصحية (Sayers et al., 2024).

2. العلاج الجيني ((Gene Therapy

يهدف العلاج الجيني إلى إدخال نسخة سليمة من الجين أو تعديل الجين المعيب لعلاج بعض الأمراض الوراثية، وما زال هذا المجال يشهد تطورًا متسارعًا في العديد من الأمراض الوراثية وبعض أنواع السرطان (Organization, 2026).

3. الطب الشرعي

تُستخدم البصمة الوراثية (DNA Fingerprinting) في:

1-التعرف على هوية الأشخاص.

2-إثبات أو نفي النسب.

-3التعرف على ضحايا الكوارث.

-4التحقيقات الجنائية.

ثالثًا: التطبيقات الزراعية

أسهمت الأحياء المجهرية والوراثة في تطوير الزراعة الحديثة (Lowe et al., 2024)من خلال:

1. الأسمدة الحيوية

تستخدم بكتيريا مثل Rhizobium وAzotobacter لتثبيت النيتروجين وتحسين خصوبة التربة، مما يقلل من الاعتماد على الأسمدة الكيميائية.

2. المكافحة الحيوية

تُستخدم كائنات دقيقة نافعة للحد من الآفات والأمراض النباتية، مما يقلل استخدام المبيدات ويحافظ على البيئة.

3. تحسين المحاصيل وراثيًا

تُستخدم تقنيات الهندسة الوراثية لإنتاج نباتات تمتاز بـ:

-1مقاومة الآفات.

-2تحمل الجفاف والملوحة.

-3زيادة الإنتاجية.

-4تحسين القيمة الغذائية.

جدول (15): أهم التطبيقات الزراعية

التطبيق	الفائدة
الأسمدة الحيوية	زيادة خصوبة التربة
المكافحة الحيوية	تقليل استخدام المبيدات
الهندسة الوراثية	تحسين صفات المحاصيل

زراعة الأنسجة إكثار النباتات السليمة

رابعًا: التطبيقات الصناعية

تلعب الكائنات المجهرية دورًا رئيسيًا في الصناعة من خلال إنتاج:

-1الإنزيمات الصناعية.

-2الأحماض العضوية.

-3الفيتامينات.

-4الأحماض الأمينية.

-5البوليمرات الحيوية.

-6الوقود الحيوي.

وتتميز العمليات الحيوية بانخفاض استهلاك الطاقة وتقليل النفايات مقارنة بالطرق الكيميائية التقليدية (Fao, 2018).

خامسًا: التطبيقات البيئية للأحياء المجهرية

تؤدي الكائنات المجهرية دورًا محوريًا في حماية البيئة والمحافظة على التوازن البيئي، إذ تشارك في تحليل الملوثات العضوية، وإعادة تدوير العناصر الغذائية، وتنقية المياه، ومعالجة النفايات الصلبة والسائلة. وقد أدى التوسع الصناعي والزراعي إلى زيادة الاهتمام بتطبيقات الأحياء المجهرية في الحد من التلوث وتحقيق التنمية المستدامة (Citaristi, 2022).

1. المعالجة الحيوية ((Bioremediation

المعالجة الحيوية هي استخدام الكائنات المجهرية أو إنزيماتها لإزالة الملوثات من البيئة أو تحويلها إلى مركبات أقل سمية. وتعتمد هذه التقنية على قدرة بعض البكتيريا والفطريات على استهلاك الملوثات كمصدر للطاقة أو الكربون.

أهم التطبيقات:

-1إزالة التلوث النفطي من البحار والأنهار.

-2معالجة التربة الملوثة بالمبيدات.

-3التخلص من المذيبات العضوية.

-4إزالة بعض المعادن الثقيلة باستخدام الكائنات الدقيقة أو الطحالب.

2. معالجة مياه الصرف الصحي

تُستخدم البكتيريا الهوائية واللاهوائية في محطات المعالجة لتحليل المواد العضوية وخفض الحمل الميكروبي، مما يسهم في تحسين جودة المياه وتقليل الأثر البيئي.

3. إعادة تدوير المخلفات

تشارك الكائنات المجهرية في تحويل المخلفات العضوية إلى سماد عضوي (Compost)، وإنتاج الغاز الحيوي (Biogas)، مما يساهم في تقليل النفايات والاستفادة منها كمصدر للطاقة.

سادسًا: التكنولوجيا الحيوية ((Biotechnology

تعتمد التكنولوجيا الحيوية على توظيف الكائنات الحية أو مكوناتها لإنتاج منتجات أو خدمات ذات قيمة في الطب والزراعة والصناعة والبيئة (Raghavan et al., 2024).

التطبيقات الرئيسة

-1إنتاج البروتينات العلاجية مثل الإنسولين البشري.

-2إنتاج اللقاحات الحديثة.

-3تصنيع الإنزيمات الصناعية.

-4إنتاج الوقود الحيوي.

-5تطوير الأغذية الوظيفية ((Functional Foods.

-6تحسين السلالات الميكروبية المستخدمة في الصناعة.

سابعًا: الميكروبيوم والصحة

أظهرت الأبحاث الحديثة أن الميكروبيوم البشري يرتبط بصحة الإنسان بصورة وثيقة، إذ يسهم في:

-1تنظيم المناعة.

-2دعم عملية الهضم.

-3إنتاج بعض الفيتامينات.

-4الحد من نمو الممرضات.

وتشير الدراسات إلى أن اختلال توازن الميكروبيوم قد يرتبط بأمراض مثل السمنة، والسكري، وأمراض الأمعاء الالتهابية، وبعض الاضطرابات المناعية (Curtis et al., 2012).

ثامنًا: الطب الدقيق ((Precision Medicine

يعتمد الطب الدقيق على دمج المعلومات الوراثية والبيئية ونمط الحياة لتقديم تشخيص وعلاج يناسب كل مريض على حدة، بدلًا من تطبيق نهج علاجي موحد. وقد أسهمت تقنيات التسلسل الجيني وتحليل البيانات الحيوية في تعزيز هذا المجال، خاصة في علاج بعض أنواع السرطان والأمراض الوراثية (Cruz et al., 2026).

تاسعًا: أخلاقيات التطبيقات الوراثية

مع التطور السريع في الهندسة الوراثية وتحرير الجينات، برزت قضايا أخلاقية وقانونية تتطلب ضوابط واضحة (Vagneron & Kirchhelle, 2026)، ومن أهمها:

-1حماية خصوصية المعلومات الوراثية.

-2الحصول على الموافقة المستنيرة قبل إجراء الفحوص الجينية.

-3الاستخدام المسؤول لتقنيات تحرير الجينات.

-4منع التمييز على أساس المعلومات الوراثية.

-5الالتزام بالمعايير الوطنية والدولية في البحوث الحيوية.

عاشرًا: الاتجاهات المستقبلية

من المتوقع أن يشهد هذا المجال تطورًا متسارعًا خلال السنوات القادمة (Koca, 2023)، ومن أبرز الاتجاهات:

-1تطوير علاجات جينية أكثر دقة وأمانًا.

-2استخدام الذكاء الاصطناعي في تحليل البيانات الجينومية.

-3تصميم لقاحات مخصصة لبعض الأمراض.

-4تحسين إنتاج الغذاء باستخدام الكائنات المجهرية والهندسة الوراثية.

-5توسيع استخدام الميكروبات في إنتاج الطاقة الحيوية والمواد الصديقة للبيئة.

-6تطوير وسائل أسرع للكشف عن الأمراض المعدية والوراثية.

جدول (16): أبرز التطبيقات الحديثة للأحياء المجهرية والوراثة

المجال	التطبيق	الفائدة
الطب	التشخيص الجزيئي	كشف مبكر ودقة عالية
الطب	العلاج الجيني	تصحيح بعض الطفرات الوراثية
الزراعة	الأسمدة الحيوية	تحسين خصوبة التربة
الزراعة	المحاصيل المحسنة وراثيًا	زيادة الإنتاج ومقاومة الإجهاد
الصناعة	إنتاج الإنزيمات	تحسين العمليات الصناعية
البيئة	المعالجة الحيوية	إزالة الملوثات وحماية البيئة
الطاقة	الغاز الحيوي	مصدر متجدد للطاقة

خاتمة المبحث الثالث

أصبحت الأحياء المجهرية والوراثة من أهم ركائز العلوم الحياتية الحديثة، لما لهما من تطبيقات واسعة في الطب والزراعة والصناعة والبيئة. وقد أسهم التقدم في البيولوجيا الجزيئية والتكنولوجيا الحيوية في تحسين وسائل التشخيص والعلاج، وتطوير المنتجات الحيوية، وتعزيز الأمن الغذائي، ودعم جهود التنمية المستدامة. ومع استمرار تطور التقنيات الحديثة، من المتوقع أن تتوسع هذه التطبيقات بصورة أكبر، مع ضرورة الالتزام بالضوابط الأخلاقية والقانونية لضمان الاستخدام الآمن والمسؤول لهذه التقنيات.

خاتمة الفصل

يمثل علم الأحياء المجهرية والوراثة أحد أهم محاور العلوم الحياتية الحديثة، إذ أسهم في إحداث تطورات كبيرة في فهم تركيب الكائنات الحية ووظائفها وآليات انتقال الصفات الوراثية

والتفاعلات الحيوية داخل الخلية. كما أدى التقدم في البيولوجيا الجزيئية والتكنولوجيا الحيوية إلى توسيع نطاق تطبيقات هذا العلم ليشمل مجالات الطب والزراعة والصناعة والبيئة والأمن الغذائي.

وتبين من هذا الفصل أن الكائنات المجهرية لا تقتصر أهميتها على كونها مسببات للأمراض، بل تؤدي أدوارًا أساسية في تدوير العناصر الغذائية، وتحسين خصوبة التربة، ومعالجة الملوثات، وإنتاج المضادات الحيوية واللقاحات والإنزيمات والمنتجات الحيوية. وفي المقابل، أسهم علم الوراثة في تفسير انتقال الصفات، وفهم الأمراض الوراثية، وتطوير تقنيات التشخيص والعلاج الجيني، مما جعله أحد الركائز الأساسية للطب الحديث.

كما أبرز الفصل أهمية التقنيات الحديثة، مثل تفاعل البوليميراز المتسلسل (PCR)، والتسلسل الجيني عالي الإنتاجية (NGS)، وتقنية CRISPR-Cas9، في إحداث نقلة نوعية في البحث العلمي والتطبيقات الطبية والزراعية. ومن المتوقع أن تتوسع هذه التطبيقات مستقبلًا مع تطور علوم الجينوم، والميكروبيوم، والطب الدقيق، مع ضرورة الالتزام بالضوابط الأخلاقية والقانونية التي تضمن الاستخدام المسؤول لهذه التقنيات.

الاستنتاجات

1- تؤدي الأحياء المجهرية دورًا محوريًا في المحافظة على التوازن البيئي ودعم النظم الحيوية.

2- تُعد الكائنات المجهرية أساسًا لإنتاج العديد من المستحضرات الدوائية والغذائية والصناعية.

3- تمثل الجينات والكروموسومات الأساس العلمي لانتقال الصفات الوراثية بين الأجيال.

4- أسهمت الوراثة الجزيئية في تفسير أسباب العديد من الأمراض الوراثية والمكتسبة.

5- أصبحت التقنيات الجزيئية الحديثة أدوات رئيسية في التشخيص والعلاج والبحث العلمي.

6- عززت التكنولوجيا الحيوية من كفاءة الإنتاج الزراعي والصناعي مع تقليل الأثر البيئي.

7- يمثل التكامل بين الأحياء المجهرية والوراثة أساسًا لتطوير حلول مبتكرة في مجالات الصحة والبيئة والتنمية المستدامة.

التوصيات

1- دعم برامج البحث العلمي في مجالات الأحياء المجهرية والوراثة والتكنولوجيا الحيوية.

-2تحديث المناهج الجامعية لتشمل أحدث التقنيات الجزيئية وتطبيقاتها.

-3تعزيز التعاون بين الجامعات والمراكز البحثية والمؤسسات الصحية والصناعية.

-4التوسع في استخدام التقنيات الجزيئية في التشخيص المبكر للأمراض المعدية والوراثية.

-5تشجيع استخدام المعالجة الحيوية والأسمدة الحيوية للحد من التلوث البيئي.

-6وضع أطر تشريعية وأخلاقية لتنظيم استخدام تقنيات تحرير الجينات والعلاج الجيني.

-7زيادة الوعي المجتمعي بأهمية الفحوص الوراثية والوقاية من الأمراض الوراثية.

أسئلة للمراجعة

عرّف علم الأحياء المجهرية، واذكر أهم فروعه.

ما أهمية الكائنات المجهرية في البيئة والصناعة؟

وضّح قانوني مندل في الوراثة مع الأمثلة.

قارن بين الانقسام المتساوي والانقسام المنصف.

ما الفرق بين DNA وRNA من حيث التركيب والوظيفة؟

اشرح أنواع الطفرات الوراثية وأهم آثارها.

ما أهم تطبيقات تقنية PCR في المختبرات الطبية؟

ناقش دور تقنية CRISPR-Cas9 في العلاج الجيني.

كيف تسهم الأحياء المجهرية في معالجة التلوث البيئي؟

ناقش مستقبل تطبيقات الأحياء المجهرية والوراثة في ضوء التطورات الحديثة.

حالة سريرية (Clinical Case)

مثال

حالة سريرية

راجع رجل يبلغ من العمر 55 سنة المستشفى بسبب ارتفاع درجة الحرارة والسعال وضيق التنفس.

أظهر الفحص المختبري ما يلي:

- ارتفاع CRP
- ارتفاع عدد الكريات البيضاء
- زرع البلغم موجب لـ *Streptococcus pneumoniae*
- اختبار PCR موجب

أسئلة الحالة

1. ما الكائن المسبب؟
2. ما الاختبار التشخيصي الأدق؟
3. ما المضاد الحيوي المناسب؟
4. كيف يمكن الوقاية من هذه العدوى؟

ملخص الفصل (Chapter Summary)

تناول هذا الفصل التعريف بالأحياء المجهرية وتصنيفها وخصائصها، إضافة إلى نمو الكائنات الدقيقة والعوامل المؤثرة فيه، كما استعرض التطبيقات الطبية والزراعية والصناعية والبيئية، وأبرز التطورات الحديثة في التكنولوجيا الحيوية والوراثة الجزيئية.

أسئلة المراجعة (Review Questions)

1. عرف علم الأحياء المجهرية.
2. قارن بين بدائيات النوى وحقيقيات النوى.
3. ما مراحل نمو البكتيريا؟
4. ما العوامل المؤثرة في النمو؟
5. ما أهمية الأحياء المجهرية في الصناعة؟
6. اشرح تقنية PCR.
7. ما فوائد الهندسة الوراثية؟

8. عرف الميكروبيوم.

أسئلة اختيار من متعدد (MCQs)

1.أي الكائنات الآتية لا يعد خلية حية؟

A. Bacteria

B. Fungi

C. Virus

D. Protozoa

الإجابة الصحيحة:C

2. أين توجد المادة الوراثية في البكتيريا؟

A. Nucleus

B. Ribosome

C. Cytoplasm

D. Nucleoid

الإجابة:D

3. أي مرحلة يكون فيها معدل الانقسام أعلى؟

A. Lag phase

B. Log phase

C. Stationary phase

D. Death phase

الإجابة:B

4. أي تقنية تستخدم للكشف عن DNA؟

A. ELISA

B. PCR

C. Gram stain

D. Western blot

الإجابة:B

دراسة حالة (Case Study)

مثال

انتشرت عدوى غذائية بين 30 شخصًا بعد تناول وجبة جماعية.

أظهرت النتائج:

- إسهال شديد
- قيء
- حرارة مرتفعة
- نمو *Salmonella enterica* في الزرع.

المطلوب

1. تحديد العامل المسبب.
2. وصف طريقة انتقال العدوى.
3. اقتراح الفحوص المختبرية اللازمة.
4. اقتراح وسائل الوقاية.

المراجع الأساسية المقترحة

1. Alberts, B., Hopkin, K., Johnson, A. D., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2018). *Essential cell biology: Fifth international student edition*. WW Norton & Company.

2. Bautista, J., Echeverría, C. E., Maldonado-Noboa, I., Ojeda-Mosquera, S., Hidalgo-Tinoco, C., & López-Cortés, A. (2025). The human microbiome in clinical translation: from bench to bedside. *Frontiers in microbiology*, *16*, 1632435.

3. Biology, A. S. f. C. (2004). *Molecular biology of the cell* (Vol. 15). American Society for Cell Biology.

4. Brown, T. A. (2023). *Genomes 5*. CRC Press.

5. Brown, T. A. (2025). *Gene cloning and DNA analysis: an introduction*. John Wiley & Sons.

6. Cantelli, G., Bateman, A., Brooksbank, C., Petrov, A. I., Malik-Sheriff, R. S., Ide-Smith, M., Hermjakob, H., Flicek, P., Apweiler, R., & Birney, E. (2022). The european bioinformatics institute (EMBL-EBI) in 2021. *Nucleic Acids Research*, *50*(D1), D11-D19.

7. Cappuccino, J. (2018). *Microbiology a laboratory manual*. Pearson.

8. Citaristi, I. (2022). United nations environment programme—UNEP. In *The Europa directory of international organizations 2022* (pp. 193-199). Routledge.

9. Cruz, P., Kyle, J. L., Gold, D., Armour, P., & Durrani, T. S. (2026). Evaluation and Management of Exposure to Infectious Agents. *Handbook of Occupational Safety and Health*, 149-211.

10. Curtis, H., Blaser, M. J., Dirk, G., Kota, K. C., Rob, K., Liu, B., Wang, L., Sahar, A., White, J. R., & Badger, J. H. (2012). Structure, function and diversity of the healthy human microbiome. *Nature (London)*, *486*(7402), 207-214.

11. Denison, I., & Wauchope, S. (2024). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). In *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research* (pp. 7361-7366). Springer.

12. Denny, J. C. (2025). ENABLING A HEALTHIER FUTURE FOR ALL THROUGH PRECISION MEDICINE. *Transactions of the American Clinical and Climatological Association*, *135*, 60.

13. Du, S., Hu, X., Li, P., Xu, S., Kim, M., Liu, X., & Zhan, P. (2026). Antiviral drug discovery and development: challenges and future directions. *Signal transduction and targeted therapy*, *11*(1), 69.

14. Fao, F. (2018). Food and agriculture organization of the United Nations. *Rome, URL: http://faostat. fao. org*, *403*.

15. Forbes, B. A., Sahm, D. F., & Weissfeld, A. S. (2007). *Diagnostic microbiology*. Mosby St Louis.

16. Franks, P. W., Rich, S. S., Linder, B., Zaghloul, N. A., & Cefalu, W. T. (2025). A research roadmap to address the heterogeneity of diabetes and advance precision medicine. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, *110*(3), 601-610.

17. Gilbert, J. A., Blaser, M. J., Caporaso, J. G., Jansson, J. K., Lynch, S. V., & Knight, R. (2018). Current understanding of the human microbiome. *Nature medicine*, *24*(4), 392-400.

18. Glick, B. R., & Patten, C. L. (2022). *Molecular biotechnology: principles and applications of recombinant DNA*. John Wiley & Sons.

19. Kaçar, B. (2024). Reconstructing early microbial life. *Annual Review of Microbiology*, *78*(1), 463-492.

20. Koca, Ö. (2023). The laboratory diagnosis of Chlamydia infections. *Chlamydia-Secret Enemy From Past to Present*, *31*.

21. Koolaee, M. (2026). *Microbiology & Immunology Case Reports-E-BOOK: Microbiology & Immunology Case Reports-E-BOOK*. Elsevier Health Sciences.

22. Lowe, C., Minssen, T., & Skentelbery, C. (2024). Emerging Biotechnologies in Europe: Foresight for Policy. *Joint Research Centre: Brussels, Belgium*.

23. Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (1997). *Brock biology of microorganisms* (Vol. 11). Prentice hall Upper Saddle River, NJ.

24. Manolio, T. A., Narula, J., Rupert, A., Bult, C. J., Chisholm, R. L., Ginsburg, G. S., Green, E. D., Hooker, G., Jarvik, G. P., & Mensah, G. A. (2024). Genomic medicine year in review: 2024. *The American Journal of Human Genetics*, *111*(12), 2585-2588.

25. Mekouar, M. A. (2023). Food and agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Yearbook of International Environmental Law*, *34*(1), yvae031.

26. Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2022). *Princípios de bioquímica de Lehninger*. Artmed Editora.

27. Nelson, D. L., Lehninger, A. L., & Cox, M. M. (2008). *Lehninger principles of biochemistry*. Macmillan.

28. Organization, W. H. (2023). *Antimicrobial resistance surveillance in Europe 2023–2021 data*. European Centre for Disease Prevention and Control and World Health ….

29. Organization, W. H. (2025). Human genomics technologies in clinical trials: the research landscape: report on the 1990-2024 period.

30. Organization, W. H. (2026). *Launch of Volume 20 of the International Agency for Research on Cancer Handbooks of Cancer Prevention: meeting report, 14 October 2025*.

31. Phillip, A. (2026). The Role of Artificial Intelligence in Modern Biotechnology: A Comprehensive Review. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, *13*(1), 1899-1921.

32. Pierce, B. A. (2012). *Genetics: a conceptual approach*. Macmillan.

33. Qu, H.-Q., Kao, C., & Hakonarson, H. (2024). Single-cell RNA sequencing technology landscape in 2023. *Stem Cells*, *42*(1), 1-12.

34. Raghavan, A., Pirruccello, J. P., Ellinor, P. T., & Lindsay, M. E. (2024). Using genomics to identify novel therapeutic targets for aortic disease. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology*, *44*(2), 334-351.

35. Ray, C. G., & Ryan, K. J. (2014). *Sherris medical microbiology*. McGraw-Hill Education/Medical New York, NY, USA.

36. Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Jackson, R. B. (2014). *Campbell biology* (Vol. 9). Pearson Boston.

37. Sayers, E. W., Beck, J., Bolton, E. E., Brister, J. R., Chan, J., Comeau, D. C., Connor, R., DiCuccio, M., Farrell, C. M., & Feldgarden, M. (2024). Database resources of the national center for biotechnology information. *Nucleic Acids Research*, *52*(D1), D33-D43.

38. Sayers, E. W., Beck, J., Bolton, E. E., Brister, J. R., Chan, J., Connor, R., Feldgarden, M., Fine, A. M., Funk, K., & Hoffman, J. (2025). Database resources of the National Center for Biotechnology Information in 2025. *Nucleic Acids Research*, *53*(D1), D20-D29.

39. Siboni, B. (2023). United Nations Environment Program (UNEP). In *Encyclopedia of Sustainable Management* (pp. 3840-3843). Springer.

40. Tortora, G., Tortora, G. J., Funke, B. R., Case, C. L., Weber, D., & Bair, W. B. (2024). *Microbiology: an introduction*. BoD–Books on Demand.

41. Vagneron, F., & Kirchhelle, C. (2026). Culture, Codes, Communities: Culture Collections' Transformation from Microbial Palaces to Networked Services (1890–1972). *Journal of the History of Biology*, *59*(1), 51-90.

42. Wang, B., Kes, M. B., van Saparoea, A. C. v. d. B., Dugar, G., Luirink, J., & Hamoen, L. W. (2024). Inactivation of the conserved protease LonA increases production of xylanase and amylase in Bacillus subtilis. *Microbial Cell Factories*, *23*(1), 335.

43. Watson, J. D. (2004). *Molecular biology of the gene*. 東京電機大学出版局.

44. Willey, J. M., Sherwood, L., & Woolverton, C. J. (2011). *Prescott's microbiology* (Vol. 7). McGraw-Hill New York.

قراءات إضافية (Suggested Reading)

45. Prescott's Microbiology.

46. Brock Biology of Microorganisms.

47. Jawetz, Melnick & Adelberg's Medical Microbiology.

48. Molecular Biology of the Gene.

49. Lewin's Genes XII.

50. Thompson & Thompson Genetics and Genomics in Medicine.

51. Medical Genetics.

52. مقالات مراجعة حديثة من دوريات **Nature Reviews Genetics** و **Nature Reviews Microbiology** و**The Lancet Microbe** و(2020–2026) **Cell**.

الفصل الرابع

الأحياء المجهرية والوراثة

Microbiology and Genetics

م.د. وداد سمير جعاز
جامعة كربلاء - العراق

الملخص

يتناول الفصل الأحياء المجهرية والوراثة بوصفهما مجالين متكاملين في تفسير تنوع الحياة ووظائفها وانتقال صفاتها. ويبدأ بتعريف الأحياء المجهرية وفئاتها وخصائصها الأساسية، ثم يعرض أدوارها في البيئة ودورات المادة والعلاقات مع الإنسان والحيوان والنبات. وتوضح المعالجة التمييز بين تأثيرات الكائنات الدقيقة النافعة والضارة، وبين وجودها في الوسط والوظائف التي تؤديها ضمن منظومة حيوية أوسع.

ويعرض الفصل المادة الوراثية والجينات والكروموسومات وآليات انتقال الصفات، مع شرح المبادئ التي تربط البنية الجزيئية بالتعبير والوظيفة. كما يناقش التنوع الوراثي والطفرات وتفاعل العوامل الجينية مع البيئة، مستعينًا بالأمثلة والرسوم والجداول لتقريب العلاقات الأساسية. ويصل هذا العرض بين المستوى الخلوي ومستوى الكائن، ويبين كيف توفر الوراثة أدوات لفهم التشابه والاختلاف والقدرة على التكيف.

ويتناول الفصل تطبيقات الأحياء المجهرية والوراثة في المجالات الصحية والزراعية والصناعية والبيئية، ومن بينها التقنيات الجزيئية والتكنولوجيا الحيوية التي يوردها المصدر. وتبرز المناقشة أهمية الانتقال من المعرفة إلى التطبيق وفق ضوابط للتحقق والسلامة والمسؤولية، لا بمجرد توافر الأداة. وتخلص المعالجة إلى أن التكامل بين المجالين يوسع تفسير العمليات الحيوية ويفتح مسارات للاستفادة منها، مع إبقاء حدود كل مثال وتقنية واضحة. وتتمثل المساهمة في تقديم عرض علمي تعليمي منظم للمفاهيم والعلاقات والتطبيقات، وليس في تقرير تجربة مستقلة تجمع جميع المجالات التي يستعرضها الفصل أو في إضافة نتائج لم ترد في مادته.

الكلمات المفتاحية: الأحياء المجهرية؛ الوراثة؛ التنوع الوراثي؛ التكنولوجيا الحيوية؛ التطبيقات البيئية

Abstract

This chapter examines microbiology and genetics as complementary fields for explaining biological diversity, function, and inheritance. It introduces microorganisms, their principal groups, and basic characteristics, then considers environmental roles, material cycles, and relationships with humans, animals, and plants. Beneficial and harmful effects are distinguished, as are the presence of organisms in an environment and the functions they perform within a wider biological system.

Genetic material, genes, chromosomes, and transmission of characteristics are discussed through principles connecting molecular structure with expression and function. Genetic diversity, mutation, and interactions between genes and environment are explained using examples, illustrations, and tables. This account connects cellular and organismal levels and shows how genetics provides tools for understanding similarity, variation, and adaptation.

The chapter reviews health, agricultural, industrial, and environmental applications, including the molecular techniques and biotechnological approaches described in the source. It emphasizes that movement from knowledge to application requires verification, safety, and responsibility rather than access to a tool alone. The concluding discussion presents integration between microbiology and genetics as a means of widening explanations of living processes and identifying useful applications while preserving the limits of particular examples and techniques. The contribution is an organized scientific and educational overview of concepts, relationships, and uses. It does not report an independent experiment encompassing every field reviewed or add results not contained in the submitted material.

Keywords: Microbiology; Genetics; Genetic diversity; Biotechnology; Environmental applications

المقدمة (Introduction):

يشهد علم الأحياء المجهرية الحالي والوراثة الجزيئية تكاملا ملفت وغير مسبوق يقود الثورات البيولوجية الحديثة في مجالات الأمن الحيوي، الهندسة البيئية، والاستدامة الطبية وذلك لان الكائنات المجهرية الدقيقة (البكتيريا، الفيروسات، الفطريات، الأوليات، الطحالب، والآرجيا) الحجر الأساس لتوازن النظام البيئي واستمرارية الحياة على كوكب الأرض، نظراً لخصائصها التركيبية والوظائف الأيضية المتنوعة التي تتميز بها. (Madigan et al., 2021; Tortora et al., 2023)

تقوم الأحياء المجهرية بتأدية دورا جوهري في دوران وحركة العناصر الكيميائية الأساسية للحياة من خلال ما يعرف بالدورات البيوجيوكيميائية، حيث تساهم في تثبيت الكربون والنيتروجين، وتحويل الكبريت والفوسفور إلى أشكال حيوية قابلة لامتصاص النباتات والكيانات الحية الأخرى (Atlas & Bartha, 2020; Martinez & Zhao, 2023; Baker et al., 2020)

ان ألاحياء المجهرية في الحقول التطبيقية تتجلى في البيئة من خلال تقنيات المعالجة الحيوية (Bioremediation) واستخدام عمليات الأيض الميكروبي لتفكيك الملوثات العضوية والسموم والتخلص من المخلفات الصناعية والبترولية، مما يعزز قدرة البيئة على التعافي. (Metting, 2020; Smith & Johnson, 2024; Omer et al., 2026)

كذلك تؤثر الاحياء المجهرية الدقيقة بشكل مباشر على الصحة العامة وصحة الكائنات الحية والتوازن المناخي التناغمي، مما يجعل فهم بيئتها ووظائفها دعامة أساسية للأمن الحيوي وحماية التنوع البيولوجي.(Gaston, 2021; Watson et al., 2020; Patel et al., 2024)

يهدف هذا الفصل إلى تقديم دراسة لربط المفاهيم النظرية الكلاسيكية بالمسارات التطبيقية والاكتشافات الحديثة في مجالات الأمن الحيوي،الهندسة البيئية، والاستدامة الطبية والصناعية.

المبحث الأول: الأحياء المجهرية ودورها في البيئة والحياة

Microorganisms and Their Role in the Environment and Life

15-1-1مقدمة عامة في علم الأحياء المجهرية البيئية

الأحياء المجهرية (Microorganisms) هي كائنات صغيرة الحجم، من غير الممكن رؤيتها بالعين المجردة بدون استخدام المجهر. وهو من أقدم الأنظمة البيولوجية الحية حيث تتضمن مجاميع متباينة من الكائنات الحية منها البكتيريا، والفيروسات، والفطريات المجهرية، والطفيليات الأولية (البروتوزوا)، والطحالب المجهرية، وطائفة الآركيا (البدائيات الحقيقية) جدول رقم (15-1). ويسمى العلم الذي يدرس هذه الكائنات الحية اسم علم الأحياء المجهرية (Microbiology) (Madigan et al., 2021;Gaston, 2021).

تعد الأحياء المجهرية من أقدم الكائنات الحية الموجودة على سطح الأرض، حيثان تاريخ تواجدها التطوري يمتد إلى أكثر من 3.5 مليار عام(Madigan et al., 2021).. وذلك لمقدرتها الكبيرةعلى التكيف مع مختلف الظروف البيئية الغير ملائمة مثل المناطق القطبية المتجمدة الينابيع الساخنة، أعماق البحار، (Madigan et al., 2021; Al-Khafaji et al., 2025)

يضم هذا النظام مجاميع متباينة في التنظيم الخلوي والمسارات الأيضية تنقسم إلى كائنات بدائية النواة، وحقيقية النواة، وعوامل لا خلوية.

الجدول (15-1): الخصائص الخلوية للمجاميع الميكروبية

المجاميع الميكروبية	النمط الخلوي	التركيب المميز للجدار الخلوي	نمط التغذية والتكاثر
البكتيريا (Bacteria)	بدائية النواة (Prokaryotes)	يحتوي على مادة الببتيدوغليكان (Peptidoglycan)	ذاتية أو غير ذاتية، تتكاثر بالانشطار الثنائي.
الفيروسات (Viruses)	لا خلوية (Acellular)	قفيصة بروتينية (Capsid) وغلاف دهني أحياناً	طفيلية إجبارية داخل خلايا العائل.

الفطريات (Fungi)	حقيقية النواة (Eukaryotes)	يتكون من مادة الكايتين (Chitin)	غير ذاتية (امتصاصية)، تتكاثر بالتجرثم أو التبرعم.
البروتوزوا (Protozoa)	حقيقية النواة (Eukaryotes)	تفتقر للجدار الصلب (تحتوي على أغشية حركة)	غير ذاتية (بالابتلاع/الامتصاص)، تتغذى على الأنسجة أو المواد العضوية.
الطحالب (Microalgae)	حقيقية النواة (Eukaryotes)	جدار سليلوزي مع مركبات بكتينية	ذاتية التغذية بواسطة البناء الضوئي.
الآرجيا (Archaea)	بدائية النواة (Prokaryotes)	يفتقر للببتيدوغليكان الحقيقي، ذو أغشية إيثيرية	ذاتية/غير ذاتية، متكيفة مع البيئات القاسية.

15-1-2تصنيف الأحياء المجهرية وخصائصها

1- البكتيريا (Bacteria)

البكتيريا كائنات حية وحيدة الخلية بدائية النواة (Prokaryotes)، تكون المادة الوراثية لها غير محاطة بغلاف نووي، ولاتحوي على عضيات محاطة بأغشية مثل الميتوكندريا. يتراوح حجم الخلية بين واحد وعشرة ميكرومترات، أشكالها متعددة منها الكروي، والعصوي، واللولبي. الخلية البكتيرية محاطة بجدار خلوي يحتوي على مادة ببتيدوغليكان (Peptidoglycan)، وهي صفة تستخدم في تصنيف نوع البكتريا إلى بكتيريا موجبة الجرام وأخرى سالبة الجرام. تتكاثر البكتيريا بالانشطار الثنائي (Binary fission)،تتم هذه العملية كل عشرين دقيقة في الظروف الملائمة، وهذا يدل على قدرتها العالية على التكاثر. تختلف طرق تغذية البكتيريا الى ذاتية التغذية (كالبكتيريا الكبريتية والبكتيريا الزرقاء التي تقوم بالتمثيل الضوئي) وغير ذاتية التغذية التي تعتمد على مواد عضوية جاهزة، سواء كانت مترممة تتغذى على بقايا الكائنات الميتة، أو متطفلة تعيش على حساب عائل حي وقد تسبب له المرض.(Madigan et al., 2021).

2- الفيروسات (Viruses)

الفيروسات هي عوامل بيولوجية تفتقر للتركيب الخلوي، لا تقوم بأي نشاط أيضي مستقل، ولا يمكنها التكاثر إلا داخل خلية عائل حي تستغل مكوناتها. يتكون الفيروس من حامض نووي واحد فقط (DNA أو RNA) يكون محاط بغلاف بروتيني يدعى القفيصة (Capsid)، يحاط في

بعض الأنواع بغلاف دهني إضافي مشتق من غشاء الخلية المضيفة. الية عمله تتضمن الالتصاق بمستقبِلات نوعية على سطوح الخلايا العائلة، ثم تنتقل لها مادتها الوراثية ، وتستخدم الفايروسات محتويات الخلية لتصنيع نسخ جديدة منها، تحرر هذه النسخ عندما تتحلل الخلية أو عن طريق التبرعم منها. من الأمراض الفيروسية التي تصيب الإنسان الإنفلونزا، ونزلات البرد، والحصبة، والتهاب الكبد الفيروسي، وكوفيد-19 الناجم عن فيروس كورونا المستجد (SARS-CoV-2) (Krupovic et al., 2021).

3-الفطريات المجهرية (Microscopic Fungi)

تشمل الفطريات الاعفان (Molds) متعدد الخلايا وكذلك الخمائر (Yeasts) وحيدة الخلية ، وهي كائنات حية حقيقية النواة ذات جدار خلوي مكوّن من مادة الكايتين (Chitin). تغذية الفطريات تغذية غير ذاتية بواسطة إفراز الانزيمات الهاضمة خارج الخلية ثم امتصاص نواتج الهضم، وتتكاثر بطرق متنوعة تشمل التجرثم الجنسي واللاجنسي والتبرعم. تلعب الفطريات دور مزدوج فقد تكون نافعة كما في الفطريات المستخدمة في صناعة المضادات الحيوية كالبنسلين المستخرج من فطر البنسيليوم وفي الصناعات الغذائية مثل صناعة المخبوزات والاجبان، وانواع الأخرى ممرضة قد تسبب أمراض جلدية اوتنفسية للإنسان، وبعضها يسبب تلف المحاصيل الزراعية والمواد الغذائية المخزنة ((Naranjo-Ortiz & Gabaldón, 2020.

4- الطفيليات الأولية البروتوزوا (Protozoa)

تعرف الطفيليات الأولية بانها كائنات وحيدة الخلية حقيقية النواة، غالبا ما تعيش في بيئات رطبة أو مائية، وتكون تغذيتها غير ذاتية اما عن طريق الامتصاص او بالابتلاع. اما حركتها فتكون متنوعة عن طريق الأقدام الكاذبة أو الأهداب، والأسواط، ومن أمثلتها البراميسيوم والأميبا، ، وطفيلي الليشمانيا المسبب لمرض الليشمانيا الجلدي والحشوي وأيضا طفيلي الملاريا الذي ينتقل عبر لدغة بعوضة الأنوفيليس((Yaeger & Broadbent, 2020.

5-الطحالب المجهرية (Microalgae)

هي كائنات حية ذاتية التغذية تقوم بعملية البناء الضوئي لاحتوائها صبغة الكلوروفيل، الطحالب تعيش في المسطحات المائية العذبة والمالحة. تُعَدّ الطحالب، وعلى رأسها العوالق

النباتية(Phytoplankton) ، المسؤولة عن إنتاج نسبة كبيرة من الأوكسجين، وهي من اساسيات السلسلة الغذائية في الأنظمة البيئية المائية (Metting, 2020).

6- البدائيات الحقيقية (Archaea)

مجموعة من الكائنات الحية تكون وحيدة الخلية وبدائية النواة، الشكل الخارجي تشبه البكتيريا الا انها تختلف عنها في التركيب الكيميائي بالنسبة للجدار الخلوي والاغشية وكذلك طريقة التعبير الجيني. تشتهر الآرجيا بقدرتها على التكييف والعيش في بيئة صعبة الظروف والبحيرات شديدة الملوحة والينابيع الحارة، والأعماق البحرية عالية الضغط(Baker et al., 2020).

تلعب الاحياء المجهرية دوراً محورياً في استدامة الأنظمة البيئية من خلال تفاعلاتها المعقدة مع محيطها من المكونات الحية وغير الحية (Omer et al., 2026). ومن خلال الأبحاث العلمية والمراجع الأكاديمية العالمية، يتضح أن هذه العمليات تمثل الركيزة الأساسية للتطور الحياتي المستمر والتحولات البيئية المستدامة . (Watson et al., 2020; Smith & Johnson, 2024)

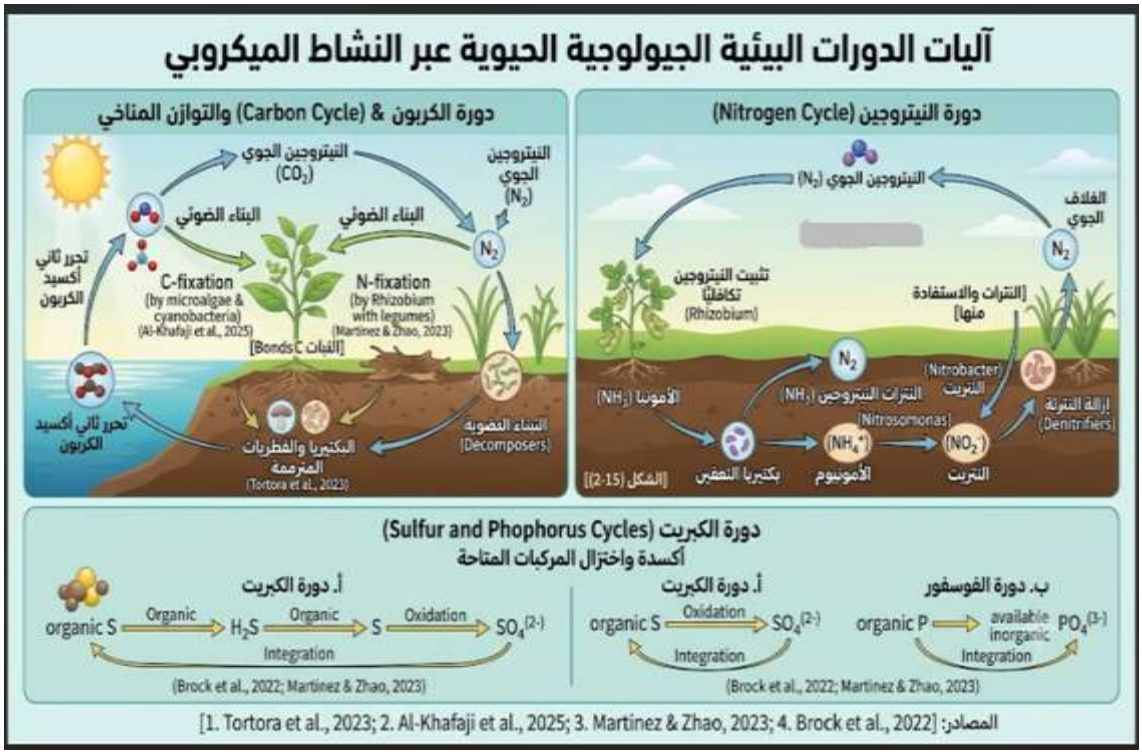
دور الأحياء المجهرية في الدورات البيوجيوكيميائية والاستدامة البيئية

تؤدي الأحياء المجهرية أدوار مهمة في استمرار الحياة على الأرض، حيث تضطلع بمهمة تدوير العناصر الحيوية الأساسية بين الكائنات الحية والبيئة غير الحية،حيث ان المسارات الأيضية للاحياء المجهرية هي التي تتحكم فيحركات العناصر الأساسية كما في دورة الكربون ودورة النيتروجين التي تعتمد بصورة رئيسية على نشاط الاحياء المجهرية . (Atlas & Bartha, 2020)

- دورة الكربون (Carbon Cycle): ترتبط دورة الكربون بشكل وثيق بالتوازن المناخي العالمي. حيث تقوم البكتيريا والفطريات المترممة (Decomposers) بتحلل الحيوانات الميتة وبقايا النباتات فتحرر ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي حتى يعاد استخدامه في عملية البناء الضوئي(Tortora et al., 2023). كما تسهم الطحالب المجهرية والبكتيريا الزرقاء في تثبيت الكربون عبر البناء الضوئي (Al-Khafaji et al., 2025)

• دورة النيتروجين (Nitrogen Cycle): تقوم البكتيريا مثل جنس الريزوبيوم (Rhizobium) بتثبيت النيتروجين حيث يعيش بشكل تكافلي مع النباتات البقولية وتحول غاز النيتروجين الجوي الخامل إلى صورة الأمونيا التي يمكن للنبات امتصاصها، بينما تقوم بكتيريا التعفين والنترتة بإنتاج النترات عن بتحويل المركبات النيتروجينية العضوية إلى نترات يستفيد منها النبات، وتقوم بكتيريا أخرى بعملية إزالة النترتة لإعادة النيتروجين إلى الغلاف الجوي (Martinez & Zhao, 2023) كما في الشكل (15-2).

• دورة الكبريت والفوسفور (Sulfur and Phosphorus Cycles): تسهم مجموعات متخصصة من البكتيريا في أكسدة واختزال مركبات الكبريت والفوسفور العضوية وغير العضوية، مما يجعل هذه العناصر متاحة للكائنات الأخرى (Brock et al., 2022; Martinez & Zhao, 2023)



• **المعالجة الحيوية ((Bioremediation والميكروبيوم (Microbiome):**

هناك أنواع من البكتريا والفطريات لها القدرة على تحليل الملوثات النفطية والمبيدات الكيميائية والمبيدات الكيميائية ومركبات المعادن الثقيلة، بوصفها بديلاً بيئي آمن عن الطرق الكيميائية الفيزيائية المكلفة في تنظيف التربة والمياه الملوثة.

بالإضافة لكون الميكروبيوم المعوي الموجود عند الإنسان يساهم بفاعلية في هضم بعض الأغذية وفي تنظيم جهاز المناعة، بحيث انه عند حدوث أي خلل في توازنه (Dysbiosis) يرتبط بأمراض استقلابية ومناعية.وهو مجموعة الأحياء المجهرية المرتبطة بكائن حي معين او التي تعيش في بيئة معينة، سواء في التربة أو المسطحات المائية أو داخل جسم الإنسان أو الحيوان (Zhang et al., 2024). فقد بيّنت مراجعات علمية حديثة أن الميكروبيوم المعوي الموجود عند الإنسان يساهم بفاعلية في هضم بعض الاغذية وفي تنظيم جهاز المناعة عبر التوازن بين الاستجابة المناعية والالتهاب (Patel et al., 2024). وحدوث أي خلل في توازنه (Dysbiosis) يرتبط بأمراض استقلابية ومناعية عديدة كالسمنة والسكري وأمراض الأمعاء الالتهابية مما يجعل دراسة الميكروبيوم مجال حيوي من مجالات البحث في علم الأحياء المجهرية المعاصر، ويفتح افق علاجية جديدة قائمة على اصلاح وتعديل التركيب الميكروبي عبر البروبيوتيك أو زراعة الميكروبيوت البرازي.

ان التحلل وإعادة تدوير المادة العضوية بتكسير الجزيئات المعقدة إلى مركبات بسيطة يمكن للنباتات إعادة استخدامها، يغلق حلقة تدفق المادة في النظام البيئي وبدونه ستتراكم بقايا الكائنات الميتة إلى ما لا نهاية

المبحث الثاني: الوراثة وانتقال الصفات في الأحياء المجهرية

أولا **:الوراثة**

يعتبر علم الوراثة (*Genetics*) أحد أهم فروع علم الأحياء الحديث، وهو العلم الذي يدرس كيفية انتقال الصفات البيولوجية من الآباء إلى الأبناء عبر الأجيال، والآليات الجزيئية المسؤولة عن ذلك وتفسير التشابه والاختلاف بين الكائنات الحية

(Afzaal et al., 2022; Fan & Pedersen, 2020-2024). ويقوم هذا العلم على عدد من المفاهيم الأساسية التي لابد من إتقانها قبل الخوض في تفصيلاته

المفاهيم الأساسية في علم الوراثة:

- الصفة الوراثية (Trait) هي خاصية يمكن ملاحظتها أو قياسها في الكائن الحي، مثل لون العينين أو طول الساق أو فصيلة الدم. هذه الصفات تُعد انعكاسًا مباشرًا للتعبير الجيني، وهي الأساس الذي يُبنى عليه علم الوراثة التطبيقي (Smith, 2025).
- أما الجين (Gene) فهو وحدة الوراثة الأساسية، وهو جزء من جزيء الحمض النووي (DNA) يحمل الشيفرة اللازمة لتصنيع بروتين معين أو للتحكم في صفة محددة. الجينات هي التي تحدد السمات الموروثة وتوجه العمليات الحيوية داخل الخلية (Johnson, 2024).
- الكروموسوم (Chromosome) يمثل بنية خيطية توجد داخل نواة الخلية، ويتكون من DNA ملتف حول بروتينات الهستون، ويحمل عددًا كبيرًا من الجينات مرتبة على طوله. يمتلك الإنسان 46 كروموسومًا (23 زوجًا) في كل خلية جسدية، وهي المسؤولة عن تنظيم انتقال الصفات عبر الأجيال (Brown, 2023).
- المورّثة والأليل (Allele) هما الصور البديلة للجين نفسه، وتشغل الأليلات الموقع نفسه على الكروموسوم المتماثل، وقد تكون متماثلة أو مختلفة. هذا التنوع في الأليلات هو ما يفسر الاختلافات الفردية بين الكائنات الحية (Davis, 2025).
- النمط الجيني والنمط الظاهري (Genotype & Phenotype) يمثلان جانبين متكاملين؛ فالنمط الجيني هو التركيب الوراثي للأليلات التي يحملها الفرد، بينما النمط الظاهري هو المظهر الفعلي الناتج عن التعبير عن ذلك التركيب، متأثرًا أحيانًا بالبيئة (Wilson, 2024).
- التماثل والتخالف اللاقح (Homozygous & Heterozygous) يصفان طبيعة الأليلات التي يحملها الفرد؛ فإذا كان يحمل أليلين متماثلين لصفة ما فهو متماثل اللواقح، أما إذا كان يحمل أليلين مختلفين فهو متخالف اللواقح، وهذه الحالة تُعد أساسًا للتنوع الوراثي (Taylor, 2025).

ثانيًا: تركيب الحامض النووي ووظيفته

يعد الحامض النووي منقوص الأكسجين (Deoxyribonucleic Acid – DNA) الجزيء الذي يحمل المعلومات الوراثية في جميع الكائنات الحية. توصّل العالمان جيمس واطسون وفرانسيس كريك عام 1953، بالاستناد إلى صور الأشعة السينية التي التقطتها روزاليند

فرانكلين، إلى النموذج الشهير المعروف باللولب المزدوج (Double Helix)، الذي يصف جزيء DNA بوصفه شريطين ملتفَّين حول بعضهما، مكوَّنين من وحدات متكررة تسمى النيوكليوتيدات (Watson & Crick, 1953; Franklin, 1953).

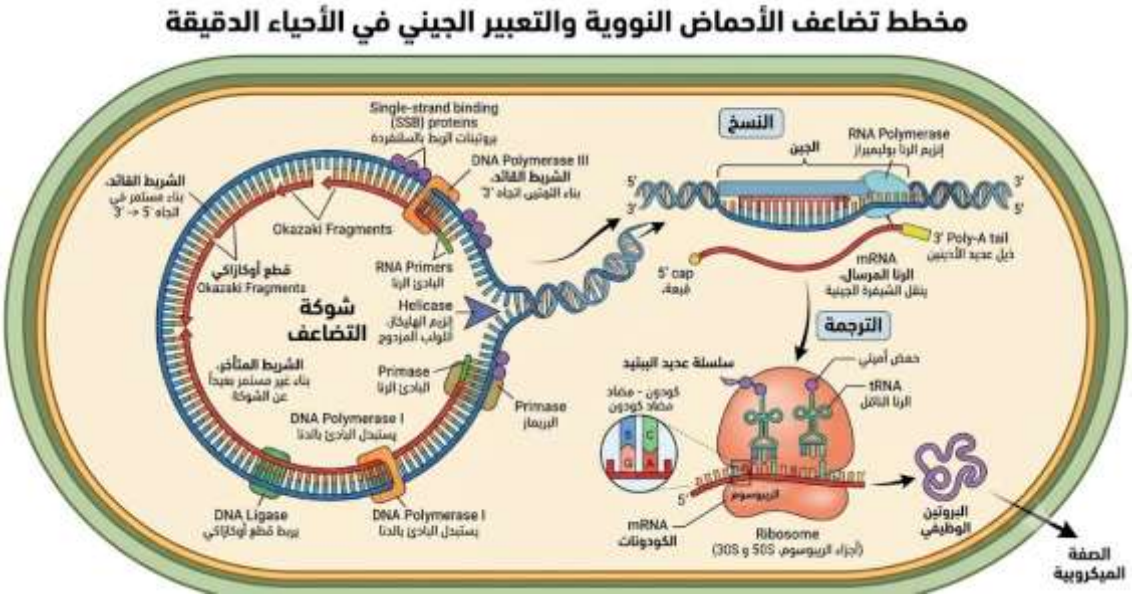
كل نيوكليوتيدة تتكون من أجزاء ثلاثة: سكر خماسي الكربون (ديوكسي ريبوز)، وقاعدة نيتروجينية ومجموعة فوسفات تتالف القواعد النيتروجينية من أربع قواعد هي: الأدنين (A) والثايمين (T) والغوانين (G) والسيتوزين (C). وترتبط القواعد ببعضها بروابط هيدروجينية : الأدنين مع الثايمين، والغوانين مع السيتوزين، من هنا تظهر قدرة الجزيء على التضاعف الذاتي بدقة عالية أثناء انقسام الخلية .(Alberts, 2022)

كذلك نلاحظ ان الحامض النووي الريبوزي (RNA) يشبه DNA في تركيبه الا انه يختلف عنه في كون السكر الرايبوزي بدل الديوكسي ريبوز، وكذلك احتوائه قاعدة اليوراسيل (U) بدل من قاعدة الثايمين، بالإضافة لكونه في الغالب شريط واحد. ويضم الحامض النووي الريبوزي المرسال (mRNA) الذي ينقل الشيفرة من النواة إلى الريبوسومات، والحامض الناقل (tRNA)، والحامض الريبوسومي (rRNA). وهذه تشارك في عملية التعبير الجيني التي تتم عبر خطوتين متتاليتين هما النسخ (Transcription) الذي ينتج عنه mRNA من DNA، والترجمة (Translation) التي يصنع فيها البروتين على الريبوسومات بالاعتماد على شفرة mRNAة (Lewin, 2021; Lodish et al., 2021).

ان الوراثة في الأحياء الدقيقة عبارة عن تضاعف DNA في البكتيريا يتم بسرعة بفضل إنزيمات مثل DNA polymerase، بينما النسخ يعتمد على RNA polymerase الذي يترجم التعليمات الجينية إلى رسائل RNA. أما الترجمة فتتم عبر الريبوسومات التي تنتج البروتينات المسؤولة عن الصفات الميكروبية. تمتلك الأحياء الدقيقة ميزة فريدة وهي النقل الأفقي للجينات، حيث يمكن للبكتيريا أن تتبادل جينات المقاومة أو السمّية عبر الاقتران أو التحول أو النقل بواسطة الفيروسات، مما يجعل النظام الوراثي ديناميكيًا ومتغيرًا باستمرار ;Zhang et al., 2024) .Ding et al., 2024)

وهذه العملية تساعد على حفظ الصفات، وتسمح كذلك بحدوث الطفرات التي قد تغير من طبيعة الكائنات الحية. عند دراسة تلك الطفرات، نجد أنها تكون سبب رئيسي في احداث مقاومة

المضادات الحيوية، إذ أن تغير بسيط في بروتين مستهدف ما قد يجعل الدواء غير فعال.(Zhang et al., 2024; Kursheed et al., 2025)



Madigan et al. (2021) / Alberts et al. (2022)

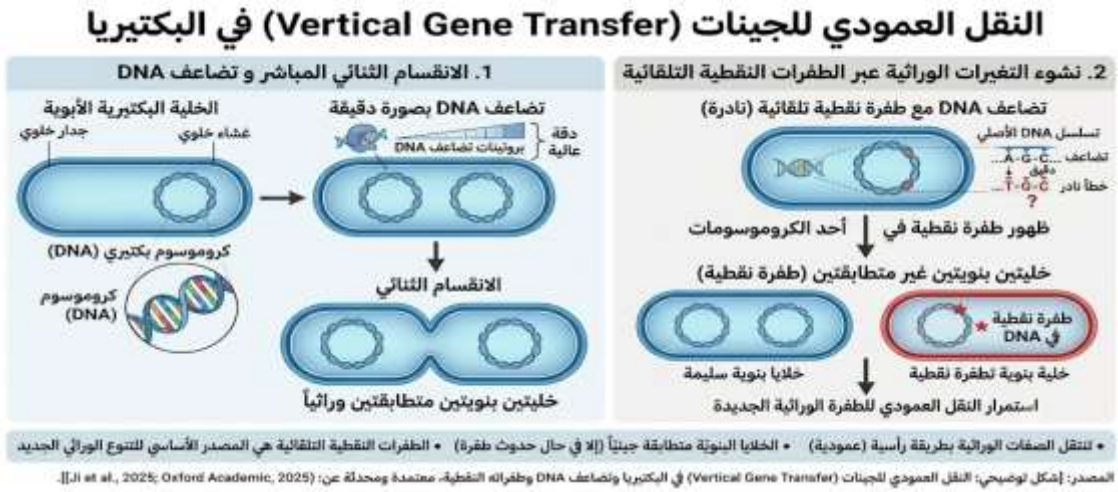
مخطط يوضح التعبير الجيني والتركيب الجزيئي في الأحياء الدقيقة

(Watson & Crick, 1953; Alberts, 2022; Lewin, 2021; Zhang et al., 2024)

المرحلة / المكون	الوصف والتفاصيل الجزيئية	الإنزيم / العضية المسؤولة	النتيجة / التأثير البيولوجي
تركيب DNA	لولب مزدوج (A=T و G≡C) بسكر ديوكسي ريبوز	DNA Polymerase	حفظ وتضاعف المادة الوراثية بدقة
تركيب RNA	شريط مفرد بسكر ريبوز وقاعدة اليوراسيل (U) بدلاً من (T)	RNA Polymerase	نقل الشيفرة الجينية وتصنيع البروتين
النسخ (Transcription)	بناء شريط mRNA مكمل لجزء من الـ DNA	RNA Polymerase	إنتاج رسالة وراثية ناضجة (mRNA)
الترجمة (Translation)	قراءة الشيفرة الجينية ورصف الأحماض الأمينية	الريبوسومات بمساعدة tRNA/rRNA	بناء البروتينات المحددة للصفات
النقل الأفقي (HGT)	تبادل الجينات بين البكتيريا (اقتران، تحول، توصيل)	البلازميدات والفاجات	نقل جينات المقاومة والسمّية

انتقال الصفات في الأحياء المجهرية:

-1 النقل العمودي للجينات (Vertical Gene Transfer) ان الصفات الوراثية في الأحياء المجهرية تنتقل بطريقة رأسية من خلال الانقسام الثنائي المباشر، بتضاعف الخلية البكتيرية لمادتها الوراثية بصورة دقيقة قبل أن تنقسم إلى خليتين بنويتين متطابقتين. تنشأ هذه التغيرات الوراثية في هكذا نمط عبرمايعرف بالطفرات النقطية التلقائية النادرة أثناء تضاعف DNA (Ji et al., 2025; Oxford Academic, 2025)

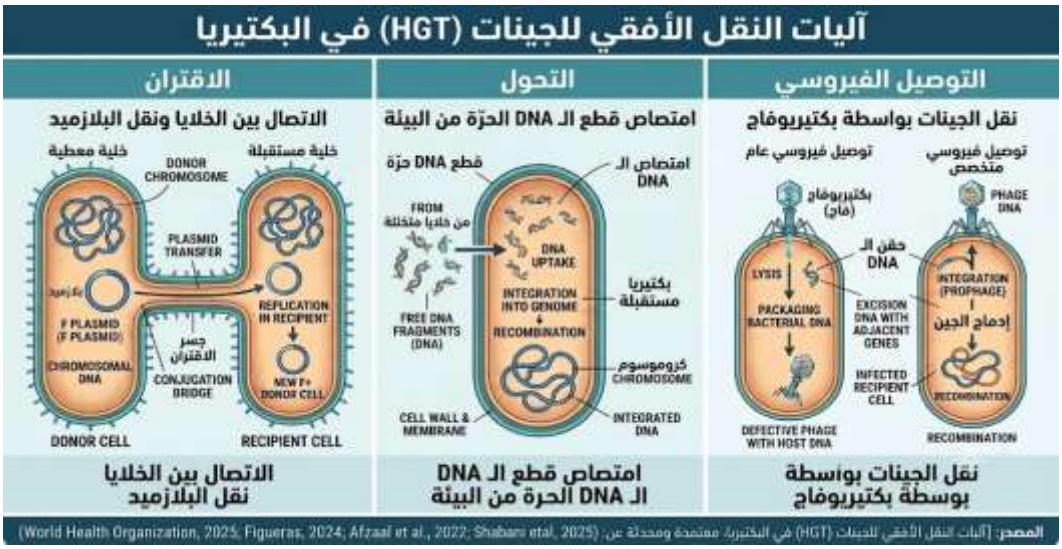


المصدر: إشكل توضيحي: النقل العمودي للجينات (Vertical Gene Transfer) في البكتيريا وتضاعف DNA وطفراته النقطية. معتمدة ومحدثة عن: [Ji et al., 2025; Oxford Academic, 2025].

-2 آليات النقل الأفقي للجينات (Horizontal Gene Transfer) تقوم الميكروبات بتبادل الجينات بين أفرادها في الجيل الواحد، وهذا يتيح لها الانتشار السريع بالنسبة لصفات حيوية مثل مقاومة المضادات الحيوية عبر الآليات التالية:

- الاقتران (Conjugation): انتقال مادتها الوراثية عبر الملامسة المباشرة باستخدام البلازميدات الناقلة التي تتضاعف باستقلال: (World Health Organization, 2025; Figueras, 2024)
- التحول (Transformation): تقوم احيانا البكتيريا بالتقاط قطع حرّة من الـ DNA الموجودة في بيئتها ودماجها في جينومها الخاص. (Afzaal et al., 2022; Shabani et al., 2025)

- التوصيل الفيروسي (Transduction): هوعملية نقل أجزاء من الجينوم البكتيري باستخدام الفيروسات المهاجمة للبكتيريا (البكتيريوفاج(Shabani et al., 2025)(



-3 الهندسة الوراثية وتقنيات النقل الحديثة تُستغل آليات نقل الجينات الميكروبية حالياً لتعديل الصفات دقيقاً؛ حيث تُستخدم إنزيمات القطع المحدود (Restriction Enzymes) وإنزيم اللحام (DNA Ligase) لدمج الجينات المطلوبة داخل بلازميدات بكتيرية مثل *Escherichia coli*)) لإنتاج بروتينات حيوية. كما تطورت التقنيات لتشمل التحرير الجيني المتقدم لنقل وتعديل الصفات بدقة فائقة (Cambridge University Press, 2025; Innovative Genomics Institute, 2023; CRISPR Medicine News, 2026)

المبحث الثالث: التطبيقات العلمية للأحياء المجهرية والوراثة:

ان التطبيقات العلمية للأحياء المجهرية والوراثة تعتبرركيزة اساسية للثورة التقنية الحيوية الحديثة؛ إذ تحول التعامل مع الكائنات المجهرية من دراسة خصائصها الأيضية فقط إلى إعادة تشكيل بنيتها الوراثية وتوظيف مساراتها الجينية. لانها ستتيح لهذه التطبيقات تحويل الاحياء المجهرية إلى منصات جزيئية عالية الدقة تُسهم في معالجة أعقد التحديات في الطب، والزراعة، والصناعة الاستخراجية، والحفاظ على البيئة.

15-3-1 القطاع الطبي والطب الجيني الدقيق

تُستخدم الهندسة الوراثية والتعديل الجيني الميكروبي لتصنيع البروتينات واللقاحات وتطوير العلاجات الموجهة للأمراض المزمنة والوراثية:

-1إنتاج بعض البروتينات والهرمونات البشرية: حيث بالإمكان استخدام بكتيريا *Escherichia coli* والخمائر عبر تقنية DNA المؤتلف لإنتاج الإنسولين البشري وهرمون النمو بكفاءة عالية.

-2اللقاحات الحديثة وتقنية mRNA: الاعتماد على الشفرة الوراثية لتوجيه الخلايا نحو تصنيع بروتينات مستهدفة وتحفيز المناعة بفعالية وبشكل سريع.

-3العلاجات المتقدمة بالتحرير الجيني: توظيف أنظمة مثل "كريسبر-كاس9" المستلهمة من المناعة البكتيرية لعلاج أمراض الدم الوراثية)مثل عقار Casgevy لفقر الدم المنجلي(وبناء خلايا مناعية معدلة وراثياً لمكافحة السرطان (CAR-T).

-4التشخيص الجزيئي: استخدام تقنيات تفاعل البوليميراز المتسلسل (PCR) وتسلسل الجينوم الكامل للكشف الدقيق عن الممرضات وتخصيص العلاجات المناسبة.

(U.S. Food and Drug Administration, 2023; Cambridge University Press, 2025; Oxford Academic, 2025; Ji et al., 2025)

15-3-2 الميكروبيوم البشري والتطبيقات الطبية

يوضح الشكل ادناه الدور المحوري الذي يلعبه الميكروبيوم المعوي (بكتيريا الأمعاء النافعة) كمركز تحكم رئيسي يتجاوز الجهاز الهضمي ليؤثر مباشرةً على المناعة والصحة النفسية.

1- تركيب ووظائف الميكروبيوم المعوي (Gut Microbiome)

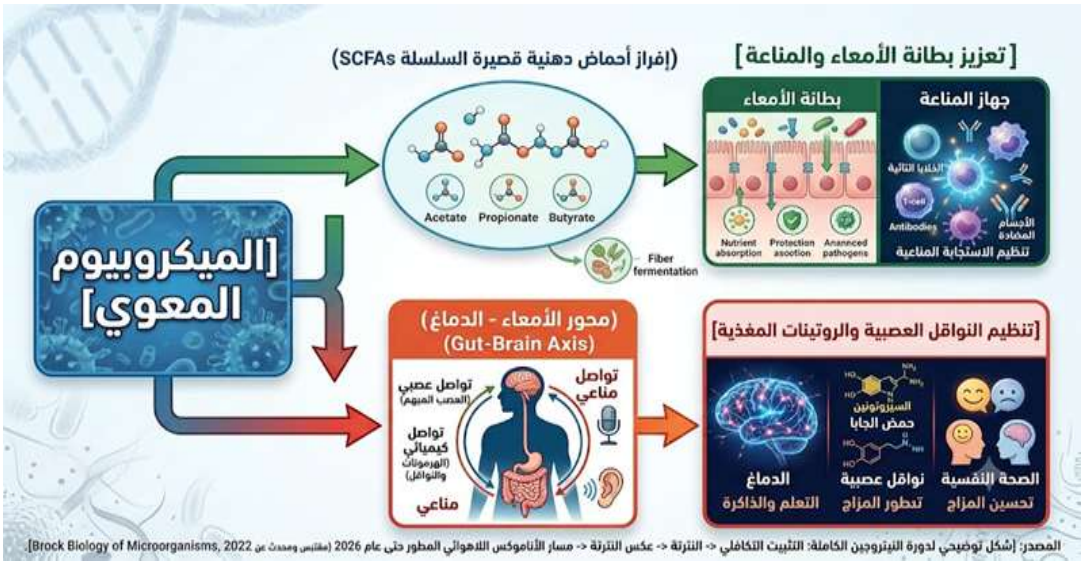
- يتكون الميكروبيوم البشري المعوي بشكل رئيسي من شعبتي البكتيريا *Bacteroidetes* و *Firmicutes*.
- **الإنتاج الأيضي:** تقوم البكتيريا بتخمير الألياف غير القابلة للهضم لإنتاج أحماض دهنية قصيرة السلسلة (SCFAs) تشمل البوتيرات (Butyrate)، البروبيونات (Propionate)، والأسيتات (Acetate). من خلال المسار البيوكيميائي والمناعي هذا تعمل الاحماض على تقوية بطانة الأمعاء وتحفيز الاستجابة المناعية للحد من الالتهابات.

- **التأثير الوظيفي:** تعمل هذه الأحماض على تغذية خلايا بطانة الأمعاء، وتنظيم الخلايا المناعية التائية المُنظمة (T-reg cells)، والوقاية من الالتهابات المزمنة والسرطانات.

2-محور الأمعاء-الدماغ (Gut-Brain Axis)

- هنالك تفاعل مباشر يحصل بين الميكروبيوم والجهاز العصبي المركزي عبر العصب الحائر (Vagus Nerve) والمسارات الأيضية والهرمونية.

- تقوم البكتريا المعوية بصنع نسق واسع من النواقل العصبية، كالسيروتونين (Serotonin) الذي يُصنع أكثر من 90% منه داخل الأمعاء بوساطة التفاعلات الميكروبية، وحمض التوت الأميني بيكاربوكسيليك (GABA)، مما يؤثر في المزاج والصحة النفسية.



2. قطاع الطاقة والصناعات الاستخراجية (النفط والتعدين)

- يستخدم في الصناعات الحديثة القدرات الأيضية للاحياء المجهرية خاصة البكتيريا في تسهيل عمليات الاستخراج وتطهير الوقود وتحسين الاستدامة حيث ان الاستخلاص المخصب للنفط بيولوجياً (MEOR) تستخدم بكتيريا للحقن مثل *Bacillus subtilis* و *Pseudomonas aeruginosa* لتخليق مرطبات حيوية (Biosurfactants) وغازات تعمل على تقليل التوتر السطحي واللزوجة للنفط المحتجز داخل الصخورللمساعدة في تسهيل وانسيابية تدفقه.

• إزالة الكبريت البيولوجية (Biodesulfurization): تستخدم بكتيريا *Rhodococcus erythropolis* باستخدام مسار 4 Sلإزالة عنصرالكبريت من المركبات Dibenzothiophene وتجنب تدمير الهيكل الهيدروكربوني أو تقليل القيمة الحرارية للوقود.

• التعدين الحيوي (Biomining / Bioleaching): استغلال بكتيريا *Acidithiobacillus ferrooxidans* التي تعتبر بكتيريا مؤكسدة للحديد والكبريت لغرض تذويب الصخور واستخدامها لاستخلاص المعادن الثمينة كالنحاس والذهب واليورانيوم من الخامات ضعيفة التركيز ;United Nations General Assembly, 2024) Figueras, 2024; Shabani et al., 2025)

-3 القطاع البيئي والاستجابة المناخية

ان الاحياء المجهرية تشكل خط الدفاع الأول في المعالجة البيولوجية للملوثات Bioremediation of Xenobiotics))

المعالجة الحيوية للتسربات النفطية (Bioremediation): تُستخدم بكتيريا متخصصة مثل *Alcanivorax borkumensis* و *Pseudomonas putida* لغرض تفكيك سلاسل الهيدروكربونات المعقدة والميكروبلاستك وتحويلها إلى مركبات أخرى غير سامة بالاضافة للتفكيك البلاستيكي الحكيم باستخدام الهندسة الوراثية لتعديل إنزيمات مثل PETase و MHETase المستخرجة من بكتيريا *Ideonella sakaiensis* لتفكيك البلاستيك من نوع (PET) خلال فترات زمنية قصيرة.

الحد من الانبعاثات الحمضية: تُقلل المعالجة البيولوجية بالاحياء المجهرية للوقود وللمخلفات من انبعاثات أكسيد الكبريت وغازات الاحتباس الحراري.

نحو الصحة الواحدة (One Health): السعي لربط صحة الميكروبيوم البيئي والحيواني والبشري لغرض الحد من انتشار السلالات المقاومة للمضادات الحيوية (AMR)

(United Nations General Assembly, 2024; Figueras, 2024; Shabani et al., 2025; World Health Organization, 2025)

4. القطاع الزراعي والأمن الغذائي

تستغل الهندسة الوراثية الاحياءالمجهرية لتحسين إلانتاج في المحاصيل وتقليل الاعتماد على الكيميائيات الضارة:

المحاصيل المعدلة وراثياً (GMOs): هو عملية نقل جينات ميكروبية إلى النباتات حتى تكبها القدرة على تحمل الجفاف والملوحة ومقاومة الآفات الحشرية.

المدعمات الحيوية والتغذية: تستخدم لتحسين القيمة الغذائية للأغذية الأساسية (مثل الأرز الذهبي المحفز لإنتاج البيتا-كاروتين لمكافحة نقص فيتامين أ).

التخمير الدقيق (Precision Fermentation): تستخدم إعادة البرمجة الجينية لخمائر معينة لغرض البناء الحيوي لبروتينات أخرى بديلة عن المصادر الحيوانية التقليدية. (Afzaal et al., 2022; Figueras, 2024; Shabani et al., 2025)

5. التقنيات الحيوية المتقدمة والبيولوجيا التخليقية

تتطور التقنيات الحديثة متجاوزة التعديل الجيني التقليدي نحو بناء نظم ومستشعرات حيوية معقدة:

المستشعرات الحيوية الميكروبية: هي هندسة نوع من البكتيريا المضيئة حيوياً التي ستعمل كإنذار مبكر عند ملامسة الملوثات الثقيلة أو السموم.

الرقائق الميكروبية (Microbiome-on-a-Chip): هي نماذج تستخدم كمحاكاة لتفاعلات الميكروبيوم مع خلايا الجسم لدراسة الأدوية والأورام السرطانية.

الذكاء الاصطناعي وجينوم الخلية الواحدة: ان لدمج الخوارزميات بالتعلم العميق لغرض تصميم إنزيمات صناعية جديدة وتوقع المسارات الأيضية للميكروبات.

(Innovative Genomics Institute, 2023; Cambridge University Press, 2025; Ji et al., 2025; Oxford Academic, 2025)

المصادر Reference

1. Afzaal, M., et al. (2022). Principles of Molecular Genetics and Horizontal Gene Transfer in Microorganisms. Academic Press.

2. Al-Khafaji, A., et al. (2025). Microbial Adaptations in Extreme Environments and Carbon Fixation Dynamics. Journal of Environmental Microbiology, 41(2), 115-128.

3. Alberts, B. (2022). Molecular Biology of the Cell (7th ed.). W. W. Norton & Company.

4. Atlas, R. M., & Bartha, R. (2020). Microbial Ecology: Fundamentals and Applications. Pearson.

5. Baker, B. J., et al. (2020). Enigmatic Archaea: Genomics, Physiology, and Environmental Roles. Nature Reviews Microbiology, 18(9), 501-516.

6. Brock, T. D., et al. (2022). Brock Biology of Microorganisms (16th ed.). Pearson.

7. Brown, T. A. (2023). Genomes 5. CRC Press.

8. Cambridge University Press. (2025). Advances in Recombinant DNA Technology and Synthetic Biology. Cambridge University Press.

9. CRISPR Medicine News. (2026). Clinical Progress in Gene Editing and Therapeutic Applications. Biotechnology Reports, 12, 45-52.

10. Davis, R. (2025). Allelic Diversity and Population Genetics. Genetic Research, 88(1), 33-47.

11. Ding, Y., et al. (2024). Ribosomal Translation and Gene Expression Control in Bacterial Systems. Cell Discovery, 10(4), 201-215.

12. Fan, Y., & Pedersen, O. (2020-2024). Gut Microbiota in Human Metabolic Health and Disease. Nature Reviews Microbiology, 19(1), 55-71.

13. Figueras, M. J. (2024). Horizontal Gene Transfer Mechanisms and Environmental Dissemination. Microbial Ecology, 87(3), 88-102.

14. Franklin, R. E. (1953). Molecular Configuration in Sodium Thymonucleate. Nature, 171(4356), 740-741.

15. Gaston, K. J. (2021). Biodiversity and Microbial Ecosystem Services. BioScience, 71(4), 380-392.

16. Innovative Genomics Institute (IGI). (2023). CRISPR-Cas Innovations and Precision Genome Editing. IGI Reports.

17. Ji, X., et al. (2025). Vertical and Horizontal Transmission Dynamics of Antibiotic Resistance Genes. ISME Journal, 19(2), 140-155.

18. Johnson, L. (2024). Modern Genetics: From Gene Structure to Function. Oxford University Press.

19. Krupovic, M., et al. (2021). Viral Evolution and Diversity: Mechanisms and Impact. Nature Reviews Genetics, 22(11), 711-725.

20. Kursheed, A., et al. (2025). Mutational Profiling and Target Modification in Antimicrobial Resistance. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 69(1), e01234-24.

21. Lewin, B. (2021). Lewin's GENES XII. Jones & Bartlett Learning.

22. Lodish, H., et al. (2021). Molecular Cell Biology (9th ed.). W. H. Freeman.

23. Madigan, M. T., et al. (2021). Microbiology: An Evolving Science. W. W. Norton & Company.

24. Martinez, A., & Zhao, L. (2023). Biogeochemical Nitrogen and Sulfur Cycling in Soil Ecosystems. Soil Biology and Biochemistry, 178, 108950.

25. Metting, F. B. (2020). Soil Microbial Ecology: Applications in Agricultural and Environmental Management. Marcel Dekker.

26. Naranjo-Ortiz, M. A., & Gabaldón, T. (2020). Fungal Evolution: Cellular Diversity and Phylogenomics. Biological Reviews, 95(4), 1001-1032.

27. Omer, S., et al. (2026). Microbial Community Dynamics and Ecosystem Resilience. Environmental Science & Technology, 60(3), 1402-1415.

28. Oxford Academic. (2025). Bacterial Genomics and Mutational Rates in Clonal Populations. Nucleic Acids Research, 53(5), 2210-2225.

29. Patel, S., et al. (2024). The Human Gut Microbiome in Immunity and Metabolic Regulation. Immunology Today, 45(2), 112-126.

30. Shabani, M., et al. (2025). Bioremediation, Biomining, and Environmental Biotechnology. Biotechnology and Bioengineering, 122(4), 890-908.

31. Smith, J. (2025). Phenotypic Expression and Applied Genetics. Annual Review of Genetics, 59, 215-230.

32. Smith, R., & Johnson, K. (2024). Ecological Interactions and Evolutionary Dynamics of Microorganisms. Trends in Ecology & Evolution, 39(6), 540-552.

33. Taylor, E. (2025). Zygosity and Genetic Heterogeneity in Microbial Populations. Genetics, 229(1), iyad180.

34. Tortora, G. J., et al. (2023). Microbiology: An Introduction (14th ed.). Pearson.

35. U.S. Food and Drug Administration (US FDA). (2023). FDA Approves Landmark Cell-Based Gene Therapy Casgevy for Sickle Cell Disease. FDA Press Release.

36. United Nations General Assembly (UN General Assembly). (2024). Environmental Protection, One Health, and Global Biotechnology Strategies. UN Resolutions & Reports.

37. Watson, J. D., & Crick, F. H. (1953). Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. Nature, 171(4356), 737-738.

38. Watson, R., et al. (2020). Global Climate Change and Microbial Biogeochemistry. Global Change Biology, 26(8), 4300-4315.

39. Wilson, P. (2024). Genotype-to-Phenotype Mapping in Molecular Biology. Trends in Genetics, 40(3), 200-214.

40. World Health Organization (WHO). (2025). Global Action Plan on Antimicrobial Resistance and One Health Initiatives. WHO Guidelines.

41. Yaeger, R. G., & Broadbent, D. (2020). Medical Protozoology and Parasitic Infections. Clinical Microbiology Reviews, 33(2), e00045-19.

42. Zhang, Y., et al. (2024). Horizontal Gene Transfer and Genomic Plasticity in Antimicrobial Resistant Microorganisms. Nature Microbiology, 9(5), 1180-1195.

الفصل الخامس

استكشاف البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة من البيئات القاسية وتطبيقاتها الحيوية

Exploring Antioxidant-Producing Bacteria from Extreme Environments and Their Biotechnological Applications

م.م. إنعام عبد الله فياض

المديرية العامة لتربية ذي قار - قسم الإشراف - العراق

الملخص

يهدف هذا البحث إلى استكشاف البكتيريا القادرة على إنتاج المركبات المضادة للأكسدة والمعزولة من البيئات القاسية مثل الينابيع الحارة والبحيرات شديدة الملوحة والمناطق الصحراوية والبيئات الحمضية أو القلوية. وتتميز هذه الكائنات الدقيقة بقدرتها على التكيف مع الظروف البيئية الصعبة من خلال إنتاج مركبات حيوية ذات خصائص كيميائية وفسيولوجية فريدة من بينها مضادات الأكسدة الطبيعية التي تسهم في حماية الخلايا من الإجهاد التأكسدي.

يركز البحث على توضيح أهمية هذه البكتيريا وآليات إنتاجها للمركبات المضادة للأكسدة والعوامل البيئية المؤثرة في كفاءة الإنتاج إضافة إلى استعراض أبرز الطرق المستخدمة في عزلها وتنميتها وتشخيصها وتحليل المركبات الحيوية التي تنتجها باستخدام التقنيات الحديثة. كما يناقش البحث التطبيقات الحيوية لهذه المركبات في المجالات الطبية والصيدلانية والغذائية والتجميلية مع تسليط الضوء على دورها في تطوير منتجات طبيعية بديلة للمركبات الصناعية لما تمتلكه من فعالية حيوية عالية وانخفاض في الآثار الجانبية.

ويخلص البحث إلى أن البيئات القاسية تمثل مصدراً واعداً لاكتشاف سلالات بكتيرية جديدة قادرة على إنتاج مضادات أكسدة ذات قيمة اقتصادية وصحية كبيرة الأمر الذي يفتح آفاقاً واسعة أمام الدراسات المستقبلية في مجالات التكنولوجيا الحيوية والهندسة الوراثية بهدف تحسين إنتاج هذه المركبات والاستفادة منها على المستوى الصناعي والطبي.

الكلمات المفتاحية: البكتيريا؛ البيئات القاسية؛ مضادات الأكسدة؛ المركبات الحيوية؛ التكنولوجيا الحيوية

Abstract

This chapter reviews bacteria capable of producing antioxidant compounds in extreme environments, including hot springs, highly saline lakes, deserts, and acidic or alkaline habitats. It connects their adaptation to difficult environmental conditions with the production of biologically active compounds that may protect cells against oxidative stress. The discussion treats these environments as potential sources for investigating microbial diversity and functional metabolites.

The chapter considers the importance of antioxidant-producing bacteria, mechanisms associated with production, and environmental factors affecting yield. It reviews isolation, cultivation, identification, and analysis of bioactive compounds through the techniques discussed in the source. These procedures connect the search for organisms with characterization of the substances they produce, rather than assuming that environmental origin alone establishes useful activity.

Applications in pharmaceutical, food, cosmetic, and other biological fields are examined alongside prospects for developing natural products as alternatives to synthetic compounds. The concluding discussion identifies extreme environments as a promising area for further work on bacterial strains and antioxidant production. Biotechnology and genetic approaches are considered as possible means of improving production and investigating industrial use. The contribution is a review of organisms, processes, methods, and prospective applications. It does not supply new isolation results or independent clinical confirmation beyond the research material presented, and the potential value of a compound remains a question for characterization, testing, and application-specific evaluation.

Keywords: Bacteria; Extreme environments; Antioxidants; Bioactive compounds; Biotechnology

- **مقدمة**

شهدت العقود الأخيرة اهتماماً متزايداً بالبحث عن مصادر طبيعية جديدة للمركبات الحيوية ذات الفعالية العالية ولا سيما المركبات المضادة للأكسدة التي تؤدي دوراً مهماً في حماية الخلايا والأنسجة من الأضرار الناتجة عن الجذور الحرة والإجهاد التأكسدي. وقد أثبتت الدراسات العلمية أن الإجهاد التأكسدي يرتبط بظهور العديد من الأمراض المزمنة مثل أمراض القلب والأوعية الدموية والسرطان والسكري والاضطرابات العصبية مما دفع الباحثين إلى البحث عن بدائل طبيعية أكثر أماناً وفعالية من مضادات الأكسدة الصناعية المستخدمة حالياً.

وتُعد البيئات القاسية مثل الصحارى والينابيع الحارة والبحيرات المالحة والمناطق ذات الحموضة أو القلوية المرتفعة من البيئات الغنية بالكائنات الحية الدقيقة التي طورت آليات تكيف فريدة تمكنها من البقاء في ظروف غير ملائمة لمعظم الكائنات الحية الأخرى. ومن بين هذه الكائنات تبرز البكتيريا القادرة على إنتاج مجموعة متنوعة من المركبات الثانوية ذات النشاط الحيوي المرتفع بما في ذلك المركبات المضادة للأكسدة.

إن استكشاف البكتيريا المعزولة من البيئات القاسية يمثل مجالاً واعداً في التكنولوجيا الحيوية الحديثة حيث يمكن الاستفادة من نواتجها الحيوية في تطوير أدوية جديدة وإنتاج إضافات غذائية طبيعية وتصنيع مستحضرات تجميل ذات قيمة علاجية ووقائية. كما يسهم هذا المجال في توسيع المعرفة العلمية بالتنوع الميكروبي واكتشاف أنواع جديدة من المركبات الحيوية ذات الاستخدامات المتعددة.

- **أهمية البحث**

1. المساهمة في اكتشاف مصادر طبيعية جديدة للمركبات المضادة للأكسدة ذات الكفاءة العالية والآمنة بيئياً وصحياً.
2. تسليط الضوء على التنوع الحيوي الميكروبي الموجود في البيئات القاسية وإبراز قيمته العلمية والاقتصادية.

3. دعم الجهود البحثية الرامية إلى تقليل الاعتماد على مضادات الأكسدة الصناعية التي قد ترتبط ببعض التأثيرات السلبية عند الاستخدام طويل الأمد.

4. تعزيز تطبيقات التكنولوجيا الحيوية من خلال الاستفادة من القدرات الأيضية الفريدة للبكتيريا المتكيفة مع الظروف البيئية القاسية.

5. توفير قاعدة معرفية يمكن أن تسهم في تطوير منتجات دوائية وغذائية وتجميلية جديدة تعتمد على مركبات طبيعية ذات نشاط حيوي مرتفع.

6. تشجيع الدراسات المستقبلية المتعلقة بعزل وتوصيف السلالات البكتيرية الجديدة واستثمارها في المجالات الصناعية والطبية.

7. المساهمة في تحقيق التنمية المستدامة من خلال استغلال الموارد الميكروبية الطبيعية في إنتاج مركبات ذات قيمة اقتصادية عالية.

- **أهداف البحث**

1. التعرف إلى البكتيريا القادرة على إنتاج المركبات المضادة للأكسدة والمعزولة من البيئات القاسية.

2. توضيح الخصائص البيولوجية والفسيولوجية للبكتيريا المتكيفة مع الظروف البيئية القاسية.

3. دراسة العوامل البيئية والغذائية المؤثرة في إنتاج المركبات المضادة للأكسدة.

4. استعراض أهم التقنيات المستخدمة في عزل البكتيريا وتشخيصها واستخلاص المركبات الحيوية التي تنتجها.

5. تقييم التطبيقات الحيوية للمركبات المضادة للأكسدة في المجالات الطبية والغذائية والتجميلية والصناعية.

6. إبراز أهمية البيئات القاسية بوصفها مصدراً واعداً لاكتشاف مركبات حيوية جديدة ذات قيمة اقتصادية وعلاجية.

7. تقديم توصيات علمية تدعم إجراء المزيد من الدراسات حول استثمار هذه البكتيريا في تطبيقات التكنولوجيا الحيوية الحديثة.

- **مشكلة البحث**

على الرغم من التطور الكبير في مجال التكنولوجيا الحيوية لا تزال البيئات القاسية تمثل مصدراً غير مستغل بالشكل الكافي لاكتشاف البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة. كما أن كثيراً من السلالات البكتيرية الموجودة في هذه البيئات لم تُدرس بصورة شاملة من حيث خصائصها الحيوية وقدرتها على إنتاج مركبات ذات قيمة طبية وصناعية مما يحد من الاستفادة منها في تطوير منتجات طبيعية آمنة وفعالة.

- **أسئلة البحث**

1. ما المقصود بالبكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة وما أهم خصائصها؟
2. ما أنواع البيئات القاسية التي تُعد مصدراً لهذه البكتيريا؟
3. ما الآليات التي تعتمد عليها البكتيريا في إنتاج المركبات المضادة للأكسدة؟
4. ما أهم العوامل المؤثرة في كفاءة إنتاج هذه المركبات؟
5. ما التقنيات المستخدمة في عزل وتشخيص البكتيريا واستخلاص المركبات المضادة للأكسدة؟
6. ما أبرز التطبيقات الحيوية للمركبات المضادة للأكسدة المنتجة بواسطة البكتيريا في المجالات الطبية والغذائية والتجميلية؟
7. ما التحديات والآفاق المستقبلية المرتبطة باستثمار هذه البكتيريا في تطبيقات التكنولوجيا الحيوية؟

- **منهج البحث**

اعتمد هذا البحث على المنهج الوصفي التحليلي؛ لكونه المنهج الأكثر ملاءمة لدراسة البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة في البيئات القاسية حيث يتيح جمع المعلومات العلمية من المصادر الموثوقة وتحليلها وتفسيرها بصورة منهجية مع المقارنة بين نتائج الدراسات السابقة واستخلاص أبرز الاتجاهات العلمية في هذا المجال.

وقد استند البحث إلى مراجعة الأدبيات العلمية المنشورة في الكتب المحكمة والمقالات البحثية وقواعد البيانات العلمية المتخصصة بهدف التعرف إلى أنواع البكتيريا المعزولة من البيئات

القاسية وخصائصها الفسيولوجية وآليات إنتاجها للمركبات المضادة للأكسدة والعوامل المؤثرة في إنتاجها إضافة إلى استعراض أهم التطبيقات الحيوية لهذه المركبات في المجالات الطبية والغذائية والصناعية.

- **مصطلحات البحث**

1. البكتيريا

هي كائنات حية دقيقة وحيدة الخلية تنتمي إلى بدائيات النوى تتميز بقدرتها على العيش في مختلف البيئات بما فيها البيئات القاسية وتمتلك تنوعاً كبيراً في عملياتها الأيضية مما يجعلها مصدراً مهماً لإنتاج العديد من المركبات الحيوية.

2. البيئات القاسية

هي البيئات التي تتسم بظروف فيزيائية أو كيميائية غير ملائمة لمعظم الكائنات الحية مثل درجات الحرارة المرتفعة أو المنخفضة جداً والملوحة العالية والحموضة أو القلوية الشديدة والضغط المرتفع والجفاف حيث تعيش فيها كائنات دقيقة متكيفة مع هذه الظروف.

3. مضادات الأكسدة

هي مركبات طبيعية أو حيوية تعمل على تثبيط أو تقليل تأثير الجذور الحرة والجزيئات المؤكسدة مما يحمي الخلايا من التلف الناتج عن الإجهاد التأكسدي ويسهم في الوقاية من العديد من الأمراض.

4. المركبات الحيوية

هي مواد تنتجها الكائنات الحية الدقيقة أو النباتات أو الكائنات الأخرى وتمتلك نشاطاً بيولوجياً يؤثر في العمليات الحيوية وتستخدم في الصناعات الدوائية والغذائية والتجميلية.

5. التكنولوجيا الحيوية

هي مجال علمي وتطبيقي يعتمد على استخدام الكائنات الحية أو مكوناتها أو منتجاتها لتطوير تقنيات ومنتجات ذات قيمة في المجالات الطبية والزراعية والصناعية والبيئية.

6. الإجهاد التأكسدي

هو حالة تنتج عن اختلال التوازن بين إنتاج الجذور الحرة وقدرة مضادات الأكسدة على معادلتها مما يؤدي إلى تلف المكونات الخلوية مثل البروتينات والدهون والأحماض النووية وقد يرتبط بحدوث العديد من الأمراض المزمنة.

خطة البحث

المبحث الأول: البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة في البيئات القاسية

المطلب الأول: البيئات القاسية وخصائصها الميكروبية

المطلب الثاني: البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة

المبحث الثاني: التطبيقات الحيوية للبكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة

المطلب الأول: طرق عزل وتشخيص البكتيريا واستخلاص المركبات المضادة للأكسدة

المطلب الثاني: التطبيقات الحيوية والآفاق المستقبلية

خاتمة

نتائج

توصيات

المبحث الأول: البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة في البيئات القاسية

- **المطلب الأول: البيئات القاسية وخصائصها الميكروبية**

مفهوم البيئات القاسية وأنواعها

شهدت العقود الأخيرة اهتماماً متزايداً بدراسة البيئات القاسية وذلك لما تمثله من أنظمة طبيعية فريدة تحتضن أنواعاً عديدة من الكائنات الحية الدقيقة القادرة على البقاء في ظروف يصعب على معظم الكائنات الأخرى تحملها. وقد أدى هذا الاهتمام إلى اكتشاف تنوع ميكروبي واسع يمتلك قدرات أيضية وإنزيمية مميزة الأمر الذي جعل هذه البيئات مصدراً مهماً للمركبات الحيوية ذات

القيمة الطبية والصناعية ومن بينها المركبات المضادة للأكسدة التي تشكل محوراً رئيسياً في تطبيقات التكنولوجيا الحيوية الحديثة. (الخطيب، 2012)

ويقصد بالبيئات القاسية تلك البيئات التي تتصف بوجود عامل أو أكثر من العوامل الفيزيائية أو الكيميائية خارج الحدود الطبيعية الملائمة لنمو معظم الكائنات الحية مثل درجات الحرارة المرتفعة أو المنخفضة جداً أو الملوحة العالية أو الحموضة والقلوية الشديدة أو الضغط المرتفع أو الجفاف الطويل أو التعرض المستمر للإشعاعات المؤينة أو فوق البنفسجية. ورغم قسوة هذه الظروف فإن العديد من الكائنات الدقيقة استطاعت عبر ملايين السنين تطوير وسائل تكيف متقدمة مكّنتها من الاستمرار في النمو والتكاثر والمحافظة على نشاطها الحيوي.

ولا تقتصر أهمية البيئات القاسية على كونها موطناً لكائنات دقيقة متخصصة بل تمثل أيضاً مختبراً طبيعياً لدراسة آليات التطور والتكيف الحيوي. فقد أثبتت الدراسات أن الكائنات الدقيقة التي تعيش في هذه البيئات تنتج بروتينات وإنزيمات ومركبات ثانوية تختلف في خصائصها عن نظيراتها الموجودة في البيئات المعتدلة الأمر الذي يزيد من أهميتها في الصناعات الدوائية والغذائية والبيئية.

وتصنف البيئات القاسية إلى عدة أنواع تبعاً للعامل البيئي السائد فيها ومن أبرزها البيئات الحرارية والبيئات الباردة والبيئات عالية الملوحة والبيئات الحمضية والبيئات القلوية وبيئات الضغط المرتفع والبيئات الصحراوية الجافة والبيئات المشعة. (Aruoma, 1998)

1. البيئات الحرارية

تشمل الينابيع الحارة والفوهات البركانية والفتحات الحرارية الموجودة في أعماق البحار حيث قد تتجاوز درجات الحرارة 80°م بل تصل أحياناً إلى أكثر من 100°م تحت ضغط مرتفع. وتضم هذه البيئات بكتيريا محبة للحرارة تمتلك أغشية خلوية مستقرة وإنزيمات مقاومة للتحلل الحراري مما يجعلها قادرة على الاستمرار في أداء وظائفها الحيوية رغم الحرارة المرتفعة. وتتميز هذه البكتيريا بإنتاج مركبات مضادة للأكسدة تساعدها على الحد من الأضرار الناتجة عن زيادة النشاط الأيضي والإجهاد التأكسدي. (عبد الرحمن، 2015)

2. البيئات شديدة البرودة

تشمل المناطق القطبية والأنهار الجليدية والجبال المرتفعة وأعماق المحيطات حيث تنخفض درجات الحرارة إلى ما دون الصفر المئوي. وتعيش فيها بكتيريا محبة للبرودة تمتلك أغشية خلوية مرنة وإنزيمات تعمل بكفاءة في درجات الحرارة المنخفضة إضافة إلى إنتاج بروتينات تمنع تكوّن البلورات الجليدية داخل الخلايا وتحافظ على سلامة مكوناتها.

3. البيئات عالية الملوحة

توجد في البحيرات المالحة والسبخات والمستنقعات المالحة وتتميز بتركيز مرتفع من الأملاح قد يفوق عدة مرات ملوحة مياه البحر. وقد طورت البكتيريا التي تعيش في هذه البيئات آليات خاصة لتنظيم الضغط الأسموزي من خلال تراكم مركبات عضوية متوافقة داخل الخلية تمنع فقدان الماء وتحافظ على التوازن الداخلي. كما تنتج هذه الكائنات مركبات حيوية ذات خصائص مضادة للأكسدة ومضادة للميكروبات. (الخطيب، 2012)

4. البيئات الحمضية

تشمل مناطق التعدين والينابيع الكبريتية وبعض الترب البركانية حيث قد ينخفض الرقم الهيدروجيني إلى أقل من (3). وتتميز البكتيريا الحمضية بقدرتها على المحافظة على ثبات درجة الحموضة داخل الخلية رغم الوسط الخارجي شديد الحموضة وذلك بفضل أنظمة متطورة لنقل الأيونات وتنظيم العمليات الأيضية. (عبد الرحمن، 2015)

5. البيئات القلوية

تضم البحيرات القلوية وبعض الأراضي الغنية بكربونات الصوديوم حيث قد يرتفع الرقم الهيدروجيني إلى أكثر من (10). وتستخدم البكتيريا القلوية آليات دقيقة لتنظيم انتقال الأيونات والمحافظة على الاتزان الداخلي كما تنتج إنزيمات مستقرة في الظروف القلوية تستعمل في العديد من الصناعات الحيوية.

6. بيئات الضغط المرتفع

تشمل أعماق البحار والمحيطات حيث يصل الضغط إلى مئات الأضعاف مقارنة بالضغط الجوي عند سطح الأرض. وقد طورت البكتيريا التي تعيش في هذه المناطق أغشية خلوية أكثر مرونة إضافة إلى بروتينات وإنزيمات قادرة على العمل بكفاءة في ظل الضغط المرتفع.

7. البيئات الصحراوية الجافة

تتميز بندرة المياه وارتفاع درجات الحرارة نهاراً وانخفاضها ليلاً إضافة إلى التعرض المكثف للأشعة فوق البنفسجية. وتعيش فيها بكتيريا قادرة على مقاومة الجفاف والإشعاع من خلال تكوين أغلفة واقية وإنتاج أصباغ ومركبات مضادة للأكسدة تقلل من تأثير العوامل البيئية الضارة. (الجبوري، 2014)

الخصائص الميكروبية للبيئات القاسية

تمتاز الكائنات الدقيقة الموجودة في البيئات القاسية بمجموعة من الخصائص الحيوية التي تجعلها مختلفة عن الكائنات الموجودة في البيئات المعتدلة. فهي تمتلك قدرة عالية على تعديل تركيب أغشيتها الخلوية بما يتلاءم مع الظروف البيئية كما تنتج بروتينات حماية وإنزيمات مستقرة تحت الظروف القاسية إضافة إلى مركبات ثانوية ذات نشاط حيوي مرتفع مثل مضادات الأكسدة والأصباغ الطبيعية والمضادات الحيوية والإنزيمات الصناعية.

وتشير الدراسات الحديثة إلى أن هذه الخصائص ليست مجرد وسائل للبقاء وإنما تمثل أساساً لقدرة هذه الكائنات على إنتاج مركبات ذات قيمة اقتصادية كبيرة الأمر الذي جعل البيئات القاسية هدفاً رئيسياً لبرامج البحث والتطوير في مجالات التكنولوجيا الحيوية والصناعات الدوائية والغذائية. كما أسهم التقدم في تقنيات البيولوجيا الجزيئية والتسلسل الجيني في اكتشاف أعداد متزايدة من الأنواع البكتيرية التي لم تكن معروفة سابقاً وهو ما يعزز فرص اكتشاف مركبات جديدة ذات تطبيقات مستقبلية واعدة. (العزاوي، 2017)

تكيف البكتيريا مع الظروف البيئية القاسية

يُعد التكيف من أبرز الخصائص التي مكّنت البكتيريا من الاستمرار في الحياة ضمن البيئات القاسية التي تتسم بدرجات حرارة مرتفعة أو منخفضة جداً أو بملوحة عالية أو بحموضة وقلوية شديدة أو بضغط مرتفع أو بجفاف طويل الأمد. وعلى الرغم من أن هذه الظروف تُعد قاتلة لمعظم الكائنات الحية فإن البكتيريا طورت عبر ملايين السنين منظومة متكاملة من التكيفات الفسيولوجية والكيميائية والوراثية التي ضمنت لها البقاء والاستمرار في أداء وظائفها الحيوية بكفاءة.

ويتمثل التكيف البكتيري في مجموعة من الاستجابات المنظمة التي تهدف إلى المحافظة على استقرار الخلية وحماية مكوناتها الحيوية من التلف الناتج عن الظروف البيئية القاسية. وتشمل هذه الاستجابات تعديل تركيب الأغشية الخلوية وإنتاج بروتينات الحماية وتنظيم العمليات الأيضية وإفراز المركبات المضادة للأكسدة فضلاً عن تنشيط الجينات المسؤولة عن مقاومة الإجهاد البيئي.

1. التكيف مع درجات الحرارة المرتفعة

تؤدي الحرارة المرتفعة إلى إتلاف البروتينات والأحماض النووية وزيادة سيولة الأغشية الخلوية مما يهدد بقاء الخلية. ولذلك تمتلك البكتيريا المحبة للحرارة آليات متطورة للحفاظ على استقرارها من أهمها إنتاج بروتينات الصدمة الحرارية التي تعمل على حماية البروتينات من التشوه وإعادة طيها بالشكل الصحيح عند تعرضها للحرارة. (القحطاني، 2018)

كما تحتوي أغشية هذه البكتيريا على نسب مرتفعة من الأحماض الدهنية المشبعة الأمر الذي يزيد من صلابة الغشاء ويحافظ على تماسكه في درجات الحرارة المرتفعة. بالإضافة إلى ذلك تمتلك إنزيمات مقاومة للتحلل الحراري تستطيع الاستمرار في أداء وظائفها الحيوية بكفاءة وهو ما يفسر استخدام العديد منها في التطبيقات الصناعية والبيوتكنولوجية.

2. التكيف مع درجات الحرارة المنخفضة

في البيئات شديدة البرودة تنخفض سرعة التفاعلات الحيوية كما تقل مرونة الأغشية الخلوية ويزداد خطر تكوين البلورات الجليدية داخل الخلايا. وللتغلب على هذه التحديات تنتج البكتيريا المحبة للبرودة إنزيمات نشطة في درجات الحرارة المنخفضة إضافة إلى بروتينات مضادة للتجمد تمنع تكوين البلورات الثلجية التي قد تؤدي إلى تمزق الخلية.

وتعمل هذه البكتيريا أيضاً على زيادة نسبة الأحماض الدهنية غير المشبعة في الأغشية الخلوية مما يحافظ على مرونتها وقدرتها على نقل المواد الغذائية والتخلص من الفضلات حتى في درجات الحرارة المنخفضة جداً. (Bodade et al., 2026)

3. التكيف مع الملوحة العالية

تشكل البيئات المالحة تحدياً كبيراً نتيجة ارتفاع الضغط الأسموزي الذي يؤدي إلى خروج الماء من الخلايا وفقدانها لحجمها الطبيعي. ولمواجهة ذلك تعتمد البكتيريا المحبة للملوحة على

استراتيجيتين أساسيتين؛ الأولى تتمثل في تراكم أيونات غير عضوية داخل الخلية والثانية في إنتاج مركبات عضوية متوافقة مثل البيتين والتريهالوز والبرولين والجليسين بيتين وهي مركبات تحافظ على الاتزان الأسموزي دون التأثير في نشاط الإنزيمات.

وتساعد هذه المركبات كذلك في تثبيت البروتينات والأغشية الخلوية مما يزيد من قدرة البكتيريا على تحمل التغيرات البيئية المفاجئة والاستمرار في النمو. (القحطاني، 2018)

4. التكيف مع البيئات الحمضية والقلوية

تتعرض البكتيريا في البيئات الحمضية أو القلوية لتغيرات كبيرة في تركيز أيونات الهيدروجين وهو ما قد يؤثر في نشاط الإنزيمات واستقرار البروتينات. ولتجنب ذلك تمتلك هذه الكائنات أنظمة متطورة لتنظيم انتقال الأيونات عبر الغشاء الخلوي بما يضمن الحفاظ على درجة حموضة داخلية مناسبة لاستمرار العمليات الحيوية.

كما تعمل بعض الإنزيمات المتخصصة على تعديل الوسط الداخلي باستمرار مما يسمح للبكتيريا بمقاومة التقلبات الحادة في درجة الحموضة والاستمرار في التكاثر.

5. التكيف مع الضغط المرتفع

تعيش بعض البكتيريا في أعماق المحيطات حيث يصل الضغط إلى مستويات مرتفعة جداً. وفي مثل هذه الظروف تُعد المحافظة على سلامة الأغشية الخلوية والإنزيمات أمراً بالغ الأهمية. ولذلك تتميز هذه البكتيريا بوجود أغشية أكثر مرونة وإنزيمات مقاومة لتأثير الضغط إضافة إلى تعديلات في تركيب البروتينات تمنع فقدان نشاطها الحيوي. (Madigan et al., 2021)

6. مقاومة الجفاف والإشعاع

في البيئات الصحراوية أو المناطق ذات الإشعاع المرتفع تواجه البكتيريا نقصاً شديداً في الماء وتعرضاً مستمراً للأشعة فوق البنفسجية مما يؤدي إلى تلف الحمض النووي وزيادة تكوين الجذور الحرة.

ولمواجهة هذه الظروف تنتج البكتيريا أغلفة مخاطية وكبسولات واقية تقلل من فقدان الماء كما تستطيع بعض الأنواع تكوين أبواغ داخلية تتحمل الظروف البيئية القاسية لفترات طويلة. إضافة

إلى ذلك تنتج أصباغاً طبيعية مثل الكاروتينات والميلانين التي تعمل على امتصاص الإشعاعات الضارة والحد من تأثيرها في مكونات الخلية. ((Willey et al., 2020)

7. إنتاج المركبات المضادة للأكسدة كآلية تكيف

يُعد إنتاج المركبات المضادة للأكسدة من أهم وسائل التكيف التي تعتمد عليها البكتيريا في البيئات القاسية. فالظروف البيئية العنيفة تؤدي إلى زيادة تكوين أنواع الأكسجين التفاعلية (Reactive Oxygen Species) وهي جزيئات نشطة قادرة على إتلاف الدهون والبروتينات والحمض النووي.

ولذلك تنتج البكتيريا مجموعة من الإنزيمات الدفاعية مثل إنزيم فوق أكسيد الديسميوتاز وإنزيم الكاتالاز وإنزيم البيروكسيداز بالإضافة إلى مركبات غير إنزيمية مثل الكاروتينات والجلوتاثيون والفينولات والعديد من المستقلبات الثانوية ذات النشاط المضاد للأكسدة.

ولا تقتصر أهمية هذه المركبات على حماية الخلية البكتيرية بل تمتلك قيمة تطبيقية كبيرة في الصناعات الدوائية والغذائية والتجميلية نظراً لقدرتها على الحد من الإجهاد التأكسدي المرتبط بالعديد من الأمراض. (Willey et al., 2020))

8. التكيف الوراثي والجزيئي

إلى جانب التكيفات الفسيولوجية تمتلك البكتيريا القدرة على تعديل نشاطها الجيني استجابةً للتغيرات البيئية. إذ تُفعَّل جينات معينة مسؤولة عن تصنيع بروتينات الحماية والإنزيمات المضادة للأكسدة والمركبات المنظمة للضغط الأسموزي بينما يُثبط نشاط الجينات غير الضرورية في تلك الظروف مما يساهم في ترشيد استهلاك الطاقة وزيادة كفاءة البقاء.

كما تلعب الطفرات الوراثية وانتقال الجينات بين البكتيريا دوراً مهماً في اكتساب صفات جديدة تساعدها على التكيف مع البيئات القاسية وهو ما يفسر التنوع الكبير في قدراتها الأيضية وإنتاجها لمركبات حيوية ذات أهمية اقتصادية وعلمية. (Nelson & Cox, 2021)

التنوع الميكروبي في البيئات القاسية

يُعد التنوع الميكروبي في البيئات القاسية من أكثر الموضوعات التي استقطبت اهتمام الباحثين في العقود الأخيرة وذلك بعد أن أثبتت الدراسات أن هذه البيئات على الرغم من ظروفها غير الملائمة

تضم مجتمعاً ميكروبياً غنياً يتميز بقدرات تكيفية واستقلابية فريدة. وقد غيّرت نتائج الأبحاث الحديثة النظرة التقليدية التي كانت ترى أن البيئات القاسية فقيرة بالحياة إذ تبين أنها تؤوي أعداداً كبيرة من الكائنات الدقيقة التي تنتمي إلى مجموعات تصنيفية مختلفة وتمتلك خصائص وراثية ووظيفية تجعلها مصدراً مهماً للعديد من المركبات الحيوية ذات القيمة الطبية والصناعية.

ويقصد بالتنوع الميكروبي اختلاف الكائنات الدقيقة من حيث الأنواع والتركيب الوراثي والوظائف الحيوية داخل النظام البيئي الواحد. ويشمل ذلك البكتيريا والعتائق والفطريات المجهرية والطحالب الدقيقة والفيروسات التي تصيب الكائنات الدقيقة. ويؤدي هذا التنوع دوراً رئيسياً في المحافظة على التوازن البيئي إذ تشارك هذه الكائنات في تدوير العناصر الغذائية وتحلل المواد العضوية وإنتاج العديد من المركبات النشطة حيوياً. ((Nelson & Cox, 2021)

وقد أسهم التطور الكبير في تقنيات البيولوجيا الجزيئية مثل تحليل الحمض النووي وتقنيات التسلسل الجيني الحديثة في الكشف عن أنواع عديدة من الكائنات الدقيقة التي لم يكن بالإمكان التعرف إليها باستخدام الطرق التقليدية المعتمدة على الزراعة المخبرية. وأظهرت هذه الدراسات أن نسبة كبيرة من الكائنات الدقيقة الموجودة في البيئات القاسية لا تزال غير معروفة الأمر الذي يجعلها مجالاً خصباً لاكتشاف أنواع جديدة ذات تطبيقات مستقبلية واعدة.

- التنوع الميكروبي في البيئات الحرارية

تتميز الينابيع الحارة والفوهات البركانية بوجود مجتمعات ميكروبية متخصصة قادرة على تحمل درجات حرارة مرتفعة قد تتجاوز 90°م. وتضم هذه البيئات أنواعاً متعددة من البكتيريا المحبة للحرارة مثل أجناس Thermus وGeobacillus وThermotoga التي تمتلك إنزيمات مستقرة حرارياً وتنتج مركبات حيوية تستخدم في الصناعات الدوائية والغذائية.

كما أثبتت الدراسات أن العديد من هذه البكتيريا ينتج أصباغاً طبيعية ومركبات مضادة للأكسدة تساعدها على مقاومة التأثيرات الناتجة عن الحرارة المرتفعة مما يزيد من أهميتها في تطبيقات التكنولوجيا الحيوية. (Nelson & Cox, 2021)

- التنوع الميكروبي في البيئات المالحة

تعد البحيرات شديدة الملوحة والسبخات من أكثر البيئات غنىً بالكائنات الدقيقة المحبة للملوحة حيث تنتشر فيها أنواع مختلفة من البكتيريا والعتائق القادرة على النمو في تراكيز عالية من الأملاح. وتمتلك هذه الكائنات القدرة على إنتاج مركبات عضوية وإنزيمات مقاومة للملوحة بالإضافة إلى أصباغ الكاروتينات التي تعمل بوصفها مضادات أكسدة طبيعية.

ويكتسب هذا التنوع أهمية كبيرة في الصناعات الغذائية والدوائية نظراً لقدرة هذه الكائنات على إنتاج مركبات مستقرة في الظروف البيئية القاسية وهو ما يميزها عن الكائنات الدقيقة التقليدية. ((Rampelotto, 2013)

- التنوع الميكروبي في البيئات الصحراوية

تشكل الصحارى أحد أكثر النظم البيئية تحدياً نتيجة ارتفاع درجات الحرارة ونقص المياه والتعرض المستمر للأشعة فوق البنفسجية. ورغم ذلك تضم التربة الصحراوية أعداداً كبيرة من البكتيريا المقاومة للجفاف ولا سيما أنواع Bacillus وStreptomyces وMicrococcus التي تمتلك قدرة عالية على تكوين الأبواغ وإنتاج مركبات مضادة للأكسدة والمضادات الحيوية والإنزيمات الصناعية.

وقد أظهرت الأبحاث أن هذه الكائنات تمثل مصدراً مهماً لاكتشاف مركبات دوائية جديدة خاصة مع تزايد مقاومة الميكروبات للمضادات الحيوية التقليدية.

- التنوع الميكروبي في البيئات الحمضية والقلوية

تحتضن البيئات الحمضية والقلوية مجتمعات ميكروبية متخصصة استطاعت التكيف مع التغيرات الحادة في درجة الحموضة. وتشارك هذه الكائنات في العديد من العمليات البيوجيوكيميائية مثل أكسدة الكبريت والحديد وإعادة تدوير العناصر المعدنية كما تنتج إنزيمات ومركبات حيوية مستقرة في ظروف الحموضة أو القلوية الشديدة الأمر الذي يجعلها ذات أهمية كبيرة في الصناعات الكيميائية والبيئية. (Satyanarayana et al., 2013)

- التنوع الميكروبي في أعماق البحار

تعد أعماق المحيطات من أقل البيئات استكشافاً على سطح الأرض إلا أنها تضم تنوعاً ميكروبياً واسعاً يتكيف مع الضغط المرتفع ودرجات الحرارة المنخفضة ونقص الضوء. وتنتج الكائنات

الدقيقة في هذه البيئات إنزيمات ومركبات ثانوية ذات خصائص كيميائية فريدة من بينها مضادات الأكسدة والمركبات المضادة للالتهابات والمضادة للأورام مما يجعلها محوراً مهماً للأبحاث الدوائية الحديثة.

أهمية التنوع الميكروبي في إنتاج المركبات المضادة للأكسدة

يُعد التنوع الميكروبي العامل الأساسي في زيادة فرص اكتشاف سلالات بكتيرية جديدة قادرة على إنتاج مركبات مضادة للأكسدة ذات كفاءة عالية. فاختلاف الظروف البيئية يؤدي إلى اختلاف المسارات الأيضية للكائنات الدقيقة وبالتالي إنتاج أنواع متعددة من المركبات الحيوية التي تختلف في تركيبها الكيميائي وخصائصها البيولوجية.

وقد أثبتت الدراسات أن البكتيريا المعزولة من البيئات القاسية تنتج مجموعة واسعة من المركبات المضادة للأكسدة مثل الكاروتينات والفينولات والجلوتاثيون والسكريات الخارجية والعديد من المستقلبات الثانوية التي تتميز بقدرتها على تثبيط الجذور الحرة وحماية الخلايا من التلف التأكسدي.

وتتميز هذه المركبات باستقرارها العالي مقارنة بالمركبات المنتجة من الكائنات التي تعيش في البيئات المعتدلة ويرجع ذلك إلى تكيف الكائنات المنتجة لها مع ظروف قاسية تتطلب وجود أنظمة دفاعية أكثر كفاءة. (Satyanarayana et al., 2013)

التقنيات الحديثة في دراسة التنوع الميكروبي

ساهمت التقنيات الحديثة في إحداث نقلة نوعية في دراسة التنوع الميكروبي حيث أصبح بالإمكان التعرف إلى الكائنات الدقيقة دون الحاجة إلى عزلها أو زراعتها مخبرياً. ومن أبرز هذه التقنيات تحليل جين S rRNA16 وتقنيات الميتاجينوم Metagenomics)) والتسلسل الجيني عالي الإنتاجية (Next Generation Sequencing) التي أتاحت دراسة المجتمعات الميكروبية بصورة أكثر دقة وشمولاً.

وقد أسهمت هذه الأدوات في اكتشاف آلاف الأنواع البكتيرية الجديدة والكشف عن جينات مسؤولة عن إنتاج مركبات حيوية ذات أهمية كبيرة مما عزز من فرص توظيف هذه الكائنات في الصناعات الدوائية والغذائية والتجميلية.

- **المطلب الثاني: البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة**

مفهوم المركبات المضادة للأكسدة ودورها الحيوي

تُعد المركبات المضادة للأكسدة من أهم المركبات الحيوية التي حظيت باهتمام واسع في مجالات الأحياء الدقيقة والكيمياء الحيوية والتكنولوجيا الحيوية نظراً لدورها الأساسي في حماية الخلايا من التأثيرات الضارة الناتجة عن عمليات الأكسدة. وتُعرف مضادات الأكسدة بأنها مجموعة من المركبات القادرة على تثبيط أو إبطاء التفاعلات التأكسدية من خلال معادلة الجذور الحرة أو منع تكوينها أو تقليل تأثيرها على المكونات الخلوية. (Aladhadh, 2026)

وتنشأ الجذور الحرة نتيجة العمليات الأيضية الطبيعية داخل الخلايا كما يمكن أن تزداد نتيجة التعرض للعوامل البيئية المختلفة مثل الإشعاع ودرجات الحرارة المرتفعة والملوثات الكيميائية والإجهاد البيئي. وعندما يحدث اختلال بين إنتاج الجذور الحرة وقدرة الخلية على التخلص منها تنشأ حالة تعرف بالإجهاد التأكسدي والتي قد تؤدي إلى تلف البروتينات والدهون والأحماض النووية مما يؤثر في وظائف الخلية وقد يرتبط بحدوث العديد من الاضطرابات الصحية.

وقد طورت الكائنات الدقيقة وخاصة البكتيريا التي تعيش في البيئات القاسية أنظمة دفاعية فعالة لمواجهة الإجهاد التأكسدي الناتج عن الظروف البيئية الصعبة. ومن بين أهم هذه الأنظمة إنتاج إنزيمات مضادة للأكسدة ومركبات أيضية ثانوية تساعدها على حماية مكوناتها الخلوية والمحافظة على بقائها. (Aruoma, 1998)

ولا تقتصر أهمية هذه المركبات على دورها داخل الخلية البكتيرية بل أصبحت ذات قيمة تطبيقية كبيرة إذ تستخدم في تطوير المستحضرات الدوائية والمكملات الغذائية والمواد الحافظة الطبيعية ومنتجات العناية بالبشرة بسبب قدرتها على مقاومة الأكسدة وتقليل الأضرار الناتجة عن الجذور الحرة.

آليات إنتاج البكتيريا للمركبات المضادة للأكسدة

تمتلك البكتيريا مجموعة متنوعة من الآليات التي تمكنها من إنتاج المركبات المضادة للأكسدة وتختلف هذه الآليات تبعاً لنوع البكتيريا والظروف البيئية التي تعيش فيها. فالبكتيريا الموجودة في

البيئات القاسية تكون غالباً أكثر قدرة على إنتاج هذه المركبات نتيجة تعرضها المستمر لعوامل تؤدي إلى زيادة تكوين الجذور الحرة.

1. إنتاج الإنزيمات المضادة للأكسدة

تُعد الإنزيمات الدفاعية من أهم وسائل الحماية التي تستخدمها البكتيريا للتعامل مع الأنواع النشطة من الأكسجين. ومن أبرز هذه الإنزيمات: (Aruoma, 1998)

أ- إنزيم فوق أكسيد الديسميوتاز:

يعمل هذا الإنزيم على تحويل جذور الأكسجين الحرة شديدة التفاعل إلى بيروكسيد الهيدروجين الذي يمكن التخلص منه لاحقاً بواسطة إنزيمات أخرى. ويعد هذا الإنزيم من أهم أنظمة الدفاع المضادة للأكسدة في البكتيريا خاصة الأنواع التي تعيش في البيئات الغنية بالأكسجين أو المعرضة للإجهاد البيئي.

ب- إنزيم الكاتالاز:

يقوم إنزيم الكاتالاز بتحليل بيروكسيد الهيدروجين إلى ماء وأكسجين مما يمنع تراكمه داخل الخلية وتحوله إلى مركبات أكثر ضرراً. وتزداد أهمية هذا الإنزيم لدى البكتيريا التي تواجه ظروفاً بيئية تؤدي إلى ارتفاع مستويات الإجهاد التأكسدي. (Aruoma, 1998)

ج- إنزيم البيروكسيداز:

يسهم هذا الإنزيم في التخلص من المركبات المؤكسدة المختلفة ويحافظ على التوازن الكيميائي داخل الخلية مما يساعد البكتيريا على مقاومة الظروف البيئية غير الملائمة.

2. إنتاج المركبات غير الإنزيمية المضادة للأكسدة

بالإضافة إلى الإنزيمات تنتج البكتيريا مجموعة من المركبات الكيميائية الصغيرة التي تمتلك نشاطاً مضاداً للأكسدة ومن أهمها: (Barros et al., 2009)

الكاروتينات:

وهي أصباغ طبيعية تنتجها بعض البكتيريا لحماية الخلايا من الأضرار الناتجة عن الضوء والإشعاع والأكسدة كما تمتلك قدرة عالية على التقاط الجذور الحرة.

الجلوتاثيون:

وهو مركب كبريتي يعمل كعامل مختزل داخل الخلية ويساعد في المحافظة على التوازن التأكسدي وحماية البروتينات والأغشية الخلوية. (Aladhadh, 2026)

المركبات الفينولية:

وهي مركبات ذات نشاط قوي ضد الأكسدة وقد تم اكتشاف قدرة بعض السلالات البكتيرية على إنتاجها أو تعديلها حيوياً. (Barros et al., 2009)

السكريات الخارجية:

تنتج بعض البكتيريا هذه المركبات لتكوين طبقة واقية حول الخلية وقد أظهرت بعض الأنواع نشاطاً مضاداً للأكسدة مرتبطاً بهذه السكريات.

ثالثاً: أهمية إنتاج مضادات الأكسدة لدى البكتيريا في البيئات القاسية

تزداد أهمية إنتاج مضادات الأكسدة لدى البكتيريا التي تعيش في البيئات القاسية بسبب طبيعة الظروف التي تواجهها. فالحرارة المرتفعة والإشعاع والملوحة ونقص المياه والتغيرات الكيميائية الشديدة تؤدي جميعها إلى زيادة إنتاج الجذور الحرة داخل الخلايا.

ولذلك فإن امتلاك هذه البكتيريا لأنظمة مضادة للأكسدة فعالة يمثل عاملاً أساسياً في بقائها كما يمنحها خصائص حيوية مميزة يمكن استثمارها في المجالات التطبيقية. فالمركبات التي تنتجها هذه الكائنات غالباً ما تتميز بدرجة عالية من الاستقرار نتيجة تطورها للعمل في ظروف بيئية صعبة. (Bodade et al., 2026)

كما أن دراسة هذه البكتيريا تساعد الباحثين على فهم آليات المقاومة الطبيعية للإجهاد التأكسدي وتطوير مركبات جديدة يمكن استخدامها في حماية الخلايا البشرية والحيوانية من الأضرار التأكسدية (Barros et al., 2009)

أهم أنواع البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة في البيئات القاسية

تمثل البكتيريا المعزولة من البيئات القاسية مصدراً مهماً لاكتشاف مركبات حيوية جديدة وذلك بسبب امتلاكها مسارات أيضية متطورة تساعدها على إنتاج مركبات دفاعية ذات نشاط مضاد للأكسدة. وتختلف قدرة هذه البكتيريا على إنتاج مضادات الأكسدة باختلاف نوعها والظروف

البيئية التي تعيش فيها وفيما يأتي أبرز المجموعات البكتيرية التي أظهرت قدرة على إنتاج هذه المركبات:

1. بكتيريا Bacillus

تعد بكتيريا Bacillus من أكثر الأجناس البكتيرية انتشاراً في البيئات القاسية وخاصة التربة الصحراوية والينابيع الحارة والبيئات قليلة المياه. وتمتاز بقدرتها على تكوين الأبواغ الداخلية التي تمنحها مقاومة عالية للجفاف والحرارة والإشعاع والعوامل البيئية غير الملائمة. (Kumar & Kumar, 2018)

تنتج بعض أنواع Bacillus مجموعة من المركبات الحيوية مثل الإنزيمات المضادة للأكسدة والبيبتيدات الحيوية والمركبات الفينولية إضافة إلى مركبات ثانوية تساعدها على مقاومة الإجهاد التأكسدي. وقد جعلت هذه الخصائص منها كائناً مهماً في التطبيقات الصناعية والغذائية نظراً لقدرتها على إنتاج مركبات مستقرة يمكن استخدامها كمكونات طبيعية في المنتجات الحيوية.

2. بكتيريا Streptomyces

ينتمي جنس Streptomyces إلى مجموعة البكتيريا الخيطية ويُعد من أغنى المصادر الطبيعية للمركبات الثانوية ذات النشاط الحيوي. توجد هذه البكتيريا بشكل واسع في التربة والبيئات الجافة والمالحة وقد اشتهرت بقدرتها على إنتاج العديد من المضادات الحيوية والمركبات الدوائية. (Kumar & Kumar, 2018)

كما تنتج بعض أنواع Streptomyces أصباغاً طبيعية ومركبات ذات خصائص مضادة للأكسدة تساعدها على مقاومة الظروف البيئية الصعبة. وتُعد هذه المجموعة من أكثر الكائنات الدقيقة أهمية في اكتشاف مركبات جديدة بسبب تنوعها الوراثي وقدرتها العالية على تصنيع جزيئات معقدة ذات نشاط حيوي.

3. بكتيريا Thermus

تُعد بكتيريا Thermus من الكائنات المحبة للحرارة وتوجد غالباً في الينابيع الحارة والبيئات ذات درجات الحرارة المرتفعة. وتمتلك أنظمة إنزيمية مقاومة للحرارة مما يسمح لها بالحفاظ على نشاطها الحيوي في ظروف لا تستطيع معظم البكتيريا تحملها.

وتنتج بعض أنواع هذا الجنس مركبات دفاعية تساعدها على مواجهة الإجهاد الناتج عن الحرارة العالية وزيادة تكوين الجذور الحرة. كما أن إنزيماتها المقاومة للحرارة تمتلك تطبيقات واسعة في الصناعات الحيوية مثل الصناعات الغذائية والتشخيص الجزيئي. (Kumar & Kumar, 2018)

4. بكتيريا Halomonas

تنتشر بكتيريا Halomonas في البيئات شديدة الملوحة مثل البحيرات المالحة والمناطق الساحلية وتمتلك قدرة عالية على التكيف مع تراكيز الملح المرتفعة. وتعتمد على إنتاج مركبات أسموزية واقية تساعدها على المحافظة على التوازن الداخلي للخلية. (Caro-Astorga et al., 2024)

وقد أظهرت بعض أنواع هذه البكتيريا قدرة على إنتاج مركبات ذات نشاط مضاد للأكسدة مثل السكريات الخارجية والمركبات العضوية الواقية مما جعلها محط اهتمام في مجالات التكنولوجيا الحيوية وإنتاج المركبات الطبيعية.

5. بكتيريا Pseudomonas

توجد أنواع عديدة من Pseudomonas في البيئات المتنوعة بما فيها التربة والمياه والبيئات الملوثة. وتمتلك هذه البكتيريا قدرات أيضية واسعة تمكنها من إنتاج مجموعة كبيرة من المركبات الثانوية.

وتنتج بعض أنواعها أصباغاً ومركبات حيوية تساعد في مقاومة الإجهاد التأكسدي كما تمتلك أنظمة إنزيمية فعالة للتعامل مع المركبات المؤكسدة مما يمنحها قدرة عالية على البقاء في البيئات المتغيرة.

6. بكتيريا Deinococcus

تُعد Deinococcus من أكثر البكتيريا مقاومة للإشعاع والجفاف إذ تستطيع تحمل مستويات عالية من الإشعاع مقارنة بمعظم الكائنات الحية المعروفة. ويرجع ذلك إلى امتلاكها آليات فعالة لإصلاح تلف الحمض النووي إضافة إلى إنتاج مركبات مضادة للأكسدة تحمي مكونات الخلية من التأثيرات الضارة للجذور الحرة.

وتُعد هذه البكتيريا نموذجاً مهماً لدراسة آليات المقاومة البيولوجية للإجهاد التأكسدي كما تفتح المجال أمام تطبيقات مستقبلية في التكنولوجيا الحيوية والطب. (عبد الرحمن، 2015)

العوامل المؤثرة في إنتاج البكتيريا للمركبات المضادة للأكسدة

لا يعتمد إنتاج البكتيريا للمركبات المضادة للأكسدة على نوع السلالة فقط بل يتأثر بمجموعة من العوامل البيئية والغذائية والوراثية التي تتحكم في نشاطها الأيضي. ومن أهم هذه العوامل:

1. درجة الحرارة

تؤثر درجة الحرارة بصورة مباشرة في نشاط الإنزيمات والمسارات الأيضية داخل الخلية البكتيرية. فلكل نوع بكتيري درجة حرارة مثلى للنمو والإنتاج وقد يؤدي ارتفاع أو انخفاض الحرارة عن الحد المناسب إلى انخفاض إنتاج المركبات الحيوية. (الجبوري، 2014)

أما البكتيريا المحبة للظروف الحرارية القاسية فقد طورت أنظمة تسمح لها بإنتاج مركبات مستقرة حتى في درجات الحرارة المرتفعة.

2. الرقم الهيدروجيني ((pH

يؤثر الرقم الهيدروجيني في تركيب الخلية ونشاط الإنزيمات المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة. فبعض البكتيريا المتكيفة مع البيئات الحمضية أو القلوية تمتلك القدرة على إنتاج مركبات فعالة ضمن نطاقات مختلفة من الحموضة.

3. تركيز الأملاح

تؤثر الملوحة في العمليات الأسموزية داخل الخلية وقد تحفز المستويات المرتفعة من الأملاح بعض البكتيريا على زيادة إنتاج المركبات الواقية مثل السكريات الخارجية والمركبات العضوية المتوافقة التي تمتلك أحياناً خصائص مضادة للأكسدة. (Wang et al., 2024)

4. مصادر الكربون والنيتروجين

تلعب مكونات الوسط الغذائي دوراً مهماً في تنظيم إنتاج المركبات الثانوية. فقد يؤدي تغيير مصدر الكربون أو النيتروجين إلى تنشيط مسارات أيضية معينة مسؤولة عن تصنيع مضادات الأكسدة بينما قد يؤدي نقص بعض العناصر إلى انخفاض الإنتاج. (العزاوي، 2017)

5. توفر الأكسجين

يؤثر مستوى الأكسجين في البيئة على كمية الجذور الحرة المتكونة داخل الخلية وبالتالي يؤثر في حاجة البكتيريا إلى إنتاج أنظمة دفاع مضادة للأكسدة. وقد تزيد بعض الظروف المؤكسدة من تنشيط الجينات المسؤولة عن إنتاج هذه المركبات. (Wang et al., 2024)

6. العوامل الوراثية

تلعب الجينات دوراً رئيسياً في تحديد قدرة البكتيريا على إنتاج المركبات المضادة للأكسدة حيث تتحكم الجينات المنظمة في تصنيع الإنزيمات والمركبات الثانوية. وقد ساعدت تقنيات الهندسة الوراثية والتعديل الجيني على تحسين إنتاج بعض المركبات الحيوية وزيادة كفاءتها. (العزاوي، 2017)

يتضح أن البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة في البيئات القاسية تمثل مصدراً مهماً للمركبات الحيوية ذات القيمة العلمية والتطبيقية. فقد مكنتها قدرتها على التكيف مع الظروف الصعبة من تطوير أنظمة دفاعية معقدة تشمل الإنزيمات والمركبات الثانوية المضادة للأكسدة. كما أن تنوعها الكبير واختلاف خصائصها الأيضية يوفر فرصاً واسعة لاكتشاف مركبات جديدة يمكن توظيفها في المجالات الطبية والغذائية والصناعية مما يجعلها أحد الاتجاهات الواعدة في أبحاث التكنولوجيا الحيوية الحديثة. (Wang et al., 2024)

المبحث الثاني: التطبيقات الحيوية للبكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة

- **المطلب الأول: طرق عزل وتشخيص البكتيريا واستخلاص المركبات المضادة للأكسدة**

جمع العينات من البيئات القاسية

تُعد عملية جمع العينات من البيئات القاسية الخطوة الأولى والأساسية في دراسة البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة إذ تتطلب هذه العملية اتباع أساليب دقيقة تضمن المحافظة على الخصائص الطبيعية للكائنات الدقيقة وعدم التأثير في نشاطها الحيوي. وتختلف طرق جمع العينات تبعاً لطبيعة البيئة المستهدفة سواء كانت ينابيع حارة أو بحيرات مالحة أو تربة صحراوية أو أعماق بحرية. (العزاوي، 2017)

في البيئات الحرارية يتم جمع العينات من مصادر المياه الساخنة أو الرواسب المحيطة بها باستخدام أدوات معقمة مقاومة للحرارة مع تسجيل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للبيئة مثل درجة الحرارة ودرجة الحموضة وتركيز المعادن والأملاح لأن هذه العوامل تساعد في تفسير طبيعة الكائنات الدقيقة الموجودة وقدرتها على إنتاج المركبات الحيوية.

أما في البيئات الصحراوية فتُجمع عينات التربة من أعماق مختلفة لتجنب تأثير العوامل السطحية ثم تحفظ في ظروف مناسبة للحفاظ على البكتيريا القادرة على مقاومة الجفاف والإجهاد البيئي. وفي البيئات المالحة تؤخذ عينات من المياه أو الرواسب مع مراعاة المحافظة على تركيز الأملاح الطبيعي لأن بعض البكتيريا تعتمد على هذه الظروف للحفاظ على نشاطها الحيوي.

وتُعد المحافظة على الظروف الأصلية للعينة أمراً مهماً لأن التغيرات المفاجئة في درجة الحرارة أو الملوحة أو الحموضة قد تؤدي إلى فقدان بعض الأنواع البكتيرية الحساسة أو تغير نشاطها الأيضي مما يؤثر في نتائج الدراسة. (العزاوي، 2017)

عزل البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة

بعد جمع العينات تبدأ مرحلة عزل البكتيريا بهدف الحصول على سلالات نقية يمكن دراستها وتحليل خصائصها الحيوية. وتعتمد عملية العزل على استخدام أوساط زراعية مناسبة تحاكي الظروف البيئية التي جاءت منها البكتيريا وذلك بهدف زيادة فرصة نمو الأنواع المتخصصة في تلك البيئات.

تُستخدم العديد من التقنيات لعزل البكتيريا ومن أهمها:

1. تقنية التخفيف المتسلسل

تعتمد هذه الطريقة على تخفيف العينة الأصلية عدة مرات ثم زراعتها على أوساط غذائية مناسبة مما يسمح بفصل الخلايا البكتيرية والحصول على مستعمرات منفردة يمكن تنقيتها ودراستها. (Merino et al., 2019)

2. الزراعة الانتقائية

تستخدم الأوساط الانتقائية التي تحتوي على ظروف معينة مثل ارتفاع الملوحة أو درجات الحرارة المرتفعة أو انخفاض الرقم الهيدروجيني وذلك للسماح بنمو البكتيريا القادرة على تحمل هذه الظروف فقط. (العزاوي، 2017)

3. التنقية والحصول على عزلات نقية

بعد ظهور المستعمرات البكتيرية يتم اختيار المستعمرات ذات الصفات المختلفة وإعادة زراعتها عدة مرات للحصول على عزلات نقية خالية من التلوث تمهيداً لدراسة خصائصها وإنتاجها للمركبات الحيوية.

تشخيص وتعريف البكتيريا المعزولة

يمثل تشخيص البكتيريا خطوة أساسية لتحديد هوية السلالات المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة ويتم ذلك باستخدام مجموعة من الأساليب التقليدية والجزيئية.

1. التشخيص المجهري والكيميائي الحيوي

تشمل هذه الطرق دراسة شكل الخلايا البكتيرية وترتيبها وقدرتها على تكوين الأبواغ إضافة إلى إجراء اختبارات كيميائية حيوية للكشف عن قدرتها على استهلاك مصادر غذائية مختلفة وإنتاج إنزيمات معينة.

ويُعد اختبار صبغة غرام (Gram Staining) من الطرق الأساسية المستخدمة للتمييز بين البكتيريا موجبة الغرام وسالبة الغرام حيث يساعد في إعطاء معلومات أولية عن طبيعة الجدار الخلوي للبكتيريا.

2. التشخيص الجزيئي

أحدثت التقنيات الجزيئية تطوراً كبيراً في مجال التعرف على البكتيريا حيث أصبح بالإمكان تحديد الأنواع البكتيرية بدقة عالية باستخدام تحليل المادة الوراثية.

ومن أهم التقنيات المستخدمة: (القحطاني، 2018)

تحليل جين S rRNA16 الذي يعد من أكثر الطرق انتشاراً في تصنيف البكتيريا والتعرف عليها.

تقنية تفاعل البوليميراز المتسلسل (PCR) للكشف عن جينات معينة مرتبطة بإنتاج المركبات الحيوية.

تقنيات التسلسل الجيني الحديثة التي تسمح بدراسة القدرات الوراثية الكاملة للبكتيريا.

وتساعد هذه التقنيات في اكتشاف السلالات الجديدة التي قد تمتلك قدرات غير معروفة سابقاً في إنتاج مضادات الأكسدة.

استخلاص المركبات المضادة للأكسدة من البكتيريا

بعد تحديد السلالات البكتيرية المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة تبدأ مرحلة استخلاص هذه المركبات ودراسة خصائصها الكيميائية والحيوية. وتعتمد طرق الاستخلاص على طبيعة المركب المنتج وموقع وجوده داخل الخلية أو خارجها. (القحطاني، 2018)

1. استخلاص المركبات خارج الخلية

تقوم بعض البكتيريا بإفراز المركبات الحيوية إلى الوسط المحيط بها مما يسهل عملية جمعها وتنقيتها من الوسط الزراعي باستخدام تقنيات الفصل والترشيح.

2. استخلاص المركبات داخل الخلية

في حال وجود المركبات داخل الخلايا البكتيرية يتم استخدام طرق مثل تفتيت الخلايا واستخلاص المكونات الداخلية باستخدام مذيبات مناسبة ثم فصل المركبات النشطة وتحليلها. (الخطيب، 2012)

3. تقييم النشاط المضاد للأكسدة

تستخدم عدة اختبارات مخبرية لتقييم قدرة المركبات المستخلصة على مقاومة الأكسدة ومن أشهرها:

اختبار إزالة الجذور الحرة DPPH.

اختبار القدرة الاختزالية للحديد FRAP.

اختبار تثبيط أكسدة الدهون.

قياس نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة.

وتساعد هذه الاختبارات في تحديد كفاءة المركبات المنتجة ومقارنتها بمضادات الأكسدة المعروفة.

- **لمطلب الثاني: التطبيقات الحيوية والآفاق المستقبلية للبكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة**

التطبيقات الطبية والصيدلانية للمركبات المضادة للأكسدة البكتيرية

أدى الاهتمام المتزايد بالمركبات الطبيعية ذات النشاط المضاد للأكسدة إلى توجيه الدراسات الحديثة نحو استثمار الكائنات الدقيقة وخاصة البكتيريا القادمة من البيئات القاسية بوصفها مصدراً جديداً للمركبات الحيوية ذات الاستخدامات الطبية. وتتميز المركبات المنتجة بواسطة هذه البكتيريا بخصائص كيميائية وبيولوجية مميزة نتيجة تكيف الكائنات المنتجة لها مع ظروف بيئية صعبة الأمر الذي يجعلها مرشحة للعديد من التطبيقات العلاجية والوقائية. (Merino et al., 2019)

1. الحماية من الإجهاد التأكسدي المرتبط بالأمراض

يُعد الإجهاد التأكسدي أحد العوامل المساهمة في تطور العديد من الأمراض المزمنة نتيجة تراكم الجذور الحرة التي تسبب تلفاً في مكونات الخلايا. لذلك فإن المركبات المضادة للأكسدة المنتجة من البكتيريا قد تساعد في تقليل هذه الأضرار من خلال قدرتها على معادلة الجذور الحرة وتقليل عمليات الأكسدة داخل الخلايا. (الخطيب، 2012)

وقد اهتمت الدراسات بإمكانية استخدام هذه المركبات في دعم العلاجات المرتبطة بالأمراض التي تتأثر بزيادة الإجهاد التأكسدي مثل أمراض القلب والأوعية الدموية والاضطرابات العصبية وبعض الأمراض الالتهابية وذلك بسبب قدرتها المحتملة على تعزيز دفاعات الجسم الطبيعية ضد العوامل المؤكسدة.

2. تطوير مركبات دوائية جديدة

تتميز البكتيريا الموجودة في البيئات القاسية بقدرتها على إنتاج مستقلبات ثانوية ذات تركيب كيميائي متنوع وقد أسهم هذا التنوع في اكتشاف العديد من المركبات التي تمتلك أنشطة دوائية متعددة مثل النشاط المضاد للالتهاب والمضاد للميكروبات والمضاد للأكسدة.

وتُعد أجناس مثل Streptomyces وBacillus من أهم المصادر البكتيرية التي يتم البحث فيها عن مركبات جديدة نظراً لقدرتها على إنتاج جزيئات معقدة يمكن تطويرها لتصبح مواد دوائية مستقبلية. (Madigan et al., 2021)

كما تساعد دراسة الجينات المسؤولة عن تصنيع هذه المركبات في تطوير تقنيات لإنتاجها بكميات أكبر وتحسين خصائصها العلاجية باستخدام الهندسة الوراثية والتقنيات الحيوية الحديثة.

3. التطبيقات في مكافحة الشيخوخة وحماية الخلايا

تستخدم مضادات الأكسدة بشكل واسع في الدراسات المتعلقة بالشيخوخة لأن تراكم الأضرار التأكسدية يعد من العوامل المرتبطة بتراجع كفاءة الخلايا مع تقدم العمر. ولذلك فإن المركبات المضادة للأكسدة المنتجة من البكتيريا تمثل مجالاً بحثياً مهماً في تطوير مستحضرات ومواد تساعد على حماية الخلايا وتقليل تأثير الجذور الحرة. (Bodade et al., 2026)

ثانياً: التطبيقات الغذائية للمركبات المضادة للأكسدة البكتيرية

يمثل القطاع الغذائي أحد أهم المجالات التي يمكن الاستفادة فيها من المركبات المضادة للأكسدة المنتجة بواسطة البكتيريا خاصة مع تزايد الطلب على البدائل الطبيعية للمواد الحافظة الصناعية. (Madigan et al., 2021)

1. استخدامها كمواد حافظة طبيعية

تتعرض الأغذية أثناء التخزين إلى عمليات أكسدة تؤدي إلى تغير اللون والطعم والقيمة الغذائية خصوصاً في المنتجات الغنية بالدهون. لذلك تستخدم مضادات الأكسدة للحد من هذه العمليات والحفاظ على جودة الغذاء.

وقد أظهرت بعض المركبات المنتجة من البكتيريا قدرة على تثبيط أكسدة الدهون وحماية المكونات الغذائية مما يجعلها بديلاً محتملاً للمواد الصناعية المستخدمة في حفظ الأغذية.

2. تحسين القيمة الغذائية للمنتجات

يمكن لبعض المركبات الحيوية المنتجة من البكتيريا أن تساهم في رفع القيمة الصحية للمنتجات الغذائية خاصة عند استخدامها كمكونات وظيفية تمتلك تأثيرات وقائية بالإضافة إلى دورها الغذائي.

كما يمكن توظيف بعض البكتيريا المفيدة أو منتجاتها الحيوية في تطوير أغذية وظيفية تحتوي على مركبات ذات فوائد صحية إضافية. (Margesin & Schinner, 2001)

3. إنتاج أصباغ طبيعية

تنتج بعض البكتيريا المحبة للظروف القاسية أصباغاً طبيعية مثل الكاروتينات والتي لا تعمل فقط كمواد ملونة بل تمتلك أيضاً خصائص مضادة للأكسدة.

وتتميز هذه الأصباغ بإمكانية استخدامها في الصناعات الغذائية كمصادر طبيعية للألوان بدلاً من بعض الأصباغ الصناعية التي قد تواجه قيوداً تنظيمية وصحية. (Bodade et al., 2026)

ثالثاً: التطبيقات التجميلية للمركبات المضادة للأكسدة البكتيرية

شهدت صناعة مستحضرات التجميل اهتماماً كبيراً بالمركبات الطبيعية المضادة للأكسدة بسبب دورها في حماية الجلد من التأثيرات الناتجة عن الأشعة فوق البنفسجية والتلوث والعوامل البيئية المختلفة. (Margesin & Schinner, 2001)

وتستخدم المركبات المضادة للأكسدة في المنتجات التجميلية بهدف: (Bodade et al., 2026)

تقليل تأثير الجذور الحرة على خلايا الجلد.

دعم المحافظة على مرونة البشرة.

المساهمة في حماية مكونات الجلد من التلف التأكسدي.

تطوير منتجات عناية بالبشرة تعتمد على مصادر طبيعية.

وتتميز المركبات المنتجة من البكتيريا المتكيفة مع البيئات القاسية بقدرتها على تحمل الظروف الصعبة مما قد يمنحها استقراراً أعلى مقارنة ببعض المركبات الطبيعية الأخرى. (Aruoma, 1998)

التطبيقات الصناعية والبيئية

لا تقتصر أهمية البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة على المجالات الطبية والغذائية فقط بل تمتد إلى تطبيقات صناعية وبيئية متعددة.

1. إنتاج الإنزيمات الصناعية

تنتج البكتيريا القادرة على العيش في الظروف القاسية إنزيمات تتميز بالثبات في درجات الحرارة المرتفعة أو الظروف الكيميائية الصعبة ولذلك تستخدم في صناعات مختلفة مثل الصناعات الغذائية والكيميائية والمنظفات.

2. المعالجة الحيوية للملوثات

تمتلك بعض البكتيريا المتكيفة مع البيئات القاسية قدرة على تحليل المركبات الملوثة وتحويلها إلى مواد أقل ضرراً مما يجعلها أدوات مهمة في مجال المعالجة الحيوية للبيئة. (Aruoma, 1998)

3. تطوير منتجات حيوية مستدامة

يسهم استخدام البكتيريا في إنتاج المركبات الحيوية في تقليل الاعتماد على المصادر الكيميائية التقليدية ودعم الاتجاه نحو منتجات أكثر استدامة وصديقة للبيئة.

التحديات والآفاق المستقبلية

على الرغم من الإمكانات الكبيرة للبكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة فإن استثمارها على نطاق واسع ما زال يواجه عدداً من التحديات العلمية والتقنية.

ومن أبرز هذه التحديات:

1. صعوبة عزل بعض الأنواع البكتيرية

تحتاج العديد من البكتيريا الموجودة في البيئات القاسية إلى ظروف نمو خاصة تشبه بيئتها الأصلية مما يجعل زراعتها مخبرياً أمراً صعباً في بعض الحالات.

2. انخفاض إنتاج المركبات الحيوية

قد تنتج بعض السلالات كميات محدودة من المركبات المضادة للأكسدة مما يتطلب تطوير تقنيات لتحسين الإنتاج باستخدام التحفيز البيئي أو الهندسة الوراثية. (Aruoma, 1998)

3. الحاجة إلى دراسات السلامة

قبل استخدام المركبات البكتيرية في التطبيقات الطبية أو الغذائية يجب إجراء دراسات دقيقة لتقييم سلامتها وتأثيراتها المحتملة.

4. تطوير تقنيات الاستخلاص والتنقية

تعد عملية فصل المركبات النشطة وتنقيتها من أكثر المراحل تحدياً بسبب تعقيد تركيب بعض المركبات الحيوية وتنوعها.

سادساً: الاتجاهات المستقبلية في مجال البكتيريا المنتجة لمضادات الأكسدة

تشير الاتجاهات البحثية الحديثة إلى أن مستقبل هذا المجال يعتمد على دمج علم الأحياء الدقيقة مع التقنيات الجزيئية المتقدمة ومن أهم الاتجاهات المستقبلية:

استخدام تقنيات التسلسل الجيني لاكتشاف السلالات الجديدة والجينات المسؤولة عن إنتاج المركبات الحيوية. (Bodade et al., 2026)

توظيف الهندسة الوراثية لتحسين قدرة البكتيريا على إنتاج مضادات الأكسدة بكميات أكبر.

استخدام تقنيات الميتاجينوم لاستكشاف الكائنات الدقيقة غير القابلة للزراعة مخبرياً.

تطوير عمليات إنتاج صناعي تعتمد على التخمير الحيوي للحصول على مركبات طبيعية عالية الجودة.

توسيع الدراسات التطبيقية لاستخدام هذه المركبات في الطب والغذاء ومستحضرات التجميل.

تمثل البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة من البيئات القاسية مصدراً واعداً للعديد من التطبيقات الحيوية نظراً لما تمتلكه من قدرات تكيفية وإنتاجية مميزة. فقد ساعدتها ظروف الحياة الصعبة على تطوير أنظمة دفاعية متقدمة وإنتاج مركبات ذات خصائص بيولوجية مهمة. ومع استمرار تطور التقنيات الجزيئية والهندسة الحيوية من المتوقع أن تتوسع الاستفادة من هذه البكتيريا في إنتاج أدوية ومواد غذائية ومستحضرات طبيعية ذات قيمة اقتصادية وصحية كبيرة. (Aruoma, 1998)

تُشير الاتجاهات البحثية الحديثة إلى أن دراسة البكتيريا المعزولة من البيئات القاسية لم تعد تقتصر على التعرف إلى خصائصها التصنيفية أو الفسيولوجية، بل أصبحت تركز على فهم إمكاناتها الحيوية في إنتاج مركبات ذات قيمة تطبيقية عالية. ويُعزى ذلك إلى امتلاك هذه الكائنات الدقيقة مسارات أيضية متخصصة تطورت استجابةً للضغوط البيئية المستمرة، مما مكّنها من تصنيع مركبات تتميز بالاستقرار والكفاءة الحيوية. كما أن دمج تقنيات الأحياء الجزيئية والهندسة الوراثية مع تقنيات التخمير الحيوي يسهم في تحسين إنتاج هذه المركبات وزيادة فرص توظيفها في الصناعات الدوائية والغذائية والتجميلية. ومن المتوقع أن يؤدي التوسع في استكشاف البيئات القاسية إلى اكتشاف سلالات بكتيرية جديدة ومركبات حيوية غير معروفة سابقاً، الأمر الذي يعزز

دور التكنولوجيا الحيوية في تطوير حلول مبتكرة تلبي الاحتياجات الصحية والصناعية مع مراعاة مبادئ الاستدامة البيئية والاقتصادية

- **الخاتمة**

تناول هذا البحث موضوع استكشاف البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة من البيئات القاسية وتطبيقاتها الحيوية باعتباره أحد المجالات الحديثة التي تجمع بين علم الأحياء الدقيقة والتكنولوجيا الحيوية والكيمياء الحيوية. وقد أوضح البحث أن البيئات القاسية رغم الظروف الصعبة التي تتميز بها تمثل مصادر غنية بالتنوع الميكروبي وتضم العديد من السلالات البكتيرية التي طورت آليات تكيف متقدمة تمكنها من البقاء وإنتاج مركبات حيوية ذات أهمية كبيرة.

وتبين أن قدرة هذه البكتيريا على إنتاج المركبات المضادة للأكسدة ترتبط بقدرتها على مواجهة العوامل البيئية المسببة للإجهاد التأكسدي مثل الحرارة المرتفعة والملوحة العالية والجفاف والإشعاع. وقد مكنتها هذه الظروف من تطوير أنظمة دفاعية تشمل الإنزيمات المضادة للأكسدة والمركبات الثانوية ذات النشاط الحيوي مثل الكاروتينات والمركبات الفينولية والسكريات الخارجية.

كما أظهر البحث أن المركبات المضادة للأكسدة المنتجة من البكتيريا تمتلك إمكانات تطبيقية واسعة في المجالات الطبية والصيدلانية والغذائية والتجميلية حيث يمكن الاستفادة منها في تطوير منتجات طبيعية أكثر أماناً وكفاءة. إضافة إلى ذلك فإن التطور في تقنيات التشخيص الجزيئي والهندسة الوراثية ساعد في الكشف عن سلالات بكتيرية جديدة وتحسين فرص استثمارها صناعياً.

وعلى الرغم من هذه الإمكانات الكبيرة ما زالت هناك تحديات تتعلق بعزل بعض السلالات وصعوبة زراعتها وتحسين إنتاج المركبات الحيوية وتقييم سلامتها قبل الاستخدام التطبيقي. لذلك فإن استمرار الدراسات المتخصصة في هذا المجال يعد خطوة مهمة نحو استغلال الموارد الميكروبية غير المستكشفة وتطوير حلول حيوية مستدامة تخدم المجالات الصحية والصناعية.

- **نتائج البحث**

1. تمثل البيئات القاسية مصدراً مهماً وغنياً بالتنوع البكتيري حيث تحتوي على سلالات قادرة على التكيف مع ظروف بيئية شديدة الصعوبة.

2. تمتلك البكتيريا الموجودة في البيئات القاسية آليات فسيولوجية وجزيئية متطورة تساعدها على مقاومة الإجهاد البيئي والمحافظة على بقائها.

3. تنتج العديد من السلالات البكتيرية مركبات مضادة للأكسدة ذات أهمية حيوية تشمل الإنزيمات المضادة للأكسدة والمركبات الثانوية مثل الكاروتينات والمركبات الفينولية.

4. يرتبط إنتاج المركبات المضادة للأكسدة بقدرة البكتيريا على مواجهة زيادة تكوين الجذور الحرة الناتجة عن الظروف البيئية القاسية.

5. تعد أجناس بكتيرية مثل Bacillus وStreptomyces وThermus وHalomonas من أهم المجموعات التي تمتلك إمكانات واعدة في إنتاج المركبات الحيوية.

6. تؤثر العوامل البيئية مثل درجة الحرارة والرقم الهيدروجيني وتركيز الأملاح ومكونات الوسط الغذائي بشكل مباشر في كفاءة إنتاج المركبات المضادة للأكسدة.

7. أسهمت التقنيات الحديثة مثل تحليل جين S rRNA16 وتقنيات التسلسل الجيني في تحسين القدرة على التعرف إلى السلالات البكتيرية واكتشاف قدراتها الوراثية.

8. تمتلك المركبات المضادة للأكسدة المنتجة من البكتيريا تطبيقات محتملة في المجالات الطبية والغذائية والتجميلية والصناعية.

9. تواجه الاستفادة الصناعية من هذه البكتيريا بعض التحديات أهمها صعوبة زراعة بعض الأنواع والحاجة إلى تطوير تقنيات فعالة للاستخلاص والتنقية والإنتاج واسع النطاق.

10. يمثل استكشاف البكتيريا من البيئات القاسية مجالاً مستقبلياً واعداً يمكن أن يسهم في اكتشاف مركبات طبيعية جديدة ذات قيمة علاجية واقتصادية.

- **توصيات البحث**

1. زيادة الاهتمام بدراسة البيئات القاسية باعتبارها مصادر غير مستغلة بشكل كافٍ لاكتشاف سلالات بكتيرية جديدة ذات خصائص حيوية مميزة.

2. دعم الأبحاث التي تهدف إلى عزل وتشخيص البكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة باستخدام التقنيات الجزيئية الحديثة.

3. تطوير برامج بحثية متخصصة تجمع بين علم الأحياء الدقيقة والهندسة الوراثية والكيمياء الحيوية لتحسين إنتاج المركبات الحيوية.

4. إجراء المزيد من الدراسات حول آليات إنتاج البكتيريا لمضادات الأكسدة والعوامل التي تتحكم في زيادة كفاءتها الإنتاجية.

5. تشجيع استخدام تقنيات الميتاجينوم والتسلسل الجيني لاكتشاف الكائنات الدقيقة غير القابلة للزراعة مخبرياً.

6. دراسة إمكانية توظيف المركبات المضادة للأكسدة البكتيرية في تطوير أدوية ومنتجات غذائية وتجميلية طبيعية.

7. إجراء اختبارات شاملة لتقييم سلامة المركبات المنتجة قبل تطبيقها في المجالات الطبية أو الغذائية.

8. تحسين تقنيات استخلاص وتنقية المركبات الحيوية بهدف رفع كفاءة الإنتاج وتقليل التكلفة الاقتصادية.

9. إنشاء قواعد بيانات علمية تضم المعلومات الوراثية والكيميائية الحيوية للسلالات البكتيرية المنتجة للمركبات المفيدة.

10. تعزيز التعاون بين المؤسسات البحثية والقطاعات الصناعية للاستفادة من الإمكانات التطبيقية للبكتيريا المنتجة للمركبات المضادة للأكسدة.

المراجع

1. الجبوري عبد الستار عبد الكريم. (2014). علم الأحياء المجهرية. عمّان: دار دجلة للنشر والتوزيع.
2. العزاوي سعدون عبد الله عبد الرحمن أحمد محمد. (2015). الأحياء الدقيقة: الأسس والتطبيقات. القاهرة: دار الفكر العربي.
3. . (2017). التقنيات الحيوية وتطبيقاتها. عمّان: دار صفاء للنشر والتوزيع.
4. القحطاني عبد الله بن محمد. (2018). أساسيات علم الأحياء الدقيقة. الرياض: مكتبة العبيكان.
5. لخطيب محمد أحمد. (2012). علم الأحياء الدقيقة العام. عمّان: دار المسيرة للنشر والتوزيع.

مراجع أجنبية موثوقة

6. . (2021)..Ventosa, A., de la Haba, R. R., Sánchez-Porro, C., & Papke, R. T. (2015).

7. Aruoma, O. I. (1998).Free radicals, oxidative stress, and antioxidants in human health and disease.Journal of the American Oil Chemists' Society, 75, 199–212.

8. Barros, L., Dueñas, M., Ferreira, I. C. F. R., Baptista, P., & Santos-Buelga, C. (2009).

9. Extremophiles, 5, 73–83.

10. Food Chemistry, 113(2), 423–431.

11. Kumar, V., & Kumar, S. (2018).Extremophilic microorganisms: Diversity and applications.Journal of Applied Microbiology.

12. Life, 3(3), 482–485.

13. Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A Brock Biology of Microorganisms (16th ed.). Pearson

14. Margesin, R., & Schinner, F. (2001).Potential of cold-adapted microorganisms for biotechnology.

15. Microbial diversity of hypersaline environments: A review.Frontiers in Microbiology, 6, 1–15.

16. Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021).Lehninger Principles of Biochemistry (8th ed.). W. H. Freeman.

17. Phenolic compounds and antioxidant activity of mushrooms.

18. Prescott's Microbiology (11th ed.). McGraw-Hill Education.

19. Rampelotto, P. H. (2013).Extremophiles and extreme environments.

20. Satyanarayana, T., Littlechild, J., & Kawarabayasi, Y. (2013).

21. Thermophilic Microbes in Environmental and Industrial Biotechnology. Springer.

22. Willey, J. M., Sherwood, L. M., & Woolverton, C. J. (2020).

23. Aladhadh, M. (2026). Antioxidants: Mechanisms, Benefits, and the Importance of Extremophilic Microorganisms. Microorganisms, 14(4), 838. DOI: 10.3390/microorganisms14040838

24. Merino, N., Aronson, H. S., Bojanova, D. P., et al. (2019). Living at the Extremes: Extremophiles and the Limits of Life in a Planetary Context. Frontiers in Microbiology, 10. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00780

25. Bodade, R., Martínez-Espinosa, R. M., Karthikeyan, O. P., et al. (2026). Editorial: Extremophiles in Biotechnology: Challenges and Advancements in Sustainable Applications. Frontiers in Microbiology, 17. DOI: 10.3389/fmicb.2026.1888432

26. Caro-Astorga, J., Meyerowitz, J. T., Stork, D. A., et al. (2024). Polyextremophile Engineering: A Review of Organisms That Push the Limits of Life. Frontiers in Microbiology. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1341701

27. Wang, Y., Liu, J., Yi, Y., et al. (2024). Insights into the Synthesis, Engineering, and Functions of Microbial Pigments in Deinococcus Bacteria. Frontiers in Microbiology. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1447785

الفصل السادس

تقنيات استخلاص الأحماض الدهنية من الطحالب وتطبيقاتها في الصناعات البيئية وغير الطبية

Techniques for Extracting Fatty Acids from Algae and Their Applications in Environmental and Non-Medical Industries

م.م. زهراء محمد عبد الكاظم

المديرية العامة لتربية ذي قار - الكلية التربوية المفتوحة - العراق

الملخص

يتناول الفصل تقنيات استخلاص الأحماض الدهنية من الطحالب وتطبيقاتها في الصناعات البيئية وغير الطبية، من خلال ربط خصائص الكتلة الحيوية بمتطلبات الاستخلاص وكفاءة المنتج. ويعرض الطحالب ومكونات دهونها والعوامل التي تؤثر في نموها وتراكم الأحماض الدهنية، ثم يناقش خطوات إعداد المادة الأولية والمعالجات التي تساعد على إتاحة المحتوى الدهني. ويبين أن تقويم الطريقة لا يقتصر على كمية المستخلص، بل يشمل جودته وكلفته وشروط إنتاجه.

ويستعرض الفصل طرائق الاستخلاص التقليدية والحديثة، ومنها استخدام المذيبات والمعالجات المساعدة والتقنيات التي تستهدف تحسين انتقال المادة وتقليل استهلاك الوقت أو الطاقة أو المذيب. وتناقش المقارنة مزايا كل اتجاه وحدوده ومدى ملاءمته لنوع الطحلب وتركيب الجدار الخلوي وطبيعة المركبات المطلوبة. كما يعرض الفصل العوامل التشغيلية التي قد تؤثر في المردود والانتقائية والحفاظ على خصائص الأحماض الدهنية.

ويمتد النقاش إلى مجالات الاستخدام البيئي والصناعي غير الطبي، مثل الوقود الحيوي والمواد والمنتجات الحيوية، وربط الإنتاج باستثمار الموارد وتقليل المخلفات. وتُعرض تحديات توسيع النطاق والكلفة والطاقة والاستدامة بوصفها عناصر في تقويم المسار الإنتاجي كله. وتخلص المعالجة إلى أهمية اختيار تقنية متوافقة مع المادة الأولية والهدف التطبيقي، بدل تعميم أفضلية طريقة واحدة. وتتمثل مساهمة الفصل في تنظيم البدائل التقنية والعوامل المؤثرة والتطبيقات، وتوفير أساس للمقارنة بين كفاءة الاستخلاص واعتبارات الجودة والاقتصاد والبيئة، دون إضافة نتائج مختبرية لم ترد في الدراسة.

الكلمات المفتاحية: الطحالب؛ الأحماض الدهنية؛ الاستخلاص؛ الوقود الحيوي؛ الاستدامة الصناعية

Abstract

This chapter reviews techniques for extracting fatty acids from algae and their use in environmental and non-medical industries. It connects biomass characteristics with extraction requirements and product quality. Algae, lipid composition, and factors affecting growth and fatty acid accumulation are introduced before discussion of feedstock preparation and treatments that improve access to intracellular lipids. Evaluation of extraction is related to quality, cost, and production conditions as well as recovered quantity.

Traditional and contemporary approaches are examined, including solvent extraction, assisted treatments, and techniques intended to improve mass transfer or reduce time, energy, and solvent consumption. Their advantages and limitations are compared in relation to algal type, cell-wall characteristics, and the compounds sought. Operating conditions affecting yield, selectivity, and preservation of fatty acid properties are also considered.

Environmental and non-medical industrial uses include biofuels and other bio-based materials and products. The discussion connects production with resource use and waste reduction while considering scale-up, cost, energy requirements, and sustainability across the production pathway. The chapter concludes that extraction should be matched to feedstock and intended application rather than based on a universally preferred method. Its contribution is to organize technical alternatives, influential factors, and application areas, providing a foundation for comparing extraction efficiency with quality, economic, and environmental considerations. The review does not add laboratory results beyond those supplied in the study.

Keywords: Algae; Fatty acids; Extraction; Biofuels; Industrial sustainability

المقدمة (Introduction)

"لقد تسبب النمط الاستهلاكي الشره والمفرط بشكل مباشر في تشتيت التوازنات الجيوفيزيائية لكوكب الأرض، مما ضاعف من حدة الاحترار العالمي، وأدى إلى طفرة حادة في معدلات الانبعاثات الكربونية والغازات الحبيسة داخل الغلاف الجوي، وهي المعضلات التي تسببت في ظهور تقلبات مناخية قاسية كالفيضانات، الجفاف، وتمدد مستويات مياه البحار.

وفي خضم هذه الأخطار المصيرية التي باتت تنعكس سلباً على التنوع الإحيائي وسلاسل الإمداد الغذائي للمجتمعات، غدا من الضروري جداً تحديث الركائز الإنتاجية الدولية، والتوجه بجدية نحو تبني آليات 'الاقتصاد الحيوي الدائري المستدام.

ومن هذا المنطلق، اتجهت انظار المجتمع العلمي والاكاديمي والاستثماري نحو تطوير واستغلال "التطبيقات الاحيائية المستدامة(Sustainable Biotechnological Applications) " كمصادر بديلة، خضراء، ونظيفة متجددة ذاتيا دون ان تشكل عبئا على الموارد الطبيعية المتهالكة Al-Shorgani *et al*., 2021).)

وفي طليعة هذه البدائل الواعدة، تتصدر الطحالب المجهرية ,(Microalgae)والكبيره Macroalge قائمة الكائنات الحية الاكثر كفاءة وجاذبية في التكنولوجيا الحيوية البيئية؛ ويعود ذلك الى مرونتها الفسيولوجية والوراثية الفائقة التي تمنحها القدرة على النمو السريع والانتاج المكثف في بيئات مائية وبيئية متنوعة للغاية ولاتصلح للزراعة التقليدية، بما في ذلك المياه المتردية، والمياه المالحة، وحتى مياه الصرف الصحي والصناعي الغنية بالملوثات. علاوة على ذلك، تمتلك الطحالب كفاءة تمثيل ضوئي (Photosynthetic efficiency) فريدة تفوق النباتات الارضية بمعدل يتراوح بين 10 الى 50 ضعفاً، مما يجعل مساحات استزراعها بمثابة بالوعات طبيعية فائقة الاداء لأحتجاز وتثبيت غاز ثاني اكسيد الكربون الجوي وتحويله الى روابط كيميائية مخزنة للطاقة. والأهم من ذلك من الناحية التنموية، هو أن انتاج الطحالب لا يتطلب اراضٍ خصبة ولا ينافس المحاصيل الزراعية الغذائية الاستراتيجية على موارد المياه العذبة الشحيحة، مما يحل معضلة التوازن بين انتاج الطاقة والامن الغذائي التي واجهت وقود الجيلين الاول والثاني (Sahoo and Das, 2023).

تُشكل الخلايا الطحلبية المجهرية والكبيرة "مصانع حيوية مصغرة متكاملة" بالغ الحساسية والتعقيد. ؛ اذ تمتلك القدرة على توجيه مساراتها الايضية بفاعلية فائقة لانتاج طيف واسع جدا من المركبات الهيدروكربونية، والبروتينات، والكربوهيدرات المتعددة، والدهون عالية القيمة الاقتصادية. ومن بين هذه المكونات الحيوية، تحظى الاحماض الدهنية (Fatty Acids) بمكانة استراتيجية بأهمية بمكان في قطاع التطبيقات الصناعية والبيئية غير الطبية. تُعد هذه الدهون، وخاصة الثلاثية المتعادلة (Triglycerides - TAGs)، المادة الأساسية الفُضلى والدعامة المحورية لتخليق الجيل الثالث من الوقود الحيوي (Biodiesel)، نظرا لكونها تحظى بـ سلاسل هيدروكربونية مشبعة واحادية. عدم الاشباع تمنحها خصائص احتراق وفيزوكيميائية ميكانيكية (مثل رقم السيتان واللزوجة الحركية) تتشابهُ تشابهاً وثيقاً مع الديزل النفطي التقليدي مع انبعاثات كبريتية صفرية (Ratha *et al.*, 2024). ولم يقف الطموح التقني عند حدود الطاقة؛ بل تشعبت مجالات التطبيق لتغطي استخدام هذه الاحماض كركائز تقنية اساسية لبناء الملدنات والبوليمرات الحيوية القابلة للتحلل الكامل (Bioplastics) كبديل للمشتقات البتروكيميائية السامة، وتصنيع زيوت التشحيم والمذيبات الحيوية الصديقة للبيئة، فضلا عن دورها الحيوي كاضافات غذائية ومكملات مناعية غنية بالطاقة والاحماض الدهنية الاساسية)الاوميغا-3) في قطاع اعلاف الاسماك، الدواجن، والحيوانات (Jacob *et al.*, 2022).

غير أن نقل هذه الآليات إلى من الحيز المختبري التجريبي الى النطاق الصناعي والتجاري الواسع واجه معضلة تكنولوجية مستعصية ترتبط بكفاءة واقتصادية "تقنيات الاستخلاص" (Extraction Technologies). فالخلايا الطحلبية محاطة طبيعيا بجدران خلوية سميكة وصلبة تتكون من من شبكات معقدة من السليلوز، الهيميسليلوز، والبروتينات السكرية المهيأة لتحمل العوامل الخارجية الصارمة ، مما يقف كحاجز ميكانيكي منيع يمنع المذيبات العضوية التقليدية من الوصول الى الاحماض الدهنية المخزنة داخل السيتوبلازم وتحريرها بسلاسة. ونتيجةً لهذا، اصبح من الضروري تحديث وتفعيل منهجيات تحطيم خلوية متقدمة (سواء كانت ميكانيكية كالموجات فوق الصوتية، او كيميائية، او انزيمية) تليها عمليات استخلاص متطورة تؤمن الوصول إلى ذروة العطاء الإنتاجي وافضل جودة للاحماض الدهنية المستهدفة،

دون إحداث استنزافٍ جائرٍ للطاقة او الاعتماد على المذيبات الكيميائية السامة التي تترك متبقيات ضارة وتتعارضُ مع مبادئ الاستدامة البيئية (Sethi *et al*., 2025).

بناءً على ما تقدم، ياتي هذا البحث المنهجي المستقل لينصبّ الاهتمام فيه على مكوّنٍ رئيس يقع في صلب التطبيقات الاحيائية الحديثة والاحياء التطبيقية. يسلط البحث الضوء بالتقصّي والدراسة على فسيولوجيا الطحالب وقدرتها البيولوجية على بناء الدهون تحت ظروف الاجهاد، ويُخضع المؤشرات للموازنة والتحليل النقدي احدث التقنيات الحيوية والكيميائية المستخدمة في تحطيم الجدران الخلوية واستخلاص الاحماض الدهنية، وصولا الى تقويمٌ متكامل لأبرز الافاق التطبيقية لهذه المركبات في مجالات الطاقة المتجددة، الصناعات الصديقة للبيئة، والانتاج الزراعي والحيواني، بما يشارك في تقديم رؤية علمية متكاملة تعزز التحول الفعلي والعملي نحو اقتصاد حيوي دائر ونظيف يقي الانظمة البيئية لكوكب الارض.

المحور الاول: الطحالب كعنصر اساسي في التطبيقات الاحيائية الحديثة

اولا: بيولوجيا الطحالب وقدرتها على بناء الدهون (Lipid Biosynthesis)

تمتاز الطحالب (سواء كانت مجهرية وحيدة الخلية او كبيرا متعددة الخلايا كالاعشاب البحرية) بكفاءة استثنائية في تحويل الطاقة الشمسية وثاني اكسيد الكربون الى كتلة حيوية غنية بالمركبات العضوية عبر عملية البناء الضوئي. وتُعد مسارات بناء الدهون (Lipid accumulation pathways) وتخزينها داخل الخلايا من اهم الاليات الفسيولوجية والبيوكيميائية المشتركة بين مختلف رتب الطحالب.

(Ratha *et al*., 2024). حيث تقوم الخلايا ببناء وتكوين الاحماض الدهنية الاساسية داخل البلاستيدات الخضراء (Chloroplasts) وذلك عبر سلسلة من التفاعلات الانزيمية المعتمدة على مركب الاستيل التمساحي (Acetyl-CoA) كحجر اساس لبناء السلاسل الكربونية (Sahoo and Das, 2023).

وتنقسم هذه الدهون المتكونة داخل النظام الخلوي للطحالب الى مسارين وظيفيين رئيسيين

- الدهون التركيبية (Structural Lipids): وتشمل الدهون الفسفورية (Phospholipids) والدهون الجليكولية (Glycolipids)، وهي المكونات الهيكلية لبناء

الاغشية الخلوية واغشية الثايلاكويد الحاضنة لصبغات البناء الضوئي؛ وتبرز اهميتها البيولوجية في الطحالب الكبيرة (Macroalgae) للحفاظ على مرونة الجدار الخلوي وانسجامه مع التيارات المائية والملوحة المتغيرة (Chen *et al*., 2022).

- الدهون التخزينية (Storage Lipids): وتشمل غالبا في الدهون الثلاثية المتعادلة (Triglycerides - TAGs). وتُخزن هذه الدهون داخل جسيمات او قطيرات دهنية في السيتوبلازم، حيث تُشكل مخزونا كربونيًا وطاقيًا مرتفع الكثافة يعتمد عليه الكائن الحي في وظائفه الحيوية او لمواجهة الظروف البيئية القاسية كالجفاف ونقص المغذيات (Ratha *et al*., 2024).

ثانيا: التفاوت الايضي في محتوى الدهون بين مجموعات الطحالب

رغم اشتراك المجموعات الطحلبية في المسار الايضي العام للاستيل التمساحي، الأ ان هناك تمايزا بيولوجيا كبيرا في كفاءة التخزين ونوعية المنتج النهائي بين الطحالب المجهرية والكبيرة (Sahoo and Das, 2023):

- الطحالب المجهرية (Microalgae): تحتوي مرونة ايضية وسرعة فائقة في تعديل مسار انتاج البروتينات الى دهون ثلاثية (TAGs) عند التعرض الإجهاد الناجم عن العوامل البيئية (كنقص النيتروجين)، مما يزداد محتواها الدهني ليصل الى 20% - 50% (وفي بعض الحالات الاستثنائية الى 80%) من الوزن الجاف للخلية، وهو ما يوضح الاعتماد عليها بشكل رئيسي في ابحاث الطاقة والوقود الحيوي. Barsanti and Gualtieri. (2022).
- الطحالب الكبيرة / الاعشاب البحرية (Macroalgae): اتجاه الجزء الاكبر من طاقتها الحيوية نحو بناء الكربوهيدرات المعقدة (مثل الاجار والالجينات) بدلا من الدهون، لذا يتراوح محتواها الدهني الاجمالي بين 1% الى 5% فقط من وزنها الجاف (Chen *et al*., 2022). ومع ذلك، تتميز الطحالب الكبيرة بامتلاكها على نسب عالية جدا من الاحماض الدهنية متعددة عدم التشبع (PUFAs) عالية القيمة الطبية والغذائية مثل) اوميغا3- EPA وDHA) والتي لها دورا حيويا في تنظيم سيولة اغشيتها في البيئات البحرية الباردة (Barkia *et al*., 2019).

ثالثا: الاختلافات البيولوجية في محتوى الدهون بين انواع الطحالب

يتاثر بناء المركبات الدهنية في المجموعات الطحلبية لآليات تنظيمية متقلبة ونشطة ؛ فبينما تفوقت الطحالب المجهرية في كمية الدهون وكثافتها الانتاجية (مما يجعلها رائدة في مجال الطاقة الحيوية)، انفردت الطحالب الكبيرة بجودة ونوعية هذه الدهون وفائدتها الحيوية، مما يجعل النظام الايضي للدهون في الطحالب باعتبارها جميعاً من الركائز الراسخة في تطبيقات التكنولوجيا الحيوية الحديثة، سواء للاغذية او الادوية او الطاقة البديلة.

الطحالب الكبيرة / الاعشاب البحرية (Macroalgae)	الطحالب المجهرية (Microalgae)	وجه المقارنة
منخفضة الى متوسطة: تحتوي الدهون عادة ما بين 1% الى 5% من وزنها الجاف، حيث توجه طاقتها نحو بناء الكربوهيدرات المعقدة (مثل الاجار والالجينات والسليلوز)	عالية جدا: يمكن ان تحتوي الدهون من 20% الى 50% (وفي بعض الحالات التجويعية تصل الى 80%) من وزنها الجاف.	انتاجية الدهون الاجمالية
غنية جدا بالاحماض الدهنية متعددة عدم التشبع (PUFAs) عالية القيمة الغذائية مثل EPA و DHA واوميغا(.3-	غنية بالدهون الثلاثية (TAGs) الصالحة لانتاج الوقود الحيوي، بجانب الاحماض الدهنية غير المشبعة.	نوعية الاحماض الدهنية
استجابتها ابطا وتعتمد على تغيير تركيب الاغشية الخلوية ونوعية الاحماض الدهنية بدلا من تخزينها بكميات هائلة.	تستجيب بسرعة فائقة لاجهاد النيتروجين او المغذيات عبر تحويل مسارها الايضي فورا لتخزين كميات ضخمة من الدهون.	الاستجابة للاجهاد البيئي

رابعا: العوامل البيئية المؤثرة على محتوى الطحالب من الاحماض الدهنية

لا تعتمد عملية بناء الدهون وتخليقها في مجتمعات الطحالب على العوامل الوراثية والجينية الكامنة في السلالة فحسب، بل تتفاعل بشكل مباشر، وحاسم، وديناميكي بخصائص العوامل المحيطة والفيزيوكيميائية المحيطة ببيئة الاستزراع. تلجا الخلايا الطحلبية (المجهرية والخيطية) الى اعادة توجيه مساراتها الايضية والكربونية نحو زيادة انتاج وتراكم الاحماض الدهنية الحرة (FFAs) وتحويلها الى دهون ثلاثية متعادلة (TAGs) كاستراتيجية دفاعية حتمية او كالية "تكيف" فسيولوجي وبيوكيميائي حاد للبقاء على قيد الحياة عند تعرضها لظروف الاجهاد البيئي (Environmental Stress) وتترابط هذه العوامل البيئية لتؤثر على الاداء الانزيمي داخل الخلايا وفق الاتي: Ścieszka and Klewicka, (2019).

- الافتقار من المغذيات الاساسية (Nutrient Starvation): يُجمع المجتمع الحيوي على ان نقص او حرمان الخلايا الطحلبية من العناصر الغذائية الكبرى—وعلى راسها النيتروجين (N) والفسفور —(P)يُمثّل المُحفّز الأكثر تأثيراً و كفاءة لتوجيه تدفق الكربون الحاد داخل الخلية. في الوضع الطبيعي ، توظف الخلية النيتروجين لتكوين البروتينات والاحماض النووية اللازمة للانقسام والنمو الخضري. (Al-Shorgani *et al*., 2021) اما عند ظهورعجز في النيتروجين، يتوقف تكوين البروتينات وتنقسم الخلايا، مما يؤدي الى دفع الخلية لتوجيه وفرة الكربون الناتج عن التمثيل الضوئي المستمر نحو مسار تصنيع الدهون التخزينية الكثيفة (TAGs) داخل قطيرات سيتوبلازمية كخزان طاقة احتياطي (Ratha *et al.,* 2024). كما يترتب نقص الفسفور الى اضطراب في بناء الاغشية الخلوية الفسفورية، مما ينشط الانزيمات الناقلة للاسيل (Acyltransferases) على تغييرالاحماض الدهنية الحرة الى دهون ثلاثية متعادلة لحماية البنية الداخلية للخلية (Sahoo and Das, 2023).
- شدة وتذبذب الاضاءة (Light Intensity): تخضع الطحالب باعتبارها كائنات ذاتية التغذية الضوئية على الضوء كمنبع اساسي للطاقة. وعند تعريض سلالات الطحالب (مثل *Chlorella* و *Scenedesmus)* لشدة اضاءة مفرطة او فوق مشبعة (High Light Stress)، تكثرمعدلات تدفق الالكترونات في نظام البناء الضوئي بشكل يزداد قدرة الخلية على استيعابه، مما يؤدي الى انتاج انواع الاكسجين التفاعلية (ROS) المسببة للاجهاد التاكسدي الحاد وتحطيم المكونات الخلوية. ولمواجهة هذا الخطر، تؤدي الخلايا بتعطيل مسارات النمو وتنشيط انزيم الاستيل التمساحي كاربوكسيليز (ACCase)، وهو الانزيم المفتاحي والخطوة المحددة لسرعة بناء الاحماض الدهنية؛ حيث تعمل الدهون المتراكمة بمثابة "بالوعة طاقة الكترونية" تمتص الطاقة الضوئية الزائدة وتحصن جهاز البناء الضوئي من التحلل الضوئي (Sethi *et al*., 2025). وعادة ما تتجه الطحالب تحت الاجهاد الضوئي العالي الى تجمع الاحماض الدهنية المشبعة (SFAs) واحادية عدم الاشباع (MUFAs) باعتبارها اكثر استقرارا ضد الاكسدة الذاتية وصالحة لانتاج الديزل الحيوي.
- التقلبات الحرارية (Temperature Fluctuations): تُعد درجة الحرارة المُحدِّد البيئي الرئيسي في تنظيم سيولة الاغشية الخلوية واغشية الثايلاكويد داخل البلاستيدات الخضراء،

وهي تنعكس بصورة مباشرة على نوعية الاحماض الدهنية المنتجة بدلا من كميتها الاجمالية فقط. عند انخفاض درجات الحرارة النطاق الحيوي المثالي للنمو ، تواجه الاغشية الخلوية خطر التجمد وفقدان النفاذية الاختيارية؛ وتتأقلم الخلايا فسيولوجيا من خلال تنشيط انزيمات نزع الهيدروجين (Desaturases) التي تعمل على ادخال روابط ثنائية جديدة في السلاسل الهيدروكربونية، مما يزداد من نسبة الاحماض الدهنية متعددة عدم الاشباع (PUFAs) مثل اوميغا3- للأبقاء على مرونة الاغشية في البيئات الباردة (Barkia *et al.*, 2019). بالمقابل، يفضي الارتفاع المعتدل في درجات الحرارة الى يستحث التراكم الكلي للدهون التخزينية المتعادلة وزيادة نسبة الاحماض الدهنية المشبعة لتثبيت الاغشية حراريا وللحفاظ على تماسك اجزائها.

- الاجهاد الملحي والاسموذي (Salinity and Osmotic Stress): تترتب التغيرات المفاجئة في ملوحة الوسط المائي (سواء بالارتفاع او الانخفاض) الى إخضاع الخلايا لإجهاد سموزي حاد تؤثر على الضغط الهيدروستاتيكي وتوازن الايونات داخل السيتوبلازم. تتجاوب الطحالب—وخاصة الانواع المعزولة من البيئات البرية والمياه العذبة كجنس —*Cladophora* عبر تحوير نفاذية جدرانها واغشيتها الخلوية؛ بحيث تحفز الملوحة العالية من معدلات التحلل المائي للدهون التركيبية للاغشية (Membrane Lipids) واعادة تدوير احماضها الدهنية لتحويرها الى قطيرات دهنية متعادلة (TAGs)،و اعاقة نفاذ المياه داخل الخلية الى الوسط الخارجي ويضمن الحماية على الحجم الخلوي والضغط الاسموزي المتوازن (Jacob *et al.*, 2022).

خامسا: تصنيف الطحالب الاكثر كفاءة في انتاج الدهون

تختلف مجاميع الطحالب في قابليتها على انتاج وتخزين الدهون بناءً على نوعها وسلالتها. وتؤكد الدراسات التصنيفية الحديثة الى ان الطحالب الخضراء المجهرية (Microalgae) تُصنف كخيارٍ رائد يمتلك أعلى الطاقات الكامنة لخدمة الأغراض الصناعية وذلك بسبب محتواها الدهني قد يتجاوز 50% من وزنها الجاف في ظل ظروف البيئية القاسية(Jacob *et al.*, 2022). ومن ابرز الاجناس الطحلبية الاوسع انتشارا والمعتمدة عالميا في ابحاث استخلاص الاحماض الدهنية اجناس مثل *Chlorella* و *Scenedesmus*، و بعض الانواع الخيطية مثل

Cladophora التي تتميز بمعدل انتاجي متميز من الكتلة الحيوية والمركبات الدهنية المفيدة بيئيا وصناعيا (Ratha *et al.*, 2024).

المحور الثاني: التقنيات الحيوية والكيميائية لاستخلاص الاحماض الدهنية

اولا: طرق تجميع وتجفيف الكتلة الحيوية للطحالب (Biomass Harvesting and Drying)

تُشكل مرحلة حصاد الكتلة الحيوية (Harvesting) من البيئات المائية وفصلها عن الماء واحدة من اكبر العقبات الاقتصادية والفنية في دراسات وابحاث الطحالب، ذلك لصغر حجم الخلايا الطحلبية المجهرية وشحنتها السطحية السالبة التي تبقي على معلقة. وتتباين التقنيات المستخدمة في التجميع وتتضمن التخثير الكيميائي (Flocculation)، والترشيح (Filtration)، والطرد المركزي (Centrifugation) الذي يعد الاكثر كفاءة على النطاق المختبري .Chapman, (2013). بعد عملية الفصل، تعرض الكتلة الحيوية للتجفيف (Drying) عبر المعاملة الحرارية للتجفيف او التجفيف بالتجميد (Freeze-drying)؛ حيث يُعد نزع الماء من المحتوى المائي خطوة اساسية بهدف كفاءة المذيبات العضوية اللاحقة في الوصول الى الدهون ومنع تحلل الاحماض الدهنية جراء تحلل المائي (Ratha *et al.*, 2024).

ثانيا: طرق تحطيم الجدار الخلوي (Cell Disruption)

تحتوي الطحالب جدارا خلويا معقدا وسميكا يتالف بشكل جوهري من السليلوز والبروتينات السكرية والكربوهيدرات المتعددة، مما يشكل حاجزا ميكانيكيا يتطلب جهدا على المذيبات العضوية اختراقه لاستخلاص الاحماض الدهنية السيتوبلازمية. لذلك، باتت عمليات تحطيم الجدار الخلوي (Cell Disruption) كخطوة تهيئة لازمة لرفع كفاءة الاستخلاص (Sethi *et al.*, 2025). وتقسم هذه الطرق الى:

- الطرق الميكانيكية والفيزيائية: مثل الطحن بالكرات (Ball milling)، والصدمات الحرارية، والموجات فوق الصوتية (Ultrasonication) التي تنتج قوى قص ميكانيكية عالية تؤدي الى تدمير البنية الجدارية.

- الطرق غير الميكانيكية (الكيميائية والانزيمية(: وتحتوي معاملة الخلايا بالاحماض او القواعد القوية، او استخدام الانزيمات المحللة للجدار (مثل السليوليز)، وهي طرق تمتاز بكفاءتها الفائقة لكنها قد تكون مكلفة اقتصاديا على النطاق الصناعي(Mendes, *et al*., 2022. ( )

ثالثا: تقنيات استخلاص الدهون (Lipid Extraction Techniques)

وبعد إنجاز خطوة التمزق الجداري ، تصبح الدهون والاحماض الدهنية الحرة (FFAs) والمخزون الايضي من الدهون الثلاثية المتعادلة (TAGs) جاهزة بالكامل ومتحررة من الحواجز الهيكلية الخلوية، مما يفسح المجال لارتباطها الفيزيوكيميائي مع الاطوار السائلة للمذيبات المستعملة. وتتفرع تقنيات الاستخلاص المعتمدة حاليا في الدراسات الاكاديمية والتطبيقات شبه الصناعية الى نوعين رئيسيين يتغايران جذريا في الكفاءة، والاثر البيئي، والتكلفة الاقتصادية (Al-Shorgani et al., 2021):

1. الاستخلاص بالمذيبات التقليدية (Conventional Solvent Extraction)

ترتكز هذه الطرق الكلاسيكية بشكل محوري الى مبدا الذوبانية والانتشارية (Solubility and Diffusivity)، حيث تعتمد على تقارب القطبية الكيميائية (Polarity) بين المذيب العضوي والنوع الدهني المراد استخلاصه؛ وتتفرع الى عدة انظمة معتمدة مخبريا:

- انظمة المذيبات ثنائية القطب (Biphasic Solvent Systems): وتتمحور بصورة رئيسيه في نظام فولش (Folch) ونظام بليغ وديير (Bligh and Dyer). يستند هذان النظامان على دمج خليط متناسب من الكلوروفورم ($CHCl_3$) والميثانول (CH_3OH) بوجود الماء. يقوم الميثانول (المذيب القطبي) بكسر الروابط بين الدهون والبروتينات في الاغشية الخلوية، مما يسمح للكلوروفورم (المذيب غير القطبي) بالارتباط بـ الاحماض الدهنية الحرة والدهون الثلاثية وعزلها في طور سفلي مستقل (Ratha et al., 2024). ورغم قدرة هذه الانظمة على تحقيق اعلى كفاءة كمية ونوعية في استخلاص دهون الطحالب، الا ان السمية العالية جدا للكلوروفورم والميثانول، وتاثيراتهما المسرطنة، وتكلفة التخلص الامن من مخلفاتهما، تجعلها طرقا محصورة في النطاق المختبري التحليلي الضيق وغير صالحة للاستخدام التجاري.

- استخلاص سوكسليت الكلاسيكي (Soxhlet Extraction): يُعتبر من اكثر الطرق التقليدية استخداما؛ حيث تخضع الكتلة الحيوية الجافة للطحالب لعمليات غسيل مستمر ومتكرر بالمذيب العضوي الساخن (مثل الهكسان او الايثر البترولي) تحت التكثيف والارتجاع (Reflux). ينفرد الهكسان بـ انتقائية ممتازة للدهون التخزينية المتعادلة (TAGs) المناسبة لتوليد الديزل الحيوي، كما انه اقل سمية من الكلوروفورم. وبالمقابل، فان العيب الجوهري لهذه التقنية يرتكز في استهلاكها الحاد لزمن التشغيل (قد يمتد من 6 الى 24 ساعة)، واستهلاك كميات هائلة من المذيبات والطاقة الحرارية، فضلا عن خطر عرضة مباشر الاحماض الدهنية غير المشبعة (PUFAs) للتلف والاكسدة الذاتية جراء التعرض الطويل لدرجات حرارة الغليان (Sethi *et*
- *al.*, 2025).

2. الاليات الاستخلاص الخضراء والحديثة (Green and Advanced Extraction Technologies)

محاذاةً للضوابط البيئية الحاكمة ومبادئ الكيمياء الرفيقة بالبيئة ، قاد التطور التكنولوجي نحو ابتكار جيل جديد من تقنيات والاليات الاستخلاص الصديقة للبيئة (Green Extraction)، والتي تسعي الى رفع النقاوة والانتاجية مع تقليص او انهاء استخدام المذيبات البترولية السامة (Jacob et al., 2022). ومن ابرز هذه التقنيات:

- الاستخلاص بالسوائل فوق الحرجة (Supercritical Fluid Extraction - SFE):

تُمثل هذه المنهجية حجر الزاوية والقفزة التقنية الأكثر ريادية في مضمار الاستخلاص الأخضر؛ إذ يرتكز تشغيلها على توظيف غاز ثنائي أكسيد الكربون في طوره الفائق، وذلك عبر تنظيم معايير الضغط ودرجة الحرارة صعوداً لتتخطى عتبتها الحرجة البالغة **واحد وثلاثين درجة مئوية وعُشراً واحداً**، وضغطاً يعادل **ثلاثة وسبعين باراً وثمانية أعشار البار**. وضمن هذه الإحداثيات الديناميكية، يكتسب ثنائي أكسيد الكربون في حالته الفائقة سمات فسيولوجية وفيزيائية استثنائية، تدمج ببراعة بين النفاذية والانتشارية العالية المميزة للحالة الغازية، والمقدرة الإذابتية الفائقة الكامنة في السوائل الكثيفة.يتميز ثاني اكسيد الكربون فوق الحرج بانه امن فسيولوجيا، غير قابل للاشتعال، رخيص الثمن، ويحتوي قطبية منخفضة تشبه الهكسان، مما يمنحه عالي الانتقائية للاحماض الدهنية الحرة والدهون الثلاثية (TAGs). وتكمن الميزة الكبرى هنا في قابلية فصل

المذيب عن الدهون تماما وتلقائيا بمجرد خفض الضغط (Depressurization)، ليتحول الـ CO_2 الى غاز ويتبخر دون ترك اي اثر سمي في المستخلص النهائي، مع امكانية اعادة ادخاله في المنظومة الانتاجية؛ الا ان العائق الوحيد لها هو النفقات الراسمالية العالية للمعدات والضغوط المرتفعة المطلوبة صناعي (Al -Shorgani *et al.*, 2021.).

الاستخلاص بمساعدة الميكروويف (Microwave-Assisted Extraction - MAE):-

تعتمد هذه التقنية على وضع موجات الميكروويف الكهرومغناطيسية مباشرة على خليط الكتلة الحيوية والمذيب. تنفذ هذه الموجات الخلايا الطحلبية وتتفاعل مع الجزيئات القطبية والمياه داخل السيتوبلازم، مما يحفز الى تسخين داخلي سريع ومفاجئ يؤدي الى رفع الضغط البخاري الاستاتيكي داخل الخلية. هذا الضغط يسبب الى تمدد الخلايا وانفجار اغشيتها وجدرانها المتبقية، مما يدفع بالاحماض الدهنية والدهون الى الخارج الخلية لتذوب فورا في المذيب المحيط بها (Sethi *et al.*, 2025). تتميز تقنية MAE باختزالها الزمني الفائق لاستخلاص (من ساعات الى دقائق معدودة)، وتقليل كمية المذيبات المطلوبة بنسب تصل الى 70%، مع وقاية الاحماض الدهنية الحساسة من التحلل الحراري بفضل الية التبادل الحراري الانتقائي الحجمي.

- الاستخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية (Ultrasound-Assisted Extraction - UAE):

تستند على ظاهرة "التكهف الصوتي(Acoustic Cavitation) "؛ التي يطرأعلى الموجات فوق الصوتية عالية التردد طفرات متتالية من القيم الضغطية العاليه والمنخفضه داخل الوسط السائل، مما يسبب الى توليد فقاعات ميكروسكوبية تنمو وتنفجر على نحو عنيف بالقرب من اسطح الخلايا الطحلبية. تسبب هذه الانفجارات قوى قص هيدروديناميكية جبارة وتيارات نفاثة دقيقة (Micro-jets) تعمل على تكسير ما تبقى من اجزاء الجدار الخلوي وايجاد قنوات انتشارية مجهرية، مما يمهد التدفق السريع للاحماض الدهنية نحو المذيب (Jacob *et al.*, 2022). تُتسم هذه الطريقة اقتصادية وسهلة التطبيق وتتم تحت درجات حرارة منخفضة، مما يحافظ على جودة ونقاوة الاحماض الدهنية متعددة عدم الاشباع (PUFAs)

المحور الثالث: التطبيقات البيئية والصناعية (غير الطبية) للاحماض الدهنية الطحلبية

اولا: التطبيقات البيئية والطاقة المتجددة (انتاج الوقود الحيوي(

تُمثّل الاحماض الدهنية المستخرجة من الكتلة الحيوية للطحالب الركيزة الاساسية والمرتكز التكنولوجي لانتاج الجيل الثالث من الوقود الحيوي (Third-Generation Biodiesel). وتجري العملية مخبريا وصناعيا من خلال تفاعل كيميائي محوري يُعرف بـ تفاعل الترانزسترة او اعادة الاسترة (Transesterification)؛ وحيث تنجز مفاعلة الدهون الثلاثية المتعادلة (TAGs) المستخلصة مع كحول احادي قصير السلسلة—عادتا ما يكون الميثانول (CH_3OH) لرخص ثمنه، او الايثانول —(C_2H_5OH)بوجود عامل حفاز (Catalyst) قد يكون قاعدي كايدروكسيد الصوديوم ($NaOH$) او ميثوكسيد الصوديوم (CH_3ONa)، او حامضي كحمض الكبريتيك (H_2SO_4). تستهدف هذا التفاعل الكيميائي الى قطع جزيء الجلسرين المعقد ذي اللزوجة العالية وتعويضه بمجموعات الكيل الكحول، ليتولد عن ذلك استرات ميثيل الاحماض الدهنية (FAMEs)، وهي المكون الكيميائي النقي للديزل الحيوي، علاوة على ذلك الجلسرين الخام (Crude Glycerol) كمنتج ثانوي ذي اهمية تجارية في الصناعات التحويلية (Vijayaram *et al.*,. 2024).

وتتجاوز اهمية هذا الوقود الاخضر مجرد باعتباره موردا طاقيا تقليديا لسد العجز في الموارد النفطية، اذ يتميز بابعادا فنية، بيئية، واقتصادية ثورية يمكن تمثيلها في النقاط التحليلية التالية:

- كفاءة الاحتراق والخصائص الفيزيوكيميائية والميكانيكية: يمتلك الديزل الحيوي الطحلبي (FAMEs) ببروفيل احماض دهنية متوازن جدا (يحصد بين السلاسل المشبعة والاحادية غير المشبعة)، مما يزوده بخصائص فيزيائية وميكانيكية ممتازة يتوافق بالمعايير الدولية الصارمة للوقود مثل المعيار الامريكي (ASTM D6751) والمعيار الاوروبي . (EN14214) (Maroušek *et al.*, 2023). ومن ابرز هذه الخصائص:
- رقم السيتان المرتفع (High Cetane Number): يمتلك الديزل الطحلبي رقما سيتانيا عاليا يتجاوز عادة الرقم 50، وهو المؤشر القياسي لسرعة وجودة الاحتراق داخل

محركات الديزل؛ حيث يضمن تقليل فترة تاخر الاشتعال (Ignition delay)، مما يسبب الى تشغيل هادئ للمحرك، واحتراق كامل وشامل للوقود، وتقليل الضوضاء الميكانيكية.

- اللزوجة الحركية الامنة (Kinematic Viscosity): تتركز لزوجة الديزل الحيوي الطحلبي في المدى المثالي القريب من الديزل النفطي، مما يضمن تدفقه وسلاسته داخل مضخات وانظمة حقن الوقود (Injectors) دون ان يتسبب في تكوين ترسبات كربونية او انسدادات داخل اسطوانات المحرك.

- نقطة الوميض المرتفعة (High Flash Point): تتميز استرات الطحالب بنقطة وميض امنة جدا تتجاوز 130 درجة سيليزية بالمقارنة مع الديزل النفطي التقليدي الذي تبلغ نقطة وميضه حوالي 60 درجة سيليزية. هذه الافضلية تجعل الوقود الطحلبي امنا للغاية وغير قابل للاشتعال الذاتي المفاجئ اثناء عمليات النقل، الشحن، والتخزين طويل الامد في البؤر الصناعية.

- التشحيم الذاتي للمحرك (Lubricity): يمتلك الديزل الحيوي خصائص تشحيم ذاتية فائقة مقارنة بالديزل الاحفوري منخفض الكبريت، مما يسهم بشكل مباشر في تخفيف الاحتكاك والتاكل الميكانيكي للاجزاء المتحركة داخل منظومات ضخ الوقود والمحركات، وعليه اطالة عمرها الافتراضي (Al-Shorgani *et al.*, 2021).

- الاثر البيئي المتناهي وتقليل الانبعاثات الغازية: من الناحية البيئية، يُعد الديزل الحيوي المستخلص من الطحالب حلا حاسما لتقليل التلوث الهوائي وتقليل حدة الاحتباس الحراري؛ بحيث تشير البيانات التطبيقية الى كفاءته على خفض انبعاثات غازات الدفيئة والململوثات السامة بنسب تتراوح بين 60% الى 80% مقارنة بالوقود التقليدي. (Li, and Yao (2024. وتتباين هذه الكفاءة عبر الاتي:

- الحياد الكربوني (Carbon-Neutrality): لا يشكل اضافة احتراق الديزل الطحلبي كربونا جديدا الى الغلاف الجوي؛ فالـ CO_2 المنبعث من عوادم السيارات والمخلفات المصانع عند حرق هذا الحوامل الطاقية هو نفسه الغاز الذي قامت الخلايا الطحلبية باحتجازه واستنزافه من الجو او من المداخن الصناعية كعنصر تغذية ضروري اثناء عملية البناء الضوئي،

مما ينتج دورة كربونية مغلقة ذات صافي انبعاثات يقترب من الصفر (Sahoo and Das, 2023).

- خلوه من الكبريت والمركبات العطرية: يتميز الديزل الطحلبي بخلوه التام من عنصر الكبريت، مما يعني عدم وجود انبعاثات غاز ثاني اكسيد الكبريت (SO2) المسبب الاول عن الامطار الحامضية. كما يسبب الاحتراق الكامل للوقود بفضل محتواه العالي من الاكسجين الداخلي (حوالي 11%) الى تخفيف حاد في انبعاثات اول اكسيد الكربون السام (CO)، والجسيمات الدقيقة العالقة (PM)، والهيدروكربونات غير المحترقة (HC)، مما يزداد من جودة الهواء في المدن والنطاقات الصناعية.
- الاستدامة اللوجستية والامان البيئي الكامل: يمثل الديزل الطحلبي نموذجا معياري للاستدامة البيئية المطلقة والامن اللوجستي؛ فهو وقود يتجدد بالكامل ومهيأ للتحلل البيولوجي السريع (Biodegradable) في البيئة الطبيعية بفعل الاحياء الدقيقة في التربة والمياه عبرفواصل زمنية قصيرة (حيث ان اكثر من 95% منه يتحلل في غضون 21 يوما). هذه الخاصية تمنحه وقودا غير سام وامنا تماما للبيئات المائية والتربة في حال حصول تسربات نفطية عن طريق الخطا او حوادث ناقلات البحار، على العكس تماما من الكوارث البيئية المزمنة المسببه عن تسرب النفط الخام (Al-Shorgani *et al*., 2021).

ومن زاوية جغرافي وتنموي، يتفوق وقود الجيل الثالث من الطحالب على وقود الجيل الاول)المستخلص من الزيوت الغذائية كالصويا والذرة) والجيل الثاني (المستخلص من مخلفات المحاصيل والزيوت غير الماكولة كالجيروفا) في كونه يقضي جذريا معضلة "الغذاء مقابل الطاقة(Food vs. Fuel) "؛ اذ تحتوي الطحالب المجهرية انتاجية دهون للهكتار الواحد تتسامى انتاجية المحاصيل الارضية بـ 10 الى 30 ضعفا، وبامكان استزراعها في اوعية ومفاعلات حيوية ضوئية (PBRs) او احواض مفتوحة فوق اراضٍ صحراوية سبخة غير صالحة للزراعة، وبوساطة مياه مالحة او مياه صرف ملوثة، مما يقي موارد المياه العذبة ويصون على الامن الغذائي العالمي مستداما.

ثانيا: التطبيقات الزراعية والانتاج الحيواني (الكتلة الحيوية للطحالب المستدامة)

تمتاز الاحماض الدهنية الطحلبية، وبالذات الاحماض الدهنية طويلة السلسلة ومتعددة عدم التشبع (PUFAs)، بعناية منهجية في قطاع الانتاج الحيواني والزراعي. ونظرا للاستدامة الاقتصادية، تُستثمرالكتلة الحيوية المتبقية بعد استخلاص الزيوت (Algal meal)، او الزيوت الدهنية الخام نفسها، كاضافات مغذية وذات القيمة عالية في تركيب اعلاف الاسماك (Aquaculture)، والدواجن، والمواشي (Guedes *et al.*, 2022). وتتجلى الخواص البيولوجية والانتاجية لهذه الاضافات الطحلبية في النقاط التالية:

- تعزيز المناعة والمقاومة الحيوية: تسهم الاحماض الدهنية غير المشبعة (مثل EPA و DHA) كمركبات حيوية نشطة تحفز الاستجابة المناعية وتقلل من شدة الالتهابات لدى الحيوانات. يساهم ذلك بشكل مباشر في تخفيف معدلات الموت في المزارع السمكية ومزارع الدواجن، مما يخفف من الحاجة الى توظيف المضادات الحيوية الكيميائية (Shah *et al.*, 2023).
- تحسين وترقية معدلات النمو وكفاءة التحويل: تساهم اضافة مكونات الطحالب الغنية بالدهون الى تعزيز صحة الامعاء والجهاز الهضمي للحيوان، مما يتصاعد من معدل التحويل الغذائي (Feed Conversion Ratio - FCR). هذا يعني ان الحيوانات تتلقى من كميات اقل من الاعلاف لتحقيق معدلات نمو وكتلة لحمية اعلى وفي فواصل زمنية اقصر (Hasan and Soto, 2022).
- اثراء المنتجات النهائية (Functional Foods): تمثل هذه الاعلاف في نقل الاحماض الدهنية الصحية بشكل مباشرة الى انسجة الحيوان ومنتجاته؛ مما يفصح بانتاج اطعمة وظيفية عالية القيمة للمستهلك البشري، كبيض دواجن غني بالاوميغا-3، ولحوم مواشي واسماك ذات بروفيل دهني صحي لها دور في خفض الكوليسترول (Guedes *et al.*, 2022).
- تدعيم الامن الغذائي وحماية البحار: يؤدي الاعتماد على دهون الطحالب في قطاع الاستزراع السمكي حلا بيئيا انقاذيا؛ بحيث يحل زيت الطحالب مقارنة لـ "مسحوق وزيت الاسماك التقليدي(Fishmeal) " المستنفد من المحيطات، مما يؤمن التنوع البيولوجي البحري ويعزز استدامة سلاسل الامداد الغذائي (Hasan and Soto, 2022).

ثالثا: التطبيقات الصناعية الاخرى)البلاستيك الحيوي والمواد التشحيمية)

تتسع التكنولوجيا الحيوية الحديثة في توظيف الاحماض الدهنية الطحلبية كمواد اولية اساسية في الكيمياء الصناعية (Oleochemistry) بهدف تخليق مواد صديقة للبيئة وخيار اخر للمشتقات البترولية التقليدية. ولا يقتصر هذا التحول على تخفيف الاعتماد على النفط فحسب، بل يعزز في ارساء قواعد الاقتصاد الحيوي الدائري (Circular Bioeconomy) (Zhu *et al*., 2024).

ومن اهم هذه التطبيقات الفنية:

1. البلاستيك الحيوي (Bioplastics)

تُساهم الاحماض الدهنية الطحلبية كمصادر كربونية اساسية او كمواد ملدنة (Plasticizers) لانتاج البوليمرات الحيوية القابلة للتحلل الطبيعي حيوي (Biodegradable Polymers) مثل البولي هيدروكسي الكانوات (PHAs) والبولي لاكتيك اسيد (PLA).

- الالية الفنية: تصنع بعض الطحالب او البكتيريا التغذية التي تمتص المغذيات من دهون الطحالب هذه البوليمرات داخل خلاياها كمخزون طاقة، ليتم استخلاصها وتكوينها لاحقا.
- الميزة البيئية والصناعية: يسهم هذا البلاستيك الحيوي مرونة ومتانة ميكانيكية تماما ك البلاستيك التقليدي (مثل البولي ايثيلين)، ولكنه ينفرد بالقدرة على التحلل الكامل في التربة او المياه خلال فترة اشهر قليلة بفعل الكائنات الدقيقة، مما يطرح حلا جذريا لمشكلة التلوث بالبلاستيك التقليدي المترسب في المحيطات والبيئة البرية لقرون (Zhu *et al*., 2024).

2. زيوت التشحيم والمذيبات الحيوية (Bio-lubricants)

تسهم الدهون المستخلصة من الطحالب بشكل محوري في تركيب وتصنيع زيوت المحركات، الشحوم الصناعية، والمواد الخافضة للتوتر السطحي (Surfactants) والمذيبات الصديقة للبيئة، وذلك خيار تعويضي للزيوت المعدنية القائمة على البترول (Sethi *et al.,* 2025).

- الكفاءة والاداء الصناعي: تكسب البنية الكيميائية للاحماض الدهنية الطحلبية (خاصة روابط الاستر) هذه المنتجات خصائص فيزيائية عالية؛ حيث تنفرد بـ معامل لزوجة مرتفع (High viscosity index) يعزز ثبات اداء الالات والمحركات تحت درجات الحرارة المرتفعه والضغط الشديد، اضافة الى قوة التصاق ممتازة بالاسطح المعدنية لتخفيف الاحتكاك والتاكل.

- الامان البيئي: على العكس من الشحوم البترولية التي تؤدي الى تلوث كيميائي حاد عند تسربها للتربة او المياه الجوفية، تسهم هذه المنتجات الطحلبية بصفة تنافسية التحلل البيولوجي الكامل (Biodegradability) والسريع، دون اغفال لاي اثار سمية او معادن ثقيلة في المنظومة البيئية .(Nguyen *et al,*. 2022).

الخاتمة والتوصيات (Conclusion and Recommendations)

اولا: الخاتمة

اظهرت هذه الدراسة الاكاديمية الشاملة ان الطحالب المجهرية والخيطية تُعد ركيزة استراتيجية ومستدامة لا غنى عنها في مجالات التطبيقات الاحيائية الحديثة، وبالضبط في قطاعات العلوم البيئية، الطاقة المتجددة، والصناعات غير الطبية. ان القدرة الفسيولوجية الاستثنائية للخلايا الطحلبية على تعديل مساراتها الايضية وتجميع الاحماض الدهنية الحرة (FFAs) والدهون الثلاثية المتعادلة (TAGs) بكثافة عالية كالية للتكيف مع ظروف الاجهاد البيئي، تؤمن مادة خام خضراء فائقة الجودة تستطيع على انهاء عصر التبعية للمشتقات البترولية التقليدية.

كما اظهرت الاستعراض التقني المنهجي ان مرحلة تحطيم الجدار الخلوي واستخدام تقنيات الاستخلاص الخضراء والمتقدمة—وعلى راسها فصل وتنقية بالسوائل فوق الحرجة (SFE) بواسطة ثاني اكسيد الكربون فوق الحرج (scCO_2) والاستخلاص بمساعدة الميكروويف (MAE) او الموجات فوق الصوتية —(UAE)تُعد العوامل المحدده والفيصل التقني لزيادة كفاءة ونقاوة الاحماض الدهنية، والحد من الاثر البيئي السلبي والسمية الناتجة عن المذيبات الكيميائية التقليدي وتحقيق التوازن البيئي.

وتؤكد النتائج التجريبية الموثقة ان هذه الاحماض الدهنية تحتوي جدوى اقتصادية وبيئية ثورية عند تحويرها عبر تفاعل الترانزسترة (Transesterification) الى استرات ميثيل الاحماض الدهنية (FAMEs) لانتاج جيل ثالث من الوقود الحيوي (Biodiesel) حيادي الكربون، او عند ادراجها في صناعة البلاستيك الحيوي القابل للتحلل الحيوي بالكامل مثل البولي هيدروكسي الكانوات (PHA) وحمض البولي لاكتيك (PLA)، علاوة على ذلك زيوت التشحيم التقنية، والاعلاف الزراعية الغنية بالاحماض الدهنية متعددة عدم الاشباع (PUFAs)، مما يعزز بفعالية

حقيقية في تسريع وتيرة التحول العالمي نحو اقتصاد حيوي دائر وخال من التلوث يحمي الانظمة البيئية لكوكب الارض.

ثانيا: التوصيات

استنادا على المعطيات والمناقشات العلمية المستفيضة التي ناقش محاورها, هذا المبحث المستقل، وذلك من الاعتماد الاتي:

- التوسع في الافاق البحثية والصناعية في تقنيات الاستخلاص الخضراء: تعزيزالتمويل البحثي التي تركز على نقل تقنيات الاستخلاص المتطورة مثل SFE-scCO_2 و MAE و UAE من النطاق المخبري المحدود الى النطاق شبه الصناعي والتجاري كبرى؛ لتقليل التكلفة التشغيلية الاجمالية والازالة الكاملة من المذيبات السامة.
- عزل و تنمية وتطوير سلالات طحلبية محلية متفوقة: تعزيز كثافة الجهود البحثية في مختبرات الاحياء الحياتية لعزل، وتصنيف، وتطوير سلالات طحلبية برية محليّة تحتوي قدرة وراثية مزدوجة على توليد كتلة حيوية ضخمة وتكدس كميات مرتفعة من الاحماض الدهنية الحرة (FFAs) على نحو متزامن، مع التركيز على تحفيز مركب الاستيل التمساحي (Acetyl-CoA) دون الحاجة لاخضاعها لظروف اجهاد مفرطة قد تتسبب في اضعاف معدلات نموها العام.
- انجاز التكامل البيئي الصناعي (Industrial Symbiosis): تقليل تكلفة انتاج دهون الطحالب عبر توحيد مسارات استزراع الطحالب مع محطات معالجة مياه الصرف الصحي والصناعي (كمصدر متاح للمغذيات الاساسية كالنيتروجين N والفسفور (P، وربطها بمداخن المصانع الكبرى لاستخلاص وتثبيت غاز ثاني اكسيد الكربون (CO_2)، مما يتيح معالجة البيئة وتوليد وقود حيوي ومواد بوليمرية حيوية في دورة تدوير والتوليد المغلق واقتصادية.

دليل الرموز العلمي (List of Symbols and Acronyms)

- TAGs: الدهون الثلاثية المتعادلة (Neutral Triglycerides)
- FFAs: الاحماض الدهنية الحرة (Free Fatty Acids)
- SFE: الاستخلاص بالسوائل فوق الحرجة (Supercritical Fluid Extraction)

- UAE: الاستخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية (Ultrasonication-Assisted Extraction)
- MAE: الاستخلاص بمساعدة الميكروويف (Microwave-Assisted Extraction)
- FAMEs: استرات ميثيل الاحماض الدهنية (Fatty Acid Methyl Esters)
- PUFAs: الاحماض الدهنية متعددة عدم الاشباع (Polyunsaturated Fatty Acids)
- PHA: البولي هيدروكسي الكانوات (Polyhydroxyalkanoate)
- PLA: حمض البولي لاكتيك (Polylactic Acid)
- N: عنصر النيتروجين (Nitrogen)
- P: عنصر الفسفور (Phosphorus)
- CO_2: غاز ثاني اكسيد الكربون (Carbon Dioxide)
- $scCO_2$ غاز ثاني اكسيد الكربون في الحالة فوق الحرجة (Supercritical Carbon Dioxide)

References

1. Al-Shorgani, A. S., Kalil, M. S., and Yusoff, W. M. W. (2021). Microalgae as a sustainable powerhouse for bioenergy and biochemicals: A review. Journal of Cleaner Production, 292, Article 126021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126021

2. Al-Shorgani, N. K., *et al.* (2021). Biodiesel production from algal lipids: A review of transesterification processes, fuel properties, and environmental impacts. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, Article 111072. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111072

3. Barkia, I., Al-Haj, L., and Abdel-Rahman, M. A. (2019). Bioactive lipids from marine algae and their potential applications. Marine Drugs, 17(2), Article 114. https://doi.org/10.3390/md17020114

4. Barsanti, L., and Gualtieri, P. (2022). Algae: Anatomy, biochemistry, and biotechnology (3rd ed.). CRC Press.

5. Chapman, R. L. (2013). Algae: The world’s most important “plants”—an introduction. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 18(1), 5–12. https://doi.org/10.1007/s11027-012-9382-y

6. Chen, H., *et al.* (2022). Profiling of membrane and storage lipids in macroalgae under varying environmental conditions. Journal of Applied Phycology, 34(4), 1895–1908. https://doi.org/10.1007/s10811-022-02725-7

7. Food and Agriculture Organization (FAO). (2022). Algae-based feeds for sustainable aquaculture: Nutritional profiles, global market trends, and environmental benefits (Fisheries and Aquaculture Technical Paper, No. 678). (Authored by M. R. Hasan & D. Soto).

8. Guedes, A. C., Amaro, H. M., & Pereira, M. M. (2022). Microalgae as a sustainable source of polyunsaturated fatty acids for animal and aquaculture feed: A review on nutritional value and impacts. Animal Feed Science and Technology, 285, Article 115218. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115218

9. Jacob, A., Ashokkumar, V., & Ngamcharussrivichai, C. (2022). Microalgae fatty acids as a renewable source for bioplastics and bio-lubricants: Present status and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, Article 112345. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112345

10. Li, G., and Yao, J. (2024). A review of algae-based carbon capture, utilization, and storage (algae-based CCUS). Gases, 4(4), 468–503. https://doi.org/10.3390/gases4040026

11. Maroušek, J., Maroušková, A., Gavurová, B., Tuček, D., & Strunecký, O. (2023). Competitive algae biodiesel depends on advances in mass algae cultivation. Bioresource Technology, 374, Article 128802. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128802

12. Mendes, M. C., Navalho, S., Ferreira, A., Paulino, C., Figueiredo, D., Silva, D., ... & Speranza, L. G. (2022). Algae as food in Europe: An overview of species diversity and their application. Foods, 11(13), Article 1871. https://doi.org/10.3390/foods11131871

13. Nguyen, L. N., Aditya, L., Vu, H. P., Johir, A. H., Bennar, L., Ralph, P., ... & Nghiem, L. D. (2022). Nutrient removal by algae-based wastewater treatment. Current Pollution Reports, 8(4), 369–383. https://doi.org/10.1007/s40726-022-00234-x

14. Ratha, S. K., Renuka, N., and Prasanna, R. (2024). Algal lipids: Biosynthesis, extraction strategies, and industrial applications for bioenergy. Biomass and Bioenergy, 180, Article 107012. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107012

15. Sahoo, D., and Das, S. (2023). Phycology and environment: Utilizing algae for carbon sequestration and industrial products. Environmental Science and

Pollution Research, 30(14), 41200–41215. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25110-x

16. Ścieszka, S., and Klewicka, E. (2019). Algae in food: A general review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 59(21), 3538–3547. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1496361

17. Sethi, S., Kumar, M., and Singh, G. (2025). Advanced cell disruption and solvent extraction techniques for enhancing lipid recovery from microalgae: A critical review. Bioresource Technology, 402, Article 130750. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.130750

18. Shah, M. R., Liang, Y., Cheng, J. J., & Pallas, B. (2023). Bioactive lipid profiles of marine algae and their immunomodulatory effects in livestock and poultry nutrition. Phytomedicine, 112, Article 154710. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2023.154710

19. Vijayaram, S., Ringø, E., Ghafarifarsani, H., Hoseinifar, S. H., Ahani, S., & Chou, C. C. (2024). Use of algae in aquaculture: A review. Fishes, 9(2), Article 63. https://doi.org/10.3390/fishes9020063

20. Zhu, Y., Li, T., Wang, Q., and Chen, Y. (2024). Microalgal fatty acids conversion to polyhydroxyalkanoates and bioplastics: Review and future roadmaps in a circular bioeconomy. Chemical Engineering Journal, 479, Article 147890. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147890

الفصل السابع

التطبيقات الأحيائية والبيئية غير الطبية

Non-Medical Biological and Environmental Applications

م. إيمان حسين عبد خضير

هيئة البحث العلمي - وزارة التعليم العالي والبحث العلمي - العراق

الملخص

يتناول الفصل التطبيقات الأحيائية والبيئية غير الطبية من خلال توظيف الكائنات الحية وعملياتها في معالجة مشكلات البيئة والغذاء والزراعة والصناعة. ويعرض الأساس الذي تقوم عليه هذه التطبيقات، من نشاط الكائنات الدقيقة والإنزيمات والتفاعلات الحيوية إلى إمكان تنظيمها في عمليات إنتاج أو معالجة. ويربط الفهم البيولوجي بمتطلبات الكفاءة والملاءمة البيئية، بدل التعامل مع التطبيق الحيوي باعتباره حلًا منفصلًا عن ظروف الوسط.

ويبحث الفصل في المعالجة الحيوية للملوثات والمخلفات والمياه والتربة، مع عرض دور الكائنات الدقيقة والنباتات والطحالب والعوامل التي تؤثر في نشاطها. كما يتناول تطبيقات في الإنتاج الزراعي والغذائي والصناعات الحيوية، ومنها استثمار المواد الخام والمخلفات وتحسين بعض العمليات وتقليل الاعتماد على مدخلات أكثر تلويثًا. وتوضح الأمثلة أن اختيار الكائن أو التقنية يرتبط بطبيعة الملوث أو المادة والظروف التشغيلية والغاية المطلوبة.

وتناقش المعالجة حدود الاستخدام غير الطبي ومتطلبات السلامة الحيوية والتقويم البيئي وضبط الجودة، إلى جانب تحديات توسيع التطبيق والكلفة والمراقبة. وتربط الخلاصة بين الاستفادة من الإمكانات الحيوية وحماية التوازنات البيئية ومنع الآثار غير المقصودة. وتتمثل مساهمة الفصل في عرض مفاهيمي وتطبيقي يجمع المجالات المتعددة داخل إطار للاستدامة وإدارة الموارد. ولا يقدم هذا الجمع ضمانًا موحدًا لنجاح كل تقنية في جميع البيئات؛ بل يبرز الحاجة إلى الاختبار والمتابعة وملاءمة الإجراء للسياق، مع المحافظة على التمييز بين المبدأ العلمي والتطبيق المحدد وشروط التحقق من أثره.

الكلمات المفتاحية: التطبيقات الأحيائية؛ المعالجة الحيوية؛ البيئة؛ التكنولوجيا الحيوية؛ السلامة الحيوية

Abstract

This chapter examines non-medical biological and environmental applications through the use of organisms and biological processes in environmental management, food production, agriculture, and industry. It introduces the biological foundations of these applications, from microbial activity and enzymes to processes that can be organized for production or treatment. Biological understanding is linked to efficiency and environmental suitability rather than treated as independent of surrounding conditions.

The chapter reviews bioremediation of pollutants, wastes, water, and soil, considering microorganisms, plants, algae, and factors affecting their activity. Agricultural, food, and industrial applications include the use of feedstocks and residues, improvement of selected processes, and reduction of more polluting inputs. Examples show that choosing an organism or technique depends on the material or pollutant, operating conditions, and intended objective.

Limits of non-medical use are considered alongside biosafety, environmental evaluation, quality control, scale-up, cost, and monitoring. The concluding discussion connects the use of biological capabilities with protection of ecological relationships and prevention of unintended effects. The contribution is a conceptual and applied overview organized around sustainability and resource management. It does not guarantee uniform success for each technique in every environment. Instead, it emphasizes testing, follow-up, and adaptation to context, preserving the distinction between a scientific principle, a specific application, and the procedures required to establish its effect.

Keywords: Biological applications; Bioremediation; Environment; Biotechnology; Biosafety

تمهيد

شهدت العلوم الأحيائية خلال العقود الأخيرة تطورًا متسارعًا نقلها من نطاق دراسة الكائنات الحية وخصائصها بوصفها موضوعًا معرفيًا إلى مجال تطبيقي واسع يسهم في إيجاد حلول للعديد من التحديات التي تواجه الإنسان، ولا سيما في مجالات البيئة والغذاء والزراعة. وقد أسهم التقدم المستمر في علوم الأحياء الدقيقة، والتقانات الحيوية، والكيمياء الحيوية، وعلم البيئة، والهندسة الوراثية، وتقانات الإنزيمات والعمليات الحيوية في توسيع آفاق التطبيقات الأحيائية، بحيث لم تعد تقتصر على المجال الطبي، بل امتدت لتشمل مجالات حيوية ترتبط بصورة مباشرة بالأمن الغذائي، واستدامة الموارد الطبيعية، والحفاظ على جودة النظم البيئية.

وتكتسب التطبيقات الأحيائية غير الطبية أهمية متزايدة لما تتمتع به من قدرة على توظيف العمليات الحيوية الطبيعية أو تطويرها بما يتيح إنتاج حلول أكثر انسجاما مع البيئة مقارنةً بالعديد من الأساليب والمعالجات التقليدية. وتبرز الكائنات الحية الدقيقة بصورة خاصة في هذا المجال، لما تمتلكه من تنوع كبير في قدراتها الأيضية، مما يمكنها من تحليل العديد من المركبات العضوية المعقدة، وتحويل بعض المخلفات إلى مواد ومنتجات ذات قيمة، والمساهمة في تدوير العناصر الغذائية داخل النظم البيئية، فضلًا عن إنتاج مجموعة واسعة من المركبات والإنزيمات التي يمكن الاستفادة منها في تطبيقات مختلفة.

ولا تقتصر هذه الإمكانات على الكائنات الحية الدقيقة فحسب، إذ يمكن توظيف النباتات والفطريات والطحالب في عدد من التطبيقات الأحيائية والبيئية، مثل المعالجة الأحيائية للملوثات، واستعادة النظم البيئية المتضررة، وتحسين خصوبة التربة، وإدارة المخلفات الزراعية والصناعية، فضلًا عن الإسهام في تطوير ممارسات أكثر استدامة في الغذاء والزراعة. ومن هذا المنطلق، أصبحت التطبيقات الأحيائية غير الطبية تمثل أحد الاتجاهات المهمة في مواجهة التحديات البيئية والزراعية والغذائية المعاصرة، من خلال الاستفادة من القدرات الطبيعية للكائنات الحية وتسخيرها في خدمة الإنسان والبيئة (Gadd, 2010).

وفي المجال الزراعي، أسهمت التقانات الأحيائية في توفير بدائل ومكملات للمدخلات الزراعية التقليدية، من خلال توظيف الأسمدة الحيوية، والمبيدات الأحيائية، والكائنات الحية الدقيقة المحفزة لنمو النبات، إلى جانب تطوير طرائق للاستفادة من المخلفات الزراعية وإعادة توظيفها. وتزداد

أهمية هذه التطبيقات في ظل التحديات التي تواجه القطاع الزراعي، ومنها تدهور خصوبة التربة، والاعتماد المتزايد على الأسمدة والمبيدات الكيميائية، ومحدودية الموارد المائية، فضلًا عن الآثار المتنامية للتغيرات المناخية. وفي هذا السياق، أصبح توظيف الكائنات الحية الدقيقة في الأنظمة الزراعية أحد الاتجاهات المهمة نحو بناء نظم إنتاج أكثر كفاءة واستدامة، من خلال تعزيز نمو النباتات وتحسين توافر العناصر الغذائية وتقليل الاعتماد على بعض المدخلات الكيميائية (Bhattacharyya and Jha, 2012).

أما في مجال الغذاء، فقد أسهمت علوم الأحياء الدقيقة والإنزيمات والتقانات الحيوية في تطوير العديد من العمليات المرتبطة بإنتاج الغذاء وتصنيعه وحفظه، ولا سيما عمليات التخمير، وتحسين الصفات النوعية للمنتجات الغذائية، وإطالة مدة صلاحيتها، وإنتاج مكونات غذائية ذات قيمة مضافة. وتُعد عملية التخمير الحيوي من أقدم التطبيقات التي اعتمد فيها الإنسان على الكائنات الحية الدقيقة، إلا أن التطور العلمي في فهم النشاط الأيضي لهذه الكائنات وآليات عملها أتاح الانتقال من الممارسات التقليدية إلى عمليات حيوية أكثر تنظيمًا ودقة وقابلية للتحكم، مما عزز من أهميتها في الصناعات الغذائية الحديثة.(Tamang *et al*., 2020)

وعلى الرغم من الإمكانات الواسعة والمزايا التي توفرها التطبيقات الأحيائية غير الطبية، فإن التوسع في استخدامها يواجه مجموعة من التحديات العلمية والتقنية والاقتصادية والبيئية والتشريعية. ومن ثم، فإن تقييم أي تطبيق أحيائي لا ينبغي أن يعتمد فقط على مدى نجاحه في تحقيق الغرض المباشر منه، بل يتطلب نظرة أكثر شمولًا تأخذ في الاعتبار مستوى السلامة، والاستدامة البيئية، وإمكانية التوسع في التطبيق، والآثار المحتملة على المدى البعيد، فضلًا عن الجدوى الاقتصادية ومدى ملاءمة التقنية للظروف البيئية والاجتماعية المختلفة.

وانطلاقًا من ذلك، يستعرض هذا الفصل أهم التطبيقات الأحيائية والبيئية غير الطبية، مع التركيز بصورة خاصة على مجالات البيئة والغذاء والزراعة، بوصفها مجالات ترتبط ارتباطًا وثيقًا باستدامة الموارد وتحسين جودة الحياة. كما يناقش الفصل حدود هذه التطبيقات والتحديات العلمية والتقنية والاقتصادية التي قد تحد من انتشارها وتطبيقها على نطاق واسع، إلى جانب استعراض أبرز الاتجاهات المستقبلية التي يمكن أن تسهم في تطوير تقانات أحيائية أكثر كفاءة وأمانًا

واستدامة، بما ينسجم مع متطلبات التنمية المستدامة والتحديات البيئية والغذائية والزراعية المتزايدة.

المبحث الأول: التطبيقات الأحيائية في البيئة والغذاء والزراعة

تمثل التطبيقات الأحيائية في مجالات البيئة والغذاء والزراعة أحد الاتجاهات المهمة في التقانات الحيوية الحديثة، لما لها من ارتباط مباشر بالاحتياجات الإنسانية والتحديات البيئية المعاصرة. وتعتمد هذه التطبيقات بصورة أساسية على الاستفادة من القدرات الطبيعية للكائنات الحية أو مكوناتها الحيوية، وتسخيرها لتنفيذ عمليات قد يصعب تحقيقها بالكفاءة نفسها بالطرائق التقليدية. وتشمل هذه التطبيقات مجموعة واسعة من الكائنات والمواد الحيوية، مثل البكتيريا والفطريات والطحالب والنباتات، فضلًا عن الإنزيمات والخلايا والمنتجات الأيضية المختلفة.

وتختلف التطبيقات الأحيائية في طبيعتها وآليات عملها تبعًا للهدف المراد تحقيقه والوسط الذي تُطبق فيه. فبعضها يعتمد على قدرة الكائنات الحية الدقيقة على تحليل المركبات العضوية وتحويلها إلى مركبات أبسط وأقل ضررًا، في حين تستند تطبيقات أخرى إلى عمليات الامتزاز أو التراكم الحيوي للعناصر والملوثات، بينما تعتمد تطبيقات أخرى على إنتاج مركبات نافعة أو تعزيز عمليات حيوية طبيعية تسهم في تحسين خصائص الوسط البيئي أو الزراعي. ويمنح هذا التنوع في الآليات إمكانية اختيار التقنية الأكثر ملاءمة وفقًا لطبيعة المشكلة والخصائص البيئية المحيطة بها.

أولاً: التطبيقات الأحيائية في حماية البيئة ومعالجة الملوثات

أدى التوسع المتسارع في الأنشطة الصناعية والزراعية والعمرانية إلى زيادة كمية وتنوع الملوثات التي تصل إلى مكونات البيئة المختلفة، إذ أصبحت النظم البيئية معرضة لمجموعة واسعة من الملوثات، من بينها المركبات العضوية، والمبيدات الزراعية، والهيدروكربونات النفطية، والعناصر الثقيلة، والمخلفات البلاستيكية وغيرها. وقد شكل تراكم هذه الملوثات وما يترتب عليه من آثار سلبية على الإنسان والكائنات الحية والنظم البيئية دافعًا مهمًا للبحث عن تقنيات أكثر كفاءة وأقل ضررًا بالبيئة للحد من التلوث ومعالجته. ومن بين التقنيات التي حظيت باهتمام واسع في هذا المجال المعالجة الأحيائية.Bioremediation

وتُعرّف المعالجة الأحيائية بأنها مجموعة من العمليات التي تعتمد على استخدام الكائنات الحية أو نشاطها الأيضي في إزالة الملوثات أو تحويلها إلى مركبات أقل سمية وأكثر استقرارًا، بما يسهم في تقليل خطورتها وتأثيراتها في البيئة. ويمكن أن تستند هذه التقنية إلى الكائنات الحية الدقيقة الموجودة بصورة طبيعية في البيئة، والتي تمتلك القدرة على تفكيك بعض الملوثات، أو إلى كائنات دقيقة مختارة تُضاف إلى المواقع الملوثة بهدف تعزيز النشاط الحيوي وتسريع عمليات التحلل.(Azubuike *et al*., 2016)

وتكتسب المعالجة الأحيائية أهمية خاصة ضمن إطار التكنولوجيا الحيوية البيئية، نظرًا إلى قدرتها على الاستفادة من النشاط الحيوي للبكتيريا والفطريات والطحالب والنباتات، إضافة إلى الإنزيمات والمنتجات الأيضية، في التعامل مع مجموعة متنوعة من الملوثات. ولا يقتصر دور هذه التقنيات على إزالة الملوثات من البيئة، بل قد يشمل أيضًا تحويلها إلى أشكال أقل خطورة، أو تثبيتها وتقليل قابليتها للانتقال والتراكم، بحسب طبيعة الملوث والكائن المستخدم والظروف البيئية المحيطة.

وتتعدد تطبيقات المعالجة الأحيائية لتشمل المياه والتربة والمخلفات الصلبة والسائلة، كما يمكن توظيفها في معالجة التلوث الناتج عن الأنشطة الصناعية والزراعية والنفطية. فعلى سبيل المثال، يمكن لبعض الكائنات الحية الدقيقة تحليل الهيدروكربونات النفطية والمركبات العضوية، في حين تمتلك أنواع أخرى القدرة على التعامل مع بعض المبيدات والعناصر الثقيلة من خلال آليات حيوية مختلفة. كما يمكن استثمار النشاط الميكروبي في تحويل المخلفات العضوية إلى منتجات ذات قيمة، الأمر الذي يربط بين معالجة التلوث والاستفادة من الموارد وتقليل كمية المخلفات المتراكمة.

ومن هذا المنظور، لا تُعد المعالجة الأحيائية مجرد وسيلة للتخلص من الملوثات، وإنما تمثل توجهًا بيئيًا يقوم على توظيف العمليات الحيوية الطبيعية في معالجة المشكلات البيئية بطريقة يمكن أن تكون أكثر توافقًا مع مبادئ الاستدامة. ومع ذلك، فإن كفاءة هذه التقنيات تعتمد على مجموعة من العوامل، منها طبيعة الملوث وتركيزه، ونوع الكائن الحي المستخدم، وتوافر مصادر الغذاء والطاقة، ودرجة الحرارة ودرجة الحموضة وكمية الأكسجين، فضلًا عن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للوسط البيئي. ولذلك فإن نجاح المعالجة الأحيائية يتطلب فهمًا دقيقًا للتفاعل بين الكائنات الحية والملوثات والظروف البيئية المحيطة بها.

وتتميز المعالجة الأحيائية، في كثير من الحالات، بإمكانية تنفيذها في ظروف تشغيل معتدلة نسبيًا مقارنةً ببعض المعالجات الفيزيائية والكيميائية والحرارية، الأمر الذي قد يسهم في خفض استهلاك الطاقة وتقليل الحاجة إلى إضافة المواد الكيميائية. ومع ذلك، فإن كفاءة هذه المعالجة لا تكون ثابتة في جميع الحالات، بل تتأثر بصورة واضحة بطبيعة الملوث وتركيزه، والخصائص الفيزيائية والكيميائية للوسط، ودرجة الحرارة ودرجة الحموضة، وتوافر مصادر الكربون والطاقة، فضلًا عن وجود كائنات حية دقيقة تمتلك القدرة الأيضية المناسبة لتحليل الملوث أو تحويله (Rittmann and McCarty, 2001). لذلك، فإن اختيار الكائنات الحية والظروف التشغيلية الملائمة يمثل عاملًا أساسيًا في نجاح عملية المعالجة.

1- المعالجة الأحيائية للملوثات العضوية

تُعد الملوثات العضوية من أبرز المجالات التي أثبتت فيها المعالجة الأحيائية فاعليتها، نظرًا إلى امتلاك العديد من أنواع البكتيريا والفطريات قدرات أيضية وإنزيمية تمكنها من تحليل مجموعة واسعة من المركبات العضوية. ويمكن لبعض هذه الكائنات استخدام المركبات العضوية مصدرًا للكربون والطاقة، في حين تعمل أنواع أخرى على تحويلها من خلال مسارات إنزيمية متعددة إلى مركبات أبسط وأقل تعقيدًا، وقد تصل عملية التحلل في بعض الحالات إلى التمعدن الكامل للمركب وتحويله إلى نواتج نهائية بسيطة.

ومن التطبيقات المهمة في هذا المجال المعالجة الأحيائية للتلوث بالهيدروكربونات النفطية، إذ أظهرت العديد من الدراسات قدرة أنواع مختلفة من البكتيريا والفطريات على تحليل مكونات النفط الخام ومشتقاته، ولا سيما عندما تتوافر الظروف البيئية المناسبة لنشاطها. وتكتسب هذه التطبيقات أهمية خاصة في المواقع المتأثرة بالتلوث النفطي، حيث يمكن للمجتمعات الميكروبية الموجودة بصورة طبيعية في البيئة أن تسهم تدريجيًا في خفض تراكيز الهيدروكربونات، في حين يمكن تعزيز كفاءة هذه العملية من خلال توفير العناصر الغذائية اللازمة لنمو الكائنات الدقيقة أو إضافة سلالات ميكروبية مختارة تمتلك قدرات تحللية مناسبة لطبيعة الملوث والموقع (Varjani, 2017).

ولا تقتصر تطبيقات المعالجة الأحيائية للملوثات العضوية على الهيدروكربونات النفطية، بل تمتد لتشمل عددًا من المبيدات الزراعية والمذيبات والمركبات الناتجة عن الأنشطة الصناعية. وتتم

عملية التحلل عادةً من خلال سلسلة من التفاعلات الإنزيمية التي تعمل على تغيير التركيب الكيميائي للمركب الملوث، فقد تؤدي هذه التفاعلات إلى إزالة بعض المجموعات الوظيفية، أو تفكيك روابط كيميائية محددة، أو تحويل المركب الأصلي إلى نواتج وسيطة، تستمر بدورها في الخضوع لتفاعلات حيوية أخرى إلى أن تتكون مركبات أبسط وأقل خطورة.

وفي هذا السياق، تبرز الإنزيمات الميكروبية بوصفها أحد المكونات الحيوية المهمة في عمليات المعالجة، لما تمتلكه من قدرة عالية على تحفيز تفاعلات كيميائية محددة وبكفاءة يمكن أن تتناسب مع طبيعة الملوث. كما أن استخدام الإنزيمات بصورة مباشرة أو الاستفادة من الكائنات الدقيقة المنتجة لها يفتح المجال أمام تطوير طرائق معالجة أكثر تخصصًا، ولا سيما للملوثات التي يصعب تحليلها بالطرائق التقليدية. ومن هنا أصبح الاهتمام بالإنزيمات الميكروبية يتزايد بوصفها أدوات حيوية يمكن توظيفها في تفكيك عدد من الملوثات العضوية، مع إمكانية تطوير كفاءتها من خلال اختيار السلالات المناسبة وتحسين ظروف التشغيل.

وتبرز هنا أهمية الإنزيمات الميكروبية بوصفها عوامل حيوية تمتلك القدرة على تحفيز تفاعلات كيميائية محددة بكفاءة وانتقائية عالية، مما يجعلها ذات قيمة كبيرة في عمليات المعالجة الأحيائية. وتشمل الإنزيمات التي تحظى بأهمية في هذا المجال إنزيمات الأكسدة والاختزال، وإنزيمات التحلل المائي، إلى جانب الإنزيمات القادرة على تفكيك المركبات العضوية المعقدة. كما تؤدي الفطريات دورًا مهمًا في هذا المجال، إذ تمتلك بعض الأنواع قدرة على إنتاج إنزيمات خارج خلوية واسعة الطيف تمكنها من تحليل مجموعة متنوعة من المركبات التي تتميز بمقاومتها للتحلل الحيوي، مما يوسع من إمكانات استخدامها في معالجة الملوثات العضوية المعقدة (Harms *et al*., 2011).

2- المعالجة الأحيائية للعناصر الثقيلة

تختلف العناصر الثقيلة عن معظم الملوثات العضوية في طبيعتها، إذ لا يمكن للكائنات الحية الدقيقة تحليلها وتحويلها إلى عناصر أبسط من خلال التحلل الحيوي. ولذلك، تركز المعالجة الأحيائية للعناصر الثقيلة على تغيير صورتها الكيميائية، أو تثبيتها، أو امتزازها، أو تراكمها حيويًا، بما يسهم في تقليل حركتها وانتقالها وتوافرها الحيوي في البيئة.

وتوظف مجموعة متنوعة من الكائنات الحية، بما في ذلك البكتيريا والفطريات والطحالب والنباتات، في عمليات مختلفة تهدف إلى الحد من تأثير العناصر الثقيلة أو تقليل انتقالها بين مكونات النظام البيئي. ومن أبرز هذه العمليات الامتزاز الحيوي Biosorption، الذي يعتمد على ارتباط الأيونات المعدنية بالمجاميع الوظيفية الموجودة على أسطح الخلايا أو ضمن مكوناتها الحيوية. وتتميز هذه الآلية بإمكانية الاستفادة من الكتلة الحيوية للكائنات الحية في إزالة بعض العناصر المعدنية من المياه أو الأوساط الملوثة.

ومن التطبيقات المهمة الأخرى المعالجة النباتية Phytoremediation، وهي تقنية تعتمد على قدرة بعض النباتات على امتصاص الملوثات من التربة أو المياه، أو تثبيتها والحد من حركتها، أو تراكمها في أجزاء محددة من النبات. ويمكن أن تكون هذه التقنية مناسبة بصورة خاصة لمعالجة بعض المواقع الملوثة بالعناصر الثقيلة، نظرًا إلى إمكانية تطبيقها باستخدام نباتات تمتلك قدرة طبيعية على تحمل هذه العناصر وتراكمها. إلا أن كفاءة المعالجة النباتية تختلف باختلاف نوع النبات والعنصر الملوث، فضلًا عن خصائص التربة ودرجة توافر العنصر والظروف المناخية السائدة في موقع المعالجة.(Ali *et al*., 2013)

3-المعالجة الأحيائية للمبيدات

تمثل المبيدات الزراعية إحدى أهم فئات الملوثات التي تستدعي اهتمامًا خاصًا في مجال المعالجة الأحيائية، نظرًا إلى الاستخدام الواسع لها في الأنشطة الزراعية وما قد يترتب على ذلك من وصول مخلفاتها إلى مكونات البيئة المختلفة. فعلى الرغم من الدور الأساسي الذي تؤديه المبيدات في مكافحة الآفات وحماية المحاصيل الزراعية، فإن استخدامها بصورة غير رشيدة أو الإفراط في استعمالها قد يؤدي إلى تراكم بعض مخلفاتها في التربة والمياه، فضلًا عن إمكانية انتقالها إلى مواقع أخرى من خلال الجريان السطحي أو الترشيح أو عمليات الانتقال البيئي المختلفة.

وتزداد أهمية معالجة هذه المخلفات عندما تكون المبيدات أو نواتج تحللها ذات قدرة على البقاء في البيئة أو التأثير في الكائنات غير المستهدفة. وفي هذا السياق، توفر المعالجة الأحيائية نهجًا واعدًا للاستفادة من القدرات الأيضية للكائنات الحية الدقيقة في تحويل بعض المبيدات إلى مركبات أقل سمية، من خلال تفاعلات إنزيمية متعددة تعتمد على التركيب الكيميائي للمبيد ونوع الكائن الدقيق والظروف البيئية المحيطة. ومن ثم، يمكن أن تمثل دراسة الكائنات الدقيقة والإنزيمات المنتجة

منها أساسًا مهمًا لتطوير طرائق حيوية أكثر كفاءة في الحد من مخلفات المبيدات في التربة والمياه.

يمكن لعدد من أنواع البكتيريا والفطريات والكائنات الحية الدقيقة الأخرى تفكيك المبيدات وتحويلها من خلال مجموعة من الأنظمة والإنزيمات المختلفة، من بينها إنزيمات التحلل المائي، والأكسيدازات، والإنزيمات القادرة على استهداف روابط كيميائية محددة داخل جزيئات المبيد. وقد تسهم هذه العمليات في خفض تركيز المركب الأصلي في الوسط البيئي، إلا أن انخفاض التركيز وحده لا يمثل دليلًا كافيًا على نجاح المعالجة؛ إذ ينبغي التحقق من طبيعة النواتج المتكونة، ومدى استقرارها، وقابليتها للاستمرار في البيئة، فضلًا عن تقييم سميتها المحتملة للكائنات الحية.

وتكتسب المعالجة الأحيائية للمبيدات أهمية متزايدة باعتبارها خيارًا يمكن أن يستخدم بصورة مستقلة أو بوصفه مكملًا لبعض المعالجات الفيزيائية والكيميائية. ومع ذلك، فإن كفاءة التحلل الحيوي لا تكون ثابتة، بل تتأثر بمجموعة من العوامل، من أهمها التركيب الكيميائي للمبيد، وتركيزه، وخصائص التربة، ودرجة الحرارة، ومحتوى الرطوبة، وتوافر العناصر الغذائية، فضلًا عن وجود كائنات دقيقة تمتلك القدرة الفعلية على تحليل المركب. ولذلك، فإن تطبيق المعالجة الأحيائية في المواقع الملوثة بالمبيدات يتطلب أولًا دراسة خصائص الملوث والوسط البيئي بصورة دقيقة، ثم اختيار الكائن الحي أو النظام الحيوي الأكثر ملاءمة لظروف الموقع.

4- المعالجة الأحيائية للهيدروكربونات النفطية

تُعد الهيدروكربونات النفطية من الملوثات البيئية المهمة المرتبطة بالأنشطة النفطية وعمليات الاستخراج والنقل والخزن، إضافة إلى حوادث التسرب والانسكابات العرضية. وتتميز بعض مكونات هذه الملوثات بإمكانية خضوعها للتحلل الحيوي بواسطة أنواع متعددة من البكتيريا والفطريات، الأمر الذي جعلها من أبرز المركبات التي حظيت باهتمام الباحثين في مجال المعالجة الأحيائية.

وتعتمد الكائنات الحية الدقيقة في تحليل الهيدروكربونات على مجموعة من المسارات الأيضية والإنزيمية التي تؤدي إلى تحويل المركبات الهيدروكربونية المعقدة تدريجيًا إلى مركبات أبسط،

وقد تصل عملية التحلل في الظروف المناسبة إلى نواتج نهائية أقل تعقيدًا. وتتأثر سرعة وكفاءة هذه العمليات بعدد من العوامل البيئية، من أبرزها توافر الأكسجين، والعناصر الغذائية، ودرجة الحرارة، ودرجة الحموضة، فضلًا عن مساحة سطح الملوث ومدى توافره حيويًا وإمكانية وصول الكائنات الدقيقة إليه.

وتشير الدراسات إلى أن نجاح المعالجة الأحيائية للهيدروكربونات النفطية لا يعتمد فقط على وجود كائنات دقيقة تمتلك القدرة على تحليل هذه المركبات، بل يرتبط كذلك بقدرتها على الوصول إلى الملوث والاستفادة منه في الظروف البيئية الفعلية. فقد يكون الملوث موجودًا في صورة تحد من توافره للكائنات الدقيقة، مما يقلل من معدل التحلل حتى في حال وجود مجتمعات ميكروبية قادرة على استخدامه. لذلك، فإن تحسين الظروف البيئية وتوفير المتطلبات اللازمة للنشاط الميكروبي يمثلان عاملين مهمين في رفع كفاءة المعالجة (Das and Chandran, 2011).

5- المعالجة الأحيائية للتربة

تُعد التربة من المكونات البيئية التي تتعرض بصورة مستمرة لمصادر مختلفة من التلوث نتيجة الأنشطة الزراعية والصناعية، والتسربات النفطية، والتخلص غير السليم من المخلفات. وقد يؤدي استمرار هذه الأنشطة إلى تراكم مجموعة من الملوثات في التربة، مثل بقايا المبيدات والهيدروكربونات والمركبات العضوية المختلفة، الأمر الذي قد ينعكس سلبًا على خصائص التربة ووظائفها البيئية، فضلًا عن تأثيره المحتمل في الكائنات الحية الدقيقة والنباتات التي تعتمد عليها.

وفي هذا السياق، تمثل المعالجة الأحيائية للتربة أحد الاتجاهات المهمة في استعادة المواقع المتضررة، إذ تعتمد على استثمار النشاط الحيوي للكائنات الدقيقة والنباتات والفطريات في تفكيك الملوثات أو تثبيتها أو تقليل قابليتها للانتقال. وتوفر هذه التقنيات إمكانية معالجة التلوث مع المحافظة، قدر الإمكان، على الوظائف الطبيعية للتربة، إلا أن كفاءتها تعتمد على طبيعة الملوث وخصائص التربة والظروف البيئية ونوع الكائنات المستخدمة، مما يجعل تقييم الموقع قبل بدء المعالجة خطوة أساسية في اختيار النهج الأحيائي المناسب.

تستند المعالجة الأحيائية للتربة إلى الاستفادة من النشاط الطبيعي للكائنات الحية الدقيقة الموجودة فيها، إذ تمتلك بعض هذه الكائنات القدرة على استخدام المركبات الملوثة بوصفها مصادر للكربون والطاقة، أو تحويلها من خلال عمليات أيضية وإنزيمية إلى مركبات أبسط وأقل ضررًا. ويمكن تعزيز كفاءة هذه العملية من خلال تهيئة الظروف المناسبة لنشاط الكائنات الدقيقة، مثل ضبط محتوى الرطوبة، وتحسين التهوية، وتوفير العناصر الغذائية ومصادر الكربون والطاقة عند الحاجة. كما تؤدي الفطريات دورًا مهمًا في هذا المجال، ولا سيما الأنواع القادرة على إنتاج إنزيمات مؤكسدة خارج الخلية، والتي يمكنها المساهمة في تفكيك بعض المركبات العضوية المعقدة والمقاومة للتحلل.(Harms *et al*., 2011)

ومن التطبيقات المهمة للمعالجة الأحيائية للتربة معالجة المواقع الملوثة بالهيدروكربونات النفطية، إذ تمتلك بعض أنواع البكتيريا والفطريات القدرة على استخدام مكونات النفط مصدرًا للكربون والطاقة، مما يسهم في خفض تراكيزها تدريجيًا. وقد تحتاج هذه العملية إلى تهيئة الظروف المناسبة للنشاط الميكروبي من خلال إضافة العناصر الغذائية، أو تحسين التهوية، أو التحكم في مستويات الرطوبة ودرجة الحرارة. ومن التقنيات المستخدمة في هذا المجال Biopiles، التي تعتمد على تجميع التربة الملوثة في أكوام أو طبقات تتم إدارتها تحت ظروف بيئية محسوبة بهدف توفير بيئة مناسبة لنمو الكائنات الدقيقة وتعزيز قدرتها على تحليل الملوثات.

كما يمكن اللجوء إلى تقنية Landfarming في بعض المواقع، حيث تُفرش التربة الملوثة في طبقة ذات سمك مناسب، ثم تُحرث بصورة دورية بهدف تحسين التهوية وزيادة تلامس الملوثات مع الكائنات الدقيقة وتحفيز عمليات التحلل الحيوي. وتمثل كل من Biopilesو Landfarming نماذج عملية للاستفادة من النشاط الميكروبي الطبيعي في معالجة التربة الملوثة، مع إمكانية التحكم في عدد من العوامل البيئية التي تؤثر في كفاءة عملية التحلل.

6- المعالجة الأحيائية باستخدام الفطريات

تحتل الفطريات مكانة مهمة في مجال التكنولوجيا الحيوية البيئية، ويرجع ذلك بصورة أساسية إلى قدرتها على إنتاج وإفراز مجموعة واسعة من الإنزيمات خارج الخلية، مما يمنحها قدرة مميزة على التعامل مع العديد من المركبات العضوية المعقدة. كما تتميز بعض الفطريات الخيطية بقدرتها على النمو داخل المواد الصلبة واختراقها، الأمر الذي يساعدها على الوصول إلى

المركبات الموجودة في بنيتها، ثم إفراز الإنزيمات القادرة على تفكيكها أو تعديل تركيبها الكيميائي.

ومن أبرز الإنزيمات الفطرية التي حظيت باهتمام في مجال المعالجة الأحيائية Laccase و Lignin peroxidase و Manganese peroxidase. وترتبط هذه الإنزيمات بصورة خاصة بقدرة بعض الفطريات على تفكيك اللكنين، إلا أن نشاطها لا يقتصر على هذا المركب، إذ يمكن أن يمتد إلى مجموعة من المركبات العضوية الأخرى التي تتميز بتراكيب كيميائية معقدة ومقاومة للتحلل. وتمنح هذه الخاصية الفطريات والإنزيمات التي تنتجها إمكانات واسعة في مجال معالجة الملوثات، ولا سيما الأصباغ الصناعية وبعض المركبات العضوية والمبيدات والملوثات التي يصعب تحليلها بالطرائق التقليدية (Harms *et al*., 2011).

وتبرز أهمية هذا الاتجاه في إمكانية الاستفادة من الفطر نفسه أو من الإنزيمات التي ينتجها بصورة منفصلة، بحسب طبيعة التطبيق ومتطلبات المعالجة. كما أن دراسة هذه الإنزيمات وتحديد الظروف المثلى لنشاطها يمكن أن تسهم في تطوير تقانات حيوية أكثر تخصصًا لمعالجة الملوثات المعقدة، مع مراعاة العوامل التي قد تؤثر في ثبات الإنزيم وكفاءته وتكلفة إنتاجه وتطبيقه على نطاق واسع.

7- المعالجة الأحيائية باستخدام الإنزيمات

لا تقتصر التطبيقات الأحيائية في مجال معالجة الملوثات على استخدام الكائنات الحية بصورة كاملة، بل يمكن الاستفادة من الإنزيمات التي تنتجها هذه الكائنات بعد عزلها وتنقيتها واستخدامها بصورة مباشرة. وتكمن أهمية هذا النهج في إمكانية الاستفادة من النشاط التحفيزي المتخصص للإنزيم والحصول على تفاعل حيوي محدد دون الحاجة إلى المحافظة على الكائن الحي أو توفير الظروف اللازمة لنموه واستمراره.

ويمكن توظيف الإنزيمات في تفكيك عدد من المركبات العضوية أو تعديل تركيبها الكيميائي، بما يؤدي إلى إنتاج مركبات أكثر قابلية للتحلل الحيوي أو أقل سمية وخطورة على البيئة. وتبرز أهمية هذه التطبيقات بصورة خاصة عند التعامل مع المركبات المعقدة أو التي يصعب تحليلها

بالطرائق التقليدية، إذ تتميز الإنزيمات بدرجة عالية نسبيًا من الانتقائية تجاه الركائز التي تتفاعل معها.

ومن التطبيقات الحديثة التي حظيت باهتمام متزايد استخدام الإنزيمات في تحليل بعض البوليمرات والمخلفات البلاستيكية. ويأتي البولي إيثيلين تيرفثالات Polyethylene (PET) terephthalate في مقدمة المواد التي دُرست إمكانية تفكيكها حيويًا باستخدام إنزيمات متخصصة قادرة على استهداف الروابط الموجودة في بنيتها البوليمرية. وقد فتح هذا الاتجاه مجالًا واعدًا أمام تطوير تقانات حيوية يمكن أن تسهم مستقبلًا في إعادة تدوير بعض أنواع البلاستيك وتقليل تراكمها في البيئة. ومع ذلك، ما زالت هناك تحديات تحد من تطبيق هذه التقانات على نطاق واسع، من أبرزها تحسين ثبات الإنزيمات، ورفع سرعة التفاعل وكفاءته، وتقليل تكاليف إنتاج الإنزيمات واستخدامها، فضلًا عن تطوير أنظمة معالجة قابلة للتوسع والتطبيق الصناعي (Tournier *et al*., 2020).

ثانيًا: التطبيقات الأحيائية في مجال الغذاء

تمثل الكائنات الحية الدقيقة والإنزيمات أحد المكونات الأساسية في العديد من مراحل إنتاج الأغذية وتصنيعها وحفظها وتحسين خصائصها. وقد عرف الإنسان بعض هذه التطبيقات منذ آلاف السنين، ولا سيما عمليات التخمير التي استخدمت في إنتاج الخبز ومنتجات الحليب المخمرة والجبن والمخللات وغيرها، وذلك قبل أن تتوافر المعرفة العلمية بطبيعة الكائنات الدقيقة أو فهم الآليات الحيوية المسؤولة عن هذه العمليات.

ومع تطور علم الأحياء الدقيقة والكيمياء الحيوية والتقانات الحيوية، انتقلت التطبيقات الغذائية من الممارسات التقليدية القائمة على الخبرة إلى عمليات أكثر تنظيمًا وتحكمًا. وأصبح من الممكن اختيار سلالات ميكروبية محددة وفق خصائصها الوظيفية وقدرتها على إنتاج مركبات معينة، مثل الأحماض العضوية والمركبات المسؤولة عن النكهة والرائحة، والإنزيمات، إضافة إلى بعض المركبات التي تحد من نمو الكائنات الدقيقة الممرضة أو المسببة لفساد الغذاء.

وقد أسهم هذا التطور في تحسين جودة المنتجات الغذائية وزيادة استقرارها وإطالة مدة صلاحيتها، فضلًا عن إمكانية تطوير منتجات جديدة ذات خصائص غذائية أو وظيفية محسنة. كما أتاح فهم

النشاط الأيضي للكائنات الدقيقة إمكانية التحكم بدرجة أكبر في عمليات التصنيع، من خلال تحديد ظروف النمو والتخمير واختيار السلالات المناسبة لتحقيق الصفات المطلوبة في المنتج النهائي.

1- التخمير الغذائي

يُعد التخمير الغذائي من أقدم وأهم التطبيقات الأحيائية في مجال الغذاء، ويعتمد بصورة أساسية على النشاط الأيضي للكائنات الحية الدقيقة في تحويل مكونات المواد الخام إلى مركبات جديدة تسهم في تكوين الخصائص المميزة للمنتج الغذائي. وقد استُخدمت هذه العملية تاريخيًا في إنتاج مجموعة واسعة من الأغذية، إلا أن التطور العلمي الحديث أسهم في فهم الكائنات الدقيقة المشاركة في التخمير وآليات عملها، مما جعل من الممكن تطوير عمليات تخمير أكثر دقة وتحكمًا.

وتُعد الخمائر وبكتيريا حمض اللاكتيك من أهم الكائنات الدقيقة المستخدمة في تصنيع الأغذية المخمرة، إذ تؤدي دورًا أساسيًا في تحويل مكونات الغذاء وإنتاج الأحماض والمركبات الأخرى التي تسهم في خفض درجة الحموضة والحد من نمو بعض الكائنات الدقيقة غير المرغوبة. وتستخدم هذه الكائنات على نطاق واسع في إنتاج الخبز، واللبن، ومنتجات الألبان المخمرة، فضلًا عن عدد من المنتجات النباتية المخمرة.(Tamang *et al*., 2020)

ولا تقتصر فوائد التخمير على إكساب المنتجات الغذائية خصائص حسية مميزة، بل يمكن أن تسهم العملية في تحسين القيمة الغذائية للمنتج. فقد تؤدي بعض عمليات التخمير إلى زيادة توافر بعض العناصر أو المركبات الغذائية، كما يمكن أن تساعد في تقليل تركيز بعض المركبات غير المرغوبة أو الحد من تأثيرها، مما يجعل التخمير وسيلة مهمة لتحسين جودة بعض الأغذية وخصائصها الغذائية.

2- استخدام الإنزيمات في الصناعات الغذائية

أصبحت الإنزيمات من الأدوات المهمة في الصناعات الغذائية، نظرًا إلى قدرتها على تحفيز تفاعلات حيوية محددة بكفاءة وانتقائية عالية. وتستخدم مجموعة واسعة من الإنزيمات في مراحل مختلفة من تصنيع الأغذية، ومن أبرزها الأميليز Amylase والبروتيز Protease والليبيز Lipase واللاكتيز .Lactase ويمكن أن تسهم هذه الإنزيمات في تحسين كفاءة عمليات

التصنيع، وزيادة استخلاص المكونات الغذائية، فضلًا عن تعديل بعض الخصائص الفيزيائية والحسية للمنتجات.

ويستخدم إنزيم الأميليز بصورة أساسية في العمليات المرتبطة بالنشويات، إذ يسهم في تفكيكها إلى مركبات أبسط يمكن الاستفادة منها في عدد من التطبيقات الغذائية والصناعية. أما إنزيم البروتيز فيرتبط بتطبيقات تعتمد على تحليل البروتينات وتعديل خصائصها، في حين يستخدم إنزيم اللاكتيز بصورة واسعة في إنتاج الأغذية ومنتجات الألبان منخفضة اللاكتوز، من خلال تفكيك سكر اللاكتوز إلى سكريات أبسط.

وتتميز الإنزيمات بدرجة مرتفعة نسبيًا من التخصص في التفاعلات التي تحفزها، وهو ما يمنحها أهمية كبيرة في الصناعات الغذائية، إذ يمكن استخدامها لتحسين عمليات محددة وتقليل الحاجة إلى بعض المعالجات الكيميائية، مع إمكانية التحكم بصورة أفضل في طبيعة التغيرات التي تحدث في المادة الغذائية.

ومن التطبيقات الحديثة المهمة للتقانات الأحيائية في مجال الغذاء إنتاج الأغذية والمكونات ذات الخصائص الوظيفية، ومن بينها بعض المنتجات التي تحتوي على البروبيوتيك Probiotics والمركبات الحيوية الناتجة عن عمليات التخمير. وقد أدى الاهتمام المتزايد بالعلاقة بين الغذاء وصحة الإنسان إلى توسع الأبحاث المتعلقة بالأغذية الوظيفية، إلا أن الاستفادة من هذه المنتجات تتطلب تقييمًا علميًا دقيقًا لسلامتها وفعاليتها، ولا سيما عند ربطها بادعاءات صحية محددة. ولذلك ينبغي أن تستند هذه الادعاءات إلى أدلة علمية موثوقة قبل اعتمادها أو تعميمها.

3- تحسين جودة الغذاء وسلامته

يمكن لبعض الكائنات الحية الدقيقة النافعة أن تؤدي دورًا مهمًا في المحافظة على جودة الأغذية وسلامتها، من خلال الحد من نمو الكائنات الدقيقة غير المرغوبة. ويتم ذلك عبر مجموعة من الآليات، من بينها إنتاج الأحماض العضوية والمركبات ذات النشاط المضاد للميكروبات، فضلًا عن منافسة الكائنات غير المرغوبة على مصادر الغذاء ومواقع الاستقرار داخل المنتج الغذائي.

وتندرج هذه الآليات ضمن مفهوم الحفظ الحيوي Bio preservation، الذي يقوم على الاستفادة من النشاط الطبيعي لبعض الكائنات الحية الدقيقة النافعة أو المركبات التي تنتجها بهدف

إطالة مدة حفظ الغذاء والمحافظة على جودته، مع الحد من نمو الكائنات المسببة للفساد أو بعض الكائنات الدقيقة غير المرغوبة. ويُعد هذا النهج من التطبيقات المهمة للتقانات الأحيائية في الصناعات الغذائية، لما يوفره من إمكانية الاستفادة من الآليات الحيوية الطبيعية في تعزيز سلامة المنتجات.

وتحتل بكتيريا حمض اللاكتيك مكانة بارزة في هذا المجال، نظرًا إلى قدرتها على إنتاج الأحماض العضوية ومجموعة من المركبات الأخرى التي يمكن أن تسهم في الحد من نمو بعض الكائنات الدقيقة غير المرغوبة. كما أن استخدامها في عدد من المنتجات الغذائية المخمرة يجعلها من الكائنات المهمة في تطوير طرائق الحفظ الحيوي وتحسين استقرار المنتجات الغذائية.

ثالثًا: التطبيقات الأحيائية في الزراعة

تُعد الزراعة من المجالات التي توفر فيها التقانات الأحيائية غير الطبية إمكانات واسعة لتحسين الإنتاج الزراعي وتعزيز استدامته. وتزداد أهمية هذه التطبيقات في ظل الحاجة إلى توفير الغذاء لعدد متزايد من السكان، مع ضرورة المحافظة على الموارد الطبيعية وتقليل الآثار البيئية المرتبطة بالاستخدام المكثف للمدخلات الزراعية الكيميائية، ولا سيما الأسمدة والمبيدات.

وتشمل التطبيقات الأحيائية في القطاع الزراعي استخدام الكائنات الحية الدقيقة النافعة، والأسمدة الحيوية، والمبيدات الأحيائية، ومنشطات نمو النبات، إلى جانب توظيف العلاقات التكافلية بين النباتات والكائنات الدقيقة، والاستفادة من التقانات الحيوية في معالجة المخلفات الزراعية وإعادة استخدامها. وتسهم هذه التطبيقات، عند توظيفها بصورة صحيحة، في تحسين خصائص التربة وتوافر العناصر الغذائية وتعزيز نمو النبات، مع إمكانية تقليل الاعتماد على بعض المدخلات الكيميائية.

1- الأسمدة الحيوية

تُعرف الأسمدة الحيوية بأنها مستحضرات تحتوي على كائنات حية دقيقة قادرة على تحسين توافر العناصر الغذائية للنبات أو تعزيز نموه من خلال آليات مباشرة أو غير مباشرة. وتشمل أهم الكائنات المستخدمة في هذا المجال البكتيريا المثبتة للنيتروجين، والبكتيريا المذيبة للفوسفات، إلى

جانب بعض الكائنات الدقيقة المرتبطة بجذور النباتات والتي تؤدي أدوارًا مهمة في تحسين تغذية النبات ونموه.

وتؤدي البكتيريا المثبتة للنيتروجين دورًا مهمًا في تحويل النيتروجين الجوي إلى مركبات يمكن للنبات الاستفادة منها، وتظهر أهمية هذه العملية بصورة واضحة في العلاقات التكافلية بين بعض أنواع البكتيريا والنباتات البقولية. كما تستطيع بعض الكائنات الدقيقة زيادة توافر الفوسفور للنبات من خلال إذابة المركبات الفوسفاتية غير الذائبة الموجودة في التربة، وتحويلها إلى صور أكثر قابلية للامتصاص من قبل جذور النباتات.(Bhattacharyya and Jha, 2012)

ولا تقتصر أهمية الكائنات المستخدمة في الأسمدة الحيوية على تحسين توافر العناصر الغذائية، بل يمكن لبعضها أن تؤدي أدوارًا إضافية في دعم نمو النبات، مثل إنتاج مواد أو مركبات محفزة للنمو، وتحسين كفاءة امتصاص العناصر، والمساهمة في تحسين البيئة المحيطة بالجذور. ولذلك تمثل الأسمدة الحيوية أحد الاتجاهات المهمة نحو تطوير نظم زراعية أكثر كفاءة واستدامة، خاصة عندما تستخدم ضمن إدارة متكاملة للتغذية النباتية وبما يتناسب مع خصائص التربة والمحصول والظروف البيئية.

ولا تقتصر أهمية هذه الكائنات على دورها في توفير العناصر الغذائية للنبات، إذ يمكن لبعضها إنتاج مركبات ذات تأثير شبيه بالهرمونات النباتية، أو مواد تسهم في تحفيز نمو الجذور وتطويرها، فضلًا عن قدرتها على التأثير في استجابات النبات لمختلف أنواع الإجهاد البيئي. وقد أسهمت هذه الخصائص في ظهور مفهوم البكتيريا المحفزة لنمو النبات Plant (PGPB) Growth-Promoting Bacteria ، التي أصبحت من الموضوعات المهمة في مجال الزراعة الحيوية، لما تمتلكه من إمكانات يمكن توظيفها لتحسين نمو النباتات وتعزيز قدرتها على التكيف مع الظروف البيئية المختلفة.

2- المبيدات الأحيائية

تمثل المبيدات الأحيائية Bio pesticides أحد الخيارات التي يمكن استخدامها بوصفها بدائل أو مكملات للمبيدات الكيميائية التقليدية، وتعتمد بصورة أساسية على توظيف كائنات حية أو منتجاتها الحيوية في مكافحة الآفات الزراعية والحد من أضرارها. وتشمل هذه العوامل مجموعة

متنوعة من الكائنات، مثل البكتيريا والفطريات والفيروسات والنيماتودا، إضافة إلى بعض المركبات والمستخلصات ذات الأصل الحيوي.

ومن أبرز الأمثلة المعروفة في هذا المجال بكتيريا *Bacillus thuringiensis*, التي تنتج بروتينات ذات نشاط حشري يستهدف مجموعات محددة من الحشرات، ولا سيما بعض الأطوار اليرقية. كما يمكن استخدام أنواع معينة من الفطريات والفيروسات والكائنات النافعة الأخرى ضمن برامج المكافحة الحيوية المتكاملة، بحسب نوع الآفة والظروف الزراعية.

وتكمن أهمية المبيدات الأحيائية في إمكانية تحقيق درجة من التخصص في استهداف الآفات، الأمر الذي قد يسهم في تقليل بعض التأثيرات غير المرغوبة المرتبطة بالاستخدام الواسع أو غير الرشيد للمبيدات الكيميائية. ومع ذلك، فإن كفاءة هذه العوامل الحيوية قد تتأثر بصورة واضحة بالظروف البيئية، مثل درجة الحرارة والرطوبة وشدة الأشعة فوق البنفسجية، فضلًا عن خصائص الآفة المستهدفة ومرحلتها العمرية. ولذلك يتطلب استخدامها معرفة دقيقة بطبيعة الآفة والظروف السائدة في الحقل لضمان تحقيق أفضل كفاءة ممكنة.

3- البكتيريا المحفزة لنمو النبات

توجد أنواع متعددة من البكتيريا المرتبطة بمنطقة جذور النباتات، تمتلك القدرة على التأثير إيجابًا في نمو النبات من خلال مجموعة من الآليات المباشرة وغير المباشرة. ومن هذه الآليات إنتاج بعض منظمات النمو النباتية، وتحسين توافر العناصر الغذائية وامتصاصها، والمساهمة في حماية النبات من بعض الكائنات الممرضة، فضلًا عن التأثير في قدرة النبات على الاستجابة للظروف البيئية غير الملائمة.

ويُطلق على بعض هذه الكائنات اسم البكتيريا المحفزة لنمو النبات في منطقة الجذور (PGPR) Plant Growth-Promoting Rhizobacteria، وقد أصبحت من الموضوعات المهمة في مجال الزراعة المستدامة بسبب إمكاناتها في دعم نمو النبات وتحسين كفاءة استخدام الموارد. ومع ذلك، فإن نتائج استخدام هذه البكتيريا ليست متطابقة في جميع الحالات، فقد تختلف استجابة النبات تبعًا لنوع المحصول، والسلالة البكتيرية المستخدمة، وخصائص التربة، والظروف المناخية، والتفاعلات مع الكائنات الحية الأخرى الموجودة في منطقة الجذور.

4-المكافحة الأحيائية للآفات الزراعية

تمثل المكافحة الأحيائية أحد الأساليب المهمة التي يمكن استخدامها بديلًا أو مكملًا للمكافحة الكيميائية، إذ تقوم على الاستفادة من كائنات حية أو منتجاتها الحيوية في الحد من أعداد الآفات الزراعية والسيطرة عليها. ويستند هذا النهج إلى العلاقات الطبيعية بين الكائنات الحية، مثل الافتراس والتطفل والإصابة الممرضة والمنافسة، بهدف الحد من تأثير الآفة في المحصول.

ومن أشهر الأمثلة على ذلك استخدام بكتيريا *Bacillus thuringiensis*، التي تنتج بروتينات ذات تأثير حشري نوعي تجاه بعض يرقات الحشرات. كما يمكن توظيف أنواع معينة من الفطريات والفيروسات والنيماتودا في مكافحة مجموعات محددة من الآفات، وفقًا لطبيعة العامل الحيوي والآفة المستهدفة.

وتتمثل إحدى أهم مزايا المكافحة الأحيائية في إمكانية تحقيق قدر من التخصص في استهداف الآفة، مما قد يقلل من التأثيرات غير المرغوبة في الكائنات غير المستهدفة مقارنةً ببعض المبيدات الكيميائية واسعة الطيف. إلا أن نجاح هذه الطريقة يعتمد على مجموعة من العوامل، من بينها الظروف البيئية، ودورة حياة الآفة، وخصائص العامل الحيوي، وقدرته على البقاء والنشاط في البيئة المستهدفة. ولذلك ينبغي أن يتم اختيار العامل الحيوي وتطبيقه ضمن برنامج متكامل يأخذ في الاعتبار طبيعة النظام الزراعي والظروف البيئية السائدة.(Glare *et al*., 2012)

5- الفطريات التكافلية وتحسين نمو النباتات

تمثل الفطريات الجذرية التكافلية، ولا سيما الفطريات الميكوريزية Mycorrhizal fungi، أحد أبرز الأمثلة على العلاقات الأحيائية النافعة التي يمكن توظيفها في المجال الزراعي. وتنشأ هذه العلاقة بين الفطر وجذور النبات، حيث يستفيد كلا الطرفين منها؛ إذ يحصل الفطر على بعض المركبات العضوية التي ينتجها النبات، في حين تسهم الشبكة الفطرية في توسيع نطاق استكشاف التربة المحيطة بالجذور، مما قد يعزز قدرة النبات على الحصول على الماء وبعض العناصر الغذائية.

ولا تقتصر فوائد الميكوريزا على تحسين تغذية النبات، إذ يمكن لهذه العلاقة التكافلية أن تسهم في تعزيز قدرة النباتات على تحمل بعض الظروف البيئية الصعبة، مثل الجفاف والملوحة، من خلال

مجموعة من الآليات الفسيولوجية والكيميائية الحيوية. ولذلك تحظى الفطريات الميكوريزية باهتمام متزايد بوصفها أحد المكونات الواعدة في تطوير نظم زراعية أكثر قدرة على التكيف مع الضغوط البيئية وتحسين كفاءة استخدام الموارد (Smith and Read, 2008).

رابعًا: التطبيقات الأحيائية في تحقيق الزراعة المستدامة

لا تقتصر قيمة التطبيقات الأحيائية في الزراعة على مجرد استبدال مدخل كيميائي بآخر ذي أصل حيوي، وإنما تتجاوز ذلك إلى إمكانية إعادة تنظيم النظام الزراعي بصورة تزيد من اعتماده على العمليات الحيوية الطبيعية ودورات العناصر الغذائية. ويعني ذلك توظيف الكائنات الحية الدقيقة والعلاقات التكافلية والعمليات الحيوية بوصفها مكونات متكاملة ضمن منظومة الإنتاج الزراعي، بدلًا من التعامل معها كتقنيات منفصلة.

ومن هذا المنظور، يمكن دمج الأسمدة الحيوية مع إدارة متكاملة لتغذية النبات، واستخدام الكائنات المحفزة للنمو إلى جانب ممارسات تحسين خصوبة التربة، فضلًا عن دمج المكافحة الأحيائية ضمن برامج الإدارة المتكاملة للآفات. كما يمكن الاستفادة من الكائنات الدقيقة في تحويل المخلفات الزراعية إلى مواد ذات قيمة، بما يسهم في إعادة تدوير العناصر الغذائية وتقليل كمية المخلفات المتراكمة، ويعزز الانتقال نحو نظم إنتاج زراعي أكثر كفاءة في استخدام الموارد وأقل تأثيرًا في البيئة.

ومن هذا المنظور، يمكن دمج استخدام الأسمدة الحيوية مع الإدارة المتكاملة للمادة العضوية في التربة، والاستفادة من المخلفات الزراعية في إنتاج السماد العضوي، إلى جانب إدخال المكافحة الأحيائية ضمن برامج الإدارة المتكاملة للآفات. ويساعد هذا التكامل على تقليل الاعتماد على بعض المدخلات الخارجية، ورفع كفاءة استخدام الموارد المتاحة، والحد من بعض الآثار البيئية الناتجة عن الممارسات الزراعية المكثفة.

وتزداد أهمية هذا التوجه في ظل التغيرات المناخية التي تفرض على القطاع الزراعي تحديات متزايدة؛ فلم تعد زيادة الإنتاج الزراعي الهدف الوحيد، بل أصبح من الضروري أيضًا تحسين كفاءة استخدام المياه والطاقة، والحد من انبعاثات الغازات الدفيئة، والمحافظة على خصوبة التربة وصحتها على المدى البعيد. ومن هنا يمكن أن تؤدي التقانات الأحيائية دورًا مهمًا ضمن منظومة

متكاملة للزراعة المستدامة، شريطة أن تُستخدم بصورة مدروسة ومتكاملة مع الإدارة السليمة للتربة والمياه والمحاصيل، وألا يُنظر إليها بوصفها حلًا منفردًا لجميع المشكلات الزراعية.

خامسًا: التطبيقات الأحيائية في تحويل المخلفات الزراعية إلى منتجات ذات قيمة مضافة

تمثل المخلفات الزراعية مصدرًا مهمًا للكتلة الحيوية التي يمكن الاستفادة منها بدلًا من التخلص منها، وتشمل هذه المخلفات قشور الحبوب، والقش، والسيقان، والأوراق، إضافة إلى المخلفات الناتجة عن الصناعات الغذائية. وتحتوي نسبة كبيرة من هذه المواد على مكونات ليفية، ولا سيما السليلوز والهيميسليلوز واللكنين، وهي مكونات يمكن إخضاعها لعمليات حيوية أو كيميائية بهدف تحويلها إلى مواد ومنتجات ذات قيمة اقتصادية ((Abed,2025.

وقد اتجهت التطبيقات الحديثة إلى الاستفادة من هذه الكتلة الحيوية في إنتاج مجموعة متنوعة من المنتجات، مثل السكريات القابلة للتخمير، والأحماض العضوية، والإنزيمات، والمواد الحيوية، والغاز الحيوي، والأسمدة العضوية، فضلًا عن تطوير مواد قابلة للتحلل الحيوي يمكن أن تسهم في تقليل الاعتماد على بعض أنواع البلاستيك التقليدي ((Abed,2025.

وتكتسب هذه التطبيقات أهمية خاصة لأنها تجمع بين الاستفادة من المخلفات والحد من آثارها البيئية من جهة، وتقليل الاعتماد على بعض الموارد غير المتجددة من جهة أخرى. كما تنسجم مع مفهوم الاقتصاد الحيوي الدائري، الذي يقوم على إعادة إدخال الموارد الحيوية في دورة الإنتاج والاستخدام لأطول فترة ممكنة، بهدف تحقيق أعلى قيمة ممكنة من المادة الحيوية قبل التخلص منها. وبذلك تتحول المخلفات الزراعية من عبء بيئي إلى مورد يمكن استثماره في إنتاج مواد وطاقة ومنتجات ذات قيمة مضافة (Sánchez, 2009; Abed,2025).

سادسًا: التطبيقات الأحيائية في معالجة المياه

تُعد معالجة المياه ومياه الصرف من أقدم المجالات التي استُخدمت فيها العمليات الأحيائية، ولا سيما العمليات القائمة على النشاط الميكروبي. وتعتمد العديد من أنظمة المعالجة البيولوجية على مجتمعات ميكروبية متنوعة تقوم بتحويل المواد العضوية والمركبات المختلفة الموجودة في مياه

الصرف إلى نواتج أكثر استقرارًا، مما يسهم في تحسين نوعية المياه وتقليل الحمل الملوث قبل طرحها أو إعادة استخدامها.

1- الحمأة المنشطة

تُعد عملية الحمأة المنشطة Activated Sludge من أكثر التقنيات البيولوجية استخدامًا في معالجة مياه الصرف، وتعتمد على توفير ظروف مناسبة لنمو مجتمع ميكروبي قادر على استهلاك المواد العضوية الموجودة في المياه وتحويل جزء منها إلى كتلة حيوية ونواتج أخرى. وتتم العملية عادةً من خلال توفير الأكسجين اللازم للنشاط الميكروبي، ثم فصل الكتلة الحيوية عن المياه المعالجة وإعادة جزء منها إلى النظام للمحافظة على التركيز المناسب من الكائنات الدقيقة.

وتتميز هذه التقنية بقدرتها على خفض الحمل العضوي وتحسين نوعية المياه المعالجة، إلا أن كفاءتها تتطلب التحكم في مجموعة من العوامل التشغيلية، من أهمها معدل التهوية، وزمن الاحتجاز، وتركيز الكتلة الحيوية، ومعدل إعادة الحمأة. كما يمثل استهلاك الطاقة اللازمة للتهوية أحد أهم الجوانب الاقتصادية والبيئية التي ينبغي أخذها في الاعتبار عند تصميم وتشغيل أنظمة الحمأة المنشطة.(Rittmann and McCarty, 2001)

2- الإزالة الحيوية للنيتروجين

تؤدي الكائنات الحية الدقيقة دورًا أساسيًا في إزالة مركبات النيتروجين من المياه من خلال مجموعة من العمليات الحيوية، ومن أهمها النترجة Nitrification ونزع النترجة Denitrification. ففي عملية النترجة، تقوم مجموعات ميكروبية متخصصة بأكسدة مركبات الأمونيوم تدريجيًا وتحويلها إلى أشكال مؤكسدة من النيتروجين، بينما يمكن لكائنات دقيقة أخرى، في ظروف بيئية مناسبة، اختزال النترات وتحويلها إلى أشكال غازية من النيتروجين يمكن أن تغادر النظام.

وتكتسب الإزالة الحيوية للنيتروجين أهمية بيئية كبيرة، لأن ارتفاع تراكيز مركبات النيتروجين في المسطحات المائية يمكن أن يسهم في حدوث الإثراء الغذائي Eutrophication، وهي ظاهرة قد تؤدي إلى زيادة مفرطة في نمو الطحالب والنباتات المائية، وما يرافق ذلك من تغيرات في خصائص النظام المائي واضطراب توازنه البيئي.

3- الإزالة الحيوية للفوسفور

تستخدم بعض الأنظمة البيولوجية مجتمعات ميكروبية متخصصة للمساعدة في إزالة الفوسفور من مياه الصرف. وتعتمد بعض هذه الأنظمة على قدرة أنواع معينة من الكائنات الدقيقة على امتصاص الفوسفور وتخزينه داخل خلاياها، وذلك عند تعريضها لتتابع محدد من الظروف التشغيلية.

وتكتسب هذه التقنية أهمية خاصة في الحد من انتقال الفوسفور إلى الأنهار والبحيرات والمسطحات المائية، إذ يمكن أن يؤدي ارتفاع تركيزاته إلى تحفيز النمو المفرط للطحالب والنباتات المائية، وما ينتج عن ذلك من اختلال في التوازن البيئي وانخفاض جودة المياه. ومن ثم، تمثل الإزالة الحيوية للفوسفور أحد المكونات المهمة في أنظمة معالجة مياه الصرف التي تهدف إلى الحد من المغذيات قبل وصولها إلى البيئات المائية الحساسة.

سابعًا: التطبيقات الأحيائية في إدارة المخلفات وإعادة تدويرها

تمثل إدارة المخلفات أحد المجالات التي يمكن أن تحقق فيها التقانات الأحيائية فوائد بيئية واقتصادية في الوقت نفسه. فبدلًا من التعامل مع المخلفات باعتبارها مواد غير مرغوبة يجب التخلص منها، أصبح من الممكن النظر إلى جزء كبير منها بوصفه موردًا قابلًا للمعالجة والتحويل إلى مواد ومنتجات نافعة. وينطبق ذلك بصورة خاصة على المخلفات الزراعية والغذائية الغنية بالمكونات العضوية، مثل السليلوز والهيميسليلوز واللكنين، التي يمكن الاستفادة منها في إنتاج مجموعة متنوعة من المنتجات الحيوية ((Abed,2025.

ويُعد تحويل الكتلة الحيوية الزراعية إلى منتجات ذات قيمة مضافة أحد الاتجاهات المهمة في الاقتصاد الحيوي، إذ يسهم في تقليل تراكم المخلفات والحد من الآثار البيئية المرتبطة بالتخلص منها، وفي الوقت نفسه يقلل الحاجة إلى بعض المواد الخام غير المتجددة. كما يمكن أن يوفر هذا النهج فرصًا للاستفادة من الموارد المحلية وإنتاج مواد وطاقة ومنتجات حيوية ذات قيمة اقتصادية.(Sánchez, 2009)

وتُعد المخلفات العضوية المنزلية والزراعية والغذائية من المواد المناسبة بصورة خاصة للمعالجة الحيوية، نظرًا إلى احتوائها على مركبات عضوية قابلة للتحلل بواسطة الكائنات الدقيقة. ومن

أبرز التطبيقات في هذا المجال التسميد العضوي Composting والهضم اللاهوائي Anaerobic Digestion، اللذان يمثلان طريقتين مهمتين لتحويل المخلفات العضوية إلى منتجات يمكن الاستفادة منها.

1- التسميد العضوي

يُعد التسميد العضوي Composting عملية أحيائية هوائية تقوم خلالها مجتمعات متنوعة من الكائنات الحية الدقيقة بتحليل المواد العضوية بصورة تدريجية وتحويلها إلى مادة عضوية أكثر استقرارًا تعرف بالسماد العضوي Compost. وتحدث خلال هذه العملية تغيرات متتابعة في درجة الحرارة وتركيب المجتمع الميكروبي، نتيجة اختلاف المواد العضوية المتاحة والظروف السائدة في كل مرحلة.

وخلال بعض مراحل التسميد ترتفع درجة الحرارة نتيجة النشاط الميكروبي المكثف، وقد تساعد هذه الحرارة المرتفعة في الحد من أعداد بعض الكائنات الممرضة وبذور الحشائش، في حين تستمر عمليات التحلل خلال المراحل اللاحقة إلى أن تتكون مادة أكثر استقرارًا ونضجًا. ويعتمد نجاح عملية التسميد على عدد من العوامل، من بينها الرطوبة، والتهوية، ودرجة الحرارة، ونسبة الكربون إلى النيتروجين، وطبيعة المواد الداخلة في العملية.

ويسهم التسميد العضوي في تقليل كمية المخلفات التي ينتهي بها المطاف في مواقع الطمر، كما يوفر وسيلة لإعادة جزء من المادة العضوية والعناصر الغذائية إلى التربة. ويمكن أن يؤدي استخدام السماد العضوي بصورة مناسبة إلى تحسين بعض خصائص التربة ودعم خصوبتها، مما يجعل التسميد مثالًا واضحًا على توظيف العمليات الأحيائية في تحقيق الاستفادة من المخلفات وتعزيز الاستدامة الزراعية والبيئية.

2- الهضم اللاهوائي

يعتمد الهضم اللاهوائي Anaerobic Digestion على سلسلة متتابعة من العمليات الحيوية التي تنفذها مجتمعات ميكروبية متخصصة في غياب الأكسجين. وخلال هذه العملية تتحلل المواد العضوية تدريجيًا عبر مراحل مترابطة، وتنتهي العملية بتكوين الغاز الحيوي Biogas الذي

يتكون بصورة رئيسية من الميثان وثاني أكسيد الكربون، إلى جانب كميات أقل من غازات ومركبات أخرى.

وتتميز هذه التقنية بأهميتها من الناحيتين البيئية والاقتصادية؛ فمن جهة، تسهم في معالجة المخلفات العضوية وتقليل حجمها وتأثيراتها البيئية، ومن جهة أخرى تتيح استرداد جزء من محتواها من الطاقة من خلال إنتاج الغاز الحيوي، الذي يمكن استخدامه مصدرًا للطاقة. ويمكن تطبيق الهضم اللاهوائي على مجموعة واسعة من المواد العضوية، مثل مخلفات الأغذية، والمخلفات الزراعية، وروث الحيوانات، وبعض أنواع الحمأة الناتجة عن عمليات معالجة مياه الصرف (Kumar *et al*., 2010).

وتتأثر كفاءة الهضم اللاهوائي بمجموعة من العوامل التي تتحكم في نشاط المجتمع الميكروبي وتسلسل العمليات الحيوية، ومن أهمها طبيعة المادة الخام وتركيبها، ونسبة الكربون إلى النيتروجين، ودرجة الحرارة، ودرجة الحموضة، وزمن الاحتجاز، فضلًا عن تركيب المجتمع الميكروبي وتوازنه داخل وحدة الهضم. ولذلك فإن تحقيق إنتاج مستقر وفعال للغاز الحيوي يتطلب ضبط هذه العوامل بما يتناسب مع نوع المادة الخام وظروف التشغيل (Appels *et al*., 2008).

المبحث الثاني: المعالجات الحيوية والبيئية

دور الطحالب في معالجة المياه

تخضع الطحالب الى مجموعة من الظروف البيئة التي تساعدها على النمو والتكاثر متمثلة بدرجة الحرارة والتي هي من أهم العوامل الفيزيائية المؤثرة في توزيع وانتشار الأحياء في البيئة المائية. إذ تؤثر في الصفات الكيميائية والفيزيائية للماء بصورة مباشرة أو غير مباشرة من خلال تأثيرها في العمليات الحيوية الرئيسية كالبناء الضوئي و التنفس والتنظيم الأوزموزي، فضلاً عن تأثيرها في كثافة ولزوجة الماء. كما تلعب درجة الحرارة دوراً مهماً في التأثير على قابلية ذوبان الغازات في الماء حيث تكون العلاقة ما بين قابلية ذوبان الأوكسجين ودرجة الحرارة عكسية وهذا بدوره يؤثر بشكل معاكس على المتطلب الحيوي للأوكسجين إذ إن لدرجة الحرارة علاقة وثيقة بالتنفس، وتعد درجة الحرارة من العوامل المهمة ذات العلاقة بتلوث المياه ويمكن أن تؤدي التغيرات

الموسمية المفاجئة إلى اختلال واضح في توزيع الأحياء وقد تكون الملوث الرئيس للبيئة. وقد لوحظ بأن التلوث الحراري في الأنهار والذي ينتج من المصانع وغيرها من الأنشطة التي تؤدي إلى زيادة درجة حرارة الماء وبالتالي زيادة غير مرغوبة في النمو لبعض الطحالب وخفض للبعض الاخر. وتُعتبر أفضل درجة حرارة مناسبة لنمو الخلايا الطحلبية 2±25 م° ، إذ إن الزيـادة في درجة الحـرارة تعني الزيادة في الفعاليات الحياتية للأنزيمات وهذا بـدوره يؤدي إلى الزيـادة في عمليات الأيض الحياتـي ، فقد وجـد من خلال الدراسـات أن الزيـادة في درجـة الحرارة تؤدي إلى عدم الاتزان لحجم خلايا الديتومـات، كما تزداد نسبة نمو الطحالب زيـادة لورغاتميـة مع ارتفـاع درجة الحـرارة ، إذ أن ارتفاع درجة الحرارة يمكن أن يؤدي إلى زيـادة الكتلة الحية لبعض مجاميع الهائمات النباتية دوناً عن غيرها خلال فصول السنة. كما ان لدرجات الحرارة دور في عملية تحلل الطحالب وتكون أسهل في درجات الحرارة العالية, مما يؤدي إلى تحرير المغذيات النباتية إلى الوسـط المائي وبالتالـي حصول ظاهرة الإثراء الغذائي. تُقسم المسطحات المائية اعتمادا على تركيز الملوحة الموجودة فيها إلى مياه مالحة ومويلحة وعذبة، وتُعد الملوحة أحد العوامل المؤثرة في معيشة الأحياء في البيئة المائية، إذ يُمكن أن تكون من العوامل الرئيسية المسيطرة في نمو الهائمات النباتية في مناطق مصبات الأنهار. ولوحظ أن التذبـذب في تركيز الملوحة خلال عدة أيام يؤدي إلى زيادة في تنوع الهائمات النباتية . لا يقتصر تأثر الطحلب بدرجة الحرارة وشدة الإضاءة والحامضية بل تتأثر بعوامل أخرى بمقاومتها للملوحة, إذ تعد عكورة الماء عاملاً مُؤثراً بصورة مباشرة أو غير مباشرة في الأحياء، وترتبط الأحياء المجهرية بعلاقة مباشرة مع العكورة ومن الممكن أن يكون لعكورة المياه ارتباط بتواجد بعض أنواع الطحالب في البيئة المائية. وترتبط عكورة المياه بشكل مباشر مع مقدار المواد الصلبة العالقة الكلية (TSS) والذي يشمل الهائمات والأحياء المجهرية الأخرى، ويعد الأس الهيدروجيني أحد العوامل الرئيسة المؤثرة في الأحياء المجهرية لعلاقته الوطيدة بالفعاليات البيئية والحيوية للأحياء المائية التي غالباً ما تمتلك مدى معين من الأس الهيدروجيني تجري فيه عملياتها بصورة طبيعية. وتميل المياه الطبيعية بشكل عام إلى القاعدية بسبب وجود أملاح الكاربونات والبيكاربونات. وتنمو غالبية الطحالب بشكل أفضل في مياه ذات أس هيدروجيني متعـادل، بينما تفضل بعض أنـواع الطحـالب النـمو في الميـاه القاعـدية مثل طحـلب *Microcystis* sp. وهناك

بعض الأنواع تتحمل العيش في الوسط الحامضي مثل طحلب *Euglena* sp. أما المغذيات النباتية فهي من العوامل المهمة التي تحتاجها الطحالب لغرض النمو, وتمثل بالدرجة الأساس مركبات النتروجين والفسفور، بالإضافة إلى البوتاسيوم والمغنيسيوم والصوديوم، فالنتروجين من العناصر الضرورية لنمو الطحالب حيث يدخل في تصنيع الأحماض الأمينية والبروتينات ويتواجد في البيئة المائية عموماً بشكل أملاح النترات والنتريت والأمونيا ، وتؤدي الزيادة في تركيز أملاح النترات في الماء إلى حصول ظاهرة الإثراء الغذائي التي تؤثر بشكل سلبي على الأحياء المائية الأخرى. تعد الأراضي الزراعية المصدر الرئيس للنيتروجين في المياه الطبيعية بسبب استخدام الأسمدة النتروجينية، أما عنصر الفسفور فأنه يؤدي دوراً هاماً في السيطرة على الفعاليات الأيضية للخلية ،إذ يدخل في تركيب بروتوبلازم الخلية فضلاً عن أهميته في نقل الطاقة على هيئة الأدينوسين ثلاثي الفوسفات ,ATP)) كما يلعب الفسفور دوراً هاماً في عملية التنفس, إذ يزداد بزيادة تركيزه في الوسط (الحسيني ، (2017.

أهم استخدامات الطحالب في المعالجة

1- خفض تراكيز بعض العناصر الثقيلة

تدخل بعض العناصر الثقيلة مثل الرصاص و الزنك في الأنظمة البيئية وتسبب مشاكل عديدة للكائنات الحية و اعتمادا على تراكيز هذه العناصر التي يمكن اعتبارها ملوثات بيئية وكنتيجة لهذا التلوث فان العناصر الثقيلة تتراكم في الكائنات داخل السلسلة الغذائية اضافة إلى كونها سامة. وفي أحد الدراسات التي أجريت على طحلب *Scenedesmus quadricauda* الذي يتمتع بقابلية عالية على تركيز عنصر الرصاص في خلاياه بزيادة تراكيزه وبطول مدة التعريض، وللرصاص قابلية كبيرة على التراكم في سطوح وجدران الخلايا الطحلبية أكثر من بقية الأجزاء الخلوية .وفي حالة استخدام الطحالب الجافة ومعاملتها بتراكيز عالية للعناصر الثقيلة بوسط حامضي وبدرجة حرارة عالية تتم الإزالة بنسبة 85 % بعد خمس ساعات من بدء التجربة بأوزان مختلفة للطحالب الجافة. تحتاج الطحالب الى بعض العناصر الثقيلة بتراكيز مختلفة لإتمام عملية التركيب الكيميائي للمادة الحية ومن الأمثلة على هذه العناصر هو النحاس والحديد والخارصين واليود والمنغنيز والكوبلت والسيلينيوم والكروم، أما العناصر الأخرى التي لا تحتاجها فبامكانها الحصول عليها من الوسط وتجميعها في داخل أو خارج خلاياها بتراكيز تفوق

حاجتها وتفوق تراكيزها في الوسط الخارجي (الحسيني ، (2017. وهنا لا بد من الاشارة إلى إن استخدام المعالجة الحيوية لمياه الفضلات يصاحبها نمو غزير للطحالب أو النباتات المائية والذي يتطلب حصادها بين مدة زمنية وأخرى, ويمكن الاستفادة من ناتج الكتلة الحية لهذه الأحياء في أغراض متعددة اهمها :

- استخدامها كأعلاف للحيوانات اذ تتميز بعض أنواع الطحالب والنباتات باحتوائها على تراكيز عالية من البروتين والأحماض الدهنية المهمة والأساسية في تغذية الحيوانات مع الأخذ بنظر الاعتبار تراكيز الملوثات المتجمعة.

- الاستفادة منها كأسمدة زراعية

- استخدامها في إنتاج بعض المواد الكيمياوية الصناعية

2- خفض الفوسفات والنترات بمخلفات الصرف الصناعي

تعد مركبات النتروجين والفسفور من العناصر الأساسية التي تحتاجها الطحالب والنباتات المائية لغرض النمو فضلاً عن البوتاسيوم والكالسيوم والمغنيسيوم وعناصر اخرى. إذ يؤدي الفسفور دوراً مهماً في السيطرة على الفعاليات الأيضية للخلية وإنتاج الطاقة فهو مكون أساسي للأحماض النووية ،فضلاً عن أهمية الفسفور لعملية التنفس. ويكون مصدر الفسفور في مياه الفضلات والمياه الطبيعية من الأسمدة الفوسفاتية المستخدمة في الزراعة وكذلك يدخل في صناعة المنظفات المنزلية. تختلف قدرة الطحالب والنباتات المائية في سحب النتروجين والفسفور وبعض الملوثات الأخرى حسب نوع الفضلات وكذلك نوع وكثافة هذه الأحياء, فقد أشارت العديد من الدراسات الى إن قابلية الطحالب والنباتات تصل الى إزالة35-85 % من النتروجين و 85-100% من الفسفور خلال 24 ساعة. يطلق على عملية استخدام النباتات والطحالب في معالجة الملوثات تسمية التقانات النباتية Phyto Technology وتعد من التقانات السليمة بيئيا Environmental Sound Technologies أي لا تسبب أي ضرر بيئي معتمده بذلك على قدرات التنظيم الذاتي للأنظمة البيئية والطبيعية (الحسيني ، (2017.

3- معالجة مياه الصرف الصناعي من التلوث البكتيري بمستخلصات الطحالب

تنتج الطحالب الخضراء المزرقة مركبات فعالة لها مدى واسع من الفعالية الحيوية وتتضمن المضادات الحيوية ومبيدات الفطريات ومبيدات الطحالب. إن لبعض الطحالب الخضراء المزرقة القدرة على إفراز مواد ذات تأثير مثبط لنمو البكتريا، إذ تختلف المواد المنتجة من الطحالب في طبيعة فعاليتها حسب درجة الحرارة والرقم الهيدروجيني ومكونات الوسط الزرعي المستخدم ومدة الاستزراع و شدة الإضاءة وجميعها تعد من العوامل المهمة في إنتاج المواد المضادة للميكروبات، إذ ينتج طحلب*Fischerella* sp. مادة Parsigaine التي لها مدى واسع بوصفها مادة مضادة للبكتريا ومضادة للفطريات. لمستخلص طحلب *Chara* sp. مواد مثبطة للبكتريا والتي هي عبارة عن أنزيم Lipoxygenase وحامض دهني Stearic acid مع صبغات مثبطة لنمو البكتريا مثل صبغة الكاروتين و ليكوبين و زيازانثين، مع كميات قليلة من الأحماض الأمينية والببتيدات، كما ويمتلك طحلب *Oscillatoria* sp. مركبات فعالة من خلال مستخلصه العضوي ذات تأثير ضد الفطر *Candida albicans*. تعد الطحالب من الكائنات المجهرية ذات الكفاءة العالية في إنتاج مجموعة من المضادات الحيوية ذات التأثير المباشر على إزالة الكثير من البكتريا المرضية مثل*Pseudomonas* sp. المقاومة للمضادات الحيوية ،إذ تنتج الطحالب نوعين من المركبات الفعالة الموجودة داخل خلاياها والتي تدعى بالـ intracellular Products أو خارج خلاياها وتسمى Extracellular Products ، وتكون مستخلصات الطحالب ذات طبيعة مختلفة بحسب اختلاف تركيبها الكيمائي من أحماض أمينية ودهنية، إذ ينتج طحلب *Prototheca* sp. حامض Lactic acid مع كميات قليلة من حامض Succinic acid و طحلب *Chlorella* له القدرة على إنتاج حامض Lactic acid و Acetic acid، وتنتج الطحالب *Chlorella* sp. و *Anabaena* sp. كميات من الأحماض الأمينية Amino acids والببتيدات Peptides ، ويعد مركب الكلورلين Chlorellin المنتج من طحلب *Chlorella* أول تسجيل للمواد المضادة للبكتريا من الطحالب الذي يتكون من عدد من الأحماض الدهنية غير المشبعة والمكون من 77.35 % كاربون و 11.6% هيدروجين و 10.99 % أوكسجين (الحسيني ، 2017).

4- استخدام الطحالب كأدلة إحيائية لتلوث المياه

أصبح التلوث البيئي في الوقت الحاضر مشكلة عالمية وله تأثيرات واضحة فهو يدخل بالخصائص النوعية للبيئة وهو مسؤول عن تلوث الأنهار والبحار والغلاف الجوي . فقد ازدادت الدراسات حول التلوث بسبب ما تحدثه من تغييرات محسوسة في البيئة . إذ تؤثر التغييرات الحاصلة في نوعية المياه على نوعية وكمية الطحالب والهائمات الحيوانية التي تعيش فيه . ويمكن لهذا التأثير أن يُستغل لتكوين دلائل إحيائية لنوعية المياه. ومن تلك التغييرات هو التغير في تراكيز الأوكسجين الذائب أو العناصر المغذية التي تجعل المياه سامة لبعض الأنواع من الأحياء . ويحصل هذا التغير نتيجة لكمية الملوثات الصلبة والسائلة الموجودة في المياه, إذ تتأثر الطحالب المتواجدة في مياه الفضلات بشكل كبير كماً ونوعاً مقارنة بالأنواع المتواجدة في بيئة نظيفة مما يساعد على الاستدلال عن وجود التلوث من خلال نوعية الطحالب القاعية المتواجدة في النهر. كذلك تؤثر عملية طرح الفضلات العضوية في البيئة المائية في نوعية المياه ومن ثم الأحياء المتواجدة وهذا التأثير يغير من نوعية وكمية الأحياء معتمدة على مدى تحمل الأنواع للتغييرات الحاصلة في تلك البيئة ، فنوعية البيئة المائية تُحدد من خلال تواجد بعض الأحياء فيها أو اختفاء أحياءُ أخرى . حيث وُجد أن التغير الكيميائي للوسط المائي يغير في نوعية الأحياء المتواجدة فيه, كذلك يوضح دليل التنوع Diversity Index على البيئة المائية تنوع الأنواع وسيادتها فمحصلة التلوث البيئي يسبب اختزال في الأنواع الى حدود معينة تعتمد على درجة التلوث فاذا كانت الأنواع قليلة يدل على وجود التلوث في المنطقة المدروسة (الحسيني، 2017).

الجدول ((1 يوضح أهم أنواع الطحالب المستخدمة كأدلة إحيائية في تواجدها.

جدول (1) أهم أنواع الطحالب كدليل حيوي لتلوث المياه

انواع الطحالب	أصناف الطحالب	الدليل الحيوي
Stigeoclonium tenue	الخضراء المزرقة	التلوث بالمواد العضوية
Diatoma vulgare	العصوية	الوسط قليل التلوث
Cyclotella meneghinana	العصوية	الوسط ملوث بفضلات المجاري

Nitzschia kuetzingiana	العصوية	زيادة المركبات العضوية النتروجينية في الوسط المائي
Nitzschia palea	العصوية	
Nitzschia thermalis	العصوية	
Aulacosiera granulata	العصوية	المياه قاعدية وغنية بالمواد العضوية
Bacillaria paxilifer	العصوية	تلوث عضوي قليل
Synedra ulna	العصوية	واسعة التحمل للتلوث العضوي
Cymbella affinis	العصوية	المياه ذات تهوية جيدة وغنية بالمغذيات وقاعدية
Navicula crytocephala	العصوية	الملوحة العالية وقاعدية المياه
Oscillatoria chalybea	الخضراء المزرقة	مياه غنية وذات تلوث عضوي شديد
Oscillatoria minima	الخضراء المزرقة	تلوث عضوي قليل

5- استخدام الطحالب كمصادر للطاقة البديلة

تعتبر الطحالب مصدراً جديداً للطاقة الحيوية وتقلل من الضغوط على استخدام الطاقة ، وكذلك بدائلها من المصادر الحيوية مثل الكحول الأثيلي الحيوي Bioethanol وإمكانية اضطراب أسواقه وأسواق المواد الأولية له عند تحوله الى مصدر من مصادر الطاقة، وكذلك إنتاج الغاز الحيوي وإمكانية مشاركة عمليات إنتاجية كمصادر متجددة للطاقة في زيادة ظاهرة الاحتباس الحراري. فإنتاج الطاقة أو الوقود الحيوي من الطحالب يمكن أن يؤدي أكثر من غرض منها إنتاج الطاقة وحماية البيئة. ومن المصادر الواعدة هو أحد أنواع الطحالب الخضراء وحيدة الخلية والتي تعيش في المياه العذبة والمالحة في مختلف أنحاء العالم, إذ توجد في ترسبات سواحل الشواطئ في العراق في المنطقة الجنوبية الغربية وتمتاز بوجود مواد اليفاتية ويمكن أن يصل تركيزه في بعض السلالات إلى 30 % من الوزن الجاف, كما وتقوم بتثبيت غاز ثاني أوكسيد الكاربونCo_2 باستخدام الطاقة الشمسية, لذا يعد من العوامل المهمة في تقليل الغاز الذي يعد السبب الأول في ظاهرة الاحتباس الحراري. يستخدم الطحلب غاز ثاني اوكسيد الكاربون Co_2 في إنتاج الهيدروكربونات أو ما يسمى بالنفط الطحلبي الذي تصل نسبة الهيدروكربونات إلى 75 % من الوزن الجاف للكتلة الحية من الطحلب (الحسيني ، (2017.

6- الاستخدامات الأخرى

أ- كمخصبات

استُخدمت بعض أنواع الطحالب الخضراء المزرقة كمخصبات حيوية Biofertilzers خاصة في الأراضي التي تُزرع بمحصول الرز الذي يكون مُجهداً ومستنزفاً للتربة .

ب- كمستحضرات التجميل

استُخدمت بعض أنواع الطحالب في مستحضرات التجميل والعناية بالبشرة وأهمها طحلب *Chlorella* sp. و *Arthrospira* sp. وذلك لاحتوائها على البروتين بكمية عالية الوزن (الحسيني ، 2017).

ميكانيكية إزالة الملوحة باستخدام الطحالب

لاحظ الباحث Lobban (1994) دخول الأيونات عبر الأغشية الحية بوساطة الأنزيمات الحاملة لها, وتعتبر نظرية الأغشية البايولوجية من أحدث النظريات بإزالة الملوحة والتي أساس عملها صفيحات او وريقات ثنائية Bimolecular leaflets قوامها الدهون المفسفرة ذات الأسطح النشيطة ذات الطاقة العالية, إذ تثبتت المادة البروتينية خلال روابط ذات خاصية استقطابية تربطها جزيئات دهنية وتشكل الأنزيمات القسم الأكبر من المادة البروتينية المنثورة على الأغشية الخارجية. كما تعمل المركبات الدهنية وحدات بنائية وكمواد ذات ادوار محددة في تفاعلات أيض البلاستيدات الخضراء, وفيها تنظم جزيئات الأصباغ مع الجزيئات البروتينية والكربوهيدرات ، وتتميز أسطح الطحالب الخارجية بالسماح لتبادل الشحنات, وعلى هذا الاساس تجري عملية حمل الأيونات غير العضوية عبر الأغشية البروتوبلازمية وتوصيل السيالات العصبية عبر الأغشية الدهنية في التركيبات العصبية وهنا تنتقل المواد خلال الاغشية الخلوية يشتمل على عاملين :

أ- النقل السالب: وفيه يعمل الغشاء كحاجز ويتم العبور بوساطة الانتشار بمعدلات منخفضة.

ب- النقل الموجب: وفيه تدفع حركة الجسيمات المشحونة بوساطة عملية تستهلك الطاقة وتتم في الغشاء نفسه ، إذ تقوم الأنزيمات النوعية على السطح الغشائي بدور العامل المساعد على اختراق حاجز النفاذية ، وتتضمن العملية استخدام الفوسفات ذات الطاقة العالية.

تستطيع الطحالب تحمل التراكيز العالية للملوحة والتي تبدء من 10-100 ppt ، ومهما يكن فان تناقص الملوحة أو انقاصها إذ يتم توافق تناضحي يكون غير صناعي بل ضمن خلايا الغشاء أو الأغشية الأصلية والأنزيمات. كذلك تستطيع طحالب المياه العذبة والنباتات المائية واللافقريات المجهرية تحمل الملوحة حتى 3000 ملغم / لتر من خلال خفض وامتصاص الأيونات مثل أيونات البوتاسيوم والصوديوم والكلور (K^+ ، Na^+ ،(Cl^- Lobban , 1994)). تضم المياه الداخلية في العراق مسطحات مائية واسعة تقع ضمن مواصفات المياه العذبة والتي لا تزيد فيها الملوحة عن أكثر من 0.5 جزء بالألف إلا إن الملوحة بالآونة الأخيرة ارتفعت في بعض المناطق مثل مياه شط العرب. كما لوحظ في دراسة الحسيني وجماعته ((2013 إن نمو طحلب *Chlorella vulgares* بتراكيز مختلفة للملوحة بينت مزرعة الطحلب نمو كثيف بتركيز 8 ppt من الملوحة بلغت قمة نموها لليوم السابع الى 10^4× 72.8 / مليلتر وبلغ معدل نمو المزرعة حتى نهاية التجربة الى 10^4 ×56.139/ مليلتر ، كما أستطاع الطحلب بخفض تركيز 8 ppt الى 1.78 pptبنهاية التجربة محققة نسبة إزالة مقدارها 77.75% ، إذ يتم استهلاك الطحالب للملوحة في بناء الأغشية والبروتينات و الأحماض الأمينية للطحلب. للطحالب الخضراء القدرة على تغيير نسبة تركيز الملوحة من 1-5 ppt الى 0.4 ppt لاستهلاكها في بناء الأغشية والبروتينات و الأحماض الأمينية وكذلك بناء الجدار الخارجي للطحلب.

إن الطحالب هي كائنات ذاتية التغذية تحصل على غذائها من عملية البناء الضوئي كما تفعل ذلك النباتات الأخرى وتقوم بتحسين الحالة الصحية للمياه من خلال إغناءها بالأوكسجين الذائب, إضافة إلى كونها غذاء أساسي للعديد من الأحياء المائية ومنها الأسماك. أما بالنسبة للتركيز 32 ppt فلوحظ نمو الطحلب فيه ضعيف, لكن استطاع تحمل الملوحة العالية مع تثخن بجدار الخلية وزيادة حجم الخلية, يعود ذلك إلى امتلاك طحلب *Chlorella vulgaris* على أنزيم Glutaminase واقع بجدار الخلية يفقد عمله بوسط ذات تركيز ملحي قريب لمياه البحر, مما يؤدي ذلك الى تثخن الجدار الخارجي للخلية, وبصورة عامة الأنزيمات شديدة الحساسية للظروف البيئية من درجة حرارة والملوحة والأس الهيدروجيني والمثبطات, كما ويحتوي جدار الطحالب عموماً على السليلوز وبناء تركيبي لتزويد الجدار بالغذاء والدعامة وعلى أيونات الصوديوم والبوتاسيوم والمغنسيوم والكالسيوم (Ca^{+2} ,Mg^{+2}, K^+, Na^+) وعلى الألجين وسكريات

متعددة والكبريتات, كذلك يتم تصنيع السليلوز بنسبة 1-10% والملوحة العالية تؤثر على عمل السكريات والسليلوز الموجود في جدار الخلية الطحلبية ((Tamure, 1996 . وبتركيز 16 ppt كان نمو العدد الحيوي طبيعياً بالدراسة الحالية دون تأثير بجدار الخلية مع معدل امتصاصية الطحلب طبيعي وتركيز الأوكسجين أيضا طبيعي, كما إن لطحلب *Navicula busiedtii* الامكانية في خفض الملوحة ذات تركيز 16 ppt بمقدار 66 % حتى نهاية التجربة أي تم خفضه الى 5.4 ppt من خلال زيادة الامتصاصية للطحلب التي بلغت 0.484 نانوميتر, مع إغنائها بكمية من الأوكسجين بلغت 5.736ملغم /لتر بنهاية التجربة ، وتتحمل الدايتومات لتراكيز أعلى من 125 ppt و ,150 ppt في حين تستطيع أن تحقق نسبة إزالة بلغت أكثر من 70% لتركيز 50 ppt مثل طحلب *Denticula* sp., *Nitzschia frustulum, N. monoensis, N. communis,* and *Stephanodiscus oregonicus* , *Achnanthes minutissima, Cymbella minuta, N. dissipata* . كما وبينت دراسة (Pilkaitytë, 2004) إن للدايتومات القدرة على العيش في نظام بيئي ذات محتوى ملحي أكثر من 10 ppt لما تحتاجه في بناء الهيكل الخارجي للطحلب مع خفض نسبة التراكيز الى أقل من ,0.6 ppt لم يتأثر جدار خلية طحلب *Navicula* للدراسة الحالية إذ ازداد معدل نمو الخلايا بتركيز 16 ppt الى 10^4×138.408 / مليلتر وبدون تأثير للجدار , ولكن في تركيز 32 ppt لُوحظ ضُعف النمو, إذ بلغ معدل النمو الى 10^4 ×47.355 / مليلتر وبدون تأثير سلبي للجدار لم تُؤثر الملوحة العالية على نمو الطحلب بسبب مقاومته على التكيف بما ساعد ذلك على النمو, من خلال احتواء جدار الطحالب الدايتومية على مادة السليكا المشبعة بالماء, ولا يمكن أن يحل معدن آخر محل السليكون, ولذلك يتوقف نمو الدايتومات بدرجة كبيرة على تركيز السليكون مع الملوحة في البيئة, وعند استبدال السليكون بمعدن آخر فان درجة نمو الدايتومات تتناسب مع درجة تركيز السليكون. وتصل نسبة السليكون والأملاح الى حوالي 50% من الوزن الجاف للخلايا ذات المحتوى العالي من السليكون , ويحتوي جدار خلية الدايتوم المشبع بالسليكا على مركبات عضوية خاصة تسمى مواد بكتينية Pectins . تتم عملية التشبع بالسليكا تحت السيطرة التامة للسيتوبلازم وعملية تراكم السليكا والأملاح تتطلب طاقة. وتكون الطحالب الدايوتومية أكثر الطحالب امتصاصاً للأملاح بسبب المساحة السطحية للثقوب الموجودة في جدار

خلاياها والتي تتراوح بين % 10-30 من المساحة الكلية للصمام والتي من خلالها تستقطب الأملاح (الحسيني ، (2017.

الامتزاز الحيوي

وهي ظاهرة تجمع مادة بشكل أيونات ,ذرات أو جزيئات على سطح مادة أخرى. يسمى السطح الذي يحدث عليه عملية الامتزاز بالسطح الماز Adsorbent والمادة التي يتم امتزازها بالمادة الممتزة Adsorbate, وهي وسيلة لمعادلة أو اشباع قوى الجذب الموجودة على سطح معين صلب أو سائل, وهذه القوى هي امتداد للقوى الموجودة داخل المادة المازة. حدد بعض الباحثين المواد البايولوجية المستخدمة للامتزاز بالمواد غير الحية فقط أي الكتلة الحياتية الميتة un active biomass باعتبار إن استخدام الكتلة الحياتية الحية Active biomass يُشير إلى التجميع الحياتي ,Bioaccumulation أما القسم الآخر من الباحثين فقد استخدموا مصطلح الامتزاز الحياتي Biosorption للتعبير عن الازالة الحياتية بوساطة الكتلة الحياتية الحية والميتة. إن عملية الامتزاز الحياتي هي عملية ذات مرحلتين وطورين ,المرحلة الأولى سريعة يحدث فيها إزالة أكثر من نصف التركيز الكلي الممتز من قبل المازات الحياتية المستعملة, تتبعها مرحلة بطيئة يُزال بها القسم الآخر من أيونات العنصر. أما الطورين فهما الطور الصلب وهو الماز الحياتي (المادة البايولوجية) ,والطور السائل أو المذيب وهو الماء ويحتوي على أيونات العناصر الثقيلة, وخلال هاتين المرحلتين وبين هذين الطورين يحدث تفاعل بين المجاميع الوظيفية الفعالة الموجودة على جدران المازات الحياتية وأيونات العناصر الثقيلة (Voleskey, 2004).

الامتزاز الحيوي للطحالب

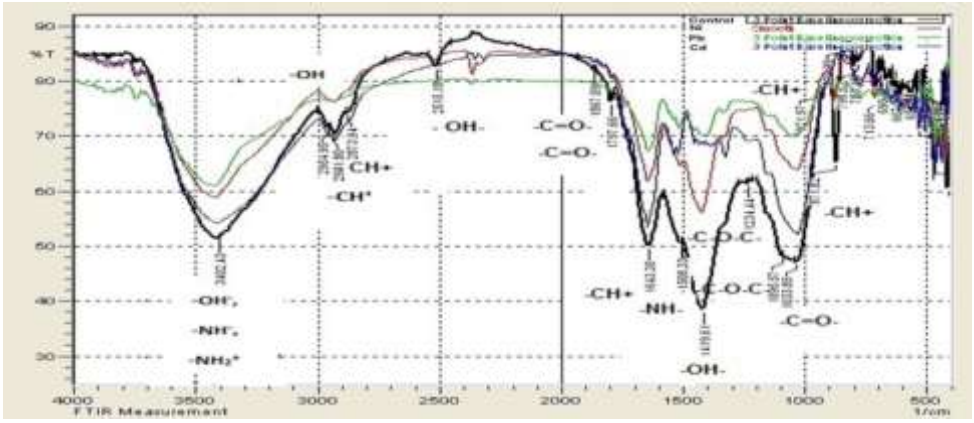
ازدادت الضغوطات في السنوات القليلة الماضية على هيئات ومنظمات حماية البيئة لدفع الباحثين باتجاه تطوير طرق جديدة للتخلص من الملوثات. مما أدى إلى ازدياد الاهتمام لاستخدام أحياء مجهرية للتخلص من العناصر الثقيلة بتقنيات اقتصادية واعدة وقليلة الضرر للبيئة . ومن أكثر المواد المازة التي لها مستقبل واعد في تجارب الامتزاز الحيوي هي الكتلة الطحلبية المجففة Aired Algal Biomass, لامتلاكها قابلية عالية لربط العناصر الثقيلة بها لوجود البروتينات

والسكريات المتعددة الحاوية على مجاميع فعالة مثل الكاربوكسيل والأمينات و السلفات والهيدروكسيل الموجودة في الجدار الخلوي للطحالب. أثبتت الكتلة الطحلبية المجففة كفاءة عالية وسريعة في ازالة العناصر الثقيلة من المحاليل المائية أكثر من بقية الأحياء المجهرية مثل البكتريا والفطريات والخمائر, لأنها لا تتأثر بسموم العناصر الثقيلة ولا تحتاج الى أوساط زرعية لإدامتها , ومن الممكن استخدامها عدة مرات للمعالجة, حيث يتم خزنها لفترات طويلة في درجة حرارة الغرفة وبدون تنقية متوفرة في المسطحات المائية وتمتلك مساحة سطحية كبيرة مما تجعلها مرشحات مثالية للمعالجة (Yun, 2001).

تُصنف الطحالب الى ثلاثة مجاميع, الطحالب البنية و الطحالب الخضراء والطحالب الحمراء وقد أثبتت الدراسات بان الطحالب البنية تمتلك أعلى قابلية لامتزاز العناصر الثقيلة من الطحالب الحمراء والخضراء ,((Methta,2005 كما استُخدم خليط من الطحالب البحرية المجففة لتنقية مياه الصرف الصناعي من المعادن الثقيلة, واستُخدمت تلك الكتلة الطحلبية لمرات عديدة وبنفس كفاءة الامتزاز تصل الى عشرين مرة, فضلا عن إمكانية انتزاع المعادن الثقيلة منها واستخلاصها لإعادة تدويرها في العملية الانتاجية تم اختبار سبعة أنواع من الطحالب البنية, والخضراء والحمراء لفصل أيونات الكادميوم من المحاليل السائلة وتحديد سعة امتزاز العناصر الثقيلة ونسبة الازالة المئوية من قبل الكتلة الطحلبية المجففة والمطحونة ومنها الأنواع التالية :

Ecklonia maxima و*Macrocystis angustifolia* و*Laminaria pallida*

شَخصت دراسة (ذجر، 2014) المجاميع الفعالة في الجدران الخلوية لطحلب *Chara* sp. بوساطة تقنية FTIR ، والمسؤولة عن الامتزاز الحيوي لعناصر الرصاص والنيكل والكادميوم (Ni Cd, (Pb., وكانت مجاميع الكاربوكسيل, الكحول ، الهيدروكسيل ، الألكيل ، الأمايد والأمين هي المسؤولة عن الامتزاز الحيوي للعناصر الثقيلة الرصاص والكادميوم والنيكل، إذ تبين وجود مجاميع فعالة مختلفة الأطوال الموجية والشحنات من خلال العلاقة بين معامل النقل (%) والأطوال الموجية ، ولوحظت الخارطة الحيوية للمجاميع الفعالة المتكونة من الكاربوكسيل والأمايد والألكين والذي تم الارتباط مع العناصر الثقيلة الرصاص والكادميوم والنيكل بهيئة الامتزاز الحيوي(الحسيني ، ,(2017 والشكل (1) يوضح ذلك .

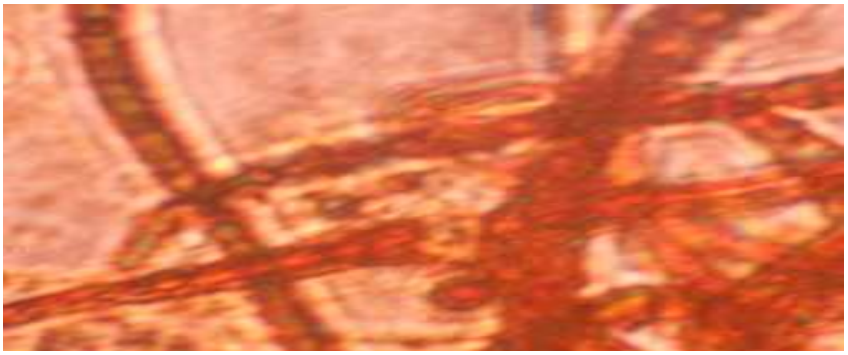


شكل (1) يوضح خارطة المركبات الفعالة في طحلب *Chara* sp. الجاف وامتزازها لعنصر الرصاص والنيكل والكادميوم

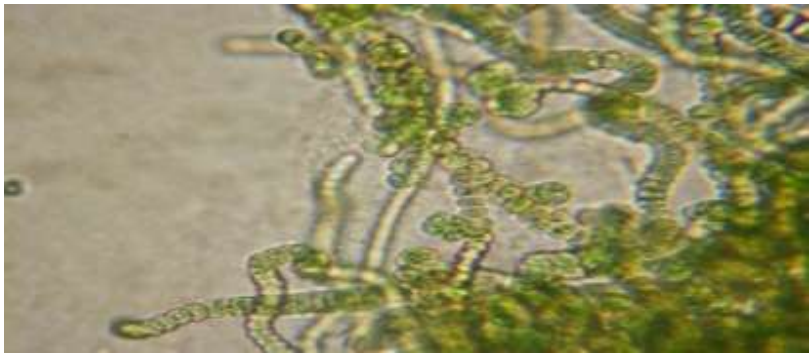
إزالة الطحالب العالية النمو البعيدة عن مصادر المياه

تتضمن أغلب التقنيات الشائعة للسيطرة على نمو الطحالب في مصادر المياه المختلفة إضافة مبيدات الطحالب أو إضافة مواد كيميائية مثل برمنكنات البوتاسيوم و كبريتات النحاس و بيروكسيد النحاس. استخدمت برمنكنات البوتاسيوم على مر السنين في معالجة مياه الصرف الصحي لأنها مادة مؤكسدة قوية لها القدرة على تحطيم المواد العضوية الطبيعية والمصنعة, كذلك استخدمت في أكسدة الحديد و المنغنيز و مركبات الكبريت والمواد المسببة في تغيير طعم ورائحة المياه الناتجة من إفرازات الطحالب التي تنمو على سطح المياه عند توفر الظروف الملائمة. وتُستخدم مواد مُزيلة للطحالب بسبب ظاهرة الإثراء الغذائي لسطوح المياه مشكلة عالمية حيث يحصل الإثراء الغذائي في البحيرات والخزانات نتيجة إضافة كميات غير اعتيادية من المغذيات النباتية مثل النيتروجين والفسفور, مما يسرع في حدوث هذه الظاهرة في البحيرات والخزانات وفي معظم مناطق العالم, هي المياه المصرفة من الزراعة والمياه الصناعية غير المعالجة والمتدفقات المنزلية التي تؤدي إلى تغيير في خواص الماء ((Ohio,2011. وعليه إن تردي نوعية المياه نتيجة للأثراء الغذائي يؤدي بالنتيجة إلى مشاكل في صحة الأنسان كما ويؤدي إلى ازدهار الهائمات النباتية إلى تسبب تردي نوعية المياه بطرق مختلفة مثل تقليل نفاذية الضوء خلال عمود الماء و تغيير طعم ورائحة الماء و خفض تركيز الأوكسجين الذائب و تغيير في مكونات مجتمع الأسماك و تقليل تواجد النباتات المائية الغاطسة, إضافة إلى تأثيراتها في صحة الإنسان و ضرر الحيوانات بسبب أنتاج المركبات السامة (قاسم ,(2007. تعد برمنكنات

البوتاسيوم عامل مؤكسد يستخدم كمادة معقمة للسطوح الخارجية للأسماك وبتركيز 2 ملغم/ لتر وذلك لفعاليته في القضاء على الإصابات الطفيلية و الفطرية والبكتيرية، وكما تُستخدم مادة برمنكنات البوتاسيوم لإزالة الرائحة والطعم واللون والبكتريا الضارة والتخلص من المعادن الثقيلة كالحديد والمنغنيز وتُستخدم خصيصا للسيطرة على المركبات الهالوجينية العضوية المعقدة والزيادات في نسب مشتقات الكلور المستخدمة لتطهير المياه بواسطة استخدامها كعامل مؤكسد ومختزل, وفي نفس الوقت تُستخدم كمزيل للرائحة والطعم واللون والطحالب والميكروبات الضارة وبديلاً عن الكلور. أستخدم العديد من الباحثين مواد تؤدي إلى موت أو خفض معدلات النمو للطحالب, إلا أنها ذات ضرر بيئي كبير مثل استخدام مادة كبريتات النحاس والتي تؤدي إلى تمزق الجدار الخارجي للطحالب مع خروج المواد السامة للوسط البيئي بدون التأثير عليها وهذا خطر جداً من خلال الطحالب التي تحمل جينات لإفراز تلك السموم ومنها شعبة الطحالب الخضراء المزرقة ، الا أن استخدام مادة برمنكنات البوتاسيوم وأوكسيد الكلورين و الأوزون والتي هي من المواد المعقمة لكثير من الجراثيم ولكن يتم الحذر منها في استخدام التراكيز المناسبة في حالة المعالجة ضمن مياه أقرب إلى الاستهلاك البشري, إضافة إلى فحص العدد الحيوي للطحالب في نهاية كل يوم, حيث تم زراعة كتلة الطحالب المترسبة على أطباق الأكار وتم حضنها بالحاضنة ذات الظروف البيئية المناسبة للنمو لمدة تراوحت من 14-20 يوم لضمان نمو الخلايا الطحلبية التي لم تتأثر بمادة برمنكنات البوتاسيوم أو السبورات الطحلبية من جراء تأثير مادة برمنكنات البوتاسيوم والمخلوطة بمادة الشب الذي له الدور الكبير في عملية الترسيب. وبينت دراسة الحسيني (2014) و الحسيني (2017 (من خلال استخدام مادة برمنكنات البوتاسيوم لإزالة الطحالب, فأنها لم تؤثر على تمزق الجدار الخارجي للطحالب المعالجة بالمادة وهذا ضمان لعدم خروج السموم الطحلبية الى البيئة الخارجية من الطحالب المنتجة للسموم. الأشكال (2 أ و ب) يبين ذلك .



شكل (– 2 أ) الطحالب غير المعاملة بمادة برمنكنات البوتاسيوم



)شكل 2- ب) الطحالب المعاملة بمادة برمنكنات البوتاسيوم وبدون تمزق جدران الطحالب الخارجية

المبحث الثالث: حدود التطبيقات الأحيائية والبيئية غير الطبية والتحديات المستقبلية

على الرغم من التطور الكبير الذي شهدته التطبيقات الأحيائية خلال العقود الأخيرة، فإن الانتقال من النتائج الواعدة التي تظهر في المختبر إلى التطبيقات الواسعة في البيئة أو الزراعة أو الصناعة لا يزال يواجه مجموعة من القيود والتحديات. فالنجاح الذي يتحقق في ظروف مختبرية مضبوطة لا يضمن بالضرورة الحصول على النتائج نفسها عند تطبيق التقنية في بيئة طبيعية تتسم بالتعقيد والتغير المستمر في درجات الحرارة والرطوبة ودرجة الحموضة وتوافر العناصر الغذائية والتفاعلات بين الكائنات الحية.

ومن هنا، فإن التطبيقات الأحيائية غير الطبية، على الرغم من إمكاناتها الكبيرة، تحتاج إلى تقييم علمي نقدي يوازن بين مزاياها والقيود التي قد تحد من استخدامها. فقد يثبت أحد الكائنات الدقيقة أو الإنزيمات كفاءة عالية في ظروف تجريبية محددة، لكنه قد يفقد جزءًا من هذه الكفاءة عند استخدامه في الحقل أو في الأنظمة الصناعية بسبب تغير الظروف البيئية أو صعوبة التحكم بها.

كما قد تكون بعض التقنيات فعالة من الناحية العلمية، لكنها تواجه صعوبات اقتصادية أو تشغيلية تحول دون تطبيقها على نطاق واسع.

وبناءً على ذلك، ينبغي ألا يقتصر تقييم أي تقنية أحيائية على السؤال عما إذا كانت قادرة على أداء الوظيفة المطلوبة، بل يجب أن يتوسع ليشمل مجموعة من الأسئلة المرتبطة بكفاءتها واستقرارها وتكلفتها وسلامتها وإمكانية توسيع نطاق استخدامها. كما ينبغي تقييم الآثار الجانبية المحتملة، وطبيعة النواتج الثانوية التي قد تتكون أثناء العملية، ومدى إمكانية مراقبة التقنية والتحكم فيها خلال مراحل التطبيق المختلفة.

أولًا: الحدود البيولوجية

تتمثل إحدى أبرز التحديات التي تواجه التطبيقات الأحيائية في الاختلاف بين سلوك الكائنات الحية في الظروف المختبرية وسلوكها في البيئة الطبيعية. ففي المختبر يمكن التحكم بدرجة الحرارة والرطوبة ودرجة الحموضة وتوافر المغذيات والأكسجين وغيرها من العوامل بدرجة عالية من الدقة، بينما تتصف البيئات الطبيعية بدرجة أكبر من التعقيد والتباين وعدم التجانس.

وقد يمتلك أحد الكائنات الدقيقة قدرة مرتفعة على تحليل ملوث معين في وسط غذائي محدد، إلا أن هذه القدرة قد لا تظهر بالمستوى نفسه عند وجود الكائن في التربة أو المياه الطبيعية، نتيجة المنافسة مع الكائنات الدقيقة الأخرى، أو ارتباط الملوث بمكونات الوسط، أو انخفاض توافره الحيوي. كما قد تتغير أعداد ونشاط الكائنات الدقيقة تبعًا للظروف البيئية وتوافر مصادر الغذاء والملوثات.

ومن المهم أيضًا النظر إلى المجتمع الميكروبي الطبيعي باعتباره نظامًا ديناميكيًا وليس مجموعة ثابتة من الكائنات. فقد تتغير تركيبته ووظائفه بصورة مستمرة استجابة للتغيرات في الظروف المحيطة. ولهذا قد لا يكون استخدام سلالة ميكروبية منفردة هو الخيار الأفضل في جميع الحالات، إذ يمكن للمجتمعات الميكروبية المختلطة أن تمتلك أحيانًا قدرة أكبر على تنفيذ عمليات التحلل المعقدة نتيجة تكامل الوظائف الأيضية بين أنواع متعددة من الكائنات.

ثانيًا: محدودية التوافر الحيوي للملوثات

يُعد التوافر الحيوي للملوث من العوامل الأساسية التي تتحكم في نجاح المعالجة الأحيائية، إذ إن وجود الملوث في البيئة لا يعني بالضرورة أن الكائنات الحية الدقيقة قادرة على الوصول إليه والاستفادة منه. فقد يرتبط الملوث بجزيئات التربة أو المادة العضوية أو الرواسب، مما يقلل من قابليته للوصول إلى الخلايا الميكروبية وبالتالي يحد من معدل تحلله.

وبذلك قد يظهر الملوث بتركيز مرتفع عند إجراء التحليل الكيميائي الكلي، في حين تكون الكمية المتاحة فعليًا للتحلل الحيوي أقل بكثير. وتبرز هذه المشكلة بصورة خاصة في المواقع القديمة الملوثة، حيث يمكن لبعض المركبات أن تصبح أكثر ارتباطًا بالمادة العضوية أو مكونات التربة بمرور الوقت، مما يجعلها أقل توافرًا للكائنات الدقيقة.

وعليه، فإن زيادة النشاط الميكروبي وحدها قد لا تكون كافية لتحقيق إزالة فعالة للملوث في بعض الحالات، بل قد يتطلب الأمر تحسين توافر الملوث حيويًا من خلال طرائق مناسبة تتوافق مع طبيعة الوسط والملوث، مع مراعاة عدم التسبب في زيادة انتشاره أو انتقاله إلى مكونات بيئية أخرى.

ثالثًا: صعوبة السيطرة على العمليات الأحيائية

تختلف الأنظمة الأحيائية عن العديد من العمليات الكيميائية التقليدية في كونها تعتمد على كائنات حية تتأثر بمجموعة واسعة من العوامل الداخلية والخارجية. وقد يؤدي تغير محدود في درجة الحرارة أو درجة الحموضة أو توافر الأكسجين أو العناصر الغذائية إلى تغير ملحوظ في نشاط المجتمع الميكروبي وكفاءة العملية.

ويمثل هذا الأمر تحديًا مهمًا عند الانتقال إلى التطبيقات واسعة النطاق، حيث يصبح الحفاظ على ظروف تشغيل مستقرة أكثر صعوبة. ولذلك تحتاج الأنظمة الأحيائية إلى عمليات مراقبة مستمرة للعوامل التشغيلية، إلى جانب وضع استراتيجيات للتعامل مع التغيرات التي قد تحدث أثناء المعالجة، بما يضمن المحافظة على الكفاءة والاستقرار قدر الإمكان.

رابعًا: محدودية التوسع من المختبر إلى الحقل

تمثل عملية الانتقال من التجارب المختبرية إلى التطبيقات الحقلية أو الصناعية إحدى أكثر مراحل تطوير التقانات الحيوية تحديًا. ففي المختبر يمكن التحكم في معظم الظروف وتكرار التجربة بصورة دقيقة، بينما تتسم المواقع الطبيعية بعدم التجانس والتغير المستمر في خصائصها.

وقد تظهر نسب مرتفعة من إزالة الملوثات في الدراسات المختبرية، ثم تنخفض هذه النسب عند تطبيق التقنية في موقع ملوث فعلي نتيجة اختلاف خصائص التربة أو المياه، أو تباين توزيع الملوث، أو تغير الظروف المناخية، أو وجود كائنات منافسة. ولذلك فإن الانتقال المباشر من المختبر إلى التطبيق الكامل قد يحمل مخاطر علمية واقتصادية، ويُفضل في كثير من الحالات إجراء تجارب على نطاق تجريبي Pilot Scale قبل التوسع إلى المستوى الحقلي أو الصناعي. وتوفر هذه المرحلة التجريبية فرصة لتقييم أداء التقنية تحت ظروف أقرب إلى الواقع، وتحديد المشكلات التشغيلية والكلف المحتملة، وإجراء التعديلات اللازمة قبل اعتمادها على نطاق واسع.

خامسًا: مشكلة النواتج الوسيطة

لا يعني اختفاء الملوث الأصلي من الوسط البيئي بالضرورة انتهاء المشكلة أو نجاح المعالجة بصورة كاملة. فقد تؤدي عمليات التحلل الحيوي إلى تكوين مركبات وسيطة تختلف في خصائصها الكيميائية والبيئية عن المركب الأصلي. وقد تكون هذه النواتج أقل سمية وأكثر قابلية للتحلل، إلا أن بعضها قد يحتفظ بدرجة من السمية أو يتميز بثبات أكبر أو قدرة أعلى على الانتقال في البيئة.

ولهذا فإن تقييم نجاح المعالجة الأحيائية ينبغي ألا يعتمد فقط على قياس الانخفاض في تركيز الملوث الأصلي، بل يجب أن يتضمن، قدر الإمكان، تحديد النواتج المتكونة ودراسة خصائصها وسميتها واستقرارها. وتكتسب تقنيات التحليل الكيميائي، بما فيها التقنيات الكروماتوغرافية والطيفية، أهمية كبيرة في هذا النوع من الدراسات، لأنها تساعد في تتبع المركب الأصلي والنواتج الوسيطة وتقييم مسار التحلل بصورة أكثر شمولًا.

سادسًا: التحديات المرتبطة بالتطبيقات الزراعية والغذائية

تواجه التطبيقات الأحيائية الزراعية تحديات مرتبطة بالتباين الكبير في خصائص التربة والمناخ ونوع المحصول. فقد يحقق أحد المنتجات الحيوية نتائج واضحة في منطقة معينة، بينما تكون الاستجابة محدودة في منطقة أخرى نتيجة اختلاف خصائص التربة أو درجات الحرارة أو الرطوبة أو المجتمع الميكروبي المحلي. كما يمكن أن تتأثر كفاءة الكائنات المستخدمة في الزراعة بالتفاعلات المعقدة بينها وبين النباتات والكائنات الدقيقة الموجودة طبيعيًا في البيئة.

أما في المجال الغذائي، فتُعد السلامة والاستقرار ومدة الصلاحية وثبات الخصائص النوعية من أهم الجوانب التي يجب تقييمها قبل اعتماد أي تطبيق حيوي على نطاق واسع. كما يمثل تقبل المستهلك عاملًا مهمًا، ولا سيما في المنتجات التي ترتبط باستخدام كائنات دقيقة أو تقانات حيوية حديثة. ولذلك ينبغي أن ترافق عملية تطوير المنتجات الأحيائية دراسات دقيقة للسلامة والجودة والفعالية، إلى جانب مراعاة المتطلبات التنظيمية والتشريعية ذات الصلة.

سابعًا: التحديات الاقتصادية

قد تمثل المنافسة مع التقانات الكيميائية التقليدية تحديًا أمام بعض التطبيقات الأحيائية، ولا سيما عندما تحتاج التقنية الحيوية إلى وقت أطول للوصول إلى النتيجة المطلوبة. لذلك لا ينبغي تقييم الجدوى الاقتصادية اعتمادًا على تكلفة المادة المستخدمة فقط، بل يجب النظر إلى دورة حياة التقنية كاملة، بدءًا من إنتاج المادة الحيوية وانتهاءً بالتطبيق والتخلص من المخلفات أو النواتج الثانوية.

وقد تكون بعض التقانات الأحيائية فعالة من الناحية العلمية، لكنها لا تحقق بالضرورة ميزة اقتصادية واضحة عند مقارنتها بالطرائق التقليدية. وتتأثر التكلفة بمجموعة من العوامل، من بينها نوع الوسط المستخدم، ومصدر الكائنات الدقيقة أو الإنزيمات، وعمليات العزل والتنقية، وظروف التخزين، واستهلاك الطاقة والتهوية، ونقل المواد، فضلًا عن تكاليف المراقبة والتحليل والصيانة.

وتبرز هذه المشكلة بصورة أوضح في التطبيقات القائمة على الإنزيمات، إذ قد تشكل عمليات إنتاج الإنزيم وتنقيته والحفاظ على نشاطه واستقراره عائقًا أمام استخدامه على نطاق واسع. ولذلك فإن تحقيق الجدوى التجارية لهذه التطبيقات يتطلب تطوير طرائق إنتاج أقل كلفة، والاستفادة من

مصادر حيوية متاحة محليًا، إلى جانب تحسين عمليات الاستخلاص والتنقية والتثبيت بما يتناسب مع طبيعة التطبيق.

ثامنًا: السلامة الأحيائية والبيئية

يمثل تقييم السلامة الأحيائية والبيئية جزءًا أساسيًا من تطوير أي تقنية تعتمد على استخدام الكائنات الحية أو منتجاتها، خصوصًا عندما يتعلق الأمر بإطلاق كائنات غير محلية أو كائنات معدلة وراثيًا إلى البيئة، أو عندما تمتلك السلالات المستخدمة خصائص قد تمكنها من البقاء والتكاثر خارج موقع التطبيق.

ويجب أن يشمل تقييم السلامة دراسة احتمالية انتقال الكائن المستخدم إلى البيئات المحيطة، وتأثيره المحتمل في الكائنات غير المستهدفة، وإمكانية انتقال المادة الوراثية بين الكائنات، فضلًا عن تقييم نواتج التحلل والآثار التي قد تظهر على المدى الطويل. ويكتسب هذا التقييم أهمية خاصة في التطبيقات البيئية، لأن إدخال كائن حي إلى نظام طبيعي قد يؤدي إلى تفاعلات يصعب التنبؤ بها أو التحكم فيها بصورة كاملة.

تاسعًا: الاستقرار البيئي للمنتجات الحيوية

تواجه بعض المنتجات الحيوية، مثل المبيدات الأحيائية والأسمدة الحيوية، تحديًا يتمثل في انخفاض استقرارها أثناء التخزين أو عند استخدامها في الظروف البيئية الفعلية. فقد تتأثر الكائنات الدقيقة المستخدمة بدرجات الحرارة المرتفعة، والجفاف، والأشعة فوق البنفسجية، وغيرها من العوامل البيئية، كما قد يفقد بعض المنتجات جزءًا من نشاطه الحيوي عند التخزين لفترات طويلة.

ومن ثم، فإن تطوير المنتج الحيوي لا ينتهي بمجرد إثبات فعاليته في الظروف المختبرية، بل يتطلب أيضًا تطوير تركيبة مناسبة تحافظ على نشاطه الحيوي، وتزيد من مدة صلاحيته، وتسهّل عمليات نقله وتخزينه وتطبيقه. ولذلك أصبحت تقنيات صياغة المنتجات الحيوية وتحسين استقرارها جزءًا أساسيًا من تطويرها للاستخدام التجاري والحقلي.

عاشرًا: التحديات المرتبطة بالكائنات المعدلة وراثيًا

أتاحت الهندسة الوراثية إمكانات واسعة لتطوير الكائنات الدقيقة والنباتات من خلال إدخال أو تعديل صفات محددة بهدف تحسين أدائها أو زيادة إنتاجها لمركبات أو إنزيمات ذات أهمية

تطبيقية. ومن الناحية النظرية، يمكن تطوير كائنات دقيقة تمتلك قدرة أعلى على تحليل ملوث معين، أو إنتاج إنزيم محدد بكفاءة أكبر، أو تحمل ظروف بيئية قد تحد من نشاط السلالات الطبيعية.

ومع ذلك، فإن استخدام الكائنات المعدلة وراثيًا في البيئة يثير مجموعة من القضايا العلمية والتنظيمية والأخلاقية، ولا سيما ما يتعلق باستقرار التعديل الوراثي، واحتمالية انتقال المادة الوراثية إلى كائنات أخرى، وتأثير الكائن المعدل في المجتمعات الميكروبية الطبيعية والتوازن البيئي.

ولهذا فإن توظيف الكائنات المعدلة وراثيًا في التطبيقات البيئية يحتاج إلى تحقيق توازن بين الاستفادة من إمكاناتها التقنية وبين تطبيق إجراءات دقيقة للسلامة الحيوية، وإجراء تقييم شامل للمخاطر المحتملة قبل السماح باستخدامها خارج البيئات المختبرية أو المغلقة.

الحادي عشر: حدود المعالجة الحيوية للميكروبلاستيك

أصبح تلوث البيئة باللدائن الدقيقة Microplastics من المشكلات البيئية الحديثة التي تحظى باهتمام متزايد، وقد دفع ذلك الباحثين إلى البحث عن وسائل أحيائية يمكن أن تسهم في الحد من تراكمها أو تفكيك بعض مكوناتها.

وقد أظهرت بعض الدراسات وجود كائنات دقيقة وإنزيمات تمتلك القدرة على تحليل أنواع محددة من البوليمرات، إلا أن هذه النتائج لا يمكن تعميمها على جميع أنواع البلاستيك أو الميكروبلاستيك. فالمواد البلاستيكية تمثل مجموعة واسعة من البوليمرات التي تختلف في تركيبها الكيميائي ودرجة مقاومتها للتحلل وخصائصها الفيزيائية.

كما يمكن أن تؤثر عوامل أخرى في قابلية البلاستيك للتحلل الحيوي، مثل حجم الجسيمات وشكلها ودرجة تبلورها، فضلًا عن طبيعة المواد المضافة الموجودة فيها. ولذلك فإن المعالجة الأحيائية للميكروبلاستيك تمثل مجالًا بحثيًا واعدًا، لكنها لا تزال في حاجة إلى مزيد من الدراسات لتطوير عمليات تتميز بالكفاءة والسرعة والاستقرار، ويمكن تطبيقها اقتصاديًا على نطاق واسع.

الثاني عشر: التحديات المرتبطة باستخدام الإنزيمات

تتميز الإنزيمات بقدرتها العالية على تحفيز تفاعلات كيميائية محددة، مما يجعلها أدوات مهمة في العديد من التطبيقات البيئية والصناعية. إلا أن استخدامها في الظروف البيئية قد يواجه مشكلة انخفاض الاستقرار والنشاط، إذ يمكن أن تتأثر الإنزيمات بتغير درجة الحرارة أو درجة الحموضة، أو بوجود مركبات مثبطة أو ظروف غير ملائمة لنشاطها.

ومن الاتجاهات الواعدة للتغلب على هذه المشكلة تطوير إنزيمات أكثر ثباتًا وكفاءة باستخدام الهندسة البروتينية Protein Engineering وتقنية التطور الموجه Directed Evolution وقد أظهرت الدراسات إمكانية تحسين خصائص بعض الإنزيمات المحللة للبوليمرات من خلال التعديل الموجه، ومن بينها تطوير إنزيمات ذات نشاط محسّن تجاه بوليمر(PET) .(Tournier *et al*., 2020)

ومع ذلك، فإن الحصول على إنزيم يتمتع بنشاط مرتفع في الظروف المختبرية لا يعني بالضرورة أن استخدامه سيكون مجديًا اقتصاديًا عند تطبيقه على كميات كبيرة من المخلفات البلاستيكية. ولذلك يتطلب تطوير هذه التطبيقات الجمع بين البيولوجيا الجزيئية والهندسة الحيوية وهندسة العمليات، بحيث لا يقتصر التطوير على تحسين نشاط الإنزيم، بل يشمل أيضًا إنتاجه بكلفة مناسبة وتثبيته واستعادته وإعادة استخدامه وتطوير أنظمة تشغيل قابلة للتوسع.

الثالث عشر: التحديات في الزراعة الحيوية

على الرغم من الإمكانات المهمة للأسمدة الحيوية والمبيدات الأحيائية والكائنات المحفزة لنمو النبات، فإن نتائج استخدامها قد تختلف بصورة واضحة تبعًا لنوع المحصول والصنف الزراعي وخصائص التربة والظروف المناخية والمجتمع الميكروبي الموجود بصورة طبيعية في البيئة.

فقد يحقق أحد المنتجات الحيوية نتائج متميزة في منطقة أو محصول معين، بينما تكون الاستجابة محدودة في منطقة أخرى. ويرتبط ذلك باختلاف درجة الحرارة والرطوبة وخصائص التربة وتوافر العناصر الغذائية، إضافة إلى التفاعلات المعقدة بين الكائنات الدقيقة والنبات والكائنات الحية الأخرى الموجودة في منطقة الجذور.

ولهذا فإن مستقبل الزراعة الحيوية يتطلب الابتعاد تدريجيًا عن فكرة "منتج واحد لجميع الظروف"، والاتجاه نحو تطبيقات أكثر تخصصًا تعتمد على اختيار السلالة أو المجتمع الميكروبي المناسب وفق نوع المحصول وخصائص التربة والظروف البيئية المحلية. وقد يسهم هذا التوجه في رفع كفاءة المنتجات الحيوية وتحقيق نتائج أكثر استقرارًا في الحقل.

الرابع عشر: التحديات في التطبيقات الغذائية

تحتاج التطبيقات الأحيائية في مجال الغذاء إلى تحقيق توازن دقيق بين الفعالية وتحسين جودة المنتج من جهة، وضمان السلامة والاستقرار من جهة أخرى. فأي استخدام لكائن حي أو إنزيم في تصنيع الغذاء أو حفظه ينبغي أن يخضع لتقييم دقيق من حيث هوية الكائن أو الإنزيم، والجرعة المستخدمة، وظروف التطبيق، وطبيعة النشاط الحيوي، والنواتج الناتجة عنه.

كما تختلف المنتجات الغذائية اختلافًا كبيرًا في تركيبها وخصائصها الفيزيائية والكيميائية، وقد تؤثر مكونات الغذاء المختلفة في نشاط الكائنات الدقيقة أو الإنزيمات واستقرارها. ولذلك فإن نجاح تطبيق حيوي في منتج غذائي معين لا يعني بالضرورة إمكانية نقله مباشرة إلى منتج آخر، بل يحتاج كل نظام غذائي إلى تقييم مستقل يأخذ في الاعتبار تركيب المنتج وظروف تصنيعه وتخزينه.

ومن هنا، فإن تطوير التطبيقات الأحيائية الغذائية ينبغي أن يجمع بين دراسة الكفاءة التقنية، والتحقق من السلامة الميكروبية والكيميائية، وتقييم جودة المنتج ومدة صلاحيته، فضلًا عن مراعاة المتطلبات التنظيمية وتقبل المستهلك. ويُعد هذا التكامل ضروريًا لضمان انتقال التقانات الأحيائية الغذائية من نطاق البحث والتجريب إلى تطبيقات عملية موثوقة وقابلة للاستمرار.

الخامس عشر: الحاجة إلى التقييم الشامل لدورة الحياة

من الأخطاء المحتملة عند تقييم التقانات الأحيائية التركيز على مرحلة المعالجة نفسها دون النظر إلى المراحل الأخرى المرتبطة بإنتاج التقنية ونقلها وتشغيلها والتخلص من نواتجها. فقد تتميز إحدى العمليات الحيوية بانخفاض استهلاكها للطاقة أثناء المعالجة، لكنها في المقابل قد تحتاج إلى مواد أولية تتطلب استهلاكًا مرتفعًا للموارد، أو إلى عمليات نقل وتنقية وتصنيع قد تكون لها آثار بيئية ملحوظة.

ولهذا أصبح تقييم دورة الحياة Life Cycle Assessment (LCA) من الأدوات المهمة في دراسة الاستدامة البيئية للتقانات المختلفة. إذ يتيح هذا الأسلوب تقييم الآثار البيئية المرتبطة بمراحل متعددة من دورة حياة المنتج أو العملية، كما يمكن استخدامه لإجراء مقارنات بين التقانات الأحيائية والطرائق التقليدية من حيث استهلاك الطاقة والمياه والمواد الخام، إضافة إلى الانبعاثات وتكوين المخلفات.

ومن المنظور العلمي، لا ينبغي وصف أي تقنية بأنها «صديقة للبيئة» لمجرد اعتمادها على كائنات حية أو مواد ذات أصل حيوي، وإنما يجب دعم هذا الوصف بأدلة تستند إلى تقييم شامل لمختلف مراحل دورة الحياة. ويساعد هذا النهج على تقديم صورة أكثر واقعية عن الفوائد البيئية الفعلية للتقنية وتحديد الجوانب التي يمكن تحسينها.

السادس عشر: التحديات التنظيمية والتشريعية

تحتاج التطبيقات الأحيائية، ولا سيما المنتجات المستخدمة في مجالات الزراعة والبيئة والغذاء، إلى أطر تنظيمية وتشريعية واضحة تضمن سلامة المنتجات وفعاليتها وجودتها، وتحدد الشروط الواجب توافرها قبل استخدامها أو طرحها في الأسواق.

وتزداد أهمية الجوانب التنظيمية عند استخدام الكائنات المعدلة وراثيًا أو الكائنات الحية التي يمكن أن تنتقل أو تستقر في البيئة. كما تحتاج المنتجات الحيوية الزراعية إلى معايير واضحة تتعلق بهوية الكائن المستخدم ونقاوته وفعاليته واستقراره، فضلًا عن متطلبات التخزين والتداول والاستخدام.

وقد يؤدي عدم وجود معايير تنظيمية واضحة أو اختلافها بين الدول والمناطق إلى إبطاء انتقال بعض التقانات الواعدة من المختبر إلى التطبيق التجاري. ولذلك فإن تطوير أطر تنظيمية تستند إلى الأدلة العلمية يمثل خطوة ضرورية لتحقيق التوازن بين تشجيع الابتكار وضمان السلامة البيئية والصحية.

السابع عشر: نحو مجتمعات ميكروبية مصممة

اعتمدت التطبيقات التقليدية في التكنولوجيا الحيوية الميكروبية في كثير من الأحيان على عزل كائن دقيق منفرد ودراسة قدرته على تنفيذ وظيفة محددة. أما الاتجاهات الحديثة فتولي اهتمامًا متزايدًا بفهم المجتمعات الميكروبية المتكاملة ودراسة التفاعلات الوظيفية بين مكوناتها.

وقد تكون المجتمعات الميكروبية المختلطة أكثر قدرة على التعامل مع بعض الملوثات أو المواد المعقدة، نتيجة تكامل القدرات الأيضية بين الأنواع المختلفة. فقد يقوم نوع ميكروبي بتحويل المركب الأصلي إلى مركب وسيط، ثم يستخدم نوع آخر هذا المركب ويستكمل مراحل التحلل اللاحقة، بما يؤدي في النهاية إلى تفكيك المركب بصورة أكثر كفاءة.

ومن هذا المنطلق، يمكن أن يتجه مستقبل المعالجة الأحيائية نحو اختيار أو تصميم مجتمعات ميكروبية مستقرة ومتكاملة بدلًا من الاعتماد بصورة أساسية على سلالة واحدة. وقد يتيح هذا النهج تطوير نظم حيوية أكثر قدرة على التكيف مع الظروف البيئية المعقدة، مع ضرورة دراسة استقرار هذه المجتمعات وإمكانية التحكم في نشاطها على المدى الطويل.

الثامن عشر: التكامل بين التقانات الأحيائية والطرائق التقليدية

لا ينبغي النظر إلى التكنولوجيا الحيوية باعتبارها بديلًا مطلقًا لجميع التقانات الفيزيائية والكيميائية التقليدية، إذ قد تكون أفضل النتائج في كثير من الحالات ناتجة عن الجمع بين أكثر من تقنية ضمن نظام معالجة متكامل.

فعلى سبيل المثال، يمكن استخدام المعالجة الفيزيائية في مرحلة أولى لإزالة الجسيمات أو المواد الكبيرة، ثم توظيف المعالجة الأحيائية للتعامل مع المركبات العضوية المتبقية. كما يمكن دمج بعض المعالجات الكيميائية مع الإنزيمات أو الكائنات الدقيقة ضمن مراحل متتابعة، بحيث تؤدي كل تقنية وظيفة تتناسب مع خصائصها.

ويُعرف هذا الاتجاه باسم أنظمة المعالجة الهجينة Hybrid Treatment Systems ، ويكتسب أهمية متزايدة لأن لكل تقنية مزايا وحدودًا معينة. ومن خلال الجمع بينها يمكن تحسين كفاءة المعالجة وتقليل زمنها أو استهلاك الموارد، مع الحد من نقاط الضعف المرتبطة باستخدام تقنية واحدة بصورة منفردة.

التاسع عشر: من إزالة الملوثات إلى استرداد الموارد

يتجه التفكير البيئي الحديث تدريجيًا من مفهوم إزالة الملوث بوصفه الهدف النهائي للمعالجة إلى مفهوم أكثر شمولًا يتمثل في استرداد الموارد. ويعني ذلك عدم الاكتفاء بالتخلص من المادة الملوثة، بل البحث عن إمكانية تحويلها أو استرداد مكوناتها والاستفادة منها في إنتاج مواد أو طاقة أو منتجات جديدة.

ويظهر هذا التوجه بصورة واضحة في معالجة المخلفات العضوية، إذ لا يقتصر الهدف على التخلص من المادة العضوية، وإنما يمكن تحويلها إلى سماد عضوي أو غاز حيوي أو مواد أخرى ذات قيمة مضافة. وينطبق المبدأ نفسه على بعض المخلفات الصناعية والزراعية، حيث يمكن استخدام الكائنات الدقيقة أو الإنزيمات لتحويل المخلفات إلى مواد أولية ثانوية يمكن إعادة إدخالها في عمليات إنتاجية أخرى.

ويتماشى هذا النهج مع مبادئ الاقتصاد الدائري Circular Economy ، الذي يسعى إلى تقليل الفاقد وتعظيم الاستفادة من الموارد وإطالة دورة استخدامها. ومن ثم، يمكن للتكنولوجيا الحيوية أن تؤدي دورًا مهمًا في الانتقال من نموذج يقوم على الاستخدام ثم التخلص إلى نموذج أكثر استدامة يقوم على إعادة الاستخدام والاسترداد والتحويل الحيوي للموارد.

العشرون: التحديات المستقبلية والآفاق

يمثل التطور السريع في العلوم الأحيائية والتقانات الحيوية فرصة مهمة لتطوير حلول أكثر كفاءة لمعالجة المشكلات البيئية والزراعية والغذائية، إلا أن الاستفادة الكاملة من هذه الإمكانات تتطلب تجاوز عدد من التحديات العلمية والتقنية والاقتصادية والتنظيمية. ومن أهم الاتجاهات المستقبلية تطوير كائنات دقيقة وإنزيمات أكثر كفاءة واستقرارًا، وتحسين عمليات الإنتاج والتطبيق، وفهم التفاعلات داخل المجتمعات الميكروبية بصورة أعمق.

كما يُتوقع أن يُسهم التقدم في علم الجينوم والميتاجينوميا والبيولوجيا التركيبية والذكاء الاصطناعي في اكتشاف قدرات حيوية جديدة والتنبؤ بالوظائف الأيضية للكائنات الدقيقة واختيار الأنظمة الحيوية الأكثر ملاءمة لكل تطبيق. ويمكن أن يساعد الجمع بين هذه الأدوات في تطوير حلول أكثر تخصصًا تتناسب مع طبيعة الملوث أو المحصول أو المخلف والظروف البيئية المحيطة.

ومن جهة أخرى، سيظل تحقيق الجدوى الاقتصادية وقابلية التوسع من أهم الشروط اللازمة لتحويل الابتكارات الأحيائية من نتائج بحثية إلى تطبيقات عملية. ولذلك ينبغي أن تتجه البحوث المستقبلية إلى دراسة التقنية منذ مراحلها المبكرة بصورة متكاملة، بحيث تشمل الكفاءة العلمية، والسلامة، والتكلفة، واستهلاك الموارد، والأثر البيئي، وإمكانية التطبيق على نطاق واسع.

وبصورة عامة، فإن مستقبل التطبيقات الأحيائية والبيئية غير الطبية لا يعتمد فقط على اكتشاف كائنات أو إنزيمات جديدة، وإنما على القدرة على دمج المعرفة البيولوجية مع الهندسة والتقنيات التحليلية والتقييم الاقتصادي والبيئي. ومن هنا يمكن أن تتحول التقانات الأحيائية من حلول منفردة إلى مكونات أساسية في منظومات أكثر تكاملًا واستدامة لإدارة البيئة والغذاء والزراعة والموارد الطبيعية.

العشرون: التحديات المستقبلية والاتجاهات الواعدة

يتجه مستقبل التطبيقات الأحيائية غير الطبية نحو مزيد من التكامل بين التقانات الحيوية التقليدية والتقنيات الجزيئية الحديثة والهندسة الحيوية وأدوات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات. ومن شأن هذا التكامل أن يوسع القدرة على اكتشاف الوظائف الحيوية للكائنات الدقيقة وتطويرها بما يتناسب مع الاحتياجات البيئية والزراعية والغذائية.

ومن الاتجاهات الواعدة في هذا المجال استخدام تقنيات الميتاجينوميات Metagenomics والميتاترنسكربتوميات Metatranscriptomics لدراسة المجتمعات الميكروبية الموجودة في البيئات المختلفة، والكشف عن الجينات والإنزيمات والمسارات الأيضية التي تمتلكها، دون الحاجة إلى عزل جميع الكائنات الدقيقة وزراعتها بالطرائق المختبرية التقليدية. ويفتح هذا النهج المجال أمام اكتشاف قدرات حيوية جديدة يمكن توظيفها في تحليل الملوثات، وتحويل المخلفات، وإنتاج مركبات أو مواد ذات قيمة تطبيقية.

كما يمكن للذكاء الاصطناعي وتقنيات تحليل البيانات أن تؤدي دورًا متزايدًا في التنبؤ بقدرة الكائنات الدقيقة على تحليل مركبات معينة، واختيار الظروف المثلى لنمو المجتمعات الميكروبية، وتحليل التفاعلات المعقدة بين الكائنات والبيئة. ويمكن كذلك الاستفادة من هذه الأدوات في البحث عن إنزيمات جديدة أو التنبؤ بخصائصها وتطويرها لتؤدي وظائف محددة بكفاءة أعلى.

ومن جانب آخر، توفر الهندسة الأيضية Metabolic Engineering إمكانية تعديل المسارات الأيضية للكائنات الدقيقة بهدف زيادة إنتاج مركبات محددة أو تحسين قدرتها على تنفيذ عمليات حيوية مرغوبة. وقد يتيح الجمع بين الهندسة الأيضية والتقنيات الجزيئية المتقدمة تطوير أنظمة حيوية أكثر تخصصًا، إلا أن تطبيق هذه التقنيات على نطاق واسع يتطلب في الوقت نفسه تقييمًا دقيقًا للسلامة والاستقرار والجدوى الاقتصادية.

الحادي والعشرون: رؤية نقدية لمستقبل التطبيقات الأحيائية غير الطبية

على الرغم من الإمكانات الواسعة التي توفرها التطبيقات الأحيائية غير الطبية، فإن التعامل معها باعتبارها حلًا شاملًا لجميع المشكلات البيئية والزراعية والغذائية قد يؤدي إلى تقييم غير دقيق لإمكاناتها الحقيقية. فالكائنات الحية لا تعمل بمعزل عن البيئة المحيطة، كما أن العمليات الأحيائية قد تتسم بالبطء النسبي، وتتأثر بدرجة كبيرة بالظروف البيئية، وقد تحتاج إلى مراقبة مستمرة للحفاظ على كفاءتها واستقرارها.

كما أن نجاح تقنية معينة في ظروف المختبر لا يمثل دليلًا كافيًا على صلاحيتها للتطبيق التجاري أو الحقلي. إذ ينبغي أن تمر التقانة بمراحل متتابعة من التحقق العلمي، والتجارب على النطاق التجريبي وشبه الحقلي، ثم التجارب الحقلية، إلى جانب تقييم الجدوى الاقتصادية والأثر البيئي والسلامة قبل التوسع في استخدامها.

ومن ناحية أخرى، لا ينبغي أن يكون الهدف من تطوير التقانات الأحيائية هو الاستبدال المطلق لجميع المواد أو العمليات الكيميائية ببدائل حيوية. فقد تكون بعض المواد الكيميائية أو الطرائق التقليدية أكثر كفاءة أو أقل تكلفة في ظروف معينة. ولذلك ينبغي أن يستند الاختيار العلمي إلى مقارنة موضوعية بين البدائل المتاحة، تأخذ في الاعتبار الكفاءة، والسلامة، والتكلفة، واستهلاك الموارد، والأثر البيئي، وقابلية التطبيق على المدى الطويل.

وبناءً على ذلك، فإن القيمة الحقيقية للتقانات الأحيائية لا تكمن في كونها «حيوية» بحد ذاتها، وإنما في قدرتها على تقديم حلول أكثر ملاءمة عندما تثبت المقارنة العلمية والبيئية والاقتصادية جدواها.

خاتمة الفصل

أصبحت التطبيقات الأحيائية غير الطبية جزءًا مهمًا من منظومة العلوم التطبيقية الحديثة، لما توفره من إمكانات لتوظيف الكائنات الحية والإنزيمات والعمليات الحيوية في مجالات البيئة والغذاء والزراعة. وقد أظهرت المعالجة الأحيائية قدرة النشاط الميكروبي والأنزيمي على التعامل مع مجموعة متنوعة من الملوثات، كما أثبتت العمليات البيولوجية أهميتها في معالجة مياه الصرف، وتحويل المخلفات، واسترداد الموارد، وتحسين كفاءة استخدام المواد الحيوية.

وأظهر استعراض هذه التطبيقات أن القيمة الأساسية للتقانات الأحيائية لا تتمثل في استخدامها بديلًا مطلقًا للطرائق التقليدية، وإنما في إمكانية دمجها ضمن منظومات متكاملة تستفيد من نقاط قوتها وتحد من جوانب قصورها. فقد تحقق المعالجة الأحيائية نتائج أفضل عند دمجها مع معالجات فيزيائية أو كيميائية مناسبة، كما يمكن أن تحقق الأسمدة والمبيدات الأحيائية فاعلية أكبر عند استخدامها ضمن برامج متكاملة لإدارة التربة والمحاصيل والآفات.

وفي المقابل، فإن التوسع في استخدام هذه التقانات لا يزال مرتبطًا بتجاوز مجموعة من التحديات، من أبرزها التباين في الظروف البيئية، ومحدودية التوافر الحيوي لبعض الملوثات، وصعوبة الانتقال من المختبر إلى الحقل أو المستوى الصناعي، فضلًا عن الحاجة إلى ضمان السلامة الأحيائية والبيئية، وتحقيق الجدوى الاقتصادية، ووضع أطر تنظيمية وتشريعية واضحة. كما يمثل تقبل المجتمع والمستهلك أحد العوامل التي ينبغي أخذها في الاعتبار، ولا سيما في التطبيقات الغذائية والزراعية المرتبطة بالتقانات الحيوية الحديثة.

وعليه، فإن مستقبل التطبيقات الأحيائية غير الطبية يرتبط بقدرتها على الانتقال من حلول حيوية منفردة إلى منظومات متكاملة تقوم على استرداد الموارد، والاقتصاد الدائري، وتقليل إنتاج المخلفات، وتحسين كفاءة استخدام المياه والطاقة، والمحافظة على صحة التربة والتنوع الحيوي. ومن المتوقع أن يؤدي التكامل بين علم الأحياء الدقيقة والهندسة الحيوية والعلوم البيئية والتقنيات الجزيئية وتحليل البيانات والذكاء الاصطناعي إلى توسيع نطاق هذه التطبيقات وتطوير تقانات أكثر دقة وكفاءة واستدامة.

وفي النهاية، فإن التطور الحقيقي في هذا المجال لا يقاس بعدد التقانات الحيوية الجديدة التي يتم اكتشافها، وإنما بمدى قدرتها على الانتقال بصورة آمنة ومدروسة من المختبر إلى التطبيق،

وتحقيق توازن حقيقي بين الكفاءة العلمية والجدوى الاقتصادية والسلامة البيئية والاستدامة. وهذا التوازن هو الأساس الذي يمكن أن يجعل التطبيقات الأحيائية غير الطبية جزءًا فاعلًا من الحلول المستقبلية للتحديات المرتبطة بالبيئة والغذاء والزراعة.

المراجع

1. الحسيني ، أحمد عيدان و رزوقي ،أحمد محي و غالب ،محمد باسل علي و زعيتر ،عدي سعدون و فاضل ، غنية حسن . (2013). دراسة آلية النمو الحركية للطحالب الملتصقة على مختلف المواد كوسط مساعد للنمو في نهر دجلة . مجلة مركز بحوث التقنيات الاحيائية .جامعة النهرين . المجلد(7) العدد(3) .

2. الحسيني ،أحمد عيدان ومحمد ، ايلاف سمير و كامل ،رويدة فاهم .(2014). خفض إنتاجية الكلوروفيل من مختلف الطحالب بمادة برمنكنات البوتاسيوم . المجلة العراقية للعلوم والتكنولوجيا . وزارة العلوم والتكنولوجيا .

3. الحسيني ،أحمد عيدان. (2017) . كتاب / الطحالب في العراق بيئتها وتصنيفها ، دار النشر وزارة الثقافة والاعلام العراقية ، دار الشؤون الثقافية العامة ، عدد الصفحات 440 صفحة .

4. ذجر ، لمياء عبد السادة و الحسيني ،أحمد عيدان وناجي ، هاني سعدي وطالب، رسل مكي.(2014) .الامتزاز الحيوي لعناصر الرصاص والكادميوم والنيكل من مياه الصرف الصناعي باستخدام الطحالب الكبيرة الجافة . المؤتمر العلمي النسوي الثاني .كلية العلوم للبنات .مجلة بغداد .

5. قاسم ، ثائر أبراهيم .(2007) " الطحالب الملتصقة على القاع في خزان حمرين ، العراق " .مجلة أم سلمة . مجلد 4 (2).

6. Abed, E.H. (2025). Study of preparation, characterization, and biodegradability of the bioplastic film prepared from rice husk cellulose as an eco-friendly material. PhD Dissertation, College of science, University of Baghdad, Baghdad, Iraq. p. 180. (In English).

7. Ali, H., Khan, E. and Sajad, M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881.

8. Azubuike, C.C., Chikere, C.B. and Okpokwasili, G.C. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32, 180.

9. Bhattacharyya, P.N. and Jha, D.K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327–1350.

10. Gadd, G.M. (2010). Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156(3), 609–643.

11. Glare, T., Caradus, J., Gelernter, W., Jackson, T., Keyhani, N., Köhl, J., Marrone, P., Morin, L. and Stewart, A. (2012). Have biopesticides come of age? *Trends in Biotechnology*, 30(5), 250–258.

12. Harms, H., Schlosser, D. and Wick, L.Y. (2011). Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, 9, 177–192.

13. Kumar, R., Singh, S. and Singh, O.V. (2010). Bioconversion of lignocellulosic biomass: biochemical and molecular perspectives. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 37, 151–161.

14. Lobban, C.S., AND P.J.Harrison.(1994). Seaweed Ecology and Physiology .Cambridge University Press , Cambridge , UK.

15. Mehta,S.k., and Gaur,J.P.(2005).Use of algae for removing heavy metals from wastewater: progress and prospects critical reviews in biotechnology,J.Hazard.mater,25(3)113-152.

16. Ohio Section Technology Committee. (2011) ,White Paper on Algal Toxin Treatment. Environmental Protection Agency , 1- 6.

17. Pilkaitytë, R., Schoor, A. and Schubert, H. (2004), 'Response of phytoplankton communities to salinity changes – a mesocosm approach', *Hydrobiologia*, vol. 513, no. 1–3, pp. 27–38.

18. Sánchez, C. (2009). Lignocellulosic residues: biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances*, 27(2), 185–194.

19. Smith, S.E. and Read, D.J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. London: Academic Press.

20. Tamang, J.P., Cotter, P.D., Endo, A. and Han, N.S. (2020). Fermented foods in a global age: East meets West. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 184–217.

21. Tamure,H.,I.Mine and K.Okuda.(1996). Cellulose-Synthesizing terminal complexes and microfibril structure in the brown algae *Sphacelaria rigidula* (sphacelaiales , Phaeophyceae).Phycological Research 44:63- 68 .

22. Varjani, S.J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223, 277–286.

23. Voleskey,B.(2004).Sorption and biosorption .Sorbex ,INC ,St .Lambert,Quebec,36-103.

24. Yun,Y.S.and B.Volesky,2001.Biosorption of trivalent chromium on the brown seaweed biomass.Environ.Sci.Technol.,32(21):4353-4358.

الفصل الثامن

الاستدامة والتغير المناخي

Sustainability and Climate Change

م.م. أحمد عيدان مطرود
هيئة البحث العلمي - العراق
ahmed.a.matrood@src.edu.iq
ORCID: 0000-0002-5778-3099

الملخص

يتناول الفصل الاستدامة والتغير المناخي من خلال العلاقة بين إدارة الموارد وآثار التحولات المناخية والحلول العلمية والتقنية المقترحة للتخفيف والتكيف. ويعرض مفهوم الاستدامة وتطوره وأبعاده البيئية والاقتصادية والاجتماعية، ثم يناقش كيف تتداخل أنماط استخدام الطاقة والمياه والأرض مع التلوث والانبعاثات والتنوع الحيوي. وتوضح المعالجة أن الاستدامة لا تقتصر على جانب بيئي منفرد، بل ترتبط بتنظيم الموارد وحاجات المجتمع والاقتصاد.

ويبحث الفصل آثار التغير المناخي في المياه والتربة والزراعة والأمن الغذائي والأنظمة البيئية، مع عرض مسارات للتخفيف وإدارة المخاطر والتكيف. ويتناول الطاقة المتجددة وكفاءة الموارد والحلول القائمة على الطبيعة وتقنيات المعالجة، ثم يخصص مساحة لتطبيقات الطحالب والكائنات الدقيقة في التقاط ثاني أكسيد الكربون ومعالجة المياه وإنتاج الكتلة الحيوية. وتربط هذه التطبيقات المفاهيم العامة للاستدامة بعمليات حيوية قابلة للدراسة والتقويم.

ويعرض الفصل أنماط المفاعلات الحيوية الضوئية ونظم تنمية الطحالب، بما فيها التصاميم الأنبوبية واللولبية وغيرها، ويناقش الإضاءة والخلط والحرارة وتبادل الغازات والكلفة والإنتاجية. كما يتناول الطحالب مصدرًا للوقود الحيوي والتحديات المرتبطة بالحصاد والطاقة وتوسيع الإنتاج. وتخلص المعالجة إلى ضرورة تقويم الحلول عبر متطلباتها وقيودها، لا عبر إمكاناتها النظرية وحدها. وتتمثل مساهمة الفصل في وصل الإطار المفاهيمي للاستدامة بدراسة الأثر المناخي والتطبيقات الحيوية، مع المحافظة على تفاصيل الأمثلة والمفاعلات والمراجع بوصفها أساسًا لفهم فرص الاستخدام وحدوده.

الكلمات المفتاحية: الاستدامة؛ التغير المناخي؛ الطحالب الدقيقة؛ المفاعلات الضوئية؛ التقاط الكربون

Abstract

This chapter examines sustainability and climate change through relationships among resource management, environmental effects, and proposed scientific responses for mitigation and adaptation. It introduces the development of sustainability and its environmental, economic, and social dimensions, then considers connections among energy, water, land use, pollution, emissions, and biodiversity. Sustainability is therefore presented as involving resources, society, and economic activity rather than an isolated environmental concern.

The chapter discusses climate-related effects on water, soil, agriculture, food security, and ecosystems alongside approaches to mitigation, risk reduction, and adaptation. Renewable energy, resource efficiency, nature-based approaches, and treatment technologies lead into a more detailed examination of algae and microorganisms for carbon dioxide capture, water treatment, and biomass production. These applications connect the broad sustainability framework with biological processes that can be studied and evaluated.

Photobioreactor types and algal cultivation systems are reviewed, including tubular, helical, and other designs. Light, mixing, temperature, gas exchange, cost, and productivity are considered as interacting requirements. The chapter also examines algae as a biofuel source and the constraints associated with harvesting, energy demand, and scale-up. Its conclusion emphasizes evaluating solutions through their requirements and limitations rather than theoretical potential alone. The contribution links sustainability concepts and climate effects with specific biological applications, preserving the examples, reactor descriptions, and references needed to understand both opportunities and constraints.

Keywords: Sustainability; Climate change; Microalgae; Photobioreactors; Carbon capture

First topic: The concept of sustainability and its relationship to climate change

Introduction

Sustainability is among the most important concepts to have emerged over the past decades, driven by the environmental, climatic, economic, and social challenges confronting the world. Accelerated population growth, industrial expansion, excessive consumption of natural resources, and rising greenhouse-gas emissions have created unprecedented pressures on ecological systems, making sustainable development a strategic requirement to ensure the continuity of human life and the protection of natural resources for future generations. Sustainability is no longer limited to environmental protection alone; it has become an integrated framework that brings together economic development, social justice, and environmental preservation at the same time.

Against the backdrop of worsening climate change, sustainability has become a central element in international policies aimed at reducing carbon emissions, improving resource efficiency, transitioning to a green economy and clean energy, and achieving the United Nations' sustainable development goals through 2030.

First: The concept of sustainability

Sustainability is defined as the ability to meet the needs of the present generation without compromising the ability of future

generations to meet their own needs, while achieving a balanced approach to economic growth, environmental protection, and social justice. This definition, which appeared in the 1987 Brundtland Commission report, forms the basis for most modern concepts and policies related to sustainability.

Currently, the concept of sustainability has expanded to include:

• Conserving natural resources.

• Reducing environmental pollution.

• Mitigating the effects of climate change.

• Promoting a low-carbon economy.

• Protecting biodiversity.

• Sustainable management of water, energy, and food.

• Enhancing social justice and public health

Thus, sustainability has become a global approach aimed at achieving economic development while reducing negative environmental impacts, through the rational use of natural resources, the application of clean technologies, and scientific innovation.

Second: The relationship between sustainability and climate change

Climate change is one of the biggest challenges to achieving sustainable development, as rising global temperatures lead to:

• Increased droughts.

• More frequent floods.

• Rising sea levels.

• Declining agricultural production.

• Loss of biodiversity.

• Increased spread of diseases.

Conversely, sustainability principles contribute to mitigating the effects of climate change by:

• Reducing carbon dioxide emissions.

• Increasing reliance on renewable energy.

• Improving energy efficiency.

• Recycling waste.

• Conserving forests.

• Promoting a circular economy.

Therefore, the relationship between sustainability and climate is complementary; achieving sustainability is one of the most important solutions for mitigating and adapting to the effects of climate change.

Third: Dimensions of Sustainability

Sustainability is based on three main dimensions:

1. The Environmental Dimension

It focuses on protecting natural resources, reducing pollution, decreasing greenhouse gas emissions, and preserving ecosystems and biodiversity.

2. The Economic Dimension

This dimension focuses on achieving economic growth through the efficient use of resources, promoting a green economy, and supporting innovation and clean technologies.

3. The Social Dimension

This dimension focuses on improving quality of life, social justice, health, education, equality, and poverty reduction.

Experts emphasize that achieving sustainability is only possible through the integration of these three dimensions.

Fourth: Sustainability in the Face of the Climate Crisis

Reports from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) indicate that human activity has caused the average global temperature to rise by approximately 1.1°C compared to pre-industrial levels. This is primarily due to greenhouse gas emissions resulting from the burning of fossil fuels, deforestation, and industrial activities.

Therefore, sustainability is a fundamental pillar for reducing these emissions through:

• Transitioning to solar and wind energy.

• Utilizing carbon capture technologies.

• Promoting sustainable transportation.

• Expanding green building practices.

• Implementing climate-smart agriculture.

• Developing environmentally friendly materials.

Modern technologies, including Green Nanotechnology, also contribute to the development of highly efficient materials for water and air treatment, improving the efficiency of solar cells and reducing energy consumption, thus enhancing climate sustainability efforts.

The concept of sustainability and its dimensions: A comprehensive scientific study

Sustainability has become one of the most influential scientific concepts of the 21st century, driven by the escalating environmental, economic, and social challenges facing human societies, particularly climate change, biodiversity loss, depletion of natural resources, water, air, and soil pollution, and increasing pressure on ecosystems. The concept of sustainability has evolved from a limited environmental idea to a comprehensive framework for development aimed at balancing current human needs with the ability of future generations to meet their own needs.

Sustainability represents a development philosophy based on managing natural and human resources in a way that ensures the long-term viability of biological, economic, and social systems, while minimizing the negative impacts of human activities on the environment. Therefore, sustainability has become a central focus in global policies, national strategies, and research programs related to energy, water, agriculture, industry, and waste management.

The concept of sustainability gained global importance following the 1987 report by the World Commission on Environment and

Development, known as "Our Common Future," which defined sustainable development as:

"Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs."

This definition forms the intellectual foundation for most modern studies on sustainability, emphasizing the interconnectedness of economic development, environmental protection, and the achievement of social justice.

First: The historical development of the concept of sustainability

The concept of sustainability did not emerge suddenly, but rather evolved through historical stages linked to the changing relationship between humanity and the environment. In traditional societies, human activities relied heavily on renewable resources, and the rate of resource consumption was close to their natural rate of renewal. However, the Industrial Revolution in the 18th century led to a radical change in this relationship due to the heavy reliance on fossil fuels and the increase in industrial production.

Industrial expansion has led to increased emissions of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO_2) and methane (CH_4), contributing to rising average global temperatures and widespread climate change. New environmental problems have also emerged, including water pollution from heavy metals and chemicals, the accumulation of plastic waste, and the degradation of ecosystems.



Figure (1) shows carbon dioxide emissions and their environmental damage.

During the 20th century, international organizations began to focus on environmental issues. Key milestones included:

1. The United Nations Conference on the Human Environment – Stockholm 1972, which first emphasized the need to integrate environmental issues into economic development plans.

2. The Our Common Future report of 1987, which provided the most widely accepted definition of sustainable development.

3. The Earth Summit – Rio de Janeiro 1992, which established a global agenda for achieving sustainable development and promoting international cooperation.

4. The United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) of 2015, which included 17 global goals such as eradicating poverty, ensuring access to clean energy, protecting ecosystems, combating

climate change, and achieving responsible consumption and production patterns.

Second: The Concept of Sustainability from a Scientific Perspective

Scientifically, sustainability is defined as the ability of an ecosystem, economy, or society to continue functioning efficiently over the long term without depleting resources or causing irreversible damage.

From an environmental science perspective, sustainability means maintaining the dynamic balance among the components of an ecosystem, ensuring that resource consumption rates remain within limits that allow for natural regeneration.

From an economic perspective, sustainability means achieving economic growth while preserving natural capital and minimizing the environmental damage resulting from economic activity.

In the fields of technology and engineering, sustainability is linked to the development of environmentally friendly technologies that reduce energy and raw material consumption and limit the production of pollutants, such as:

• Renewable energy.

• Advanced water treatment technologies.

• Circular economy.

• Green nanomaterials.

• Bioremediation of pollutants using microorganisms and algae.



Figure (2) shows the shape of the applied algal bioreactor using *Chlorella sorokiniana* during the biological reduction of CO2 outside the laboratory.

Third: Dimensions of Sustainability

Modern sustainability is based on three main, interconnected dimensions known as the Triple Bottom Line:

1. Environmental Dimension
2. Economic Dimension
3. Social Dimension

Other dimensions, such as the institutional and technological dimensions, have been added later to strengthen the concept of comprehensive sustainability.

1- The Environmental Dimension of Sustainability

The environmental dimension represents the natural foundation of sustainability, focusing on protecting ecosystems, conserving natural resources, and ensuring the continuity of their vital functions.

Environmental sustainability encompasses several key areas:

A. Conserving Natural R esources

Natural resources such as water, soil, minerals, and forests are essential for the continuation of human life. Therefore, environmental sustainability aims to use these resources efficiently and minimize their depletion.

For example, freshwater is one of the most stressed resources due to population growth and industrial and agricultural expansion. Consequently, modern technologies for water treatment and reuse have emerged, such as:

• Nanomembranes

• Advanced photocatalytics

• Bioremediation using algae and bacteria



Figure (3) protects the environment from pollution.

B. Pollution Control

Reducing pollution is one of the most important goals of environmental sustainability. Pollutants include:

• Organic pollutants such as dyes, pesticides, and pharmaceuticals.

• Heavy metals such as lead, cadmium, and mercury.

• Emerging pollutants such as antibiotics and hormones.

Green nanotechnology is a modern trend in achieving sustainability, as nanoparticles can be manufactured using plant and algal extracts instead of traditional chemical methods that produce toxic waste.



Figure (4) Types of algal photosynthetic bioreactors for reducing greenhouse gases.

C. Climate Change and Sustainability

The concept of sustainability is closely linked to the problem of climate change, as unsustainable human activities have led to an increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere.

Sustainable solutions to climate change include:

• Reducing reliance on fossil fuels.

• Expanding the use of solar and wind energy.

• Improving energy efficiency.

• Increasing carbon sequestration by ecosystems.

• Developing low-emission technologies.



Figure (5) Ground-based algal photobioreactors (horizontal) for reducing greenhouse gases.

The Relationship Between Sustainability and Climate Change

The relationship between sustainability and climate change is interconnected and reciprocal. Climate change represents one of the greatest challenges to achieving sustainable development in the modern era, while sustainability represents the scientific and developmental framework that aims to reduce the causes of climate

change and adapt to its future impacts. Unsustainable development based on the excessive consumption of natural resources and heavy reliance on fossil fuels has led to increased greenhouse gas emissions, causing global warming and altering climate systems.

First: The impact of unsustainable activities on climate change

Since the Industrial Revolution, the world has witnessed a dramatic increase in the use of coal, oil, and natural gas for energy generation, powering factories, and transportation. The combustion of these resources has released vast quantities of greenhouse gases, particularly carbon dioxide (CO_2), which is the primary contributor to global warming.

Unsustainable activities lead to:

1. Increased concentration of greenhouse gases in the atmosphere. These gases trap infrared radiation emitted from the Earth's surface, leading to a rise in the average global temperature.

2. Deforestation and degradation of ecosystems. Forests are one of the most important natural carbon sinks, absorbing carbon dioxide from the atmosphere through photosynthesis. Therefore, deforestation reduces the Earth's ability to regulate the climate.

3. Excessive resource consumption. The depletion of natural resources and increased unregulated industrial production lead to increased energy and water consumption and higher carbon emissions.

4. Increased waste and pollution. Some organic waste decomposes in landfills, producing methane (CH_4), a potent greenhouse gas with a high potential to warm the atmosphere.

Second: The Role of Sustainability in Mitigating Climate Change

Sustainability is one of the most important global solutions for addressing climate change, as it relies on achieving a balance between economic development and environmental protection. Sustainability mechanisms for combating climate change include the following:

1- Transitioning to Renewable Energy

Reducing reliance on fossil fuels is one of the most important climate sustainability strategies, through the use of:

• Solar energy.

• Wind energy.

• Hydropower.

• Sustainable bioenergy.

These sources are characterized by their lower carbon emissions compared to traditional energy sources, which contributes to reducing the carbon footprint of societies.

2- Sustainable Water Management

Climate change directly impacts water resources through:

• Increased drought.

• Altered rainfall patterns.

• Increased evaporation rates.

• Deteriorating water quality.

Therefore, sustainable water management relies on modern technologies such as:

• Reuse of treated wastewater.

• Bioremediation using algae and microorganisms.

• Nanomembrane technologies.

• Photocatalytic treatment of organic pollutants.

These technologies contribute to reducing freshwater consumption and lowering the energy used in treatment processes.

Third: Nature-Based Sustainability and Addressing Climate Change

Nature-based solutions are a modern trend in climate sustainability and include:

• Reforestation of degraded areas.

• Protection of wetlands.

• Restoration of marine ecosystems.

• The use of microorganisms and algae for carbon sequestration.

Algae, for example, absorb carbon dioxide during photosynthesis, making them an important topic in sustainability research related to carbon sequestration, biomass production, and clean energy.

Carbon dioxide capturing methods

The carbon reduction in microalgae culture was revealed by the microalgae's direct fixation of carbon dioxide from the atmosphere,

due to the limited concentration of carbon dioxide in the atmosphere and the low coefficient of mass transfer between the culture surface and air. Thus, carbon dioxide must be supplied as a pure gas or by mixing it into the combustion gases.

The main chemical methods of carbon dioxide capture are: post-combustion, pre-combustion, and oxygen combustion. The most promising method is the pre-combustion process, due to its lower energy requirements, compared to other means, by obtaining carbon dioxide from fuel gas streams through a variety of physical and chemical techniques, which may involve several separation steps. (Feron and Hendriks, 2005; Benson and Surles, 2006).

The most common physical techniques include: chemical absorption, cryogenic fractionation, membrane separation, and adsorption Molecular sieves (Herzog et al., 2004). The most important process, despite its toxicity and corrosiveness to amines, is the chemosorption based on amino solvents. (Fernández *et al*., 2012).

To avoid the emission of most CO2 to the atmosphere by direct injection of flue gases into a microalgae culture, it is important to design and operate the appropriate carbonation process. Thus, the composition of flue gases according to their origin (chemical industry, cement, natural gas, coal) indicates that carbon dioxide is not the only content in the atmosphere, but also other compounds such as sulfur oxides, nitrogen oxides and carbon dioxide are more subject to change (Fernandez et al., 2012), as well as water vapor,

oxygen (O2) and nitrogen (N2). Of all these emissions, so the massive increase in anthropogenic carbon dioxide concentration is a global concern(Yang and Gao, 2011).

The role of carbon dioxide in increasing the mass of microalgae

Microalgae are mostly found in wet places or water bodies and are essential in terrestrial as well as aquatic environments. More than 70,000 species of algae have been identified but most of them are not suitable for human needs. Algae can be grown under conditions that are not suitable for the production of typical crops such as soybeans and others. Algae have the ability to fix carbon dioxide in the climate and help reduce the expansion of carbon dioxide levels in the air, which is an important global issue (Singh and Singh 2014).

so it is considered Carbon (C) is the most important element for microalgal growth, followed by nitrogen (N) and phosphorus (P) (microalgal biomass contains approximately 50% of carbon, which is all derived from CO2). Accordingly, the production of 1 g of microalgal biomass corresponds to a CO2 fixation of approximately 1.83 g, which means that these microorganisms can be effectively applied in capture CO2 (Cheah *et al*., 2015). Microalgae can fix CO2 from both the atmosphere or flue gas emissions. The use of atmospheric CO2 allows higher flexibility when selecting the location of the microalgal facility, since it does not need to be located close to a CO2 emission source and it does not require CO2 transporting

systems (moreira and pires 2016). Several studies have reported the use of microalgae in CO2 capture from the atmosphere (Arbib *et al*., 2014). only a few studies have reported the use of real flue gases for microalgal growth. When growing *Chlorella* sp. in an outdoor open thinlayer PBR using a flue gas containing 6–8% of CO2, have reported CO2 removal efficiencies between 10 and 50% (Li-Y *et al*. ,2011) when growing *Scenedesmus obliquus* in a flue gas containing 6–18% of CO2. Furthermore, some authors have referred that native species isolated near thermal power plants are the best candidates for capture CO2 from these gaseous streams.

Potential uses of the microalgae biomass

The culturing of microalgae for CO2 absorption is an expensive process. However, it can be made economically viable if the biomass produced is used both for carbon mitigation and for other purposes. Algae biomass could play an important role in supplying food security for both animals and humans. Microalgae have high nutritional value because of the wide range of essential nutrients such as provitamins, minerals and polyunsaturated fatty acids they provide (Pandey and Tiwari, 2010). *Chlorella, Spirulina, Scenedesmus* and *Caelastrum* have a protein

content of 60%, while 18 of the 22 known amino acids are found in these microalgae (Brown, 1996). They contain essential amino acids, including those containing sulphur, which are usually missing from most human diets (Kolb *et al*., 2004). They are also a rich source of polyunsaturated fatty acids, which include omega 3 fatty

acids, hexadecatrienoic acid methyl ester octadecatetraenoic acid methyl ester, eicosapentaenoic acid methyl ester, docosahexaenoic acid methyl ester, arachidonic acid and γ-linolenic acid (Spolaore *et al*., 2006). Microalgae are regarded as a good source of protein for humans, animals and fish grown in aquaculture hatcheries. Nevertheless, microalgae grown in the effluent from wastewater treatment plants should not be used for consumption by humans, animals or fish, as they may contain a variety of contaminants, ranging from heavy metals and pesticide residues to pathogenic bacteria and viruses, Microalgae also contain bioactive compounds that are effective medicinally (Gustafson, 2004). Several of these, such as lipid anti-oxidants, β-carotene, sterols and toxins, make algae a good source of nutraceuticals (Rasmussen *et al*., 2007). The therapeutic action of treatments based on microalgae on diseases associated with oxidative stress has attracted a great deal of attention (Chen *et al*., 2009). Microalgae can be used to treat a range of medical conditions because of their properties. For example, they are anti-bacterials, bronchodilators, polysynaptic blockers and analgesics, and prevent odema, convulsions and inflammation , The chemicals found in algal biomass host that can be exploited industrially to generate revenue. Microalgae also produce sugars, polysaccharides, dyes, bioflocculants, pigments and oils (Pereira *et al*., 2009). Other valuable chemicals include phycobiliproteins, which are fluorescent dyes used in certain immunoassay and cell separations and asthaxanthin, lutein,

zeaxanthin, lycopen and bixin, which are useful components of food colourants, cosmetics and pharmaceutical products (Chen *et al*., 2009).

Fourth: Sustainability and Adaptation to Climate Change Impacts

The relationship between sustainability and climate is not limited to reducing emissions; it also includes adapting to current and future climate impacts.

Adaptation strategies include:

• Developing drought-resistant agriculture.

• Improving water resource management.

• Building sustainable cities that are resilient to flooding and rising temperatures.

• Developing early warning systems for climate-related disasters.

Fifth: The Role of Technology and Innovation in Achieving Climate Sustainability

Scientific innovation has become a fundamental element in achieving sustainability goals. Among the most important modern technologies are:

1- Green Nanotechnology

This technology utilizes nanomaterials manufactured using environmentally friendly methods to improve pollutant treatment and reduce energy and chemical consumption.

Example:

• Manufacturing silver nanoparticles using algal extracts.

• Using them to remove dyes and pharmaceutical contaminants from water.

2- Advanced Photocatalysis

This technology relies on the use of nano-catalysts to produce reactive oxygen species capable of breaking down polluting organic compounds into less harmful compounds.

3- Biotechnology

Such as using algae and bacteria in:

• Pollutant removal.

• Biofuel production.

• Carbon dioxide sequestration.

Second topic: Climate Change and its Environmental Effects

Environmental Impacts of Climate Change

Climate change affects all components of the ecosystem due to the continuous alteration of fundamental climatic conditions such as temperature, humidity, precipitation rates, and levels of solar radiation. Ecosystems are characterized by interconnected relationships between living organisms and non-living factors; therefore, any climatic disturbance can lead to a cascade of effects that impact the stability and sustainability of the environment.

1- The Impact of Climate Change on Water Resources

Water resources are among the most affected environmental sectors by climate change, as rising temperatures and altered rainfall patterns disrupt the natural water cycle.

A- Reduced Availability of Freshwater

Rising temperatures cause increased evaporation rates from water bodies and soils, leading to a decrease in the amount of available water in some areas, especially arid and semi-arid regions.

These impacts manifest through:

• Decreased river and lake levels.

• Reduced groundwater recharge.

• Increased competition for water resources among different sectors.

The Middle East and North Africa region is among the most vulnerable to water scarcity due to rising temperatures, low rainfall, and increasing population demand.

B. Changes in Water Quality

Climate change affects not only the quantity of water but also its quality.

Rising temperatures lead to:

• Increased growth of harmful algae in lakes and reservoirs.

• Decreased oxygen solubility in water.

• Increased likelihood of eutrophication.

Flooding also leads to the transport of pollutants such as:

• Heavy metals.

• Pesticides.

• Organic pollutants.

• Untreated wastewater.

into surface and groundwater sources.

C. Impact of Climate Change on Wastewater Treatment

Climate change affects wastewater treatment technologies due to alterations in wastewater properties resulting from:

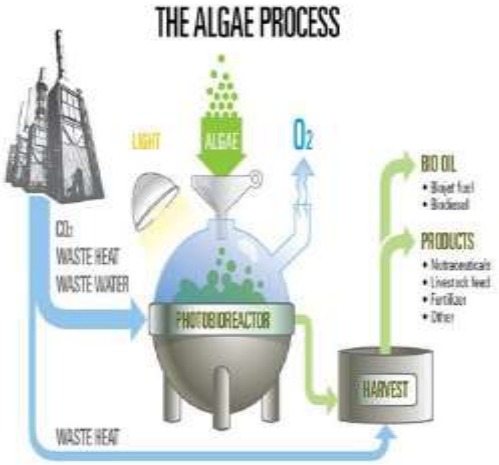


Figure (6) Techniques for wastewater treatment using algal reactors

• Temperature changes.

• Changes in pollutant concentration.

• Increased organic loads during flooding.

Therefore, sustainable technologies such as:

• Bioremediation using algae.

• Nanomembranes.

• Photocatalytic nanomaterials.

• Advanced oxidation processes.

are emerging as modern solutions for treating polluted water while reducing energy consumption.

2- The Impact of Climate Change on Soil

Soil is a complex ecosystem containing minerals, microorganisms, and organic matter. It is essential for food production and regulating the carbon cycle.

Climate change affects soil through several mechanisms:

A- Soil Fertility Deterioration

High temperatures and drought lead to:

• Reduced soil moisture content.

• Accelerated decomposition of organic matter.

• Nutrient loss.

Increased rainfall also leaches minerals from the soil and reduces its fertility.

B- Increased Desertification

Desertification is one of the most serious consequences of climate change. It occurs as a result of:

• Reduced vegetation cover.



Figure (7) Desertification and its effects on agriculture

• Increased evaporation rates.

• Persistent drought.

• Poor land management.

Desertification leads to:

• Loss of agricultural land.

• Reduced food production.

• Degradation of ecosystems.

C- The Role of Soil in the Carbon Cycle

Soil is an important carbon sink, containing large quantities of organic carbon.

When temperatures rise:

• The rate of decomposition of organic matter increases. Carbon dioxide is released into the atmosphere.

The soil's ability to store carbon is weakened.

This leads to a feedback loop that exacerbates climate change.

3- The Impact of Climate Change on Agriculture and Food Security

The agricultural sector is directly dependent on climatic conditions, making it one of the most sensitive sectors to climate change.

A- Reduced Crop Productivity

Increased heat and drought affect:

• Photosynthesis

• Plant growth

• Crop productivity

High temperatures may reduce the production of important crops such as:

• Wheat

• Rice

• Corn

• Barley

B- Spread of Agricultural Pests

Higher temperatures allow for the expansion of the spread of some:

• Agricultural insects

• Plant pathogens

• Fungi

This leads to increased use of chemical pesticides and their impact on the environment.

C- Changes in Agricultural Areas

Climate change may cause some crop production areas to shift to cooler regions, while other areas become unsuitable for agriculture due to drought or high temperatures.

4- The Impact of Climate Change on Biodiversity

Biodiversity is fundamental to the stability of ecosystems, as it contributes to:

• Maintaining ecological balance

• Plant pollination

• Water purification • Regulating the carbon cycle.

However, climate change has become one of the biggest causes of biodiversity loss globally.

A. Habitat Changes

Higher temperatures are driving many species to migrate to more climatically suitable areas.

Organisms may face:

• Loss of their natural habitats.

• Difficulty adapting quickly.

• Decline in their populations.

B. Species Extinction

The likelihood of species extinction increases when environmental conditions change more rapidly than organisms can adapt.

Species most affected include:

• Polar organisms.

• Heat-sensitive marine species.

• Plants with narrow climatic ranges.



Figure (8) Living organisms threatened with extinction as a result of climate change

C. Disruption of Ecosystem Relationships

Climate change affects relationships between organisms, such as:

• Predator-prey relationships.

• Pollination between plants and insects.

• Symbiotic relationships between microorganisms and plants.

This leads to ecological imbalances.

5. Impact of Climate Change on Marine Ecosystems



Figure (9) Deforestation and climate change

Oceans cover more than 70% of the Earth's surface and play a key role in regulating the climate by absorbing heat and carbon dioxide.

However, they face serious impacts due to climate change.

A. Ocean Warming

Warming water temperatures lead to:

• Changes in the distribution of marine organisms.

• Reduced productivity in some marine ecosystems.

• Increased heat stress for organisms.

B. Ocean Acidification

Oceans absorb a large portion of the carbon dioxide in the atmosphere, leading to the formation of carbonic acid and a decrease in the pH of the water.

Ocean acidification causes:

• Impaired shell formation in marine organisms.

• Damage to coral reefs.

• Changes in the composition of marine communities.

C. Coral Bleaching

Coral reefs are among the most sensitive ecosystems to rising temperatures.

When subjected to heat stress, they expel the symbiotic algae that live within their tissues, leading to:

• Loss of color.

• Reduced energy availability.

• Death of large sections of the coral reef.

6. The Impact of Climate Change on Forests

Forests play a key role in mitigating climate change by absorbing carbon dioxide and storing carbon in trees and soil.

However, climate change leads to:

• Increased forest fires.

• The spread of pests.

• Reduced tree growth.

• Loss of biodiversity.

Deforestation and forest fires release large amounts of carbon, exacerbating global warming.

Section Three: Scientific Strategies for Adaptation and Risk Reduction in Light of Environmental and Climatic Changes

Global warming

Global warming is a serious environmental problem. This is generally attributed to an increase in atmospheric concentration of greenhouse gases (GHGs). particularly (CO2) carbon dioxide.

As well as Methane, tropospheric ozone, and chlorofluoro carbons. It is a factor in the long-term heating of Earth’s climate system observed since the pre-industrial period (between 1850 and 1900) due to human activities, primarily fossil fuel increasing the levels of greenhouse gases that trap heat in the Earth's atmosphere. (Owen *et al*., 2010).

Carbon dioxide is considered a hazardous gas in the atmosphere as it is mainly responsible for changing (60% to 63%) of different layers of the atmosphere from 1979 to 2004 (Singh and Singh, 2014).

So anthropogenic carbon dioxide (CO2) emissions, which are now largely from fossil fuel combustion also from terrestrial carbon stocks from land use change, have increased the atmospheric CO2 concentration (Rutherford et al., 2018). Excessive radiative forcing from rising emissions of carbon dioxide and other greenhouse gases (GHGs) is already disrupting the climate in many ways. Damage includes ice cover and glacier, sea level rise, extreme weather, ocean acidification, greater variability in agricultural and forest production, including risks of crop failure, damage to ecosystems, spread of disease, and other risks to humans and other life forms (Stocker *et al.*, 2013).

Familiar alternative renewable energy technologies and methods, such as solar, wind, ocean, geothermal, bioethanol, biodiesel, wood or hydrogen have potential for recycling and low pollution impact (Kaithwas *et al*., 2012).

for that Renewed interest in biofuels has been reflected in the rapid expansion of global biofuel markets in the last five years , But what is new about this renewed interest and what makes biofuels a serious option for partially replacing oil as a transport fuel are their alleged reduced greenhouse as (GHG) emissions. This would help countries to combat the global warming problem and would enable them to comply with the commitments under the Kyoto Protocol. In addition, the Brazilian experience shows that biofuels can deliver export opportunities and rural development.(Krishnan and Mudeva , 2005)

that Biofuels have been around for a long time, but petroleum and coal have been used primarily as energy sources due to their high abundance,

high energy value, and cheap prices. Fossil fuels such as coal and petroleum also come from biomass but the difference is that they took millions of years to produce. Biofuels are making a resurgence due to increasing oil prices, dwindling fossil fuel reserves, the desire to have a renewable, reliable source of energy and as a way to mitigate the effects of climate change. Biofuels are a renewable resource because they are continually replenished. Fossil fuels on the other hand are not renewable since they require millions of years to form.

Biofuels come from modern living organism's things over a short period of time, differing with fossil fuels also in the same way, through the decomposition of organic matter, but over many many

years (Alaswad *et al*., 2015). In addition, biofuels do not lead to acid rain and have few adverse effects on the environment because they contain less sulfur and reduce carbon dioxide emissions.

Biofuels are drawing increasing attention worldwide as substitutes for petroleum-derived transportation fuels to help address energy cost, energy security and global warming concerns associated with liquid fossil fuels. The term biofuel is used here to mean any liquid fuel made from plant material that can be used as a substitute for petroleum-derived fuel. Biofuels can include relatively familiar ones, such as ethanol made from sugar cane or diesel-like fuel made from soybean and algae. oil, to less familiar fuels such as dimethyl ether (DME) or Fischer-Tropsch liquids (FTL) made from lingo cellulosic biomass. (Koonin,2006).

Drought and Water Scarcity Adaptation Strategies

Drought is one of the most impactful environmental risks to natural systems and human societies. It results from prolonged periods of low rainfall, rising temperatures, and increased evaporation rates, leading to a decrease in surface and groundwater resources.

The severity of drought increases with ongoing climate change, particularly in arid and semi-arid regions, where it directly affects agriculture, food security, biodiversity, and public health.

Addressing drought relies on a set of integrated scientific strategies, including:

1- Integrated Water Resources Management (IWM)

Integrated water management is one of the most important modern approaches to achieving water security. It relies on managing water in a way that balances human needs with the preservation of ecosystems.

This management includes:

• Assessing available water resources.

• Reducing water loss.

• Regulating water use in different sectors.

• Protecting water sources from pollution.

The success of this strategy depends on integrating hydrological science, environmental engineering, and modern monitoring technologies.

2- Water Conservation Technologies

Improving water use efficiency helps mitigate the effects of drought by reducing waste and increasing water productivity.

Among the most important technologies are:

a- Drip Irrigation

Drip irrigation is one of the most efficient technologies, as it delivers water directly to the plant's root zone, thus reducing water loss due to evaporation and surface runoff.

b- Precision Agriculture

This relies on the use of:

• Ground-based sensors.

• Satellite imagery.

• GPS systems.

To accurately determine the amount of water and fertilizer required for each agricultural area.

This technology leads to:

• Reduced water consumption.

• Increased agricultural production.

• Reduced soil and water pollution.

3- Water Reuse and Treatment

Reusing treated wastewater is one of the most important strategies for adapting to water scarcity, as it provides an additional water source and reduces pressure on natural resources.

Water treatment technologies include:

a- Biological Treatment

This relies on the use of:

• Bacteria.

• Algae.

• Microorganisms.

To break down organic compounds and remove pollutants. B. Nanofilm Technologies

Nanopore-sized membranes are used to remove:

• Heavy metals.

• Salts.

• Microorganisms.

They are highly efficient compared to traditional methods.

• Using bioreactors for biological mitigation and reducing the most dangerous greenhouse gases

Types of Bioreactors:

1- Serpentine Photobioreactors

They consist of straight tubes connected by U-bends to form a flat loop (the photostage) that may be arranged either vertically or horizontally (Chini Zittelli *et al*., 2013). Gas exchange and nutrient addition normally take place in a separate vessel and culture circulation (at flow rates between 20 and 30 cm s −1) is achieved by a pump or an airlift (Tredici *et al*., 2010). developed a tubular photobioreactor for the production of *Arthrospira* . It consisted of flexible polyethylene sleeves 14 cm in diameter and 0.3 mm think connected each other by PVC (polyvinylchloride) bends to form a loop, each bend incorporating a narrow tube for oxygen release. The pilot plant was composed of two units (500 m long, volume 8 m 3 , surface area of 80 m 2).A similar design of tubular photobioreactor for mass culture of *Portphyridium* was also developed by(Gudin and Chaumont , 1983). The loop was made made of polyethylene G. Torzillo and G. Chini Zittelli tubes of 6.4 cm diameter and 1500 m length. The temperature manipulate of the way of life was once carried out via both foating or submerging the top layer on or in a pool crammed with water by way of adjusting the quantity of air in

the tubes of the decrease layer.In the current years, PBRs of this kind are being operated with the aid 18

of Molina Grima and co-workers in Spain (Molina et al .,1999). The structures consist of a tubular photostage,made of Plexiglas tubes (from 2.6 to 5 cm in diameter) joined to shape about 100-m lengthy horizontal loop, which is linked to a 3–3.5-m excessive airlift the place dissolved oxygen, pH and temperature probes are inserted. The Spanish team (Almeria) has carried out widespread lookup recreation with serpentine PBRs on the affect of the primary variables that alter increase of photosynthetic cells, amongst which common irradiance, gas–liquid mass transfer, temperature control, fluid dynamics and mixing ,and the Figure (10) shows that.



Figure (10) Vertical tubular serpentine photobioreactor developed by the Department of Chemical Engineering of the University of Almeria (Spain) (Acien et al.,2013).

2- Manifold Photobioreactors

In manifold PBRs, a collection of parallel tubes is related at the ends by means of two manifolds, one for distribution and the different for series of the lifestyle suspension. The main advantages of these structures over serpentine loop PBRs are the discount of head losses and decrease oxygen concentrations (due to the distance of suspension float between the tube inlet and degasser), two elements that facilitate scale-up to industrial measurement (Tredici *et al*. 2010). for the first time, devised a system made of parallel sets of 20-m-long tubes connected by manifolds in which the culture was circulated by an airlift. Productivities of 0.55 g were attained with *Arthospira.* Tredici and co-workers developed the Near-Horizontal Tubular Reactor (NHTR), with tubes inclined from 5 to 20° to the horizontal so that mixing could be achieved by air bubbling (Tredici *et al*., 2010(Besides simplicity of operation and low protection cost, this inner internal gas exchange PBR has different benefits amongst which low shear stress and decreased wall fouling due to the scouring impact of the fuel bubbles. The size of tubes is, however, restricted to about (40 m) due to decreased mass switch (Babcock *et al*., 2002). the microalgae are grown in a greenhouse covering 1.2 ha with a total cultivation volume of around 600 m 3 , distributed in 500 km of tubes , and the Figure (11) shows that.



Figure (11): Tubular manifold photobioreactors installed, Tubular manifold photobioreactors installed at Roquette Klötze & Co. KG (Germany) .

3- **Helical Photobioreactors**

Helical PBRs consist of small-diameter flexible tubes wound round an upright assisting structure. This layout was once used in the Fifties to develop *Chlorella* sp. and later adopted by way of (Jüttner , 1982). A 120-l helical bubble PBR was once used to develop *Anabaena siamensis* and *A. platensis* outdoors. With *A. platensis* , a imply volumetric productiveness of 0.9 g l −1 d −1 and a photosynthetic efficiency (PE) of 6.6 percent (PAR) have been completed (Tredici and Chini Zittelli, 1998).A *Biocoil* consisting of a photostage of polyethylene or PVC tubing (between 2.5and 5 cm diameter) wound helically around a cylindrical support (8 m in height with a core diameter of 2 m) , Several parallel bands of tubes have been linked by means of manifolds to the pumping system,

permitting greater even glide and shorter tube length for that reason minimizing oxygen build-up (Tredici et al., 2010). A warmness trade or evaporative cooling supplied temperature control. Several marine species and the cyanobacterium *Arthrospira* sp. have been cultivated in 1000-l *Biocoil* in Perth, Western Australia (Borowitzka ,1999). However, restricted dialogue of the *Biocoil* in the course of latest years suggests that it no longer has sizable workable of use. A conical, rather of cylindrical, framework has additionally been suggested, as it improves the spatial distribution of tubes for daylight seize (Morita et al., 2000). Small conical *Biocoil* devices have been and are being operated in most cases for experimental and educating functions (Raes *et al*., 2014).

4- Tubular PBRs for Special Applications

A tubular serpentine PBR that makes use of condensed photo voltaic radiation has been setup at the Academic and University Centre of Nové Hrady (Masojídek et al., 2003). The PBR is based totally on photo voltaic concentrators, established in a climate-controlled greenhouse, that focal point the direct factor of incident daylight on the cultivation tubes. The cultivation unit (a 24-m long loop made of six parallel horizontal glass tubes related through U-bends) is positioned on a movable frame, which allows computerized focusing of direct photo voltaic irradiance. The PBR has been used to find out about acclimation of microalgae to supra-high photo voltaic irradiance ,since irradiance values as a lot as 3.5 instances the naturally reachable are carried out (Masojídek et al.,

2003). Based on this first design, an improved, two-stage PBR consisting of two vertical and two inclined units, used to be developed and examined , and the Figure (12) shows that. (Masojídek *et al*., 2009).



Figure (12) Tubular serpentine photobioreactor based on solar concentrators – linear Fresnel lenses developed at the Center for Biotechnology, University of South Bohemia, Nové Hrady (Czech Republic) .

With the novel 450-l PBR it is possible to carry out a two-stage process of biomass production: (i) growth of the selected microalga under lower irradiances in the vertical units, and (ii) exposure of the culture to supra-high irradiance in the inclined units. This process has been tested for the production of *H. pluvialis* : the green phase in vertical and the red phase in the inclined units (Masojídek *et al*., 2009). The system allows to cultivate microalgae at much higher irradiance than that naturally available, which may be useful at high

latitudes, and exposes the culture at ultrahigh irradiance necessary to induce stress and achieve high-value product accumulation (pigments, superoxide-dismutase, etc.).The main limitation of the technology is the high cost of the PBR, about €1,000 m−2 ,comprising glass tubes, Fresnel lenses, light tracking system, degasser, heat exchanger, pump, sensors, and control box (Masojídek *et al*., 2003).To circumvent the problem of light saturation effect, which is actually a great drawback in microalgal biotechnology, Torzillo and co-workers have recently proposed a new tubular PBR design in which the culture tubes are arranged on an 8 × 8 square pitch cell connected by U-bends and immersed in a light scattering silica nanoparticle suspension (Giannelli and Torzillo, 2012)**.**

Different forms of algal reactors used worldwide:

Closed algal growth systems, known as bioreactors, can be classified as photobioreactors (PBR). PBRs are closed (or almost closed) vessels for phototrophic algal cultivation where light is supplied either directly by the sun or via artificial sources such as LEDs. While a typical open pond system is open to the environment on at least its top surface, in closed systems the exchange of liquid, gas, biologics, dust, and solids input and output from the system are carefully controlled. Typically, closed systems also direct the circulation of the algal culture to maximize the evenness of the culture’s exposure to natural or artificial light. Since all liquid and gas streams have to be brought in and out of the bioreactor via pumps or

bubbling pressure, the energy requirements for this type of culture can be higher. However, a PBR typically produces a denser culture, which requires less energy to extract algal oils from the remaining solids, and environmental contamination is also minimized. Maintaining and optimizing water chemistry is easier in a closed system that is not exposed to rain and evaporation. The geometric configuration of closed PBRs is often designed for efficient utilization of natural light. Through a variety of methods, light is more evenly distributed through the growth media in PBRs than in open pond systems. Maximum daily volumetric harvest rates on the order of 40% and dry biomass concentrations up to 5 g/L (dry basis) are feasible (for tubular PBRs). (Ungerer *et al*., 2012) High algal biomass concentrations lead to increased harvest yields and faster and more economical down-stream processing. Closed systems vary widely in size, material, shape, and technical principles of operation, and the Figure (13) shows that.



Figure (13): Different forms Tubular photobioreactors used worldwide.

Algae as a source of Biofuel:

Microalgal oil is presently being regarded as a promising choice feedstock for biodiesel. The existing demand for oil for biofuel production considerably exceeds the supply, hence alternative sources of biomass are required. Microalgae have countless blessings over land-based plants in phrases of oil production. Their simple unicellular shape and excessive photosynthetic efficiency permit for a potentially higher oil yield per location than that of the quality oilseed crops. Algae can be grown on marginal land use of brackish or salt water and as a result do now not compete for resources with traditional agriculture. They do not longer require herbicides or pesticides and their cultivation should be coupled with the uptake of CO2 from industrial waste streams, and the elimination of excess nutrients from wastewater (Hodaifa *et al*., 2008). In addition to oil production, potentially valuable Co-products such as pigments, antioxidants, nutraceuticals, fertilizer or feeds ought be produced (Mata *et al*., 2010). Despite these advantages, algal gas is not longer presently in enormous use, generally due to its high cost of production (Chisti, 2007).

Despite robust commercial from the industrial and scientific sectors, there are presently no industrial facilities producing biodiesel from algae (Lardon *et al*., 2009). One of the main financial and technological bottlenecks in the system is biomass and lipid production by the algae (Tsukahara and Sawayama, 2005).

Productive strains and optimized lifestyle stipulations in a position to produce cells with a simultaneously high growth rate and lipid content material are required. The high cost and energy demand of harvesting unicellular algae also remains a major challenge. The small cell size (often < 10 µm in diameter) and dilute biomass produced requires innovative solutions to minimize the consumption of water and energy as well as processing costs (Rodolfi *et al*., 2009).

References

1. Acien Ferna´ndez , F. G. Ferna´ndez Sevilla ,J. M. and Molina Grima, E.(2013). Photobioreactors for the production of microalgae, Rev Environ Sci Biotechnol , 12:131–151

2. Alaswad, A., Dassisti, M., Prescott, T. and Olabi, A., (2015). Technologies and developments of third generation biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 51**,** 1446-1460.

3. Arbib Z, Ruiz J, Álvarez-Díaz P, Garrido-Pérez C, Perales JA (2014) Capability of different microalgae species for phytoremediation processes: wastewater tertiary treatment, CO2 bio-fixation and low cost biofuels production. Water Res 49:465–474.

4. Babcock RW, Malda J, Radway JC (2002) Hydrodynamics and mass transfer in a tubular airlift photobioreactor. J Appl Phycol 14:169–184.

5. Benson, S. M. and Surles, T., (2006). Carbon dioxide capture and storage: An overview with emphasis on capture and storage in deep geological formations. *Proceedings of the IEEE,* 94**,** 1795-1805.

6. Borowitzka MA (1999) Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters.J Biotechnol 70:313–321.

7. Brown, M.R.; Dunstan, G.A. Norwood, S.J. and Miller, K.A. (1996).Effects of harvest stage and light on the biochemical composition of the diatom *Thalassiosira pseudonana.* J. Phycol. (32): 64-73.

8. Cheah, W.Y. Show, P.L. Chang, J.S. Ling, T.C. Juan . J.C. (2015) Biosequestration of atmospheric CO2 and flue gas-containing CO2 by microalgae Bioresour. Technol., 184 , pp. 190-201.

9. Chen, P., Min M., Chen, Y., Wang, L., Li, Y., Chen, Q., Wang, C., Wan, Y., Wnng, X., Cheng, Y. B., Deng, S., Hennsey, L .X., Liu, Y., Wang, Y., Martnez,

B., and Ruan Y., (2009) “Review f Biological and Engineering aspects of algae to fuels approach, International Journal of Agriculture. and Biological Engineering, 2, 4, pp.1-30.

10. Chini Zittelli G, Biondi N, Rodolfi L, Tredici MR (2013) Photobioreactors for mass production of microalgae. In: Richmond A, Hu Q (eds) Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology, 2nd edn. Wiley, Oxford, pp 225–266.

11. Chisti, Y. (2007). Biodiesel from Microalgae. Biotechnology Advances, 26(3):294-306.

12. Fernández, F. G. A., González-López, C., Sevilla, J. F. and Grima, E. M., (2012). Conversion of CO2 into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO2 removal? *Applied microbiology and biotechnology,* 96**,** 577-586.

13. Feron, P. and Hendriks, C., (2005). CO2 capture process principles and costs. *Oil & Gas Science And Technology,* 60**,** 451-459.

14. Giannelli L, Torzillo G (2012) Hydrogen production with the microalga *Chlamydomonas reinhardtii* grown in a compact tubular photobioreactor immersed in a scattering nanoparticle suspension.Int J Hyd Energy 37:16951–16961**.**

15. Gudin C, Chaumont D (1983) Solar biotechnology study and development of tubular solar receptors for controlled production of photosynthetic cellular biomass for methane production and specifi c exocellular biomass. In: Palz W, Pirrwitz D (eds) Energy from biomass. D. Reidel, Dordrecht, pp 184–193.

16. Gustafson, K. R., Oku, N., and Milanowski, D. J.,(2004) “Anti-Infective Agents”. Curreent. Medicinal Chemistry, 3, pp. 233.

17. Herzog, H. and Golomb, D., (2004). Carbon capture and storage from fossil fuel use. *Encyclopedia of energy,* 1**,** 277-287.

18. Hodaifa, G, Martínez, M & Sánchez, S. (2008). Use of industrial wastewater from olive-oil extraction for biomass production of Scenedesmus obliquus. Bioresource Technology, 99(5):1111-1117.

19. Kaithwas, A., Prasad, M., Kulshreshtha, A. and Verma, S., (2012). Industrial wastes derived solid adsorbents for CO2 capture: A mini review. *Chemical Engineering Research and Design,* 90**,** 1632-1641.

20. Kolb, N., Vallaroni, L., Milanovic, N., and Stocchi, V., (2004) “Evaluation of marine algae wakame (Undaria pinnatifida) and Kombu (laminaria digitata japonica) as food suppliments”, Food technology and Biotechnology, 421, pp. 57-67.

21. Koonin Steven (2006) ‘Getting Serious About Biofuels’ Science 311 (5760): 435, 27 January.

22. Krishnan B and Mudeva A (2005) Palm Oil seen playing a role in EU Biofuels, Planet Ark available at www. planetark. org/avantgo/daily newsstory.cfm 33265.

23. Lardon, L, HeÌ lias, A, Sialve, B, Steyer, JP & Bernard, O. (2009). Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. Environmental science & technology, 43(17):6475-6481.

24. Li-Y, Chen Y, Chen P, Min M, Zhou W, Martinez B, Zhu J, Ruan R (2011) Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. Bioresour Technol 102:5138–5144.

25. Masojídek J, Papáček S, Sergejevová M, Jirka V, Červený C, Kunc J, Korečko J, Verbovikova O,Kopecký J, Štys D, Torzillo G (2003) A closed solar photobioreactor for cultivation of microalgae under supra-high irradiance: basic design and performance. J Appl Phycol 15:239–248**.**

26. Masojídek J, Sergejevová M, Rottnerová K, Jirka V, Korečko J, Kopecký J, Zaťková I, Torzillo G,Štys D (2009) A two-stage solar photobioreactor for cultivation of microalgae based on solar concentrators. J Appl Phycol 21:55–63**.**

27. Mata, TM, Martins, AA & Caetano, NS. (2010). Microalgae for Biodiesel Production and Other Applications: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1):217-232.

28. Molina Grima E, Acién Fernández FG, Camacho G, Chisti Y (1999) Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scale-up. J Biotechnol 70:231–247.

29. Moreira,D and Pires .(2016). Atmospheric CO2 capture by algae: Negative carbon dioxide emission path, Bioresource Technology,Volume 215,Pages 371-379.

30. Morita M, Watanabe Y, Saiki H (2000) Investigation of photobioreactor design for enhancing the photosynthetic productivity of microalgae. Biotechnol Bioeng 69:63–668**.**

31. Owen, N. A., Inderwildi, O. R. and King, D. A., (2010). The status of conventional world oil reserves—Hype or cause for concern? *Energy policy,* 38**,** 4743-4749.

32. Pandey, J. P., and Tiwari, A., (2010) “Optimization of Biomass Production of Spirulina maxima”, Journal of algal Biomass Utilization, 1, 2, pp. 20-23.

33. Pereira, S., Zille, A., Micheletti, E., Maradas-Ferreira, P., De Phillipis, R., and Tumagnin, P., (2009) “Complexity of cyanobacterial expolyssacharides, composition structures, inducing factors and putative genes involved in their biosynthesis and assembly.” FEM Microbiology Reviews, 33, 5, pp. 917-941.

34. Raes EJ, Isdepsky A, Muylaert K, Borowitzka MA, Moheimani NR (2014) Comparison of growth of *Tetraselmis* in a tubular photobioreactor (Biocoil) and a raceway pond. Appl Phycol 26:247–255**.**

35. Rasmussen, R. S., and Morrissey, M. T., (2007) “Marine Biotechnology for production Fof food ingredients, Advances in food and nutrition research, 52, pp. 237- 292.

36. Rodolfi, L, Chini Zittelli, G, Bassi, N, Padovani, G, Biondi, N, Bonini, G & Tredici, MR. (2009). Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor. Biotechnology and Bioengineering, 102(1):100-112.

37. Rutherford, J. S., A. R. Wiegman, J. W. Day and R. R. Lane, (2018). Energy and Climate–Global Trends and Their Implications for Delta Restoration. Mississippi Delta Restoration*. Springer*, 77-92.

38. Singh, S. and Singh, P., (2014). Effect of CO2 concentration on algal growth: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 38**,** 172-179. Singh, S. and Singh, P., (2014). Effect of CO2 concentration on algal growth: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 38**,** 172-179.

39. Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, Isambert A (2006) Optimization of *Nannochloropsis oculata* growth using the response surface method. J Chem Technol Biotechnol 81:1049–1056.

40. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, B. Bex and B. Midgley, (2013). IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.

41. Tredici MR, Chini Zittelli G (1998) Efficiency of sunlight utilization: tubular versus flat photobioreactors. Biotechnol Bioeng 57:187–197**.**

42. Tredici MR, Chini Zittelli G, Rodolfi L (2010) Photobioreactors. In: Flickinger MC, Anderson S (eds) Encyclopedia of industrial biotechnology: bioprocess, bioseparation, and cell technology,vol 6. Wiley, Hoboken, pp 3821–3838.

43. Tredici, M. R. (2010). Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution. *Biofuels*, *1*(1), 143–162. doi:10.4155/bfs.09.10.

44. Tsukahara, K and Sawayama, S. (2005). Liquid Fuel Production using Microalgae. Journal of the Japan Petroleum Institute, 48(5):251-259.

45. Ungerer J, Tao L, Davis M, Ghirardi M, Maness P, Yu J. (2012).Sustained photosynthetic conversion of CO2 to ethylene in recombinant cyanobacterium Synechocystis 6803. *Energy Environ Sci*;5: 8998–9006.

46. Yang, J., Xu, M., Zhang, X.Z., Hu, Q.A., Sommerfeld, M., Chen, Y.S. (2011). Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance. Bioresour. Technol., 102, 159-165.

الفصل التاسع

فاعلية استراتيجية (POE) في تحصيل طالبات الثاني المتوسط في مادة علم الأحياء

The Effectiveness of the POE Strategy in Biology Achievement among Second Intermediate Female Students

م.م. رشا طارق هاشم

جامعة بغداد - كلية التربية للعلوم الصرفة ابن الهيثم - قسم علوم الحياة - العراق

rasha.t@ihcoedu.uobaghdad.edu.iq

الملخص

يهدف هذا البحث إلى التعرف على فاعلية استراتيجية(poe) في تحصيل طالبات الثاني متوسط في مادة علم الاحياء ، وكذلك الكشف عن طبيعة العلاقة بين المتغيرين. تم تحديد مجتمع البحث من طالبات في المرحلة المتوسطة للدراسة الصباحية التابعة لمديرية تربية بغداد/الرصافة الأولى للعام الدراسي (2025-2026) م. والبالغ عددهم (16.368) طالبة حسب احصائيات شعبة التخطيط.

واختيرت عينة البحث بشكل قصدي المتمثلة بمتوسطة الابداع للبنات،اذ بلغ عددهن(77) طالبة ، وقد وقع الاختيار العشوائي على شعبة (ب) المؤلفة من (37) طالبة لتمثل المجموعة التجريبية ، وشعبة (أ) المؤلفة من (40) طالبة لتمثل المجموعة الضابطة.

ولتحقيق أهداف البحث، اعتمدت الباحثة المنهج التجريبي ذو الضبط الجزئي ، إذ تم بناء أداة البحث وهي الاختبار التحصيلي لمادة علم الاحياء للصف الثاني متوسط، المتكون من (40) فقرة من نوعين من الاسئلة :النوع الاول، اسئلة موضوعية من نوع (اختيار من متعدد) المتكون من (37) فقرة ، والنوع الثاني، اسئلة مقالية المتكونة من (3) فقرات. وتم تطبيقه على عينة من المجتمع الأصلي.

وأظهرت نتائج البحث أن طالبات المجموعة التجريبية يمتلكن تحصيل جيد في مادة علم الاحياء اللاتي درسن وفق استراتيجية (poe) .

الكلمات المفتاحية: استراتيجية POE؛ التحصيل؛ علم الأحياء؛ التعلم النشط؛ المرحلة المتوسطة

Abstract

This research aims to identify the effectiveness of the (poe) strategy in the biology achievement of second-year intermediate students, as well as to reveal the nature of the relationship between the two variables. The research population consisted of female students in the morning program at the intermediate level, affiliated with the Baghdad/Rusafa First Education Directorate, for the academic year (2025-2026).

The total number of female students is (16,368), according to the Planning Department's statistics. To achieve the research objectives, the researcher adopted a quasi-experimental design. The research instrument was an achievement test for second-year middle school biology, consisting of 40 items of two types :(37) multiple-choice questions and (3) essay questions. The test was administered to a sample of the target population.

The research results showed that the students in the experimental group had good achievement in biology who studied according to the (poe) strategy.

Keywords: POE strategy; Achievement; Biology; Active learning; Intermediate education

المبحث الاول : المقدمة

أولاً : مشكلة البحث

تعد الاستراتيجيات الحديثة بالتدريس ومنها استراتيجية (poe)من المتغيرات الجوهرية التي تُسهم في رفع جودة التحصيل الدراسي لمادة علم الاحياء، إذ يعكس مدى تفاعلهم المعرفي والوجداني والسلوكي مع بيئة التعلم والمؤسسة التعليمية. وإن تدريس مادة علم الاحياء في المرحلة المتوسطة يعاني منها الطلبة وذلك لبعض الصعوبات في كثرة المفاهيم العلمية وتفسير الظواهر العلمية.

وتعد احد اسباب تدني التحصيل الدراسي للطلبة في مادة علم الاحياء ، هو عدم التدريب الكاف لمدرسو مادة علم الاحياء على الاستراتيجيات وطرائق التدريس الحديثة في التدريس .

مما يؤدي إلى تدنّي مستوى اكتساب المفاهيم الأحيائية، وضعف القدرة على توظيفها في المواقف التدريسية. وهذا ما لاحظته الباحثة من خلال مناقشة واجراء استبانة استطلاعية لاراء مجموعة من المدرسين الذين يمتلكون خبرة في التدريس لمدة لا تقل عن (5)سنوات في مجال التربية. وكانت اجاباتهم كما يلي :-

1- (95%) من اجابات التدريسين يعتمدون على طرائق التدريس التقليدية .

2- (90%) من اجابات التدريسين ليس لديهم معرفة باستراتيجيات حديثة بطرائق التدريس ومن ضمنها استراتيجية ((poe.

3- (90%) من اجابات التدريسين يؤكدون على وجود ضعف في تحصيل الطلبة لمادة علم الاحياء.

ومن هنا تتحدد مشكلة البحث في السؤال الآتي:-

- ما اثر فاعلية استراتيجية (poe) في تحصيل طالبات الثاني متوسط في مادة علم الاحياء؟

ثانياً: أهمية البحث

زاد الاهتمام في الاونة الاخيرة لما يشهده اليوم عصرنا من التقدم والرُقي والتطور في مجال العلوم المختلفة ، اذ اصبح العالم يمر بثروة من المعلومات في مختلف مجالات العلوم وتطبيقاتها مقترنين بالمجتمع المعاصر خاصة مع عصر النهضة التكنولوجية وكان لهذه التطورات اثر واضح في العملية التعليمية بشكل عام وفي تدريس العلوم بشكل خاص. (سعادة ، 2018، 23)

وتظهر أهمية البحث كذلك في إفادته للمدرسين والمشرفين التربويين، إذ يقدم لهم استراتيجة تدريس حديثة يمكن تطبيقها في تدريس مادة علم الأحياء، ويساعدهم على تنويع أساليب التدريس بما يتناسب مع قدرة الطالبات وميولهن، إضافة إلى تنمية مهارات التفكير العلمي والاستقصاء لديهن. (جابر، 2006)

وتكمن أهمية البحث أيضًا في أهمية مادة علم الأحياء نفسها، إذ تُعد من المواد العلمية الأساسية التي ترتبط بحياة الإنسان والبيئة والكائنات الحية، وتتطلب فهم عميق للمفاهيم والعمليات الحيوية،

لذلك فإن استخدام استراتيجية تدريس حديثة مثل (poe) تساعد الطالبات على فهم المفاهيم العلمية بصورة عملية قائمة على الملاحظة والتفسير، مما يسهم في ترسيخ المعلومات وبقائها مدة أطول في ذاكرتهن.

)عطيه، 2010، 45(

واوضح جوي((Gou,B. ,2003 ان استراتيجية (poe) من افضل الاستراتيجيات في تدريس الاحياء بصيغة نظرية وعملية ، حيث تبدأ بالتنبؤ ثم التفكير النشط في المعطيات في مرحلة الملاحظة والتوصل الى النتيجة وشرحها ،وبالتالي تساعد الطالبات على التفكير البنائي الناقد والاستقصاء العلمي. (Gou,B. ,2003 ,40)

وفي هذا الإطار، تؤدي مدرسات علم الأحياء دوراً تربوياً وعلمياً مهماً في تنمية المفاهيم العلمية لدى الطالبات ، من خلال تمكينهن من اكتساب المفاهيم الأحيائية وفهم العلاقات بين الكائنات الحية والبيئة التي تعيش فيها. فالتدريس الفاعل لمادة الأحياء لا يعتمد على نقل المعلومات، بل على قدرة المدرسات على توظيف المفاهيم العلمية وربطها بخبرات الحياة اليومية .(محمود، 22،(2006

وللتحصيل دور كبير في تكييف المجتمع واطلاعه على معارفهن و مساهمته في بناء علاقات تكسبهن الاحترام و التقدير سعياً لتحقيق الذات ، وعليه فالتحصيل يحظى و بقدر واسع من الاهتمام من لَدُن التربويين ، كونه يمثل مخرجاً اساسياً يقاس عليه مدى نجاح العملية التربوية ، فضلاً عن كونه شرطاً اساسياً في القبول لدراسة أعلى ، وله اهمية كبيرة في التعيين وممارسة النشاط الوظيفي.

) الشمري ، 2011، 4)

ان علم الاحياء من العلوم الطبيعية التي لها علاقة وثيقة بحياة الانسان و المجتمع ، فهو علم يساعد في تسيير العالم وتسخيره لخدمة البشرية من اجل تقدم المجتمع و توفير الرفاهية لافراده)الشحماني ، 2023، (3

لتدريس مادة علم الاحياء اهداف ، ومن اهمها ان نصل بالطالبات الى التدريس الجيد ، ومن اجل ذلك نستخدم استراتيجات وانشطة متنوعة لرفع كفاءة التدريس في المرحلة المتوسطة من خلال خطوات يتبعا المدرس في التنبؤ والملاحظة والتفسير ، الذي يعد اسلوب تفاعلي مميز بين المدرس

والطالبات للاتصال والتفاعل ،ويتيح للطالبات ذوات المستوى العالي تعزيو تعلمهم و توضيح النقاط المهمة في المحتوى الدراسي ، كما يفيد في التعرف على الطالبات الضعاف علمياً واعطائهم الاهتمام الخاص من المدرس . اما المدرسين والمدرسات فإن هذه الطريقة تمكنهم من التعرف على جوانب النجاح في برامجهم وخططهم واسلوبهم في التدريس، ومعرفة نواحي القصور فيها.

(ابو جلالة ،1999، 228)

ويمكن إيجاز اهمية البحث فيما يلي:-

1-يُسهم هذا البحث المتواضع لما يُنادى به التربويون في الوقت الحاضر من ضرورة تحسين طرائق تدريس العلوم ، وفي الوقت نفسه ربطها بنتائج التحصيل الدراسي لديهم .

-2يعُد هذا البحث مُهماً للتطبيق في المرحلة المتوسطة ، لانها مرحلة بداية المراهقة ، إذ تصاحب هذه المرحلة التغيرات النفسية والجسدية للطالبات ، وتحتاج الطالبات الى رعاية كاملة وذلك لوجود مشكلات مُصاحبة لهذه المرحلة.

-3يقدم هذا البحث المساعدة لواضعي مناهج علم الاحياء ، بتزويدهم بنتائج حقيقية عن مستوى الطالبات عند اعتماد طرائق واستراتيجيات تدريسية حديثة ، لكي يتم بناء مفردات مقررات دراسية بما يتفق مع الاهداف الحديثة لتدريس علم الاحياء.

-4يمكن أن تسهم نتائج البحث في توجيه سياسات التنمية المهنية للمدرّسات نحو تعزيز روح الانتماء المهني والاهتمام بالتحسين المستمر للأداء التدريسي.

-5زيادة وعي الطالبات بما يدرسن ومدى تعلمهن على النحو الافضل من مفاهيم علمية في مادة علم الاحياء.

ثالثا: هدف البحث

التعرف على اثر استراتيجية(poe) في تحصيل طالبات الصف الثاني متوسط في مادة علم الاحياء.

رابعا : فرضية البحث

لا يوجد فرق ذو دلالة إحصائية عند مستوى (0.05) بين متوسط درجات طالبات المجموعة التجريبية اللواتي يدرسن على وفق استراتيجية (poe) ودرجات طالبات المجموعة الضابطة اللواتي يدرسن على وفق الطريقة الاعتيادية في الاختبار التحصيلي لمادة علم الأحياء.

خامسا: حدود البحث

• الحد المكاني: المدارس المتوسطة والمتوسطة التابعة للمديرية العامة لتربية بغداد/الرصافة الاولى

• الحد البشري: عينة من طالبات الصف الثاني متوسط في المديرية العامة لتربية بغداد/ الرصافة الاولى.

• الحد المعرفي: كتاب علم الاحياء للصف الثاني متوسط ، المقرر تدريسه ط5 ، وزارة التربية المديرية العامة للمناهج ، العراق ويتضمن الفصل الاول (علم التصنيف) ، الفصل الثاني (كيف تصنف الكائنات الحية) ، الفصل الثالث (الكائنات الحية البسيطة) ، و الفصل الرابع (مملكة النباتات).

• الحد الزماني: الفصل الدراسي الاول من العام الدراسي)2025-2026(م.

سادساً: تحديد المصطلحات

اولا: استراتيجية ((predict , opserve ,explain (poe) عرفها كل من:

• امبو سعيدي واخرون (2019): "انها احدى استراتيجيات التدريس الفعال والتي يتطلب فيها الطالبات بملاحظة شئ معين ، مثل (صور ، تجربة ، فيديو) مرتبط بموضوع الدرس ، بعدها تجري مناقشة بين الطالبات فيما بينهم و بين المدرس لمعرفة افكارهم السابقة عن موضوع الدرس، ثم يطلب من الطالبات ممارسة عمل معين مرتبط بما تم ملاحظته ومناقشته سابقاً .وبعد الانتهاء ، يتم عمل مناقشة اخرى وتفسير المعلومات العلمية بين الطالبات انفسهم وبين المدرس ". (امبو سعدي واخرون ، 2019 ، 45)

• Karamustafaoğlu (2022): بأنها استراتيجية تدريسية بنائية تركز على جعل الطالبات يتنبئن بنتائج ظاهرة أو موقف تعليمي معين، ثم يلاحظن النتائج الفعلية، ويقومن بتفسيرها في