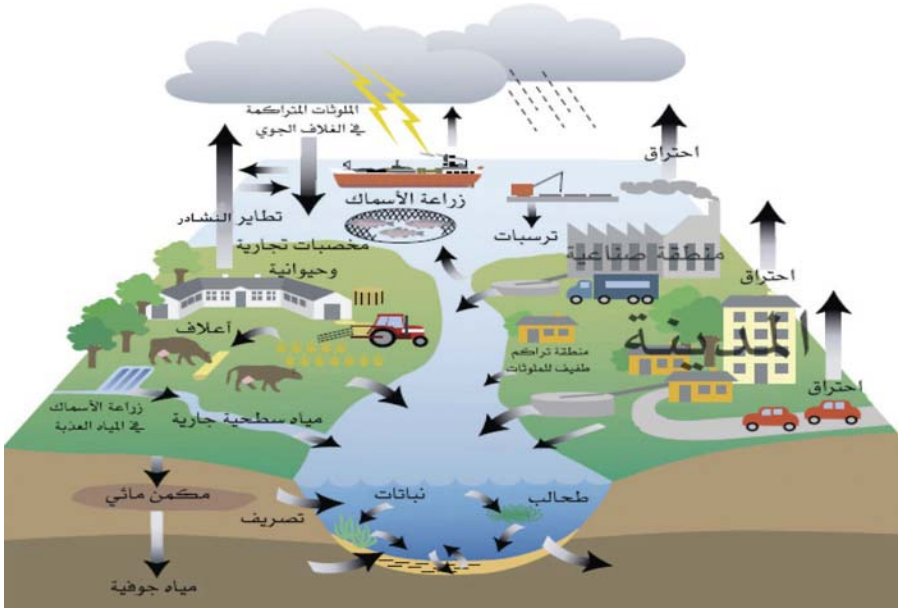
التقنيـــــة الحيويـــة البيئيـــة

د. محمد بن بروجي الفقيه

إن مشكلة التلوث البيئي ليست مشكلة جديدة أو طارئة بالنسبة للأرض، وإنما الجديد فيها هو زيادته كماً ونوعاً وكيفاً في عصرنا الحاضر، فخلال العقود القليلة المنصرمة - ومع تجاوز عدد سكان الأرض لحاجز الستة بلايين نسمة، وما صاحبه من ثورة علمية وصناعية - تم إنتاج كميات هائلة غير مسبوقة من المخلفات الصناعية والملوثات التي امتلأت بها أرجاء كوكب الأرض وأصبحت عبئاً على البيئة.

يقدر العلماء أن ملايين الأطنان من الملوثات الهوائية يتم إطلاقها سنوياً إلى الغلاف الجوي، وأن معظم هذه الملوثات هي من صنع الإنسان، شاملة عوادم السيارات والشاحنات وأدخنة المصانع ومحطات الطاقة وحرائق الغابات. لقد امتدت يد الإنسان المخربة أيضاً إلى المياه على سطح كوكب الأرض من مياه جوفية وأنهار وبحار وبحيرات فأصبحت في حالة يُرثى لها نتيجة ما يلقى فيها من المخلفات الصناعية والبشرية والحيوانية. أما التربة على سطح كوكب الأرض فلم تنجو هي الأخرى من التلوث نتيجة الاستعمال العشوائي والمكثَّف للمخصبات الزراعية والمبيدات الحشرية، ورمي وطمر النفايات غير المعالجة، شكل (١) .



■ شكل (١) رسم توضيحي يبين بعض مصادر التلوث البيئي للهواء والماء والتربة.

تعدت مشكلة التلوث البيئي النطاق الإقليمي وأضحت مشكلة عالمية لا تعترف بالحدود السياسية ولا الإقليمية، لذلك يلاحظ أن هناك قلقاً متزايداً من قبل المجتمع الدولي حيال التلوث البيئي؛ مما أفضى بكثير من الدول المتقدمة إلى سَن كثير من القوانين الدستورية والتركيز بشكل مكثف على زيادة الوعي لدى المستهلك في محاولة للحد من هذه الظاهرة. وفي نفس الوقت تسارعت خطى البحث العلمي والتطبيقي لتوظيف التقنيات الهندسية والحيوية الحديثة للحد من أو تقليل التلوث البيئي عن طريق إيجاد طرق تصنيعية أقل ضرراً على البيئة وإنتاج منتجات صديقة للبيئة.

الملوثـــات البيئيـــة

تنقسم الملوثات البيئية إلى ما يلي :-

- **مركبات طبيعية**

تمثل هذه الملوثات الغالبية العظمى من المخلفات الناتجة عن ممارسة الإنسان لحياته اليومية، وهي تشبه في تركيبها المركبات الطبيعية الموجودة في الطبيعة؛ مما يجعلها هدفاً سهلاً

للتحلل بواسطة الكائنات الحية الدقيقة الموجودة بصورة طبيعية في البيئة، كتلك الموجودة في التربة والمياه، لذلك فإنه ليس من المستغرب أن تعتمد كثير من العمليات التي تستخدمها حالياً الوكالات العامة والقطاعات الصناعية لمعالجة النفايات والملوثات بشتى أشكالها اعتماداً كبيراً على النشاط الميكروبي. ولكن تكمن المشكلة في أن كمية هذه الملوثات قد تفوق بمراحل قدرة هذه الكائنات على تفكيكها في الظروف الطبيعية.

● **المركبات الكيميائية الغريبة**

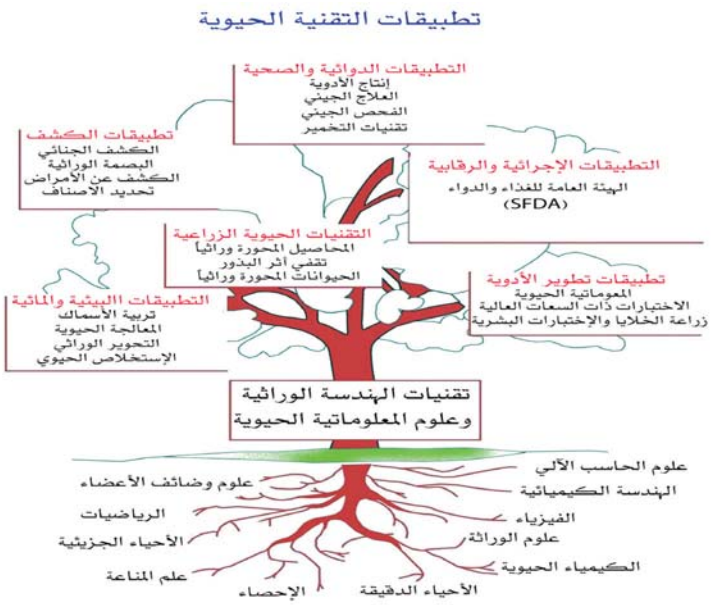
تشمل المركبات الكيميائية الغريبة (Xenobiotic Chemicals) مجموعة كبيرة متنوعة من المركبات الصناعية التي لا توجد بصورة طبيعية في البيئة، وإن وجدت فبكميات قليلة جداً، وهي عبارة عن المركبات أو المخرجات الكيميائية الصناعية التي تُنتج بطرق غير حيوية، وليس لها ما يماثلها في الطبيعة، مثل: مبيدات الحشرات (Pesticides)، ومبيدات الأعشاب (Herbicides)، والبلاستيك.

تكمن خطورة المخرجات الكيميائية الصناعية في قابليتها للتراكم في النظم البيئية المختلفة بمرور الزمن، مُشَّكلة بذلك خطراً محدقاً يهدد صحة الإنسان. علماً بأن بعض هذه المركبات تذوب في الدهون (Sat-soluble Xenobiotics)، مما يزيد من احتمالية تراكمها في الدهون الطبيعية لأجسام الحيوانات، وعند استخدام الإنسان لهذه الحيوانات كمصدر للغذاء تنتقل هذه المواد السامة لجسمه. وبالرغم من أن هذه المواد الكيميائية من صنع الإنسان إلا أن بيئتنا الطبيعية لا تخلو من الكائنات الحية الدقيقة القادرة على تكسير وتحليل هذه المركبات، في الحالات التالية:

١- عندما تكون هذه المواد المصنعة مشابهة في تركيبها الكيميائي لمواد طبيعية، بحيث تتعرف عليها إنزيمات الكائن الحي وتستخدمها كمصدر كربوني لإنتاج الطاقة.

٢- عن طريق ظاهرة الأيض المرافق (Cometabolism)، بحيث ينتج الميكروب المُستخدم عند نموه الطبيعي إنزيمات لها القدرة على تكسير هذه المواد.

٣- عن طريق تكييف وتطويع الميكروبات لاستخدام هذه المواد الكيميائية كمصدر للطاقة.



■ شكل (٢) شجرة التقنية الحيوية: ترمز جذور الشجرة إلى مجمل العلوم الطبيعية والهندسية التي تساهم في التقنية الحيوية.

وبالرغم من قدرة الكائنات الحية الدقيقة الاستثنائية على التكيف الطبيعي لاستخدام مثل هذه المواد وتعديل بنيتها الكيميائية أو تفكيكها، إلا أن عملية تكيف وتطور الأحياء الدقيقة تحدث ببطء وبفعالية محدودة، لذلك فإن تدخل الإنسان في هذه الحالة يعد ضرورياً لتسريع عملية انتخاب الأحياء الدقيقة ذات الصفات الوراثية المرغوبة عن طريق استخدام تقنيات الهندسة الوراثية الحديثة، وهذا ما يمثل جوهر التقنية الحيوية البيئية.

مفهوم التقنية الحيوية البيئية

عرف العلماء التقنية الحيوية بشكل مبسط بأنها عبارة عن مجموعة من التقنيات العلمية المختلفة التي تُستخدم لتسخير الخلايا أو الكائنات الحية أو مواد منها لصنع أو تعديل أو تحسين منتج معين أو لتطوير أو تحوير كائنات حية لاستخدامات معينة قد تكون ذات قيمة وفائدة للإنسان. تطورت في غضون السنوات القليلة الأخيرة علوم التقنية الحيوية حتى أصبحت ركيزة أساسية لمختلف الأنشطة الحيوية التي تمس حياة الإنسان اليومية، وفي وقتنا الحاضر أصبحت ذات علاقة وثيقة بشتى جوانب حياته، حيث أسهمت بشكل فعَّال في إيجاد الحلول المجدية والحاسمة لكثير من مشكلات الإنسان المعاصر، شكل (٢).

تتنوع المجالات البحثية للتقنية الحيوية لتشمل عدّة مجالات منها - على سبيل المثال لا الحصر- مجال تحسين الإنتاج النباتي والحيواني، والإنتاج الصناعي، والطب والرعاية الصحية، ومجال الطاقة، و مجال البيئة، وغيرها؛ مما قد يستجد من مجالات بحثية بهدف تحسين وتطويع إمكانات الكائنات الحية من أجل خدمة الإنسان.

استخدامات التقنية الحيوية البيئية

هناك الكثير من أوجه استخدامات التقنية الحيوية البيئية التي تمس بشكل مباشر أو غير مباشر حياة الإنسان، ومن نطاقات استخدام التقنية الحيوية البيئية ما يلي:

● **مرحلة التصنيع**

يمكن للجهات التصنيعية - أثناء مرحلة

التصنيع – أن تستفيد وبشكل فعَّال من الكائنات الحية أو أجزاء حيوية منها – والتي تعمل بصورة فعَّالة عند درجات الحرارة العادية مقارنة بعمليات التصنيع الكيميائية، والتي تتم عند درجات حرارة وضغط مرتفعتين – وبالتالي فإن استخدام مثل هذه الكائنات كبديل في عمليات التصنيع سوف يؤدي إلى تقليل التكلفة التصنيعية، وزيادة الأمان في مناطق العمل، بالإضافة إلى المحافظة على البيئة من الآثار المدمرة لعمليات التصنيع الكيميائية التقليدية، وإنتاج مخلفات بكميات قليلة، وتقليل الاعتماد على المصادر غير المتجددة، وقد يكون لاستخدام التقنيات الحيوية البيئية مردوداً اقتصادياً ملموساً، حيث يمكن استخدام الكائنات الحية الدقيقة لتحويل المواد الخام العضوية قليلة التكلفة إلى منتجات ذات قيمة مرتفعة، كذلك يمكن استخدام الإنزيمات عالية التخصصية لإنتاج مواد ذات نقاوة عالية إذا ما قورنت بمثيلاتها التي تنتج بواسطة التفاعلات الكيميائية.

- **إدارة النفايات**

يصاحب كل الصناعات عادة مخلفات سائلة متدفقة، ويشترط لإطلاق هذا النوع من المخلفات في مياه المجاري أن تكون آمنة تماماً على البيئة والنظم البيئية الطبيعية، وعليه فقد لجأت كثير من الجهات الصناعية المنتجة لمخلفات سائلة غير آمنة إلى إنشاء مواقع متخصصة للاستفادة من الكائنات الحية الدقيقة لمعالجة الملوثات الموجودة في مثل هذه المخلفات.

- **التحكم بالتلوث**

يتعدى استخدام الكائنات الحية في المجالات السابقة إلى عوامل تنظيف إضافية تسهم وبشكل فعَّال في التحكم بالتلوث البيئي. فعلى سبيل المثال يمكن استخدام الكائنات الحية الدقيقة والإنزيمات كبديل لكثير من المواد الكيميائية السامة والخطرة لتنظيف الأجهزة وأسطح العمل وأنابيب المجاري من الزيوت والدهون والمخلفات العضوية. فضلاً عن ذلك يمكن استخدام الكائنات الحية كأجهزة كشف حيوية عالية الحساسية لتقييم ومكافحة التلوث.

المعالجة الحيوية

يقصد بالمعالجة الحيوية (Bioremediation) استخدام النظم الحيوية (الميكروبات والنباتات) لتقليل التلوث الهوائي والمائي والأرضي، عن طريق تكسير وتحليل الملوثات المتراكمة. تُعد المعالجة الحيوية باستخدام الميكروبات الأكثر انتشاراً بين تقنيات المعالجة الحيوية الأخرى، حيث تستطيع هذه الكائنات الحية الدقيقة تكسير كثير من المركبات الكيميائية المكوِّنة للملوثات واستخدامها كمصدر غذائي أثناء نموها. تختلف آلية التكسير الحيوي باختلاف الميكروبات المستخدمة ويعتمد ذلك بشكل أساسي على نوعية الأيض للميكروب، فهناك أنواع من الكائنات الحية الدقيقة الهوائية (Aerobic) التي تحتاج إلى الأكسجين، بينما هناك أنواع أخرى لا هوائية (Anaerobic) تستطيع إتمام تكسير المواد الكيميائية والملوثات بدون الحاجة للأكسجين. بالإضافة إلى ذلك هناك أنواع أخرى من الكائنات الحية الدقيقة المستخدمة في عمليات المعالجة الأحيائية بالرغم من عدم اعتمادها على الملوثات الكيميائية كمصدر للطاقة. وفي هذه الحالة يتم تكسير الملوثات الكيميائية بآلية تعرف بالأيض المشترك (Cometabolism)، حيث تقوم المسارات الأيضية للكائن الحي أثناء نموه الطبيعي بإنتاج مركبات أو إنزيمات تعمل على تكسير الملوثات بصفة غير مباشرة، وقد استفاد العلماء من ظاهرة الأيض المشترك لإنجاز عمليات التحلل الحيوي التام الذي يتم من خلاله نزع السمية بالكامل عن طريق معدنة الملوثات إلى ثاني أكسيد الكربون والماء ومركبات أخرى غير عضوية عديمة السمية بدلاً عن عمليات التحلل الجزئية التي قد تؤدي إلى تكوين مركبات وسطية ذات سمية عالية. فعلى سبيل المثال يؤدي التحلل الحيوي غير التام لمركب رُباعي كلوريد الإيثيلين (Tetrachloroethylene) – مركب يدخل في تركيب صناعة المنظفات – إلى إنتاج مركب فينيل كلوريد، وهو مركب مسرطن وشديد السمية.

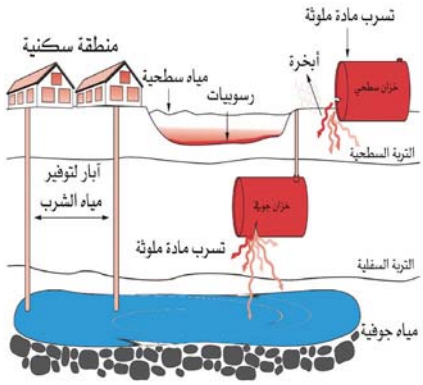
قد يحدث التحلل الحيوي بصورة تلقائية بدون تدخل الإنسان، ويسمى في هذه الحالة بالمعالجة الحيوية الحقيقة (Intrinsic Bioremediation) إلا أنه في كثير من الأحيان قد لا تكون الظروف الطبيعية مواتية أو قد لا تكون مثالية تماماً بسبب نقص الأكسجين أو المواد المغذية أو حتى الكائنات الحية الدقيقة المناسبة. يساعد تدخل الإنسان في مثل هذه الحالة – عن طريق توفير النواقص – في إتمام عمليات التحلل الحيوية. فعلى سبيل المثال أدى ارتطام ناقلة النفط العملاقة التابعة لشركة إكسون فالديز بالصخور بالقرب من شواطئ ألاسكا عام ١٩٨٩م إلى تسرب النفط على مساحة تقارب ١٠ آلاف ميل مربع على شواطئ ألاسكا محدثاً واحدةً من أسوأ الكوارث البيئية في التاريخ، وفي محاولة لتسريع عمليات تكسير بقعة الزيت قامت السلطات المختصة في حينه بنثر كميات وفيرة من المغذيات على بقعة الزيت في محاولة لتحفيز عمل الميكروبات المحللة للنفط.

خلاصة القول في هذا المجال أن تقنيات المعالجة الحيوية يمكن أن تستخدم للتقليل من أو إزالة المخلفات الخطرة الموجودة في البيئة، كما يمكن أيضاً استخدام هذه التقنيات استباقياً لمعالجة المخلفات الصناعية قبل مغادرتها مراكز الإنتاج والتصنيع، ومن أهم مجالات المعالجة الحيوية ما يلي :

- **مياه الصرف الصحي والمخلفات الصناعية السائلة**

تُستخدم الكائنات الحية الدقيقة بشكل روتيني في معامل معالجة مياه المجاري للتخلص من كثير من الملوثات الشائعة قبل إفراغها في الأنهار أو البحار، ولكن زيادة التلوث الصناعي وإنتاج ملوثات غريبة على البيئة استوجب إيجاد تقنيات جديدة تستطيع وبصفة خاصة إزالة هذه الملوثات.

إن تركيب وتركيز مياه الصرف الصناعي تختلف من صناعة إلى صناعة ومن منشأة إلى أخرى، كما تختلف مياه الصرف الصناعي عن مياه الصرف الصحي في أن الأولى تحتوي على مجموعة من المخلفات والنفايات الصناعية ذات المصادر المختلفة والطبيعية المتباينة،



■ شكل (٣) رسم يوضح آلية تلوث المياه الجوفية عن طريق تسرب الملوثات لباطن التربة.

مثـل: مركبـات النيتروجـين والفسفـور والمعادن الثقيلة و المركبات المكلورة.

تشمـل طـرق المعالجـة الأحيائيـة الحديثـة عمليـات المعالجة اللاهوائيـة والمعالجة الهوائية باستخـدام المرشحـات الحيويـة، والأغشيـة الحيوية، والمفاعلات الحيوية. يمكن خفض تكلفة معالجة ميـاه الصرف الصحـي والصناعي عن طريق تحويل هذه المخلفـات إلى مركبات نافعة، فعلـى سبيل المثـال يمكن إزالـة المعـادن الثقيلة ومركبـات الكبريـت مـن المخلفـات الصناعيـة بواسطـة بكتيريا تعتمد علـى الكبريت في نموها، ثم يمكن إعـادة استخدامها مـرة أخرى. ومثال آخر هو إنتاج علف الحيوانات من الكتلة الحيوية الفطرية الناتجة بعد عمليات إنتاج البنسيلين.

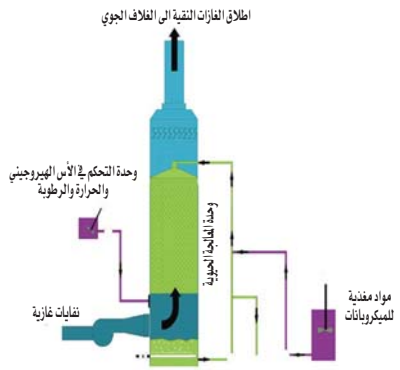
● مياه الشرب

هناك قلق متنامي من التدني المستمر لجودة ميـاه الشرب نتيجـة تلوثها بالمخلّفـات الإنسانية أو النباتية أو الحيوانيـة أو المعدنية أو الصناعية أو الكيمائية التـي تُلقى مباشرة في مصادر المياه كالبحيرات أو الأنهار، أو عن طريق تسربها للمياه الجوفية، شكل(٣). من هذا المنطلق تبرز أهمية استخـدام التقنيات الحيويـة البيئية لاستصلاح وتنقية المياه الملوثة وإعادة استخدامها.

● الهواء والنفايات الغازية

يقصد بالنفايات الغازية الغازات أو الأبخرة الناتجة عـن المنشآت الصناعيـة المختلفة، مثل: محطـات توليـد الطاقـة الكهربائيـة، ومعامـل تكرير النفط والغاز الطبيعي، ومصانع الإسمنت والأسـمدة الصناعيـة التـي تنفـث في الهـواء الجوي مـن خلال مداخنها أو مـن خلال وسائل النقل والتدفئـة. تضم هذه الملوثات مجموعة من الغـازات والجزيئـات الضارة، مثـل :أول أكسيد الكربـون، وثـاني أكسيـد الكبريـت، والأكاسيد النيتروجينيـة، والجسيمات الصلبـة العالقة في الهـواء كالأتربـة وبعض ذرات المعـادن المختلفة. وللتخلص من هذه الملوثـات تستخدم المرشحات الحيويـة التقليديـة، وهـي مرشحـات بسيطـة التركيـب ورخيصـة الثمـن مملـوءة بالأسـمدة العضوية. إن الهدف الأساسي من استخدام هذه المرشحـات هو إزالة الروائح الكريهة المنبعثة من المصانع، حيث تقوم الكائنـات الدقيقة الموجودة بشكل طبيعي في هـذه الأسمدة بتحويل المركبات العضويـة المسببـة للروائـح الكريهـة إلى ثـاني أكسيـد الكربـون وبخار المـاء، ولكن يعـاب على هـذه الأنواع مـن المرشحات الحيويـة التقليدية: بطء معـدلات معالجـة النفايـات الغازية، وكبر حجمهـا، وقصر عمرها الزمنـي. لذلك اتجهت جهـود الباحثين والمهندسـين إلى إيجـاد أنظمة ترشيح عالية الكفاءة، مثـل: المرشحات الحيوية (Trickling Biofilters)، وأجهـزة التنظيـف الحيوية (Bioscrubbers).

تعتمـد تقنيـة المرشحـات الحيويـة الحديثة علـى نفس مبـدأ المرشحات الحيويـة التقليدية، حيث تستخدم الميكروبـات للتخلص من الملوثات العضوية العالقة في الهواء، إلا أنها تتميز بكفاءة عاليـة وأحجـام أقل، شـكل(٤). تختلف تقنيات التنظيف الحيوية عـن المرشحات الحيوية في أن تنقيـة الهواء تمـر بمرحلتين، شـكل(٥). يتم في الأولى "غسيـل الهواء الملوث" عـن طريق إذابة الملوثـات الغازيـة في المـاء، بينما يتـم في الثانية تمريـر هـذا الخليـط إلى مفاعـل حيـوي يحوي ميكروبات لاهوائية تعمل على تحليل الكيميائيات أو الملوثـات الضارة، بحيث يكـون الناتج النهائي عبارة عـن غاز حيـوي (الميثـان)، والذي يمكن استخدامه كمصدر للطاقة.



■ شكل (٤) رسم توضيحي لتركيب وآلية عمل المرشحات الحيوية.

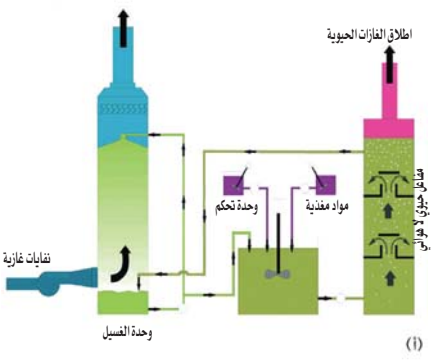
● النفايات الصلبة

تعـد النفايـات الصلبـة المنزليـة مـن أكبر المشـكلات التي تواجـه مجتمعاتنـا الاستهلاكية بسبـب التكلفـة العاليـة لعمليـات التخلص منها وضـرورة الحرص الشديـد للحيلولـة دون تلوث الميـاه الجوفيـة والهـواء. تتركـب الكثـير مـن المخلفات المنزلية من مواد عضوية يسهل تحللها، ومن هنـا تنبع أهميـة عزلها عـن المخلفات غير العضوية ومن ثم إعـادة تدويرها أو تحويلها عن طريق الحـرق أو الهضم اللاهوائي إلى منتجات ذات قيمـة اقتصادية. الجدير بالذكر أن تقنيات معالجـة النفايات الصلبة المنزليـة – خصوصاً تقنية الهضم اللاهوائي – حظيت خلال السنوات القليلـة الماضيـة بالكثير من الاهتمـام خاصاً في المجـال الاقتصادي، حيـث استخدمت مفاعلات حيويـة لاهوائية عاليـة السعة لتحويـل المخلفات المنزليـة العضوية إلى كميات وفـيرة من غازات حيويـة ومخلفـات عضويـة مستقـرة ذات قيمة اقتصادية عالية.

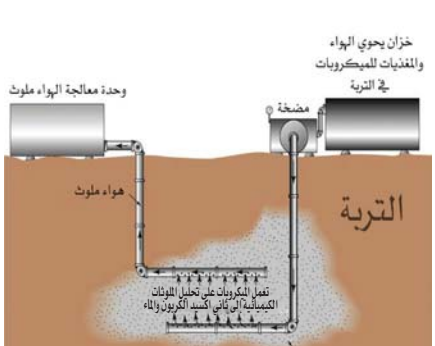
● التربة

يتم معالجة التربة حيوياً بإحدى طريقتين، هما:

■ **في موقـع التلوث (In Situ)**، حيث يتم إضافة الميكروبـات المناسبـة للتربـة الملوثة سـواءً كانت سطحيـة أو جوفية، ويتم توفـير الظروف البيئية اللازمـة لنمو هـذه الميكروبـات، مثـل: التهوية، والمغذيـات المناسبـة، شـكل(٦). تتميـز هـذه



■ شكل (٥) رسم توضيحي لتركيب وآلية عمل أجهزة التنظيف الحيوية (Bioscrubbers).



■ شكل (٦) آلية المعالجة الحيوية للتربة في موقع التلوث (In Site).

الطريقة بكفاءتها العالية وتكلفتها المعقولة.

■ **ضخ التربة الملوثة**، وفيها يتم ضخ التربة الحيوية الملوثة إلى محطات معالجة معدة على السطح (Ex Situ)، ومن ثم معالجتها حيوياً. ويعتمد تحديد استخدام هذه التقنية على عدة عوامل تخص الموقع الملوث، مثل: نوع التربة الملوثات، والمساحة المتوفرة.

● **المعالجة الحيوية باستخدام النباتات**

يطلق مصطلح المعالجة الحيوية باستخدام النباتات (Phytoremediation) على مجمل التقنيات التي تستخدم النباتات لتنقية البيئة من الملوثات المختلفة. وتُعد هذه التقنية جديدة إلى حد ما، حيث تبلورت في عام ١٩٩١م، وتكونت كثير من المعلومات بما يُعرف بالمعالجة الحيوية باستخدام النبات نتيجة للأبحاث العلمية في كثير من المجالات.

يمكن تقسيم تطبيقات المعالجة الحيوية باستخدام النبات إلى ثلاثة أقسام رئيسة طبقاً لاستراتيجية المعالجة ومصير المواد الملوثة:

■ **تكسير المواد الملوثة**: وهي – عادة – تتم نتيجة للعمليات الأيضية للنبات، أو في محيط جذور النبات بمساعدة البكتيريا التي تتواجد بكميات وفيرة في هذه المنطقة.

■ **استخلاص وتركيز الملوثات**: وتتم عن طريق امتصاصها من التربة وتركيزها في الجذور أو في المجموع الخضري للنبات فوق سطح التربة، وبعد إتمام هذه العملية يتم إزالة النبات بعيداً عن موقع التلوث وتدميرها أو إعادة تدويرها، شكل (٧).

■ **تطاير الملوثات إلى الغلاف الجوي**: حيث يعمل النبات على تحويل الملوثات إلى مواد

■ شكل (٧) آلية المعالجة الحيوية النباتية (Phytoremediation).

متطايرة يتم إطلاقها مع بخار الماء من خلال ثغور النبات. تعتمد المدة الزمنية التي تستغرقها النباتات لتنقية التربة من الملوثات على عدة عوامل، منها: نوع وكمية النبات المستخدم، نوع وكمية الملوثات، مساحة وعمق المنطقة الملوثة، نوع التربة والخصائص البيئية.

التقنية الحيوية البيئية الوقائية

استجابة للنداءات العالمية خلال السنوات القليلة الماضية، توجهت كثير من المؤسسات الصناعية الكبرى نحو تطوير عملياتها الصناعية لتخفيف التلوث البيئي. ويُلاحَظ أن هناك نمطاً وقائياً متنامياً على المستوى العالمي يدعو إلى إنتاج منتجات صديقة للبيئة، من هذا المنطلق يمكن للتقنية الحيوية أن تلعب دوراً بارزاً لتعزيز هذا التوجه على مستوى تطوير نظم الإنتاج الصناعية المستخدمة حالياً أو عن طريق تطوير نظم صناعية جديدة صديقة للبيئة. لقد توجهت كثير من القطاعات الصناعية إلى استخدام الإنزيمات كبديل للمحفزات الكيميائية، ومن هنا أمكن للتقنية الحيوية أن تلعب دوراً بارزاً في هذا المجال من خلال توظيف تقنيات هندسة البروتينات (Protein Engineering)، والمسارات الأيضية (Metabolic Engineering) لتحسين عمليات تخليق البروتينات، أو إنتاج وتطوير إنزيمات جديدة ذات كفاءة عالية تعمل عند درجات حرارة عالية وفي أوساط غير مائية، كما يمكن للتقنية الحيوية أن تسهم في إنتاج مواد جديدة صديقة للبيئة، وتكون بديلة للمنتجات الحالية، مثل البلاستيك الحيوي على سبيل المثال. ومن جانب آخر قد تسهم تطبيقات التقنيات الحيوية بشكل غير مباشر في التقليل من تلوث التربة بالمبيدات الحشرية والمخصبات الصناعية عن طريق إنتاج نباتات محورة وراثياً مقاومة للحشرات وقليلة الاعتماد على المخصبات. لقد تعدت تطبيقات التقنية الحيوية إلى إنتاج حيوانات صديقة للبيئة للتقليل من تراكم الفسفور في التربة وفي حظائر الحيوانات، فقد نجح علماء من جامعة جلف الكندية في إنتاج خنازير محورة وراثياً قادرة على إفراز إنزيم فيتيز (Phytase) من غددها اللعابية. يعمل هذا الإنزيم على تكسير المواد النباتية في الأعلاف والمحتوية على الفسفور غير الكامل للهضم بواسطة الحيوان، وبالتالي تقليل كمية الفسفور المخرج عن طريق فضلات الحيوان.

الكشف عن التلوث ومراقبته

هناك عدد كبير من الطرق الأحيائية المستخدمة حالياً للكشف عن حوادث التلوث والمتابعة المستمرة لمستويات التلوث البيئي، مثل: استخدام الكواشف الحيوية، والاختبارات المناعية. تتكون الكواشف الحيوية من شقين حيوي وآخر إلكتروني. يمكن أن يتكون الجانب الحيوي للكاشف الحيوي من إنزيمات أو أجسام مضادة أو مستعمرة بكتيرية أو غشاء حيوي أو مستقبلات عصبية أو كائن حي كامل. تستند فكرة الكشف الحيوي على تغير الخصائص الفيزيائية والكيموحيوية للشق الحيوي كردة فعل للتلوث البيئي بطريقة يمكن معها تسجيل هذا التغير بواسطة الجزء الإلكتروني، فعلى سبيل المثال يمكن استخدام التغيرات في الخصائص الضوئية لمركب اليخضور (Chlorophyll) في الطحالب لقياس كمية المبيدات العشبية في الأنهار. أما الاختبارات المناعية فتعتمد على استخدام أجسام مضادة معلّمة بصبغة معينة وإنزيمات. يحفز وجود ملوث محدد الارتباط بين الملوث والأجسام المضادة والذي يمكن الكشف عنه عن طريق التغير في خصائص الصبغة المرتبطة بالجسم المضاد كالتغير في اللون أو الإشعاع.

تُستخدم تطبيقات التقنية الحيوية الحديثة أيضاً للكشف عن الميكروبات المستخدمة للمعالجة الحيوية في مواقع التلوث ومتابعة نموها. تعتمد الطرق التقليدية على أخذ عينات من مواقع التلوث ومحاولة تنميتها مختبرياً للكشف عن الكائنات الحية الدقيقة. أما الطرق الحديثة فتشمل تقنيات التهجين الموضعي المتألق (Fluorescent in situ hybridization) و تفاعل البلمرة التسلسلي (PCR).

الهندسة الوراثية في تطوير التقنية الحيوية

تُعد الهندسة الوراثية أحد أهم فروع التقنية الحيوية والتي تُعنى بإعادة تشكيل أو هندسة المادة الوراثية (DNA) عن طريق حذف أو إضافة أجزاء منها، وذلك بهدف تغيير التركيب الوراثي للكائن الحي لإنتاج صفات وراثية جديدة ومحسنة. يتوقع العلماء والمختصون أن تساهم تطبيقات الهندسة الوراثية في تقديم الحلول العملية لكثير من المشاكل البيئية، مثل: التخلص من الملوثات البيئية، وإعادة تدوير المخلفات، ومعالجة مياه الصرف الصحي وإعادة استخدامها. إن الأمثلة التي ذكرت سابقاً، مثل: إنتاج نباتات وحيوانات محورة وراثياً صديقة للبيئة، أو هندسة البروتينات والمسارات الأيضية ما هي إلا أمثلة بسيطة لتوضيح مدى تنوع الاستفادة من تطبيقات الهندسة الوراثية في مجال حماية البيئة. ونظراً للتنوع الأحيائي الهائل وتعدد المسارات الأيضية وتنوعها فإن تطبيقات تقنية الهندسة الوراثية لا نهائية في مجال إنتاج مواد بديلة صديقة للبيئة.

تتركز تطبيقات الهندسة الوراثية للكائنات الحية الدقيقة في المجال البيئي على تحسين وتطوير قدرة المسارات الأيضية، وذلك لزيادة فعالية هذه الكائنات على تكسير الملوثات البيئية أو إنتاج إنزيمات ذات أهمية صناعية واقتصادية. فعلى سبيل المثال قام العلماء بهندسة بكتيريا الإشريكية القولونية (Escherichia Coli) عن طريق إضافة خمسة عشر مورثاً من بكتيريا من جنس الزائفة (Pseudomonas) لإنتاج بكتيريا محورة وراثياً لإنتاج صبغة النيلة لصبغ الأقمشة القطنية. حيث مكنت هذه الطريقة من الاستغناء عن المواد الكيميائية السامة التي كانت تستخدم لصبغ الأقمشة.

من جانب آخر قام العلماء بتسخير تقنيات الهندسة الوراثية في المجال الزراعي لتطوير محاصيل زراعية ذات جودة وقيمة غذائية عالية، بالإضافة إلى مقاومتها للأمراض والمبيدات الحشرية. كما أن هناك الكثير من الأبحاث العلمية لتطوير نباتات شديدة المقاومة للظروف البيئية السيئة، لزيادة كفاءة النباتات في مجال المعالجة الحيوية للملوثات.

مستقبل التقنية الحيوية البيئية

مع التسليم بأهمية تطبيقات التقنية الحيوية في شتى جوانب الحياة، يبقى العامل الاقتصادي وفكرة تحقيق فوائد تجارية باستخدام النظم الحيوية العامل الرئيس لدفع عجلة التقدم لتطوير التقنيات الحيوية بشتى أنواعها، وبالتالي فإن من الأمور التي لا مفر منها خضوع تطبيقات التقنية الحيوية للضغوط التجارية. ويرى الخبراء أنهم متأكدون بشكل جيد من أن القوى الاقتصادية والتشريعية والسياسية سوف تسهم في تشكيل مستقبل التقنية الحيوية البيئية. وفي نفس الوقت فإن استخدام التقنيات الحيوية البيئية لإيجاد حلول للمشكلات البيئية يعتمد وبشكل مباشر على العلوم الحديثة ومخرجاتها والتي تتطور بوتيرة متسارعة في عصرنا الحاضر. ومن المنتظر أن يشهد استخدام التقنيات الحيوية البيئية تقدماً كبيراً في عدة مجالات مثل:

- **الاستشعار الحيوي**

يتوقع الخبراء أن يشهد المستقبل تطوراً ملحوظاً في مجال استخدام الكاشفات الحيوية، وتجري الأبحاث الآن على قدم وساق لتطوير جيل جديد من الكاشفات الحيوية باستخدام التقنيات الحيوية الحديثة والتقنيات متناهية الصغر بحيث تكون ذات حساسية وانتقائية عالية.

- **التصنيع**

من المؤكد أن التوجه القادم سوف يركز وبشكل كبير على خفض الملوثات والنفايات الصناعية عن طريق استخدام سبل التصنيع المعتمدة على التقنيات الحيوية البيئية. ومع الأهمية المتزايدة للمحفزات الحيوية في مجال التصنيع فسوف يشهد المستقبل إقبالاً متزايداً على تطوير طرق حديثة ذات كلفة قليلة لتصنيع أنواع جديدة منها واستخدامها كبدائل للمحفزات الكيميائية التقليدية.

- **إدارة النفايات والتحكم في التلوث**

سيشهد المستقبل القريب نقلة نوعية في مجال إدارة النفايات خاصة مع الضغوطات المتنامية في كثير من دول العالم للحد من دخول الملوثات الحيوية النشطة إلى دائرة تدوير النفايات. ومع التطور الذي سوف تشهده تطبيقات الصناعات النظيفة وإعادة تدوير النفايات واستمرار الضغوط الاقتصادية والتشريعية والسياسية سوف يكون هناك تطوراً موازياً في مجال التحكم في التلوث البيئي.

- **استخدام الكائنات المعدلة وراثياً**

بالرغم من الحلول الواعدة لاستخدام الكائنات الحية المعدلة وراثياً لمواجهة التلوث البيئي، إلا أن هناك قلقاً متنامياً من الأخطار الناجمة عن إطلاق الكائنات المحورة وراثياً إلى البيئة، خاصة وأن هناك نقص في وقتنا الحالي في تقييم المخاطر المحتملة على البيئة المتلقّية. لذلك قد يشهد المستقبل تركيز العلماء والباحثين على محاولة الحد من انتشار الكائنات المعدلة وراثياً في البيئة. وتتركز التوجهات البحثية -قيد الدراسة الآن- في استخدام المادة الوراثية للبلاستيدة الخضراء (Chloroplasts) في النبات كهدف للمورثات الخارجية كبديل عن المادة الوراثية للنبات.

وفي الخلاصة فإن مفهوم التقنية الحيوية البيئية هو مفهوم واسع يشمل استخدام طرق تصنيع نظيفة واستخدام الميكروبات وتقليص استخدام الكيمائيات الزراعية واستخدام طرق المعالجة الحيوية لتنظيف البيئة إذا ما دعت الحاجة.