



منشورات جامعة دمشق
كلية الزراعة

تلوث التربة والمياه ومعالجتهما

الجزء النظري

الدكتور
إياد فؤاد سراي الدين

الدكتور
محمد سمير عز الدين الحافظ

الدكتورة
هالة مروان شيخاني

مدرس
في قسم علوم التربة

مدرس
في قسم العلوم الأساسية

أستاذ مساعد
في قسم العلوم الأساسية

1435-1436هـ
2014-2015م

جامعة دمشق



تلوث التربة والمياه ومعالجتهما



السنة الخامسة
قسم علوم التربة



محتويات الكتاب

القسم الأول: تلوث التربة ومعالجتها

الفصل الأول: أساسيات	١٢
١. تعريف التلوث POLLUTION	١٢
٢. تعريف تلوث التربة SOIL POLLUTION	١٢
٣. مكونات طبقات التربة	١٢
٤. عوامل ادمصاص الملوثات على سطح التربة	١٣
٥. النماذج الرئيسية للترب الملوثة	١٦
٦. أثر ملوثات التربة على الإنسان	١٧
الفصل الثاني: أنواع تلوث التربة	١٨
١. التلوث بالأمطار الحامضية	٢٠
٢. التلوث الناتج عن العواصف الرملية والكتبان الرملية وغبار الحراثة والبذور والصوامع	٢٠
٣. التلوث بالمحارق و الحرائق (حرق المحاصيل الحقلية)	٢١
٤. التلوث بالبراكين والزلازل والنيازك والألغام وبقايا المتفجرات والتدريبات العسكرية	٢١
٥. التلوث بالنفايات	٢٢
١.٥. التلوث بالمخلفات الصلبة	٢٣
٢.٥. التلوث بالفضلات الآدمية والمجاري (الصرف الصحي)	٢٨
٣.٥. التلوث بمخلفات محطات المعالجة "الحمأة"، وإنتاج الغاز الحيوي	٣١
٤.٥. التلوث بالنفايات الطبية	٣٤
٥.٥. التلوث بنفايات المصانع وبنفايات المواد البلاستيكية	٣٥
٦.٥. التلوث بنفايات المواد المشعة	٣٨
٦. التلوث بالأسمدة	٤١
١.٦. التلوث بالأسمدة العضوية	٤١
٢.٦. التلوث بالأسمدة غير العضوية	٤٣
٣.٦. التلوث بالأسمدة الحيوية	٤٧
٤.٦. التلوث من التسميد الورقي المستعمل بالرش	٤٨

٥٨	٥.٦ وسائل الحد من التلوث بالأسمدة
٥١	٧. التلوث بالمبيدات PESTICIDES
٥٢	١.٧ أنواع المبيدات الملوثة وتركيبها الكيميائي
٥٤	٢.٧ العوامل المؤثرة على ادمصاص المبيدات في التربة.....
٥٩	٣.٧ التخلص من المبيدات ومخلفاتها.....
٦١	٤.٧ أثر المبيدات ومخلفاتها على الإنسان والحيوان والنبات والغذاء
٦٤	٥.٧ بدائل استخدام المبيدات الملوثة للتربة الزراعية
٦٥	٨. التلوث بالمناجم
٦٥	١.٨ التلوث بالمقالع وتفجير الصخور
٦٩	2.8 التلوث بمناجم الفحم
٧٤	3.8 التلوث بمناجم استخراج النفط.....
٨٤	الفصل الثالث: تلوث التربة بالمعادن الثقيلة
٨٤	١.٣ المقدمة
٨٥	٢.٣ مصادر المعادن الثقيلة في التربة.....
٩١	٣.٣ العمليات الجيو- كيميائية لاحتفاظ التربة بالمعادن الثقيلة
٩٣	٤.٣ الجاهزية النباتية للمعادن الثقيلة في التربة.....
٩٧	٥.٣ سلوك المعادن الثقيلة في الترب الملوثة
١١٤	الفصل الرابع: الملوثات العضوية المديدة
١١٤	١.٤ المقدمة
١١٤	٢.٤ ماهية الملوثات العضوية المديدة POPS
١٢٢	٣.٤ الخواص الفيزيا- كيميائية للملوثات العضوية المديدة POPS
١٢٣	٤.٤ سلوك المركبات POPS في التربة وديمومتها
١٢٥	٥.٤ زمن مكوث الملوثات المديدة في التربة.....
١٢٦	٦.٤ الآليات التي تساهم في تشكيل الأجزاء المتبقية المديدة في الترب
١٣٢	٧.٤ الجاهزية الحيوية للمركبات POPS في التربة
١٣٥	الفصل الخامس: آليات التلوث والتأثيرات المتبادلة بين التربة والملوثات
١٣٥	أولاً- آليات التلوث.....

١٣٥	١.١.٥. المقدمة.....
١٣٦	٢.١.٥. احتفاظ التربة بالملوثات
١٤٢	٣.١.٥. انتقال الملوثات في التربة.....
١٤٤	٤.١.٥. التحولات الكيميائية للملوثات في التربة
١٥٦	ثانياً- تأثيرات الملوثات في الكائنات الحية الدقيقة للتربة
١٥٦	١.٢.٥. المقدمة.....
١٥٧	٢.٢.٥. أنماط تأثير الملوثات
١٦٠	٣.٢.٥. تأثيرات الأنواع المختلفة من الملوثات في الأحياء الدقيقة.....
١٦٥	الفصل السادس: معالجة التربة الملوثة.....
١٦٥	١.٦. المقدمة
١٦٦	٢.٦. مفهوم مستوى التلوث
١٦٦	٣.٦. استراتيجيات معالجة التربة الملوثة.....
١٦٨	٤.٦. تقنيات معالجة التربة الملوثة
١٦٩	أولاً: تقنيات المعالجة الفيزيائية
١٦٩	١- الإزالة والرمي خارج الموقع: Excavation and Off-site Disposal
١٦٩	٢- التمديد Dilution
١٧٠	٣- الفصل والتجزئة Separation-Fractionation
١٧٠	٤- طريقة الفصل بفعل حركية الالكترونات Electrokinetic separation
١٧٠	٥- غسل التربة Soil-Flushing and Soil-Washing
١٧٢	٦- التثبيت الفيزيائي Physical stabilisation
١٧٣	٧- المعاملة الحرارية Thermal treatment
١٧٤	٨- استخلاص بخار التربة Soil vapor extraction
١٧٥	٩- التحلل الضوئي Photolysis
١٧٦	ثانياً ً: تقنيات المعالجة الكيميائية.....
١٧٦	١- الانخمداد الطبيعي Natural attenuation
١٧٧	٢- التثبيت-التسكين Fixation-Stabilization
١٧٩	٣- الأكسدة والإرجاع الكيميائية Chemical Oxidation-Reduction

١٨٠	٤- استخلاص محاليل الإذابة Solvent Extraction
١٨٠	٥- إزالة العناصر الهالوجينية Dehalogenation
١٨١	٦- الادمصاص على الكربون الحبيبي الفعّال (" GAC Granulated Active Carbon ")
١٨١	ثالثاً ٥: تقنيات المعالجة الحيوية.....
١٨٢	التحلل الحيوي.....
١٩٩	المعالجة بالنباتات
١٩٩	١- الاستخلاص النباتي Phytoextraction
٢٠٥	٢- الفلترة أو الرشح الجذري Rhizofiltration
٢٠٨	٣- التحلل النباتي Phytodegradation
٢١٠	٤- تثبيت النباتي Phytostabilisation
٢١٢	٥- التطاير (التصعيد) النباتي Phytovolatilisation
٢١٤	٥.٦. اختيار تقنية المعالجة والاتجاهات المستقبلية.....
٢١٤	الفصل السابع: رصد تلوث التربة
٢١٤	١.٧. المقدمة
٢١٥	٢.٧. إعداد خطة الرصد والمراقبة.....
٢٣٤	الفصل الثامن: تشريعات حماية التربة من التلوث
٢٣٤	١. تشريعات حماية البيئة
٢٣٦	٢. تقييم الأثر البيئي EIA في العالم وسوريا
٢٤٤	3. إجراءات تقييم الأثر البيئي EIA
٢٥٩	المراجع العربية
٢٦٠	المراجع الأجنبية

القسم الثاني: تلوث المياه ومعالجتها

٢٦٤	الباب الأول: تلوث المياه
٢٦٥	الفصل الأول: مفهوم التلوث البيئي
٢٦٥	١.١. المقدمة
٢٦٦	٢.١. درجات التلوث.....

٢٦٧	٣.١. أهمية الماء
٢٦٨	٤.١. الغلاف المائي للأرض
٢٦٩	٥.١. الأمن المائي في الوطن العربي
٢٧٠	٦.١. دورة المياه في الطبيعة
٢٧٢	٧.١. أنواع المياه الطبيعية
٢٧٢	١.٧.١. المياه السطحية
٢٧٦	٢.٧.١. المياه الجوفية
٢٧٧	الفصل الثاني: مفهوم التلوث المائي
٢٧٧	١.٢. المقدمة
٢٧٩	٢.٢. تصنيف ملوثات المياه
٢٧٩	١.٢.٢. الملوثات البيولوجية للمياه
٢٨٢	٢.٢.٢. الملوثات الكيميائية للمياه
٣٠٥	٣.٢.٢. الملوثات الفيزيائية للمياه
٣١٠	الباب الثاني: تنقية المياه ومعالجتها
٣١٤	الفصل الأول: تنقية المياه السطحية
٣١٤	١.١. المقدمة
٣١٥	٢.١. مراحل تنقية المياه السطحية
٣١٥	١.٢.١. الترشيح
٣١٥	٢.٢.١. المعالجة بغاز الكلور
٣١٦	٣.٢.١. الترويق
٣١٨	٤.٢.١. الترسيب
٣١٨	٥.٢.١. الترشيح السريع
٣٢٠	الفصل الثاني: تنقية المياه الجوفية
٣٢٠	١.٢. المقدمة
٣٢١	٢.٢. العمليات المتبعة لتنقية نوعية المياه الجوفية وتحسينها
٣٢١	١.٢.٢. التهوية
٣٢١	٢.٢.٢. إزالة المواد العالقة

٣٢٢	٣.٢.٢. إزالة عُسر الماء
٣٢٦	٤.٢.٢. إزالة المواد غير العضوية
٣٢٧	٥.٢.٢. إزالة المواد العضوية
٣٢٧	٦.٢.٢. تطهير المياه الجوفية
٣٢٨	٧.٢.٢. إزالة الطعم والرائحة من المياه الجوفية
٣٢٨	الفصل الثالث: معالجة مياه الصرف الصحي
٣٢٨	١.٣. المقدمة
٣٢٩	٢.٣. تصنيف مياه الصرف الصحي
٣٢٩	٣.٣. تركيب مياه الصرف الصحي
٣٣١	٤.٣. أنواع ملوثات مياه الصرف الصحي
٣٣٢	٥.٣. مراحل معالجة مياه الصرف الصحي
٣٣٢	١.٥.٣. المعالجة التمهيدية
٣٣٣	٢.٥.٣. المعالجة الأولية
٣٣٥	٣.٥.٣. المعالجة الثانوية (البيولوجية)
٣٤٣	٤.٥.٣. المعالجة الثالثية (المتقدمة)
٣٤٨	٦.٣. محطات معالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات
٣٤٩	١.٦.٣. تصنيف محطات المعالجة بالنباتات
٣٥٠	٢.٦.٣. مراحل معالجة المياه الملوثة في محطات المعالجة بالنباتات
٣٥٣	٧.٣. مجالات استعمال مياه الصرف الصحي المعالجة
٣٥٥	الفصل الرابع: تحلية ماء البحر
٣٥٥	١.٤. المقدمة
٣٥٦	٢.٤. مراحل معالجة مياه البحر في محطات التحلية
٣٥٦	٣.٤. طرائق تحلية مياه البحر
٣٥٦	١.٣.٤. تحلية مياه البحر بالتقطير
٣٦٢	٢.٣.٤. طرائق تحلية مياه البحر بواسطة فصل الأملاح بالأغشية
٣٦٦	٣.٣.٤. تحلية مياه البحر بطريقة التجميد أو البلورة
٣٦٨	٤.٤. مشروعات تحلية المياه

٣٧٠	الفصل الخامس: تطهير المياه.....
٣٧٠	١.٥. المقدمة
٣٧١	٢.٥. طرائق تطهير المياه
٣٧١	١.٢.٥. الطرائق الحرارية
٣٧١	٢.٢.٥. الطرائق الفيزيائية
٣٧٢	٣.٢.٥. تأثير بعض أيونات المعادن الثقيلة.....
٣٧٢	٤.٢.٥. الترشيح عبر الأوساط المسامية المختلفة
٣٧٢	٥.٢.٥. استعمال المؤكسدات القوية
٣٧٧	الفصل السادس: رصد تلوث المياه ومكافحته.....
٣٧٧	١.٦. المقدمة
٣٧٨	٢.٦. مراقبة تلوث المياه ورصده
٣٧٨	٣.٦. مكافحة التلوث وحماية المياه.....
٣٧٩	١.٣.٦. إجراءات مكافحة التلوث المائي والحد منه.....
٣٨١	٤.٦. التشريعات البيئية لحماية المياه.....
٣٩١	المراجع العربية
٣٩٤	المراجع الأجنبية.....

مقدمة

تُعد المشكلات البيئية من المواضيع المعاصرة الهامة، نظراً لازدياد عدد السكان المضطرد في العالم، وما يترتب عن ذلك من استنزاف للموارد الطبيعية، وزيادة في كمية الملوثات البيئية. ويؤثر تلوث التربة والمياه تأثيراً مباشراً في الإنسان والنبات والكائنات الأخرى، وفي نظم البيئة وذلك حسب درجة التلوث، وكمية المواد الملوثة، وتركيبها الكيميائي، ومصدر التلوث.

ويضم هذا الكتاب بين دفتيه موضوعات هامة في مجال علم تلوث التربة والمياه وطرائق مُعالجتهما ليكون خير عون لطلاب السنة الخامسة في قسم علوم التربة، مُوفراً عليهم الكثير من العناء في الرجوع إلى العديد من المراجع والمصادر ذات الصلة العلمية، ومرجعاً في مادته للمُختصين والدارسين، وقد تم عرض موضوعاته بشكل مبسط، وضمن سياق علمي دقيق ومُترابط.

ويتألف الكتاب من قسمين، يتناول القسم الأول أنواع ملوثات التربة وآليات التلوث وانتقال الملوثات وطرائق مُعالجة التربة الملوثة ورصد تلوثها، أما القسم الثاني فيتألف من بابين، حيث يتطرق الباب الأول إلى مفهوم التلوث البيئي وأنواع المياه الطبيعية، ومفهوم التلوث المائي وتصنيف ملوثات المياه، ويتناول الباب الثاني طرائق تنقية المياه السطحية والجوفية، وطرائق مُعالجة مياه الصرف الصحي، وتحلية ماء البحر، وتنظيف المياه، ومُراقبة التلوث المائي ورصده ومُكافحته.

وبمثل هذا الكتاب محاولة متواضعة لا تخلو من بعض الثغرات أو الهفوات، ونتقدم بالشكر لمن يُقدم النصيحة البناء والرأي السديد، ويُساعد على تداركها مُستقبلاً.

كتب الدكتور محمد سمير الحافظ الفصل الأول والثاني والثامن من القسم الأول، بينما كتب الدكتور إياد سراي الدين الفصل الثالث والرابع والخامس والسادس والسابع من القسم نفسه، في حين كتبت الدكتورة هالة شيخاني الفصول الثمانية للقسم الثاني مُنفردة.

مع أملنا أن نكون قد وفقنا بذلك

والله ولي التوفيق

المؤلفون

دمشق، نيسان، ٢٠١٥

القسم الأول: تلوث التربة ومعالجتها

الفصل الأول

أساسيات

١ - تعريف التلوث Pollution:

هو كل تغير ناتج عن تدخل الإنسان في أنظمة البيئة ويؤدي ضرراً للكائنات الحية بشكل مباشر أو غير مباشر، ويشمل الماء والهواء والتربة والغذاء، فالتلوث طبيعي أو مشترك أو مستحدث والمسبب بيولوجي أو كيميائي أو فيزيائي.

٢ - تعريف تلوث التربة Soil pollution:

هو أي تغيير فيزيائي أو كيميائي أو حيوي في التربة، يسبب في تغير استغلالها وجعلها غير قادرة على الاستغلال المفيد دون معالجة، ويمكن أن يكون التلوث من نتائج سوء استعمال التربة واستغلالها، أو نتيجة إهمالها أو بسبب استعمال المواد الكيميائية (أسمدة، مبيدات....) وينتج عنها أضرار تهدد صحة الإنسان أو صحة الموارد الطبيعية وسلامتها. ويظهر عند ارتفاع نسبة الأملاح في التربة لسوء الري وضعف الصرف، للتخلص من المياه الزائدة مما يؤدي إلى ترسيب الأملاح. أو نتيجة شدة تماسك ذرات التربة لاستخدام الحراثة السطحية الضعيفة. وهو ضعف القدرة الإنتاجية للأرض لعدم استخدام دورات زراعية عليها وقلة استخدام الأسمدة وانتشار الآفات الزراعية والنباتات المتطفلة.

٣ - مكونات طبقات التربة:

أ) الطبقة السطحية Top soil: عمقها لا يزيد عن عدة سنتيمترات وتحتوي عادة على معظم المادة العضوية الناتجة عن تحلل بقايا النبات والحيوان والتي يطلق عليها اسم الدبال Humus، وتعيش في هذه الطبقة معظم الكائنات الحية الدقيقة والديدان الأرضية وحشرات

التربة والنيماطودا والفطريات. ويعمل الدبال على زيادة خصوبة التربة. وعموماً فإن هذه الطبقة تكون معرضة للانجراف.

ب) الطبقة تحت التربة Sub Soil: تحتوي على قليل من الدبال والكائنات الحية الدقيقة مقارنة بالطبقة السطحية.

ت) الطبقة الصخرية Weathered Sub Soil: هي طبقة الصخر الأصلي التي تكونت منها التربة ولم تتأثر بعوامل التربة.

تتمتع التربة بنظام ديناميكي متزن. ويقوم الإنسان داخل هذا النظام بعمليات متعددة من ري وصرف وتسميد. وقد يؤدي تدخل الإنسان أحياناً إلى تحويل الأراضي الزراعية الخصبة إلى أراضي فقيرة، عن طريق تعرية التربة وفقدانها للطبقة السطحية الخصبة، وهو ما يسمى بتجريف التربة أو تجريف مساحات واسعة من الأراضي باستغلالها كمناجم، كما ويتدمر الغطاء النباتي بشق الطرق ويؤدي إلى التصحر و تتلوث التربة بالمبيدات الكيميائية والفضلات البشرية السائلة والمخلفات الصناعية.

٤- عوامل ادمصاص الملوثات على سطح التربة:

تعتمد حركة الملوثات في التربة على الخواص الكيميائية والفيزيائية للتربة، ويتوقف معدل انتقال الملوثات على خواص التربة الفيزيائية وبالتحديد التوزيع الحجمي للحبيبات والكثافة الظاهرية ولأنهما يؤثران على حركة الماء والهواء خلال التربة. يؤدي قيمة رقم الحموضة الـ pH إلى ترسب العناصر الثقيلة. فالزرنيخ والسلينيوم يكونان أكثر حركة في الظروف القاعدية بينما الرصاص والزنك والكاديوم في الظروف الحامضية. تصبح العناصر اقل حركة في الأراضي الخفيفة عنه في الأراضي الطينية.

يحدد ادمصاص الملوثات على سطح التربة العوامل التالية:

١) نشاط معادن الطين وفعاليتها:

التربة الغنية بمعادن الطين تبقي أثر الملوثات لسنوات عدة وكلما كانت الحبيبات المكونة لها صغيرة فتكبر مساحة السطح وتزداد شدة جذب المكونات الملوثة.

٢) نوع التربة الزراعية:

إن التربة الرملية تحتفظ بجزيئات مكونات المادة الملوثة مدة أطول على مر السنين مقارنة بباقي أنواع الترب.

(٣) محتوى التربة الزراعية من المياه:

إن غسل الملوثات من الأراضي الخفيفة أسهل منه في الأراضي الثقيلة.

(٤) درجة حرارة التربة:

كلما زادت درجة الحرارة الناتجة من تأثير درجة حرارة الشمس وخاصة في الخمسة سنتيمترات من الطبقة السطحية زاد فقدان الملوثات من الأراضي الزراعية. وكلما زادت درجة الحرارة وقلت الرطوبة فقدت الملوثات بسهولة أكثر. أدى تبخر التربة الزراعية إلى زيادة تركيز النحاس والزنك.

(٥) درجة ذوبان المادة الملوثة:

كلما زادت درجة ذوبان المواد الملوثة زادت سهولة فقدها عن طريق الصرف بعكس المواد غير القابلة للذوبان. وكلما ازدادت درجة ذوبان المواد الملوثة ازدادت حركتها في التربة.

(٦) درجة حموضة التربة:

قيمة رقم الحموضة الـ pH تؤدي إلى ترسب بعض العناصر الثقيلة. وتؤثر درجة الحموضة في مدى ذوبان كثير من الملوثات في المياه الموجودة في التربة الزراعية.

(٧) مدى قدرة المادة الملوثة على التطاير:

وجد أنه كلما ازدادت قيمة الضغط التي تتعرض له المادة الملوثة كلما ازداد معدل تطايرها وفقدتها بالتالي من التربة مع الأخذ بعين الاعتبار العوامل الأخرى من مسامية التربة ونوعها ودرجة الرطوبة والحرارة وتركيز المادة الملوثة.

(٨) السعة التبادلية للشوارد:

كلما كانت قدرة الأيونات الموجبة والسالبة على إزاحة جزيئات المادة الملوثة من نسيج التربة كلما أمكن التخلص من ارتباط المادة الملوثة وإزاحتها من التربة.

(٩) مسامية التربة:

تلعب المسامية دوراً هاماً في انتقال غازات العمليات الحيوية في التربة وفي التبخر أو التسامي أو التطاير وبالتالي في انتقال مكونات المادة الملوثة وإبعادها عن التربة.

(١٠) تأثير الضوء:

إن الضوء الحاوي على الأشعة الشمسية والأشعة فوق البنفسجية يمكنه من تكسير وتعقيم وتطهير الكثير من الملوثات في الطبقة السطحية من التربة.

(١١) تفاعلات التربة:

تحدث في التربة تفاعلات عديدة مثل الأكسدة والإرجاع والاماهة والحلمهة وتشكيل معقدات مخلبية وتفاعلات حيوية بفعل الأنزيمات التي يمكن أن تفكك وتحلل وتحطم المادة الملوثة أو قد تحولها حسب آلية التفاعلات الكيميائية من مادة ملوثة إلى مادة غير ملوثة .

(١٢) محتوى التربة من العناصر:

وجود بعض العناصر مثل الفسفور والبوتاسيوم والكالسيوم والمنغنيز والحديد والألمنيوم والسليكون في التربة قد يساهم في احتفاظ التربة ببعض الملوثات.

(١٣) حالة المادة الملوثة:

أي حالة المادة الملوثة على شكل مستحلب أو محبب أو مسحوق قابل للبلل أو مسحوق تعفير أو مسحوق محلول حقيقي واحتوائها على مواد إضافية تلعب دوراً كبيراً في سهولة أو صعوبة التخلص من المادة الملوثة.

(١٤) العمق الذي يوجد فيه الملوث:

إن توضع المادة الملوثة على سطح التربة يسهل تحريرها ويقلل امتصاصها على سطح حبيبات التربة بسبب عوامل عديدة، بتأثير أشعة الشمس أو الغسل بمياه الصرف أو بتأثير الكائنات الحية الدقيقة، ولكن عند توضع المادة الملوثة على أعماق كبيرة في التربة قد يمنع تخليصها من أعماق التربة وتبقى وتحفظ بالتالي مدة طويلة.

(١٥) حجم حبيبات الملوث:

كلما كان حجم حبيبات الملوث صغيراً كلما أمكن بسهولة هدمه وأكسدته وتحليله وإبعاده وتفكيكه، وعكس ذلك فكلما كانت حبيباته كبيرة اشترت مقاومته للتحلل والهدم والأكسدة.

(١٦) نوع الملوث وتركيبه الكيميائي:

إن الصفات الفيزيائية والكيميائية وتفاعلاتها للملوث لها دور كبير في شدة أو ضعف ارتباط مكونات الملوث في التربة وهنا يوجد طيف واسع من الروابط الكيميائية التي تؤثر سلباً أو إيجابياً على حجم التلوث الحاصل.

(١٧) محتوى التربة من الكائنات الحية:

يزداد نشاط الكائنات الحية الدقيقة في التربة بزيادة كمية المادة العضوية، هذا يعني أنه كلما زادت المواد العضوية قل بقاء الملوثات في التربة لزيادة نشاط الكائنات الحية التي تساعد على تفكك المواد الملوثة والتي يصل عددها إلى عدة ملايين من الكائنات الحية الدقيقة قادرة على

الأكسدة أو الإرجاع أو التحليل المائي أو تحطيم كثير من الملوثات، ويمكنها إزالة بعض مجموعات الكربوكسيل أو الميثيل النشطة، ولكن في حالة فقر التربة بهذه الكائنات الحية فتعجز عن هدم الملوثات وتكسيروها.

٥- النماذج الرئيسية للتربة الملوثة:

تختلف درجة تلوث التربة بالملوثات المختلفة، باختلاف مصادر التلوث التي تؤدي إلى تلوثها وهذا ما يمكن من تمييز أربعة نماذج رئيسية لتلوث التربة وهي:

أ- التربة الملوثة بمقالب القمامة ومواد الفضلات والنفايات السائلة والصلبة، وتتمثل مقالب القمامة في نواتج عمليات مقالع الحجارة، والتعدين.

كما أن الفضلات البشرية، ونفايات المصانع والمتاجر تشكل مصدر تلوث للتربة، فتتراكم تلك النفايات والفضلات وتسبب تراجع استغلال التربة، وسيتدنى غطاؤها النباتي الطبيعي وستسير في طريق التهجير حتى لتوصف فيما بعد بالتربة المهجورة.

ب- التربة المهملة (المهجورة):

١) التربة المهملة التي خربت، وتوجد في مناطق المدن الصناعية وفي المراكز الريفية ومنها التربة التي خربت في أثناء الحروب أو مهابط الطيران الحربي.

٢) التربة المهملة التي كانت تستعمل كخطوط سكك حديدية أو طرق نقل برية.

٣) التربة المهملة التي كانت مناطق محاجر ومناجم تعدين وتوقف فيها العمل الآن وتتميز بكثرة الفجوات والمغائر وبأكوام النفايات الكبيرة.

٤) التربة التي ليست مستغلة زراعياً بشكل جيد وغير مصانة باستمرار وتستعمل كمناطق تجميع للقمامة والنفايات.

ج- التربة التي تستغل لتصريف النفايات الصناعية المحتوية على مواد كيميائية مضرّة ومواد نشطة إشعاعياً، وهذه التربة تصبح غير ملائمة للزراعة أو حتى للسكن.

د- التربة الزراعية ذات الاستغلال الفعال والكثيف، والتي يعود استغلالها إلى استخدام الطرائق والأساليب الزراعية الحديثة، مثل استخدام المخصبات الكيميائية والمبيدات. غير أنها تتعرض لتأثيرات التلوث الذي تسببه مياه التصريف التي تدخل التربة من الجداول والأنهار الملوثة، وهذا كله يسبب تلوث الأرض وتدني استغلالها مع تقدم الزمن.

في التربة الزراعية، وتبقى الملوثات في الأراضي الخفيفة، وعادة ما يزداد بقاء الملوثات في التربة الزراعية كلما زادت كمية المواد العضوية بها، حيث تقوم هذه المواد بادمصاص تلك الملوثات، بحيث تمكنها من التسرب أو الرش أو الصرف.

٦- أثر ملوثات التربة على الإنسان:

تنتقل المواد الملوثة في التربة إلى الإنسان مع الدورة الغذائية وتسبب أضراراً صحية على المدى الطويل بتراكمها في أنسجة جسم الإنسان، ان مدة التعرض وحجم الجرعة وشدة التعرض وخواص المواد السمي، قد تسبب تسمماً حاداً أو تسمماً مزمنياً، قد لا يظهر إلا بعد فترة زمنية طويلة على شكل أمراض، مستعصية كالسرطان، وتسبب مركبات النترو والنتروزو والآزو والأمينات الأليفاتية والعطرية، عوامل محرضة للسرطان. وقد تسبب هذه الملوثات تشوهات وتسمماً كبدياً وكلياً وسموماً عصبية وقلبية، وحسب منظمات سلامة المواد الكيميائية المشترك بين برنامج الأمم المتحدة للبيئة ومنظمة العمل الدولية ومنظمة الصحة العالمية تختلف آثار المواد معدنية أو عضوية، وتسبب ٢٢ مرضاً بينها فيروس التهاب الكبد الوبائي.



٦- أثر ملوثات التربة على الإنسان:

تنتقل المواد الملوثة في التربة إلى الإنسان مع الدورة الغذائية وتسبب أضراراً صحية على المدى الطويل بتراكمها في أنسجة جسم الإنسان، ان مدة التعرض وحجم الجرعة وشدة التعرض وخواص المواد السمي، قد تسبب تسمماً حاداً أو تسمماً مزمناً، قد لا يظهر إلا بعد فترة زمنية طويلة على شكل أمراض، مستعصية كالسرطان، وتسبب مركبات النترو والنتروزو والأزو والأمينات الأليفاتية والعطرية، عوامل محرضة للسرطان. وقد تسبب هذه الملوثات تشوهات وتسمماً كبدياً وكليوياً وسموماً عصبية وقلبية، وحسب منظمات سلامة المواد الكيميائية المشتركة بين برنامج الأمم المتحدة للبيئة ومنظمة العمل الدولية ومنظمة الصحة العالمية تختلف آثار المواد معدنية أو عضوية، وتسبب ٢٢ مرضاً بينها فيروس التهاب الكبد الوبائي.



الشكل (١) تأثيرات التلوث على الانسان.

تؤدي الأبخرة الناتجة والمتفككة عند وصولها للجهاز التنفسي إلى التهابات خطيرة وقد تسبب أوراماً دموية أو أن يصاب الإنسان بالفشل الكلوي والكبد، أو قد تحفز على تشكل أمراض سرطانية. وقد تؤثر على الجهاز العصبي، يسبب دوخة مع صداع في الرأس، مع اقياء وتشنج، توسع في حدقات العينين وعدم تحسسهما للضوء. وقد يصاب الإنسان بأمراض رئوية، صداع، حساسية، سرطان الجلد. على سبيل المثال إن بعض الأحياء المائية تركز بعض المعادن السامة مثل أنواع من الجمبيري التي تركز عنصر الزنك، وتمتص الطحالب الفناديوم والبيريليوم فتهدد صحة الإنسان. ظهور مرض الخناق المفاجئ الناتج عن استهلاك النترات حيث تختزل داخل الجهاز الهضمي إلى نترت يذهب إلى جهاز الدوران ويشكل مع الهيموغلوبين مركب الـ Methemoglobin السام وخاصة للأطفال الرضع.

تؤثر ملوثات المواد المشعة على الخلايا والأنسجة ونخاع العظام، وعلى الجينات فتتلف الكروموسومات، فتؤدي إلى الطفرات الوراثية وتنتج تشوهات خلقية.

الفصل الثاني

أنواع تلوث التربة

- ١- الأمطار الحامضية.
- ٢- العواصف الريحية والكثبان الرملية وغبار الحرائق والبذور وغبار المجابل وصوامع الحبوب.
- ٣- المحارق والحرائق (حرق المحاصيل الحقلية).
- ٤- البراكين والزلازل والنيازك والألغام وبقايا المتفجرات.
- ٥- النفايات.
 - ١.٥. المخلفات الصلبة.
 - ٢.٥. الفضلات الآدمية والمجاري (الصرف الصحي).
 - ٣.٥. مخلفات محطات المعالجة.
 - ٤.٥. النفايات الطبية.
 - ٥.٥. نفايات المصانع ومخلفات البيوت البلاستيكية.
 - ٦.٥. المخلفات الإشعاعية (مفاعلات وحروب ومخلفات الأقمار ودفن المخلفات في الصحراء).
- ٦- الأسمدة الكيميائية.
- ٧- المبيدات الكيميائية.
- ٨- المناجم (النفط والفحم والمقالع).
- ٩- المعادن الثقيلة.

١ - التلوث بالأمطار الحامضية:

يلعب المطر دوراً مهماً في تشبع التربة بالملوثات المختلفة. فتحتوي الأمطار الحامضية على حمض الكبريت وحمض الآزوت، والتي تعمل على تغيير درجة الحموضة بمحيط الجذور ولفترة قصيرة فتؤدي إلى موت بعض الكائنات الحية الدقيقة في التربة. وتروي الأمطار المزروعات والأشجار، ويزيد في الغلاف الغازي نسب وجود غازات مثل أكسيد الكبريت وأكسيد النتروجين (الأزوت)، حيث تتصاعد هذه الغازات حتى مستوى السحب فتتفاعل مع قطرات الماء مكونة أحماضاً .

تأتي أسباب زيادة الغازات من المصانع التي تطرحها في الجو بشكل أبخرة وذرات معدنية من قبل ذرات كربونات الكالسيوم وكربونات المغنيزيوم وهذه الأبخرة تتحلل في الرطوبة الجوية والماء وتمارس دور الأسس أو القواعد. إن نترات النشادر أو كبريتات النشادر المتساقطة في الجو تلوث التربة.

من خلال الأمطار التي تهطل فوق مقالب القمامة، تعمل على انحلال الملوثات العضوية والكيميائية القابلة للذوبان فتتلوث التربة.

تتعرض ثروة الغابات لموت الأشجار وتؤدي إلى تعرية التربة.

لا يوجد تلوث واضح بالأمطار القاعدية ويقتصر سقوطها في بعض المناطق الجافة وشبه الجافة.

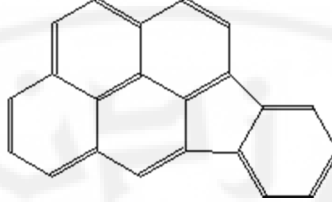
٢ - التلوث الناتج عن العواصف الرملية والكتبان الرملية وغبار الحرائق والبذور والمجابل

والصوامع:

تسبب العواصف الرملية إلى قلع الأشجار وتعرية التربة. وتسبب الأغبرة إلى منع تنفس التربة وإلى إفقار التربة من مخصباتها الطبيعية عن طريق تفاعلها مع المعادن والأسس وجرف المخصبات وتخليص التربة من مخزونها من المعادن والكاتيونات القاعدية الضرورية لنمو الغابات والنباتات بشكل طبيعي.

يترسب على التربة العوالق الهوائية والغبار TSP (Total Suspended Particulate)، المحمولة مع الهواء الجوي، إذ تسقط المواد السامة من الجو على التربة وتتغلغل فيها مباشرة أو مع المطر ملوثة التربة والانتاج النباتي، ويجب أن لا يزيد التركيز السنوي للعوالق عن ١٠٠ ميكروغرام/م^٣ ، حسب منظمة الصحة العالمية. وقد تحمل هذه العوالق مركبات حلقيه عطرية

PAH (Aromatic Hydrocarbons Polycyclic)، تلوث التربة وذات خواص مسرطنة أظهرها جهاز الكروماتوغرافيا الغازية مع كاشف الأشعة فوق البنفسجية مثل مركب ايندوبيرين.



Indeno(1,2,3-cd)Pyrene

وتسبب الرياح نقل بذور مختلفة منها بذور الحشائش، وقد يحصل تلوث عن طريق البذور بحدوث خلل في التركيب الميكروبي للتربة بدخول نوع من الفطريات الممرضة، ويحدث تنافس بين الفطريات القاطنة للتربة والفطريات الداخلة للحصول على المواد الغذائية، مما قد يخلق حالة تضاد بين الفطريات.

إن دخول بذور ملوثة في تربة معقمة يؤدي إلى زيادة نسبة الإصابة حيث توجد ميكروبات ضارة. عند معرفتنا بظاهرة التضاد بين الفطريات في التربة يمكن استخدامها في المقاومة الحيوية وتقليل نسبة المرض في النبات.

٣- التلوث بالمحارق و الحرائق (حرق المحاصيل الحقلية):

الحرائق ومسبباتها متنوعة وقد ينجم عنها غازات حمضية، وعناصر ثقيلة، زئبق، رصاص، زرنيخ، كادميوم، زنك، كلور، مركبات عضوية، أول أكسيد الكربون، أكاسيد الكبريت والآزوت. وينجم عن المحارق الطبية ديوكسين والزئبق (يجب معالجة النفايات الطبية قبل أن يتم طمرها بمحارق نظامية مغلقة اغلاقاً تاماً لأنه قد ينتج منها مثلاً هالوجينات عطرية شديدة الخطورة). وجد أن مشكلة التلوث بالرصاص تزداد مع استهلاك البنزين، وتبين من خلال تحليل الترب بأن الرصاص يكون مركزاً في آفاق التربة العليا أكثر من السفلى، ومعروف أن الرصاص لا يتسرب إلا بمقادير بسيطة نحو الطبقات السفلى. ويتراوح تركيزه الطبيعي بين ٢ - ٢٠٠ ميكروغرام/غرام ويصل تركيزه بالتربة الملوثة إلى ٣٠٠ ميكروغرام/غرام.

٤- التلوث بالبراكين والزلازل والنيازك والألغام وبقايا المتفجرات في الحروب والتدريبات العسكرية

براكين مشهورة حدثت في العالم أدت إلى تلوث التربة مثل بركان كاتماي في آلاسكا وبركان كراكاتاو في اندونيسيا، نجم عنها صخور وغبار من أثر الانفجارات البركانية. إن ارتفاع الصهر البركاني إلى سطح الأرض أدى إلى دفن التربة الزراعية وتغطيتها بأكوام من الضخور البركانية كالبازلت في السويداء. ترافق البراكين كميات هائلة من الأبخرة والغازات مثل أكاسيد وكبريتات وكلوريدات المعادن المختلفة فيؤدي إلى تلوث التربة وفسادها.

ترافق الحروب والتدريبات العسكرية واستعمال الذخيرة والمتفجرات والألغام وفوارغ الذخيرة بانتشار ملوثات عضوية مثل مركبات نثرو العطرية وعناصر معدنية مثل النحاس والزنك الناتجين من فوارغ الذخيرة والرصاص الناتج عن الذخيرة، واحتمال انتشار للنظائر المشعة وتلوث التربة في المواقع العسكرية بالغبار المترسب وعوادم احتراق الفحم والخشب ومخلفات الحروب بزيوت وشحوم المدرعات المتسربة وبقايا الاطارات. ان انهيار السدود والطوفان أو قنوات الري تؤدي الى تغيير بنية التربة، وهي دخول بنية رطبة الى تربة دافئة المناخ أو تربة كانت جافة، فتتحول الى تربة ذات بنية صالحة لكثير من الحشرات، مع ظهور نباتات على الشواطئ، وتؤثر على ارتفاع مناسيب المياه الأرضية وتؤثر على خصوبة التربة ونوعية المياه وتملح التربة نتيجة ظاهرة الخاصية الشعرية. وضعف شبكات الري والتصرف. وقد تستخدم السدود في الحروب كما قام الملك الآشوري سنحاريب لمدينة بابل عام ٦٨٩ قبل الميلاد، حيث شيد سداً كبيراً على نهر الفرات ثم قام بهدمه واغرق المدينة وأدى الى الحاق الضرر بالزرع والتربة وقلب الموازين الطبيعية في البيئة. تسبب السدود فقدان التربة الزراعية والغابات نتيجة الغمر بمياه خزان السد. غمر سد أسوان ٤٠٠ ألف هكتار من التربة.

كما منعت السدود من انتقال رسوبيات الأنهر، فسببت الى انحسار الدلتا الى الداخل، وتتغلغل مياه البحر بسبب عمليات التعرية وعدم وجود مواد غرينية آتية من النهر.

٥- التلوث بالنفايات:

إن مصطلح النفايات السمية يشير إلى سم قاتل مميت، فان المادة الملوثة التي تدخل الجسم وتمتص من قبل الكائنات الحية فان كميتها تسبب اىذاء وضرراً بالصحة، وتعتمد السمية على الكمية السامة الموجودة في مجمل الكمية من المخلفات، فعلى سبيل المثال، إن عدة كيلوغرامات من الفينول في عشرة آلاف من أطنان من المخلفات يمكن أن لا يعتبر ساماً.

إن التخلص من المخلفات الصلبة والسامة. مخلفات المنازل والمصانع والمستشفيات يمكن أن تؤدي إلى تلوث التربة بالعناصر الصغرى والثقيلة، فالتخلص منها سواء بإلقائها أو دفنها في التربة يؤدي إلى تلوث التربة وانتقالها إلى المياه الجوفية.

١.٥. التلوث بالمخلفات الصلبة:

أ - قمامة المدن:

تتزايد كميات القمامة بمعدلات رهيبية بسبب الزيادة المضطردة في عدد السكان والتطور الاستهلاكي، وتسبب مشاكل صحية وتشجع على زيادة نمو الحشرات كالذباب والقوارض والبعوض وبانت تشكل خطراً واضحاً ليس على الإنسان فحسب، وإنما على تلوث التربة الزراعية التي تستغل في نمو المحاصيل الزراعية وتشتمل على أنواع أهمها: المخلفات الورقية، الخشب، الأقمشة والخرق والجلود، قطع زجاج وسيراميك، المخلفات المعدنية ومعلبات فارغة، مخلفات التعليب الغذائية البلاستيكية، مخلفات المطابخ من المنازل والفنادق والمدارس، المأكولات التالفة.

وتتمثل النفايات التجارية في الفضلات الناتجة عن الأماكن التجارية الكبرى، ومناطق البيع الصغيرة والأعمال الأخرى من مطاعم وفنادق ومخازن بجميع أنواعها، ومن أهم مصادرها الأسواق الكبرى، كأسواق الخضروات والفواكه، وأسواق بيع الحيوانات، واللحوم ومخلفات المذابح والمسالخ، وأسواق البيع الدورية الأسبوعية التي تأخذ نفاياتها طابعاً مستقلاً، في حين أن معظم نفايات المحلات التجارية الصغيرة تختلط مع النفايات المنزلية ومخلفات المستشفيات التي تجمع في حاويات القمامة. ويطلق على النفايات النباتية والحيوانية على بقايا النباتات (بقايا الأعلاف ومخلفات حصاد المحاصيل الزراعية)، ومخلفات الحيوانات من إفرازاتها والروث والحيوانات النافقة وأجسادها بعد موتها، ونواتج المسالخ من مواد عضوية متنوعة ناتجة عن ذبح الأبقار والأغنام والدواجن والمكونة من الأحشاء وما تحتويه، وأجزاء الجلد. وتتصف المخلفات الحيوانية بسرعة تفككها وتفسخها وتحللها من قبل الكائنات الحية الدقيقة.

ب- مقابل القمامة العشوائية ومطامر النفايات الصلبة:

تعتبر أساليب الدفن في مقابل تحت سطح الأرض، أو الردم في الأراضي المنخفضة، أو البرك أو التكويم في صورة هضاب صناعية على شكل أكداش متراكمة فوق بعضها بصورة أكوام أو دفن النفايات في الصحراء أو حفر تكونت في أراضي المحاجر ومداخل المناجم أو طمر

النفايات الطبية أو رمي المخلفات في البحر، وهذا شكل من عيوب التخلص من مخلفات القمامة انظر الشكل (٢). فالمكبات العشوائية تشوه المنظر العام وتلوث عصاريتها التربة والأراضي الزراعية. ومما يزيد الأمر سوءاً التقيب والنش، حيث يقوم عدد كبير من الأشخاص بنش المخلفات الصلبة وجمع المواد الموجودة فيها.

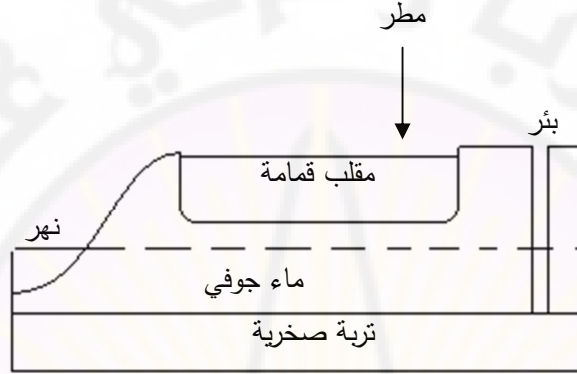
أمكن اليوم من تحديد حجم المطامر باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ووفق نظام تحديد الأمكنة العالمي، نظام المعلومات الجغرافي (Geographic Information System) GIS.

إن حجز المخلفات في أصغر مساحة وقد تكون على أرض زراعية خصبة لها فائدة في زراعة محاصيل زراعية أو بجانب مجرى مائي، هو تخلص مؤقت من المشكلة وتصدير لها من مكان لآخر، وتحتوي القمامة على الكثير من المواد العضوية التي يتوالد فيها كثير من الميكروبات وتستطيع الاحتفاظ بحيويتها فترة طويلة، تحتوي القمامة على بقايا عضوية تسمح بنشاط الفعل البكتيري مما يترتب عليه انطلاق غازات مختلفة، كالنشادر، أول أكسيد الكربون، كبريت الهيدروجين. حيث ينحل غاز ثاني أكسيد الكربون في الماء، لينتج عنه حمض الكربون أي سائل حامضي . يتميز غاز كبريت الهيدروجين برائحته الكريهة وغير المقبولة. ويتصف غاز أول أكسيد الكربون بسميته وخاصة مع ارتفاع درجات تراكيزه في مقابل القمامة حيث ينطلق فجأة محدثاً آثاراً سلبية في البيئة الحوية المجاورة. فالأمطار والمياه الجوفية والجارية تحت سطح الأرض والملوثة تضخ نحو السطح لتروي بها المزروعات مؤدية إلى تلوث التربة. وتعتبر مصدراً لانتشار الأمراض والأوبئة وتلوث الآبار الجوفية، انظر الشكل (٣)، وتنتقل الأمراض كالتيفويد والكليرا والاسهالات والالتهابات الكبدية الوعائية وأمراض الطاعون وحمى الملاريا، يحدث ذلك في مقابل القمامة العشوائية خاصة عند سقوط الأمطار.

يضاف إلى هذه القمامة الحيوانات النافقة التي تفرز الحشرات من الذباب والناموس والصراصير، ويجلب القوارض والفئران والحيوانات الضالة مثل القطط والكلاب الناقلة لأمراض فيروسية كالسعار وتزيد من الروائح الكريهة.



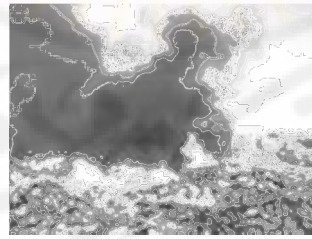
الشكل (٢) مقلب قمامة عشوائي ونبشها من قبل الحيوانات ملوث للبيئة



الشكل (٣) مقلب قمامة ملوث للبيئة.

ت - حرق القمامة:

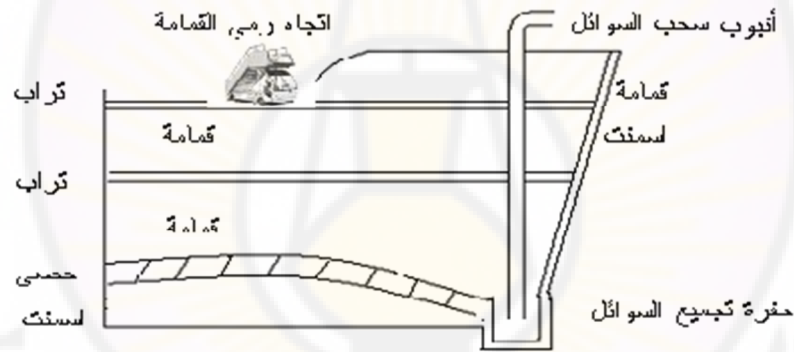
أكثر الطرائق المسببة للتلوث وهي أساليب قديمة . إن حرق مقالب القمامة بطريقة الترميد وتحويلها إلى رماد تفاقم المشكلة من إصدار للدخان القاتل (الضباب الحمضي السام) الذي يتصاعد حاملا معه عشرات المواد السامة، مثل أكاسيد الكربون والنيتروجين والكبريت، ويسبب أمراض الصدر والحساسية والتهاب الصوت واحتقاناً في العينين وصعوبة التنفس وإحساساً بالإعياء عندما يختلط مع رطوبة الجو انظر الشكل(٤).



الشكل (٤) حرق مقلب قمامة الملوث للبيئة.

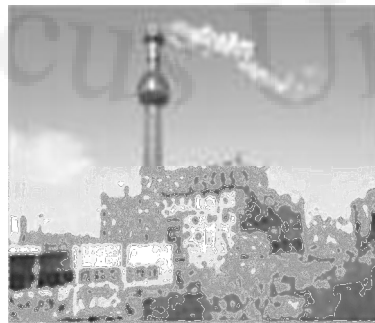
١.١.٥. مقالب القمامة النموذجية:

قد يقع مقلب القمامة في منطقة تغذية المياه الجوفية وقد تتغلغل السوائل من خلال الصخور المتشققة والمتصدعة. إن مشاريع إدارة النفايات بالاعتماد على مصنع مقلب القمامة النموذجي، البعيد عن مناطق تغذية المياه الجوفية، وأسلوب الدفن الصحي بموقع، مصمم هندسياً يعتمد على أساليب التجميع بعد الفرز الآلي المغناطيسي والوزن لحساب الكمية الواردة، ثم عملية خلط وتجانس، وبالتالي الضغط بالمعدات الثقيلة الخاصة لتقليل حجمها وتغطيتها بطبقة من الحصى ٦٠ سم ثم طبقة من الرمال ٦٠ سم، لكي تمنع خروج الروائح وتهافت الحشرات، انظر الشكل (٥). إن هذا يعتبر بمثابة نظام التنقية (الفلتر) لتصريف الغازات الذي يسحب بمضخات خاصة، حيث أن غاز الميثان الناتج أخف من الهواء، ويبحث عن مكان أقل ضغطاً للصعود إلى الأعلى. يلي ذلك تقليب ميكانيكي وتخمير نهائي ونظام خاص وتعبئة على شكل سداد عضوي.

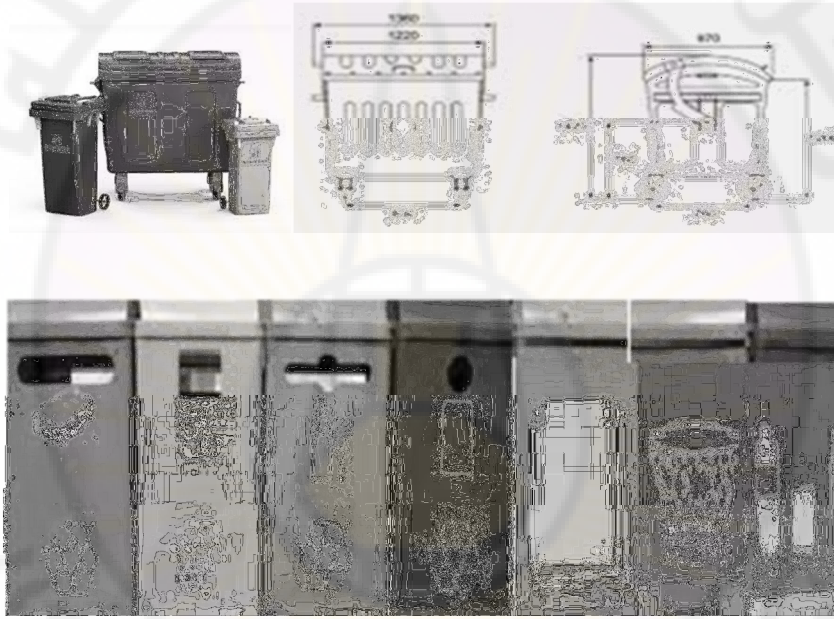


الشكل (٥) مقلب قمامة نموذجي.

إن تحسين جمع النفايات وفرزها مع انتشار مخلفات التعبئة البلاستيكية، وإعادة تأهيل مقلب قمامة مع توفر اشتراطات المواصفات البيئية ومطابقة أحكام تقويم الأثر البيئي، مع فصل النفايات الطبية يوفر مساحة للأرض الزراعية أو تحويلها إلى حدائق بيئية أو حرق النفايات نموذجياً في محطات لتوليد الطاقة الكهربائية. انظر الشكلين (٦) و (٧).



الشكل (٦) توليد الكهرباء من مخلفات القمامة.



الشكل (٧) حاويات قمامة نموذجية.

٢.١.٥. معالجة النفايات:

تعالج النفايات إما بهدف الحصول على مساحات خضراء وتحويل المقلب إلى حدائق بيئية، وللتقليل من درجة تلوث التربة يلجأ إلى عدة عمليات تهدف إلى التقليل من حجم النفايات وكميتها والتخلص من المركبات السامة:

١- طريقة الترميد Incineration :

تتحرق النفايات وتحول إلى رماد ويتولد غاز ودخان ومركبات كيميائية تنطلق في الجو وتساهم في تلوث الجو المحيط بها .

٢- طريقة التحليل الحراري Pyrolysis :

تقطر كامل النفايات في جو معدوم من الهواء فينتج خليط من الهيدروجين والميثان وثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون والايثيلين، وبعض من هذه النواتج يمكن أن يستعمل بدلاً من الغاز الطبيعي كوقود. كما ينتج أيضاً من تلك النفايات المحللة، العديد من المواد مثل : القطران والزفت وزيت خفيفة وكبريتات الأمونيوم وفحم الكربون، ويمكن إعادة استعمال الكثير من تلك المواد المتخلفة من عملية التحليل الحراري، ففحم الكربون كمثال، يمكن أن يستعمل بدل الفحم البلدي (فحم الخشب). من مميزات هذه الطريقة إنقاص كمية النفايات بدرجة كبيرة وقابلية بعض نواتجها لإعادة الاستعمال مرة أخرى.

٣- تحرير النفايات من موادها القابلة للاستعمال Reclamation :

إن العديد من المواد التي ترمى ضمن مقالب القمامة يمكن أن تكون صالحة لاستعمالها مرة أخرى، لذا يجب فرزها من مقالب القمامة قبل أن يتم ترميد تلك المقالب أو تحليلها حرارياً، وتتمثل تلك المواد في الحديد الخردة ومعادن أخرى غير حديدية مثل الورق، بقايا الخبز، زجاج، إطارات، زيوت مستعملة، قطع الآلات، بقايا الحواسيب والبطاريات وبقايا السيارات.

٢.٥. التلوث بالفضلات الأدمية والمجاري (الصرف الصحي):

إن اتباع الطرائق غير السليمة للتخلص من مياه الصرف الصحي يزيد من مشكلة التلوث، ويؤدي صرفها إلى تراكم الأملاح في منطقة انتشار الجذور، مما يؤدي إلى تقليل النفاذية وتسبب زيادة الملوحة والقلوية، تتكون من السوائل البولية والمواد البرازية العضوية ومخلفات المطابخ والغسل والشطف والتنظيف والحمامات.

وتحتوي على الكيماويات التي يستخدمها الإنسان في التنظيف. إن بول الإنسان الجاري مع مياه الصرف الصحي يحتوي على اليوريا والأملاح الضارة لجسم الإنسان وبعض الطفيليات والبكتيريا والميكروبات وبقايا الأدوية المختلفة، ويحتوي البراز على مخلفات الطعام والمواد الصلبة العضوية التي لا يستطيع جسم الإنسان هضمها، وبعض الطفيليات والبكتيريا والميكروبات أو فيروسات معوية ومنها فيروسات: الهيپاتيتس المعدي، بوليو، كوكساس، أدينو، روتا، نورردك. وبكتريا: السالمونيلا، الشيغيلا، يرسينيا إنتروكوليتيكا، يرسينيا بسيدو-تيوبيركوليسيز، لبيتوسبيريا، فرانيسيلاتبولارينسيزن، دايسيبسيكولي، إنتروتوكسيميتيك-أي كولي، بسيدوموناوز، وفيريو. وكذلك بقايا

الأدوية المختلفة تساعد على نمو الكائنات الحية الدقيقة فتتكاثر التربة. إن وجود الأكسجين يساعد على تكسير المواد العضوية وتحليلها، ولكن إذا قلت كمية الأكسجين تقل مقدرة كسر المواد العضوية إلى نواتج غير ضارة ويحدث عفونة وتشكل كبريت الهيدروجين. وقد تحتوي التربة على مصادر العدوى بديدان الأمعاء من بيض ويرقات والتي قد تصل إلى التربة مباشرة عن طريق الإنسان أو عن طريق مياه الري الملوثة بمياه الصرف الصحي وبعض تلك الديدان تسبب أمراضاً خطيرة مثل الأنتيميا وأمراض الكبد والكلى والأمعاء.

حسب درجة تطور النظام المحيط للإنسان (التقنية العلمية) في المدينة أو الريف أو في المعسكرات أو المساكن المنفردة، قد تخط هذه المخلفات جميعها وتجمع بمجرى واحد مع مياه الشرب ومخلفات المصانع وتذهب إلى محطات المعالجة. أو ترمى بمسطحات مائية مثل الأنهار والبحيرات أو المحيطات. أو تصرف في الصحاري والأراضي غير المسكونة فتلوثها وتلوث المياه الجوفية. إن هذا التصرف يؤدي إلى تنشيط البكتيريا وازدياد أعدادها والتي يمكنها استهلاك كميات كبيرة من الأوكسجين وبالتالي تؤدي إلى ازدهار أنواع عديدة من البكتيريا اللاهوائية فتحلل المواد العضوية منتجة غازات سامة مثل سيان الهيدروجين. أهم الطرق التي يستعملها الإنسان للتخلص من فضلاته الآدمية وتصنف أنها من الطرق الجافة هي:

- ١- **مراض الحفرة الصغيرة (مراض القطة):** حفرة صغيرة سطحية تردم بعد ملئها.
- ٢- **مراض الحفرة العميقة:** حفرة قطرها ٥٠ سم ويتراوح عمقها ما بين ٤ إلى ٦ أمتار ويمكن تبطينها بالاسمنت، وقد تصل إلى منسوب المياه الجوفية ولا يمكن استعماله عند ارتفاع منسوبها، وتعتبر تكلفتها رخيصة وتستعمل في المساكن الريفية.
- ٣- **مراض الصندوق:** صندوق راشح يبنى من عدة بلاطات من الاسمنت، كلما امتلأ تفرغ محتوياته وتستعمل بعد مدة كافية كسماد. يستخدم في المساكن الريفية التي يكون فيها مستوى مياه الرش مرتفعاً.
- ٤- **مراض الخزان الأصم (خزان الصرف أو خزان النزع):** حفرة تبني تحت الأرض بالاسمنت المسلح بشكل يجعل جدرانها غير قابلة لتسرب السوائل أي صماء. وعند سقوط الفضلات بداخلها فإن المواد العضوية تتحلل بفعل البكتيريا إلى غازات وديال تتجمع فيها الماء المختلط بالفضلات، والذي يطلق عليه سائل الصرف الصحي، فإنه يملأ الخزان لعدم

تسرب المياه والسوائل، ويلوث الأرض والتربة المحيطة بالمنزل والذي يجب أن تفرغ محتوياته باستمرار لأنه سريع الامتلاء ويصرف بعيداً إلى محطات المعالجة أو في أرض بعيدة عن موارد المياه. وبنائه عالي الكلفة.

٥- **المرحاض الكيميائي:** حجرة لا تسمح بتسرب الماء إطلاقاً وتصنع عادة من صفائح معدنية وتملأ بالماء، ويضاف إليه الصودا الكاوية أو ماء الكلور فيتحلل البراز بطريقة كيميائية وتظهر من الميكروبات. وهي طريقة مكلفة ولكنها صحية.

٦- **مرحاض الوعاء:** يوضع وعاء تحت قاعدة المرحاض ليتلقى المواد البرازية والبول ويتم جمع الأوعية يومياً وتفريغها بواسطة عمال متخصصين ويوضع بالأوعية مواد تقلل من الرائحة وهي طريقة قديمة جداً تستعمل بالقرون الوسطى بقصور الأمراء وتحتاج لإشراف دقيق وعدم الإهمال لكي لا تتلوث التربة المحيطة.

٧- **مرحاض الإسقاط:** يبنى بحيث تسقط الفضلات في مجرى مائي مباشرة، كما هو في بعض السفن والقطارات القديمة أو بعض البيوت المبنية على ضفاف الأنهار فتلوث كل شيء وينجم عن استعمالها أوبئة التيفوئيد الخطيرة إضافة لتلوث التربة والمياه.

٨- **الخزان الراشح:** يشبه الخزان الأصم إلى أن حوائطه غير صماء لأنها لا تبطن بالأسمنت مما يؤدي إلى تسرب السوائل في التربة، وبذلك لا يمتلئ إلا بعد فترة طويلة، ولذلك يسمح فيه بتسرب المياه العادمة ويمكن استعمال مرحاض وعاء مستقبل البول والبراز ذي محبس مائي، كما يمكن أن تصرف فيه فضلات أكثر من مرحاض وهو لا يحتاج للتفريغ إلا في فترات متباعدة، لتحلل المواد به وتحولها إلى سائل تتسرب من الجدران إلى التربة حولها، ومن أهم عيوبه الاحتياج لمكان متسع بحقل المنزل لبنائه بعيداً عن الجدران حتى لا تنهار مما لا يتوفر في منازل الريفيين، ويستعمل في المباني الكبيرة التي عدد سكانها كبير، كما أنه قد يعمل على تلوث المياه الجوفية.

٩- **خزان التحليل:** أدخل تعديل على الخزان الراشح الذي يقوم بعمليتين هما تحليل المواد العضوية وتصريف السوائل خلال المسام في حوائطه، حيث هنا يفصل بين العمليتين ببناء خزان أصم صغير يسمى خزان التحليل بحجم يتسع للفضلات التي تتكون من المبنى في ٢٤ ساعة، وفي هذه المدة يتسرب الجزء الصلب من الفضلات ويتحلل الجزء العضوي إلى غازات وسوائل ومواد تنوب في المياه، وهذه تخرج إلى بئر للصرف يشبه الخزان الراشح.

وهذه أفضل طريقة للتخلص من الفضلات الآدمية المتخلفة من المباني الكبيرة مثل المستشفيات والمصانع مادام بها ماء جار في مواسير ولا تتصل بمجار عمومية.

١٠- **خزان التحليل والخندق الراشح:** يشبه في تكوينه وعمله خزان التحليل الا أنه يستبدل بئر الصرف بخندق راشح ليستقبل المياه من خزان التحليل، ويكون طول الخندق متناسباً مع كمية المياه المنصرفة ومدى مسامية الأرض مما يجعله أكثر كفاية من سطح بئر الصرف في عملية التشرب.

٥ . ٣ . التلوث بمخلفات محطات المعالجة "الحمأة، وإنتاج الغاز الحيوي":

إن تقدم التقنية العلمية والتطور والمدنية وبهدف سام هو حماية التربة والمياه والهواء من التلوث المتوقع حدوثه نتيجة صرف مياه الصرف الصحي، أدى إلى نظام الصرف الصحي. ففي المدن الحديثة يتكون نظام الصرف الصحي من شبكة أنابيب تبدأ من الأبنية، تجمع مياه المجاري وتتسع هذه الأنابيب شيئاً فشيئاً حتى تتحول إلى أنفاق كبيرة تنتهي في محطة معالجة الصرف الصحي. في محطة الصرف الصحي وبعدة مراحل (الباب الثاني) تسرع عملية تحلل المواد العضوية الموجودة بعمل البكتيريا إلى غازات ومياه وفضلات. ويستعمل عادة في أغلب المحطات غاز الكلور لقتل الميكروبات أو يستعمل النباتات للتنقية والأشعة فوق البنفسجية أو الأوزون. المياه الناتجة عن محطات الصرف الصحي تحتوي على ٩٥ % ماء والباقي مواد عالقة ومواد عضوية ومعادن ثقيلة وأملاح معدنية وبعض العناصر مثل الأزوت والفسفور والبوتاسيوم وتحلل مخبرياً ويومياً وهي:

(اللون ، حرارة الماء ، الطعم والرائحة، العكارة، الناقلية، الرقم الهيدروجيني pH، الأكسجين الكيماوي COD، الأكسجين الحيوي BOD، الكلوريدات، النترات، الأمونيوم، الكبريتات، الفسفات، الحديد والرصاص وعناصر ثقيلة أخرى). وتقوم نوعيتها حسب المواصفات القياسية (الباب الثاني). إن الرواسب الناتجة عن المعالجة كبيرة وهي تجمع وتكثف وتهضم وتجفف وتسمى الحمأة.

٥ . ٣ . ١ . الحمأة:

تعتبر سابقاً الحمأة من ملوثات التربة حسب محتواها من المواد، لكن في الوقت الحاضر تركزت الجهود على الاستفادة من كمياتها الهائلة في تخصيب المزروعات كسماد محسن للتربة، بعد ضبط محتواها من العناصر الثقيلة والمؤذية ومراقبتها مخبرياً ومعرفة محتواها بدقة من العناصر الثقيلة والأملاح والميكروبات المختلفة.

(١) العناصر الثقيلة:

أهمها الكاديوم والرصاص والزنك والنيكل والزرنيخ والنحاس ويختلف تركيزها حسب مصدر الصرف الصحي. تحدد صفات التربة الزراعية وخواصها الفيزيائية والكيميائية مدى ادمصاص العناصر الثقيلة على سطح معادن التربة. إن قيمة رقم الحموضة الـ pH يؤدي إلى ترسب العناصر الثقيلة. إن العناصر الثقيلة تذوب أكثر في التربة الحامضية مقارنة بالقلوية تدمص التربة الطينية كمية أكبر من العناصر مقارنة بالتربة الرملية. يؤدي تراكم العناصر الثقيلة بالتربة إلى أضرار بالتربة عند امتصاصها من قبل المحاصيل الزراعية. لا بد أن تضاف الحمأة دون حدود التراكم المسموح به وإضافتها على أساس الوزن الجاف.

(٢) الأملاح:

تعتبر أملاح النترات والكلور والصوديوم والمغنيزيوم والفسفات أهم الأملاح الموجودة في الحمأة مهما اختلف نوعها وهي تسبب تملح التربة ورفع الضغط الأسموزي لمحلول التربة، وبالتالي انخفاض قدرة النبات على امتصاص الماء وانخفاضية في إنتاجية المحاصيل الزراعية. إن التركيز العالي من الكلور ضار للتربة وللنبات ويؤثر بشكل سلبي. تتفاعل شاردة النترات وشاردة النتريت مكونة النتروزامين المسببة للسرطان والتي تمتص من التربة بواسطة النباتات، وعن طريق الغذاء تنتقل إلى الإنسان والحيوان وتسبب خطراً كبيراً على الصحة. وينتقل النترات إلى مياه الشرب ولاسيما بتلوث الينابيع والآبار الجوفية، حيث يرجع النتريت في المعدة والأمعاء ويتحد مع هيموغلوبين الدم فيقل قدرته على امتصاص الأكسجين، ويتأثر الرضع وتصاب بمرض الازرقاق. يتحمل الإنسان ١٥ ميلليغرام من النترات يومياً من وزنه ومن النتريت فقط ٤ ميلليغرام من وزنه يومياً. ويتم بالمعالجة بالبكتريا للتقليل من شوارد النترات والفسفات. ويستعمل الطحالب أو بعض النباتات للتخفيف من العناصر الثقيلة القابلة للامتصاص.

(٣) الكائنات الحية الدقيقة:

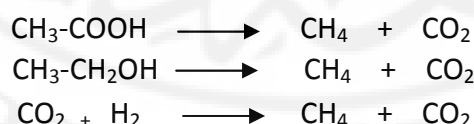
توجد في الحمأة مئات الملايين من الكائنات الحية الدقيقة في الغرام الواحد، حسب مصدرها ونوع المعالجة التي خضعت له، وتسبب للإنسان عند انتقالها إليه ديدان الاسكاريس، وهي من الديدان المعوية، إضافة إلى البكتريا المسببة للكوليرا والتيفوئيد، وكذلك الفيروسات المسببة لفيروس الكبد الوبائي. كل هذه المخاطر تخفف بمعالجة الحمأة بدرجة عالية من الحرارة وإضافة الكلور أو الأوزون للتخلص من المكروبات الممرضة.

٢.٣.٥ إنتاج الغاز الحيوي:

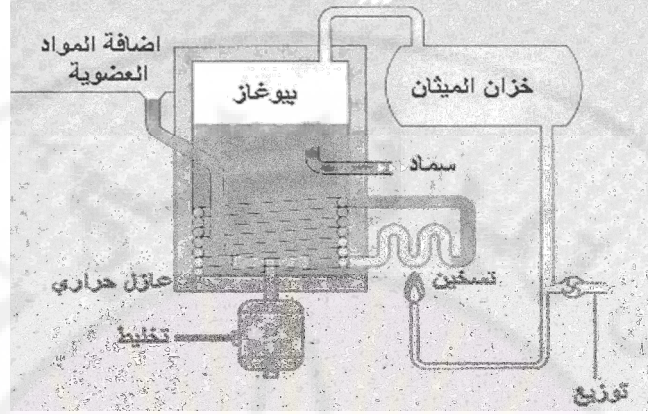
إن إنتاج الغاز الحيوي تجربة مميزة باتجاه زيادة الاستفادة من المخلفات الزراعية بالتخمير في الحصول على السماد العضوي والغاز الحيوي والتي لها بعد اقتصادي وبيئي من جهة توفير الطاقة وتوليد طاقة كهربائية تصل إلى ١٠٠ كيلوواط (إنتاج ٧٠٠ ميغاواط ساعي سنوياً بفرض أن عدد ساعات عمل المجموعات ٧ آلاف ساعة في السنة) بكلفة منخفضة مناسبة تكون في متناول كل فلاح سوري.

حيث ينتج عن نظام معالجة الصرف الصحي أو روث الحيوانات أو فضلات طعام أو عشب وقش، وذلك من أبراج المخمرات بواسطة الميكروبات الهوائية التي تستنفذ الأكسجين، وتقوم بكتريا العصوية والكروية بتحليل المواد العضوية إلى خليط من الأحماض الدسمة مثل حمض الخل وحمض النمل وحمض الزبدة، إضافة إلى الكحولات مثل الميثانول والإيثانول والبروبانول وغازات ثاني أكسيد الكبريت والهيدروجين. وتحت ظروف لاهوائية وبواسطة بكتريا الميثان حيث ينتج خليطاً من غازات منها الميثان CH_4 (غاز مفيد بالوقود الطبيعي كمصدر للطاقة وهو قابل للاشتعال ويولد ٨.٥ حريرة تحت صفر مئوية وضغط ١ جو ونسبة ٥٠-٦٠% من مجموع الغازات) ، وغاز ثاني أكسيد الكربون (بنسبة ٣٠-٣٥%)، بخار الماء H_2O (يؤدي لارتفاع الرطوبة ولصدئ المعادن) وحمض كبريت الهيدروجين H_2S (يؤدي لصدئ المعادن وسمية مرتفعة للإنسان) وغاز الهيدروجين H_2 وأول أكسيد الكربون CO وأكاسيد الكبريت (لا تزيد نسبتها عن ٥-١٠%). تكمن صعوبة إنتاج الغاز الحيوي بالفترة الطويلة التي تستغرقه عملية التخمير وهذا يتعلق بالدرجة الأولى على احتواء الحمأة على المادة السللوزية. ويصل كمية الطاقة التي يمكن توفيرها من استعمال الغاز الحيوي إلى ١٠%. وتقوم بتوليد الكهرباء بواسطة المحركات الغازية. ويستفاد من الغازات في معالجة الحمأة.

تتميز بكتريا الميثان من عصوية أو حلزونية أو كروية الشكل بالقدرة على النمو بظروف لا هوائية وبدرجة حرارة مثلى ٣٠ °م ، وقيمة درجة الحموضة $pH = ٧$ ، ولكن تراكم الهيدروجين وحمض كبريت الهيدروجين وغاز الأمونيا يثبط نشاط بكتريا الميثان، وينشط معدل الرطوبة المثلى وعملية التقلب المستمر. ويتم تنقية غاز الميثان من الكبريت بواسطة إمراره على فلتر حصوي. وفيما يلي التفاعلات الكيميائية لتشكيل الميثان:



ويوجد أنواع عديدة من المخمرات تخدم القرى أو مزرعة كبيرة أو عدة منازل.



الشكل (٨): مسقط هندسي لمخمر قمامة الغاز الحيوي.



الشكل (٩): مخمرات إنتاج الميثان.

٥. ٤ التلوث بالنفايات الطبية:

تتضمن النفايات الطبية مخلفات المستشفيات والعمليات الجراحية كالأنسجة والغيارات الملوثة والضمادات والسرنجات والأدوات الحادة والحقن، والمواد الكيميائية المستعملة في التعقيم ومخلفات المخابر والعيادات، مثل الحشوات السنية ومخلفات الصيدلية وبقايا الأدوية والعقاقير الطازجة والفاضة المنتهية (تقدر ب ١٢٢ كغ / سرير من المشفى يومياً) ، تضاف إليها الزئبق الذي ينتج من بطاريات موازين الحرارة. إضافة الى خطر نقل هذه الملوثات بفضل الذباب والبعوض والقوارض التي تنقلها لمسافات واسعة. لا يجب تصنيف هذه النفايات مع غيرها وإنما فصلها وفرزها ومعالجتها بشكل منفصل عن باقي الفضلات، وبشكل مغلق ويفضل أن توضع

في حفرة مبطنة بالكلس وبإغلاق تام ويجب عدم استعمال مكبات مفتوحة وإنما مطمورة بمقابل خاصة، وحرقت أجزاء مخلفاتها بمحارق نظامية خاصة. وينبغي عدم رميها مع مخلفات الصرف الصحي وإنتاج الحماة مطلقاً لخطورة ملوثاتها على التربة والإنسان. أو استخدام الأوتوكلاف أي التعقيم بالحرارة والضغط ومن ثم طمرها.

٥.٥ التلوث بنفايات المصانع وبنفايات المواد البلاستيكية:

تنتج الوحدات الصناعية والصناعات التحويلية على سبيل المثال، كمية هائلة من نفايات العالم الخطرة، وهي تتألف من مواد صلبة، وملوثات سائلة وكميات متباينة من المواد الكيميائية المعلقة السامة وغير السامة القابلة للاشتعال أو غير القابلة للاحتراق والمنحلة في الماء قلوية وحمضية، منها ملوثات السيانيد وقد تحتوي على مجموعة من المركبات العضوية تعرف باسم مركبات ثنائي الفينيل متعددة الكلور PCB، وتوجد في مخلفات مصانع الورق والنسيج والمطاط، وقد منع استخدامها في أغلب دول العالم. والزئبق الناتج عن صناعات الأجهزة الكهربائية. وتحتوي المخلفات الصناعية على مئات من المنتجات الملوثة مثل الأصباغ والمواد الملونة والأملاح والأحماض والأسس. لا توجد اليوم طريقة واحدة للتخلص من كل هذه المواد الملوثة، ولكن يجب أن تقوم كل صناعة بتنقية مخلفاتها ومعالجتها قبل القائها. إن عملية التخلص من هذه النفايات باهظة التكاليف، وأصبحت مشكلة الدول الغنية هي كيفية استغلال البلدان الفقيرة للتخلص من النفايات الخطرة التي تولدها الصناعات الاستخراجية والتعدينية ونفايات معامل الأبحاث وصناعة الأدوية ونفايات مصانع الأسلحة الكيماوية ونفايات مصانع المبيدات. ولبعض المواد الكيميائية التي توجد بالمخلفات الصناعية تأثير مباشر على حياة الكائنات، فبعض هذه المواد سام وقاتل، مثل مركبات الفسفور العضوية، وبعض المنظفات الصناعية وبعض المواد المحتوية على الفلزات الثقيلة مثل الرصاص والزئبق .

أطنان من أنابيب الأترنيت العملاقة مرمية على الأرض، تنتشر أليافاً على مساحة واسعة وهي مضرّة جداً لصحة الإنسان خاصة عند تطاير شعيرات منها ودخولها إلى الرئة. هناك نوعان من المنظفات الصناعية، أحدهما سريع التفكك والتحلل بفعل الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في المجاري المائية، يسمى المنظفات الميسرة وهو لا يسبب تلوثاً. والنوع الثاني نوع ثابت ويقاوم التحلل بالعناصر الطبيعية ويسمى المنظفات العسرة يبقى أثرها الضار مدة طويلة وقد يؤدي إلى تغطية سطح المجرى المائي بطبقة سميكة من الرغوة تعزل مياه النهر عن أكسجين الهواء. وتلوثت السواحل وأصبحت غير صالحة لكثير من النباتات.

ازداد استهلاك المنظفات في الأعمال اليومية المنزلية وترمى مخلفاتها مع مياه الصرف وذات خواص سمية، وأدى اعتبارها من الملوثات العضوية ذات الوزن الجزيئي المرتفع، مثل مركبات ألكيل البنزن الخطية LABs والتي يوجد لها ٢٠ مأكب، والمُستخدمة في تصنيع المواد الفعالة سطحياً والخافضة للتوتر السطحي، وتنتج عن ألكلة البنزن بجزيئات من الفحوم الهيدروجينية، وتشكل مركبات ألكيل البنزن الخطية التي تجري لها عملية سلفنة للحصول على حمض السلفونيك المستعمل مع المنظفات، ولكن لها تأثير سلبي على متعضيات النظام البيئي الموجودة في التربة الزراعية اذا ما تجاوزت تراكيزها ٥ - ١٥ مغ/كغ. تحتوي مخلفات مصانع الطلاء الكهربائي على أيونات السيانييد وهي سم زعاف تقتل كل الكائنات الحية. يتسرب من مصانع التي تنتج هيدروكسيد الصوديوم بالتحليل الكهربائي لملح الطعام العنصر الثقيل الزئبق. تتراكم أكوام النفايات الصناعية في مواقع العمل حتى يتم نقلها إلى مناطق تصطف تحت السطح أو فوقه أو يمكن تخزينها حتى معالجتها بطرق مختلفة قبل تصريفها بإنقاص حجمها أو إعادة استعمال المواد المستخلصة منها أو إعادة تدويرها إلى عمليات تصنيع جديدة. إن نفايات إطارات السيارات الشاغرة لمساحة متزايدة من الأرض من الممكن إعادة استعمالها في تشييد الملاعب اصطناعياً بعد معالجتها. انظر الشكل (١٠).

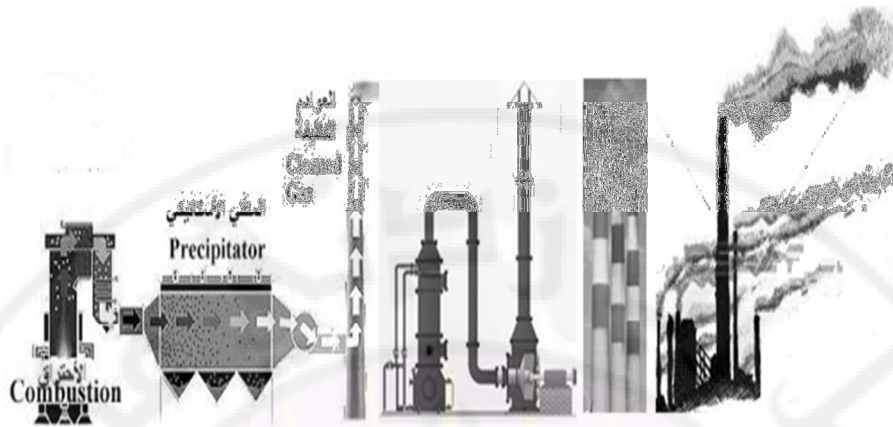


الشكل (١٠) مقلب قمامة من إطارات السيارات الملوثة للبيئة.

مساحة كبيرة من التربة الزراعية مغطاة بأكياس النايلون التي ترمى، حيث تعتبر النفايات البلاستيكية من ملوثات التربة فالبلاستيك هو مادة بوليميرية يمكن تشكيلها واستعمالها في أدوات نافعة من خلال التسخين أو الضغط أو القوالب، بتحويل الجزيئات البسيطة مونومير إلى جزيئات عملاقة مكونة البوليمير . وينتج بلاستيك طيع للحرارة بالحرق أو الحقن أو النفخ. وينتج بلاستيك متصلب لقوة ارتباط جزيئاته.

ومن أنواع البلاستيك:

- ١) بولي فينيل كلورايد (PVC): يصنع منه الأنابيب والمواسير والملابس الواقية والعبوات وصناعة السيارات والطائرات. (المونومير كلور الفينيل $H_2C=CHCl$).
 - ٢) الأورلون: ينتج من النتريل أكريل ويصنع من الخيوط النسيجية.
 - ٣) البولي سترين: ينتج من إيثيل الفينيل ويتميز بالخواص الزجاجية مع كثافة منخفضة فيستعمل للعزل الكهربائي وصناعة الأمشاط والأزرار والأوعية والإسفنج.
 - ٤) النايلون: ينتج من بلمرة ثنائي كلور حمض الأوبييك وثنائي أمين هكسان المستخرجة من مادة قطران الفحم، ويصنع منه شعيرات فرشاة الأسنان وخيوط الجراحة والجوارب النسائية وأقمشة الخيام والمظلات.
- يلوث البلاستيك التربة ويسبب مسامات التربة ويسبب موت الحيوانات عند انسداد الأمعاء. كما يسبب ضرراً كبيراً للإنسان عند انتقاله بواسطة الغذاء أو الغازات عند حرقه، وحساسية وضيق الأوعية الدموية.
- يوجد حالياً بعض المقترحات لمعالجة نفايات المصانع على النحو التالي:
- ١- تغيير البرنامج الإنتاجي مثل استخدام التكنولوجيا المعلقة مع إدارة سليمة للموارد الطبيعية ومنع استنزافها، وإنشاؤها بأماكن بعيدة عن التربة الزراعية، ومنع تشتت ملكية الأراضي، ورصد أنواع المخلفات الناتجة ومعالجتها أو تخزينها أو إتلافها بعناية شديدة.
 - ٢- استخدام وسائل تجميع الجسيمات والغازات مثل: المرشحات (للتخلص من الجسيمات) - المرشحات الكهربائية (للجسيمات) - السيكلونات (للجسيمات) - وسائل ميكانيكية أخرى (للجسيمات) - الأبراج (للغازات) - المواد الممتزة (للغازات) - معدلات الاحتراق الخاصة (للغازات).
 - ٣- المداخل العالية: وهي لا تقلل انبعاث المواد بل تقلل تركيزها على سطح الأرض في المناطق المحيطة.
 - ٤- إنتاج الوقود المنخفض في نسبة الكبريت واستخدامه.



الشكل (١١) معالجة نفايات المصانع.

٥ . ٦ التلوث بنفايات المواد المشعة:

يتم التخلص من نفايات المواد المشعة بشكل آمن حسب نوعها مثل مخلفات محطات توليد الكهرباء النووية أو أجهزة الإشعاعات المستهلكة في المستشفيات أو مخلفات المخابر الطبية الإشعاعية أو مخلفات المعالجة الطبية الإشعاعية، ضمن أسس علمية آمنة قد تتم بالدفن في مقابر إسمنتية أو خزانات صخرية في باطن الأرض أو تحت قاع البحار أو في أبار البترول الفارغة أو بعيدا عن متناول الإنسان في الصحراء. وتحكم طريق التخلص من النفايات المشعة، وخاصة اختبارات الأسلحة النووية السائلة أو استعمال اليورانيوم المنضب في الحروب (يحتوي على اشعاعات الفا وغاما ذات الطاقة المرتفعة)، ومخلفات المفاعلات النووية ومحطات الطاقة أو حوادث نقل الوقود الذري، أمور الكلفة الاقتصادية المرتفعة جداً التي لا يمكن لأحد أن يتحملها، إذا أراد الأمان من التلوث الإشعاعي، فهي مستهدفة وتستنفذ الدخل القومي. تم تحويل بعض الفضلات النووية السائلة ذات الإشعاع العالي إلى الشكل الصلب لكي تطمر في طبقات الأرض العميقة أو مناجم الملح المستنفذة أو أعماق البحار، فالحرارة العالية الناتجة عنها قد تتراكم لتصهر جدران الأوعية والحاويات الحديدية المحفوظة فيها.

وقد تتعرض المنطقة المخزن فيها الفضلات النووية لهزات أرضية فتسبب تلفها وتسرب الفضلات النووية. أكدت مصادر في وكالة الطاقة الدولية وتقارير لمنظمات حماية البيئة الدولية أن النفايات التي يلفظها مفاعل ديمونا النووي تشكل خطراً كبيراً على البيئة والمياه في الشرق الأوسط ككل

انظر الشكل (١١)، بسبب استمرار الإسرائيليين في دفن النفايات النووية في حاويات حديدية قديمة تعاني من التلف والصدأ، و تدفن في الصحراء. و تؤكد تلك التقارير على أن الكيان الصهيوني يدفن جزءاً من نفاياته النووية في ٢٠ موقعاً على الأرض السورية المحتلة من الجولان السوري المحتل، أبرزها موقع نشبة المقبلة الواقعة في أعالي جبل الشيخ .

فقد أثبتت الكوارث الإشعاعية مثل تلوث التربة بالنظائر المشعة عند إجراء أول اختبار نووي عام ١٩٥٠، حيث تسربت كميات هائلة من عنصري: ^{90}Sr و ^{137}Cs حيث ادمست على سطوح حبيبات التربة وارتبطت بالمادة العضوية في التربة وتعدى التركيز الإشعاعي في هذه التربة الحد المسموح به عالمياً، وأدى إلى خروج هذه الأراضي من الإنتاج الزراعي. فتبين أن التلوث لا مهرب منه كانت قواعد التخلص من النفايات موثوق بها.

وتلجأ بعض الدول لبيعها للدول النامية أو أصحاب النفوس الضعيفة لدفنها في أراضيها تخلصاً منها ومن كلفتها وحماية لمواطنيها وللأجيال القادمة. أهم مخاطر التسرب الإشعاعي للنظائر في التفجيرات النووية على الكائنات الحية :

١-اليود المشع : يتراوح نصف عمره الزمني لتحلله في الطبيعة بين ٨ أيام و ١٠٠ سنة، حيث يترسب بكميات عالية على أسطح الخضراوات ولحوم الأسماك ومياه الشرب فتلوثها بالإشعاع وعند تناولها من قبل الإنسان يصاب بسرطان الغدة الدرقية.

٢- الكربون المشع : يقدر نصف عمره الزمني لتحلله في الطبيعة نحو ٥٨٠٠ سنة، ويتركز على أنسجة النباتات والمحاصيل الزراعية ويسبب أمراض مزمنة للإنسان.

٣- السترونسيوم Sr ٩٠ : يتراوح نصف عمره الزمني لتحلله في الطبيعة بين ٥٣ يوماً ونحو ٢٨ سنة حيث يتركز على أنسجة النباتات وأجسام الحيوانات وعند تناولها من قبل الإنسان يصاب بأمراض سرطانية خطيرة، كما انه يتسرب نحو التربة فتفقد خصوبتها. وينصح عند حدوث الكوارث الإشعاعية أن يأخذ الإنسان أقراص اليود أو السوائل المضادة للأشعة والامتناع عن شرب الحليب ومشتقاته، كما ينصح بامتناع الأمهات عن إرضاع المواليد الجدد لخطورة أصابتهن بالتركيز المنخفض للسترونسيوم المشع.

٤- السيزيوم Cs : يتراوح نصف عمره الزمني لتحلله في الطبيعة بين (٢ - ٣٠) سنة ويتركز على المحاصيل الزراعية ونباتات المراعي والتربة، ويتسرب إلى المياه الجوفية. ويصاب الإنسان عند تناوله المحاصيل الزراعية أو لحوم الحيوانات الملوثة بالإشعاع بتلف الغدد العصبية والعضلات والأنسجة وأمراض الدم ويؤدي لأمراض سرطانية خطيرة. وينصح عند حدوث

الكوارث الإشعاعية بتناول أفراس الأديودين لتقليل من آثار الأشعة القاتلة. لا تقتصر خطورة النظائر المشعة عند تسربها على حياة الإنسان وحسب، بل يمتد تأثيرها إلى أجيال قادمة لأنها صعبة التحلل في الطبيعة ويحتاج قسم منها لمئات السنين لينعدم تأثيرها الخطر على حياة الإنسان.

" تعتبر الطيور أكثر الكائنات الحية حساسية للأشعة النووية وتقل درجة الحساسية عند الحشرات، في حين تتحمل بعض النباتات نسب معينة من الإشعاع النووي أكثر مما يتحمله الإنسان والحيوان. وكذلك الأمر بالنسبة لبعض الحشائش والشجيرات الصغيرة. وهناك نباتات ذات حساسية عالية للإشعاع النووي مثل: الشعير والذرة والبقوليات، وتتأثر المياه الجوفية بالإشعاعات النووية أكثر من تأثر مجاري المياه لضعف قدرتها على التنقية الذاتية قياساً بالمياه الجارية وبدرجة أقل في البحيرات الراكدة، وتسبب المياه الملوثة بالإشعاعات النووية أمراضاً سرطانية خطيرة للإنسان ".

وتبقى المراقبة الإشعاعية لأنواع الإشعاعات بقياس النشاط الإشعاعي لهذه النفايات بكل أشكالها انظر الشكل (١١) هي الحد الأدنى من الوقاية الإشعاعية للتلوث الإشعاعي الذي يعتبر مسألة بالغة التعقيد رغم التشريعات والقوانين الدولية الحازمة وإشارات التحذير والعقوبات الدولية الصادرة من قبل الأمم المتحدة، هذا من جهة، ومن جهة أخرى يجب معرفة نمط التلوث وأسلوبه والتطور الذي يطرأ على الملوثات والعوامل الذاتية المستندة إلى طبيعة الملوثات وماهيتها وكميتها وأثر هذه الملوثات على التربة إضافة إلى العوامل الخارجية التي تتركز على جغرافية الوسط الملوث.



الشكل (١١): دخان مفاعل نووي.



الشكل (١٢): تحذير بوجود نفايات مشعة.

٦. التلوث بالأسمدة:

إن السماد مفيد، ولكن استعماله بكميات فائضة تزيد عن حاجة النبات، تفوق احتياج النبات وفي مواعيد غير مناسبة لمرحلة نمو المحصول، قد يؤدي إلى هدم التوازن الكائن في التربة بين عناصر غذاء النبات، قد يبقى في التربة أو ينحل مع مياه الصرف والري والأمطار ويتسرب إلى المياه الجوفية والسطحية والبحيرات الموجودة، فيصبح له تأثير بيئي ذو حدين، فيسبب أذى لنسيج التربة الطبيعية وبالتالي يلوثها، وعندها يتعذر على النبات الاستفادة من العناصر الغذائية الأساسية الكبرى والصغرى ويتجلى الأثر السلبي على النبات بقلة الإنتاج رغم فائض السماد. وقد يسبب ظاهرة التراكم البيولوجي، حيث يزيد تركيز بعض العناصر الكيميائية إلى زيادة تراكيز العناصر السامة داخل خلايا الأحياء البشرية وينسب مكبرة قد تصل إلى ١٥٠ ألف مرة ويسبب ذلك تحول بعض الخلايا في الجسم البشري من خلايا نظامية إلى خلايا سرطانية. ويتضاعف حالياً استخدام الأسمدة الكيماوية بصورة خطيرة إضافة إلى الحماة (٣.٥.الحماة) ورغم ثبات المساحة المزروعة.

١.٦. التلوث بالأسمدة العضوية:

تعتبر الأسمدة العضوية مسؤولة عن زيادة خصوبة الأراضي الزراعية، وهي مفيدة جداً للتربة. واضطر المزارعون إلى استخدام كميات هائلة بغرض الحصول على أكبر إنتاج بوحدة المساحة. إن إضافة الأسمدة العضوية بكميات تفوق احتياج النبات وفي أوقات غير ملائمة لمرحلة نمو المحاصيل، يؤدي إلى خلل وهدم التوازن الكائن في التربة بين عناصر غذاء النبات. قد تضاف الأسمدة العضوية الطبيعية وهي بقايا نباتية أو حيوانية متحللة بواسطة البكتيريا، وتستعمل بكثرة لأنها أوفر اقتصادياً من الأسمدة العضوية الكيميائية الصناعية التي تتميز عندما

تستعمل بشكل فائض أنها أكثر تلوثاً. وخاصة لأن إنتاج الأسمدة الآزوتية والفسفاتية تعتمد على الحموض وأملاح الأمونيوم والفسفور والكلسيوم والبوتاسيوم. فالملوثات التي تنتج خلال التصنيع هي الانهيدرات، والأحماض، والفلور. ويتعلق حجم الملوث وتركيزه بمدى فعالية معدات التصنيع.

١.١.٦. التلوث بالأسمدة الفسفاتية:

ينجم عن فرط استخدام الأسمدة الفسفاتية مثل سماد السوبر فسفات أو من فسفات أحادية الكلسيوم $Ca(H_2PO_4)_2$ غير النقية أو الفسفوجيبسيوم (هو مخلف صناعي صلب من الصخر الفسفاتي الطبيعي يحمل شوائب من العناصر المعدنية والعناصر المشعة الطبيعية مثل الراديوم-٢٢٦ والرادون-٢٢٢ لكنه قد يحسن معامل نفاذية وسعة احتفاظية التربة بالماء، وهو يماثل في تركيبه الجيبس الطبيعي) ، والتي قد تنتقل إلى التربة بعض العناصر غير المرغوب بها مثل بعض العناصر المشعة أو الفلور وهي موجودة في تركيبها أثناء عمليات التصنيع أو إلى ترسيب بعض العناصر النادرة الموجودة في التربة الزراعية التي يحتاجها النبات في نموه وتحويلها إلى مواد عديمة الذوبان في الماء وغير صالحة لامتصاص النبات. أثر زيادة امتصاص الفلور الناتج عن السماد الفسفاتي عن ٥ مغ/يوم/شخص الى خفض الذكاء عند الأطفال، والى تأثيرات سمية في الجملة العصبية.

٢.١.٦. التلوث بالأسمدة الآزوتية:

يحدث التلوث بالأسمدة الآزوتية باعتبارها من عناصر التسميد الأساسية عند الإسراف في استخدامها في مكان وزمن غير مناسبين أو حملها للشوائب غير المرغوب فيها واستعمالها دون التقيد بالمعادلات السمادية أو قد تسبب تلوث للتربة لزيادة درجة قلويتها أو تؤدي زيادتها إلى تأثير سلبي لامتصاص عناصر أخرى، فعلى سبيل المثال زيادة نسبة الكبريت في التربة تؤثر على امتصاص الآزوت و يؤدي زيادة امتصاصها من قبل النبات وزيادة تركيزها بالنسبة إلى الكربون مثلاً إلى عدم تشكل الأزهار أو تأخر نموها. ومع توالي الدورات الزراعية تؤدي إلى تغيير وضغط كبير على نسيج وحيويات التربة وهشاشتها وزيادة حمل الشوائب التي تحملها وتفوق قدرتها الطبيعية.

مع الإشارة إلى أن تعدد وتنوع الأسمدة الآزوتية وخلائطها وتفاعلاتها الكيميائية مثل سماد الأمونيا السائلة أو أملاح الأمونيوم واليوريا(البولة) ونترات الأمونيوم وكبريتات الأمونيوم، وخطأ التعامل معها يفاقم من مشكلة تلوث التربة وبالتالي من صعوبة معالجة مشكلة التلوث. يدخل الآزوت مع النتريدات بروابط شاردية ومع اللامعدن بروابط مشتركة ويدخل بالمركبات الحلقية

غير المتجانسة. ومعروف قديماً أن العالم الشهير لافوازييه أطلق على الآزوت اسم azote وتعني a باللغة اللاتينية لا وتعني zote حياة، أي الآزوت غير صالح للحياة. إن سماد الأمونيا يدمص على غرويات التربة بينما سماد النترا يفقد بسهولة من غرويات التربة، وعلى سبيل المثال إن عملية النترة Nitrification تتأثر بوجود كمية الأكسجين والبكتريا وتكون إما بنائية أو هدمية حسب التفاعل:



٢.٦. التلوث بالأسمدة غير العضوية:

١.٢.٦. التلوث بالأسمدة النتراية:

النتروجين الموجود في التربة معظمه في صورة عضوية، وبالتالي يكون غير صالح للنبات ولذلك تحدث عمليات بيولوجية في التربة يتم فيها تحويل النتروجين من صورة عضوية إلى صورة غير عضوية ($\text{NO}_3\text{-N}$ ، N-NH_4) صالحة للامتصاص بواسطة النبات أو يفقد بالتطاير أو الغسيل أو يتحول إلى مكونات عضوية في أجسام ميكروبات التربة إلى نترات وهذا يزيد من خطر تلوث التربة بالنترات. إن إضافة الأسمدة النتراية المعدنية رغم أنها عنصر محوري في التربة بشكل فائض عن حاجة النبات له تأثير سلبي على التربة والمياه للأسباب التالية:

(١) نتيجة الاستخدام المتزايد للأسمدة النيتروجينية يؤدي فقد جزء كبير منها عن طريق الغسيل والنترات المفقودة من التربة عن طريق الغسيل، سوف تؤدي إلى تلوث المياه الجوفية ومياه الصرف الزراعي. وتتوقف كمية النترات المغسولة من قطاع التربة على عدة عوامل أهمها:

(أ) كمية المياه المتخللة التربة.

(ب) كمية النترات في التربة.

(ت) نوع التربة.

(ث) نظام الزراعة.

ويكون الفقد أكبر ما يمكن في الأراضي الرملية وقليل في الأراضي المزروعة بالأعلاف (حشائش) وكبيراً عند زراعة محاصيل ذات نمو قصير. وعموماً توجد علاقة قوية بين كمية النترات القابلة للغسيل في التربة ونظم إضافتها لسماد.

يفقد من الأسمدة النترالية بالرشح والغسيل Leaching أو بالإرجاع نحو 20% إلى 70% حسب نوع التربة. يغسل إلى خارج التربة ويصل إلى المياه الجوفية على شكل شاردة النترات NO_3^- وقد تتحول النترات بالإرجاع إلى نترت NO_2^- وتمتص بواسطة النباتات الورقية وتتراكم فيها، مثل: الجزر والفاصولياء والخيار والسبانخ والخس والفجل حسب الجدول (1) ، ومن ثم تنتقل إلى الإنسان وتسبب أثراً صحياً مؤذياً وخاصة للأطفال.

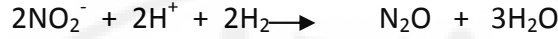
الجدول (1): تراكم النترات والنترت في النباتات الورقية بوحدة ppm.

النبات	النترات NO_3^- بوحدة ppm	النترت NO_2^- بوحدة ppm
الجزر	183	1.5
الفاصولياء	153	5.3
الخيار	156	8.0
السبانخ	442	3.2
الخس	1361	8.7
الفجل	2600	7.3

النترات NO_3^-
أو أكاسيد N_2
أو NO وتتطلق
وتلوثه، إضافة
الأوزون في طبقة

(٢) تتحول شاردة
إلى غاز الآزوت
نتروجينية N_2O
إلى الجو الغازي
إلى هدمها لطبقة

الستراتوسفير، والى زيادة في رفع درجة حرارة المناخ، بتأثيرها على ظاهرة دفء البيت الزجاجي وذلك بفعل تفاعلات الدنترة Denitrification، التي قد تتم بفعل تأثير ميكروبي بواسطة البكتريا الهوائية أو اللاهوائية حيث لن تكتمل السلسلة التنفسية السينوكروم خلال استخدام الأكسجين المرتبط بالنترات كمستقبل للإلكترون بدلاً من الأكسجين الحر، وهي تقوم بعملية الفسفرة الحيوية المؤكسدة لتكوين الطاقة في صورة ATP كما يلي:



تتم عملية الدنترة في التربة والرواسب والمياه الجوفية ومياه المجاري، وتستطيع ميكروبات الدنترة تشكيل الميثان CH_4 والنمو تحت ظروف لا هوائية مخمرة، وتستطيع أن تتحمل الحرارة المرتفعة والملوحة والحموضة. إذا إن إضافة الأسمدة والفضلات البشرية وبقايا النباتات والجذور يؤدي لزيادة خسارة الأزوت بالدنترة وتشكل مناطق لا هوائية ترجع فيها الميكروبات النترات عوضاً عن الأكسجين في عملية تنفسها الحيوية.

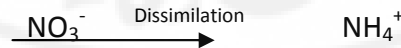
وتتوقف عملية الدنترة على قوام التربة ومسافتها البينية وتكون مرتفعة في الأراضي ذات الحبيبات الناعمة الطينية مقارنة بالأراضي ذات الحبيبات الخشنة الرملية.

ويزداد معدل انطلاق أكاسيد الأزوت الملوثة بعد سقوط الأمطار وهذا ملاحظ في الأراضي الجافة وشبه الجافة. كما أن زيادة عمق التربة وعمق المياه الجوفية يقلل من إرجاع النترات وإن أسلوب الري وزيادة معدلاته يزيد من انطلاق غازات الأزوت لزيادة النشاط الميكروبي في التربة. ويزداد تكوين غازات الأزوت N_2O و NO بزيادة حموضة التربة التي تفضلها الفطريات، أما الوسط المعتدل أو المائل للقلوية في التربة فيؤدي لتكوين غاز الأزوت N_2 .

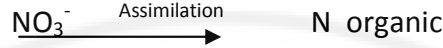
أي مما سبق نستنتج أن عوامل المادة العضوية والأكسجين والنترات وقيمة درجة الحمض في التربة لها تأثير فعال في تكوين أكاسيد الأزوت الملوثة للبيئة التي قد تصل كميتها إلى 400 مليون طن سنوياً.

(٣) إن شاردة النترات عنصر أساسي في التربة الزراعية ويمكن أن تتم تحولاتها الكيميائية على الشكل التالي:

أ- إرجاع النترات وتكون الأمونيا وهي عملية هدمية Dissimilatory تؤدي إلى تكون الأمونيا التي تدمص على غرويات التربة :



ب- إرجاع النترات وتكون الأزوت العضوي وتكون الأمونيا وهي عملية بنائية Assimilation تدخل في تكوين الأحماض الأمينية.



يؤدي الغسل إلى فقد الأزوت خارج التربة وقد يمتصه النبات أو يصل للمياه الجوفية ويلوثها. ومن ناحية أخرى فان تفاعل تكوين الأمونيا يحتاج 8 الكترونات لكل مول نترات يرجع بينما عملية الدنترة تحتاج إلى 5 الكترونات فقط .

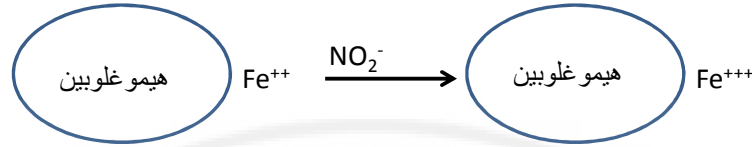
٤) يسبب إرجاع النترات أو الرش إلى خسارة اقتصادية مرتفعة برفع الكلفة الاقتصادية للمنتج.

٢.٢.٦. مشكلة النترت و النترات وتأثيرها الصحي:

إن الإسراف في استخدام الأسمدة بمعدلات مرتفعة يؤدي إلى سهولة انتقالها للإنسان والحيوان ولغذاء الإنسان، وزيادة تراكيز العناصر السامة داخل خلايا الأحياء البشرية وينسب مكبرة مرتفعة تزيد عن قدرة الخلايا أو قد يؤدي لنشوء بوادر لخلايا سرطانية تؤثر على الصحة.

ينتقل النترت NO_2^- والنترات NO_3^- إلى النباتات أو إلى مياه الشرب ولاسيما بسهولة الغسل بمياه الري والأمطار وتصل إلى الأنهار والبحيرات والمجاري المائية وتلوث الينابيع والآبار الجوفية التي تعتبر مصدراً لمياه الشرب وبالتالي تزيد في تكلفة تنقية المياه. إضافة إلى أن مشكلة التلوث تزيد في الأراضي التي تربي فيها الحيوانات بأعداد كبيرة. إن شاردة النترت سامة جداً وهي تنتج من شاردة النترات الثابتة لأن نشاطها الكيميائي محدود، بعكس شاردة النترت غير الثابتة ونشاطها الكيميائي واضح، بسبب القدرة على التفاعل والاتحاد مع كثير من المواد. يتأثر الرضع وتصاب بمرض الازرقاق لتشكل النيتروزامين Nitrosamines عندما تتحد النترت مع الأمينات الثانوية مسببة لبوادر خلايا سرطانية أو عدم قدرة الأكسجين على الاتحاد مع هيموغلوبين الدم. يتحمل الإنسان ١٥ ميلليغرام من النترات يومياً من وزنه، ومن النترت فقط ٤ ميلليغرام من وزنه يومياً. وعندما تصل نسبته 70% يؤدي إلى الوفاة. إن تحول النترات إلى نترت يحتاج إلى طاقة لذلك لا تتحول بالجسم بشكل كامل وإنما تطرح خارج الجسم عن طريق الكلى لأنها تحتاج إلى أنزيم ريدوكتاز Nitrate reductase.

يرجع النترت في المعدة والأمعاء ويتحد مع هيموغلوبين الدم فيقل قدرته على امتصاص الأوكسجين ويمنع نقل الأوكسجين من الرئتين إلى جميع خلايا الجسم:



يسمى ميثيموغلوبين يفشل في نقل الأكسجين من الرئتين للخلايا. ويقوم بتعطيل عمل بعض الأنزيمات التي ترجع الحديد في هيموغلوبين الدم ويظهر التسمم عندما تصل نسبته إلى 10% ويظهر اضطراب في النبض والتنفس وارتفاع ضغط الدم وأمراض تحسسية عندما تصل نسبته 20%.

٣.٦. التلوث بالأسمدة الحيوية:

الأسمدة الحيوية هي لقاحات ميكروبية ذات أصل حيوي، وهي كائنات دقيقة مجهرية تم إكثارها في مزارع مناسبة، ثم حملت أو نقلت على حامل ملائم، ثم تضاف إلى التربة بهدف تحسين خصوبتها وتقوم بتنشيط التحولات الحيوية وتتمركز في الطبقة السطحية للتربة حول حبيبات التربة أو حول جذور النباتات مثل البكتريا: لقاحات مثبتة للنتروجين الجوي الرايزوبيا أو الأزويباكتريا أو السيانو بكتريا وهي طحالب خضراء مزرققة.

قد تكون الأسمدة الحيوية على شكل فطريات : وهي كائنات مجهرية هوائية مثل الميكوريزا أو تكون على شكل خمائر أو طحالب أو أميبات أو هديبات أو سوطيات أو فيروسات عددها بالآلاف لكل غرام تربة أو 10^9 خلية/غرام أي حوالي 10 مليون خلية ميكروبية ويكثر العدد في الطبقة السطحية ويقل كلما زاد العمق وتتأثر بالحرارة والرطوبة وقيمة درجة الحموضة.

قد تدخل الفطريات إلى التربة عن طريق البذور ويحدث تنافس بين الفطريات القاطنة في التربة والفطريات الداخلة مما قد يحدث حالة تضاد بين الفطريات. إن زراعة بذور ملوثة في تربة معقمة يؤدي إلى زيادة نسبة الإصابة عند زراعة بذور ملوثة في تربة غير معقمة حيث توجد ميكروبات مضادة، فإذا لقحت تربة معقمة بالفطر *Bipolaris sorokimiana* وهو حساس جداً للفطريات الأخرى فإنه ينمو بقوة في التربة المعقمة بينما لا يستطيع النمو في تربة ملوثة. ويمكن الاستفادة من ظاهرة التضاد بين الفطريات في التربة في المقاومة الحيوية وتقليل نسبة المرض في النبات وبذلك تقل نسبة نقل التلوث بالبذور.

أغلب الأسمدة الحيوية غير ضار، ولكن بعضها ممرض فهي ذات حدين. وتدرس في المختبر بتحليل نسبة الأكسجين الكيميائي COD أو نسبة الأكسجين الحيوي BOD .

مثل البكتريا الشبيهة بالفطريات St.scabies، المسببة لمرض الجدري في البطاطا والشوندر السكري. وهناك البروتوزا الدوسنتاريا الممرضة للإنسان. ومن الممكن انتقال بعض الفيروسات الممرضة من التربة الملوثة إلى الإنسان عن طريق الخضروات والكمأة والفطر. فتعتبر التربة مسؤولة عن انتقال الفيروسات إلى الإنسان والحيوان وتعتبر فيروسات شلل الأطفال والفيروسات المعوية الكبدية والحمى القلاعية، من أكثر الفيروسات انتشاراً في التربة وقد وجدت علاقة طردية بين درجة ادمصاص الفيروسات على غرويات التربة وكمية الجسيمات الفيروسية في محلول التربة، حيث كلما زادت نسبة الطين في قوام التربة كلما زاد التصاق الفيروسات في حبيبات الطين. وغالباً تنتقل الفيروسات الممرضة عند استعمال حمأة المجاري كسماد حيوي غير معالج. إن استخدام مياه الصرف الصحي غير المعالجة ينقل الفيروسات إلى التربة ويلوثها. تنتقل فيروسات التربة للجذور السليمة للنباتات وتخترق خلايا النبات، إن غسل الخضروات قبل أكلها طازجة لا يخلصها من الفيروسات الموجودة داخلها. إن وجود فيروسات البكتريا يمنع من انتشار البكتريا المفيدة كالرايزوبيا والأزوتوباكتر المثبتة للنترجين الجوي والسيانوبكتريا.

٤.٦. التلوث من التسميد الورقي المستعمل بالرش:

يسقط رذاذ سائل الرش على سطح التربة بوجود رياح أو هواء متحرك أو بالغسل بالأمطار، ويمكن أن يزداد تركيزه في التربة مع مرور الزمن وتوالي الدورات الزراعية وتكرار الرش وتصل إلى قيم تعد ذات سمية عالية. وخاصة عند احتواء سائل الرش على شوائب قد تتراكم وتتضخم، حيث وجد أن السماد أو المبيد الذي يرش في حدود مليون جزء من الغرام قد يصل داخل الأحياء مكبرا مئة ألف مرة مسبباً أذى كبيراً.

ويتعرض العامل الزراعي وأي إنسان موجود خلال عملية الرش بالسماد الورقي إلى أمراض جلدية ورئوية وعينية وتحسسيه عند التعرض إلى رذاذ سائل التسميد وهو على شكل حبيبات صغيرة جداً أحجامها في المجال الغروي، إذا لم يتبع إجراءات الوقاية والأمان وتوخي الدقة عند استخدام وإضافة السماد الورقي الذي يرش على النبات في مراحل مختلفة من نموه بغض النظر عن وسائل الرش الظاهرية أو الرش باستعمال مضخة محرك كهربائي أو الرش بالطائرات.

٥.٦. وسائل الحد من التلوث بالأسمدة:

(١) إضافة السماد باستعمال المعادلة السمادية التي يحتاجها فعلاً كل محصول، وذلك بعد التحليل الكيميائي للتربة والحرث العميق للتربة ويوقت مناسب، حسب التوصيات الإرشادية الزراعية.

(٢) معالجة مياه الصرف الصحي والحماة قبل استعمالها كسماد بالأراضي الزراعية، بإنشاء محطات معالجة صغيرة لمياه الصرف الصحي، باستعمال راتنجات شاردية وتنقية الحماة وإصدار القوانين والتشريعات المحددة للحد الأقصى المسموح به للملوثات، والتأكد من مطابقتها للمواصفات القياسية المسموح باستعمالها ويسمح باستعمالها فقط إذا توفرت فيها الصفات الأساسية للمياه الصالحة للري.

إن المواد الصلبة الموجودة في الصرف الصحي قد تكون مفيدة للتربة إذا أحسن استعمالها، وليس للون أثر في استخدام المياه إلا أنه يكون عادة دليل على وجود المادة العضوية. ومن الضروري التأكد من عدم تجاوز نسب البورون والكالسيوم والزنك والزنك والنحاس والرصاص إلى الحدود الحرجة. إن تطهير الحماة من الفيروسات والبكتيريا وغيرها من الكائنات الدقيقة التي تسبب الأمراض تعتبر ذات أهمية صحية كبرى، وتتم بإطالة مدة عملية التخمير لتصل إلى أعلى درجات الحرارة.

(٣) استعمال الأسمدة العضوية الناتجة من مزارع الأبقار والدواجن ومن مخلفات المزارع وتعتبر هذه الأسمدة العضوية صالحة للاستعمال بعد عدة أسابيع من إنتاجها. وذلك بعد تجميعها وتخمير المواد العضوية فيها، أي الانتقال من التسميد التقليدي إلى تقنيات الزراعة العضوية الحافظة بإعادة المادة العضوية والعناصر المعدنية المفقودة، ومحاكاة النظم البيئية الطبيعية وخفض انبعاث غازات الدفيئة CO_2 ، NO_2 ، NH_4^+ .

(٤) التسميد الحيوي: الأسمدة أو المخصبات الحيوية مصادر غذائية للنبات رخيصة الثمن بديلاً عن استخدام الأسمدة المعدنية وتنتج هذه المخصبات من الكائنات الحية الدقيقة وتستعمل كلقاح حيث تضاف إلى التربة الزراعية إما نثراً أو بخلطها مع التربة أو بخلطها مع بذور النبات عند الزراعة. ومن أمثلتها (السيراليين - الريزوباكترين - البيوجين - الأزولا).

(٥) استخدام الطحالب كمحسن للأراضي الصحراوية والمستصلحة حديثاً: تحتوي الطحالب الخضراء والخضراء المزرقّة والحمرّاء على النسب الآتية من المركبات الحيوية الهامة (دهون ٧-١١%، كربوهيدرات ١٢-١٦%، بروتين ٥٠-٥٥%). إلى جانب احتوائها على نسب مرتفعة من العناصر المعدنية الكبرى والصغرى والنادرة الهامة واللازمة للنمو والحياة،

كما وجد أنها تحتوى على نسب مرتفعة من الهرمونات النباتية المختلفة مثل الأكسجين والسيتوكينين، والتي تعتبر عاملاً هاماً وحيوياً لنمو النباتات. يتراوح الرقم الحامضي لمستخلص الطحالب بين ٥.٦-٦.٥ مما ساعد على استخدامه في جميع أنواع الأراضي.

الأسماء العلمية لهذه الطحالب: ULOTHRIX- CHLORELLA- EUGLENA- ILLATORIA- NITZSCHIA- ARTHROSPIRA .

٦) استعمال الأسمدة العضوية الناتجة من مخلفات المزارع (الزراعة العضوية) مثل المحاصيل والحشائش ثم ترطيبها ودفنها في حفرة، ثم تغطيتها بطبقة من التربة الزراعية أو البلاستيك لتحليل المواد العضوية. أو يمكن استعمال منتجات تدوير القمامة أو التسميد الأخضر عن طريق الجذور، ويتم بحرث النبات ونموه الخضري في التربة الزراعية.

يؤدى غياب التسميد العضوي إلى الإسراف في استخدام الأسمدة المعدنية تحت نظام الزراعة الكثيفة والتي تلوث التربة والمياه وبالتالي النبات - الأمر الذي جعل مستوى المادة العضوية بالتربة من العوامل المحددة للإنتاج. من هذا المنطلق فإن التوسع في برامج الزراعة العضوية يتحقق بالاستخدام المنظم للأسمدة العضوية، مما يؤدي إلى الحفاظ على خصوبة التربة وتحسين خواصها وإنتاج غذاء آمن صحياً.

أهمية التسميد الأخضر: زيادة المادة العضوية في التربة، وزيادة الآزوت في التربة والمحافظة على العناصر الغذائية في التربة، وزيادة تركيز العناصر الغذائية في الطبقة السطحية من التربة وزيادة صلاحية بعض العناصر الغذائية، وتحسين طبقة تحت سطح التربة مع زيادة نشاط الأحياء الدقيقة إضافة إلى إبادة الحشائش.

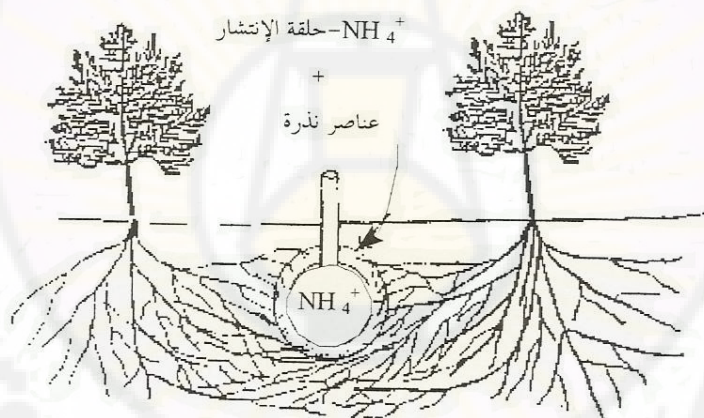
ويختلف نوع السماد العضوي باختلاف مصادره كما يلي :

١. السماد البلدي : ناتج التخمير الهوائي لروث الماشية والمخلفات الحيوانية الأخرى.
٢. السماد العضوي الصناعي : ناتج التخمير الهوائي لمخلفات المحاصيل والبقايا الحيوانية.
٣. سماد الدواجن : ناتج التخمير الهوائي لزرق الدواجن.
٤. سماد البودريت : ناتج عن التجفيف الهوائي للحمأة المعالجة.
٥. سماد الكومبست : ناتج عن التخمير الهوائي لمخاليط المخلفات النباتية والحيوانية أو الأسمدة النتروجينية.
٦. سماد القمامة : ناتج من التخمير الهوائي لقمامة الشوارع في المدن والقرى.

٧. سماد البيوجاز: ناتج عن التخمر اللاهوائي للمخلفات النباتية والحيوانية والأدمية بعد إنتاج غاز الميثان كمصدر دائم ومتجدد للطاقة.

(٧) التسميد بمنطقة الجذور حسب طريقة كولتان CULTAN

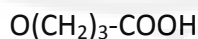
تستعمل طريقة كولتان CULTAN بوضع حجوم صغيرة في التربة من شوارد الأمونيوم والعناصر المعدنية، والتي من الممكن أن تكون على شكل شلات ضمن محيط جذور النباتات، والتي يتوقف استقرارها على محتوى الطين في التربة ونشاط الكائنات الحية الدقيقة ودرجة الحموضة لسائل التربة. فتستطيع النباتات بجزء محدد من جذورها بمنطقة محددة من التربة أن تتفرع وتنمو جذورها بكثافة، وتوجه جذر النبات بعكس الجاذبية الأرضية من الأسفل إلى الأعلى، وبالتالي تمتص حاجتها فقط من الأزوت والبوتاسيوم والفسفور والعناصر الصغرى. وجد أن طريقة كولتان طريقة اقتصادية قليلة التكاليف، وبيئية لتخفيفها والحد من تلوث التربة. وتطبق على كافة المحاصيل والأشجار أنظر الشكل (١٣).

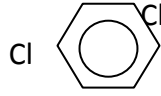


الشكل (١٣) : التسميد حسب طريقة كولتان CULTAN.

٧. التلوث بالمبيدات Pesticides:

المبيدات عبارة عن مواد كيميائية عضوية طبيعية فعالة مثل المضادات الحيوية أو مواد عضوية أو حيوية مصنعة مثل ٢-٤ ثنائي كلور فينوكسي أسيتال





قد تحوي المبيدات على حلقة بنزن وعناصر استبدالية على مواقعها (أورتو وميتا وبارا)، وقد تحوي على روابط (استر وايتير) وذرات الكربون الرباعية. أوهي مواد غير عضوية مثل كيريتات النحاس CuSO_4 وقد تحوي على هالوجينات (فلور F ، كلور Cl ، بروم Br ، يود I) أو أزوت N أو كيريت S أو زئبق Hg أو فسفور P. وحسب تركيبها الكيميائي قد تكون على شكل سائل أو جاف أو متطاير (أيروسولات).

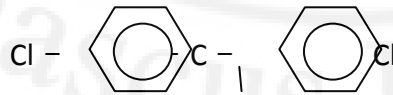
انتشر استخدام المبيدات في مكافحة الآفات والحشرات في أعقاب الحرب العالمية الثانية، وأسرف في استخداماتها حتى بلغ حدود التلوث بها وبآثارها ومخلفاتها خطراً كبيراً على الإنسان ومائه وغذائه وعلى التربة والنبات والحيوان. وخاصة بهدف الحصول على أكبر انتاج في المساحة المزروعة. أو قد يلجأ بعض المزارعين الى التخلص من بقايا المبيدات عن طريق دفنها في التربة أو القائها على سطح الأرض الجافة. واستخدمت المبيدات أيضاً بكثرة، وخاصة مبيدات الحشائش عوضاً عن القيام بعمليات قلب التربة وإزالة الحشائش يدوياً.

فالمبيد له أثر تراكمي، وهو ملوث بيئي ذو حدين ضار ونافع، وتخل بالنظام البيئي لبطء تفككها وتراكمها وبيئت الدراسات البحثية الأكاديمية المتعددة وخاصة على كيمياء التربة ومكوناتها وتأثيراتها على التفاعلات الكيميائية والحيوية لنسيج التربة وعوامل ادمصاصها على سطح التربة، ومعدل ثباتها وفعاليتها وتأثيراتها على خصوبة التربة وكائنات التربة والسماذ وشروط استخدامها وقيم جرعاتها المؤثرة والأثر المتبقي وطرق تحللها وسبل التخلص منها ومن مخلفاتها.

١.٧. أنواع المبيدات الملوثة وتركيبها الكيميائي:

تقسم أنواع المبيدات طبقاً لتأثير المادة الفعالة على الكائنات التي تعيش في التربة إلى:

- ١- **المبيدات الحشرية Insecticides:** ومنها مبيدات العناكب Acarisides وهي مواد كيميائية عضوية طبيعية كالنيكوتين أو صناعية مثل المركبات الهيدروكربونات الكلورينية العضوية Organochlorines. مثل الألدرين وهبتا كلور و مركب DDT الذي يبقى أكثر من عشر سنوات في التربة:





أو المركبات العضوية الفسفورية مثل الباراثيون والمالاتيون وثنائي كلوروفوس وديازيفون والتي تسمح الانسان ويوجد مركب مبيد الديموثوت TEPP أو مبيد المينازون Menazon وتتميز أنها تتفكك حيوياً بسرعة في التربة. والمادة الفعالة في مبيد الأكره هي Chromafenozide والمستعملة لمقاومة دودة ورق القطن ودودة اللوز. والمادة الفعالة النانكول هي Bensulfab والمستعملة لمقاومة دودة العنب والبطاطا.

٢- مبيدات القوارض Rodenticides والطيور وسموم الزواحف Repticles وسموم البرمائيات Amphibian أو المواد القاتلة والطاردة للحيوانات اللافقارية Invertebrate animal poisons and repellents ومبيدات القواقع والزواحف وتستعمل مادة فسفيد الزنك كمادة مضادة للتجلط عند القوارض.

٣- مبيدات النيماتودا Nematodes وتشمل معقمات التربة ومدخنات الغازات.

٤- المبيدات الفطرية Fungicides: منها المبيدات القاتلة أو المثبطة لنمو الكائنات الدقيقة Bacteriocides، ومنها مبيدات سطحية تبقى على السطح وترش على الأوراق أو تنثر كمسحوق صلب تحتوي على عناصر معدنية مثل النحاس Cu والزنك Zn والزرنيخ As والكبريت S وكبريتات الكالسيوم أو مبيدات مركبات الزئبق الألكيلية أو مبيدات مركبات الزئبق الفينولية. واستعمل بدلاً من مركبات الزئبق مركبات التيو كرمات العضوية مثل مبيد المنب Maneb. ويوجد من المبيدات الفطرية نوع من المبيدات الداخلية الأساسية التي تنتقل إلى أنسجة النبات.

وتستعمل المركبات الفينولية مثل الديترفينول ويستعمل البينوميل والتيوفانت، وتستعمل أيضاً المركبات الفسفورية كالدوكو والترياريمول، كما يستعمل الكاربوكسين. والمادة الفعالة في مبيد الشين هي Oxpocnazole وتستعمل للتخلص من أعفان الجذور Fusarium. إضافة إلى التأثير السلبي لأكثر هذه المبيدات في التربة نتيجة تحولاتها الكيميائية والكيميائية الحيوية، إن استعمال المواد الداخل في تركيبها الزئبق في التربة له تأثير سمي كبير ويمكن أن يتراكم وينتقل إلى المياه والغذاء.

٥- الهرمونات ومنظمات النمو ومثبطات النمو أو المكافحة الميكروبية:

وتشمل الفيرمونات (جاذبات جنسية) وتسبب العقم. وهي كائنات حية دقيقة مثل البكتريا والفطريات والفيروسات والتوكسينات، تصيب الحشرات الضارة في عمليات تطور نموها. تخلط حالياً مع المبيدات مما يزيد من فعالية المبيد.

٦- **المبيدات العشبية Herbicides**: تستعمل للقضاء على النباتات ذات الجذور الدقيقة في التربة أو الأعشاب الضارة، بهدف زيادة إنتاجية التربة بوحدة المساحة، وتستعمل نثراً على التربة أو رشاً. منها الانتقائي أو الراكد أو المتحرك كمبيد ثنائي كلوروبروب Dichloroprop أو مبيد الدالبون Dalapon غير أنه وجد أن أغلبها تحتوي على مادة الديوكسين Dioxin التي ثبت أنها تنتقل للإنسان وتسبب تشوهات خلقية. والمادة الفعالة في الساتيرن هي Thionecarp وفي السيرليس هي Pyrazosulfuron والتي تقضي على حشائش الأرز. كما وجد أن المبيد سيمازين Simazine ينتقل إلى المواشي وله تأثير سلبي.

إذاً إضافة إلى التقسيم السابق تصنف المبيدات حسب الجزء الكيميائي الفعال إلى:

(أ) مبيدات هيدروكربونية كلورينية عضوية مثل DDT.

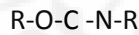
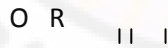
(ب) مبيدات فسفورية مثل المالاتيون.

(ت) مبيدات زرنيخية مثل زرنيخات الكلسيوم وزرنيخات الرصاص.

(ث) مبيدات اليوريا.

(ج) مبيدات أكاسيد النحاس ومبيدات الزئبق.

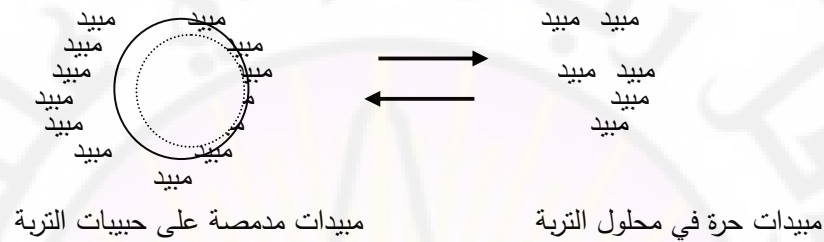
مبيدات كارباماتية مثل الكربوفوران والسيرومايزين وسلفوكسيد الديكارب ومنها الأوكساميل التي تقوم بالتأثير على الجهاز العصبي وتنشط عمل الأنزيمات، وهي أسترآت أو أميدات مشتقة من حمض الكارباميك.



٢.٧. العوامل المؤثرة على ادمصاص المبيدات في التربة:

يكون ادمصاص المبيدات وذوبانها على المادة العضوية ذات الشحنات السالبة وذات القدرة التبادلية الكاتيونية، وتؤثر ظاهرة ادمصاص مع عوامل عديدة مثل التفكك الكيميائي وتحرك

المبيد والتحلل الميكروبي ويحصل توازن بين كل من كمية المبيد المدمصة وكمية المبيد الذائبة في محلول التربة، لأن ليس كل كمية المبيد المستخدمة تكون فعالة وخاصة بعد ادمصاصها بواسطة حبيبات التربة، وتصبح غير مؤثرة أو انفرادها في صورة حرة وتصبح مؤثرة انظر الشكل (١٤):



الشكل (١٤): توازن المبيدات على سطح حبيبات التربة ومحلول التربة.

١.٢.٧. طرائق وصول المبيدات إلى سطح التربة:

(أ) طرائق مباشرة: باستخدام الرش بالرشاشات المحولة أو بالمضخات الظهرية أو بالطائرات. إن حجم حبيبات الرش كبيرة كانت أو صغيرة لها دور كبير في التلوث، حيث تتطاير في الهواء وتتوضع على سطح التربة وتلوثها. ويعتبر الرش بالطائرات ملوثاً للتربة الزراعية، حيث لا يمكن بدقة تحديد مكان الإصابة أو التحكم بالضبط في الارتفاع عند رش مساحات كبيرة من الأراضي فتنتقل أيضاً جزيئات المبيد مع حركة الهواء ويلوث كل جزء في تلك الأراضي. كما أن التعفير والتدخين أو عن طريق الحفر بجوار النبات المحملة بالمبيد يلوث التربة الزراعية.

(ب) طرائق غير مباشرة: تساقط المبيد عند الري أو الرش أو التعفير أو عن طريق الندى أو عن طريق الأمطار أو عند تقليب بقايا المخلفات النباتية الملوثة بالمبيدات في التربة، وذلك قبل تحلل وتفكك المبيد مثل الأوراق والجذور أو باستخدام الأسمدة العضوية أو الحماة الملوثة بالمبيدات أو عن طريق بذور معاملة بالمبيدات لحمايتها فتتغلغل وتلوث التربة.

إن الغبار الناتجة عن الرش بالمبيدات ينقل إلى سطح التربة، ويؤدي إلى تلوثها. وتصل كمية المبيد التي تتساقط على سطح التربة من ٢٠% - ٥٠%. إن رش المبيدات في البيوت البلاستيكية أكثر تلوثاً للتربة من الرش في الجو المفتوح لأن الرش يتم على فترات قصيرة

ومتكررة ومتقاربة. وجد أن الأسمدة الكيميائية تشجع بشكل ملحوظ على امتصاص المبيدات من التربة، والسبب عائد إلى أن الأسمدة تشجع نمو النباتات ومن ثم تزداد قدرتها على امتصاص كميات أكبر من المبيدات.

٢.٢.٧. الأثر المتبقي للمبيد أو معدل ثبات المبيد أو طول فترة بقاء المبيد:

الأثر المتبقي للمبيد Residue أو مخلفات المبيد أو معدل اختفاء المبيد Disappearance هي كمية المادة الفعالة ونواتج تفككها التي يمكن تقديرها بعد استعمال المبيد. ومعدل ثبات المبيد هي المدة اللازمة لتحليل ٧٥-١٠٠% من المبيد. قد يكون مرغوباً من ناحية طول فترة بقاء المبيد مثلاً عند الحاجة للتخلص من الحشائش لفترة طويلة. ومن ناحية أخرى قد تتراكم المبيدات شديدة المقاومة للتحلل وتصبح ضارة وتلوث التربة. ولهذا يلزم مبيدات أقل ثباتاً في التربة مع الحفاظ على الفعالية دون الإضرار بالتربة.

تتأثر درجة ثبات المبيدات في التربة تبعاً للعديد من العوامل، بعضها يتعلق بالتربة من حيث القوام والتركيب الطبيعي والكيميائي ونسبة المواد العضوية الموجودة فيها ودرجة الحموضة والحرارة والرطوبة وتسرب المبيد وأشعة وضوء الشمس والنشاط الميكروبي، وعوامل تتعلق بالمبيد مثل التركيب الكيميائي والصفات الطبيعية وشكل المادة الفعالة والتركيز المستخدم.

إن المبيد القليل الذوبان في الماء يبقى في التربة فترة قد تصل إلى ٣٠ سنة مثل مبيد DDT بينما مبيد الكاربوفوران يزول بعد أسبوع وذلك بسبب درجة ذوبانه المرتفعة في الماء. وجد أن المبيدات التي تحوي على مجموعة الميثوكسي على حلقة البنزن أكثر ثباتاً من التي تحتوي على الكلور ثيو الميثيل.

إن عوامل درجة الحرارة والحموضة وكمية المواد العضوية والسعة التبادلية الكاتيونية ونوع الطين ونوع المادة الماصة ونوع معادن الطين، لها دور كبير في مدى بقاء المبيدات في التربة. تقوم الحرارة على زيادة تحلل مبيد الألدرين من التربة. حيث يزداد ادمصاص المبيد في التربة الأكثر حامضية ويزداد فترة ثباتها لفترات أطول، لأنه وجد أن ادمصاص بعض المبيدات على سطح التربة قد يحميها من التفكك والتحلل، بينما في بعض المبيدات الأخرى قد يساعد على تحللها مائياً. وجد أن نسبة مخلفات المبيدات في الأراضي الرملية أعلى من الأراضي الطينية. وجود الماء والرطوبة والري يعمل على غسيل وإزاحة المبيد بسرعة أكبر من التربة الجافة مثل مبيد الباراثيون الذي يتحول بزيادة رطوبة التربة نتيجة تحلله مائياً أو بفعل الكائنات الحية الدقيقة إلى الشكل الأميني.

ومن المصطلحات المستخدمة في معدل ثبات المبيدات:

DT₅₀ عمر نصف المبيد: وهي طول فترة بقاء المبيد فعالاً بتركيز ٥٠% من المبيد فمثلاً يبلغ عمر نصف المبيد ١٤ يوماً بدرجة ١٠ حرارة مئوية في التربة. فيما يبلغ عمر نصف المبيد D-٤,٢ ما بين ٢-٣ أسابيع.

٣.٢.٧. طبيعة ونوع المبيد وكميته:

إن تلوث التربة بالمبيدات يختلف باختلاف نوع المبيد وتركيبه الكيميائي وفترة بقائه في التربة ومستوى توازن عملية الادمصاص على سطح التربة ومحلولها، كما يوجد ارتباط عكسي بين ذوبان المبيد ومعدل الادمصاص. تؤثر حالة المبيد المستعمل على ثباته فإذا كان محبباً فيكون أكثر ثباتاً في التربة. إن المبيد القابل للبلل والتغير أقل ثباتاً من المبيد القابل للاستحلاب. ويتميز المبيد البطيء التحرر، من حالة الادمصاص على حبيبات التربة بفعاليته على المكافحة. ووجد أنه كلما زادت كمية المبيد المستعملة كلما زادت درجة تلوثه وطول مدة بقائه في التربة.

٤.٢.٧. نوع التربة:

كلما زاد محتوى التربة من الحبيبات الناعمة زادت القدرة على ادمصاص الملوثات، فالتربة الغنية بالمواد العضوية الغروية تمتص المبيدات بشكل أكثر وتصل نسبة وجودها إلى أكثر من ٥٠%، والتربة الغنية بمعادن الطين مثل معدن طين المونتوموريلونيت قد تبقى أثر المبيد لمدة تصل إلى ٣٠ عاماً، التربة الغنية بمعادن الطين تبقى أثر الملوثات لسنوات عدة حيث كلما كانت الحبيبات المكونة لها صغيرة فيكبر مساحة السطح أو تصبح غروية فتزداد شدة جذب المبيدات الملوث. إن التربة الرملية تحتفظ بجزئيات المبيد مدة أطول على مر السنين مقارنة بباقي أنواع الترب وتصل نسبة وجودها أقل من ١% .

٥.٢.٧. العوامل الجوية والتطايير:

يغسل المطر مبيدات الحشائش بعمق في التربة، فيبعدها عن جذور الحشائش إلى جذور المحاصيل فيكون له أثر سلبي. وقد تؤدي رطوبة الجو والرياح والضوء ودرجة حرارة التربة على تعجيل أو إبطاء سرعة تحلل المبيد، فكلما زادت درجة حرارة التربة زادت سرعة تبخر المبيد وهروبه من الحالة المدمصة على سطح حبيبات التربة إلى محلول التربة بسبب تكسر الروابط بين المبيد والسطح الغروي، ويحدد للتركيب الكيميائي للمبيد الضغط البخاري ودرجة ذوبانه في ماء التربة.

لا تفقد التربة التي تحتفظ بأقل من سعتها الحقلية من المياه أية ملوثات عادة. ووجد مستوى الرطوبة ووجود الماء يزيح الألدرين والهيبتاكلور من حبيبات التربة، مما يؤدي إلى تبخير مقدار كبير منه. لأن جزيئات الماء قطبية وتتنافس جزيئات المبيد في الادمصاص على حبيبات التربة. تدمص جزيئات المبيد بشكل أكبر على حبيبات التربة الجافة مقارنة بالتربة الرطبة إن ظروف الجفاف وبرودة التربة مع وجود نسبة مرتفعة من المادة العضوية يساعد على تطاير المبيد. تؤثر كمية الضوء والحرارة على تفاعلات الأكسدة و الإرجاع والتحلل المائي. وكلما زادت درجة الحرارة الناتجة من تأثير درجة حرارة الشمس وخاصة في الخمسة سنتيمترات من الطبقة السطحية زاد فقدان المبيدات الملوثة من الأراضي الزراعية. وكلما زادت درجة الحرارة وقلت الرطوبة فقدت المبيدات بسهولة أكثر من التربة.

٦.٢.٧. النشاط الميكروبي والكائنات الحية في التربة:

تؤثر بقايا المبيدات بوضوح على العدد الكلي للكائنات في التربة وعلى البكتريا والفطريات والأكتينوميستيات والحشرات وأطوارها وعلى النيماتودا والديدان الأرضية التي وجد في أجسامها تركيزات من المبيدات تعادل عشرة أضعاف ما يوجد في التربة. قد تستخدم الكائنات الحية الدقيقة المبيدات كمصدر للكربون أو الكبريت أو الفسفور للحصول على الطاقة والنمو مما يؤدي إلى تفكك وتحلل واختفاء المبيد بعد فترة زمنية في محلول التربة. كلما زاد احتواء المبيد على الكلور زاد مقاومته للتحلل بتأثير النشاط الميكروبي وزاد ثباتاً في التربة. وجد أن الطحالب تتأثر بشدة بالمبيدات بعضها لها تأثير منشط للمبيدات والبعض الآخر تأثير مثبط وتستخدم كدليل حيوي لقياس مدى تلوث التربة بمبيدات الحشائش. إن إضافة مبيدات النيماتودا إلى التربة قد يؤدي إلى زيادة تركيز الفسفور الذائب. وأدت معاملة بذور البقوليات بالمبيدات الحشرية DDT لمكافحة ذبابة الفول إلى تلف البكتريا الملقحة مما أثر على تكوين العقد الجذرية في التربة وانخفاض كبير في المحصول. إن معظم المبيدات ذات تأثير سيئ في نشاط الكائنات الحية الدقيقة وتقلل من أعداد البكتريا والأكتينوميستيات. وإن تشجيع نمو الكائنات الحية الدقيقة يزيد من وجود المبيدات في محلول التربة ويؤدي بالتالي إلى سرعة اختفاء المبيد الكيميائي.

دلت التجارب أن مبيد سادس كلور البنزين يخفف من عملية النشدة بالتربة وتحويل النشادر إلى نترت و نترات بشدة، وأظهر تأثيره السام على الفطريات وعلى البكتريا المسؤولة عن معدنة الأزوت في التربة، مثل البكتريا المسمدة نيتروزوموناس التي تحول النشادر إلى نترت الأقل حساسية لمعظم المبيدات من البكتريا المسمدة نيتروباكترا، التي تحول النترت إلى نترات ويؤدي

ذلك إلى تراكم للنترت في التربة وهذا سام. بينما المبيد التوكسافين زاد من أعداد الفطريات. ولم يتأثر إنتاج النشادر عند استخدام الهيتاكلور وتراكمت شاردة النترت، ولم تتحول إلى نترات فهذا المبيد خطر جداً على خصوبة التربة. ووجد أن المبيدات الفسفورية تزيد من إنتاج النشادر. كما لها تأثير واضح على إنتاج ثاني أكسيد الكربون عند استعمال أي مبيد. هذا يدل على أن عملية التآزت حيث تتأكسد الأمونيا إلى نترت تتأثر بشدة بالمبيدات ولها تأثير مبط بدرجات متفاوتة، ويعتمد ذلك على تركيبها الكيميائي والحرارة المستعملة وطبيعة التربة. أما عملية الدنترة وهي تحول النترات إلى نترت وأزوت فتتأثر ببعض المبيدات التي تثبطها وبالتالي تقلل من فقد الأزوت وهذا ايجابي.

٧.٢.٧. درجة ذوبان المبيد:

تميل المبيدات قليلة الذوبان في الماء إلى البقاء في التربة فترة أطول من المبيدات كثيرة الذوبان لادمصاصها على سطح غرويات التربة. وكلما زادت درجة ذوبان المبيد زادت سهولة فقدها عن طريق الصرف وتترشح في التربة. وكلما ازدادت درجة ذوبان المبيد ازدادت حركته في التربة. ولكن ليس من الضروري أن تتوافق درجة الذوبان مع التسرب للأعماق المختلفة. توجد المبيدات الكلورينية دائماً في الطبقة العلوية من التربة، لأنها ضعيفة الذوبان في الماء ولا تتحرك وتتجه إلى الثبات. ويبين الجدول (٢) العلاقة بين درجة ذوبان المبيد ومدة بقائه في التربة.

الجدول (٢): العلاقة بين درجة ذوبان المبيد ومدة بقائه في التربة.

اسم المبيد	درجة الذوبان (جزئ في المليون ppm)	ومدة بقائه في التربة
DTT	٠.٠٠١٢	٣٠ سنة
الأندرين	٠.٢٣	٧ سنوات
الديفونيت	١٣	٣ أشهر
الكاربوفوران	٢٥٠	أسبوع

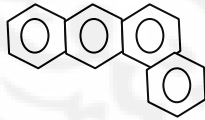
٣.٧. التخلص من المبيدات ومخلفاتها:

يمكن أن يبقى المبيد عدة سنين في التربة حيث يتم ادمصاصه على حبيبات التربة، فتمنع عملية الادمصاص سرعة فقده أو تحلله أو تحطيمه. فيجب تفكيك البنية الكيميائية للمبيدات ومخلفاتها لإزالة تلوثها في التربة. ورغم إيقاف إنتاج مبيد ال DDT منذ عشرات السنين فإنه مازالت جميع المنتجات الزراعية مثل الخضر والفواكه ولحوم الدواجن والأبقار والألبان والبيض تحتوي على هذا المركب أو نواتج تحطيمه.

• عوامل تفكك المبيدات:

- أ) التركيب الكيميائي: وجود حلقة بنزينية أو روابط كيميائية غير قابلة للتحلل مثل SO_3^{--} ، NO_2^- ، Cl^- أو روابط إيتيرية $-O-$ أو ذرة كربون الرباعية R_4C .
- ب) محتوى التربة من المادة العضوية ووجود الأحياء الدقيقة.
- ت) الأكسجين: وجود الأكسجين اللازم للأنزيمات المحللة بيولوجياً للمبيدات.
- ث) وجود شوارد معدنية.
- ج) الامتزاز على حبيبات التربة.
- ح) حركية المبيدات في التربة وامتصاصها من قبل النبات.
- خ) نوع التربة: وجد أن تفكك المبيد المدمص على التربة الثقيلة أسهل تفككاً من المبيد المدمص على التربة الرملية.
- د) قيمة درجة الحموضة pH .
- ذ) درجة الحرارة ورطوبة التربة.
- ر) خلط المبيدات: وجد أن استعمال أكثر من مبيد يزيد من قابلية تفكك المبيد.

• المواد الكيميائية الناتجة عن تفكك المبيدات :



١- مركبات هيدروكربونية حلقة عطرية : وتتميز بأنها بطيئة

التحلل وذات تفكك بطيء ويتراوح نصف عمرها بين

٠.٣ - ٢.٨ سنة مما يجعل لها أخطاراً وسمية

لمختلف الكائنات في البيئة.

وتتميز بفعالها السمي الشديد وقابلية الانحلال في دهون الكائنات الحية واستمراريتها وتراكمها وانتقالها وانتشارها لمسافات طويلة غطت أنحاء العالم تقريباً فتسبب قضاء وموت آلاف من الطيور والثدييات.

بينما المبيدات الفسفورية كالدوكو والترياريمول تتفكك حيوياً بسرعة في التربة، ومركباتها غير مستقرة ولا تتراكم في الكائن، ولكن إذا دخلت الجهاز الهضمي للكائن فهي قاتلة.

٢- مركبات نترو عطرية: تنتج من مبيدات الحشائش ومبيدات البكتريا.

٣- الفينولات والانيلينات: تنتج من مبيدات الحشائش ومبيدات البكتريا حيث يتحلل مبيد الكاربازيل في الوسط القلوي إلى النفثول ومبيد Bendiocorb إلى الفينول ومبيد Ethiofe corb إلى الفينول سلفون.

٤- الهالوجينات العطرية: تنتج من مبيدات الحشائش وقد تبقى ١٥ سنة دون أن تتفكك.

٥- أمينات: يتحلل مبيد الكاربوفوران إلى ميثيل أمين $\text{NH}_2\text{-CH}_3$.

٦- الهالوجينات الأليفاتية.

٧- نشادر ينتج من المبيدات الفسفورية وقد يتحول إلى نترت و نترات.

٨- غازات نتروجينية وأيروسولات.

٩- مركبات كبريتية مثل CH_3SH وأوكسيم $\text{CH}_3\text{-S-C(=N-OH)-R}$ والكبريتات.

١٠- فسفات.

١١- عناصر ثقيلة مثل الزئبق العضوي ذات سمية عالية وأملاح معقدات يمكن أن تحل محل معادن الطين وينتج الزنك من مبيد Ziram.

١٢- غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 .

٤.٧. أثر المبيدات ومخلفاتها على الإنسان والحيوان والنبات والغذاء:

تقاس التأثيرات المباشرة للمبيدات بحساب معدلات الوفاة أو التغيرات في القدرة التناسلية أو السلوك أو تغير معدل النمو أو التمثيل الضوئي.

أما قياس التأثيرات غير المباشرة فقياسها صعب مثل التغيرات في التركيب الكيميائي والطبيعي للنظام البيئي والتغيرات في المنافسة على الامداد الغذائي والتغيرات في علاقات الضحية بالمفترس. إن الإسراف في استخدام المبيدات وعدم الالتزام بالتوصيات من الأسباب الرئيسية للتلوث فكل مبيد عامل أمان يختلف من موضع لآخر.

ويجد مصطلح الحد المسموح به وهو يعبر عن أقصى مستوى يسمح بوجوده من المبيد.

تأثيرها على الإنسان:

وجد أن المبيدات تنتقل من التربة الملوثة عبر ظاهرة الادمصاص والنفوذ من خلال جدر خلايا الجذور ليصل إلى الأوعية الخشبية وأوعية اللحاء، حيث يتحرك مع العصارة ليصل إلى جميع أجزاء النبات لتصل إلى الأوراق والدرنات والجذور والثمار والبذور، حيث يأكلها الإنسان من أحد مكونات السلسلة الغذائية وتسبب له أعراض الحساسية والرعشة والصداع والعرق، وخاصة الأثر المتبقي للمبيدات الكلورونية شديدة البقاء في التربة والبيئة وهي ملوثة بالمبيدات الحاوية على مركبات كيميائية حلقية مؤذية عند وصولها للإنسان كما أن مبيدات النحاس والزئبق ونواتج تكسرها ذات سمية مرتفعة للإنسان لوجود العناصر الثقيلة مثل حالة التسمم بعنصر السيلينيوم من مركب سيلينوسيسثاين بحدوث التهاب عصبي تسمي صاحبه اضطرابات في الجهاز الهضمي وكانت له تأثيرات ضارة على الجهاز الهضمي والجلد والشعر والأظافر، وعانى المرضى في البداية تخديراً طفيفاً وآلاماً في الأطراف ثم تنميلاً وتشنجاً وشللاً واضطرابات عصبية وشللاً في الجسم. حتى إن الأبخرة الناتجة والمتفككة عند وصولها للجهاز التنفسي تؤدي إلى التهابات خطيرة مثل مبيد فسفيد الزنك وتسبب أوراماً دموية وانبعاث بول دموي. إن المبيدات المكلورة شديدة السمية عندما تذوب في دهون الإنسان وتحفز على تشكل أمراض سرطانية. تؤثر المبيدات الفسفورية على الجهاز العصبي وقد تؤدي إلى الشلل الكامل.

يحدث المبيد العشبي Trizole تضخم للغدد الرئوية، ويسبب سرطانات الكبد، إضافة إلى الفشل الكلوي والكبدية وعموماً، المبيدات العشبية لها تأثيرات طويلة الأمد على الكائنات الحية ينجم عنها تشوهات خلقية وقد تحتوي على الديوكسينات ذات الدرجة العالية من السمية.. ومن المصطلحات المستخدمة:

LD₅₀ الجرعة القاتلة النصفية الحادة للأثر المتبقي اللازمة لقتل ٥٠% من كائنات التجربة عن طريق الجلد والفم ونقاس بوحدة مغ / كغ .
LC₅₀ التركيز القاتل النصف الحاد لقتل ٥٠% من كائنات التجربة عن طريق الاستنشاق ونقاس بوحدة مغ / لتر. ويكون الإنسان عرضة للتلوث بشكل أكبر في البيوت البلاستيكية المغلقة عنه في الهواء الخارجي المفتوح.

الخاصية التراكمية للمبيدات، حيث تتراكم في أنسجة النباتات وتنتقل إلى الحيوانات المستأنسة والطيور الداجنة والأسماك، وتصل إلى الإنسان في نهاية السلسلة الغذائية، وظهرت بقايا المبيدات في ألبان الأمهات الرضع وفي عظام وأجسام الأطفال حديثي الولادة، في دمائهم وعظامهم ولحمهم وكيبتهم وأكبادهم، إضافة إلى تشوهات في الجنين وسقوط الأجنة.

تأثيرها على الأحياء الدقيقة والحشرات والطيور:

تؤثر المبيدات على الأحياء الدقيقة التي تعيش في التربة، فتهلك بعضها مثل النمل والديدان وبعض الحشرات والأحياء والتي تعد أعداء طبيعية للعديد من مسببات أمراض المحاصيل. ولكن يتأخر رد فعلها مقابل الآفة. فالمبيدات لا تفرق في تأثيرها السام بين الحشرات النافعة والضارة. وقد تقضي على حشرة نافعة قد تقتل حشرة ضارة. حيث اختفى النمل الأبيض لمدة عشر سنوات عندما عولجت التربة بالتوكسافين. يؤدي تكرار استعمال المبيدات إلى انتخاب حشرات مقاومة، ونباتات أقل مقاومة مما دفع إلى إنتاج مبيدات ذات فعالية أقوى. إضافة إلى القضاء على الحشرة النافعة كالنحل.

تؤثر المبيدات على سمك قشرة البيضة في الطيور وقد تؤدي إلى عدم نمو الجنين في بعض الطيور. معظم الحيوانات تمتص المبيدات لتصل إلى الكبد دون أن يكون قابلاً للتبرز. وتتراكم ضمن الجسم حتى تصل إلى قيمة عظمى حدية قاتلة.

تأثيرها على النبات:

تؤثر المبيدات الموجودة في التربة على نمو وإنتاجية النباتات المزروعة (قلة الإنبات - ضعف النمو - نقصان اليخضور - التقزم) وتمتص المبيدات من قبل أوراق النباتات لتستمر موجودة في أنسجتها حتى ينتج المحصول، إن غسيل الثمار الملوثة بالمبيد لا يخلص المبيد لأن جزءاً من المبيد قد يكون امتص بالأنسجة الخارجية للثمار. يؤدي المبيد إلى تغير لون الأوراق وإسقاطها بسبب إعاقة البناء الضوئي فيتغير لون الأوراق إلى بني ويحدث خلل في النمو في قاعدة عنق الورقة. كما وتغسل المبيدات التي ترش على النبات لتترسب إلى التربة.

تأثيرها على الغذاء:

إن السلوك الغذائي قد يساهم في تضخيم مشكلة تأثير المبيدات حيث إن الإسراف في تناول الخضر والفواكه دون الغسل والنقع والتقشير يجعلها تتراكم. ووجد ازدياد في تركيز المبيدات مثل DDT وتراكمها عبر السلسلة الغذائية. وتنتقل مع الزمن من الماء إلى الأسماك وكان تركيزها يزداد مع انتقالها ضمن السلسلة الغذائية. ويزداد تركيزها في الجسم لتحدث اضطرابات وأمراض مختلفة.

إن عملية تعريض المادة الغذائية لعملية إزالة المبيد (عملية الغسيل والسلق والتقشير والبسترة) يؤدي إلى التقليل من آثار المبيدات في الغذاء. كما وجد أن التخلي عن المبيدات الزراعية يمكن أن يسبب نقصاً يصل إلى ٥٠% في إنتاج الغذاء.

٥.٧. بدائل استخدام المبيدات الملوثة للتربة الزراعية:

١- استخدام وسائل لرش تعفير المبيدات أقل تلويثاً للتربة الزراعية. أو استخدام جهاز إنتاج المبيد على شكل ضباب في صورة حبيبات صغيرة جداً أحجامها في المجال الغروي يتم توجيهها إلى النباتات والحشرة (يستخدم وسائل الاستشعار عن بعد في تحديد المساحة المصابة وكثافة الإصابة) دون أن تلوث التربة الزراعية.

٢- المكافحة الحيوية: وتتم من خلال تعطيل التكاثر أو تعطيل وظائف أحد الأعضاء بالقضاء على أحد جوانب مراحل حياته أو عن طريق استخدام كائن آخر يقضي عليه مثل استخدام الخنافس في مكافحة الحشرات مثل المن والحشرات القشرية على ثمار الحمضيات والتي تطلق عند الحاجة. كما تستخدم في المكافحة الحيوية الطفيليات والفيروسات والميكروبات وهي أكثر فعالية وخاصة أنها لا تتراكم في البيئة مثل المبيدات الكيميائية وهذه الطريقة معروفة منذ القدم ولكن وسائلها غير منتشرة بسبب بطء فاعليتها وتخصصها بنوع واحد من الإصابة مقارنة بالمبيدات الكيميائية. حيث يمكن معملياً إنتاج سلالات من الكائنات الحية الدقيقة في تحليل كثير من المبيدات حسب مدى تلوث التربة الزراعية ودرجة التلوث ومدى توفر الظروف البيئية المناسبة لنمو هذه الكائنات.

٣- استخدام أصناف وسلالات مقاومة للإصابة بتطوير أنواع لها سماكة طبقة حماية خارجية كبيرة تغلف النبات أو تكون مواد كيميائية شبه قلويدية داخلية طبيعية تحمي النبات من الإصابة.

٤- تعقيم الحشرات بنشر حشرات عقيمة ومنعها من التكاثر أو وإعاقة دورة تكاثرها ونموها وانتشارها وتشويهها أو عدم فقس البيض أو نقص الخصوبة ويتم ذلك باستخدام الهرمونات والفرمونات الجنسية لجذب الحشرة وتجمعها وبالتالي القضاء عليها ويتم وضعها عن طريق المصائد أو بالرش أو بشكل معجون أو يوضع فرمون مخلوط بالمبيد لجذب جنسين للحشرة معاً أو يتم وضع مواد كيميائية مانعة لتغذية الحشرات ونموها .

٥- استخدام مواد كيميائية آمنة: مثل كبريتات الألمنيوم، زهر الكبريت، صابون، مازوت، خميرة.

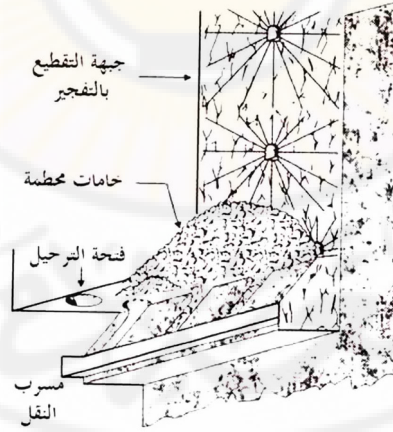
٦- توسيع زراعة الأشجار والتي تتميز أنها تفرز مواد قاتلة للبكتريا والفطريات وتكون مواد طيارة مثل التي تفرزها أشجار الصنوبر والكافور والزيزفون.

٧- استخدام مصدر الأشعة فوق البنفسجية لجذب الحشرات إلى مصائد كهربائية أو ميكانيكية.

٨. التلوث بالمناجم:

١.٨. التلوث بالمقالع وتفجير الصخور:

إن عملية استخراج المعادن من المناجم أعطت المصادر الفلزية الغنية الدول التي اكتشفتها واستثمرتها امتيازات رفعتها إلى درجات عالية من التفوق الصناعي والعلمي. وقد بدأ استخدام البارود في عمليات الحفر المنجمي في القرن السابع عشر، واستمر الاعتماد عليه مع محاولات كثيرة لزيادة فعاليته وتوفير ما أمكن من شروط السلامة حتى اكتشاف النيتروغليسرين عام ١٨٦٠ الذي طُبق، على الرغم من أخطاره، في أعمال الحفر المنجمي، وتوسّع استخدامه أكثر بعد أن ثبته العالم نوبل Nobel بشكل ديناميت سنة ١٨٦٧. أما نترات الأمونيوم فتتميز عن الديناميت بكونها أقل خطراً، وبأنها قابلة للنقل والتخزين، وأقل كلفة. وقد ازدهرت المقالع والمناجم في الحقبة التي أعقبت الحرب العالمية الثانية بسبب استخدام الآلات والمعدات ذات الاستطاعة العالية (معدات الجرف والتحميل تتحرك على سكة حديدية أو على عجلات مطاطية أو على زناجير، وهي تعمل بمحركات الكهرباء أو البخار أو الديزل والحفارة المغرفية الدوارة تنقل المواد إلى عربات الشحن بوساطة سيور متحركة ومكنات حفر ثقوب التفجير أو تحفر بنفث اللهب مع الماء)، إضافة إلى تطوير عمليات التفجير ومعدات الحفر الخاصة بها. واستثمرت التوضعات الفلزية الضخمة الموجودة على سطح الأرض أو القريبة منه مثل توضعات الحديد والنحاس والفحم الحجري والبوكسيت والغضار والفسفات والأملاح والبحص والرمل وأحجار البناء والزينة ومواد الإسمنت والأحجار الكريمة والمعادن الثمينة.

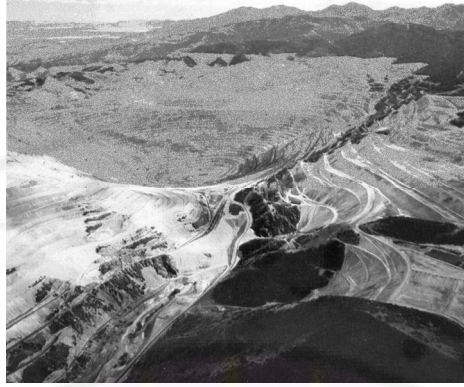


الشكل (١٥) تحضير المقالع بالتفجير.

تكس الأنقاض والنفايات الصخرية في العادة في أماكن قريبة ما أمكن من مواقع الاستثمار، أو تملأ بها التجاويف التي خلفها الاستثمار، وذلك من أجل تخفيض تكاليف النقل.

تطبق في التوضعات القريبة من سطح الأرض وهنا تحفر فتحات شاقولية ذات مقطع مربع أو دائري تصل إلى أعماق لا تتجاوز ١٠م، ويمكن أن يستعاض عنها بالخنادق حين يكون التوضع أكثر قرباً من سطح الأرض. ويراعى في الحُفر والخنادق أن تكون جوانبها منحدره غير قائمة لتجنب الانهيارات. تفتح المقالع لتوضعات أحجار البناء والرخام في مناطق هضبية أو جبلية. ويكون المقلع على شكل فتحة جانبية واسعة في سطح منحدر. وفي بعض الأحيان يفتح المقلع من جانبيين متقابلين. وتقطع الصخور من جبهة تشرف على مصطبة عرضها ١٠ - ١٢م. ويستعان بالتفجير لتقطيع الصخور أو إزالة التغطية والأجزاء غير المرغوب فيها. أما في حالات كتل الرخام فيستغنى عن التفجير، وتقطع الصخور بطرائق أخرى مثل حفر صف من الثقوب في هذه الكتل وضغط أسافين مخروطية فيها أو استخدام المنشار السلبي انظر الشكل (١٥). تحمل مخلفات الرخام الكثير من الرواسب والمواد العالقة (كمخة)، ترمى على التربة لتجف وتتججر، وتختلط الكمخة مع التربة، فتخفض نفوذية التربة للمياه والهواء وتمنع مرور المياه من السطح الى الآبار والى خزانات المياه الجوفية. وقد ترمى مع مياه الصرف الصحي بعد تهدئة بسيطة لتجنب انسداد المجاري.

يناسب استخدام طريقة التعرية التوضعات الرسوبية المسطحة ذات الامتداد الجانبي الواسع مثل طبقات الحديد والغضار والبوكسيت والفسفات وطبقات (راقات) الفحم الحجري، وتستخدم الآلة في عمليات التعرية على نطاق واسع ولاسيما عمليات إزالة الغطاء وتقطيع الخامات وتحميلها ونقلها، كما يستخدم التفجير في تسهيل هذه العمليات. أما أهم المكنات التي تستخدم في التعرية فهي الجراف والحفارة المغرفية الدوارة و«القاحط» (البلدوزر).



الشكل (١٦) تضاريس المقالع والمناجم السطحية.

يستخدم الحفر بالماء في بعض التوضعات القليلة التماسك كما هي الحال في الذهب والبلاتين والقصدير والأحجار الكريمة. وهنا يتم تسليط نفثات مائية قوية تفتت الخامات وتجرفها نحو مجار خاصة توصل إلى أحواض ترسيب ومصائد تفصل المواد الفلزية الثقيلة. وتراوح أعماق المناجم بين ٢٠٠ و ١٥٠٠م ويمكن أن تصل إلى أعماق تتجاوز ٣٠٠٠م. ولقد كان الاستثمار المنجمي القديم يتم في كثير من الأحيان بحفر أنفاق تحت الأرض وصلت امتداداتها إلى نحو ١٠٠م، يقومون بأعمال الحفر اليدوي مع استخدام النار في تحطيم الصخور القاسية وتفتيتها عن طريق التمدد بالتسخين والنقل السريع بصب الماء على الصخور الساخنة.

أما أهم طرائق المناجم تحت الأرض وتقنياتها فهي التفضين، وهي تسمية تطلق على العمليات المنجمية العشوائية التي يسير الحفر التضاؤلي (التفضين) وتطبق على التوضعات التي تحيط بها جدران صخرية متماسكة متينة، ولاسيما توضعات العروق المعدنية. ويسير الحفر المنجمي في هذه التوضعات وفق مستويات عدة، من دون اللجوء إلى التدعيم.

تلائم طريقة الحفر تحت المستوى الخامات المتينة المتماسكة، وتصبح مستحيلة أو خطيرة حين تكون الخامات ضعيفة التماسك. أما الحفر المملوء فتستخدم في التوضعات المحاطة بجدران صخرية متينة وتكون خاماتها على درجة كافية من التماسك تكفي للحفر المنجمي ضمن حيز محدود، من دون حاجة إلى تدعيم. أما أسلوب الحفر وتقطيع الخامات تحاشياً لحدوث الانهيارات في حالة التوضعات المحاطة بجدران صخرية ضعيفة أو التي تقع تحت غطاء صخري ثقيل. وأكثر طرائق التدعيم انتشاراً التدعيم بالمجموعات المربعة، إلا أنه عالي الكلفة ويستهلك كميات

كبيرة من الأخشاب ويزيد في احتمالات التعرض للحريق، ويضعف مردود العمل. تستخدم طرائق التكهيف في التوضعات الفلزية الضخمة التي يعلوها غطاء صخري قابل للانخساف، ليستفاد من هبوطه في تحطيم خامات التوضع وتوفير عمليات التقطيع والتحطيم. تحفر في التوضعات المنجمية للملح الصخري والفضة والحديد شبكة نظامية من أنفاق الاستثمار تصل حتى مستوى الماء الجوفي. وتستخدم الوسائل الآلية لنضح الماء الجوفي المتسرب في أثناء العمل المنجمي.

وضع العالم الألماني جورجيويس أغريكولا Georgius Agricola أهم أسس النظريات العلمية حول نشوء الخامات وتوزعها وتصنيفها في كتابه «حول المعادن الحديثة» عام ١٦٥٦ الذي وصف فيه العمليات المنجمية، وبيّن فيه قواعد تنظيم الاستثمار المنجمي وطرائق تحطيم الصخور وعمليات النقل ونضح الماء وقواعد السلامة في أثناء العمل. تختلف أنواع المتفجرات التي تستخدم في عمليات المناجم تحت الأرض عنها في المناجم المكشوفة. ولا يسمح إلا باستخدام أنواع خاصة تتصف بالتفجر السريع من دون إعطاء لهب قوي أو دخان أو حرارة عالية. ويفضل استعمال الديناميت المصنع لهذه الأغراض والذي يُنتج بدرجات متباينة من حيث قوة التفجير. أما حفر ثقب التفجير فيتم بوسائل آلية مشابهة لما يستعمل في المناجم المكشوفة. ويتم الحفر وفق نماذج هندسية خاصة بالمناجم تحت الأرض.

حالياً تم التوسع في استخدام الأجهزة الإلكترونية والحواسيب والمصورات التلفازية (الكاميرات) وأجهزة التحكم من بعد في متابعة تنفيذ الخطط العامة والتفصيلية للإشراف المباشر على العمل المنجمي وتحديد الثغرات فيه، وتسهيل الصيانة والإنقاذ، وتلافي الكوارث المنجمية، وتحسين الأحوال الصحية في مواقع العمل.

أما البحوث الحديثة فهي تتجه نحو تخفيف استنزاف مصادر الفلزات بمحاولات لاستخدام بدائل لبعض الصناعات المعدنية، كالدائن، وإيجاد مصادر بديلة للطاقة، كالطاقة الشمسية والرياح والحرارة الجوفية، كما تتجه أيضاً إلى البحث عن المصادر الفلزية في أعماق البحار، وتطوير الوسائل التقنية والآلية التي تمكن من توسيع استثمارها في المستقبل.

تؤدي العمليات المنجمية في كثير من مجالاتها إلى تلويث البيئة والإضرار بها وماينتج عنها من مخلفات تصبح مصدراً للتلوث في الأراضي المحيطة، وعلى سبيل المثال يُذكر ما يتعلق برمي الأنقاض والنفايات، وحفر الأراضي، وإزالة الأشجار والنباتات والتربة الزراعية، وانخسافات الأراضي، وانزلاقات التربة، وطرح المياه الحاملة للنفايات، وتلويث المياه السطحية والجوفية

بالمحاليل الضارة أو المواد المشعة، وإثارة الغبار من المناجم السطحية إلى المناطق المأهولة المجاورة وغيرها. ولذلك تأخذ القوانين الحديثة بقواعد وأسس ناظمة يجب اتباعها في مختلف العمليات المنجمية وأهمها التالي:

- ١) منع رمي الأنقاض والنفايات والمياه الحاملة لها في الأنهار والشواطئ أو المجاري السيلية مع أسس ناظمة لكيفية التخلص منها.
- ٢) إعادة ردم الحفر وتسوية الأرض وتغطيتها بالتربة الزراعية، وتعديل انحدارات الحفر وجعلها مدرجة في مصاطب مستوية ذات تربة زراعية، وإعادة تشجيرها أو زرعها بالأعشاب.
- ٣) استخدام تجهيزات خاصة لتنقية مياه النفايات أو معالجة الخامات وتركيزها قبل التخلص منها، ومنع تسرب محاليل ضارة أو سامة من أكداس النفايات في أثناء تعرضها للعوامل الجوية، عن طريق التغطية أو تخصيص أمكنة مهيأة لها.
- ٤) إحاطة أماكن العمل المنجمي تحت الأرض بسياج يحيط بكامل المسافة التي تتأثر تأثيراً مباشراً أو غير مباشر، بالانخسافات وانزلاقات الأراضي والتربة، ووضع لافتات تنبه للخطر. وفي مختلف طرائق العمل المنجمي تحت الأرض يحفر مدخل واسع، يتجه شاقولياً أو مائلاً، يوصل إلى المواضع المناسبة.

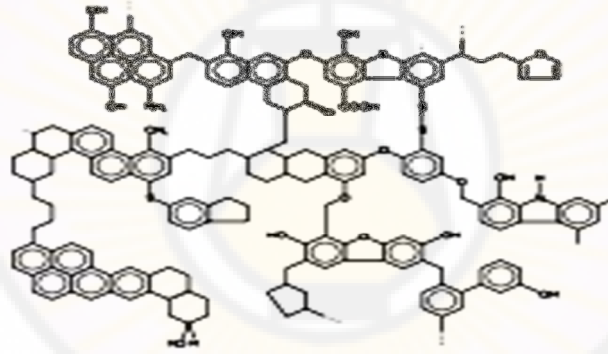
٢.٨. التلوث بمناجم الفحم:

الفحم الحجري صخر أسود أو بني اللون قابل للاشتعال والاحتراق، يستعمل في إنتاج ثلثي الكهرباء المستهلكة في العالم وكذلك في إنتاج فحم الكوك وفي صناعة بعض المنتجات كالأدوية والأصبغ والأسمدة. تأخذ توضعات الفحم الحجري أشكالاً رسوبية مسطحة «راقات الفحم» تخانتها محدودة وامتدادها الجانبي واسع، ومن ثم يعلوها سقف واسع، تسمى طبقات الفحم الحجري راقات الفحم الحجري أو عروق الفحم الحجري.



الشكل (١٧) قطعة من خامة الفحم الحجري.

ويتراوح سمك هذه الرافعات بين أقل من ٥،٢ سم و ١٢٠م أو أكثر. لذلك فإن عمليات الحفر المنجمي تواجه دائماً مشكلة تدعيم هذا السقف. وتقع بعض طبقات الفحم الحجري موازية لسطح الأرض تقريباً. وتكون طبقات أخرى مائلة بفعل الحركات الأرضية وتوجد بزاوية مائلة مع سطح الأرض. يحتوي الفحم الحجري على شوائب عنصر الكبريت ومعادن أخرى متنوعة. ولدى احتراق الفحم الحجري فإن معظم عنصر الكبريت يتحد مع عنصر الأكسجين ويكونان غازاً ساماً هو غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 وتسبب تلوثاً خطيراً. أما معظم المعادن الأخرى فتتحول إلى رماد. وقد حدث صعوبة وارتفاع تكلفة تطوير تدابير الأمان من التلوث من استعمال الفحم الحجري كوقود. ليس للفحم الحجري تركيب كيميائي ثابت. تتركب كل الفحم الحجري من أجسام صلبة معينة ومن رطوبة. أما الأجسام الصلبة فتتكون أساساً من عناصر الكربون والهيدروجين والنيتروجين والأكسجين والكبريت. ولكن الفحم الحجري تتباين كثيراً من حيث محتواها من هذه العناصر، وكذلك من حيث محتواها من الرطوبة. وفي الحقيقة لا يوجد ترسبان من الفحم الحجري متشابهان تماماً من حيث التركيب.



الشكل (١٨) التركيب الكيميائي للفحم الحجري.

- تصنف الفحم الحجري عادة طبقاً لكمية محتواها من الكربون. وعليه تُجمع الفحم الحجري في أربعة أصناف أو رتب رئيسية هي:
- ١- الأنتراسيتات: تحتوي على حوالي ٩٨% من عنصر الكربون.
 - ٢- الفحم الحمري أو القارية.

٣- الفحم تحت الحمرة أو تحت القارية.

٤- اللجنيتات أو الفحم البنية اللون تحتوي على حوالي ٣٠% من عنصر الكربون. ويتناقص محتوى الكربون في الفحم الحجرية مع تدني رتبها. يكون الأنتراسيت هو أقدم أنواع الفحم عمراً كما يكون اللجنيت أحدثها عمراً وعادة ما تتكون طبقات الفحم الحجري العميقة من فحوم الأنتراسيت القار. وفي حالات عديدة نجد أن الحركات الأرضية قد قامت برفع طبقات فحوم الأنتراسيت القار العميقة إلى وضع قريب من سطح الأرض، وتقع بعض طبقات الفحم الحجري موازية لسطح الأرض تقريباً. وتكون طبقات أخرى مائلة بفعل الحركات الأرضية وتوجد بزاوية مائلة مع سطح الأرض. وعادة ما تتكون طبقات الفحم الحجري العميقة من فحوم الأنتراسيت القار. لقد بقيت الفحم الحمرة (القارية) الفحم الحجرية المفضلة لتوليد القدرة الكهربائية لأنها الفحم الأكثر وفرة، ولأنها ذات القيمة الحرارية الأعلى من بين الفحم الأخرى، كالفحوم تحت القارية واللجنيت التي تحتوي على القيمة الحرارية الأدنى من بين الفحم. وقد كانت المعاول هي الأدوات الوحيدة التي تستعمل في تكسير وتقشير الفحم الحجري. وكان على عمال المناجم الفحم الحجري أن يجرفوا الفحم الحجري المتفتت ويحملوه في عربات. وفي حالات عديدة كان الأطفال دون سن العاشرة يجزؤون عربات الفحم الحجري من المناجم. كما عملت النساء في عمليات التحميل والنقل بالعربات. ومع مرور الزمن فقد الآلاف من الرجال والنساء والأطفال حياتهم في حوادث المناجم. كما مات آلاف آخرون جرّاء إصابتهم بأمراض الرئتين بسبب استنشاق رماذ الفحم الحجري طوال حياتهم العملية في المناجم. وتُنفذ الآلات هذه الأيام معظم الأعمال في مناجم الفحم الحجري.



الشكل (١٩) : الآلات المستخدمة في استخراج الفحم الحجري.

وكان الفحم الحجري يُستخرج من مناجم صغيرة مكشوفة حفرت لهذا الغرض، ومن ثم يتم استعماله أساساً في عمليات صهر وطرق المعادن. وقد اعتبر معظم الأوروبيين الفحم الحجري وقوداً قذراً ورفضوا استخدامه. وحاول منتجو الجعة استعمال الفحم الحجري في عمليات تجفيف المالت (شعير منقوع في الماء) ، هذه العملية ولكن المالت كان يمتص غازاته، الأمر الذي أفسد مالت الجعة. وقد استخدم الفحم الحجري من أجل الحصول على الحرارة اللازمة لصناعة منتجات كثيرة تتفاوت من صناعة الزجاج إلى صناعة الأطعمة المعلبة. وصناعات الإسمنت والورق وبحلولت بعض الصناعات إلى الفحم الحجري تقادياً لأسعار الغاز الطبيعي المرتفعة. وتقوم مصانع الفولاذ بحرق الفحم الحجري للحصول على الكوك (فحم الكوك) مع خام الحديد وذلك لتحويل خام الحديد إلى حديد نقي لازم لإنتاج الفولاذ. ويستخدم الأمونيا وقطران الفحم الحجري والزيت الخفيف في إنتاج الأدوية والأصبغ والأسمدة. كما يستعمل قطران الفحم الحجري أيضاً في أعمال أسطح المنازل ورصف الطرق. ويتم إنتاج الكهرباء باستخدام الفحم الحجري وقوداً بتكلفة أقل من إنتاجها باستعمال الغاز الطبيعي أو زيت الوقود. ويسحب الفحم الحجري عبر أنابيب تمتد من المناجم إلى معامل توليد القدرة الكهربائية فإن معامل إنتاج القدرة الكهربائية التي تقوم بحرق فحوم حجرية ذات محتوى متوسط أو محتوى عالٍ من الكبريت عليها أن تتفق أموالاً طائلة لإنشاء معامل لغسل ثاني أكسيد الكبريت. وللحصول على فحم حجري ذي محتوى قليل من الكبريت. ويشكل كل من الرماد والكبريت الشوائب الرئيسية في الفحم الحجري. ويتألف الرماد أساساً من مركبات معدنية تتكون من عناصر: الألومنيوم، والكالسيوم، والحديد، والسليكون. ويكون بعض الكبريت الموجود في الفحم الحجري على هيئة معدن البيريت بشكل خاص أو المعروف بالمعدن الشبيه بالذهب. وما تبقى فهو كبريت عضوي وهذا يكون متحداً بشدة مع كربون الفحم الحجري. وكذلك قد يحتوي الفحم الحجري الآتي من المنجم على قطع صغيرة من الصخر أو الطين تنبغي إزالتها أيضاً، بالإضافة إلى الشوائب الأخرى. تعتمد معامل التجهيز على مبدأ الوزن النوعي في إزالتها لشوائب الفحم الحجري الآتي من المنجم. وحسب مبدأ الوزن النوعي، فإنه إذا وضعت مادتان صلبتان في محلول فإن المادة الأثقل ستهبط وتستقر في القاع أولاً. وتكون معظم الشوائب المعدنية الموجودة في الفحم الحجري أثقل من الفحم الحجري

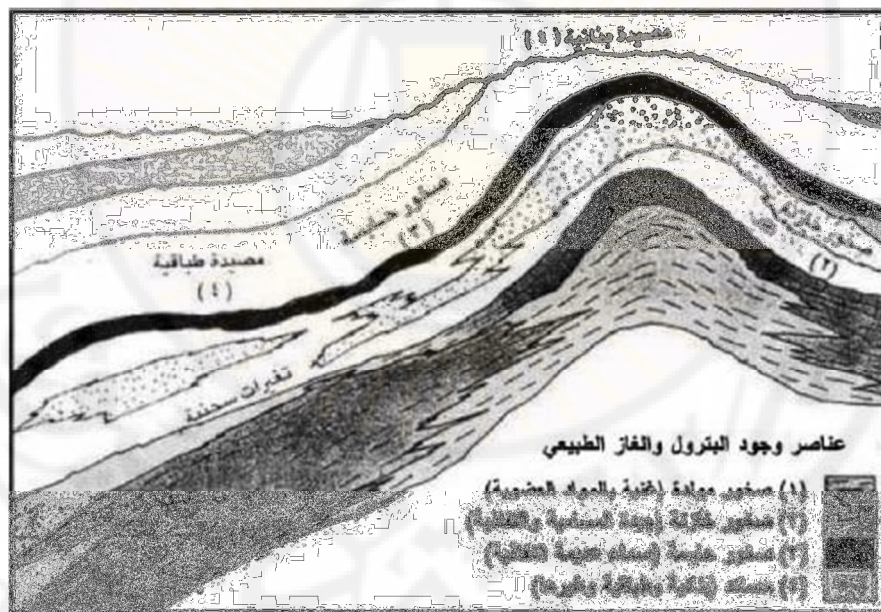
الخالص؛ ولهذا فإن هذه الشوائب يمكن فصلها عن الفحم الحجري الآتي من المنجم بوضعه في محلول. وتتضمن عملية تنظيف الفحم الحجري الكاملة ثلاث خطوات هي: ١- الفرز ٢- الغسل ٣- التجفيف.

فإن استعمال الفحم الحجري يحمل في طياته مشاكل من نوع خاص؛ إذ إن احتراقه يشكل سبباً رئيسياً لتلوث الهواء. حيث ازدادت غازات الدفيئة في العالم وارتفعت حرارة الكرة الأرضية وأثرت على التغير المناخي. وقد طُوِّرت وسائل عديدة للتقليل من التلوث ولكنها مكلفة ولم تثبت جدواها حتى الآن، ينتج من احتراق الفحم المستعمل كوقود نواتج كبريتية ملوثة إضافة إلى قطران الفحم. ومع مرور الزمن فقد الآلاف من الرجال والنساء والأطفال حياتهم في حوادث المناجم وخاصة المناجم تحت الأرضية. كما مات آلاف آخرون جرّاء إصابتهم بأمراض الرئتين بسبب استنشاق رماد الفحم الحجري طوال حياتهم العملية في المناجم. وقد تسببت الحوادث في المناجم في وفاة أو إعاقة آلاف من عمال المناجم سنوياً. إن كل من يستنشق كميات كبيرة من غبار الفحم الحجري لمدة من الزمن، يمكن أن يصاب بمرض الرئة الغباري المعروف أيضاً باسم مرض الرئة السوداء. بعض الغازات التي تتسرب في مناجم الفحم الحجري تحت أرضية ذات خطر عظيم إذا تراكمت. ويُعد غازا الميثان وأول أكسيد الكربون خطيرين بشكل خاص. فالميثان غاز قابل للانفجار. وهو يوجد بشكل طبيعي في راقات الفحم الحجري. وهو غير ضار إن وجد بكميات قليلة. وعلى كل حال فإن مزيجاً من ٥-١٥% من الميثان في الهواء يمكن أن يحدث انفجاراً عنيفاً. ثم بدأت الحكومات سن تشريعات وضعت معايير للحد الأدنى من الصحة والسلامة لكل من العاملين وأرباب العمل على حد سواء. وبذلك تناقصت معدلات الوفيات بين العاملين بشكل كبير بلغ في بعض الحالات ٨٥%. تتضمن إجراءات السلامة في المناجم أربعة أنماط من المخاطر الرئيسية وهي: ١- حوادث بفعل الآلات. ٢- انهيار الجدران والسقوف. ٣- تجمع وتراكم الغازات. ٤- تركيز غبار الفحم الحجري.

تتمثل المشاكل البيئية في كون التعدين بالتجريد والكشط، يؤدي إلى دفن التربة الخصبة تحت أكوام من الصخر. وتطلق هذه الصخور حموضاً عند تعرضها للرطوبة. وتحمل مياه الأمطار الجارية عبر المنحدرات الجرداء الحموض والأحوال معها، وتجرف التربة الخصبة من المناطق المجاورة. وتلوث هذه المياه الجارية مياه الجداول والأنهار بما تحمله من أحوال وحموض.

٣.٨. التلوث بمناجم استخراج النفط:

تتلوث التربة عند استخراج الوقود الأحفوري، وهو النفط أو البترول الخام ومنتجاته النفطية المكررة من زيوت وشحومات ووقود وتداولها عن طريق الشحن بالأنابيب أو الشاحنات أو الناقلات. ويكون التلوث مركزاً في منطقة الحادث، ولكنه يؤثر في كل المناطق والأراضي المحيطة بمنطقة الحادث أو التسرب أو الإهمال. تعمل المواد النفطية على تدمير كافة أنواع الأتربة ومنها التربة الزراعية الخصبة وتحولها إلى تربة عقيمة لا نفع منها. فالنفط السائل يعمل كحاجز كقيم بين حبيبات التربة والهواء ويؤدي إلى تسمم وموت كافة محتويات التربة من كائناتها الحية. ويحصل التغيير الشديد في مواصفات التربة، فالتربة لن تعود ولمدة طويلة صالحة للزراعة. ما يجعل التربة بحاجة لإعادة تأهيل بعمليات مكلفة جداً.

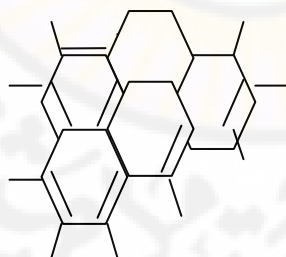


الشكل (٢٠) أماكن وجود النفط.

تركيب النفط:

النفط أو البترول Petroleum مصطلح لاتيني مكون من petra بمعنى صخر rock و oleum بمعنى زيت oil ويطلق عليه أحياناً اسم الذهب الأسود، وهو سائل ثقيل القوام تخين كثافته عالية أسود اللون يميل إلى البني أو الأخضر، والبترول سائل قابل للاشتعال لاحتوائه على كثير من المواد المشتعلة. يظهر أحياناً على سطح الأرض في بعض المناطق على شكل برك نفطية، حيث عرفه القدماء في صورته الخام، واستخدموه في بعض الاستخدامات الحياتية كالإضاءة، والبناء، وطلاء السفن، كما استخدم في علاج بعض الأمراض، وفي تحنيط الموتى، وفي بعض الصناعات البسيطة، ويعتبر النفط مصدراً مهماً للطاقة، ومصدراً غنياً للعديد من المركبات والمنتجات الكيميائية، كالمذيبات، والأسمدة، والمبيدات الحشرية، والبلاستيك وغيرها.

يتألف النفط من خليط معقد من الهيدروكربونات والمركبات العضوية الأخرى، وتفاوت تركيبيه بشكل كبير من نوع إلى آخر، والمركبات العضوية كما هو معروف تتألف من الكربون، والهيدروجين، وعناصر أخرى كالأكسجين، والنيتروجين، والكبريت، كما يحتوي النفط على آثار من بعض العناصر المعدنية، كالحديد والفاناديوم والنيكل. ويشكل الميثان CH_4 ، والإيثان C_2H_6 ، والبروبان C_3H_8 ، والبيوتان C_4H_{10} ، نسبة عالية من الهيدروكربونات المكونة للبترول. (١) النفط الخام: عبارة عن مزيج من مركبات هيدروكربونية مفتوحة مثل الميثان وهو أبسط مركب هيدروكربوني أو مركبات عطرية حلقية تحتوي على ٤-٢٦ ذرة كربون في التركيب الجزيئي. ويكون ترتيب الذرات بشكل مستقيم أو متفرع أو حلقي مثل البنزوينزين وهو مركب هيدروكربوني عطري عديد الحلقات:

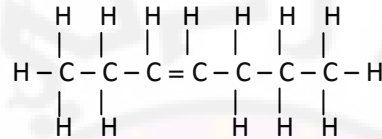


وتوجد مركبات لاهيدروكربونية بنسبة ٢٥% إضافة إلى مركبات الكبريت والفاناديوم وزيتوقود والنفثالين وزيتوقود شمعية ثقيلة والقار (مركبات ثقيلة تستخدم في عمليات رصف الطرق). (٢) نفط ثقيل: يحتوي على قطران وإسفلت.

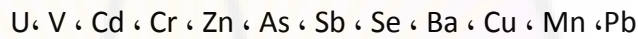
٣) نفط متوسط : يحتوي على زيوت وشحوم.

٤) نفط خفيف كوقود الديزل.

٥) نفط خفيف جداً كوقود الطائرات والبنزين. ويملك البنزين الصيغة الكيميائية التالية تمييزاً عن الهكسان والبنزن:



٦) منتجات النفط: مثل الهالوجينات العطرية الناتجة عن حرق النفط. أو عدد كبير من العناصر الثقيلة التي تنتج من احتراق النفط وتترسب على الأراضي المحيطة مع انبعاث الأيروسولات والغبار مثل:



٧) منتجات حرق الوقود: وخاصة في المدن الصناعية حيث تترسب نواتج حرق الوقود من دخان ثاني أكسيد الكربون والمركبات النتروجينية والمركبات الأكسجينية والهالوجينات المشعة والتي تتراكم على سطح التربة على شكل حبيبات ناعمة سوداء.

أصل البترول والنظرية العضوية:

اختلف العلماء في أصل البترول، فمنهم من يرى أنّ المادة غير العضوية متمثلة في الكربون ومركباته هي الأصل، كمركب كربيد الكالسيوم على سبيل المثال CaC_2 حيث اعتري عنصر الكربون ومركباته والتي كانت تملأ الأرض قديماً، تغيرات كيميائية نتج عنها هذا الخليط الهائل من الهيدروكربونات وبقية المركبات العضوية المكوّنة للبترول. ويُعتقد أنّ البداية كانت عبارة عن تفاعل من هذا النوع :



ومنهم من يرى أنّ أصل البترول هو الكائن الحيّ المؤلّف من المادة العضوية. يرى الكثير من علماء الجيولوجيا أنّ أصل البترول وكذلك الفحم الحجري والغاز الطبيعي- (هو بقايا الكائنات الحيّة القديمة من النباتات والحيوانات البحرية الصغيرة ، حيث ترسّبت بقايا هذه الكائنات

بكميات كبيرة في مناطق منخفضة من المحيطات وتغطّت بطبقات من الطين)، وتحت تأثير الضغط والحرارة وعامل الزمن تحلّت بقايا هذه الكائنات وحدثت لها العديد من التحوّلات والتفاعلات الحيوية لينتج البترول .

تكرير النفط وتصنيفه:

عملية التقطير والتي تتم في أبراج ضخمة تسمى أبراج التقطير التجزيئي وينتج عنها فصل النفط إلى معظم المشتقات البترولية، مع الإشارة إلى أنه يجب فصل الماء والأملاح لأن تبخّر الماء في برج التقطير يسبب انفجاراً بسبب للضغط الهائل الذي ينتج، أما الأملاح فتسبب تآكل الحديد المصنوع منه مادة البرج. وينتج عن التكرير المكونات التالية كما في الشكل (٢١):



الشكل (٢١) نواتج تقطير النفط.

(١) هيدروكربونات خفيفة أو غازات: مثل ايتير البترول والميثان والايثان والايثلين والبروبان والبوتان وغيرها وفي الغالب تتراوح أعداد ذرات الكربون في المركبات المكونة لها من ١-٤ وتتكاثر عند درجات غليان أقل من ٢٥ °م، وتُستخدم في إنتاج الغاز المنزلي وإنتاج غازات

أخرى مثل غاز الاسيتلين المستخدم في عمليات اللحام، كما تعتبر هذه المواد هامة جداً للصناعات البتروكيميائية.

(٢) السوائل الخفيفة وأهمها منتج الجازولين المُستعمل كوقود للسيارات وتتراوح أعداد ذرات الكربون في مركباته من 5-9 ويتكاثف عند درجات حرارة ٣٥-١٥٠.

(٣) الكيروسين: تتراوح أعداد ذرات الكربون في هذا المشتق من ٩-١٥ ذرة كربون ويتكاثف عند ١٥٠-٢٥٠ ويستخدم كوقود للطائرات النفاثة، كما يستخدم نوع رديء منه كوقود رخيص الثمن في المنشآت الصناعية والمنازل .

(٤) الديزل Diesel أو السولار: سائل أثقل من الكيروسين يستخدم كوقود في المصانع والمحركات الضخمة والشاحنات .

(٥) السوائل الثقيلة: وهي تتألف من مركبات تتكاثف عند درجات حرارة أعلى من ٣٠٠ درجة م ويتم إنتاج زيوت التزيت المختلفة منها، كما تعتبر مصدراً مهماً للصناعات البترولية حيث يمكن تحويل جزء منها إلى مشتقات خفيفة كالجازولين عن طريق عمليات بترولية معروفة مثل التكسير الحراري والتكسير الحفزي.

(٦) الزفت asphalt وهي البقايا المتجمعة في قاع البرج تتألف من مركبات عضوية ذات وزن جزيئي عالي ودرجات غليان مرتفعة جداً وتستخدم في طلاء الإنشاءات الخرسانية وطلاء السفن وفي تزييت الطرق وتعبيدها.

أنواع النفط:

يمكن تصنيف النفط حسب كثافته ، إلى نفط ثقيل ونفط خفيف، وترجع خاصية اختلاف كثافة البترول إلى نسبة الهيدروكربونات الثقيلة فيه ، فكلما زادت هذه النسبة زادت كثافة النفط ، وفي الحقيقة فإنّ النفط الخفيف أكثر طلباً في السوق وأعلى سعراً وذلك بسبب إمكانية الحصول منه على كميات كبيرة من المشتقات البترولية وبالذات الجازولين، والذي يعتبر المشتق البترولي الأكثر طلباً في العالم. كما يمكن تصنيف البترول إلى بترول حلو الحاوي على نسبة كبريت منخفضة، وبترول حامض الحاوي على نسبة كبريت عالية، إنّ النفط الحلو أكثر طلباً في السوق العالمية.

١.٣.٨ مصادر تلوث التربة بالنفط:

(أ) مصادر طبيعية: من تسريبات من باطن الأرض وقد تكون نتيجة حوادث طبيعية كالزلازل والبراكين، ويعود ذلك إلى انفلات النفط والمياه المرافقة وقد تختلط بمياه آسنة ومياه الصرف

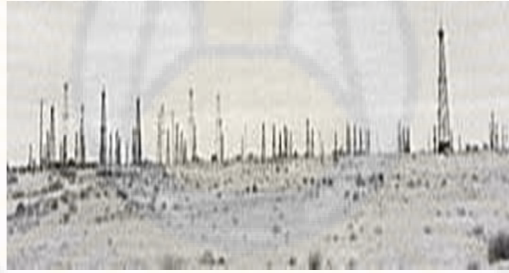
الصحي. أو نتيجة أعطال في رؤوس الآبار والأنابيب أو أثناء عملية الصيانة، وقد لوحظت أيضاً تسريبات نفطية لاماكن تحت سطحية تعود إلى وجود تكهفات في طبقات التربة ذات الطبيعة الجبسية. وفي حرب الخليج تم تدمير كثير من وسائل نقل النفط مع انتشار حمولتها وتلوثها للتربة وتدفق نحو ١.٥ ملون برميل نفط تحتاج إلى ٢٠ عاماً لكي تزول آثارها حيث لا يمكن للأكسجين ولأشعة الشمس والبكتريا تفكيك هذا الكم الهائل من النفط المركز في منطقة واحدة.

ب) مصادر صناعية:

١ - حوادث ناقلات النفط الخام ومنتجاته المكررة: مثل التصادم الملوث للتربة الشاطئية. كما حدث في الشواطئ الشمالية من فرنسا نتيجة غرق ناقلة النفط العملاقة أموكو كاديز Amoco Cadiz وتدفق ٢٢٠ ألف طن من النفط.

٢ - من أعمال التنقيب وحفر آبار النفط:

وفي المكسيك عام ١٩٧٩ تدفق ٣٥٠ ألف طن نتيجة انفجار بئر نفط. وفي إيران عام ١٩٨٣ تدفق ٢٠٠٠-٣٠٠٠ برميل يومياً. تتلوث التربة من عمليات التنقيب عن النفط الخام أو استخراجها. قدر ما يتسرب من كل بئر نفطي بنحو خمسة بالآلاف من كمية الإنتاج الشكل (٢٢).



الشكل (٢٢) تلوث التربة أثناء استخراج النفط.

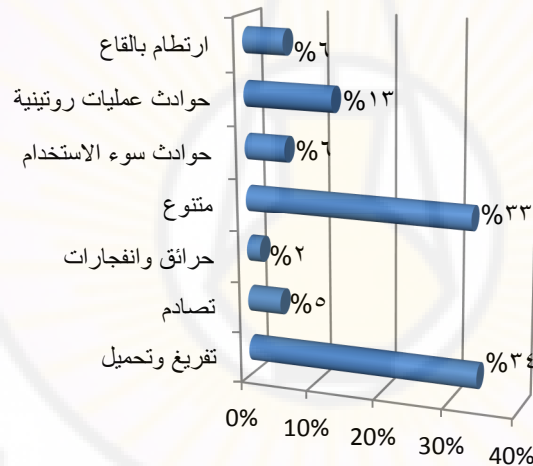
٣ - أثناء الشحن والتعبئة والتفريغ لشاحنات النفط البري والبحري والأنابيب الناقلة للنفط ومنتجاته وتسريباتها الملوثة للتربة: التلوث النفطي الذي يضرب شواطئ مريع نظراً لكثافته وسماكة طبقة القار وعلى عمق يزيد على كيلو متر في البحر، ما كان سبباً في انتشار رائحته النفاذة في المنطقة وتراكم وانتشار البقع الزيتية من النوع الثقيل على طول الشاطئ.

٤- **المخلفات السائلة من محطات خدمة السيارات:** وتختلط عادة مع فضلات المجاري في المدن وتسلك هذه الزيوت البترولية مجرى الأمطار وتتسرب إلى التربة وتلوثها. وقد تصل درجة التسرب البترولي ضعف حوادث ناقلات النفط.

٥- **من مخلفات مصافي تكرير النفط:**

يتسرب النفط الخام ومنتجاته من معمل التكرير وهو عملية تقطير أو قطفات عند درجات غليان مختلفة، وكما يتسرب النفط من صناعة البتروكيماويات. حيث قدر ما ترميه المصافي نحو ٢٠ ألف طن في السنة عام ١٩٧٨.

يبين الشكل (١٥) نسب حوادث تسريبات النفط المتعددة من شاحنات البترول أو الشحن البحري وأثناء راحة السفن في الأرصفة البحرية. وقد يصل النفط المتسرب من الزفت أو زيوت الوقود إلى مسافة تبعد حوالي ٧٠٠ كم عن منطقة التسرب في أعمال التنقيب.



الشكل (٢٣): نسب حوادث تسريبات النفط.

٢.٣.٨. خصائص النفط المتسرب وحركته والعوامل المؤثرة:

يتحكم بتأثير التسرب النفطي عدة عوامل:

أ- **نوع الانسكاب النفطي:** يؤثر انسكاب المواد النفطية العطرية بشكل خاص لخطورتها وسميتها، وهي موجودة في المواد النفطية الخفيفة وهي تفقد بالتبخر ولكنها تذوب بالماء وتشكل

مُستحلباً (خليط ماء وبنفط) وتنقل إلى التربة وتلوثها وقد تنقل معها بعض المبيدات الحشرية والمنظفات الصناعية وبعض العناصر الثقيلة مثل الكاديوم والرصاص والزئبق والفاناديوم وترفع من تركيزها في التربة إضافة أن النفط يؤثر على الأحياء الدقيقة وتعتبر أكثر سمية من زيت الوقود الذي بدوره أكثر خطورة من الزيت الخام.

ووجد أن بقعة الزيت السوداء لها قابلية امتصاص الحرارة ومن ثم إعادة بثها بعد وقت طويل مسببة الموت للكائنات الحية في التربة. ووجد أنها تحتوي على نسبة من عنصر الحديد أعلى مما يوجد في زيت النفط الطبيعي بسبب أن كرات القار (كتل سوداء متفاوتة الأحجام تتألف من مركبات إسفلتية وبعض الأزوت والأكسجين والكبريت) تنتج من مخلفات زيت النفط وقد تلوث أيضاً قاع البحر عند غرق ناقلات النفط وتغطي قاع البحر بطبقة سوداء من كرات القار تصل سماكتها لنحو ١٥ سم.

وقد تحدث تفاعلات أكسدة وإرجاع وتتأكسد السلاسل الهيدروكربونية في النفط وتتحول إلى مواد عضوية مثل الكحولات والألدهيدات والكيونات وهي مركبات عضوية سامة . والأنواع المتسربة من النفط تختلف حسب خصائصه الكيميائية والفيزيائية من حيث اللزوجة والتطاير.

ب- الانتشار والانجراف والتبخر والأكسدة والترسب والانحلال والتفكك:

تفقد بقعة النفط خلال ٢٤ ساعة الأولى حوالي ٢٠% من معظم العناصر السامة بواسطة التبخر. تعتمد حركة النفط المنسكب في جوف الأرض على الجاذبية الأرضية وخواص التربة ونوعيتها. وقد يصل النفط إلى المياه الجوفية ويطفو على سطحها ويتجه باتجاهها وتحسب سرعة بقعة النفط بالمعادلة التالية:

$$\text{سرعة بقعة النفط} = \text{سرعة الرياح} \times ٣.٤\% + \text{سرعة الأمواج}$$

فإذا كانت الرياح والأمواج في نفس الاتجاه فإننا نجمع أما إذا كان عكس اتجاه الموج فإننا نطرح. أما إذا كانت سرعة الرياح والأمواج ليست في نفس الاتجاه وتوجد بينهما زاوية فإن سرعة واتجاه بقعة النفط يكون المحصلة بينهما.

ت- المكان الجغرافي للانسكاب وتأثير المناخ: يقل معدل التحلل الحيوي والبكتيري للنفط في المناطق الباردة والقطبية. ولم تؤثر سرعة الرياح بشكل ملحوظ بينما وجد أن عدد البراميل المتسربة لها تأثير سلبي واضح على تلوث التربة.

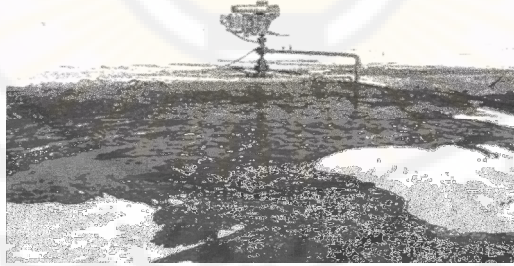
ث- عملية التنظيف: وجد أن استعمال المواد الكيميائية التي تنظف النفط الخام ومنتجاته تضعف من الأحياء الدقيقة في التربة كالبكتيريا والأنزيمات ويحدث تحلل بكتيري.



الشكل (٢٤) تنظيف التلوث النفطي.

٣.٣.٨. تأثير الانسكاب النفطي:

لم تتلوث التربة بمخلفات النفط إلا في النصف الثاني من القرن العشرين. له خطورة انتشار الحرائق أو الانفجار وتختلط نفايات النفط السوداء بالتربة الشاطئية وتهدد كل من يرغب بالاستجمام على رمال هذه الشواطئ أو الاستحمام وقد يؤثر على محطات التحلية عند اختلاط مياه الشرب بالمواد الهيدروكربونية السامة، وان انتقالها إلى غذاء الإنسان يسبب خللاً فيزيولوجياً وسلوكياً وتبلغ قيمة الجرعة النصفية LD₅₀ ٤٣٠٠ ملغ/كغ من وزن الجسم وقد تحسب عادة في الكائنات الحية بتركيز PAH والجرعات المرتفعة تسبب إصابة الإنسان بالأورام السرطانية. ووجد أن بعض الكائنات الحية في التربة تهاجم المواد الهيدروكربونية وتعيش عليها. ان المركبات العطرية أكثر سمية من الأليفاتية كما أن المركبات ذات الوزن الجزيئي المتوسط أكثر سمية من المركبات ذات الوزن الجزيئي الكبير مثل القار، بينما المركبات ذات الوزن الجزيئي الصغير تعتبر غير هامة من ناحية السمية حيث أنها سريعة التطاير.



الشكل (٢٥) تلوث التربة من انسكاب النفط.

وتجري اختبارات ودراسات السمية للملوثات وقد تقدر بواسطة البتروبيرين وهو مركب مسبب للأورام السرطانية. علماً أن النتائج على الملوثات الهيدروكربونية أكثر دقة ولكنها غير واضحة تماماً لمزيج من النفط الخام. وتختلف السمية مع مدى حساسية الكائن الحي وعمره وتبلغ قيمة

الجرعة النصفية الحادة الفائلة $LD50 = 4300$ مغ/كغ من وزن الجسم. وتكون التأثيرات على المدى الطويل مثل أمراض الأورام السرطانية شديدة من التأثيرات الفورية التي قد تسبب الموت. وتظهر أمراض جلدية (التهابات جلدية، وسرطانات جلدية)، وتسجل حالات ولادات لأطفال يعانون من تشوهات خلقية.

وللانسكاب النفطي آثار اقتصادية كبيرة على الموارد الاقتصادية والحيوية من توقف ضخه وإنتاجه والتكاليف الباهظة للمكافحة وتنظيف الشواطئ المتضررة والتي تؤثر على الطيور والزواحف مما يدفعها لهجرة أماكن تلوث التربة.

٩. التلوث بالمعادن الثقيلة:

يُعد تلوث التربة الزراعية بالمعادن الثقيلة من أكثر أنواع التلوث شيوعاً، وبسبب أهمية هذه المعادن وتعدد مصادرها في البيئة سوف نورد لها فصلاً مستقلاً.

الفصل الثالث

تلوث التربة بالمعادن الثقيلة

Soil pollution by heavy metals

١.٣. المقدمة:

لقد حظي تلوث التربة بالمعادن الثقيلة في السنوات الأخيرة بالكثير من الاهتمام، وذلك لأن هذه المعادن ذات تأثير سام في بيئة التربة وأحيائها ووظائفها من جهة وقابليتها للتراكم في الأنسجة الحية النباتية والحيوانية من جهة أخرى. تصل هذه المعادن إلى التربة وتحدث أضراراً في مختلف أنواع الكائنات الحية التي تعيش فيها فهي تؤثر في بنية وتركيب المجتمع الميكروبي للتربة على مستوى كتلته الحيوية وأعداده النوعية أو على مستوى وظائفه الحيوية.

وللمعادن الثقيلة تأثيرات سلبية في البيئة كما تؤثر في صحة الإنسان والحيوان والنبات. ومن المعادن الثقيلة، الكاديوم، والرصاص، والزنك، والزرنيخ، والكوبالت، والنيكل، والكروم، والسلينيوم وهي من أخطر المعادن السامة التي تلوث التربة والماء والهواء. وتمتص النباتات هذه العناصر إذا كانت موجودة في التربة أو الماء، ثم تصل بعد ذلك إلى الإنسان عبر السلسلة الغذائية، لذلك فالمحافظة على التربة من التلوث والتدهور ضرورة حتمية من ضروريات العصر لارتباطها بصحة الإنسان. وتوجد المعادن الثقيلة بصورة طبيعية في النظام البيئي مع اختلافات كبيرة في التركيز لكن ازدياد نسبها مؤخراً يرجع كنتيجة لتطور النشاطات الإنسانية وخاصة في المجال الصناعي حيث أن آلاف الاطنان من هذه المعادن الناتجة عن النشاطات البشرية تُطرح سنوياً في الوسط مؤديةً إلى تلوثه.

وتُعد بعض المعادن الثقيلة أساسية للنمو الطبيعي لكل من النباتات والحيوانات والإنسان، ففي مجال التغذية النباتية تُدعى هذه المعادن بالعناصر الصغرى micronutrients مثل النحاس Cu، والزنك Zn، والمنغنيز Mn، والمولبيدينيوم Mo. كما تعتبر عناصر أخرى مثل الزرنيخ As والكوبالت Co والكروم Cr والنيكل Ni والسلينيوم Se والفاناديوم V أساسية للتغذية الحيوانية، كما تُعتبر هذه العناصر باستثناء عنصر الزرنيخ As والفاناديوم V أساسية في التغذية البشرية. وبالرغم من كل المحاولات للوقوف على تعريف واحد ومحدد للمعادن الثقيلة heavy metals، ولكن لسوء الحظ لم يتم إيجاد صيغة محددة لتعريف المعدن الثقيل. فبعض التعاريف يعتمد على

كثافة المعدن أو وزنه الذري أو على بعض خصائصه الكيميائية ومستوى سميته، في حين يعتمد البعض الآخر على ترتيبه وتوضعه في الجدول الدوري للعناصر. ويشير التعريف الشائع للمعادن الثقيلة إلى تلك العناصر التي تزيد كثافتها عن خمس أضعاف كثافة الماء. بينما يشير التعريف الأكثر شمولية إلى ذلك المعدن أو شبه المعدن الذي تزيد كثافته عن ٥ غ/سم^٣ ووزنه الجزيئي أكبر من الوزن الجزيئي لعنصر الصوديوم (٢٣ غرام) وعدده الذري مرتفع (أكبر من ٢٠) ويقع بين العمود الثالث والسادس عشر من الجدول الدوري ويشغل الصف الرابع (أي من المجموعة VIIA إلى نهاية المجموعة IIA)، ويسبب وجوده تلوثاً وسميةً للأنظمة البيئية الحيوية وتتطلبه الكائنات الحية النباتية والحيوانية بتركيزات منخفضة.

وقد يُشار إلى المعادن الثقيلة ويُستعاض عنها بإسم "المعادن ذات الأثر" Trace metals وبشكل خاص في مجال الكيمياء الجيولوجية لتعبّر عن تلك العناصر الكيميائية التي توجد في القشرة الأرضية بتركيزات أقل من ١٠٠٠ جزء بالمليون.

٢.٣. مصادر المعادن الثقيلة في التربة:

يوجد بشكل عام مصدران رئيسيان لدخول المعادن الثقيلة إلى التربة وهما: مصدر طبيعي natural وآخر بشري anthropogenic (الناتج عن نشاط الإنسان). وتمثل الصخور الأم parent rocks والفلزات المعدنية metallic minerals (أو خامات الفلز ores) المصادر الطبيعية الأساسية للمعادن في البيئة ويبين الجدول (٣) أهم أنواع الصخور وتركيزات المعادن الثقيلة التي يمكن أن تحتويها. بالإضافة إلى ذلك، قد تنتج المعادن الثقيلة من مصادر طبيعية أخرى كالانبعاثات البركانية.

الجدول (٣) أنواع الصخور وتركيز بعض المعادن الثقيلة فيها.

تركيز المعدن الثقيل ppm (جزء بالمليون)								نوع الصخر
Zn	Cd	Hg	Pb	Cr	Co	Ni	As	
								Magmatic rocks (الصخور الإندفاعية)
								Ultramafic rocks pyroxenites, peridotites, dunites
								Mafic rocks gabbros, basalts
								Intermediate rocks syenites, diorites
								Acid rocks gneisses, granites
								Acid rocks (volcanic) dacites, trachytes, rhyolites
								Sedimentary Rocks (الصخور الرسوبية)
								Argillaceous sediments
								Shales
								Sandstones
								dolomites, Limestones

الجدول (٤) المصادر البشرية (النشاطات الإنسانية) anthropogenic لتلوث التربة.

المعدن الثقيل	مصادر التلوث
الكاديوم (Cd)	صناعة الأصبغة، صناعة السبائك والخلائط المعدنية، صناعة البطاريات، استخراج المعدن من مناجمه، الصناعات التعدينية (عمليات صهر وإذابة المعدن)، احتراق الوقود (فحم-بترو)، الأسمدة الكيميائية (الأسمدة الفسفورية).
الزنك (Zn)	عمليات استخراج الزنك من مناجمه وصهره وإذابته، عمليات الطلاء والغلفنة، صناعة الأوراق والطباعة، احتراق الوقود (فحم-بترو)، صناعة السبائك، صناعة الأسمدة الزراعية.
الرصاص (Pb)	صناعة البطاريات، صناعة مواسير المياه والكابلات، صناعة الدهانات والمبيدات الحشرية، احتراق الوقود (فحم-بترو)، انبعاثات عوادم السيارات.
الزئبق (Hg)	عمليات استخراج المعدن من مناجمه وصهره وإذابته، عمليات تكرير وتنقية الذهب والنحاس، صناعة عجائن الورق، صناعة المصابيح الكهربائية وموازين الحرارة، صناعة بعض مستحضرات التجميل.
النيكل (Ni)	صناعة البطاريات، صناعة الحديد والفولاذ، الصناعات الالكترونية، الأسمدة الكيميائية.
الكروم (Cr)	صناعة الدهانات، صناعة الأصبغة وأعمال الدباغة، معالجة الأخشاب، احتراق الوقود (فحم-بترو)، بعض الأسمدة الكيميائية.
الكوبالت (Co)	صناعة السبائك والخلائط المعدنية، الصناعات الكهربائية والالكترونية، صناعة بعض انواع الفولاذ غير القابل للصدأ، أعمال الطلاء الكهربائية، صناعة الأصبغة والحبر، صناعة الأسمدة الكيميائية، الصناعات الدوائية (فيتامين B12).
الزرنيخ (As)	صناعة السبائك، معالجة الزجاج والأصباغ والمنسوجات والورق ولواصق المعادن، صناعة المواد الحافظة للأخشاب، عملية دباغة الجلود، صناعة بعض المبيدات الحشرية وبعض المستحضرات الطبية.

الجدول (٥) محتوى المصادر الزراعية (الحماة، الأسمدة الفسفورية، الأسمدة الآزوتية، الأسمدة الحيوانية، المبيدات) من بالمعادن الثقيلة.

المبيدات (%)	الأسمدة الحيوانية (جزء بالمليون)	الأسمدة الآزوتية (جزء بالمليون)	الأسمدة الفسفورية (جزء بالمليون)	الحماة (جزء بالمليون)	المعدن الثقيل
-	0.8-0.3	8.5-0.05	170-7	1500-2	الكاديوم (Cd)
-	24-0.3	12-5	12-1	260-2	الزنك (Zn)
-	55-5.2	19-3	245-66	600-20	الرصاص (Pb)
42-0.8	0.2-0.09	3-0.3	1.2-0.01	55-0.1	الزئبق (Hg)
-	30-7.8	38-7	38-7	5300-16	النيكل (Ni)
60	15-6.6	1450-2	225-7	3000-50	الكروم (Cr)
25-1.3	250-15	42-1	1450-50	1000-49	الكوبالت (Co)
60-22	25-3	120-2	1200-2	26-2	الزرنيخ (As)

(-): لا يوجد معطيات.

في حين تتعدد المصادر البشرية للمعادن الثقيلة بين المصادر الناتجة عن النشاطات الزراعية مثل التسميد واستخدام المبيدات وري الأراضي الزراعية بمياه الصرف الصحي واستخدام الحمأة، والناتجة عن النشاطات الصناعية كعمليات التعدين (صهر وصناعة المعادن) واستخراج المعادن من المناجم، وصناعة البطاريات، والصناعة الالكترونية الدقيقة، بالإضافة إلى طرح النفايات والفضلات المنزلية والصناعية في الترب الزراعية. ويبين الجدول (٤) المصادر البشرية لأهم المعادن الثقيلة.

يسبب استخدام الأسمدة الفسفورية المصنعة من بعض الصخور الفسفورية تلوث التربة بعنصر الكاديوم بسبب إحتواء تلك الأسمدة على نسبة لا بأس بها من هذا العنصر. بينما يأتي غالباً تلوث الترب بالنحاس والزنك من خلال إضافات الأسمدة الحيوانية، بينما يعود التلوث بالكروم لإضافة الفضلات الصناعية أو الري بمياه الصرف الصحي الصناعي، أما النيكل فيصل إلى التربة عن طريق إضافة الأسمدة الكيميائية. كما أصبح استخدام الحمأة في التسميد يشكل مصدراً ثانوياً لتلوث الترب الزراعية بالمعادن الثقيلة، وخاصةً بعد التوقف عن رميها بالمحيطات، فقد أصبحت بذلك تلعب دوراً كبيراً في زيادة محتوى التربة الزراعية من تلك المعادن وخاصةً الكاديوم والنيكل والزنك. ويوضح الجدول (٥) أهم المصادر الزراعية لتلوث التربة ومحتواها من المعادن الثقيلة.

وتمثل الترسيبات الجوية atmospheric depositions مصدراً آخر لتلوث الترب الزراعية بالمعادن الثقيلة وخاصةً في الدول الصناعية الكبرى مثل أوروبا الغربية وأمريكا الشمالية. ففي إنكلترا على سبيل المثال يشكل كل من النحاس والزنك والناتج عن الترسيبات الجوية ما نسبته حوالي ٣٣% و ٩٣% من المدخلات الكلية للتربة من هذين العنصرين على التوالي. وتستقبل الترب الزراعية انطلافاً من الترسيبات الجوية ما يقارب ٤٠% من النيكل والزنك وأكثر من ٥٠% من الكاديوم والزرنيخ والرصاص بالنسبة إلى المحتوى الكلي للتربة من هذه العناصر. ويُعتبر الترسيب الجوي مصدراً يتجاوز في تأثيره حدود الأنظمة البيئية، فبعض المعادن مثل السيليونيوم والزرنيخ والزنك يمكن أن تنتقل إلى مسافات طويلة على صورة غازية أو عن طريق انتقال حبيبات التربة الناعمة الغنية بها.

ويوضح الجدول (٦) تراكيز بعض العناصر الثقيلة الناتجة عن الترسيبات الجوية atmospheric depositions في أربعة أنظمة بيئية مختلفة (مقدرة بالغرام/هكتار/سنة).

الجدول (٦) تراكيز العناصر الثقيلة الناتجة عن الترسبات الجوية atmospheric depositions في أنظمة بيئية مختلفة (مقدرة بالغرام/هكتار/سنة).

المعدن	أراضي زراعية (Agricultural lands)	غابات صنوبر (Pine forests)	غابات تنوب (Spruce forests)	غابات أشجار متساقطة الأوراق (Deciduous forests)
الكاديوم (Cd)	٥	٤.٥	٢	٢١
الزنك (Zn)	—	٥.٦	—	—
الرصاص (Pb)	—	—	٥.٥	—
الزئبق (Hg)	—	—	—	—
النيكل (Ni)	—	٣٤	—	—
الكروم (Cr)	٢٦٠	١١٠	١٥٠	٢٨٦
الكوبالت (Co)	٢٥٠	٢١٠	١٨٠	٥٣٨
الزرنيخ (As)	—	—	—	—

(-): لا يوجد معطيات.

كما وينتج عن احتراق الوقود (فحم، بترول) عدد كبير من العناصر الثقيلة مثل الرصاص والكاديوم والكروم والزنك والسيلينيوم وغيرها. ويُعد احتراق وقود السيارات الذي يحتوي على إضافات من الرصاص من أهم مصادر تلوث التربة بهذا المعدن.

في الوقت الذي يلعب فيه النظام الأرضي terrestrial system دور المستقبل الرئيسي للمعادن الثقيلة، يُظهر النظام المائي aquatic system المتمثل بالمياه الجوفية أو السطحية تلوثاً واضحاً بتلك المعادن. فالمعادن التي توجد بأشكال أنيونية مثل الأرسينات AsO_4^{3-} ، الأرسينيت AsO_3^{3-} ، السيلينات SeO_4^{2-} ، الكرومات CrO_4^{2-} يمكن أن تصل إلى المياه الجوفية أو قد تنتقل جانبياً إلى أقرب سطح مائي. وتشكل الرسوبيات sediments المستودع الرئيسي للمعادن في النظام المائي، ولكن يبقى هذا النظام بعيداً عن الاهتمام لعدم وصول مستوى التلوث فيه لدرجة الخطورة بسبب السعة التنظيمية العالية لمياه البحر ونوعاً ما للمياه الجوفية.

٣.٣ العمليات الجيو- كيميائية لاحتفاظ التربة بالمعادن الثقيلة:

تشكل التربة في الأنظمة البيئية الأرضية terrestrial systems المخزن الرئيسي للكثير من المعادن الثقيلة، بينما في الأنظمة المائية aquatic systems تعمل الرواسب كمخزن نهائي لتلك المعادن. ومن المهم جداً أن نفهم آلية العمليات الجيو- كيميائية geochemical التي تحدث في التربة وتتحكم بكل من تغيرات ومصير تلك العناصر الكيميائية. والأكثر أهمية في ذلك هو تقويم الجاهزية الحيوية لتلك المعادن وقدرتها على الحركة على أسس كمية. وتُعتبر غالباً المعادن الثقيلة مديدة البقاء في التربة ويمثل جزؤها المتيسر حيوياً المكون الأكثر ارتباطاً بعملية الانحماض الطبيعي للمعدن الثقيل. وهنا لا بدّ من البحث في أهم العمليات الجيو- كيميائية التي تساهم في احتفاظ التربة بالمعادن الثقيلة. وتشمل تلك العمليات كل من الإدمصاص وتشكيل المعقدات والترسيب.

الإدمصاص Adsorption:

يمكن تعريف الإدمصاص عموماً بأنه ارتباط العنصر الكيميائي على السطح الفاصل بين المحلول المائي ومعقد الإدمصاص الصلب. ويمكن أن تشمل هذه العملية كل من التبادل الأيوني، وتشكيل معقدات السطوح الصلبة، والترسيب، والانتشار ضمن الأجسام الصلبة. وكلما انخفض تركيز المعدن في محلول التربة وازداد عدد المواقع المتاحة للإدمصاص على سطوح المكونات الصلبة للتربة كلما أصبح الإدمصاص بشكله النوعي وغير النوعي أكثر فاعلية في التحكم بتركيز محلول التربة.

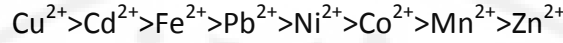
ويحدد كل من خواص التربة وتركيب محلولها الأرضي التركيز التوازني للمعادن بين طوري التربة الصلب والسائل، ويتأثر تركيز المعادن في محلول التربة بشكل كبير بتغيرات درجة حموضة الوسط وبطبيعة كل من المركبات العضوية والمعدنية الموجودة في التربة. فعلى سبيل المثال يُعزى انخفاض نشاط الأيون المعدني الحر في محلول التربة عند pH أعلى من 6 إلى زيادة شحنة سطوح أكاسيد الحديد والألمنيوم والمنغنيز، أو إلى ميول المعدن لتتشكيل الشيلات مع بعض مكونات المادة العضوية أو إلى ترسيب هذه الأيونات على هيئة هيدروكسيدات المعدن. يؤثر وجود الأنيونات المعدنية في محلول التربة في عملية ادمصاص المعادن الثقيلة ويظهر هذا التأثير من خلال العمليات التالية:

١. تعمل الأنيونات المعدنية على تشكيل معقدات مع المعادن، مما يقود ذلك إلى انخفاض ادمصاص تلك المعادن على سطوح حبيبات التربة.
٢. يزيد ادمصاص النوعي لأنيونات الأربطة ligand الشحنة السالبة على سطوح حبيبات التربة، مؤدياً ذلك إلى زيادة ادمصاص كاتيونات المعدن.
٣. وقد تتنافس بقوة الأنيونات المدمصة بشكل نوعي (مثل الفسفات H_2PO_4^-) مع أنيونات المعدن مثل الأرسينات AsO_4^{3-} أو السيلينات SeO_4^{2-} مما يؤدي إلى إزاحتها عن سطوح ادمصاص.

تشكيل المعقدات: Complexation

تشكل المعادن الثقيلة معقدات عضوية وغير عضوية مع مجموعة مختلفة من العناصر الذائبة في التربة. فعلى سبيل المثال، يشكّل الكلور معقداً ذائباً مع الكاديوم Cd^{2+} على هيئة CdCl^+ الأمر الذي يقود إلى انخفاض ادمصاص Cd^{2+} على سطوح حبيبات التربة. كما ترتبط عملية ادمصاص بشكل كبير بوجود المادة العضوية في التربة، فقد تبين أنّ القسم الأكبر من الكاديوم الذائب في محلول التربة يشكل غالباً معقدات مع المادة العضوية، وعلى العكس من أيونات الأربطة المعدنية يمكن أن يتعزز ادمصاص Cd^{2+} على فلز الكاؤولينيت kaolinite بوجود المادة العضوية في التربة وذلك عبر تشكيل طبقة عضوية ادمصاصية على سطح الفلز. وتبدي المادة العضوية في التربة ميلاً كبيراً نحو كاتيونات المعدن بسبب احتوائها على مجموعات وظيفية مثل الكربوكسيل والفينوليك وألكوهوليك والكربونيل بِمَكْنُهَا أن تكون شيلات مع المعدن. وتتفكك بدورها وتتفصل هذه المجموعات الوظيفية مع ارتفاع pH الوسط مما يزيد من ميول

أيونات الرباط نحو كاتيونات المعدن. ويظهر الترتيب العام لميول المعدن لتشكيل معقدات مع مكونات المادة العضوية على الشكل التالي:



وتتعلق طبيعة تفاعلات المعادن في التربة بمجموعة من العوامل مثل درجة حموضة محلول التربة وقوته الأيونية، وأشكال وجود المعدن في الوسط، ونوع الكاتيون السائد، ونوع الأربطة العضوية والمعدنية الموجودة في محلول التربة. ومن ناحية أخرى، يمكن أن تسود في محلول التربة وبالتحديد في منطقة المحيط الجذري عملية تشكيل المعقدات المائية لبعض المعادن مثل الكاديوم مع الحموض العضوية ذات الوزن الجزيئي المنخفض التي تنتج عن المفزرات الجذرية للنباتات.

الترسيب Precipitation:

تُعتبر عملية الترسيب العملية الرئيسية المسؤولة عن تثبيت المعادن في الترب القلوية وذلك بوجود أيونات مثل السلفات SO_4^{2-} أو الكربونات CO_3^{2-} أو الهيدروكسيد OH^- أو الفسفات H_2PO_4^- ، وخاصةً عندما يكون تركيز المعدن في الوسط مرتفعاً. إذ يمثل ترسيب المعادن على صورة فسفات المعدن إحدى آليات تثبيت المعادن الثقيلة في التربة، ولا سيما في الأوساط التي تحتوي على تراكيز عالية من هذه المعادن. ويُجد كذلك أنه يمكن للكروم والزرنيخ أن تكون أشكالاً مترسبة مع الكالسيوم الذائب Ca^{2+} تحت الظروف الطبيعية من pH التربة.

كما يشجع إضافة الكلس للتربة احتفاظها بالعناصر الثقيلة، فقد تبين ازدياد احتفاظ التربة بكل من الكروم الثلاثي Cr^{3+} والكاديوم والرصاص مع إضافة الكلس الذي يسبب ارتفاعاً في pH التربة. وبيّنت الدراسات أن مجال pH التربة المعاملة بالكلس الذي يتراوح بين 7-8 يوافق مجال الترسيب الفعال لبعض المعادن الثقيلة على هيئة هيدروكسيدات المعدن مثل الكروم الثلاثي الذي يترسب على هيئة هيدروكسيد الكروم $\text{Cr}(\text{OH})_3$. ويعمل أيضاً ارتفاع pH التربة المعاملة بالكلس على زيادة الشحنة السالبة للترب التي تتصف بشحنتها المتغيرة مما يشجع عملية ادمصاص المعادن.

٤.٣. الجاهزية النباتية للمعادن الثقيلة في التربة:

يُعتبر العنصر متاحاً للنباتات عندما يكون قادراً على الحركة في التربة كما يجب أن يدخل في تماس مع جذور النبات ليتم امتصاصه من قبلها. يشير تيسر المعادن الثقيلة للامتصاص من قبل النباتات أو ما يُدعى بالجاهزية النباتية *Phytoavailability* إلى كمية المعدن الكلية الممتصة من قبل النباتات. وتمتص النباتات بشكل طبيعي أقل بكثير من ١% من كمية المعدن الموجودة في التربة، وهذا لا يشير حتماً إلى مدى وجود المعدن بشكل متيسر للنباتات في الوسط ولا يشير كذلك إلى المدة الزمنية لهذه الجاهزية. لذلك، يجب أن يُؤخذ بعين الاعتبار عند تحديد الجاهزية الحيوية للمعدن ليس فقط كمية العنصر الممتصة خلال موسم نمو واحد بل أيضاً كميته الكلية المتاحة بشكل كامن في التربة.

وتُعتبر أشكال المعدن الذائبة في محلول التربة هي أكثر الأشكال الكيميائية تيسراً للنبات، يليها الأشكال القابلة للتبادل ثم الأشكال التي تدخل في تكوين المعقدات. أظهرت بعض الدراسات أن بعض المعقدات كالمركبات المخيلية للمعدن مثل EDTA أو DTPA يمكن أن تساعد في عملية استخلاص المعادن من قبل النباتات، ولُوحظ كذلك أن بعض الأربطة المعدنية قد تسهل عملية امتصاص المعادن من الوسط. فعلى سبيل المثال معقدات معدن الكاديوم مع الكلور $Cd-Cl$ تبدي تراكماً حيوياً كبيراً في بعض النباتات بسبب سهولة امتصاصها من التربة. لذلك يمكن أن تُستخدم الأيونات الحرة أو الأيونات الموجودة على شكل معقدات للدلالة على الجاهزية الحيوية للمعادن بشكل أفضل مما يدل عليه التركيز الكلي لهذه المعادن في محلول التربة. من ناحية أخرى، يُعتبر قياس أو تحديد التركيز السام للمعادن الثقيلة وتأثيراتها في النباتات معقداً للغاية لأنه يعتمد على العديد من العوامل التي يصعب قياسها، ومن أهمها نسبة الأيونات المرتبطة الموجودة في محلول التربة أو في مركباتها.

ونتيجة الاستخدام المكثف والمتزايد لمصادر تلوث التربة الزراعية، يصل تراكيز المعادن الثقيلة في التربة لمستويات عالية تعتبر سامة للنباتات وأحياء التربة على حد سواء. يبين الجدول (٧) الحدود القصوى المسموح بها من بعض المعادن الثقيلة في الترب الزراعية في دول مختلفة من العالم.

الجدول (٧) التراكيز القصوى المسموح بها للمعادن الثقيلة في الترب الزراعية (جزء بالمليون).

المعدن الثقيل	استرالية	الإتحاد الأوروبي	الولايات المتحدة الامريكية
Cd	٥	٣-١	٢٠
Co	٥٠	-	-
Cr	١٠٠	١٥٠-٥٠	١٥٠٠
Hg	٥	١.٥-١	٨
Ni	١٠٠	٧٥-٣٠	٢١٠
Pb	١٠٠	٣٠٠-٥٠	١٥٠
Zn	٣٠٠	٣٠٠-١٥٠	١٤٠٠
As	٥٠	-	-

(-): لا يوجد معطيات.

وتُعتبر النباتات بشكل عام أكثر مقاومةً لزيادة تركيز العنصر في وسط النمو من انخفاض تركيزه، وتُظهر بعض النباتات تحملاً كبيراً للتراكمات العالية من العناصر الثقيلة كما هو الحال في النباتات المُجمّعة للمعادن Hyperaccumulators. ويتجلى التأثير السام للمعادن الثقيلة في النباتات على عدة أشكال تختلف ونوع المعدن الثقيل ولكنها تجتمع في تأثيرها في كمية الإنتاج، ويوضح الجدول (٨) التراكيز الحرجة لبعض المعدن الثقيلة في الأنسجة النباتية.

المعدن الثقيل	التركيز ppm (جزء بالمليون وزن جاف)
---------------	---------------------------------------

الجدول (٨)
التركيز الحرجة لبعض
المعادن الثقيلة في
النسيج النباتي.

النباتات الحساسة	عند انخفاض ١٠ % من الإنتاج	
Cd	١٠ - ٥	٢٠ - ١٠
Co	٢٠ - ١٠	٤٠ - ٢٠
Cr	٢ - ١	١٠ - ١
Hg	١ - ٠.٥	٨ - ١
Ni	٣٠ - ٢٠	٣٠ - ١٠
Zn	٢٠٠ - ١٥٠	٥٠٠ - ١٠٠
As	-	٢٠ - ١

٥.٣. سلوك المعادن الثقيلة في الترب الملوثة:

١.٥.٣. الكاديوم Cd (Cadmium):

الكاديوم في التربة:

تزايد الاهتمام البيئي بعنصر الكاديوم في الآونة الأخيرة لكونه يمثل أكثر المعادن الثقيلة سمية في البيئة، حيث تظهر تأثيراته السلبية الشديدة على كل من النشاط الحيوي للتربة والعمليات الاستقلابية للنبات بالإضافة إلى خطورته على صحة الإنسان والحيوان. لا يتجاوز تركيز الكاديوم في كل من الصخور الإندفاعية والرسوبية حوالي ٠.٥ جزء بالمليون (الجدول ٣).

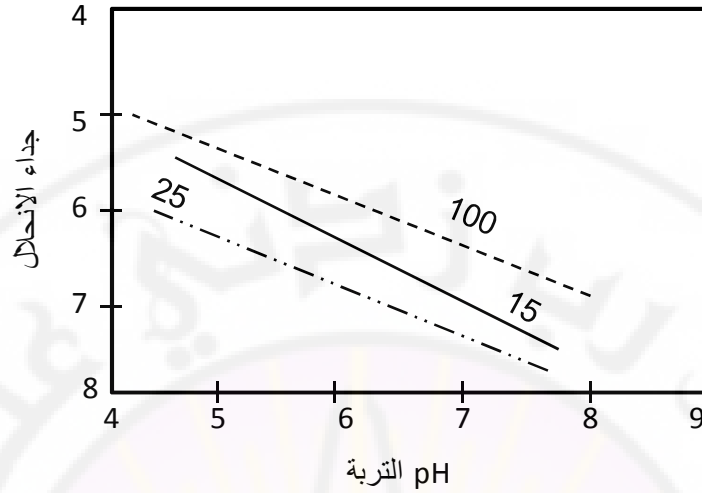
وغالباً ما يترافق هذا المعدن بقوة في تركيبه الجيو-كيميائي مع الزنك Zn ولكن يتفوق عليه في ميوله نحو الكبريت وفي قدرته على الحركة في الأوساط الحامضية. وبالرغم من وجود الكاديوم في الغالب على صورة Cd^{2+} إلا أنه قد يشكل أيضاً عدة معقدات معدنية مثل $CdOH^+$ ، $CdCl^+$ ، $CdHCO_3^+$ ، $CdCl_3^-$ ، $CdCl_4^{2-}$ ، $Cd(OH)_3^-$ ، $Cd(OH)_4^{2-}$ وشيلات عضوية. ويُعد الكاديوم الثنائي Cd^{2+} أكثر الأشكال أهمية في البيئة. وتحت ظروف الأكسدة الشديدة، يمكن للكاديوم أن يشكل فلزات مثل أكسيد الكاديوم CdO وكربونات الكاديوم $CdCO_3$.

ومن ناحية أخرى، يمثل التركيب الكيميائي للصخر الأم العامل الأساسي الذي يحدد كمية الكاديوم في التربة، حيث يتراوح متوسط محتوى الترب من الكاديوم بين ٠.٠٦ و ١.١ جزء بالمليون. ويبلغ متوسط تركيز الكاديوم في الترب السطحية على نطاق واسع حول العالم حوالي ٠.٥٣ جزء بالمليون، وتعكس هذه القيمة العالية بشكل واضح تأثير دور الإنسان من خلال نشاطاته المختلفة في زيادة تركيز الكاديوم في التربة.

وبالرغم من أن كمية الطين ليست هي العامل الرئيسي الذي يحدد انتشار الكاديوم في التربة، إلا أنها تساهم بنسبة ١٠ % من أشكال وجود الكاديوم في التربة، وبينت كذلك بعض الدراسات وجود علاقة قوية تربط بين محتوى التربة من الكاديوم وكمية أكاسيد الحديد والمنغنيز، ونقل أهمية هذه العلاقة مع انخفاض قيمة pH التربة دون ٥.٥.

سلوك الكاديوم في التربة:

يتحرك الكاديوم بسهولة في محلول التربة، ويُعتبر كل من pH الوسط وكمون الأكسدة أكثر أهم العوامل التي تتحكم بقدرته على الحركة في التربة. ويمثل الادمصاص العملية الأساسية المسؤولة عن ارتباط الكاديوم في التربة، وتتحكم بشكل أكبر من عملية الترسيب بتركيز الكاديوم في محلول التربة ضمن مجال محددة من pH الوسط. ويعتمد إلى حد بعيد ذوبان الكاديوم في التربة على درجة pH الوسط، إذ يشير الشكل ٢٦ الذي يربط بين تغير pH التربة وقدرة الكاديوم على الذوبان إلى صعوبة إنتقال الكاديوم المدمص نحو محلول التربة عند pH تزيد عن ٧.٥. لذلك يمكن أن يتحكم ذوبان كربونات الكاديوم $CdCO_3$ أو فسفات الكاديوم $Cd_3(PO_4)_2$ بقدرته الكاديوم على الحركة في التربة من خلال تأثير هذه المركبات في pH التربة.



الشكل (٢٦) ذوبان الكاديوم Cd^{2+} تبعاً لدرجة حموضة التربة من أجل ثلاثة تراكيز مختلفة (١٠٠، ٢٥، ١٥ ميكروغرام)

ويُعد الكاديوم بشكلٍ عام أكثر قدرة على الحركة في ظروف الترب الحامضية وضمن مجال يتراوح بين ٤ و ٥.٥، ويقع مجال الحموضة الحرج بين ٤-٤.٥ وعندها يؤدي الانخفاض في pH بمقدار ٠.٢ وحدة إلى زيادة في تركيز الكاديوم في محلول التربة بمقدار ٣-٥ أضعاف، بينما في الترب القلوية يكون الكاديوم بالأحرى غير قابل للحركة. ويمكن أن يترافق ارتفاع الـ pH في المجال القلوي، مع وجود الكاديوم على صورة $CdOH^+$ التي لا تشغل بسهولة مواقع على معقدات التبادل الكاتيوني الأمر الذي يُخفّض من معدل ادمصاص الكاديوم. ومن المحتمل أن يعود انخفاض معدل الادمصاص مع زيادة قلوية التربة إلى التنافس الذي يلاقيه الكاديوم مع أيونات الكالسيوم Ca^{2+} والمغنيزيوم Mg^{2+} على مواقع الادمصاص. وتحديث عملية ادمصاص الكاديوم في التربة بسرعة كبيرة، حيث وُجد أن حوالي ٩٥ % من الكاديوم يدمص خلال العشرة دقائق الأولى من بدء عملية الادمصاص التي تستغرق ساعة واحدة للوصول إلى حالة التوازن الكيميائي. ومن جهة أخرى، يؤدي إضافة الفسفات للتربة إلى تثبيت الكاديوم مما يؤدي إلى انخفاض قدرته على الحركة بشكل واضح.

تلوث التربة بالكاديوم:

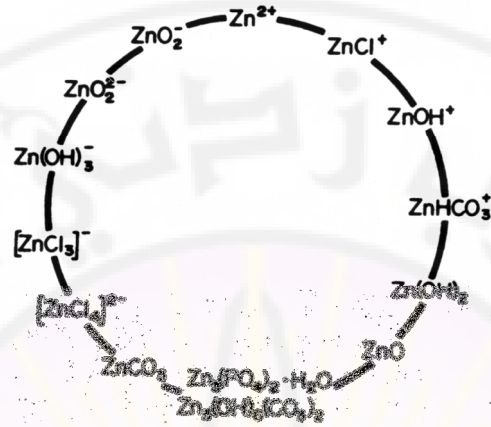
يُعتبر تركيز الكاديوم في محلول التربة منخفضاً نسبياً، فهو يتراوح بين ٠.٢ و ٦ ميكروغرام/ليتر ($\mu\text{g/L}$)، ويزداد هذا التركيز ليصل إلى ٣٠٠ أو ٤٠٠ ميكروغرام/ليتر في الترب الملوثة. ويُعتقد أن تلوث التربة بالكاديوم يُعد من أخطر أشكال تلوث التربة بالمعادن الثقيلة. في الظروف الناتجة عن تدخل الإنسان يمكن أن يزداد تركيز الكاديوم في الطبقات العليا للتربة، ولكن قد تكون التراكيز العالية من الكاديوم في الترب ناتجة أصلاً عن مصدر طبيعي للمعدن فقد وُجد أنَّ الترب الطميية alluvial soils التي نشأت من الكوارتز وبعض الأنديزين andesine تحتوي على تراكيز عالية من الكاديوم تصل إلى ٢٢٢ جزء بالمليون. كما وُجد كذلك أنَّ بعض الترب الملوثة بالكاديوم قد نشأت من الصخور الكلسية limestone التي يتراوح محتواها من الكاديوم بين ٠.٠٢ و ٨.١٥ جزء بالمليون. ويُعتبر إضافة مياه الصرف الصحي والحماة أو الأسمدة الفسفورية للتربة مصادر هامة للتلوث بالكاديوم حيث لوحظ تراكم لهذا المعدن في الترب نتيجة الإضافات المستمرة للحماة. وتبلغ الجرعة المسموح بها للكاديوم في التربة جراء الإضافات المختلفة ٢٢ كغ/هكتار ويمكن الوصول إلى هذا المستوى خلال فترات زمنية متباعدة بعد إضافة مياه الصرف الصحي وهذا يتعلق ببعض خواص التربة ومن أهمها معامل الادمصاص.

٢.٥.٣. الزنك (Zinc) Zn:

الزنك في التربة:

يميل الزنك للانتشار بشكل متماثل في الصخور الإندفاعية، ويتراوح تركيزه في الصخور الحامضية بين ٤٠ و ٦٠ جزء بالمليون، بينما تركيز الزنك في الرواسب الطينية والشيل مرتفع ويتراوح بين ٨٠ و ١٢٠ جزء بالمليون، ويتراوح التركيز في الصخور الرملية بين ١٠ و ٣٠ جزء بالمليون (الجدول ٣). يوجد الزنك في التربة بصورة رئيسية على شكل سلفيد الزنك ZnS . ينتج عن ذوبان فلزات الزنك خلال عملية التجوية أيونات الزنك Zn^{2+} القادرة على الحركة وبشكل خاص في الأوساط الحامضية والأوساط المؤكسدة. يتراوح متوسط محتوى التربة الكلي من الزنك في الطبقة السطحية للتربة في العديد من دول العالم بين ١٧ و ١٢٥ جزء بالمليون. ويتراوح تركيز الزنك في محلول التربة بين ٤ و ٢٧٠ ميكروغرام/ليتر تبعاً لنوع التربة ونوع التقنيات

المستخدمة لاستخلاص محلول التربة. ويبين الشكل (٢٧) الأشكال الأيونية ومركبات الزنك الموجودة في التربة.



الشكل (٢٧) الأشكال الأيونية ومركبات الزنك الموجودة في التربة

سلوك الزنك في التربة:

من المعتقد أن أكثر أشكال الزنك مصادفةً وقابليةً للحركة في التربة هي الأيونات الذائبة في محلول التربة والأيونات الداخلة في تشكيل المعقدات المعدنية، بالإضافة إلى الأشكال المدمصة التي يمكن أن تصبح متحركة عند توفر الظروف المناسبة. ومقارنةً مع المعادن الثقيلة الأخرى يُعتبر الزنك قابلاً للذوبان بسهولة، وتُعدّ فلزات الطين والأكاسيد المائية و pH التربة أكثر العوامل أهمية في التحكم بقدرة الزنك على الذوبان في الترب، بينما المعقدات العضوية وترسب الزنك على هيئة هيدروكسيدات وكربونات هي أقل أهمية بكثير.

ويُعدّ الزنك سهل الامتصاص من قبل فلزات التربة والمركبات العضوية ولهذا يلاحظ تراكمه في الآفاق العليا لمعظم الترب. ويوجد بشكل عام آليتان مختلفتان لإدمصاص الزنك في التربة هما: آلية توجد في الوسط الحامضي وتتعلق بمواقع التبادل الكاتيوني والآلية الثانية تحدث في الوسط القلوي وتُعتبر عملية ادمصاص كيميائي وتتأثر بشكل كبير بالأربطة العضوية الموجودة في التربة. وترتبط عملية ادمصاص الزنك Zn^{2+} في التربة بدرجة الحموضة، إذ يمكن أن ينخفض الامتصاص عند pH أقل من ٧ وذلك بسبب تأثير الكاتيونات التنافسية وهذا يؤدي إلى سهولة حركة الزنك وبالتالي غسله من التربة وخاصةً ذات الحموضة الخفيفة، وعند قيم مرتفعة من pH يؤثر تشكيل المعقدات العضوية للزنك في قدرته على الذوبان في التربة. ويدمّص الزنك اختياريًا

على أكاسيد الحديد وفلز الهالوزيت والألوفان والإموجوليت، بينما يقل ادمصاصه على فلز المونتموريونيت.

من ناحية أخرى، تتميز المادة العضوية للتربة بقدرتها على ربط الزنك بأشكال ثابتة، لذلك لوحظ تراكم للزنك في الأفاق العضوية للتربة. ويرتبط الزنك في الترب بشكل أساسي مع فلزات الطين ونسبة تتراوح بين ٢٤ و ٦٣% من كمية الزنك الكلية في التربة، ومع أكاسيد الحديد والالمنيوم المائية بنسبة ١٤-٣٨%)، بينما أشكال القابلة للحركة بسهولة ومعقداته العضوية فهي تشكل نسبة ١-٢٠% و ١.٥-٢.٣% على التوالي. وبينت بعض الدراسات أن جزء الطين يتحكم بحوالي ٦٠% من توزيع كمية الزنك في التربة، كما بينت أن إضافة الحمأة للتربة يغير من توزيع نسب أشكال الزنك حيث تزداد كمية الزنك القابل للذوبان بسهولة والزنك القابل للتبادل.

تلوث التربة بالزنك:

يصل تركيز الزنك في محلول الترب غير الملوثة وشديدة الحموضة ($pH < 4$) إلى حوالي ٧ مغ/ليتر. بينما يصل تركيزه الأعظمي في محلول الترب شديدة التلوث إلى ١٧ مغ/ليتر. وفي الترب شديدة التلوث بالزنك لوحظ تشكل فلز بيرومورفيت الزنك $Zn_5(PO_4)_3OH$ وبشكل أساسي عند سطوح جذور الأعشاب مما يفترض تأثير منطقة المحيط الجذري في هذه عملية تشكيل هذا الفلز. وتعمل إضافة الحمأة الغنية بالزنك إلى التربة على زيادة أشكال الزنك القابلة للإفادة بسهولة من ٣ إلى ٢١% وزيادة في أشكال الزنك القابلة للتبادل من ٢١ إلى ٣٤% من كمية الزنك الكلية.

٣.٥.٣. الرصاص (Pb):

الرصاص في التربة:

يُعتبر معدن الرصاص Pb أحد أهم المعادن الثقيلة التي أنتجها الإنسان منذ آلاف السنين، حيث أشارت الدراسات إلى وجود الرصاص منذ القدم حتى قبل نشوء الإمبراطورية الرومانية (أي قبل حوالي ٢٠٠٠ سنة). يميل المعدن للتواجد في الصخور الاندفاعية والرسوبيات الطينية بتركيز يتراوح بين ١٠ و ٤٠ جزء بالمليون، بينما يتراوح تركيزه في الرواسب الكلسية بين ٠.١ و ١٠ جزء بالمليون (جدول ٣).

يوجد في القشرة الأرضية نوعان من معدن الرصاص هما: الرصاص الأولي والرصاص الثانوي. ينشأ الرصاص الأولي من أصل جيولوجي geogenic ويكون مندمجاً ضمن الفلزات أثناء

تشكلها، بينما ينشأ الرصاص الثانوي من مصدر مشع radiogenic ينتج عن انخمد النشاط الإشعاعي لعنصر اليورانيوم U أو عنصر الثيتانيوم Th وتحولهما إلى عناصر ثابتة. ويوجد الرصاص بشكل رئيسي على صورة رصاص ثنائي التكافؤ Pb^{2+} ، كما يوجد على صورة Pb^{4+} ويشكل الرصاص عدة فلزات من أهمها الغالينا PbS وهو الشكل الأولي الذي يوجد عليه الرصاص في الحالة الطبيعية .

يُعدّ المحتوى الطبيعي للرصاص في التربة هو الموروث من الصخور الأم. ولكن نتيجة التلوث الواسع بالرصاص، فإنّ معظم الترب قد تكون غنية به وبشكل خاص في طبقاتها السطحية. إن الحد الاعلى المسموح به للرصاص في التربة العادية هو ٧٠ جزء بالمليون. ويبلغ متوسط تركيز الرصاص في الترب السطحية لأغلب الترب حول العالم ٢٥ جزء بالمليون.

سلوك الرصاص في التربة:

من بين المعادن الثقيلة الأخرى يُعدّ الرصاص الأقل قدرة على الحركة. يترافق وجود الرصاص في التربة بشكل رئيسي مع كل من فلزات الطين وأكاسيد المنغنيز وهيدروكسيدات الحديد والألمنيوم والمادة العضوية. يؤدي إضافة الفسفات للتربة الملوثة بالرصاص إلى انخفاض الجزء القابل للذوبان منه، وإلى انخفاض كبير في الجزء المرتبط بالأكاسيد والكربونات، بينما تؤدي إلى زيادة في الجزء المرتبط بالمادة العضوية. وفي الترب شديدة التلوث بالرصاص يؤدي إضافة الفسفات إلى تشكيل فلز بيرومورفيت الرصاص $Pb_5(PO_4)_3Cl$.

ويمكن أن تنخفض قدرة الرصاص على الذوبان في التربة بشكل كبير عند إضافة الكلس. فارتفاع pH التربة المعاملة بالكلس قد يعمل على ترسيب الرصاص على شكل هيدروكسيد، أو فوسفات أو كربونات، بالإضافة إلى تشجيعه لعملية تشكيل معقدات الرصاص العضوية التي تتصف ببنائها. وزيادة حموضة التربة قد يزيد من قدرة الرصاص على الحركة ولكن هذه العملية تكون عادةً أبطأ من عملية تراكمه في الطبقات الغنية بالمادة العضوية. يعتمد ادمصاص الرصاص بشكل كبير على أنواع الأربطة التي تتدخل في تشكيل معقدات الهيدروكسي مع الرصاص مثل $Pb_4(OH)^{4+}$ و $PbOH^+$. وتدمص الأشكال الكيميائية للهيدروكسي وفق عدة آليات، إما على شكل تبادل كاتيوني بسيط كما في ادمصاص الرصاص على فلز المونتموريونيت، أو على شكل تنافسي كما في عملية ادمصاصه على فلز الكاؤولينيت والإيليت، أو على شكل ادمصاص اصطفاي من قبل أكاسيد الحديد والهالوزيت والأموغوليت.

تلوث التربة بمعدن الرصاص:

تأتي الخطورة من تلوث التربة بمعدن الرصاص على صحة الإنسان من مصدرين أساسيين: دخوله في السلسلة الغذائية وعملية استنشاق غبار التربة. واستقطب وجود الرصاص في التربة الكثير من الاهتمام في السنوات الحالية. الجانب الأكثر خطورة لرصاص التربة يظهر من خلال إنتقاله المباشر من التربة الملوثة إلى الطفل، حيث وُجد علاقة معنوية بين مستويات الرصاص في كل من التربة ودم الأطفال. قد يصل تراكم الرصاص في التربة السطحية المعرضة لمصادر تلوث مختلفة إلى قيمة عالية بحوالي ٢ % من التربة الجافة. وقد تتراوح مستويات الرصاص في بعض التربة الملوثة بين ١٠٠ و ٥٠٠ جزء بالمليون. توجد ملوثات الرصاص الرئيسية المنطلقة من معامل صهر المعادن على أشكال فلزية مثل: PbS ، PbO ، $PbSO_4$ ، $PbO.PbSO_4$. بينما يكون الرصاص الناتج عن انبعاثات عوادم المركبات بشكل أساسي على شكل أملاح هاليدية مثل: $PbBr$ ، $PbBrCl$ ، $Pb(OH)Br$ ، $(PbO)_2PbBr_2$.

وتختلف الآراء حول كون الرصاص يمثل ملوثاً إذا كان متحركاً أو يمثل مكوناً ثابتاً للتربة. يمثل الرصاص المعدن الأكثر ثباتاً في التربة، ويستلزم انخفاض تركيزه بمقدار ١٠ % التربة الملوثة جراء عملية الغسل حوالي ٢٠٠ سنة. بينما تبلغ الفترة اللازمة لانخفاض كميته في التربة بمقدار النصف فتتراوح بين ٧٤٠ و ٥٩٠٠ سنة تبعاً لنوع التربة وإدارة مياه الري وكمية المادة العضوية. وإن كميات الرصاص التي تدخل النظام البيئي تتجاوز بكثير الكميات المفقودة منه، فعلى سبيل المثال، تبلغ الزيادة السنوية للرصاص في التربة الزراعية ٣.٧ % من كميته الكلية.

٤.٥.٣. الزرنيخ (Arsenic) As:

الزرنيخ في التربة:

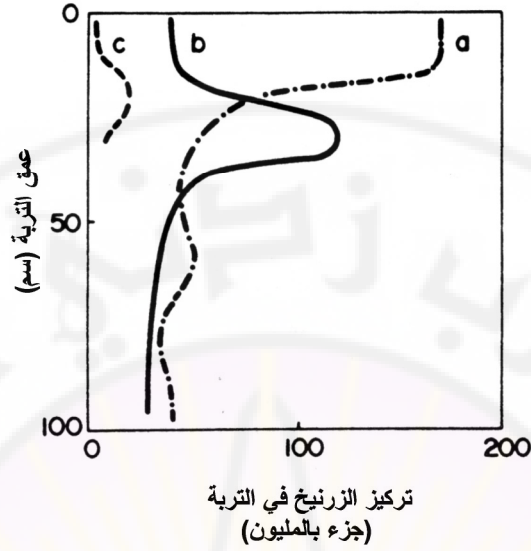
يتوزع الزرنيخ بشكل متجانس في أغلب أنواع الصخور حيث يتراوح تركيزه بين ٠.٥ و ٢.٥ جزء بالمليون (جدول ٣). ويرتفع تركيزه في الرواسب الطينية إلى ١٣ جزء بالمليون. يملك الزرنيخ ميلاً كبيراً للوجود في العديد من الفلزات، ويوجد حوالي ٢٠٠ فلز يحتوي على معدن الزرنيخ على هيئة أرسينات AsO_4^{3-} بنسبة ٦٠ % تقريباً. وفلز الزرنيخ الأكثر شيوعاً هو الأرسينوبيريت $FeAsS$ arsenopyrite. يترافق هذا العنصر بشكل كبير مع رواسب العديد من المعادن ولذلك يُعد الزرنيخ مؤشراً جيداً في دراسة عملية الرصد الجيو-كيميائي للتربة. إن مستويات الزرنيخ في التربة السطحية عموماً منخفضة، بالرغم من أنها تتجاوز مستويات الزرنيخ في الصخور بعدة أضعاف. يتراوح تركيزه في التربة غير الملوثة بين أقل من ١ إلى ٩٥ جزء بالمليون.

سلوك الزرنيخ في التربة:

بالرغم من أن فلزات ومركبات الزرنيخ قابلة للذوبان بسهولة في الوسط، إلا أن هجرة الزرنيخ تُعتبر محدودة بشكل كبير بسبب ادمصاصه القوي على الطين والهيدروكسيدات والمادة العضوية. يرتبط حوالي ٢٧-٩٠ % من الكمية الكلية للزرنيخ في التربة مع الجزء الحبيبي الطيني للتربة ذات الأبعاد الأقل من ٠.٠٠١ مم. يوجد هذا العنصر بعدة أشكال كيميائية وحالات أكسدة مختلفة، إذ يوجد على صورة As^0 و As^{3+} في البيئات المرجعة، وعلى هيئة معقدات أنيونية مثل AsO_2^- ، AsO_4^{3-} ، $HAso_4^{2-}$ ، $H_2AsO_3^-$ وهي الأشكال القابلة للحركة الأكثر شيوعاً للزرنيخ في التربة. ويوجد الزرنيخ الخماسي As^{5+} في أغلب الظروف البيئية على شكل $H_2AsO_4^-$ ، بينما في البيئات ذات pH المنخفض يكون الزرنيخ على هيئة $H_3AsO_3^0$ هو السائد. يوجد فقط جزء محدود من الكمية الكلية للزرنيخ قابلاً للحركة، بينما يرتبط أكثر من ٨٠ % بقوة مع الحديد والألمنيوم وبشكل خاص مع الجيوتيت goethite ولا يكون متاحاً بذلك للنباتات.

تلوث التربة بمعدن الزرنيخ:

يتراوح تركيز الزرنيخ بشكل طبيعي في الترب بين ٢-١٥ جزء بالمليون. وترتبط المصادر البشرية لتلوث التربة بهذا المعدن بالنشاطات الصناعية كالتعدين وصناعة بعض المبيدات الحشرية. ويؤدي استخدام المركبات الزرنيخية عن طريق الرش وبشكل خاص في بساتين الفاكهة إلى تلوث التربة بهذا المعدن، فقد يصل تركيز الزرنيخ في ترب الحدائق شديدة التلوث حتى ٢٠٠ جزء بالمليون وهذا يعود إلى سعة الادمصاص العالية للترب. وبينت الدراسات أن ٦٠ % على الأقل من كمية الزرنيخ الموجودة في الجو تعود إلى مصادرها الطبيعية. ويختلف الزرنيخ في توزيعه العامودي ضمن مقطع التربة تبعاً لظروف الأكسدة. ففي الترب الطينية الثقيلة يتراكم الزرنيخ فقط في الآفاق العليا ويُغسل بسهولة نحو الأسفل تحت ظروف شديدة من الإرجاع الكيميائي. بينما يأخذ توزيع الزرنيخ في الترب الخفيفة القوام وجيدة الصرف شكلاً مختلفاً (الشكل ٢٨).



الشكل (٢٨) الانتشار العامودي للزرنيخ الكلي في التربة
(a) تربة ثقيلة، (b) تربة خفيفة، (c) تربة مغمورة غير ملوثة

٥.٥.٣. النيكل (Ni):

النيكل في التربة:

يوجد تشابه كبير بين توزع وانتشار كل من النيكل والكوبالت والحديد في القشرة الأرضية. ويتوقف تركيز النيكل في الترب بشكل كبير على محتوى الصخور الأم. تحتوي الصخور الرسوبية على النيكل ضمن المجال ٥-٩٠ جزء بالمليون، ويقل تركيز النيكل مع ازدياد حموضة الصخور إلى ما دون ٥-١٥ جزء بالمليون كما في الغرانيت (جدول ٣). يوجد النيكل بشكل أولي في الصخور الأرضية على هيئة فلزات مثل الميليريت (NiS) والنيكوليت (NiAs) والبريث أوبتيت (NiSb) (breithauptite). وقد يتشكل فلز الغارنيريت (Ni) الذي يمثل خليطاً من فلزات الطين خلال تجوية الصخور الغنية بالنيكل وبشكل رئيسي في المناخات الاستوائية. يتراوح تركيز النيكل في كثير من الترب بين ٠.٢ و ٤٥٠ جزء بالمليون، ويبلغ تركيزه الوسطي لأغلب ترب العالم حوالي ٢٢ جزء بالمليون، وتوجد التراكيز الأعلى منه دائماً في الترب الطينية واللومية مثل rendzinas و cambisols.

سلوك النيكل في التربة:

يصبح النيكل قادراً على الحركة بسهولة خلال التجوية ويترسب بشكل مرافق لترسب أكاسيد الحديد والمنغنيز. وعلى خلاف Fe^{2+} و Mn^{2+} يتميز النيكل بأنه ثابت نسبياً في المحاليل المائية وإنه قادر على الهجرة إلى مسافات طويلة. يتعلق توزع النيكل في أفاق التربة بوجود كل من المادة العضوية والأكاسيد غير المتبلورة وفلزات الطين، وذلك تبعاً لنوع التربة. وتُظهر المادة العضوية ميلاً قوياً اتجاه النيكل، فهو يوجد في الترب السطحية بأشكال مرتبطة عضوياً بشكل أساسي، وجزء من هذه الأشكال قد يكون شيلات قابلة للذوبان بسهولة. ويُعد نيكل التربة المرتبط مع أكاسيد الحديد والمنغنيز الجزء الأكثر تيسراً للنباتات. ويبلغ تركيز النيكل في المحاليل الطبيعية لتربة الأفاق السطحية لمجموعة مختلفة من الترب ٣ ميكروغرام/لتر ($\mu g/l$) ويصل إلى ٢٥ ميكروغرام/لتر في محاليل الترب الملوثة. ويوجد النيكل في محلول التربة بأشكال كيميائية متعددة مثل Ni^{2+} ، $NiOH^+$ ، $HNiO_2^-$ و $Ni(OH)_2$.

ترتبط قدرة النيكل على الذوبان عكسياً مع pH التربة، ويعتمد معدل ادمصاصه على أكاسيد الحديد والمنغنيز بشكل خاص على pH التربة، وقد يُعزى ذلك إلى الادمصاص الاختياري للشكل $NiOH^+$ أو إلى تأثير شحنة سطوح الأكاسيد بتغير pH الوسط. وتعمل المركبات مثل SO_4^{2-} والحموض العضوية التي تشكل المعقدات مع النيكل على تخفيض معدل ادمصاصه. وهكذا يصبح النيكل قابلاً للحركة بزيادة قدرته على تشكيل المعقدات في التربة، كما هو الحال في الترب الملوثة والغنية بالمادة العضوية.

تلوث التربة بمعدن النيكل:

أصبح معدن النيكل في الآونة الأخيرة يشكل أحد الملوثات الخطيرة في البيئة، فهو يتحرر من الانبعاثات الناتجة عن عمليات تصنيع المعدن وعن عمليات احتراق الفحم والزيوت. وقد يشكل إضافة الحمأة وبعض الأسمدة الفسفورية للتربة مصدراً هاماً للتلوث بالنيكل. وبينت بعض الدراسات أن تركيز معدن النيكل لا يزداد بصورة كبيرة في الترب السطحية. ويؤدي إضافة الكلس أو الفسفات أو المادة العضوية للتربة إلى انخفاض جاهزية النيكل للنباتات.

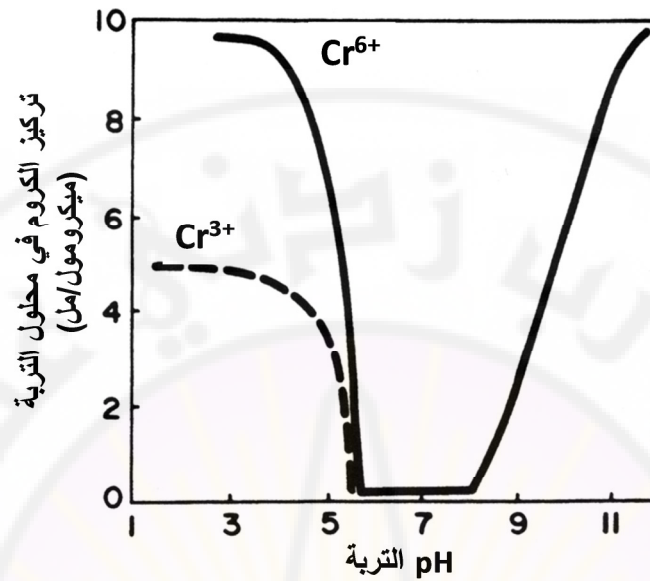
٦.٥.٣. الكروم (Chromium) Cr:

الكروم في التربة:

يشير وجود الكروم في القشرة الأرضية إلى ترافقه بشكل أساسي مع صخور mafic و ultramafic والتي يوجد فيها بنسبة منخفضة 0.0x % (جدول ٣)، بينما يزداد تركيزه في الصخور النارية الحامضية والصخور الرسوبية ويتراوح من ٥ إلى ١٢٠ جزء بالمليون. يوجد معظم الكروم Cr^{3+} في فلز الكروميت $(FeCr_2O_4)$ ، وهو الفلز الأكثر شيوعاً ويُعتبر مقاوماً للتجوية وهذا يفسر وجود معظم الكروم في بقايا عملية التجوية. يعود مصدر الكروم الموجود في التربة إلى الصخور الأم ولذلك يزداد تركيزه في الترب ذات المنشأ الصخري. وتحتوي ترب السرينتين بشكل خاص على كمية عالية من هذا المعدن تتراوح بين ٠.٢ و ٠.٤ %، بينما تعتبر الترب الرملية وترب histosols الأكثر فقراً به حيث يبلغ محتواها الوسطي ٤٧ و ١٢ جزء بالمليون على التوالي. في حين يبلغ متوسط محتوى الترب السطحية من الكروم حوالي ٥٤ جزء بالمليون.

سلوك الكروم في التربة:

ييدي الكروم الموجود في التربة حالات أكسدة متغيرة بشكل كبير من +2 إلى +6، وهو يشكل معقدات أيونية كاتيونية أو أنيونية مثل $Cr(OH)^{2+}$ ، CrO_4^{2-} و CrO_3^- . ويوجد الكروم بحالته الطبيعية في التربة على شكل كروم ثلاثي Cr^{3+} كما في CrO_3^- وسداسي Cr^{6+} كما في الكرومات CrO_4^{2-} . ويعتبر الكروم السداسي أكثر سمية وقدرة على الحركة من الكروم الثلاثي. وبشكل الكروم تحت ظروف الأكسدة المتقدمة شوارد الكرومات CrO_4^{2-} التي تتميز بسهولة حركتها وقدرتها على الادمصاص من قبل فلزات الطين والأكاسيد المائية. ويوجد معظم كروم التربة على صورة كروم ثلاثي Cr^{3+} أو ضمن التركيب الفلزي أو على أشكال من أكاسيد الكروم Cr^{3+} والحديد Fe^{3+} المختلطة. ويُعد الكروم Cr^{3+} قليل الحركة في الوسط الشديد الحموضة ويترسب بشكل كامل عند pH تساوي ٥.٥، لذلك تُعتبر مركباته ثابتة جداً في الترب. ومن ناحية أخرى، يتميز الكروم Cr^{6+} الذي يوجد على صورة CrO_4^{2-} و $HCrO_4^-$ بنباته الضعيف للغاية في الترب ويصبح قابلاً للحركة بسهولة في كل من الترب الحامضية والقلوية (شكل ٢٩).



الشكل (٢٩) قابلية الكروم الثلاثي والسداسي للذوبان في محلول التربة تبعاً لتغير pH التربة

يخضع سلوك الكروم لكل من pH التربة وكمون الأكسدة والإرجاع، إذ يتشكل المركب $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ضمن مجال من pH التربة يتراوح بين ٧-٩، بينما يوجد الشكل CrO_4^{2-} عند $\text{pH} > 7$. ويعتمد ادمصاص الكروم من قبل فلزات الطين بدرجة كبيرة على pH التربة حيث ينخفض معدل ادمصاص الكروم Cr^{6+} مع ازدياد pH في حين يزداد ادمصاص الكروم Cr^{3+} . وقد يتغير سلوك الكروم في التربة بوجود المعقدات العضوية للكروم، ويتجلى التأثير الرئيسي والأهم للمادة العضوية في تنشيط عملية إرجاع الكروم Cr^{6+} إلى Cr^{3+} . يمثل التحول السريع للكروم تحت الظروف الطبيعية للتربة، من الشكل Cr^{6+} القابل للذوبان إلى الشكل Cr^{3+} غير القابل للذوبان أهمية كبرى بسبب كونه مسؤولاً عن الجاهزية المنخفضة لعنصر الكروم للنباتات. وعدم قدرة الكروم على الحركة ربما هي المسؤولة عن عدم تزود النباتات بشكل كافٍ بهذا العنصر.

تلوث التربة بمعدن الكروم:

يُعتبر الكروم السداسي Cr^{6+} الذي يتميز بقدرته العالية على الذوبان والحركة في الترب ساماً للنبات والحيوان. لذلك يُشكل تغير حالات أكسدة الكروم في الترب أهمية كبرى وخاصةً من الناحية البيئية. وإلى جانب ذلك، يوجد تأثيرات ضارة أيضاً لمركبات الكروم الثلاثي Cr^{3+} في

العمليات الكيميائية والحيوية للتربة، إذ يؤثر الكروم الثلاثي بفاعلية في عمل أنزيمات التربة وخاصةً الأنزيم dehydrogenase المسؤول عن عمليات الحلمأة المائية لبعض المركبات في التربة.

وتزداد كمية الكروم في الترب السطحية نتيجةً للتلوث الذي ينشأ من مصادر مختلفة، ومن أهمها الفضلات الصناعية المختلفة مثل بقايا دباغة الجلود ومياه الصرف الصحي. وبينت بعض الدراسات أن الحد الأقصى لتراكم الكروم في التربة الزراعية جراء الإضافات المتكررة له يبلغ حوالي ٣ طن/الهكتار، حيث لا تظهر أي تأثيرات سلبية على النباتات عند هذا المستوى من الكروم. وتبين أن عمليات إضافة الكلس والفسفور والمادة العضوية للتربة تُعدّ فعّالة في تخفيض سمية الكرومات في الترب الملوثة بالكروم. ففي حال تلوث التربة بالكروم السداسي Cr^{6+} ، عندئذ لا بدّ من العمل على خفض pH التربة واستخدام عوامل مرجعة من أجل تسريع عملية إرجاع الكروم السداسي إلى ثلاثي.

٧.٥.٣. الزئبق Hg (Mercury):

الزئبق في التربة:

يُعدّ محتوى الزئبق في الصخور الاندفاعية منخفضاً جداً ولا يتجاوز رتبة الجزء بالبليون ppb (الجدول ٣)، ويوجد بتركيز أعلى بكثير في الصخور الرسوبية والطينية وبشكل خاص في الشيل الغني بالمواد العضوية حيث يتراوح تركيز الزئبق بين ٤٠ و ٤٠٠ جزء بالبليون. ولا يتجاوز متوسط تركيزه في الترب السطحية ٤٠٠ جزء بالبليون في حين يصل تركيزه الأعظمي في الترب العضوية والترب الطينية إلى ٢٨٠ جزء بالبليون. وأهم الخواص الجيو-كيميائية أهمية لمعدن الزئبق هي:

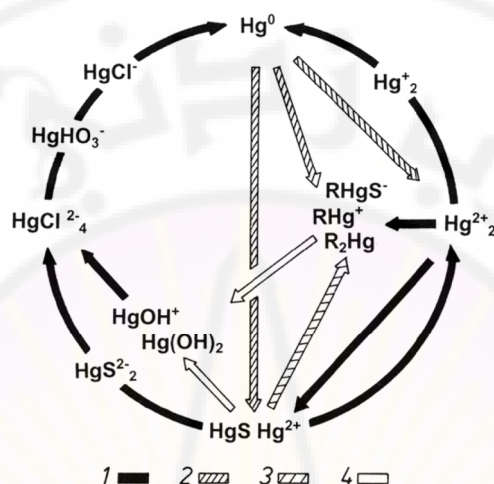
(١) ميول الزئبق لتشكيل روابط قوية مع الكبريت وتكوين مركبات مثل فلز السينابر HgS وهو الفلز الأكثر شيوعاً.

(٢) تكوين مركبات الزئبق العضوية التي تتميز بثباتها النسبي في الوسط المائي.

(٣) قابلية عنصر الزئبق للتطاير.

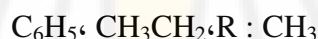
وبالرغم من أن الزئبق يوجد على عدة أشكال أيونية (الشكل ٣٠) إلا أنه غير قابل للحركة كثيراً أثناء عملية التجوية. وتضم أشكال الزئبق القابلة للتطاير كل من Hg^0 و $(CH_3)_2Hg$ ، أما الأشكال القابلة للذوبان فتشمل $HgCl_2$ ، $Hg(OH)Cl$ ، $Hg(OH)_2$ ، بينما تضم الأشكال قليلة

القدرة على الحركة بشكل أساسي المعقدات العضوية مثل CH_3Hg^+ ، CH_3HgS^- . وتشكل عموماً أيونات الزئبق Hg_2^+ معقدات أضعف من المعقدات التي تشكلها أيونات الزئبق الموجود على صورة Hg_2^{2+} .



الشكل (٣٠) الأشكال الأيونية للزئبق و تحولات مركباته في التربة:

(١) إرجاع، (٢) أكسدة، (٣) تشكيل مركبات عضوية، (٤) حلمأة



سلوك الزئبق في التربة:

يعتمد سلوك الزئبق في الترب بشكل كبير على أشكاله الكيميائية والتي تتعلق بعدة عوامل من أهمها خواص التربة وتركيز الزئبق والكلور Cl^- في محلول التربة. ويُعزى تراكم الزئبق في التربة بشكل أساسي إلى تكوين المعقدات العضوية وعمليات الترسيب، لذلك تتطلب قدرة الزئبق على الحركة عمليات إذابة وتحلل حيوي وكيميائي للمركبات العضوية الزئبقية. ويدمض الزئبق بشكل جيد على المادة العضوية، بينما يُعد ادمصاصه على فلزات الطين محدوداً جداً ويتأثر قليلاً بتغير pH الوسط، ويُعتبر $\text{Hg}(\text{OH})_2$ هو الشكل المفضل للادمصاص في التربة. ويعمل وجود فائض من أيونات الكلور Cl^- في الترب على انخفاض ادمصاص الزئبق Hg^+ على كل من الحبيبات الفلزية والمادة العضوية، بسبب تشكيل المعقدات Hg-Cl التي تتميز بثباتها العالي وضعف ادمصاصها.

وللمادة العضوية دور هام في توزيع الزئبق وانتشاره في التربة، بالإضافة لدورها في ادمصاص المعدن وإزاحته فهي تحتفظ به كمعقدات عضوية قليلة القدرة على الحركة، وتُعتبر الأشكال المعلقة من الزئبق هي المسؤولة بشكل أساسي عن هجرة الزئبق في مختلف الترب في المناطق الرطبة ونصف الرطبة. ويتوزع الزئبق في الترب السطحية بنسبة تفوق عدة أضعاف نسبة توزيعه في الترب تحت السطحية، وتملك عموماً الترب العضوية محتوى أعلى من الزئبق من الترب المعدنية بسبب السعة الادمصاصية الكبيرة التي يبدىها دبال التربة وخاصةً الدبال الخام. إذ يوجد الزئبق في الدبال الخام بتركيز عالية تتجاوز غالباً ٠.٣ جزء بالمليون من الوزن الجاف. ومن ناحية أخرى، بينت بعض الدراسات أن عدة أنواع من البكتريا والخمائر تؤثر في إرجاع الشكل الكاتيوني Hg^{2+} إلى Hg^0 القابل للتطاير، وإن أكسدة الزئبق Hg^0 إلى الشكل الكاتيوني يمكن أيضاً أن يتم بواسطة الكائنات الحية الدقيقة.

تعتبر عمليات هجرة الزئبق في الترب محدودة جداً، فقط حوالي ١% من كمية الزئبق الكلية الموجودة في الترب الملوثة يمكن أن تصبح قابلة للحركة تحت تأثير جريان الماء. ويتحرك الزئبق كلياً على شكل معقد مرتبط بالحموض الهيومية. ويزداد الميل القوي للزئبق نحو المادة العضوية مع ازدياد حموضة التربة، ويُغسل خارج مقطع التربة في الوسط الحامضي على شكل مرتبط بالمركبات العضوية، بينما في الترب خفيفة القلوية والمتعادلة يغسل الزئبق على شكل جزء فعال غير عضوي. أما عملية فقدته من التربة عن طريق التطاير تزداد مع ارتفاع درجة حرارة الترب وزيادة قلويتها.

تلوث التربة بالزئبق:

يشغل سلوك الزئبق في التربة الملوثة أهمية كبيرة نظراً لأن جاهزيته الحيوية السريعة تخلق مخاطر كبيرة على الصحة العامة. فتطاير الزئبق من الترب الملوثة به يمكن أن يملك تأثيراً سلبياً على صحة الإنسان عندما يتجاوز عتبة التركيز القياسي للاستنشاق وهي 300 ng/m^3 . وتتعلق مصادر تلوث التربة بالزئبق بشكل أساسي بعمليات صناعة المعدن وبعض النشاطات الكيميائية بالإضافة إلى الاستخدام المبكر لمبيدات الفطور الزئبقية. ويصل تركيز الزئبق في الترب الواقعة في مواقع معالجة وإعادة تصنيع البطاريات إلى مستويات عالية تبلغ ٠.٤ جزء بالمليون. واستخدام الزئبق في عملية ملغمة الذهب في مناجم استخراج الذهب في منطقة الامازون والمناطق السيبيرية يُضيف كميات كبيرة منه إلى الوسط، حيث قُدِّر انبعاث الزئبق من

منطقة واحدة لمناجم الذهب في البرازيل بمعدل ٨٠ طن/سنة. وهذه الكميات من الزئبق المضافة إلى البيئة ستخلق خطورة كبيرة من خلال انتقاله إلى السلسلة الغذائية.

٨.٥.٣. الكوبالت (Cobalt) Co:

الكوبالت في التربة:

يملك الكوبالت في القشرة الأرضية تركيزاً عالياً في صخور ultramafic (١٠٠-٢٠٠ جزء بالمليون)، بينما يقل تركيزه في كل من الصخور الحامضية (١-١٥ جزء بالمليون) والصخور الرسوبية بين (٠.١ و ٢٠ جزء بالمليون) (الجدول ٣)، ويبلغ متوسط محتوى القشرة الأرضية من الكوبالت حوالي ٢٥ جزء بالمليون. ويتراوح المحتوى الطبيعي للتربة السطحية من هذا المعدن بين ٠.١ و ٧٠ جزء بالمليون. ويوجد الكوبالت في عدة فلزات مثل الكوبالتيت cobaltite (CoAsS) وفلز الليمينيت limneite (Co₂S₄)، بالإضافة إلى فلز اريثريت erythriteCo₂(AsO₄)₂.8H₂O الذي يمكن أن يوجد في بعض أنواع التربة.

يشبه الكوبالت بشكل كبير الحديد والمنغنيز في الدورات الجيو-كيميائية، ويتحدد مصير الكوبالت في عمليات التجوية وتوزعه في الرسوبيات وفي مقطع التربة بشكل كبير من خلال عملية تشكيل مركب أكسيد المنغنيز. ويوجد الكوبالت بشكل طبيعي في التربة بحالتي أكسدة هما: Co²⁺ و Co³⁺، وقد يوجد على شكل معقدات أيونية مثل Co(OH)₃. وخلال عملية التجوية، يكون الكوبالت قابلاً للحركة نسبياً في البيئات الحامضية المؤكسدة، ولكن نظراً لادمصاصه العالي من قبل أكاسيد الحديد والمنغنيز وفلزات الطين، فإنه لا يهاجر في الطور الذائب.

سلوك الكوبالت في التربة:

تُعتبر آلية ادمصاص مركبات وأشكال الكوبالت في التربة معقدة للغاية بسبب المراحل المختلفة لأكسدة الكوبالت والنشاط الميكروبي من خلال البكتريا المعروفة بقدرتها على جعل الكوبالت الموجود على صورة معقدات قابلاً للحركة. وتُظهر أكاسيد الحديد ميلاً كبيراً لادمصاص الكوبالت، الأمر الذي ينعكس على توزع الكوبالت في مقطع التربة. ولكن في بعض الترب الغنية بفلزات المنغنيز، يطغى ترافق الكوبالت مع المنغنيز على العوامل الأخرى التي تتحكم بتوزع الكوبالت في التربة.

إن آلية ادمصاص الكوبالت من قبل أكاسيد المنغنيز المتبلورة تختلف بشكل واضح مع تغير pH التربة، إذ يزداد ادمصاص الكوبالت في التربة بشكل كبير مع ازدياد pH الوسط. وتعتمد عملية

الادمصاص عموماً على التبادل الداخلي للكوبالت Co^{3+} مع Mn^{2+} وعلى تكوين أشكال الهيدروكسي $Co(OH)_2$ التي تترسب على سطوح الأكسيد. وفي هذا الإطار تم اقتراح ثلاث آليات مختلفة لادمصاص الكوبالت على أكاسيد المنغنيز وهي:

- (١) أكسدة الكوبالت الثنائي Co^{2+} إلى ثلاثي Co^{3+} عند سطح الأكاسيد.
 - (٢) إرجاع المنغنيز الرباعي Mn^{4+} إلى ثلاثي Mn^{3+} في الشبكة البلورية للأوكسيد.
 - (٣) استبدال Mn^{3+} أو Mn^{4+} من قبل الكوبالت الثلاثي Co^{3+} .
- وهكذا قدرة الكوبالت على الذوبان في معظم ظروف التربة تتأثر بشكل كبير بأكاسيد المنغنيز من خلال قوة العلاقة بين pH التربة وكمون الأكسدة والإرجاع . يُعتبر أيضاً محتوى التربة من المادة العضوية والطين من العوامل الهامة التي تتحكم بتوزيع وسلوك الكوبالت في التربة، وخاصةً فلزي الطين المونتموريونيت والإيليت بسبب سعة ادمصاصهما الكبيرة وقدرتهما على تحرير الكوبالت بسهولة في الوسط. وترتبط قدرة الكوبالت على الحركة بشكل كبير بنوع المادة العضوية في الترب. فالشيلات العضوية للكوبالت تُعتبر سهلة الحركة والانتقال في التربة.

الفصل الرابع

الملوثات العضوية المديدة Persistent Organic Pollutants (POPs)

١.٤. المقدمة:

توجد الملوثات العضوية في كل مكان تقريباً في البيئة، وقد ظهرت حمولتها البيئية على السطح بشكل كبير نتيجةً للنشاط الإنساني الصناعي الهائل في القرنين التاسع عشر والعشرين. ويمكن للتربة أن تشكل المستقبل أو الحوض البيئي environment sink الرئيسي للعديد من الملوثات العضوية التي تنطلق إلى الجو. وما أن تصل الملوثات العضوية للتربة حتى تميل المركبات غير الأيونية منها وخاصة ذات الوزن الجزيئي الكبير إلى البقاء في التربة لفترات طويلة من الزمن. ومن المعتقد أن العوامل الأولية المحددة لبقاء تلك الملوثات في التربة ما هي إلا آليات أساسية من عمليات ادمصاص وإزاحة تتحكم بتوزيع المركب الكيميائي وانتشاره بين طوري التربة الصلب والسائل. وتُعد الملوثات العضوية المديدة الموجودة في التربة متاحة بشكل كامل للعديد من الأحياء التي تشمل كل من الكائنات الحية النباتية الدقيقة microflora وأحياء التربة وخاصة ديدان الأرض، بالإضافة إلى الحيوانات الحافرة للتربة. وقد بينت الدراسات أن جاهزية الملوثات العضوية المديدة POPs تميل للانخفاض مع الزمن، وإن جاهزيتها الحيوية اتجاه أحياء التربة الدقيقة تُعتبر هامة جداً في تحديد الخطورة الكامنة للتربة الملوثة بتلك المركبات وتحديد مقدار تأثيرها في فاعلية المعالجة الحيوية لتلك التربة.

٢.٤. ماهية الملوثات العضوية المديدة POPs:

الملوثات العضوية المديدة POPs هي عبارة عن مركبات عضوية تتصف بمقاومتها العالية لعمليات التحلل البيئية المختلفة الكيميائية والحيوية والضوئية. مما يجعل هذه المركبات قادرة على البقاء لفترة طويلة في أنظمة البيئة المختلفة (الأرضية والمائية والهوائية) وقادرة أيضاً على الانتقال لمسافات طويلة، وتميل للتراكم الحيوي في الأنسجة البشرية والحيوانية، ولانتقال ضمن السلسلة الغذائية مما يشكل منها خطراً كامناً على صحة الإنسان وسلامة البيئة.

ازداد الاهتمام بهذه المركبات بسبب ظهور دلائل على تأثيراتها السلبية في صحة الإنسان حيث تأكد تأثيرها في تغيير وظائف الجهاز التناسلي والغدد الصم وكذلك تبين ارتباط هذه المركبات بأمراض القلب والسكري وغيرهما. وعلى مدى القرنين التاسع عشر والعشرين أنتج الإنسان وأطلق كميات كبيرة من المركبات العضوية باتجاه الغلاف الحيوي biosphere، وانتشرت تلك المركبات بدورها بشكل واسع ضمن البيئة حيث يُعد العديد منها مسرطناً ويسبب طفرات وراثية مما استدعى تصنيف تلك الملوثات. وتوجه العلماء بعد الحرب العالمية الثانية إلى تصنيف بعض المواد الكيميائية العضوية انطلاقاً من منشئها الطبيعي أو الصناعي والمعروفة بمكوئها الطويل في البيئة ومقاومتها العالية لعمليات التحلل المختلفة وقدرتها أيضاً على الانتقال عبر الهواء والماء قبل أن تستقر في التربة أو الرواسب. و وضع برنامج الأمم المتحدة للبيئة في عام ١٩٩٥ قائمة المركبات العضوية المديدة وتضم اثني عشر مركباً بعد أن كانت هذه التسمية تشير في الماضي فقط إلى المبيدات وبعض المذيبات والمركبات الكلورية، وسُميت هذه المركبات بالملوثات الإثني عشرة وهي:

aldrin ، chlordane ، DDT ، endrin ، dieldrin ، heptachlor ، hexachlorobenzene ، mirex ، PCB ، PCDDs ، PCDFs ، toxaphene .

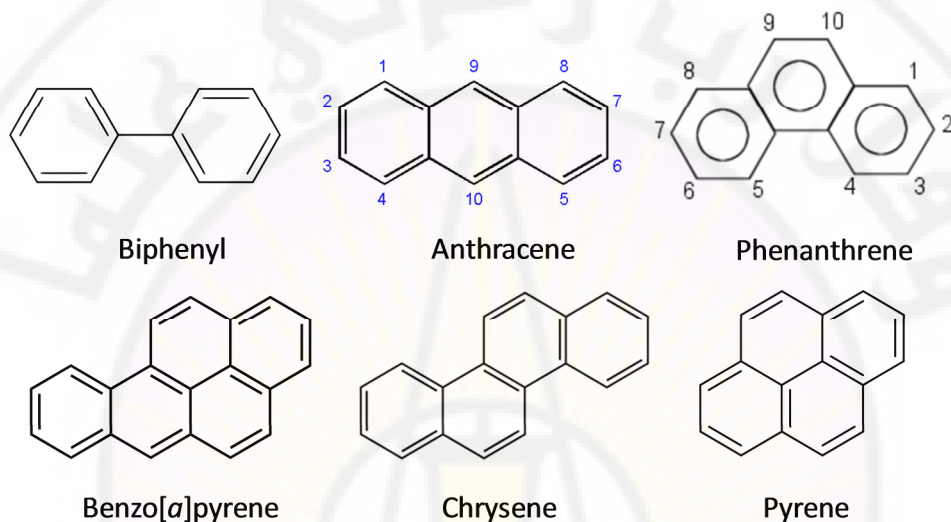
وفي عام ٢٠٠١ حددت معاهدة استوكهولم هذه المركبات كمركبات مديدة ثم ضمت لها في السنوات اللاحقة مركبات جديدة لتتسع هكذا قائمة المركبات العضوية المديدة لتشمل عدداً كبيراً من المركبات. وسنستعرض فيما يلي بعض أهم هذه المركبات بشيء من التفصيل.

الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات (PAHs): Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

وهي مركبات عضوية هيدروكربونية (فحوم هيدروجينية) حلقية تتكون فقط من الكربون والهيدروجين اللذين يؤلفان معاً حلقات عطرية مضاعفة. وتنتج الهيدروكربونات الحلقية من خلال ارتباط نهائي السلسلة الكربونية للمركبات الهيدروكربونية الأليفاتية. والمركبات PAHs هي جزيئات متعادلة (عديمة الشحنة الكهربائية) غير قطبية تنشأ من الوقود الأحفوري (النفط والفحم) وتنتج عادةً من عمليات الاحتراق غير الكامل للمواد العضوية (مثل وقود المحركات وأكوام المخلفات العضوية) عند درجة حرارة تتراوح بين ٣٠٠ و ٦٠٠ درجة مئوية. ومن أكثر هذه المركبات استحواداً للاهتمام هو المركب Benzo[a]pyrene (الشكل ٣١) بسبب سميته

العالية، ويوجد هذه المركب في قطران الفحم coal tar وتُعتبر نواتج استقلابه في الجسم عالية السمية وتسبب طفرات وراثية mutagenic.

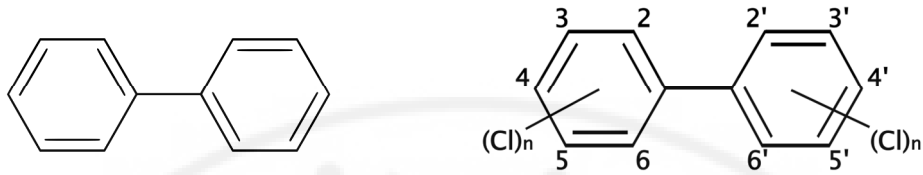
وصُنفت المركبات PAHs كموا ملوثة وخطرة لتأثيراتها الكامنة على صحة الإنسان ولوجودها بمستويات عالية عبر الزمن في الأنظمة البيئية، وتتضمن المركبات PAHs قائمة كبيرة من المركبات المختلفة ويبين الشكل ٣١ بعضاً منها.



الشكل (٣١) بعض المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات (PAHs).

المركبات ثنائية الفينيل - متعددة الكلور Polychlorinated Biphenyls (PCBs):

وهي عبارة عن مركبات عضوية صيغتها الكيميائية العامة هي $C_{12}H_{10-x}Cl_x$ (الشكل ٣٢). وتتكون هذه المركبات من خلال ارتباط الكلور مع مركب ثنائي الفينيل Biphenyls (أو Diphenyl) وهو عبارة عن جزيئة مكونة من حلقتي بنزن (الشكل ٣٣). وتضم هذه المركبات ٢٠٩ متجانساً congeners مع عدد من ذرات الكلور يتراوح بين ١-١٠ ذرات.



الشكل (٣٣) مركب ثنائي الفينيل

الشكل (٣٢) البنية الكيميائية للمركبات PCBs

وتُستخدم المركبات PCBs بشكل واسع في مجال صناعة العوازل الكهربائية وسوائل التبريد. وبسبب سميتها البيئية العالية وتصنيفها ضمن المركبات العضوية المديدة توقف إنتاج هذه المركبات بقرار من الأمم المتحدة عام ١٩٧٩ ومن قبل اتفاقية ستوكهولم عام ٢٠٠١، إذ تبين أنّ هذه المركبات تسبب الأمراض السرطانية لكل من الإنسان والحيوان. وقد حظيت هذه المركبات بالكثير من الإهتمام وخاصةً تلك التي تبدي تشابهاً في بنيتها الكيميائية ونمط تأثيرها السمي مع مركبات الديوكسين Dioxin. والحد الأعظمي المسموح به من هذه المركبات في مياه الشرب يقرب من الصفر، ولكن نتيجة معاملة مياه الشرب قد يصل تركيزها إلى حوالي 0.5 ppb (جزء بالبلليون). وتختلف المركبات PCBs بمحتواها من عنصر الكلور، فالمركبات PCBs قليلة الكلورة تكون عديمة اللون والطعم وتوجد كسوائل لزجة، بينما المركبات عالية المحتوى من الكلور تكون أكثر لزوجة. وتتميز المركبات PCBs بشكل عام بانخفاض معدل ذوبانها في الماء وانخفاض ضغط بخارها عند درجة حرارة الغرفة، ولكن قابليتها للذوبان في المذيبات العضوية والزيوت والدهون عالية. وعندما يزداد عدد ذرات الكلور في المركب ترتفع نقطة ذوبانه melting point وينخفض ضغط بخاره وقابليته للذوبان في الماء.

وتُعد المركبات PCBs مركبات ثابتة لا تتحلل في الوسط بسهولة، وهذا ناتج عن عدم قابليتها الكيميائية للأكسدة والإرجاع في ظروف البيئة الطبيعية. ويتراوح نصف عمر هذه المركبات بين ٨ إلى ١٥ سنة، وما يساهم في ثباتيتها في الوسط هو عدم قدرتها على الذوبان في الماء. وتُعد عملية تحليلها كيميائياً أو حرارياً أو حيوياً صعبة للغاية، وتمثل خطورة كبيرة عبر إنتاجها لمركبات عالية السمية مثل dibenzodioxins و dibenzofurans عند أكسدة جزئياً. وتدخل هذه المركبات إلى البيئة من خلال استخدامها الواسع في الصناعة أو من خلال طرحها ورميها مباشرة في التربة. وعملية إنتقال هذه المركبات ضمن البيئة يُعد معقداً جداً وإن حدث فهو

يجري على شكل إنتقال لكتلة التربة الملوثة. ونتيجة انخفاض ضغط البخار للمركبات PCBs، فهي تتراكم أولاً في الغلاف المائي Hydrosphere مثل البحار والمحيطات وفي المادة العضوية للتربة وفي أجسام الكائنات الحية. وبالرغم من أنها مركبات كارهة للماء Hydrophobe فإن الحجم الضخم الذي يشكله ماء المحيطات يبقى قادراً على إذابة كميات كبيرة من هذه المركبات.

وتوجد المركبات PCBs بكميات ضئيلة جداً في الغلاف الجوي حتى ضمن المناطق السكنية التي تمثل مركز التلوث بتلك المركبات. ويشكل الغلاف المائي بمكوناته المختلفة المخزن الرئيسي لها ويخدم الغلاف الجوي كوسط تنتقل عبره المركبات PCBs وخاصة تلك المتجانسات التي تحتوي على ذرة واحدة إلى أربع ذرات من الكلور. ويصل تركيز تلك المركبات في الجو إلى 1 ng/m^3 (نانوغرام/م³) أو أكثر في مراكز المدن الكبرى بينما يصل إلى أعلى من ذلك بكثير في البحيرات الملوثة كما في بحيرة ميتشغن الأمريكية التي يدخلها سنوياً كمية من المركبات PCBs تصل إلى ١٢٠ كغ. وحالما تتحرر المركبات PCB في البيئة، لا تميل للتحلل بسهولة بل تمضي فترة طويلة من الزمن منتقلة بين الماء والهواء والتربة، ويمكن أن تُحمل لمسافات طويلة بعيدة عن مصادر التلوث. ويمكنها أن تتراكم في الأجزاء الهوائية للنبات وبعض المحاصيل الغذائية وبعض الكائنات الصغيرة مثل الأسماك التي تمثل بدورها معبراً ضمن السلسلة الغذائية لوصول المركبات PCBs للإنسان.

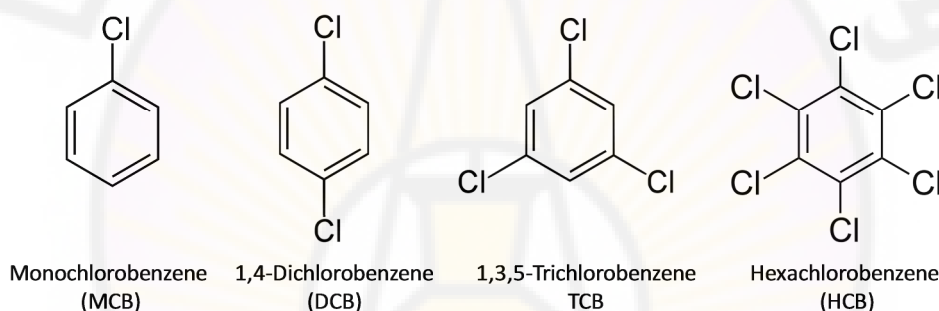
ويوجد عدة مصادر لدخول الملوثات PCBs النظام البيئي مثل:

١. رمي النفايات وخاصة المواد التي تدخل في صناعتها المركبات PCBs مثل المحولات والمكثفات الكهربائية والمواد البلاستيكية التي تدخل في تصنيع الإكسسوارات الكهربائية (قواطع، أسلاك عزل).
٢. حرق النفايات المنزلية الذي يؤدي أيضاً إلى التلوث بمركبات أخرى مثل كلور الهيدروجين HCl والديوكسين (PCDDs، PCDFs).
٣. التطاير انطلاقاً من المسطحات المائية (وخاصة البحيرات) الملوثة بالمركبات PCBs.

الكلوروبنزن (CBs) Chlorobenzenes:

تحتوي فقط هذه المركبات على ذرات كلور وهيدروجين في حلقة البنزن، ويتغير عدد ذرات الكلور فيها من ١ إلى ٦. وهي عموماً مركبات خاملة غير نشيطة كيميائياً وثابتة تحت الظروف

البيئية. ويمكن الفرق بين بنى مركبات الكلوروبينزن فقط في عدد ذرات الكلور التي تمتلكها وفي أماكن توضع حلقات البنزن. وينتج عن هذا التبدل في أماكن توضع حلقات البنزن اثني عشر مركباً مختلفاً منها: أحادي الكلوروبينزن (Monochlorobenzene) MCB، وثنائي الكلوروبينزن (Dichlorobenzene) DCB، وثلاثي الكلوروبينزن (Trichlorobenzene) TCB، وستاسي كلوروبينزن (Hexachlorobenzene) HCB (الشكل ٣٤). وتُصنف مركبات الكلوروبينزن كمركبات سامة وتزداد سميتها مع ازدياد عدد ذرات الكلور المرتبطة مع حلقة البنزن، ومن أشد المركبات سمية هو المركب HCB ذو الصيغة الكيميائية C_6Cl_6 الذي يسبب أمراضاً سرطانية لدى الإنسان. ويسبب سميتها الشديدة تقع هذه المركبات في قائمة الملوثات الأشد خطراً على صحة الإنسان.



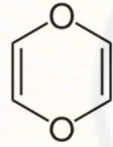
الشكل (٣٤) بعض مركبات الكلوروبينزن (Chlorobenzenes (CBs).

وتُستخدم هذه المركبات بشكل أساسي كمذيبات لإزالة الشحوم وكمبيدات زراعية (مبيدات أعشاب وفطرية وحشرية) وأيضاً كمواضع وسيطة لإنتاج مواد أخرى كالأصبغة. وتوجد في المخلفات الصناعية السائلة وبقيايا ناتجة عن حرق الفضلات التي تحتوي على مركبات عضوية مكلورة، ويمكن أيضاً أن تصل إلى البيئة من خلال التحلل الحيوي للمركبات المكلورة. وقد لوحظ وجود مركبات الكلوروبينزن في العديد من الترب، حيث يبلغ تركيزها على هيئة مركب Dichlorobenzene (DCB) في الترب غير الملوثة أقل من ٠.٤ مغ/كغ تربة وأقل من ٠.١ مغ/كغ تربة لمركبات الكلوروبينزن الأخرى. ويتراوح التركيز الكلي لهذه المركبات في الترب شديدة التلوث بين ١.٥ و ١٨٤٠٠ مغ/كغ تربة، بينما في بعض الترب الزراعية يتراوح تركيز المركب

hexachlorobenzene (HCB) فقط بين ٠.١٥ و ٥ مغ/كغ تربة. ولُوحظ كذلك وجودها في الروسوبيات واللحقيات بسبب إنتقال هذه المركبات وميولها للارتباط بالمواد الرسوبية.

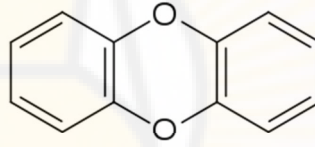
مركبات الديوكسين PCDDs والفيوران PCDFs:

المركبات ثنائية البنزن متعددة الكلورة (PCDDs) Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins أو مركبات الديوكسين هي عبارة عن مجموعة من المركبات العضوية متعددة العناصر الهالوجينية ملوثة لكل الأنظمة البيئية ولكن بكميات ضئيلة. يُشار لهذه المركبات من أجل التبسيط بمركبات الديوكسين Dioxins، لأن كل جزيئة من هذه المركبات تحتوي على المركب 4-dioxin, dibenzo-1 (الشكل ٣٥-ا) في بنيتها الهيكلية مع وجود الحلقة 4-1-dioxin كحلقة مركزية (الشكل ٣٥-ب). وتتألف بنية المركب 4-dioxin, dibenzo-1 من حلقتي بنزن ترتبط مع بعضها عبر جسرين من الأكسجين. ويرجع اسم الديوكسين بشكل أساسي إلى الحلقة الأكسجينية المركزية التي تستقر من خلال حلقتي بنزن محيطة بها. وتتوقفسمية المركبات PCDD على عدد ذرات الكلور الداخلة في بنية المركب ومواقع ارتباط هذه الذرات، وبناء عليهما يوجد حوالي ٧٥ متجانساً congeners مختلفاً من هذه المركبات.



1,4-Dioxin

(b)



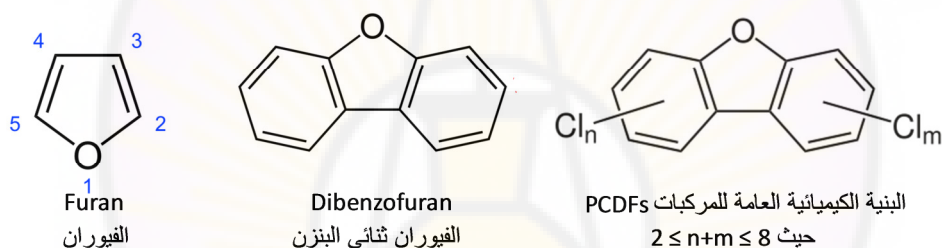
dibenzo-1,4-dioxin

(a)

الشكل (٣٥) المركب 1,4-dioxin والمركب dibenzo-1,4-dioxin

وينتج الديوكسين بتركيز منخفضة عند احتراق المواد العضوية التي تحتوي على عنصر الكلور، سواءً وُجد الكلور على هيئة أيونات أو كمركبات عضوية كلورية. حتى عام ١٩٨٧ كان تشكل عملية حرق وترميد النفايات العضوية بأشكالها كافة (النفايات المنزلية الصلبة، النفايات الصحية، نفايات الصرف الصحي) نسبة أكثر من ٨٠% من المصادر المعروفة للديوكسين. وبفضل الجهود الحثيثة والتشريعات الصارمة في العديد من الدول انخفضت هذه النسبة في أيامنا هذه

لتبلغ فقط حوالي ٣ ٪. ويمكن أن يتشكل الديوكسين مرة أخرى أثناء عملية الترميد وذلك بعد أن تنخفض درجة حرارة الغازات المنبعثة من ٦٠٠ إلى حوالي ٢٠٠ درجة مئوية. وبالنسبة للمركبات ثنائية البنزن متعددة الكلورة PCDFs (polychlorinated dibenzofurans) أو مركبات الفيوران (الشكل ٣٦)، فهي مركبات عضوية تحتوي على ذرة أو أكثر من الهيدروجين في بنية الفيوران ثنائي البنزن dibenzofuran تم استبدالها بذرات كلور. والمركبات PCDFs هي متفرعة أو مشتقة من مركب الفيوران ثنائي البنزن dibenzofuran (الشكل ٣٦) ويوجد ١٣٥ متجانساً congeners تختلف عن بعضها البعض في عدد ومواقع ذرات الكلور. ويُشار للمركبات PCDFs غالباً بهدف التبسيط بإسم مركبات الفيوران furans. والفيوران هو مركب عضوي حلقي غير متجانس يتألف من خمس حلقات عطرية بأربع ذرات كربون وذرة أكسجين واحدة (الشكل ٣٦).



الشكل (٣٦) البنية الكيميائية العامة للمركبات PCDFs والفيوران ثنائي البنزن والفيوران.

وتُعتبر هذه المركبات أكثر سمية من المركبات الأم التي تنشأ منها ولها بنى فيزيائية وكيميائية تشبه بنى مركبات الديوكسين PCDDs، وتميل أيضاً للوجود معها في الوسط نفسه. وعلى عكس الملوثات البيئية الأخرى مثل PCB و DDT و PCP وغيرها لا تُصنع أبداً المركبات PCDDs و PCDFs بشكل مقصود أو بغية استخدامها صناعياً، وإنما تتشكل كنواتج مرافقة للعديد من الأنشطة الصناعية مثل عملية تصنيع بعض مركبات الكلور العضوية (وهي مركبات عضوية تحتوي على الأقل رابطة تشاركية واحدة من الكلور) أو أثناء عملية تصنيع بعض مبيدات الأعشاب مثل 4-dichlorophenoxyacetic acid، 2 والمبيد 2،4،5-

trichlorophenoxyacetic acid، وتنتج أيضاً عن عملية ترميد المواد الكيميائية التي تحتوي في تركيبها على عنصر الكلور مثل مركب (PVC) Polyvinyl chloride وهو مادة بلاستيكية بوليميرية، وتنتج كذلك مركبات PCDDs و PCDFs عن عملية تبييض الأوراق وعملية صهر المعادن وغيرها من العمليات. كما تنشأ هذه المركبات من مصادر طبيعية مثل البراكين وإحتراق الغابات. وتُعتبر مركبات PCDDs/ PCDFs مسرطنة وتتراكم حيوياً في الجسم بسبب خواصها المحبة للدهون وأكثَر الطرائق التي تؤدي لتعرض الإنسان لهذه المركبات هي الحماية الغذائية وبشكل أساسي تناول اللحوم والحليب والأسماك والبيض وكل المنتجات المرتبطة بها. كما وتتراكم في التربة والرواسب وفي أحياء البيئة المختلفة Biota بما تحتويه من كائنات حية حيوانية ونباتية. وقد يتم التعرض لمركبات الفيوران مباشرة عبر استنشاقها من الجو أو من خلال تماسها مع الجلد وخاصةً في المواقع الملوثة بإحدى مركباتها مثل قطران الفحم coal tar.

٣.٤. الخواص الفيزيا- كيميائية للملوثات العضوية المديدة POPs:

إلى جانب سميتها العالية وقابليتها المتوسطة للتطاير وميولها الكبير للارتباط مع الليبيدات Lipophilicity، تتصف المركبات POPs بمعامل تجزئة أوكتانول/ماء عالي نسبياً ومعدل ذوبان منخفض في الماء وكتلة مولية كبيرة وثباتية عالية. لذلك تميل هذه المركبات لمقاومة التحلل الميكروبي وتتراكم في الأنسجة الدهنية للكائنات الحية، كما يسبب انخفاض قدرتها على الاستقلاب استمرارية لبقائها في السلسلة الغذائية.

ويُعتبر تحديد معامل الادمصاص بهدف دراسة الخواص الفيزيا-كيميائية للمركبات POPs غير كافٍ نظراً لميول تلك المركبات للارتباط مع الليبيدات Lipophilicity من جهة، وقابليتها نحو التطاير والتصعيد Volatility من جهة أخرى، لذا ينبغي الاعتماد على قرائن أو معاملات أخرى من أهمها معامل التجزئة أوكتانول/ماء (k_{ow}) أو معامل التجزئة أوكتانول/كربون (k_{oc}) أو معامل التجزئة أوكتانول/هواء (k_{oa}) بالإضافة إلى ثابت هنري ($k'H$). تشير معاملات التجزئة السابقة بأنواعها الثلاثة إلى مدى قدرة المركب العضوي على الذوبان في الكحول (الأوكتانول) أو الماء أو الكربون أو الهواء، في حين يُعد ثابت هنري ($k'H$) أفضل قرينة لقياس قدرة المركب على التطاير في ظروف التربة الرطبة. ويبين الجدول (٩) بعض الخواص الفيزيا- كيميائية لعدد من المركبات العضوية المديدة الأساسية PAHs، PCBs، CBs، PCDD/Fs التي توجد في الترب الملوثة.

الجدول (٩) الخواص الفيزيا-كيميائية لبعض المركبات العضوية.

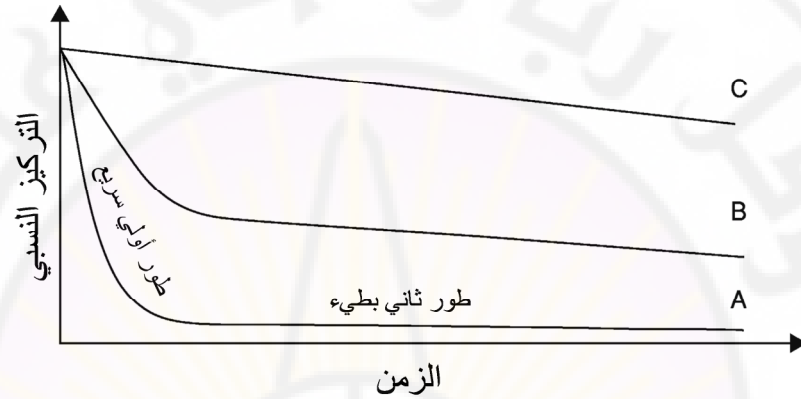
المركب	$\log k_{ow}$	$\log k_{oc}$	$\log k_{oa}$	$k'H$
المركبات CBs				
HCB	5.5	5.25	7.07	2.72×10^{-2}
المركبات PAHs				
Naphtalene	3.37	3.14	5.13	1.74×10^{-2}
Phenathrene	4.57	4.4	7.45	1.31×10^{-3}
Benzo[a]pyrene	6.04	6.24	10.77	1.86×10^{-5}
Coronene	6.75	6.4	13.51	1.72×10^{-7}
المركبات PCDDs				
8-TCDD، 7، 3، 2	6.8	6.2	9.67	1.35×10^{-3}
OCDD	8.2	6.97	11.76	2.76×10^{-4}
المركبات PCBs				
PCB-18	5.72	5.15	7.43	1.95×10^{-2}
PCB-52	5.83	4.99	7.59	1.75×10^{-2}
PCB-101	6.3	6.3	8.36	8.74×10^{-3}
PCB-138	6.69	6.24	8.69	1.00×10^{-3}
PCB-206	7.94	6.66	10.19	5.59×10^{-3}

$\log K_{ow}$: لغاريتم معامل التجزئة اوكتانول/ماء، $\log K_{oc}$: لغاريتم معامل التجزئة اوكتانول/كربون، $\log K_{oa}$: لغاريتم معامل التجزئة اوكتانول/هواء، $K'H$: ثابت هنري.

٤.٤. سلوك المركبات POPs في التربة وديمومتها:

بغض النظر عن ماهية الطريقة الرئيسية لفقد المركبات العضوية من التربة، فإن الفقد الكلي لتلك المركبات يُعتبر ثنائي الطور. أي يتعرض المركب العضوي لفقد أولي سريع خلال فترة زمنية قصيرة يتبعه غالباً فقد بطيء يمتد فترة أطول من الزمن. ومن المعتقد أن العوامل الأولية التي تتحكم بهذا السلوك ثنائي الطور هي آليات ادمصاص وإزاحة أساسية تدير بدورها عملية توزيع وانتشار المواد الكيميائية بين طوري التربة الصلب والسائل. ويرتبط بشكل عام بقاء المركبات العضوية وفقدانها الكلي من التربة بكل من الخواص الفيزيا-كيميائية للتربة وللمركبات العضوية

من جهة، والعوامل البيئية المختلفة (مثل درجة الحرارة والهطول المطري) والعوامل المتعلقة بالنشاط البشري (كالزراعة ومعاملة التربة) من جهة أخرى. وتسلك عموماً المركبات العضوية غير الأيونية خلال تلاشيها وفقدانها من الوسط ثلاثة أنواع من المسارات التي تختلف فيما بينها تبعاً للخواص الفيزيائية- كيميائية لتلك الملوثات وخاصة قدرتها على التطاير أو الذوبان في الماء كما يبين الشكل (٣٧).



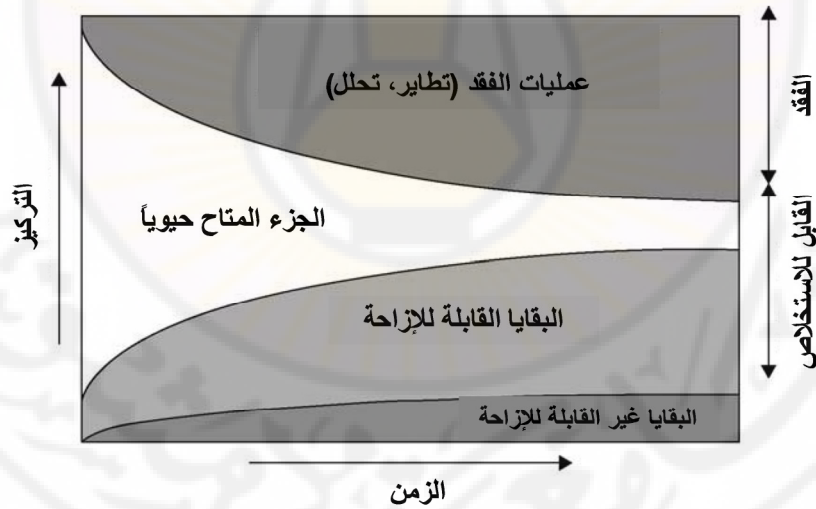
الشكل (٣٧) مسارات فقد المركبات العضوية غير الأيونية من التربة

يصف المنحنى (A) ثنائي الطور فقد الملوث العضوي الذي يتميز بنصف عمر قصير إذ يبدي فقد سريع نسبياً لجزء كبير من كمية المركب في التربة وخلال زمن قصير. وتعد المركبات القابلة للتطاير وتلك القابلة للذوبان في الماء والمركبات سهلة التحلل أو التي تجمع بين هذه الخواص من أهم المركبات التي تسلك المنحنى A مثل المواد الهيدروكربونية العطرية الطيارة والبنزن ضعيف الكلورة. ويميز هذا المنحنى تلك المركبات التي تتصف بقدرة ادمصاصية متوسطة في التربة. بالمقابل، يقع في الجهة الأخرى من الشكل (٣٧) المنحنى (C) أحادي الطور والذي يمثل فقد وتلاشي كل من المركبات العضوية غير القابلة للتطاير والمركبات غير القابلة نسبياً للذوبان في الماء والمركبات التي تُظهر مقاومة عالية للتحلل الميكروبي. وتتميز هذه المركبات بقوة ادمصاصها على مكونات التربة حيث تمكث فيها لفترات زمنية طويلة مثل المركبات PCDDs والمركبات PCDFs. ويقع المنحنى الثالث (B) بين المنحنيين السابقين ويشبه بشكل أساسي المنحنى (A) في السلوك العام ولكن يختلف عنه بطول طور الفقد الأولي. يميز هذا المنحنى ثنائي الطور عموماً الجزء الأكبر من المركبات العضوية الموجودة في التربة الملوثة. وتقود هذه

المسارات إلى تشكيل ما يُسمى الجزء المتبقي المديد "PRF" Persistent Residual Fraction في التربة. ويتحدد حجم هذا الجزء بشكل كبير من خلال الخواص الفيزيائية- كيميائية لكل من المركب والتربة، ويبدى غالباً منحنى فقد ثنائي الطور.

٥.٤. زمن مكوث الملوثات المديدة في التربة:

يخضع المركب العضوي غير الأيوني الذي يدخل التربة إلى مجموعة من العمليات التي تقود إلى فقدته من الوسط كما يبين الشكل (٣٨). وتشمل هذه العمليات: الغسل، التطاير، التحلل الكيميائي والحيوي، والامتصاص من قبل جنور النباتات بالإضافة إلى عمليات النقل والادمصاص. وقد تؤدي هذه الأخيرة إلى ارتباط المركب العضوي وبشكل غير قابل للإزاحة بالبنية الأساسية للتربة أو ما يُدعى بحشوة التربة soil matrix. وتزداد بذلك صعوبة استخلاص المركب عبر تقنيات الاستخلاص التقليدية. وبالتالي، عندما يزداد زمن مكوث المركبات العضوية في التربة تزداد صعوبة استخلاصها، وتُعرف هذه الظاهرة باسم تأثير زمن المكوث aging effect ويترافق هذا التأثير مع انخفاض في كل من الجاهزية الحيوية للمركب وفاعلية استخلاصه.



الشكل (٣٨) حركية المركبات العضوية المديدة غير الأيونية في التربة

يُشير الشكل (٣٨) إلى أنَّ انخفاض القدرة على استخلاص المركبات العضوية المرتبطة مع التربة يعود جزئياً إلى تشكيل بقايا مرتبطة ضمن حشوة التربة غير قابلة للإزاحة، وإنَّ تطور هذه

البقايا خلال زمن المكوث يُعتبر العامل الرئيسي المحدد في عملية تشكيل الأجزاء المتبقية المديدة PRF للمركبات العضوية في التربة.

٦.٤. الآليات التي تساهم في تشكيل الأجزاء المتبقية المديدة في الترب:

يوجد مجموعة من العمليات التي تشترك في تأثيرها في عملية تشكيل الأجزاء المتبقية المديدة في التربة وفي زمن مكوثها أيضاً. ويمكن أن تُقسم تلك العمليات إلى آليات النقل وآليات الادمصاص.

أولاً- آليات النقل:

وهي تلك الآليات التي تخضع فيها عمليات ادمصاص وإزاحة المركبات العضوية لتأثير جريان الماء في التربة، وترتبط هذه العمليات بشكل رئيسي بخواص التربة الفيزيائية مثل القوام والبناء التي تدير عمليات جريان الماء وانتقال الملوثات. كما وتلعب أيضاً خواص الملوثات في التربة كالتركيز وشكل تواجدتها الكيميائي وقابليتها للذوبان في محلول التربة أو قابليتها للتطاير دوراً هاماً في آلية إنتقالها ضمن التربة (وسنتناول آليات النقل بالتفصيل في الفصل الخامس).

ثانياً- آليات الادمصاص:

تُعد طبيعة آليات الادمصاص وأثرها في بقاء الملوثات العضوية في التربة أقل وضوحاً من آليات النقل، حيث تُشير الدراسات إلى العديد من الاختلافات حول مدى مساهمة هذه الآليات في البقاء المديد للمركبات العضوية غير الأيونية في التربة. ويمكن أن نميز بشكل عام نوعين من آليات الادمصاص هما: آلية الادمصاص الكيميائي وآلية الإنتقال بالإنتشار.

آلية الادمصاص الكيميائي:

يحدث الادمصاص الكيميائي عندما تتفاعل المجموعة الوظيفية للمركب العضوي مع الأجزاء القابلة للتفاعل لمكونات التربة الصلبة، ويتم ذلك من خلال تشكيل روابط كيميائية وخاصةً من النوع التشاركي covalent bonds. تؤدي هذه التفاعلات إلى تشكيل جزء يدمص بقوة في التربة وبشكل غير عكوس (أي غير قابل للإزاحة) حتى مع استخدام محاليل استخلاص عالية الفعالية. يُعرف هذا الجزء في علم المبيدات باسم البقايا المحصورة أو المقيدة bound residue. ولكن على اعتبار أن الملوثات القابلة للتأين مثل المبيدات هي وحدها التي تخضع للادمصاص الكيميائي على عكس الملوثات العضوية المديدة غير الأيونية التي تكون في الغالب أقل ميولاً لتشكيل روابط كيميائية مع مكونات التربة الصلبة بسبب عدم احتوائها على مجموعات

وظيفية قطبية. لذلك من غير المحتمل أن يكون الادمصاص الكيميائي هو العامل المحدد والمسؤول عن ديمومة وبقاء المركبات العضوية وخاصةً المركبات الكارهة للماء في التربة. ولكن، يمكن لعمليات التحلل الحيوي التي تجري في التربة أن تغير من تركيب المواد العضوية غير الأيونية بحيث تصبح أكثر ميولاً للتأثر بعملية الادمصاص الكيميائي. فقد أظهرت بعض الدراسات أن الأكسدة الجزئية للمركبات العضوية الهيدروكربونية (PAHs) بواسطة عمليات التحلل الحيوي تعطي نواتج استقلابية لها قابلية للادمصاص الكيميائي غير العكوس.

آلية الانتقال بالانتشار:

لا تتعلق هذه الآلية بالحركة البراونية Brownian motion لجزيئات المادة الكيميائية، ولا تخضع كذلك لقانون فيك للانتشار، بل تشير بالأحرى إلى انتشار للجزيئات ضمن الوسط يرتبط بشكل مباشر بقابليتها للادمصاص والإزاحة على مكونات التربة. لذلك لا يُنظر لتلك العملية كظاهرة فيزيائية فقط بل كظاهرة فيزياء- كيميائية. ويشمل هذا النوع من الآليات أربعة نماذج مختلفة وهي:

١- الانتشار عبر الأغشية المائية Films diffusion:

ويُعبّر هذا النوع عن انتشار المركب العضوي ضمن الأغشية المائية التي تحيط بحبيبات التربة، وهو يرتبط بالمقاومة التي يواجهها المركب أثناء عبوره للغشاء المائي الرفيع الذي يحيط بمكونات الطور الصلب للتربة أو بتجمعاتها الحبيبية، أو أثناء الانتقال من الطور الصلب نحو الطور السائل أو الغازي. ويُعدّ عموماً هذا النوع من الانتشار ضعيفاً ومهملاً بالمقارنة مع غيره من أنواع الانتشار.

٢- الانتشار عبر مسام التربة Pores diffusion:

وهو يشير إلى الانتشار الجزيئي للمركبات العضوية ضمن مسام التربة داخل التجمعات الحبيبية. وفيما يتعلق بدور هذين النوعين من الانتشار (عبر الأغشية وعبر المسام) في تكوين الأجزاء المتبقية من المركبات العضوية في التربة، فقد بينت بعض الدراسات الحديثة ضعف مساهمة هذين النوعين لذلك يمكن إهمال دورهما بشكلٍ كامل.

٣- الانتشار المتأخر ضمن حبيبات التربة Retarded intraparticle diffusion:

تُعرّف عملية الانتشار ضمن حبيبات التربة على أنها انتشار جزيئات الملوثات الذائبة في محلول التربة ضمن المسام الدقيقة لحبيبات التربة الناعمة. وتأتي عملية انتشار هذه الجزيئات داخل المسام الدقيقة كعملية لاحقة لعملية ادمصاص فوري وموضعي للجزيئات على الجدر الداخلية للمسام ، لذلك يُدعى هذا النوع بالانتشار الجزيئي المتأخر. وتشبه هذه العملية إلى حد بعيد

عملية فصل كروماتوغرافي chromatographic للمواد الكيميائية حيث تنتشر هذه المواد تدريجياً على طول المسام. ويمكن ملاحظة هذه العملية بشكل واضح في المسام المتوسطة الحجم. وقد يزيد من وتيرة هذه العملية حدوث ادمصاص آخر للمركبات ضمن المادة العضوية التي تغلف وتبطن جدر المسام من الداخل. ويُعتبر هذا النوع من الادمصاص في حال حدوثه قابلاً للانعكاس ولكن بشكل ضعيف مما يساهم ذلك في تشكيل الأجزاء المتبقية في التربة.

وتحدث عملية انتشار الملوثات العضوية ضمن حبيبات التربة على عدة مراحل يمكن توضيحها بالشكل (٣٩) الذي يصف انتشار المركب benzo(a)pyrene وهو أحد الملوثات الهيدروكربونية (PAH). أثناء دخول المركب benzo(a)pyrene مسام التربة ينتشر تدريجياً على طول هذه المسام بدءاً من المسام المتوسطة mesopores ثم المسام الدقيقة micropores لينتهي بالانتشار في المسام الدقيقة للغاية التي يبلغ قطرها بضعة انغسترومات والتي يزيد حجمها عن حجم جزيئة المركب الملوث (شكل ٣٩ -a). يكون غالباً الانتشار بطيئاً في المسام الضيقة بسبب اللزوجة العالية التي يبديها ماء مسام التربة، ويمكن ملاحظة ذلك عند الفلزات القطبية إذ تمتلك هذه الفلزات طبقة أو أكثر من الماء الذي يحيط بسطوحها بقوة. حيث تزيد هذه الطبقات لزوجة الماء وتُضعف بشكل كبير عملية الانتشار الجزيئي للمركبات ضمن المسام الدقيقة جداً من رتبة النانومتر.

ومن ناحية أخرى، يمثل تعرج مسام التربة بشكل متزايد عاملاً هاماً في تأخير انتشار الملوثات أو إزاحتها عن سطوح ادمصاصها، فعندما يتناقص قطر السُم يزداد تعرجه مما يعيق لاحقاً عمليات الانتشار أو الإزاحة. ويزداد دور المسام في تأخير عملية الإزاحة كلما زاد تعرجها وقل قطرها. كما ويؤدي تعاقب حدوث عمليتي ترطيب وتجفيف التربة إلى تمدد وتقلص البنية الشبكية lattices لفلزات الطين (شكل ٣٩ -d)، مما يسبب انهيار فيزيائي للمسام يقود إلى حجز فيزيائي لجزيئات المركب في المسام ضمن ممرات مغلقة (شكل ٣٩ -e).



الشكل (٣٩) شكل توضيحي يبين عملية انتشار المركب benzo(a)pyrene ضمن حبيبات التربة.

يمثل الشكل السابق بالنتيجة سلسلة من الخطوات التي تقيد انتشار الملوثات العضوية وتؤخر عملية إزاحتها مما يقود إلى تشكيل أجزاء متبقية منها في التربة. تتصف تلك الأجزاء بعدة خواص من أهمها عدم تيسرها حيويًا وكيميائيًا. ولكن هذه الحالة ليست دائمة فقد يؤدي التحطم الفيزيائي لتجمعات التربة إلى تحرير تلك المركبات من جديد أو يزيد بالأحرى من جاهزيتها الحيوية والكيميائية. ويعمل كذلك انخفاض pH التربة بدوره على إذابة الأكاسيد المعدنية التي

ترتبط التجمعات الحبيبية مع بعضها البعض مما يساهم في تحرير المركبات العضوية المحتجزة نحو الوسط.

٤- الانتشار ضمن المادة العضوية *Intraoraganic matter diffusion*:

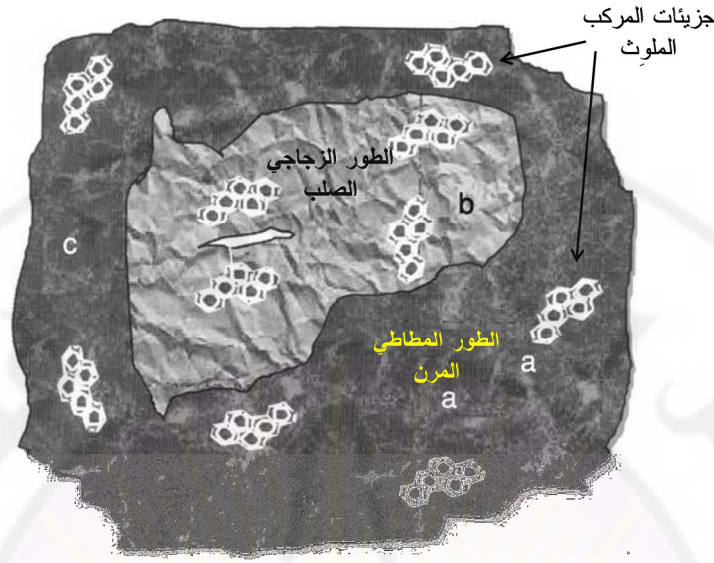
يُعد الانتشار ضمن المادة العضوية العامل الهام الآخر الذي يدخل في عملية إدمصاص أو إزاحة المركبات العضوية المديدة من التربة. يمكن أن توجد المادة العضوية في التربة على شكل أغشية سطحية تغلف مكونات التربة أو أغلفة تبطن الجدر الداخلية للمسام أو على شكل حبيبات منفصلة. ومن المحتمل أن يكون هذا النوع من الانتشار هو العملية الأولية المحددة لتشكيل الأجزاء المتبقية المديدة في الترب عالية المحتوى من المادة العضوية. ولكن بما أن الإدمصاص يحدث أيضاً في الترب قليلة أو عديمة المحتوى من المادة العضوية فيمكن القول إن هذه العملية ليست هي وحدها المسؤولة عن تشكيل الأجزاء المديدة.

من ناحية أخرى، يُنظر لهذه العملية على أنها عملية انتشار بطيئة ضمن حشوة المادة العضوية التي تبدو كشبكة من البوليميرات. وتتملك هذه البوليميرات نوعين من البنى هما: بنية صلبة (كثيفة أو زجاجية) وبنية أخرى مرنة مطاطية (متمددة أو مطاطية) كما يبين الشكل (٤٠). يكون انتشار المركبات العضوية في البنى الصلبة بطيئاً (الشكل ٤٠-ب)، بينما في البنى المرنة يكون الانتشار خلالها أسرع (الشكل ٤٠-ا). ويحدث الانتشار في تلك البوليميرات وفق نوعين من الآليات:

١. آلية تغيير الموقع، وتتم الحركة فيها من خلال تبادل داخلي للموقع ضمن أجزاء من البوليمير حيث ينتهي بدخول الجزيئة ضمن بوليمير المادة العضوية.

٢. أو من خلال آلية إملء النقص (الفراغ) حيث تقفز جزيئة الملوث الداخلة لبنية البوليمير متقلبة بين أماكن النقص الموجودة في بنيته الشبكية أو بين ما يحتويه من فراغات ومسام.

وإلى جانب هذين النوعين من الآليات، يمكن أن تخضع بعض المركبات للإدمصاص من نوع لانغمير *Langmuir* وذلك في الفراغات الداخلية ضمن حشوة المادة العضوية.



الشكل (٤٠) عمليات الانتشار البطيء، (a) انتشار خلال الطور المطاطي، (b) انتشار خلال الطور الزجاجي، (c) ادمصاص من نوع لانغمير Langmuir.

وبالرغم من أن عمليات الانتشار البطيئة هذه تقود إلى تشكيل مركبات محمية فيزيائياً، لكن يمكن وصفها مع ذلك بأنها عمليات مؤقتة لأنها قد تتعرض لتأثير بعض العوامل البيئية (مثل ارتفاع درجة الحرارة أو التغير في درجة الحموضة أو وجود بعض المذيبات) التي تساهم في انتفاخ أو انكماش حشوة المادة العضوية محولة إياها من حالة صلبة إلى حالة لينة، الأمر الذي يسرع عملية انتشار المركبات المرتبطة بقوة مع المادة العضوية في الوسط.

يمكن القول أن تعاضد كلا العمليتين السابقتين (الانتشار المتأخر ضمن حبيبات التربة والانتشار ضمن المادة العضوية) له الدور الأساسي في تشكيل الأجزاء المتبقية المديدة من الملوثات العضوية في التربة والتي تُعتبر غالباً غير متاحة كيميائياً أو حيويّاً والآليات التي تقود إلى تشكيلها هي غالباً مؤقتة. ولا بدّ من الأخذ بعين الاعتبار الجاهزية الحيوية لتلك المركبات في التربة، لأنّ انتشارها في الوسط ربما يتأثر بشكل أو بآخر بالظروف والعوامل البيئية المختلفة كما سنرى لاحقاً.

٧.٤. الجاهزية الحيوية للمركبات POPs في التربة:

يُقصد بالجاهزية الحيوية Bioavailability بشكل عام بأنها "مدى تيسر المركب أو العنصر للامتصاص من قبل الكائن الحي". يشمل هذا التعريف الواسع تيسر المركب لكل من النباتات والكائنات الحية الدقيقة عبر مجموعة متنوعة من الطرائق. وترتبط بشدة كبيرة جاهزية المركبات العضوية للدخول إلى السلسلة الغذائية انطلاقاً من التربة بشكل وجودها في الوسط والذي يتأثر بدوره بعدة عوامل تشمل كل من زمن مكوث المركب في التربة، والخواص الفيزيا- كيميائية لكل من المركب والتربة، وكيفية دخول المركب للتربة. ولجاهزية المركبات العضوية في التربة أهمية كبرى إذ أنها تؤثر في مدى الخطورة البيئية التي تحملها وفي القدرة الكامنة في معالجة الموقع الملوث بتلك المركبات.

وتُعد عموماً المركبات POPs متاحة حيوياً وبشكل كامن للعديد من الكائنات الحية، وسنستعرض هنا الجاهزية الحيوية للمركبات POPs لبعض الكائنات الحية ومنها: النباتات، البكتيريا، والحيوانات العاشبة والحيوانات اللافقرية وبشكل خاص ديدان الأرض.

جاهزية المركبات POPs للنباتات:

تُعتبر عموماً عملية إنتقال المركبات العضوية غير الأيونية من الجذور إلى الأوراق مهمة، ويُعزى ذلك إلى انخفاض نسبة ذوبانها في الماء وإلى ارتفاع قيمة معامل التجزئة أوكتانول/ماء إضافةً إلى الارتباط القوي الذي تبديه العديد من هذه المركبات مع حبيبات التربة أو مع المادة العضوية، ولذلك توجد هذه المركبات بتركيز ضئيلة جداً في أجزاء النباتات القابلة للاستهلاك من قبل الإنسان والحيوان. وامتصاص النباتات للملوثات الموجودة في الهواء المحيط على شكل أبخرة عبر أجزائها الخضرية يَغلِبُ في الواقع على عملية امتصاصها للمركبات العضوية غير الأيونية انطلاقاً من التربة. وبالرغم من التراكيز المرتفعة للملوثات غير الأيونية في التربة إلا أنها نادراً ما تكون متاحة للانتقال من التربة إلى النبات عبر الجذور، ولكن في الترب شديدة التلوث بتلك المركبات يمكن وجود تراكيز مرتفعة نسبياً منها في الأعضاء النباتية الهوائية مثل الأوراق.

جاهزية المركبات POPs للأحياء الدقيقة:

تشكل جاهزية المركبات العضوية لأحياء التربة الدقيقة عاملاً محدداً في غاية الأهمية وخصوصاً أثناء عملية المعالجة الحيوية أو الانخماد الطبيعي للتربة الملوثة. حيث يمثل التحلل الحيوي الميكروبي العملية الأساسية التي تؤثر في ديمومة وبقاء المركبات POPs في التربة. ويمكن أن يختلف بشكل كبير مدى جاهزية المركبات POPs للبكتيريا في العديد من التربة حتى تحت ظروف نمو مثالية متماثلة.

ويملك الادمصاص تأثيراً هاماً في الجاهزية الحيوية للمركبات العضوية وخاصةً الكارهة للماء hydrophobic، فقد لوحظ انخفاض معدلات تحلل هذه المركبات في الوقت الذي يبدي زيادة في السعة الإدمصاصية للتربة. ومن ناحية أخرى. يمكن أن يظل الجزء المتبقي المديد من المركبات POPs غير متيسر لبكتيريا التربة حتى بعد معالجة التربة، ويمكن أن يُعزى ذلك إلى الهجرة البطيئة لجزء كبير ومتزايد من هذه المركبات إلى كل من الجزء العضوي للتربة والجزء المعدني مع الزمن مما يُضعف بالتالي من جاهزيتها الحيوية.

وكما ذكر سابقاً، تنخفض جاهزية المركبات POPs مع زيادة فترة مكوثها في التربة، وبالتالي قد يقلل زمن المكوث من فعالية المعالجة الحيوية للتربة. وإضافة إلى ذلك يمكن أن تقلل الجاهزية الحيوية المنخفضة لتلك المركبات العتبة السمية البيئية الكامنة في التربة. وتأتي أهمية قياس الجاهزية الحيوية للمركبات العضوية في التربة بكونها تُمكن من تحديد مدى ملائمة التربة الملوثة للمعالجة الحيوية من جهة وتحديد العتبة السمية البيئية التي تبديها هذه التربة من جهة أخرى.

جاهزية المركبات POPs للحيوانات العاشبة:

يمكن أن تتناول الحيوانات العاشبة أثناء رعيها للأعشاب في الحقول كمية من التربة تتراوح نسبتها من ١ إلى ١٨% من كمية المادة الجافة الكلية التي يتناولها الحيوان، وتتباين هذه النسبة تبعاً لظروف المرعى وطبيعة ونوع الأعشاب. وبالتالي من المحتمل أن تمثل التربة المهضومة من قبل الحيوانات المجترّة ممراً أساسياً لانتقال الملوثات العضوية لأجسامها انطلاقاً من التربة. وتُعد الكمية الكلية الممتصة من المركبات العضوية من قبل الحيوانات الداجنة العاشبة نسبياً منخفضة. وبالإضافة إلى ذلك، وبسبب الانتشار البطيء للمركبات POPs في التربة يكون الجزء المتاح لتلك الحيوانات أقل بكثير من ذلك الجزء المحسوب على أساس وزن المركب بالنسبة إلى وزن التربة.

جاهزية المركبات POPs لديدان الأرض:

توجد ديدان الأرض بأعداد كبيرة للغاية وخاصةً في أراضي مراعي الماشية حيث يمكن أن تصل كتلتها إلى ٢٧٢ غ/م^٢، وتستطيع دودة الأرض الواحدة أن تهضم سنوياً كمية من التربة أكبر من وزنها بحوالي ٤٠٠ مرة. وبفضل كثافتها العالية ونشاطها الكبير، يمكن لديدان الأرض أن تقوم سنوياً بتدوير حوالي ٢٥ % من حجم طبقة التربة السطحية، وبالتالي يشكل وجودها أهمية بالغة في حركية وديمومة المركبات العضوية في التربة.

وتُخزن دودة الأرض المركبات POPs في جسمها الذي يحتوي على كمية مرتفعة نسبياً من الليبيدات. ويمكن للديدان أن تسرع في تحرير بعض البقايا العضوية المدمصة في التربة وذلك من خلال تعرض التربة عند مرورها عبر الجهاز الهضمي لتأثير أنزيمات الهضم الفعالة (العصارات المعدية المعوية Gastrointestinal). ومن ناحية أخرى، تمثل ديدان الأرض ممراً هاماً لدخول المركبات POPs السلسلة الغذائية. فديدان الأرض التي هي عملياً في حالة تماس فيزيائي دائم مع التربة قد تُراكم كميات كبيرة من المركبات POPs في أجسامها مقارنةً مع تربة الوسط المحيطة بها، وربما لا تكون هذه التراكيز عالية بما يكفي لتسبب سمية حادة أو مزمنة للديدان.

هذا وتتغذى العديد من الأنواع الحيوانية على ديدان الأرض وبالتالي ستتراكم المركبات المحبة للليبيدات في دهون أجسامها، ويقود ذلك بطبيعة الحال إلى زيادة حمولة الجسم من المركبات POPs وزيادة بالمقابل في المستوى الغذائي Trophic level ضمن السلسلة الغذائية. وتُعرف هذه الظاهرة بإسم التضخم الحيوي Biomagnification التي ربما تقود إلى أعراض السمية عند بعض الكائنات الحية وخاصةً تلك التي لا توجد على تماس مباشر مع مركبات التربة POPs.

الفصل الخامس

آليات التلوث والتأثيرات المتبادلة بين التربة والملوثات

Pollution Mechanisms and Soil-Polluants Interaction

يناقش هذا الفصل سلوك الملوثات في بيئة التربة من حيث العمليات المختلفة التي تشترك فيها تلك الملوثات من جهة والآليات المختلفة التي تساهم في تلوث التربة من جهة أخرى. كما ويتناول أيضاً التأثيرات العامة والنوعية للملوثات بمختلف أنواعها وصفوفها في بيئة الأحياء الدقيقة للتربة من حيث وظيفة المجتمع الميكروبي وتركيبه.

أولاً- آليات التلوث

Pollution Mechanisms

١.١.٥. المقدمة:

يشمل سلوك الملوثات والتأثيرات المتبادلة بينها وبين التربة عمليات مختلفة مثل العمليات الفيزيائية والكيميائية والحيوية التي تحدث في التربة بأطوارها الثلاثة (الصلب والسائل والغازي). يمكن أن تتوزع هذه العمليات على ثلاث مجموعات أساسية وهي:

- الادمصاص واحتفاظ التربة بالملوثات.
- انتقال الملوثات في الوسط.
- التفاعلات الكيميائية وتشمل كل من التحولات الكيميائية الأنزيمية والتحلل المائي (الحلمأة) وتفاعلات الأكسدة والإرجاع.

تتضمن المجموعتان الأولى والثانية بشكل رئيسي عمليات فيزيائية وكيميائية تنتقل من خلالها الملوثات وتتوزع في التربة أو تحتجز في فراغاتها البينية *interstitial spaces*، وتعتمد هذه العمليات بشكل أساسي على بعض المتغيرات الفيزيائية التي تميز الوسط مثل درجة الحرارة وقوام التربة والمحتوى الرطوبي وسرعة جريان الماء. بينما تصف المجموعة الثالثة العمليات الكيميائية والحيوية والكيميا-حيوية التي تتحول من خلالها الملوثات من شكل لآخر في التربة. وبالنسبة للعمليات الحيوية فهي تشمل عمليات التحول الحيوي *Biotransformation* وعمليات التحلل

الحيوي Biodegradation التي تعتمد جميعها على ظروف بيئة الأحياء الدقيقة في التربة وعمق الملوثات في التربة وعلى تركيز الأكسجين عند ذلك العمق. ويمكن تلخيص مجمل الآليات التي تساهم في تلوث التربة في الشكل (٤١).

وفيما يلي سنستعرض بعض أهم هذه الآليات مثل احتفاظ التربة بالملوثات وانتقالها ضمن الوسط وبالإضافة إلى التحولات الكيميائية التي يمكن أن تعترضها أثناء وجودها في التربة.



الشكل (٤١) آليات تلوث التربة.

٢.١.٥. احتفاظ التربة بالملوثات:

يمكن تمييز نوعين من طرائق احتفاظ التربة بالملوثات هما: احتفاظ بالملوثات عن طريق الادمصاص واحتفاظ عن طريق الحجز الفيزيائي دون ادمصاص.

١.٢.١.٥. احتفاظ التربة بالملوثات عن طريق الادمصاص **Adsorptive retention**:

ليس بالإمكان عموماً التمييز بين عملية الإدمصاص adsorption وهي ظاهرة تتعلق بالسطوح وعملية الامتصاص absorption التي يخترق بواسطتها الملوث البنية الأساسية لركيزة الإدمصاص كالمادة العضوية أو غيرها ويستقر فيها. ويُشار إلى كلا العمليتين بعملية واحدة تُدعى sorption. ويمكن أن تحتفظ التربة بالملوثات على سطوح حبيباتها من خلال نوعين من الادمصاص:

- الادمصاص الفيزيائي: وفيه ترتبط جزيئات الملوثات بسطوح حبيبات التربة عن طريق قوى فاندرفالس Van der Waal، وهي قوى ضعيفة نسبياً ويزداد ضعفها مع ازدياد المسافة التي تفصل جزيئات الملوثات عن سطوح الادمصاص. وبالتالي تكون كمية الطاقة الداخلة في هذه الارتباط ضئيلة وقليلة الأهمية. وفي هذا النوع من الادمصاص تبقى الجزيئات المدمصة على السطوح محتفظة بهويتها الكيميائية، بالرغم من أنها قد تمتد لتشغل مساحات كبيرة من تلك السطوح.

- الادمصاص الكيميائي: وفيه ترتبط جزيئات الملوثات على سطوح حبيبات التربة عبر تشكيل روابط كيميائية تشاركية. وفي هذه الحالة تكون طاقة الارتباط بين الجزيئات وسطوح الادمصاص أعلى بكثير من تلك الموجودة في حالة الادمصاص الفيزيائي. وبترافق هذا الادمصاص مع تعديل في توزيع الشحنات الكهربائية لكل من الجزيئات المدمصة وسطوح الادمصاص، وتفقد بموجبه الجزيئات هويتها الكيميائية بسبب إعادة ترتيب ذراتها. ويتوقف مقدار قوى الادمصاص الكيميائية على كل من مساحة سطح ركيزة الادمصاص وتركيز الملوثات في محلول التربة ودرجة حرارة الوسط. وتصل عملية الادمصاص إلى التوازن عندما يتساوى تركيز الجزيئات المدمصة وتركيز الجزيئات الحرة في الوسط. وعند توقيع كمية المادة المدمصة مقابل الكمية الذائبة في محلول التربة نحصل على منحنى يُدعى منحنى الادمصاص متساوي الدرجة adsorption isotherm.

وبالرغم من صعوبة التمييز بين نوعي الادمصاص السابق الذكر، يمكن القول إن كمية المادة المدمصة فيزيائياً تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة ولكن هذه العلاقة تنعكس في حالة المواد التي تدمص كيميائياً. يوجد عادةً العديد من ركائز الادمصاص في التربة مثل معادن الطين وأكاسيد الحديد والمنغنيز المائية وهيدروكسيدات الألمنيوم والمواد الهيومية والمفرزات البكتيرية (مثل المواد

المخاطية). وتعتمد عادةً الشحنة التي يمتلكها سطح الاممصااص في نوعها وأهميتها على تركيب محلول التربة وعلى طبيعة هذا السطح. وتتجذب الملوثات المتأينة نحو سطوح ركيزة الاممصااص تحت تأثير الشحنات الكهربائية للسطح، بينما الملوثات غير المتأينة فيمكن أن تدمص على حبيبات التربة بشكل رئيسي من خلال قوى كهربائية-ساكنة $electrostatic forces$. ومن أهم الملوثات التي يمكن أن تحتفظ بها التربة عن طريق الاممصااص المبيدات والمعادن الثقيلة، وفيما يلي سنتعرض على سبيل المثال عملية ادممصااص المبيدات من قبل التربة.

ادممصااص المبيدات في التربة:

تتجلى أهمية عملية ادممصااص المبيدات في التربة من خلال دورها الهام في تحديد سلوكها العام في الوسط. فالادممصااص القوي للمبيدات في التربة يحد من فقدها عن طريق الغسل بمياه الري أو الأمطار، ويقلل بالتالي من إمكانية انتقالها نحو المياه الجوفية. يُقاس عادةً ادممصااص من خلال تحديد معامل خاص يُدعى معامل ادممصااص K_d coefficient وذلك عند وصول النظام الذي يضم كل من التربة ومحلولها المائي لحالة التوازن الكيميائي خلال فترة معينة من الزمن. ويمكن حساب معامل ادممصااص الذي يُعبر عنه بالواحدة مل/غرام من العلاقة التالية:

$$K_d = (\text{تركيز المبيد المدمص} / \text{تركيز المبيد الذائب})$$

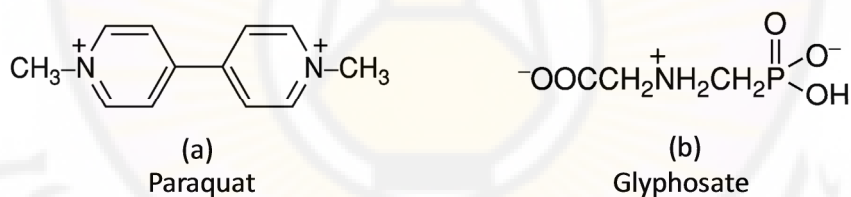
وتدمص بشكل كبير المبيدات الحامضية وغير المتأينة عن طريق الارتباط بالمادة العضوية، ويُنظر لهذه العملية بشكل أساسي كحالة توازن قابل للانعكاس، أي يمكن للمبيدات المدمصة أن تُزاح باتجاه محلول التربة ولكن تبقى عملية الإزاحة أبطأ إلى حد ما من عملية ادممصااص. ويهدف دراسة الاختلاف في سلوك ادممصااص المبيدات تبعاً لمحتوى التربة من المادة العضوية، يمكن قياس ما يُسمى معامل ادممصااص على المادة العضوية K_{om} أو على الكربون العضوي K_{oc} اللذين يرتبطان مع معامل ادممصااص في التربة K_d بالعلاقة التالية:

$$K_d = k_{om} \times (\% \text{ للمادة العضوية} / 100) = k_{oc} \times (\% \text{ للكربون العضوي} / 100)$$

وتتوقف إلى حدٍ بعيد قيمة معامل الامصاص بمدى قابلية المبيد للارتباط مع الليبيدات lipophilicity (أي الألفة للليبيدات). وفي هذا الإطار أُقترحت علاقات متعددة من أجل قياس الامصاص من خلال تحديد ألفة المبيدات للليبيدات وذلك من خلال معامل التجزئة K_{ow} بين الماء والاوكتانول، حيث اقترح Briggs في عام ١٩٨١ المعادلة التالية التي يمكن بواسطتها حساب معامل امتصاص المبيد على المادة العضوية للتربة:

$$\log K_{om} = 0.52 \log K_{ow} + 0.62$$

وبالرغم من بساطة وسهولة هذا العلاقة، يمكن الأخذ بها بشكل جدي في حساب معامل امتصاص المبيد في التربة من خلال الاعتماد على قيمة معامل تجزئة المبيد K_{ow} بين الماء والاوكتانول لمعظم المبيدات. وقد تدمص بعض المبيدات في التربة من خلال ما تملكه من مجموعات وظيفية تضيف بدورها امصاصاً إضافياً عبر تفاعلات نوعية مع ركيعة الامصاص. ويمكن أيضاً أن تدمص بعض المبيدات التي تحمل شحنة موجبة من خلال إزاحة المعدن في حشوة التربة soil matrix عبر عملية تبادل كاتيوني مثل مبيد الأعشاب باراكوات paraquat وهو عبارة عن جزيئة تحمل شحنتين موجبتين (الشكل ٤٢-أ)، حيث يدمص هذا المركب بقوة على المادة العضوية وحبيبات الطين. ففي الترب التي تحتوي فلز المونتموريونيت يمكن أن يدخل مبيد paraquat بين طبقات البنية البلورية وترتبط معها بإحكام.



الشكل (٤٢) بعض المبيدات المشحونة التي تخضع لعملية امتصاص شديدة من قبل التربة
(a) paraquat، (b) glyphosate.

ويوجد آلية أخرى من الارتباط تتم عبر تشكيل مركبات مخلبية chelation مع المعادن مثل الحديد والألمنيوم، كما هو الحال مع مبيد الأعشاب glyphosate (الشكل ٤٢-ب) الذي يحمل شحنة موجبة وأخرى سالبة. وبرغم من كون هذا المركب شديد القطبية والذوبان في الماء، فإنه يدمص بقوة في التربة نتيجة لتشكيل الشيلات من قبل المجموعات المشحونة.

ومن جهة أخرى، يمكن الاعتماد على قيم معاملات الامصاص المختلفة (K_d , K_{ow} , K_{om})، K_{oc} من أجل تصنيف قدرة المبيد على الحركة في التربة إلى مبيدات غير متحركة، بطيئة الحركة، متوسطة الحركة، متحركة وعالية الحركة كما يوضح الجدول (١٠).

الجدول (١٠) تصنيف قدرة المبيد على الحركة في التربة.

القدرة على الحركة	$\log k_{ow}$	$K_{oc} (ml/g)$	$K_{om} (ml/g)$	$K_d (ml/g)$
غير متحرك	>5.3	>4000	>2320	>46
بطيء الحركة	3.5-5.3	500-4000	290-2320	5.8-46
متوسط الحركة	2.0-3.5	75-500	43-290	0.86-5.8
متحرك	0.6-2.0	15-75	9-43	0.18-0.86
عالي الحركة	<0.6	<15	<9	<0.18

٢.٢.١.٥. احتفاظ التربة بالملوثات بدون ادمصاص **Nonadsorptive retention**:

يوجد طريقتين لاحتفاظ التربة بالملوثات بعيداً عن عملية الامصاص الكيميائي وهما الحجز الفيزيائي **trapping** والترسيب **precipitation**.

الحجز الفيزيائي **physical trapping**:

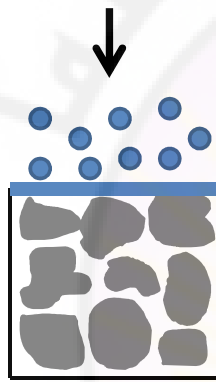
يُشكل احتجاز الحبيبات الصلبة للملوثات وجزيئاتها الكبيرة الذائبة في مسام التربة إحدى الآليات الرئيسية في احتفاظ التربة بالملوثات. وهذا النمط من الاحتفاظ يحدث تبعاً لثلاث آليات مختلفة يبينها الشكل (٤٣) وهي:

- **تشكيل طبقة Caking على سطح التربة**: يمكن أن يحدث هذا فيزيائياً عندما تكون جزيئات المادة الملوثة أكبر من حجم مسام التربة. في هذه الحالة تشكل جزيئات الملوثة المحتجزة طبقة cake على سطح التربة. وقد تنتج أيضاً هذه الظاهرة من النشاطات الحيوية للأحياء الدقيقة للتربة التي تتجمع من خلالها حبيبات التربة في كتل **lumps** أكبر وتسد المسام وتسمى هذه الظاهرة **clogging**.

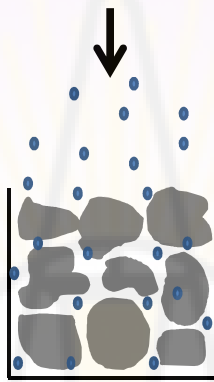
- **تصفية (تنقية) جزيئات المادة الملوثة Straining**: تحدث هذه الآلية عندما يكون حجم جزيئات المادة الملوثة قريباً من حجوم مسام التربة. حيث تتحرك هذه الجزيئات للأسفل على طول مسام التربة مادام حجمها أقل من حجم المسام إلى أن تلاقي مساماً أقل منها حجماً

لُتحتجز عندئذ عند مدخل تلك المسام. وتشبه هذه الآلية إلى حدٍ ما عملية الفصل الكروماتوغرافي للجزيئات في الوسط.

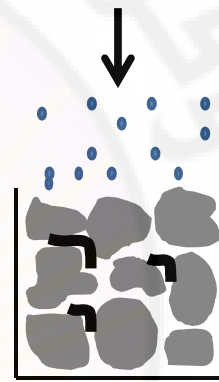
- **الحجز الكيمياء-فيزيائي للملوثات physical-chemical trapping**: قد يحدث في بعض الظروف تقييد لحركة وانتقال الملوثات في مسام التربة نتيجة تحولات فيزيائية أو كيميائية تطرأ على الملوثات كإنتاج مركبات جديدة خلال التفاعلات الكيميائية تتجاوز حجوم جزيئاتها حجوم مسام التربة، مما يقود في النهاية إلى انسداد المسام وإعاقة انتقال جزيئات المادة الملوثة عبرها.



تشكيل طبقة
Caking



تصفية (تنقية)
Straining



الحجز الكيمياء-فيزيائي
physical-chemical trapping

الشكل (43) آليات حجز التربة للملوثات.

الترسيب Precipitation:

يمكن أن يحدث أيضاً احتفاظ التربة بالملوثات من خلال تحولها من شكل ذائب إلى أشكال أخرى راسبة غير قابلة للاندخال وذلك من خلال التفاعلات الجيو-كيميائية التي تحدث ضمن مسام التربة. وتخضع تفاعلات الترسيب لتأثير التوازن الحامضي-القاعدي وظروف الأكسدة والإرجاع. وتعتبر هذه التفاعلات قابلة للإنعكاس أي قد تعود وتذوب المركبات المترسبة عندما تتغير ظروف الوسط.

٣.١.٥. انتقال الملوثات في التربة:

تنتقل الملوثات اللاعضوية (المعدنية) كالعناصر الثقيلة في التربة وفقاً لثلاث آليات هي:

١- الحمل Convection.

٢- الانتشار Diffusion.

٣- البعثرة Dispersion.

وفيما يلي سوف تستعرض هذه الآليات كل على حدى.

١.٣.١.٥. الحمل Convection:

تنتقل الملوثات الذائبة وفق هذا النوع من الآليات عن طريق الحمل مع محلول التربة، ويدعى هذا الانتقال أيضاً بجريان الكتلة Mass flow. ويُعطى تدفق الملوثات في التربة بالعلاقة التالية:

$$J_m = q \cdot c \quad (١)$$

حيث J_m : تدفق الملوثة الذائبة، أي كمية الملوثة التي تعبر وحدة المساحة خلال وحدة الزمن (ويُعبّر عنه بالوحدة $\text{Mass}/\text{L}^2 \cdot \text{t}$). حيث Mass: هي وحدة الكتلة (غ، كغ)، L: وحدة الطول (سم، م)، t: وحدة الزمن (ثانية، دقيقة).

q : كثافة جريان الماء (أو معدل التصريف النوعي) (ويُعبّر عنه بالوحدة L/t)، c: متوسط تركيز الملوثة في محلول التربة (ويُعطى بالوحدة Mass/L^3).

ولكن حسب قانون دارسي يُعطى معدل التصريف النوعي بالعلاقة التالية:

$$q = -k \frac{\partial H}{\partial z} \quad (٢)$$

حيث k: الناقلية المائية المشبعة للتربة (L/t)، و $\frac{\partial H}{\partial z}$: الممال المائي للتربة.

بتعويض q بقيمتها في العلاقة (١) ينتج لدينا:

$$J_m = -c \left(k \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (٣)$$

٢.٣.١.٥. الانتشار Diffusion:

تُعبّر هذه العملية عن انتشار الملوثات في الوسط بفعل الحركة البراونية للجزيئات الذائبة والجزيئات كنتيجة لتأثير درجة حرارة الوسط. ويخضع بشكل عام معدل انتقال الملوثات عبر الانتشار لتأثير معامل التركيز في التربة، إذ كلما زاد تركيز الملوثات كلما كان معدل انتشارها أعلى. وتنتشر بشكل عام الملوثات من المناطق الأكثر تركيزاً إلى المناطق الأقل تركيزاً. وتخضع فيزيائياً عملية انتشار الملوثات في التربة إلى قانون فيك Fik الأول الذي يُعطى بالعلاقة التالية:

$$J_d = -D_m \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \quad (٤)$$

حيث J_d : معدل انتشار الملوثة في التربة (ويُعبّر عنه بالوحدة $\text{Mass/L}^2 \cdot t$)، c : تركيز الملوثة، z : عمق التربة، $\frac{\partial c}{\partial z}$: معامل تركيز الملوثة، D_m : معامل الانتشار الجزيئي (ويُعبّر عنه بالوحدة L^2/t).

ومن أجل وصف انتقال الذائبات عبر الانتشار في حالة الجريان المتغير للماء أي عندما يتغير تركيز المادة الملوثة ومعدل انتقالها خلال الزمن لا بدّ من الاستعانة بقانون حفظ الكتلة التالي:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial J_d}{\partial z} \quad (٥)$$

بتعويض J_d بقيمتها في العلاقة (٥) ينتج العلاقة التالية وهي قانون فيك الثاني للانتشار:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (٦)$$

٣.٣.١.٥. البعثرة Dispersion:

وتُدعى أيضاً بالبعثرة الهيدروديناميكية Hydrodynamic dispersion، وتنتج عموماً هذه العملية عن الاختلافات في سرعة جريان ماء التربة ضمن المسام. إذ لا تُعد سرعة جريان الماء في مسام التربة متماثلة بل تختلف تبعاً لحجوم المسام وطول مسار الجريان وتعرجه وأيضاً تبعاً لبعدها عن الجدران الداخلية للمسام. ويأخذ توزيع سرعات ماء التربة داخل المسام شكل قطع مكافئ، أي تقع سرعة الماء الأعظمية في مركز السُم ثم تتناقص تدريجياً باتجاه الجدران لتصبح معدومة تقريباً عند ملامستها لسطوح تلك الجدران. وتُعتبر عملية البعثرة هامة للغاية ويمكن أن تتفوق في أهميتها على عملية الانتشار في أغلب الأوقات.

ويعطى البعثة الهيدروديناميكية للملوثات بالعلاقة التالية:

$$J_h = -D_h \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \quad (7)$$

حيث J_h : تدفق الملوثة نتيجة عملية البعثة الهيدروديناميكية (ويعطى بالوحدة $\text{Mass/L}^2 \cdot t$).

$\frac{\partial c}{\partial x}$: معامل الملوثة الذائبة، D_h : معامل البعثة الميكانيكية (mechanical dispersion coefficient) (ويعطى بالوحدة L^2/t).

ولما كان التدفق الكلي للذائبة J_s عبارة عن مجموع التدفقات الثلاثة السابقة (J_h, J_d, J_m):

$$J_s = J_m + J_d + J_h \quad (8)$$

وبالتعويض ينتج:

$$J_s = qc - D_m \frac{\partial c}{\partial z} - D_h \frac{\partial c}{\partial z} \quad (9)$$

ثم نعوض قيمة J_s في معادلة الحفاظ على الكتلة التي تمثلها العلاقة التالية:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\frac{\partial J_s}{\partial z} \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} (qc - D_e \frac{\partial c}{\partial z}) \quad (11)$$

حيث D_e هو معامل البعثة - الانتشار الفعال.

وينتج أخيراً عن إعادة ترتيب المعادلة (11) العلاقة التالية:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\frac{\partial qc}{\partial z} + D_e \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (12)$$

وهي المعادلة العامة لانتقال الملوثات في التربة، وهي تصف فقط الملوثات غير القابلة للادمصاص أو التطاير.

٤.١.٥. التحولات الكيميائية للملوثات في التربة:

تقود عموماً التحولات الكيميائية للملوثات في التربة إلى تغيير البنية الكيميائية لتلك الملوثات وإنتاج مركبات جديدة قد تؤثر بالتالي في قابليتها للحركة في الوسط. ويشكل كل من التحولات الأنزيمية وتفاعلات الأكسدة والإرجاع أهم التفاعلات الكيميائية التي تتعرض لها الملوثات في التربة.

١.٤.١.٥. التحولات الأنزيمية Enzymatic transformation:

وهي مجموعة من التحولات الكيميائية التي تخضع لها الملوثات تحت تأثير أنزيمات التربة المختلفة. والأنزيمات هي عبارة عن بروتينات تعمل كمحفّزات catalysts من خلال تسريع معدلات التفاعلات الكيميائية دون أن يطرأ عليها أي تغيير كيميائي ثابت. وتساهم كل من النباتات وحيوانات التربة في إفراز تلك الأنزيمات، ولكن من الصعوبة أن نميز بشكل واضح بين هذين المصدرين في التربة. ومن جهة أخرى تعمل أيضاً الأنزيمات كمنشّطات نوعية specific activators لأنها تشترك نوعياً مع ركائزها حيث تُخفّض ثباتية بعض الروابط الكيميائية سريعة التأثير، مما يُخفّض بالتالي من طاقة تنشيط التفاعلات أي كمية الطاقة اللازمة من أجل إنجاز تفاعل ما.

ويمكن أن توجد الأنزيمات في التربة بعدة أشكال: داخل الغشاء السيتوبلازمي intracellular للخلايا النباتية والحيوانية أو خارج الغشاء السيتوبلازمي في الفراغ المحيط به periplasmic space، أو على السطوح الخارجية للخلايا، وتُدعى هذه الأشكال الثلاثة بالأنزيمات الحيوية biotic enzymes. كما وتوجد الأنزيمات خارج الخلايا extracellular في محلول التربة أو مُثبتة ضمن حشوة التربة soil matrix، وتُدعى في هذه الحالة بالأنزيمات اللاحيوية abiotic enzymes. وتدخل الأنزيمات بنوعيتها الحيوية واللاحيوية في العمليات الكيميائية-حيوية للتربة ولكن من الصعب تحديد نسبة مشاركة كل منها في هذه العمليات.

تستمد الأنزيمات أسماءها النوعية من الركائز التي تعمل عليها، وهي تتغير من خلال إضافة اللاحقة "-ase" إلى اسم الركيزة. وتبعاً لنوع التفاعلات الكيميائية التي تشترك فيها تُصنّف الأنزيمات إلى ست مجموعات أساسية وهي:

١- الهيدرولاز Hydrolases: وهي أنزيمات تساعد في عملية التحلل المائي Hydrolysis للمركبات الكيميائية.

٢- الترانسفيراز Transferases: وتساعد في تحوّل بعض المركبات إلى ركائز أخرى.

٣- أوكسيدوريديوكتاز Oxidoreductases: وتساهم هذه الأنزيمات في عمليات الأكسدة والإرجاع للملوثات من خلال تحويل الهيدروجين أو الإلكترونات بين ركيزتين اثنتين.

٤- اللياز Lyases: وهي تُزيح أو تُزيل المجموعات الوظيفية من ركائزها.

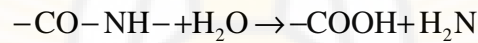
٥- الليغاز (Ligases) (synthases): وهي أنزيمات تحفز ارتباط جزيئتين مع بعضهما (أي تشكل الرابطة C-C).

٦- الإيزوميراز Isomerases: تحفز هذه الأنزيمات على إعادة ترتيب الجزيئات.

وسنتناول فيما يلي بعض أهم هذه المجموعات الأنزيمية ونبين دور كل منها في عملية التحول الكيميائي للملوثات في التربة.

أولاً- أنزيمات الهيدرولاز **Hydrolases**: تشكل هذه الأنزيمات حوالي ثلث الأنزيمات المعروفة والتي تعمل بشكل أساسي على المبيدات والاستيريات والجليكوسيد والأميد. تحفز هذه الأنزيمات عملية التحلل المائي لركائزها ويمكن أن تُصنف إلى C-N Hydrolases و C-O Hydrolases تبعاً لنوع الرابطة التي تخضع لتأثيرها.

- أنزيمات الرابطة **C-N**: وهي أنزيمات نوعية خاصة لحلمأة الرابطة C-N، ويمكن أيضاً أن تُصنف هذه الأنزيمات حسب الرابطة C-N التي تحللها مائياً إلى أنزيمات البروتياز **proteases** وأنزيمات الديميناز **deaminases**. تساعد أنزيمات البروتياز في تحلل البروتينات من خلال عملية حلمأة روابط الببتيد الداخلية على طول السلسلة التي تربط حموض الأمينو المفردة **individual** في جزيئة البروتين، ويأخذ التحلل المائي للرابطة الشكل التالي:



ويتميز عادةً أنزيم البروتياز إلى أنزيم البروتيناز **proteinase** الذي يقسم البروتينات ذات الوزن الجزيئي الكبير إلى مركبات أبسط (**polypeptides**)، وأنزيم الببتيداز **peptidase** الذي يُفكك هذه المركبات البسيطة السابقة.

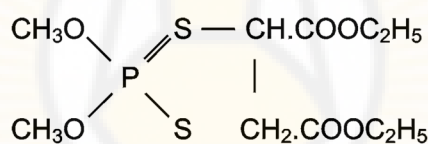
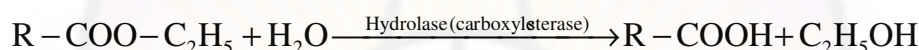
بينما تحفز أنزيمات الديميناز **deaminases** التحلل المائي لبعض الروابط C-N، ويمثل أنزيم اليورياز **urease** وأنزيم الأرجيناز **arginase** أكثر أنزيمات الديميناز أهمية. يساعد أنزيم اليورياز في تحلل اليوريا إلى أمونيا وغاز ثاني أكسيد الكربون، في حين يساعد أنزيم الأرجيناز في انقسام المركب البروتيني الأرجينين إلى مركب **ornithine** ويوريا.

- أنزيمات الرابطة **C-O**: تحفز هذه الأنزيمات عملية حلمأة الاستيريات الطبيعية، ويمكن أن تُصنف هذه الأنزيمات بالاعتماد على نوع الركيزة إلى مجموعة مختلفة من الأنزيمات وأكثرها

أهمية هي: الليباز lipases، والفسفاتاز phosphatases، والسيولفاتاز sulphatases، والكربوهيدراز carbohydrases.

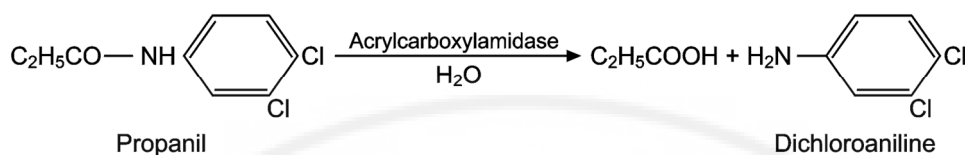
دور أنزيمات الهيدرولاز Hydrolases في تفكك المبيدات:

تستطيع أنزيمات الهيدرولاز سواء كانت متخصصة بالروابط C-N أو الروابط C-O تفكيك وتحليل العديد من المبيدات التي تحتوي في تركيبها على الاستيرات أو الأميد أو الفسفات. ويوجد الكثير من الأمثلة حول هذه المبيدات مثل مجموعة المبيدات العضوية الفسفورية organophosphorus ومبيدات الحشرات والأعشاب الكرياماتية carbamate. وإن إزالة سمية مبيد المالاتيون malathion (الشكل ٤٤) من خلال عملية الحلمأة تحت تأثير أنزيمات الرابطة C-O (carboxylesterase) يعطي مثلاً واضحاً على تفكك المبيدات العضوية الفسفورية من خلال فصل الارتباط مع مجموعة carboxylethyl، وتتبع عملية حلمأة الارتباط carboxylethyl التفاعل التالي:



الشكل (٤٤) مبيد المالاتيون Malathion.

وتتفكك أيضاً مبيدات الأعشاب العضوية الكلورية organochlorine مثل المبيد 4-D.2 من خلال الفعل التحفيزي لأنزيم carboxylesterase. حيث يتحلل مبيد الأعشاب بروبانيل propanil مائياً عن طريق تأثير أنزيمات الرابطة C-N (acrylcarboxylamidase) ليعطي مركب dichloroaniline (الشكل ٤٥).



الشكل (٤٥) التحلل المائي لمبيد الأعشاب بروبانيل propanil.

ثانياً- أنزيمات الترانسفيراز **Transferases**: ومن أهم هذه الأنزيمات يمكن أن نذكر:

- أنزيمات **Transphosphorylase**: تحتاج بعض الأنزيمات من أجل إتمام عملية تحويل المواد الكيميائية إلى مركبات أخرى إلى مساعدة مادة ثالثة تُدعى بالعامل المرافق **cofactor**. ويُعد مركب ATP (adenosine triphosphate) أحد أهم هذه العوامل المرافقة. ويُعتبر أنزيم **Transphosphorylase** أحد الأنزيمات التي تحتاج للعامل المرافق من أجل أن تقوم بدورها الذي يتمثل في إضافة مجموعات الفسفات إلى الركيزة، ويستخدم الأنزيم **Transphosphorylase** المركب ATP كمصدر لمجموعات الفسفات اللازمة لهذا التفاعل.
- أنزيمات **Transacylases**: تُعرف الأنزيمات التي تستطيع تحويل ونقل مجموعة الأسيل **acyl** من مادة معطية لها إلى جزيئة مُستقبلة لها بأنزيمات **Transacylases**. وتتملك هذه الأنزيمات جزءاً غير بروتيني ضعيف الارتباط يعمل كأنزيم مرافق يقوم بفصل رابطة الأسيل في مرحلة وسطى من التفاعل ثم يحولها إلى مجموعة مُستقبلة لها. كما وتلعب هذه الأنزيمات دوراً في عملية الأَسْيَلَة **acylation** الكيما-حيوية وخاصةً في تفكك الكربوهيدرات والدهون.

دور أنزيمات الترانسفيراز **Transferases** في تفكك المبيدات وغيرها من الملوثات:

من بين أنزيمات الترانسفيراز يوجد النظام المعروف بإسم (GST) أي **Glutathione-S-Transferase** الذي يلعب دوراً رئيسياً في إزالة سمية بعض الملوثات عن طريق تحفيز عملية اقتران المادة الأصلية **Glutathione (GSH)** بالموقع المحب للإلكترونات الموجود على المواد الحيوية الدخيلة. والـ **glutathione** هو مركب ثلاثي الببتيد يتشكل من اتحاد ثلاثة حموض أمينية وهي: غليسين **glycine** وسيسيتين **cysteine** وغلوتاميك **glutamic**.

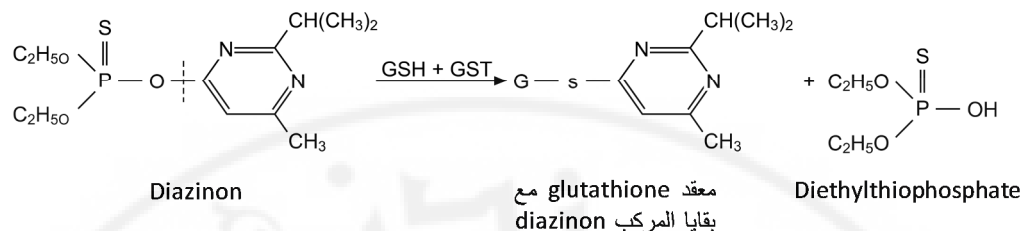
ويحدث غالباً تنشيط عملية اقتران مركب **glutathione** مع الملوثات على ركائز معينة يجب أن يتوافر فيها ثلاث صفات هامة وهي: يجب أن تكون الركيزة كارهة للماء لدرجة معينة، ويجب

Glutathione-S-Epoxyde Transferases - تقيد هذه الأنزيمات في تحليل بعض المبيدات الكلورية العضوية في التربة مثل المبيد dieldrin.

CCN(C)C1=NC2=C(N1)N=CN=C2Cl
 $\xrightarrow{\text{GSH} + \text{GST}}$
CCN(C)C1=NC2=C(N1)N=CN=C2S[SH]
+ HCl

Atrazine
 مع glutathione معقد
atrazine منزوع الكلور

149



الشكل (٤٧) انقسام المبيد diazinon بواسطة GSH.

٢.٤.١.٥. تفاعلات أكسدة وإرجاع الملوثات Oxidation-reduction:

يمكن أن تتحول الملوثات العضوية وغير العضوية في بيئة التربة إلى مركبات أخرى من خلال عمليات الأكسدة والأرجاع التي يمكن أن تحدث كيميائياً *chemically* أو حيوياً *biologically* أو بشكل كيميائي-ضوئي *photochemically*. وتسلك عملية الأكسدة الميكروبية للمادة العضوية في التربة والرسوبيات تتابعاً معيناً للعوامل المؤكسدة يتمثل في: إرجاع جزيئة الأكسجين O_2 ، إرجاع النترات NO_3^- ، إرجاع ثنائي أكسيد المنغنيز MnO_4 ، إرجاع هيدروكسيد الحديد $Fe(OH)_3$ ، إرجاع السلفات SO_4^{2-} ، وإنتاج غاز الميثان CH_4 . ويعتمد تعاقب تفاعلات الإرجاع هذه على العامل المؤكسد حيث يتقدم التفاعل حتى تُستنفذ كل المؤكسيدات أو كل المادة العضوية القابلة للأكسدة في الوسط وضمن نطاق محدد من عمق التربة. وسنستعرض فيما يلي آليات عمليات أكسدة كل من الملوثات اللاعضوية (المعدنية) والملوثات العضوية في التربة.

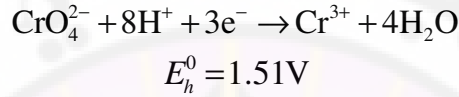
أولاً- أكسدة وإرجاع الملوثات اللاعضوية (المعدنية):

وتُعد المعادن الثقيلة من أهم هذه الملوثات المعدنية التي تصل البيئة وتسبب أضراراً لأنظمتها المختلفة. تخضع هذه الملوثات في الوسط لعمليات الأكسدة والإرجاع تحت تأثير مجموعة مختلفة من العوامل المؤكسدة والمرجعة والتي من أهمها أكاسيد المنغنيز والحديد وفيما يلي سنبين دور أكاسيد المنغنيز في عملية الإرجاع الكيميائية.

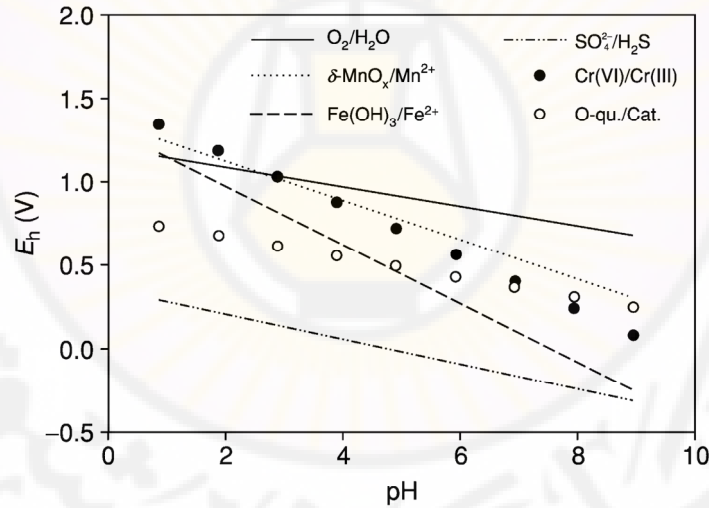
استخدام المنغنيز كعامل مؤكسد:

ترتبط الأهمية البيئية لأكاسيد وهيدروكسيدات المنغنيز الثلاثي Mn^{3+} أو الرباعي Mn^{4+} بقابليتها لادمصاص وأكسدة (في بعض الظروف) بعض المعادن الثقيلة مثل الكروم Cr الذي يملك حالتين من الأكسدة الطبيعية وهما: الكروم الثلاثي Cr^{3+} والكروم السداسي Cr^{6+} ، ويرتبط

أشكال وجود الكروم في محلول التربة بدرجة pH الوسط. ويتميز الكروم Cr^{6+} بقابليته العالية للحركة في الترب لأنه عنصر Oxyanion (أي قابل للإتحاد مع الأكسجين) ويُستبعد من قبل حبيبات الطين المشحونة سلبياً. بالمقابل، يدمص الكروم الثلاثي Cr^{3+} بقوة أكبر على حبيبات التربة ويُشكّل مركبات أكسيد أو هيدروكسيد الكروم غير القابلة نسبياً للذوبان. ويُكتب نصف تفاعل الإرجاع للزوج Cr^{6+}/Cr^{3+} وكمون الإرجاع القياسي بالشكل التالي:

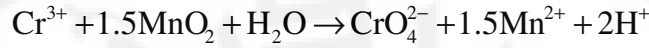


وتُعطي عملية أكسدة الكروم الثلاثي Cr^{3+} إلى سداسي Cr^{6+} بواسطة الأكسجين طاقة أكبر مما تعطيه عملية الأكسدة باستخدام أكاسيد أو هيدروكسيدات المنغنيز أو حتى أكاسيد الحديد كما نرى في الشكل (٤٨).



الشكل (٤٨) العلاقة بين كمون الأكسدة والأرجاع (E_h) و pH الوسط لعدد من أزواج تفاعلات الأكسدة والإرجاع في التربة.

ويتميز معدل أكسدة الكروم Cr^{3+} عن طريق الأكسجين عبر مجال واسع من pH الوسط بالبطء كما يبين الشكل (٤٨). كما يبين هذا الشكل أنّ أكاسيد المنغنيز الموجودة في التربة يمكن أن تؤكّسد مباشرة الكروم Cr^{3+} بمعدلات أسرع من الأكسجين أو أكاسيد الحديد تبعاً للتفاعل التالي:



وقد وُجد أنّ معدلات أكسدة الكروم Cr^{3+} تتخفض مع الزمن مع ارتفاع pH الوسط، ويعود ذلك إلى ترسب الكروم على صورة $Cr(OH)_3$ على سطوح حبيبات التربة مما يعيق تفاعل الأكسدة. وفي بعض الأحيان قد يؤخر أيضاً تشكل طور وسيطي من أوكسي هيدروكسيد المنغنيز الثلاثي تفاعل الأكسدة، وهذا يرجع بطبيعة الحال لكون الكروم السداسي أكثر قابلية للحركة وأكثر سمية من الكروم الثلاثي. أمثلة أخرى على عمليات أكسدة وإرجاع الملوثات المعدنية تشمل أكسدة الكوبالت الثنائي Co^{2+} إلى ثلاثي Co^{3+} ، وأكسدة الزرنيخ الثلاثي As^{3+} إلى خماسي As^{5+} ، وأكسدة السيلينيوم الرباعي Se^{4+} إلى سداسي Se^{6+} . في جميع هذه التفاعلات يعتمد معدل التفاعل على تركيز كل من العوامل المؤكسدة والمرجعة في الوسط.

ومن ناحية أخرى، قد وُجد أنّ الحديد الثنائي Fe^{2+} المدمص على أكاسيد المعادن يمكن أن يحفز إرجاع الكروم السداسي Cr^{6+} والنترت NO_2^- واليورانيوم U^{6+} . ويُفيد إرجاع الكروم Cr^{6+} السام من خلال أشكال الحديد الثنائي Fe^{2+} في تخفيض قابلية الكروم على الذوبان نتيجة تشكيل مركبات راسبة من الكروم الثلاثي.

ثانياً- أكسدة وإرجاع الملوثات العضوية:

تخضع المركبات العضوية في تفاعلات الأكسدة والإرجاع لعمليات مشابهة لتلك التي تحدث للمركبات اللاعضوية مثل تشكيل المعقدات ونقل الإلكترونات وتحرير نواتج التفاعل. وبالنسبة للملوثات العضوية يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار الخواص البنوية للمركب العضوي من حيث طبيعة المجموعات الوظيفية وموقعها، حموضتها وقلويتها والحجم الكلي للجزيء وشكله. تعكس بدورها هذه الخواص قابلية المركب العضوي للذوبان في الماء وقدرته على التفاعل مع العوامل المؤكسدة أو المُرّجة الموجودة في بيئة التربة. وتُمثل المجموعات الوظيفية للمركب العضوي المواقع الفعّالة التي تساهم في عمليات الأكسدة والإرجاع. وتُعد المجموعات الوظيفية المانحة للإلكترون والقادرة على تشكيل معقدات سطحية surface complexes وخاصة المعقدات المخيلية بمثابة عوامل مُرجعة فعّالة لأشكال الحديد والمنغنيز المؤكسدين في الوسط.

أكسدة وإرجاع المادة العضوية في التربة:

تتكون المادة العضوية في التربة من مجموعة واسعة من المركبات المختلفة والتي تنتج عن المخلفات النباتية والحيوانية والطحلبية والمفرزات الميكروبية، وتتميز المادة العضوية ببنى وخواص مختلفة. تشمل المجموعات الوظيفية الأساسية في المادة العضوية كل من O- و N- التي تحتوي على المجموعات المانحة للإلكترون وتخضع لعمليات مختلفة لكي تشكل المواد الهيومية (HS) Humic substances.

ونمثل خصائص الكربون العضوي والتحول التي يخضع لها في التربة عوامل مهمة تؤثر بدورها في الخواص الكيميائية للمادة الهيومية HS. ومن ناحية أخرى، يمكن أن يعرقل تدبّل المادة العضوية الطبيعية تفاعلات أكسدة وإرجاع الملوثات العضوية التي تحتوي بدورها مجموعات وظيفية مانحة للإلكترون. ولا بدّ من الإشارة هنا إلى الدور الكبير الذي تلعبه الأحياء الدقيقة في عملية تحلل المادة العضوية لأنها تستطيع الحصول على الطاقة من الكربون المرجّع. استخدام المنغنيز كعامل مؤكسد:

يتميز التفاعل المباشر للمركبات العضوية وخاصة الملوثات العضوية مع الأكسجين ببطئه الشديد. ويمكن لأكاسيد أو هيدروكسيدات المنغنيز الثلاثي والرباعي التي توجد كطور صلب في التربة أن تعمل كمستقبلات إلكترون هامة للمادة العضوية والفينولات الكلورة chlorinated phenols والأنيلين aniline. ويمكن أن نبين أهمية كل من المنغنيز والحديد كعوامل مؤكسدة من خلال دورها في أكسدة المركبات العضوية التالية:

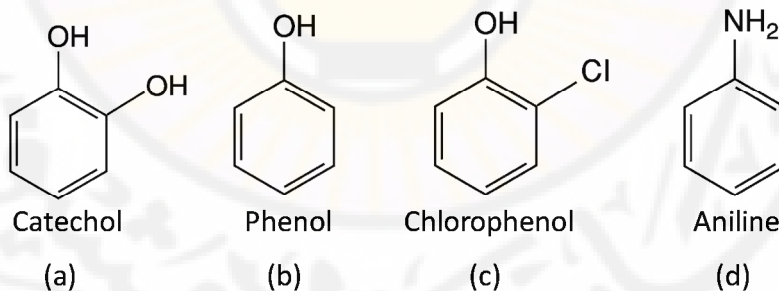
- مركب الكاتيكول catechol (الشكل ٤٩ a-): ويُعرف أيضاً بإسم 1,2-dihydroxybenzene وهو مركب مخلي متعدد الفينول والبوليميرات ويُعرف بخواصه المتميزة في الأكسدة والإرجاع. ويُعدّ هذا المركب نظيراً للمادة العضوية في التربة ويشبه لحدّ كبير المادة الهيومية HS. يعمل وجود فلز البيرنيسيت birnessite ($\delta\text{-MnO}_x$) في التربة على تحفيز أكسدة مركب catechol طبيعياً بمعدل أسرع من الأكسجين أو فلز الجيوتيت FeOOH. ومن المحتمل أن تساهم عملية تشكيل المركب catechol لشيئات سطحية مع المعدن الذي يشغل المواقع السطحية للبيرنيسيت في زيادة ذوبان هذا الفلز.

- الفينولات phenols (الشكل ٤٩ b-): تعدّ عملية أكسدة الفينولات بواسطة المؤكسيدات المعدنية معقّدة للغاية، وذلك لأنّ كل من انتشار نواتج التفاعل ومعدلات التفاعل يعتمدان بشكل كبير على كل من طبيعة العامل المؤكسد وتركيز المادة المتفاعلة وظروف التفاعل. وقد تترافق

عملية أكسدة الفينول وانهلال أكاسيد وهيدروكسيدات المنغنيز الثلاثي والرابعي مع بعض التفاعلات التي تُوصف بأنها تنافسية مثل التفاعلات المؤكسدة الثنائية (البلمرة) للجذور العضوية.

- مركب الكلوروفينول chlorophenols (الشكل ٤٩ -c): وهو ملوث عضوي عالي السمية، ينتمي إلى مجموعة الملوثات العضوية التي يمكن أن تتحلل لحيوياً في التربة بواسطة أكاسيد المنغنيز التي توجد على هيئة طور صلب. وتتخفّض قدرة هذا المركب على الذوبان والتفاعل مع ازدياد عدد بدائل الكلور المضافة إلى الفينول. وتُستخدم أكاسيد وهيدروكسيدات المنغنيز الثلاثي والرابعي عبر عمليات الأكسدة وإزالة الكلور dechlorination والبلمرة polymerization في إزالة سمية الفينولات المُكلّورة الموجودة في التربة، ويمكن أن تقود هذه العملية إلى نواتج أقل سمية يمكن أن تتفكك بدورها حيوياً في التربة وبمعدل أسرع.

- مركب الانيلين aniline (الشكل ٤٩ -d) ويُعرف أيضاً بإسم aminobenzene وهو ملوث عضوي يوجد كمنتجات صناعية مرافقة ويدخل في تركيب المبيدات. يمكن أن يتأكسد هذا المركب سريعاً في التربة بوجود فلز البيرنيسيت، ويخضع لاحقاً للتفاعلات المؤكسدة الثنائية ليشكل مجموعة مختلفة من النواتج البوليميرية. بالرغم من عدم توفرها الكبير في التربة تُعد أكاسيد المنغنيز مواداً أكثر تحفيزاً من أكاسيد الحديد لتفاعلات الأكسدة والإرجاع لطيف واسع من الملوثات العضوية.



الشكل (٤٩) بعض المركبات (الملوثات) العضوية في التربة.

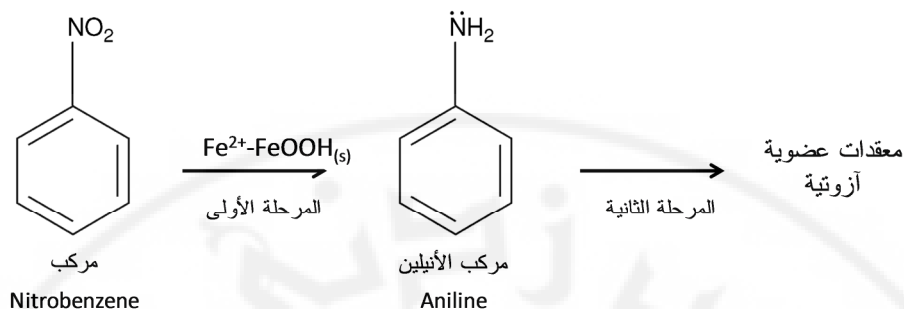
استخدام الحديد الثنائي Fe^{2+} المدمص كعامل مُرجع:

في الظروف اللاهوائية سواء في التربة أو الأحواض المائية، تُعد أشكال الحديد Fe^{2+} المُدمص على بعض مكونات التربة مثل أكاسيد الحديد الثلاثي الصلبة عوامل مُرجعة هامة للملوثات العضوية المؤكسدة مثل المذيبات الهالوجينية ومركبات النيترو العطرية nitroaromatic. ومن المعتقد بشكل عام أن الحديد الثنائي Fe^{2+} المُدمص على شكل معقدات سطحية من النوع inner-sphere يقود إلى معدلات إرجاع أعلى بالمقارنة مع الحديد Fe^{2+} الذائب أو الذي يوجد على هيئة طور صلب. ولا تتصف الروابط السطحية للحديد بأنها فقط أكثر تفاعلاً ولكن قد تكون أيضاً قابلة للتغير بشكل مستمر من خلال نشاطات الأحياء الدقيقة المُرجعة للحديد أو من خلال الادمصاص المتتالي للحديد انطلاقاً من محلول التربة. ونتيجةً لارتباط سلوك الادمصاص بقيم pH الوسط، من الممكن أن تتغير كثافة سطح الادمصاص بالحديد Fe^{2+} تبعاً لتغير الـ pH. وتزداد معدلات الإرجاع بشكل طبيعي مع pH الوسط بسبب ازدياد كثافة سطح الادمصاص بالحديد Fe^{2+} . وتمثل عملية إرجاع الملوثات العضوية باستخدام الحديد الثنائي بحد ذاتها معالجة كيميائية لتلك الملوثات كما هو الحال لمركب النيتروبنزن Nitrobenzene، وهو ملوث عضوي معروف ينتشر في مواقع صناعة المواد المتفجرة وتخزينها. ويتم إرجاع هذه المركب إلى مركبات عضوية آزوتية معقدة عبر مرحلتين يوضحهما الشكل (٥٠) وهما:

١. إرجاع كامل وبمعدلات سريعة لمركب النيتروبنزن إلى مركبات أمينية عطرية (الأنيلين). ويتم هذا التفاعل بواسطة الحديد الثنائي المُدمص على فلز الجيوتيت ($FeOOH$).

٢. تفاعل مركب الأنيلين مع المادة العضوية الطبيعية في التربة ويندمج ضمن معقدات عضوية آزوتية - هيومية. ويؤدي هذا التفاعل إلى تشكيل روابط كيميائية تشاركية قوية بين الأنيلين والمادة الهيومية.

ويتوقف كلا التفاعلين السابقين (الإرجاع وتشكيل الروابط) على قيم pH الوسط، وتقود عملية إرجاع مركب النيتروبنزن بالمحصلة إلى تخفيض الخطورة البيئية للمركب في التربة.



الشكل (٥٠) مراحل إرجاع مركب النيتروبنزن Nitrobenzene.

ثانياً- تأثيرات الملوثات في الكائنات الحية الدقيقة للتربة Pollutants Effects on Soil Microorganisms

١.٢.٥. المقدمة:

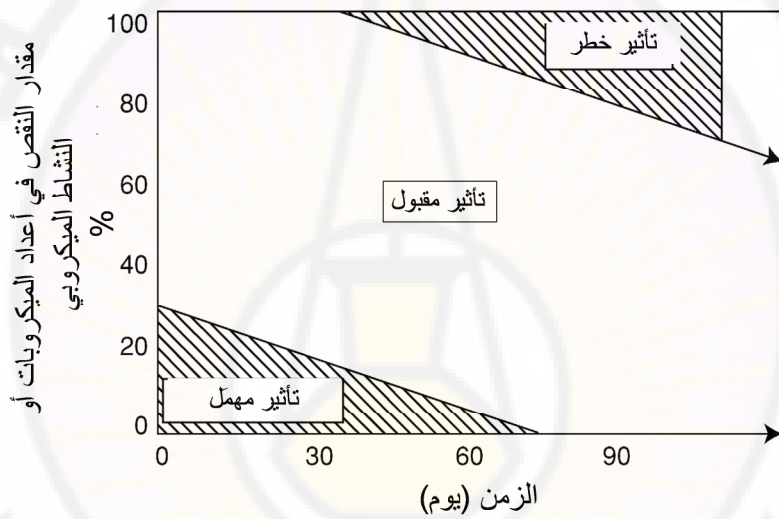
أدت العديد من النشاطات الإنسانية إلى تحرير أنواع مختلفة من الملوثات في التربة، بعض هذه الملوثات هي طبيعية أو نتجت من مصادر طبيعية مثل المركبات الهيدروكربونية النفطية والمعادن الثقيلة. مثل هذه المركبات لا تُعتبر بحد ذاتها ملوثات في حال وُجِدَتْ في مكان نشوئها الطبيعي بينما يُعد وجودها في مكان آخر أو تربة أخرى ملوثاً لأنها تُعتبر كمركبات دخيلة على بيئة التربة أو في حال تجاوز تركيزها الحد الطبيعي في الوسط. بالمقابل، العديد من المركبات الملوثة المصنعة جزئياً أو كلياً من قبل الإنسان مثل المبيدات والمواد المتفجرة والتي لا تملك نظيراً طبيعياً في البيئة تُعد ملوثات.

تتحلل العديد من الملوثات حيوياً بواسطة الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في التربة، بالرغم من أن بعض تلك الملوثات يُعد ساماً لأجزاء مختلفة من المجتمع الميكروبي الذي يعيش في هذا الوسط. ويمكن أن تظهر التأثيرات السلبية للملوثات السامة على هيئة تغيرات في بنية (تركيب) المجتمع الميكروبي أو تغيرات في وظائفه أو غالباً تغيرات في الاثنين معاً.

وقد خضعت تأثيرات الملوثات في بيئة التربة ككل أو في وظائف الأنظمة البيئية المختلفة لدراسات موسعة منذ سبعينات القرن الماضي، وأغلب هذه الدراسات ركزت على تأثير المبيدات

الزراعية. ويمكن توضيح شدة التأثير السلبي لهذه المبيدات وغيرها في نشاط الاحياء الدقيقة من خلال الشكل (٥١).

يمكن أن تتراوح تأثيرات الملوث حسب الشكل (٥١) بين تأثيرات مهمة إلى تأثيرات خطيرة وذلك بالاعتماد على مقدار النقص أو العجز الملاحظ في أعداد الميكروبات أو نشاط المجتمع الحيوي. ويمكن أن يكون مقدار النقص في أحد مكونات المجتمع الميكروبي مقبولاً ولا يسبب تأثيرات سلبية ملموسة إذا كان ضئيلاً واستمر لفترة طويلة أو كان كبيراً وانحصر تأثيره لفترة قصيرة.

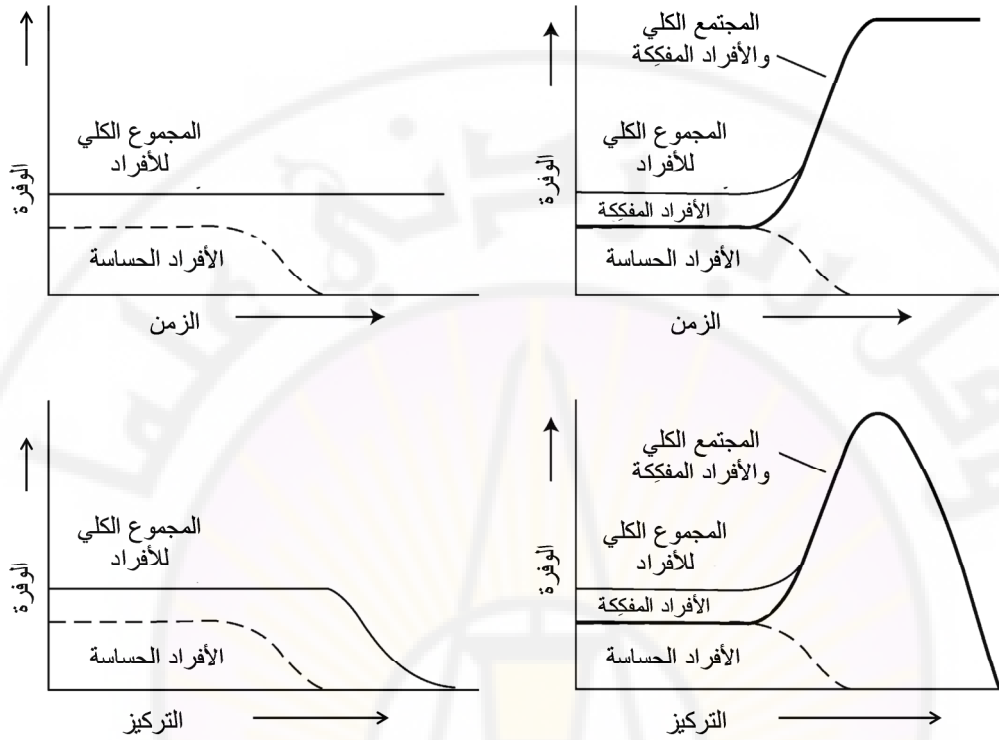


الشكل (٥١) تأثير الملوثات في المجتمع الميكروبي تبعاً لمقدار التأثير ومدته.

٢.٢.٥. أنماط تأثير الملوثات:

أولاً- تأثير الملوثات في تركيب المجتمع الميكروبي:

يقود دخول الملوّث إلى النظام البيئي للتربة إلى أنماط مختلفة من التغيرات في تركيب المجتمع الميكروبي يمكن تلخيصها في الشكل (٥٢). وتختلف هذه التأثيرات تبعاً لتركيز الملوّث في الوسط وطول مدة التعرض له وقدرته على التحلل، ويمكن بشكل عام أن نميز نوعين من التأثيرات: تأثيرات عامة وأخرى نوعية.



ملوثات غير قابلة للتحلل الحيوي

ملوثات قابلة للتحلل الحيوي

الشكل (٥٢) التغيرات المتوقعة في تركيب المجتمع الميكروبي للتربة استجابةً لتأثير الملوثات القابلة وغير القابلة للتحلل الحيوي.

التأثيرات العامة:

إذا كان الملوّث الموجود في التربة شديد السمية أو يوجد بتركيز عالية جداً، فيمكنه أن يخفّض أعداد جميع الأحياء الدقيقة الموجودة في هذا الوسط بسبب تحلل الخلايا البكتيرية وموتها. ولكن بالمقابل، إذا وُجد الملوّث بتركيز معتدل وكان قابلاً للاستخدام كمصدر للكربون و/أو للطاقة من قبل أحياء التربة الدقيقة، ففي هذه الحالة يمكن أن يُلاحظ زيادة في أعداد الأحياء الدقيقة ووفرته في التربة مثل البكتيريا والفطريات ووحيدات الخلية.

التأثيرات النوعية:

تمارسُ بعض الملوثات تأثيرات سامة على مجموعات نوعية من ميكروبات التربة، التي يمكن أن تقود إلى موت الخلايا الميكروبية الفعالة أو تقلل من أعدادها، بينما تبقى المجموعات الميكروبية المقاومة والأبواغ بعيدة نسبياً عن هذا التأثير. وفي العديد من الحالات، لا يعود الإنخفاض في أعداد الميكروبات النوعية إلى الموت المباشر للخلايا، وإنما بسبب إعاقة نشاطاتها ووظائفها الخلوية النوعية إلى المدى الذي لا تستطيع عنده الخلية البقاء فعالة أو القيام بوظائفها المختلفة.

ثانياً- تأثير الملوثات في وظيفة المجتمع الميكروبي:

تملك الملوثات القدرة على تخفيض أو زيادة النشاطات أو الوظائف المختلفة للمجتمع الميكروبي في التربة. بعض هذه التغيرات التي يبدئها المجتمع الميكروبي قد تكون كاستجابة مباشرة للملوث نفسه، أو كنتيجة غير مباشرة للتأثيرات التي تسببها الملوثات في خواص الوسط كتغيرات في pH التربة مثلاً. بالإضافة لذلك، قد يظهر تأثير الملوثات على شكل تغيرات عامة تمس نشاطات جميع الخلايا الميكروبية الموجودة في التربة، أو على شكل تغيرات ترتبط فقط بنشاطات مجموعة صغيرة ونوعية من المجتمع الميكروبي.

ويمكن أن يُعتبر غنى المجتمع الميكروبي (أي وجود أكثر من سلالة ميكروبية واحدة قادرة على إنجاز نفس الوظائف) العامل المُحدِّد الرئيسي لمعرفة إذا كانت الملوثات تسبب تغيرات في مجمل وظائف المجتمع الميكروبي. ومن ناحية أخرى، قد تحدد طبيعة التوزيع غير المتماثل للميكروبات في التربة قدرة المجتمع الميكروبي على تخفيف التأثيرات السلبية للملوثات سواءً على مستوى صغير (microscale) يمثل حجماً أو عمقاً معيناً من التربة أو على مستوى كبير يشمل مجمل النظام البيئي للتربة (macroscale).

التأثيرات العامة

تُعتبر عملية تمعدن الكربون العضوي الوظيفة العامة للمجموعات الميكروبية في التربة. القسم الأكبر من الأحياء الدقيقة في معظم الترب هو مختلط التغذية كيميائياً chemoheterotrophic أي تستقلب المواد العضوية المتيسرة كمصادر للكربون والطاقة من أجل النمو والحفاظ على حياة الخلايا. ويمكن أن تتعارض الملوثات الموجودة في التربة مع عملية تمعدن الكربون عن طريق تفاعلها مباشرة مع أنزيمات نوعية مفككة للمادة العضوية، ولكن غالباً ما يظهر تأثير الملوثات من خلال تعطيلها للأنظمة الخلوية اللازمة لإنتاج وتدفق الطاقة (أي إنتاج ATP وإعادة توليد

(NAD (P و FAD). ويعمل عموماً وجود الملوثات القابلة للتحلل الحيوي في التربة على زيادة معدل عملية تمعدن الكربون بسبب زيادة النشاط الميكروبي والكتلة الحيوية للخلايا الميكروبية. التأثيرات النوعية:

تحدث عمليتي النشطرة Ammonification وعكس النتجة Denitrification بشكل كبير في التربة بواسطة طيف واسع من الأحياء الدقيقة، بينما عملية النتجة Nitrification وتثبيت الآزوت الجوي تقوم بها فقط بعض الأنواع البكتيرية. وهذا يشير إلى أن عملية النتجة وبشكل خاص أكسدة الامونيوم حساسة جداً لبعض أنواع الملوثات. ويُعد الجنس *Nitrosomonas* و *Nitrobacter* من البكتيريا ذاتية التغذية من أهم بكتيريا النتجة السائدة في التربة. ويُعتبر هذين الجنسین عاليي الحساسية ليس فقط للملوثات وإنما أيضاً لتغير الظروف البيئية وخاصةً pH التربة. و لذلك، يمكن توظيف عملية النتجة كمؤشر أولي للدلالة على اضطراب النظام البيئي للتربة الملوثة. وبالرغم من أن القدرة على تثبيت الآزوت الجوي تقتصر على القليل من الأنواع البكتيرية التعايشية symbiotic أو التي تعيش بشكل حر في التربة، فإن عملية تثبيت الآزوت أقل حساسية لمعظم الملوثات من عملية النتجة.

ومن ناحية أخرى، يُعتبر الكربون والآزوت من العناصر الغذائية المحددة لنشاط الكائنات الحية في التربة، ولذلك حظي هذان العنصران بالكثير من الدراسة. بالمقابل، يبدو أن دورة الفسفور والكبريت يقوم بها طيف لا بأس به من الأنواع البكتيرية داخل المجتمع الميكروبي، ولهذا السبب يمكن ملاحظة التأثيرات السلبية للملوثات في نشاط هذه الأحياء في بعض الحالات فقط. ومن التأثيرات النوعية الأخرى للملوثات تلك التأثيرات التي تؤدي إلى تغيرات في نشاط أنزيمات التربة مثل أنزيم ديهيدروجيناز dehydrogenase والفسفاتاز phosphatase والأميداز amidases واليورياز urease والبروتياز protease. يتحرر العديد من أنزيمات التربة من الخلايا البكتيرية إلى التربة بهدف تحليل المادة العضوية التي تؤدي إلى تحرير عناصرها الغذائية. وتؤثر بشكل عام الملوثات في عملية تمعدن الكربون العضوي من خلال إعاقته لتحويل الجزيئات العضوية الكبيرة إلى جزيئات أصغر حجماً لكي تكون متاحة للخلايا البكتيرية وعملياتها الاستقلابية.

٣.٢.٥. تأثيرات الأنواع المختلفة من الملوثات في الأحياء الدقيقة:

يلخص الجدول (١١) التأثيرات المختلفة لملوثات التربة في بنية ووظيفة المجتمع الميكروبي. تعتمد عموماً معظم التأثيرات بشكل كبير على بعض المتغيرات الفيزيا-كيميائية للتربة مثل درجة الحموضة، وكمون الأكسدة والإرجاع، وسعة التبادل الكاتيوني، بالإضافة إلى محتوى التربة من الطين والمادة العضوية. ومن أهم هذه الملوثات يمكن أن نذكر:

المركبات الهيدروكربونية:

خضع تأثير المركبات الهيدروكربونية بأنواعها المختلفة (الهيدروكربونات ذات السلسلة القصيرة والمستقيمة، الهيدروكربونات العطرية المتعددة الحلقات PAH) في المجتمع الميكروبي للعديد من الدراسات بسبب زيادة التلوث بهذه المركبات وانتشارها الواسع وبشكل خاص في مناطق وجود محطات الوقود ومصافي تكرير النفط. ويتجلى التأثير العام لهذه المركبات من خلال زيادة الكتلة الحيوية الميكروبية في التربة وتغيرات في بنية المجتمع الميكروبي نتيجة استخدام هذه المركبات كمصدر للطاقة والكربون (الجدول ١١). وتعمل كذلك المركبات الهيدروكربونية بأنواعها المختلفة على زيادة معدل تنفس الأحياء الدقيقة، بينما يكون تأثيرها على نشاطات ميكروبية أخرى بأدنى حدودها.

المركبات الهالوجينية:

تشمل المركبات الهالوجينية كل من المركبات رباعي كلور الاتيلين (PCE)، وثلاثي كلور الاتيلين (TCE)، والمركبات (PCBs) وغيرها من المواد الكيميائية الهالوجينية الصناعية. تدخل المركبات الهالوجينية إلى البيئة عبر مصادر متنوعة منها رمي المخلفات الصناعة وحرق النفايات. وُجد أن المركبات الهالوجينية الأليفاتية في حال وجدت بتركيز متوسطة في التربة تكون ضعيفة التأثير في الأحياء الدقيقة (الجدول ١١)، بينما تؤثر المركبات الهالوجينية العطرية وخاصةً الكلورة بشكل ملموس في بعض جوانب بنية المجتمع الميكروبي مثل الكتلة الحيوية والتنوع الميكروبي، كما وتؤثر أيضاً في بعض وظائفه وبشكل خاص في عملية عكس النترجة والتنفس.

الجدول (١١) تأثيرات الأنواع المختلفة للملوثات في بنية ووظيفة المجتمع الميكروبي للتربة.

وظيفة المجتمع الميكروبي								بنية وتركيب المجتمع الميكروبي		نوع الملوثات
دورة الفسفور	دورة الكبريت	أنزيمات التربة	عكس النترجة	النترجة	النشطرة	تثبيت الآزوت	التنفس	الأعداد النوعية	الكتلة الحيوية الكلية	
Phosphorus cycling	Sulfur cycling	Soil enzymes	Denitrification	Nitrification	Ammonification	Nitrogen fixation	Respiration	Specific population	Total biomass	
المركبات الهيدروكربونية										
؟	؟	؟	؟	-	؟	None/-	+	+	+	الدهنية
؟	؟	None	None/-	-	None/-	None	+	+	+	العطرية
؟	؟	؟	؟	-	؟	None	+	+	None/+	PAH
المركبات الهالوجينية										
؟	؟	؟	None	-	None	؟	None	None	None	الدهنية
؟	؟	؟	-	؟	؟	؟	-	+	-/None/+	العطرية
None	-/None	؟	-	None/-	None/+	None/+/-	None/-	None/+/-	None	المبيدات
؟	؟	؟	؟	+/-/None	؟	-	None/-	+	None/-	المواد المتفجرة
-	-	-	-	-	؟	-/+	+/-	+/-/None	-/None	المعادن الثقيلة

+ :ازدياد في معدل العملية، - : انخفاض في معدل العملية، ? : لا يوجد معطيات كافية، None : لا يوجد تأثير

المبيدات Pesticides:

تدخل المبيدات بأنواعها المختلفة (مبيدات الفطريات fungicides، مبيدات النيماتودا nematocides، المبيدات الحشرية insecticides، مبيدات الأعشاب herbicides) البيئة بشكل إرادي نتيجة استخدامها من قبل الإنسان في مكافحة الآفات والأمراض الزراعية. فقد بينت دراسات حديثة لأكثر من ٥٠ مبيداً من أجل تقييم تأثيرات المبيدات في الأحياء الدقيقة على مستوى النوع الميكروبي باستخدام تقانات الوراثة الجزيئية، إن استخدام الجرعات الزراعية المنصوح بها لم تسبب على المدى الطويل أي تأثيرات في بنية أو وظيفة المجتمع الميكروبي للتربة. وفي حال وجود أي تأثيرات ملموسة فإنها تُعزى بالأحرى إلى نواتج تحلل المبيد في التربة أكثر منها إلى المركب الأصلي.

المواد المتفجرة Explosives:

تم حديثاً تصنيف هذه المواد كملوثات هامة لما لها تأثيرات كامنة في البيئة، وتشمل هذه المواد كل من TNT (2,4,6-trinitrotoluene)، (nitrocellulose) NC، TNB (1,3,5-trinitrobenzene). وتُعد المواد المتفجرة بمعظمها قابلة للذوبان بسهولة، ولكن عندما تمتزج مع مركبات أخرى مثل الشمع فإن جاهزيتها الحيوية تصبح محدودة تماماً. وينتج غالباً التلوث بالمواد المتفجرة من إنشاء السكك الحديدية أو العمليات الحربية. ولسوء الحظ لا يوجد دراسات كافية حول تأثيرها في الأحياء الدقيقة للتربة.

المعادن Metals:

تُعتبر بعض المعادن في غاية الأهمية بالنسبة للخلايا الميكروبية التي تعيش في التربة، بينما يُعد بعضها الآخر قليل الأهمية حيث يُطلب بكميات ضئيلة جداً. في حين يعتبر قسم من هذه العناصر غير أساسي وساماً للكائنات الحية الدقيقة. والمعادن الأكثر سمية هي المعادن الثقيلة مثل الكاديوم Cd، والرصاص Pb، والزنق Hg، ولكن وجود تراكيز عالية من النحاس Cu، والزنك Zn، والكروم Cr، والحديد Fe، والمنغنيز Mn، والنيكل Ni، والكوبالت Co، والزرنيخ As، والفضة Ag يمكن أيضاً أن يؤثر سلباً في بنية المجتمع الميكروبي ووظيفته. يمكن أن تظهر سمية المعادن الثقيلة من خلال استبدالها للمعدن الرئيسي في التفاعلات المركزية للأنزيمات التي تفرزها الكائنات الحية الدقيقة، وتتوقف سمية العناصر بشكل كبير على درجة

pH الوسط وكمون الأكسدة والأرجاع في التربة، حيث تؤثر تلك العوامل في عملية أكسدة المعادن وذوبانها، وبالتالي في جاهزيتها الحيوية لأحياء التربة الدقيقة. ومن ناحية أخرى، طورت بدورها الأحياء الدقيقة في التربة عدة آليات لمقاومة تأثير هذه العناصر السامة مثل تسهيل نقل المعدن إلى خارج الخلية البكتيرية أو ربطه على شكل معقدات مع جزيئات فعّالة مثل المركب glutathione (وهو مضاد أكسدة يوجد في بعض الخلايا البكتيرية) بحيث تقلل من جاهزيته الحيوية.

الفصل السادس

معالجة التربة الملوثة

Remediation of polluted soils

يتناول هذا الفصل الاستراتيجية العامة المُتبعة من أجل معالجة التربة الملوثة بكلا النوعين من المركبات العضوية والمعدنية، كما ويتناول بإيجاز التقنيات بأنواعها المختلفة التي يمكن أن تُستخدم في المعالجة ويسلط الضوء بشكل موسع على الطرائق الحيوية دون غيرها نظراً لأهميتها الكبرى كطريقة فعّالة وقليلة التكاليف.

١.٦. المقدمة:

ازداد اهتمام الإنسان بتلوث البيئة بشكل ملحوظ منذ بداية القرن العشرين مع ازدياد الوعي والمسؤولية حول ما تعاني منه البيئة من مشكلات. وتشكّل بدورها نشاطات الإنسان على الصعيد الصناعي والزراعي مصدراً رئيسياً لتلوث البيئة بأنظمتها المختلفة. إلى جانب ذلك سلّطت الحوادث البيئية الضوء على مخاطر التلوث على صحة الإنسان وسلامة البيئة، مثل التلوث الإشعاعي الذي نتج عن انفجار مفاعل تشيرنوبيل في أوكرانيا في عام ١٩٨٦ وانفجار مفاعل فوكوشيما في اليابان عام ٢٠١١ أو التلوث الهوائي الذي نتج عن انفجار المصنع الكيميائي للمبيدات في مدينة بوبال (Bhopal) الهندية في عام ١٩٨٤.

وتطلق المجتمعات الصناعية سنوياً كميات كبيرة جداً من المواد الكيميائية الصناعية نحو البيئات الطبيعية التي تتمثل بكل من التربة والماء والجو، وينتهي العديد من تلك المواد كملوثات تستقر في تلك البيئات. وتبدي الملوثات ميولاً للبقاء في بيئة التربة فترة أطول من الزمن مما تبديه في باقي البيئات، حيث تُعد التربة المستقبل النهائي لأغلب الملوثات وتعمل كفلتر تتراكم ضمنه الملوثات بسرعة ولكنها تُفقد منه ببطء. وقد أصبح معالجة البيئة الملوثة قضية اجتماعية ذات طابع إقتصادي بسبب أهميتها بالنسبة لصحة الإنسان من جهة وبسبب ما تلحقه من أضرار اقتصادية من جهة أخرى. ونتيجةً لذلك تطورت خلال العقود الأخيرة جملة تقنيات حديثة تعتمد على مجموعة آليات فيزيائية وكيميائية وحيوية متنوعة من أجل استصلاح أو معالجة التربة الملوثة.

وتتطلب بداية معالجة التربة الملوثة وجود خطة معالجة ناجحة تعتمد بشكل أساسي على مجموعة المعلومات التي يتم الحصول عليها عبر عملية التشخيص الأولي للموقع الملوثة والتي تتم قبل إتخاذ قرار البدء بعملية المعالجة. وهنا لا بدّ من الإشارة إلى ضرورة مناقشة جملة من النقاط الهامة عند اختيار طريقة المعالجة المناسبة:

- ١- الطبيعة الكيميائية للملوثات الموجودة في الموقع، أي هل هي ملوثات عضوية أو ملوثات معدنية؟.
- ٢- معرفة حجم التلوث وأبعاده، هل هو تلوث محصور في مساحة محدودة أو منتشر على مساحات واسعة؟
- ٣- معرفة مستوى خطورة التلوث، هل يشكل التلوث خطورة كبيرة أو متوسطة أو محدودة؟ ويتم تقدير ذلك من خلال إجراء التحاليل الكيميائية اللازمة لمعرفة تركيز الملوثات في الموقع.
- ٤- طبيعة المعالجة الممكنة، هل هي معالجة في الموقع In situ أو معالجة خارج الموقع Ex situ؟
- ٥- التكلفة المادية المتوقعة وهل يوجد معوقات مادية حول اختيار تقنية المعالجة الملائمة؟

٢.٦. مفهوم مستوى التلوث:

تُمكن نتائج التحاليل الكيميائية من الحصول على معلومات كافية حول انتشار التلوث في الموقع ومستواه. ويمكن تصنيف حالات التلوث تبعاً لمستوى انتشاره إلى نوعين أساسيين هما:

- حالات تلوث محدودة (محصورة): ينتج التلوث المحدود عن حوادث تسرب مواد ملوثة في التربة مثل تسرب المواد الكيميائية المخزنة أو المظمورة أو الموجودة في المناطق الصناعية، وفي هذه الحالات يتم غالباً معالجة التلوث في الموقع نفسه.
- حالات تلوث منتشرة: وفيها تصل الملوثات إلى التربة وتنتشر عمودياً وأفقياً ويتوقف مدى انتشارها على بعض خواص التربة الفيزيائية وبشكل خاص محتوى التربة الرطوبي وناقليتها المائية.

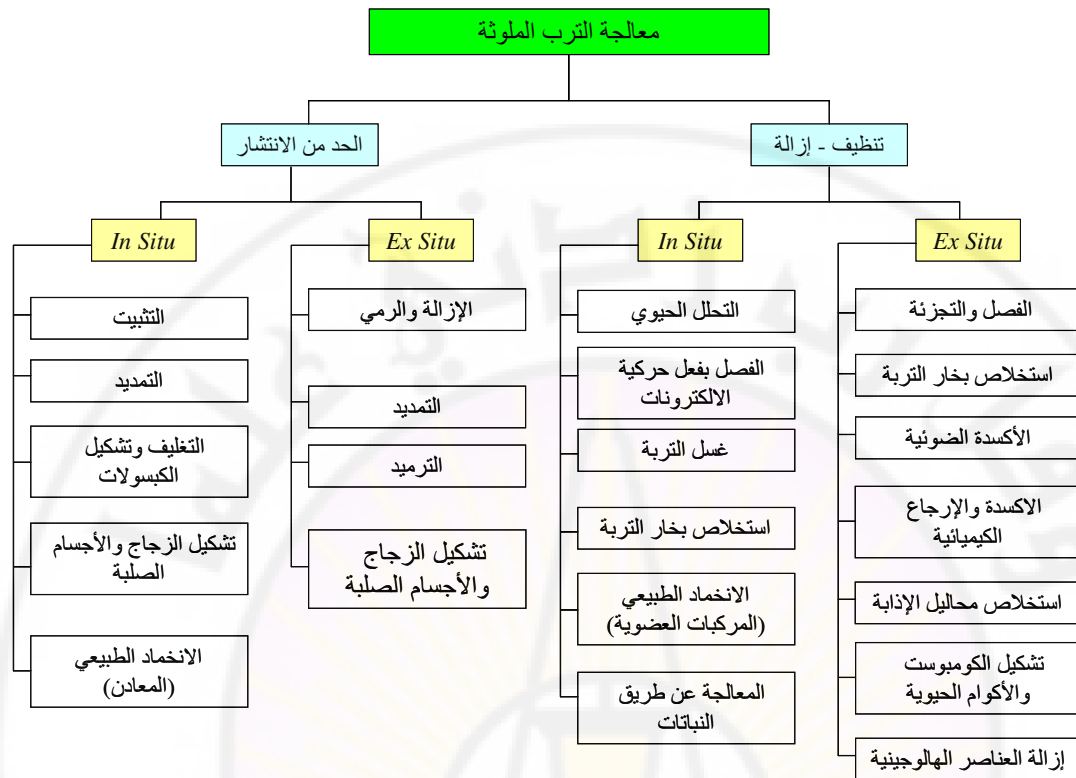
٣.٦. استراتيجيات معالجة التربة الملوثة:

يوجد نوعان من الاستراتيجيات على مستوى إدارة تلوث التربة (الشكل ٥٣). النوع الأول: هو استراتيجية تنظيف التربة من الملوثات clean-up. وظهرت هذه الإستراتيجية في بداية القرن العشرين، وهو النوع المفضل والمنصوح به من قبل العديد من مخابر و وكالات ضبط وتقويم التلوث في العديد من دول العالم. ويهدف إلى معالجة التربة وتخليصها من الملوثات إلى ما دون التركيز الأقصى المسموح به. ويمكن أن يتحقق هذا عبر استخدام مجموعة متنوعة من التقنيات يُشار إليها بتقنيات تنظيف التربة.

والنوع الثاني من الاستراتيجيات هو استراتيجية الحد من انتشار الملوثات containment. حيث لا يتطلب هذا النوع تخفيض التركيز الكلي للملوثات في التربة بل يهدف إلى الحد من التعرض لها وإلى إدارة المخاطر البيئية والصحية التي تسببه وذلك من خلال استخدام تقنيات تعمل على خفض حركية الملوثات وجاهزيتها في التربة، وتُعرف هذه التقنيات باسم تقنيات الحد من انتشار الملوثات في البيئة.

ومن ناحية أخرى، يلعب نوع التقنية المستخدمة في المعالجة وعوامل أخرى تتعلق بخواص الملوثات وطبيعة الموقع الملوث دوراً هاماً في اختيار مكان المعالجة وتبعاً لذلك يمكن تمييز نوعين من المعالجة وهما معالجة في المكان أو الموقع الملوث In Situ ومعالجة خارج الموقع Ex Situ.

تُشير معالجة التربة الملوثة في الحقل In Situ إلى نظام معالجة معين تبقى فيه التربة في موقعها الأصلي خلال العملية، وهنا لا بدّ من التحقق من تعرض كامل التربة الملوثة للمعالجة. وتتصف هذه المعالجة ببعض الميزات الهامة كقلة التكلفة وقلة المخاطر البيئية والصحية المتعلقة بإزالة ونقل التربة الملوثة خارج الموقع. بينما تقوم استراتيجية المعالجة خارج الحقل Ex Situ على نقل التربة الملوثة إلى مواقع خارجية تكون مخصصة ومجهزة لإجراء عملية المعالجة. ويتم اللجوء إلى هذه المعالجة عند وجود صعوبة في تأسيس بنية تحتية أساسية لمعالجة التربة في الموقع الملوث أو بسبب وجوده في مكان غير مناسب لتطبيق المعالجة فيه.



الشكل (٥٣) الاستراتيجيات والتقنيات المتاحة لمعالجة التربة الملوثة.

٤.٦. تقنيات معالجة التربة الملوثة:

تتنوع هذه التقنيات بشكل كبير تبعاً للعديد من العوامل، منها ما يتعلق بالملوثات الموجودة في التربة (نوع الملوثات، وتركيزها، ومستوى التلوث، وطبيعة انتشارها) ومنها ما يرتبط بالموقع الملوّث (مساحته، وعمق التلوث، وطبوغرافية الموقع) ومنها ما يرتبط بالتكاليف الاقتصادية والميزانية المخصصة. وتُقسم عموماً هذه التقنيات إلى ثلاث مجموعات:

- تقنيات المعالجة الفيزيائية Physical treatment technologies.
- تقنيات المعالجة الكيميائية Chemical treatment technologies.
- تقنيات المعالجة الحيوية Biological treatment technologies.

أولاً: تقنيات المعالجة الفيزيائية Physical treatment technologies

ومن أهم هذه التقنيات التي يمكن استخدامها في معالجة التربة الملوثة:

١ - الإزالة والرمي خارج الموقع: Excavation and Off-site Disposal

تُستخدم هذه التقنية لمعالجة التربة الملوثة بالمركبات العضوية وغير العضوية، وتستلزم إزالة التربة الملوثة ونقلها ثم رميها خارج الموقع الملوث. فهي بالأحرى عملية تجميع للتربة الملوثة من المناطق المكشوفة ووضعها في مكان واحد بهدف معالجتها أو التخلص منها بالطمر مما يجعل إدارتها أكثر سهولة. ويمكن أن تتطلب التربة الملوثة قبل نقلها معاملة أولية مسيقة من أجل خفض تركيز الملوثات القابلة للحركة فيها مما يحد لاحقاً من إمكانية انتقال هذه الملوثات إلى مواقع أخرى.

ولقد أستخدمت هذه الطريقة بشكل واسع في الماضي وهي تُعتبر طريقة سريعة لإدارة المواقع الملوثة، ولكنها لا تمثل في حد ذاتها معالجة بل تعتمد على نقل المشكلة إلى مكان آخر. وتتصف هذه الطريقة بارتفاع تكاليفها وحاجتها لمساحات واسعة من الأراضي. ومن ناحية أخرى، تتعرض هذه الطريقة للكثير من النقد من قبل وكالات حماية البيئة مما جعل منها طريقة غير مفضلة لدى الرأي العام. وتحتاج في نفس الوقت إلى ما يُسمى بإدارة ما بعد الرمي، تتمثل هذه الإدارة في المراقبة والرصد المستمرين لعملية رمي التربة الملوثة وتجميعها من أجل التأكد من عدم انتقال الملوثات من مواقع المعالجة أو الطمر لأماكن أخرى.

٢ - التمديد Dilution:

تُنفَّذ هذه الطريقة في التربة الملوثة بالمركبات العضوية أو المعدنية وبشكل خاص العناصر المغذية كعنصر النحاس. ويتم تمديد التربة الملوثة من خلال خلطها مع بعضها بالحرارة العميقة أو عمل شقوق فيها. وتُعد هذه الطريقة فعالة في تقليل التعرض للجرعة الكامنة للملوثات في المواقع التي تنتشر فيها الملوثات على مساحات صغيرة ومبعثرة. وقد تزيد عملياً هذه الطريقة حجم التربة الملوثة ولكنها في المقابل تبدو مناسبة من أجل إدارة التربة الملوثة بكميات زائدة من العناصر الغذائية (مثل التربة التي تستقبل مياه صرف مزارع الأبقار). ولكن تبقى هذه الطريقة

غير منصوح بها من قبل وكالات ضبط تلوث البيئة ومراقبته أو لدى الرأي العام وبشكل خاص فيما يتعلق بأنواع معينة من الملوثات.

٣- الفصل والتجزئة Separation-Fractionation :

يعتمد المبدأ العام لهذه الطريقة على ارتباط الملوثات مع أجزاء التربة الناعمة الأكثر تفاعلاً والتي تتمثل عموماً بحبيبات الطين التي تملك مساحة عالية نسبياً من السطوح النوعية. ثم استخدام الغرلة أو الترسيب لفصل وإزالة تلك الأجزاء الناعمة من التربة. تُنفذ هذه الطريقة خارج الموقع ولكل من الملوثات العضوية والمعدنية (وخاصة العناصر المشعة). ويُنتج فصل الجزء الناعم من التربة بقايا شديدة التلوث تتطلب فيما بعد إجراء معاملة ثانوية مثل الترميد أو الرمي والطمير. وتؤدي بشكل أساسي عملية فصل الجزء الناعم إلى انخفاض كبير في كتلة التربة التي يمكن أن تخضع لمعالجة أخرى في مرحلة لاحقة.

٤- طريقة الفصل بفعل حركية الالكترونات Electrokinetic separation :

تقوم هذه الطريقة على توليد تيار كهربائي منخفض الشدة بين إلكترودين متوضعين في التربة بهدف تحريض الملوثات ونقلها ضمن الوسط. حيث تنتقل الملوثات ذات الطبيعة الأنثيونية نحو القطب الموجب (anode) والكاتيونية نحو القطب السالب (cathode). ثم يتم لاحقاً إزالة الملوثات واسترجاعها من خلال ترسيبها عند الإلكترود أو عن طريق استخدام مادة راتنجية ذات تبادل أيوني عالي أو من خلال استخلاص فيزيائي للمحلول المائي للتربة. ويمكن استخدام هذه الطريقة في معالجة الترب الملوثة بالمركبات العضوية القطبية والملوثات المعدنية. ويُفضل أن تتصف هذه الترب بنفاذية منخفضة (أي محتوى عالي من الطين) وبإنخفاض معدل الصرف. ومن ناحية أخرى، تُعد هذه التقنية حديثة إذ أظهرت الدراسات الأولية نتائج جيدة مما يسمح لها أن تكون طريقة واعدة في المستقبل.

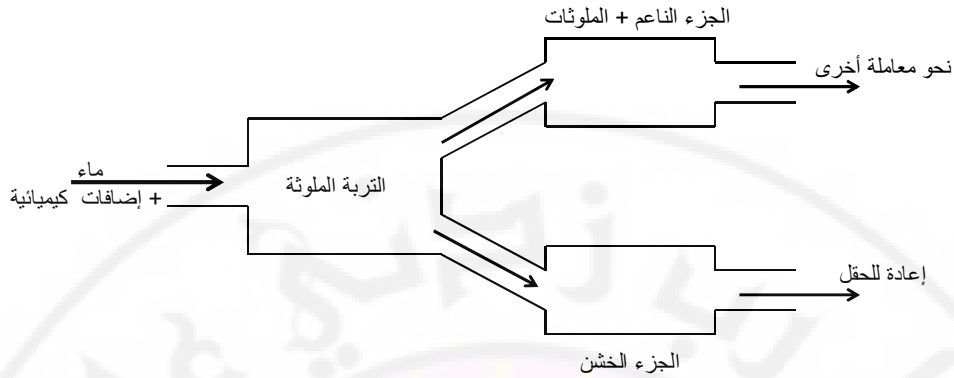
٥- غسل التربة Soil-Flushing and Soil-Washing :

تُستخدم هذه الطريقة لمعالجة الترب الملوثة بطيف واسع من الملوثات العضوية وغير العضوية مثل المعادن الثقيلة والمركبات الزيتية والمبيدات والعناصر المشعة. ويوجد بشكل عام آليتين تندرج تحت هذه الطريقة.

الآلية الأولى وهي غسل التربة في المكان وتُدعى Soil-Flushing. وفي هذه الطريقة يُضاف محلول مائي (يسمى محلول الغسل مكوّن من الماء فقط أو الماء مضافاً إليه مواد تساعد في ذوبان الملوثات) إلى التربة الملوثة. حيث يعمل المحلول على غسل وإزاحة الملوثات من التربة ليتم لاحقاً استرجاعها من محلول الغسل الذي يتم جمعه من أسفل التربة المعاملة. تأخذ هذه العملية عادةً شكل دورة مستمرة يتم فيها تصفية الماء ثم إعادة إضافته من جديد إلى التربة الملوثة. وقد تتطلب عملية المعالجة إجراء عدة دورات غسل كاملة من أجل تخفيض تركيز الملوثات بشكل فعال.

تُعد هذه الطريقة سيئة للغاية عند تطبيقها في كل من الترب ذات النفاذية المنخفضة والترب التي تحتوي على ملوثات تدمص بقوة على سطوح حبيبات التربة. وكذلك في الترب التي مضى على تلوثها زمن طويل حيث تتميز بانخفاض ملحوظ في حركية الملوثات فيها نتيجة عمليات الانحدار الطبيعي التي تعثرها، إذ لا يمكن إجراء معالجة كاملة لمثل هذه الترب ضمن فترة زمنية قصيرة إضافة لما يترتب على ذلك من تكاليف باهظة.

والآلية الثانية في هذه الطريقة هي غسل التربة خارج الموقع وتُدعى Soil-Washing. وهنا يتم إزالة التربة الملوثة وغسلها في أحواض خاصة خارج الموقع باستخدام الماء تحت تأثير عملية رج ميكانيكي لإزالة الملوثات الخطرة نهائياً أو من أجل خفض كميتها. ويتم بعدها فصل مكونات التربة إلى جزئين اثنين: جزء ناعم ترتبط به الملوثات ويضم حبيبات التربة صغيرة ومتوسطة الحجم مثل الطين والسلت وجزء آخر خشن هو عبارة عن الرمل والحصى (الشكل ٥٤). وقد يتم اللجوء أحياناً إلى إضافة بعض المواد الكيميائية لماء الغسل مثل خافضات التوتر السطحي الأمر الذي يزيد من كفاءة عملية فصل حبيبات التربة. وفي مرحلة لاحقة، تخضع الأجزاء الناعمة الحاملة للجزء الأكبر من الملوثات لطريقة أخرى من طرائق المعالجة للتخلص من تلك الملوثات. في حين يُعاد جزء التربة الخشن إلى الحقل في حال كان خالياً من الملوثات أو يُكرر غسله إذا بقي ملوثاً.



الشكل (٥٤) مراحل عملية غسل التربة Soil-Washing.

٦- التثبيت الفيزيائي Physical stabilisation :

تهدف هذه التقنية بشكل عام إلى تحويل الملوثات إلى مواد ونواتج صلبة ثابتة في التربة بغية تقليل التعرض لها من جهة ومنع انتقالها وهجرتها نحو المياه الجوفية من جهة أخرى. وتضم هذه التقنية مجموعة من الطرائق وهي:

- تشكيل الأجسام الصلبة Solidification :

تستخدم هذه التقنية بشكل خاص لمعالجة التربة الملوثة بالعناصر المشعة Radionuclides ويمكن تطبيقها في الموقع الملوث أو خارجه. وتستلزم إدخال مواد مقاومة للغسل أو التجوية إلى التربة الملوثة عن طريق خلطها مع التربة أو حقنها فيها. وتعمل تلك المواد على تكوين نواتج صلبة مع الملوثات عبر عملية إحاطتها فيزيائياً بأغلفة غير نفوذة وغير سامة، مما يحد من التعرض لها ومنع هجرتها نحو الطبقات العميقة من التربة. وقد استخدم في هذه التقنية مجموعة لا بأس بها من المواد مثل الإسمنت والرماد والاسفلت المستحلب والبولي إثيلين. ولا تُعتبر المادة الناتجة عن تلك العملية تربة بل مكون صلب يمكن استخدامه كمادة بناء.

- التغطية وتشكيل الكبسولات Capping and encapsulation :

تعتمد هذه التقنية على وضع حواجز أو أغشية تحت سطحية غير نفوذة وعالية التفاعل تقوم بجذب الملوثات أو تتفاعل معها كيميائياً. وتهدف إلى إلغاء تعرض الإنسان للتربة الملوثة والحد من الحركة الجانبية أو العمودية للملوثات. ولكن قد تتعرض هذه العوائق أو الحواجز لعملية التحلل الكيميائي أو التكسير أو الاختراق من قبل جذور النباتات العميقة. لذلك لا بد من إجراء مراقبة مستمرة للموقع للتأكد من سلامة تلك الحواجز أو الأغلفة. ومن ناحية أخرى، يمكن أيضاً

استخدام مواد بلاستيكية متفاعلة حرارياً مثل Sulphur cement المعدل، الذي يُطحن ويُخلط جيداً مع التربة الملوثة في أحواض خاصة ضمن ظروف حرارية ليشكل ملاطاً سائلاً متجانساً على صورة كبسولات، ويمكن لنا فصل النواتج الصلبة الملوثة والتخلص منها بعد تبريد الملاط.

- عملية تشكيل الأجسام الزجاجية Vitrification :

تُطبق هذه التقنية بشكل أساسي في الترب الملوثة بالمركبات المعدنية وبشكل خاص العناصر المشعة. حيث تُصهر التربة عند درجات حرارة مرتفعة جداً تصل إلى ٢٠٠٠ درجة مئوية عبر إمرار تيار كهربائي ضمنها، بعد ذلك تُبرد التربة المنصهرة ليتشكل كيميائياً جسم صلب ثابت شبيه بالزجاج مقاوم للغسل والرشح وقادر على تغليف الملوثات غير العضوية وحجزها. وخلال هذه العملية تتهدم وتتلاشى الملوثات العضوية الموجودة في التربة من خلال عملية التفكك الحراري pyrolysis عند درجات الحرارة العالية.

ولكن بالرغم من فعاليتها العالية تعمل هذه الطريقة على تخريب التربة مما يحد من إمكانية استثمارها في المستقبل. ويبدو أنّ استخدام هذه التقنية يقتصر فقط على الملوثات غير العضوية عالية الخطورة كما هو الحال في حالة الترب الملوثة بالعناصر المشعة.

في النتيجة نجد أن الطرائق الثلاثة السابقة لا تؤدي إلى إزالة تامة للملوثات من التربة بل يقتصر أدائها على الحد من انتشارها ضمن البيئة. ومن ناحية أخرى، تستلزم هذه التقنيات إجراء عملية مراقبة ورصد بشكل مستمر للتأكد من عدم تسرب الملوثات عبر الغسل أو عمليات التجوية الكيميائية مما يزيد ذلك من تكلفتها المادية.

٧- المعاملة الحرارية Thermal treatment :

تُعد عملية تفكك وتطاير الملوثات من خلال المعاملة الحرارية للتربة الملوثة تقنية فعالة جداً. ويتم عبر تسخين التربة في أفران خاصة على درجة حرارة عالية نسبياً تتراوح بين ٤٠٠ و ٦٠٠ درجة مئوية، ثم يتبعها معاملة أخرى للغازات المنطلقة من الفرن تتم عند درجة حرارة أعلى تتراوح بين ٨٠٠ و ١٢٠٠ درجة مئوية للتأكد من حدوث أكسدة كاملة للمواد العضوية المتطايرة. وتضم المعاملة الحرارية عدة تقنيات أكثرها أهمية هي الترميد والإزاحة الحرارية.

- الترميد Incineration :

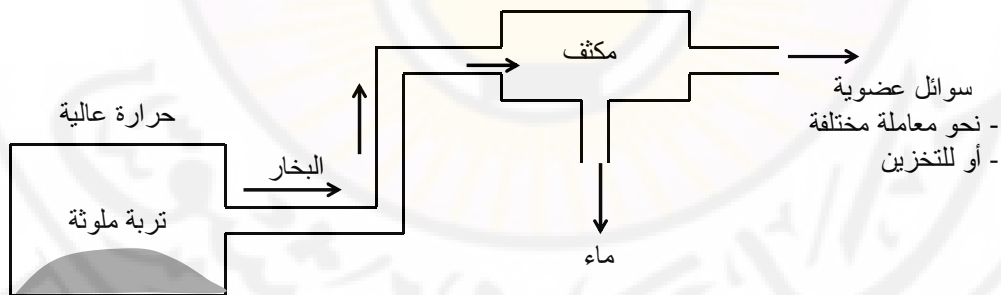
تُعالجُ بشكل خاص هذه التقنية الترب الملوثة بالمركبات العضوية والملوثات الممرضة pathogens، وتُطبق خارج الموقع الملوث. حيث تُنقل التربة الملوثة التي يتم إزالتها من الموقع

وتُحرق تحت ظروف مراقبة ضمن مَرَمَدات على درجة حرارة عالية تتراوح بين ٩٧٠ و ١٢٠٠ درجة مئوية. ويترافق إحتراق الملوثات العضوية تحرير وإنبعاث أبخرة يتم تجميعها أو تهديمها عبر عملية التفكك الحراري. ويمكن أيضاً أن تتحرر بعض المعادن القابلة للتطاير مثل الزئبق Hg والرصاص Pb التي يتم التقاطها لاحقاً ضمن الغازات المنبعثة عن طريق استخدام أجهزة أخرى ملحقة.

تُعد عملياً هذه الطريقة فعّالة للتخلص من الملوثات الهالوجينية وغيرها من الملوثات العضوية المقاومة للتحلل حيث تصل فعاليتها إلى حدود ٩٩.٩%، ويُعد هذا هاماً للغاية من أجل الملوثات ثنائية الفينيل - متعددة الكلور (PCBs) والديوكسين. ويمكن أيضاً أن تُستخدم هذه الطريقة في معالجة التربة الملوثة بالمركبات غير العضوية كما هو الحال بالنسبة للتربة الناتجة عن عملية المعالجة بالفصل والتجزئة التي تحتوي على تراكيز عالية من المعادن الثقيلة.

- الإزاحة الحرارية Thermal desorption :

وهي العملية التي يتم من خلالها تطاير الملوثات العضوية تحت ظروف مُحكمة عبر تسخين التربة الملوثة لدرجة حرارة تصل إلى ٦٠٠ درجة مئوية. تتطاير تحت هذه الظروف الملوثات التي تتميز بنقطة غليان منخفضة وتُجمع في مرحلة لاحقة ثم تُعامل للتخلص منها. وفضلاً عن كونها طريقة ترميد تهدف هذه العملية أيضاً إلى فصل فيزيائي للملوثات من التربة عبر أجهزة خاصة ملحقة (الشكل ٥٥).



الشكل (٥٥) الإزاحة الحرارية للملوثات العضوية.

٨- استخلاص بخار التربة Soil vapor extraction :

تُعتبر هذه التقنية معروفة وشائعة في معالجة التربة في كثير من المناطق، وهي عملية معالجة بسيطة نسبياً للتخلص من الملوثات العضوية التي تتصف بقابليتها العالية للتطاير مثل المركبات

VOCS التي توجد في المنطقة غير المشبعة للتربة أو الملوثات التي تتراكم فوق مستوى المياه الجوفية. وتتطلب هذه الطريقة في حالة المعالجة ضمن الموقع حقن هواء نظيف إلى داخل المنطقة غير المشبعة للتربة من أجل فصل أبخرة الملوثات العضوية من محلول التربة عبر تجزئتها بين هواء التربة ومحلولها، ثم تُزال الأبخرة التي تتضمن لهواء التربة عن طريق أبار استخلاص من خلال تطبيق تخلية هوائية. ويمكن تحفيز عملية تبخر الملوثات العضوية من التربة حرارياً عن طريق حقن البخار أو الهواء الساخن في التربة، أو عبر تطبيق تقنية التسخين الكهربائي.

أما في حالة المعالجة خارج الموقع الملوث فهنا تُزال التربة وتُوضع فوق شبكة من الأنابيب المثقوبة، ثم تُستخلص (تُشحب) الغازات تحت تأثير عملية التخلية الهوائية، وبالنسبة للملوثات العضوية التي قد تحتويها تلك الغازات فإنها تُجمع وتُفكك عبر عملية التفكك الحراري pyrolysis أو عملية الأكسدة الضوئية photo-oxidation.

تعتمد كفاءة هذه الطريقة وفعاليتها بشكل أساسي على درجة تشبع التربة الملوثة بالماء وكذلك على الخواص الفيزيائية والكيميائية للملوثات المستخلصة مثل ضغط البخار ومدى قابليته للتطاير. وقد تُعامل لاحقاً الأبخرة المستخلصة عبر استخدام تقنية أخرى مثل عملية الإدمصاص على الكربون المنشط أو غيرها من الطرائق التي تساعد في عملية ترسيب تلك الغازات السامة وتوضعها.

٩- التحلل الضوئي Photolysis :

تُستخدم هذه الطريقة بشكل رئيسي من أجل التخلص من الملوثات العضوية، وتهدف إلى تحلل الملوثات العضوية باستخدام الأشعة فوق البنفسجية (UV) من مصدر صناعي أو طبيعي عبر أشعة الشمس. وتُدعى عملية تفكك المركبات العضوية بواسطة هذه الطريقة بالأكسدة الضوئية photo-oxidation وتعطي نواتج غير عضوية بسيطة مثل غاز CO_2 والماء بشكل أساسي. وقد يكون تعرض الطبقة السطحية للتربة الملوثة لأشعة الشمس كافياً لتفكك الملوثات العضوية الموجودة فيها. في حين تُزال التربة الملوثة في طبقات أعمق وتُنقل إلى مواقع خاصة حيث تخضع لعملية التحلل الضوئي في خزانات خاصة. وقد يتم تطبيق هذه العملية من أجل التخلص من الملوثات العضوية الناتجة عن عملية استخلاص بخار التربة الملوث، حيث تُخلط تلك الملوثات مع مادة محفزة catalyst ثم تُوضع داخل مفاعل الأكسدة الضوئية وتتعرض لحزمة

من الأشعة فوق البنفسجية التي تنشط المادة المحفزة مؤديةً إلى أكسدة المركبات العضوية. تُعد عملية التحلل الضوئي فعالة جداً لأن الأشعة فوق البنفسجية تحلل الملوثات العضوية بشكل كامل. حيث تُستخدم في هذه التقنية فوتونات الأشعة UV من أجل تكسير الروابط الكيميائية في المركبات العضوية القابلة للتطاير مثل المركبات VOCs التي تشمل كل من ثلاثي كلور الإثيلين (TCE) والتولوين والبنزن وغيرهم.

وينبغي اختيار مصدر الأشعة فوق البنفسجية وفقاً لمجال امتصاصها من قبل الملوث العضوي الهدف لتلك الأشعة. إذ يملك كل مركب كيميائي طول موجة مثلى للانفصال الضوئي photodissociation، فعلى سبيل المثال يبلغ طول الموجة المثلى للبنزن ١٨٤ نانومتر وللمركب TCE ٢٨٠ نانومتر، في حين يملك الأسيتون طولي موجة هما ٢٢٠ و ٣١٨ نانومتر. وفي حالة المركبات العضوية المعقدة التي تملك مجالات امتصاص مختلفة للأشعة UV، يجب تكرار عملية التحلل الضوئي من أجل كل مركب منها مع طول الموجة المثلى التي توافقه. ومن الضروري الإشارة إلى أنه يمكن تحقيق عملية مشتركة بين عمليتي التحلل الضوئي والتحلل الحيوي من خلال إضافة كائنات حية دقيقة وعناصر مغذية إلى التربة الملوثة بعد معاملة هذه الأخيرة ضوئياً وخاصةً في حالة التربة الملوثة بالمركبات العضوية صعبة التفكك.

ثانياً : تقنيات المعالجة الكيميائية

Chemical treatment technologies

يكمن الهدف وراء المعالجة الكيميائية للتربة الملوثة في تغيير الطبيعة الكيميائية للملوثات بطريقة تمنع انتقال مركباتها السامة إلى مكونات أخرى في نظام التربة، كانتقال الملوثات إلى النباتات أو نحو المياه الجوفية أو إلى أحياء التربة المختلفة. قد تمثل هذه التقنيات عمليات وقائية من تأثير الملوثات وذلك عبر مجموعة مختلفة من العمليات الكيميائية التي تسعى إلى تخفيض حركية تلك الملوثات أو تغيير تركيبها الكيميائي من خلال تفكيكها إلى عناصر أخرى أقل سمية للبيئة بمكوناتها المختلفة.

ومن أهم طرائق المعالجة الكيميائية للتربة الملوثة وتقنياتها يمكن أن نذكر الطرائق التالية:

١- الانخماد الطبيعي Natural attenuation :

يُعبّر الانخمداد الطبيعي للملوثات عن انخفاض قدرتها على الحركة mobility وجاهزيتها الحيوية خلال فترة تماسها مع مكونات التربة المختلفة نتيجة التفاعلات الكيميائية (ادمصاص، تحليل، تحول كيميائي لأشكال أخرى) التي تحدث على المدى الطويل. ويعتمد معدل هذه التفاعلات على الخواص الفيزيائية لكل من الملوث والتربة. ويمكن تطبيق هذه التقنية في الموقع الملوث بكلا النوعين من الملوثات العضوية واللاعضوية. ولكن عند اعتماد هذه الطريقة، يجب العمل على الحد من انتقال الملوثات فيزيائياً لخارج الموقع عبر عملية التعرية أو غيرها من العمليات. بالإضافة إلى ذلك قد تبدي عملية الانخمداد الطبيعي قابلية كامنة للانعكاس (أي عودة المركبات للشكل الفعّال)، ولكن العوامل التي تؤثر في هذه القابلية تبدو لغاية الآن غير واضحة، بالإضافة إلى وجود حاجة مستمرة لمراقبة أي موقع تُعتمد فيه عملية الانخمداد الطبيعي كاستراتيجية أولية لمعالجة الترب الملوثة.

٢- التثبيت-التسكين Fixation-Stabilization:

تهدف هذه التقنية إلى خفض تركيز كل من الأشكال الذائبة والأشكال القابلة للتبادل للعنصر في التربة، وذلك من خلال إضافة مادة وسيطة غير سامة قابلة للتفاعل مع العنصر. من هذه المواد الوسيطة يمكن أن نذكر: الكلس ومركبات الفسفور الذائبة والرماد وبعض معادن الطين مثل الزيوليت zeolite أو المعادن الغنية بأكاسيد الحديد أو الألمنيوم مثل الطين الأحمر red mud أو الجبس. والكثير من هذه المواد هو عبارة عن نواتج بعض الصناعات ويمكن الحصول عليها بأسعار منخفضة. تعمل هذه المواد على تثبيت المعادن الثقيلة عبر تشكيل رواسب أو مركبات غير قابلة للذوبان أو تعمل على زيادة كمية الملوث المدمص على سطوح المكونات الصلبة للتربة، وبالتالي خفض تركيز الملوثات الذائبة. وبفضل هذه الطريقة تتخفض حركة وتيسر الملوثات لمستويات مرضية.

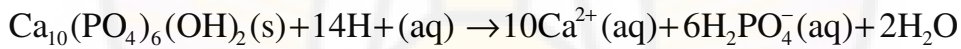
ويوجد بعض العوامل التي تحد من استخدام هذه الطريقة مثل احتواء التربة على خليط من الملوثات التي تختلف عن بعضها البعض في نوع المادة الوسيطة اللازمة لتثبيتها. فعلى سبيل المثال، ارتفاع pH التربة يمكن أن يخفض بشكل كبير قابلية الحركة لدى بعض المعادن الثقيلة مثل الرصاص Pb والزنك Zn، ولكن في الوقت ذاته قد يؤدي إلى زيادة حركة ملوثات أخرى مثل الزرنيخ As والسيانيد. بالإضافة لذلك، ينبغي تجنب النقل الفيزيائي للترب الملوثة لخارج

الموقع كما أن إجراء متابعة ورصد مستمرين يبدو ضرورياً من أجل تقدير ثباتية هذه الطريقة من المعالجة.

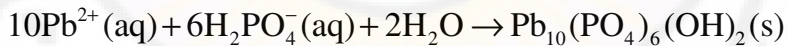
تُعد طريقة تثبيت المعادن الثقيلة في التربة عن طريق إضافة مواد رخيصة الثمن ومتوفرة هي الطريقة المثالية والمناسبة اقتصادياً. وهذه التقنية هي ملائمة جداً وخاصةً عندما يتعلق الأمر بمساحات كبيرة من الأراضي الملوثة سطحياً، حيث بينت الكثير من الدراسات نجاح الطريقة في الكثير من دول العالم كأمريكا الشمالية وأوروبا وأستراليا. فعلى سبيل المثال، تعمل إضافة المواد الفسفاتية للتربة الملوثة بالرصاص والزنك على تثبيت هذه المعادن على شكل مركبات فوسفات الرصاص، وفوسفات الزنك إذ تملك هذه المركبات الجديدة قدرة انحلالية منخفضة للغاية ضمن مجال واسع من pH التربة. وقد تُستخدم أيضاً الفلزات مثل فلز الأباتيت للهدف نفسه، حيث يملك فلز الأباتيت قدرة عالية على تثبيت الرصاص الذائب Pb^{2+} على شكل مادة راسبة من أباتيت الرصاص. ويوجد عموماً آليتين مقترحتين من أجل تفاعل الرصاص الذائب Pb^{2+} مع الأباتيت وهما:

١- تفاعل الرصاص مع هيدروكسي الأباتيت ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ hydroxyapatite). ويتم هذا التفاعل عبر مرحلتين:

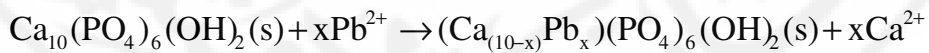
- ذوبان هيدروكسي الأباتيت حسب التفاعل التالي:



- تثبيت الرصاص على شكل أباتيت الرصاص $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ وفق التفاعل الآتي:



٢- أن يحل الرصاص الذائب Pb^{2+} محل الكالسيوم Ca^{2+} في الأباتيت وذلك حسب المعادلة:



يمكن أن تتشكل أباتيت الرصاص والكالسيوم من خلال ادمصاص الرصاص أو من خلال ذوبان هيدروكسي الأباتيت متبوعاً بعملية ترسيب مشترك co-precipitation لنوعي الأباتيت (أباتيت الرصاص وأباتيت الكالسيوم). ويمكن أيضاً تثبيت معادن ثقيلة أخرى مثل As، Cd، Pb، Zn في

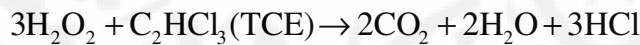
مصهور الترب الملوثة باستخدام فسفات الأمونيوم الثنائية (DAP). وتبين أن إضافة كميات من هذا المركب بمعدل 2.3 g/kg يُعد فعالاً من أجل تثبيت الكاديوم والرصاص والزنك في التربة الملوثة.

٣- الأكسدة والإرجاع الكيميائية Chemical Oxidation-Reduction :

تهدف هذه الطريقة إلى تحويل الملوثات في التربة لمركبات خاملة كيميائياً أو مواد أقل سمية من خلال إضافة الوسائط المؤكسدة أو المرجعة. فعلى سبيل المثال، يوجد كل من الكروم Cr والزرنيخ As في التربة بأكثر من حالة تكافؤ، فالكروم السداسي Cr^{6+} يُعد أكثر سمية وقابلية للحركة في التربة من الكروم الثلاثي Cr^{3+} ، وكذلك يُعتبر الزرنيخ الثلاثي As^{3+} أكثر سمية وقدرة على الحركة من الزرنيخ الخماسي As^{5+} . فإرجاع الكروم وأكسدة الزرنيخ يمكن أن يخفض سمية هذه المعادن.

وتُعد عملية الأكسدة الكيميائية إحدى طرائق المعالجة عالية الفعالية حيث أستخدمت بنجاح في معالجة التلوث عند مصادره، وأستخدمت أيضاً من أجل معالجة الترب الملوثة بالمركبات العضوية مثل مركبات الغازولين (BTEX) التي تضم كل من البنزين benzene، والتولوين toluene، والأتيل بنزن ethylbenzene والاكسيلين xylene بالإضافة إلى المركبات الهيدروكربونية (PAHs) ومركبات السيانييد Cyanides السامة. ويُستخدم في عملية الأكسدة الكيميائية مجموعة واسعة من المواد كوسائط أكسدة مثل الماء الأكسجيني (H_2O_2) والأوزون (O_3) وكذلك برمنغنات البوتاسيوم ($KMnO_4$). وتملك تلك المواد كفاءة عالية تزيد عن ٩٠% بعد فترة قصيرة من بداية التفاعل.

فعلى سبيل المثال، يجري تفاعل أكسدة مركب كلور الإيتيلين الثلاثي (C_2HCl_3) والذي يُرمز له اختصاراً TCE وهو أحد المركبات الأليفاتية غير المشبعة في حال استخدام الماء الأكسجيني كوسيط أكسدة على النحو التالي:



وأما في حال استخدام الأوزون كوسيط للأكسدة فيصبح التفاعل:



وأخيراً عندما يكون برمنغنات البوتاسيوم هو الوسيط فتحدث عملية الأكسدة على الشكل التالي:



وتعطي جميع تفاعلات الأكسدة الثلاثة السابقة غاز كلور الهيدروجين HCl وغاز ثاني أكسيد الكربون CO₂ كنواتج تفاعل. ولكن قد تُرجع الملوثات إلى تكافؤاتها الأكثر سمية تبعاً لظروف الوسط، ولذلك من الضروري القيام بالمتابعة والمراقبة المستمرة للكشف عن هذا التحول.

٤ - استخلاص محاليل الإذابة Solvent Extraction :

تعتمد هذه الطريقة على إذابة الملوثات في التربة عن طريق استخدام محاليل كيميائية معينة يختلف نوعها وطبيعة الملوثات الموجودة في التربة تُسمى محاليل الإذابة أو سوائل الاستخلاص extraction fluids. حيث تُوضع التربة الملوثة التي تم إزالتها من الموقع في أنبوب كبير ويُغسل بسائل الاستخلاص أو يخلطان معاً في إناء مفاعل خاص. يعمل سائل الاستخلاص على إذابة الملوثات وثم يُجمع بعد ذلك ويُعالج بغية تنقيته من الملوثات. ومن أجل الترب الملوثة بالمركبات غير العضوية، يمكن استخدام محلول مائي حامضي يحتوي على مواد خافضة للتوتر السطحي كسوائل استخلاص، وبعد إزالة الملوثات يمكن تعديل pH التربة عبر إضافة مادة قاعدية. بينما في الترب الملوثة بالمركبات العضوية تشكل المذيبات العضوية organic solvent سوائل استخلاص جيدة. ومن ناحية أخرى، قد تحتفظ التربة بعد معالجتها بكميات ضئيلة من المذيب لذلك ينبغي أيضاً الأخذ بعين الاعتبار مستوى سمية المذيب المستخدم في المعالجة.

٥ - إزالة العناصر الهالوجينية Dehalogenation :

تعمل هذه الطريقة على إزالة مجموعات الهالوجين من الملوثات العضوية الهالوجينية وتجعلها أقل سمية أو عديمة السمية، وذلك عبر إضافة مواد تحفز إزالة هذه المجموعات من التربة. تُخلط المواد المحفزة مع التربة الملوثة في وعاء المفاعل ثم يُعالج الخليط حرارياً من أجل تسهيل التفاعل. ويُعد عنصر الكلور من أهم العناصر الهالوجينية التي يمكن إزالتها من المركبات العضوية المكلّورة. وتُدعى عملية تخليص المركبات العضوية من عنصر الكلور بعملية إزالة الكلور المرجعة reductive dechlorination. وهي عملية عالية الفعالية وتُستخدم غالباً في معاملة المركبات المكلّورة القابلة للتطاير من خلال إمرار الغازات الساخنة التي تحتوي على الملوثات عبر طبقات من مادة محفزة معدنية تطلق تفاعل إرجاع يعمل على تحطيم الروابط الهالوجينية مما يقود إلى إزالة الكلور أو استبداله كما هو الحال في عملية تحول مركب كلور

الإيتيلين الثلاثي (TCE) إلى إيتيلين كما سنرى لاحقاً في الشكل (٥٨). ونظراً للتكلفة العالية للمواد المحفزة تُعتبر هذه التقنية عموماً غير اقتصادية في معالجة التربة شديدة التلوث. ولكن يمكن أن تُجز عملية إزالة الكلور المرجعة للملوثات العضوية دون إضافة مواد محفزة وذلك بالاعتماد على مركبات التربة التي تتميز بكمون أكسدة وإرجاع نشط مثل أكسيد الحديد أو الفلزات التي تحتوي على الحديد الثنائي وبذلك تصبح هذه الطريقة أقل تكلفة وذات كفاءة جيدة. وقد تتم أيضاً عملية إزالة الكلور المرجعة بوجود الأحياء الدقيقة عند إضافتها للتربة الملوثة حيث تحفز هذه الأحياء عملية نزع الكلور من الملوثات العضوية.

٦- الإدمصاص على الكربون الحبيبي الفعّال " Granulated Active Carbon" GAC :

تعتمد هذه الطريقة على قابلية معظم المركبات العضوية للإدمصاص على سطح الكربون الحبيبي النشط (GAC)، ويزداد هذا الميول مع ازدياد نقطة غليان boiling point المركبات العضوية. وتُستخدم الطريقة بشكل أساسي لمعاملة الغازات السامة والمذيبات والروائح ذات المنشأ العضوي. وتُعدّ الأفضل من أجل معالجة التربة الملوثة بالمركبات التالية: المركبات العضوية الهالوجينية القابلة للتطاير (VOCs) والهيدروكربونات ذات الأوزان الجزيئية العالية وبعض المبيدات والمواد المتفجرة. ويُستخدم الكربون الحبيبي بسبب صغر حجم حبيباته ومساحة سطحه النوعي الكبير حيث يشغل كل واحد غرام منه مساحة تزيد عن ٥٠٠ م^٢، مما يعطيه كفاءة عالية جداً في عملية إدمصاص المركبات على سطوحه الخارجية.

وتُجرى هذه الطريقة خارج الموقع في أحواض أو أسرة خاصة مجهزة لهذا الغرض ويمكن أن تتم هذه الطريقة في الطورالسائل (كما في معالجة المياه الجوفية) أو في الطور الغازي (كما في معالجة الغازات التي يحتويها بخار التربة المُستخلص من التربة الملوثة).

ثالثاً : تقنيات المعالجة الحيوية

Biological treatment technologies

تختلف تقنيات المعالجة الحيوية عن التقنيات الفيزيائية والكيميائية السابقة في فعاليتها وانخفاض تكاليفها. وتُعدّ بحد ذاتها طريقة معالجة نظيفة وصديقة للبيئة، حيث لا تستلزم إدخال أو استخدام مواد كيميائية في بيئة التربة، بل تعتمد على الكائنات الحية بشكل رئيسي في المعالجة. وتُعدّ الطريقتان التاليتان من أهم تقنيات المعالجة الحيوية المستخدمة:

- التحلل الحيوي.
- المعالجة بالنباتات.

التحلل الحيوي

Biodegradation techniques

وهو عبارة عن تقنية معالجة حيوية bioremediation تُستخدم في التربة الملوثة بالمركبات العضوية وتهدف إلى خفض التركيز الكلي للملوثات من خلال تحلل degradation المركبات العضوية جزئياً أو كلياً عن طريق الكائنات الحية الدقيقة microorganisms مثل البكتيريا والخمائر التي تعيش في التربة. وتستفيد هذه الكائنات الحية الدقيقة التي تُدعى بالمحللات (المفكّكات) degraders من الملوثات كمصدر للعناصر الغذائية والطاقة. ولقد أستخدمت هذه التقنية بنجاح لمعاملة التربة الملوثة بطيف واسع من الملوثات العضوية مثل الهيدروكربونات والمذيبات والمبيدات والمركبات الحافظة للأخشاب وغيرها من المركبات العضوية. وبالرغم من أن التحلل الحيوي يحدث طبيعياً في التربة وفي غيرها من البيئات، إلا أنه قد يتم أحياناً العمل على زيادة فعالية هذه العملية من خلال تنشيط عمل الأحياء الدقيقة المحللة. ويتم ذلك عبر إحدى طريقتين إما من خلال تأمين الظروف البيئية المثلى فيما يتعلق بكمية الأكسجين والعناصر الغذائية والرطوبة وضبط درجة حرارة و pH الوسط، أو أن تُلّج التربة الملوثة بسلاسل نوعية (محلية أو غير محلية) من الكائنات الحية الدقيقة المعروفة بقدرتها العالية على تحليل المركبات العضوية وتُعرف هذه التقنية تحت اسم التضخم الحيوي Bioaugmentation. وتستخدم البكتيريا عملياً كل الجزيئات العضوية الطبيعية والمصنعة والعديد من الجزيئات غير العضوية (مثل Fe^{2+} ، H_2S ، H_2 ، NH_4^+) بالإضافة إلى الضوء كمصدر للحصول على الطاقة، وإلى جانب الأكسجين، تستطيع الأحياء الدقيقة النوعية خلال نشاطها الحيوي استخدام مجموعة كبيرة من الملوثات الصناعية والمبيدات كمستقبلات إلكترون نهائية. ويمكن أن تقود عملية التحلل الميكروبي إلى إنتاج العديد من المواد المختلفة، ويؤدي بشكل عام التحلل الحيوي للجزيئات العضوية الكبيرة إلى إعطاء جزيئات عضوية أصغر حجماً وأقل تعقيداً وقد تكون أكثر أو أقل سمية مقارنة مع المركبات الأولية. فعلى سبيل المثال، يتحول مركب ثلاثي كلور الأتيلين "TCE" خلال عملية التحلل الحيوي إلى مركب vinyl chloride أقل سمية.

ومن ناحية أخرى، تُعتبر قابلية مادة كيميائية ما للتحلل الحيوي أحد أهم العوامل التي تحدد مصير تلك المادة في الوسط. ويخضع بشكل عام معدل التحلل لتأثير كل من الظروف البيئية وطبيعة الملوث. فعلى سبيل المثال، المعاملة الحيوية للهيدروكربونات العطرية المتعددة الحلقات polyaromatic hydrocarbons (PAHs) تكون انتقائية أي تقوم الكائنات الحية بانتقاء المركبات الأكثر قابلية للتحلل الحيوي، في حين تبقى المركبات الأقل قابلية ثابتة وبعيدة عن التأثير الحيوي.

ومن أهم الخصائص التي تتصف بها تقنية التحلل الحيوي هي انخفاض تكلفتها المادية، بالإضافة إلى أنها تتطلب وقتاً طويلاً مقارنةً مع غيرها من تقنيات المعالجة المتوفرة. ويرى البعض أن التحلل الحيوي للملوثات يُعد خطراً بسبب أثر التحولات الناتجة عن هذا التحلل على صحة الإنسان وسلامة البيئة. فالمركبات الناتجة عن هذه العملية قد تُغسل باتجاه المياه الجوفية مما يقود إلى تلوثها، مما يطرح تهديداً جدياً على مصادر مياه الشرب والصحة العامة نظراً لكون المركبات الموجودة في المياه الجوفية أكثر ثباتاً وديمومةً من تلك الموجودة في التربة بسبب ضعف النشاط الحيوي في المياه الجوفية. ويُعزى هذا الضعف إلى التزود المحدود بالأكسجين والمواد الغذائية اللاعضوية من جهة وانخفاض أعداد الأحياء الدقيقة من جهة أخرى. وبالإضافة إلى ذلك، تُعد طريقة المعالجة الحيوية سهلة وفعالة ولكن يعتمد الوقت اللازم لإتمامها على مكان إجراءها. حيث يمكن تنفيذها في نفس الموقع الملوث أو في أماكن معالجة متخصصة خارج الموقع الملوث، وتتميز هذه الأخيرة بفعاليتها العالية وسرعة إنجازها.

التحلل الحيوي في الموقع (بالمكان) In situ:

يُستخدم التحلل الحيوي في المكان بشكل أساسي لمعالجة التربة الملوثة بالمركبات العضوية القابلة نوعاً ما للتطاير مثل وقود الديزل والزيوت الثقيلة وغيرها من المركبات التي يمكن استقلالها من قبل الكائنات الحية الدقيقة. وتُعرف هذه التقنية عادةً باسم المعالجة الحيوية الهوائية aerobic bioremediation. وتتم من خلال إضافة مواد كيميائية للتربة من أجل تحفيز وتنشيط الكائنات الحية الدقيقة المفككة. ويُستخدم عادةً طريقتان بهدف خلق الظروف المناسبة لتنشيط تلك الكائنات وهما:

- التهوية الحيوية bioventing: وتتم من خلال ضخ الهواء عبر أنابيب خاصة إلى جسم التربة من أجل تزويد الكائنات الحية الدقيقة بكميات جيدة من الأكسجين.

- الحقن بالماء الأكسجيني: ويتم هنا إدخال الأكسجين للتربة على شكل سائل من خلال حقنها بالماء الأكسجيني. وتُجرى هذه الطريقة فقط في المواقع التي تعاني من تلوث المياه الجوفية وذلك من أجل الحيلولة دون التسبب بتلوث المياه الجوفية بهذه المركبات في المناطق غير الملوثة أو التي تُظهر تلوثاً محدوداً.

التحلل الحيوي خارج الموقع Ex situ:

تُنفذ هذه المعالجة بعيداً عن الموقع الملوث وتُطبّق على مجموعة واسعة من الملوثات. وهي عموماً طرائق أسرع وأكثر كفاءةً من طرائق المعالجة بالمكان، ولكنها أكثر كلفةً وتحتاج في بعض الحالات إلى إجراء معالجة أولية للتربة في الموقع الملوث قبل نقل التربة وذلك بهدف زيادة فعالية المعالجة.

وتخضع بشكل عام الملوثات في التربة إلى نوعين من عمليات التحول الحيوي هي التحولات الهوائية والتحولات غير الهوائية، وسنستعرض فيما يلي بشيء من التفصيل كلٍ منهما على حدة.

أولاً- عمليات التحول الهوائية Aerobic transformation processes :

بيّنت الدراسات المختلفة أنّ العديد من الملوثات المصنّعة يمكن أن تُستخدم من قبل بعض أنواع البكتيريا النوعية والفطور تحت ظروف هوائية كمصدرٍ للكربون وللطاقة. وتتمعدن غالباً هذه المركبات بشكل كامل عن طريق نوع وحيد أو مجموعة مختلفة من الكائنات الحية إلى CO_2 ومواد أخرى تُستخدم كمكونات للخلية. وأثناء هذه العملية يتحول الملوث بشكل عام تحت تأثير أنزيمات نوعية إلى واحد أو أكثر من المواد الاستقلابية (مثل الحمض العضوي pyruvic وجزيئة الأسيل كوانزيم acetyl-CoA). ثم تتحول هذه المواد الاستقلابية إلى طاقة وكتلة حيوية من خلال الممرات الاستقلابية المألوفة لدى الكائنات الحية.

ويمكن القول إنّ التمدن الهوائي aerobic mineralization للمركبات هو عملية مرتبطة مباشرة بنمو الكائنات الحية الدقيقة حيث يزداد من خلالها أعداد الميكروبات عندما يتناقص تركيز المادة الكيميائية. ويخضع العديد من الملوثات العضوية للتمدن في التربة مثل مكونات النفط الخام والغازولين ومجموعة كبيرة من المبيدات. وفي الوقت نفسه يوجد مجموعة واسعة من المواد العضوية التي يمكن أن تتحلل حيوياً من خلال عملية أخرى لا ترتبط مباشرة بنمو الكائنات الحية الدقيقة المفككة تُدعى بالاستقلاب المرافق co-metabolism. ومن خلال هذه العملية تُغيّر الخلية البكتيرية البنية الكيميائية للمركب عبر تفكيكه إلى مركبات أخرى، ولا يترافق

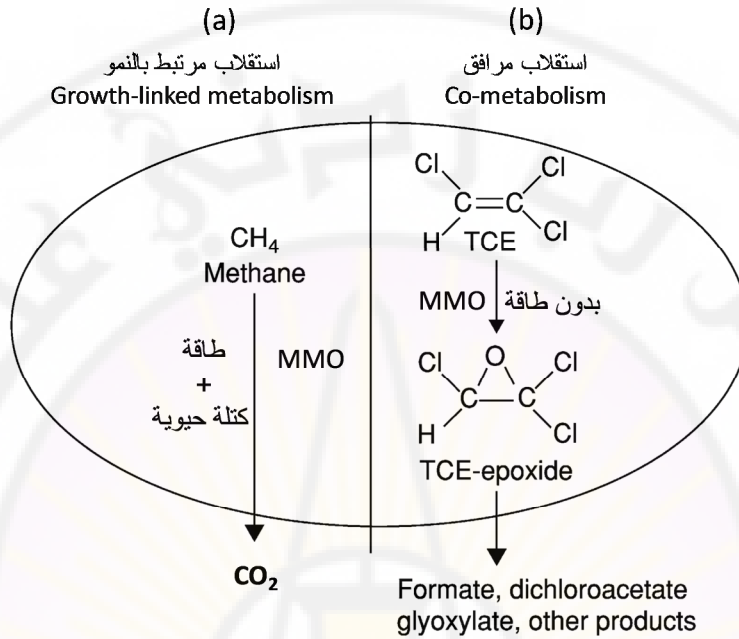
هذا التفاعل مع كسب طاقة أو كربون أو حتى عناصر غذائية غير عضوية. ولكن كعملية تحلل أكثر فعالية للملوثات، تُفضّل عملية التحلل الحيوي المرتبط بالنمو عن سابقتها لكونها تؤدي إلى فقدان سريع لتلك الملوثات من التربة.

وتوجد عدة مجموعات من البكتيريا الهوائية في الترب من أهمها:

- البكتيريا التي تتغذى على الميثان methanotrophic bacteria.
- البكتيريا المؤكسدة للأمونيا nitrifying bacteria.
- البكتيريا المؤكسدة للبروبان propane-oxidizing bacteria.
- البكتيريا المؤكسدة للفينول phenol-oxidizing bacteria.
- البكتيريا المؤكسدة للتولوين toluene-oxidizing bacteria.

ولقد وُجد أن تلك المجموعات السابقة من البكتيريا يمكن أن تحوّل مجموعة مختلفة من المركبات عبر تفاعلات استقلابية مرافقة co-metabolic إلى مركبات أخرى من خلال إنتاج أنزيمات الأكسجيناز الأحادية (MMO) monooxygenase أو أنزيمات الأكسجيناز الثنائية dioxygenase غير الانتقائية. على سبيل المثال، تُنتج البكتيريا التي تتغذى على الميثان أنزيمات الأكسجيناز الأحادية (MMO) وهو أنزيم يعمل عادةً على أكسدة الميثان للحصول على الطاقة (الشكل a-٥٦)، ويؤدي هذا التفاعل إلى إنتاج غاز ثاني أكسيد الكربون. ويملك هذا الأنزيم ميزة ركيزة عريضة حيث يُحفّز الأكسدة الأولية للعديد من المركبات الهيدروكربونية مثل الألكانات والألكينات والمركبات العطرية بالإضافة إلى دوره في تحلل سلسلة من المركبات الأليفاتية الكلورة مثل ثنائي كلور الإثيلين (DCE) وثلاثي كلور الإثيلين (TCE). ولا تحصل البكتيريا على الكربون أو الطاقة من عملية الأكسدة الاستقلابية المرافقة co-metabolism لغالبية المركبات، وإنما يتم الحصول على ما يلزم من الطاقة عبر إضافة ركائز مرافقة co-substrate ضرورية لنمو البكتيريا. فعلى سبيل المثال يُضاف مركب التولوين toluene من أجل البكتيريا المؤكسدة للتولوين، والميثان من أجل البكتيريا المؤكسدة للميثان. وبالرغم من أن التفاعلات الاستقلابية المرافقة تؤدي أحياناً إلى تراكم المركبات الوسيطة ذات البقاء المديد في الوسط، إلا أن التفاعل المؤكسد يُنتج مركبات قابلة للتحلل بسهولة التي تتمعدن بدورها لاحقاً. ووفقاً للشكل (b-٥٦)، يُعطي التفاعل الاستقلابي للأنزيم MMO مع المركب ثلاثي كلور الإثيلين (TCE) مركب epoxide غير ثابت (وهو عبارة عن مركب الإثير الحلقي) والذي يتحلل

لاحقاً إلى مجموعة مختلفة من ركائز النمو مثل glyoxylate ، formate ، و dichloroacetate.

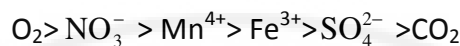


الشكل (٥٦) تتحلل الميثان إلى ثاني أكسيد الكربون ومركب TCE-epoxide عبر عمليتي الاستقلاب المرتبط بالنمو (a) والاستقلاب المرافق (b) على التوالي.

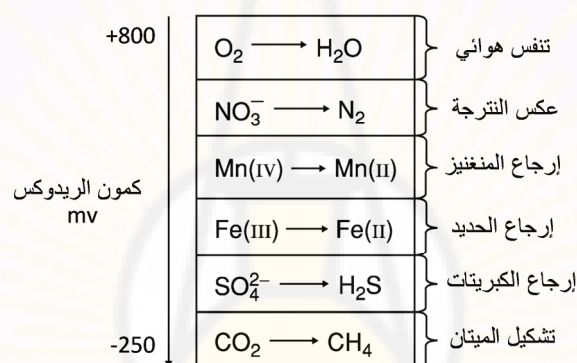
ثانياً-عمليات التحول اللاهوائية : Anaerobic transformation processes

يخضع طيف واسع من الملوثات والمبيدات للتحلل الحيوي تحت ظروف لاهوائية، فكلتا العمليتين التمدن والتفاعلات الاستقلابية المرافقة تحدثان أيضاً في البيئات اللاهوائية. وبما أن الكائنات الحية القادرة على القيام بعملية التحلل تحت تأثير الظروف اللاهوائية هي حصراً لا هوائية فإن تحلل بعض المركبات حيوياً يقتصر حدوثه فقط ضمن هذه الظروف. ويمكن أن يقترن تحلل بعض الملوثات النوعية والمبيدات تحت الظروف اللاهوائية بإرجاع مستقبلات الإلكترون النهائية الأخرى غير الأكسجين مثل NO_3^- ، Mn^{4+} ، Fe^{3+} ، SO_4^{2-} أو CO_2 وتُدعى هذه العملية بالتنفس اللاهوائي anaerobic respiration. وتكون الطاقة الناتجة عن عملية التنفس اللاهوائي باستخدام مستقبلات الإلكترون السابقة أقل من الطاقة الناتجة عن نفس التفاعل في

حال استخدام الأكسجين كمستقبل إلكترون. ويتناقص إنتاج الطاقة مع تغير مستقبلات الإلكترون وفق التسلسل التالي:



ولهذا السبب تكون التفاعلات اللاهوائية بطيئة وتكون فيها نواتج النمو الميكروبي أقل مما هي عليه في حالة التفاعلات الهوائية. ويبين الشكل (٥٧) تتابع تفاعلات استقبال الإلكترون عند تحلل مركب عضوي ما في التربة. تبدأ هذه التفاعلات انطلاقاً من الأكسجين O_2 كمستقبل إلكترون أولي في الظروف الهوائية على اعتباره هو السائد في التربة وتنتهي بعملية تشكيل الميثان في ظروف توفر CO_2 كمستقبل أولي في الوسط عبر تفاعل إرجاع.



الشكل (٥٧) تتابع تفاعلات استقبال الإلكترون خلال تحلل مركب عضوي ما. ويمكن لبعض الكائنات الحية الدقيقة (مثل اللاهوائية الاختيارية) أن تستعمل أكثر من مستقبل إلكترون واحد، كما هو الحال بالنسبة لبكتيريا عكس النترجة التي تنمو هوائياً بوجود الأكسجين ومن ثم لاهوائياً بالاعتماد على النترات NO_3^- عندما ينخفض تركيز الأكسجين في الوسط. بينما العديد من البكتيريا المسؤولة عن إرجاع الكبريتات تكون حصراً لاهوائية وتستخدم مستقبلاً واحداً فقط هو الكبريتات SO_4^{2-} .

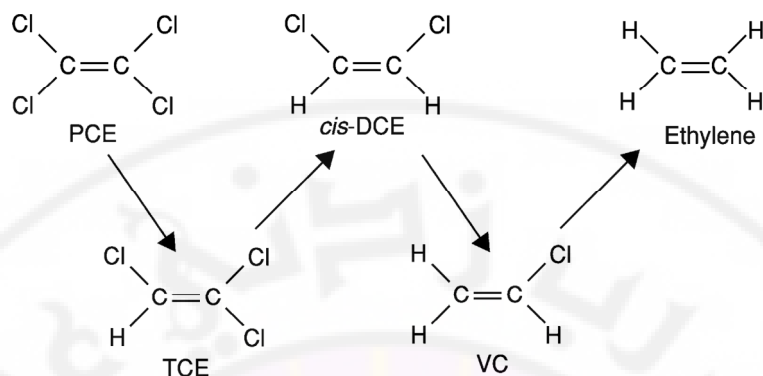
وعندما تُستنفذ مستقبلات الإلكترون واحداً تلو الآخر من الوسط الملوّث، فمن الممكن أن يقود ذلك إلى توقف عملية التحلل الحيوي. ولهذا السبب، يُضاف الأكسجين بشكل متكرر إلى التربة الملوثة بالمركبات العضوية بهدف تنشيط التحلل الحيوي وتحفيزه. وقد تُضاف أيضاً أسمدة غير

عضوية للتربة على شكل عناصر غذائية صغرى أو كبرى في حال كان محتواها من هذه العناصر غير كافٍ لدعم النشاط الميكروبي.

ومن ناحية أخرى، يمكن أن تُستخدم بعض الملوثات المكلورة مثل المركبات ثنائية الفينيل-متعددة الكلور (PCBs)، والمركبات كلوروفينول chlorophenols، والمذيبات الكلورية، وبعض المبيدات العضوية الكلورية (مثل المبيد الحشري DDT) كمستقبلات إلكترون بديلة من خلال عملية إزالة الكلور المرجعة reductive dechlorination والتي تُدعى أيضاً بالتنفس الهالوجيني halorespiration. وهذه العملية التي تحدث فقط في غياب الأكسجين تمثل خطوة في غاية الأهمية بالنسبة لتحلل الملوثات مديدة البقاء. ففي أثناء هذه العملية تنقل البكتريا الإلكترونات من ركيزة النمو (الهيدروجين) إلى المركبات المكلورة مما يقود ذلك إلى تحرير أيونات الكلور في الوسط وإعطاء النواتج العضوية الثانوية المختلفة.

وكمثال على عملية إزالة الكلور المرجعة يبين الشكل (٥٨) مراحل هذه العملية للمركب رباعي كلور الإثيلين (PCE) perchloroethylene، حيث يتم إزالة ذرات الكلور في المركب تدريجياً من خلال استبدالها بذرات الهيدروجين ويتحول المركب نتيجة تغير بنيته الكيميائية إلى مركبات أخرى هي: TCE، 1-cis-2-DCE، vinyl chloride (VC)، والإثيلين ethylene على التوالي. كما وتخضع مركبات أخرى مثل المركبات ثنائية الفينيل-متعددة الكلور (PCBs) وعدد من المبيدات العضوية الكلورية مثل pentachlorophenol (PCP) والمبيد DDT لمثل هذا التفاعل تحت ظروف إرجاع قوية.

وقد تحدث عملية إزالة الكلور المرجعة لبعض المركبات في التربة نتيجة تبدل في متجانسات congeners المركب وليس من خلال إزالة عنصر الكلور ومثال على ذلك المركبات PCBs حيث تتم عملية إزالة الكلور المرجعة عبر تغير متجانسات المركب PCB الموجودة ضمن الوسط وذلك اعتباراً من النظائر الأكثر كلورةً (التي تحتوي على أكثر عدد من ذرات الكلور) إلى النظائر الأقل كلورةً.



الشكل (٥٨) خطوات التحلل الحيوي للمركب perchloroethylene (PCE) خلال عملية إزالة الكلور المرجعة.

العوامل المؤثرة في عملية التحلل الحيوي:

تُعتبر كل المركبات العضوية الطبيعية قابلة للتحلل الحيوي، ويرتبط معدل حدوث هذا التحلل بشكل واسع بالظروف البيئية وطبيعة التركيب الكيميائي لتلك المركبات (مثل التحلل الحيوي للليغنين الذي يُوصف بأنه بطيء حتى تحت ظروف تحلل مثالية لكونه ذا تركيب كيميائي معقد). ولكن يُعتقد بشكل عام أنه لا يوجد مواد عضوية طبيعية مقاومة بشكل كامل للتحلل والتفكيك الميكروبي. وليس من المفاجئ القول أن الأنزيمات الميكروبية المسؤولة عن عملية التحلل الحيوي قد تطورت خلال مئات الملايين من السنين بشكل متزامن وجنباً إلى جنب مع ظهور مركبات عضوية جديدة في البيئة.

ونقسم العوامل التي تؤثر في قابلية المركب للتحلل الحيوي degradability إلى مجموعتين: مجموعة أولى هي عبارة عن عوامل تمثل الخواص الكيميائية للمركب من حيث النوع والتركيز في الوسط وتوضع البدائل الجزيئية molecular substituents ونوع الروابط الكيميائية ودرجة النقرع بالإضافة إلى الوزن الجزيئي كما يبين الشكل (٥٩). ومجموعة ثانية تضم العوامل البيئية التي تمثل خواص الوسط مثل درجة الحموضة وكمية الرطوبة ودرجة الحرارة وغيرها من العوامل.

أولاً- الخواص الكيميائية المؤثرة في عملية التحلل الحيوي:

١- محتوى المركب من العناصر الهالوجينية:

يؤدي زيادة عدد العناصر الهالوجينية halogenations في المركب (الشكل ٥٩-ا) إلى زيادة مقاومته للتحلل الحيوي وبالتالي إلى زيادة طول فترة بقائه في البيئة. ولهذا السبب يُنصح باستخدام تلك المركبات لمرة واحدة فقط. وتضم هذه المركبات المبيدات العضوية الكلورية مثل DDT، toxaphene، pentachlorophenol، chlordane، aldrin، hexachlor و metoxychlor. ومُنِع استخدام هذه المبيدات في العديد من دول العالم كالولايات المتحدة الأمريكية ومعظم الدول الأوروبية بسبب بقائها المديد وتأثيراتها السلبية في الأنظمة البيئية المختلفة. إذ أثبتت الدراسات أن هذه المركبات ذات مقاومة عالية للتحلل الحيوي الهوائي وتُبدى تحللاً بطيئاً جداً تحت الظروف اللاهوائية.

ومن أهم الملوثات الهالوجينية مديدة البقاء في البيئة والتي تحتوي على عناصر هالوجينية يمكن أن نذكر المركبات التالية: ثنائي الفينيل-متعدد الكلور (PCBs)، وثنائي الفينيل- متعدد البروميد polybrominated biphenyls (PBBs)، وكذلك المذيبات الكلورية مثل رباعي كلور الاثيلين (PCE)، والمركب carbon tetrachloride.

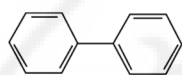
٢- التفرع أو التشعب الجزيئي للمركب:

تعمل أيضاً زيادة التفرع الجزيئي molecular branching للمركب على خفض معدل تحلله الحيوي (الشكل ٥٩-ب). حيث تميل التفرعات الجزيئية للمركب للتعارض مع الأنزيمات المفككة التي تفرزها الكائنات الحية الدقيقة أثناء عملية التحلل الميكروبي. فعلى سبيل المثال، تتحول العديد من الألكانات alkanes مثل مركب الأوكتان عن طريق البكتريا إلى جزيئة الاستيل كوانزيم acetyl-coA عبر عملية تُدعى الأكسدة - بيتا beta-oxidation التي تمثل عمليات متسلسلة من أكسدة وانفصال لجزيئتي كربون. خلال هذه العملية، يتأكسد مركب الأوكتان بشكل متعاقب إلى كحول ثم إلى ألدهيد ومن ثم إلى حمض أليفاتي، وبعدها ينقسم الحمض ليشكل جزيئة acetyl-coA التي يمكن أن تستخدمها الخلية كمصدر للطاقة. تستمر عملية الأكسدة- بيتا حتى يتحلل كامل الأوكتان إلى acetyl-coA.

وتفرع المركب الألكاني وبشكل خاص التفرع مع واحدة أو أكثر من مجموعات الميثيل methyl groups (-CH₃)، يمكن أن يُوقف انفصال جزيئتي الكربون في عملية الأكسدة- بيتا مما يسبب تحول جزيء المركب إلى جزيء غير قابل للتحلل الحيوي. لذلك، توصف بعض مركبات الألكانات المتفرعة مثل pristaine و phytane بأنها المركبات ذات معدل التحلل الأكثر بطءً

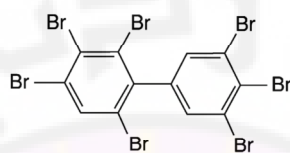
من بين مركبات النفط الخام وتستخدم كمؤشر مرجعي من أجل تقدير مستوى التحلل الحيوي للمركبات الأخرى للنفط الخام.

تحلل حيوي سريع



Biphenyl

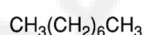
تحلل حيوي ضعيف



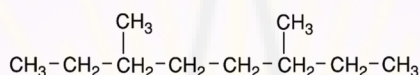
Polybrominated biphenyl

الاختلاف في التركيب والبنية

1- محتوى المركب من العناصر الهالوجينية
(a)

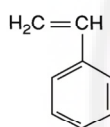


Octane

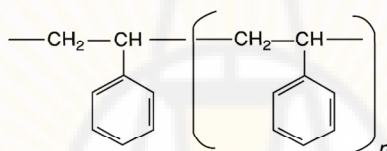


3,6-Dimethyloctane

2- مستوى التشعب الجزيئي
(b)

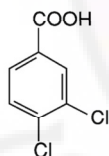


Styrene

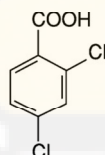


Polystyrene (MW > 500)

3- الوزن الجزيئي
(c)



3,4-Dichlorobenzoic acid



2,4-Dichlorobenzoic acid

4- مواقع التبادل
(d)

الشكل (٥٩) تأثير البنية الجزيئية للملوثات في قابليتها للتحلل الحيوي.

٣- الوزن الجزيئي للمركب:

يُسبب الوزن الجزيئي الكبير للمركب الكيميائي انخفاض قابليته للتحلل الحيوي. عندما يزداد الوزن الجزيئي للمركب إلى أكثر من ٥٠٠-٦٠٠ (وحدة وزن جزيئي) يميل التحلل الحيوي للانخفاض بشكل ملحوظ، وهذا ينعكس إلى حد ما على عدم قدرة الجزيئات الكبيرة على دخول الخلية الميكروبية. فعلى سبيل المثال، تعود إعاقة التحلل الحيوي للعديد من البوليميرات العضوية

التي تكون مادة البلاستيك مثل البولي اتيلين polyethylene والبولي ستيرين polystyrene إلى الحجم الجزيئي الكبير لتلك البوليميرات (شكل ٥٩-c). وإذا انخفض الوزن الجزيئي إلى أقل من ٥٠٠ (وحدة وزن جزيئي) مقارنةً مع أوزانها الجزيئية الطبيعية الذي يتراوح بين عدة آلاف إلى أكثر من ١٠٠٠٠٠ (وحدة وزن جزيئي) فإن العديد من تلك البنى البوليميرية ستصبح قابلة للتحلل الحيوي.

٤- موقع وتوضع البدائل:

تمثل عملية إضافة بدائل substituents عضوية أو غير عضوية جديدة إلى بنية جزيئية معروفة لمركب كيميائي ما إحدى طرائق تكوين مركبات صناعية جديدة (والبدائل هي عبارة عن ذرات أو جزيئات معينة). و وجود اختلافات صغيرة في نوع وتوضع هذه البدائل يمكن أن يحدد قابلية وميول هذا الجزيء للتحلل الحيوي. وتُدعى الجزيئات أو المركبات المقاومة للتحلل الحيوي بسبب خواص بنيتها الكيميائية بالمركبات المستعصية أو المعنّدة "recalcitrant molecules". وقد ظهر العديد من المركبات العضوية المصنّعة والمبيدات عن طريق إضافة بعض العناصر الهالوجينية (بشكل خاص الكلور، الفلور، البروم) إلى المركبات العضوية. ولأن الرابطة بين الهالوجين والكربون تُعتبر مستقرة بشكل كبير وثابتة ومقاومة للتأثير الميكروبي، فهذا النوع من الاستبدال substitution يميل إلى تشكيل جزيئة مُستعصية (مُعنّدة) كما هو الحال في تحول حمض ثنائي الكلوروبنزويك من الشكل القابل للتحلل السريع 3، 4-Dichlorobenzoic acid إلى الشكل المستعصي 2، 4-Dichlorobenzoic acid (الشكل ٥٩-d).

ثانياً- العوامل البيئية المؤثرة في التحلل الحيوي:

ليس من الضروري أن تكون الملوثات التي تتحلل بسهولة تحت ظروف قياسية مثل ظروف المخبر قابلةً أيضاً للتحلل بسهولة في الحقل حتى وإن وُجدت الكائنات الحية القادرة على تحليلها. إن لم تكن الملوثات متاحة بشكل جيد للكائنات الحية الدقيقة وكانت الظروف البيئية مشجعة للنشاط البكتيري، ستكون عملية التحلل الحيوي محدودة وقد تبقى الملوثات في التربة لفترات زمنية طويلة. حيث يرتبط نمو الكائنات الحية الدقيقة وكذلك معدل التحلل الحيوي للمواد الكيميائية إلى حدٍ كبيرٍ بالخواص الفيزيائية والكيميائية والحيوية لبيئة التربة. ومن أهم العوامل البيئية المؤثرة في التحلل الحيوي:

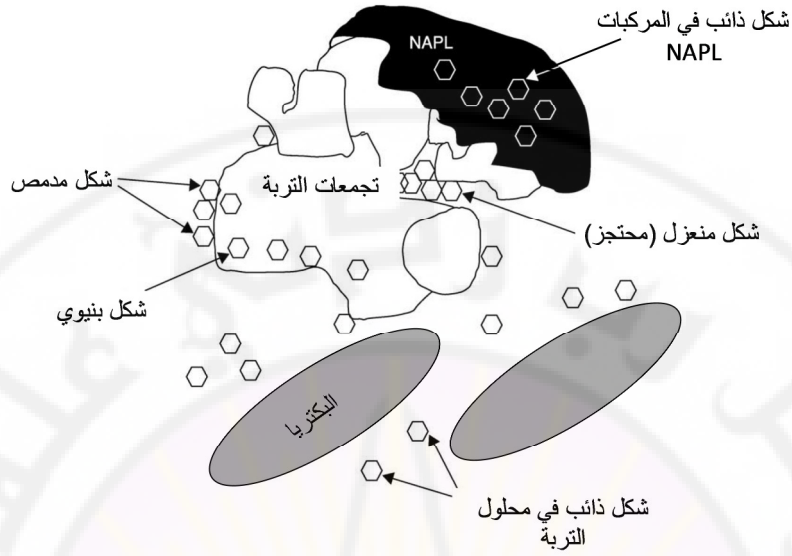
١- الجاهزية الحيوية للمركبات:

لا تُعد الملوثات التي تصل إلى التربة قابلةً للتحلل الحيوي إن لم تكن تتمتع بجاهزية حيوية جيدة. ويمكن أن تمكث الملوثات فترة طويلة في التربة إن لم تدخل في تماس مع الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في الوسط. ويمكن أن تتخفف الجاهزية الحيوية للمركب إذا كان مدمصاً على حبيبات التربة، أو محتجزاً ضمن البنية الأساسية للتربة soil matrix أو منحلاً في الطور غير المائي nonaqueous-phase liquid. ويمثل الشكل (٦٠) الأشكال المختلفة لوجود الملوثات العضوية في التربة. وفيما يلي سنستعرض هذه الأشكال الثلاثة بشيءٍ من التفصيل.

a- الادمصاص:

يجب أن تكون الملوثات ذائبة في الطور السائل للتربة لكي تدخل الملوثات الخلية الميكروبية لتخضع فيما بعد لعملية التحلل الحيوي، لهذا يزيد غالباً ادمصاص المركبات الكيميائية على سطوح حبيبات التربة من مقاومتها للتأثير الميكروبي. ومن ناحية أخرى، تفرز بعض البكتيريا والفقار خارج خلاياها مواد حيوية خافضة للتوتر السطحي تعمل على زيادة إزاحة الملوثات المدمصة إلى محلول التربة. إن تحرير هذه المواد الكيميائية في الوسط يمكن أن يسرع بالتالي من عملية التحلل الحيوي.

تحتوي معادن الطين والمادة العضوية في التربة على مقدار لا بأس به مواقع الادمصاص التي يمكن للملوثات المتأينة أن ترتبط بها مثل مثيل الأعشاب diquat الذي يدمص بقوة على معادن الطين والمادة العضوية، وادمصاصه القوي هذا يجعل منه مركباً غير متاح كيميائياً أو حيوياً. بينما تميل الجزيئات العضوية اللاقطبية للارتباط مع المادة العضوية من خلال عملية الادمصاص أو الدخول ضمن حشوة التربة soil matrix. وعلى سبيل المثال، تدخل بعض المركبات PAHs مثل phenanthrene، و anthracene، و pyrene ضمن حشوة التربة وتتنخفض بالتالي جاهزيتها الحيوية كنتيجةً لتفاعلاتها مع مركبات المادة العضوية الهيومية.



الشكل (٦٠) أشكال وجود الملوثات العضوية في التربة.

b- احتجاز المركبات ضمن حشوة للتربة Soil matrix:

يمكن لبعض المركبات عند وصولها التربة أن تتحرك ببطء ضمن هذا الوسط من مواقع تُعتبر سهلة المنال بالنسبة للكائنات الحية إلى مواقع أخرى بعيدة نوعاً ما عن تأثيرها. ونتيجة لذلك يمكن أن تلاقي تلك المركبات انخفاضاً في جاهزيتها الحيوية كما هو الحال بالنسبة للملوثات العضوية اللاقطبية التي يمكن أن تنتشر بعمق في المناطق الكارهة للماء hydrophobic regions ضمن المادة العضوية للتربة وتصبح بذلك بعيدة عن تأثير الأحياء الدقيقة. في حين تلجأ مركبات أخرى للانتشار في مسام التربة الدقيقة جداً nanopores، لتصبح محمية فيزيائياً من العمليات الاستقلابية التي تقوم بها الكائنات الحية الدقيقة. ويُدعى المركب الذي يتحرك إلى مواقع معزولة في التربة بالمركب المعزول أو المحتجز. ويعتمد حجم عملية العزل sequestration على عدد من العوامل تتعلق بخواص التربة والملوثات، فقد بينت بعض الدراسات أنَّ حجز المركبات الكيميائية في التربة يزداد مع ازدياد محتواها من المادة العضوية. ومن المحتمل أيضاً أن تلعب بنية التربة دوراً أساسياً في عملية عزل بعض الملوثات. ففي الترب

جيدة البناء يمكن أن تكون الملوثات محمية من التحلل الحيوي أكثر بالمقارنة مع الترب ضعيفة البناء.

من ناحية أخرى، تلعب بعض الخواص الكيميائية للملوث دوراً هاماً في احتجازها بالتربة، حيث تبين وجود علاقة عكسية بين قدرة الملوثات على الذوبان في الماء وقدرتها الكامنة على الانعزال والاحتجاز ضمن التربة. وتُعتبر المركبات PAHs، والعديد من المبيدات مثل 1،2-dibromothane، DDT والكلوردان chlordane الأكثر قابلية للحجز أو الانعزال ضمن التربة.

c- طور السائل غير المائي Nonaqueous-phase liquid :

يمكن وجود بعض الملوثات في التربة على شكل منحل في مذيبات غير مائية مثل المركبات الهيدروجينية (النفط ومشتقاته). حيث تشكل هذه المواد طوراً سائلاً غير مائياً nonaqueous-phase liquid (NAPLs) ويملك أغلبها قدرة منخفضة جداً على الذوبان في الماء. وبما أن النشاط الحيوي للكائنات الحية الدقيقة يتركز بشكل طبيعي في الطور المائي فقط، فإن الملوثات من النوع NAPLs أو تلك الذائبة فيها يمكن أن تكون بعيدة عن تأثير الكائنات الحية وتأثير نشاطها الحيوي التحليلي. وإلى جانب ذلك، يتوقف مقدار تحلل المركب المنحل في الطور السائل غير المائي على عدة عوامل وهي: معدل تجزئة المركب partition rate بين الطورين المائي وغير المائي، والتركيز التوازني للملوثات في الطور المائي، وطبيعة سطح التماس بين الطورين السابقين بالإضافة إلى سمية المركبات NAPLs إتجاه الكائنات الحية الدقيقة المسؤولة عن عملية التحلل الحيوي. وبرغم ميول المركبات NAPLs إلى التحلل بمعدلات مختلفة، إلا أن الملوثات الذائبة والمنتشرة في هذا الطور يمكن أن تمكث في التربة لفترة طويلة من الزمن.

٢- جاهزية العناصر الغذائية في التربة:

تحتاج الكائنات الحية الدقيقة مختلطة التغذية heterotrophic التي تعيش في التربة لكمية من العناصر الغذائية الصغرى والكبرى كمصدرٍ للطاقة ومستقبلات للإلكترون. في الترب الملوثة تشكل غالباً الملوثات ذلك المصدر، ولكن إذا كانت هذه الترب فقيرة بالعناصر الغذائية وخاصةً الآزوت والفسفور يمكن للملوثات أن تبقى في الوسط لفترة من الزمن بسبب ضعف نمو ونشاط الكائنات الحية الدقيقة القادرة على تحليلها واستقلابها. وهنا تلجأ الكائنات إلى الاعتماد على الملوثات نفسها كمصدرٍ للعناصر الغذائية كما هو الحال في أثناء التحلل الحيوي لبعض المواد المتفجرة مثل TNT و RDX عند وجود محتوى محدود من الآزوت في التربة.

ويمكن أيضاً أن تُستخدم بعض المركبات العضوية التي تحتوي على الفسفور مثل ثلاثي فسفات الايتيل (TEP) triethylphosphate من قبل الكائنات الحية الدقيقة للحصول على الفسفور في حال عدم تيسره للكائنات الحية.

٣- درجة حموضة الوسط:

تُعد درجة pH الوسط القريبة من الاعتدال الدرجة المثلى لأغلب الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في التربة، ولكن تستطيع بعض البكتريا والفطور أن تنمو وتعيش تحت ظروف شديدة الحموضة أو القلوية. ولقد طورت الكائنات الحية الدقيقة نفسها للحياة تحت ظروف قصوى من pH الوسط (حموضة أو قلوية)، ويمكن أن يقود سيطرة هذه الظروف إلى تغير في طبيعة الأنزيمات التي تفرزها الكائنات الحية الدقيقة. لذلك يزداد التحلل الحيوي للملوثات عند درجة pH قريبة من الاعتدال، بينما يتناقص بشكل ملحوظ عند ازدياد قلوية أو حموضة الوسط. وبالإضافة إلى تأثيرها المباشر في الخلايا الميكروبية تؤثر pH أيضاً في عملية ادمصاص الملوثات القابلة للتأين في التربة وبالتالي تؤثر في جاهزيتها الحيوية. فقد بينت بعض الدراسات أن ادمصاص بعض الملوثات مثل مبيد الباراكوات paraquat، والديكوات diquat، والمبيدات القاعدية مثل الأترازين atrazine والمبيدات الحامضية مثل 2،4،D-، و dicamba يعتمد بشكل كبير على pH التربة.

٤- درجة حرارة الوسط:

يتعلق نمو الكائنات الحية الدقيقة بشكل كبير بدرجة حرارة التربة. إذ تُعتبر درجة الحرارة السائدة في التربة العامل البيئي الأكثر أهمية في تحديد معدل وحجم عملية التحلل الحيوي للملوثات. إن أغلبية الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة هي من النوع mesophilic أي تعيش في درجات حرارة معتدلة. وتنمو الكائنات الحية الدقيقة ضمن مجال حراري محصور بين ١٥ و ٤٥ درجة مئوية، بينما تُعتبر درجة الحرارة التي تتراوح بين ٢٥ و ٣٥ درجة مئوية هي الدرجة المثلى للنمو. وبذلك تقع درجة الحرارة المثلى للتحلل الحيوي للمركبات ضمن المجال الحراري الذي يحقق أفضل نمو للكائنات الحية، وتزداد معدلات التحلل مع زيادة درجة الحرارة ضمن هذا المجال.

ولكن، هذا لا يعني إطلاقاً أن عمليات تحلل الملوثات حيوياً في التربة تتوقف عندما تصبح درجة الحرارة أدنى من ١٥ أو أعلى من ٤٥ درجة مئوية، بل يوجد العديد من الأنواع البكتيرية التي يمكن أن تعيش وتنمو بشكل مثالي عند درجات حرارة أقل من ١٥ درجة مئوية تُدعى بالكائنات

المحبة للبرودة psychrophilic. ويوجد أيضاً أنواع بكتيرية أخرى محبة للحرارة thermophilic تتميز بنمو مثالي عندما تتجاوز درجة حرارة الوسط ٤٠ درجة مئوية وبعض الأحيان عند درجة حرارة قصوى تصل إلى ٦٠ درجة مئوية. وتلك الكائنات الحية تُعد مسؤولة عن التحلل الحيوي للملوثات في بيئات ذات ظروف باردة مثل بيئة المناخات القطبية أو ظروف مرتفعة الحرارة كما هو الحال أثناء تشكيل الكومبوست.

٥- المحتوى الرطوبي للتربة Water content:

يؤثر المحتوى الرطوبي للتربة في نمو الكائنات الحية الدقيقة وعملياتها الاستقلابية، وتختلف الكائنات الحية عن بعضها البعض في استجابتها لتغيرات رطوبة التربة. ويحدث النشاط الميكروبي الأمثل لمعظم الكائنات الحية الدقيقة عند محتوى رطوبي يتراوح بين ٦٠ و ٨٠ % من سعة التشبع الرطوبي. فالأوساط التي تتميز بمحتوى رطوبي منخفض تدعم بشكل محدود النشاط الميكروبي. ففي ترب المناطق الجافة، يكون التحلل الحيوي محدوداً جداً مما يسبب بقاء الملوثات فترة طويلة من الزمن مقارنةً مع ترب المناطق الرطبة.

بينما يمكن أن تحدّ الرطوبة الزائدة للتربة من انتشار الأكسجين في الوسط وتتحول الظروف نتيجة ذلك إلى ظروف لاهوائية. وبالرغم من أنّ غياب الأكسجين المتاح في الوسط يمكن أن يُعيق تحلل بعض الملوثات ومنها المبيدات، إلّا أنّ الظروف اللاهوائية تشجع مع ذلك تحلل بعض المركبات الأخرى عبر عملية إزالة الكلور المرجعة.

٦- وجود الكائنات الحية الدقيقة الملائمة:

يلعب وجود الكائنات الحية الملائمة والقادرة على القيام بعملية التحلل الحيوي دوراً أساسياً في إنجاز هذه العملية، وهذه الكائنات هي غالباً مستوطنة (محلية) في التربة. فعلى سبيل المثال، البكتيريا التي تحلل هوائياً مكونات الغازولين (BTEX) تنتشر في الطبقة السطحية لمعظم الترب تقريباً. وقد تتوفر في بعض الأوساط ظروف مناسبة لتحلل بعض الملوثات لا تتوفر في غيرها من الأوساط. فقد وُجد على سبيل المثال أن مركب gasoline oxygenate methyl يتحلل بسهولة في الظروف الهوائية لبعض الترب بسبب وجود ظروف مناسبة للتحلل، ولكنه مديد البقاء وبشكل كبير في ترب أخرى. وقد تبين أيضاً أن غياب الكائنات الحية الدقيقة النوعية *Dehalococcoides ethenogenes* المسؤولة عن عملية التنفس بإزالة العناصر الهالوجينية dehalorespiration يشكل العامل الأساسي الذي يحدد مدى تحلل كل من المركبات PCE و TCE في بعض الظروف اللاهوائية. ففي غياب هذه الكائنات الحية تتوقف عملية إزالة الكلور

للمركب PCE أو TCE عند مرحلة تشكل المركب *cis*-DCE أو VC بدلاً من أن تتطور نحو الأمام وصولاً إلى المركب النهائي إيثيلين ethylene (الشكل ٥٨).

٧- عملية الافتراض:

تتعرض البكتيريا للافتراض من قبل بعض حيوانات التربة وحيدة الخلية (البروتوزوا protozoa). ويمكن أن تؤثر هذه العملية في تحلل ملوثات التربة حيوياً، وقد يكون هذا التأثير محفزاً أو معيقاً ومؤخراً للتحلل الحيوي.

إن عملية الافتراض التي تقوم بها البروتوزوا يمكن أن تقلل من عدد الخلايا البكتيرية التي تقوم بتحليل واستقلاب الملوثات الموجودة في الوسط، وتقود بالتالي إلى انخفاض معدل تحلله. بالمقابل، قد تنشط عملية الافتراض هذه نمو الكائنات الحية الدقيقة من خلال تأثيرها في جاهزية العناصر الغذائية، حيث تحرر البروتوزوا عبر استقلابها للخلايا الميكروبية عناصر معدنية قابلة للإفادة مثل الآزوت والفسفور وغيرهما من العناصر التي تعود بدورها إلى التربة، مما يساهم ذلك في تحفيز نمو الخلايا الميكروبية في الوسط.

ولابد من التنويه هنا إلى أنّ طبيعة العلاقة بين حيوانات التربة وحيدة الخلية والبكتيريا معقدة جداً وخصوصاً فيما يتعلق بتأثيرها في معدل التحلل الحيوي للملوثات. إذ تبين أن هذا المعدل يتوقف على جملة من العوامل المختلفة التي تشمل كلاً من كثافة الخلايا البكتيرية والكائنات الحية المفترسة وحجم الخلايا بالإضافة إلى خواص الوسط الذي تعيش فيه هذه الكائنات.

٨- وجود مركبات أخرى في التربة:

يمكن أن تتأثر الكائنات الحية الدقيقة المسؤولة عن تحلل واستقلاب ملوث ما بوجود ملوثات أخرى في التربة. فقد توجد بعض المعادن الثقيلة أو المركبات الهيدروكربونية ذات الوزن الجزيئي المنخفض بتركيز سام في التربة تعمل على قتل الأنواع البكتيرية المسؤولة عن تحلل مركبات أخرى توجد في التربة.

وقد يستخدم الكائن الحي مركباً آخر غير الملوثات كمصدر للكربون أو الطاقة، مما قد يبطئ عملية تحلل الملوث الهدف. ولكن بالمقابل يمكن أن يعزز وجود مركب آخر النشاط الميكروبي ويسرع عملية التحلل الحيوي. فعلى سبيل المثال، وُجد أن إضافة مركب ثنائي الفينيل biphenyl للتربة يزيد من معدل تحلل بعض المركبات ثنائية الفينيل - متعددة الكلور (PCBs) ضعيفة الكلورة.

المعالجة بالنباتات Phytoremediation

يتألف المصطلح phytoremediation من قسمين هما: Phyto وتعني النبات واللاحقة remedium وتعني التنظيف أو الإزالة. وهو يُعبّر عن استخدام النباتات الموجودة طبيعياً أو المعدلة وراثياً كمصالحات أو كوسائط من أجل معالجة التربة الملوثة بالمركبات العضوية وغير العضوية. ويحدث الجزء الأعظم من هذه العملية في منطقة المحيط الجذري Rhizosphere أو بشكل أعم في منطقة انتشار الجذور النباتية. وتُعد بشكل عام طريقة المعالجة باستخدام النباتات تقنية سلبية passive وقد اكتسبت قبولاً واسعاً كطريقة فعالة في المعالجة خلال العقود القليلة الماضية كونها تُعد صديقة جيدة للبيئة. وتختلف الملوثات العضوية في درجة استجابتها لهذه الطريقة، فقد تستجيب بعض الملوثات مثل المعادن الثقيلة وبعض المركبات الكارهة نوعاً ما للماء كالبنزن Benzene والتولوين Toluene والمذيبات الكلورية للمعالجة بشكل أفضل من غيرها.

وتشمل عملية المعالجة بالنباتات خمس تقنيات مختلفة من أجل معالجة التربة أو الرسوبيات أو المياه الملوثة بأنواع مختلفة من المركبات، وتملك كل تقنية منها خواصاً معينة وآلية تأثير مختلفة ولكنها تقود في النهاية إلى هدف واحد وهو الحد من انتشار الملوثات أو إزالتها جزئياً من الوسط الملوث، وهذه التقنيات هي:

- ١- الاستخلاص النباتي Phytoextraction.
- ٢- الفلترة أو الرشح الجذري Rhizofiltration.
- ٣- التحلل النباتي Phytodegradation.
- ٤- تثبيت النباتي Phytostabilisation.
- ٥- التطاير (التصعيد) النباتي Phytovolatilisation.

١- الاستخلاص النباتي Phytoextraction:

تُعد تقنية الاستخلاص النباتي Phytoextraction الأكثر دراسةً واستخداماً من بين جميع التقنيات المقترحة في معالجة التربة الملوثة باستخدام النباتات. وبالرغم من كونها تقنية نوعية للمعالجة إلا أنها تُعتبر في بعض الأحيان مرادفةً للتسمية Phytoremediation.

تُوظف هذه الطريقة النباتات من أجل إزالة الملوثات المعدنية من التربة وبشكل خاص المعادن الثقيلة. حيث تمتص جذور النبات المعادن من التربة وتنقلها إلى أجزائه العليا (الهوائية) لتتراكم في الأوراق. إذا كانت جاهزية المعدن غير كافية لامتصاص من قبل النبات، ففي هذه الحالة يمكن إضافة مواد كيميائية للتربة الملوثة كبعض المركبات المخلبية أو المواد ذات التأثير المخفّض pH للتربة تعمل على زيادة تحرير المعادن إلى محلول التربة. بعد وصول النباتات لمراحل النمو الأخيرة تُحصد النباتات أو أجزاؤها العليا المخزنة (المراكمة) للمعادن الثقيلة ويتم التخلص منها كبقايا نباتية ملوثة. وهذا يشكل إزالة مستمرة للمعادن من التربة الملوثة بها عبر مواسم زراعية متتالية. ويقترح البعض ترميد هذه المخلفات النباتية مما يقلل حجمها في حين يقترح البعض الآخر إمكانية استخدام هذه المخلفات كمصدر للمعادن الثقيلة.

ويجب أن يُنظر إلى هذه التقنية كطريقة معالجة طويلة الأمد لأنها تتطلب عدة دورات زراعية لتخفيض تركيز المعادن في التربة إلى مستويات مقبولة. ويتوقف الوقت اللازم لعملية المعالجة على نوع التلوث المعدني وحجمه وطول موسم نمو النبات وفعاليته في استخلاص المعادن من التربة، وتمتد هذه الفترة بشكل طبيعي من سنة واحدة إلى ٢٠ سنة. ويوجد العديد من العوامل التي تحدد فعالية هذه التقنية، فبعض هذه العوامل يتعلق بالموقع الملوّث وبعضها الآخر يرتبط بالنبات نفسه المستخدم في المعالجة. ويُعتبر اختيار الموقع الملوّث أهم هذه العوامل على الإطلاق، إذ تُعد التقنية مناسبة لمعالجة مساحات واسعة من التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة وبتراكيز تتراوح من ضعيفة إلى متوسطة.

ولكن يُؤخذ على هذه الطريقة محدودية فعاليتها بعمق المجموع الجذري للنباتات المستخدمة في المعالجة. إذ يتصف القسم الأكبر من تلك النباتات بمجموع جذري قليل العمق يصل حتى ٦٠ سم. ويلعب أيضاً ضعف نمو النبات في التربة شديدة التلوث بالمعادن الثقيلة وصغر حجم مجموعها الجذري دوراً في الحد من فعالية الطريقة. ومن ناحية أخرى، يجب أن يكون موقع المعالجة خالياً نسبياً من المعوقات كالصخور مثلاً ويسمح بإجراء الخدمة الزراعية المناسبة واستخدام المعدات الزراعية المختلفة.

ويجب أن يتمتع النبات المستخدم في المعالجة بالخواص التالية:

- ١- قدرته العالية على إنتاج كتلة حيوية كبيرة وخلال فترة زمنية قصيرة، وعلى استخلاص كميات كبيرة من المعادن الثقيلة من التربة وتجميعها في أنسجة الأوراق.
 - ٢- يجب أن يكون النبات متحملاً للتراكيز العالية من المعدن الهدف أو المعادن الأخرى، وأن يكون فعالاً في نقلها من الجذور إلى الأجزاء الهوائية للنبات (الأوراق) والتي يمكن إزالتها لاحقاً والتخلص منها كبقايا نباتية ملوثة.
 - ٣- يجب أن يتحمل النبات ظروف التربة المختلفة مثل درجة الـ pH والملوحة وانخفاض المحتوى الرطوبي.
 - ٤- يجب أيضاً أن يتمتع النبات بمجموع جذري كثيف، وأن يكون سهل الزراعة والخدمة الزراعية وقليل الإصابة بالأمراض والآفات الزراعية.
- وبالرغم من وجود نباتات يمكن أن تتمتع ببعض هذه الخواص غير إنه لا يوجد نبات متكامل يملك الخواص مجتمعة، لذلك إيجاد النبات المتكامل قد يُعد هدفاً للأبحاث العلمية المستقبلية في مجال الهندسة الوراثية.
- يمكن بشكلٍ عام تمييز اتجاهين بهدف استخلاص العناصر السامة من التربة. يعتمد الاتجاه الأول على استخدام النباتات ذات القدرة العالية على امتصاص وتجميع بعض العناصر الثقيلة في أنسجتها النباتية، تُعرف هذه النباتات بالمجمّعات **Hyperaccumulators**. أما الاتجاه الثاني فيركّز على استخدام نباتات ذات كتلة حيوية ضخمة قادرة على امتصاص كمية كبيرة من المعادن وذلك من خلال زيادة قدرة العناصر الثقيلة على الحركة في التربة باتباع بعض المعاملات الكيميائية. وتم حديثاً التحفّظ على هذا التوجه كونه يشجّع على حركة المعادن السامة في التربة مما يزيد من إمكانية غسلها باتجاه المياه الجوفية.
- وتُعرف النباتات المجمعّة (المجمّعات) **Hyperaccumulators** بأنها مجموعة من النباتات تتميز بقدرة عالية على امتصاص كميات كبيرة من الملوثات وخاصة المعادن الثقيلة من التربة وتجميعها أو مراكمتها في أنسجة الأوراق. يعود استخدام المصطلح **Hyperaccumulators** للعالم Chaney في العام ١٩٨٣ حيث يُعتبر أول من اقترح توظيف النباتات (المجمّعات) من أجل معالجة التربة الملوثة. ولكن بالمقابل وبسبب صغر حجمها وبطء نموها تبدي هذه النباتات قدرة كامنة محدودة في امتصاصها للمعادن الثقيلة مما يؤخر من عملية إزالتها للتلوث. فالنبات المجمع هو النبات الذي يستطيع أن يراكم في أنسجته كمية من المعدن الثقيل تتراوح بين ٠.٠١ % و ١ % من المادة الجافة تبعاً للمعدن الهدف.

ويوجد أنواع عديدة من هذه النباتات المَجْمعة مثل نبات الخردل الهندي *Brassica juncea* الذي ينتمي للعائلة الملفوفية Brassicaceae (الشكل ٦١) والذي يتميز بقدرته الكبيرة على استخلاص كميات هائلة من الرصاص Pb تصل إلى حوالي ٢ طن/هكتار من التربة الملوثة بهذا العنصر، بالإضافة أيضاً إلى قدرته على امتصاص كميات جيدة من الكاديوم Cd والكروم Cr والنيكل Ni والزنك Zn. وكذلك نبات *Thlaspi caerulescens* (الشكل ٦٢) الذي ينتمي أيضاً للعائلة الملفوفية والمعروف سابقاً بإسم *Thlaspi alpestre* والذي يستطيع أن يراكم في أنسجته عنصر الزنك Zn بتركيز عالية. وكذلك نبات عشب باهيا *Paspalum notatum* (الشكل ٦٣) الذي يعود للعائلة الكلثية Poaceae ويُعد مَجْمعاً جيداً لعنصر السيزيوم Cs. ويبين الجدول (١٢) بعض أنواع النباتات المَجْمعة للعناصر الثقيلة متضمناً العائلة التي ينتمي إليها النبات ومنطقة انتشاره بالإضافة إلى التركيز الأعظمي للعنصر الذي يمكن للنبات أن يراكمه في أنسجته.

ويمثل عمق استخلاص المعادن من التربة المأخذ الأهم لتلك النباتات المَجْمعة حيث يصل عمق الاستخلاص الأقصى إلى حوالي ٦٠ سم وهو العمق الأعظمي لانتشار المجموع الجذري لأغلب النباتات المَجْمعة. ولذلك من أجل زيادة عمق المعالجة يتم اللجوء إلى استخدام بعض أنواع الأشجار التي تعمل أيضاً كمَجْمعات بالرغم من وجود إمكانية إعادة المعادن الثقيلة المَجْمعة إلى التربة من خلال تساقط الأوراق أو غيرها من الأجزاء الهوائية للنبات.

ويوجد أنواع عديدة من هذه النباتات المَجْمعة مثل نبات الخردل الهندي *Brassica juncea* الذي ينتمي للعائلة الملفوفية Brassicaceae (الشكل ٦١) والذي يتميز بقدرته الكبيرة على استخلاص كميات هائلة من الرصاص Pb تصل إلى حوالي ٢ طن/هكتار من التربة الملوثة بهذا العنصر، بالإضافة أيضاً إلى قدرته على امتصاص كميات جيدة من الكاديوم Cd والكروم Cr والنيكل Ni والزنك Zn. وكذلك نبات *Thlaspi caerulescens* (الشكل ٦٢) الذي ينتمي أيضاً للعائلة الملفوفية والمعروف سابقاً بإسم *Thlaspi alpestre* والذي يستطيع أن يراكم في أنسجته عنصر الزنك Zn بتركيز عالية. وكذلك نبات عشب باهيا *Paspalum notatum* (الشكل ٦٣) الذي يعود للعائلة الكلثية Poaceae ويُعد مَجْمعاً جيداً لعنصر السيزيوم Cs. ويبين الجدول (١٢) بعض أنواع النباتات المَجْمعة للعناصر الثقيلة متضمناً العائلة التي ينتمي إليها

النبات ومنطقة انتشاره بالإضافة إلى التركيز الأعظمي للعنصر الذي يمكن للنبات أن يُراكمه في أنسجته.

ويمثل عمق استخلاص المعادن من التربة المأخذ الأهم لتلك النباتات المجمعّة حيث يصل عمق الاستخلاص الأقصى إلى حوالي ٦٠ سم وهو العمق الأعظمي لانتشار المجموع الجذري لأغلب النباتات المجمعّة. ولذلك من أجل زيادة عمق المعالجة يتم اللجوء إلى استخدام بعض أنواع الأشجار التي تعمل أيضاً كمجمّعات بالرغم من وجود إمكانية إعادة المعادن الثقيلة المجمعّة إلى التربة من خلال تساقط الأوراق أو غيرها من الأجزاء الهوائية للنبات.



الشكل (٦٢) نبات *Thlaspi caerulescens*



الشكل (٦١) نبات الخردل الهندي
(*Brassica juncea*)



الشكل (٦٣) نبات عشب باهيا
(*Paspalum notatum*)

الجدول (١٢) بعض النباتات المُجمّعة للعناصر الثقيلة.

الحد الأقصى للتكريز (مغ/كغ مادة جافة)	المعدن الثقيل	منطقة الانتشار	النوع	العائلة
13620	Zn	ألمانيا	<i>Arabidopsis halleri</i>	BRASSICACEAE
43000	Zn	القارة الأوروبية	<i>Thlaspi caerulescens</i>	BRASSICACEAE
2130	Cd	القارة الأوروبية	<i>Thlaspi caerulescens</i>	BRASSICACEAE
2740	Pb	القارة الأوروبية	<i>Thlaspi caerulescens</i>	BRASSICACEAE
17600	Ni	تركيا	<i>Cochlearia aucheri</i>	BRASSICACEAE
13490	Pb	المملكة المتحدة	<i>Agrostis tenuis</i>	POACEAE
1500	Pb	فرنسا	<i>Arrhenatherum elatus</i>	POACEAE
10000	Zn	بلجيكا، ألمانيا	<i>Viola calaminaria</i>	VIOLACEAE
2889	Co	-	<i>Anisopappus davii</i>	ASTERACEAE
11600	Ni	جنوب افريقيا	<i>Berkheya coddii</i>	ASTERACEAE
3010	Co	-	<i>Crotalaria cobalticola</i>	FABACEAE
10230	Co	-	<i>Haumaniastrum robertii</i>	LAMINACEAE

٢- الفلترة أو الرشح الجذري Rhizofiltration:

تشير عملية الفلترة أو الرشح الجذري Rhizofiltration إلى استخدام بعض النباتات المائية والطحالب من أجل تنظيف ومعالجة البيئات المائية الملوثة بالمعادن الثقيلة، وتحدث بشكل أساسي في منطقة المحيط الجذري من قبل جذور النبات. ونظراً لكون هذه العملية تحدث بسرعة أعلى في الماء فإنها تُستخدم بشكل رئيسي من أجل معالجة المياه الملوثة بالملوثات المعدنية مثل العناصر المشعة والمعادن الثقيلة. وهي طريقة بديلة للطريقة التقليدية التي كانت تُستخدم سابقاً لتنظيف المياه الملوثة من خلال عملية ترسيب الملوثات وتجميعها ثم إزالة الرواسب الناتجة. وتُنفذ هذه الطريقة عبر مرحلتين أساسيتين وهما:

- تنمو النباتات أولاً في البيوت البلاستيكية في أحواض من المحاليل المغذية حتى يتطور مجموعها الجذري بشكل جيد.
 - عند اكتمال نمو المجموع الجذري للنباتات يتم استبدال محاليل النمو بالماء الملوث بالمعادن الثقيلة أو العناصر المشعة، أو يتم نقل النباتات بالكامل إلى المواقع الملوثة.
- وعلى خلاف عملية الاستخلاص النباتي، يتم في عملية الرشح الجذري تجميع الملوثات المعدنية في الجذور فقط حيث يتم إزالتها لاحقاً والتخلص منها كبقايا نباتية ثانوية ملوثة. ومن ناحية أخرى، قد تسبب المفرزات الجذرية والتغيرات في pH منطقة المحيط الجذري ترسب المعادن على سطوح جذور النباتات مما يجعلها مشبعة بتلك الملوثات وهذا يستدعي لاحقاً إزالة الجذور أو النبات بالكامل والتخلص منهما.
- ويعتقد البعض أن النباتات التي تُستخدم في المعالجة ينبغي أن تُراكم المعادن التي تستخلصها من الوسط المائي في الجذور فقط، ويُعززون ذلك إلى أن إنتقال المعادن إلى الأوراق سيُقلل فعالية الرشح الجذري وذلك نتيجة زيادة كمية البقايا النباتية الملوثة التي تحتاج للإزالة. ولكن بالمقابل، يرى آخرون أنّ كفاءة الطريقة يمكن أن تزداد عبر استخدام نباتات تملك قابلية كبيرة على امتصاص العناصر الثقيلة وتركيزها ضمن أنسجة النبات.
- وبالرغم من هذا الاختلاف في الرأي يبدو أن اختيار النبات المناسب هو مفتاح النجاح في عملية المعالجة تلك. ويجب أن يتصف النبات المثالي الذي يمكن استخدامه في عملية الرشح الجذري بالميزات التالية:
- ١- يجب أن يكون النبات قادراً على تجميع كميات كبيرة من المعدن الهدف، وأن يكون متحملاً للتركيزات العالية للملوثات المعدنية.
 - ٢- يتصف بخدمة زراعية سهلة وبتكلفة مادية منخفضة.

٣- أن تكون كمية البقايا الثانوية الملوثة المطلوب التخلص منها في حدها الأدنى.

٤- أن يكون النبات قادراً على إنتاج كتلة حيوية جذرية ضخمة أو مساحة جذرية كبيرة.

وبملك العديد من الأنواع النباتية المائية القدرة على إزالة المعادن الثقيلة من المياه الملوثة مثل نبات ياقوتة الماء (ورد النيل) *Eichhornia crassipes* (الشكل ٦٤) والذي يعود للعائلة Pontederiaceae، وأيضاً نبات عدس الماء *Lemna minor* L. (الشكل ٦٥) الذي ينتمي للعائلة اللوفية Araceae. ولكن تبقى هذه النباتات ذات قدرة كامنة محدودة في إزالة المعادن الثقيلة من المياه الملوثة بسبب صغر حجم مجموعها الجذري من جهة ونموها البطيء من جهة أخرى.

ومن المعتقد أن النباتات الأرضية أكثر ملائمة لعملية الرشح الجذري وذلك لكونها تنتج مجموعاً جذرياً أطول وأقوى من المجموع الجذري للنباتات المائية، وغالباً يكون ليفياً ويملك مساحة جذرية كبيرة. وفي هذا المعنى يبدو أن كلاً من نبات زهرة الشمس *Helianthus annuus* L. من العائلة النجمية Asteraceae ونبات الخردل الهندي *Brassica juncea* Czern هما النباتان الواعدان الأكثر ملائمة لهذا الغرض مستقبلاً. حيث تُعد جذور نبات الخردل الهندي فعّالة في استخلاص كل من الكاديوم Cd والكروم Cr والنيكل Ni والرصاص Pb والزنك Zn كما سبق ذكره، بينما تستطيع جذور نبات زهرة الشمس امتصاص كل من الرصاص Pb واليورانيوم U والسيزيوم Cs والسترونشيوم Sr من المحاليل المائية. وتحدث في حالة النباتات المائية عملية مشابهة تماماً لعملية الرشح الجذري تمتص من خلالها بعض النباتات المائية الملوثات وخاصةً المعادن الثقيلة من الوسط المائي المحيط وتراكمها في أنسجتها الورقية، وتُعرف هذه العملية باسم Phytosorption وتعتمد كفاءتها في المعالجة على العوامل الكيميائية والحيوية المختلفة للوسط المائي. يقوم بهذه العملية فقط بعض النباتات المائية وبعض الطحالب ويمكن أن تكون فعّالة في امتصاص العديد من العناصر الثقيلة مثل الكاديوم Cd والزنك Zn والنيكل Ni أو غيرها من العناصر مثل النحاس Cu.

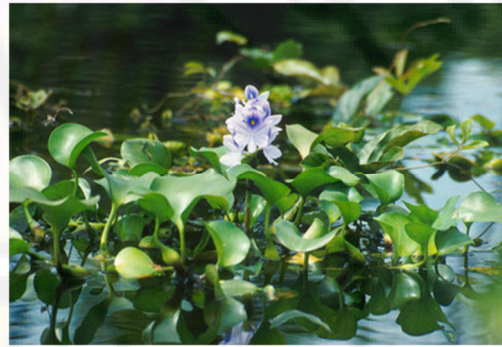
وتُعد طريقة الرشح الجذري منافسة جيدة لغيرها من الطرائق من حيث التكلفة المادية في معالجة تلوث المياه السطحية والمياه الجوفية التي تحتوي على تراكيز منخفضة من المعادن الثقيلة مثل الكروم والرصاص والزنك. ويتعلق تسويق هذه التقنية بالتكلفة الاقتصادية أولاً وبمميزات التقنية ثانياً والتي من أهمها إمكانية تطبيقها على طيف واسع من الملوثات المعدنية، وقدرتها على معالجة حجم كبير من المياه الملوثة، وأنها أيضاً ذات احتياجات قليلة من المركبات الكيميائية

السامة التي يمكن إضافتها خلال المعالجة، بالإضافة إلى انخفاض حجم البقايا الثانوية الملوثة، وإمكانية إعادة استخدام النباتات، والأهم من ذلك كله أنها تلقى قبولاً واسعاً لدى الرأي العام ووكالات حماية البيئة على اعتبارها طريقة نظيفة وصديقة للبيئة.

ولكن، تطبيق هذه التقنية يُشكل تحدياً كبيراً عند مقارنتها بغيرها من الطرائق التي تتميز بنفس التكلفة. فإنتاج الشتول عبر الزراعة المائية والمحافظة على نظام زراعة مائية ناجح يتطلب فريق عمل مؤهل ذا خبرة وكفاءة جيدتين بالإضافة لما تحتاجه هذه الطريقة من مستلزمات وأجهزة متنوعة مما يزيد من تكلفتها المادية.



الشكل (٦٥) نبات عدس الماء
(*Lemna minor* L.)



الشكل (٦٤) نبات ياقوتة الماء أو ورد النيل
(*Eichhornia crassipes*)

٣- التحلل النباتي Phytodegradation:

تُطبق هذه التقنية من أجل معالجة التربة الملوثة بالمركبات العضوية حيث تُستخدم النباتات من أجل تفكيك الملوثات العضوية في التربة عبر تفاعلات كيميائية-حيوية، وهي بشكل أساسي تفاعلات أنزيمية تتم عن طريق أنزيمات يفرزها النبات. ويمكن أن تحدث عملية تفكيك المركبات العضوية ضمن النبات أو في منطقة المحيط الجذري.

وتُعد هذه الطريقة فعّالة في التخلص من عدد كبير من الملوثات العضوية مثل المواد البترولية والمبيدات والمذيبات العضوية والمواد المتفجرة بالإضافة إلى المركبات العطرية. فقد بينت بعض الدراسات أن بعض أنواع الأشجار الاستوائية مثل *Leucaena leucocephala* التي تنتمي للعائلة البقولية Fabaceae تستطيع تفكيك وتحليل بعض المذيبات العضوية مثل مركب الاتيلين

ثنائي البروميد EDB (Ethylene dibromide) أو المركب ثلاثي كلور الاثيلين TCE (Trichlorethylene). وكذلك يستطيع نبات زهرة الشمس *Helianthus annuus* امتصاص واستقلاب بعض المذيبات العضوية مثل مركب Benzotriazoles من المياه الملوثة عند زراعته مائياً.

بالإضافة لما سبق، وُجد أيضاً أن بعض المبيدات والمواد المتفجرة قابلةً للتحلل النباتي مثل المركب TNT الذي يتحلل بوجود نباتات مثل الذرة البيضاء الحليبية *Sorghum halepense* (الشكل ٦٦) أو زيوان القمح *Lolium temulentum* (الشكل ٦٧) اللذين ينتميان للعائلة الكلثية Poaceae، أو الصفصاف الهجين من العائلة الصفصافية Salicaceae. ويمكن أيضاً لبعض الأشجار مثل الصفصاف والحو *Populus Aigeiros* من العائلة الصفصافية امتصاص كميات كبيرة من ماء التربة مما يعمل بطريقة غير مباشرة على تخفيض ميل الملوثات للانتقال بالحمل نحو المياه الجوفية. بالإضافة لذلك، يمكن لبعض المركبات العضوية والاعتماد على خواصها الفيزيائية والكيميائية أن تُمتص من قبل النباتات وأن تتحلل جزئياً أو كلياً من خلال أنزيمات تفرزها تلك النباتات أو الأحياء الدقيقة (البكتريا والفطور) التعايشية Endophytic.

وفي عملية التحلل النباتي تعمل النباتات عبر مجموعها الجذري وبالتعاون مع أحياء التربة على تحليل وتفكيك الملوثات العضوية. حيث تتم عملية تحلل الملوثات عن طريق الكائنات الحية الدقيقة في المنطقة المحيطة بالجذور وأيضاً من خلال الأنزيمات التي يفرزها النبات. وفي الوقت نفسه يمكن أن يُشار لعملية التحلل النباتي أيضاً كعملية مساعدة للتحلل الحيوي. إذ يمكن أن يدعم المجموع الجذري عملية تحلل الملوثات العضوية الذي تقوم به الأحياء الدقيقة وذلك من خلال إفرازه لبعض المواد الكيميائية مثل المواد المغذية والمواد السكرية التي تستخدمها الأحياء كمصدرٍ للطاقة. يحافظ هذا التعاضد والتعاون الموجود بين الطرفين على بقاء الأحياء الدقيقة عند مستوى كافٍ للقيام بنشاطاتها الحيوية المختلفة التي تؤمن تحلل مستمر للملوثات السامة. ومن ناحية أخرى قد يؤدي هذا التعاون إلى تغيرات هامة على مستوى ظروف الوسط كانهخفاض تركيز الأكسجين في الوسط مما يؤدي إلى خلق بيئة مرجعة مشجعة لتفاعلات تحلل الملوثات المختلفة مثل الملوثات المكثورة.



الشكل (٦٦) نبات الذرة البيضاء الحلبية
(*Sorghum halepense*)

الشكل (٦٧) نبات زيوان القمح
(*Lolium temulentum*)

٤- التثبيت النباتي Phytostabilisation:

تعتمد عملية التثبيت النباتي Phytostabilisation والتي تُعرف أيضاً باسم Phytorestoration على استخدام النباتات المتحملة للملوثات من أجل، أولاً: تثبيت التربة الملوثة لمنع انجرافها مائياً أو لمنع نقل الملوثات عبر حملها هوائياً إلى بيئة أخرى أو هجرتها باتجاه المياه الجوفية، وثانياً: من أجل تثبيت الملوثات القابلة للذوبان من خلال امتصاصها من قبل النباتات والارتباط معها لتشكل كتلة ثابتة بحيث لا تستطيع الملوثات الرجوع إلى التربة أو منطقة المحيط الجذري. ويتم اللجوء إلى هذه التقنية في حالة عدم وجود إمكانية مباشرة لمعالجة التربة الملوثة. وهي على خلاف غيرها من تقنيات المعالجة لا تهدف هذه التقنية إلى إزالة الملوثات المعدنية من التربة، بل تهدف إلى تثبيتها والحد من خطورتها على صحة الإنسان وسلامة البيئة.

ويجب أن يتصف النبات المختار لعملية التثبيت النباتي بالميزتين التاليتين:

- ١- انخفاض قدرته على نقل الملوثات المعدنية إلى الأجزاء الهوائية منه والتي يمكن أن تُستهلك من قبل الإنسان أو الحيوان، مما يلغي الحاجة لمعالجة البقايا النباتية الثانوية كمادة ملوثة.
- ٢- يجب أن يكون النبات سهل الزراعة والخدمة ويتمتع بنمو سريع ويملك تاجاً خضرياً ومجموعاً جذرياً كبيرين وأن يكون متحملاً للتراكيز العالية من الملوثات المعدنية ولظروف الموقع الأخرى التي ربما تحد من نموه.

ويُعد كل من العشب النجيلي النحيل *Agrostis tenuis* Sibth (الشكل ٦٨) من العائلة النجيلية Gramineae ونبات الفستوك الحمراء *Festuca rubra* L (الشكل ٦٩) من العائلة الكلئية Poaceae من أهم النباتات التي تُستخدم في عملية التثبيت النباتي، وهذان النباتان قادران على تثبيت كل من الرصاص والزنك والنيكل والنحاس في التربة الملوثة.



الشكل (٦٩) نبات الفستوك الحمراء
(*Festuca rubra* L.)



الشكل (٦٨) نبات العشب النجيلي
Agrostis tenuis Sibth النحيل

ومن ناحية أخرى، تُعد عملية التثبيت النباتي أكثر كفاءة في المواقع التي تتميز بتربة ناعمة القوام ومحتوى مرتفع من المادة العضوية، وتُعد أيضاً مناسبة في معالجة المواقع التي تتميز بمساحات واسعة من الترب الملوثة. ولكن لا يمكن تطبيقها في المواقع التي ينمو فيها النبات بشكل ضعيف، وهنا لا بدّ من الأخذ بعين الاعتبار وقاية النبات من الأمراض والأفات التي يمكن أن تصيبه وتحد من عمره. وهي عموماً أقل تكلفة مادية مقارنة مع غيرها من طرائق المعالجة وكذلك أقل ضرراً بالبيئة وسهلة التنفيذ وتعطي منظراً جمالياً رائعاً، وهي الطريقة المفضلة بشكل عام في حال تعذر استخدام طرائق أخرى بسبب اتساع المساحات الملوثة وقلة الاعتمادات المادية.

٥- التطاير (التصعيد) النباتي Phytovolatilisation:

تُعبّر عملية التطاير النباتي Phytovolatilisation عن قيام بعض النباتات سواءً الطبيعية منها أو المعدلة وراثياً بامتصاص الأشكال المعدنية لبعض العناصر الملوثة مثل الزرنيخ AS والزرنيق Hg والسيلينيوم Se وتحويلها حيويّاً ضمن النبات إلى أشكال غازية تتطلق فيما بعد إلى الجو الخارجي. وتعتمد هذه الطريقة على التأثير المشترك للنباتات والأحياء الدقيقة والتي تعمل بشكل متوافق.

وتُعدّ عموماً الأنواع النباتية التي يمكن أن تُستخدم في عملية التطاير النباتي محدودة، فقد وُجد أن بعض النباتات من العائلة الملفوفية Brassicaceae قادرة على تحرير مركبات السيلينيوم إلى الجو بمعدل يصل إلى (40 غرام/الهكتار/اليوم) على صورة أشكال غازية مختلفة. وبعض النباتات المائية مثل نبات عشبة البرك *Typha latifolia* L. (الشكل ٧٠) من العائلة التيفية Typhaceae تُعتبر أيضاً جيدة في عملية تطاير معدن السيلينيوم. وعلى خلاف النباتات التي تُستخدم من أجل تطاير السيلينيوم تُعدّ النباتات المسؤولة عن تطاير الزرنيق نباتات معدلة وراثياً، فقد تم تعديل كل من نبات *Arabidopsis thaliana* L. (الشكل ٧١) من العائلة الملفوفية ونبات التبغ *Nicotiana tabacum* وراثياً عن طريق استخدام مورثات بكتيرية نوعية. ويمتص هذان النباتان الزرنيق من التربة بشكله المعدني Hg^{2+} وأيضاً على صورة مركب ميثيل الزرنيق MeHg ويطلقانه إلى الجو عبر الأوراق على صورة غازية هي Hg^0 .

وتفيد عملية تطاير كل من الزرنيق والسيلينيوم نحو الجو في تخفيض سميتهما عبر تحويلهما لأشكال غازية، فمثلاً مركب السيلينييد ثنائي الميثيل (Dimethylselenide) المتطاير ذات سمية تعادل ١/٥٠٠-١/٦٠٠ من سمية الأشكال المعدنية للسيلينيوم الموجودة في التربة. وتشكل عملية تحول معدني الزرنيق والسيلينيوم من الشكل المعدني وتطايرهما إلى الجو حلاً دائماً لإزالة تلوث الترب وذلك لعدم إمكانية عودة وترسب الأشكال الغازية في الموقع الذي خرجت منه أو حتى قريباً منه. وتملك أيضاً هذه الطريقة فوائد إضافية فهي غير مخرية للتربة وتمنع التعرية ولا تحتاج للتخلص من البقايا النباتية الثانوية الملوثة ولا تستلزم المواقع التي تخضع لهذه التقنية إدارة وخدمة كبيرتين بعد زراعة النباتات.



الشكل (٧١) نبات (*Arabidopsis thaliana* L.)



الشكل (٧٠) نبات عشبة البرك
(*Typha latifolia* L.)

ومن ناحية أخرى، تُعد عملية التطاير النباتي الأكثر إثارة للجدل من بين كل التقنيات الحيوية السابقة الذكر، حيث يعتقد البعض أن هذه الطريقة ضارة للبيئة لكون الأشكال الغازية لمعدني الزئبق والسيلينيوم المتحررة إلى الجو المحيط تُعتبر بحد ذاتها سامة وخطيرة. ولكن قد يكون تركيز هذه الغازات ضعيفاً جداً لا يساهم بشكل فعلي في تغيير التوازن الغازي الطبيعي للجو كما يرى آخرون. ومن لا يدعم هذه الطريقة يرى أن تطبيقها في المواقع الملوثة القريبة من المناطق السكنية لا يُعد قراراً حكيماً خوفاً من حدوث عملية ترسيب وتوضع سريع للمركبات المتطايرة، كما يصعب أيضاً إدارة هجرة هذه الأشكال الغازية إلى مناطق أخرى. ولكن بالرغم من كل النقد والجدل حول هذه التقنية، يبدو في النهاية أنها تشكل أداة واعدة لمعالجة التربة الملوثة بكل من الزئبق والسيلينيوم في كثير من المناطق حول العالم.

في النهاية، بالرغم من كون تقنيات المعالجة باستخدام النباتات ذات تكلفة اقتصادية قليلة وصديقة للبيئة وتلقى قبولاً جيداً لدى الرأي العام، إلا أنها تتصف بسلسلة من القيود التي تحد من مجال استخدامها وتطبيقها التي يمكن أن نذكر بعضها:

- عمق منطقة المعالجة محدود بعمق المجموع الجذري.
- يمكن أن تكون التراكيز العالية من الملوثات سامة للنباتات المستخدمة في المعالجة.

- قد تكون عملية المعالجة فصلية وتحتاج لفترة زمنية طويلة لتكتمل.
- قد تكون الطريقة غير فعّالة من أجل الملوثات شديدة الادمصاص في التربة.

٥.٦. اختيار تقنية المعالجة والاتجاهات المستقبلية:

- يتم اللجوء إلى معالجة التربة الملوثة كحل نهائي عندما تصبح الحاجة لذلك ملحةً وضرورية. ويعتمد اختيار تقنية المعالجة اللازمة على جملة معايير وعوامل من أهمها:
- طبيعة وسمية ومنشأ الملوثات.
 - درجة الخطورة الحالية والكامنة المرتبطة بمستوى التلوث.
 - الخواص الفيزيائية والكيميائية للتربة.
 - نوع استعمال الأرض.
 - الوقت المتاح لإجراء المعالجة.
 - ومدى تقبل الرأي العام لها والجدوى الاقتصادية منها.
- وتختلف هذه المعايير السابقة بشكل واسع بين تقنية وأخرى، فعلى سبيل المثال، يمكن أن يختلف متوسط قيمة التكلفة الاقتصادية للمعالجة من تقنية لأخرى بمقدار يزيد عن ٢٥ ضعفاً. إن تطوير تقنيات ذات تكلفة واحتياجات منخفضة يمثل هدفاً رئيسياً تسعى له المجتمعات الصناعية لإيجاد حل لمشكلة التربة الملوثة. فبعض هذه التقنيات السابق ذكرها تم استخدامها واعتمادها بشكل جيد في العديد من المناطق، بينما البعض الآخر ما زال تحت قيد البحث. ونتيجة ازدياد اهتمام الرأي العام بالمخاطر المرتبطة بتلوث التربة، قد يصبح عدد كبير من التقنيات متاحاً في المستقبل. فالتقدم السريع في علم التقانات الحيوية والهندسة الوراثية الجزيئية يسمح بفهم جيد للآليات المساهمة في عملية المعالجة الحيوية ويسمح كذلك باستخدام هذه التقنيات ضمن الشروط المثلى.

الفصل السابع

رصد تلوث التربة

Soil pollution monitoring

١.٧. المقدمة:

تُعرف عملية الرصد بأنها عملية المراقبة المنتظمة والمستمرة للتلوث الموجود في موقع معين من التربة وتقدير حجم هذا التلوث وتغيراته خلال الزمن. وتُطبق بشكل عام عملية الرصد على نوعين من التربة هما التربة الملوثة والتربة المهددة بالتلوث. من أجل التربة الملوثة، تهدف عملية الرصد إلى متابعة تطور عملية المعالجة وفعاليتها وذلك من خلال إجراء قياسات مستمرة لتراكيز الملوثات في التربة، وقد تستمر عملية الرصد حتى بعد المعالجة. بينما في التربة المهددة بالتلوث سواء التربة الزراعية أو تلك التي تقع في المناطق المأهولة أو المجاورة للمناطق الصناعية، فتجري عملية الرصد من أجل الحيلولة دون تلوث تلك التربة.

ويجب أن تجري عملية الرصد بطريقة تمكن من كشف التغيرات المكانية والزمانية في تراكيز الملوثات في الموقع المطلوب رصد التلوث فيه. ومن جهتها يجب أن تزود عملية الرصد معلومات حول مجموعة النقاط التالية:

١. طبيعة الملوثات، وأشكالها، ومصدرها، وتوزعها وانتشارها في الوسط.
٢. تأثير الملوثات في الوسط.
٣. تركيز الملوثات والتغيرات البيولوجية في الموقع وأسبابها.
٤. إمكانية معالجة التلوث.

٢.٧. إعداد خطة الرصد والمراقبة:

قبل وضع أي خطة للمراقبة، يجب جمع المعلومات الكافية حول الموقع الملوث المستهدف في عملية الرصد وتحليل تلك المعلومات بدقة وعناية. فهذا من شأنه أن يوفر لاحقاً كما لا بأس به من الجهد ويُخفّض من التكلفة المادية، وسيسمح في الوقت نفسه باختيار طريقة الرصد المناسبة التي يمكن اعتمادها لاحقاً. تشمل هذه المعلومات مجموعة من المعطيات الجيولوجية والبيولوجية والهيدروجيولوجية حول الموقع الملوث وأيضاً معطيات تتعلق بطبيعة استعمالات الأراضي في المنطقة.

بالنسبة للمعطيات الجيولوجية والهيدروجيولوجية، فيمكن الحصول عليها من الخرائط الجيولوجية للموقع أو من خلال المعلومات المتوفرة من المراقبة الجيولوجية المحلية للمنطقة. أما المعلومات البيولوجية، فيمكن الاعتماد في الحصول عليها على خرائط التربة أو المعطيات الحقلية المتاحة والمتوفرة في مراكز الأبحاث والدراسات الخاصة بالمنطقة.

والخطوة الرئيسية بعد جمع وتحليل المعلومات المطلوبة هي تحديد الأهداف الأساسية من عملية المراقبة والرصد والتي تمكّن من تحديد نوع عملية الرصد المطلوبة وذلك عبر طرح جملة الأسئلة التالية:

- هل الهدف الرئيسي من عملية الرصد هو الكشف عن وجود أو عدم وجود ملوث معين؟ إذا كان هذا هو الهدف، فعملية الرصد في هذه الحالة تمثل رسداً كشفياً فقط.
 - هل من المعروف سلفاً تلوث الموقع واحتوائه على الملوثات المفترضة؟ وهل سيكون الهدف الرئيسي لخطة الرصد هو تحديد اتساع التلوث؟ إذا كان الجواب نعم، ستكون عملية الرصد بقصد تقدير حجم التلوث الموجود.
 - هل الهدف من الخطة هو تقييم إمكانية معالجة الموقع وتقدير التكلفة الإقتصادية المترتبة على ذلك؟ إذا كان الجواب نعم، فالحالة هنا رصد ومراقبة تنفيذية.
 - هل ستكون عملية الرصد جزءاً من الخطة القادمة من أجل تقييم نجاح عملية المعالجة؟ إذا كان الجواب نعم، فسيكون الرصد المطلوب هو رسداً بحثياً.
- تساعد هذه الأسئلة المطروحة في اختيار طريقة الرصد الملائمة وبالتالي اعتماد التقنية اللازمة في الخطة. وهذا يسمح بدوره بخطة صحيحة وتقدير التكلفة المالية المتوقعة بكل دقة.

وتشمل بشكل عام خطة الرصد النقاط الأساسية التالية:

- صفات وخصائص الموقع.
- الحصول على المعطيات (جمع المعطيات).
- التحكم بنوعية المعطيات.
- قراءة وتفسير المعطيات.
- إعداد التقارير.

١.٢.٧. صفات وخصائص الموقع:

إنّ جمع المعطيات المتاحة حول الموقع المدروس يجب أن يسبق كل الأعمال الميدانية في مشروع المراقبة، وهذا يشمل الاطلاع على كل المعلومات المتوفرة حول الخواص الجيومورفولوجية والبيدولوجية للمنطقة المستهدفة. وفي حال تعذر وجود الخرائط اللازمة، يجب

عندئذ وضع خرائط للمنطقة باستخدام أي تقنية مرجعية معروفة. ويوجد عموماً أربعة أنواع من الخرائط وهي:

١. الخرائط الأساسية (القاعدية) Base map:

تساعد هذه الخرائط على توصيف مورفولوجية الموقع وتبين ظروف وطبيعة الجريان السطحي للماء الذي يمكن أن يؤثر في الجريان الهيدرولوجي في الموقع. وفي مرحلة لاحقة، كل مواقع الاعتيان (جمع العينات) يجب أن تُحدد على الخارطة الأساسية. وإذا تضمنت الخطة الرصد الحيوي للموقع، ففي هذه الحالة يجب أن نحدد أيضاً مواقع التجمعات النباتية.

٢. الخرائط الجيولوجية Geologic map:

بما أن نوع التربة يتعلق بطبيعة الصخر الأم وعمليات التجوية ذات الدور الهام في منشأ وتكوين التربة، فإن الخارطة الجيولوجية للمنطقة يمكن أن تُحدد بالتفصيل الأنواع الرئيسية للصخور الموجودة في تلك المنطقة. ويمكن أن تعطي هذه الخرائط معلومات قيمة حول كيمياء التربة والتراكيز الأرضية للمعادن الثقيلة في الطبقات العميقة غير المشبعة والطبقات القريبة من المياه الجوفية، وتساعد أيضاً هذه الخرائط في تحديد القدرة الكامنة لتدفق الملوثات في تربة الموقع المطلوب رصد التلوث فيه.

٣. الخرائط الهيدرولوجية Hydrologic map:

تقوم هذه الخرائط بتفسير كل المعلومات الجيولوجية حول المنطقة، وتعطي معلومات عن المياه الجوفية من حيث كميتها وعمقها واتجاه جريانها. ويستمد الجيولوجيون في العادة كل المعلومات اللازمة حول خواص الجريان العميق للماء باستخدام هذه الخرائط والتي يمكن الحصول عليها من محطات المراقبة الهيدرولوجية المحلية. ومن ناحية أخرى، يمكن أيضاً وصف الظروف الهيدرولوجية للموقع المطلوب رصده من خلال حفر آبار مراقبة أو عبر الآبار المحلية الموجودة.

٤. خرائط مواد التربة Overburden map:

تعطي الخرائط البيدولوجية أو خرائط مواد التربة معلومات عن أنواع الترب السائدة في المنطقة حسب أنظمة التصنيف البيدولوجية المتبعة، كما تسمح هذه الخرائط بتفسير أي اختلافات في الخواص الكيميائية لترب المنطقة المدروسة. وتحتوي عادةً على بعض الخواص الفيزيائية للتربة مثل القوام، بالإضافة إلى بعض الخواص الكيميائية مثل درجة الحموضة (pH)، سعة التبادل الكاتيوني (CEC) وغيرها من الخواص.

٢.٢.٧. مرحلة جمع المعطيات:

تشمل هذه المرحلة تحضير خطة الحصول على العينات (الاعتيان) sampling plan وتحديد الوصف الكيميائي والفيزيائي للمشكلة المطروحة. ويبين الشكل (٧٢) المراحل الأساسية لعملية رصد تلوث التربة، كما ويوجد مرحلتان أساسيتان من أجل هذا الهدف: أولاً تحضير خطة الاعتيان وثانياً وضع خطة الدراسة الفيزيائية والكيميائية التي تشكل الإطار العام لعملية جمع المعطيات.



الشكل (٧٢) المراحل الرئيسية لعملية رصد تلوث التربة.

خطة الحصول على العينات:

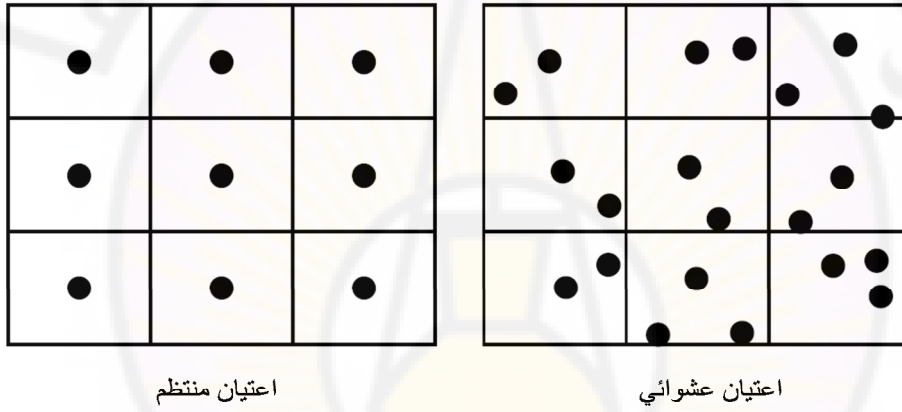
في كل أنواع الرصد المذكورة سابقاً (رصد كشفي، تنفيذي، بحثي)، يُشكل الاعتيان العملية الرئيسية لوصف العوامل والمتغيرات المختلفة المتعلقة ببيئة المنطقة المدروسة. وتساعد عملية الاعتيان في تحديد موقع التلوث وتغيير تراكيز الملوثات تبعاً للزمن والمكان مما يعطي فكرة عن مدى توزع وانتشار الملوثات.

مواقع نقاط الاعتيان:

عند وضع خطة الاعتيان، يتوقف بشكل كبير تحديد موقع نقاط الاعتيان على الهدف من عملية الرصد وعلى الظروف الطبوغرافية والجيولوجية للمنطقة. فإذا كان الهدف من عملية

الرصد على سبيل المثال هو تقدير حجم التلوث، فهذه الحالة تستلزم عدداً كبيراً من مواقع الاعتيان التي تكون نوعاً ما متوزعة بشكل منتظم بحيث تغطي كامل منطقة الدراسة. وإن المعرفة الجيدة لجيولوجية وهيدرولوجية المنطقة يُعد عاملاً هاماً في اختيار مواقع الاعتيان. يوجد نوعان رئيسيان للاعتيان هما: اعتيان منتظم على شكل شبكة من الخطوط المستقيمة rectilinear grid واعتيان على شكل خطوط متقاطعة (المعترضة أو على شكل زكزاك) traverse lines.

في النوع الأول، تُحدد شبكة من الخطوط المستقيمة ثم تُؤخذ عينات التربة على مسافات متساوية على امتداد هذه الخطوط (الشكل ٧٣-أ). ويوجد شكل آخر لهذا النوع هو الاعتيان العشوائي ضمن كتل blocks تقع ضمن شبكة الخطوط المستقيمة (الشكل ٧٣-ب).



(a)

(b)

الشكل (٧٣) أشكال الاعتيان وفق الخطوط المستقيمة: اعتيان منتظم (a) واعتيان عشوائي (b).

وفي النوع الثاني من الاعتيان يتم اختيار نقاط الاعتيان عند نقاط تقاطع المعطيات الطبوغرافية والجيولوجية والجيوفيزيائية، وتُعد المعطيات البيئية والحيوكيميائية للمنطقة هامة من أجل تحديد اتجاه وكثافة نقاط الاعتيان. ويمكن أن تُؤخذ عينات التربة على امتداد الخط القاطع إما على مسافات متساوية أو على مسافات عشوائية.

وتُعد الطريقة الأولى للاعتيان هي الأكثر استخداماً بسبب سهولة تنفيذها وسهولة توقيع مواقع نقاط الاعتيان على الخرائط الأساسية. وإن مدى تمثيل العينات للظروف البيئية للمنطقة المدروسة يعتمد بشكل أساسي على عدة عوامل مثل تكرار الاعتيان، طريقة جمع العينات،

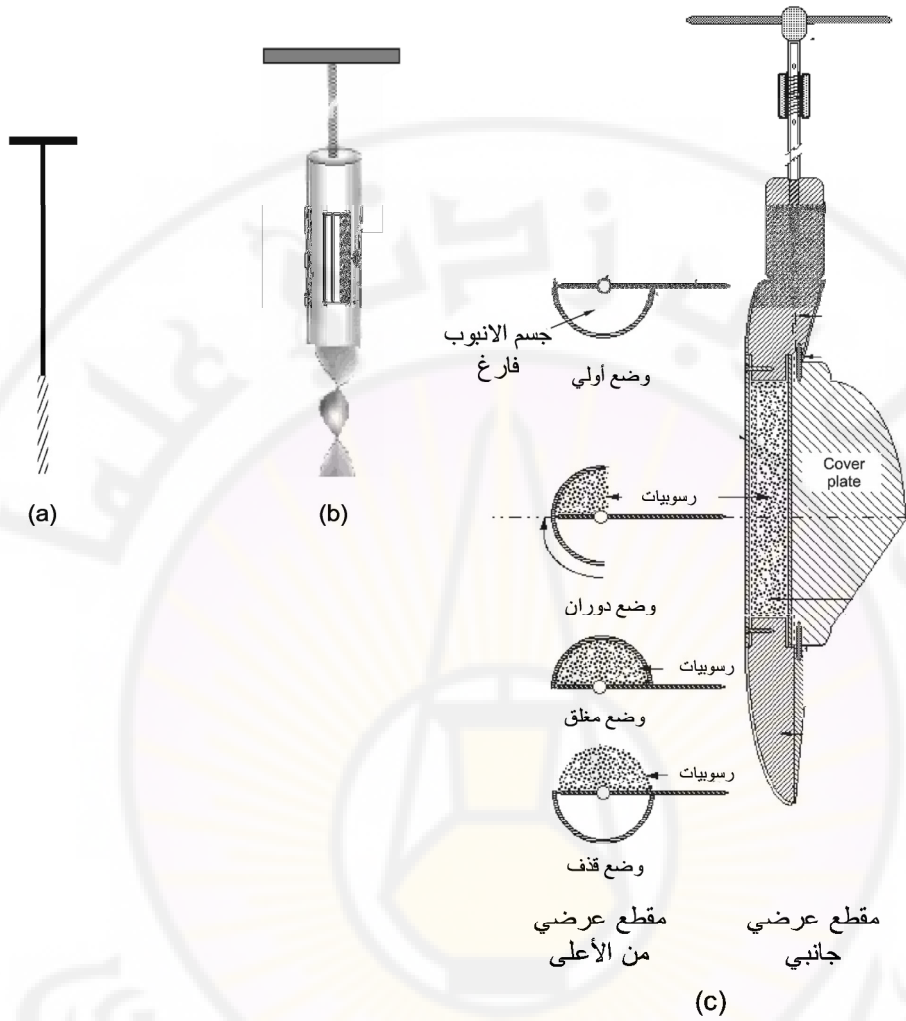
الأخطاء التقنية للشخص الذي يقوم بعملية الاعتيان، بالإضافة إلى طريقة تخزين العينات ومعاملتها ونقلها إلى المختبر. وعموماً، يجب أن تكون نقاط الاعتيان مكثفة حول البقع الساخنة hot spots أي حول الأماكن الأكثر تلوثاً أو في المناطق التي يشتبه بتلوثها.

إجراءات الاعتيان:

إعتيان التربة:

يرتبط عمق الاعتيان بشكل مباشر بهدف عملية الاعتيان، حيث تُؤخذ عينات التربة إما عند أعماق متساوية أو بشكل منفصل من كل أفق على حدة. ويتم الاعتيان مباشرة من خلال حفر صغيرة إذا كانت العينات سطحية أو قليلة العمق تصل حتى ٦٠ سم، أما عند الأعماق الكبيرة فيتم الاعتيان باستخدام مسبر التربة Soil auger (الشكل ٧٤-أ).

أما عينات الخث فإنها تُجمع باستخدام مسابر خاصة مثل مثقب الخث المتعرج Hillier peat borer (الشكل ٧٤-ب) أو المسبر الروسي (الشكل ٧٤-ج) الخاص بالحصول على عينات تربة ملوثة بمركبات خطرة وسامة. كما يُستخدم هذا المسبر من أجل الحصول على عينات غير مضغوطة من الرسوبيات المستتعية أو عينات تربة من أماكن ذات مياه جوفية ضحلة. ويتكون هذا المسبر من جسم رئيسي هو عبارة عن إنبوب مجوّف نصف دائري وذو حواف حادة، ومن أجل الحصول على عينة التربة يُدور هذا الإنبوب يدوياً بزاوية ١٨٠ درجة كما يوضح الشكل (٧٤-ج).



الشكل (٧٤) مسبر التربة (a)، مسبر الخث المتعرج (b)، المسبر الروسي (c).

إعتيان محلول التربة:

يتم اللجوء إلى اعتيان محلول التربة عندما يكون اعتيان التربة غير كافٍ في عملية رصد التلوث، أو من أجل رصد طبيعة انتقال الملوثات في التربة. ويوجد نوعان من الطرائق التي تُستخدم من أجل الحصول على محلول التربة وهما: طرائق تُوصف بأنها مخرّبة للتربة

Destructive وطرائق أخرى غير مخرّبة للتربة Non-destructive، ويتوقف اختيار طريقة الإعتيان بشكل طبيعي على هدف عملية الرصد.

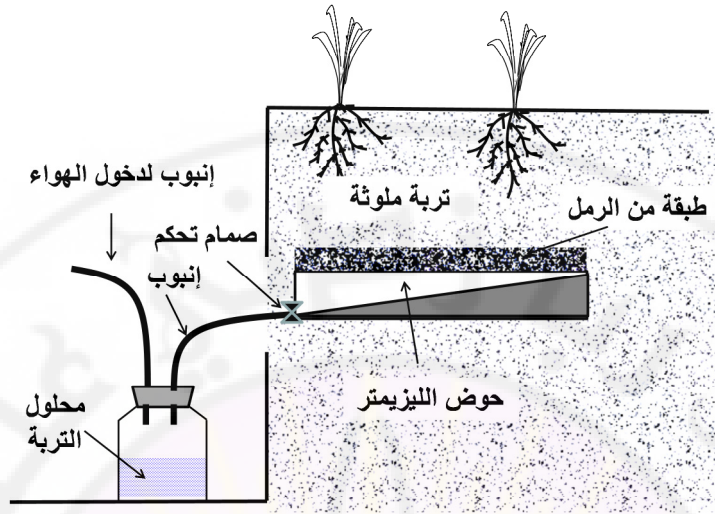
طرائق الاعتيان غير المخرّبة للتربة Non-destructive methods:

تعتمد هذه الطرائق وبشكل خاص تلك التي تستخدم الليزيمترات Lysimeter على ظاهرتين فيزيائيتين لجريان الماء في التربة هما:

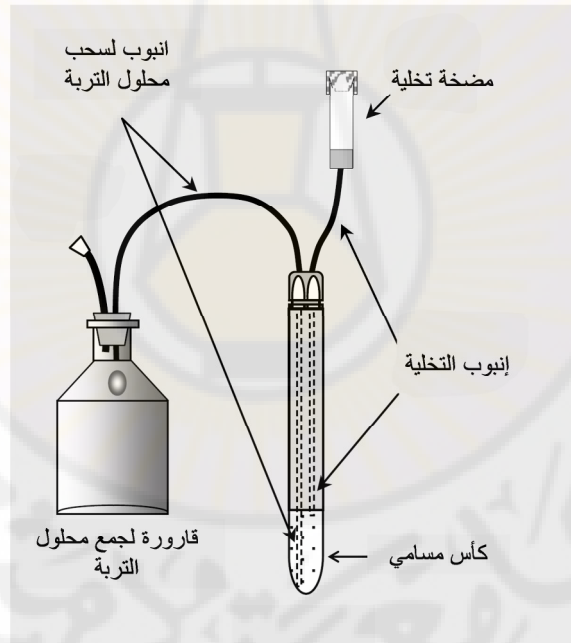
- جريان السائل (محلول التربة) تحت ظروف طبيعية في الوسط دون تطبيق أي قوة جهد أو شدّ خارجي. وتوجد هذه الحالة في الترب غير المشبعة حيث يجري الماء فيها تحت تأثير الممال المائي للتربة، بينما في الترب المشبعة ينتقل الماء تحت تأثير جهد الجاذبية الأرضية فقط.
- جريان محلول التربة تحت تأثير ظروف شد أو ضغط خارجي كاستخدام مضخات التخلية Vacuum pumps مثلاً.

ويوجد بشكل عام نوعان من الليزيمترات:

- ١- ليزيمترات تعمل تحت ظروف غياب قوى الشد وتُدعى Zero-tension lysimeter (الشكل ٧٥)، والتي يُشار إليها اختصاراً بالرمز ZTL. يُستخدم هذا النوع عادة للحصول على محلول التربة خلال جريانه في الترب المشبعة أو القريبة من الإشباع ويتألف من حوض يتوضع أسفل جسم التربة غير المضطرب، ويتصل الحوض بأنبوب ينتهي بخزان لجمع محلول التربة. ويُستخدم أيضاً هذا النوع من الليزيمترات على نطاق واسع من أجل رصد تلوث ماء التربة بالمبيدات من خلال مراقبة تركيب محلول التربة حقلياً، كما يفيد في مراقبة عملية معالجة التربة الملوثة. ويمثل محلول التربة الذي يتم جمعه بواسطة هذه الليزيمترات المحصلة النهائية لمجمل التغيرات والعمليات الفيزيائية والكيميائية والحيوية التي تتم في الوسط.
- ٢- ليزيمترات تعمل تحت تأثير وجود قوى الشد أو التوتر Suction lysimeter (الشكل ٧٦). ويُستخدم هذا النوع من الليزيمترات من أجل الحصول على محلول التربة في الأوساط غير المشبعة، وخاصة في منطقة انتشار الجذور النباتية. ويتم استخلاص محلول التربة عبر تطبيق تخلية مستمرة داخل الليزيمتر تؤدي لدخول محلول التربة الليزيمتر عبر كأس مسامي cup يوجد على تماس مباشر مع التربة، ليتم بعدها جمع محلول التربة المُستخلص في قارورة تتوضع خارج جسم التربة.



الشكل (٧٥) ليزيمتر يعمل تحت ظروف غياب قوى الشد (Zero-tension lysimeter).



الشكل (٧٦) ليزيمتر يعمل تحت تأثير وجود قوى الشد أو التوتر (suction cup).

تُوضع عادةً الليزيمترات في التربة عند أعماق مختلفة، فمنها ما يوضع ضمن منطقة انتشار المجموعة الجذرية عند عمق يختلف ونوع النبات المزروع، وليزيمترات أخرى تُوضع أسفل منطقة انتشار المجموع الجذري من أجل جمع محلول التربة الذي يُصرف خارج منطقة انتشار الجذور.

طرائق الاعتيان المخربة للتربة Destructive methods:

يتم بواسطة هذه الطرائق جمع عينات التربة ثم إرسالها إلى المختبر ليتم لاحقاً استخلاص محلول التربة عبر إحدى طريقتين:

١- طريقة الصرف بالطرد المركزي Centrifuge drainage: حيث تخضع عينات التربة لعملية طرد مركزي باستخدام جهاز طرد مركزي يتكون من حجرة مؤلفة من قسمين: قسم علوي هو عبارة عن صفيحة عليا مثقوبة تُوضع عليها عينة التربة، وقسم سفلي مخصص لجمع محلول التربة الذي يتم استخلاصه من العينة. ثم تُطبق قوة طرد مركزي مقدارها حوالي $10000 \times g$ ولمدة ٣٠ دقيقة، ليتم بعدها الحصول على محلول التربة من القسم السفلي لحجرة الطرد المركزي.

٢- طريقة المستخلص المشبع Saturation extract: يتم في هذه الطريقة إضافة كمية من الماء المقطر إلى عينة التربة ثم يتم جمع محلول التربة من خلال استخلاصه بترشيح عينة التربة المُعاملة. تُستخدم هذه الطريقة من أجل بعض الترب مثل الترب الطينية التي يتعذر فيها استخدام طرائق استخلاص أخرى.

اعتيان هواء التربة:

يعكس التركيب الكيميائي لهواء التربة العديد من المتغيرات البيئية في الوسط، ويكشف عن تلوث التربة بالمركبات العضوية القابلة للتطاير (VOCs) مثل المركبات الهيدروكربونية كالبينزين benzene والتولوين toluene والمذيبات الكلورية. ويمكن الحصول على عينات هواء التربة باستخدام طرائق بسيطة كاستخلاصه من الشقوق والثقوب التي يتم حفرها في التربة باستخدام المسابر ليتم بعدها سحب الهواء عن طريق المضخات، أو يتم اعتيان هواء التربة عبر طريقة حديثة تُسمى الاعتيان السببي passive sampling. وتُستخدم هذه الطريقة بشكل أساسي من أجل الكشف عن المركبات العضوية المتطايرة، حيث تُطمر كمية من الفحم النباتي charcoal bar الفعّال في التربة الملوثة. تعمل هذه المادة كسطوح ادمصاص تدمص عليها المركبات العضوية القابلة للتطاير. ويتم رفع هذه المادة من التربة بعد مضي عدة أيام أو عدة أسابيع (حسب درجة تلوث التربة) ثم يتم فصل الملوثات من أجل تحليلها باستخدام جهاز

الكروماتوغرافي الغازي أو أي تقنية أخرى متاحة. ولا بدّ هنا من التنويه إلى أن تخزين عينات هواء التربة يتم حصراً في أوعية مصنوعة من الستانلس ستيل Stainless steel أو من الزجاج.

٣.٢.٧. الكشف الحقلّي والمخبري:

تعتمد طرائق تحليل العينات بأنواعها الثلاثة (التربة، محلول التربة، هواء التربة) على الهدف من عملية الرصد وعلى درجة الدقة المطلوبة. قد يكون الكشف كافياً في بعض الحالات من أجل تقدير درجة التلوث بشكل أولي، وفي حالات أخرى، لا بدّ من إجراء تحاليل كيميائية دقيقة وشاملة.

١ - دراسة المكونات الصلبة (الطور الصلب) للتربة:

باستطاعة فريق الاعتيان إذا كان يضم خبراء جيولوجيين أن يكشف عادةً عن التركيب الصخري لتربة الحقل من خلال كشف حسي لمنطقة الدراسة. بينما إجراء الفحص المجهرى عن طريق دراسة انكسار الأشعة السينية (X-ray-Diffraction) يُعد ضرورياً من أجل تحديد التركيب الفلزي للصخور. ويمكن الكشف عن وجود التلوث في الحقل كالتلوث بالمشتقات النفطية من خلال الكشف الحسي، كما ويمكن استخدام طريقة UV-fluorescence بنجاح للكشف عن التلوث الزيتي في التربة، ولكن يبقى تحديد نوع الملوثات النفطية يستلزم تحاليل مخبرية نوعية. أما التحليل الكيميائي لعينة تربة ملوثة بالمعادن الثقيلة، فيتم باستخدام جهاز الامتصاص الذري (Atomic Absorption Spectroscopy) AAS أو جهاز ICP (Inductively Coupled Plasma).

٢ - دراسة محلول التربة:

يوجد نوعان من الطرائق المستخدمة في دراسة محلول التربة هما:

- الطرائق المباشرة: وفيها يتم إجراء التحاليل المخبرية لعينات محلول التربة التي تم جمعها من خلال الطرائق التي سبق ذكرها وهي طرائق مخربة لسطح التربة، ويفضّل أن تحلل العينات مباشرة بعد وصولها إلى المختبر. ويجب أن تُخزن العينات ضمن شروط مخبرية جيدة من درجة الحرارة والإضاءة لا تسبب تغيراً في خواصها الكيميائية خلال فترة التخزين.

- الطرائق غير المباشرة: وهي طرائق تمكّن من دراسة محلّول التربة دون اللجوء لاعتنيائه و تحليله مخبرياً، وهي طرائق غير مخربة لسطح التربة، وتشمل كل من الطرائق الجيو - فيزيائية السطحية وتقنيات الاستشعار عن بعد.

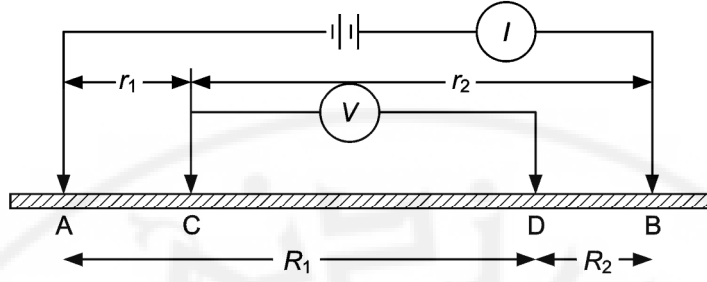
أولاً- الطرائق الجيو - فيزيائية السطحية:

وهي طرائق حديثة في مجال رصد تلوث التربة والمياه الجوفية، وهي تقوم بالكشف عن وجود الملوثات في هذه الأوساط انطلاقاً من سطح التربة، فهي بذلك تقنيات غير مخربة للتربة لأنها لا تحتاج لإجراء اعتيان أو حفر أبار مراقبة بل تعتمد على قياسات سطحية للتربة الملوثة. ومن أهم هذه التقنيات التصوير الطبقي للمقاومة الكهربائية للتربة (ERT) وتقنية استخدام الرادار (GPR).

طريقة التصوير الطبقي للمقاومة الكهربائية للتربة (ERT) Electrical Resistivity Tomography:

وهي طريقة غير مخربة للوسط، سريعة التنفيذ وعالية الحساسية وتتمتع بإمكانية تكرار القياس زمنياً ومكانياً وتغطي مساحات واسعة، بالإضافة لكونها فراغية (ثلاثية الأبعاد). تقوم بقياس المقاومة الكهربائية للتربة Electrical resistivity وتسمح بالحصول على مقاطع ثنائية وثلاثية الأبعاد لمقاومة التربة الكهربائية ولحجم محدود من التربة يمتد من سطح التربة حتى عمق معين يحدده نوع التطبيق المستخدم. يرجع وجود هذه الطريقة إلى عام ١٩٢٠ حيث أستخدمت في الولايات المتحدة في مجال التنقيب عن النفط وتوصيف مقطع التربة الجيولوجي. وقد تطور استخدام هذه التقنية في السنوات الأخيرة ليشمل علوم البيئة والمياه وخاصة في مجال مراقبة تلوث التربة والمياه الجوفية.

وتعتمد هذه الطريقة على مبدأ بسيط يقوم على إمرار تيار كهربائي مستمر منخفض الشدة والتردد عبر زوج من الألكترودات (الإلكترودين A و B) مزروع على سطح التربة يُدعى بزوج التيار الكهربائي، ثم يقوم زوج آخر (الإلكترودين D و C) يُدعى بزوج الكمون بقياس فرق الكمون الكهربائي الناتج عن مرور التيار الكهربائي في التربة بين الإلكترودين A و B (الشكل ٧٧).



الشكل (٧٧) قياس المقاومة الكهربائية للتربة.

ويُعطى فرق الكمون V عند النقطة الالكترود C بالعلاقة التالية:

$$V_C = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

حيث r_1 : المسافة بين الإلكترودين الكمون C و A ، و r_2 : المسافة بين الإلكترودين الكمون C و B . كما يُعطى فرق الكمون عند الالكترود D بالعلاقة:

$$V_D = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

حيث R_1 : المسافة بين الإلكترودين A و D ، و R_2 : المسافة بين الإلكترودين B و D . وفي كلا الحالتين يمكن قياس المقاومة من العلاقتين السابقتين عند معرفة قيمة فرق الكمون V . وترتبط قيمة المقاومة الكهربائية للوسط بما يحتويه من مياه وأملاح ذائبة، فهي تزداد مع تناقص المحتوى الرطوبي للتربة وتركيز الأملاح. وترتبط المقاومة الكهربائية Electrical resistivity والتي هي مقلوب الناقلية الكهربائية Electrical conductivity لأي مادة (كإسطوانة معدنية مثلاً) بالمقاومة الكهربائية Electrical resistance من خلال العلاقة التالية:

$$\rho = R \frac{L}{S}$$

حيث ρ : المقاومة الكهربائية للتربة (Ohm.m).

R : المقاومة الكهربائية للتربة (Ohm).

L : طول الاسطوانة (m)، S : مساحة مقطع الاسطوانة العرضي (m²).

بينت العديد من الدراسات إمكانية استخدام هذه الطريقة من أجل رصد وتتبع تلوث التربة بالملوثات المعدنية وخاصة العناصر الثقيلة. حيث يلعب اختلاف محتوى التربة ومحلولها من

الملوثات المعدنية الدور الرئيسي في تحديد مقدار وتوزيع المقاومة الكهربائية للتربة التي تعكس بدورها تركيز الملوثات وانتشارها عبر مقطع التربة. وتسمح مقاطع التربة ثنائية وثلاثية البعد للمقاومة الكهربائية والتي يتم الحصول عليها من قياسات متكررة خلال الزمن برصد تغيرات تراكيز الملوثات المعدنية، كما وتسمح بتحديد عمق جبهة التلوث وتعقب تقدمها نحو الطبقات العميقة للتربة.

طريقة استخدام الرادار في كشف التربة (GPR) Ground penetrating Radar:

تستخدم هذه الطريقة ذبذبات الرادار والأشعة الكهرومغناطيسية ضمن نطاق الموجات الدقيقة لطيف الراديو من أجل تصوير التربة تحت السطحية. حيث يقوم الرادار بإرسال أشعة الكهرومغناطيسية للتربة بتردد عالي يقع ضمن المجال ١-١٠ ميكا هرتز وعندما تصطدم هذه الأشعة بمواد مختلفة في ثابت عزلها الكهربائي dielectric constants فإنها ترتد وتتبعكس ليتم قياسها وتسجيلها ضمن الجهاز. ويمكن تطبيق هذه الطريقة في أوساط مختلفة تشمل الصخور والترب والجليد والمياه العذبة. وفي الظروف الجيدة يمكن لهذه التقنية أن تكشف عن وجود بعض الأجسام الدخيلة في التربة كالمخلفات مثلاً وكذلك عن وجود الفراغات أو الشقوق داخل التربة وعلى أعماق مختلفة وأن تحدد أيضاً مقدار التغير الذي يطرأ على خواص التربة خلال الزمن.

وحققت هذه الطريقة نتائج جيدة في الكشف عن فضلات مطمورة تحت سطح التربة وتحديد عمق المياه. وأُستخدمت بنجاح في الكشف عن تلوث التربة بالمركبات العضوية مثل المركبات الهيدروكربونية (المشتقات النفطية) في المياه الجوفية من خلال تحديد مقدار انخفاض المنطقة الشعرية الذي ينتج عن وجود طبقة من المركبات الهيدروكربونية تتوضع على سطح المياه الجوفية.

ثانياً - طريقة الاستشعار عن بعد:

يُستخدم الاستشعار عن بعد من أجل الحصول على معلومات حول مكوّن ما باستخدام حساسات (مستشعرات) sensors بعيدة ومفصولة فيزيائياً عن هذا المكون. يمكن وضع الحساسات على حوامل مختلفة ومتنوعة مثل الطائرات والمناطيد aircrafts والبالونات المجهزة بألات تصوير أو على أجهزة حقلية محمولة سهلة الاستخدام.

وتعتمد أغلب طرائق الاستشعار عن بعد على قياس الاستجابة التي يبديها الجسم المدروس لأجزاء نوعية من الطيف الكهرومغناطيسي مثل أشعة غاما والضوء المرئي والموجات الدقيقة Microwaves أو موجات الراديو. وأُستخدِمت تقنية الاستشعار عن بعد حديثاً في مجال رصد تلوث التربة وخاصة بهدف الكشف عن مصادر التلوث بالمعادن الثقيلة. يمكن الاستشعار عن بعد من تحديد أماكن انتشار الفلزات على سطح التربة، إذ تمثل الفلزات المصادر الطبيعية للمعادن الثقيلة في التربة.

٤.٢.٧. مراقبة ورصد تلوث المياه الجوفية:

يمكن أن تدمص الملوثات خلال انتقالها نحو المياه الجوفية على سطوح المكونات الصلبة للتربة في المنطقة غير المشبعة أو لاحقاً في المنطقة المشبعة. إن دراسة الخواص الحركية للمياه الجوفية وآليات جريان الماء يعد مهماً جداً في وضع خطط المعالجة. لذا تُعد مراقبة ورصد سرعة واتجاه جريان المياه الجوفية جزءاً أساسياً من عملية رصد التلوث. ومن أجل فهم حركة المياه الجوفية، لا بدّ من دراسة مدى تغير خواصها الحركية تبعاً لظروف المنطقة الجيولوجية وخاصة اتجاه الجريان وتغير الضغوط المائي.

- تحديد اتجاه جريان المياه الجوفية:

يمكن أن يُستدل مباشرة على اتجاه الجريان من خلال طبوغرافية الموقع الملوث وذلك باستخدام خرائط طبوغرافية للمنطقة المدروسة. ولكن الحصول على معلومات دقيقة حول موقع محدد يتم من خلال قياسات دقيقة ومنظمة لارتفاع مستوى المياه الجوفية فوق مستوى مرجعي هو عادةً مستوى سطح البحر، ثم توقيع النتائج على خارطة أساسية Base map توضح توزع وانتشار الضغوط المائية للتربة.

من أجل هذا الهدف تُحفر أبار للمراقبة التي يتجاوز عمقها مستوى الماء الجوفي في عدة مواقع في المنطقة المدروسة، ويجب أن تكون هذه الأبار مجهزة بأنابيب متساوية الأقطار. وتتم قياسات عمق الماء الجوفي بشكل نظامي عند فترات متساوية كما ويُسجل ارتفاع المياه الجوفية عن المستوى المرجعي المحدد. ويتوقف موقع أبار المراقبة على شرطين أساسيين هما:

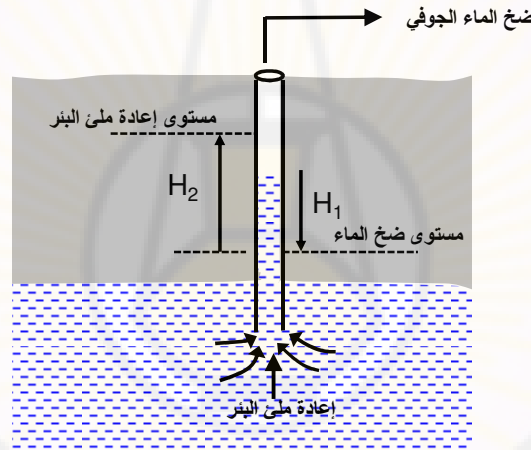
- يجب أن تُحفر كل أبار المراقبة إلى عمق لا يتجاوز عمق الحوض المائي وأن تقع جميعها ضمن نطاق هذا الحوض.

- يجب أن تملك أبار المراقبة توصيل مائي جيد بالنسبة إلى بعضها البعض. يتطلب تحقيق الشرط الأول معرفة جيدة لجيولوجية الطبقة التي تقع تحت سطح التربة. بينما يستلزم الشرط الثاني التأكد من وجود توصيل مائي جيد بين أبار المراقبة. وفي هذا الإطار وضع Hölting (عام ١٩٨٠) العلاقة التجريبية التالية التي تحدد ماهية هذا التوصيل (الشكل 78):

$$\varepsilon = \frac{2}{t} \left(\frac{H_1 - H_2}{H_1 + H_2} \right)$$

وتبعاً لهذه العلاقة يكون التوصيل المائي الجيد لبئر المراقبة مُحَقَّقاً إذا أعطت العلاقة التالية قيمة رقمية أعلى من ٠.٠٠١١٥.

H_1 : انخفاض مستوى الماء الجوفي (سم) بالنسبة إلى المستوى الأصلي.
 H_2 : ارتفاع مستوى الماء الجوفي (سم) نتيجة عملية الجريان الراجع خلال زمن مقداره t .
 t : الزمن (دقيقة).



الشكل (78) تباين مستوى الماء الأرضي في بئر المراقبة.

مثال توضيحي (١):

في تجربة ضخ للمياه الجوفية انخفض مستوى الماء الجوفي بمقدار ٤٥ سم، وبعد مرور ٥ دقائق عمل الجريان الراجع على رفع مستوى الماء الجوفي إلى ارتفاع يزيد بمقدار ٢٨ سم عن المستوى الذي وصل إليه بعد عملية الضخ. فهل يمكن اختيار هذا الموقع كمحطة مراقبة لمستوى الماء الجوفي على فرض أن جميع أبار المراقبة تقع ضمن حوض مائي واحد؟

بعد تطبيق العلاقة السابقة نجد:

$$\varepsilon = \frac{2}{5} \left(\frac{45 - 28}{45 + 28} \right) = 0.093 > 0.0115$$

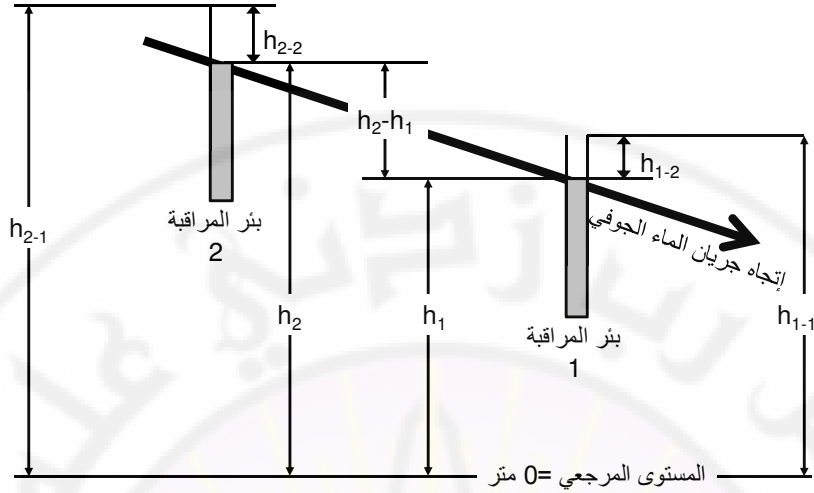
نلاحظ أن قيمة العلاقة السابقة ٠.٠٩٣ أكبر من القيمة ٠.٠١١٥، فهذا البئر يملك توصيل هيدرولوجي جيد ضمن الحوض المائي ويمكن اختياره كمحطة مراقبة لقياس تغيرات مستوى الماء الجوفي.

وتُستخدم في مرحلة لاحقة أعماق مستوى المياه الجوفية التي سُجلت في جميع آبار المراقبة المنتشرة في المنطقة المدروسة من أجل رسم خارطة مستوى الماء الجوفي، ثم يتم بالاعتماد عليها رسم كنتورات الجهود من أجل تحديد اتجاهات جريان الماء الجوفي وبالتالي اتجاهات انتقال الملوثات وتكون هذه الاتجاهات عموماً عمودية على خطوط الكونتورات.

- رصد الضاغط المائي:

إن مراقبة ارتفاع مستوى الماء الجوفي في آبار المراقبة المتاحة لا يفيد فقط في تحديد إتجاه جريان الماء والملوثات، بل يمكن أيضاً الاستعانة به في تطبيق قانون دارسي لجريان الماء من أجل تحديد العديد من المتغيرات مثل سرعة جريان المياه الجوفية ومعدل انتقال الملوثات ضمن الحوض المائي، أو تقدير الزمن اللازم لانتقال كمية محددة من الملوثات من مناطق ملوثة ضمن الحوض المائي إلى مناطق أخرى غير ملوثة.

ومن الناحية العملية، يُقاس الضاغط المائي في بئر المراقبة من خلال طرح قيمة عمق الماء الجوفي في البئر من قيمة الارتفاع الطبوغرافي لفتحة البئر بالنسبة لمستوى مرجعي كمستوى سطح البحر كما يوضح الشكل (٧٩).



الشكل (79) مراقبة الضاغط المائي في بئري مراقبة.

مثال توضيحي (٢):

إذا بلغ ارتفاع فتحة البئر فوق المستوى المرجعي ٨٧ متراً بالنسبة لبئر المراقبة الأول (h_{1-1}) و ٩٠ متراً بالنسبة لبئر المراقبة الثاني (h_{2-1})، وكان عمق الماء الجوفي تحت فتحة البئر هو ٦ أمتار في بئر المراقبة الأول (h_{1-2}) و ٤.٥ أمتار في البئر الثاني (h_{2-2}) فيمكن حساب ارتفاع الضاغط المائي في البئر الأول (h_1) و في البئر الثاني (h_2) على النحو التالي:

$$h_1 = 87 - 6 = 81\text{m}$$

$$h_2 = 90 - 4.5 = 85.5\text{m}$$

ويكون فرق الضاغط المائي بين بئري المراقبة هو:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 85.5 - 81 = 4.5\text{m}$$

وبالتالي يكون اتجاه المياه الجوفية في المنطقة المدروسة من البئر الثاني نحو البئر الأول.

الفصل الثامن

تشريعات حماية التربة من التلوث

١. تشريعات حماية البيئة:

تنبه الإنسان بخطر تلوث البيئة وتجمع الناس ونادوا إلى المحافظة على البيئة وحمايتها من التلوث فأصدرت الدول مجموعة قوانين وتشريعات سميت بقانون البيئة Environmental laws . تدعم قوانين البيئة حماية الأنظمة البيئية بالمحافظة على الثروات المائية والتربة الزراعية والنباتية والحيوانية والموارد الطبيعية والمحافظة على الصحة العامة، وحددت المبيدات الممنوع استخدامها وطرق التخلص من المخلفات وعدم إلقاء مياه الصرف الصحي في الأنهر، وتقويم الأثر البيئي لأي مشروع صناعي قبل الترخيص به وسبل معالجة المخلفات.

وقع عدد كبير من الدول اتفاقية منع تلوث البحار بزيوت النفط في مؤتمر بالأمم المتحدة عام ١٩٨٢، وعقد في القاهرة عام ١٩٨٩ مؤتمر حماية البيئة بين الدول العربية، تقرر فيه إعداد استراتيجية كاملة لمكافحة التصحر وتنفيذ مشروعات تنقية المياه وأنظمة معالجة الصرف الصحي ومراعاة الجوانب البيئية عند تنفيذ المشروعات.

شارك أكثر من ١٥٠ دولة في مؤتمر قمة الأرض في البرازيل عام ١٩٩٢ صدر عنه اتفاقية حماية التنوع الحيوي وحماية الطقس والدفع العالمي، وشمل إعلان أنه لا يجوز لأي بلد أن يؤدي بيئة الدول الأخرى، وحدد جدول أعمال المشكلات البيئية التي تحتاج لاهتمام وفيها وضعت أسس تقدير أو تقييم المخاطر وهو احتمالية الخطورة $\times$ درجة الخطورة وعرف الخطر

المقبول وهو: $\frac{\text{احتمال المخاطرة} \times \text{درجة الخطورة}}{\text{الواقعة من المنبع}}$ وهذا يعني إذا كان هناك أي زيادة في الخطورة

فيجب أن يتوازن هذا مع المنفعة الناتجة، وتم وضع تشريعات بيئية صارمة وتم فرض ضرائب على مسببي تلوث البيئة مع تقديم المساعدات المالية للدول النامية مع إنشاء قاعدة بيانات بيئية عالمية.

وصدر في سورية بتاريخ ١٩٩٦/٤/٣ مرسوم تشريعي بانضمام وتوقيع سورية لاتفاقية مؤتمر الأرض. إن سيادة المناخ الصحراوي المسبب لظاهرة التصحر وتوالي نوبات الجفاف والنقلبات المناخية الحادة وانحباس المطر عدة مواسم والمتراكمة مع ارتفاعه ملحوظ لمتوسطات الحرارة،

إضافة للتيارات الهوائية الحادة جعلت التربة عرضة للانجراف الريحي والمسببة في تشكيل الكثبان الرملية، وتفاقت ظاهرة العواصف الغبارية والتي تنتج عنها خروج مساحات واسعة من الأراضي الزراعية وتدهور التربة وتصحرها، وبالتالي إلى عوائق أمام توسع الإنتاج الزراعي، فلا بد من تطبيق سبل مكافحة الانجراف الريحي بالتثبيت الميكانيكي للرمال وإقامة خنادق مع سواتر ترابية وحواجز من سعف النخيل وعيدان القصب وشبك بلاستيك، والقيام بالتثبيت الحيوي من خلال التثبيت الحيوي من خلال زراعة أشربة نباتية رعوية وأحزمة رعوية ضيقة واستخدام تقنيات النثر المباشر للبذور الرعوية واستخدام تقنيات حصاد المياه.

وشاركت سورية في مؤتمر الأمم المتحدة التاسع عشر للتغيرات المناخية في مجموعة ٧٧+ عام ٢٠٠١ وأصدر إعلان كيوتو للحد من غازات الدفيئة (انبعاثات الكربون CO_2 ، CH_4 ، NH_3) ووقعها ٣٦ دولة صناعية وقامت سورية بتوقيعها عام ٢٠٠٥. تسبب غازات الدفيئة ارتفاع حرارة الكرة الأرضية ٠.٨ درجة مئوية في خلال قرن وربما ترتفع خمس درجات بحلول عام ٢١٠٠. واتفق أن تتحمل هذه الدول الصناعية النصيب الأكبر من الالتزامات لتخفيض الغازات الدفيئة بنسبة ٥% حتى عام ٢٠١٢، ولكن وجد أن هنالك حافزاً بين الالتزامات والإجراءات. ورفضته الولايات المتحدة بسبب دعوتها لمشاركة الصين والهند التي تحقق نمواً اقتصادياً سريعاً. في عام ٢٠١١ أبرم اتفاق دوريان الذي نص على ضم كل الدول لخفض الغازات الدفيئة وأن يكون ملزماً قانونياً مع تقديم مساعدات مالية لدول الجنوب الفقيرة غير القادرة على مواجهة تداعيات التغير المناخي. وفرضت على الدول الحد من الانبعاثات (بونات خفض الكربون) للتغلب على الأضرار والخسائر الناجمة عن الموجات الحارة والجفاف والفيضانات والتهديدات الزاحفة مثل زيادة مستويات مياه البحار والتصحر على الرغم من رفض الدول الغنية التعهد بدفع المزيد من الأموال وتراجع اليابان بعد حادثة فوكوشيما بعد إغلاق مفاعلاتها النووية. ويعد هذا تراجعاً عن اتفاقية دوريان. ويتم في هذا الوقت التحضير لاتفاق باريس ٢٠١٥ بين ٢٠٠ دولة لكي يدخل حيز التنفيذ عام ٢٠٢٠ لمحاربة التغير المناخي. قامت وزارة الدولة لشؤون البيئة في سورية وبحكم موقع سورية الجغرافي ضمن المناطق الجافة وشبه الجافة، وتنفيذاً للخطة الخمسية التاسعة والعاشر في إطار السياسة العامة للدولة، في مجال حماية البيئة وللتخلص من السلوكيات الخاطئة والضارة بالبيئة لارتباط تدهور الوضع البيئي صحياً على المجتمع وتعزيز التعاون بين المؤسسات والمنظمات الأهلية والمختصين والخبراء بالتخطيط الإقليمي مع مسألة تلوث التربة والمياه وذلك من منطلق كونها تشكل أبرز التحديات التي تعترض مسار التنمية، من

منهجية متكاملة يتواكب فيها القضاء على التلوث من المصدر ، فيتم لذلك إعداد خريطة للملوثات التي تقدم تشخيصاً شاملاً لحجم وتوزع وخواص الملوثات ووضع معايير السلامة طبقاً لدرجة خطورة الملوثات. تم وضع حلول وبرامج واقعية بأرقام واقعية بالمقارنة مع المواصفات القياسية السورية ومواصفات الصحة العالمية بالأخذ بعين الاعتبار لبرامج الجودة مثل تطبيق المواصفة ١٧٠٢٥ لعام ٢٠٠٥ . وتم وضع خرائط بيئية دقيقة تساعد على التعرف على المواقع التي تعاني من مشكلات بيئية لكي تساهم بشكل ايجابي وفعال في حل المشكلات البيئية والمناطق المعرضة للخطر ومواجهة انحباس الأمطار والجفاف والتصحر وحرائق الغابات والعواصف الرملية التي تؤثر على الموارد الطبيعية الزراعية. أقامت إدارة النفايات الصلبة محطات معالجة ووضعت القواعد النازمة لعملها. لابد من الاستمرار بإجراءات إصحاح البيئة وإدارة المياه والطاقة والنفايات ووضع استراتيجية وخطة عمل شاملة للمعالجة والتكيف مع الآثار المترتبة ويجب التركيز على الخطة الحادية عشرة للسياسة العامة في الدولة في المشاريع البيئية (حماية المياه والتربة....) والتركيز على أهمية تقويم الأثر البيئي للمشاريع الاقتصادية وإجراء مراجعة وتدقيق للمشاريع الحالية وإدماج البعد البيئي في خطط التنمية والتعاون بين قطاع البيئة وكل القطاعات الأخرى. وفي هذا الوقت تم انجاز إصدار القانون البيئي رقم ٥٠ بتاريخ ٢٦/٠٦/٢٠٠٢ ثم تم تعديل هذا القانون بالقانون رقم ١٢ بتاريخ ٢٩/٠٣/٢٠١٢. وتم إطلاق البلاغ الوطني الأول للتغيرات المناخية في سورية بتاريخ ٢١/٠٤/٢٠١١ بالتعاون مع برنامج الأمم المتحدة الإنمائي وبتنويل من برنامج البيئة العالمي ويتضمن اعتماد استراتيجية خطة عمل وطنية للتكيف مع التغيرات المناخية واحداث قاعدة بيانات تتضمن أكثر من ٣٠ دراسة تخصصية مع العديد من الخبراء الوطنيين وهو مصدر هام للمعرفة والمعلومات للدارسين والمخططين ولواضعي السياسات وأصحاب القرار ويتضمن نظم التنبؤ بالجفاف ورصده ويشكل قاعدة علمية وعملية أساسية ودليل في التعامل مع آثار التغيرات وتطويرها إلى مشروعات بناءً على الخطط الوطنية لمكافحة التصحر وحفظ التنوع الحيوي. وفيما يلي أهم ما جاء في القانون رقم (١٢) للعام ٢٠١٢ المتعلق بإرساء القواعد الأساسية اللازمة لسلامة البيئة وحمايتها من التلوث وتحقيق التنمية البيئية:

المادة ١: تعاريف:

الجدول (١٣): تعاريف أساسية في القانون رقم ١٢ لعام ٢٠١٢

البيئة	المحيط الذي تعيش فيه الأحياء من إنسان وحيوان ونبات ويشمل الماء
--------	--

	والهواء والأرض وما يؤثر على ذلك المحيط	
المادة ٢:	كل تغيير كمي أو كيفي بفعل الملوثات في الصفات الفيزيائية أو الكيميائية أو الحيوية لعنصر أو أكثر من عناصر البيئة وينتج عنها أضرار تهدد صحة الإنسان أو حياته والأحياء أو صحة وسلامة الموارد الطبيعية	تلوث البيئة
يهدف هذا القانون إلى إرساء القواعد الأساسية	هي مجموعة النظم والإجراءات التي تكفل استمرار توازن البيئة وتكاملها الإنمائي وتحافظ على بيئة سليمة صالحة للاستمتاع بالحياة والاستفادة من الموارد والممتلكات على خير وجه	حماية البيئة
لسلامة البيئة وحمايتها من التلوث وتحقيق التنمية البيئية وتحديد المهام المنوطة بالوزارة وكذلك المهام التي تقوم بها بالتعاون مع الجهات المختصة	الماء والهواء والأرض وما تشتمل عليه ويعيش في داخلها ومحيطها	عناصر البيئة
	هو البحث في الأثر البيئي لمشروع أو نشاط محدد وتقويمه على ضوء الأسس والإجراءات المعتمدة.	تقويم الأثر البيئي
	هي إحدى ركائز التنمية المستدامة والتي تكفل الحفاظ على عناصر البيئة وتنميتها والاستفادة منها بشكل دائم دون تعريضها للتدهور أو الإخلال بالتوازن بينها	التنمية البيئية
	هو التغيرات الطارئة على عناصر البيئة والنظم البيئية الناتجة عن النشاطات البشرية أو التغيرات المناخية بما يقلل من قيمتها أو يشوه من طبيعتها البيئية	التدهور البيئي
	أي مادة تتصف بإحدى صفات الخطورة وتسبب أذى محتملاً لعناصر البيئة بسبب خصائصها الكيميائية أو الفيزيائية أو الإشعاعية أو الحيوية	المادة الخطرة
	أي مادة بسيطة أو مركبة أو مخلوطة أو نفايات سواء كانت طبيعية أو مصنعة تشكل ضرراً على البيئة أو على أي من عناصرها	المادة الضارة
	أي مادة تحظر استعمالاتها كافة باستثناء استخدامها في مجالات محددة مسموح بها	المادة المقيدة

لمتابعة تنفيذ أحكامه وأحكام القوانين والأنظمة المتعلقة بالشؤون البيئية بما يحقق هذه الأهداف.

المادة ٣: في سبيل تحقيق ما يهدف إليه هذا القانون ومع مراعاة النصوص والأحكام النافذة ذات العلاقة بالمحافظة على سلامة البيئة ومواردها تتولى الوزارة المهام الآتية:

(١) وضع الرؤية والسياسة العامة لحماية البيئة ضمن إطار السياسة العامة للدولة وإعداد الإستراتيجية الوطنية اللازمة لذلك وتطويرها ووضع الخطط والبرامج لتنفيذها ومتابعتها بالتعاون والتنسيق مع الجهات المختصة.

(٢) إعداد التشريعات والأنظمة والدراسات الكفيلة بالحفاظ على البيئة بمختلف عناصرها ومنهجية حمايتها والتوجه نحو الاقتصاد الأخضر بالتعاون والتنسيق مع الجهات المختصة.

(٣) حصر المشكلات البيئية القائمة وإجراء أو المشاركة في البحوث والدراسات العلمية اللازمة لمعالجتها والحد من التدهور البيئي الحاصل والسعي للحد من ظهور أي مشكلات بيئية أخرى تهدد بضرر محتمل يلحق بالبيئة مستفيدة من الدراسات المحلية والدولية ذات الصلة.

(٤) مراقبة عناصر البيئة من خلال مختبراتها والمختبرات التي يوافق على اعتمادها المجلس وفق الأسس التي تحددها لجنة مختصة تضم الوزارات المعنية وإجراء تقييم دوري لوضع ومنحى التلوث في عناصر البيئة.

(٥) وضع الأسس والإجراءات اللازمة لتقييم الأثر البيئي بالتعاون والتنسيق مع الجهات المختصة للنشاطات التنموية الجديدة بما فيها مشاريع للبنى التحتية وأي منشأة صناعية أو زراعية أو خدمية يترتب على عملها تهديد للبيئة بسبب حجمها أو طبيعتها أو بسبب إصدارها ملوثات إلى عناصر البيئة ويشمل ذلك المنشآت المراد إقامتها ضمن المدن والمناطق الصناعية والمناطق الحرة ويصدر الوزير لائحة بالمشاريع والنشاطات التي تخضع لهذا التقييم يتم إعدادها بالتعاون مع الجهات المختصة ويعتبر اعتماد دراسة تقييم الأثر البيئي من قبل الجهة المعنية في الوزارة شرطاً للحصول على الترخيص الدائم أو المؤقت لهذه المشاريع إلا إذا تم استثناء بعضها لضرورات قصوى من قبل المجلس على أن تلتزم الجهة المستثناة بالتعويض عن الضرر الناجم عن عملها حال حدوثه والذي يحدده المجلس باقتراح من الوزير.

(٦) إجراء التقييم البيئي الاستراتيجي لخطط وسياسات وبرامج عمل الوزارات.

(٧) وضع الأنظمة والشروط البيئية للمنشآت الصناعية والنشاطات الأخرى التي لها تأثير ضار على البيئة أو التي تؤدي إلى الإخلال بتوازنها وذلك بالتعاون مع الجهات المختصة.

(٨) تحديد المنشآت التي يقتضي وجود إدارة بيئية ذاتية ضمنها ووضع أسس عمل هذه الإدارة.

- ٩) إعداد المواصفات والمعايير القياسية التي يجب توفرها في كل من عناصر البيئة حسب استعمالاتها في ضوء التقدم التكنولوجي وتطور المعايير المتعارف عليها دولياً بالتعاون مع الجهات المختصة تمهيداً لاعتمادها واعتبار كل تجاوز لهذه المواصفات والمعايير تلوثاً.
- ١٠) تحديد معايير ومؤشرات الحد الأعلى المسموح به بيئياً للضجيج بمختلف مصادره بالتعاون مع الجهات المختصة.
- ١١) تحديد المواد الضارة أو الخطرة على البيئة ووضع أسس تصنيفها وتخزينها وتداولها ونقلها وإتلافها والتخلص منها وتحديد ما يمنع إدخاله منها إلى الجمهورية العربية السورية وفقاً للاتفاقيات البيئية الدولية وذلك بالمشاركة مع الجهات المختصة.
- ١٢) إعداد خطط الطوارئ البيئية ومتابعة تطويرها وتنفيذها وذلك بالتعاون مع الجهات المختصة.
- ١٣) مراقبة إجراءات معالجة التلوث في الوسط البيئي ومتابعتها بما يكفل عدم انتقال هذا التلوث أو اتساعه.
- ١٤) الرقابة والتفتيش على النشاطات ذات التأثير البيئي لدى الجهات العامة والخاصة للتحقق من مدى تقيدها بالمواصفات البيئية القياسية والمعايير المعتمدة واتخاذ الإجراءات اللازمة بالنسبة للنشاطات المخالفة العائدة للقطاع الخاص والاقتراح على المجلس الإجراءات اللازمة بالنسبة للنشاطات العائدة للقطاع العام والمشارك لتلافي المخالفات إن وجدت.
- ١٥) إعداد وتطوير الأدلة والاشتراطات والتعليمات اللازمة لتصنيف وإدارة النفايات الصناعية والخطرة والطبية المشار إليها بمضمون الفصول الثالث والرابع والخامس من قانون النظافة رقم ٤٩ لعام ٢٠٠٤ بالمشاركة مع وزارة الإدارة المحلية ووزارة الصحة والجهات المختصة والتعاون مع تلك الجهات في متابعة تنفيذ الأحكام الواردة في تلك الفصول.
- ١٦) وضع أسس إنشاء المتنزهات الوطنية والحدائق والشوارع البيئية وشروطها ووضع أسس إنشاء المحميات الطبيعية بأنواعها وفقاً للمعايير الدولية ومراقبتها وفقاً لمعطياتها وخصائصها بالمشاركة مع وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي والجهات المختصة.
- ١٧) وضع المعايير البيئية لحماية مكونات التنوع الحيوي النباتية والحيوانية سواء كانت مائية أو برية.
- ١٨) وضع السياسات العامة لحماية مكونات التنوع الحيوي النباتية والحيوانية بالمشاركة مع الجهات المختصة ومتابعة تنفيذ استراتيجية وخطة العمل الوطنية لحماية التنوع الحيوي.

- ١٩) العمل على إنشاء شبكات الرصد البيئي وتشغيلها ومتابعتها.
- ٢٠) إعداد بنك المعلومات البيئي وتنظيمه ومتابعة تطويره.
- ٢١) إعداد خارطة التلوث البيئي لكل محافظة ومتابعة تطوراتها.
- ٢٢) دعم الجمعيات ومنظمات المجتمع الأهلي العاملة في مجال حماية البيئة بهدف تفعيل وتسهيل نشاطاتها.
- ٢٣) تكليف باحثين من الوزارة أو من خارجها للقيام بالبحوث والدراسات العلمية البيئية وفقاً لأحكام القوانين والأنظمة النافذة.
- ٢٤) تنمية الوعي العام البيئي بمختلف الوسائل الإعلامية ونشر ما يمكن نشره من نتائج الأبحاث العلمية بهدف الحفاظ على صحة البيئة وسلامة مواردها والتوجيه باستعمال التقانات الخاصة والطاقات والمواد البديلة ومتابعة تشجيع الوقاية من التلوث والتقليل منه ومراقبته والسعي لإدخال برامج تربية بيئية في المناهج الدراسية واختصاصات بيئية جديدة في مراحل التعليم العالي.

المادة ٤: تقوم الوزارة بالتعاون والتنسيق مع الجهات المختصة بتنفيذ المهام التالية:

- ١- وضع المعايير والاشتراطات البيئية لاستخدام تقانات الطاقات المتجددة والبديلة والإنتاج الأنظف والمشاركة في إعداد استراتيجيات وبحوث الشبكات الوطنية لتلك التقانات.
- ٢- وضع أسس ومعايير التخطيط البيئي المتكامل لاستعمالات الأراضي.
- ٣- المشاركة في البحوث العلمية البيئية والدراسات المتعلقة بالأنشطة التي تقع في أراضي الدولة ومياهها الداخلية والبحرية والحيز الجوي الذي يقع فوقها وعلى المنشآت والمواد الخطرة المصرة بسلامة البيئة واقتراح التوصيات والإجراءات اللازمة لإزالة الخطر.
- ٤- المشاركة مع المنظمات الإقليمية والدولية في البحوث والمؤتمرات والندوات والاجتماعات المتعلقة بالشؤون البيئية ومتابعة تنفيذ المقترحات والتوصيات بالتعاون مع الجهات المختصة وبالتنسيق مع وزارة الخارجية والمغتربين.
- ٥- تدعيم العلاقات مع الدول والهيئات والمنظمات الدولية والإقليمية في الأمور والشؤون والاتفاقيات والمعاهدات المتعلقة بمهام الوزارة ووضع الأنظمة المنصوص عليها في تلك المعاهدات والاتفاقيات وذلك بالتعاون مع وزارة الخارجية والمغتربين وهيئة التخطيط والتعاون الدولي.

- ٦- المشاركة في حماية الساحل والبيئة البحرية من التلوث.
- ٧- دراسة أسباب انجراف التربة والتصحر وكل ما يؤدي إلى تلوث الأرض وجوفها ومواردها الطبيعية واقتراح الحلول المناسبة لها.
- ٨- وضع دراسات للنشاطات البشرية المؤثرة سلباً على مكونات التنوع الحيوي الصيد، التجارة الوطنية والدولية، إدخال الأنواع الحية الغريبة والكائنات المعدلة وراثياً وغيرها.
- ٩- وضع دراسات لتطوير وتنظيم النشاطات البشرية التي تشكل مصادر دخل بديلة للمجتمعات المحلية التي تتعامل مباشرة مع مكونات التنوع الحيوي كالسياحة البيئية ومشاريع التنمية الريفية وغيرها.
- ١٠- المشاركة مع وزارة الإدارة المحلية في تطوير طرق معالجة النفايات البلدية الصلبة واستثمارها والتخلص منها وتقديم الرأي الفني من خلال مراجعة دراسات تقييم الأثر البيئي لمواقع معالجة تلك النفايات.
- ١١- اتخاذ الإجراءات اللازمة لمنع إدخال إي نفايات إلى الجمهورية العربية السورية أو طمرها فيها.

المادة ١٢: التفتيش البيئي.

- (١) تسمى الوزارة مفتشين بيئيين من العاملين التابعين لها ممن تتوفر لديهم الخبرة الفنية كما هو محدد بالشروط التي تضعها الوزارة في النظام الداخلي ويؤدي هؤلاء المفتشون البيئيون أمام رئيس محكمة البداية المدنية في مركز المحافظة التي يقيمون فيها اليمين التالية //اقسم بالله العظيم أن أقوم بمهمتي بأمانة وكرمان وأن انتهج المسلك الذي يحتمه الواجب في حماية البيئة وصحة المواطنين. //
- (٢) يحق لهؤلاء المفتشين البيئيين بعد أدائهم القسم دخول الأماكن التي تحددها الوزارة بالتنسيق مع الجهات المختصة وذلك بموجب امر مهمة صادر عن الوزير أو من يفوضه يخولهم حق تفتيشها من الناحية البيئية بمؤازرة الضابطة البيئية وذلك لضبط أي مخالفة لما نص عليه هذا القانون وأي مخالفة للمواصفات والشروط والأنظمة البيئية الأخرى.
- (٣) بمراعاة البند ١٤ من المادة ٣ يكون للضبوط التي ينظمها المفتشون البيئيون بعد إنذار المخالف وانقضاء مدة الإنذار صفة الضبوط المنظمة من قبل الضابطة العدلية بعد اعتمادها من

الوزير أو من يفوضه حيث تحال إلى المحكمة المختصة عن طريق النيابة العامة لمحاكمة المخالف.

المادة ١٣: المسؤوليات والعقوبات.

١-أ: كل من ساهم أو ساعد في عبور النفايات النووية أو المشعة أو الخطرة إلى الجمهورية العربية السورية يعاقب بالاعتقال المؤقت خمس سنوات على الأقل وبالغرامة من عشرة ملايين ليرة سورية إلى عشرين مليون ليرة سورية أو بضعفي قيمة الشحنة أيهما أكثر.

ب- وتكون العقوبة الأشغال الشاقة المؤبدة إذا أدخل هذه النفايات بقصد إلقيائها أو دفنها أو إغراقها أو حرقها أو تخزينها في أراضي الجمهورية العربية السورية أو مياهاها الإقليمية وتصل إلى الإعدام إذا نجم عن هذا الإدخال وفاة إنسان.

أ: المسؤول عن إدارة المنشأة الخاصة ذات النشاط الصناعي أو الاقتصادي أو التعموي أو السياحي أو الخدمي إضافة إلى صاحبها يعاقب بالغرامة من أربع مائة ألف ليرة سورية إلى مليون ليرة سورية في إحدى الحالات التالية: إذا كان نشاطه يسبب تلوثاً بيئياً يؤدي إلى ضرر آني أو مستقبلي على صحة الإنسان وسلامته. إذا تخلص في الجمهورية العربية السورية من أي نوع من المخلفات الصلبة، الصناعية، الخطرة، الطبية أو السائلة أو الغازية الناتجة عن نشاطه خلافاً لأحكام هذا القانون والمعايير والمواصفات والشروط والأنظمة البيئية الأخرى. إذا خالف أسس تصنيف وتخزين ونقل وتداول وإتلاف المواد الضارة أو الخطرة أو استخدم المواد المقيدة في غير الاستخدامات المحددة والمسموح بها.

ب: تستحق العقوبة سواء تم التخلص من هذه المخلفات بتصريفها أو إلقيائها أو إغراقها أو حرقها أو بأي صورة أخرى.

ج: في حال التكرار تكون العقوبة الحبس ثلاثة أشهر على الأقل ومضاعفة الغرامة المحددة في الفقرة /أ/ السابقة.

٢- كل منشأة زراعية أو صناعية أو خدمية خاضعة لتقويم الأثر البيئي تمت مباشرة العمل فيها دون إجراء دراسة لتقويم الأثر البيئي واعتمادها من قبل الجهة المعنية في الوزارة يتم إغلاقها وبالإضافة إلى الإغلاق يعاقب المسؤول عن إدارتها بالإضافة إلى صاحبها بالغرامة من مئة

ألف ليرة سورية إلى أربعمئة ألف ليرة سورية وتضاعف هذه العقوبة إذا نجم عن عمل المنشأة تلوث للبيئة.

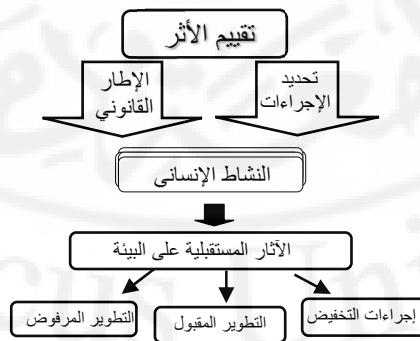
٢. تقويم الأثر البيئي



١.٢. تقويم الأثر البيئي EIA في العالم وفي سوريا

يهدف تقويم الأثر البيئي EIA (Environmental Impact Assessment) إلى تفادي الآثار غير الرجعية على البيئة وحماية الموارد والنظم البيئية، وتحقيق مبدأ التنمية المستدامة والتأكد من أخذ البعد الاجتماعي في المشروع بعين الاعتبار، وحماية الصحة العامة والإنسان والتأكد من أن الموارد تستثمر بشكل أمثل، وتحديد الإجراءات المناسبة لخفض الآثار المتوقعة ووضع متخذي القرار بالصورة الدقيقة. وهو وسيلة لإعطاء الإطار القانوني والمعلومات الأساسية لمتخذي القرار بشأن النشاطات التي لها آثار على البيئة (الشكل ٢٦) ثم المراقبة أثناء خطوات بناء المشروع و دخوله في حالة التشغيل.

نشأ أول تشريع لتقويم الأثر البيئي عام ١٩٧٠ من قانون البيئة الوطني الأمريكي NEPA (National Environmental Policy Act). أول بلدين أوروبيين يعتمدان متطلبات تقويم الأثر البيئي هما ألمانيا (١٩٧٥) وفرنسا (١٩٧٦)، ثم تلاها عدد من البلدان النامية وفي عام ١٩٨٩، اعتمد البنك الدولي تقويم الأثر البيئي في المشاريع التي يمولها وصار إلزامياً على البلدان المقترضة تنفيذه مما فرض إدخال وتطوير أنظمة تقويم الأثر البيئي في كثير من البلدان النامية. اعتمدت مفوضية الأمم المتحدة الاقتصادية الأوروبية UNECE اتفاقية تقويم الأثر البيئي العابر للحدود ١٩٩١ ودخلت حيز التنفيذ عام ١٩٩٧ تحت رعاية منظمة تقويم الأثر العالمي IAIA (INTERNATIONAL ASSOCIATION for IMPACT ASSESSMENT). وضعت في سوريا الشروط المرجعية لدراسات تقويم الأثر البيئي (TOR) الصادرة عن الهيئة



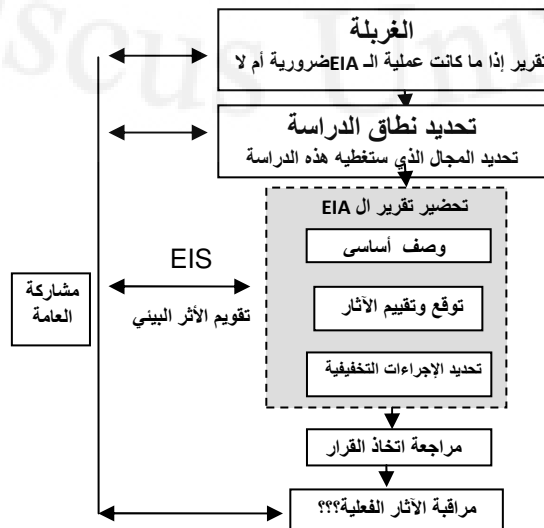
الشكل ٨٠: تقويم الأثر البيئي.

العامّة لشؤون البيئة ، وقانون حماية البيئة رقم ٥٠ لعام ٢٠٠٢ . تعتبر الإجراءات السورية لتقويم الأثر البيئي جزءاً من مشروع تعاون بين الجمهورية العربية السورية ممثلة بوزارة الإدارة المحلية والبيئة وجمهورية ألمانيا الاتحادية الوكالة الألمانية للتعاون الفني (GTZ). تهدف هذه التعليمات إلى توضيح القواعد الأساسية لسلامة البيئة وحمايتها من التلوث المنصوص عليها في المادة ٤/ من القانون ٥٠/ لعام ٢٠٠٢ ومنذ ٢٠٠٥ جرى تطوير إجراءات التقويم وفي كانون الثاني ٢٠٠٨ جرى تصديق التعليمات التنفيذية لإجراءات تقويم الأثر البيئي والعمل بها. الجهة المعنية بتقويم الأثر البيئي: هي الهيئة العامة لشؤون البيئة (GCEA) ومديرياتها في المحافظات، ويجري الآن على إعداد خبراء تقويم الأثر البيئي.

٣. إجراءات تقويم الأثر البيئي EIA:

إن خطوات ومكونات دراسة تقييم الأثر البيئي (الشكل ٢٧) كما يلي:

- ١) تحديد المشروع وتقديم المقترح.
- ٢) الغرلة.
- ٣) تحديد نطاق الدراسة.
- ٤) الأخذ بالرأي العام.
- ٥) تحليل الأثر.
- ٦) تخفيض وإدارة الأثر .
- ٧) تقديم تقرير دراسة الأثر البيئي.
- ٨) مراجعة وتدقيق الدراسة.
- ٩) اتخاذ القرار .
- ١٠) التنفيذ والمتابعة.



الشكل ٨١ : إجراءات تقويم الأثر البيئي.

١.٣ الغريلة Screening:

تعتبر الغريلة أول خطوة من منهجية تقويم الأثر البيئي، وتبدأ بتقديم المستثمر للحصول على رخصة تقويم أثر بيئي لمشروع أو لحالة دراسة. وتهدف إلى قيام الخبراء بوضع المشروع أو الحالة ضمن إحدى القوائم لنتائج الغريلة الثلاث التالية:

- (a) غير مطلوب تقديم دراسة تقويم أثر بيئي.
- (b) المطلوب دراسة كاملة وشاملة.
- (c) المطلوب دراسة بسيطة / مباشرة مع شروط.

١.١.٣ طرائق الغريلة:

(١) التصنيف العام وفقاً للضوابط الأساسية التالية:

- أ- نوعية المنشأة الصناعية.
- ب- موقع المنشأة الصناعية.
- ج- مدى تأثيرها على الموارد الطبيعية واستنزافها.
- د- نوع الطاقة المستخدمة لتشغيل المنشأة الصناعية.

٢) أسلوب القوائم: وهو أسلوب مرن يتضمن تصنيف المشروعات إلى عدة قوائم تتطلب مستويات مختلفة من تقييم الآثار البيئية تبعاً لشدة الآثار المحتملة (وضعت الهيئة العامة لشؤون البيئة (GCEA) ومديرياتها في المحافظات بالتعاون مع وزارة الإدارة المحلية والبيئة ضمن التعليمات التنفيذية لإجراءات تقييم الأثر البيئي).

أمثلة عن المشاريع التي تتطلب دراسة كاملة لتقييم الأثر البيئي:

- السدود والخزانات المائية بطاقة تخزينية عالية.
- مشاريع إعادة التوطين والتجمعات السكانية.
- مشاريع البنى التحتية (النقل والصرف الصحي والموانئ والسكك الحديدية والمطارات).
- مشاريع التنمية الزراعية المروية.
- المنشآت الصناعية (مصافي النفط والصناعات الكيماوية والبتروكيماوية).
- الصناعات الكيماوية.
- معامل الإسمنت واستخراج المعادن والمقالع.
- محارق النفايات.
- محطات تحلية مياه البحر.
- منشآت تصنيع المبيدات بغض النظر عن حجمها وعدد العمال.
- مشاريع توليد ونقل الطاقة.
- مطامر ومكبات النفايات البلدية والصناعية.
- منشآت تخزين وإدارة النفايات ومعالجة والتخلص من المواد السامة والخطرة.

أمثلة عن المشاريع التي تتطلب دراسة بسيطة لتقييم الأثر البيئي:

- الصناعات الكيماوية التي تستخدم عدداً من العمال بين ١٠ - ٥٠ عامل.
- الصناعات المعدنية الصغيرة.
- مشاريع التنمية الزراعية المروية الصغيرة.
- المحارق.
- المنشآت والصناعات الغذائية ومؤسسات التجارة الغذائية.
- صناعات السيراميك والمطاط.
- محطات تزويد المحروقات.
- مزارع ومنشآت تربية الحيوانات والدواجن.

• مشاريع البنى التحتية الصغيرة.

ولوزير الإدارة المحلية والبيئة، بناءً على اقتراح الهيئة العامة لشؤون البيئة القيام بما يلي:

إضافة مشاريع جديدة والتي يمكن أن يكون لها آثار هامة على البيئة من خلال طبيعتها أو حجمها أو موقعها. واستبعاد المشاريع التي لا مبرر للتخوف من أية آثار هامة لها على البيئة، وإعادة النظر في المشاريع كل سنتين أو كلما دعت الحاجة.

٢.١.٣ معايير الغريلة

حددت معايير الغريلة وفق ما يلي :

١. **مميزات المشاريع:** من حيث استخدام الموارد - الأضرار والتلوث البيئي - إمكانية وقوع الحوادث ولاسيما فيما يتعلق بالتقنيات المستخدمة يجب أن يتم تحديد مميزات المشاريع بشكل خاص بناءً على المعايير التالية :

- (١) حجم المشروع
- (٢) استخدام و تصميم المياه ، التربة ، الطبيعة و المناظر الطبيعية
- (٣) إنتاج النفايات
- (٤) الأضرار و التلوث البيئي
- (٥) إمكانية وقوع الحوادث و لا سيما فيما يتعلق بالمواد و التقنيات المستخدمة

٢. **مواقع المشاريع :** مع الأخذ بالاعتبار الأثر التراكمي للمشروع مع المشاريع الأخرى يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار الحساسية البيئية للمناطق الجغرافية التي ستتأثر بالمشاريع، آخذين بالحسبان بشكل خاص الاستخدام اللاحق و معايير الحماية و حساب الأثر التراكمي للمشروع مع المشاريع الأخرى على المنطقة.

٣. **خصائص الآثار المتوقعة:** من حيث مدى الأثر وانتشاره واحتمال حدوثه. يجب أن تدرس الآثار المحتملة الهامة للمشاريع من خلال علاقتها بالمعايير المدرجة ضمن ١ و ٢ المذكورين أعلاه و أن تكون متعلقة بما يلي :

- (١) مدى الأثر (الساحة الجغرافية و حجم التلوث المؤثر)
- (٢) طبيعة انتشار الأثر

٣) حدة و درجة تعقيد الأثر

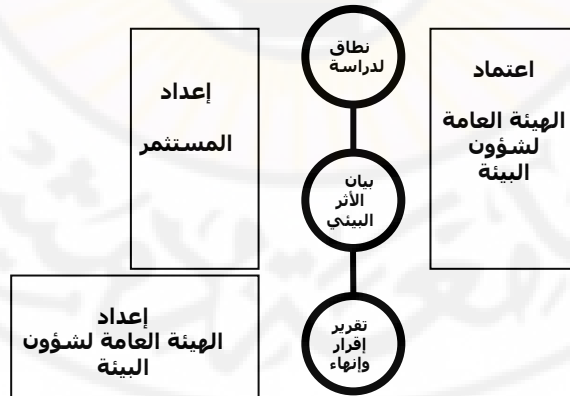
٤) احتمالية الأثر

٥) مدة و تكرار وقابلية الأثر للعكس (كونه عكوساً)

بعض الاعتبارات لتحديد التأثيرات الهامة عند دراسة المشاريع:

- الطاقة الاستيعابية للبيئة الطبيعية.
- المناطق الحساسة بيئياً (مثل المناطق الساحلية والجبلية والأراضي الرطبة).
- قرب موقع المشروع من المناطق المحمية .
- قرب موقع المشروع من المناطق ذات القيمة التاريخية.
- تخطيط واستخدام الأراضي.
- وفرة وجودة الموارد الطبيعية.
- المعايير والأهداف البيئية.

تعلم الهيئة العامة لشؤون البيئة المستثمر أن المشروع يحتاج إلى دراسة تقييم أثر بيئي، وتزوده بنسخة عن متطلبات وآلية الدراسة، وتبلغه بضرورة الإعلان والبدء بتحضير نطاق الدراسة (الشكل ٢٨). قد يقوم المستثمر(س) بتكليف المكتب الاستشاري (ع) لمتابعة الموافقة البيئية واستكمال كافة الدراسات المطلوبة.



الشكل ٨٢ : الجهة الدارسة.

٢.٣ تحديد نطاق الدراسة Scoping:

في حال كان المشروع المقترح يتطلب تقييم أثر بيئي فإن على المستثمر أن يتقدم للهيئة العامة لشؤون البيئة ومديرياتها في المحافظات، وفي مرحلة التحضير للمشروع تقريراً أولياً و مختصراً يتضمن :

- وصف أولي للمشروع و تأثيره البيئية المحتملة.
 - المواقع المقترحة للمشروع والبدائل إن توفرت والتي ستؤخذ بعين الاعتبار.
 - المعلومات الأولية عن موقع المشروع.
 - أي وضع حدود عملية التقييم وتحديد الجوانب الرئيسية التي يجب تناولها وفق الشروط المرجعية لدراسات تقييم الأثر البيئي (TOR) وذلك للوصول إلى الأهداف التالية :
 - تحديد البيانات اللازمة عن المشروع باستخدام جداول ومخططات.
 - تحديد النطاق الجغرافي للدراسة باستخدام نظام المعلومات الجغرافي (GIS).
 - تحديد المكونات البيئية التي يجب التركيز عليها.
 - تحديد الآثار البيئية الهامة التي يجب دراستها.
 - تحديد الجهات العامة المعنية بالدراسة.
 - وضع اللائحة المرجعية للدراسة (دفتر شروط الدراسة) .
 - تحديد الخبراء المساعدين.
- على المستثمر - عند الضرورة - تعديل تقرير تحديد نطاق الدراسة بناء على المقترحات المقدمة وفي حال عدم الأخذ بهذه المقترحات فعليه أن يبين أسباب ذلك في البيان بالتقرير.
- في حال امتداد الأثر البيئي إلى بلد آخر أو مسطح مائي مشترك على المستثمر تقديم دراسة بيان الأثر البيئي خلال سنة من تاريخ الموافقة على تحديد نطاق الدراسة تحت طائلة اعتبار الموافقة لاغية وعليه إعداد تقرير آخر وفق البند أو أن يكون الأثر البيئي واسع الانتشار، يرفع تقرير تحديد نطاق الدراسة إلى وزير الإدارة المحلية والبيئة، وخلال مدة لا تتجاوز أسبوعين للمصادقة عليه وإبلاغه إلى المستثمر والجهات المعنية وفق الأسس المرعية.
- يمكن للهيئة العامة لشؤون البيئة ومديرياتها في المحافظات، وبعد استشارة الجهات المعنية بيان الرأي اللازم خلال أسبوع على الأكثر بالموافقة على تقرير تحديد نطاق الدراسة، و للمستثمر

البدء بالإشادة على أن يستكمل الدراسة و لا تعطى الموافقة البيئية إلا بعد اعتماد بيان الأثر البيئي المعد، وفي حالة عدم الموافقة على نطاق الدراسة يتم بيان الأسباب لعدم الموافقة، وتوجيه المستثمر لاستكمال النواقص.

خلال عملية تحديد النطاق تتحدد البنود التي يجب أن تغطيها الدراسة ويحويها تقرير الدراسة مثل: البدائل التي يجب أخذها في الاعتبار للتأثيرات، إجراءات تخفيف الآثار السلبية.....الخ. كما يمكن كذلك تحديد القواعد الأخرى الخاصة بتنظيم التقرير، مثل عدد الصفحات والملخصات وخلافه. تقويم البدائل: المقصود بها تحديد القضايا التي يجب أن تتناولها أو تغطيها الدراسة والمعلومات اللازمة لتحديد العوامل والآثار البيئية التي يجب أن تؤخذ بالاعتبار. من الجدير بالذكر أنه عادة ما يختلف نطاق دراسات المشروعات حتى وإن كانت مشروعات متشابهة، لذلك يجب تحديد نطاق كل دراسة على حدة لتسهيل إجراءات الدراسة وتحسين مستواها وضمان احتوائها على جميع المتطلبات مما يؤدي إلى توفير الوقت والجهد والتكلفة.

١.٢.٣. تتضمن عملية تحديد نطاق الدراسة:

١. تحديد جميع القضايا البيئية ذات العلاقة.
٢. تقدير مبدئي للدلالة (الأهمية) النسبية لتأثيراتها.
٣. تحديد القضايا الرئيسية وأولوياتها وكيفية تناولها وتحليلها والسبب في اعتبارها قضايا ذات أهمية أكثر من القضايا الأخرى (الأقل أهمية).

٢.٢.٣. أهداف تحديد نطاق الدراسة

- إعلام العامة والجهات المعنية عن المشروع المقترح.
- تحديد الشركاء الأساسيين والجهات ذات العلاقة واهتماماتهم وتعريف أدوارهم.
- المواضيع الهامة التي يجب إدراجها في تقويم الأثر البيئي.
- ٣.٢.٣. الحدود الزمنية والمكانية لدراسة تحديد نطاق أولي للدراسة يتضمن الخطوط الرئيسية التالية:

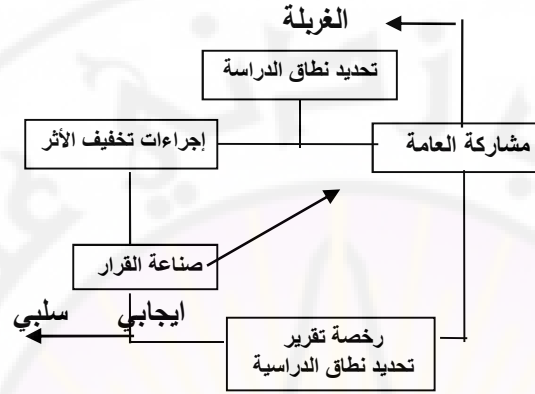
- توصيف للمشروع وأهدافه.
- مصادر المعلومات والمعطيات، الصعوبات في الحصول عليها.
- بدائل وخيارات المشروع.
- المواضيع ومصادر القلق والتأثيرات التي تم التعرف عليها حتى تاريخه.

- انخراط الرأي العام في الموضوع.
- الجدول الزمني لنطاق الدراسة وتنفيذها واتخاذ القرار.
- تحديد الإطار العام لنطاق الدراسة عن طريق الاستشارات غير الرسمية والمعطيات الأولية التي توفرت ومن تحديد النقص في المعلومات.
- وضع قائمة طويلة لمجالات المواضيع ومصادر القلق حول المشروع.
- تقويم الأهمية النسبية لهذه المواضيع ومن ثم وضع قائمة قصيرة بأولويات هذه المواضيع ومصادر القلق.
- توزيع قائمة الأولويات القصيرة ضمن تصنيفات التأثيرات المختلفة للمشروع.
- تعديل الإطار العام لنطاق الدراسة بحيث يتضمن بشكل تدريجي المعلومات الناتجة عن كل مرحلة من تنفيذ دراسة تقويم الأثر البيئي.
- وضع دفتر الشروط المرجعية (TOR) لتنفيذ الدراسة وتضمين المعلومات المطلوب جمعها والدلائل الاسترشادية للدراسة ومنهجية وأسس مراجعة وتدقيق الدراسة.
- مراقبة تقدم عملية تنفيذ الدراسة بالمقارنة مع دفتر الشروط المرجعية وإجراء التعديلات (إذا دعت الحاجة) وتوفير المعلومات للعامة والشركاء.
- تقويم الأثر البيئي.
- المعلومات الضرورية واللازمة للتضمين في الدراسة من أجل تسهيل اتخاذ القرار المناسب من قبل الجهات والسلطات المعنية.
- التأثيرات والعوامل الهامة التي يجب دراستها بالتفصيل والتركيز عليها في دراسة تقويم الأثر البيئي.
- تحديد البدائل أو الخيارات الممكنة لبعض الأفعال والنشاطات.
- قائمة مؤشرات بالنشاطات المتضمنة في مرحلة تحديد نطاق الدراسة.

٣.٣ مشاوره العامة Public Participation والحصول على رخصة تحديد نطاق الدراسة:

بعد الانتهاء من الإعلان عن المشروع والانتهاه من تقرير تحديد نطاق الدراسة (الشكل ٢٩)، يجب على المستثمر بالتعاون مع الهيئة العامة لشؤون البيئة ومديرياتها، أن ينظم ندوات للعامة لإعلامهم بالفعاليات المقترحة من قبل المستثمر. يتم الاتفاق على آلية وزمن نشر المعلومات

الخاصة بالمشروع، والتقنيات التي ستستخدم لمشاركة العامة. يتم الطلب إلى مديرية البيئة بالإعلان عن المشروع. ويتم تحديد الإطار العام ومكونات نطاق الدراسة الأولي وتحضيره.



الشكل ٨٣: الحصول على رخصة تحديد نطاق الدراسة.

١.٣.٣. آلية وإجراءات المشاركة العامة:

تعتبر مشاركة العامة عنصراً أساسياً في التشريع السوري لتقويم الأثر البيئي (المرجع: دليل إجراءات تقويم الأثر البيئي) والأهداف هي:

- ضمان النوعية، الشمولية والفعالية في تقويم الأثر البيئي.
- تقرير الفهم الكامل لدى الجماهير.
- تحديد المشاكل، الحاجات، القيم الهامة.
- توليد الأفكار وحل المشاكل.
- المساعدة في إجراءات التخفيف.
- تقويم البدائل.
- إعادة حل الخلافات بالإجماع.
- التأكد من أن وجهة نظر العامة قد أخذت بعين الاعتبار عند اتخاذ القرار.
- التأكد من أن المجموعات المتأثرة قد شاركت قبل أن يتم اتخاذ القرارات غير القابلة للتراجع عنها.

٢.٣.٣. مراحل الاستشارة العامة

- الإعلان عن المشروع.
- وصف المشروع وآلية تطبيقه للعموم.
- الاعتراضات / الآراء.
- الاجتماع العام.
- الإلغاء والتعديل.
- الإجراء.
- التوثيق.
- النشر للعموم.
- سريان التعليمات.

١) الإعلان عن المشروع:

في حال اكتملت البيانات الخاصة بوصف المشروع تقوم الجهة المانحة للموافقة البيئية الإعلان عن المشروع بطريقة ملائمة وذلك على نفقة المستثمر (الصحف المحلية، المنظمات الزراعية....). يتم عقد اجتماعين الهدف من الاجتماع الأول هو الإعلان وشرح المشروع في بدايته و ذلك خلال أسبوعين بعد إعداد نطاق الدراسة، و يعقد الاجتماع الثاني عند الانتهاء من إعداد بيان الأثر البيئي.

٢) محتوى الإعلان: يجب أن يتضمن الإعلان ما يلي:

- المعلومات البيئية والتقنية الضرورية (وصف المشروع ومسودة تحديد نطاق الدراسة) ضمن ملخص غير فني.
- معلومات حول موقع المشروع والبيئة المحيطة.
- يجب أن تكون إمكانية الوصول إلى وثائق المشروع متاحة على الأقل في مديريات البيئة. ويجب أن يتم الإعلان عن آلية تنفيذ المشروع ووصفه وكذلك عن كل المعلومات والوثائق ذات الصلة والتي تحتوي على الآثار المحتملة للمشروع على البيئة، كل ذلك سيتم الإعلان عنه للعمامة في مديريات البيئة .
- يجب أن يكون الوصول إلى وثائق المشروع متاحاً على الأقل خلال ساعات الدوام وكذلك على شبكة الإنترنت إن أمكن.

يمكن التقدم بالاعتراضات/ الآراء إلى مديريات البيئة بعد الإعلان عن الوثائق المتعلقة بالمشروع للامة، أو خلال الاجتماع. تقوم مديرية البيئة بتزويد المستثمر بنسخ طبق الأصل عن كل الاعتراضات والآراء.

خلال الاجتماع الأول بعد إعداد نطاق الدراسة يتم تقديم الاعتراضات/ الآراء ليتم مناقشتها مباشرة. وسيمنح المعارض إمكانية شرح اعتراضه/ رأيه. وتناقش الآراء والاعتراضات مع المستثمر.

لا يتم عقد الاجتماع الأول في إحدى حالتين:

- عدم التقدم بأي اعتراض أو رأي مضاد للمشروع.
- سحب الاعتراضات التي تم التقدم بها على أن يكون ذلك قد تم قبل تحديد موعد الاجتماع الأول.

يمكن لمديرية البيئة أن تغير موعد أو مكان الاجتماع الأول في حال كان ذلك ضرورياً. يتم الإعلان عن زمن ومكان الاجتماع الجديد في أبكر وقت ممكن. ويتم إعلام المستثمر في حال عدم عقد الاجتماع مع العامة أو في حال تعديله. ويجب أن يكون الاجتماع مفتوحاً للجميع. يتم إدارة الاجتماع من قبل منسق مسؤول. يمكن أن يكون المنسق المسؤول أحد كواادر مديرية البيئة، أو خبيراً أو أي طرف ثالث مستقل موثوق.

يتم الإعلان عن جدول أعمال الاجتماع مسبقاً. يمكن للمنسق أن يقوم بتلخيص الاعتراضات/ الآراء للمناقشة. في هذه الحالة يمكن للمنسق أن يطلب من المعارضين شرح اعتراضاتهم/ آرائهم.

يعطي المنسق الحق بالكلام ويحدد زمن الحديث، يمكن للمنسق أن يسحب الحق بالكلام في حال تجاوز الوقت المحدد أو في حال الخروج بالنقاش عن القضايا المتعلقة بالاعتراض أو الرأي.

يعتبر المنسق مسؤولاً عن النظام العام. ويمكنه أن يتجاوز الأشخاص الذين يثيرون الشغب في الاجتماع العام أو لا يطيعون أيأ من أوامر المنسق. يمكن أن يستمر الاجتماع بدون الأشخاص الذين يتجاوزون النظام.

ينهي المنسق الاجتماع عندما تتم مناقشة كافة الاعتراضات والآراء. يمكن إنهاء الاجتماع في الحالات التي يحدث فيها عدم انضباط لدرجة كبيرة. أما الاعتراضات التي لم تتم مناقشتها

فيمكن مناقشتها لاحقاً عن طريق وثائق كتابية. ويقوم المنسق بإعلام المعارض بذلك. يتم توثيق الاجتماع عن طريق محضر مكتوب. ويحتوي هذا المحضر على:

- مكان وزمان عقد الاجتماع
 - اسم المنسق.
 - اسم وموقع المشروع.
 - وقائع ونتائج الاجتماع.
 - قائمة بأسماء المشاركين (حسب رغبتهم).
- يتم توقيع المحضر من قبل سكرتير الجلسة (المقرر). يتم تزويد المستثمر بنسخة عن المحضر. وكذلك تؤمن نسخة ليتم الاطلاع عليها من قبل المعارضين والأطراف الأخرى المهتمة.

٣) تقنيات الإعلان: تستعمل الإعلانات التقنيات التالية:

- جلسات الاستماع والاجتماعات (تقنيات المشاركة العامة التقليدية، الاجتماع الرسمي الذي يعد البيانات المكتوبة وتحفظ محاضرة.
- النشرات المطبوعة.
- برامج الراديو، التلفاز، الأخبار، الأفلام الوثائقية والمحاضرات المصورة.
- زيارات التخطيط المحلية والجولات الميدانية وزيارات الموقع.
- مقالات الجرائد والمجلات.
- البريد المباشر ونشرات الأخبار.
- الخطابات العامة.

٤) تكاليف الإعلان:

يتحمل المستثمر التكاليف التالية:

- أجور الإعلان والمشاورات مع العامة
- أجور الخبير الدارس و المعتمد.
- فيما يتعلق بأجور الخبراء المدققين تحدد الهيئة العامة لشؤون البيئة الآلية والجهة التي يمكن أن تشرف عليها.

لا تقصر تعليمات تقويم الأثر البيئي السوري مشاركة الجمهور على مجموعات بعينها. وهذا ما يعني في النهاية أن من حق أي شخص الاعتراض على المشروع أو إبداء الملاحظات حوله. و رغم عدم وجود حدود على المشاركة، فمن الممكن تعداد الجماعات المعنية.

ومن تلك الجماعات:

- المواطنون الأفراد.
- جماعات الرياضيين.
- المنظمات البيئية غير الحكومية.
- التنظيمات الفلاحية.
- مالكو الأراضي.
- الصناعة/الأعمال.
- الجماعات المهنية.
- المنظمات المدنية.
- نقابات العمال.
- جماعات ومنظمات أخرى.

ولعل أهم هذه الفئات فيما يتعلق بإجراءات تقويم الأثر البيئي، هي فئة المواطنين الأفراد الذين يتألفون أساساً من أهل المنطقة المهتمين بمحيطهم الطبيعي والبيئي. ومن شأن هذه المشاركة أن تُزوّد إجراءات تقويم الأثر البيئي بمعلوماتٍ تفصيلية عن المنطقة وعن الوضع البيئي. وهذه مزيةٌ أيضاً لأن المنظمات البيئية غير الحكومية عادةً ما تملك خبراتٍ ومعارف كبيرة يمكن للسلطات المعنية استخدامها للوصول إلى القرار الأفضل. وقد لا تكون الجماعات الأخرى بتلك الأهمية فيما يتعلق بالتوصل إلى القرار الصائب، لكن من الممكن لها طرح بعض الآراء ضمن هذه العملية.

في حال امتداد الأثر البيئي إلى بلد آخر أو مسطح مائي مشترك أو أن يكون الأثر البيئي واسع الانتشار، وبعد استشارة العامة، يرفع تقرير تحديد نطاق الدراسة إلى وزير الإدارة المحلية والبيئة وخلال مدة لا تتجاوز أسبوعين للمصادقة عليه وإبلاغها إلى المستثمر والجهات المعنية وفق الأسس المرعية. على المستثمر تقديم دراسة بيان الأثر البيئي EIS خلال سنة من تاريخ الموافقة على تحديد نطاق الدراسة تحت طائلة اعتبار الموافقة لاغية وعليه إعداد تقرير آخر.

٤. دراسة حالة استعمال الشلات والنترات على أراضي التربة الكلسية في الغوطة:

بتطبيق الغريلة على حالة استعمال الشلات والنترات على أراضي التربة الكلسية في الغوطة، حيث أن النترات يمكن أن تتراكم في أوراق الخضروات وتتسرب إلى المياه الجوفية فتلوثها بزيادة

تركيز النترات فيها، فعند استعمالها للشرب تتحول النترات إلى نترات في جسم الإنسان وتسبب الاختناق لدى الأطفال نتيجة منع وصول الأكسجين للدم، كما تسبب مشكلة كلوية وسرطانات للمعدة والتهابات. إن استعمال شلات الحديد يؤدي إلى تراكم الحديد في التربة و خسارة اقتصادية كبيرة. إذا حالة الدراسة هذه بحاجة إلى دراسة كاملة بتقييم الأثر البيئي EIA لان الإفراط في التسميد الأزوتي يؤدي إلى:

١. تأخر نضج النبات (خسارة إنتاجية)
٢. حساسية النبات للأمراض (تأثر المورثات)
٣. ميل النبات للرقاد (خسارة اقتصادية)
٤. زيادة الحساسية للبرودة
٥. ارتفاع مستوى النترات في الأوراق يؤدي إلى تلوث الآبار الجوفية بالنترات.
- (خسارة بيئية)

قوائم التحقق من التسميد المفرط من خلال الاستبيان التالي:

الرقم	السؤال	نعم/لا	الخصائص التي تؤثر على البيئة	حجم الأثر
١	هل يسبب تلوث المياه الجوفية	نعم	لسرعة غسل النترات بالتربة	كبير
٢	هل يسبب تملح للتربة	نعم	لفرط كمية استخدامه	كبير
٣	هل يؤثر على السكان	نعم	زيادة السكان القاطنين	كبير
٤	هل يؤدي إلى زيادة المحاصيل	نعم	بسبب حاجة النبات الكبيرة للأزوت	كبير
٥	هل يؤثر على الصحة	نعم	بسبب تحول النترات إلى نترات	كبير
٦	هل يؤثر على الحيوان	نعم	التأثير السلبي للنترات	كبير
٧	هل يؤثر على جودة المياه	نعم	بسبب الحاجة الكبيرة للمياه	كبير
٨	هل الشلات تزيل اصفرار الأوراق	نعم	لامتصاص الحديد وتشكل اليخضور	كبير
٩	هل الشلات ترفع نسب الحديد في المياه	لا	بسبب عدم حركية الحديد في التربة	قليل

١٠	هل تحسن خواص التربة الكلسية	نعم	بسبب نقص الأزوت والحديد	كبير
١١	هل يتراكم الحديد في التربة	نعم	يترسب في التربة	كبير
١٢	هل يسبب ضرراً اقتصادياً	نعم	بسبب تلوث المياه	كبير
١٣	هل المساحة المتضررة كبيرة	نعم	مساحة أراضي الفوطة	كبير

إن هيكليّة وثيقة نطاق الدراسة يجب أن تتضمن:

١. عدد المزارعين الذين يستعملون سماد النترات وشلات الحديد.
٢. عدد الآبار الجوفية التي ستدرس.
٣. تسجيل عدد الأشجار المثمرة التي قد تصاب بظاهرة اصفرار الأوراق.
٤. تحديد الكلفة الاقتصادية الإضافية التي يتكبدها المزارعون.
٥. مسح عدد المصابين نتيجة تأثرهم من ارتفاع نسب النترات.
٦. إيجاد بدائل لاستعمال الشلات لتخفيف الأثر البيئي.
٧. قيام خبراء تقويم الأثر البيئي بعقد ندوات إرشادية للمزارعين.
٨. إعلام الجمهور بخطورة تناول الخضروات المرتفعة نسبة النترات.
٩. اختبار نسب النترات بشكل مستمر وتقدير صلاحية تناول المنتج أو عدمه.
١٠. دراسة مواقع الآبار الجوفية المتضررة وإجراء مسح شامل لها.
١١. دراسة جدوى تنقية المياه وإمكانية استعمالها في الشرب والزراعة.
١٢. دراسة درجة تملح ترب الفوطة.

الإجراءات التي يجب دراستها والتي تخفف من الآثار البيئية:

١. جمع عينات التربة بشكل صحيح وبدون أخطاء.
٢. إجراء التحاليل الفيزيائية والكيميائية لخصوبة التربة.
٣. إجراء تحاليل للمياه المستخدمة في مياه الري.
٤. الحفاظ على التوازن الحيوي ومنع تلوث التربة باستعمال المخصبات العضوية الطبيعية.
٥. استعمال مقياس المياه المتسربة والذي يساعد على دراسة تحليلية للشوارد في الماء.
٦. استخدام نظم المعلومات الجغرافية في المراقبة البيئية.
٧. استعمال طريقة وضع الأسمدة بجانب الجذور مع حاجة النبات للعناصر الصغرى.

فريق العمل الموثق لنتائج دراسات الأثر البيئي وإصدار الحكم القانوني:

- خبير بيئي: يصف المشروع ويحدد العواقب المحتملة.
- مهندس زراعي: يحدد الآثار المحتملة للمحصول.
- هيدرولوجي: يصف مواقع الآبار وأعماقها.
- كيميائي: يحدد تركيز النترات ونسب التملح.
- خبير تخطيط استعمالات الأراضي: تخطيط الأرض.
- طبيب صحة عامة: لتحديد الآثار الصحية.

الجهات المطلوب تقديم موافقتها ورأيها في المشروع:

- وزارة الزراعة ووزارة الإدارة المحلية والبيئة.
- مديرية البحوث الزراعية.
- مركز الاستشعار عن بعد.
- الوحدات الإرشادية والاتحاد العام للفلاحين.
- المخبر المركزي لتحديد جودة المياه.
- الساكنين بجوار الغوطة.

المراجع العربية

١. التركيب الكيميائي للفسفوجبسوم السوري ومقارنته مع بعض الأنواع الموجودة في العالم واستخدامه في الزراعة الدكتور محمد باهر القدور كلية الزراعة، جامعة حلب، ٢٠٠٠.
٢. أعراض نقص العناصر الغذائية على الأشجار المثمرة، وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي، ١٩٨٥.
٣. مؤتمر علوم وتكنولوجيا الموارد المائية، جامعة دمشق، ١٨-٢١ تشرين الثاني، ٢٠٠٣.

٤. التعليمات التنفيذية لإجراءات تقييم الأثر البيئي EIA في سورية ، الملحق /١/ قائمة المشاريع التي تتطلب EIA ، الملحق /٥/ نموذج للشروط المرجعية المطلوبة TOR في التقييم البيئي، وزارة الإدارة المحلية والبيئة، ٢٠٠٨.

٥. تقييم الآثار البيئية - المنهجية والإجراءات ، د. يحيى عويضة ، ٢٠٠٨.

المراجع الأجنبية

1. An Introduction to Pollution Science (2006) Roy M. Harrison. School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham, Birmingham, UK.

2. ASTM D3282 : Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes, American Society for Testing and Materials, annual book of ASTM standards, vo. 04-08, ASTM, West Conchohocken, pennsylvania, 1994.

3. Biogeochemistry of WETLANDS (2008). K. Ramesh Reddy and Ronald D. DeLaune
4. Chang, Wen F.; David A. Chin; Robert Ho. : Phosphogypsum for secondary road construction, Florida institute for phosphate research, publication No. 01-033-077, Bartow, Florida, June, 1989.
5. Diffuse Pollution of Water Resources Principles and Case Studies in the Southern African Region
6. Environmental Pollution and control (1998) FOURTH EDITION. . Jeffrey Peirce, Ruth E Weiner, E Aarne Vesilind. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data
- 7.Environmental Pollution control Microbiology (2004). Ross E.McKinney. University of Kansas Lawrence, Kansas, U.S.A.
8. FUNDAMENTALS OF SOIL SCIENCE (1990) EIGHTH EDITION HENRY D. FOTH. Michigan State University
9. Heavy metals in the environment (2002). Bibudhendra Sarkar. University of Toronto. Canada
۱۲. Laiche, T. P. : Radiological enluation of phosphogypsm, Health physics, vol160, 1991.
- ۱۳.Laiche, T.P. and Scott, M.L. A radiological evaluation of phosphogypsum. . Health phys. 60.pp.691-6, 1991
14. Marschner, H., Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press London, San Diego, New York . 1988
15. Sloomweg R., Kolhoff A., A generic approach to integrate biodiversity considerations in screening and scoping for EIA. EIA Review 23(6): 657-681, 2003
16. Schmidt, M.; Glasson, J.; Emmelin, L.; Helbron, H. (Eds.), Environmental Protection in the European Union, Vol. 3, 493 p. 52

القسم الثاني

تلوث المياه ومعالجتها

تأليف: الدكتورة هالة مروان شيخاني



الباب الأول

تلوث المياه

الفصل الأول:

مفهوم التلوث البيئي

الفصل الثاني:

مفهوم التلوث المائي

الفصل الأول

مفهوم التلوث البيئي

١.١. المقدمة:

تُعد مشكلة تلوث البيئة مشكلة عالمية نظراً لما تُحدثه من إخلال في توازن النظام البيئي " Eco System"، والذي يُعرف بأنه مجموعة العلاقات التكاملية داخل وحدة بيئية معينة، وفق نظام متوازن ودقيق بين مكوناتها الطبيعية غير العضوية "غير الحية" ومكوناتها العضوية "الحية". فعندما يتم التأثير على أحد المكونات أو أكثر، تتأثر بقية المكونات الأخرى وتتبدل العلاقات القائمة فيما بينها، لتُصبح غير قادرة على الحفاظ على التوازن السابق، لذلك أصبح من الضروري التعرف على نظام العلاقة بين العناصر الحية والعناصر غير الحية، وكذلك معرفة العوامل التي تؤثر على هذه العلاقة، لفهم أسباب هذه المشكلات وإيجاد الحلول المناسبة لها.

يُقسم النظام البيئي من حيث طبيعة العلاقات إلى:

النظام البيئي الطبيعي: وهو علاقة الكائنات الحية النباتية والحيوانية مع العناصر البيئية غير العضوية كالماء والهواء والتراب والمناخ،،،، إلخ.

النظام البيئي البشري: وهو علاقة الإنسان مع البيئة بجميع عناصرها العضوية وغير العضوية. ويتألف النظام البيئي من أربع مجموعات من العناصر:

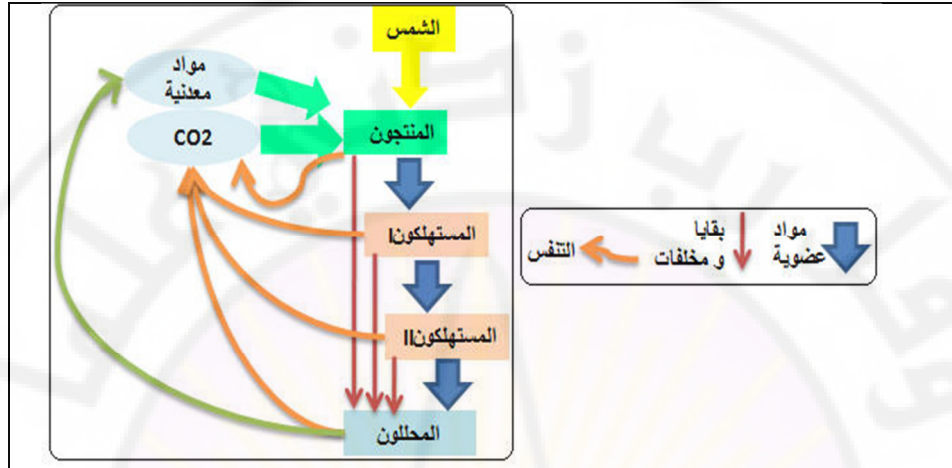
١ - **مجموعة العناصر غير العضوية:** وتشمل كافة العناصر البيئية الطبيعية غير الحية كالهواء والماء والتراب والضوء والحرارة والصخور والأمطار والتلوج وغيرها. ويُطلق عليها اسم "مجموعة الأساس" أو "مجموعة الثوابت"، لأن ما يُستهلك منها يُمكن أن يعوض.

٢ - **مجموعة العناصر العضوية المنتجة:** وتشمل الكائنات الحية ذاتية التغذية التي تقوم باصطناع الغذاء من عناصر مجموعة الأساس، ويُطلق عليها اسم "مجموعة المُنتجات".

٣ - **مجموعة العناصر العضوية المستهلكة:** وتشمل الكائنات الحية التي تعتمد في تغذيتها على غيرها، ويُطلق عليها اسم "مجموعة المُستهلكات".

٤ - **مجموعة العناصر العضوية الدقيقة:** وتشمل البكتيريا والفطريات التي تقوم بتحليل المواد العضوية الحيوانية والنباتية الميتة إلى مكوناتها الأولية الأساسية، ويُطلق عليها اسم "مجموعة

المُحلات". ويُوضح الشكل التالي التأثير المتبادل بين مجموعات عناصر النظام البيئي "الايكولوجي" الأربع سابقة الذكر (شكل-١).



شكل-١: التأثير المتبادل بين مجموعات عناصر النظام البيئي.

تعتمد عناصر النظام البيئي بعضها على البعض الآخر وفق سلسلة غذائية "Food chain" والتي تصف العلاقة بين المنتج والمستهلك للكائنات الحية ضمن النظام البيئي، حيث يتغذى الكثير من المستهلكات على أكثر من نوع نباتي أو حيواني مما يجعل سلاسل الغذاء تتداخل مع بعضها على شكل شبكة غذائية.

ويُستعمل مُصطلح الشبكة الغذائية "Food web" والتي تتكون من عدة سلاسل غذائية، لتُوصف العلاقات التبادلية المُعقدة والمتداخلة بين أكثر من كائن حي.

كما ويُعرف التلوث البيئي بأنه التغير الكمي والكيفي في مكونات البيئة الحية "العضوية" أو غير الحية "غير العضوية"، على أن يكون هذا التغير خارج المجال الطبيعي لهذه المكونات، مما يؤدي إلى حدوث خلل ما في التوازن البيئي للطبيعة.

وتُعرف الملوثات بأنها مواد غازية أو سائلة أو صلبة أو جزيئات دقيقة، أو ميكروبات تؤدي إلى حدوث خلل في التوازن البيئي.

٢.١. درجات التلوث:

يُقسم التلوث إلى ثلاث درجات وهي:

- **التلوث المقبول:**

وهو درجة محدودة من درجات التلوث، ولا يؤدي إلى أي أضرار أو مشاكل بيئية رئيسية، وكانت درجة التلوث المقبول قائمة في معظم بيئات العالم قبل الثورة الصناعية، إذ لا تُوجد بيئة خالية تماماً من التلوث وذلك نظراً لسهولة نقله بأنواعه المختلفة من مكان إلى آخر سواء كان ذلك بواسطة العوامل المناخية أو البشرية.

- **التلوث الخطر:**

وتُمثل الدرجة التي تتجاوز فيها الملوثات حد الظاهرة "الحد الآمن" مما يؤدي إلى حدوث خلل داخل النظام البيئي، ويرافق ذلك أضرار كثيرة على معظم مكونات البيئة الحية وغير الحية، وقد برزت هذه الدرجة من التلوث في أعقاب الثورة الصناعية في أوروبا حيث تم طرح كميات هائلة من النفايات والملوثات إلى البيئات المختلفة، مما يفوق قدرتها على التنقية الذاتية، وتتطلب هذه الدرجة من التلوث إجراءات سريعة للحد من التأثيرات السلبية الناتجة عنها باستعمال طرائق ووسائل تقنية حديثة كإنشاء وحدات معالجة كفيلة بتخفيض نسبة الملوثات لتصل إلى الحد المسموح به دولياً، وكذلك سن قوانين وتشريعات على المنشآت الصناعية التي تساهم في أحداث التلوث أو في زيادة نسبته.

- **التلوث المُدمر:**

وهو أخطر درجات التلوث حيث تتخطى فيه الملوثات الحد الخطر لتصل إلى ما يُسمى بالحد "المُدمر" أو "القاتل"، ويمثل هذا التلوث المرحلة التي ينهار فيها النظام البيئي وذلك نظراً لاختلاف مستوى التوازن بشكل جذري، وتُعد حادثة تشيرنوبل التي حدثت في إحدى محطات المفاعلات النووية في الاتحاد السوفيتي السابق أفضل مثال على التلوث المُدمر، حيث أدت هذه الحادثة إلى انهيار النظام البيئي كلياً، والحاجة إلى تدخل العنصر البشري وبتكلفة اقتصادية باهظة ولسنوات عدة لإعادة توازنه من جديد، وقد قدر خبراء البيئة في الاتحاد السوفيتي السابق بأن منطقة تشيرنوبل والمناطق المُجاورة لها تحتاج إلى نحو خمسين سنة لإعادة توازنها البيئي وبشكل يسمح بوجود نمط من أنماط الحياة فيها.

٣.١. أهمية الماء:

يُعد الماء أساس الحياة وأهم مكون من مكوناتها، وتحتاج جميع الكائنات الحية له للبقاء على قيد الحياة، فالماء هو الوسط المُساعد على حدوث جميع التفاعلات الكيميائية الحيوية في الكائنات الحية، ومن الجدير بالذكر أن الكائنات الحية تتحمل زيادة في نسبة الأملاح في أجسامها بنسبة محدودة لا تزيد عن ٩% وإن أي زيادة عن ذلك قد تؤدي إلى الأمراض ومن ثم إلى الوفاة. يُغطي الماء نحو ٧١% من سطح الكرة الأرضية، وتُشكل مياه البحار والمحيطات نحو ٩٧% من المخزون الرئيس للمياه، وتحتوي على نسب عالية من الأملاح وبالتالي لا يمكن استعمالها إلا بعد مُعالجة باهظة الثمن، أما الـ ٣% من المياه المُتبقية فيشكل منها نحو ٨٠% جليد في القطبين الشمالي والجنوبي، و ١٠% مياه جوفية و ٠.٣% فقط تُشكل المياه العذبة الموجودة في الكرة الأرضية والتي يُمكن استعمالها للأغراض المنزلية وفي المجالات الزراعية والصناعية.

٤.١. الغلاف المائي للأرض:

يضم الغلاف المائي الأطوار الثلاثة التي يوجد بها الماء "السائلة، الصلبة والغازية"، ويغطي الغلاف المائي نحو ثلاثة أرباع الكرة الأرضية موزعاً بين المحيطات والبحار والبحيرات والأنهار والأمطار، إضافة إلى المخزون الهائل للمياه الجوفية المُتسربة خلال مسامات وشقوق وفجوات صخور القشرة الأرضية، والتي قد يصل عمقها إلى أكثر من ١٠٠٠م، وكذلك بخار الماء الموجود في الغلاف الجوي، والجليد والثلوج التي تُغطي نحو عُشر مساحة اليابسة، ويُبين (الجدول-١) أشكال وجود المياه في الكرة الأرضية ونسب توزيعها.

تظهر مشكلة المياه بشكل واضح في المناطق الجافة وشبه الجافة والتي تضم أغلب بلدان الوطن العربي، حيث لا تهطل الأمطار عليها إلا نادراً وفي فصل الشتاء فقط وبالتالي لا تفي الاحتياجات المائية للبلدان التي تقع ضمنها. ويبلغ مستوى هطول الأمطار على البلدان العربية نحو ١٩٠ ملم/السنة، ولا تهطل هذه الأمطار على كافة المناطق، ففي المناطق الصحراوية والتي تحتل نحو ٦٧% من مساحة الوطن العربي لا تهطل الأمطار عليها تقريباً على مدار السنة، في حين تُمثل المناطق الرطبة التي تهطل عليها الأمطار نحو ٩% فقط من مساحتها. ويتضح من ذلك أن البلدان العربية لا تستطيع الاعتماد على مياه الأمطار فقط، وأنها بحاجة إلى المياه الجوفية الموجودة فيها لسد احتياجاتها المائية.

جدول-١: أشكال وجود المياه في الكرة الأرضية ونسب توزيعها.

النسبة المئوية %	أشكال الوجود
------------------	--------------

١	مياه البحار والمحيطات	٨٠.١٩
٢	الماء المسامي في الصخور (المياه الجوفية)	١٨.٦٠
٣	ماء الجليد والتلوج	١.٢٠
٤	مياه البحيرات والأنهار	٠.٠٠٢
٥	بخار الماء في التربة	٠.٠٠١
٦	بخار الماء في الجو	٠.٠٠٦

وتشير الدراسات إلى أن مخزون المياه الجوفية المتجددة في الوطن العربي يُقدر بنحو ٤٨ مليار م^٣/السنة، وأن مقدار المياه الجوفية المُستغلة منها حالياً يصل إلى نحو ٢٤ مليار م^٣/السنة، كما وتؤكد الدراسات توفر مخزون ضخم من المياه الجوفية غير المُتجددة والذي يُمكن استغلاله في بعض المناطق. وقد تعرضت المياه الجوفية في الوطن العربي لعمليات استنزاف ضخمة عن طريق ضخ هذه المياه واستجرائها بكميات كبيرة مع عدم مراعاة التوازن بين كميات المياه المُستجرة وكمياتها المُتجددة. وتؤدي عمليات ضخ المياه بشكل مُفرط إلى قلة الموارد المُتاحة من المياه الجوفية من جهة، وإلى تدهور نوعية المياه من جهة أخرى، حيث تزداد نسبة الأملاح والمواد الذائبة فيها، وبالتالي تُصبح غير صالحة للاستعمال الزراعي أو الشرب، يُضاف إلى ذلك التلوث الذي قد يصل إلى المياه الجوفية والذي يؤدي إلى إفسادها.

٥.١. الأمن المائي في الوطن العربي:

يُمثل حد الأمان المائي في بلد ما متوسط نصيب الفرد الواحد من المياه سنوياً من الموارد المائية المُتجددة والعذبة المُتاحة للاستعمالات الزراعية والصناعية والاستهلاك المنزلي، ويُعد مُعدل ١٠٠٠ م^٣/السنة من المياه المُتجددة للفرد، هو المؤشر العالمي والحد الذي دونه يتعرض البلد لمشكلة ندرة مائية تُعرق التنمية وتؤثر سلباً على صحة الأفراد، علماً بأن مُعدل متوسط حصة الفرد في البلاد العربية يصل إلى نحو ٥٠٠ م^٣/السنة، بينما يصل المُعدل العالمي إلى ٧٧٠٠ م^٣/السنة.

تُمثل المياه المُتجددة في الوطن العربي أقل من ١% من الثروات المُتجددة في العالم، ويحتوي على أقل من ١% فقط من الجريان السطحي للمياه في العالم. ونحو ٢% من إجمالي الأمطار في العالم. ويُقدر مُعدل الوارد للمياه المُتجددة سنوياً في الوطن العربي بنحو ٣٥٠ مليار م^٣، منها ١٢٥ مليار م^٣ أي ٣٥% تأتي عن طريق الأنهار خارج المنطقة، مثل نهر النيل ٥٦ مليار م^٣،

نهر الفرات ٢٨ مليار م^٣، ونهر دجلة وفروعه ٣٨ مليار م^٣. كما ويُقدر الوارد السنوي للأمطار بين ٢١٠٠-٢٣٠٠ مليار م^٣، وتتراوح المعدلات السنوية لهطول الأمطار بين ٢٥٠-٤٠٠ ملم وقد تتجاوز الـ ١٠٠٠ ملم في بعض المناطق، علماً أن نحو ٤٠% من مياه الأمطار تهطل في فصل الشتاء في بلاد المغرب العربي والشمال الأفريقي والدول العربية المطلة على ساحل البحر الأبيض المتوسط، بينما تتساقط ٦٠% من مياه الأمطار في فصل الصيف ومُعظمها في حوض السودان والقرن الأفريقي واليمن وموريتانيا.

يستغل الوطن العربي نحو ٥٠% فقط من موارده المائية والباقي مُعرض للهدر والضياع. وقد بلغ عدد الدول العربية الواقعة تحت خط الفقر المائي ١٩ دولة منها ١٤ دولة تُعاني شحاً في المياه لا يكفي معه سد الاحتياجات الأساسية لمواطنيها، كما ويتباين نصيب الفرد من المياه في الوطن العربي، بحيث يُسجل أعلى مُعدل بأكثر من ١٠٠٠ م^٣/السنة، في كل من المغرب والسودان والعراق، فيما يُسجل أقل مُعدل في كل من ليبيا ودول شبه الجزيرة العربية بأقل من ١٦٤ م^٣/السنة. وتجدر الإشارة هنا إلى أن هذه المعدلات تُعد غير ثابتة وتتبدل تبعاً لإقامة مشاريع الري أو السدود على مجاري الأنهار في البلدان العربية، أو تتغير تبعاً لنمط الزراعة أو طرائق الري المُستعملة والتي تستهلك كميات كبيرة من المياه، كما ويُلاحظ أن الأنهار العربية الكبرى مثل الفرات ودجلة والنيل تنبع من أراضي دول تقع خارج حدود الوطن العربي، وبالتالي فإن إقامة أي مشروع على أحد هذه الأنهار في تلك الدول سيكون له تأثير بالغ على نصيب الفرد من المياه العذبة في العالم العربي.

ولقد أشارت تقارير برنامج الأمم المتحدة للبيئة عام ١٩٩٠م أن متوسط نصيب الفرد في الدول العربية من الماء قد بلغ نحو ٣٣٠٠ م^٣/السنة، وانخفض إلى نحو ١٢٥٠ م^٣/السنة خلال تسعينيات القرن الماضي، ويُقدر حالياً بنحو ٦٥٠ م^٣/السنة، ومن المتوقع وصوله إلى نحو ٣٥٤ م^٣/السنة للفرد عام ٢٠٢٥م، وعليه فإن الوطن العربي سيواجه مشاكل كبيرة في مجال الأمن المائي الأمر الذي يستدعي اتخاذ إجراءات صارمة لزيادة كفاءة الموارد المائية، كإقامة مشاريع لاستغلال المياه الجوفية الموجودة في بعض المناطق، والقيام بتحلية مياه البحار باستعمال طرائق اقتصادية، وكذلك ترشيد استعمال الموارد المائية واستغلالها بشكل أفضل.

٦.١. دورة المياه في الطبيعة:

يُدعى كوكب الأرض بالكوكب المائي، إذ تبلغ مساحة المُسطحات المائية نحو ٧١% من مساحة الكرة الأرضية الكلية، وتبلغ كمية المياه المُوزعة على سطح الأرض نحو ١.٥ مليار كم^٣، ٩٧%

منها مياه مالحة تتوزع في البحار والمحيطات، أما ٣% المتبقية فهي المياه الموجودة في المناطق القطبية وعلى قمم الجبال المرتفعة والأنهار الجليدية وكذلك المياه العذبة الموجودة في الأنهار والبحيرات. يؤدي تعرض المسطحات المائية من بحار ومحيطات وبحيرات وأنهار لأشعة الشمس إلى تبخر جزء من مياهها إلى الهواء وارتفاعها ١٠-١٥ كم فوق سطح البحر إلى طبقة الستراتوسفير من الغلاف الجوي، لتتساقط بعد ذلك مطراً أو ثلجاً ولتعود مرة أخرى إلى الأرض في دورة تعرف باسم دورة المياه الطبيعية (الشكل ٢)، وبذلك تكون كمية الماء في الأرض ثابتة لأن ما يتبخر منها يعود ليتساقط من جديد على صورة هطولات مائية مطرية أو ثلجية.

ويعود كل عام إلى القارات نحو ١٠% مما تبخر من مياه الكرة الأرضية، كما ويجري إلى البحر مقدار مماثل من المياه تقريباً وهو الجزء الرئيس من المياه الذي يعتمد عليه، أما الجزء المتسرب في باطن الأرض فنسبته أكبر من ذلك، ويُعد استجراره باهظ التكلفة، لاسيما وأن المياه الجوفية تُعد من الموارد الطبيعية غير المتجددة، ولا يتم الاستفادة من جميع كميات المياه الجارية فوق اليابسة، إذ يصل نحو الثلث منها فقط إلى الأنهار والبحيرات والتي يُمكن استغلالها، أما الثلثان الآخران فتكون على شكل فيضانات موسمية لا يمكن الاستفادة منها.

تُعد الزراعة المُستهلك الأكبر للمياه العذبة، حيث تستهلك نحو ٧٣% منها ويُؤدي استعمال الأساليب القديمة في الري إلى فقدان قسم كبير من هذه المياه، بينما تستهلك الصناعة نحو ٢٢% من المياه إلا أنها تقوم بتلويث المياه بشكل أكبر، الأمر الذي أدى إلى إفساد مياه بعض الأنهار بشكل كلي بحيث لم تعد صالحة للاستعمال، أما الاستعمال المنزلي فيستهلك نحو ٥% من المياه العذبة، ويختلف هذا الاستهلاك من بلد إلى آخر حيث يزداد في البلدان الغنية والمتقدمة عنه في البلدان الفقيرة والنامية وكذلك في البلدان الحارة عن البلدان الباردة.

إن ازدياد عدد السكان المضطرد على الكرة الأرضية وكذلك عدم توازن التوزيع الجغرافي، وقصور الخطط لتزويد المياه لبعض المناطق المكتظة بالسكان، وازدياد الطلب على المياه لسد الحاجات المنزلية والزراعية والصناعية، جعلت مصادر المياه غير كافية، وأدى إلى مُعاناة من نقص في إمدادات المياه لنحو ٤٠% من إجمالي سكان العالم في ٨٠ بلداً، ولا زالت هذه المشكلة في تصاعد مُستمر، لذلك يسعى التوجه العام حالياً نحو حفظ المياه ومصادرها من التلوث، وإعادة تنقية المياه بعد استعمالها، وكذلك تدويرها لإعادة استعمالها لأغراض مُناسبة، بدلاً من تصريفها إلى أماكن لا تسمح بإعادة استعمالها كطرحها إلى البحر مثلاً، حيث

أوضحت الدراسات إمكانية استعادة ٩٠% من الماء المُستعمل في المنازل وفي الصناعة أيضاً.



شكل-٢: دورة المياه في الطبيعة.

٧.١. أنواع المياه الطبيعية:

لا تختلف أنواع المياه الطبيعية عن بعضها البعض في تركيبها الكيميائي، لكن قد تختلف في محتويات هذه المياه، وتُقسم المياه في الطبيعة إلى:

١.٧.١. المياه السطحية:

وهي المياه التي توجد على سطح القشرة الأرضية، وتتمثل في مياه الأمطار والأنهار والبحيرات والبحار والمحيطات.

١.١.٧.١. مياه الأمطار:

وتُعد من أنقى المياه الطبيعية، وتهطل على سطح الأرض على هيئة أمطار أو ثلوج أو برد وذلك تبعاً لشروط المناخ السائدة عند الهطول، ويختلف متوسط الهطولات المائية من منطقة إلى أخرى تبعاً لطبيعة المنطقة الجغرافية وقربها أو بُعدها عن البحر، ويُلاحظ غزارة الهطولات المائية فوق المناطق الاستوائية، وكذلك على المناطق الساحلية عن المناطق الأخرى الموزعة داخل

القارات، وأيضاً ازدياد هطول الأمطار فوق المناطق المرتفعة نسبةً إلى المناطق المنخفضة الواقعة تحت مستوى سطح البحر. وتعتمد العديد من المناطق في زراعتها على مياه الأمطار، وقد تؤدي فترات الجفاف إلى تلف الكثير من المحاصيل الزراعية والنباتات وإلى هلاك عدد كبير من قطعان الماشية وحدوث المجاعات لسكان تلك المناطق.

وعلى الرغم من نقاوة مياه الأمطار، إلا أنها قد تحتوي على بعض الغازات التي يحملها الهواء كالأكسجين والنيتروجين وأكاسيد النيتروجين وثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت وكبريت الهيدروجين، وكذلك على كميات قليلة من المواد الصلبة المعلقة في الجو كدقائق الغبار أو حبات الطلع أو البكتيريا. ويؤدي احتواء مياه الأمطار على هذه الشوائب إلى تلوثها وتحولها إلى أمطار حمضية والتي تسبب العديد من الأضرار البيئية.

٢.١.٧.١. مياه الأنهار والبحيرات:

تعد مياه الأنهار والبحيرات من أهم مصادر المياه العذبة وتحتوي على نسب متفاوتة من الأملاح الذائبة والمواد العالقة، حيث تتراوح نسبة الأملاح الكلية الذائبة في مياه الأنهار بين ٥٠-١٠٠٠ مغ/لتر، وتختلف نوعية هذه الأملاح تبعاً لنوع التربة والصخور والخصائص الجيولوجية للمناطق التي تجري فيها الأنهار، أو تبعاً لمياه الأمطار التي شكلت هذه الأنهار.

تُدعى المياه "عذبة" إذا احتوت على أقل من ١ غ من الأملاح لكل ١ كغ من الماء، أما المياه "المالحة" فهي تلك المياه التي تحتوي على أكثر من ١ غ من الأملاح لكل ١ كغ من الماء، وقد ترتفع نسب الأملاح الذائبة في بعض أجزاء من الأنهار وذلك نتيجة عمليات تلوث الهواء، أو ما يُلقى فيها من مياه الصرف الصحي والصناعي. وتحتوي مياه الأنهار والبحيرات العذبة أيضاً على نسب متفاوتة من المواد والجزيئات العالقة من الطمي (الغرين) كالطين أو المحاليل الغروية سليكاتية التركيب، والناجمة عن عمليات التعرية المختلفة، أو عن تأثير غاز ثاني أكسيد الكربون الذائب في المياه والمُحل للصخور الكلسية "الكربوناتية"، أو نتيجة التلوث الصناعي، مع العلم أن الطمي الذي تحمله الأنهار يُساهم في إغناء التربة الزراعية المنتشرة في مناطق الأودية النهرية، ويوفر للنباتات العديد من العناصر المعدنية المغذية والتي تؤدي إلى رفع كفاءة خصوبة التربة.

٣.١.٧.١. مياه البحار والمحيطات:

تُغطي مياه البحار والمحيطات نحو ٧١% من سطح الكرة الأرضية ويبلغ متوسط عمقها ٣٨٠٠م، كما وتحتوي على عدد من الأملاح الذائبة فيها وينسبة تصل إلى نحو ٣.٥%. ويُعبد العلماء مصدر الأملاح الذائبة في مياه البحار والمحيطات إلى مصدرين أساسيين هما: عمليات التجوية الفيزيائية والكيميائية المختلفة والتي تؤدي إلى إذابة بعض المركبات المعدنية من صخورها، حيثُ تساهم عمليات النقل المختلفة "ريحي، مائي، ثلجي..." في نقلها إلى البحار والمحيطات، أو النشاط البركاني الذي يتم على اليابسة أو تحت سطح البحار والذي يُرافق عادةً بانطلاق كميات هائلة من الغازات والمحاليل المائية الحارة والغنية عادةً بالأملاح الذائبة. وتتأثر ملوحة مياه البحار والمحيطات بعاملين رئيسيين، هما: كمية الهطولات المائية وكمية المياه المُتبخّرة. ويؤثر المناخ بعوامله المُختلفة بشدة في هذين العاملين ودرجة تأثيرهما، فمثلاً عند ارتفاع درجات الحرارة تزداد كمية المياه المُتبخّرة وبالتالي تزداد درجة مُلوحة المياه السطحية، وعلى النقيض عند ارتفاع مُعدل الهطولات المائية تنخفض درجة مُلوحة تلك المياه، كما وتتناوب مُلوحة المياه السطحية للبحار والمحيطات أيضاً باختلافات طفيفة من مكان إلى آخر، أما مياه الأعماق فلا تتغير تراكيز مُلوحتها من موقع إلى آخر لأنها لا تتأثر بعمليات التبخر ولذلك تبقى نسب الملوحة فيها شبه ثابتة وتقدر بنحو ٣.٥% من الماء، وتتوزع أملاحها كما هو مُبين في (الجدول-٢).

يُعد ملح كلوريد الصوديوم من أهم الأملاح الذائبة في مياه البحار والمحيطات وتبلغ نسبته نحو ٧٧.٧% من الكمية الكلية للأملاح الذائبة فيها، وتستطيع هذه الكمية أن تُغطي سطح الكرة الأرضية بطبقة من الملح تصل ثخانتها إلى نحو أربعة أمتار، يليه ملح كلوريد المغنيزيوم وتصل نسبته نحو ١٠.٨%، ومن ثم أملاح كبريتات المغنيزيوم والكلسيوم بنسب مُتوسطة تقدر بنحو ٤.٧% و ٣.٦% على التوالي من الكمية الإجمالية للأملاح الذائبة، وتُعد كربونات الكلسيوم من أهم المركبات الملحية للكائنات الحية المائية كونها تدخل في تركيب هياكلها وقواقعها. أما أملاح البوتاسيوم ومن أهمها كبريتات البوتاسيوم فتبلغ نسبتها نحو ٢.٥% من الكمية الكلية للأملاح الذائبة. كما وتحتوي مياه البحار والمحيطات على عدد كبير من الأملاح والمُركبات الكيميائية الذائبة كمركبات الكبريت والبروم واليود الموجود في الأعشاب البحرية، ومركبات الكربون والبورون والسليكون المُثبتة في هياكل وقواقع أو أجسام بعض الكائنات الحية البحرية. كما وتوجد مُركبات عناصر كيميائية أخرى كأملاح ومُركبات النحاس والحديد والألمنيوم والمنغنيز والفسفور والباريوم والفلور والزرنيخ، ولكن بنسب قليلة ومحدودة.

لقد أثبتت الأبحاث بأن المُتَبقي الصلب الناتج عن عملية تبخر مياه البحار والمُحيطات يحتوي ويشكل دائم على نسب ثابتة من الأملاح الرئيسة المُبينة في الجدول السابق، ويُمكن تفسير التركيب الثابت لنسب الأملاح الذائبة في مياه البحار والمُحيطات بأنه ناتج عن امتزاج واختلاط هذه المياه ومُحتوياتها من الأملاح الذائبة بفعل التيارات المائية المُختلفة عبر الزمن الجيولوجي الطويل.

جدول-٢: يبين نوعية وتركيب الأملاح الذائبة ونسبتها المئوية في مياه البحار والمُحيطات.

نوع الملح	تركيبه الكيميائي	النسبة المئوية %
١- كلوريد الصوديوم	NaCl	٧٧.٧
٢- كلوريد المغنيزيوم	MgCl ₂	١٠.٨
٣- كبريتات المغنيزيوم	MgSO ₄	٤.٧
٤- كبريتات الكالسيوم	CaSO ₄	٣.٦
٥- كبريتات البوتاسيوم	K ₂ SO ₄	٢.٥
٦- كربونات الكالسيوم وكربونات المغنيزيوم	CaCO ₃ MgCO ₃	٠.٣
٧- أملاح أخرى		٠.٤
٨- المجموع		١٠٠

وتحتوي مياه البحار والمُحيطات أيضاً على عدد من الغازات الذائبة فيها والتي مصدرها الرئيس الغلاف الجوي، وأهمها غاز الأكسجين ويُعد وجوده عاملاً هاماً وضرورياً لتنفس الكائنات الحية البحرية وتبلغ نسبته ٣٤% من مجموع كمية الغازات الذائبة، وغاز الآزوت ويشكل نحو ٦٣% من مجموع كمية الغازات الذائبة والذي يُساهم في تركيب بروتينات الكائنات الحية المائية، وكذلك غاز ثاني أكسيد الكربون وتصل نسبته إلى نحو ١.٦% من مجموع الغازات الذائبة، والذي يُساهم بتشكيل العديد من المركبات والمواد العضوية للكائنات النباتية الحية البحرية. تتوزع المواد والمركبات غير العضوية كالألاح مثلاً بشكل مُنتظم في مياه البحار والمُحيطات، في حين تتفاوت نسب توافر المواد والمركبات العضوية والتي تكون على شكل ذائب أو مُعلق،

من موقع إلى آخر وذلك تبعاً لمجموعة من العوامل أهمها تفاوت وفرة الكائنات الحية من مكان إلى آخر في مياه البحار والمحيطات.

٢.٧.١. المياه الجوفية:

هي المياه الموجودة تحت سطح الأرض على أعماق متباينة تتراوح عادةً بين عشرات إلى مئات الأمتار، كمياه الآبار والينابيع، وتتساقط بشكل رئيس من مياه الأمطار التي تسربت إلى باطن الأرض وتجمعت بين طبقات صخرية غير نفوذة. ويعتمد وجود المياه الجوفية عادة على طبيعة ونوع وتركيب الصخور الخازنة لها، كما ويتأثر وجودها بدرجة نفاذية هذه الصخور، والتي تتأثر بدورها بدرجة الحرارة ودرجة الرطوبة النسبية للهواء، حيث تزداد نفاذية وسرعة تغلغل وتسرب المياه السطحية إلى باطن الأرض عندما تكون درجات الحرارة معتدلة والجو رطباً مما يقلل من سرعة تبخر المياه السطحية وبالتالي زيادة كمية المياه المتسربة إلى باطن الأرض.

تكون المياه الجوفية عادةً نقية ورائقة ولا تحتوي على شوائب عضوية بسبب ترشيحها خلال الصخور التي مرت من خلالها تلك المياه، ولكن تتميز باحتوائها على كميات متباينة من الأملاح الذائبة، حيث ترتبط كمية الأملاح ونوعها مع طبيعة الصخور التي تغلغلت ضمنها تلك المياه ورشحت خلالها وكذلك طبيعة المياه السطحية التي غدتها. وتتراوح كمية تلك الأملاح عادة بين ٣٠-٣٠٠ مغ/لتر، وتكون عندئذ مياهاً عذبة صالحة للشرب دون أي معالجة، أما المياه الجوفية التي تصل نسب الأملاح الذائبة فيها إلى نحو ٤٠٠٠ مغ/لتر فلا تكون مياهاً صالحة للشرب، لكنها ذات أهمية في المعالجة الطبية، كمياه بعض الينابيع الغنية بالمعادن مثل ينابيع المياه الكبريتية.

تكون الخزانات الجوفية والمتشكلة من المياه المتسربة داخل الطبقات الصخرية تحت السطحية تحت ضغط تلك الطبقات من جميع الجهات، ويؤدي حدوث فارق فيها إلى اندفاع المياه إلى السطح مكونة "الينابيع" أو "العيون". وهي عبارة عن المياه التي تسري ذاتياً وباستمرار من الطبقات تحت السطحية إلى الطبقات السطحية.

وتتوقف درجة حرارة مياه الينابيع على درجة حرارة التربة أو الصخور التي تتدفق من خلالها المياه الجوفية، فالمياه التي تجري بالقرب من السطح الخارجي للأرض، تكون مياهها أكثر دفئاً في الصيف عنها في الشتاء، بينما لا تتأثر الينابيع التي تأتي من مناطق أكثر عمقاً بدرجة حرارة السطح، أما الينابيع الحارة فيشكل معظمها أنهاراً انسيابية أو بركاً ساكنة من المياه، أو قد تشكل

منفذاً بركانياً أو حمماً فوارة، ويتكون عدد كبير من الينابيع الحارة في المناطق البركانية حيث تكون الصخور النارية قرب السطح الخارجي للأرض، وكذلك تتكون عند تسرب المياه السطحية تدريجياً إلى أعماق الأرض خلال الشقوق الصخرية حيث يتم تسخينها بالصهارة، ثم يرتفع الماء بعدئذ إلى السطح عبر الكسور والفوالق وتشققات الصخور.

لا توجد الينابيع في الطبيعة بوفرة، لذلك يتم عادة الحصول على المياه الجوفية عن طريق حفر الآبار التي يُستجر منها الماء، مع وجوب ترشيد استهلاك هذه المياه وذلك للحفاظ على مستوى ثابت لمناسيبها. وتُستعمل مياه الآبار عادة في الأغراض المنزلية وفي ري الأراضي الزراعية وفي بعض الاستعمالات الصناعية.

الفصل الثاني

مفهوم التلوث المائي

١.٢. المقدمة:

أدت الزيادة السكانية والتوسع العمراني وارتفاع مستوى المعيشة والنمو الصناعي والزراعي إلى زيادة الضغوط على البيئة الطبيعية، مما انعكس بالتالي على دورة المياه في الطبيعة ابتداءً من مرحلة تبخر المياه من سطح الأرض وانتهاءً بعودتها إليها ثانيةً مُحملةً بالملوثات المختلفة، وعلى الرغم من الدور الهام للطبيعة في إزالة أو تقليل عدد من الملوثات (التنقية الذاتية)، إلا أن هذا الدور أصبح ضعيفاً وازداد ضعفاً مع زيادة الملوثات التي تُلقى بتركيز عالية في مكونات البيئة الأساسية من هواء وتربة وماء، وكان الاعتقاد السائد خلال القرن الماضي بأن الأنهار والبحار والمحيطات هي الأماكن الأنسب للتخلص من مخلفات المدن والمخلفات الصناعية وأي مخلفات أخرى.

تحتوي المياه الطبيعية على تراكيز محددة من المواد العضوية والمواد اللاعضوية الذائبة وغير الذائبة والمواد العالقة، ويختلف نوع وتركيز هذه المواد من مياه إلى أخرى، ففي حين يبلغ تركيز المواد العضوية في مياه المحيطات نحو 0.5 ppm، يصل في البحيرات والمستنقعات إلى نحو 100 ppm.

ويحدث التلوث عند زيادة تركيز هذه المواد زيادة كبيرة عن تراكيزها الطبيعية، ويُعرف "تلوث الماء" بأنه إحداث تلف أو إفساد لنوعية المياه بشكل مباشر أو غير مباشر، نتيجة التغيرات التي تُؤثر في خصائص المياه الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، مما يؤدي إلى حدوث خلل في نظامها البيئي، ويُقلل من قدرتها على أداء دورها الطبيعي ويجعل المياه أقل صلاحية أو غير صالحة للاستعمال فتُصبح ضارة أو مؤذية للكائنات الحية، أو تُفقد العديد من قدرتها الاقتصادية ويشكل خاص ما يتعلق بمواردها السمكية وغيرها من الأحياء المائية.

ومن مظاهر تلوث المياه:

- ١- استهلاك كميات كبيرة من الأكسجين الذائب في الماء، نتيجة طرح مياه الصرف الصحي والصناعي والزراعي فيه.
- ٢- نمو وازدياد الكائنات الحية الدقيقة في المياه.
- ٣- زيادة تركيز المواد والمركبات الكيميائية في المياه، مما يجعلها سامة للكائنات الحية.
- ٤- انخفاض نفاذية الضوء الضروري لنمو الأحياء النباتية المائية كالعوالق المائية Planktons.

وتتنوع مصادر تلوث المياه، فمنها المصادر الطبيعية المنتشرة في الهواء والتربة، والمصادر غير الطبيعية والتي تعود إلى النشاطات البشرية المختلفة والمسؤولة عن التلوث بشكل رئيس.

٢.٢. تصنيف ملوثات المياه:

وتُصنف إلى:

- الملوثات البيولوجية: كالتلوث بالأحياء الدقيقة (جراثيم، فيروسات، طفيليات).
- الملوثات الكيميائية: كالتلوث بالمعادن الثقيلة والهيدروكربونات والمبيدات والأسمدة.
- الملوثات الفيزيائية: كالتلوث الحراري والتلوث الإشعاعي.

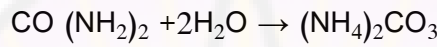
١.٢.٢. الملوثات البيولوجية للمياه:

١.١.٢.٢. التلوث بمياه الصرف الصحي:

تقوم العديد من الدول بطرح مياه الصرف الصحي في المسطحات المائية الطبيعية كالأنهار والبحيرات والبحار، فتصبح هذه المياه مصدراً خطراً من مصادر التلوث المائي وذلك لاحتوائها على ملوثات عديدة كالمواد العضوية والمواد اللاعضوية والمواد العالقة والجراثيم والفيروسات الممرضة والمواد الكيميائية كالمنظفات الصناعية والصابون، إضافة إلى المعادن الثقيلة والمركبات الهيدروكربونية.

وتقوم الكائنات الحية الدقيقة بإزالة التلوث البيولوجي للمياه، حيث تتغذى بشكل رئيس على المواد العضوية، وتتأكسد تلك الملوثات بوجود الأكسجين الذائب في الماء مكونة غاز ثاني أكسيد الكربون والماء، ويؤدي استهلاك كمية كبيرة من غاز الأكسجين الذائب في الماء إلى تعرض الكائنات الحية المائية الموجودة فيه إلى الخطر، وذلك لأن الحد الأدنى لبقائها حية هو احتواء الماء على نحو أربع أجزاء في المليون من الأكسجين الذائب، علماً بأن هذه القيمة تتضاعف في فصل الشتاء. يُقدر تلوث الماء بواسطة عدة معايير أهمها: قياس كمية الطلب الكيميائي الحيوي للأكسجين (BOD=Biochemical Oxygen Demand) ويُعبر عن قيمته من خلال تقدير كمية غاز الأكسجين الذائب بـ مغ/لتر والتي تُستهلك في وقت محدد نتيجة للتأكسد الهوائي الحيوي للملوثات العضوية في الماء، ويُعبر رمز BOD_5 أو BOD_{10} عن كمية الأكسجين المُستهلكة من قبل الكائنات الحية الدقيقة بعد خمسة أيام أو بعد عشرة أيام، ويرتبط هذا الطلب بتركيز كبير للجراثيم والبكتيريا الموجودة في مياه الصرف الصحي والتي قد يصل تركيزها إلى نحو $10^8 - 10^9$ /لتر، أما المؤشر الآخر فهو الطلب الكيميائي للأكسجين (COD=Chemical Oxygen Demand) ويُعبر عن قيمته بكمية غاز الأكسجين بـ مغ/لتر اللازمة لأكسدة الملوثات العضوية في الماء، ويُقاس بمعالجة عينة من مياه الصرف الصحي بمحلول حمض

الكبريت الكثيف وزيادة من ثاني كرومات البوتاسيوم بوجود وسيط مناسب فتتم عملية الأكسدة للمركبات العضوية في مياه الصرف الصحي إلى غاز ثاني أكسيد الكربون وماء، وتبقى مركبات النتروجين على شكل أمونيا مُنحلة. عندما تتأكسد المركبات العضوية بالأكسجين الذائب في الماء أكسدةً هوائيةً تتناقص كمية هذا الغاز في المياه إلى الحد الذي يتناسب مع درجة التلوث فيه، وتلجأ الكائنات الحية الدقيقة، عند عدم توفر كمية من غاز الأكسجين الذائب الضرورية في المياه، للحصول على الأكسجين، إلى إرجاع المواد عوضاً عن أكسدتها فيتحول الكبريت S على سبيل المثال إلى غاز H₂S، كما يتحول الآزوت القادم بشكل أساسي من مادة اليوريا المُنحلة في الماء بواسطة أنزيم اليورياز إلى أملاح الأمونيا كما يوضح التفاعل التالي:



ويكون للأمونيا والأمينات رائحة مزعجة، وتُعد الرائحة هنا مؤشراً على أن الماء مثقل بالملوثات وغير ملائم لنمو الحياة فيه. تستطيع المُسطحات المائية تعويض الأكسجين من الغلاف الجوي بفعل الرياح والأمواج (التنقية الذاتية للماء)، فمثلاً عندما تتعرض مياه نهر ما إلى التلوث بمياه الصرف الصحي التي لا تحتوي على مواد سامة أو مواد غير قابلة للتحلل، تتناقص درجة التلوث أو تزول كلياً في النهر بعد جريان المياه ولمسافة قصيرة من منطقة دخول الملوثات. وتكون قدرة البيئة على التنقية الذاتية من الملوثات بواسطة عدة عوامل وهي: العوامل الفيزيائية المُتضمنة عملية الترسيب للملوثات، حيث يكون للتيارات المائية ولزوجة المياه المُتأثرة بدرجة الحرارة دور هام فيها، وكذلك بواسطة العمليات الكيميائية عن طريق تحلل المركبات الكيميائية المُتفاعلة مع الماء، وعمليات الأكسدة والإرجاع، وأيضاً بواسطة العمليات الحيوية، والتي تُعد من أهم العوامل في عملية التنقية الذاتية حيث تُشارك فيها مُعظم الكائنات الحية التي تعيش في النظام البيئي المائي كالبكتيريا والفطريات والطحالب ووحيدات الخلية والنباتات والأسماك وغيرها سواءً كانت المُشاركة بطريقة مُباشرة أو غير مُباشرة، حيث تقوم الكائنات الحية الدقيقة بتحليل المواد العضوية الذائبة والصلبة وإعادتها إلى دورتها الطبيعية. ولكن عندما يفوق طرح مياه الصرف الصحي إلى المُسطحات المائية قدرتها على الحصول على الأكسجين، يحدث عندها نقص في تركيز الأكسجين الذائب في الماء ومن ثم يحدث التلوث. ويجب عند طرح مياه الصرف الصحي مُراعاة النسبة التي تمثلها هذه المياه إلى مياه المُسطحات المائية، بحيث تكون ٧٠:١ من مياه النهر، إذا كانت مياه الصرف الصحي غير مُعالجة، بينما تصل النسبة إلى ٤٠:١ بعد مُعالجة المياه مُعالجة أولية قبل إلقاءها في النهر، ولا تُحدث هذه النسبة ضرراً كبيراً

للكائنات الحية المائية. ويُفضل قبل إلقاء مياه الصرف الصحي في مياه البحر مُعالجتها مُعالجة أولية وطرحها بواسطة أنابيب على بعد نحو عشرة كيلومترات من الشاطئ وعلى عمق نحو خمسين متراً تحت سطح البحر، وذلك للتقليل من الأضرار الناجمة عن إلقاء هذه المياه في البحار، ولمنح الفرصة للعوامل الطبيعية كالأكسجين والكائنات الحية الدقيقة وضوء الشمس للقضاء على التلوث الناجم.

وقد يؤدي إلقاء مياه الصرف الصحي في البحيرات إلى حدوث ظاهرة "التشبع الغذائي" Eutrophication وتتحول عندها البحيرات إلى مُستنقعات نظراً للنمو السريع للنباتات المائية كالطحالب والأشنيات. وتنتج هذه الظاهرة عند زيادة المواد العضوية، وزيادة المركبات النتروجينية، وبشكل خاص زيادة المركبات الفسفورية، والتي تعود إلى الاستعمال الواسع للمنظفات التي تحتوي على تراكيز عالية من الفسفات، ومنتجاته الدول المُتقدمة حالياً إلى استعمال بدائل الفسفات في صناعة المنظفات للحد من هذه الظاهرة.

تحتوي مياه الصرف الصحي على مُسببات نقل الأمراض إلى الإنسان، وذلك لاحتوائها على عدد كبير من البكتيريا والجراثيم والفيروسات والطفيليات المُمرضة، وتنتقل هذه الأحياء الدقيقة عن طريق الفم أو الجلد والجروح، أو نتيجة تناول الأسماك المُصابة بها، أو عند الاستحمام أو السباحة في المياه الملوثة. ويصاب الإنسان بأمراض عديدة نتيجة تلوث المُسطحات المائية بمياه الصرف الصحي، ومنها أمراض: "التيفوئيد والنزلات المعوية الحادة التي تسببها بكتيريا السالمونيلا، والإسهالات التي تسببها بكتيريا الشيغلا Shigella (الزحار)، والتهابات الكبد والكلى والجهاز العصبي المركزي التي تسببها بكتيريا الليبتوسبيرا Leptospira، وأما مرض الكوليرا فتسببها بكتيريا الفيبريو Vibrio، كما يؤدي وجود بكتيريا إيشيريشيا كولي Escherichia Coli في المياه إلى الإصابة بأمراض الجفاف والإسهال والقيء". وتجدر الإشارة هنا أن بكتيريا إيشيريشيا كولي Escherichia Coli توجد بشكل طبيعي داخل جسم الإنسان، وتخرج مع الفضلات البشرية نحو ١٠٠ بليون إلى ١٠ تريليون واحدة، وينقص عددها كثيراً في الوسط الخارجي نتيجة تواجدها في أوساط غير مُلائمة لتكاثرها، ويدل وجودها في المياه على تواجد أنواع أخرى من البكتيريا الضارة، حيث يُعد وجودها مؤشراً هاماً للقيام بالمُعالجة اللازمة لانقاص العوامل المُمرضة الأخرى بعد التخلص الكامل من هذه البكتيريا. تبلغ المعايير القياسية لوجود بكتيريا إيشيريشيا كولي في المياه نحو ٢٠٠٠ واحدة/١٠٠ مل ماء، ويجب ألا يزيد عددها عن ٢٠٠

واحدة / ١٠٠ مل ماء من أجل المياه المخصصة للاستحمام أو أحواض السباحة، وألا تزيد قيم تواجدتها عن ١ واحدة/ ١٠٠ مل ماء من أجل الماء المخصص للشرب.

٢.٢.٢. الملوثات الكيميائية للمياه:

١.٢.٢.٢. تلوث المياه بالمخلفات الصناعية:

تطرح المصانع المنشأة على امتداد الأنهار وشواطئ البحيرات والبحار، مخلفاتها الصناعية في هذه المسطحات المائية، وتُمثل هذه النفايات خطراً على الكائنات الحية المائية. لاسيما وأنها شديدة الثبات ولا تتحلل بسهولة في الطبيعة، وذات سُمية عالية وتأثير تراكمي، ولدى بعضها القدرة على الانحلال في الماء حيث تختزن أجسام الكائنات الحية المائية وتنتقل إلى الإنسان عبر السلسلة الغذائية. وتُوضح الدراسات أن أغلب المواد الكيميائية الموجودة في المخلفات الصناعية تستهلك كميات كبيرة من غاز الأكسجين الذائب في الماء، وأن ما تستهلكه هذه المخلفات من غاز الأكسجين يُقدر بأربعة أضعاف ما تستهلكه مياه الصرف الصحي، مما يؤدي إلى هلاك وموت الكائنات الحية المائية ضمن هذه المسطحات المائية.

وتُعد العناصر المعدنية الثقيلة وهي: كل عنصر كيميائي تزيد كثافته الحقيقية عن ٥ غرام/سم^٣، من أكثر المخلفات الصناعية خطراً، وتعود خطورتها بسبب ازدياد معدلات تراكيزها التراكمية في الجسم بشكل أسرع من عمليات طرحها أو تحطّمها وإفرازها من الجسم. وتضم مجموعة كبيرة من العناصر المعدنية مثل: الرصاص، والزنك، والزرنيخ، والنيكل، والكروم، والكوبالت، والنحاس، والزنك، والمنغنيز، علماً أن بعض العناصر المعدنية الثقيلة كالنحاس والزنك تكون ضرورية بتركيز ضئيلة ومُحددة لإتمام بعض العمليات الحيوية الاستقلابية في الجسم.

١.١.٢.٢.٢. أهم العناصر المعدنية الثقيلة:

• الرصاص:

يدخل الرصاص في العديد من الأعمال المنجمية والصناعات التعدينية كتخضير السبائك، أو الصناعات الأساسية كصناعة البطاريات السائلة والدهانات والأصبغة ومواد الطباعة والمطاط ومشمع الأرضيات وغيرها، وكذلك في صناعة النفط ووقود الآليات. ويُعد كل من المحيط الأطلسي والبحر الأبيض المتوسط من أكثر المسطحات المائية تلوثاً بمركبات الرصاص.

وتتعرض المُسطحات المائية للتلوث بمركبات الرصاص عند إلقاء المصانع الكيميائية لنفاياتها فيها، ويُعد ذلك المصدر الثانوي للتلوث بهذه المركبات، حيث تتجاوز كمية الرصاص المُلقاة من المصانع في البحار سنوياً نحو ٢٥٠ ألف طن، أما المصدر الرئيس للتلوث بمركبات الرصاص فيأتي من عوادم السيارات، ولذلك يُضاف مركب رابع إيثيل الرصاص إلى الوقود لتحسين نوعيته، مما يؤدي إلى زيادة كفاءة المُحرك، إذ يتحول رابع إيثيل الرصاص عند الاحتراق إلى أول أكسيد الرصاص، وهي مادة صلبة تترسب على مُحرك السيارات، لذلك يُضاف أيضاً إلى البنزين مادة بروميد الإيثيلين والتي تقوم بالتفاعل مع أكسيد الرصاص وتُحوّله إلى مركب بروميد الرصاص، وهو مادة مُتطايرة، يُشكل مع الهواء مُعلقاً دقيقاً (ضباب خفيف) ينتقل من منطقة إلى أخرى. تعمل التيارات المائية على نقل المياه المُلوثة بالرصاص من مكان إلى آخر حيث يتركز في أنسجة الكائنات الحية المائية وينتقل منها إلى الإنسان. وتُعد أملاح الرصاص سامة جداً للإنسان وللكائنات الحية فتركيز ٠.٣ مغ/لتر في الماء يُسبب قتل الأسماك. ويُؤدي التسمم بمركبات الرصاص للإنسان إلى نقص في عدد كريات الدم الحمراء (مرض الأنيميا)، ومن ثم الموت البطيء، وقد يحدث تلفاً شديداً للكلية والكبد، وأمراض الجهاز الهضمي، وتلف الدماغ، وخلل في عمل الجهاز العصبي المُحيطي والمركزي.

ونتيجة الأضرار الصحية الكبيرة التي يُسببها تلوث المياه بمركبات الرصاص فقد عمدت الدول المتقدمة كألمانيا وسويسرا منذ عام ١٩٨٦م، إلى إنتاج وقود للسيارات "بنزين" خالٍ من الرصاص، ولا زالت الأبحاث مُستمرة لإيجاد وقود للسيارات بديل للبنزين أكثر أماناً للبيئة.

• الزئبق:

يحدث التلوث بالزئبق عن طريق النفايات الصناعية الناتجة عن صناعة المواد البلاستيكية، ومصانع الأصبغة أو من تحضير الزئبق أو التعامل مع إحدى مُركباته، كمصانع أجهزة قياس الحرارة والضغط "الترمومترات والبارومترات" ومصانع المصابيح المفلورة أو المصابيح البراقة، وعند عمليات التحليل الكهربائي لدى إنتاج الكلور، وصناعة الورق لمنع نمو الفطريات أثناء تحضير عجينة الورق، أو إنتاج المُبيدات الفطرية والتي تحتوي على الزئبق. وتُعد بعض أنواع المُبيدات التي تحتوي في تركيبها على عنصر الزئبق، من أكثر المُركبات سميةً من مركبات الزئبق الأخرى كونها أكثرها ذوباناً في الماء، ويتم بالتالي امتصاصها بشكل سريع من قبل النباتات ثم تنتقل إلى الكائنات الحية العليا عن طريق السلسلة الغذائية.

وتقدر كمية عنصر الزئبق الناتجة عن المخلفات الصناعية بنحو ١٢٥٠٠ طن/سنوياً، وتجدر الإشارة هنا أن الصناعات في الولايات المتحدة الأمريكية تُلقِي سنوياً في المُسطحات المائية كميات من مُركبات الزئبق تزيد عن ٥٠٠ طن.

لقد أثبتت الدراسات أن بعض البكتيريا اللاهوائية تقوم بتحويل الزئبق المعدني إلى زئبق عضوي "ميثيل الزئبق" وهو مُركب شديد السمية تمتصه خلايا الكائنات الحية المائية بسهولة ويتراكم في أنسجتها وأجسامها، ثم ينتقل إلى الإنسان عبر السلسلة الغذائية.

وتختلف مُركبات الزئبق العضوية واللاعضوية في تأثيراتها السمية، وفي الفترة اللازمة لظهور الأعراض المرضية والحدود الكمية اللازمة لظهورها. ويُعد بخار الزئبق من أكثر المواد سميةً، ولاسيما عند التعرض له لفترات زمنية طويلة، ومن هنا تكمن خطورته الشديدة على أطباء الأسنان ومُساعدتهم لدى تحضيرهم لحشوات الأسنان، وكذلك عمال المناجم والتعدين الذين يستشقون أثناء عملهم لفترات زمنية طويلة أبخرة الزئبق بتركيز تزيد ألف مرة عن محتواه في الهواء بالحالة الطبيعية. كما وتساهم البراكين النائرة أيضاً في زيادة مُحتوى بخار الزئبق في الغلاف الجوي، وكذلك تم تحديد تراكيز عالية جداً من بخار الزئبق فوق محارق النفايات الورقية وفوق مداخن المصانع التي تستعمل الفحم الحجري كوقود لها، حيث حددت الدراسات أن مصنعاً واحداً من تلك المصانع يُطلق نحو ٣٠٠ طن من الزئبق سنوياً في الغلاف الجوي نتيجة حرق الفحم الحجري.

ويؤدي التسمم بمركبات الزئبق عند الإنسان إلى ظهور أعراض الفشل الكلوي واضطرابات الدورة الدموية والأمراض الهضمية والأمراض العصبية والشعور بالتعب والإرهاق والصداع والدوار والغثيان والإقياء، وقد حددت هيئة الصحة العالمية WHO الحدود العليا التي يُسمح بوجود الزئبق في مياه الشرب بـ ٠.٠٠١ مغ/لتر.

• الكاديوم:

يُوجد عنصر الكاديوم في الطبيعة في صخور القشرة الأرضية مُترافقاً غالباً مع عنصري الزنك والنيكل، وتتلوث المُسطحات المائية بمعدن الكاديوم من مُخلفات عمليات التعدين وتحضير السبائك والتغليف الكهربائي وصناعة البطاريات ومصانع الدهانات وأصبغ المواد البلاستيكية، كما ويدخل الكاديوم في عدد كبير من الصناعات الكيميائية والتحويلية كطلاء الخزف. وتقدر

كميته الناتجة عن مختلف المجالات الصناعية بنحو ٨٠٠٠ طن/سنوياً، يصل منها إلى مياه الأنهار والبحيرات والبحار والمحيطات نحو ١٠٠٠ طن/سنوياً.

تُعد مركبات الكاديوم مواد شديدة السمية، ويتجمع عنصر الكاديوم في أنسجة الكائنات الحية المائية ومن ثم ينتقل إلى الإنسان عن طريق الغذاء، ومن أعراضه السمية فقر الدم والفشل الكلوي والتهاب الكبد وهشاشة العظام، حيث تصبح الأضلاع هشة معرضة للكسر لدى أي اهتزاز ضعيف كالناتج عن السعال مثلاً، ومع مرور الزمن تصبح العظام لينة كالأنسجة كما في مرض إتي-إتي (Itia-Itia) الذي ظهر في مقاطعة كوياما اليابانية نتيجة التسمم بالكاديوم، كما ويمكن أن يتسبب الكاديوم بالأمراض السرطانية المختلفة، وقد تم تحديد الحد الأعلى المسموح بوجود الكاديوم في مياه الشرب من قبل هيئة الصحة العالمية WHO بـ ٠.٠٠٥ مغ/لتر.

• البيريليوم:

يحدث التلوث البيئي بعنصر البيريليوم نتيجة استعماله في الصناعات التعدينية لتقسية السبائك المعدنية، كما ينبعث عند احتراق الفحم الحجري. ويُعد البيريليوم من العناصر السامة جداً، لاسيما عند وجوده على هيئة دقائق مُعلقة في الجو، ويُؤدي التعرض إلى تراكيز عالية منه إلى حدوث التهابات حادة في الجهاز التنفسي، كما ويُسبب التعرض المُستمر إلى دقائق البيريليوم ولفترات طويلة في الإصابة بمرض البيريليويس Berylliosis حيث تُصاب الرئتين بضعف حاد يُؤثر على التبادل الغازي مما يُشكل اجتهاداً للعضلة القلبية وبالتالي الوفاة. وقد حددت هيئة الصحة العالمية WHO الحدود العليا التي يُسمح بوجود البيريليوم في مياه الشرب بـ ٠.١ مغ/لتر.

• الزرنيخ:

تُعد كل من مُنشآت التعدين ومصانع صهر بعض المعادن كالنحاس والرصاص والزنك، وعمليات احتراق الفحم الحجري، وكذلك المنشآت الصناعية التي يُستعمل الزرنيخ فيها كصناعة الزجاج والسيراميك، المصادر الرئيسة لتلوث المُسطحات المائية بعنصر الزرنيخ، إضافةً إلى ذلك يدخل عنصر الزرنيخ في تركيب عدد كبير من المبيدات الحشرية. وقد أثبتت الدراسات خطر الزرنيخ على البيئة وإن كان وجوده بأقل تركيز.

ويؤدي ارتفاع تركيز عنصر الزرنيخ في جسم الإنسان إلى الوهن في العضلات والتهاب الجهاز الهضمي والكبد، والفشل الكلوي والتهاب الجهاز العصبي، كما ويتسبب في الإصابة بالعديد من أنواع السرطانات مثل سرطان الجلد والرئة والمثانة وكذلك أمراض القلب والأوعية الدموية، وقد

حددت هيئة الصحة العالمية WHO الحدود العليا التي يُسمح بوجود الزرنيخ في مياه الشرب بـ ٠.٠١ مغ/لتر.

• النيكل:

يترافق النيكل غالباً مع العناصر المعدنية الثقيلة الأخرى مثل: الكروم والكاديوم، وتُعد الأعمال المنجمية أو التعدينية من أهم مصادره الطبيعية، كما ويدخل النيكل في تحضير بعض السبائك المعدنية، وصناعة عدد كبير من الأدوات والأجهزة الكهربائية وكذلك في صناعة الصلب المقاوم للصدأ وفي هدرجة الزيوت وصناعة المجوهرات والحلي. وتنتشر مركبات النيكل مثل: "أكسيد النيكل NiO أو كربونات النيكل $NiCO_3$ أو كبريت النيكل NiS في الغلاف الجوي على هيئة دقائق ترافق الغبار، يستنشقها الإنسان وتتراكم في أنسجته، وتسبب عند ارتفاع تركيزها أمراضاً سرطانية مختلفة، وكذلك اضطرابات في الجهاز التنفسي وحالات الاختناق، واضطرابات الدورة الدموية والأزمات القلبية، وقد حددت هيئة الصحة العالمية WHO الحدود العليا التي يُسمح بوجود النيكل في مياه الشرب بـ ٠.٠٢ مغ/لتر.

• الكروم:

تُعد الأعمال المنجمية والتعدينية من أهم مصادره الطبيعية، فهو يدخل في عدد كبير من الصناعات المعدنية، وصناعة الأدوات المنزلية والأصبغة والطلاء كما ويدخل في معالجة الجلود ودباغتها، وصناعة الخشب. وتُعد مركبات الكروم ثلاثي الشحنة غير سامة، بينما تكون مركبات الكروم سداسية الشحنة شديدة السمية، ويؤدي ارتفاع تركيزها لدى الإنسان إلى اضطرابات في الجهاز الهضمي كالتهابات المري والمعدة والقولون، وكذلك التهاب الجلد والتهاب المفاصل والتهاب الكبد والفشل الكلوي والتهاب الخلايا العصبية، وسرطانات الرئة عند استنشاقه، وقد تم تحديد الحد الأعلى المسموح بوجود الكروم في مياه الشرب من قبل هيئة الصحة العالمية WHO بـ ٠.٠٥ مغ/لتر.

• الكوبالت:

يدخل عنصر الكوبالت في عدد كبير من الصناعات المعدنية، ويُعد من العناصر المعدنية شديدة السمية، ويؤدي ارتفاع تركيزه في جسم الإنسان إلى اضطرابات في الدورة الدموية، كما أن أكاسيد الكوبالت تُسبب سرطانات الجهاز التنفسي، وقد تم تحديد الحد الأعلى المسموح بوجود الكوبالت في مياه الشرب من قبل هيئة الصحة العالمية WHO بـ ٠.٠٥ مغ/لتر.

• النحاس:

يترافق معدن النحاس غالباً مع معدن الزنك ويدخل في صناعة مضخات المياه وأنابيبها، وصناعة عدد كبير من الأدوات والمستلزمات الكهربائية. وتؤدي زيادة تركيزه في جسم الإنسان إلى تلف الكبد، ونقص القدرة المناعية والتهاب الجهاز العصبي والدورة الدموية، وقد تم تحديد الحد الأعلى المسموح بوجود النحاس في مياه الشرب من قبل هيئة الصحة العالمية WHO بـ ١مغ/لتر.

تحتوي المخلفات الصناعية المُلقاة من مصانع الورق والنسيج والمطاط وغيرها في المُسطحات المائية على عدد كبير من المواد الكيميائية المتفاوتة بدرجة سميتها وتأثيرها السلبي على المياه، ومن أهمها المركبات العضوية التي تُعرف باسم **ثنائي فينيل مُتعدد الكلور Polychlorinated Biphenyls (P.C.B)**، وقد تعهد عدد كبير من الدول الصناعية المتقدمة مؤخراً بمنع إنتاج هذه المركبات أو استعمالها. كما وتطرح أيضاً مصانع مُبيدات الأعشاب والمواد المُطهرة في المُسطحات المائية بعض المركبات والمواد شديدة السمية كمركبات **دايوكسين Dioxin** والتي تُسبب الإصابة بالأمراض السرطانية المُختلفة، ويزيد من خطورة هذه المركبات ثباتها الشديد وعدم تفككها أو تحللها أو تأثرها بالعناصر الطبيعية، حيث يبلغ عمر النصف لها نحو عشر سنوات. كما وتحتوي مياه المصانع على العديد من المواد والمركبات الضارة الأخرى كالأُملاح والأحماض والقواعد والمواد الملونة والأصبغ والتي تُسبب الضرر الهائل للكائنات الحية المائية.

يُعد الحد من تلوث المُسطحات المائية الطبيعية بالمخلفات الصناعية، أمراً هاماً وفي غاية الصعوبة، وذلك لعدم توفر طرائق مُوحدة للتخلص منها، لذلك يجب على كل منشأة صناعية القيام بمُعالجة منفصلة ونوعية وتنقية مياه صرفها الصناعي قبل طرحه في المُسطحات المائية الطبيعية.

٢.٢.٢.٢. تلوث المياه بالمركبات غير العضوية:

تُعد المركبات غير العضوية مثل النترات والنترت والفسفات والفلورايد والأسبستوس، من أهم المواد التي تلوث المياه.

١.٢.٢.٢.٢. مركبات النترات والنترت:

توجد النترات في البيئة بشكل طبيعي في الماء والتربة والطعام، وتقوم البكتيريا في دورة النترجين الطبيعية بتحويل النترجين المُمتص من قبل النبات إلى نترات يُخزن في خلاياها، وعندما تتغذى

ويُعد إضافة الفلور إلى مياه الشرب المعبأة، أو وجوده في مياه الشرب بنسب لا تزيد عن ١.٥مغ/لتر، عامل مهم لحماية الأسنان من التسوس، وزيادة صلابة ومناعة مينا الأسنان، كما وله أثر وقائي ضد أمراض القلب ومُحفز لتكوين العظام بعد العمليات الجراحية العظمية. إلا أن زيادة تركيز الفلور في مياه الشرب يُسبب بقع ملونة على الأسنان وتغير لون المينا وتلفه في بعض الأحيان، كما وتؤدي أيضاً إلى هشاشة العظام. وتكمن خطورة الفلور في العمل على فقدان الشهية والتغير في بناء وتشكيل أنسجة العظام والأسنان وإعاقة في النمو وتشوه في الأطراف واضطرابات عصبية، كما ويؤثر على المفاصل، والكلية، والكبد، والقلب، والغدة الدرقية، ويستطيع أن يهدم الأنزيمات بسبب اتحادها مع بعض العناصر مثل النحاس، والزنك، والحديد، والمنغنيز، وبعض العناصر الأخرى والتي تُعد جزءاً من تكوين الأنزيم، وقد تم تحديد الحد الأعلى المسموح بوجود الفلور في مياه الشرب من قبل هيئة الصحة العالمية WHO بـ ١.٥مغ/لتر.

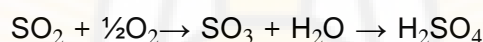
٤.٢.٢.٢.٢. الأسبستوس:

ينتمي الأسبستوس إلى مجموعة المعادن الألوموسيليكاتية المائية المبلورة، ويوجد على هيئة بلورات ليفية إبرية المظهر تختلف عن بعضها في التركيب الكيميائي والخصائص الفيزيائية الطبيعية وهي: الأسبستوس الأبيض (الكريزوتيل Chrysotile) والأسبستوس الأزرق (كروسيڨولايت Crocidolite) والأسبستوس البني (أموسايت Amosite). وتتميز بلورات الأسبستوس بمقاومتها الشديدة للحرارة والاحتراق وناقليتها الرديئة للكهرباء وكذلك مقاومتها العالية للضغط والشد والاحتكاك، وعدم تأثرها بالحموض، لذلك تم استعمال الأسبستوس في مجال البناء، والعوازل الداخلية والخارجية، وصناعة أنابيب صرف المياه، وفي صناعات البلاستيك والنسيج وغيرها، مما أدى إلى ارتفاع نسب وجوده في الهواء والماء في المناطق الصناعية. وقد أكدت الدراسات أن استنشاق ألياف الأسبستوس الدقيقة المُعلقة في الهواء وخاصة في أماكن العمل، وكذلك تناول مياه الشرب الملوثة به، تؤدي إلى الإصابة بأمراض الجهاز التنفسي وسرطانات الحنجرة والرئة والجهاز الهضمي كالكلية والمعدة والبنكرياس.

ونتيجة للأضرار الجسيمة لهذه المادة فقد عمدت الأبحاث التطبيقية إلى إيجاد مواد بديلة للأسبستوس تتميز بنفس خواصه، ولكنها تكون آمنة بيئياً، كاستعمال الألمنيوم الاسفنجي والسليكون المسامي في الصناعات الكيميائية وصناعة السيارات.

٣.٢.٢.٢. تلوث المياه بالأمطار الحمضية:

تكون درجة حموضة المياه الطبيعية النقية متعادلة الحموضة $pH=7$ ، أما مياه الأمطار العادية فتتراوح درجة حموضتها بين $pH=5.6-5.8$ وذلك نظراً لانهلال غاز ثاني أكسيد الكربون فيها. وتُعد مياه الأمطار ذات طبيعة حمضية إذا بلغت درجة حموضتها $pH=4.1-4.5$ وقد تصل درجة الحموضة في بعض الأحيان إلى نحو $pH=2.2$ أو حتى أقل من ذلك. وقد كان الاعتقاد السائد سابقاً أن منشأ الأمطار الحمضية يرتبط ببعض العوامل الطبيعية، كالغازات الحمضية المرافقة للنشاطات البركانية، أو تلك الناجمة عن احتراق الغابات، أو نتيجة تحلل بقايا النباتات والحيوانات، ولكن أثبتت الدراسات الحديثة أن السبب الرئيس لتشكّل الأمطار الحمضية هو مركبات أكسيد الكبريت وأكسيد الآزوت المُنبعثَة إلى الغلاف الجوي نتيجة احتراق الوقود، كالنفط أو الفحم الحجري في محطات توليد الطاقة الكهربائية، ومُحركات الآليات وأفران المصانع، ومن الاحتراق غير الكامل للوقود كما يحدث في عوادم السيارات، وتتطلق هذه الأكاسيد أيضاً من أبراج المنشآت الصناعية البتروكيميائية ومعامل تكرير البترول أو من مصانع إنتاج الأمونيا ومصانع الأسمدة الزراعية وغيرها. وتتفاعل الغازات المُنبعثَة والحاوية على غاز الكبريت وأهمها غاز ثاني أكسيد الكبريت مع أكسجين الغلاف الجوي وبوجود الأشعة فوق البنفسجية الصادرة عن الشمس، فيتشكل غاز ثالث أكسيد الكبريت، الذي يتحد مع بخار الماء الموجود في الغلاف الجوي مكوناً حمض الكبريت، وفق التفاعل التالي:



كما ويتحد أيضاً أول أكسيد الآزوت مع أكسجين الغلاف الجوي وبوجود الأشعة فوق البنفسجية المُنبعثَة من الشمس، مكوناً غاز ثاني أكسيد الآزوت والذي يتحد بدوره مع بخار ماء الغلاف الجوي مكوناً حمض النترات وكذلك حمض النتريت وهو مُركب غير ثابت، يتفكك ويُطلق غاز أكسيد الآزوت، وفق التفاعل التالي:



يتفكك

↓

NO

يبقى حمض الكبريت المتشكل مُعلّقاً في الهواء على هيئة رذاذ دقيق، ينتقل بواسطة الرياح من مكان إلى آخر، وقد يتحد هذا الرذاذ مع بعض الغازات القلوية الموجودة في الهواء كالنشادر وينتج عن ذلك مُركب كبريتات النشادر، ويبقى رذاذ حمض الكبريت ودقائق كبريتات النشادر

معلقين بالهواء بشكل ساكن ويظهران على هيئة ضباب خفيف في المناخ الجاف. في حين يذوب هذان المركبان في المطر عندما تصبح الظروف مناسبة لسقوط الأمطار، ويكون المطر الهائل عندئذ على شكل مطر حمضي. وعند درجات الحرارة المنخفضة جداً يتساقط رذاذ حمض الكبريت مع الجليد مُختلطاً مع بلوراته. ويُطلق على حادثة تشكل حمض الكبريت وحمض النتريت في الغلاف الجوي بحادثة "الترسيب الحمضي"، ويكون لها شكلان، الأول الترسيب الحمضي الجاف ويكون على هيئة جسيمات جافة أو غازات، ويكون هذا الترسيب الحمضي القريب من مصدر التلوث أي في دائرة لا يتعدى قطرها الـ ٣٠٠ كم، والثاني الترسيب الحمضي الرطب ويكون على هيئة أمطار وضباب وجليد وندى حمضي، ويكون عادةً بعيداً عن مصدر التلوث ما يزيد عن ٥٠٠ كم وقد يصل البعد إلى نحو ٢٠٠٠ كم أو أكثر.

وقد أنشأت حديثاً في عدة دول أوربية محطات لقياس حموضة الأمطار الهائلة عليها وقياس تراكيز كل من الكبريتات والنتريت في غلافها الجوي، ويتم نقل تلك القياسات إلى الشبكة الأوربية لكيمياء الغلاف الجوي والتي تضم أكثر من مائة محطة مُخصصة لهذا الغرض. وتُشير البيانات الصادرة عن البرنامج الأوروبي للمراقبة والتقييم إلى تساقط أمطار حمضية على مناطق واسعة من أوروبا الوسطى، تبلغ درجة حموضتها نحو $pH=4.2$ أو تقل عن ذلك. كما تُبين تقارير منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، أن القيم السنوية لدرجة حموضة الأمطار في بعض المناطق الملوثة في العالم قد بلغت حدوداً بالغة الخطورة، حيث هطلت عليها أمطار حمضية بلغت درجة حموضتها نحو $pH=1.5$ ، أي قريبة من درجة حموضة حمض البطاريات السائلة. تُؤدي الأمطار الحمضية نتيجة احتوائها على حمض الكبريت وحمض النتريت إلى آثار سلبية وأضرار جسيمة على البيئة، فحين تهطل هذه الأمطار على المسطحات المائية كالمحيطات والبحار والبحيرات والأنهار ترتفع درجة حموضة مياهها مُؤديةً إلى هلاك الكائنات المائية فيها، والأمثلة على ذلك كثيرة وبشكل خاص البحيرات المنتشرة في المناطق الصناعية في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا.

كما قد تُؤدي الأمطار الحمضية أيضاً إلى تآكل خزانات مياه الشرب، وقنوات المياه والمعدات المعدنية المُتصلة بخزاناتها. وتمتد الآثار السلبية للأمطار الحمضية إلى المباني والمنشآت الأثرية وكذلك المباني حديثة البناء والمنشآت المعدنية. وتعمل الأمطار الحمضية أيضاً عند هطولها على الأراضي الكلسية على إذابة قدر كبير منها، مُؤديةً إلى انحلال وإذابة وتكهف هذه الصخور، وتؤدي أيضاً إلى إذابة الكربونات من التربة الكلسية، وارتفاع تركيز عنصر الكالسيوم

في المياه، مما يؤثر سلباً على الصفات الخصوبية للتربة الزراعية، نتيجة انحلال عدد كبير من العناصر الكيميائية المغذية، كالبيوتاسيوم والكلسيوم والمغنيزيوم، وإبعادها عن جذور النبات إلى المياه الجوفية مما يعمل على إضعاف النباتات. كما يؤدي هطول الأمطار الحمضية على الأراضي ذات التربة الناتجة عن تجوية الصخور الغرانيتية إلى تفتيتها، وتذيب تلك الأمطار أيضاً عدداً كبيراً من العناصر المعدنية الثقيلة السامة كالرصاص والزنك والألمنيوم من التربة وتنقلها لاحقاً إلى المسطحات المائية. وتؤدي الأمطار الحمضية إلى هلاك مساحات شاسعة من المحاصيل الزراعية والغابات وهو ما يُطلق عليه مُصطلح "موت الغابات" والأمثلة على ذلك كثيرة في بعض مناطق الدول الأوروبية وأمريكا الشمالية.

كما وتُعد الأمطار الحمضية خطرة على الأشخاص الذين يعانون من أمراض القلب أو الجهاز التنفسي، مسببةً لهم الازهاق الشديد للجهاز التنفسي وأزمات قلبية حادة وتنفسية قاسية. يتوقف تأثير مياه الأمطار الحمضية بشكل عام على مجموعة من العوامل أهمها: كمية الهطولات المائية للأمطار الحمضية، والفترات الزمنية التي يستمر فيها تساقط هذه الهطولات، ودرجة حموضتها، والتراكيب الكيميائية والفيزيائية للصخور والتربة، ونوع الغطاء النباتي ومستوى المياه الطبيعية، وكذلك طبيعة المناخ السائد في المنطقة كدرجة الحرارة وعلاقتها بدرجة البخر، وأيضاً وجود ملوثات أخرى في الغلاف الجوي. وقد اثبتت الدراسات العلمية زيادة خطورة الضباب الحمضي عن المطر الحمضي، وذلك لتشكله وتكاثره بالقرب من سطح الأرض، مما يؤدي إلى التسبب بحدوث عدد كبير من المشاكل الصحية في الجهاز التنفسي والربو والصداع والتهابات الجلد، وكذلك مشاكل في الكلى، ويسبب مرض الزهايمر وتلف الجهاز العصبي، وتمتد التأثيرات الضارة للضباب الحمضي أيضاً ليشمل الغطاء النباتي والحيوانات والمباني والمنشآت والآثار والسيارات.

ويُعد منع تشكل المطر الحمضي من خلال وقف انبعاث أكاسيد الكبريت والآزوت في الهواء الحل الأمثل والوحيد لمشكلة المطر الحمضي، ولكنه مُكلف اقتصادياً، وذلك عن طريق إزالة هذه الأكاسيد من الغازات العادمة المنبعثة من محطات توليد الطاقة الكهربائية ومن المحركات التي تعمل بالوقود الأحفوري كالنفط والفحم الحجري. ويتم ذلك عن طريق استعمال أفران ومواقد حديثة، تحد من كمية الغازات المنبعثة وبشكل خاص أكاسيد الكبريت والآزوت، من خلال استعمال أنظمة الحقن بحجر الكلس ضمن أفران الحرق والمواقد التي تعمل بالوقود الأحفوري.

ولقد أظهرت نتائج تجارب المراكز البحثية الأوروبية، أن هذه الأفران والمواق قد تُزِيل نحو ٨٠% من غاز ثاني أكسيد الكبريت، كما ويُمكن أيضاً إزالة الكبريت بعد عملية الاحتراق وقبل أن تنفذ الغازات المتكونة عبر المداخل، وذلك عن طريق غسل هذه الغازات الكبريتية بمحلول قلوي التركيب يعمل على تحويل غاز ثاني أكسيد الكبريت إلى نفايات، كالرواسب الطينية والوحل، وابتاع تلك التقنية يمكن إزالة نحو ٩٥% من غاز كبريت المداخل.

ومن الطرائق المُتبعة أيضاً استعمال وقود ذي تركيز مُنخفض من الكبريت، وبشكل عام تحتوي جميع أنواع الوقود المُستعملة في إنتاج الطاقة على تراكيز قليلة من الكبريت تصل إلى ٠.١٥ - ٣% وزناً، ولكن نظراً لاستعمال الدول الصناعية الكبيرة ملايين الأطنان سنوياً من الوقود، فقد قُدرت كمية غاز ثاني أكسيد الكبريت المُنبعث إلى الغلاف الجوي بنحو ٥٠ مليون طن سنوياً في المناطق الصناعية الأوروبية، في حين تقدر هذه الكمية في الولايات المتحدة الأمريكية بنحو ٤٠ مليون طن سنوياً.

ويمكن التخلص من عنصر الكبريت من مُعظم أنواع الفحم الحجري بواسطة استعمال عملية السحق وبعض العمليات الكيميائية الأخرى، باستثناء فحم اللغيت المُستخرج من القسم الشرقي للأراضي الألمانية والمُستعمل كوقود، فلا يمكن التخلص من الكبريت الموجودة فيه بالطرائق التقنية الحديثة. كما وتُنتج محطات تكرير البترول الخام الحديثة نفطاً يحتوي على نسب منخفضة من الكبريت.

يتم اتباع بعض الإجراءات لتقليل مخاطر الأمطار الحمضية، كطلاء المباني والمُنشآت العمرانية والأوابد الأثرية بأنواع خاصة وجديدة من الطلاء من أجل حمايتها من الآثار البيئية لهطولات الأمطار الحمضية، كما ويُمكن استعمال الكلس في مُعالجة مياه البحيرات التي تتعرض لتساقط الأمطار الحمضية عليها، وذلك برش السطح الخارجي لهذه المُسطحات المائية برذاذ من الكلس بواسطة قوارب خاصة، لمُعادلة حموضة المياه، ولا تُعد هذه الطريقة الحل الأمثل لمشكلة ارتفاع درجة حموضة مياه البحيرات وذلك بسبب تكاليفها المرتفعة، واحتياجها لجهود كبيرة ودقة في التنفيذ، وبشكل خاص ضرورة تحديد كميات الكلس المُضاف بشكل دقيق حتى لا تتحول حموضة مياه البحيرات والمُسطحات المائية إلى قلوية.

٤.٢.٢.٢. تلوث المياه بالمبيدات:

وهي مواد كيميائية تقضى على الكائنات الحية الضارة وغير المرغوب فيها ومنها المبيدات الحشرية (Insecticides)، والمبيدات العشبية (Herbicides)، والمبيدات الفطرية

(Fungicides)، ومبيدات القوارض (Rodenticides)، وهناك بعض المبيدات الأخرى التي تُستعمل في تطبيقات مختلفة مثل مبيدات الطحالب ومبيدات الجراثيم وغيرها. تُعد المبيدات للقضاء على العديد من الكائنات الحية غير المُستهدفة مع الكائنات الضارة المُستهدفة. وقد أدت مواد سامة إلى إيقاف العمليات الحيوية في الكائن الحي غير المرغوب فيه، وتعمل استعمال المبيدات الكيميائية إلى القضاء على عدد كبير من الآفات الضارة بالنباتات مما أدى إلى زيادة في الإنتاج الزراعي، وكذلك القضاء على العديد من الحشرات الناقلة للأمراض المختلفة. وتُستهلك في العالم سنوياً نحو أربعة ملايين طن من المبيدات الحشرية، ولكن رغم ذلك تقضي الحشرات على نصف كمية المحاصيل الزراعية قبل نضجها، ويُستعمل على سبيل المثال في الولايات المتحدة الأمريكية نحو خمسمائة ألف طن من المبيدات سنوياً للقضاء على الحشرات والقوارض والأحياء الدقيقة، التي تُهاجم المحاصيل الزراعية وبكلفة تقدر بنحو بليون ونصف البليون دولار. ويُشكل الاستعمال غير الرشيد والمُفرط لهذه المبيدات الكيميائية خطورة بالغة على الإنسان والكائنات الحية الأخرى، وهي مُلوثات خطيرة للغلاف الجوي والبيئة المائية. يُوجد أنواع عديدة من المبيدات الحشرية التي تتباين فيما بينها بالتركيب الكيميائي والفيزيائي وفي آثارها السامة وفي درجة تلوينها للبيئة. ويُمكن تقسيم هذه المبيدات إلى قسمين رئيسيين:

١ - المبيدات غير العضوية:

- والتي شاع استعمالها قبل التوصل إلى تصنيع المبيدات العضوية ومن أهمها:
- **مركبات الزرنيخ:** وهي مركبات شديدة السمية ويعتمد تأثيرها البيولوجي على درجة ذوبانها في الماء وثباتها العالي على سطح النباتات، ومن أمثلتها زرنيخات الكالسيوم وزرنيخات الرصاص.
 - **مركبات الفلور:** وهي مركبات أكثر سمية على الحشرات من مركبات الزرنيخ، ومن أمثلتها فلوريد الصوديوم، وفلوريد الباريوم، وفلوريد البوتاسيوم، وفلوريد الرصاص.
 - **مركبات الزئبق:** ومن أهم مركباتها كلوريد الزئبق وأكسيد الزئبق، حيث تؤثر أبخرة الزئبق السامة على الحشرات وكذلك على إنبات البذور.
 - **مركبات الفسفور:** ومنها فوسفيد الزنك، حيث ينطلق غاز الفسفور في الجو الرطب وهو غاز شديد السمية وقابل للاشتعال.

- **مركبات الكلورات والبورات:** ومن أهم مركباتها هيبوكلوريت الصوديوم، والبوراكس، وحمض البوريك.

- **مركبات الكبريت:** ومثال عليها مركب ثنائي - ثيوكاربامات.

٢- **المبيدات العضوية:** وتنقسم إلى ثلاثة أنواع وهي:

- **المبيدات الموجودة في النباتات بشكل طبيعي:** وهي عبارة عن مضادات حيوية توجد في بعض النباتات السامة، مثل أحماض البوليتيك "Boletic Acids".

- **المبيدات ذات الأصل النباتي:** مثل البيريثرينات "Pyrethrins" والذي يُستخلص من أزهار البيرثرم.

- **المبيدات العضوية الصناعية:** وتشمل كافة المبيدات الهيدروكربونية الكلورية، ومن أهمها:

▪ سادس كلوريد البنزن.

▪ اللندين.

▪ المبيدات الفسفورية العضوية.

▪ المبيدات الكريماوية.

▪ مبيدات الـ D.D.T "و مشتقاتها:

وتُعد من أكثر أنواع المبيدات انتشاراً واستعمالاً. والـ D.D.T مبيد حشري يدخل في تركيبه الكلور العضوي، وقد تم اكتشافه في أوائل أربعينات القرن الماضي، وانتشر استعماله في جميع أنحاء العالم، وعلى نطاق واسع بسبب تطبيقاته العديدة للإنسان، إضافة إلى سهولة تصنيعه وقلة تكلفته المادية نسبياً. ويتميز الـ D.D.T بأنه مركب مقاوم للتغير الكيميائي (مستقر) كما أنه قليل الذوبان في الماء لكنه يذوب في الدهون، وسام لمعظم اللافقاريات، وخاصة الأسماك، ويتركز في أنسجة الكائنات الحية. وقد تبين تأثيره السلبي بعد ذلك على عدد كبير من الكائنات الحية في أعلى السلسلة الغذائية، وكذلك تأثيره الكبير على الحياة البرية، ونتيجة لذلك تم حظر استعماله أو تم وضع الكثير من القيود والحدود لاستعماله في العديد من الدول.

يتصف عدد كبير من مركبات المبيدات الكيميائية بالثبات في التربة لفترات زمنية طويلة نسبياً قد تصل إلى نحو عشر سنوات أو أكثر قبل أن تتفكك، وقد كان ثبات خصائص هذه المركبات من الأمور الإيجابية كونها تؤمن فترات وقائية طويلة. إلا أن هذه الصفة أصبحت حالياً من الصفات السيئة، لاسيما وأن الإسراف في استعمال المبيدات الكيميائية قد أدى إلى التلوث، حيث تبقى كمية من المبيدات في التربة الزراعية قد تصل إلى نحو ١٥% من كمية المبيد، وتقوم مياه

الأمطار أو مياه الري بنقل هذا الجزء المتبقي من المبيدات إلى المسطحات المائية، أو إلى المياه الجوفية، ويكفي وجود تركيز ٠.٠٠٠٥ مغ/لتر من المبيد في الماء إلى تغير طعمه ورائحته. وما يزيد من خطورة المبيدات الكيميائية أيضاً الأثر التراكمي لها في أنسجة الكائنات الحية حيث يتضاعف تركيزها آلاف المرات خلال مرورها عبر السلاسل الغذائية. ومن أمثلة ذلك تراكم مبيد الـ D.D.T، في أحد السلاسل الغذائية في مستنقع الملح في جزيرة لونج "Long Island"، حيث وُجد أن تركيز المبيد في مياه المستنقع هو ٠.٠٠٠٥ ppm وفي النباتات ٠.٠٠٤ ppm، وفي براغيث البحر ٠.١٦ ppm وفي ثعابين البحر ٠.٢٨ ppm وفي الأسماك ٢.٥٧ ppm، أي بزيادة تركيز المبيد في أجسامها بنحو ١.٥ مليون ضعف عن التركيز الموجود في مياه المستنقع. كما ويؤدي استعمال بعض مبيدات الآفات إلى القضاء على أعداد كبيرة من الكائنات الحية الدقيقة المائية، وذات الأهمية الكبرى في تحقيق التوازن البيئي الطبيعي، وذلك لقيامها في الحفاظ على نسبة الأكسجين الذائب في المياه والمساهمة في تنقيته من العديد من عوامل التلوث، كما وتؤثر المبيدات في الأحياء النباتية الدقيقة التي تعيش في المسطحات المائية حيث يتأثر التركيب الضوئي للعوالق المائية "البلانكتون" حتى بالتراكيز الضئيلة جداً من المبيدات.

تؤثر مبيدات الآفات في الإنسان، بطريقة مباشرة عن طريق الملامسة أو من خلال استنشاق الأبخرة، أو بطريقة غير مباشرة عن طريق الغذاء والمياه الملوثة. ويؤدي تعرض الإنسان للمبيدات إلى حدوث حالات تسمم قد تؤدي أحياناً إلى الوفاة. وتشير تقارير منظمة الصحة العالمية إلى أن نصف حالات التسمم بالمبيدات المسجلة عالمياً تحدث في الدول النامية، رغم أن هذه الدول تستهلك نحو ١٥% فقط من الاستهلاك العالمي للمبيدات، إلا أن ذلك يحدث نتيجة الجهل بخطورة هذه المركبات. كما وتسبب المبيدات عدداً كبيراً من الأمراض الخطيرة كالأمراض السرطانية، وقد أثبتت الدراسات العلمية علاقة مبيد الـ D.D.T ومشتقاته بأمراض السرطان، وبرهنت التجارب على أن مخلفات المبيدات الكيميائية وأهمها الدايبوكسينات، والتي تُعد من أكثرها سميةً تعمل على فتح الشريط الحلزونى للحمض النووي الريبوزي منقوص الأكسجين "DNA" وتحول دون التئامها مرة أخرى.

لقد حققت بعض الدول المتقدمة كالولايات المتحدة الأمريكية وكندا وأستراليا وغيرها تقدماً كبيراً في مجال استعمال وسائل الضبط البيولوجي للآفات والحشرات باستعمال أعدائها الطبيعيين أو ما يُعرف "بالمكافحة الحيوية" وذلك للحد من التلوث البيئي الناجم عن التوسع في استعمال

المُبيدات الحشرية الكيميائية والتي قد تُحدث المناعة لدى الحشرات الضارة، وتقضي على الأنواع المفيدة من الكائنات الحية، وتستنزف بالتالي مصادر الثروة.

٥.٢.٢.٢. تلوث المياه بالأسمدة الكيميائية:

تُستعمل الأسمدة الكيميائية نظراً لزيادة الطلب على الغذاء، وعدم قدرة المزارعين على تطبيق التسميد العضوي للمساحات الواسعة للأراضي الزراعية، وتقوم الأسمدة الكيميائية بزيادة خصوبة التربة ورفع كفاءتها الإنتاجية من المحاصيل الزراعية.

ونقسم الأسمدة الكيميائية المُستعملة حالياً إلى كل من:

١. **الأسمدة البسيطة:** وهي الأسمدة التي تحتوي على عنصر مغذي واحد، وأهمها وأكثرها شيوعاً:

- الأسمدة الآزوتية.
- الأسمدة الفسفاتية.
- الأسمدة البوتاسية.

٢. **الأسمدة المركبة:** وهي التي تحتوي على مجموعة من العناصر الضرورية لتغذية النباتات ونموها، وتحتوي على العناصر الكبرى الثلاثة المُغذية "الأزوت، الفسفور والبوتاسيوم" NPK، وقد تحتوي على بعض العناصر الثانوية الأخرى.

تُعد مركبات الفسفات والنترات، من أغلب المُخصبات الزراعية المُستعملة، حيث يُستعمل في الوقت الحالي نحو ٣ مليار طن من الأسمدة الآزوتية سنوياً، و١.٥ مليار طن من الأسمدة الفسفاتية سنوياً، ويُؤدي الإسراف الشديد في استعمال وإضافة الأسمدة إلى بقاء كميات كبيرة منها في التربة، مما يعمل على الاختلال بالتوازن الموجود فيها من العناصر المُغذية للنبات، كما ويُنقل القسم المُتبقى منها بواسطة مياه الأمطار أو مياه الري إلى مياه الأنهار والبحيرات والمياه الجوفية، فمثلاً تُقدر كمية الأسمدة الآزوتية المُستعملة في تسميد الأراضي الزراعية في فرنسا بنحو تسعة ملايين طن في السنة يبقى منها نحو مليوني طن سنوياً في التربة، وهو الكم الفائض عن حاجة استهلاك النباتات للنترات، والمسؤول عن تلوث المياه الطبيعية، وينطبق هذا أيضاً على الأسمدة الفسفاتية.

تُعد مركبات الفسفور والنترات من المركبات ذات السمية الشديدة، إذا زادت نسبتها في المياه عن حدود معينة وذلك عند إضافتها للتربة بكميات تفوق حاجة النبات، وفي مواعيد غير مناسبة لمرحلة نمو المحاصيل الزراعية، كما وتتميز بنباتها الكيميائي، حيث تكون صعبة الانحلال

وتبقى مدة طويلة في المياه، وتؤدي إلى تحول بعض البحيرات المغلقة إلى مستنقعات بسبب ظاهرة "التشبع الغذائي".

ويمكن تقسيم الأسمدة تبعاً لطبيعة السماد إلى أسمدة صلبة (جافة) كالتي سبق ذكرها، وأسمدة سائلة تستعمل على شكل محاليل ذائبة في الماء، وتحتوي على جميع العناصر التي يحتاجها النبات، ويتم رشها على أوراق النباتات، أو إضافتها مع مياه الري، أو حقنها في التربة، وكذلك أسمدة غازية ومن أهمها سماد ثاني أكسيد الكربون والذي أستخدم حديثاً ضمن البيوت الزجاجية، وفي غرف نمو النباتات، وأحياناً في الحقل، حيث يتم حقنه في التربة مع مياه الري وذلك بهدف زيادة معدل التركيب الضوئي للنبات وتحسين الكفاءة الإنتاجية.

٦.٢.٢.٢. التلوث النفطي للمياه:

يُعد النفط من أخطر مصادر التلوث المائي وأكثرها شيوعاً، وينجم التلوث إما نتيجة تسربات المخزون النفطي من طبقاته الصخرية الطبيعية الخازنة إلى قاع البحر، أو النشاطات البشرية المتمثلة بعمليات استخراج النفط من مكامنه تحت البحرية وعمليات تكريره وصناعته ونقله عبر البحار والمحيطات، حيث يُمثل النقل النفطي نحو نصف الحجم الكلي للنقل البحري، ويُعد النفط من أهم السلع المنقولة فيه. وتقدر كمية الملوثات النفطية التي تُطرح سنوياً في البحار والمحيطات بنحو ٦-١٠ مليون طن، ويُمثل هذا خطراً بالغاً على البيئة البحرية ويُنذر بمشاكل بيئية خطيرة قد تؤثر على التوازن البيئي في البحار وعلى اليابسة على حد سواء، وذلك نظراً لصعوبة التحكم في التلوث البحري أو منع انتشاره، لأنه خطر عائم ومتحرك وتصعب السيطرة عليه، وذلك بسبب تأثره بعدة عوامل كاتجاه الرياح وسرعتها، وحركة المد والجزر، وشدة الأمواج والتيارات المائية واتجاهها وسرعتها. كما وتُعد البحار التي يطل عليها الوطن العربي من أكثر بحار العالم تلوثاً نفطياً، وذلك لأنها تُمثل بحاراً شبه مغلقة لا تتجدد مياهها إلا بعد انقضاء مدة طويلة من الزمن تُقدر بنحو مائة عام أو أكثر، إضافة إلى كثافة حركة النقل البحري فيها، واستعمال هذه البحار من قبل العديد من الدول كمستودعات طبيعية لطرح عدد كبير من الملوثات الأخرى غير النفطية فيها، كمياه الصرف الصحي والصناعي.

يُمثل البحر الأبيض المتوسط معبراً هاماً لنقلات النفط البحرية بين طرفي العالم الغربي والشرقي، ورغم صغر مساحته التي لا تتعدى الـ ١% من مساحة المسطحات المائية للبحار والمحيطات، إلا أنه يُعد من أكثر بحار العالم تلوثاً بالنفط، حيث أشارت الدراسات إلى تسرب نحو ٦٥٠ ألف طن من النفط الخام سنوياً إلى مياه البحر الأبيض المتوسط.

كما ويُعد الخليج العربي أيضاً ذو المساحة الصغيرة والمحدودة من أكثر بحار العالم تعرضاً للتلوث، وأحد أضعف النُظم البيئية المائية، فقد يؤدي أي تسرب نفطي إلى تدهور خطير لبيئة البحرية. وتزداد خطورة التلوث النفطي لمياه الخليج نظراً لاعتماد معظم الدول الخليجية على تحلية مياهه كمصدر رئيس لمواردها المائية.

١.٦.٢.٢.٢ مصادر التلوث النفطي:

يتسرب النفط والمركبات الهيدروكربونية إلى المُسطحات المائية من مصادر عدة وأهمها:

- حوادث انفجار الآبار النفطية البحرية، أو منصاتهما.
- حوادث عمليات الحفر بعد انجاز عمليات التنقيب عن النفط.
- الحوادث الناجمة عن التآكل الكيميائي في أنابيب النفط البحرية.
- حوادث الناقلات البحرية النفطية.
- عمليات تفريغ ماء التوازن في ناقلات النفط.
- حوادث الخلل في عمليتي الشحن، والتفريغ النفطي.
- تبخر الهيدروكربونات النفطية من صهاريج النفط والمُنتجات النفطية والغاز الطبيعي إلى الهواء، ومن ثم سقوطها في البحر مع مياه الأمطار.
- مُخلفات الناقلات وسفن الشحن البحرية، التي تتخلص من مُخلفات الزيوت المُحتركة وغيرها بشكل مُباشر في البحار والمُحيطات.
- طرح مُخلفات الصناعات البترولية والبتروكيميائية من المُنشآت الصناعية إلى مياه البحار مباشرة، دون مُعالجة مُسبقة لهذه النفايات الملوثة بالنفط.
- عملية فصل الماء المالح عن النفط الخام فور استخراجه من جوف الأرض.

٢.٦.٢.٢.٢ الأثر البيئي للتلوث النفطي:

يُشكل النفط المُتسرب إلى المُسطحات المائية طبقة رقيقة فوق سطح الماء، وتُشير الدراسات إلى أن الطن الواحد من النفط المُتسرب يغطي مساحة تقدر بنحو ١٢ كم^٢. ويدوم النفط فترات طويلة جداً في الماء، ولا يتفكك إلا بواسطة أنواع مُحددة من البكتيريا، وأوضحت الأبحاث أن قطرة النفط الواحدة والتي يبلغ قطرها ٠.٠٠٠٠١ مم تعمل على عزل الماء عن أكسجين الهواء، وأن طبقة رقيقة جداً من النفط تعمل على خفض مُعدلات التبخر إلى نحو ٦٠%، وهو أمر في غاية الأهمية لأن البحار والمُحيطات تؤمن نحو ٩٠% من بخار الماء الموجود في الغلاف الجوي.

وتمنع البقعة النفطية الطافية فوق سطح الماء وصول الأكسجين وثنائي أكسيد الكربون والضوء إليه، مما يؤدي إلى عدم قدرة النباتات المائية على القيام بعملية التركيب الضوئي الضرورية لتزويد مياه البحر بالأكسجين وتنقيته من غاز ثاني أكسيد الكربون، كما وتعمل أيضاً على منع وصول أشعة الشمس وبالتالي عزل الحرارة من الوصول إلى أعماق البحار، مما يؤثر على الأحياء المائية التي تعيش فيه ويؤدي إلى تفكك وتهدم الشعاب المرجانية والإسفنج والتي تحتاج إلى عشرات السنين ليتم تشكيل غيرها.

وتتسبب البقع النفطية في زيادة حرارة سطح الماء مما يقلل من كمية الأكسجين الذائب فيه، نتيجة لانخفاض التبادل الأكسجيني بين الغلاف المائي والغازي، ويؤثر ذلك سلباً في سرعة نمو الأحياء المائية، مؤدياً إلى حدوث خلل في التوازن البيئي البحري. ولقد أثبتت الدراسات أن تسرب ٢٠٠ ألف طن من النفط الخام، كافية إلى هلاك جميع الكائنات الحية وموتها في بحر مغلق كبحر البلطيق مثلاً، أي أن عملية تسرب نفطي من ناقلة نفط واحدة كافية لتحقيق ذلك.

يحتوي النفط على مواد عطرية ومواد تدعى باسم "النافثينات" وهي مركبات سامّة تقضي على الكائنات الحية الحيوانية كالأسمك وبيوضها والرخويات والقشريات وغيرها، ولقد أثبتت الأبحاث أن مقدار عشر غرامات فقط من النفط في ١م^٣ من مياه البحر، يكون كافياً لقتل بيوض السمك الموجودة في هذه المياه، كما وأثبتت الدراسات أن تركيز ٠.١ ppm من المواد العطرية يؤثر في القشريات والأحياء التي تعيش في قاع البحر، ويؤدي إلى نقص الكائنات الحية النباتية، ومن أهمها العوالق البحرية "البلانكتون"، والتي تقوم بتوفير غاز الأكسجين للغلاف الجوي، وتُعد مصدراً غذائياً رئيساً للأحياء البحرية، حيث تستطيع البلانكتون التكاثر بسرعة هائلة. تتجمع الهيدروكربونات المكونة للنفط في أنسجة الأحياء البحرية وتنقل هذه المواد والمركبات السامة إلى الإنسان عبر السلاسل الغذائية، وقد تم إثبات أن بعضها كمركب "البنزوبيرين" تُسبب الأمراض السرطانية للإنسان.

بعد انتشار بقعة النفط في المسطحات المائية وقلة ثخانتها بمرور الزمن تستطيع أشعة الشمس وأكسجين الغلاف الجوي من إحداث تفاعل كيميائي ضوئي يتسبب في أكسدة بعض السلاسل الهيدروكربونية المكونة للنفط، وتكوين مركبات ومواد كيميائية لم تكن موجودة سابقاً، مثل الكحولات والألدهيدات والكيوتونات، وهي مواد ذات جزيئات صغيرة نسبياً وسهلة الذوبان في الماء، فتُصبح في مُتناول الكائنات الحية البحرية، وتؤدي هذه المواد السامة إلى حدوث مزيد من الأضرار في البيئة البحرية. ومن المعروف بأن النفط غير قابل للذوبان في الماء، إلا أن جزءاً

من البقعة النفطية يختلط بمياه البحر مشكلاً نوع من المُستحلب والذي يمتص العديد من المواد العضوية الضارة الموجودة في مياه البحر، كـبعض المُبيدات الحشرية أو المُنظفات الصناعية، كما ويقوم هذا المُستحلب بامتصاص بعض العناصر المعدنية الثقيلة مثل الرصاص والكاديوم والزنك فيزداد تركيزها في هذه المنطقة وتزداد معه الآثار السلبية السامة، مما يؤدي إلى هلاك الحياة البحرية فيها.

يؤدي ارتفاع أمواج البحر والتيارات المائية إلى امتزاج البقعة النفطية بطبقة المياه تحت السطحية، فيتكون نوع آخر من المُستحلبات، يظهر على شكل رغوة سميكة فوق البقعة النفطية، تُغطي مساحات واسعة قد تمتد إلى مئات الكيلومترات المربعة، تثقلها الرياح والأمواج والتيارات المائية إلى مناطق أخرى. كما ويمتد التلوث الناتج عن بقعة النفط ليشمل قاع البحر أيضاً، فبعد انطلاق المواد الطيارة من النفط وتكون المُستحلب تبقى الأجزاء الثقيلة غير القابلة للتطاير أو الذوبان طافية فوق المياه مدة من الزمن، ثم تتأكسد بالأكسجين الجوي أو بواسطة بعض العوامل الميكروبيولوجية الأخرى وتتحول إلى كتل سوداء صغيرة تعرف باسم "كرات القار"، وتحتوي هذه الكرات على مواد إسفلتية ومواد هيدروكربونية ومركبات عضوية، تحملها التيارات المائية وتنتشرها على الشواطئ، كما ويتسبب بعضها مع مرور الزمن إلى القاع البحري مما يؤدي إلى تلوثه. ولا بد من الإشارة هنا إلى خطورة التلوث النفطي في المناطق التي تعاني شحاً في المياه العذبة، وتعتمد على تحلية مياه البحار للحصول على الماء العذب، كدول الخليج العربي مثلاً، حيث يؤدي ظهور أي نسبة ولو ضئيلة جداً من التلوث النفطي إلى تغير جودة ومواصفات المياه المحلاة، كالمذاق مثلاً، ويؤثر أيضاً على قدرة محطات التحلية والتقطير على التشغيل، لاسيما وأن هذه المنشآت الصناعية تعتمد على مياه الخليج في تبريد أجهزتها.

٣.٦.٢.٢.٢ طرائق مكافحة التلوث النفطي:

تُوجد طرائق مُختلفة لمُعالجة التلوث النفطي، ويتم عادةً في بعض الحالات اتباع أكثر من طريقة للحد منه ومكافحته في المناطق الساحلية أو البحرية، وأهم هذه الطرائق:

- الطرائق الميكانيكية:

تُستعمل في هذه الطرائق الحواجز الطافية فوق سطح الماء، والتي تعمل على إحاطة البقعة النفطية، لمنع من متابعة امتدادها، ويُستعمل في هذه الطريقة أيضاً مجموعة من التجهيزات الخاصة والكانسات والجرافات لحصر بقع النفط العائمة، حيث تعمل على زيادة ثخانة هذه البقع والإقلال من مساحة انتشارها، ويمكن بعد ذلك شفط البقعة بشكل تدريجي بواسطة مضخات، ثم

تُجمع في خزانات موجودة على الشواطئ أو على ظهر السفن، ويتم لاحقاً فصل النفط عن الماء، وتستغرق هذه التقنية عادة وقتاً طويلاً تتعرض خلاله البقع النفطية إلى عوامل المناخ والتيارات البحرية، مما يؤدي إلى تشتتها وتحطمها بفعل الضوء، الأمر الذي يزيد من صعوبة عملية المكافحة ويقلل من فعاليتها.

كما ويمكن أيضاً استعمال مواد ماصة للبقع النفطية، والتي يمكن استعمالها عدة مرات، وذلك برشها على البقع بشكل مباشر، مثل الرش بالصوف الزجاجي باستعمال قوارب صغيرة، وتعمل هذه المواد على العرقلة والحد من حركة البقع النفطية، ويتم بعد ذلك جمعها بواسطة شبكات دقيقة، ثم تُنقل إلى مواقع مُحددة على الشاطئ ليتم التخلص من المركبات النفطية إما بالحرق في أفران خاصة أو بالفصل، ويتم استعمال أجهزة خاصة للشفط يمكنها فصل النفط عن الماء. ومن الطرائق الميكانيكية أيضاً أجهزة الحزام الناقل، حيث يمرر حزام معدني عبر طبقة النفط اللزجة، مما يؤدي إلى التصاق المركبات النفطية به، والتي يتم التخلص منها لاحقاً، وكذلك الكاشطات وهي أجهزة خاصة تقوم بقشط طبقة النفط السميكة الطافية فوق سطح الماء.

- الطرائق الكيميائية:

تُستعمل مواد كيميائية خاصة تقوم بعملية تبديد البقع النفطية، وعملية التكسير والتفكيك، حيث تُرش المواد الكيميائية على البقع النفطية مباشرة، كرش أنواع معينة من المذيبات والمُنظفات الصناعية والمساحيق ذات الكثافة العالية، مما يؤدي إلى تفتيت البقع النفطية وتحولها بعد ذلك إلى ما يشبه مُستحلب ينتشر في الماء ويذوب فيه أو يغوص إلى القاع نتيجة ارتفاع كثافته، كما وقد تُحول المركبات النفطية باستعمال مواد كيميائية محددة إلى مادة هلامية، تُجمع باستعمال تيار هوائي، ويمكن التخلص منها فيما بعد بواسطة الحرق، وقد تُستعمل مواد كيميائية أخرى تقوم بحرق المركبات والمواد الهيدروكربونية ذات اللزوجة المُخفضة، كما ويمكن استعمال بعض المركبات المُحفزة التي تقوم بزيادة سرعة أكسدة المركبات الهيدروكربونية وتفكيكها. يُسبب استعمال الطرائق الكيميائية في البيئة البحرية ضرراً بيئياً كبيراً، وذلك نتيجة استعمال المذيبات "المُشتتات" بكميات كبيرة قد تساوي في بعض الأحيان كمية النفط المراد إزالته، الأمر الذي يُضيف تلوثاً آخر إلى التلوث النفطي، كما وتقوم المواد الكيميائية التي تحرق المركبات النفطية بتلويث الهواء.

تقوم هذه الطرائق الكيميائية على رفع درجات التلوث وزيادة تعقيدها ولا تُعد حلاً مثالياً ونهائياً لمكافحة التلوث النفطي.

- الطرائق البيولوجية:

تتعرض البقع النفطية العائمة فوق المُسطحات المائية البحرية إلى التنقية الذاتية "Self-Purification" فبعد تبخر الأجزاء الطيارة من النفط يتعرض الجزء المُتبقى لعمليات مُختلفة من الأكسدة وأهمها الأكسدة البيولوجية "Biodegradation" والتي تتم بواسطة الكائنات الحية الدقيقة مثل البكتيريا والفطريات والتي تعيش في البيئة البحرية المائية. تتجمع البكتيريا المُؤكسدة للمواد الهيدروكربونية النفطية حول القطرات النفطية، وتعمل على تفكيك الغشاء الفاصل بين قطرات المواد الهيدروكربونية والماء، مما يؤدي إلى ازدياد تحول المواد النفطية إلى قطرات دقيقة جداً في مياه البحر، وبالتالي ازدياد السطح المُعرض لعملية التحلل البيولوجي. وتتأثر عملية الأكسدة البيولوجية بعوامل عدة منها:

وفرة الكائنات الحية الدقيقة التي تقوم بعملية الأكسدة البيولوجية في البيئة البحرية. كمية الأكسجين الذائب في الماء، حيث تزداد عملية التحلل البيولوجي للبقع النفطية مع زيادته، وهذا ما يُفسر صعوبة تحليل كرات القار السوداء المترسبة على قاع البحر. درجة حرارة الماء، حيث تحتاج عملية إتمام الأكسدة البيولوجية إلى مياه دافئة. تركيز المواد والمركبات النفطية في البيئة البحرية، فكلما كان التركيز منخفضاً سهل التحلل البيولوجي للبقع النفطية.

تُوفر المواد الغذائية للبكتيريا التي تقوم بعملية الأكسدة البيولوجية وبشكل خاص مُركبات الآزوت والفسفور، والتي توجد بشكل قليل في مياه البحر، وقد ساهمت الأبحاث الحديثة بتحضير مركب زيتي من الآزوت والفسفور، يُضاف إلى مياه البحر الملوثة بالنفط لتنشيط البكتيريا التي تقوم بتحليل البقع النفطية.

وقد تم تحديد نحو ٢٠٠ مجموعة من الأحياء الدقيقة التي تتغذى على البقع النفطية، حيث تستطيع هذه الكائنات الحية تحليل المواد النفطية وفي الوقت ذاته تحويل البقع النفطية إلى دقائق وقطرات دقيقة في الماء ومن أمثلتها: *Pseudomonas*، *Arthrobacteria*، *Cornybacteria*. ويتم حالياً استعمال الأحياء الدقيقة، على نطاق تجاري واسع في الشركات النفطية والمختبرات الكيميائية المُختصة في الدول المُتقدمة، للقيام بمُعالجة البقع النفطية في البحار والمحيطات، إلا أن لهذه الطريقة مساوئها أيضاً كاستهلاك كميات كبيرة من الأكسجين الذائب في المياه أثناء قيام الأحياء الدقيقة بعملية الأكسدة البيولوجية، مما يؤثر بشكل ضار على

الأحياء المائية الموجودة تحت البقع النفطية، إضافة إلى الفعالية البطيئة لهذه الطريقة في حالة الكوارث النفطية الكبيرة والتي تغطي مساحات مائية واسعة.

٣.٢.٢. الملوثات الفيزيائية للمياه:

١.٣.٢.٢. التلوث الحراري للمياه:

يحدث التلوث الحراري نتيجة طرح المياه الصناعية الناجمة عن أنشطة المصانع إلى مصادر المياه، حيث تقوم المنشآت الصناعية كمحطات توليد الطاقة الكهربائية والمحطات النووية والصناعات النفطية والمصانع الأخرى بسحب المياه الباردة من المسطحات المائية لتبريد آلاتها ومن ثم تُعاد هذه المياه ساخنةً إليها، ونظراً لضخامة كمية المياه الساخنة المطروحة، فإنها تؤدي إلى رفع درجة حرارة المصدر المائي بضع درجات، لأن درجة حرارة مياه تبريد المنشآت الصناعية تزداد بين ٦-١٩°م، وفي حالات استثنائية قد ترتفع إلى أكثر من ذلك.

وتُعد محطات توليد الطاقة الكهربائية المصدر الرئيس للتلوث الحراري للمياه، حيث تستعمل هذه المحطات ٤٠% فقط من الطاقة المنتجة في توليد الكهرباء، في حين ينتقل القسم المتبقي من الطاقة إلى ماء التبريد، وتؤدي محطات توليد الكهرباء التي تعمل بالطاقة النووية إلى حدوث تلوث حراري أكبر مقارنة مع المحطات التي تعمل بالوقود الأحفوري، أما الصناعات الأخرى كصناعة الحديد والصلب والصناعات النفطية وغيرها فتعد مصدراً ثانوياً للتلوث الحراري للمياه. ويؤدي التلوث الحراري إلى حدوث تأثيرات عدة على المياه أهمها:

- التأثيرات الفيزيائية:

يؤدي ارتفاع درجة حرارة المياه إلى حدوث تغير في صفاته الفيزيائية، حيثُ تنخفض درجة ذوبان الأكسجين، وكذلك تنخفض درجتي كثافة ولزوجة الماء، مما يُسرّع في ترسيب المواد المُعلقة فيه، كما هو مبين في (الجدول-٣).

جدول-3: درجة إذابة الأكسجين وكثافة ولزوجة المياه مع ازدياد درجة الحرارة.

درجة الحرارة °م	مقدار إذابة الأكسجين مغ/لتر	الكثافة	اللزوجة
٠	١٤.٦	٠.٩٩٩٨٤	١.٧٨٧
٥	١٢.٨	٠.٩٩٩٩٧	١.٥١٩
١٠	١١.٣	٠.٩٩٩٩٧	١.٣٠٧

١٠.١٣٩	٠.٩٩٩١٠	١٠.٢	١٥
١.٠٠٢	٠.٩٩٨٢٠	٩.٢	٢٠
٠.٨٩٠	٠.٩٩٧٠٤	٨.٤	٢٥
٠.٧٩٨	٠.٩٩٥٦٥	٧.٦	٣٠

- التأثيرات الكيميائية:

يعمل ارتفاع درجة حرارة المياه على زيادة كمية المياه المتبخرة وتسريع التفاعلات الكيميائية، حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة بمقدار عشرة درجات مئوية إلى تضاعف سرعة التفاعلات الكيميائية بين المركبات، مما يساهم في إزالة كميات كبيرة من الأكسجين الذائب في المياه، كما ويقوم التلوث الحراري للمياه بدور العامل المحفز على أكسدة العناصر المعدنية التي لا تُعد عادة كملوثات للمياه، كعنصري الحديد والمنغنيز، لتتحول بعد أكسدتها إلى مركبات كيميائية سامة، مما يجعلها خطراً على الأحياء المائية. كما وتعمل أملاح الفسفات والكربونات والكبريتات وبعض المواد العضوية المضافة إلى الماء المستعمل للتبريد، على زيادة نمو الطحالب والأشنيات والنباتات المائية، وكذلك على زيادة درجة عسر المياه، عند طرح هذه المواد في المسطحات المائية، كما ويؤدي إضافة المواد المعقمة إلى الماء المستعمل في التبريد كإضافة الكلور مثلاً، إلى تغيير في صفاته كالمذاق واللون وإلى هلاك والقضاء على الأحياء الدقيقة الضرورية في السلسلة الغذائية.

- التأثيرات البيولوجية:

تتباين درجة حرارة الأنهار والبحيرات والمحيطات من فصل إلى آخر ومن منطقة إلى أخرى، وبشكل عام تتراوح درجة حرارة المياه بين درجة الصفر المئوية و ٣٢°م، وتختلف قدرة الكائنات المائية الحيوانية على تحمل درجة حرارة الماء من نوع إلى آخر، فمثلاً تستطيع الأسماك أن تتحمل حداً أقصى من الحرارة يبلغ نحو ٣٤°م. وبشكل عام يؤدي ارتفاع درجة حرارة المياه إلى أكثر من ٣٢°م إلى تناقص عدد الأحياء المائية، ومن الملاحظ أن الأحياء كاملة النمو تكون أكثر تحملاً للفرقات الحرارية من بعض صغار تلك الأحياء أو يرقاتها، كما وتوجد أيضاً علاقة طردية بين حرارة المياه واستهلاك الأسماك للأكسجين، فنتيجة ارتفاع درجة حرارة الماء عن المعدلات التي تتأقلم معها الأسماك تزداد سرعة تنفسها، وترتفع بالتالي معدلات استهلاكها للأكسجين لتتمكن من التأقلم مع الشروط البيئية الجديدة في الماء، فمثلاً يستهلك سمك السلمون

من الأكسجين الذائب في الماء في أقصى درجة حرارة يتحملها أربعة أضعاف ما يستهلكه في الظروف الاعتيادية، وهذا يعني بأن ارتفاع درجة حرارة المُسطحات المائية الناتج عن ضخ المياه الساخنة إلى المُسطحات المائية يؤدي إلى رفع درجة حرارتها ويزيد من استهلاك الأسماك للأكسجين، مما يؤدي إلى انخفاض مُعدلات أعمارها وأوزانها وأحجامها، وبالتالي انخفاض مقدار الثروة السمكية.

كما يعمل انخفاض كمية غاز الأكسجين الذائب نتيجة لارتفاع درجة حرارة المياه على زيادة استقلاب الكائنات الحيوانية المائية وزيادة نشاط الأنزيمات، فتستهلك كميات أكبر من الغذاء في وقت أقصر مما لو كانت في بيئتها الاعتيادية، وقد يؤدي زيادة معدل الاستقلاب إلى نقص في الموارد الغذائية وبالتالي ينتج عنه نقص في عدد الكائنات الحيوانية الحية. نتيجة لهذه التغيرات البيئية قد تموت بعض الأنواع من الأحياء المائية الحيوانية، أو قد يهاجر بعضها الآخر، أو قد تُستبدل بأنواع أخرى قادرة على التكيف في البيئة الجديدة. ومن الجدير بالذكر أن التلوث الحراري يُسبب في كثير من الأحيان أضراراً للكائنات الحية النباتية والحيوانية أكثر مما تُسببه المواد الملوثة التي تطرحها المصانع ذاتها في المياه، الأمر الذي يؤثر بشكل خطير على البيئة المائية.

توجد عدة طرائق يمكن أن تعمل على حل مشكلة التلوث الحراري، كإلقاء المياه الساخنة في أعماق البحار لأن درجة حرارة المياه العميقة تكون أقل من المياه السطحية، أو تحويل المياه الصناعية إلى حلقات مُغلقة لا تُطرح مباشرة في المُسطحات المائية وذلك عن طريق:

١- تمرير الماء الساخن ضمن بحيرات صناعية يتعرض فيها الماء لعمليات التهوية والتبريد قبل أن يُطرح إلى المُسطحات المائية الطبيعية.

٢- استعمال مُكثفات هواء بارد وأنظمة تبريد مُغلقة لتحسين عمل محطات توليد الطاقة الكهربائية.

٣- استعمال أبراج تبريد أو قنوات تصريف لتبريد الحرارة الفائضة.

٤- تطوير أنظمة تتيح الاستفادة من المياه الساخنة الناتجة عن النشاطات الصناعية واستعمالها في صناعات أخرى أو في التدفئة أو لتحلية مياه البحر.

وتجدر الإشارة بأن هناك آثاراً بيئية ضارة للمياه الباردة أيضاً، فقد وجد أن طرح مياه خزانات السدود الباردة يؤدي إلى أضرار بيئية هائلة على الحياة المائية، ومثال على ذلك هلاك الأسماك

المحلية في العديد من الأنهار ذات الحرارة المرتفعة نسبياً في استراليا عند طرح مياه خزانات السدود الباردة فيها.

٢.٣.٢.٢. التلوث الإشعاعي للمياه:

يحدث التلوث الإشعاعي عند تسرب المواد المشعة من أماكن تخزينها أو نتيجة لانفجار الذخائر المزودة بها كالصواريخ ذات الرؤوس النووية، أو القنابل الانشطارية النووية....إلخ. وتندمج المواد المشعة بعد تسربها في عناصر البيئة المختلفة وتلوثها، وهي مواد ذات خطورة بالغة، ولها صفة تراكمية في أجسام الكائنات الحية ويظهر تأثيرها التراكمي عند الوصول إلى حد مُعين.

يختلف تأثير الإشعاعات على الكائنات الحية حسب نوع الكائن الحي، ونوع ودرجة الإشعاع، والفترة الزمنية للتعرض الإشعاعي، وعند الإنسان قد يكون التأثير حرارياً فقط، أو قد تكون التأثيرات بيولوجية كالتسمم الإشعاعي الحاد أو المزمن، وأخطر التأثيرات الإشعاعية الإصابة بالأمراض السرطانية المختلفة.

تتعرض الكائنات الحية إلى مستويات قليلة من الإشعاعات من مصادر طبيعية متعددة، كالأشعة الكونية والمواد المشعة الموجودة في التشكيلات الصخرية للقشرة الأرضية، أو الموجودة في الغلاف الجوي أو الغلاف المائي، وقد يتم التعرض للإشعاعات من مصادر اصطناعية مثل الأشعة المُستعملة في الأغراض الطبية والصناعية، كالأشعة السينية والنظائر المشعة المُستعملة في تشخيص الأمراض وعلاجها، أو التجهيزات المُستعملة في الأبحاث العلمية، ويُعد أكثر المصادر خطورة إشعاعية هي تلك الناجمة عن التفجيرات النووية التجريبية في البحار والمحيطات، أو المرتبطة بحوادث تسرب إشعاعي من منشآت المفاعلات النووية. تتلوث المياه بالإشعاع عند طرح المفاعلات النووية للنفايات المشعة فيها، ومثال على ذلك منشآت معالجة الوقود النووي المُستنفذ، وهذه النفايات المشعة ذات خطورة شديدة نظراً لامتلاكها مستوى عالياً من الإشعاع، وبقاء بعض النظائر المشعة الموجودة فيها لفترات زمنية طويلة قد تستغرق آلاف السنين، لأنها تمتلك أعماراً نصفية طويلة. ولايوجد طريقة محددة لجعل النفايات المشعة غير ضارة وأمنة بيئياً، ولذلك يتم اتخاذ وسائل متعددة للتخلص منها مثل:

١- تخزينها بعيداً عن الكائنات الحية وفترات زمنية طويلة جداً حتى يتم تحليلها، فالنفايات المشعة الناتجة عن وحدات استعادة الوقود النووي تكون على الأغلب على شكل محاليل تُحول إلى وحدات معالجة وتخزن لمدة ١٠-١٥ سنة في حاويات خاصة للخن، ذات جدران متعددة، أو قد يتم غمرها في خزانات مليئة بالماء حتى تفقد حرارتها وتخفض شدة إشعاعاتها، ثم يتم تركيز هذه المحاليل، وتوضع في حاويات خاصة مغلقة بإحكام، أو ضمن خزانات إسمنتية مدفونة في أماكن معزولة عميقة بعيدة عن التجمعات السكانية والمنشآت العمرانية المأهولة، كالمناطق القطبية أو أعماق البحار والمحيطات.

٢- قد تُدفن النفايات المشعة في أماكن مختارة من اليابسة، ذات تراكيب جيولوجية مستقرة وبعيدة الاحتمال عن تعرضها للمخاطر الزلزالية، أو في مناجم عميقة يحتوي تركيبها الجيولوجي على طبقات متعددة من الصخور الملحية والتي قد تكونت في البحار القديمة، وتكون هذه الصخور الملحية مستقرة عادة على مدى سنين طويلة جداً.

ولا تتوفر أماكن مناسبة تماماً لدفن النفايات النووية المشعة، كما وتوجد أيضاً شكوك حول إمكانية بقاء النفايات النووية المشعة بمعزل عن البيئة لفترات زمنية طويلة، لاسيما وأن الدراسات الجيولوجية الحديثة قد أثبتت إمكانية حدوث الزلازل نتيجة تسرب الحرارة من النفايات النووية المشعة.

تُعد طرائق التخلص بشكل آمن من النفايات المشعة عالية الخطورة والناجمة عن التوسع الكبير في استعمال الطاقة النووية لتوليد الطاقة الكهربائية، وكذلك السعي المتواصل لمنع انتشار التلوث الإشعاعي من القضايا العالمية بالغة الصعوبة، ولذلك تعمل الدول المتقدمة حالياً على الحد من بناء المنشآت النووية والمفاعلات المولدة للطاقة الكهربائية، والتوجه نحو تطوير بعض الطاقات البديلة المتجددة والنظيفة والأمنة بيئياً.

الباب الثاني

تنقية المياه ومعالجتها

- المقدمة

- الفصل الأول:

تنقية المياه السطحية

- الفصل الثاني:

تنقية المياه الجوفية

- الفصل الثالث:

معالجة مياه الصرف الصحي

- الفصل الرابع:

تحلية ماء البحر

- الفصل الخامس:

تطهير المياه

- الفصل السادس:

رصد تلوث المياه ومكافحته

الباب الثاني

تنقية المياه ومعالجتها

المقدمة:

تُعد مياه الأمطار المصدر الرئيس للمياه العذبة، وتنقسم عند وصولها إلى السطح الخارجي للأرض إلى مياه جارية تجري في المسيلات المائية والأنهار أو تتجمع في الوهاد والمنخفضات مكونة البحيرات، ومياه متسربة تتسرب عبر قطاعات التربة والشقوق الصخرية مكونة المياه تحت السطحية الجوفية، بينما يتبخر جزء من مياه الأمطار ويعود إلى الغلاف الجوي. وقد لا تكون جميع المياه العذبة صالحة للشرب أو للاستعمالات المنزلية لما تحتويه من ملوثات مختلفة. ويمكن تقسيم الشوائب الموجودة في المياه الجارية على سطح الأرض إلى نوعين رئيسيين:

- المواد العالقة في الماء:

كفروع النباتات والأعشاب وفتات الصخور وبعض الكائنات الحية الدقيقة كالبيكتيريا والطحالب، كما وقد تحتوي المياه السطحية أيضاً على بعض النفايات والمنظفات الصناعية وآثار للمبيدات أو الأسمدة أو على بعض المواد العضوية الناتجة عن تحلل بعض الكائنات الحية.

وبشكل عام يُمكن التخلص من المواد العالقة في الماء بطرائق بسيطة.

- المواد الذائبة في الماء:

كأملاح الفسفات والنترات والكلوريدات والكبريتات والكربونات لبعض العناصر كالصوديوم والبوتاسيوم والكلسيوم والحديد والمنغنيز. وتتباين نسبة الأملاح الذائبة تبعاً لنوعية المياه ومصدرها، فعلى سبيل المثال تحتوي المياه السطحية على نحو ٣٠ مغ/لتر من الأملاح

الذائبة، ولاسيما إذا كان مجرى النهر يجري في مناطق صخرية، في حين قد تصل هذه النسبة إلى نحو ٣٠٠-٥٠٠ مغ/لتر في بعض المياه الجوفية. وبشكل عام تتميز طرائق التخلص من المواد الذائبة في الماء بصعوبتها مقارنةً مع طرائق التخلص من المواد العالقة فيه.

• مياه الشرب:

يؤدي شرب الإنسان للماء غير النقي إلى خطورة بالغة على صحته كإصابته ببعض الأمراض نتيجة وجود بعض الكائنات الحية الدقيقة الممرضة فيه، أو إصابته بالتسمم نتيجة إحتواء الماء على بعض العناصر المعدنية الثقيلة كالزئبق والرصاص وغيرها، أو وجود تراكيز عالية من المركبات الملحية الذائبة كأملح الفسفات أو النترات، أو قد يؤدي إلى إصابته بالأمراض السرطانية المختلفة لوجود بعض المواد المسببة للسرطانات كالفيايات الصناعية أو بعض المبيدات الحشرية والعشبية والفطرية أو بعض المواد المشعة في المياه.

ويتم تطهير المياه الحاوية على الملوثات باستعمال غاز الأوزون مثلاً، وعند وجود هذه المواد بكميات محدودة يمكن امتصاصها بواسطة الفحم المنشط "الفعال"، أو تنقية المياه بكبريتات الألمنيوم "الشبة"، إلا أنها قد تؤدي إلى بقاء كمية منحلّة من عنصر الألمنيوم في الماء، لذلك يُفضل حالياً عدم معاملة المياه بهذه المادة، حيث أثبتت بعض الدراسات وجود علاقة بين إصابة الإنسان بمرض الزهايمر ووجود عنصر الألمنيوم في مياه الشرب، ولذلك يجب أن تكون مياه الشرب خالية من جميع الملوثات كما ويجب العناية الشديدة بتحليل عينات مياه الشرب بشكل دوري في مراكز مُتخصصة قبل ضخها إلى خزانات التجميع والتوزيع.

وقد قامت كل دولة بوضع مواصفات لمياه الشرب الخاصة بها وللمياه الصالحة لمختلف الاستعمالات البشرية، وكذلك تم وضع مواصفات خاصة ومُحددة "قياسية" لمياه الشرب من قبل مجموعة من الدول المُتقدمة، ومن قبل هيئة الصحة العالمية "WHO" كمرجع لكل دول العالم (جدول-٤). تتباين مواصفات مياه الشرب من بلد إلى آخر، فقد لا تتوفر في بعض البلدان مياه نقية صالحة للشرب في بعض مناطقها، بينما في بلدان أخرى تزداد نسبة الأملاح في مياهها عن الحدود القصوى المسموح بها، فتكون مواصفات مياه الشرب فيها أقل بكثير من المواصفات القياسية آنفة الذكر.

وقد ازداد الوعي العالمي بأهمية توفر المياه العذبة الصالحة للشرب أو لري المزروعات منذ منتصف القرن الماضي، وعقدت مؤتمرات دولية عديدة تم فيها مناقشة المواضيع المرتبطة بكافة

قضايا المياه العذبة على المستوى العالمي، واعتبرت السنوات من ١٩٨٠-١٩٩٠م على أنها العقد الدولي لمياه الشرب وتنقيتها، ونتيجة لذلك تم وضع برامج خاصة لترشيد استعمال المياه بشكل عام ومياه الشرب بشكل خاص، وعدم استعماله في أغراض أخرى، كما تم تركيز الأبحاث العلمية والتقنية لتطوير طرائق تنقية المياه ومعالجتها. والجدير بالذكر أن هذه الطرائق تتباين تبعاً لمصادر المياه الطبيعية كالمياه السطحية، والمياه الجوفية، أو طرائق معالجة المياه المستعملة، كمياه المخلفات الصناعية والصرف الصحي والزراعي.

جدول-٤: القيم الحدية لتراكيز الأيونات المختلفة في مياه الشرب ، بـمغ/م^٣.

العنصر	منظمة الصحة العالمية "WHO"	اتحاد الدول الأوروبية	ألمانيا	أمريكا	فرنسا	سويسرا
Al	--	50	200	--	--	500
As	50	50	40	50	50	--
Ba	--	100	--	1000	--	--
Pb	100	50	40	50	50	50
Cd	10	5	6	10	5	10
Cr	--	50	50	50	50	20(IV)
Fe	100 1000*	300	1500	50- 300	100	100
F	600 1700*	700- 1500	--	200/ 1000	1500	1500
Cu	50 1500*	50	100	10-50	50	1500
Mn	100 500*	50	50- 90	45	50	50
NO3	45	50	--	--	50/ 100	40
NO2	--	1	--	--	--	--
Hg	1	1	4	2	1	3
Se	10	10	8	10	10	--

200	--	50	100	10	--	Ag
1500	--	5000	100/ 2000	100/20 00	5000 15000*	Zn
*نصف القيمة الضرورية للتركيز / أعلى قيمة حدية مسموح بتواجدها.						

الفصل الأول

تنقية المياه السطحية

١.١. المقدمة:

تُعد المياه السطحية كمياه الأنهار والبحيرات مياهاً متوسطة النقاوة، وقد تحتوي هذه المياه على المخلفات العضوية الناجمة عن تحلل الكائنات الحية النباتية والحيوانية، وقد تتعرض مياهها للتلوث من مصادر مختلفة مما يجعلها غير صالحة للشرب أو للاستعمال البشري، كالتلوث بمياه الصرف الزراعي أو الصحي، وبمخلفات المصانع الكيميائية. ويجب عند تنقية المياه إجراء التحليل البيولوجي لها قبل استعمالها في أغراض الشرب للتأكد من خلوها من جميع أنواع البكتيريا والجراثيم. ويُعد القضاء على بكتيريا إيشيريشيا كولي *Escherichia Coli* واسعة الانتشار والمصاحبة لفضلات الإنسان والحيوان مؤشراً إلى القضاء على أنواع البكتيريا الضارة الأخرى الموجودة فيه بنفس الوقت، لذلك يبحث القائمون على تنقية المياه عن وجود بكتيريا إيشيريشيا كولي قبل بدء عملية التنقية وبعدها. كما وقد تحتوي المياه السطحية كمياه البحيرات والسدود المنشأة على مجاري الأنهار على بعض الأنواع من الطحالب وبعض النباتات المائية والتي تُعد من المشاكل الكبرى في عملية تنقية المياه، ويتم القضاء على الطحالب باستعمال بعض المواد الكيميائية مثل كبريتات النحاس والتي تُوضع وفق نسب محددة في أكياس من القماش، وذلك نظراً لسميتها ومن ثم تُدلى من قوارب في الماء، ويتم بعد ذلك سحبها في البحيرات أو توضع ضمن خزانات مياه السدود، كما ويمكن مكافحة الطحالب في خزانات المياه الصغيرة عن طريق تغطية هذه الخزانات لمنع وصول أشعة الشمس إليها، مما يؤدي إلى وقف نمو الطحالب ومنع تكاثرها، ويمكن أيضاً وضع أكياس من مسحوق الفحم الذي يؤدي إلى تلون المياه باللون الأسود مانعاً من وصول ضوء الشمس إلى الطحالب، مما يؤدي إلى القضاء عليها.

٢.١. مراحل تنقية المياه السطحية:

١.٢.١. الترشيح:

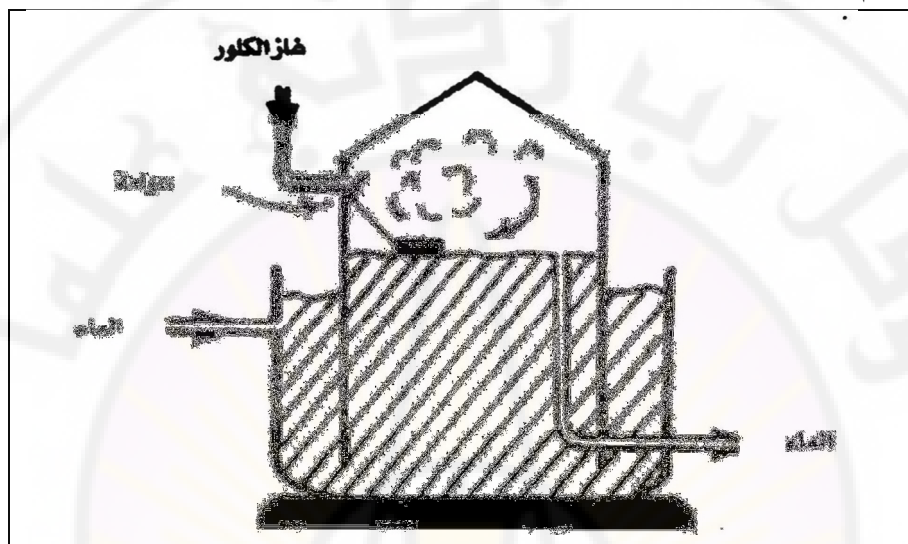
وتعتمد على استعمال طبقات رملية ناعمة ذات مواصفات خاصة، ويتراوح سماكة كل طبقة رملية نحو ٩٠ سم، تليها طبقة من الحصى، وعندما تمرر المياه خلال هذه الطبقات يتم احتجاز جميع المواد العالقة فيها كالحالب والأعشاب والشوائب الأخرى، وفي بعض الحالات يمكن التخلص أيضاً من البكتيريا الموجودة. وتتميز طريقة الترشيح هذه بالكفاءة المتوسطة، وتُدعى بطريقة "الترشيح البطيء" ويمكن استعمالها في ترشيح كميات المياه التي قد تصل إلى نحو ٢٠-٤٠ مليون لتر/هكتار من طبقة ترشيح، وتكفي الكمية السابقة استهلاك بعض المدن الصغيرة من المياه. من مساوئ هذه الطريقة تشكل طبقة من الخبث في الطبقات العليا من الرمال والتي قد تؤدي مع مرور الوقت إلى سد مسامات الرمال وخفض سرعة عملية الترشيح، مما يستدعي إزالتها، ويتم ذلك غالباً بطريقة يدوية بطيئة وبواسطة أدوات بسيطة كالجاروف مثلاً. وفي بعض محطات معالجة المياه يتم إدخال المياه إلى أحواض ترسيب، حيث تترسب المواد العالقة والشوائب الأخرى تحت تأثير الجاذبية الأرضية، وتُعد المدة الزمنية التي تُترك فيها المياه في أحواض الترسيب، وكذلك سرعة دخول المياه إليها، وطبيعة المواد العالقة فيها، ذات تأثير بالغ على كفاءة الترسيب في هذه الأحواض.

٢.٢.١. المعالجة بغاز الكلور:

يُعد غاز الكلور عاملاً مؤكسداً قوياً، ويقوم بأكسدة المواد غير العضوية وكذلك المواد العضوية الموجودة في المياه السطحية والنتيجة عن بقايا الكائنات الحية النباتية والحيوانية إلى مركبات عديدة أخرى غير ضارة، كما يؤدي استعمال الكلور إلى القضاء على جميع أنواع البكتيريا الموجودة في هذه المياه، لاسيما وأن المياه السطحية مكشوفة ومعرضة للعديد من الملوثات. تتم إضافة غاز الكلور إلى المياه التي سبق ترشيحها عن طريق أجهزة الكلورة "Chlorinators"، حيث يُضاف غاز الكلور بكميات دقيقة ومحسوبة من قبل الهيئات الصحية، وتعتمد الكمية المُضافة على نوعية المياه السطحية وما تحتويه من مواد عضوية وغيرها. وتُعد معالجة المياه المرشحة بغاز الكلور من أهم مراحل تنقية المياه السطحية (شكل-٣).

قد تؤدي أكسدة المواد العضوية بالكلور إلى ظهور طعم أو رائحة غريبة في الماء، وذلك نتيجة للتغير الحاصل في طبيعة المواد العضوية المتبقية فيه عند المعاملة بالكلور، ويمكن التخلص من المواد العضوية المتبقية عن طريق زيادة نسبة غاز الكلور المُضافة، أو عن طريق التهوية

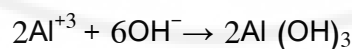
بتوجيه المياه لتتساقط على مصاطب خاصة، أو برشها من فتحات معينة على شكل رذاذ فتختلط بأكسجين الهواء مما يُساعد على أكسدة ما تبقى من مواد عضوية وتحويلها إلى مركبات عديمة الطعم والرائحة، وكما قد يؤدي رش الماء على طبقات من الفحم المُنشط (الفعال) إلى امتصاص كل طعم أو رائحة غريبة فيه.

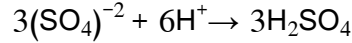


شكل-٣: جهاز مُعالجة المياه السطحية بغاز الكلور.

٣.٢.١. الترويق:

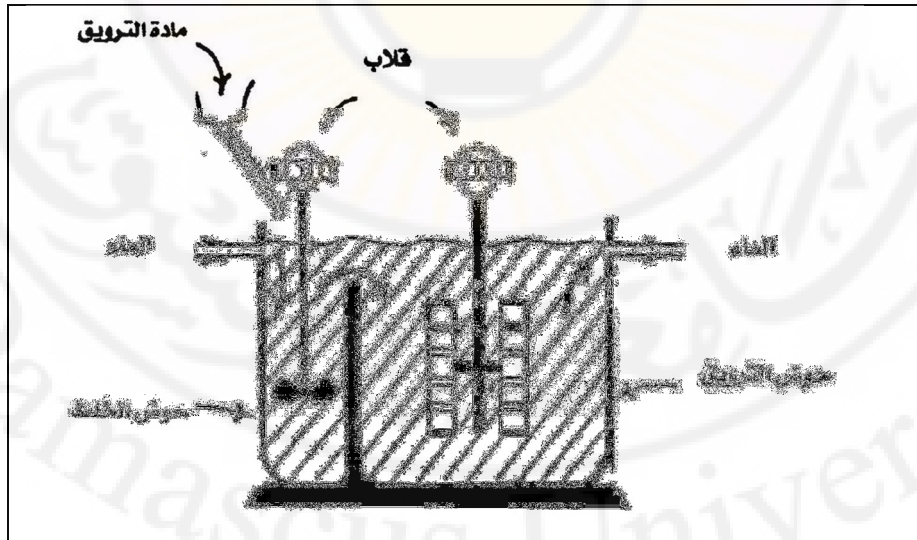
تحتوي المياه السطحية غالباً على بعض المواد الغروية التي تُسبب عكارتها، وهذه المواد عبارة عن جسيمات مُنتاهية في الصغر، يوجد على سطحها شحنات كهربائية مُتمثلة مما يؤدي إلى تنافرها عن بعضها بعضاً وبقائها مُعلقة في المحلول. تعمل إضافة بعض المواد الكيميائية التي تتأين في الماء، وتعطي أيونات ذات شحنة مخالفة لشحنة الجسيمات الغروية، على تعادل المواد الغروية فتبدأ بالتجمع على شكل حبيبات حجمها أكبر، ومن ثم تُشكل راسباً يتم فصله بعد ذلك عن المحلول. ويوجد العديد من المواد الكيميائية التي تُستعمل لهذا الغرض كمركب كلوريد الحديد، ولكن أكثرها شيوعاً وأقلها تكلفةً مادة كبريتات الألمنيوم "الشبة"، حيث يُستعمل محلول يتراوح تركيزه بين ٥-١٠ %، وتُوضح المُعادلات الكيميائية التالية ذلك:





تتفاعل أيونات الألمنيوم الناتجة عن تأين كبريتات الألمنيوم مع أيونات الهيدروكسيل الناتجة عن تأين الماء مكونة هيدروكسيد الألمنيوم، وهو مركب ذو خصائص قاعدية ضعيفة، وكذلك يتفاعل جذر الكبريتات السالب مع أيونات الهيدروجين الناتجة عن تأين الماء مكوناً حمض الكبريت، وهو مركب ذو خصائص حمضية قوية، لذلك يكون الماء الرائق الناتج عن عملية الترويق بمادة كبريتات الألمنيوم "الشبة" حمضياً، فإذا كان تأثير المياه المستعملة قليلاً إلى حد ما، فيمكنه أن يُعادل الحمضية السابقة، أو تعادل عن طريق إضافة مواد قلوية كالكلس مثلاً، والذي يتفاعل مع حمض الكبريت مكوناً كبريتات الكالسيوم غير الذائبة في الماء، والتي يتم التخلص منها بعد ذلك بعملية الترشيح.

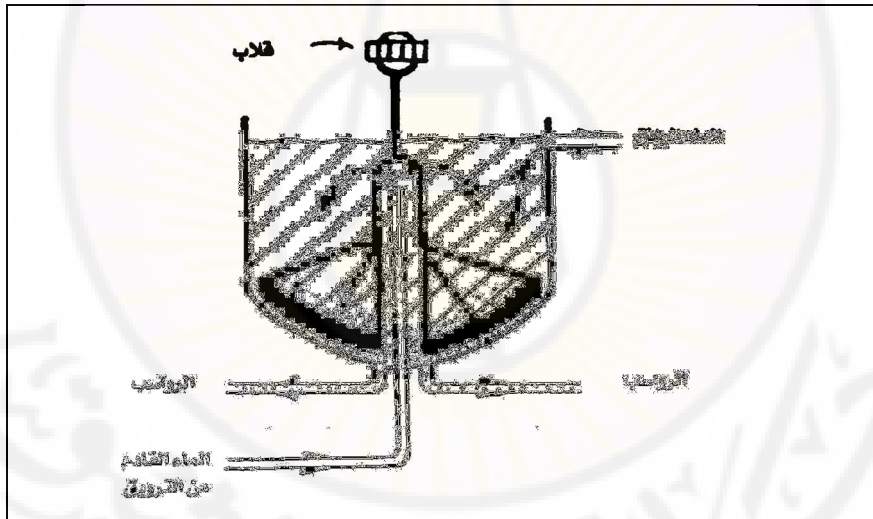
يُوضح (الشكل-٤) جهاز الترويق والذي يتألف من حوض جانبي تمزج فيه المادة الكيميائية المستعملة في عملية الترويق مع الماء، وحوض الترويق الذي يتم نقل المياه السابقة إليه، حيث يتم تقليب الماء فيه لفترة زمنية محددة إلى أن يتم تجمع الجسيمات الغروية على هيئة ندف، ومن ثم يُسحب الماء من أنبوب جانبي تقع فتحة عند السطح العلوي للحوض، وفي بعض الأحيان قد تُمزج المادة الكيميائية المستعملة بعملية الترويق مع قليل من الفحم المنشط، لامتصاص الروائح وإزالة طعم المياه غير المستساغ، ويتم التخلص من الفحم المنشط مع الرواسب الناجمة عن عملية الترشيح.



شكل-٤: جهاز ترويق المياه السطحية.

٤.٢.١. الترسيب:

تدخل المياه الناتجة عن عملية الترويق إلى أحواض الترسيب من أنبوبة موجودة في منتصفها (شكل-٥)، وتكون قاعدة هذه الأحواض مائلة نحو مركزها الداخلي، حيث تتجمع المواد المترسبة عليها، والتي يتم دفعها بواسطة قلابات تدور ببطء وبشكل مستمر وملامسة لقاعدة أحواض الترسيب المائلة، وبذلك يتم دفع الرواسب المتوضعة إلى أنبوبة تصريف في مركز قاعدة حوض الترسيب، بينما تُسحب المياه الراكدة نسبياً من أنبوبة مثبتة على جانب الحوض في مستوى سطح الماء. تكون أحواض الترسيب بشكل عام كبيرة الحجم، تتقوى ضمنها كميات كبيرة من المياه، ويتم ترك المياه في أحواض الترسيب لمدة زمنية محددة قد تصل إلى نحو ست ساعات، وذلك تبعاً لنوعية المياه ومقدار ما تحتويه من رواسب، بحيث يتناسب حجم حوض الترسيب مع كمية المياه المُعالجة، ومع زمن الترسيب اللازم.



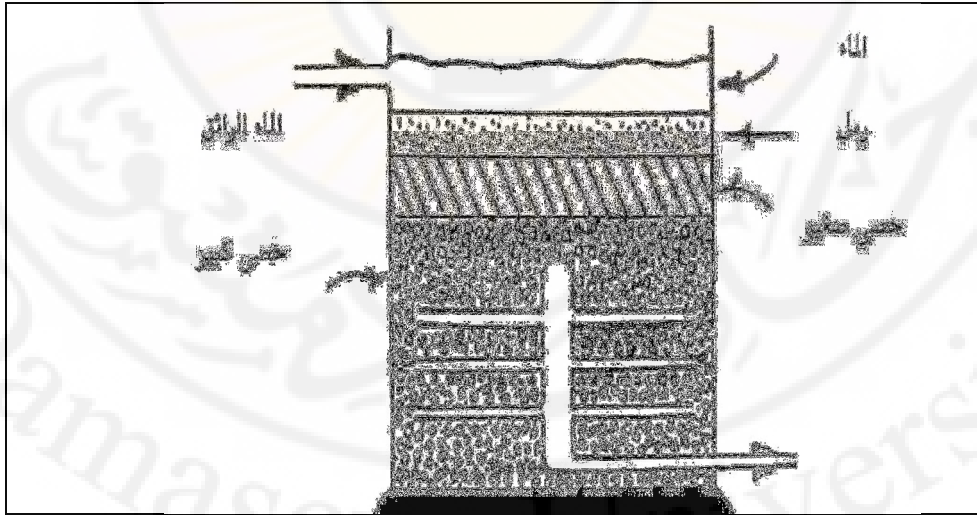
شكل-٥: حوض ترسيب شوائب المياه السطحية.

٥.٢.١. الترشيح السريع:

وهي الخطوة الأخيرة من الخطوات المتبعة في تنقية المياه السطحية، وتمكن من إزالة جميع الرواسب المتبقية من أحواض الترسيب، ويتم ذلك بإدخال المياه إلى أحواض الترشيح السريع من الأعلى حيث تمر ضمن عدة طبقات تساعد على تدرج سرعة جريان المياه، تتكون الطبقة العليا

من نوع خاص من الرمل، وتكون حجم مكوناته الحبيبية أكبر بقليل من حجم حبيبات الرمل المستعملة في عملية الترشيح البطيء، وتصل سماكة هذه الطبقة إلى نحو ٧٥سم، أما الطبقة التي تقع للأسفل منها فهي عبارة عن حصى متوسطة الحجم يتراوح قطرها بين ٢-٧٥ ملم، وتوزع الحصى وفق نظام معين بحيث تكون الحصى صغيرة الحجم في الأعلى والحصى كبيرة الحجم في أسفل الطبقة. تُجمع المياه المرشحة عن طريق مجموعة من الأنابيب موزعة داخل طبقة الحصى، وتقوم هذه الأنابيب بتجميع المياه في أنبوبة رئيسة تخرج من قاعدة حوض الترسيب (شكل-٦).

يتم غسل المرشحات في أحواض الترشيح السريع من وقت إلى آخر لاستبعاد الرواسب العالقة فيها، ويتم الغسل عن طريق إمرار تيار مائي تكون جهته مُعكسة لجهة دخول المياه إلى المرشح، أي من طبقة الحصى في أسفل حوض الترشيح إلى طبقة الرمل أعلاه، مع مُراعاة التحكم بقوة تيار المياه وذلك للمحافظة على عدم اختلال توزيع الحصى وحبيبات الرمال. يكون الماء الناتج عن عملية الترشيح السريع نقياً ورائقاً وصالحاً للشرب، ولكن يجب تحليله للتأكد من نسبة الكلور الموجودة فيه، والذي تم استهلاك قسم كبير منه في أكسدة بعض المواد العضوية خلال عمليات الترسيب والترشيح، ويجب بعد ذلك تعديل نسبة الكلور في الماء بحيث لا تزيد عن ١ ppm عند الانتهاء من عمليات تنقية المياه السطحية، وهذه النسبة ذات أهمية للمحافظة على نظافة الماء ومنع تلوثه عند نقله في أنابيب التوزيع.



شكل-٦: حوض الترشيح السريع للمياه السطحية.

الفصل الثاني

تنقية المياه الجوفية

١.٢. المقدمة:

تُمثل المياه الجوفية مصدراً هاماً من مصادر المياه العذبة الصالحة للشرب والري، وتكون تلك المياه عادةً ذات نوعية جيدة وذلك لخضوعها للترشيح الذي تقوم به طبقات التربة والصخور بشكل طبيعي أثناء تسرب المياه ضمنها. وقد تكون الآبار قريبة من سطح الأرض، كما هو الحال في الآبار قليلة العمق، عندئذ تزداد فرصة تعرضها للتلوث البيولوجي أو الكيميائي، أو تكون الآبار عميقة فتتضاءل فرص التلوث فيها، لأن المياه تمر في هذه الحالة خلال طبقات صخرية مسامية نفوذة إلى نصف نفوذة، والتي تعمل على ترشيح الماء وتخليصه من أغلب الشوائب، إلا أن استعمال الآبار لحقن النفايات الصناعية والإشعاعية في الطبقات الجوفية العميقة الحاملة للمياه المالحة، يؤدي إلى احتمالية تسرب هذه النفايات إلى الطبقات العليا الحاملة للمياه العذبة، كما وقد يؤدي الضخ والاستخراج المفرط للمياه العذبة الموجودة في الآبار القريبة من البحار إلى تسرب المياه المالحة من البحر باتجاه الطبقات الحاملة واختلاطها بالمياه العذبة، وقد يحدث التلوث أيضاً نتيجة التخلص السطحي للنفايات الصناعية، حيث تدفن الدول الصناعية مخلفاتها ونفاياتها في برك تخزينية سطحية، ويؤدي عدم إحكام عزل هذه البرك إلى تسرب النفايات إلى الطبقات الحاملة للمياه العذبة. ويُعد تلوث المياه الجوفية بمياه الصرف الصحي من أهم مصادر التلوث، لاسيما في القرى أو بعض المدن التي لا تتوفر فيها أنظمة جيدة للصرف الصحي، مما قد يؤدي إلى تسرب الطفيليات والبكتيريا والمواد العضوية إلى المياه الجوفية.

تُعد المشكلة الرئيسة للمياه الجوفية احتوائها على الأملاح، وذلك نتيجة انحلال بعض الأملاح أثناء مرور الماء خلال مسامات وشقوق التربة والصخور، كما ويؤدي الاستعمال المفرط للمبيدات الحشرية والأسمدة مع اتباع الطرائق القديمة للري كالغمر مثلاً، إلى زيادة تركيز الأملاح والمعادن والنترات في المياه الجوفية. وتعتمد المسافة التي يقطعها الملوّث في التربة على التالي:

- نوع وكمية المادة الملوثة.
- طبوغرافية المنطقة.

- الخصائص الهيدرولوجية للطبقة الصخرية الخازنة للمياه الجوفية.

فمثلاً تقوم الطبقات الصخرية الرملية الناعمة بإزالة المواد الصلبة العالقة والبكتيريا من المياه عبر مسافات قصيرة، إلا أن الطبقات الصخرية الحطامية المفككة الخشنة والمكونة بشكل رئيس من الحصى والحجارة تسمح بمرور نفس الملوثات لتقطع مسافة أطول، أما الملوثات الذائبة فلا تتأثر بعملية الترشيح داخل التربة وإنما تتأثر بعوامل أخرى كقوى الامتزاز مثلاً.

ويقاوم الانسياب البطيء للمياه الجوفية عبر طبقات التربة وطبقات الصخور تحت السطحية أيضاً من مخاطر الملوثات، حيث تتساق المياه الجوفية بسرعة وسطى تقدر بنحو ٣م/سنة أو في اليوم، وذلك تبعاً لدرجة نفاذية تلك الطبقات، ونتيجةً لذلك قد يستمر تلوث الخزان الجوفي للمياه مئات السنين قبل اكتشاف أي تلوث فيه. وبشكل عام تتفاوت الأملاح الذائبة في المياه الجوفية في كميتها ونوعيتها تبعاً للبيئة المحلية، ومصدر المياه، ومساحة وحجم الخزان المائي الجوفي، ونوعية الطبقات الصخرية الخازنة للمياه، وتركيبها الكيميائي، ونوع ودرجة انحلالية المعادن، وزمن تلامس المياه الجوفية مع صخور الخزان المائي الجوفي، وسرعة تدفق المياه الجوفية.

ونتيجة لزيادة الملوثات التي تتعرض لها التربة كماً ونوعاً، فقد أصبحت معظم المياه الجوفية تحتاج إلى عمليات تنقية متقدمة وباهظة التكاليف قبل ضخها إلى شبكة التوزيع.

٢.٢. العمليات المتبعة لتنقية نوعية المياه الجوفية وتحسينها:

١.٢.٢. التهوية:

يؤدي ضخ الهواء في المياه الجوفية إلى إزالة بعض الغازات الذائبة فيها كغاز ثاني أكسيد الكبريت وكبريت الهيدروجين والمواد الهيدروكربونية الطيارة، كما يؤدي إلى أكسدة بعض الأيونات المعدنية كالحديد والمنغنيز. وتُستعمل التهوية أيضاً بهدف تبريد مياه بعض الآبار العميقة التي تكون درجة حرارتها عالية، حيث يستدعي تبريدها حفاظاً على كفاءة عمليات المعالجة الأخرى.

٢.٢.٢. إزالة المواد العالقة:

لا تحتوي المياه الجوفية عادة على المواد العالقة، وتتم عملية ترشيح المياه بشكل طبيعي في مسامات التربة عند تسريبها إلى باطن الأرض، حيث تعمل التربة والطبقات الصخرية عمل

المُرشحات المُستعملة في تنقية المياه السطحية، وتكون نسبة العكارة في المياه الجوفية قليلة جداً أو معدومة مقارنةً مع المياه السطحية التي تحتوي على نسب عالية من العكارة. وتُزال المواد العالقة الموجودة في المياه الجوفية بعملية "الترشيح" أو "التخثير" Coagulation والتي تعتمد على التصاق المواد العالقة بالمرشحات، ومن ثم فصلها بعد ذلك. والمرشحات المُستعملة لهذا الغرض عبارة عن رمل السليكا (كثافته ٢.٦٥ غ/سم^٣) وفحم الانتراسيت. ويعتمد زمن ترسيب المواد العالقة على كمية وحجم هذه المواد، وتقوم عملية التخثير بتسهيل عملية ترسيب المواد العالقة صغيرة الحجم (جدول-٥) ويُستعمل تجارياً لهذا الغرض أنواع عديدة من أملاح الحديد والألمنيوم مثل: $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ و $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. وتُعد عملية إزالة المواد العالقة من المياه ضرورية لمنع حدوث مشاكل تشغيلية في شبكات التوزيع من جهة، ولحماية الصحة العامة عند استعمالها للشرب من جهة أخرى، فقد تعمل المواد العالقة على حماية الأحياء الدقيقة من تأثير المواد المُطهرة، أو قد تتفاعل معها، مما يقلل من فعاليتها في القضاء على الكائنات الحية الدقيقة، كما وقد تترسب المواد العالقة في بعض أجزاء شبكة التوزيع، مما يُسبب نمو البكتيريا التي تُؤدي إلى تغير في رائحة وطعم ولون المياه.

٣.٢.٢. إزالة عُسَر الماء:

تحتوي المياه الجوفية على نسبة من الأملاح الذائبة أثناء تسرب المياه عبر مسام التربة، فإذا زادت هذه النسبة عن حد معين، أصبحت المياه الجوفية غير صالحة للاستعمال البشري أو ري المزروعات. وتُعد أكثر الأملاح الذائبة في المياه الجوفية ضرراً أملاح كربونات الكالسيوم والمغنيزيوم وكبريتات الكالسيوم والمغنيزيوم، حيث يؤدي وجودها إلى منع تشكل الرغوة مع الصابون، نظراً للتبادل الحاصل بين هذه الأملاح وأملاح الصوديوم أو البوتاسيوم للأحماض الدهنية طويلة السلسلة التي تكون الصابون، فتتكون أملاح الكالسيوم أو المغنيزيوم للأحماض الدهنية، وهي قليلة الذوبان في الماء، تظهر على شكل عكارة تترسب فيما بعد، كما يؤدي رفع درجة حرارة المياه الحاوية على هذه الأملاح إلى ترسبها على شكل قشور في الأواني والغلايات ومواسير المياه، مما يؤدي إلى تآكل جدرانها وانسداد أنابيبها، واستهلاك طاقة عالية.

جدول- ٥ : تأثير حجم المواد العالقة على زمن الترسيب.

الحجم ب مم	نوعية المواد	المساحة السطحية	زمن
------------	--------------	-----------------	-----

الترسيب		العائقة	
٠.٣ ثانية	٠.٤٨٧ بوصة مربعة *	حصى	١٠.٠٠٠٠٠
٣ ثانية	٤.٨٧٠ بوصة مربعة	رمل خشن	١.٠٠٠٠٠٠
٣٨ ثانية	٤٨.٧٠٠ بوصة مربعة	رمل ناعم	٠.١٠٠٠٠٠
٣٣ دقيقة	٣.٣٨ قدم مربع **	طمي أو غرين	٠.٠١٠٠٠٠
٥٥ ساعة	٣٣.٨ قدم مربع	البكتيريا	٠.٠٠١٠٠٠
٢٣٠ يوم	٣.٨ ياردة مربعة ***	الجسيمات الرغوية	٠.٠٠٠١٠٠
٦.٣ سنة	٠.٧ هكتار ****	الجسيمات الرغوية	٠.٠٠٠٠١٠
٦٣ سنة	٧ هكتار ،	الجسيمات الرغوية	٠.٠٠٠٠٠١

** ١ قدم مربع = ٩٢٩.٠٣١٦ سم^٢

**** ١ هكتار = ١٠.٨ سم^٢

* ١ بوصة مربعة = ٦.٤٥١٦ سم^٢

*** ١ ياردة مربعة = ٨٣٦١.٢٧ سم^٢

- ويُطلق مصطلح "عُسر المياه الجوفية" على المياه الحاوية على الأملاح، وتُقسم إلى ما يلي:
- **عُسر المياه المؤقت:** ويُطلق عليه أيضاً "العُسر الكربوناتي"، نتيجة وجود أملاح كربونات وبيكربونات الكالسيوم والمغنيزيوم في المياه الجوفية.
 - **عُسر المياه الدائم:** ويُسمى "بالعُسر غير الكربوناتي" وينتج عن وجود أملاح كبريتات وسليكات الكالسيوم والمغنيزيوم في المياه الجوفية.
- يُعرف مجموع تركيز عنصري الكالسيوم والمغنيزيوم **بالعُسر الكلي للمياه**، ويُقاس عادة عُسر المياه بمُكافئ كربونات الكالسيوم، ويُعبر عنه بـ ميلي غرام من كربونات الكالسيوم المُكافئة لكل لتر ماء، وتحدد درجة عُسر المياه تبعاً لتركيز كربونات الكالسيوم (جدول-٦). وتُعد المياه التي تحتوي على عُسر كلي ١٠٠-١٥٠ مغ مُكافئ كربونات كالسيوم/لتر ولا يزيد عن ٤٠ مغ مُكافئ كربونات مغنيزيوم/لتر، مناسبة للاستعمال البشري حسب جمعية أعمال المياه الأمريكية (AWWA).

جدول- ٦ : العلاقة بين درجة عُسَر المياه وتركيز كربونات الكالسيوم.

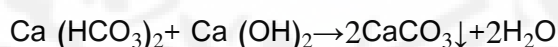
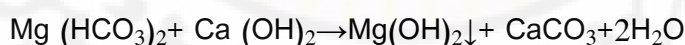
تركيز كربونات الكالسيوم بـ مـغ مكافئـ / لتر	درجة عُسَر المياه	
٥٠ - ٠	مياه يسرة	١
١٠٠ - ٥٠	مياه مترسطة اليسر	٢
١٥٠ - ١٠٠	مياه ذات عُسَر خفيف	٣
٢٠٠ - ١٥٠	مياه ذات عُسَر متوسط	٤
٣٠٠ - ٢٠٠	مياه عسرة	٥
٣٠٠ <	مياه شديدة العُسَر	٦

١.٣.٢.٢. طرائق إزالة عُسَر المياه:

وتدعى "بعملية التيسير"، ويُعد المبدأ العام لمُعالجة عُسَر المياه هو إزالة مُركبات الكالسيوم والمغنيزيوم الذائبة فيها بطريقة الترسيب الكيميائي ثم الترشيح. وتوجد عدة طرائق لإزالة العُسَر المؤقت والعُسَر الدائم للمياه الجوفية أهمها:

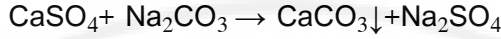
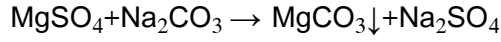
١.١.٣.٢.٢. طريقة هيدروكسيد الكالسيوم (الكلس المطفأ) وكربونات الصوديوم (رماد الصودا):

تُعالج المياه الجوفية بمزيج من هيدروكسيد الكالسيوم مع كربونات الصوديوم، ويُؤدى ذلك إلى إزالة العُسَر المؤقت للمياه، عن طريق تفاعل هيدروكسيد الكالسيوم مع بيكربونات المغنيزيوم ومع بيكربونات الكالسيوم، مُكونة هيدروكسيد المغنيزيوم وكربونات الكالسيوم عديمة الذوبان في الماء وفق التفاعلات التالية:



ويُمكن التخلص من الرواسب الناتجة بعملية الترشيح.

كما ويُؤدى إضافة كربونات الصوديوم إلى إزالة العُسَر الدائم للمياه الجوفية، عن طريق تفاعل كربونات الصوديوم مع كبريتات المغنيزيوم ومع كبريتات الكالسيوم مُكونة كربونات المغنيزيوم وكربونات الكالسيوم غير الذائبة في الماء وفق التفاعلات التالية:



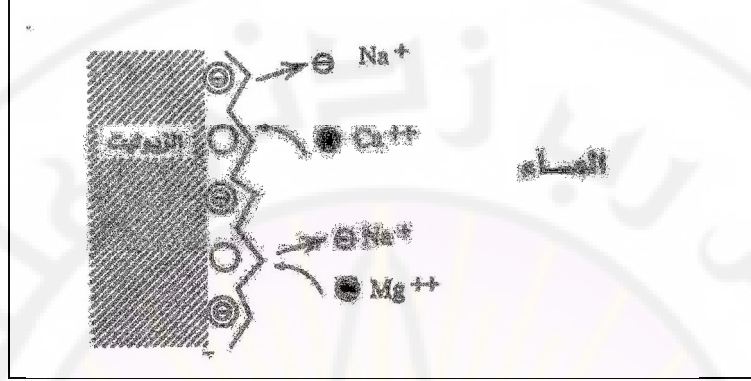
ويمكن التخلص من الرواسب الناتجة بعملية الترشيح، ويبقى مركب كبريتات الصوديوم في الماء والذي لا يسبب عُسراً للمياه. إن معالجة طن واحد من المياه الجوفية تحتاج إلى نحو ٢٥٠ غ من هيدروكسيد الكالسيوم ونحو ٥٠ غ من كربونات الصوديوم، ويكون الماء الناتج قلويًا، نظراً لوجود زيادة طفيفة من المزيغ المُستعمل (هيدروكسيد الكالسيوم وكربونات الصوديوم)، ولمعادلة هذه القلوية يُمرر كمية من غاز ثاني أكسيد الكربون في الماء قبل ترشيح الرواسب. من أهم ميزات الطريقة السابقة لإزالة عُسر المياه الجوفية سهولتها، ولكن لها أيضاً بعض المساوئ، ومنها تشكل كميات كبيرة من الرواسب التي تحتاج إلى عملية ترشيح، كما أنها مُكلفة مادياً. ويوجد طرائق أخرى لإزالة عُسر المياه إضافة إلى طريقة الترسيب الكيميائي كالتبادل الأيوني والتناضح العكسي.

٢.١.٣.٢.٢ استعمال الزيوليت لإزالة عُسر المياه الجوفية:

الزيوليت عبارة عن مجموعة من المعادن الألوموسليكاتية البلورية، ومنها الألوموسليكات الصوديوم ذات الصيغة الكيميائية $(\text{Na}_2\text{Al}_2\text{SiO}_8 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ ، والتي تُعد من أهم المواد ذات القدرة العالية على التبادل الأيوني، فعندما تمر المياه الجوفية خلال الزيوليت، يتم التبادل الأيوني بينهما، حيث يُثبت الزيوليت أيونات الكالسيوم والمغنيزيوم الموجودة في الماء بدلاً من أيونات الصوديوم المتوفرة في شبكته البلورية، ويتم طرح الأيونات آفة الذكر إلى المياه، وبذلك تتم إزالة عُسر المياه الجوفية (شكل-٧)، وتتشكل مركبات كبريتات الصوديوم وكربونات الصوديوم، والتي لا تُسبب عُسراً للمياه، ويبقى الماء صالحاً للاستعمال.

يفقد الزيوليت صلاحيته للتبادل الأيوني بعد مدة من الاستعمال، عندما تحل أيونات الكالسيوم والمغنيزيوم الموجودة في الماء مكان جميع أيونات الصوديوم المتوفرة في الشبكة البلورية للزيوليت. ولإعادة تجديد الزيوليت يُستعمل محلول كلوريد الصوديوم، والذي يؤدي إلى تشكيل مركبات كلوريد الكالسيوم وكلوريد المغنيزيوم، حيث تحل أيونات الصوديوم مكان أيونات الكالسيوم والمغنيزيوم المرتبطة بالزيوليت، ومن ثم يُغسل الزيوليت بالماء، ويُصبح صالحاً للاستعمال مرة أخرى. تُعد طريقة استعمال الزيوليت في إزالة عُسر المياه الجوفية، طريقة سهلة وبسيطة وذات مزايا كثيرة، حيث تُحول كميات صغيرة من الزيوليت المُستعمل في المنازل، الماء العُسر إلى ماء

يسر بسرعة، وتتم إزالة الرواسب بعملية الترشيح، وأما أهم مساوئ هذه الطريقة فهي عدم صلاحيتها لإزالة المواد العالقة أو المواد الغروية الموجودة في الماء، على الرغم من مروره خلال طبقات عديدة من الزيوليت، وكما قد لا يستسيغ البعض طعم المياه الناتجة عن المعالجة به.



شكل - ٧: التبادل الأيوني بين الزيوليت والماء.

٤.٢.٢. إزالة المواد غير العضوية:

وتتضمن على سبيل المثال العناصر التالية: "الفضة، الزرنيخ، الباريوم، الكاديوم، الكروم، النحاس، الحديد، الزئبق، الرصاص، القصدير، المنغنيز، الفلور، الصوديوم ومركب كبريت الهيدروجين"، فيؤثر مثلاً عنصر النحاس على طعم المياه، وتسبب أيونات الحديد والمنغنيز العكارة للمياه، وتآكل الأنابيب المعدنية الناقلة لها، كما وتسبب المواد غير العضوية أضراراً بالغة على صحة الإنسان، لذلك يجب تخفيض تراكيزها إلى الحدود المسموح بها، ويتم ذلك بإتباع الطرائق التالية:

- طرائق الأكسدة والترسيب: وتتم إما عن طريق التهوية "الأكسدة بالأكسجين الجوي"، ثم الترسيب ومن ثم الترشيح، أو عن طريق الأكسدة بالمواد الكيميائية، كبرمنغنات البوتاسيوم أو الكلور أو الأوزون.
- طريقة التبادل الأيوني: ويتم مبادلة العناصر الكيميائية سابقة الذكر بأيونات الصوديوم والهيدروجين.
- طريقة تثبيت الأيونات: وتتم بإضافة مادة سداسي ميثا فسفات الصوديوم Sodium Hexameta phosphate والتي تستعمل بشكل رئيس لإزالة أيونات الحديد.
- ترسيب العناصر الكيميائية على شكل كربونات أو هيدروكسيدات.

- امتصاص العناصر بواسطة أكسيد المنغنيز أو الحديد المائي. ويتم إزالة العناصر الكيميائية سابقة الذكر على شكل مجموعة وليس عنصراً تلو الآخر، كما وتُستعمل طرائق المُعالجة السابقة لأكثر من غرض كما هو مُبين في الجدول التالي (جدول-٧).

جدول - ٧: أهم الطرائق المُتبعة لمُعالجة المواد غير العضوية.

العنصر	الطريقة الفعالة المتبعة
الزرنخ	التخثير بالحديد، التيسير بالكلس، المُعالجة بالألومينا النشطة.
الباريوم	التيسير بالكلس، التبادل الأيوني.
الكاديوم	التخثير بالحديد، التيسير بالكلس.
الكروم	التخثير بالحديد، التخثير بكبريتات الألمنيوم "الشبة".
الفلور	التبادل الأيوني مع كبريتات الألمنيوم "الشبة" المنشطة.
الرصاص	التخثير بالحديد، التيسير بالكلس
الزئبق	التخثير بكبريتات الحديد، المُعالجة بالكربون المنشط "الفعال".
الفضة	التخثير بكبريتات الألمنيوم "الشبة"، التخثير بكبريتات الحديد، التيسير بالكلس.

٥.٢.٢. إزالة المواد العضوية:

يكون لنوعية التربة ومياه التغذية وتلوث الطبقة الخازنة للمياه الجوفية بالمُخلفات الصناعية، تأثير كبير على نوعية وكمية المواد العضوية في المياه الجوفية، ومن أهم هذه المواد فينيل كلوريد Vinyl Chloride، وثنائي كلورو إيثين Dichlorethene، وكلورو بنزين Chlorobenzene، وأخطرها الهيدروكربونات العطرية عديدة النوى Polynuclear aromatic hydrocarbons والتي تُعد من أهم مُسببات الأمراض السرطانية لدى الإنسان. ولإزالة المواد والمُركبات العضوية من المياه يُستعمل الكربون المُنشط على شكل مسحوق أو حبيبات.

٦.٢.٢. تطهير المياه الجوفية:

وهي عملية القضاء على الكائنات الحية الدقيقة المُسببة للأمراض، ومن أهم طرائق تطهير المياه:

- أ- رفع درجة حرارة المياه (التسخين).
 ب- استعمال الأشعة فوق البنفسجية.
 ج- استعمال أيونات بعض المعادن مثل أيونات الفضة والنحاس.
 د- استعمال المؤكسدات القوية مثل الكلور ومركباته، البروم، اليود، برمنغنات البوتاسيوم، الأوزون وغيرها.

٧.٢.٢. إزالة الطعم والرائحة من المياه الجوفية:

يُستعمل الكربون المنشط وبعض المؤكسدات الكيميائية مثل الكلور وبرمنغنات البوتاسيوم لإزالة الطعم والرائحة من المياه الجوفية، وتتم عملية الإزالة أثناء القيام بإجراءات المعالجة الرئيسية، كأن تتم إضافة المواد السابقة أثناء عمليات التخثير الكيميائي مثلاً. وتقاس رائحة المياه بإحدى المقياسين التاليين:

- TON (Threshold Odor Number): وهي نسبة تخفيف الماء ذي الرائحة بماء عديم الرائحة، إلى أن تزول رائحته، ويُعبر عنها رياضياً بالعلاقة التالية:

$$TON = [(A+B): A]$$

- OII (Odor Intensity Index): وهي عدد المرات التي يتم بها تخفيف الماء ذي الرائحة إلى النصف، حتى يتم الحصول على مياه عديمة الرائحة، ويُعبر عنها رياضياً بالعلاقة التالية:

$$OII = [(3.3 \log 200: A) + 3D]$$

حيث:

- A = كمية المياه ذات الرائحة (بالمتر).
 B = كمية المياه عديمة الرائحة المستعملة للتخفيف (بالمتر).
 D = عدد ٢٥:١٧٥ من التخفيف الأولي للحصول على مياه عديمة الرائحة.

الفصل الثالث

معالجة مياه الصرف الصحي

١.٣. المقدمة:

تتجمع مياه الصرف الصحي في أنابيب ضمن شبكة الصرف الصحي، وأهم مصادر هذه المياه:

- مياه المخلفات المنزلية.
- مياه المخلفات الصناعية.
- مياه الأمطار المتسربة إلى شبكة الصرف الصحي، أو عند دمج شبكة الصرف الصحي مع شبكة تصريف السيول والأمطار (المصارف الأرضية).
- المياه المتسربة من مصادر أخرى كالمياه الجوفية.

٢.٣. تصنيف مياه الصرف الصحي:

تُقسم مياه الصرف الصحي إلى:

- **مياه رمادية:** وهي مياه المغاسل (باستثناء أحواض الجلي)، وأحواض الاستحمام، والغسالات ومياه الأمطار والسيول (المصارف الأرضية).
- **مياه سوداء:** وهي مياه دورات المياه.

يتم الفصل بين نوعي مياه الصرف الصحي في كثير من الدول المتقدمة في شبكة صرف منفصلة، مما يؤدي إلى تسهيل عمليات معالجة المياه، إذ لا تحتاج المياه الرمادية والتي يكون حجمها كبيراً إلى معالجة كثيرة لتنقية المياه نظراً لقلّة الملوثات فيها، وبالتالي يمكن استعمالها مباشرةً لري المزروعات، أو استعمالها بعد المعالجة البسيطة، عن طريق تمرير المياه الرمادية في نظام فلترة إلى خزان قبل استعمالها في الري، كما ويمكن إلقاء الفائض منها في المسطحات المائية الطبيعية، أما المياه السوداء القادمة من المنازل فتكون شديدة التلوث، وتحتاج إلى عدد كبير من عمليات المعالجة والتنقية قبل طرحها في المسطحات المائية، أو استعمالها في الزراعة والري، أو حتى استعمالها للشرب مرة أخرى، حيث تهدف الأبحاث في مجال البحث عن مصادر المياه إلى استعمال كميات المياه نفسها في حلقة مغلقة، أي انتقال الماء النقي من المنزل إلى شبكة الصرف الصحي، ثم معالجته بشكل مُتقدم، بحيث يصبح صالحاً للاستعمال المنزلي مرة أخرى، ومثال على ذلك يتم في بعض الدول الإفريقية تغذية خزانات مياه الشرب بالمياه المعالجة بشكل مُتقدم نظراً لشح المياه فيها.

٣.٣. تركيب مياه الصرف الصحي:

تتكون مياه الصرف الصحي من ٩٩.٩% ماء ونحو ٠.١% من الملوثات المكونة من مواد صلبة ومواد ذائبة، تضم مواد عضوية مُعلقة أو ذائبة (جدول - ٨ و ٩) وكائنات حية دقيقة وأملاح معدنية ذائبة ومعادن ثقيلة ومواد مُغذية للنبات كالمركبات الآزوتية والفسفورية. ولمياه الصرف الصحي تركيب مُعقد، غير ثابت، يتغير مع الزمن (ساعات اليوم، أيام الأسبوع، فصول السنة)، وتبعاً للسكان والعادات المختلفة للمُجتمعات.

جدول-٨: تركيب المواد العضوية المُعلقة في مياه الصرف الصحي.

المكون	التركيز مغ/لتر	% للكربون العضوي
الشحوم	١٤٠	٥٠
البروتينات	٤٢	١٠
الكربوهيدرات	٣٤	٦.٤
منظفات أنيونية	٥.٩	١.٨
الساكرات الأمينية	١.٧	٠.٣
الأميدات	٢.٧	٠.٦
الحموض المنحلة	١٢.٥	٢.٣
مختلفة	٦٠	٢٨.٦
الكربون العضوي	٢١١	١٠٠

جدول - ٩: تركيب المواد العضوية الذائبة في مياه الصرف الصحي.

المكون	التركيز مغ/لتر	% للكربون العضوي
الساكر	١٠	٣١.٣
الحموض غير طيارة	٣٤	١٥.٢
الحموض طيارة	٢٥	١١.٣

الحموض عضوية حرة	٥	٣.١
الحموض أمينية مرتبطة	١٣	٧.٦
المنظفات أنيونية	١٧	١١.٢
حمض البول	١	٠.٥
الفينولات	٠.٢	٠.٢
الكيرياتين - الكيرياتينين	٦	٣.٩
مختلفة	--	١٥.٧
الكربون العضوي	٩٠	١٠٠

٤.٣. أنواع ملوثات مياه الصرف الصحي:

وتُقسم إلى:

- **الملوثات الفيزيائية:** وتشتمل على الرمال والحصى الناعمة، ويتم التخلص منها بسهولة عن طريق إزالتها من خلال عمليات بسيطة كالترسيب، ولا تُسبب هذه الملوثات عادةً أية أضرار بيئية.
- **الملوثات الكيميائية:** وتُعد المكون الرئيس لمياه المخلفات الصناعية، ومن أهم الملوثات الموجودة في مياه الصرف الصحي، ويصعب التخلص من جزء كبير منها بواسطة المعالجة البيولوجية التقليدية وتُقسم إلى:
 - **المواد العضوية:** وهي المواد الناتجة عن فضلات الطعام، والمخلفات الصناعية مثل: الدسم، الزيوت، الشحوم، المبيدات، الهيدروكربونات، الفينولات، البروتينات.
 - **المواد اللاعضوية:** وهي المواد الناتجة عن بعض المركبات الكيميائية اللاعضوية مثل: الكلوريدات، القلويات، المعادن الثقيلة، الكبريت، الفسفور، الآزوت.
 - **الغازات:** وتنتج عن بعض التفاعلات الكيميائية الحيوية مثل: الكبريت، الهيدروجين، الميثان والأمونيا.
- **الملوثات البيولوجية:** وتُعد من أهم الملوثات الموجودة في مياه الصرف الصحي، ويُسبب بعضها أوبئة وأمراضاً خطيرة، ومن أهمها:
 - الحيوانات النافقة: كالمقطط مثلاً.

- النباتات: كأوراق أو أغصان أو جذوع الأشجار ومُعظمها غير ضار، إلا أنه يجب إزالتها من المياه قبل طرحها في المُسطحات المائية.

- الكائنات الحية الدقيقة: كالجراثيم والفيروسات والطفيليات والديدان والتي يُعد بعضها ضاراً. يُطلق مُصطلح "المواد الصلبة الكلية (TS) Total Solids" على كافة المواد والمُلوثات المحمولة في مياه الصرف الصحي، سواء كانت أجزاءً صلبة كالرمال، أو مواداً عضوية، أو لا عضوية، أو كائنات حية دقيقة... الخ وتنقسم إلى:

- مواد صلبة كلية مُعلقة (TSS): وتتألف من جزء قابل للترسيب بشكل مُباشر في أحواض الترسيب العادية، وجزء آخر يتم ترسيبه بإضافة مواد مُخثرة، ويتم عند ترشيح عينة من مياه الصرف الصحي حجز المواد الصلبة الكلية المُعلقة فوق ورق الترشيح.

- مواد صلبة كلية راشحة (TFS): وتتألف من مواد ذائبة أو غروية أو كليهما، وتتم هذه المواد عبر ورقة الترشيح.

تتألف المادة الصلبة عادة من جزء عضوي وهو عبارة عن مجموعة المواد المُتطايرة، وجزء لا عضوي وهو الجزء غير المُتطاير، وكلما كان الجزء العضوي أكبر من الجزء اللاعضوي كانت مياه الصرف الصحي أشد تلوثاً ومؤشراً هاماً على أن مصدرها على الأغلب منزلياً وليس صناعياً.

٥.٣. مراحل مُعالجة مياه الصرف الصحي:

تهدف عملية مُعالجة مياه الصرف الصحي في محطات المُعالجة إلى إزالة كل المُلوثات الكيميائية والبيولوجية من هذه المياه، حيث يتم إزالة المواد الصلبة والعضوية، والكائنات الحية الدقيقة، أو خفض المُلوثات فيها إلى الحدود المقبولة، وقد تشمل المُعالجة أيضاً على إزالة المركبات الفسفورية والنتروجينية. وتعتمد درجة نقاوة مياه الصرف الصحي في نهاية المُعالجة على نوعية المياه الداخلة وعلى الطريقة المُتبعة في المُعالجة، حيث تُوجد مُعالجة تمهيدية وأولية وثانوية وثالثية لمياه الصرف الصحي (الشكل-١٣)، ومن ثم تأتي في نهاية مراحل المُعالجة عمليات تطهير المياه للقضاء على الكائنات الحية الدقيقة الممرضة.

وتُقسم عمليات مُعالجة مياه الصرف الصحي إلى المراحل التالية:

١.٥.٣. المُعالجة التمهيديّة:

ويتم فيها تقطيع ومن ثم فصل المواد الصلبة كبيرة الحجم الموجودة في مياه الصرف الصحي، وذلك منعاً لانسداد القنوات والأنابيب الموجودة في المراحل اللاحقة من المُعالجة، وكذلك لتأمين

- حماية أجهزة محطات المعالجة، كما ويتم في مرحلة المعالجة التمهيدية تجانس المياه، ولاسيما عندما تكون شبكة الصرف الصحي مشتركة، أو عندما تصب في بعض الأحيان كميات كبيرة من مياه المخلفات الصناعية في محطة المعالجة، وأهم مكونات المعالجة التمهيدية:
- **المصافي والمناخل الخشنة والناعمة:** ويتم بواسطتها حجز المواد الصلبة كبيرة الحجم، مثل المخلفات الورقية والخشبية وغيرها، وتوضع عند مدخل محطات المعالجة.
 - **أجهزة التفطيت:** ويتم بواسطتها تقطيع وتفتيت المواد الصلبة التي مرت عبر المصافي والمناخل، وتوضع قبل المرسبات الرملية أو قبل محطات الضخ.
 - **المرسبات الرملية:** وتزال بواسطتها حبيبات الرمال والحصى الناعمة التي مرت عبر المصافي، ومن أهم أنواعها غرف الرمال ذات الجريان الأفقي، وغرف الرمال الدوامية، وغرف الرمال المهواة، وتعمل على الإقلال من كمية الرواسب في أحواض الترسيب.
 - **أحواض التعديل:** وتُستعمل عند الحاجة، وتعمل على خفض شدة الجريان للمياه الداخلة إلى محطة المعالجة، فيُصبح للجريان مُعدل شبه ثابت، ويتم بالتالي الحصول على تركيز شبه ثابت للملوثات الموجودة في مياه الصرف الصحي.

تُمكن مرحلة المعالجة التمهيدية من إزالة نحو ٥-١٠% من المواد العالقة، ولا يمكن استعمال المياه الناتجة عن هذه المرحلة لأي غرض.

٢.٥.٣. المعالجة الأولية:

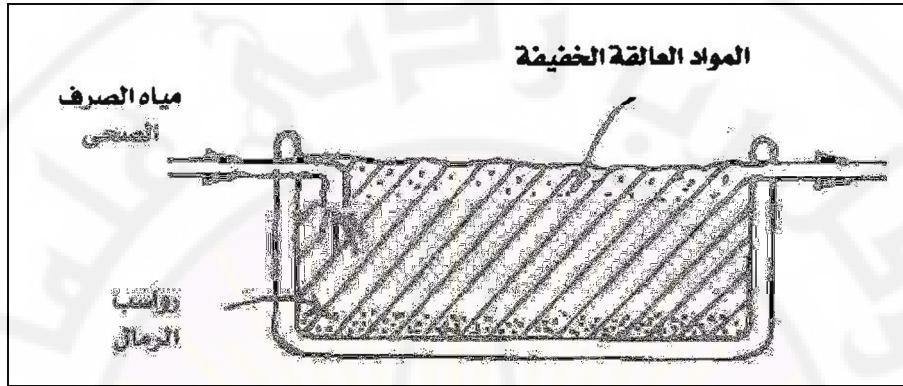
- وتهدف هذه المعالجة إلى إزالة المواد الصلبة المُعلقة غير العضوية، والتخلص من المواد العضوية التي يمكن فصلها بعمليات الترسيب، وأهم مكونات المعالجة الأولية:
- **أحواض التعويم:**

وتُستعمل للتخلص من الشحوم والزيوت الموجودة في مياه الصرف الصحي والتي يؤدي وجودها إلى إعاقة عمليات المعالجة، وتُعد مياه المخلفات الصناعية المصدر الرئيس للشحوم والزيوت في مياه الصرف الصحي.

- أحواض الترسيب الأولية:

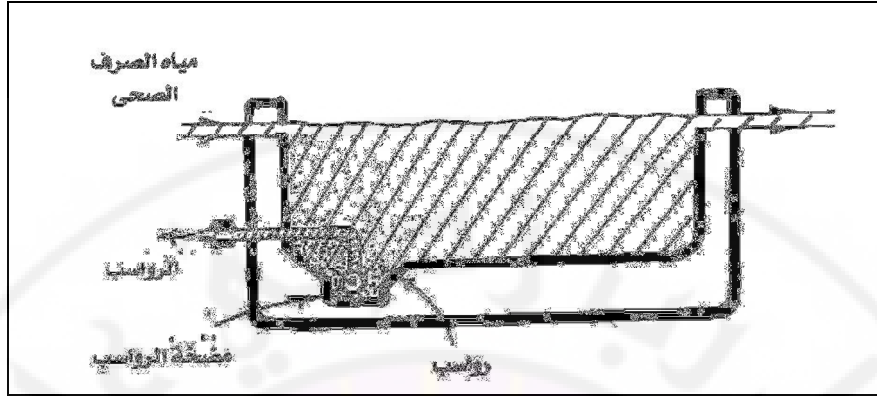
تدخل مياه الصرف الصحي بشكل تيار ضعيف من أنابيب موجودة في الطرف العلوي إلى أحواض التخلص من الرمال، مما يسمح لبعض المواد العالقة غير العضوية من الرمال وغيرها إلى الهبوط إلى قاع الحوض، ثم يتم بعد ذلك سحب المياه إلى قناة موجودة في الطرف العلوي الآخر للحوض تقع عند مستوى سطح الماء حاملةً معها الملوثات العضوية الخفيفة وبعض المواد

الذائبة في الماء، ثم تُدفع المياه إلى أحواض الترسيب وتترك فيها مدة من الزمن تمتد عادة إلى عدة ساعات ليتم ترسيب أغلب المواد العضوية الخفيفة والمواد العالقة في الماء إلى قاع الحوض، ويُسحب الراسب بعدئذ بواسطة مضخة موجودة في قاع الحوض (شكل ٨- و ٩).



شكل ٨-: حوض إزالة الرمال.

يكون شكل أحواض الترسيب الأولية إما دائرياً أو مستطيلاً، ولا تكون قدرة المعالجة الأولية على إزالة الملوثات من مياه الصرف الصحي عالية، حيث ينخفض معدل BOD_5 بنحو ٣٥% وقيمة COD بنحو ٣٠% والمواد الصلبة العالقة بنحو ٦٠%. تتميز المعالجة الأولية لمياه الصرف الصحي ببساطتها، وانخفاض تكاليفها، ويكون الماء الناتج عنها غير صالح للاستعمال، ويتم تطهيره بغاز الكلور قبل طرحه في المسطحات المائية الطبيعية، أما المواد المترسبة فيتم غالباً حرقها أو نقلها إلى مكان مخصص للطمس.



شكل-٩: حوض الترسيب.

٣.٥.٣. المعالجة الثانوية (البيولوجية):

تتضمن المعالجة الثانوية مرحلة الأكسدة البيولوجية: والتي تهدف إلى تخثير وإزالة المواد الغروية الصلبة غير القابلة للترسيب، وإلى تثبيت المواد العضوية، وخفض المركبات المغذية للنبات كالمركبات الفسفورية والنيتروجينية، وتُعد هذه المرحلة من أهم المراحل في محطات المعالجة حيث تُؤكسد الكائنات الحية الدقيقة المواد العضوية المختلفة وتحولها إلى مركبات مُستقرة وإلى كتلة حيوية تتكون من الكائنات الحية الدقيقة، والتي يمكن فصلها بعدئذ عن المياه ومعالجتها بشكل مُستقل للحصول على مياه خالية من التلوث العضوي. وتقوم الكائنات الحية الدقيقة بتحويل المواد العضوية الكربونية المُحللة والمواد الغروية إلى غازات مُختلفة تدمجها ضمن أنسجتها الخلوية التي تملك وزناً نوعياً قيمته أكبر بقليل من الوزن النوعي للماء، مما يؤدي إلى إزالة هذه الخلايا بالترسيب الثقالي. ويُعد توفر الأكسجين والكائنات الحية الدقيقة من أهم العناصر الضرورية للقيام بالمعالجة البيولوجية، إضافة إلى عناصر أخرى كدرجة الحرارة الملائمة، ووجود بعض المُغذيات المساعدة.

١.٣.٥.٣. أهم الكائنات الحية الدقيقة التي تقوم بالمعالجة البيولوجية:

• البكتيريا:

وهي وحيدات خلوية، يتراوح حجمها بين ٠.٥-٥ ميكرون، تتكاثر بالانقسام الثنائي البسيط، حيث يتكون جيل جديد كل عشرين دقيقة تقريباً ضمن الظروف البيئية المناسبة لبعض سلالاتها، ويشكل الماء نحو ٨٠% من الخلية البكتيرية والمادة الجافة ٢٠% منها، وتتألف من نحو ٩٠%

مواد عضوية صيغتها الجزيئية $C_5H_7O_2N$ ، و ١٠% مواد لا عضوية، تكون درجة الحموضة المثلى لأغلب السلالات البكتيرية $pH=6.5-7.5$ أي الأوساط المعتدلة، ولا تتأقلم في درجة الحموضة $pH=9.5$ أو أقل من $pH=4$ ، وقد يصل عدد البكتيريا في اسم^٢ إلى عدة ملايين تعود لآلاف الأنواع. وهي أيضاً من أكثر الكائنات الحية الدقيقة المسببة للأمراض في مياه الصرف الصحي، وللبيكتيريا دور رئيس وهام في المعالجة البيولوجية لمياه الصرف الصحي، حيث تعمل على تكسير وأكسدة المواد العضوية وإزالتها، وكذلك إزالة المواد اللاعضوية من مخلفات المنازل والمصانع بما فيها المعادن الثقيلة السامة كالرصاص والزنك، كما تقوم بعض أنواع البكتيريا بمعالجة المخلفات لإنتاج الطاقة من غاز الميثان، وكذلك معالجة التلوث بالبقع النفطية. كما ويوجد أنواع من البكتيريا تستطيع تحليل المركبات الفينولية الناجمة عن عمليات تكرير البترول والتخلص منها، وتعمل أنواع أخرى من البكتيريا على إرجاع الكبريت ومركبات أكاسيده الناجمة عن احتراق الوقود، بينما تعمل سلالات أخرى منها على تحليل وتفكيك المركبات المطاطية، وبعضها الآخر في تنقية المياه من بعض العناصر المشعة. وتُستعمل البكتيريا في مكافحة التلوث بطريقتين تعتمد الأولى على تنشيط البكتيريا الموجودة أصلاً في المواد الملوثة أو في موقع التلوث وعمل تهوية لها مع إمدادها بالمواد المغذية، بينما يتم في الطريقة الثانية حقن مكان التلوث بكميات محدودة من البكتيريا المتخصصة والمنشطة مسبقاً في المخبر.

• الفطريات:

وهي نباتات عديدة الخلايا، ذات تركيب مُعقد مكون من كتلة لها خيوط مُتفرعة، تتكاثر بثلاث طرائق الجنسية أو اللاجنسية أو بانقسام الأبواغ، وغالبيتها كائنات هوائية تنمو بوجود الأكسجين، ودرجة الحموضة المثلى لأغلب أنواعها هي $pH=5.6$ ، لكنها تستطيع البقاء في درجات حموضة تتراوح بين $pH=2-9$ ، يُمكن للفطريات تكسير المواد العضوية المُعقدة، والحياة ضمن أوساط فقيرة المُحتوى الآزوتي ودرجة حموضة مُنخفضة، مما يُتيح لها القدرة على تفكيك وتحليل السيللوز، الأمر الذي يجعلها بالغة الأهمية في معالجة مياه الصرف الصحي، وبشكل خاص المخلفات الصناعية، وعمليات تكوين الكومبوست من المواد العضوية، وتُسبب بعض أنواع الفطريات الأمراض للإنسان، كما وتُعد مسؤولة عن ظهور الروائح والطعم الغريب في المياه.

• البروتوزا والروتيفيرا:

- البروتوزوا:

وهي كائنات حيوانية أولية مجهرية، لها القدرة على الحركة أغلبها هوائية وتوجد أنواع قليلة منها لا هوائية، يتراوح حجمها بين 10-100 ميكرون، أي أكبر حجماً من البكتيريا، وبالتالي تستهلك البكتيريا كمصدر رئيس لغذائها يمدّها بالطاقة وبمعظم عناصر نموها، ويتكاثر أغلبها بالانقسام الثنائي البسيط. تعمل البروتوزوا كمنقي للمياه النهائية الخارجة من المعالجة البيولوجية "الثانوية" بسبب استهلاكها للبكتيريا والمواد العضوية الدقيقة.

- الروتيفيرا:

وهي كائنات حيوانية مجهرية، متعددة الخلايا، هوائية وغير ذاتية التغذية، تدعى بالهدبيات لوجود مجموعتين من الأهداب في رأسها، وتكون الأهداب حرة الحركة تدور حول نفسها، مما يُعطيها حرية الحركة وسهولة اصطيد المواد الغذائية (البكتيريا والمواد العضوية الدقيقة)، ويُعد وجودها في المياه الخارجة من المعالجة الثانوية دليلاً على جودة المعالجة الثانوية.

• الطحالب:

وهي كائنات نباتية أغلبها عديدة الخلايا، وبعض أنواعها يكون وحيد الخلية، ذاتية التغذية، تنتج بعملية التركيب الضوئي الأكسجين وتستهلك غاز ثاني أكسيد الكربون، مما يُؤمّن توازناً وثباتاً بيئياً للكائنات الحية داخل البيئة المائية. حيث تقوم البكتيريا الهوائية باستهلاك الأكسجين المُنتج بواسطة الطحالب. وتستهلك الطحالب غاز ثاني أكسيد الكربون المُنتج من البكتيريا والكائنات الحية الأخرى. وللطحالب أهمية كبرى وذلك بسبب المشاكل الناجمة عن ازدياد نموها نتيجة وجود المغذيات من المركبات النتروجينية والفسفورية الناتجة مثلاً عن طرح المياه المعالجة معالجة أولية وثانوية إلى المسطحات المائية، مما يُوجب معالجة المياه الملوثة معالجةً ثالثة لإزالة هذه المركبات، كما وتُسبب الطحالب ظهور الروائح والطعم الغريب في موارد المياه.

• الأشكال الأرقى في الحياة:

وهي الكائنات الحية الدقيقة الأكبر حجماً حيث يمكن رؤيتها بالعين المجردة، والأكثر تعقيداً في تركيبها الخلوي، ومثال عليها الديدان ويرقات الحشرات وبعض القشريات. وتتميز بدورة حياة مُعقدة، وقدرتها على استقلاب الغذاء، وتحويل المواد العضوية البسيطة إلى مركبات مُعقدة، وتنمو الديدان بكثرة عند توافر الأكسجين الذائب والغذاء البكتيري، وتؤدي حركة الديدان في مياه

الصرف الصحي إلى انتشار الأكسجين، وتدوير المغذيات من المركبات النتروجينية والفسفورية، وتجميع أعداد كبيرة من البكتيريا كمصدر غذائي لها.

٢.٣.٥.٣. التحلل البيولوجي للملوثات العضوية:

تحتوي مياه الصرف الصحي المنزلي على نسبة ٥٠% من المواد الصلبة العضوية، والتي تشمل على الكربوهيدرات والليبيدات والبروتينات. ويتم التحلل البيولوجي الهوائي للملوثات العضوية بوجود الأكسجين ويستمر حتى نفاذ كميته.

تلخص العمليات التي تتم عند إزالة المواد العضوية (الملوثات) كالتالي:

- عملية الأكسدة: وتتم وفق التفاعل التالي:

مواد عضوية + أكسجين + بكتيريا →

ثاني أكسيد الكربون + ماء + نشادر + مواد نهائية أخرى + طاقة

- عملية التركيب الخلوي: وتتم وفق التفاعل التالي:

مواد عضوية + أكسجين + بكتيريا → طاقة + خلايا بكتيرية جديدة

- عملية التنفس: وتتم وفق التفاعل التالي:

خلايا بكتيرية + أكسجين → ثاني أكسيد الكربون + ماء + نشادر

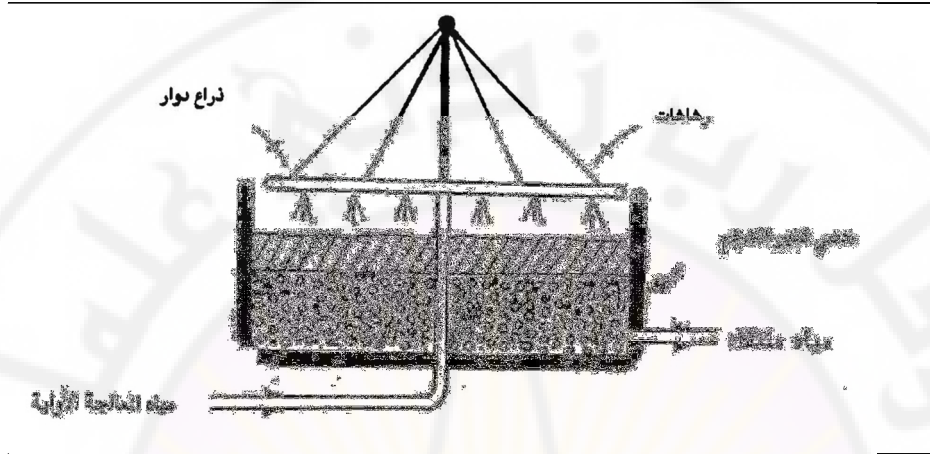
تتم المعالجة الثانوية في محطة معالجة مياه الصرف الصحي في وحدتين رئيسيتين، هما:
أحواض التهوية وأحواض الترسيب الثانوية.

٣.٣.٥.٣. أهم الطرائق المستعملة في المعالجة الثانوية:

١.٣.٣.٥.٣. المرشحات البيولوجية:

يتم تمرير المياه الناتجة عن المعالجة الأولية في رشاشات دوارة لتهويتها أثناء سقوطها على هيئة رذاذ فوق خزانات خاصة، وتُمرر المياه بعد ذلك ببطء خلال الفراغات البينية لطبقات من الحصى الخشن، والتي تنمو على سطحها الكائنات الحية الدقيقة، حيث تقوم هذه الكائنات الحية بتفكيك المواد العضوية وأكسدها إلى مركبات بسيطة غير ضارة، ثم تخرج بعد ذلك المياه المرشحة من أسفل الخزانات إلى أحواض الترسيب الثانوية، والتي يتم فيها فصل الحمأة عن

المياه وإزالتها ثم تجفيفها. ومن مساوئ هذه الطريقة انتشار الذباب والبعوض في الموقع وعدم ثبات مردود المعالجة (شكل-١٠).



شكل-١٠: المرشحات البيولوجية.

٢.٣.٣.٥.٣. الأقرص البيولوجية الدوارة:

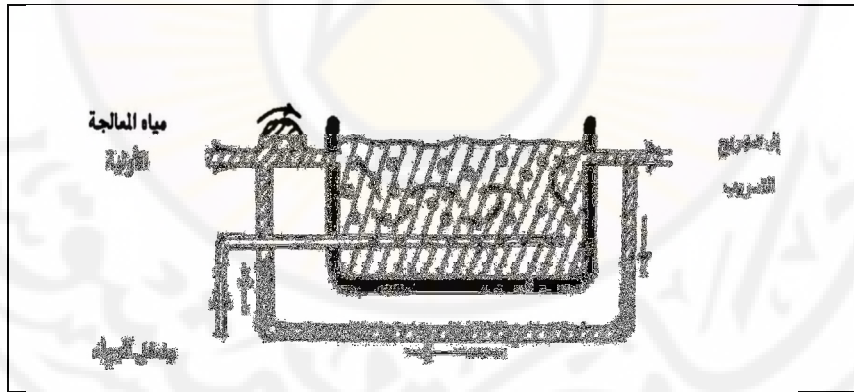
تتألف من مجموعة أقراص، تدور ببطء حول محور مركزي مُرتبط بها، وتكون هذه الأقراص مغمورة بنحو نصف قطرها ضمن المياه، ويدخل الأكسجين الجوي عند دورانها وخروجها إلى الهواء ليلاصق الطبقة البيولوجية من الأحياء الدقيقة (الغشاء البيولوجي) والتي تنمو على سطح الأقراص وتقوم بالمعالجة الثانوية. تُستعمل هذه الطريقة في محطات المعالجة الصغيرة، حيث يتم بناء عدد من صفوف أقراص التماس بشكل متتابع خلف بعضها في حوض التهوية. وتتمتاز هذه الطريقة باستهلاكها المحدود للطاقة، وانخفاض كمية الحمأة الناتجة عنها، ويبلغ مُعدل التنقية باستعمالها نحو ٨٥% (شكل-١١).



شكل-١١: صورة توضح الأقراص البيولوجية الدوارة.

٣.٣.٣.٥.٣. طريقة تنشيط الرواسب:

تُدفع المياه الناتجة عن المعالجة الأولية إلى خزانات خاصة، ويدخل فيها تيار هوائي من أسفل الخزان نحو أعلاه حاملاً معه البكتيريا إلى داخل الخزان، ويقوم التيار الهوائي بتقليب الرواسب، بينما تعمل البكتيريا على أكسدة المواد العضوية، ثم تُدفع المياه بعدئذٍ إلى خزانات الترسيب الثانوي لإزالة جميع الرواسب منها (شكل-١٢).



شكل-١٢: طريقة تنشيط الرواسب.

٣.٣.٣.٥.٣. طريقة الحمأة المنشطة:

تعتمد هذه الطريقة على تنشيط البكتيريا الموجودة في مياه الصرف الصحي، عن طريق ضخ الأكسجين اللازم لنموها وتكاثرها في أحواض التهوية، حيث تدخل المياه المُعالجة القادمة من

أحواض الترسيب الأولية إلى أحواض التهوية، ويتم مزج الهواء ضمنها بإحدى الطريقتين الرئيسيتين: التهوية الميكانيكية، والتهوية بواسطة الهواء المضغوط، وتقوم عملية المزج بخلط الأكسجين مع محتويات أحواض التهوية، كما وتُساعد عملية التقليب أيضاً على ازدياد التلامس بين الكائنات الحية الدقيقة والمواد العضوية والأكسجين الذائب، في حين تمنع عملية المزج المواد المعلقة من الترسب إلى قاع خزانات الترسيب الثانوية.

تُعد طريقة الحمأة المنشطة من أكثر الطرائق شيوعاً وذلك بسبب فعاليتها الكبيرة في المعالجة الثانوية لمياه الصرف الصحي، وسُميت بالحمأة المنشطة نظراً لإعادة جزء من الحمأة المترسبة في أحواض الترسيب الثانوية وبشكل مستمر إلى أحواض التهوية، مما يعمل على زيادة كثافة الكتلة الحيوية من الكائنات الحية الدقيقة في هذه الأحواض، والذي يؤدي إلى زيادة معدل أكسدة المواد العضوية. كما وتتميز طريقة الحمأة المنشطة بكفاءتها العالية في المعالجة، وبشكل خاص معالجة العديد من المخلفات العضوية الصناعية، والتي كان يُعتقد بأنها سامة للأنظمة البيولوجية، كما وأنها لا تؤدي إلى انتشار الروائح الكريهة وتجمع الحشرات الضارة، وبالتالي إمكانية انشائها بالقرب من المدن، وتحتاج إلى مساحة صغيرة من الأرض مقارنة بغيرها من الطرائق، وعدد قليل من الأيدي العاملة. أما مساوئ هذه الطريقة، فهي احتواء الحمأة الثانوية على نسب عالية من الرطوبة، مما يؤدي إلى زيادة حجمها، وصعوبة تجفيفها، وذات تكاليف مرتفعة نظراً لاحتياجها إلى تجهيزات ميكانيكية وكهربائية غالية الثمن، كما وأنها تحتاج إلى كوادر فنية متخصصة للتشغيل. وتندرج ضمن طريقة الحمأة المنشطة طريقتا التهوية المطولة وخنادق الأكسدة، للمعالجة الثانوية لمياه الصرف الصحي.

٣.٥.٣.٥.٣. برك الأكسدة:

يعتمد مبدأ المعالجة في هذه البرك على النشاط الطبيعي المشترك والمُتكامل بين الطحالب والبكتيريا بوجود أشعة الشمس وبعض العناصر الموجودة في مياه الصرف الصحي، وطريقة المعالجة هذه مهمة في المناطق الصحراوية، حيث تُساعد درجات الحرارة وأشعة الشمس على نمو الطحالب التي تُوفر للبرك الأكسجين الذائب. وتُعد هذه الطريقة من أبسط الطرائق المُتبعة في المعالجة الثانوية لمياه الصرف الصحي.

ويتم إنشاء هذه البرك باستعمال طرائق هندسية بسيطة، لا تتعدى أحياناً عمليات الحفر والتمهيد والتسوية، وتتميز بمساحتها الكبيرة، وأعماقها القليلة. ويتطلب ذلك دراسات أولية لطبوغرافية المنطقة، ونظامها الهيدرولوجي، وخصائص التربة، ودرجة الحرارة، والرياح السائدة، ومقدار

السطوح الشمسي، والشكل المناسب لها، وثمان الأرض وتكاليف الإنشاء والتشغيل وغيرها. ولهذه الطريقة مزايا كثيرة أهمها انخفاض تكاليف الإنشاء والتشغيل والصيانة، وكذلك فعاليتها في القضاء على الكائنات الحية الدقيقة الممرضة، ومعالجتها للعديد من المخلفات الصناعية، أما أهم مساوئها فهي الحاجة إلى مساحات واسعة للإنشاء، وانتشار الروائح والبعوض، والفقدان الكبير للمياه نتيجة البخر، وإمكانية تلوث المياه الجوفية بسبب الرش. ويوجد أربع أنواع رئيسة لبرك الأكسدة: البرك الاختيارية، وبرك الانضاج، والبرك اللاهوائية، وبرك التهوية.

تؤدي المعالجة الثانوية لمياه الصرف الصحي إلى انخفاض واضح في قيمة التلوث، حيث يتم إزالة نحو ٩٠% من المواد الصلبة المعلقة والتي تحتوي على نحو ٥٠% من النتروجين الكلي و٣٠% من الفسفور الكلي في المياه الملوثة، كما وتؤدي إلى إزالة نحو ٥% من الأملاح المعدنية المختلفة.

ويمكن تصريف المياه المعالجة ثانوياً إلى المسطحات المائية الطبيعية كالأنهار مثلاً بحيث لا يقل تخفيفها عن ٨:١ مرة، وأن تكون قيمة الـ BOD أقل من ٢٠ مغ/لتر، والجسيمات المعلقة الصلبة أقل من ٣٠ مغ/لتر، وقد لا يتوفر الماء الضروري للتخفيف في كثير من الحالات، لذلك تُمرر المياه عبر مرشح رملي لإزالة نسبة كبيرة من المواد الصلبة المعلقة وينخفض بذلك قيمة الـ BOD إلى ١٠ مغ/لتر أو أقل.

٤.٣.٥.٣. معالجة الحمأة:

يطلق مصطلح الحمأة على المواد المترسبة الناتجة عن عمليات معالجة مياه الصرف الصحي في محطات المعالجة، وتكون الحمأة آمنة ومطابقة للمواصفات القياسية يجب معالجة المحتوى المائي الكبير فيها، والذي يُقدر بنحو ٩٧% من حجمها، وكذلك العناصر المعدنية الثقيلة الموجودة فيها، والمحتوى من الكائنات الحية الدقيقة الممرضة أيضاً. وتتم هذه المعالجة داخل محطات معالجة مياه الصرف الصحي بطرائق المعالجات التقليدية أو المعالجات المتقدمة للحمأة، والتي تتضمن المعاملات التالية: التجفيف الحراري، والتثبيت الهوائي، والهضم اللاهوائي، والمعالجة الحرارية للحمأة السائلة، والمعالجة بالكلس، ومن ثم تخزين الحمأة.

وهناك ضوابط عديدة لإنتاج الحمأة في محطات معالجة الصرف الصحي وهي: عدم نقلها إلى مواقع التخزين إلا بعد الوصول إلى نسبة رطوبة بنحو ٧٠% وزناً، وملء الأحواض بالحمأة المخمرة تدريجياً كل ٤ أيام ولعمق يصل إلى نحو ١٥ سم في المرة الواحدة بحيث يكون ارتفاع

التخزين الكلي في حدود ٦٠-٨٠سم، وكذلك تغطية أكوام الحمأة بحمأة أخرى جافة أو مواد تغطية لمنع تكاثر الذباب أو البعوض أو للتخفيف من إصدار الروائح الكريهة قدر المستطاع، كما ويجب أن يكون قاع موقع التخزين معزولاً تماماً عن المياه الجوفية أو مصادر المياه ويكون آمناً بيئياً. ويمكن الاستفادة من الغاز الحيوي الناتج عن مُعاملات تخمير الحمأة في تسخين خزانات التخمير وفي إنتاج الطاقة.

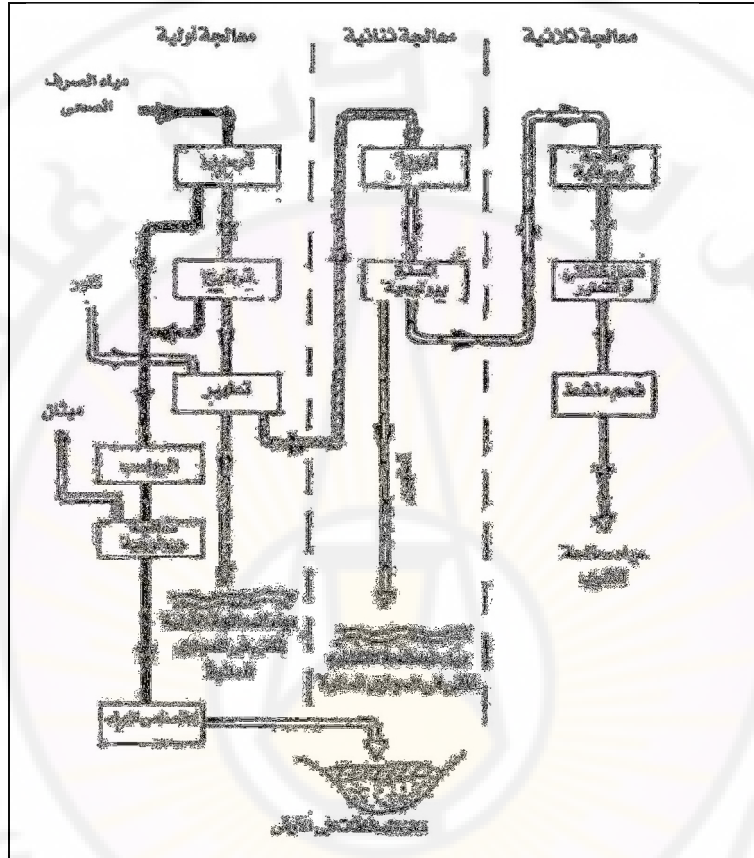
ويتم التخلص من الحمأة الناتجة بطرائق عدة كاستعمالها في الزراعة والحراج، حيث يُعادل استعمال الحمأة كفاءة استعمال الأسمدة المعدنية أو تزيد عنها، وبشكل خاص عند تعرض النباتات إلى الجفاف، وقد أثبتت الدراسات بأن تحرر عنصري الآزوت والفسفور وبعض العناصر الأخرى من الحمأة أثناء تفككها في التربة يؤدي إلى زيادة إنتاج المحاصيل الزراعية. كما وتُستعمل الحمأة أيضاً في استصلاح الأراضي، ويؤدي استعمالها إلى تحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة نتيجة إمداد التربة بالمادة العضوية، ويمكن التخلص من الحمأة أيضاً بواسطة الحرق، أو الطمر الصحي أو تصريفها إلى البحار العميقة، أما أهم التأثيرات السلبية لإضافة الحمأة واستعمالها المديد هو تراكم العناصر المعدنية الثقيلة في التربة، والتي قد تصل إلى مستويات ضارة بالنباتات، كما ويمكن لبعضها أن يُغسل من التربة ويصل إلى المياه الجوفية، ويمكن أيضاً أن يتم التلوث بالمركبات العضوية الضارة، مما يؤثر سلباً على الكائنات الحية النباتية والحيوانية وينتقل إلى الإنسان عبر السلسلة الغذائية.

٤.٥.٣. المعالجة الثالثة (المتقدمة):

تهدف المعالجة الثالثة المتقدمة إلى استعمال مياه الصرف الصحي في أغراض الشرب والاستعمالات المنزلية، أو أغراض أخرى تقتضي أن تكون المياه خالية من جميع أنواع الملوثات وبدرجة عالية من النقاوة، وعلى الرغم من خلو المياه المُعالجة ثانوياً من أغلب المواد العضوية، إلا أنها لا زالت تحتوي على بعض المواد غير العضوية الذائبة فيها كألاح الفسفات والنترات، وبعض الأيونات المعدنية الثقيلة المُنحلة الضارة، ولذلك يمنع استعمال المياه قبل التخلص منها أو خفض تركيزها إلى القيم المُحددة من قبل المنظمات العالمية للصحة أو الهيئات الصحية في كل بلد.

وتُعد الغاية الرئيسة من المعالجة الثالثة هو التحسين الإضافي للمياه، بإزالة الملوثات سابقة الذكر واستبدال المُعالجات البيولوجية بالطرائق الفيزيائية والكيميائية (جدول-١٠). ويمكن إتباع طرائق مُتعددة في المعالجة المُتقدمة للمياه، ويتم اختيار استعمال طريقة تنقية ما تبعاً لنوعية

المواد المتبقية في مياه الصرف الصحي الناتج عن المعالجة الثانوية، كاستعمال بعض عمليات التقطير أو الفصل الغشائي والمعاملة بالفحم المنشط، واستعمال الكلس لترسيب المعادن الثقيلة.



شكل-١٣: يوضح المخطط مراحل تنقية مياه الصرف الصحي.

١.٤.٥.٣. إزالة المركبات الآزوتية:

وتهدف المعالجة إلى إزالة النتروجين في المياه الملوثة بشكله العضوي (الأمونيا)، وغير العضوي (النترات المنحلة)، وتوجد صعوبات فنية عديدة للطرائق المحدودة المستعملة من أجل إزالة الملوثات النتروجينية، وتعد طريقة تعديل الأحوال النشطة من أنجع هذه الطرائق، والتي يعتمد مبدؤها على إرجاع النترات إلى غاز النتروجين الحر. ففي خزان التهوية يتحول النشادر إلى نترات، ومن ثم يُضاف إلى المياه مواد مُحفزة مثل الميثانول، وتقوم الكائنات الحية الدقيقة

الموجودة في الأوحال النشطة باستهلاك الأكسجين الذائب أولاً، وعند تمام استهلاكه تعمل على إرجاع النترات للحصول على الأكسجين، وينطلق نتيجة لذلك غاز النتروجين الحر، ويتم فصل الوحل بعد ذلك ويُعاد إلى خزان التهوية في بداية الخط، وتجدر الإشارة هنا، أن هذه الطريقة تحتاج على الرغم من بساطة مبدئها إلى ضبط دقيق.

أما الطريقة الأخرى لإزالة النشادر من المياه تتم بواسطة الهواء، وبتحريك حموضة الوسط إلى $pH=10.8$ ، فعندما يتحول النشادر المنحل إلى نشادر غير متأين (جزيئي)، يُمكن نزعه بتيار هوائي خالي من النشادر، ونظراً للانحلال الجيد للنشادر في الماء فإنه يلزم استعمال أحجام كبيرة من الهواء لنزعه قد تصل إلى نحو 3000 ضعف حجم الماء، كما يجب أن يكون برج التماس مُصمماً بشكل خاص لتحقيق ذلك. هذا ويرافق هذه الطريقة لنزع الأمونيا (النشادر) مشكلتان فنيّتان هما:

أ- ترسب كربونات الكالسيوم في البرج على شكل أوحال لينة، والتي يُمكن إزالتها بواسطة تيار مائي قوي، أما إذا كانت الأوحال قاسية فيتم اتخاذ إجراءات فنية أكثر تعقيداً لإزالتها.

ب- زيادة انحلال الأمونيا في الماء عند انخفاض درجة حرارة الجو، ونتيجة لذلك يتم التوجه إلى استعمال عملية التبادل الأيوني كعملية بديلة لإزالة الأمونيا، حيث تُمرر المياه المُعالجة عبر فلتر انتقائي لأيونات الأمونيوم (مُرشح الكلينوبيتيلوليت)، وتُشغّل هذه المُبادلات بين فترة وأخرى بمعاملتها بمحلول قلوي مثل هيدروكسيد الكالسيوم.

ويجب في كلا الطريقتين خفض قيمة درجة الحموضة بحيث يُصبح الوسط مُعتدلاً $pH=7$ ، ويمكن تحقيق ذلك بإضافة غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن تحويل الأوحال إلى رماد، أو أي وسيلة أخرى مناسبة تحقق ذلك.

٢.٤.٥.٣. إزالة المركبات الفسفورية:

تتم هذه العملية عن طريق إضافة أملاح الحديد أو الحديدي أو أملاح الكالسيوم أو الألمنيوم إلى مرحلة مناسبة من مراحل مُعالجة مياه الصرف الصحي. فمثلاً يُضاف في السويد كبريتات الألمنيوم بكميات محددة بدقة إلى ناتج المُعالجة الثانوية مع الأوحال النشطة، ومن ثم تُوضع المياه في خزانات ترسيب مع استمرارية التحريك الخفيف، ويُؤدي ذلك إلى تناقص محتوى الفسفات في المياه المُعالجة من ٨ مغ/لتر إلى نحو ١ مغ/لتر. كما يُضاف في بعض الأحيان

أكسيد الكالسيوم إلى مرحلة الترسيب الأولي (المعالجة الأولية) مما يؤدي إلى ترسيب الفسفات مع الأوحال على شكل هيدروكسي إيبيت $Ca_5OH(PO_4)_3$. وتؤدي هذه العملية إلى رفع قيمة درجة حموضة الوسط إلى نحو $pH=9.5$ ، وهي درجة قلوية مقبولة، ويمكن تعديلها بتمرير غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن عمليات الأكسدة بواسطة الأحياء الدقيقة ضمن الأوحال النشطة. كما يُوفر أيضاً إضافة أكسيد الكالسيوم الوسط القلوي الضروري لإزالة النشادر بواسطة الهواء "بالفرقة" عن طريق تمرير تيار من الهواء المضغوط داخل المحلول كما ذكر سابقاً، ويجب تعديل درجة حموضة هذه المياه المعالجة قبل طرحها إلى المسطحات المائية أو قبل استعمالها.

٣.٤.٥.٣. استعمال مياه المعالجة الثالثة (المتقدمة) للشرب:

لا يُسمح باستعمال المياه المعالجة ثالثاً وتوزيعها على المنازل قبل القيام بالإجراءات الضرورية التالية:

- إزالة الفيروسات والميكروبات:

ويتم عن طريق تطهير المياه بطريقة الكلورة شائعة الاستعمال، وذلك للقضاء على كافة أنواع البكتيريا الممرضة، أما القضاء على الفيروسات فيحتاج إلى استعمال كميات كبيرة من الفحم الفعال، حيث يمرر الماء خلال الفحم الفعال الحبيبي الناعم قبل إضافة الكلور، ويجب ألا تقل مدة التماس بين الكلور والماء عن ساعة، ويمكن بذلك تحقيق الإزالة التامة للبكتيريا، في حين يوجد صعوبة في تحقيق الإزالة التامة للفيروسات.

- إزالة المواد العضوية:

ويفضل قبل استعمال المياه إزالة أكبر قدر ممكن من المواد العضوية.

- إزالة المكونات اللاعضوية:

ويتطلب إزالة المكونات اللاعضوية كإزالة الصوديوم والكلوريد طرائق متطورة لتحلية المياه المالحة، كالتحليل الكهربائي، والحلول العكسي، واستعمال المبادلات الأيونية، والتقطير الحراري العادي، ويتم اختيار طريقة معينة تبعاً للتكلفة المادية. وتُعد طريقة الامتزاز على الفحم الفعال مفيدة لإزالة الطعم والرائحة من المياه المعالجة، وذلك رغم التكلفة الاقتصادية الإضافية، ويمكن تنشيط هذا الفحم من حين إلى آخر عن طريق تسخينه بمعزل عن الهواء إلى الدرجة $950^{\circ}C$.

حيث يتخلص الفحم عند هذه الدرجة من الشوائب، وتكون كمية الفحم الضائعة قليلة ولا تزيد عن بضعة أجزاء من المائة.

٤.٤.٥.٣. بعض الطرائق الخاصة بالمعالجة الثالثة (المتقدمة):

تتضمن المعالجة المتقدمة للحصول على مياه عالية النقاوة العمليات التالية:

- **التخثر الكيميائي والترسيب:** ويتم التخثر الكيميائي عند إحداث تغير فيزيوكيميائي للجسيمات، بإضافة مواد كيميائية تؤدي إلى تلاحقها مع بعضها وتجمعها، ومن ثم ترسيبها في أحواض الترسيب نظراً لزيادة حجمها، ومن أهم المركبات الكيميائية المخثرة مركبات الحديد والألمنيوم والكلسيوم والبوليمير.

- **الترشيح الرملي:** وتتم هذه العملية بمرور المياه خلال وسط رملي بسمكة لا تقل عن ٥٠ سم، ويتحقق بذلك إزالة معظم الجسيمات العالقة الدقيقة في الماء والتي لم تترسب في أحواض الترسيب نظراً لصغر حجمها، وكذلك إزالة المواد الصلبة المتبقية بعد عملية التخثر الكيميائي، ويجب إجراء عملية الترشيح الرملي قبل إجراء العمليات اللاحقة لمعالجة المياه كالامتصاص الكربوني والتبادل الأيوني والتناضح العكسي.

- **الامتصاص الكربوني:** يستعمل الكربون المنشط في هذه العملية لإزالة المواد العضوية الذائبة، ويتم ذلك بتمرير المياه من خلال خزانات تحتوي على الوسط الكربوني، وتتم عملية إعادة تنشيط الوسط الكربوني بعد تشبعه بالكربون بواسطة استعمال مواد كيميائية محددة أو بواسطة الحرق.

- **التبادل الأيوني:** وهي إحلال أيونات معينة في الماء من مادة تبادل غير قابلة للذوبان بأيونات أخرى، وهذه العملية تشابه عملية الامتصاص الكربوني لكن لإزالة المواد غير العضوية

- التناضح العكسي (الأسموزية العكسية):

ويتم خلال هذه العملية دفع الماء بقوة وضغط عالي من خلال غشاء رقيق نصف نفوذ، يسمح بمرور جزيئات الماء فقط ويمنع مرور جزيئات الأملاح، وتؤدي هذه الطريقة إلى خفض التراكيز المرتفعة من الأملاح المعدنية الذائبة، وإزالة المواد الذائبة الأيونية وغير الأيونية، وكذلك تقوم بإزالة المواد العضوية متضمنة البكتيريا والجراثيم.

جدول-١٠: يبين النسب المئوية لإزالة أهم ملوثات مياه الصرف الصحي نتيجة معالجتها

بطرائق معالجة مختلفة (أولية، ثانوية وثالثية "متقدمة").

المعالجة الثالثة (المتقدمة) باتتبع طرائق			المعالجة الثانوية	المعالجة الأولية	الطرائق المستعملة لإزالة العناصر المعدنية واللامعدنية
مرشحات رملية %	امتصاص كربوني بعد التبادل الأيوني %	أكسدة كيميائية وتناضح عكسي %	الحماة المحفزة		
٩٦	١٠٠	١٠٠	٩٤	٤٢	الأكسجين الكيميائي الحيوي
٨٨	٩٨	١٠٠	٨٣	٣٨	الأكسجين الكيميائي
٩٩	١٠٠	١٠٠	٩١	٦٣	المواد العالقة الصلبة
٨٠	١٠٠	١٠٠	٧٠	١٨	آزوت - الأمونيا
٣٨	١٠٠	١٠٠	٦٠	٢٧	الفسفور
٩٠	١٠٠	١٠٠	٨٩	٣٤	الكربون العضوي
٩٤	٩٧	١٠٠	٩٤	٦٥	الزيوت والدهون
٧٩	١٠٠	١٠٠	٩٠	٣١	المواد العكرة
٨٩	لا تتغير	لا تتغير	٣٨	تزداد	القلوية
70	93	١٠٠	56	15	اللون
79	92	١٠٠	79	27	المواد المسببة لتشكيل الرغوة

٦.٣. محطات معالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات:

تُدعى محطات معالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات "بالأراضي الرطبة الاصطناعية"، وتُمر فيها المياه الناتجة عن المعالجة الأولية عبر أحواض مصممة بشكل هندسي مملوءة بوسط حصوي أو رملي أو مزيج منهما ومزروعة بالنباتات كالقصب مثلاً، ويُمكن اعتبار هذه الأحواض مرحلة ثانوية أو ثالثية من معالجة المياه الملوثة، وذلك تبعاً لاستعمال أحواض متباينة ذات جريان سطحي وجريان تحت سطحي، وتُشكل جذور وسوق وأوراق النباتات ضمن أحواض الأراضي الرطبة الاصطناعية مكاناً مناسباً لنمو الكائنات الحية الدقيقة والتي يُطلق عليها اسم

بيريفيتون "Periphyton"، وهناك درجة عالية من التنوع الحيوي ضمن هذا النظام، حيث يُوجد ما يزيد عن ٥٠٠٠ نوع مختلف من البكتيريا مقارنةً مع ٢٠٠-٣٠٠ نوع من البكتيريا الموجودة في محطات المعالجة التقليدية. وتعمل الكائنات الحية الدقيقة على تحطيم المواد العضوية الموجودة في مياه الصرف الصحي، ويؤدي عمل البيريفتون والعمليات البيولوجية والكيميائية والفيزيائية الطبيعية إلى التخلص من ٩٠% تقريباً من الملوثات، كما تقوم النباتات نفسها بإزالة ٧-١٠% من الملوثات، وتشكل النباتات بعد موتها وتحللها مصدراً كربونياً للكائنات الحية الدقيقة، كما ويمكن للنباتات المائية أيضاً وبحسب نوع النبات وينسب مختلفاً إزالة العناصر المعدنية الثقيلة. ويعتمد مبدأ عمل الأراضي الرطبة الاصطناعية على التحلل البيولوجي للملوثات بشكل مُماثل لما يجري في الطبيعة، مع إزالة جزء من المواد المغذية للنبات كالمركبات النتروجينية والفسفورية، حيث يؤدي التنوع العالي الحيوي ضمن هذا النظام إلى حدوث آليات متنوعة من التحلل لمركبات عديدة، وبسرعة أكبر عما يتم في محطات المعالجة البيولوجية الميكانيكية والتي تعتمد في المعالجة على بعض الأنواع من الكائنات الحية الدقيقة، وعلى الرغم من اعتماد هذه التقنية على الوسائل الطبيعية في المعالجة، إلا أنها أثبتت كفاءةً عاليةً في عمليات تنقية ومعالجة المياه.

١.٦.٣. تصنيف محطات المعالجة بالنباتات:

تُصنف محطات معالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات "الأراضي الرطبة الاصطناعية" تبعاً للنباتات المائية المستعملة ضمنها، أو تبعاً لنوع جريان مياه الصرف الصحي عبرها.

- تصنيف محطات معالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات "الأراضي الرطبة"، تبعاً للنباتات المائية (شكل-١٤):

أ- محطة المعالجة ذات النباتات الطافية Plant Floating.

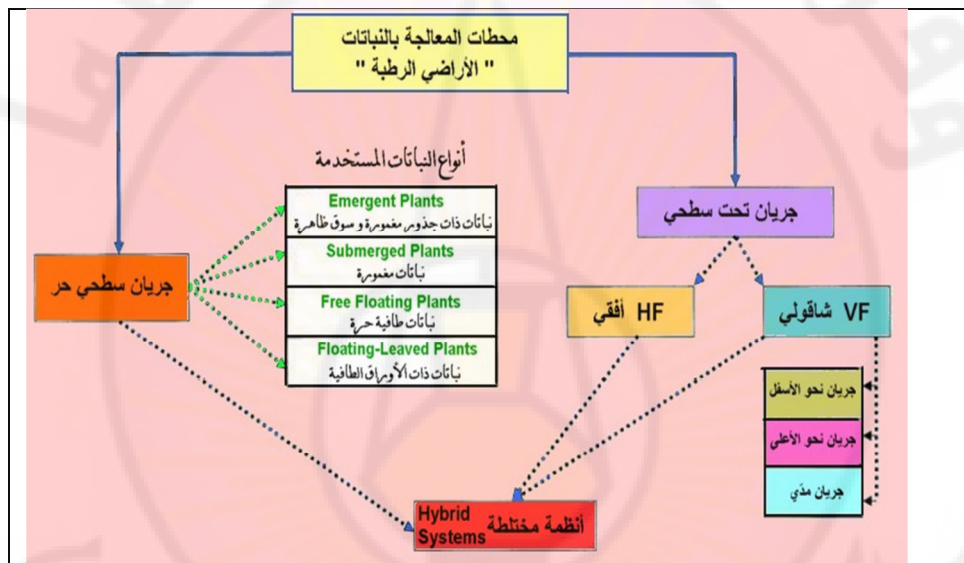
ب- محطة المعالجة ذات النباتات المغمورة Submerged Plants.

ج- محطة المعالجة ذات النباتات التي لها جذور مغمورة وسوق ظاهرة Rooted

emergent Plants.

- تصنيف محطات معالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات "الأراضي الرطبة"، تبعاً لاتجاه تدفق المياه عبر الوسط "الميدى":

- أ- محطة المُعالجة ذات الجريان السطحي الحر Water Surface Free ويرمز لها بـ FWS.
- ب- محطة المُعالجة ذات الجريان تحت السطحي الأفقي Subsurface horizontal Flow ويرمز لها بـ SHF أو HF.
- ج- محطة المُعالجة ذات الجريان السطحي الشاقولي Subsurface Vertical Flow ويرمز لها بـ SVF أو VF.
- د- محطة المُعالجة ذات الجريان المتنوع (أفقي، شاقولي) Hybrid System.



شكل-١٤: تصنيف محطات مُعالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات.

٢.٦.٣. مراحل مُعالجة المياه المُلوثة في محطات المُعالجة بالنباتات:

تتم في البدء المُعالجة الأولية لمياه الصرف الصحي باستعمال أحواض الترسيب الأولية، وقد يتطلب الأمر استعمال أحواض إزالة الرمال والدهون، ثم تُمرر المياه الخارجة من المُعالجة الأولية إلى وحدة المُعالجة بالنباتات ذات الجريان تحت السطحي الأفقي أو الشاقولي للمُعالجة الثانوية، وتُمرر المياه بعد ذلك إلى وحدة المُعالجة بالنباتات ذات الجريان السطحي وهي المرحلة

الأخيرة للمعالجة لتحسين المواصفات النهائية للمياه المُعالجة، وتتم الخطوات السابقة عند خفض تركيز الملوثات من المواد العضوية والمواد الصلبة المُعلقة فقط.

أما عند ضرورة خفض تركيز الأمونيا، فيجب في البدء مرور المياه إلى وحدة مُعالجة النبات ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي (VF)، وذلك عبر ضخ المياه المراد مُعالجتها لتسريع دخولها عبر وسط الفلتر "المبدئ". ويتم فيها خفض قيم الأمونيا، حيث تتم عملية النترجة في الأحواض ذات الجريان الشاقولي (VF)، وعملية إزالة النترجة في الأحواض ذات الجريان الأفقي (HF). وتتطلب محطة المُعالجة بالنباتات وجود حفر لمراقبة نوعية المياه قبل حوض المُعالجة بالنباتات وبعده.

ويُعد النظام الذي يُستعمل مزيجاً من الأحواض المتتالية، ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي والجريان تحت السطحي الأفقي، الأكثر فعالية في تنقية المياه المُلوثة، ويُوضح كل من (الشكل- ١٦و١٥) المخطط العام للأحواض ذات الجريان الأفقي، والجريان الشاقولي على التوالي.

تُماثل محطات المُعالجة بالنباتات "الأراضي الرطبة الاصطناعية" محطات المُعالجة الصغيرة أو متوسطة الحجم، وتُستعمل لمُعالجة مياه الصرف الصحي المنزلي أو الصناعي أو مياه الأمطار وغيرها. وقد تم تطوير محطات المُعالجة بالنباتات خلال العقود السابقة مما أدى إلى انتشار استعمالها في دول عديدة، ومن أهم ميزاتها:

التكلفة المُخفضة للبناء وسهولة الإنشاء والتشغيل والصيانة، وذلك لاعتماد هذه الطريقة على المُعالجة البيولوجية الطبيعية، والتي تحتاج إلى طاقة قليلة للتشغيل والصيانة، وكذلك لا تُستعمل فيها مواد كيميائية وتجهيزات ميكانيكية، وبالتالي لا تحتاج إلى خبراء من أجل التشغيل.

الإزالة الفعالة للملوثات والعوامل المُمرضة وبيوض الديدان.

قلة الحمأة الناتجة عن المُعالجة وتنتج الحمأة الأولية فقط.

الأداء العالي والقدرة الكبيرة على تحمل تذبذبات تدفق مياه الصرف الصحي.

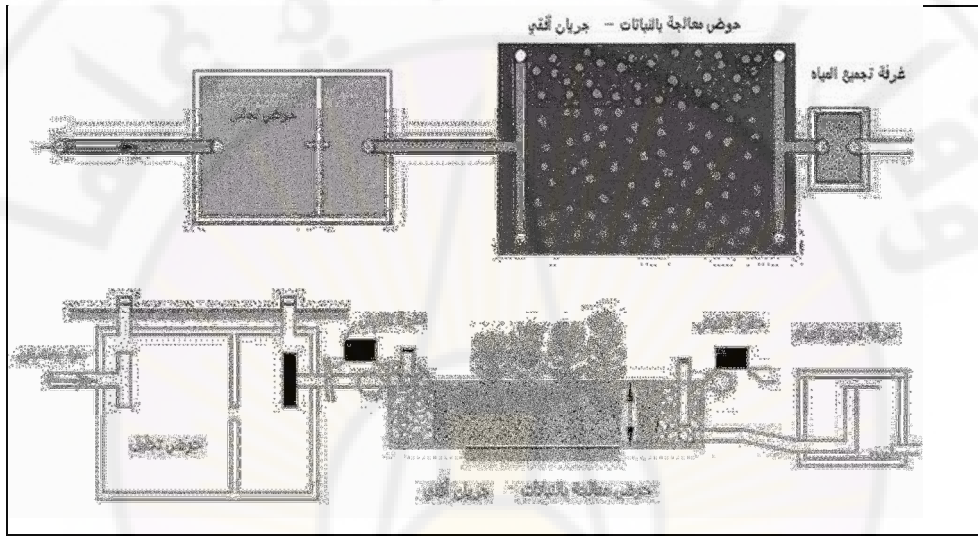
استعمال المياه المُعالجة في ري المحاصيل، وإعادة استعمال النباتات بعد قطعها في موسم الحصاد لتغذية الحيوانات.

وأما مساوئ محطات المُعالجة بالنباتات فهي:

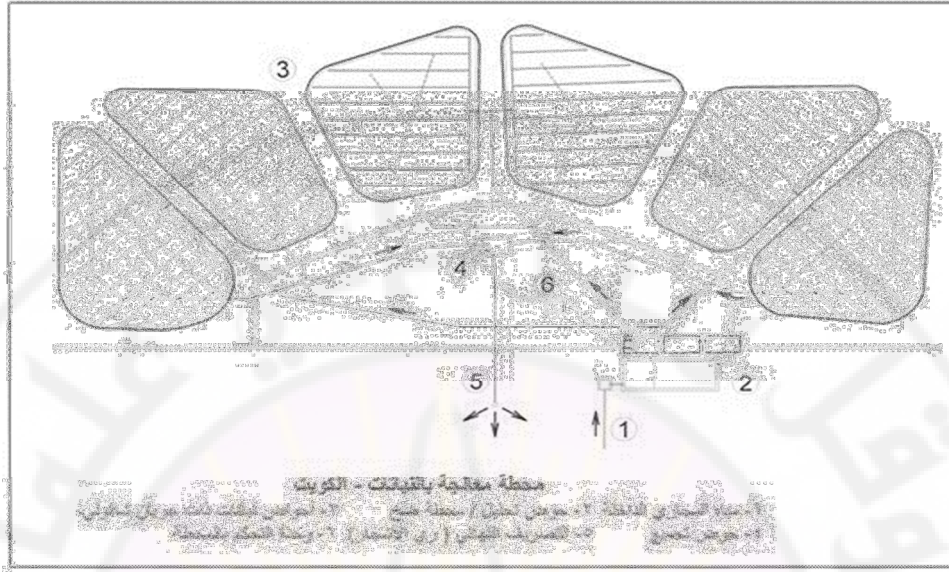
- المساحة الكبيرة اللازمة للمحطة مقارنةً مع محطات المُعالجة التقليدية.

- تحتاج إلى كميات كبيرة نسبياً من الرمال والحصى والحجارة.

- احتمالية انسداد بعض الأجزاء الوسطى من الفلتر "الميديا" نتيجة تحلل وتفكك المواد الصلبة الخام والكتلة الحية.
- انتشار الروائح الكريهة، نتيجة لعدم معالجة الحمأة الأولية الناتجة بشكل مناسب.
- التكلفة العالية عند الاضطرار إلى استبدال وسط الفلتر بسبب سوء التشغيل أو التصميم لهذه المحطات.



شكل-١٥: المخطط العام للأحواض ذات الجريان الأفقي.



شكل-١٦: المخطط العام للأحواض ذات الجريان الشاقولي.

٧.٣. مجالات استعمال مياه الصرف الصحي المعالجة:

تُستعمل مياه الصرف الصحي الناتجة عن محطات المعالجة في أغراض عديدة، حيث يُستعمل نحو ٦٠% منها لأغراض الزراعة والري، وبعد مشروع موسكيجون في ولاية ميتشغن الأمريكية لإعادة استعمال مياه الصرف الصحي، أُخذ الأمثلة للمشاريع المنشأة للاستفادة من المياه المعالجة للأغراض الزراعية، ويقوم هذا المشروع بري أكثر من ٢٠٠٠ هكتار من الأراضي المزروعة بمحصول الذرة، حيث تمر المياه المعالجة على هذه الأراضي الزراعية أولاً، ثم يصب بعد ذلك في البحيرة، ويُعد مرور المياه المعالجة في الأراضي لري المحاصيل من إحدى الطرائق لإزالة الملوثات قبل طرحها إلى المسطحات المائية. كما ويُستعمل نحو ٣٠% من المياه المعالجة في الاستعمالات الصناعية كعمليات التبريد مثلاً، ونحو ١٠% منها تُستعمل لأغراض أخرى متنوعة، كتغذية المياه الجوفية تعويضاً للنقص في المخزون المائي الجوفي، نظراً للاستهلاك المتزايد لهذه المياه ومنعاً لتسرب المياه المالحة إلى الطبقات الصخرية الخازنة والحاملة للمياه الجوفية العذبة عند نقصان المخزون المائي. كما وتُعد المرافق الترفيهية من إحدى مجالات استعمال مياه الصرف الصحي، حيث تم بناء مشروعين ناجحين في الولايات

المتحدة الأمريكية في ولاية كاليفورنيا، الأول هو مشروع سانتي حيث تطرح المياه من محطة سانتي، للمعالجة في أحد الوديان، وتترك لتتساب خلال التوضعات الرملية والحصوية مسافة تقدر بنحو ١ كم قبل أن تجمع وتوجه لتصب في ثلاث بحيرات مُتصلة مع بعضها ويحيط بها حديقة عامة، ويتم في بحيرتين منها تربية الأسماك وصيدها وممارسة رياضة القوارب، بينما تم تخصيص البحيرة الثالثة للسباحة بعد معالجة مياهها بالكلور. أما المشروع الثاني فهو مشروع خزان الجدول الهندي، وتأتيه المياه المُعالجة مُعالجة ثالثة من محطة تاهو الجنوبية للمعالجة المُتقدمة، ويتسع هذا الخزان لنحو ٢٧ مليون م^٣ من المياه التي تُستعمل لنشاطات مُتعددة كالسباحة وصيد الأسماك.

ومن أهم مجالات استعمال مياه الصرف الصحي بعد المُعالجة الثالثة المُتقدمة هو استعمالها في الشرب، ومن أمثلة ذلك إمداد مدينة شانوت بولاية كنساس الأمريكية بنحو ٤٠٠٠ م^٣ يومياً بالمياه المُعالجة ثالثياً لسد حاجة السكان من مياه الشرب عندما تعرضت المنطقة لموجة من الجفاف في عام ١٩٥٦م. كما تم أيضاً في ناميبيا بمدينة ويندهول إنشاء محطة معالجة مُتقدمة لمياه الصرف الصحي في عام ١٩٦٤م لإمداد المدينة بنحو ٥٠% من احتياجاتها من مياه الشرب.

الفصل الرابع

تحلية ماء البحر

١.٤. المقدمة:

أدى الازدياد المضطرد في عدد السكان في العالم وارتفاع مستوى المعيشة في كثير من الدول إلى زيادة كبيرة في استهلاك المياه العذبة. ويبلغ استهلاك الفرد في الدول النامية لكافة أنشطته المختلفة نحو ٥٠ لتر/اليوم من الماء، في حين يبلغ استهلاك الفرد في الدول الصناعية نحو ٥٠٠ لتر/اليوم. كما ويوجد العديد من المناطق في العالم لا تتوافر فيها المياه العذبة الصالحة للشرب، كالمناطق الجافة والصحراوية التي لا تهطل عليها الأمطار ولا تحتوي أيضاً على كميات كافية من المياه الجوفية، وقد أدى النقص الشديد الذي تعانيه الكثير من دول العالم في المياه الصالحة للشرب، وكذلك تلوث مصادر المياه كما هو الحال في أغلب الدول الصناعية، إلى البحث عن مصادر جديدة للمياه غير المصادر التقليدية، ولذلك لجأت العديد من الدول إلى تحلية مياه البحر، وتحتاج هذه المصادر إلى تقانات معالجة متقدمة للمياه، بالإضافة إلى المعالجة التقليدية.

وتختلف المواصفات القياسية لمياه الشرب من حيث نسبة الأملاح الكلية الذائبة من بلد إلى آخر، فالمواصفات القياسية الأمريكية تتطلب ألا تزيد النسبة عن ١٥٠٠ ppm، وفي استراليا ٣١٠٠ ppm، أما في المكسيك فهي ٤٠٠٠ ppm.

تحتوي مياه البحر على أملاح ذائبة مختلفة أهمها كلوريدات، وكبريتات، وكربونات، لعناصر الصوديوم والبوتاسيوم والكلسيوم والمغنيزيوم، ولا يمكن إزالة الأملاح من مياه البحر بالطرائق المتبعة لإزالة عسر المياه، والتي قد تنجح مع بعض أملاح الكلسيوم والمغنيزيوم، ولكنها غير ناجحة لإزالة الأملاح الأخرى مثل كلوريدات الصوديوم والبوتاسيوم، وتوجد طرائق عدة لتحلية المياه، ويعتمد اختيار طريقة معينة على عدة عوامل منها نسبة الأملاح الكلية الذائبة في الماء، وسعر تكلفة المتر المكعب الواحد للماء العذب والنواتج عن عملية التحلية، والذي يعتمد على تكاليف الإنشاء والتشغيل. وتُدعى عملية إزالة الأملاح بشكل كلي أو جزئي من مياه البحار والمحيطات بتحلية الماء أو إغذاب الماء.

٢.٤. مراحل معالجة مياه البحر في محطات التحلية:

تخضع مياه البحر في محطات التحلية بشكل عام إلى مراحل التحلية المختلفة التالية:

- المعالجة الأولية:

يُضخ ماء البحر إلى وحدات الفصل الميكانيكية لفصل المواد الصلبة وإزالة جزء كبير من المواد العالقة بالمياه كذرات التراب والبكتيريا، ثم يُمرر الماء على وحدات المعالجة الأولية، ويتم في هذه العملية إضافة بعض المواد الكيميائية التي تختلف نوعيتها وكميتها تبعاً لنوعية ماء البحر ولطريقة التحلية المتبعة في المحطة، كإضافة محلول هيبوكلوريت الصوديوم لمعالجة المياه من المواد البيولوجية العالقة بها، وإضافة البولي فسفات مثلاً لمنع الترسبات (القشور) داخل أنابيب المكثفات والمبادلات الحرارية، وتُمرر مياه البحر أيضاً على أجهزة لنزع والتخلص من الغازات الذائبة في المياه، كما ويتم تسخين مياه البحر بواسطة مبادلات حرارية تعمل البخار تُدعى مُسخنات المياه المالحة.

- عملية إزالة الأملاح:

ويتم فيها إزالة الأملاح الذائبة في المياه والفيروسات والمواد الأخرى الذائبة فيه، كالمواد الكيميائية والعضوية، عن طريق استعمال طرائق التحلية المختلفة.

- المعالجة النهائية:

تُعالج المياه الناتجة عن محطة التحلية مُعالجةً كيميائيةً أخرى، حيث تتم إضافة بعض الأملاح والمواد الأخرى إلى الماء (مثل الكلور وثاني أكسيد الكربون والكلس) ليُصبح ضمن المواصفات القياسية، وذلك فقط في حالة استعمال المياه للاستهلاك المباشر للشرب، أو للاستعمال المنزلي أو الزراعي، ولا تتم هذه الإضافات عند استعمال المياه في أغراض التطبيقات الصناعية والأدوية حتى لا تؤثر سلباً على جودة المنتج. ويتم بعدئذ نقله من محطة المعالجة إلى الخزانات الكبيرة التي تمتد شبكة مياه الشرب.

٣.٤. طرائق تحلية مياه البحر:

تُوجد طرائق عديدة لتحلية مياه البحر، كالطرائق التي تعتمد على تحلية المياه بالتقطير (الطرائق الحرارية)، أو المُعتمدة على طرائق فصل الأملاح بالأغشية، أو تحلية المياه بالتجميد أو البلورة.

١.٣.٤. تحلية مياه البحر بالتقطير:

١.١.٣.٤. التقطير العادي:

وثُعد من أقدم التقانات المُستعملة لتحلية المياه، ويعتمد مبدؤها على رفع درجة حرارة الماء في خزان المياه إلى درجة الغليان، مما يؤدي إلى تصاعد بخار الماء إلى أعلى الخزان، ومن ثم يخرج عبر مسار مُوصول إلى المُكثف، والذي يقوم بتحويل بخار الماء إلى قطرات، يتم بعد ذلك تجميعها في خزان الماء المقطر. وتُستعمل هذه الطريقة في محطات التحلية ذات الطاقة الإنتاجية الصغيرة. ولهذه الطريقة مساوئ عدة، منها مخاطر التآكل المصاحب لدرجات الحرارة المرتفعة، وترسب قشور ملحية من أملاح الكالسيوم والمغنيزيوم عند درجة حرارة أعلى من ٧١°م، إضافة إلى تكاليفها الباهظة، واستهلاكها كميات كبيرة من الطاقة، فمثلاً للحصول على 1م^٣ من الماء العذب تحتاج إلى نحو ٦٠٠ وحدة حرارية.

وقد تطورت طريقة التحلية بالتقطير عبر العقود السابقة، ونشأ عنها العديد من تقانات التحلية بالتقطير مما سمح بالانتشار الواسع لهذه التقنية.

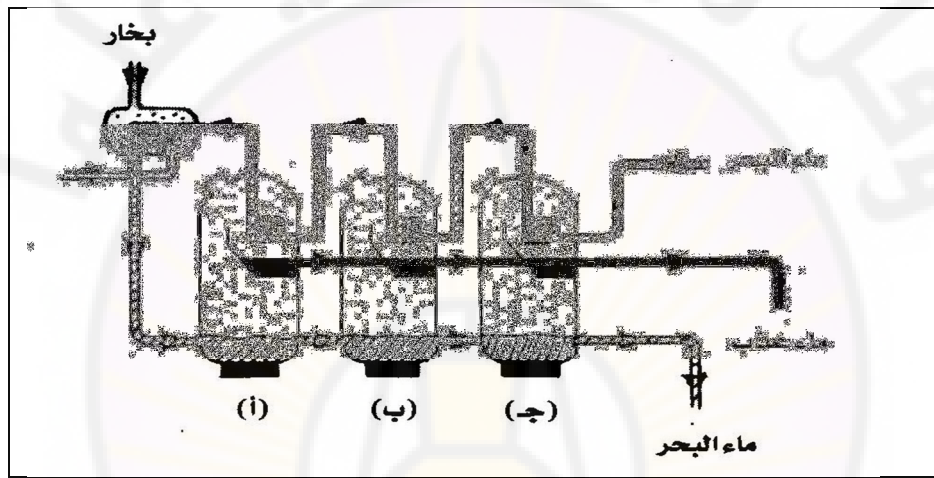
٢.١.٣.٤. التقطير الومضي مُتعدد المراحل:

تعتمد هذه الطريقة على التغير في درجة غليان الماء بتغير درجة الضغط الواقع على سطحه، حيث تتناسب درجة السوائل طردياً مع الضغط الواقع عليها، فكلما قل الضغط الواقع على السائل انخفضت درجة غليانه. وتُدعى عملية غليان الماء لحظة انخفاض الضغط الواقع عليه بشكل فجائي وبدون أي إمدادات حرارية بالومض.

وفي هذه الطريقة يدخل ماء البحر إلى المرجل ويتم تسخين الماء فيه إلى درجة حرارة مرتفعة تصل إلى نحو ٩٠-١٠٠°م، ومن ثم يُمرر الماء بعدة مراحل (عدة حبرات متتالية)، يكون فيها الضغط في كل مرحلة أقل من المرحلة التي سبقتها، مما يؤدي إلى غليان المياه، ونتيجة لذلك فإن جزءاً من المياه يتحول آنياً إلى بخار، أما بقية المياه الحارة فتستمر في التحرك داخل سلسلة من المراحل (الحُبرات) بدرجات حرارة وضغوط تتخفف تدريجياً، الأمر الذي يؤدي إلى تحول الماء إلى البخار.

يُلامس البخار المتصاعد في كل مرحلة من المراحل الأنابيب التي تحمل مياه البحر الباردة الداخلة إلى الأجهزة (شكل-١٧)، مما يؤدي إلى تكاثفه إلى ماء عذب، يتجمع في وعاء بجانب كل مرحلة، كما ويؤدي البخار المتصاعد إلى رفع درجة حرارة ماء البحر البارد عند أول مرحلة وقبل دخوله إلى المرجل، ليقال بذلك من كمية البخار الخارجي المطلوب للتسخين، ويؤدي أيضاً إلى زيادة سرعة عملية التقطير، وبهذه الطريقة يتخلص الماء في كل مرحلة من المراحل من جزء من أملاحه التي تبقى مع الفضلات، وتطرح بعد ذلك في البحر.

تتطلب هذه التقنية في تحلية المياه وجود ٢٠-٢٥ مرحلة (حُجرة) على الأقل لإمرار المياه، وكلما ازداد عدد المراحل كلما كانت فعالية التحلية أعلى، والمردود الاقتصادي أفضل، ولكن يزداد بالتالي ارتفاع التكلفة الإنشائية. وتُستعمل هذه الطريقة في محطات التحلية ذات الطاقة الإنتاجية الكبيرة نحو ٣٠٠٠٠ م^٣ من المياه، أي نحو ٨ مليون غالون مياه يومياً. وقد تم بواسطة طريقة التقطير الومضي مُتعدد المراحل والتي بدأ استعمالها منذ خمسينيات القرن الماضي، تحلية نحو ٧٠% من الاحتياجات المائية للمياه العذبة في دول الخليج العربي.

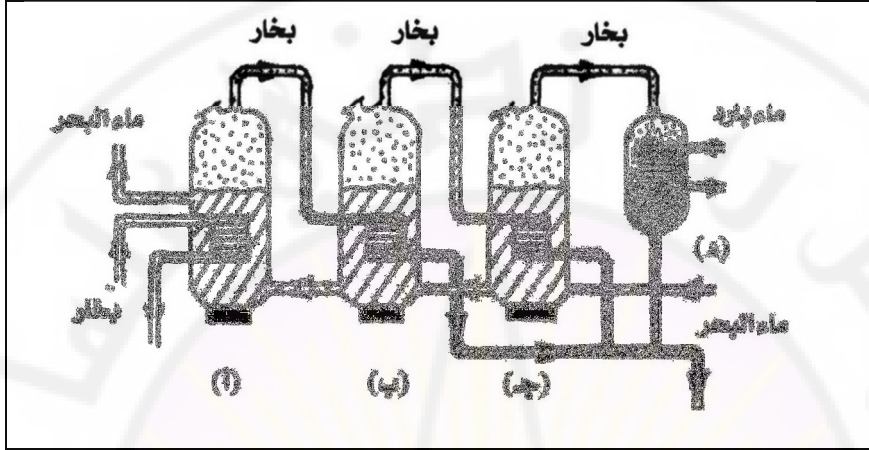


شكل-١٧: تحلية مياه البحر بطريقة التقطير الومضي مُتعدد المراحل.

٣.١.٣.٤. التقطير مُتعدد التأثير ومُتعدد المراحل:

ويتألف من عدة وحدات يتناقص فيها الضغط أيضاً من مرحلة إلى أخرى من مراحل التقطير كما في طريقة التقطير الومضي مُتعدد المراحل (شكل-١٨)، ويتم في هذه الطريقة الاستفادة من البخار الناتج من كل مرحلة في تسخين مياه البحر في المرحلة التي تليها، بحيث تسير مياه البحر في اتجاه مُعاكس لحركة البخار. ويتم تبريد بخار الماء الناتج في المرحلة الأخيرة بالماء البارد واطلاقه في نظام التبريد، ويجمع الماء العذب الناتج من تكثيف البخار في كل مرحلة من المراحل السابقة في خط واحد من الأنابيب. كما ويتم التخلص من ماء البحر المُتبقى والذي ازداد تركيز الملح فيه من مرحلة إلى أخرى من قاع المرحلة الأولى، ويُلقى بعد ذلك في البحر. ومن

أهم ميزات هذه الطريقة الإقلال من احتمالية تشكل قشور الأملاح على سطح الأجهزة المستعملة.

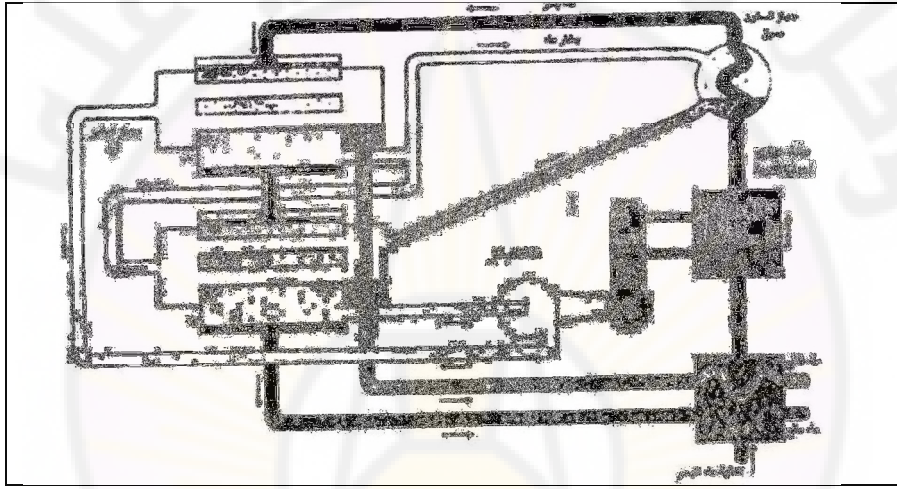


شكل-١٨: تحلية مياه البحر بطريقة التقطير متعدد التأثير ومتعدد المراحل.

٤.١.٣.٤. التقطير بضغط البخار:

تعتمد هذه الطريقة على استعمال البخار المضغوط بواسطة ضاغط مناسب (طاقة ميكانيكية) كمصدر للطاقة الحرارية (شكل-١٩). ويؤدي تعريض غاز ما موجود في حيز مغلق إلى الضغط، إلى الإقلال من حجم هذا الغاز مع تزايد الضغط المطبق عليه، وكذلك يؤدي إلى ارتفاع في درجة حرارته كلما ازداد الضغط. وفي حالة البخار يقل حجم البخار بزيادة الضغط المطبق عليه، حتى الوصول إلى مرحلة يتحول عندها البخار إلى سائل. وتعتمد هذه التقنية على تسخين ماء البحر إلى درجة الغليان في مبخرات، ثم سحب البخار المتشكل وضغطه بطريقة ميكانيكية (ضاغط)، ومن ثم يدخل البخار المضغوط إلى جزء آخر من المبخر، حيث يتكاثف جزء من هذا البخار إلى ماء عذب خارج الأنابيب الحاملة لماء البحر، ويستفاد من حرارة التكثيف (الحرارة الكامنة للبخار) لتوفير الحرارة اللازمة لعملية تسخين مياه البحر الداخلة إلى الأجهزة إلى درجة الغليان. وتُسحب الغازات غير القابلة للتكثيف من حيز البخار، ويتم تكثيفها بواسطة مضخة سحب أو طارد بخاري.

بينما يُستعمل في وحدات التقطير الومضي والتقطير مُتعدد التأثير مصدر بخار خارجي للتسخين كمصدر أساسي للحرارة، فإن التقطير بانضغاط البخار يستعمل بخاره الخاص كمصدر حراري، بعدما يُضغَط هذا البخار. ويُمكن باتِّباع هذه الطريقة تحلية كميات محدودة من ماء البحر، تصل إلى نحو ٥٠٠ م^٣/يوم في محطة متوسطة الحجم، وذلك نظراً لوجود بعض الصعوبات التقنية والتي تتعلق بحجم أجهزة الضغط الجوي المُستعملة في هذه المحطات، وتناسب هذه الطريقة الوحدات الصغيرة حتى ٢٣ مليون لتر/يوم.

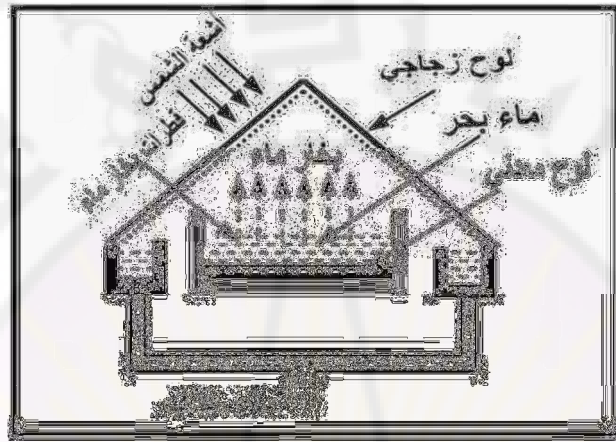


شكل-١٩: تحلية مياه البحر بطريقة التقطير بضغط البخار.

٥.١.٣.٤. التقطير باستعمال الطاقة الشمسية:

تعتمد هذه الطريقة على الاستفادة من الطاقة الشمسية في تبخير مياه البحر، ومن ثم تكثيفها على أسطح باردة، وتجميع المياه الخالية من الملوحة في أنابيب. وتشبه وحدات التحلية المُستعملة لهذا الغرض من حيث التصميم البيوت الزجاجية الزراعية، وتُدعى جهاز التقطير الشمسي Solar Still والذي يتكون من صوبة زجاجية يُغطى الحوض في قاعها بسطح أسود وعلى جانبيها قناتين لتجميع بخار الماء المُتكاثف (شكل-٢٠). تُؤدي أشعة الشمس، التي تخترق الألواح الزجاجية للجهاز إلى رفع درجة حرارة ماء البحر الموجود على السطح الأسود في قاع الصوبة، والذي يمتص جزءاً كبيراً من حرارة الشمس مما يؤدي إلى ارتفاع حرارته بشكل كبير. ويؤدي الفرق الحراري بين قاع الجهاز وألواح الزجاج التي لا ترتفع حرارتها بنفس المقدار،

إلى تكثيف بخار الماء على الألواح الزجاجية بشكل قطرات من الماء العذب، تتجمع بعد ذلك في القناتين الموجودتين على جانب الصوبة. ويتم إضافة كمية جديدة من ماء البحر في حوض الجهاز كل فترة، ويفضل ألا تزيد سماكة الطبقة المالحة عن عدة سنتيمترات، لأن ذلك يُساعد على سرعة رفع درجة حرارتها إلى الحد المناسب.



شكل - ٢٠: تحلية مياه البحر باستعمال الطاقة الشمسية.

يعتمد مُعدل التبخر في جهاز التقطير الشمسي على درجة حرارة الماء المُسخن بالأشعة الشمسية، وعلى درجة الرطوبة النسبية للجو المحيط بسطح التبخر، ويُؤدي تكثيف البخار على الألواح الزجاجية للجهاز إلى تناقص الرطوبة النسبية فيه، وزيادة مُعدل التبخر. وتمتاز هذه التقنية لتحلية المياه ببساطتها، وانخفاض تكاليفها، ولا تحتاج إلى تسخين المياه إلى درجة الغليان، ولكن من الضروري تشغيلها في طقس مُتميز بدرجة حرارة عالية كالمناطق الصحراوية، وبالتالي لا يمكن استعمالها في كل البيئات، كما وأنها تحتاج إلى مساحات كبيرة لإنشاء الصوبة، إضافة إلى طرح كميات كبيرة من الفضلات ذات التركيز الملحي المرتفع والتي يُمكن إعادتها من جديد إلى البحر، ولكن في كثير من الأحيان قد يتم طرحها على شكل توضعات، مما يتوجب الحذر من إمكانية تلوث المياه الجوفية، الأمر الذي يتطلب الاختيار الصحيح بيئياً لمواقع طرح هذه الفضلات. كما وتُعد كفاءة هذه التقنية محدودة، حيث يُعطي حوض مساحته ١م^٢ نحو خمس لترات من الماء العذب في اليوم عند درجة حرارة ٣٧م°، ولذلك تُلائم هذه التقنية الوحدات الصغيرة التي تمتد القرى والمراكز السياحية بالماء العذب.

٢.٣.٤. طرائق تحلية مياه البحر بواسطة فصل الأملاح بالأغشية:

وتُعد هذه الطرائق من أفضل تقانات تحلية المياه، وذلك لاستهلاكها المحدود للطاقة، حيث تعمل في الدرجات العادية للحرارة، وبالتالي لا تتطلب تحول الماء من الطور السائل إلى الطور البخاري، كما في طريقة التقطير التي تحتاج إلى طاقة كبيرة لإحداث التغيير في أطوار الماء. ويوجد طريقتان تُستعمل فيهما الأغشية شبه النفوذة لتحلية المياه وهما: طريقة الفصل الغشائي الكهربائي وطريقة الضغط الأسموزي العكسي.

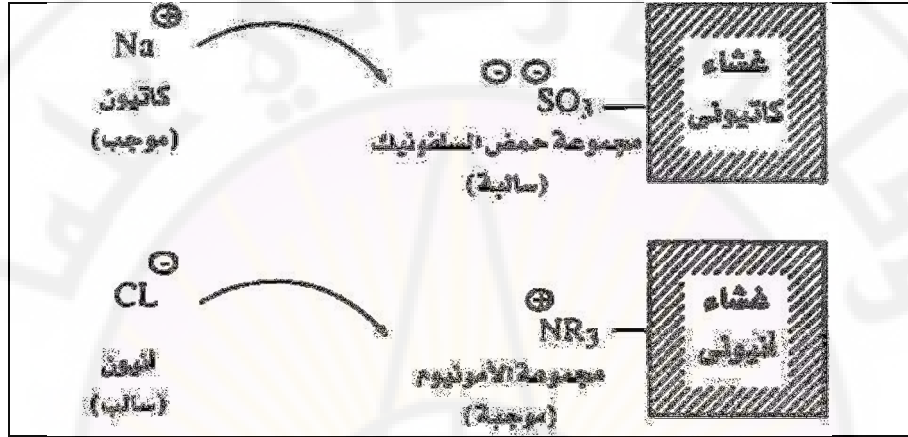
١.٢.٣.٤. طريقة الفصل الغشائي الكهربائي أو طريقة الديليزة الكهربائية:

وتعتمد هذه الطريقة على التحليل الكهربائي للأملاح الذائبة إلى أيونات موجبة Cations وأيونات سالبة Anions، وعلى استعمال الأغشية شبه النفوذة التي تسمح بمرور هذه الأيونات، ويوجد نوعان من الأغشية، والتي تُعرف باسم الأغشية الانتقائية Selective Membranes، لأن كل منها ينتقي من المحلول نوعاً واحداً من الأيونات فقط.

فهناك أغشية أنيونية Anionic Membranes، والتي تسمح بنفاذ الأيونات السالبة كأيون الكلور Cl^{-1} أو أيون الكبريتات SO_4^{-2} ، وأغشية كاتيونية Cationic Membranes والتي تسمح بنفاذ الأيونات الموجبة، كأيون الصوديوم Na^{+1} وأيون الكالسيوم Ca^{+2} . ومعظم هذه الأغشية هي مواد عضوية متبلورة مثل الأغشية المصنوعة من بوليمير "بولي سترين ثنائي فينيل بنزن Polystyrene-Divinylbenzene" والتي تحتوي جزيئاتها على مجموعة فعالة، تقوم بجذب الأيونات المخالفة لها في الشحنة، حيث تحتوي الأغشية الكاتيونية على مجموعة الحمض الكبريتي SO_3^{-} والتي تحمل الشحنة السالبة وتقوم بجذب الكاتيونات، بينما تحتوي الأغشية الأنيونية على مجموعة الأمونيوم الرباعية NR_3^{+} وتقوم بجذب الأنيونات (شكل-٢١). وتُستعمل هذه الخاصية الانتقائية للأغشية في تحلية المياه. ويوضح (الشكل-٢٢) أحد الأجهزة المُستعملة في تحلية مياه البحر بطريقة الفصل الغشائي الكهربائي.

ويتألف هذا الجهاز من ثلاثة أقسام: القسم المتوسط والذي يحتوي على الماء المالح، ويفصله عن القسمين الأيمن والأيسر غشاءين، أحدهما غشاء كاتينيوني ويوضع إلى جهة القطب السالب، والآخر غشاء أنيوني ويوضع إلى جهة القطب الموجب. وعند مرور التيار الكهربائي في المحلول تقوم مجموعة الحمض الكبريتي SO_3^{-} المرتبطة بجزيئات الغشاء الكاتينيوني بجذب الكاتيونات من المحلول أي أيونات الصوديوم Na^{+1} وتسمح لها بالنفاذ إلى القسم المتضمن على القطب السالب، ولا تستطيع الأنيونات أي أيونات الكلور Cl^{-1} الاقتراب من هذا الغشاء لأنها تتنافر

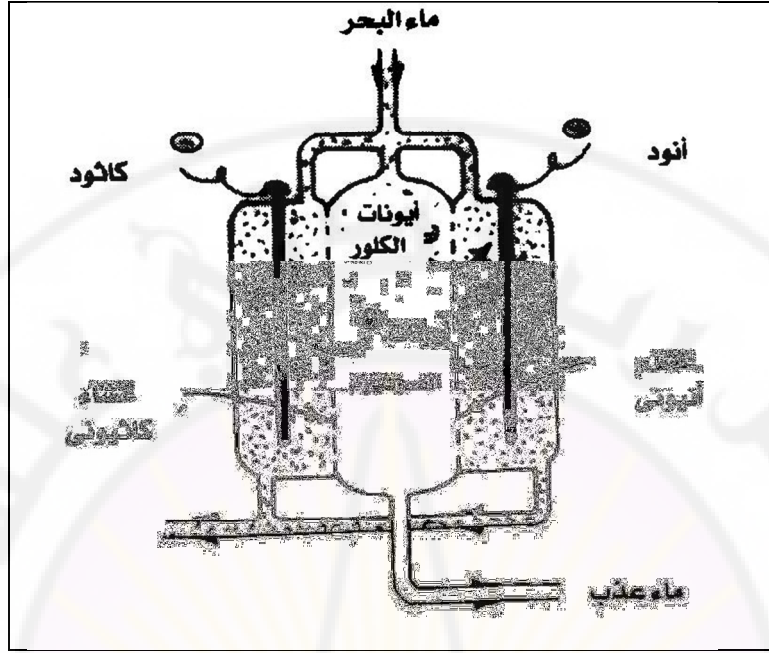
معها، بينما تقوم مجموعة الأمونيوم NR_3^+ بجذب الأنيونات من المحلول أي أيونات الكلور Cl^- وتسمح لها بالنفاذ إلى القسم المتضمن على القطب الموجب، بينما تتنافر الكاتيونات أي أيونات الصوديوم Na^+ عند الاقتراب من هذا الغشاء، ويخرج الماء العذب من قاع القسم المتوسط للجهاز.



شكل-٢١: تحلية مياه البحر باستعمال طريقة الفصل الغشائي الكهربائي.

تبلغ سماكة الأغشية المستعملة في هذه الطريقة نحو ٠.٢-٠.٨ ملم، ولا يمكن استعمالها بشكل دائم، ويوجد بعض أنواع من الأغشية والتي قد تصل مدة استعمالها إلى خمس سنوات. كما وتتناسب الطاقة الكهربائية في هذه الطريقة طردياً مع كمية الأملاح الذائبة في الماء، فكلما زادت نسبة الأملاح كانت الطاقة الكهربائية أعلى. وقد أثبتت طريقة الفصل الغشائي الكهربائي فعالية في تحلية المياه المالحة التي تحتوي على أقل من ٥ غ/لتر من الأملاح الذائبة، ويوجد العديد من الوحدات لتحلية المياه وفقاً لهذه الطريقة في العالم ومنها ما يوجد في الخليج العربي.

وهناك أيضاً طريقة أخرى مشابهة لطريقة الفصل الغشائي الكهربائي، ولكنها لا تعتمد على الخاصية الانتقائية للأغشية، وإنما يستعمل فيها أغشية شبه نفوذة غير انتقائية، مما يساهم في خفض التكلفة لتحلية المياه إلى حد ما، ولكنها تحتاج إلى طاقة كهربائية عالية لتحريك الأيونات وجذبها إلى الأقطاب.

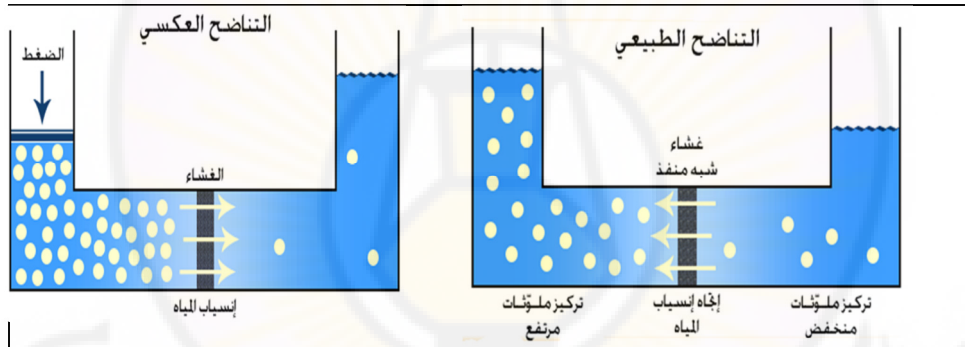


شكل-٢٢: رسم توضيحي لأحد الأجهزة المستعملة في تحلية مياه البحر بطريقة الفصل الغشائي الكهربائي.

٢.٢.٣.٤. طريقة الضغط الأسموزي العكسي (التناضح العكسي):

وتعتمد هذه الطريقة على استعمال أغشية شبه نفوذة أي يمر منها الماء فقط دون الأملاح، وعلى ظاهرة الضغط الأسموزي. ولتوضيح ظاهرة الضغط الأسموزي نفترض وجود أنبوبة ذات فرعين، وُضع في قاعها غشاء شبه نفوذ بحيث يفصلها إلى قسمين، ثم صب في فرعي الأنبوبة قليلاً من الماء، فيلاحظ أن الماء يمر خلال الغشاء من الفرع الذي يكون فيه سطح الماء أعلى إلى الفرع الذي يكون فيه سطح الماء أقل حتى يتساوى سطحي الماء في الفرعين، ويمكن القول عندئذ أن عدد جزيئات الماء المارة في أحد الاتجاهين مساوية لعدد الجزيئات التي تمر في الاتجاه الآخر وأن هناك توازناً حول سطحي الغشاء شبه النفوذ. وعند إذابة قليل من الملح في أحد فرعي الأنبوبة، يُصبح عدد جزيئات الماء في هذا الفرع أقل من عدد جزيئات الماء في الفرع الآخر، وذلك نظراً لحلول بعض جزيئات الملح محلها، وينجم عن ذلك دخول جزيئات الماء عبر الغشاء شبه النفوذ إلى الفرع الذي يحتوي على الملح بعدد أكبر من الجزيئات التي تخرج منه، مما يؤدي

إلى ارتفاع سطح المحلول بشكل تدريجي في هذا الفرع، وانخفاضه في الفرع الآخر حتى الوصول إلى حالة التوازن من جديد، حيث يصبح ضغط جزيئات الماء على سطحي الغشاء متساوياً. ويُدعى الفرق بين سطحي الفرعين في الأنبوبة "بالضغط الأسموزي"، كما وتُلاحظ هذه الظاهرة عند فصل محلول ملحي ذي تركيز مخفف وآخر به محلول ملحي مركز بغشاء شبه نفوذ، حيث تمر جزيئات الماء من المحلول المُخفف التركيز إلى المحلول الآخر، وعند الضغط على المحلول المركز بضغط مساوي للضغط الأسموزي لن يحصل أي انتقال للماء ويبقى تركيز الأملاح في فرعي الأنبوبة على حاله، وذلك لأن الضغط الواقع على المحلول المركز يُلغي الضغط الأسموزي ولن يكون هناك قوة دافعة نحو انتقال جزيئات الماء، لكن عند زيادة الضغط على المحلول ذي التركيز العالي تنشأ قوة دافعة أخرى تؤدي إلى انتقال جزيئات الماء من هذا المحلول إلى الجهة ذات التركيز الملحي المُخفف، وكلما زاد الضغط زادت كمية انتقال الماء، وهذه العملية هي عكس ما يحدث تلقائياً وبشكل طبيعي عند تلاقي المحلولين السابقين، ولذلك دُعيت هذه الظاهرة "بالضغط الأسموزي العكسي" (شكل-٢٣).



شكل-٢٣: تحلية مياه البحر باستعمال طريقة الضغط الأسموزي العكسي.

تضم محطات تحلية الماء التي تُستعمل تقانة الضغط الأسموزي العكسي على الأجزاء الرئيسية التالية:

- **وحدات المعالجة الأولية:** وتقوم بإزالة الشوائب الكبيرة، والمواد العالقة، والمواد العضوية، والمواد غير العضوية، وكذلك إزالة عُسر المياه من الماء المالح قبل دخوله إلى الأغشية لحمايتها من الترسبات التي يمكن أن تُقلل من كفاءتها.

- **مضخات الضغط العالي:** وتقوم برفع ضغط المياه المالحة على الغشاء للتغلب على الضغط الأسموزي، وتعمل على توفير الجهد المناسب لانتقال الماء بالاتجاه المعاكس له.

- **مجموعة الأغشية شبه النفوذة:** وتوجد عدة أنواع من الأغشية شبه النفوذة المستعملة، والتي تمتاز بمقاومتها للبكتيريا، أو الكلور، أو بقدرتها العالية على حجز الأملاح وارتفاع في معدل نفاذية المياه العذبة، والعمل ضمن مجال واسع لدرجة الحموضة، ومن أنواعها الأغشية الاسطوانية، وأغشية الألياف الدقيقة المجوفة، وأغشية اللف الحلزوني.

- **وحدات المعالجة النهائية:** ويتم فيها تعديل درجة حموضة الماء، وضبط التركيز الكلي للأملاح الذائبة، وإضافة الكلور أو الأوزون لتطهيره.

ويبلغ الضغط الأسموزي لماء البحر نحو ٢٥ ضغطاً جويًا، وتحتاج هذه الطريقة إلى استعمال ضغط قد يصل إلى نحو ٥٠ ضعفًا من الضغط الجوي العادي للتغلب على الضغط الأسموزي لماء البحر. كما ويتوقف إنتاج الماء العذب بهذه الطريقة على مستوى ملوحة الماء الداخل إلى المحطة، وعدد مراحل التحلية، حيث تسمح معظم الأغشية المستعملة بمرور أقل من ١% من المحتوى الملحي في المرحلة الواحدة، مما يؤدي إلى إنتاج مياه بملوحة تتراوح بين ٣٠٠-٤٠٠ ppm، ويمكن خفض هذه الملوحة بتحلية المياه مرة ثانية بالأغشية وتكاليف إضافية. ولهذه التقانة ميزات عديدة وأهمها فعاليتها العالية للتخلص من الأملاح والتي قد تصل إلى ما يزيد عن ٩٩%، وإزالة للمركبات العضوية بنسبة ٩٥-٩٩%، وإزالة الملوثات والعناصر الضارة والبكتيريا والجراثيم بنسبة قد تصل إلى ١٠٠%، وتمتاز كذلك بسهولة التشغيل والصيانة، وانخفاض استهلاك الطاقة المستعملة، وقصر الوقت اللازم لإنشائها، وقلة تكلفة إنتاج المياه العذبة، وإضافة إلى ذلك التطور المستمر في إنتاج أغشية التناضح العكسي لهذه الطريقة، وقد بلغت نسبة محطات التحلية التي تعمل بهذه التقانة نحو ٣٠% من إجمالي عدد محطات تحلية المياه في العالم.

٣.٣.٤. تحلية مياه البحر بطريقة التجميد أو البلورة:

وتعتمد هذه الطريقة على تبريد المياه المالحة إلى درجة التجمد، حيث يتجمد الماء العذب عند درجة حرارة أعلى من تلك التي يتجمد عندها المحلول الملحي، مما يؤدي إلى تشكيل بلورات من

التلج خالية من الأملاح، وعند فصل هذه البلورات وإعادة صهرها يتم الحصول على مياه عذبة. ويمكن تحلية المياه المالحة بهذه الطريقة بتبريده إلى نحو -2°C ، فتبدأ بلورات التلج النقي في الانفصال، بينما يزداد تركيز الأملاح في المياه المتبقية. ومن أهم ميزات هذه الطريقة الإقلال من الترسب والتآكل حيث يتم التشغيل عند درجات حرارة منخفضة نسبياً، وأما أهم مساوئها فهي المشاكل الناجمة عن نقل وتنقية التلج. وتوجد طريقتان لإزالة ملوحة ماء البحر بالتجميد وهما:

١.٣.٣.٤. طريقة التجميد المباشر:

ويعتمد مبدؤها على عملية التفرغ والتبخير الفجائي، حيث يدخل ماء البحر بعد تبريده في المبادل الحراري إلى برج التجميد (المُبلور crystallizer)، ويكون الضغط داخل البرج نحو $3-4$ مم زئبقي (0.05 ضغط جوي)، مما يؤدي إلى التبخر الفجائي لجزء من ماء البحر. وتسحب الحرارة اللازمة للتبخير من الجزء المتبقي من ماء البحر، وتكون درجة التجميد نحو -1.9°C . وقد تم إجراء العديد من التعديلات على هذه الطريقة من قبل شركة Colt Industries الأمريكية. وأوضحت الدراسات بأن الحرارة المستعملة لإنتاج كيلو غرام من البخار تكفي لإنتاج 7.5 كيلو غرام من التلج، وأن إزالة ملوحة المياه بالتجميد تحتاج إلى نحو 80 سعرة حرارية فقط لإنتاج كيلو غرام واحد من التلج، وتُعطي المُجمدات الحديثة معدلات بلورة تصل إلى نحو $1-1.5$ طن من التلج / ساعة / متر مكعب من حجم المبلور. ويتم بعد ذلك عملية غسل التلج الناتج وذلك للتخلص من الأملاح الموجودة عليه بطرائق خاصة للغسل، ومن أكثرها كفاءة طريقة غسل التلج بتمريره عكس تيار من ماء الغسل المنقول إلى الأسفل، وتفقد في هذه الطريقة كمية محدودة جداً من المياه العذبة أثناء عملية الغسل، ويوجد حالياً أعمدة غسل ذات كفاءة عالية وحجم صغير.

٢.٣.٣.٤. طريقة التجميد غير المباشر:

ويُستعمل في هذه الطريقة مبرد ذو ضغط جزئي أعلى من الضغط الجزئي للماء، ويمكن استعمال مبررات مختلفة لهذا الغرض مثل البيوتان والبريون 114 . يدخل سائل البيوتان وماء البحر إلى المُجمد حيث يكون الضغط أقل نسبياً من الضغط الجوي، مما يؤدي إلى غليان البيوتان بعد أن يأخذ الحرارة اللازمة للتبخير من الماء بتحويله إلى تلج، مع

العلم بأن درجة غليان البيوتان تكون عند الضغط الجوي -٠.٥ م°، وهي قريبة جداً من درجة حرارة تجمد الماء. ويُؤدى تبخير ١ طن من البيوتان إلى تكوين ١.١٥ طن من الثلج، ويتم غسل مزيج الثلج والماء المالح بكمية قليلة من تيار مُعاكس من الماء العذب، ثم يُوجه إلى الضاغط حيث يتم رفع ضغطه إلى ضغط أعلى من الضغط الجوي بقليل، ويتم بعد ذلك التلامس بين البيوتان من الضاغط والثلج في المُصهر، مما يؤدي إلى انصهار الثلج مع تكثف بخار البيوتان إلى سائل، ثم يفصل الماء عن البيوتان بعد ذلك في المصفق، ويتم إرجاع سائل البيوتان إلى المُجمد، ويخرج الماء العذب من وحدة إزالة الملوحة. وعند استعمال مُبرد الفريون ١١٤ تكون طريقة الانصهار غير مُباشرة بدلاً من طريقة الانصهار بالتلامس المُباشر المُستعمل في مُبرد البيوتان، مما يؤدي إلى الاقلال من تلوث الثلج المُذاب بسائل التبريد.

٤.٤. مشروعات تحلية المياه:

أضحت تقانة تحلية المياه ذات أهمية بالغة، وتُنتج مُنشآت تحلية المياه في العالم أكثر من ٣.٨ بليون لتر من الماء العذب يومياً، ولكن لا يُغطي هذا الإنتاج إلا جزءاً بسيطاً من الاحتياجات العالمية للماء العذب. وتُعد طريقة التقطير الومضي الطريقة الأوسع استعمالاً في تحلية مياه البحر، وتُمثل نحو ٧٠% من طرائق تحلية المياه على مستوى العالم، فعلى سبيل المثال يتم في الكويت تحلية ١٨ مليون لتر من الماء المالح يومياً بهذه الطريقة، كما ويتم إنتاج ١٣ مليون لتر من الماء العذب يومياً في جزيرة أروبا في البحر الكاريبي. وتُستعمل طريقة الضغط الأسموزي العكسي لتقطير نحو أربع مائة ألف لتر من مياه المحيط في ولاية كاليفورنيا بالولايات المتحدة الأمريكية، وكذلك يتم إنتاج نحو مليون متر مكعب من الماء العذب يومياً بهذه الطريقة في محطة تحلية المياه في مدينة الجبيل في المملكة العربية السعودية. وتُوجد بعض الصعوبات في استعمال طرائق التقطير والتي تُعد بشكل عام طرائق مُعقدة ومُرتفعة التكاليف، وتحتاج إلى خبراء في التشغيل، وأهم مشكلة تواجه عمليات إغذاب المياه بطرائق التقطير هو ترسب الأملاح، وتكوينها قشوراً في الأنابيب، مما يؤدي إلى تأكلها وانسدادها، وبالتالي انخفاض كفاءة عمليات التبادل الحراري، وزيادة في استهلاك الطاقة، فتقل بذلك كفاءة عملية التحلية كلها. وقد تطورت تقانة تحلية المياه تطوراً ملحوظاً خلال العقود الأخيرة، إلا أنها مع ذلك لم تصبح وسيلة أساسية لتوفير مياه الشرب، ويعود السبب في ذلك إلى التكلفة المُرتفعة لإنتاج المتر المُكعب الواحد من المياه العذبة مقارنةً بإنتاج المياه من مصادر تقليدية أخرى،

وكذلك التكاليف الباهظة لإنشاء محطات المعالجة، وتكاليف الطاقة الكبيرة المُستعملة في مراحل التحلية، مما جعل استعمال تقانة تحلية المياه ينحصر في الوطن العربي بصورة رئيسة في دول الخليج، وذلك نظراً لغياب البدائل، ولتوفر الطاقة، والامكانيات المادية لديها لتحمل النفقات الاستثمارية الكبرى. وقد أصبح إنتاج المياه العذبة من التحلية وبصورة خاصة في دول الخليج العربي أفضل اقتصادياً من بناء السدود، أو تمديد خطوط أنابيب لتأمين المياه من مصادرها إلى المناطق البعيدة، إضافة إلى ارتفاع تكاليف نفقات استثمار المياه من مصادرها التقليدية، وبشكل خاص المياه الجوفية غير المُتجددة، لاسيما وأن مناسيب هذه المياه مُنخفضة في مُعظم الدول العربية، وكذلك نوعية المياه الجوفية في تلك الدول، حيث يبلغ مُتوسط الملوحة في مُعظمها نحو ١٠٠٠ ppm.

وتهدف العديد من الأبحاث المُتعلقة بتحلية مياه البحر إلى خفض سعر تكلفة المتر المُكعب من الماء مع خفض الطاقة المُستهلكة لعمليات التحلية. وقد تناولت بعض هذه الدراسات إمكانية استعمال مصادر جديدة للطاقة كالطاقة النووية، والطاقة المُتجددة كالطاقة الشمسية الحرارية، وطاقة الرياح، لخفض تكلفة تحلية المياه، وسيكون أيضاً بمقدور هذه المحطات إنتاج قدرة كهربائية إضافة إلى الماء العذب، كما وتُركز أبحاث أخرى على استعمال مواد جديدة في بناء التجهيزات المطلوبة لتحلية المياه، كاستعمال أنواع خاصة من الاسمنت في بناء أبراج التقطير عوضاً عن بعض الأنواع من الصلب باهظة الثمن والمُستعملة حالياً. واهتمت بعض الأبحاث بإمكانية استعمال سبائك جديدة رخيصة التكاليف من سبائك الألمنيوم لبناء المبادلات الحرارية عوضاً عن استعمال النحاس في بنائها، كما وتنتج أبحاث أخرى إلى تطوير طريقة الضغط الأسموزي العكسي من خلال ابتكار أنواع جديدة من الأغشية ذات النفاذية العالية، والتي تعمل تحت ضغوط قليلة نسبياً، مما يُقلل من الطاقة المُستعملة في عمليات التحلية ويزيد من قدرتها على تحلية كميات أكبر من مياه البحار.

الفصل الخامس

تطهير المياه

١.٥. المقدمة:

تحتوي مياه الصرف الصحي المنزلي والصناعي على أعداد هائلة من الكائنات الحية الدقيقة، والتي ينخفض عددها بشكل كبير بعد عمليات المعالجة، ولكن لا تسمح عمليات المعالجة المختلفة لمياه الصرف الصحي بالقضاء نهائياً على الكائنات الحية الدقيقة الممرضة في هذه المياه. ولذلك تُعد عملية التطهير العملية النهائية اللازمة في معالجة مياه الصرف الصحي، قبل طرحها في المسطحات المائية الطبيعية، أو قبل استعمالها في أغراض مختلفة، وكذلك العملية النهائية لتحضير مياه الشرب.

ويجب التفريق بين مصطلح "تطهير المياه" وهو إزالة الكائنات الحية الدقيقة الممرضة في المياه المخصصة للشرب، ومصطلح "تعقيم المياه" وهو إزالة كل الكائنات الحية الدقيقة في المياه المخصصة للاستعمالات الطبية والصيدلانية. وقد تكون عمليات التطهير الشاملة لمياه الصرف الصحي غير مرغوب فيها، وذلك لأن إزالة معظم الكائنات الحية سوف يعيق عمليات التنقية الذاتية في المياه الطبيعية التي تُطرح فيها المياه المعالجة، كما أن بقايا المواد المُطهرة قد تحدث ضرراً كبيراً للكائنات الحية المائية. ويتم ضبط فعالية تطهير المياه بتحديد العدد الكلي للبكتيريا في اسم^٣ من المياه، وتواجد البكتيريا المعوية العنوية *Escherichia Coli* تبعاً لمؤشر كولي-أينديكس أو مؤشر كولي-تينتر للمياه بعد التطهير.

ويُستعمل التحديد الكمي لبكتيريا *Escherichia Coli* غير الضارة كمؤشر لتلوث المياه البكتيري وذلك لعدة اعتبارات:

- يُعد وجودها في المياه مؤشراً على التلوث بالمخلفات الأدمية و/أو الحيوانية نظراً لوجود هذه البكتيريا في أمعاء الإنسان والحيوانات ذات الدم الحار.
- تحديد وجود بكتيريا *Escherichia Coli* في المياه أبسط من تحديد تواجد بقية الأنواع البكتيرية المعوية الأخرى.
- يؤثر تطهير المياه بالمؤكسدات القوية على هذه البكتيريا بشكل أصعب من تأثيرها على الأحياء الدقيقة الأخرى.

وتوجد عوامل عديدة مؤثرة على عملية تطهير المياه، مثل نوع الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في المياه، ونوع وتركيز المادة المُنظِّرة المُستعملة، والفترة الزمنية لتفاعل هذه المادة، كما وتؤثر جودة المياه على عملية التطهير، وذلك تبعاً لمستوى العكارة، وتركيز المواد العضوية الطبيعية فيها، ودرجة حرارة، ودرجة حموضة المياه.

٢.٥. طرائق تطهير المياه:

تُوجد طرائق عدة لتطهير المياه، وهي:

١.٢.٥. الطرائق الحرارية:

يؤدي غليان الماء لمدة ١٢-٢٠ دقيقة إلى القضاء على جميع أنواع الكائنات الحية الدقيقة ذات التشكيلات غير الجرثومية، أما الجراثيم فيتم القضاء عليها بتسخين المياه تحت الضغط، وعند درجة حرارة ١٢٠م° ولمدة ساعتين. ويُعد التطهير باستعمال الحرارة من العمليات البسيطة ذات الكفاءة العالية، إلا أنها تقلل من الطعم السائغ المقبول للمياه، نتيجة إزالة الأكسجين الذائب فيها، كما وأن استعمالها محدود، نظراً لعدم إمكانية اعتمادها كطريقة مناسبة لتطهير الحجوم الضخمة من المياه.

٢.٢.٥. الطرائق الفيزيائية:

ويُستعمل في هذه الطرائق تأثير أشعة الشمس، أو الأمواج فوق الصوتية، أو أشعة بيتا، أو أشعة غاما، أو الأشعة فوق البنفسجية، والتي تُعد من أكثر الطرائق استعمالاً وانتشاراً في محطات معالجة مياه الصرف الصحي صغيرة الحجم، حيث يتم تعريض الكائنات الحية الدقيقة إلى الأشعة فوق البنفسجية عند طول موجة ٢٥٤ نانومتر، وتقوم هذه الأشعة بإحداث تغيير للحمض النووي فيها بشكل رئيس، إضافة إلى تأثيرات ضارة على مكونات الخلية الأخرى، وتُفقد القدرة على التكاثر، وبالتالي تُدمر الأشعة الخلايا، مُؤديةً إلى القضاء عليها.

ولهذه الطريقة مزايا عدة، منها سهولة التشغيل والصيانة وعدم تشكل روائح أو ألوان، ولا تترك مخلفات سامة، وتتطلب فترات تماس قصيرة، كما ولا يؤدي استعمال جرعات زائدة منها إلى مخاطر صحية. أما مساوئ هذه الطريقة، فهي التكلفة الباهظة، كما وأنها طريقة غير مناسبة للمياه ذات المستويات العالية من العكارة، والمياه ذات التراكيز العالية من المواد العضوية الذائبة، لأن هذه المواد تستعمل الأشعة للتحلل والتفكك فتصبح غذاء سهلاً للبكتيريا، أو ممكن أن تتفاعل مع الأشعة أو تمتصها، مما يؤدي إلى خفض فعالية التطهير.

٣.٢.٥. تأثير بعض أيونات المعادن الثقيلة:

تُستعمل أحياناً كميات قليلة من أيونات الفضة والنحاس والذهب لتطهير المياه، ويتطلب ذلك فترة تعريض طويلة، فعلى سبيل المثال يتطلب تطهير المياه من الكائنات الحية الدقيقة الممرضة استعمال أيونات الفضة بتركيز ٠.٠١٥ مغ/لتر، ولمدة زمنية لا تقل عن أربع ساعات لتماس الأيونات مع المياه. وتُعد أيونات الفضة سامة لأغلب الكائنات الحية الدقيقة، بينما تكون أيونات النحاس ذات فعالية أقل في القضاء عليها، ومن أهم مساوئ هذه الطريقة ارتفاع تكاليفها، ولذلك تصلح فقط للاستعمالات المحدودة والصغيرة، حيث يتم تشريب الكربون المنشط (الفعال) بأيونات المعادن الثقيلة، بهدف استعماله في عمليات التطهير وخاصة في أجهزة التنقية الصغيرة أو متوسطة الحجم.

٤.٢.٥. الترشيح عبر الأوساط المسامية المختلفة:

يُستعمل لهذا الغرض مرشحات فائقة الدقة مصنوعة من الخزف المسامي أو المرشحات الغشائية أو غيرها، وتملك الكائنات الحية الدقيقة الممرضة ما عدا الفيروسات أبعاداً أكبر من ١-٢ ميكرون، لذلك يمكن ترشيحها خلال أوساط ترشيح تكون أبعاد مسامها أقل من ١ ميكرون.

٥.٢.٥. استعمال المؤكسدات القوية:

تعد طرائق استعمال المؤكسدات القوية في عملية تطهير المياه من أكثر الطرائق شيوعاً في الاستعمال، وتتم عملية تطهير المياه بهذه المؤكسدات على مرحلتين، في المرحلة الأولى تنتشر المادة المُطهرة إلى داخل أجسام الكائنات الحية الدقيقة، وتقوم المادة المُطهرة في المرحلة الثانية بالتفاعل مع الأنزيمات داخل الخلية، وتتحدد سرعة عملية التطهير، بحركية الانتشار للمادة المُطهرة داخل أجسام الكائنات الحية الدقيقة، وبالقضاء الفعلي عليها بسبب تأكسد الأنزيمات بهذه المادة. وتزداد سرعة عملية التطهير بزيادة تركيز المواد المؤكسدة المُطهرة في المياه، وارتفاع درجة حرارة المياه، حيث أثبتت الدراسات أن رفع درجة حرارة المياه ضمن المجال بين ٠.٢-١٠°م° تقوم بتسريع عملية التطهير بشكل كبير، بينما يؤدي الرفع التالي لدرجات الحرارة إلى تأثير أقل. تتناقص سرعة عملية تطهير المياه بوجود المواد العضوية القادرة على التأكسد، والمرجعات المختلفة، وكذلك عند وجود المواد الغروية والمواد العالقة التي تجذب إليها البكتيريا، مما يعيق تماسها مع المادة المُطهرة.

وكمثال على بعض المؤكسدات القوية المُستعملة في تطهير المياه:

١.٥.٢.٥. الكلور ومركباته:

الكلور غاز سام، لونه أصفر مخضر وله رائحة واخذه "كريبه" ويُستعمل بشكله السائل في كلورة المياه، وتُعد عملية الكلورة من أكثر الطرائق انتشاراً في عملية التطهير من الفيروسات والبكتيريا المُمرضة الموجودة في مياه الصرف الصحي، والتي تمت مُعالجتها بالمُعالجات التقليدية، ويرجع السبب في ذلك إلى الميزات التالية:

- السمية الشديدة للكلور لمُعظم الكائنات الحية الدقيقة.
 - رخص ثمنه.
 - سهولة الحصول عليه على شكل غاز أو سائل أو صلب (بودرة).
 - سهولة الاستعمال نظراً لانهلاله الكبيرة "٧٠٠٠ مغ/لتر".
 - يعطي حماية مُستمرة للمياه في نظام التوزيع، لأنه يترك بقايا في المياه والتي لا تُعد ضارة على صحة الانسان.
 - يُتيح مُراقبة مستمرة لتلوث المياه من خلال معرفة مدى استهلاك الكلور.
 - مُطهر فعال عند حالات حصول تلوث طارئ للمياه.
- وعلى الرغم من المميزات السابقة إلا أنه يجب الحذر:
- عند تناوله أو تداوله باعتباره غازاً ساماً.
 - ظهور طعم ورائحة في المياه المُخصصة للشرب.
 - وجود تراكيز مُخفضة من المُركبات العضوية الكلورية في الماء، والذي يُعد بعضها مسبباً للسرطانات عند الحيوانات، وذلك عند الوجود بتراكيز عالية نسبياً مثل مادة الكلوروفورم، ولكن لا يوجد لتاريخه أي دليل على وجود مخاطر صحية للإنسان بسبب المستويات الموجودة حالياً من هذه المُركبات في المياه، مع وجوب العمل على منع تكوينها بواسطة الرقابة المُستمرة على المياه.
 - يُوجد محاذير صحية لاستعمال الكلور ناجمة عن احتمال تسرب الغاز في محطات المُعالجة، أو تسربه خلال عمليات نقل اسطواناته في هذه المحطات، مع العلم بأنه لم يتم لتاريخه تسجيل أي حوادث خطيرة في محطات مُعالجة الصرف الصحي.
- يؤدي استعمال جرعات عالية من الكلور إلى وصول كميات مُتبقية فائضة من المواد ذات الطبيعة السمية إلى البيئة المُحيطة، مثل الكلور الفعال المُتبقى، ومُركبات الكلور المُتبقية، ومُركبات الكلور العضوية المُختلفة، والتي تُشكل تهديداً خطيراً على الحياة في البيئة المائية

الطبيعية، بتأثيرها السلبي على الثروة السمكية، وعلى الحياة الميكروبيولوجية، وعلى إعاقة عمليات التحلل البيوكيميائية في المياه الطبيعية، الأمر الذي يؤثر على قدرة المسطحات المائية على التنقية الذاتية، كما يؤدي وجود هذه المركبات في مياه المصادر الطبيعية إلى تعقيد تقانات التنقية المائية، مما يرفع التكاليف الإنشائية والاستثمارية لمحطات التنقية بشكل كبير، ويؤثر أيضاً وجود هذه المواد على إمكانية استعمال المياه الناتجة عن المعالجة في المجالات المختلفة. وترتبط درجة سمية مياه الصرف الصحي الخاصة بعملية الكلورة بدرجة تركيز الأمونيا في هذه المياه قبل بدء عملية التطهير بالكلور الفعال، ويشكل الكلور مع الأمونيا الموجودة في مياه الصرف الصحي مركبات الكلور أمينات، والتي تُعد مواد تطهير ثانوية، ولزيادة فعالية تطهير هذه المادة لتصبح بشكل مشابه لفعالية التطهير بالكلور الفعال، لا بد من زيادة جرعة الكلور الأولية، وزيادة مدة التماس لهذه المركبات مع المياه. ولا بد من الإشارة هنا إلى أن الكلور أمينات مركبات قاتلة للأسماك حتى في التراكيز المنخفضة منها، أو التراكيز المتبقية في المياه. كما ويُستعمل ثاني أكسيد الكلور في تطهير المياه وفي إزالة الرائحة والطعم غير المستساغ، وهذه المادة لها فعالية مطهرة أقوى من الكلور إلا أنها أغلى ثمنًا، وهي مادة غير ثابتة، ويجب توليدها وتحضيرها في محطة معالجة المياه. ولا تتحد مع الأمونيا الموجودة في مياه الصرف الصحي، كما ويتم إجراء دراسات حول التشكل المحتمل للمركبات العضوية الكلورة مع مادة ثاني أكسيد الكلور، ولذلك فإن استعمالها في محطات المعالجة كبديل لغاز الكلور قد لا يحل مشكلة بقاء آثار من المواد العضوية في المياه. وتم أيضاً استعمال محلول هيبوكلوريت في محطات معالجة مياه الصرف الصحي الصغيرة كوسيلة آمنة بعيدة عن احتمالية المخاطر الصحية لاستعمال غاز الكلور. ونتيجة لما ذكر سابقاً وجب القيام بدراسات لاستعمال طرائق بديلة لتطهير مياه الصرف الصحي بحيث تكون ذات سمية أقل من الكلور الفعال، وكذلك إلحاق عمليات الكلورة بعمليات إزالة الكلورة de Chlorination وذلك باستعمال الفحم المنشط، أو باستعمال المفاعلات الكيميائية المختلفة.

٢.٥.٢.٥. كلوريد البروم:

وهو سائل ثقيل لونه أحمر داكن، ورائحته واخذه، ويملك توازناً مع كل من البروم والكلور في طوريه الغازي والسائل، وله خواص فيزيائية وسطية بين خواص البروم وخواص الكلور الفعال

(درجة حرارة الانصهار، ودرجة الغليان، والكثافة، وضغط البخار، والانتحالية)، مما يُعطيه مزايًا عديدة مقارنة مع كل من البروم والكلور، وتتشابه بعض خواص كلوريد البروم الكيميائية مع خواص الكلور الكيميائية، حيث يُؤثر كلوريد البروم بشكل سريع على الجلد والخلايا الحية الأخرى ويُسبب التهابات وحرقاً، كما ويُؤثر ضمن تراكيز أبخرته المُخفضة على المجاري التنفسية للإنسان. وكلوريد البروم مُؤكسد قوي في الحالتين السائلة والغازية، وتشكل نواتج تفاعل كلوريد البروم مع الماء، وكذلك مع الأمونيا، والمُرجعات المُختلفة، والمواد العضوية، تأثيراً تطهيرياً إضافياً لهذه المادة.

وقد وُجد لدى مقارنة فعالية تطهير مياه الصرف الصحي لكل من كلوريد البروم والكلور الفعال، بأن العدد الكلي للبكتيريا في مياه الصرف الصحي المُعالجة بكلوريد البروم أقل من عدد البكتيريا الكلي في مياه الصرف الصحي المُعالجة بالكلور الفعال لدى استعمال كميات مُكافئة في عملية التطهير، كما أكدت الدراسات أن النمو التالي للبكتيريا بعد عملية تطهير مياه الصرف الصحي بكلوريد البروم كان أقل منه بالنسبة لمياه الصرف الصحي الخاصة للتطهير بالأوزون. وتجدر الإشارة هنا بأن عملية التطهير بكلوريد البروم لا تحتاج إلى خزانات التماس الضروري توفرها لدى استعمال الكلور الفعال.

ويتفاعل كلوريد البروم مع الأمونيا الموجود في مياه الصرف الصحي بسرعة كبيرة مكوناً مُركبات البروم أمينات (أحادي وثنائي بروم أمين)، وتُعد هذه المُركبات المُتشكلة أقل استقراراً وثباتاً من الكلور أمينات، وأشد فعالية كيميائية وتطهيرية منها.

كما وأثبتت الدراسات أن فعالية البروم أمينات في القضاء على البكتيريا أكبر بكثير من فعالية الكلور أمينات، وأكدت أبحاث أخرى أن البروم أمينات تبدي فعالية عالية جداً مُضادة للبكتيريا، بحيث لا يوجد ضرورة لتشكيل الظروف المناسبة لظهور البروم الحر في المياه المُعالجة من أجل الحصول على الفعالية القصوى للتطهير، كما هو الحال في حال الكلور الحر، وتشير الدراسات أن فعالية البروم أمينات تكون مساوية تقريباً لفعالية البروم الحر في القيم الشائعة لدرجة حموضة مياه الصرف الصحي.

كما وتؤمن البروم أمينات إبادة أسرع وأكمل للفيروسات من الكلور أمينات، ويبيد كلوريد البروم تأثيراً فعالاً يزيد قليلاً عن فعالية الكلور في إبادة فيروسات معينة، وقد أوضحت بعض الأبحاث أن وجود الأمونيا في المياه يؤدي إلى رفع قدرة كلوريد البروم على إبادة بعض الفيروسات في درجة حموضة 7-9 pH.

وتتأكسد المُرَجعات العضوية المختلفة مثل الكحولات والألدهيدات وغيرها بكلوريد البروم مكونةً نواتج غير سامة، مُقارنةً مع نواتج الكلور العضوية، وهذه المُرَكبات المُتشكلة حساسة جداً لكل من التأين والتميه والتحلل الضوئي الكيميائي، مما يؤدي إلى أن مركبات البروم العضوية المكونة وذات الكميات الضئيلة والمحدودة نسبياً، تتخرب بسرعة في المُسطحات المائية الطبيعية، قبل أن تتجح في التراكم البيولوجي.

ويتضح مما سبق الفعالية التطهيرية المرتفعة لكلوريد البروم، وانخفاض درجة سُميته، إضافة إلى التكاليف المُنخفضة نسبياً لعملية التطهير كلها عند استعماله مُنضمناً تجهيزات التحضير والنقل.

٣.٥.٢.٥. الأوزون:

يوجد غاز الأوزون في الغلاف الجوي على ارتفاعات تتراوح بين ١٠-٥٠ كم، وتعتمد سماكة طبقة الأوزون في هذا الغلاف على كمية الطاقة الشمسية، ويتم الحصول عليه مخبرياً من إمرار الهواء خلال جهاز تفريغ كهربائي ذي فرق كمون "جهد" وتردد عاليتين. وهو غاز غير ثابت، لونه مائل للزرقة، ورائحته واخذه، وذو سمية عالية.

ويُعد غاز الأوزون من العوامل المؤكسدة القوية، ويمتلك القدرة على أكسدة العناصر، وبالتالي قتل البكتيريا والفيروسات والطفيليات وإزالة عدد كبير من السموم، ولذلك يُعد من المواد المطهرة القوية، فقدرة التطهير بغاز الأوزون أعلى بنحو ٣٢٠٠ ضعفاً من قدرة تطهير الكلور، ويمكن باستعماله أيضاً مُعالجة الجسيمات الدقيقة والتي تكسب الماء طعماً غير مُستساغاً ورائحة كريهة ولا يوجد آثار جانبية لتطهير المياه بالأوزون مثل الآثار المرافقة لاستعمال الكلور مثلاً. كما وجد في بعض الحالات أن ترشيح المياه مع استعمال غاز الأوزون يعطي مُعالجة جيدة للماء بشكل مشابه للذي نحصل عليه باستعمال الطرائق والتقنيات المُعقدة، كاستعمال عمليات التخثير والترسيب والترشيح والكلورة في محطات المُعالجة.

تُعد المُعالجة باستعمال غاز الأوزون مرتفعة التكاليف، وتتميز بقدرة عالية على إزالة الألوان والروائح. وغاز الأوزون مُشابه لغاز الأكسجين في درجة انحلاليته القليلة في الماء، ولا يترك أي بقايا عند تحلله، وذلك نظراً لعدم ثباته، ويؤدي غياب بقايا غاز الأوزون في نظام التوزيع إلى إمكانية حدوث النمو البكتيري، وما يُرافق ذلك من روائح غير مقبولة وطعم كريه، ويمكن أن يتم منع حدوث هذا النمو عن طريق إضافة جرعة صغيرة من الكلور بعد المُعالجة بالأوزون. كما أن لغاز الأوزون بعض التطبيقات في أكسدة بعض أنواع مياه الصرف الصناعي، والتي لا تستجيب

تماماً لعملية الأكسدة البيولوجية، كما ويتفاعل أيضاً مع المواد العضوية ليعطي مركبات مأوزنة تحت ظروف خاصة، ولا تزال هذه المركبات قيد البحث والدراسة. تم إنشاء أول محطة لمعالجة مياه الشرب بغاز الأوزون في مدينة فيسبادن الألمانية في مطلع القرن العشرين وتبعها بعد ذلك العديد من الدول الأوربية، ويوجد حالياً أكثر من ٢٥٠٠ محطة معالجة لتنقية المياه بغاز الأوزون في أرجاء العالم.

الفصل السادس

رصد تلوث المياه ومكافحته

١.٦. المقدمة:

يُعد الحفاظ على مصادر المياه من النضوب والتلوث من أهم المواضيع البيئية عالمياً، وتهدف الدول إلى حماية بيئتها والحفاظ على مواردها في إطار اقليمي وعالمي من أجل سلامة كوكب الأرض، ولهذا الغرض أسست هيئات حكومية تقوم بإعداد خطط حالية ومستقبلية لمنع التلوث

البيئي والرقابة عليه ورصده ومكافحته ووضع التشريعات والأنظمة للحد منه، والتعاون مع الجهات الحكومية الأخرى لتحقيق ذلك.

٢.٦. مراقبة تلوث المياه ورصده:

تم إنشاء محطات مراقبة ورصد متطورة، تُسجل كافة المُعطيات والبيانات والخصائص الفيزيائية والكيميائية والحيوية المحددة لنوعية المياه، ودرجة صلاحيتها أو نسبة تلوثها، وتنقل تلك المُعطيات والبيانات بشكل آلي ودوري إلى المحطة المركزية ليُصار إلى مُعالجتها، وفي حال حدوث أي ارتفاع في نسب التلوث، فإن المحطة المركزية تُرسل إنذارات طارئة، وبشكل مبكر وكاف، لاتخاذ الإجراءات السريعة لمواجهة الخطر وحماية الإنسان والبيئة. ويتم إجراء عملية المراقبة البيئية حالياً بسرعة مذهلة، من خلال مُعالجة وتفسير نتائج مُعطيات الاستشعار عن بعد والصور الفضائية، اعتماداً على أنظمة تطبيقات وبرمجيات الحواسيب الآلية، كما يتم عرض نتائج المُعالجة هذه في صيغة مُعطيات رقمية، أو تقارير، أو معلومات إحصائية، أو على هيئة صور أو خرائط يتم توزيعها إلى الجهات المُختصة. ويمكن بواسطة تقنية الاستشعار عن بعد رصد الموارد المائية من مياه جوفية ومياه سطحية، ورصد البقع النفطية وكذلك رصد التيارات الهوائية، ومراقبة مظاهر التصحر، أو انجراف أو تملح التربة، وتدهور الأراضي الزراعية، وأيضاً رصد التلوث الناتج عن النشاط البشري الصناعي وتأثيره على كل من الهواء والتربة والمياه في كافة أرجاء الكرة الأرضية.

٣.٦. مكافحة التلوث وحماية المياه:

نظراً لأهمية الماء وضرورة توفره للإنسان، ولمساهمة في شتى مجالات الحياة، تم الاهتمام من قبل المُختصين في مجال التلوث البيئي وبشكل مُبكر على حماية المياه من مصادر التلوث المختلفة، ولذلك يُلاحظ بأن حجم الأبحاث والدراسات التي تناولت موضوع تلوث المياه أكبر من حجم الأبحاث التي تناولت باقي مجالات التلوث، ودأبت جميع الهيئات العالمية المعنية منذ تأسيسها، بمُعالجة نواحي التلوث باتباع وسائل مُتعددة للحد منه، وذلك بالتعاون مع الهيئات المحلية المُختصة بالرقابة البيئية في كل بلد، والتي قامت بدورها بوضع إجراءات عديدة تُحقق

عند الالتزام بها الحد من التلوث أو الاقلال من مصادره في كافة أشكاله وأنواعه وكذلك الحيلولة دون انتقال تلك الملوثات.

١.٣.٦. إجراءات مكافحة التلوث المائي والحد منه:

يُمكن تحديد أهم الإجراءات الضرورية لمكافحة التلوث المائي والحد منه على النحو التالي:

- تنقية مياه الشرب لإزالة العكارة واللون والطعم والرائحة، والقضاء على الكائنات الحية الدقيقة الممرضة، وإزالة المواد السامة العضوية.
- معالجة مياه الصرف الصحي والصناعي والزراعي، ومحاولة منع وصولها إلى المسطحات المائية الطبيعية قبل معالجتها، وإعادة استعمالها في ري الأراضي الزراعية واستعمال الحمأة الناتجة كأسمدة.
- التخلص السليم من المخلفات الكيميائية للمصانع، وعدم طرحها في مياه الصرف الصحي إلا بعد المعالجة الكيميائية النوعية التي تحولها إلى مركبات غير ضارة بيئياً، أو عن طريق حرقها، إذا كانت نواتج الاحتراق غير ضارة أيضاً، وكذلك معالجة الغازات والأبخرة المتصاعدة من المنشآت الصناعية، وبناء هذه المنشآت بعيداً عن المناطق السكنية.
- مراقبة تلوث مياه البحر بشكل منتظم، وخاصة المناطق القريبة من مصبات تفرغ المنشآت الصناعية، والمحافظة على عدم تلوث البحار والأنهار بالمخلفات الصناعية.
- إقامة المحميات البحرية ولاسيما في المناطق التي تحتوي على أهم الكائنات البحرية.
- مكافحة التلوث النفطي، والتخلص من النفط العائم فوق المسطحات المائية، ومحاولة معالجة التسربات الحادثة بأسرع وقت ممكن، والحد من التلوث بمياه تفرغ الخزانات النفطية في المسطحات المائية الطبيعية، وذلك عن طريق بناء أحواض في موانئ الشحن لتفريغ هذه المياه فيها، ومن ثم تصفيتها لتخليصها من النفط.
- مراقبة المياه الجوفية المستعملة للشرب، وترشيد استهلاكها، والحد من بناء المنشآت الصناعية والسكنية القريبة منها.
- عدم دفن النفايات المشعة في الأراضي الصحراوية، لمنع احتمالية تسرب هذه المواد إلى المياه الجوفية وتلوثها، وتعرض السكان لمخاطر التلوث الإشعاعي.

- مراقبة المُسطحات المائية المُغلقة كالبحيرات من تراكم المواد العضوية المُختلفة، والذي يُؤدي إلى خلل في التوازن البيئي، من خلال تشجير المناطق المُحيطة بالمُسطحات المائية المُغلقة.
- التخلص من الطحالب والنباتات المائية الملوثة لمياه الأنهار بالوسائل الميكانيكية.
- الاهتمام بالبيئة المُحيطة بالمياه، ورصد تلوثها، ووضع جميع الإجراءات لحمايتها من التلوث الكيميائي وبشكل خاص تلوث المياه بالمبيدات، كمنع استعمال المبيدات الثابتة غير القابلة للتفكك مثل D.D.T.، وكذلك حماية المياه من التلوث بالعناصر المعدنية السامة.
- الحد من تلوث الهواء بالمواد الكيميائية، والإقلال من نسب الكبريت والرصاص في وقود السيارات، وذلك لأن الرياح ومياه الأمطار تحول ملوثات الهواء إلى مُلوثات للتربة والمُسطحات المائية الطبيعية، وبشكل خاص عند التحول إلى الأمطار الحمضية.
- إدخال الأجهزة المُضادة للتلوث في المنشآت الصناعية الحديثة، والإقلال من الاعتماد على التقانات القديمة، واستحداث تقانات أكثر توفيراً للطاقة والمواد الخام، والاعتماد على مصادر الطاقة النظيفة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح.
- مراقبة المياه مخبرياً، والتحليل الدوري الكيميائي والحيوي للماء في مختبرات مُخصصة، لضمان المعايير التي تحقق جودة المياه وعدم تلوثها.
- وضع إجراءات بالمواصفات القياسية، والتي تُحدد صفات المياه الكيميائية والبيولوجية (الأكسجين الحيوي والكيميائي المُستهلك، درجة الحموضة، درجة الحرارة، المواد العالقة، المواد الكيميائية السامة، الكائنات الحية الدقيقة المُمرضة، وغيرها).
- رفع مستوى الوعي البيئي للسكان بضرورة المحافظة على الماء وحمايته من التلوث، وترشيد الاستهلاك في كافة المجالات والتركيز على أنها أفضل الطرائق للحد من التلوث.
- الاهتمام بتوسيع مفهوم التقانات والمنتجات الخضراء البديلة في المنازل والمصانع والمزارع، وهي المنتجات الصديقة للبيئة والأفضل لصحة الإنسان، والتشجيع على زيادة الاهتمام بالزراعات العضوية والبناء الأخضر والطاقات النظيفة بكافة أشكالها.
- تطبيق القوانين الخاصة بحماية البيئة وتفعيلها، وتشديد الرقابة على الصناعات الأكثر إنتاجاً للمواد الملوثة، ورفع قيمة الضرائب بما يتناسب مع خطورة تلك المُخلفات، وإلزام المصانع بعمل مُعالجة نوعية للمُخلفات السائلة والصلبة الناتجة، وتشديد العقوبات بحق المخالفين.

- إصدار القوانين والتشريعات الخاصة للمحافظة على المياه وحمايتها من التلوث الحيوي والكيميائي، والحد من وصول الملوثات المختلفة إلى مصادر مياه الشرب.

٤.٦. التشريعات البيئية لحماية المياه:

تبين الجداول التالية (١-٦) المواصفات القياسية السورية وأهم المعايير العالمية لمياه الشرب، وكذلك الحدود القصوى لتراكيز العناصر الثقيلة الموصى بها في مياه الري، والحدود القصوى لمؤشرات التلوث من الصرف الصناعي إلى البيئة المائية، والحدود القصوى المسموح بها في مياه الصرف الصناعي قبل طرحها إلى شبكة الصرف الصحي.

المواصفات القياسية السورية لمياه الشرب رقم (٤٥) لعام ٢٠٠٧م.
جدول-١: الحد الأقصى المسموح به للجوانب الحيوية المجهرية.

المكون	وحدة القياس	الحد الأقصى المسموح به	الملاحظات
مياه الشرب في الحالات الطبيعية			
القولونيات	مُستعمرة	صفر	عند درجة حرارة ٣٧°م س بعد ٤٨،٢٤ ساعة

الكلية	١٠٠/مل		
أيشريشياكولي	مُستعمرة ١٠٠/مل	صفر	عند درجة حرارة ٤٤م° س بعد ٤٨،٢٤ ساعة
القولونيات البرازية	مُستعمرة ١٠٠/مل	صفر	عند درجة حرارة ٣٧م° س بعد ٤٨،٢٤ ساعة
التعداد الكلي لجراثيم أخرى	مُستعمرة ١٠٠/مل	٢٠٠٠ أو ٢٠٠٠٠	عند درجة حرارة ٣٧م° س بعد ٢٤ ساعة عند درجة حرارة ٢٢م° س بعد ٧٢ ساعة
الكولر الحر المتبقي	مغ/ل	١-٠.١	في شبكة التوزيع لا يقل عن ٠.١ مغ/لتر في نهاية الشبكة في زمن لا يقل ٣٠ دقيقة ولا تزيد عن ١ مغ/لتر في بداية الشبكة
مياه الشرب في حالات الطوارئ			
القولونيات الكلية	مُستعمرة ١٠٠/مل	١٠	عند درجة حرارة ٣٧م° س بعد ٤٨،٢٤ ساعة
أيشريشياكولي	مُستعمرة ١٠٠/مل	صفر	عند درجة حرارة ٤٤م° س بعد ٤٨،٢٤ ساعة
التعداد الكلي لجراثيم أخرى	مُستعمرة ١٠٠/مل	-	عند درجة حرارة ٣٧م° س بعد ٢٤ ساعة
مكورات عنقودية ممرضة	مُستعمرة ١٠٠/مل	صفر	
الكولر الحر المتبقي	مغ/ل	٢-٠.٥	٠.٥ مغ/لتر في نهاية الشبكة مع زمن تماس لا يقل عن ٣٠ دقيقة. و ٢ مغ/لتر في بداية الشبكة

جدول ٢- الحدود القصوى المسموح بها في مياه الشرب للعناصر
أو المركبات الكيميائية اللاعضوية.

العنصر أو المركب الكيميائي	الرمز	وحدة القياس	الحد المسموح به	الحد الأقصى المسموح به
الزرنيخ	As	مغ/ل	٠.٠١	٠.٠١
الكاديوم	Cd	مغ/ل	٠.٠٠٣	٠.٠٠٥
الكروم الكلي	Cr	مغ/ل	٠.٠٥	٠.٠٥
السيانيد	CN ⁻	مغ/ل	٠.٠٥	٠.٠٧

٠.٠١	٠.٠١	مغ/ل	Pb	الرصاص
٠.٠٠١	٠.٠٠١	مغ/ل	Hg	الزئبق
٠.٠١	٠.٠١	مغ/ل	Se	السيلينيوم
٠.٠٧	٠.٠٧	مغ/ل	Mo	الموليبديوم
٠.٧	٠.١	مغ/ل	Ba	الباريوم
٠.٠٢	٠.٠٢	مغ/ل	Ni	النيكل
من (٨-١٦) س . من (٢٥-٣) س .	١.٥ ٠.٧	مغ/ل	F	الفلور
٠.٥	٠.٣	مغ/ل	B	البور
٠.٥	٠.٥	مغ/ل	NH ₄ ⁺	الامونيا
٠.٥	٠.٢	مغ/ل	NO ₂ ⁻	النتريت
٦٠	٥٠	مغ/ل	NO ₃ ⁻	النترات
١	٠.٥	مغ/ل	PO ₄ ⁻	الفسفات
٣	٢	مغ/ل	C.O.D	الأكسجين الكيميائي المستهلك
٥	٣	مغ/ل	TOC	الكربون العضوي الكلي
٠.٠٢	٠.٠٠٥	مغ/ل	Sb	الانتيموان

ونظراً لإمكانية التزامن لكل من النترات والنتريت في مياه الشرب لا يجوز أن يتجاوز مجموع نسب تركيز كل منهما إلى القيمة القياسية المعادلة:

$$1 \geq \frac{C \cdots NO3}{GV \cdots NO3} + \frac{C \cdots NO2}{GV \cdots NO2}$$

حيث: C التركيز و GV القيمة القياسية.

جدول-٣: أهم المعايير العالمية لمياه الشرب.

- الملوثات اللاعضوية.

العنصر أو المادة	مواصفات WHO	المواصفات الأوروبية	المواصفات الكندية	المواصفات الأمريكية	المواصفات الروسية
اللون TCU	15	20	15	15	—
المواد	1000	—	500	500	—

					الصلابة الذائبة
–	–	–	–	–	المواد الصلابة المعلقة
–	1-5	5	4	5	العكارة NTU
–	8.5-6.5	8.5-6.5	8.5-6.5	8.5-6.5	الـ pH
4	–	–	–	–	الأكسجين المذاب
–	–	–	–	500	عسر الماء
2	–	–	–	–	آزوت نشادري (أمونيا)
2	–	–	0.5	–	الألمونيوم
–	10	10	–	10	نترات معين بالنتروجين
10	–	–	50	٥٠	النترات
1	–	1	–	–	نترت معين بالنتروجين
1	–	–	0.1	٠.٢	النترت
–	–	–	5	5	الفسفور
2	–	–	–	–	الأكسجين الحيوي
–	–	–	170-150	200	الصوديوم
250	250	250	25	250	الكلور
500	250	500	25	400	الكبريتات
–	–	0.05	–	–	الكبريتيد
1.5	2	1.5	1.5	1.5	الفلوريد
–	–	5	1	–	البورون
0.1	–	0.2	–	0.1	السيانيد

—	—	—	0.2	0.2	الألمنيوم
—	0.05	0.05	0.05	0.05	الأرسن

المواصفات الروسية	المواصفات الأمريكية	المواصفات الكندية	المواصفات الأوروبية	مواصفات WHO	الملوثات العضوية
----------------------	------------------------	----------------------	------------------------	----------------	------------------

—	1	1	0.1	—	الباريوم
0.001	0.01	0.005	0.005	0.005	الكاديوم
0.1	0.05	0.05	0.005	0.05	الكروم
0.1	—	—	—	٠.٠٥	الكوبالت
1	1	1	1	1	النحاس
0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	الحديد
0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	الرصاص
—	0.05	0.05	0.05	0.1	المنغنيز
0.0005	0.002	0.001	0.001	0.001	الزئبق
—	—	—	0.05	٠.٠٢	النيكل
—	0.01	0.01	0.01	0.01	السلينيوم
1	5	5	(3)– 0.1	5	الزنك

- الملوثات العضوية:

0.3	–	–	0.01	–	Oil&Petroleum Products
–	–	0.1	0.5	–	Total Pesticides
–	–	–	0.1	–	Individual Pesticides
–	–	0.7	–	0.03	Aldrin& Dieldrin
–	–	30	–	1	DDT
–	0.4	4	–	3	Lindane
–	100	100	–	30	Methoxychlor
–	5	–	–	10	Benzene
–	–	–	–	0.01	Hexachlorobenzene
–	–	–	–	10	Pentachlorophenol
1	–	2	0.5	–	Phenols
0.5	12(0.5)	–	0.2	–	Detergents

جدول - ٤ : الحدود القصوى لتراكيز العناصر الثقيلة الموصى بها في مياه الري.

العنصر الكيميائي	وحدة القياس	الاستعمال قصير الأجل (حتى 20 سنة كحد أقصى)	الاستعمال طويل الأجل (بشكل دائم)
---------------------	----------------	---	-------------------------------------

5	20	مغ/ل	Al
0.1	2	مغ/ل	As
0.1	0.5	مغ/ل	Be
0.5	2	مغ/ل	B
0.01	0.05	مغ/ل	Cd
0.1	1	مغ/ل	Cr
0.05	5	مغ/ل	Co
0.2	5	مغ/ل	Cu
1	15	مغ/ل	F
5	20	مغ/ل	Fe
2.5	5	مغ/ل	Li
0.2	10	مغ/ل	Mn
0.01	0.05	مغ/ل	Mo
0.2	1	مغ/ل	Ni
0.02	0.02	مغ/ل	Se
0.1	1	مغ/ل	V
2	10	مغ/ل	Zn
٠.٥	٥	مغ/ل	Pb
٠.١	٠.١	مغ/ل	CN

جدول - ٥ : الحدود القصوى لمؤشرات التلوث من الصرف الصناعي إلى البيئة المائية.

المؤشرات	واحدة	أنواع المستقبلات (البيئة المائية المستقبلية)
----------	-------	--

اللون	القياس	البحار	سطح الأرض	الأنهار	قنوات الصرف الزراعية
اللون	سلم بلاتيني كوبالت	عديم اللون	عديم اللون	عديم اللون	عديم اللون
pH		٩-٦	٩-٦	٩-٦	٩-٦
درجة الحرارة	درجة مئوية	١٠ درجات أعلى من حرارة الوسط المستعمل	٥ درجات أعلى من حرارة الوسط المستعمل		
أكسجين الحيوي	مغ/ل	٦٠	٢٠	٤٠	٦٠
أكسجين الكيماوي	مغ/ل	٢٠٠	٣٠	١٥٠	١٠٠
الزيوت والشحوم	مغ/ل	١٥	١٠	١٠	١٠
المواد العالقة الكلية	مغ/ل	٦٠	٣٠	٣٠	٦٠
المواد الذائبة الكلية	مغ/ل	—	٨٠٠	١٢٠٠	١٠٠٠
المواد المترسبة	مغ/ل	—	—	—	—
الفسفات	مغ/ل	١٠	١	١٥	١٠
الأمونيا (آزوت)	مغ/ل	١٠	٥	٥	٠.٥
نترات - آزوت	مغ/ل	٥٠	٣٠	٥٠	٤٠
الفينول	مغ/ل	٠.٥	٠.٠١	٠.٠٢	٠.٥
الفلور	مغ/ل	١	٠.٥	١.٥	٠.٥
الكبريتيد	مغ/ل	١	١	١	١
الكلور المُنْبَقِي	مغ/ل	—	١	١	—
المنظفات	مغ/ل	٢	٠.٠٥	٠.٠٥	٠.٥
أكسجين مذاب	مغ/ل	٤	٤	٤	٤
هيدروكربونات نفطية	مغ/ل	١٥	٥	٥	٥-
جسيمات عالقة	عدم وجود جسيمات عالقة				
الألمونيوم	مغ/ل	٣	١	١	٣
الزرنخ	مغ/ل	٠.١	٠.١	٠.١	٠.١
الباريوم	مغ/ل	٢	—	١	—

٠.٠٥	٠.٠٥	٠.٠٥	٠.٠٥	مغ/ل	بيريليوم
٠.٠٥	٠.٠٥	٠.٠١	٠.٠٥	مغ/ل	كادميوم
٠.٠٥	٠.١	٠.١	٠.١٥	مغ/ل	سيانيد
٠.٥	٠.٥	٠.٥	٠.٥	مغ/ل	كروم إجمالي
٠.٠٥	٠.٠٥	٠.٠٥	٠.٥	مغ/ل	كروم سداسي
٠.٥	٠.٣	٠.٣	٠.٥	مغ/ل	نيكل
٠.٠٠٥	٠.٠٠٥	٠.٠٠٥	٠.٠٠٥	مغ/ل	زنابق
٢	٢	١	٢	مغ/ل	حديد
٠.٣	٠.٣	٠.٣	١	مغ/ل	انتيمون
١	١	١	١.٥	مغ/ل	نحاس
٠.٥	٠.٥	٠.٥	١	مغ/ل	منغنيز
٢	٢	١	٢	مغ/ل	زنك
٠.٥	٠.٢	٠.٢	٠.٥	مغ/ل	الرصاص
—	٠.٠٥	٠.٠٥	٠.١	مغ/ل	الفضة
٢	١	١	٢	مغ/ل	المجموع الكلي للعناصر الثقيلة **
٥٠٠٠	١٠٠	٢٥٠٠	٥٠٠٠	عددها في ١٠٠ مل	العدد الإجمالي للبكتيريا القولونية

جدول - ٦: الحدود القصوى المسموح بها في مياه الصرف الصناعي قبل طرحها إلى
شبكة الصرف الصحي.

اسم العنصر	الرمز	الحد الأقصى المسموح به	واحدة القياس	الملاحظات
درجة الحرارة	T	٣٥	°م	
الرقم الهيدروجيني	PH	٦.٥-٩.٥		
المواد الصلبة القابلة للترسيب	S.S	١٠	مغ/ل	بعد ٣٠ دقيقة
مجموع المواد العالقة	T.S.S	٥٠٠	مغ/ل	
الكبريتيد	S	٢	مغ/ل	
الكبريتات	So	١٠٠٠	مغ/ل	
الأمونيا / الأمونيوم	N- _٤ NH N- _٣ NH	١٠٠	مغ/ل	
الفسفات	Po ₄	٢٠	مغ/ل	
الزيوت والشحوم القابلة للتصبن والمواد الراتنجية	-	١٠٠	مغ/ل	
الزيوت والشحوم المعدنية	-	١٠	مغ/ل	
الباريوم	Ba	٣.٠	مغ/ل	
البورون	B	١.٠	مغ/ل	
الكاديوم	Cd	٠.١	مغ/ل	
الكروم سداسي	Cr	٠.١	مغ/ل	
الكروم الكلي	Cr	٢.٠	مغ/ل	
النحاس	Cu	١.٠	مغ/ل	
الرصاص	Pb	١.٠	مغ/ل	
الزئبق	Hg	٠.٠١	مغ/ل	
النيكل	Ni	٢.٠	مغ/ل	
السيلينيوم	Se	١.٠	مغ/ل	
الفضة	Ag	١.٠	مغ/ل	
التوتياء	Zn	٤.٠	مغ/ل	
السيانيد	Cn	٠.٥	مغ/ل	
الزرنيخ	As	٠.١	مغ/ل	
مركبات الفينول	-	٢.٠	مغ/ل	
الاحتياج الكيميائي للأكسجين	BOD	٨٠٠	مغ/ل	
الاحتياج الكيميائي للأكسجين	COD	١٦٠٠	مغ/ل	

	مغ/ل	٢٠٠٠	T.D.S	الأملاح الكلية المنحلة
	مغ/ل	٦٠٠	Cl	الكلور
	مغ/ل	٨٠٠	F	الفلور
	مغ/ل	٠.٠٠٥	-	المبيدات
	مغ/ل	٥	ABS	المنظفات
	مغ/ل	٠.١	AOX	المركبات العضوية الهالوجينية

المراجع العلمية لقسم تلوث المياه ومعالجتها
المراجع العربية

١. أبو قرين مصطفى و صالح فؤاد حسن، (١٩٩٢): تلوث البيئة، أسبابه، أخطاره، ومكافحته، الهيئة القومية للبحث العلمي، دارالكتب الوطنية ببنغازي، ليبيا.
٢. أخرس، صفوان (٢٠٠٤): التلوث المائي، مواصفات مياه الصرف الصحي، منشورات نقابة المهندسين، دمشق، الجمهورية العربية السورية.
٣. إسلام، أحمد مدحت (١٩٩٩): الماء سائل الحياة "خواصه-أنواعه-تنقيته-تحليلته-تلوثه-موارده في الوطن العربي وحرب المياه"، دار الفكر العربي، القاهرة، جمهورية مصر العربية.
٤. تركماني، عبدالرزاق (٢٠٠٩): محطات المعالجة بالنباتات، المصدر: محاضرة عامة في جامعة البعث، كلية الهندسة المدنية، حمص، الجمهورية العربية السورية.
٥. تركماني، عبدالرزاق (٢٠١٠): موقع الهندسة البيئية، WWW.4enveng.com.
٦. جرار، عادل أحمد (١٩٩٢): البيئة والموارد الطبيعية، مركز غنيم للتصميم والطباعة، عمان، الأردن.
٧. حارث جبار فهد و عادل مشعان (٢٠١٠): التلوث المائي مصادره مخاطره مُعالجته، مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع، عمان، الأردن.
٨. حسن، محمد ابراهيم و المعتاز ابراهيم صالح (١٩٩٥): ملوثات البيئة، أضرارها مصادرها وطرق مكافحتها جامعة أم القرى، مكتبة الخريج، مكة، المملكة العربية السعودية.
٩. حسن، محمد ابراهيم (٢٠١٠): ملوثات البيئة، أضرارها مصادرها وطرق مكافحتها جامعة أم القرى، مكة، المملكة العربية السعودية.
١٠. دليل منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة الفاو (FAO) والصادر عن المكتب الإقليمي للشرق الأدنى، (٢٠٠٠): والمتعلق باستعمال المياه العادمة المُعالجة في الري.
١١. دليل منظمة الصحة العالمية لنوعية مياه الشرب (١٩٩٦): المجلدات ١، ٢، ٣- الطبعة الثانية.
١٢. رنيه، كولاس (١٩٨١): تلوث الماء، ترجمة محمد يعقوب، منشورات عويدات، بيروت، لبنان.
١٣. سردي، أحمد (٢٠١٠): الملوثات المائية (المصدر - التأثير - التحكم والعلاج) دار الكتب العلمية، القاهرة، جمهورية مصر العربية.

١٤. سلوم، محمد غسان و عدنان نظام (٢٠٠٧): البيئة التطبيقية والتلوث "الجزء النظري"، منشورات جامعة دمشق، دمشق، الجمهورية العربية السورية.
١٥. سويلم، محمد نبهان (١٩٩٩): التلوث البيئي وسبل مواجهته، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة، جمهورية مصر العربية.
١٦. صالح، فؤاد و أحمد الشلاح (٢٠٠٠): التلوث البيئي والأمن الصناعي، الطبعة الثانية، منشورات جامعة دمشق، دمشق، الجمهورية العربية السورية.
١٧. عبد ربه، ريم (٢٠٠٤): استخدام المياه المُعالجة والحماة، منشورات نقابة المهندسين، دمشق، الجمهورية العربية السورية.
١٨. عبد الوهاب عبد الجواد، أحمد (١٩٩٦): التشريعات البيئية، سلسلة دار المعارف البيئية، الدار العربية للنشر والتوزيع، القاهرة، جمهورية مصر العربية.
١٩. عمر، محمد اسماعيل (٢٠٠٦): مُعالجة المياه، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، القاهرة، جمهورية مصر العربية.
٢٠. عودات، محمد (١٩٨٨): التلوث وحماية البيئة، منشورات دار الأهالي للطباعة والنشر والتوزيع، دمشق، الجمهورية العربية السورية.
٢١. عودات، محمد و البشير، محفوظ (٢٠٠٧): الحماة، خصائصها وامكانية استعمالها الآمن في الزراعة، منشورات هيئة الطاقة الذرية في دمشق، الجمهورية العربية السورية.
٢٢. غرابية، سامح و يحيى الفرحان (١٩٨٧): المدخل إلى العلوم البيئية، دار الشروق للطباعة والنشر والتوزيع، عمان، الأردن.
٢٣. فقي، محمد عبد القادر (٢٠٠٦): البيئة مشاكلها وقضاياها وحمايتها من التلوث، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة، جمهورية مصر العربية.
٢٤. مهداوي، سمير و حافظ عزة (١٩٩٥): دليل الدراسة البيئية، الطبعة الأولى، الدار العربية للنشر والتوزيع، القاهرة، جمهورية مصر العربية.
٢٥. المواصفة القياسية السورية رقم ٣٤٧٤ / (٢٠٠٩): والمتعلقة بالمياه المُعالجة المسموح بصرفها إلى البيئة المائية، دمشق، الجمهورية العربية السورية.
٢٦. مواصفة السوق الأوروبية المشتركة (EU) (١٩٩٨): والمتعلقة بمياه الشرب.
٢٧. مواصفة منظمة حماية البيئة الأمريكية (EPA)، (١٩٩٦): والمتعلقة بمياه الشرب.

٢٨. يوسف، نجم عبدالواحد (٢٠٠٩): حماية البيئة من التلوث بالأسمدة، الإدارة العامة للثقافة الزراعية - وزارة الزراعة واستصلاح الأراضي - نشرة رقم ٦ لعام ٢٠٠٩، القاهرة، جمهورية مصر العربية.

المراجع الأجنبية

1. Brauer H., (1996): Handbuch Des Umweltschutzes Und Der Umweltschutztechnik: Band 1: Emissionen, Springer DE,.

2. Faust, S.D. and Osman, M.A., (1983): Chemistry and Water Treatment. Ann Arbor Science, Michigan, USA,.
3. Fielding M., and M. Farrimond, (1999): Disinfection by-Products in Drinking Water: Current Issues, Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK,.
4. Goncharuk, V. V., N. A. Klimenko, L. A. Savchina, T. L. Vrubel, and I.P., Kozyatnik, (2006): Water treatment and demineralization technology, current issues in the technology of drinking water conditioning," Journal of Water Chemistry and Technology, vol. 28, no. 1, 2-49.pp.,.
5. Grohmann, U. Hässelbarth, und W. Schwerdtfeger, (2003): Die Trinkwasserverordnung. Einführung und Erläuterungen für Wasser-versorgungsunternehmen und Überwachungsbehörden. 4. Auflage. Erich Schmidt Verlag, Berlin,.
6. Guderian R., (2001): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie: Band 2B: Terrestrische. Springer DE,.
7. Lühr, L. Z., (2001): Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Gabler Wissenschaftsverlage,.
8. Oehmichen, U., M. Schmitz, und P. Seeliger, (2011): Die neue Trinkwasserverordnung. 2. Auflage. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
9. Sorg, T.J. and Logston, G.S., (1980): J. Am. Water Works Assoc. 72, 411.PP.,.
10. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005) (USA-EPA),.

11. Winter T, Harvey J, Franke OL, Alley W. (1998): Ground water and surface water: a single resource. U.S. Geological Survey Circular 1139. Denver: U.S. Government Printing Office.79.PP.
12. WHO (1996): Guidelines for Drinking-water Quality-(Second Edition 2-Volume 2), World Health Organization.Geneva.,.

