

معالجة تلوث المياه السطحية والجوفية (Surface and Groundwater Pollution Remediation)

إن تحسين و استرداد النظام البيئي (ECOSYSTEM RECOVERY) الكيميائي بين الأنظمة البيئية يتباين على نحو واسع و يعتمد على ما يلي:

- معدل حمولة أو كسيدات النتروجين والكبريت؛
- معدل ومقدار تناقص الترسيب الناجم عن المطر الحمضي؛
- مدى توفر أو استنفاد الأيونات الموجبة القاعدية مثل الكالسيوم من التربة؛
- مدى تجمع الكبريت والنتروجين في التربة.
- معدل تجوية التربة والصخور التحتية والتجهيز المرتبط بالأيونات الموجبة القاعدية إلى النظام البيئي؛
- نسبة الترسيب الجوي للأيونات الموجبة القاعدية.
- معدل إشباع التربة القاعدية 20 % أو أعلى.
- نسبة الكالسيوم إلى الألمنيوم في محلول التربة 1.0 أو أكبر في الأنظمة البيئية المائية
- pH مياه الجداول و البحيرات 6.0 أو أعلى .
- تركيز الألمنيوم اللاعضوي الذائب في مياه البحيرة أو الجدول أقل من 2 (μmol/l).

المعالجة بواسطة تخفيض المغذيات (Remediation via Nutrient Reduction)

تسعة طرق تستخدم لتخفيض وفرة المغذيات أو البيئة المناسبة للتركيب الضوئي.

1. إزالة المغذيات بأساليب المعالجة المتقدمة وإدارة الأرض
2. تحويل مسار المحاليل المغذية بعيدا عن الأنهار أو البحيرات
3. سحب المياه الغنية بالمغذيات بالضحخ، أو الدفع و الحقن الى باطن الأرض (الآبار العميقة).
4. تخفيف ومزج مياه المسطحات بمياه قليلة المغذيات
5. ترسيب وتعطيل الفسفور بعد إضافة مركبات الألمنيوم أو الطين الطبيعي وحببيات الكربونات
6. أكسدة الراسب بإضافات البدائل القابلة للإلكترونات مثل النترات لتأخير اختزال الحديد و تحرير الفسفور.
7. تهوية البحيرات و المسطحات المائية بتحريك مياهها بالهواء المضغوط.
8. إزالة الرواسب من أجزاء البحيرات الضحلة لإزالة التراكمات المغذية وزيادة عمقها.
9. المناورة في منافذ تغذية الهائمات (zooplankton) والأسماك و زيادة كفاءتها في أكل النبات و الطحالب ، وتدوير المغذيات.

إعادة استخدام مياه النفايات (Wastewater Effluent Reuse)

يستعمل ماء المطر حالياً في العديد من البلدان كنتيجة للاستعمال واسع الانتشار من خلال إدارة مياه العواصف المطرية (سيول المناطق الحضرية) في الاستعمالات المنزلية و الري ويعالج ليستعمل ثانية للعمليات الصناعية و التبريد و كذلك مياه سطوح النباتات المجمعّة تعالج عادة باستعمال عمليات الترشيح، الفصل، الترسيب والتعقيم بالأشعة فوق البنفسجية (UV). في إدارة المياه القذرة المحلية، إحدى الخيارات جلبت انتباها كثيراً في السنوات الأخيرة في التفريق والفصل بين الماء الأسود أو مياه التواليت (blackwater) والماء الرمادي (Greywater) الذي يمثل كّل المياه القذرة البيئية الباقية. الماء الرمادي درس كبديل لاستخدام مصادر المياه باستثناء تطبيقات المياه الصالحة للشرب بضمن ذلك الريّ.

إعادة استعمال المياه القذرة واستصلاحها تجلب منفعتين (i) تعد مصدر مائي و(ii) تعزل ملوثات المياه القذرة بعيدا عن مصادر المياه الطبيعية.

اما المبادئ الأساسية لاستخدام المياه القذرة فإنها تتضمّن ثلاثة دعائم (i) تعطي معالجةً موثوقة (ii) تحمي الصحة العامة و (iii) ربح و قبول عام. المياه القذرة تستعمل في ستة أنواع من الاستخدامات: (i) ريّ زراعي (ii) ريّ نباتات المعالم الطبيعية (iii) تغذية المياه الجوفية (iv) ماء لأغراض صناعية (v) استعمالات بيئية وترفيهية (vi) استعمالات منزلية.

معالجة مياه الفضلات

تشكل مياه الفضلات المنزلية (Domestic wastewater) أو مياه المجاري المنزلية، التي تنتج عن المدن مصدرا رئيسيا من مصادر تلوث المياه ولذلك فإن من الضروري إخضاعها الى معالجة للحد من المواد العضوية القابلة على التحلل فيها قبل طرحها الى المصادر المائية، أو قبل الاستفادة منها في استخدامات ذات درجات أدنى، أن هذه العملية التي تحدث طبيعيا تحت تأثير الأحياء المجهرية تسير ببطء لا سيما عند نقص الأوكسجين وعليه فإن المعالجة البيولوجية ما هي إلا عبارة عن تنشيط عملية التحلل الحيوي الطبيعية والإسراع بحدوثها من خلال تجهيز وفرة من الأوكسجين، للأحياء المجهرية لمساعدتها على انجاز التحلل النشط بسرعة وكفاءة، وقبل هذه المرحلة يتوجب التخلص من المواد الكبيرة الحجم ولذلك فمن المعتاد أن تسبق مرحلة المعالجة البيولوجية مراحل تمهيدية، هي كما يلي:

- المعالجة الميكانيكية: الطرق الفيزيائية المتبعة في مجال المعالجة وذلك بإزالة الأجزاء الكبيرة والأجسام الطافية من خلال تمرير المياه على مشبكات معدنية أو ترسيب العوالق الصلبة وما شاكل ذلك وهذه المعالجة تستخدم كخطوة تمهيدية تسبق أي معالجة أخرى.
- المعالجة الكيماوية: وهي إضافة بعض المواد القليلة الضرر على البيئة لغرض معادلة حمضية أو قاعدية مياه الفضلات، أو لترسيب المعادن الثقيلة، ويكثر استخدام هذه المعالجات في محطات معالجة مياه الفضلات الصناعية عادة .
- المعالجة البيولوجية: وهي أكثر أنواع المعالجة شيوعا و أكثرها كفاءة في المعالجة، وهي قد تتم على مرحلة واحدة أو مرحلتان وفي أحيان أخرى على ثلاثة مراحل واهم شروط إجراء المعالجة :

1- موقع التصريف النهائي الى النهر أو البحيرة أو الساحل البحري ومدى أهميته من جوانب استخدامات المياه .

2- عامل التخفيف الذي يقدمه المصدر المائي نسبة الى حجم التصريف .

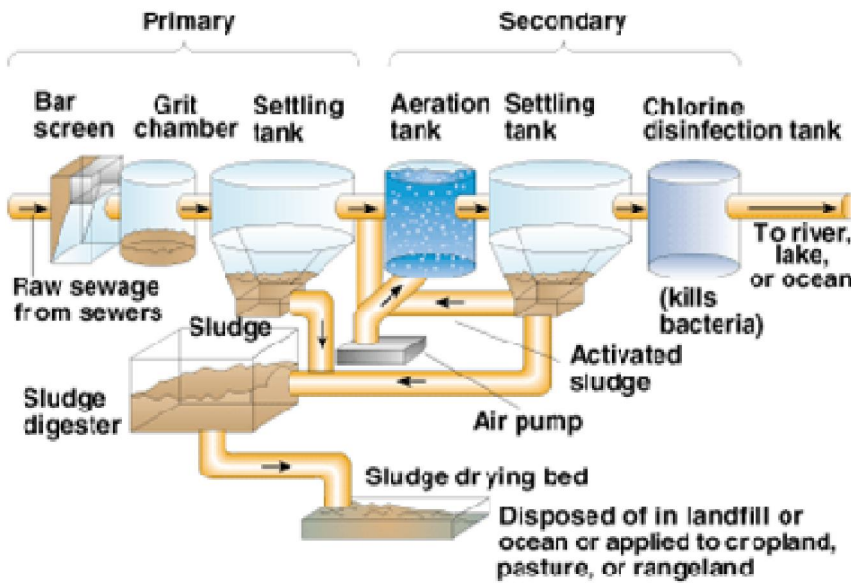
3- الغاية من استخدام المياه في الموقع بعد التصريف ومدى الخطورة المحتملة على مستخدمي تلك المياه أو الأحياء المائية في المصدر .

4- الكلف الاقتصادية المرتبة على تطوير وحدات المعالجة بما يتلاءم مع الاستخدام النهائي للمياه .

تقسم عملية معالجة مياه الفضلات المنزلية الى ثلاثة مراحل بشكل عام هي أولية ، ثانوية وثالثة :

المعالجة الأولية (Primary Treatment):

هي ابسط المراحل وتبدأ من عملية إزالة الأجسام الطافية والعوالق الصلبة بطرق ميكانيكية ، حيث تمرر المياه القادمة من شبكة مجاري المدينة خلال مشبكات معدنية لعزل الأجسام الطافية الكبيرة الحجم ، ويتم بعد ذلك إزالة الرغوة والدهون الطافية فوق سطح الماء بواسطة قاشطات (skimmers)، أو اذرع ميكانيكية دوارة، يعقبها تمرير المياه الى حوض خاص تستقر فيه المياه لفترة وجيزة لترسيب ما تحمله من مواد عالقة ويعرف هذا الحوض بحوض الترسيب (sedimentation tank) وقد تعرفه بعض المصادر على انه حوض الترويق الأولي(primary clarifiers)، وما ينتج من ترسبات في هذه المرحلة يعرف أحيانا بالأوحال الفجة أو الأولية (sludge) والتي تحتوي على 94-99% ماء.



ينتج عن هذه المرحلة كميات كبيرة من غاز الميثان (CH_4) الذي يعرف بالغاز الحيوي (biogas) يستخدم عادة كمصدر طاقة في نفس المحطة وذلك في تدفئة الأحواض وتنشيط الأوحال أو لإدارة المضخات وغير ذلك، وبانتهاء هذه المرحلة تكون مياه الفضلات قد تخلصت من ما يقرب 40% من العوالق الصلبة لكنها ما تزال محتوية على كثير من الملوثات وبتراكيز عالية أحيانا، ومع ذلك فإن العديد من دول العالم الثالث تكتفي بهذه المرحلة من المعالجة،

وتقوم بتعقيم المياه بغاز الكلور، وتصرفها الى المصادر المائية، إلا أن هذه الممارسة تعتبر غير مقبولة وفق المفاهيم البيئية الحديثة،

وتشير العديد من المراجع العلمية في هذا المجال أن الماء الجاري في مصدر مائي مار في مناطق كثيفة السكان، لابد وان يكون قد استخدم، بل أن أي جزيئة منه لابد أن تكون قد مرت في أجسام بشر أو الحيوانات، بعدد يتراوح ما بين 10-40 إنسان أو حيوان وهناك من يعتقد بان كل جزيئة ماء شرب نتناولها من الحنفية مباشرة عند المساء لابد وان تكون قد خرجت من محطة تصفية مياه المجاري صباحا .

تجري الكثير من الممارسات الحديثة في الوقت الحاضر وبأشراف المنظمات الدولية لتعديل إجراءات تصريف مياه المجاري بعد معالجتها للاستخدام الزراعي (ري المزروعات) بدلا من إعادتها الى المصادر المائية المخصصة لمياه الشرب، ويتركز أكثر هذه الاتجاهات على ري المزروعات التي لا تؤكل مباشرة بل تحتاج الى تجفيف أو عمليات تحضير مثل بذور عباد الشمس وفول الصويا أو المزروعات التي لا تؤكل أساسا مثل الكتان والقطن ،ومع ذلك فإن الحاجة الى المياه في العديد من الدول تتطلب إعادة استخدام المياه لأغراض مختلفة ومنها الشرب، حتى وان كانت مياه مجاري معالجة .

المعالجة الثانوية (Secondary Treatment): وهذه هي المرحلة الحقيقية للمعالجة البيولوجية وتشمل إزالة ما تبقى من المواد العضوية بواسطة تكسيرها حيويا بتشجيع نمو الأحياء المجهرية الموجودة أصلا في مياه الفضلات بتوفير الظروف الملائمة لها تحت سيطرة دقيقة مما يؤدي الى إزالة حوالي 90% من هذه المواد العضوية، وهناك طريقتين رئيسيتين في انجاز هذه العملية وهما طريقة استخدام المرشح التتقيطي وطريقة استخدام الأوحال المنشطة، وتتم العملية بإدخال المياه القادمة من المرحلة الأولى الى هاتين الطريقتين:

1- استخدام المرشح التتقيطي (trickling filter): وتعتمد الطريقة على ضخ المياه في أنابيب مثقبة فتؤدي الى رش المياه بالتتقيط (أو بالريزاز) على طبقات من الحصى ذات سمك عدة أقدام وتسمح هذه الطبقات بمرور المياه من خلال طبقات الحصى فتعمل البكتريا المتكاثرة فيما بينها على تكسير المواد العضوية وتخليص المياه منها ،فتصل الى أسفل الحوض حيث توجد شبكة أخرى من أنابيب أفقية تقوم بجمع المياه الواصلة ونقلها الى خارج هذا الحوض.

2- طريقة الأوحال المنشطة (activated sludge method): تعتمد هذه الطريقة على استخدام البكتريا الموجودة في الأوحال لتكسير المواد العضوية، وتتم العملية بإيصال المياه القادمة من المرحلة الأولى الى حوض يعرف بحوض التهوية (Aeration tank) حيث يخلط مع الحماة لعدة ساعات بينما يضخ الهواء في المياه لغرض إغنائها بالأكسجين الذائب فتتكاثر المحلات بدرجة كبيرة نظرا لوفرة الظروف الملائمة لها من أكسجين ذائب ومواد عضوية، فتتشط بذلك عمليات التحلل. تمرر المياه بعدها الى حوض ترسيب لإزالة الأوحال الغنية بالأحياء المجهرية، ويمكن وصف الأوحال في هذه الحالة بأنها منشطة (activated) ويمكن استخدامها مجددا، لذا تتم إعادتها الى حوض التهوية لتخلط مع وجبة جديدة من الفضلات.

إن المياه الناتجة من هذه المرحلة الثانوية يمكن أن تدخل الى المرحلة الثالثة (tertiary stage) من المعالجة أو أن تصرف الى خارج المحطة بعد تعقيمها بغاز الكلور ،وعند إجراء التعقيم بغاز الكلور قبل التصريف فإن من شأنه إبادة 99% من البكتريا الضارة في المياه فيما لو أحسن استخدامه، وتمتاز طريقة الأوحال المنشطة هذه بأهمية كبيرة وكفاءة عالية ،لكنها تفقد كفاءتها جزئيا أو كليا أحيانا في حالة وجود مواد سامة في مياه الفضلات، والتي تصل من مصادر صناعية، يعود السبب في ذلك الى سمية بعض المركبات الصناعية للأحياء المجهرية .

تكون الترسبات الناتجة عن المعالجة، محملة بأنواع البكتريا والأحياء المجهرية، ونواتج تحلل أو تبيض الملوثات الكيماوية وتكلف عملية إزالة الأوحال ما بين 25-50% من الكلفة الكلية لتشغيل محطات معالجة مياه المجاري .

وبغية التخلص من الكميات الكبيرة من الأوحال الأولية التي تتجمع في المحطة عادة فأنها تتعرض الى عملية تجفيف لإزالة الماء الزائد منها وذلك بتجفيفها باستخدام الحرارة أو في الهواء الطلق، وأحيانا بالتجفيف الميكانيكي، وتحول بعد ذلك الى مرحلة مستقلة تعرف بمرحلة الهضم وذلك بجمعها في حوض أو خزان يعرف بخزان الهضم (digestion tank) تجري فيه عمليات التحلل في ظروف لاهوائية،

وتعزل بعد ذلك، حيث يتم التخلص النهائي منها إما بالطمر أو بالحرق أو باستخدامها كمخصبات للتربة الزراعية باعتبارها مواد عضوية متحللة وحاوية على تراكيز مناسبة من النتروجين والفسفور وغيرها من المواد الضرورية لتحسين الإنتاج الزراعي.

المعالجة الثالثة (tertiary treatment): وهي مرحلة متطورة من إجراءات المعالجة التي تتم على المياه الناتجة من مرحلة المعالجة الثانوية ولا تستخدم إلا في حالات معينة فقط وتعتمد على أشكال مختلفة من المعالجة الكيماوية مثل إضافة مواد كيميائية لإزالة بعض المواد مثل النترات والفوسفات أو بعض العوالق الصلبة وغيرها، إلا إن هذه المرحلة هي غير مألوفة عموماً في الوقت الحاضر. برك الأكسدة (oxidation ponds): هي طريقة أخرى من طرق معالجة مياه الفضلات لاسيما الفضلات المنزلية منها، حيث تصرف المياه إلى برك في الأراضي المفتوحة، تبلغ ما بين 50-100 سم عمقاً، حيث تعمل أشعة الشمس على تنشيط نمو الطحالب التي تزود البركة بالأكسجين فتقوم الأحياء المجهرية الموجودة أصلاً في المياه بتكسير المواد العضوية، إلا إن شح الأكسجين هي متوقعة ولذلك



يحتمل انبعاث الروائح غير المستحبة من البركة خصوصاً عند ارتفاع درجات الحرارة في موسم الصيف، حيث تنخفض قابلية ذوبان الأكسجين في المياه ويترافق مع الطلب الكبير عليه، وقد تتساوى كفاءة عمليات التكسير هذه مع العمليات التي تتم في المرحلة الثانية من المعالجة البيولوجية في محطات المعالجة، ومن أهم مساوئ هذه الطريقة هي أنها عرضة للتغيرات المناخية وتشكل مصدر لانبعاث الروائح الكريهة وتكاثر الحشرات الناقلة للأمراض كالبعوض الذي يحتاج إلى مثل هذه البرك لوضع البيض وتكاثر اليرقات ذات المعيشة المائية، ومع ذلك فإن مزايا هذه الطريقة هي انخفاض كلفة الإنشاء والتشغيل والإدامة. يمكن في بعض الأحيان استخدام هذه الطريقة كمرحلة معالجة ثالثة أو إدخال تعديلات على هذه الطريقة باستخدام نباتات مائية مثل مجموعة (water hyacinth) للمساعدة في تخليص المياه من بعض المواد السامة والمعادن الثقيلة من خلال امتصاصها عبر الجذور.

معالجة ملوثات المياه الجوفية:

ملوثات المياه الجوفية نوعان،

النوع الأول معالجته مكلفة ويأخذ وقتاً طويلاً:

وقد لا يستعيد الخزان المائي حالته الطبيعية وحينئذ تعد المياه غير صالحة للشرب كما هو الحال في التلوث الإشعاعي- النووي الذي يتسرب نحو الخزانات الجوفية ويسبب تلوثها وآثاره تبقى لملايين السنين.

أما النوع الثاني فالملوّثات القابلة للمعالجة:

غالباً ما تكون نوع من أنواع البكتريا المرضية أو عناصر معدنية ثقيلة ذات نسب عالية السمية للاستخدامات البشرية أو لها تأثيرات سلبية على منتجات التصنيع في حال استخدامها بحالتها الخام.

وبشكل عام، فالملوّثات السائدة في المياه الجوفية هي: المعادن الثقيلة؛ والمغذيات الزراعية؛ والكيميائيات العضوية؛ ومبيدات الحشرات؛ والمكونات الملحية؛ والبكتريا (الجراثيم)؛ وأخيراً الفيروسات. وأغلب تلك الملوثات هي نتيجة للاستخدامات البشرية.

ولكن تلك الملوثات لا تأخذ طريقها بنفس النسب نحو المياه الجوفية، حيث تتأثر تلك النسب بشكل كبير عند مرورها بالطبقات الأرضية التي تعلو الخزان الجوفي وتتفاعل مع مكونات وعناصر أخرى كثيرة مما يؤدي إلى تغير نسبها أو امتصاص القسم الأكبر منها في المنطقة المشبعة من جذور النباتات.

وتتأثر عملية تخفيف الملوثات خلال مسارها في نطاق التربة ونطاق المياه الجوفية بتفاعلات كيميائية طبيعية وبالعمليات البيولوجية والفيزيائية التي غالباً ما تسبب تغيراً في حالتها الفيزيائية وتركيبها الكيميائي. تتضمن التفاعلات والعمليات الأساسية العمليات الجيوكيميائية (كالإمصاص وإزالة الأمصاص؛ والانحلال؛ والترسيب؛ والأكسدة والاختزال) والعمليات الفيزيائية (كانتقال الحرارة في اتجاه أفقي والتشتت، التبخر، والإعاقة أو التأخير والترشيح) والعمليات البيوكيميائية (كالتفكك العضوي) والعمليات البيوفيزيائية (رشح وانتقال الكائنات الممرضة) وثمة تباين في هذه العمليات وشدها تحت سطح الأرض، فنطاق التربة هو الأكثر أهمية وتبايناً بالمقارنة ببقية الأوساط التطبيقية، ففي نطاق الجذور تتحطم كميات ملموسة من الكيميائيات بواسطة العضويات الدقيقة أو بالعمليات الكيميائية والفيزيائية وهذه تمتصها النباتات.

أما النطاق غير المشبع فيلعب أهم دور في تأخير وصول الملوثات إلى منسوب المياه الجوفية. وهناك عمليات أخرى تحدث في النطاق المشبع حيث تكون عمليات الانحلال والتشتت الهيدرو ديناميكي هي الأكثر فعالية.

إذاً، هناك نطاقين (المشبع وغير المشبع) في طبقات الأرض يلعبان دوراً مهماً في وصول أو عدم وصول الملوثات إلى المياه الجوفية، وأن أكثر العمليات التي تطرأ على الملوثات تحدث في النطاق المشبع. يضاف إلى تلك العمليات الحيوية حركة تلك الملوثات ضمن الطبقات الأرضية بمعنى آخر التكوينات الأرضية (تربة كلسية و غرينية؛ ومتشقة) تساهم بقدر ليس قليلاً في (إعاقة أو تسهيل) وصول الملوثات إلى المياه الجوفية، وتستغرق تلك العملية مدة طويلة وهي متعلقة بحجم الملوثات وبنوع الطبقة الصخرية التي تمر عبرها.

وتنشط في منطقة الجذور بالتربة أكثر العمليات الطبيعية تنوعاً وشدة حيث تتحلل كميات لا بأس بها من المواد الكيميائية بواسطة العضويات المجهرية الصغيرة من خلال العمليات الكيميائية والفيزيائية ويتم امتصاصها من قبل النباتات. كما يحدث نشاط بيولوجي (حيوي) في النطاق غير المشبع إلا أنه أقل أثراً من نشاط نطاق التربة حيث تسيطر العمليات الكيميائية والفيزيائية. أما الظاهرة الأساسية في النطاق غير المشبع فتتمثل في إعاقة وتأخير وصول الملوثات إلى سطح المياه الجوفية. وهناك عمليات أقل أهمية تحدث في النطاق المشبع من الطبقة المائية حيث يكون الانحلال وتخفيف التراكيز والتشتت الهيدرو ديناميكي العمليات الأكثر فعالية في تخفيف التلوث.

ومن العرض السابق، يمكن تلخيص العمليات الأساسية المؤثرة على حركة ونوعية الملوثات بأربعة عمليات: العمليات الجيوكيميائية، تشمل (الأمصاص وإزالته؛ والانحلال والترسيب؛ والأكسدة والاختزال)؛ والعمليات البيوكيميائية (الحيوية)؛ والعمليات الفيزيائية، تشمل (الانتقال مع حركة المياه؛ والتشتت أو التبخر؛ والإعاقة؛ والترشيح؛ وانتقال الغازات)؛ والعمليات البيوفيزيائية (الحيوية الفيزيائية).

تلك النشاطات الكيميائية والفيزيائية في أغلبها تحدث في المنطقة المشبعة، وتساهم المنطقة غير المشبعة بالقسم الثاني من العمليات. وهي عمليات معقدة لها ظروفها من حيث اختلاف درجات الحرارة ودرجة الحموضة والوسط الذي تجري فيه، بالإضافة إلى نوع البكتريا المتواجدة في الوسط التي تساهم بقدر كبير في تغير نتائج التحلل للملوّثات.

وعلى العموم، التقييم الذي يجب اعتماده في معرفة العوامل المؤثرة على التلوث تتحكم به عوامل عديدة منها الأساسية: حجم التغذية المائية؛ وخصائص التربة؛ ومميزات النطاقان المشبع وغير المشبع. أما العوامل الثانوية فهي: الطبوغرافية وعلاقة المياه الجوفية بالمياه السطحية ومكونات الطبقات المائية الجوفية.

الكشف عن طور السوائل غير المائية (Investigating NAPLs)

في حالة التحري عن موقع فيه تلوث عضوي مطلوب معالجته، السؤال: هل هناك سوائل غير مائية؟ وما مقداره؟ هل هي في المنطقة غير المشبعة أو المشبعة؟ كمية وموقع (NAPLs) هو العامل الرئيسي في تحديد نوع المعالجة الأفضل. محاولة تحديد موقع وكمية الملوث موجود تحت السطح هو عمل صعب. الحفر التقليدي وطرق أخذ العينات غير قادرة عن تحديد بقايا طبقات الملوثات العضوية الرقيقة وإنما تحدد برك التجمعات. وقد يخلق الحفر ممرات تسهل انتقال (NAPLs) وقد يتطلب حقن البئر بمواد مألثة للتخلص من ذلك. جمع العينات من المواد غير المتصلبة أو الهشة (الرمال والحصى) سهل ويمكن لنفاذيتها العالية و سهولة تمرير الملوثات العضوية والغازات الناتجة عنها، إذ يؤخذ النموذج كاملاً مع سوائله المائية وغير المائية يعبا و يغلف بإحكام لمنع تسرب الغازات الطيارة. إن تركيز الملوث في عينات المياه الجوفية دليل غير مباشر حول وجود أو احتمالية وجود (NAPLs) قريبة من الموقع الملوث.

معالجة التلوث (Remediating Contamination)

معالجة تلوث المياه الجوفية ليست بسيطة. إن المشكلة ومصدرها غير مرئية، وتوزيعها المكاني مجهول دائماً. مشاكل التلوث تتشا كنتيجة معقدة عن عمليات طبيعية، كيميائية و حيوية. المفهومة على نحو محدود.

أهداف المعالجة تتفاوت من موقع لآخر. إذ أن الخزانات الجوفية القيمة من حيث إمداد المياه، يكون الهدف تخليص الموقع من كل الملوثات والعكس في حالة وجود مياه مالحة و متردية فلا معنى لإجراء معالجة. وإذا كانت المياه الجوفية المحلية لا تستعمل لأي غرض بسبب تسرب العديد من الملوثات الأخرى كما في العديد من المناطق الحضرية، فهدف المعالجة يكون بطموح واطىء. المعالجة قد تتضمن إزالة جزئية لمصدر التلوث أو تحديد هجرة المحاليل الملوثة الى موقع أخرى أو ربما مراقبة عمليات المعالجة الحيوية (bioremediation) الطبيعية.

عزل أو إزالة المصدر (Source Removal or Isolation)

إزالة مصدر التلوث عادة يكون في قمة قائمة أولوية المعالجة عندما يحدد مدى امتداد المصدر وعمقه. أكثر مصادر (NAPLs) تشمل تسريب الخزانات أو الأنابيب والتربة القريبة الحاوية على (NAPLs). هذه التربة تُعالج في الموقع عادة إذا كان هناك فضاء للمعالجة. طرق المعالجة مختلفة وتعتمد على الملوثات والتربة. لوقود الهيدروكربون الذي يتحلل طبيعياً بسهولة، تتضمن المعالجة بالتفكك الحيوي الهوائي (aerobic biodegradation) بواسطة الهواء المتدفق. التربة التي تحتوي على الملوثات الأكثر خطورة وأقل تحللاً، تعالج في أغلب الأحيان أو تحرق بوسائل خارج الموقع.

البديل لإزالة مصدر التلوث هو عزل مصدر التلوث: يُحدد تدفق الماء خلال مناطق و مصادر الملوثات. العزلة تتم عموماً بالحواجز الهندسية التي لها توصيل هيدروليكي منخفض جداً (الشكل-). هذه العوازل تشكل أغشية و جدران صناعية، صفائح فولاذية، حقن الاسمنت، أو بضعط الطبقات الطينية. الأغشية الصناعية رقيقة عموماً، بسمك عدة مليمترات. هذه الأغشية تصنع من البلاستيك الحراري أو منسوج البلاستيك مع البنتونيت (bentonite) ذو القابلية على الانتفاخ بشكل لفات كبيرة تلام على شاحنة، تربط وتلحم بالصمغ الحراري أو وسائل أخرى. الأغشية تستعمل كمبطنات تحت النفايات وكأغطية لمنع تسرب الماء.

جدران ملاط الطين (slurry walls) تستعمل كحواجز عمودية تمتد تحت سطح الأرض و تحفر بشكل خندق عمودي بعرض 0.5-1.5 m. و يُعاد ملأ الخندق بملاط الطين و/ أو الاسمنت.

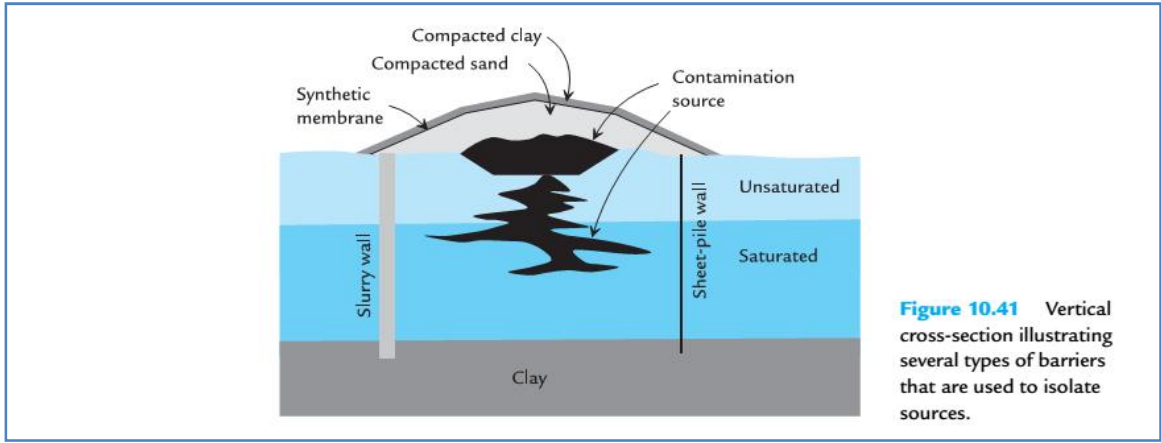


Figure 10.41 Vertical cross-section illustrating several types of barriers that are used to isolate sources.

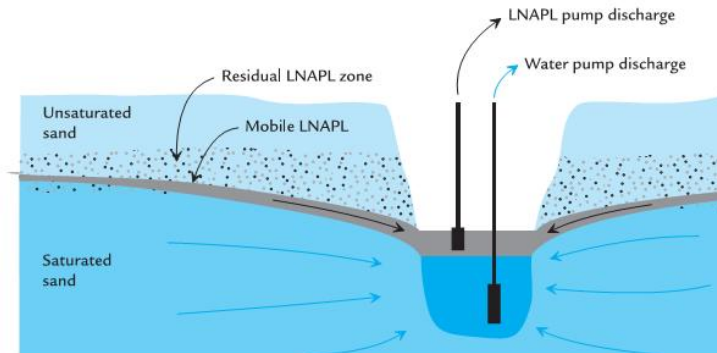
شكل - مقطع عرضي عمودي يُصوِّر عِدَّة أنواع من الموانع التي تُستعمل لِعزْل مصادر التلوث. الصفائح الفولاذية المتموجة تُستعمل أحياناً كبديل لجدران حشوات الملاط لِخَلْق الموانع العمودية.

و كذلك تستعمل تقنية حقن ملاط الإسمنت و/ أو البنتونايت تحت الضغط بهدف سدّ المسامات وتقليل التوصيل الهيدروليكي للأوساط المسامية. تحفر شبكة كثيفة من آبار الحقن لبناء مانع مستمر و فعّال لمنع التسرب الجدي خلال الفجوات و يُستعمل لصنع الموانع في صخور طبقة الأساس، حيث لا بديل عملي.

استرداد و سحب السوائل غير المائية (NAPL Recovery):

في بعض الظروف، خصوصاً في طور السوائل غير المائية الخفيفة (LNAPLs)، يُمكن أن تستعاد من تحت السطح بوسائل لا تشمل الكشف والقلع. لأن LNAPLs تطفو فوق المنطقة المشبعة وتتجمع ليسهل استخراجها. انخفاض منسوب الماء تحت منطقة LNAPL يجعل الملوثات تنزلق إلى المنخفض بسهولة و تتجمع ليسهل تصريفها الشكل - ، مضختان مُستخدَمتان في مثل هذه المخطط: واحد أعرق لَصَخ الماء وخلق مخروط الانخفاض، و آخر مَوْضوع اقل عمقا لَصَخ LNAPL. تعمل بوحدة سيطرة الكترونية. الماء سيكوّن على الأغلب ملوثاً بمحاليل من LNAPL و قد يَتطلّب معالجة قبل أن يضح إلى البيئة. أحياناً تستخدم مضخة واحدة بالقرب من منسوب الماء، وهي تُضخ خليط الماء و الملوثات العضوية.

Figure 10.43 LNAPL extraction trench with two pumps: one to pump water and create the depression in the water table, and another to pump the accumulated LNAPL. A similar two-pump configuration is used in wells screened across the water table.



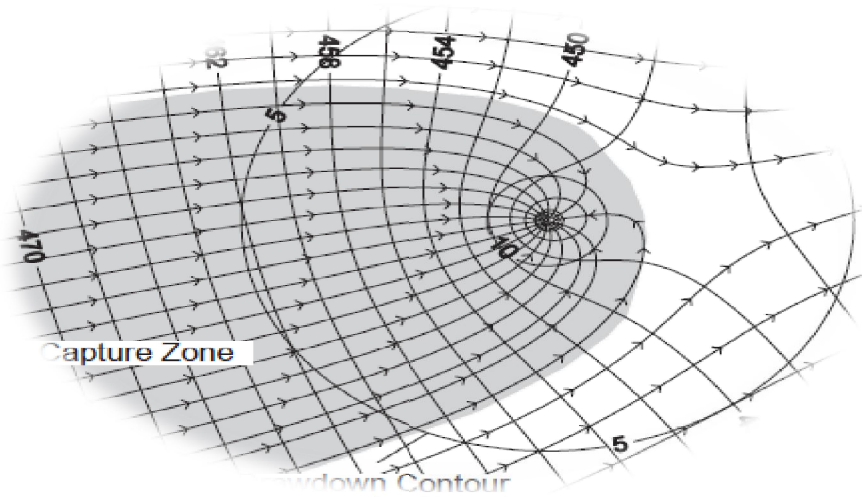
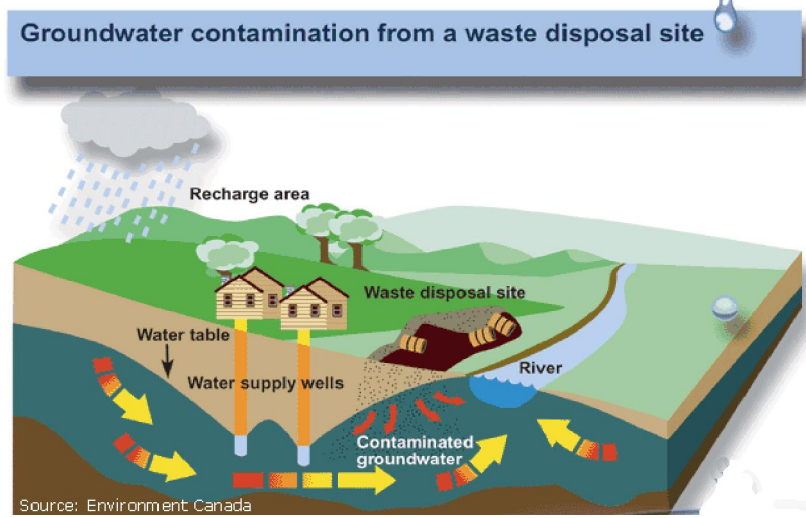
الشكل - : ضخ LNAPL من خندق التجميع. (عملية إزالة الملوثات).

استرداد DNAPLs أصعب من استرداد LNAPLs لأن DNAPLs لا يتجمع بسهولة في العمق الضحل. تقنيات مُختلفة اختبرت لتسهيل استرداد السوائل غير المائية الكثيفة مثل المواد الكيماوية في طور البخار أو بخار الماء. لتحسين الاسترداد في المرحلة المائية، يُمكن أن تُضاف جزيئات المنظفات ومن شأنه يزيد نسبة حلّ و تفكيك NAPL، و يزيد قابلية ذوبان النفط أو الدهن.

السيطرة الهيدروليكية على هالة محلول الملوثات (Hydraulic Control of Solute Plumes)

السيطرة الهيدروليكية المثالية تتضمن الآبار الواقعة تحت ضغط هيدروليكي أوطأ من ضغط مصدر الملوثات. كلّ المياه الجوفية الملوثة يمكن أسرها بضخ مياه الآبار ولا ماء ملوث يهرب بعيداً عن اتجاه الميل الهيدروليكي (الشكل -) بتطبيق هندسة نطاق الأسر (captured)

(zone). و عند تصمِيمِ أنظمة السيطرة الهيدروليكية، يراعى فيها تقليل كلف ضخ ومُعَالَجَة الماء. الماء المأسور بأنظمة السيطرة الهيدروليكية يعالج لغرض إزالة الملوث، وبعد ذلك يعاد إلى المياه الجوفية أو السطحية. أحياناً المعالجة تُحدث في الموقع وأحياناً ترسل إلى موقع معالجة مياه فضلات محلية.



انتزاع الأبخرة السامة من التربة (Soil Vapor Extraction)

عند تسرب الملوثات العضوية إلى المياه الجوفية عبر المنطقة غير المشبعة تتخلف تراكيز عالية من غازات المركبات الطيارة مع NAPLs العضوي ضمن المسامات. تقنية جيدة لانتزاع الملوثات من تحت السطح تشمل ضخ هذه الغازات من المنطقة غير المشبعة، تعرف بطريقة انتزاع البخار من التربة (Soil Vapor Extraction). عدد كبير من مشاكل التلوث تتضمن انسكاب المركبات العضوية القلقة و ملوثاتها بضغط البخار العالية تميل إلى التجزؤ من مرحلة السيويلة إلى مرحلة البخار وعندها تكون قابلة للاستخلاص بتقنيات (SVE).

أنظمة SVE تشمل آبار المنطقة غير المشبعة أو الخنادق مع إنبوب بئر أفقي مثقب كما في الشكل-. يستعمل تطبيق الخنادق في المناطق الضحلة وفي الأعماق يستعمل البئر الموصول إلى مضخة مفرغة تخلق ضغط منخفض في الأنابيب مسبباً تدفق البخار من المنطقة غير المشبعة المحيطة بمصافي البئر. و قد يتم دفع هواء نظيف من بئر مجاور للمساعدة بطرد الغازات السامة.

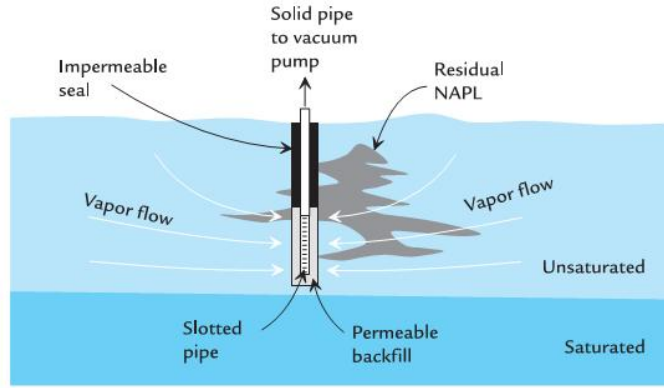


Figure 10.44 A typical SVE system with one extraction well.

الشكل-4 نظام SVE لاستخلاص الغازات بواسطة ضخ الهواء من البئر.

الأبخرة المنتزعة تُعالج عادة لإزالة الملوثات، لكن أحياناً تتحرر إلى الجو. للمركبات العضوية الطيارة (Volatile organic compounds) معالجة تُشمل الأكسدة المباشرة (حرق أو ما شابه ذلك) أو ترشيح خلال الكربون المنشط الحبيبي (granular activated carbon). لقابليتها على الامتزاز بقوة. و يُعالج عادة بتحطيم الملوثات وتوليد الكربون.

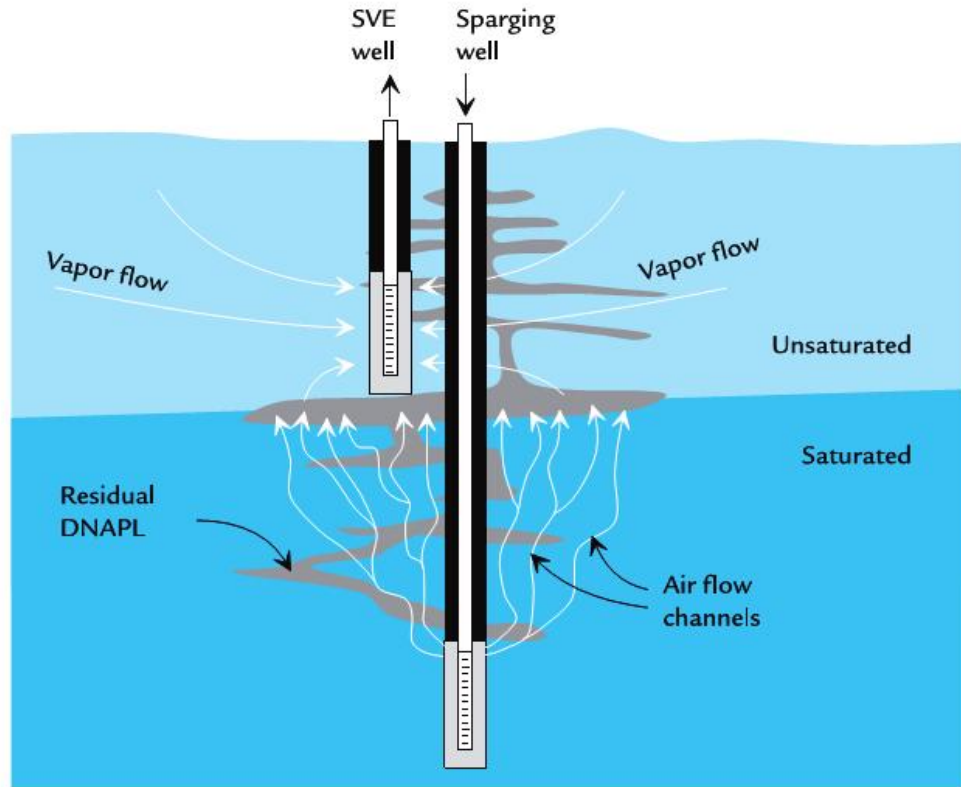


Figure 10.45 Typical configuration of a single air sparging well. Many installations involve multiple sparging and SVE extraction wells.

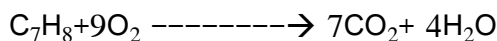
المعالجة البيولوجية (Bioremediation):

تشير Bioremediation المعالجة البيولوجية إلى تدمير جزيئات الملوث في موقعه الأصلي بتفاعلات تحدث بواسطة الجراثيم المقيمة طبيعياً وأحياناً تساعد بجهود المعالجة التي تُجهز المغذيات المطلوبة أو تُحسّن ظروفها. أكثر مركبات وقود الهيدروكربون معرضة للتفكك و التحلل biodegradation ومشاكل التلوث بوقود الهيدروكربون هو أسوأ بكثير من ذلك. تظهر كل المياه الجوفية السطحية دعماً للكثير من الجراثيم. تتراوح الكثافة المثالية للجراثيم من 10^3 إلى 10^7 لكل سنتيمتر مكعب من المياه الجوفية، في كلتا المياه الملوثة وغير الملوثة

البكتيريا هي النوع الأكثر شيوعاً من وجود الجراثيم، وهي العامل المهيمن للتفكك biodegradation وتستقر على السطوح الصلبة لصنع مغذيات عيشها من بينتها لبناء مادة الخلية وإنتاج الطاقة. تفاعلات الأكسدة و الاختزال Redox تعني بوجود الأوكسجين يحدث التفكك الحيوي الهوائي وبعده يحدث التفكك الحيوي اللاهوائي، و كما في أدناه.

Reaction	Free Energy (kJ/mol)
Photosynthesis: $\frac{1}{4} \text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{4} \text{H}_2\text{O} = \frac{1}{4} \text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{4} \text{O}_2(\text{g})$	+119.0
Respiration: $\frac{1}{4} \text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{4} \text{O}_2(\text{g}) = \frac{1}{4} \text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{4} \text{H}_2\text{O}$	-119.0
Denitrification: $\frac{1}{4} \text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{5} \text{NO}_3^- + \frac{1}{5} \text{H}^+ = \frac{1}{4} \text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{10} \text{N}_2(\text{g}) + \frac{7}{20} \text{H}_2\text{O}$	-113.0
Manganese reduction: $\frac{1}{4} \text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{MnO}_2(\text{s}) + \text{H}^+ = \frac{1}{4} \text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{Mn}^{2+} + \frac{3}{4} \text{H}_2\text{O}$	-96.7
Iron reduction: $\frac{1}{4} \text{CH}_2\text{O} + \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + \text{H}^+ = \frac{1}{4} \text{CO}_2(\text{g}) + \text{Fe}^{2+} + \frac{11}{4} \text{H}_2\text{O}$	-46.7
Sulfate reduction: $\frac{1}{4} \text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{8} \text{SO}_4^{2-} + \frac{1}{8} \text{H}^+ = \frac{1}{4} \text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{8} \text{HS}^- + \frac{1}{4} \text{H}_2\text{O}$	-20.5
Methane generation: $\frac{1}{4} \text{CH}_2\text{O} = \frac{1}{8} \text{CO}_2(\text{g}) + \frac{1}{8} \text{CH}_4$	-17.7
Iron oxidation: $\text{Fe}^{2+} + \frac{1}{4} \text{O}_2(\text{g}) + 5\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 2\text{H}^+$	-106.8
Sulfide oxidation: $\frac{1}{8} \text{H}_2\text{S}(\text{g}) + \frac{1}{4} \text{O}_2(\text{g}) = \frac{1}{8} \text{SO}_4^{2-} + \frac{1}{4} \text{H}^+$	-98.3
Nitrification(a): $\frac{1}{6} \text{NH}_4^+ + \frac{1}{4} \text{O}_2(\text{g}) = \frac{1}{6} \text{NO}_2^- + \frac{1}{3} \text{H}^+ + \frac{1}{6} \text{H}_2\text{O}$	-45.3
Nitrification(b): $\frac{1}{2} \text{NO}_2^- + \frac{1}{4} \text{O}_2(\text{g}) = \frac{1}{2} \text{NO}_3^-$	-37.6

كما تحدث عملية إعادة النترية Denitrification في أغلب الأحيان في صميم هالة الهيدروكربون قليلة الأوكسجين. تحويل الجزيئات العضوية إلى مُنتجات لاعضوية تعرف بـ mineralization. على سبيل المثال، التفاعل الهوائي للتولين (toluene C_7H_8) يحدث طبقاً للمعادلة:



Examine the ratio of oxygen to toluene:

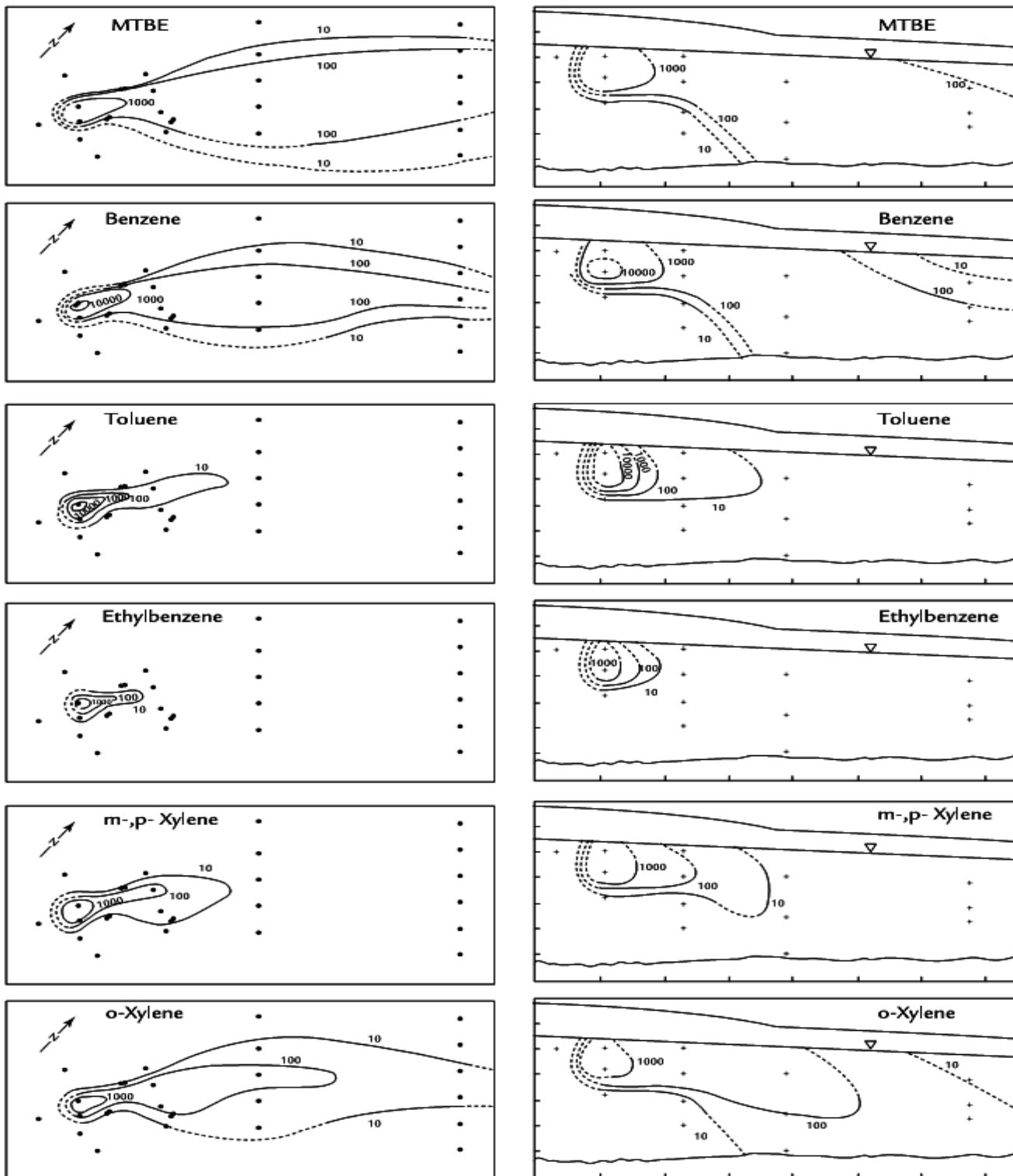
A mole of toluene has a mass of 92.2 g, while 9 mol of O_2 has a mass of 288.0 g.

Solution:

For each gram of toluene degraded, 3.1 g of oxygen is required ($288.0 \text{ g} / 92.2 \text{ g} = 3.12$).

Aerobic degradation of other common hydrocarbon molecules also requires about a 3:1 ratio of oxygen mass to hydrocarbon mass.

جزيئات الهيدروكربون المختلفة تستهلك بنسب مختلفة بالجراثيم وبعض انواع وقود الهيدروكربون تستهلك بسرعة بينما تستمر الأخرى لأوقات أطول. هالة انسكاب الوقود في الشكل- توضح اختلاف كبير في نسب تفكك و تحلل ethyl benzene و التلوين toluene يَختفي بسرعة أكبر بكثير من (MTBE-(Methyl-tert butyl ether) و البنزين. نسبة تفكك المركب يعتمد على العديد من العوامل بضمن ذلك تجمعات الجراثيم، جزيئات هيدروكربون مختلفة، الأوكسجين، المواد المغذية أخرى ، pH، ودرجة حرارة. تتضمن المواد المغذية الضرورية الأخرى النتروجين، الفسفور، وعناصر أخرى.



الشكل-6 خرائط توزيع بعض الملوثات.

تركيز الأوكسجين في الماء المهورى المثالى ضمن المنطقة غير المشبعة لا يتجاوز 10 ملغم/لتر و يهبط تركيز الأوكسجين بتلوته بالهيدروكربون. حَقْن الهواء إلى الآبار في المنطقة الملوثة هي تقنية معروفة بالتفيس الحيوي. هذه التقنية مشابهة لانتزاع بخار التربة، باستثناء الهدف تخفيض الملوثة في موقعه الأصلي بدلاً من إزالته في مرحلة البخار.

أنطقة التفاعل الموقعية (In Situ Reaction Zones)

التطور الحديث في المعالجة في مفهوم نطاق التفاعل الموقعي المصمّم لخلق شروط مناسبة للتحلل الحيوي أو عملية تفكك غير حيوي. النطاق يحدد عبر طريق هالة الملوثة مُصمّم لكي تقوم التفاعلات بتحويل تركيز الملوثات الى المستويات المقبولة قَبْل أن يَخْرُج الماء من الجانب النهائي. فائدة واحدة من هذا التطبيق بأنها تتطلّب أقل أجهزة و اوطا كلف صيانة من ضخّ الماء إلى السطح ومعالجتها. النظام يشتغل بنمط سلبي أو غير فعال بدون الضخّ المستمر. الفائدة الأخرى هي طالما الماء باقى تحت السطح فهو غير خاضع للتعليمات الصارمة التي تحكّم تصريف الماء المُعالج إلى البيئة.

الشكل- يبين التصور العام لانطقة التفاعل. أنطقة التفاعل من الضروري أن تكون كبيرة بما فيه الكفاية لاعتراض كامل هالة الماء الملوثة لإنجاز أهداف المعالجة. لتحديد حجم منطقة التفاعل ومعالجة هالة التلوث، يتم استخدام هندسة "القمع و البوابة". القمع يشتمل الموانع الهندسية مثل حيطان أو صفحة ملاط الطين والبوابة تمثل النطاق الأكثر نفاذاً حيث تحدث المعالجة خلال volatilization أو بعض التفاعلات الموقعية لتحطيم الملوثة.

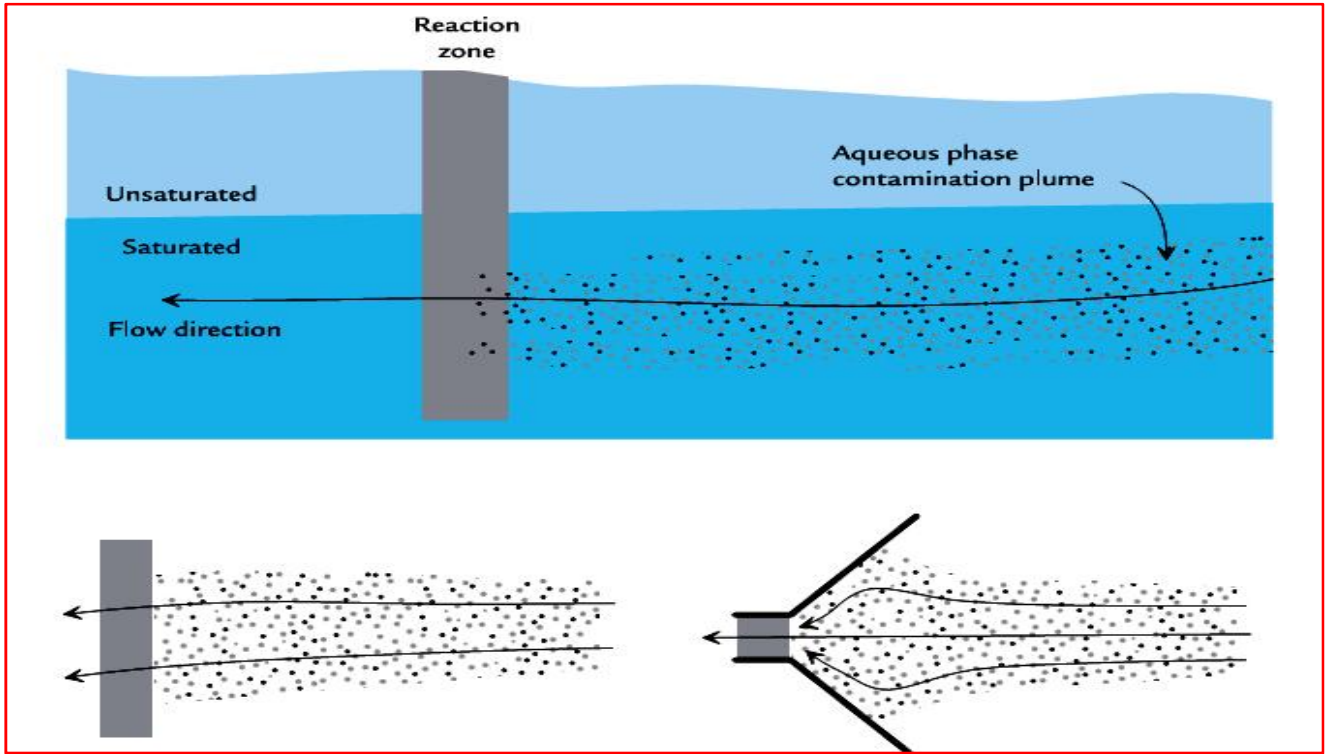
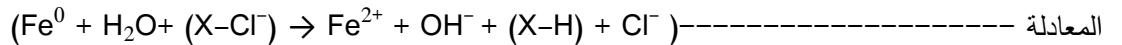


Figure 7 Cross section of a reaction zone (top) and two possible plan-view configurations (bottom).

يُغيّر تصميم انطقه التفاعل اعتماد على المواد الكيماوية المستعملة للمعالجة . لمعالجة الهيدروكربون، تستخدم المواد الخشنة للتحشية وأنابيب توزيع تُستعمل لتقديم الأوكسجين، مواد مغذية، وربما مستعمرات البكتيريا. المواد الكيماوية لتجهيز الأوكسجين تشمل بيروكسيد الهيدروجين (H₂O₂) أو البرمنجنات (MnO₄).

الكلور - هيدروكربون يعالج في مناطق التفاعل باستعمال (Fe⁰) (حشوات حديدية نقيه، حالة أكسدة صفر) كمواد مألثة. تفاعل الأكسدة والاختزال (Redox) يعمل على أكسدة الحديد و اختزال الهيدروكربون المُكلور، باستبدال ذرات الكلور بذرات الهيدروجين كما في



حيث (X-Cl) في أعلاه يُمثل الهيدروكربون المُكلور، (X-H) هذا الهيدروكربون الذي يستبدل فيه الكلور بالهيدروجين.