

التلوث:

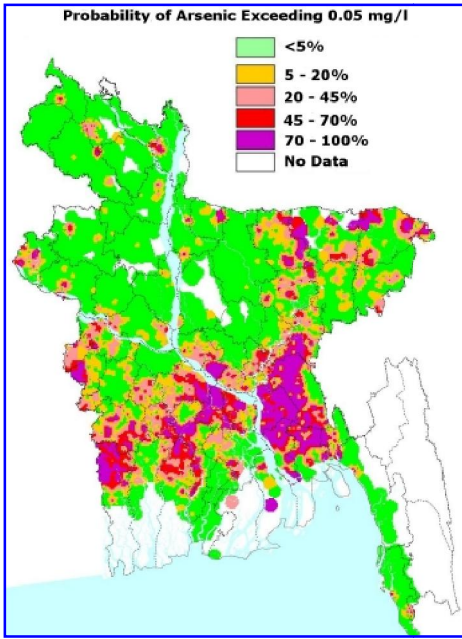
يقصد بتلوث المياه حدوث تدهور في نوعية المياه على نحو يؤدي إلى حدوث خلل في نظامها بصورة أو أخرى بما يقلل من قدرتها على أداء دورها الطبيعي، ويجعلها تفقد الكثير من قيمتها الاقتصادية وتتسبب في أضرار صحية وبيئية هامة عند استعمالها.

مصادر التلوث:

يعود تلوث المياه الجوفية لمصدرين أساسيين هما:

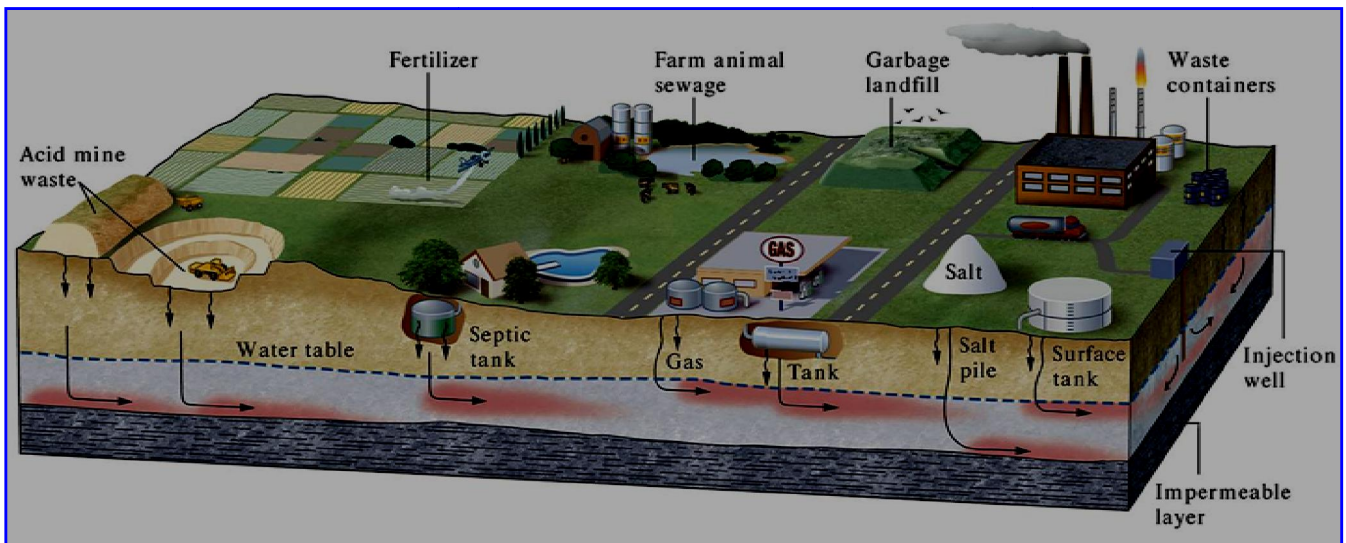
1- التلوث الطبيعي

مسببات النوع الأول: المسببات الطبيعية والتغيرات المناخية، فالمسطحات المائية و الآبار والينابيع المعرضة للظروف الجوية تستقبل كميات كبيرة من الملوثات وعبر تلك المتتسفات الطبيعية للخزانات الجوفية تتسرب تلك الملوثات إلى المياه الجوفية. إن مساهمة هذه الملوثات المسؤولة عنها التغيرات المناخية، ليست كبيرةً وتستلزم وقتاً كبيراً. و هنالك المعادن الثقيلة و ملوثات إشعاعية منها منبعثة من تحلل الطبقة الحاملة للمياه الجوفية مثل الرادون 222 الشديد الذوبان في المياه وقد رصد هذا النوع من الملوثات في عدد من آبار عمان (حوض الزرقا) في الأردن. وهناك تلوث باليورانيوم ينتج عن ذوبان الطبقات الحاملة للمياه خاصة الصخور الجرانيتية (أو الرسوبية) ورصدت تلك الملوثات في عدد من آبار الشرق الأوسط وأفريقيا وينسب تتراوح بين (20-27) ملغم/ لتر.



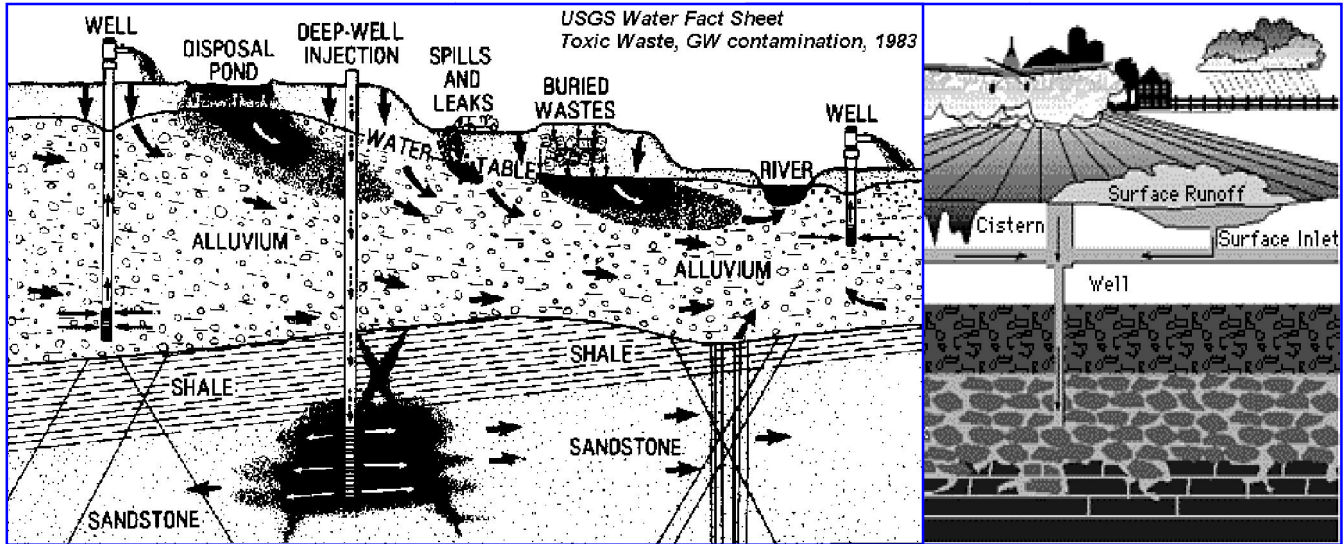
والشكل (1) يوضح تلوث المياه الجوفية بعنصر الزرنيخ في بنغلاديش .

2- التلوث الاصطناعي الناتج عن نشاطات الإنسان كافة، شكل(2) التي تسبب تدهورا في نوعية المياه، فالنشاط الزراعي وما يسفر عن استخداماته للأسمدة والمبيدات الحشرية وكذلك مخلفات الحيوانات تتسرب عبر مياه الصرف الزراعي إلى المياه الجوفية. إن بعض المبيدات الحشرية والمواد الكيميائية بدأت تجد طريقها إلى الطبقات الحاملة للمياه Aquifers. وتعد هذه المعلومات العلمية الحديثة في غاية الخطورة، إذ تشير الدلائل إلى تعرض المخزون الكبير للأرض من المياه العذبة إلى التلوث من مصادر عديدة، مثل الأنشطة الزراعية، حيث يؤدي استعمال الماء بالطرق القديمة، مثل الغمر أو الاستعمال المفرط للمياه، مع سوء استخدام المبيدات الحشرية والأسمدة، إلى زيادة تركيز الأملاح والمعادن و النتراز في المياه الجوفية وبصفة خاصة إذا لم تتوافر أنظمة الصرف الزراعي الحديثة.



شكل(2) مصادر التلوث الاصطناعي للمياه الجوفية

أما مخلفات النشاطات الصناعية المسببة لتلوث المياه الجوفية منها ملوثات السيانيد الناتجة عن صناعات التعدين والورق، والزئبق الناتج عن صناعات الأجهزة الكهربائية وكذلك المواد الصلبة الناتجة عن الصناعات البتروكيميائية. يضاف إليها مخلفات مياه الصرف المنزلي التي أغلب ملوثاتها من الكبريتات، الكلوريدات، النترات، والفينولات حيث تعمل على خفض قيمة الأوكسجين الذائب و الأوكسجين الحيوي المستهلك في المياه. كما أن استخدام الآبار لحقن النفايات الصناعية والإشعاعية، في الطبقات الجوفية العميقة الحاملة للمياه المالحة قد يؤدي إلى تسرب هذه النفايات إلى الطبقات العليا الحاملة للمياه العذبة عن طريق الأنابيب غير المحكمة، أو عن طريق سريانها في اتجاه الطبقات الحاملة للمياه العذبة، من خلال تصدع.



شكل (3،4) . تلوث المياه الجوفية بحقن النفايات السامة ومياه البزل في باطن الأرض.

كذلك فإن تلوث المياه الجوفية قد يحدث نتيجة التخلص السطحي من النفايات شكل (5) وهي ما تدعى بموقع دفن النفايات (Landfills) هو تعبير يغطي تشكيلة واسعة من الوسائل التي تضم مدى واسع من الملوثات المحتملة ، ويحدث هذا غالباً في البلاد الصناعية، حيث



تدفن هذه البلاد نفاياتها الصناعية في حفر تخزين سطحية. وقد يؤدي عدم إحكام عزل هذه الحفر إلى تسرب هذه النفايات إلى الطبقات الحاملة للمياه العذبة، إذ يتحرك الماء المترشح خلال القمامة و يلتقط المكونات الذائبة بطريقه الى خارج قاعدة القمامة. بمستوى عالي من المواد الصلبة و الملوثات العضوية ، حيث يشكل نحو 10% من هذه النفايات خطورة حقيقية على صحة الإنسان والبيئة.

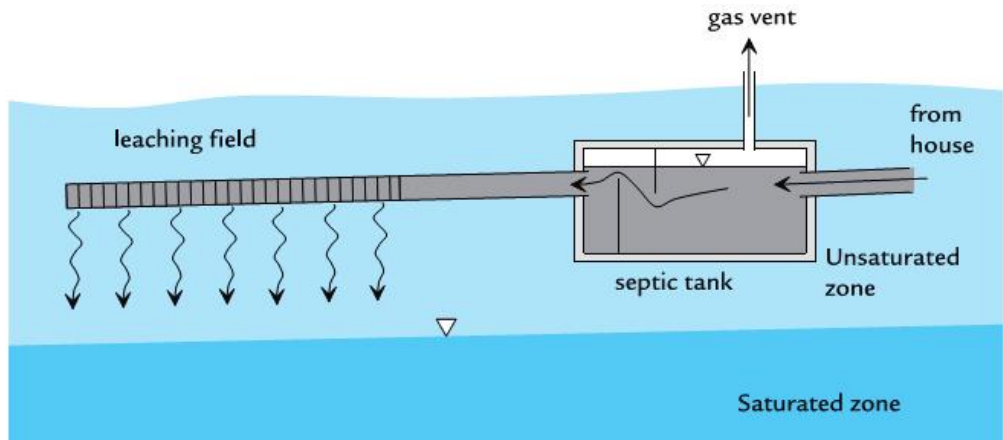
وبالنظر لمحدودية القدرة الذاتية للتنقية في المياه الجوفية للتقليل من الآثار السلبية السمية للملوثات المختلفة، فإن تأثيراتها

شكل (5). حفر الطمر الصحي .

السرطانية على الإنسان والحيوان تبدو جلية. وتؤثر تلك الملوثات على مدى تلوث المياه المتسربة نحو الخزان الجوفي، وكذلك لمدى هشاشة قوام التربة ذات النفاذية العالية التي تسمح لمرور الملوثات عبرها دون أن تخفف من تأثيراتها في النطاقين غير المشبع والمشبّع. كما أن الاستخدام الجائر لمياه الخزانات الجوفية يؤدي الى تلوثها بالأملاح نتيجة تداخل مياه البحار مع مياه الخزان الجوفي والذي يؤدي إلى تسرب المياه المالحة من البحر في اتجاه الطبقات الحاملة واختلاطها بالمياه العذبة. ونتيجة لذلك تصبح هذه المياه غير صالحة للشرب أو الزراعة. ويسبب التلوث البيولوجي الناتج عن البكتريا المرضية والأحياء العضوية الدقيقة التي تنتج مواد كيميائية سامة بالإضافة إلى الفيروسات والبكتريا الممرضة الناتجة عن مخلفات الإنسان المختلطة مع مياه الصرف المنزلي. شكل (6).

و من تسرب حاويات الخزن (Leaking Storage Tanks) ، إذ تعد الخزانات كثيرة الاستعمال لخزن الوقود والمواد الكيماوية، والعديد منها يسرب مواد على مرّ السنين. سببت الخزانات تحت الأرضية أكثر التلوث، لأنها يُمكن أن تسرب ببطءٍ لوقتٍ طويل بدون أن تكتشف. حَمَّنت وكالة الحماية البيئية الأمريكية بأن ب1996 لقد كانت هناك 318,000 حالة إطلاقٍ من الخزانات تحت الأرضية و الأكثر شيوعاً خزانات الغاز في محطات البنزين و الوقود وخزانات المذيبات الصناعية. يطلق على المواد العضوية المتسربة هذه (NAPLs). أنظمة الخزانات الأحدث عموماً مصنوعة من البلاستيك المدعوم بالألياف زجاجية.

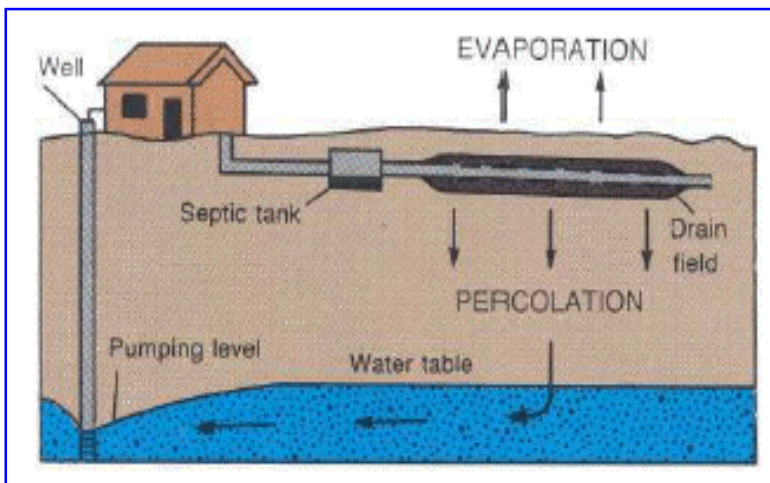
كذلك تستخدم أنظمة التعفين (Septic Systems) للتخلص من المياه القذرة الى تحت السطح في المناطق الريفية البعيدة و المناطق غير المخدمومة بالبلوعات وأنظمة معالجة مياه المجاري. أكثر الأنظمة المنتتة تُخدّم العوائل الوحيدة، لكن بعض الأنظمة الأكبر تُخدّم مجموعة بيوت و/ أو مكاتب. أي نظام تعفين مثالي يبدأ في سلسلة أنابيب التصريف في منظومة سباكة البيت. توصلُ وتصرّف إلى إنبوب واحد يمتد خارج إلى البالوعة حيث تستقر المواد صلبة. و من الضروري أن تُنظف خزانات التعفين بشكل دوري لإزالة المواد الصلبة المتراكمة. و منها تتدفق المياه القذرة وتُرشحُ الى الحقل بشبكة أنابيب التوزيع المنقّبة في المنطقة الغير مشبعة (الشكل-).



شكل (6) نظام التعفين البيتي المثالي.

تحتوي المياه القذرة مركبات عضوية ذائبة تغذي تفاعلات الأكسدة و الاختزال Redox بالجراثيم التي تعيش في النظام. تفاعلات Redox في الخزانات عادة لاهوائية anaerobic و تتضمن عملية التخمر، توليد الميثان، و اختزال الكبريتات. الماء الخارج من الخزان يحوي تركيز عالي من المركبات العضوية، CO_2 ، و الامونيوم .

أما أسباب التلوث الإشعاعي في المياه الجوفية فيعود للراديويم الناتج عن ذوبان مكونات صخور الخزان الجوفي، والرادون - 222 الذي يعتبر شديد الذوبان في الماء. وهناك النويدات المشعة الناتجة عن تحلل اليورانيوم والثور يوم والصخور الغرانيتية والرسوبية التي تنتج



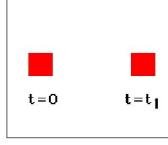
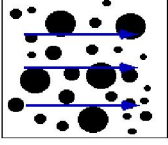
شكل (6a). تلوث المياه الجوفية بمياه الصرف الصحي .

مواد مشعة. ويسبب التركيز العالي لليورانيوم والرادون والراديويم في مياه الشرب طفرات جينية وولادات مشوهة وأمراض سرطانية خطيرة للإنسان. يضاف إلى ذلك الملوثات الإشعاعية الناتجة عن عمليات الانشطار النووي لإنتاج اليورانيوم أو مخلفات معالجة الوقود النووي في محطات الطاقة النووية، وكذلك ملوثات الاستخدام الإشعاعي في المختبرات الطبية. ومعظمها يحتاج لمئات السنين لينعدم تأثيرها السلبي على حياة الإنسان.

العوامل الأساسية والثانوية المساهمة في عملية تلوث المياه الجوفية :

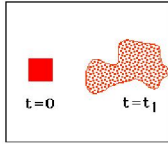
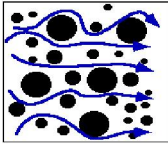
1- التغذية المائية، خصائص التربة، مميزات النطاق غير المشبع والمشبّع، طبيعة الصخور المكونة للخزان الجوفي، شدة الجفاف ومدته، درجات الحرارة والرطوبة، التلوث العابر للحدود، قرب أو بعد الخزان الجوفي عن مصادر المياه العذبة أو المالحة، ودرجة استنزاف مياه الخزان الجوفي.

Advective transport of a solute:



وللتربة دور كبير في تخفيف أو زيادة التلوث في المياه الجوفية، فالقدرة الذاتية للتربة على تنقية المياه المتسربة من الملوثات متعلقة بنوعية التربة. فهناك تربة ذات تنقية عالية تسهم بشكل كبير في تنقية المياه من ملوثاتها قبل وصولها للمياه الجوفية، وتربة ذات تنقية متوسطة تسمح لحد ما لمرور بعض الملوثات إلى المياه الجوفية. وتربة ذات تنقية متدنية تسمح للملوثات بالنفاذ من خلالها إلى المياه الجوفية.

Actual transport of a solute:



تعتمد القدرة الذاتية للتربة على التنقية من خلال خصائصها -القوام (النسجة)، السماكة، النفاذية، التراص، النوعية (عضوية أو عضوية، خشنة، وناعمة) التي

تسمح أو تعيق حركة الملوثات نحو المياه الجوفية. وهي المحددة لسرعة وصولها إلى الخزانات الجوفية. (شكل 7).

يتطلب تقييم إمكانية تخفيف التلوث في المياه الجوفية النظر لمكونات التربة ومدى قدرتها على إزالة بعض الملوثات أو التقليل من

تركيزها (التنقية الذاتية للتربة) المتمثلة بقدرة نظام المياه الجوفية والأوساط التي تملؤها على الامتزاز والتشتت والإعاقة، وتأخير حركة الملوثات من خلال جملة من العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تعمل وتنتشر في نظام (التربة، الصخور، والمياه الجوفية). وهناك تباين في هذه العمليات وشدها تحت سطح الأرض، ففي نطاق الجذور تتحطم كميات ملموسة من الكيمائيات بواسطة العضويات الدقيقة أو بالعمليات الكيميائية والفيزيائية حيث تمتصها النباتات. أما النطاق غير المشبع فإنه يلعب دوراً مهماً في تأخير وصول



الملوثات إلى الخزان الجوفي، نتيجة عمليات التحلل والتشتت (التبعثر) الهيدرو ديناميكي ذو الفاعلية العالية .

2-التوسع في الزراعة والحاجة المستمرة إلى مشاريع مروية من مياه المخزون الجوفي. ويمثل النشاط الأساسي المتسبب في نزوب وإنهاء هذا المخزون. كما أن النشاط الزراعي مسؤول عن تلوث المياه الجوفية بسبب زيادة النتراة الناتجة عن استعمال الأسمدة والمبيدات، ونتيجة للمخلفات الصلبة والسائلة للحيوانات إضافة إلى الأنماط السيئة للمصارف الزراعية والصحية.

3-تعتبر النشاطات الصناعية عاملاً أساسياً في تلوث المياه الجوفية والسطحية على السواء. ويختلف نمط تلوث المياه الجوفية باختلاف المصدر الملوث، مثل مخلفات السيانيد الناتجة عن عمليات التعدين والورق الغني بالكبريت ومخلفات صناعة المصابيح الكهربائية والمواد الغنية بالزئبق الناتجة عن الصناعات الكهربائية والمخلفات الصلبة للصناعات البتروكيميائية والتعدين وإنتاج الغاز والنفط. لا تعتبر النشاطات الصناعية السبب الرئيس وراء نزوب المصادر المائية لكنها السبب الرئيس لتلوثها.

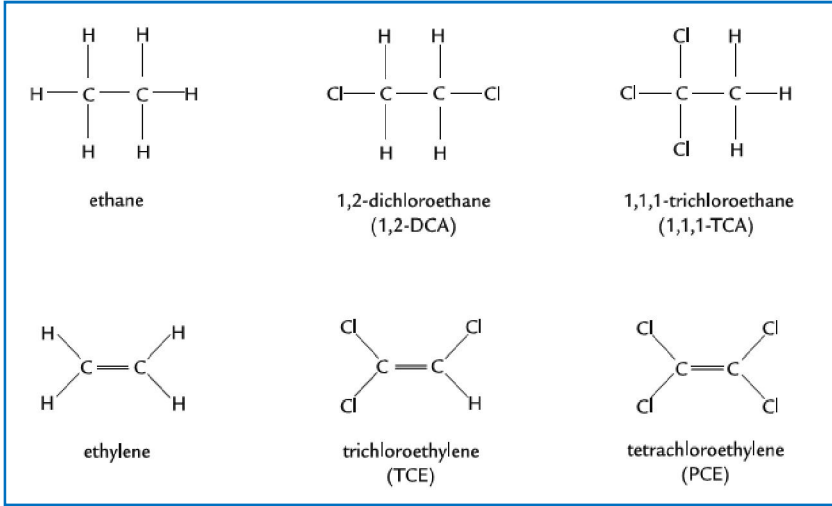
4-تعتبر النشاطات المنزلية والتجارية من الأسباب الرئيسية لتلوث المياه الجوفية رغم أن تأثيرها ثانوي على الاستهلاك. ويرجع سبب التلوث إلى التركيز المرتفع للكبريتات و الكلوريدات و النتراة، وقد تشكل المواد المتسربة من مخلفات صرف المنازل والنشاطات التجارية

مصدراً ملوثاً خطيراً على المياه الجوفية وذلك لمكوناتها القابلة للذوبان وحاجتها الكبيرة من الأوكسجين البيولوجي الذي قد ينتج عنه ظاهرة نقص الأوكسجين في النطاقين المشبع وغير المشبع المعرضين للتسرب المباشر بواسطة الأمطار.

الملوثات العضوية (Organic Contaminants)

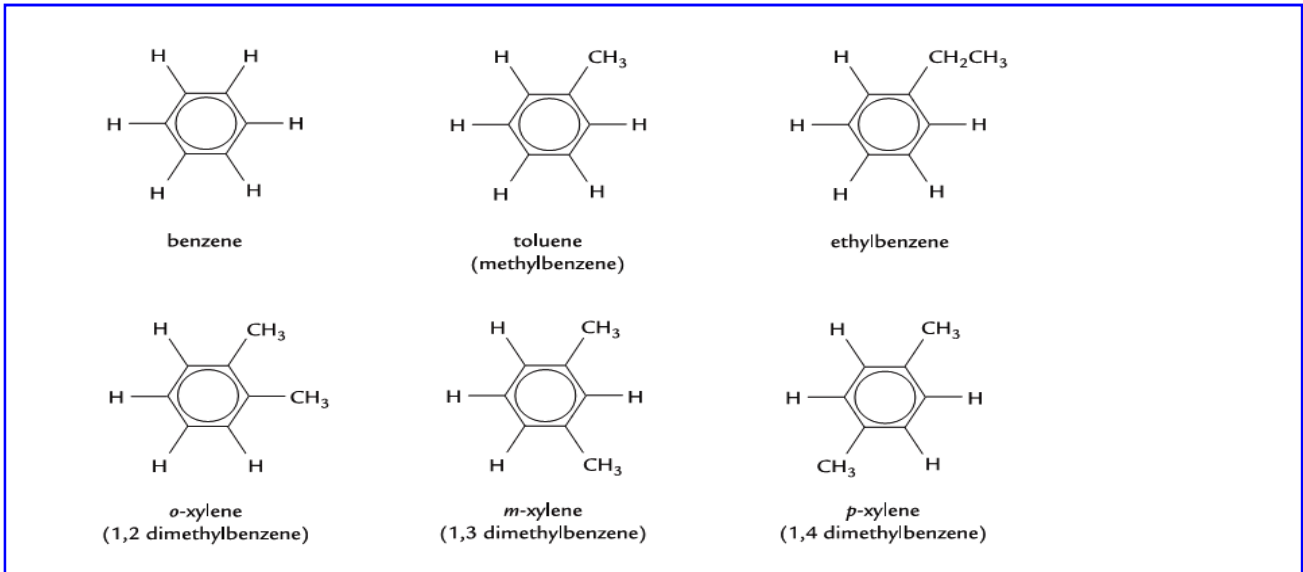
جزء كبير من مشاكل تلوث المياه الجوفية تتضمن الملوثات العضوية إذ تستعمل كميات من وقود الهيدروكربون و المذيبات solvents وسوائل عضوية أخرى. أكثر الإطلاقات المسكوبة العرضية أو غير الشرعية تُحرّك إلى جوف الأرض و إلى المياه الجوفية و يُهاجر مسافات.

مُلخّص المركّبات العضوية المتكونة من ذرات الكربون التي تلتصقُ بشكل تساهمي لنفسها وإلى العناصر الأخرى، مثل الهيدروجين،



الأوكسجين، النتروجين، الكبريت و الهالوجين (فلورين، كلور، البروم واليود) موضحة في الشكل (8) و قد أصبح عدد من المركبات العضوية المختلفة ملوثات للمياه الجوفية. ولوكالة الحماية البيئية الأمريكية معايير الماء الصالح للشرب لـ 54 مركب عضوي مختلف وهناك العشرات منها يمكن أن تكون ملوثات في المياه الجوفية.

يُفطرُ النفط الخام (نפט) لإنتاج مُنتجات الهيدروكربون المُختلفة. أثناء التقطير مئات الأنواع المختلفة للجزيئات العضوية في النفط تنفصل طبقاً لدرجات غليانهم (جدول-1). و الخواص الكيماوية للملوثات العضوية موضحة في الجدول-2.



جدول-1 مفصولات تكرير النفط

| Fraction | Number of Carbon Atoms | Boiling Temp. (°C) | Uses |
|-------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------------------|
| Gas | 1-4 | -162-30 | Fuel gas, plastics manufacture |
| Petroleum ether | 5-6 | 30-60 | Solvents, gasoline additives (MTBE, others) |
| Gasoline | 5-12 | 40-200 | Gasoline fuels |
| Kerosene | 11-16 | 175-275 | Diesel fuel, jet fuel, heating oil |
| Residual fuel oil | 15-18 | 275-375 | Industrial heating |
| Lubricating oil | 17-24 | > 350 | Lubricants |
| Paraffin | > 20 | Solid residue | Candles, waxes, etc. |
| Asphalt | > 30 | Solid residue | Road pavement |

| Substance | Formula | Density (g/cm ³) | Solub. (mg/L) | MCL (mg/L) | Log(K _{ow}) | K _H (M/atm) | Vapor Pr. (mm Hg) |
|------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|---------------|------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| Benzene | C ₆ H ₆ | 0.88 | 1,750 | 0.005 | 2.1 | 0.18 | 76 |
| Ethylbenzene | C ₈ H ₁₀ | 0.87 | 180 | 0.7 | 3.1 | 0.15 | 9 |
| Toluene | C ₇ H ₈ | 0.87 | 520 | 1.0 | 2.7 | 0.15 | 28 |
| <i>o</i> -Xylene | C ₈ H ₁₀ | 0.88 | 175 | † | 3.1 | 0.20 | 6 |
| <i>m</i> -Xylene | C ₈ H ₁₀ | 0.86 | 160 | † | 3.2 | 0.14 | 8 |
| <i>p</i> -Xylene | C ₈ H ₁₀ | 0.86 | 190 | † | 3.2 | 0.14 | 9 |
| Benzo(a)pyrene | C ₂₀ H ₁₂ | 1.35 | 0.003 | 0.0002 | 6.0 | 2900 | 5 × 10 ⁻⁹ |
| PCB-1248 | C ₁₂ H _{10-n} Cl _n | 1.41 | 0.055 | 0.0005 | 6.1 | 0.25 | 4 × 10 ⁻⁴ |
| 1,2-DCA | C ₂ H ₄ Cl ₂ | 1.25 | 8,400 | 0.005 | 1.5 | 0.91 | 85 |
| 1,1,1-TCA | C ₂ H ₃ Cl ₃ | 1.35 | 1,300 | 0.2 | 2.5 | 0.060 | 120 |
| TCE | C ₂ HCl ₃ | 1.46 | 1,100 | 0.005 | 2.4 | 0.11 | 70 |
| PCE | C ₂ Cl ₄ | 1.62 | 150 | 0.005 | 2.4 | 0.060 | 19 |
| DCM | CH ₂ Cl ₂ | 1.33 | 14,000 | 0.005 | 1.3 | 0.40 | 440 |
| MTBE | C ₅ H ₁₂ O | 0.74 | 45,000 | ‡ | 1.2 | 1.7 | 350 |

Properties are representative average values for 20 to 25°C.

Density of the NAPL, except for benzo(a)pyrene which is solid.

Solub. = aqueous solubility.

MCL = maximum contaminant level, permissible in U.S. public water supplies.

K_{ow} = octanol-water partition coefficient (dimensionless; see Eq. 9.80).

K_H = Henry's law constant (dimensionless; see Eq. 9.31).

† MCL is 10 mg/L for total of all three xylene isomers.

‡ No MCL is yet defined. Health advisory based on taste and odor is 0.02 to 0.04 mg/L.

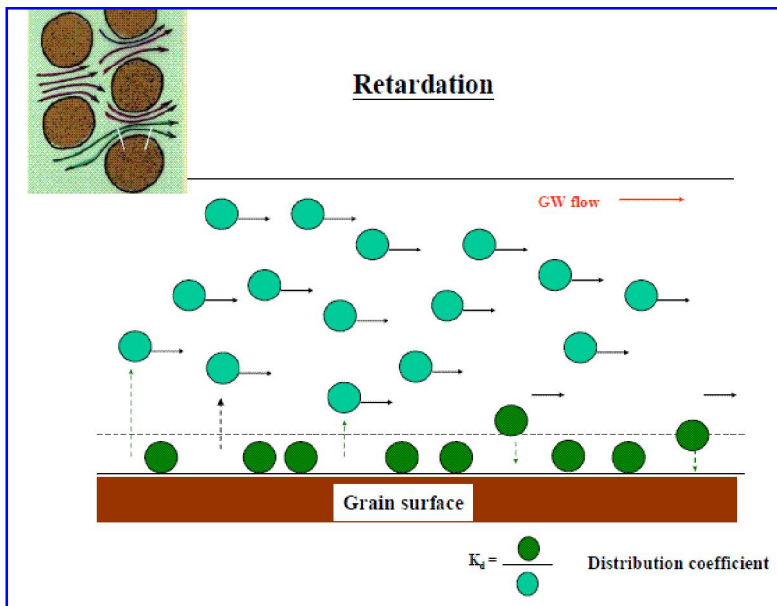
PCBs are a mixture of chlorinated biphenyls with formula as shown.

PCB-1248 contains 48% chlorine by weight, and n = 2 to 6.

أهم العمليات المؤثرة في انتقال الملوثات إلى المياه الجوفية :
أولاً- العمليات الجيو كيميائية:

هي كافة التغيرات التي تطرأ على تركيز الملوثات في المياه قبل وصولها إلى المياه الجوفية ومن أهمها :

1- عملية الامتزاز adsorption وإزالته: من أهم خصائصها التوازن بين عدد أواصر المواد المتفاعلة مع المحلول من خلال عملية الامتزاز فزيادة تركيز المحلول يزيد من عملية الامتزاز ونقصانه يسبب إزالته، فمكونات الصخور الطينية والزيولايت وهيدروكسيل وهيدرات



الحديد والمنغنيز، وهيدروكسيل الألمنيوم والمركبات العضوية تتأثر بشكل أكبر بعملية الامتزاز. ويلعب التأثير الامتزازي لجذور النباتات العضوية الصغيرة المجهرية، والبكتريا العنصر الأساس في عملية الامتزاز. إن عملية التبادل بين أيونات المحلول وايونات الرسوبيات تسمى (التبادل الأيوني) ويتأثر اتجاهه وكميته وسرعته بعدة عوامل أهمها، أنواع وخصائص المكونات الصخرية، نوعية الأيونات، تركيز الأيونات المنحلة والأيونات المستبدلة وتسبب التفاعلات المستمرة للامتزاز وإزالته إعاقه الملوثات للوصول إلى المياه الجوفية وتقاس بمعامل الإعاقه أو الاحتجاز retention = (نسبة سرعة المياه الجوفية إلى سرعة الملوثات).

شكل (9). احتجاز الملوثات بواسطة الامتزاز على سطح طبقة طينية.

2- عملية الإذابة والترسيب: تتوقف على قابلية الملوثات على (الانحلال و التفكك) وتقسّم الملوثات حسب درجة إذابتها وتفاعلها في الماء إلى: ملوثات الكتروليتية (أملاح، أحماض، وقواعد)، وملوثات غير الكتروليتية (مركبات استقطابية، وغير استقطابية). وتتحكم بعملية الإذابة والترسيب قيم ال PH ودرجة الحرارة، درجة التأكسد والاختزال (Eh)، فالمركبات الالكتروليتية تتفكك إلى أيونات، أما المركبات العضوية الاستقطابية (السكر، الكحول، والغازات) فتشكل محاليل حقيقية بشكل جزيئات. والمركبات العضوية غير الاستقطابية (الزيوت المعدنية ومنتجاتها، والهيدروكربونات الهالوجينية) تشكل محاليل ضعيفة.

تتلخص آلية العمل ب: ترسب المواد المذابة خلال مسارات جريان المياه الى الخزانات الجوفية فيزداد تركيزها بفعل التبخر والنتح ليصل الماء الملوث فوق درجة الإشباع (في المناخ الجافة) إلى المياه الجوفية ويتفاعل معها ليشكل مركبات كيميائية وأيونات ضعيفة التفكك. ومن خلال عمليات الترسيب للأيونات ذات التركيز العالية تتم عملية الإحلال، ولهذه الظاهرة الترسيبية أهمية بالغة في تثبيت كثير من المعادن الثقيلة والمركبات الإشعاعية في الخزان الجوفي خاصة بالنسبة لهيدرات الحديد والمنغنيز، وبفعل عملية الاستعاضة للأيونات الأيزومرفية ذات الحجم المتشابه (الترسيب المترابط والمتزامن) يتم تنقية المياه من الملوثات.

3- عملية الأكسدة والاختزال: تتلخص آلية عملها ب: ترسب الأيونات القابلة للأكسدة و الاختزال (عند قيم pH محددة) في المياه الجوفية حيث يتغير جهد التأكسد والاختزال وفقاً لمسارات جريان المياه الجوفية ومكونات صخور الخزان الجوفي. ويعمل على تفكك المواد العضوية في نطاقات مختلطة خالصة من الأوكسجين وبوجود الحديد والمنغنيز والنترات تترسب المعادن الثقيلة جدول-3.

| Reaction | Free Energy (kj/mol) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Photosynthesis: | |
| $\frac{1}{4}CO_2(g) + \frac{1}{4}H_2O = \frac{1}{4}CH_2O + \frac{1}{4}O_2(g)$ | +119.0 |
| Respiration: | |
| $\frac{1}{4}CH_2O + \frac{1}{4}O_2(g) = \frac{1}{4}CO_2(g) + \frac{1}{4}H_2O$ | -119.0 |
| Denitrification: | |
| $\frac{1}{4}CH_2O + \frac{1}{5}NO_3^- + \frac{1}{5}H^+ = \frac{1}{4}CO_2(g) + \frac{1}{10}N_2(g) + \frac{7}{20}H_2O$ | -113.0 |
| Manganese reduction: | |
| $\frac{1}{4}CH_2O + \frac{1}{2}MnO_2(s) + H^+ = \frac{1}{4}CO_2(g) + \frac{1}{2}Mn^{2+} + \frac{3}{4}H_2O$ | -96.7 |
| Iron reduction: | |
| $\frac{1}{4}CH_2O + Fe(OH)_3(s) + H^+ = \frac{1}{4}CO_2(g) + Fe^{2+} + \frac{11}{4}H_2O$ | -46.7 |
| Sulfate reduction: | |
| $\frac{1}{4}CH_2O + \frac{1}{8}SO_4^{2-} + \frac{1}{8}H^+ = \frac{1}{4}CO_2(g) + \frac{1}{8}HS^- + \frac{1}{4}H_2O$ | -20.5 |
| Methane generation: | |
| $\frac{1}{4}CH_2O = \frac{1}{8}CO_2(g) + \frac{1}{8}CH_4$ | -17.7 |
| Iron oxidation: | |
| $Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2(g) + 5H_2O = Fe(OH)_3(s) + 2H^+$ | -106.8 |
| Sulfide oxidation: | |
| $\frac{1}{8}H_2S(g) + \frac{1}{4}O_2(g) = \frac{1}{8}SO_4^{2-} + \frac{1}{4}H^+$ | -98.3 |
| Nitrification(a): | |
| $\frac{1}{6}NH_4^+ + \frac{1}{4}O_2(g) = \frac{1}{6}NO_2^- + \frac{1}{3}H^+ + \frac{1}{6}H_2O$ | -45.3 |
| Nitrification(b): | |
| $\frac{1}{2}NO_2^- + \frac{1}{4}O_2(g) = \frac{1}{2}NO_3^-$ | -37.6 |

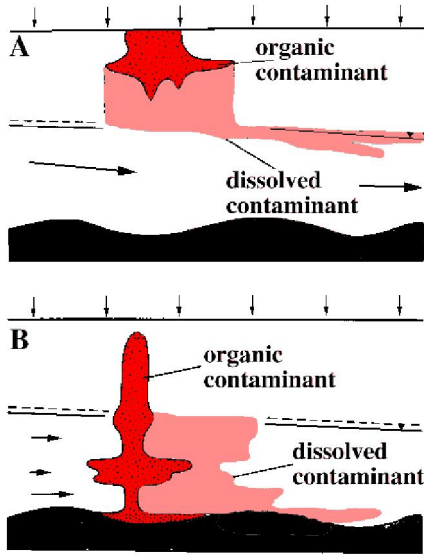
ثانياً - العمليات البيوكيميائية (الحيوية) :

يتم خلالها تفكك المركبات العضوية الرئيسية بواسطة البكتريا إلى كربون وهيدروجين، لاستخدامها كطاقة في تفاعلاتها لتكوين مركبات ثاني أو كسيد الكربون وجزيئة الماء.

ثالثاً- العمليات الفيزيائية: وتشمل:

1- عملية التشتت dispersion: هناك اتجاهين لتشتت الملوثات الذائبة (أفقياً وعمودياً) فالمياه الملوثة تتمدد عند اختلاطها مع المياه الجوفية النقية بسبب التشتت الهيدرو ديناميكي حتى يصل تركيز الملوثات إلى المستويات العادية، ويسبب عملية الاختلاط يحدث نقصاً في تركيز الملوثات مع الزمن تبعاً لمسار جريان المياه. شكل (10).

شكل (10). التشتت الأفقي والعمودي للملوثات.



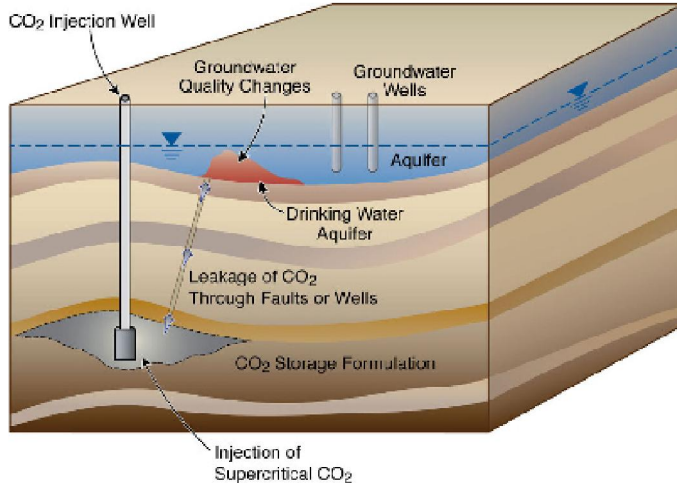
2- عملية الإعاقة retention:

تعمل وفقاً لآليات فيزيائية - كيميائية على إعاقة حركة المواد المنحلة ضمن مسار الماء حيث تنقسم المواد المذابة لفتنتين : فئة محافظة وهي المواد المذابة التي لا تتفاعل مع التربة أو المياه الجوفية مثل الكلور، وفي الغالب تكون حركتها سريعة. وفئة فعالة : فالمواد المتفاعلة (كيميائياً وبيولوجياً) مع التربة غالباً تكون حركتها بطيئة. وتتخلص آلية عمل الإعاقة: بالتأثير المتعاكس للامتزاز وإزالته الذي يعيق انتقال الملوثات في مسار الماء وتحديد المحلول والترشيح والتفاعل الكيميائي والتغيير البيوكيميائي.

3- عملية الترشيح : وتمثل مجموع الفعاليات الفيزيائية والكيميائية التي تحدث في مكونات التربة بغرض إزالة الجزيئات الكبيرة بالجهد الميكانيكي و امتزاز الجزيئات الصغيرة المعلقة (البكتريا، الجراثيم، وبقايا هيدروكسيل الحديد). وتعتبر عملية الترشيح الميكانيكية في الطبقات المائية الحصوية غير فعالة بسبب صغر حجم

جزيئات هيدروكسيل الحديد لنحو 10 ميكرومتر وحجم جزيئات البكتريا لنحو (0.2-5) ميكرومتر والفيروسات لنحو (0.02-0.25) ميكرومتر. وتتخلص آلية العمل بتراكم المعادن والفلزات غير العضوية (بكتافة 2.5 غم/سم³) وعدم تراكمها بالنسبة للعضويات المجهرية الصغيرة (أقل من 5 ميكرومتر وكثافتها أقل من 1غم/سم³). أما الجزيئات ذات الأقطار الأقل من واحد ميكرومتر كالفيروسات فإن انتشارها يكون مهماً جداً، وتضعف عملية الترشيح حين تصل حجم الجزيئات بين (1-5) ميكرومتر والذي يماثل حجم معظم البكتريا.

4- عملية انتقال الغازات :



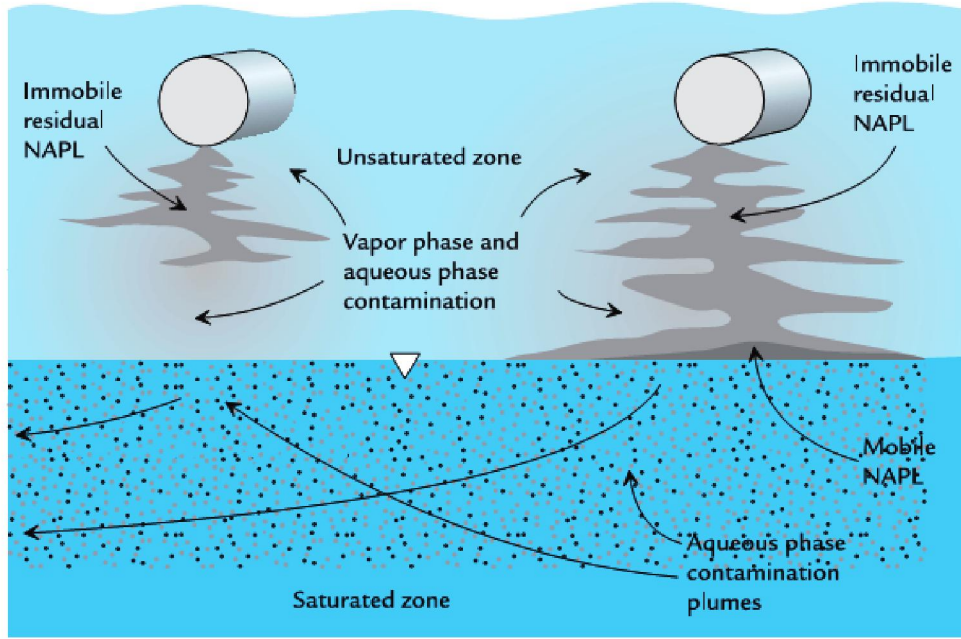
تجتاز الغازات أثناء انتقالها من المياه الجوفية إلى الجو نطاقين فاصلين الأول يفصل بين النطاق غير المشبع والمياه الجوفية والثاني يقع بين النطاق غير المشبع والجو. حيث تتأثر حركة وانتشار الغازات في النطاقين غير المشبع والمشبوع ب : تأثير درجة الحرارة واختلاف درجات الضغط الجوي، تأثير التشتت وكمية وفعالية إمداد الأوكسجين من الجو في الشروط الهوائية أو اللاهوائية في المياه الجوفية، وتعمل الحركة العكسية للغاز على إزالة النواتج الغازية كالنتروجين وثاني أكسيد الكربون والملوثات الطيارة من المياه الجوفية، شكل(11).

رابعاً- العمليات البيوفيزيائية:

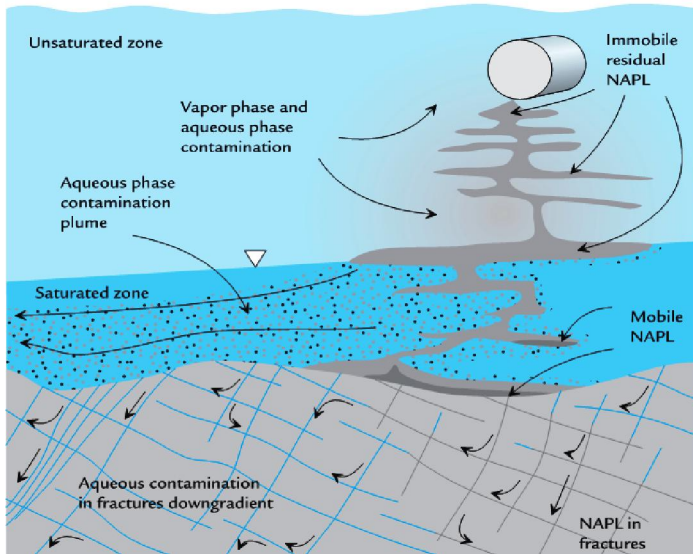
تتسرب الجراثيم إلى المياه الجوفية عن طريق التغذية المائية وسرعتها تتعلق بمصدر التلوث، وطبيعة التربة أعلى منطقة الخزان الجوفي حيث يقدر متوسط الفترة الزمنية اللازمة لوصول الجراثيم إلى المياه الجوفية بين (20-400) يوم.

أنماط الهجرة (Overview of Migration Patterns)

تبدأ أكثر الملوثات العضوية هجرتها تحت السطحية بشكل سوائيل عضوية (طور السائل غير المائي-NAPL). هذه السوائيل غير قابلة للامتزاج بالماء، مثل الزيت والماء في صلصة السلطة. هذا لا يعني عدم حدوث خلط. تدوّب جزيئات السائل العضوي في الماء. عند سكب السائل العضوي، يميل إلى الهجرة داخل المنطقة غير المشبعة و قد يُهاجر مسافة قصيرة من الانسكاب أو قد يُهاجر أبعـد وأعمق (الشكل - 12). عند هجرة طور السائل غير المائي-NAPL ، يترك وراءه أثر قطرات صغيرة محصورة في فراغات المسام الأكبر.



شكل- 12 يوضح هجرة طور السائل غير المائي -NAPL نتيجة تسربات خزان إلى طبقة جوفية حبيبية. إذ يتجمع (NAPL) في قمة أقل الطبقات نفاذية و يتحرك أحياناً باتجاه عكس تدفق المياه الجوفية.



والشكل-13 يوضح هجرة طور السائل غير المائي الكثيف DNAPL ضمن كسور الصخور التي تقع تحت الطبقة الجوفية الحبيبية. يتجمع -DNAPL على سطح الطبقة الصخرية ثم ينتشر ملوثا المياه الجوفية في المناطق السفلى.

هناك بضعة آليات من شأنها التقليل من شدة تأثير ملوثات المياه الجوفية العضوية. بعض جزيئات الملوث العضوية مثل polychlorinated biphenyls تتشبث بقوة في مواد الطبقة الجوفية الصلبة و تحدد مدى هجرة المحاليل. تعد الجزيئات العضوية الملوثة غذاء في أغلب الأحيان للجراثيم التي تعيش في بيئات المياه الجوفية الضحلة. تفاعلات الأكسدة و الاختزال Redox الكيماوية الحيوية بصحبة هذه الكائنات الحية يمكن

أن تُخفّض أو تُزيل كتلة الملوثات. بدون التفسخ الميكروبي الطبيعي، هالة تلوّث غازولين ستكوّن شاملة وأكثرَ ضرراً.

سوائل الطور غير المائي (Non aqueous-Phase Liquids)

الصفات الطبيعية لسوائل الطور غير المائي (NAPL) موضحة في الجدول 4. سوائل الطور غير المائي (NAPL) ستعوم وتجمع على سطح المنطقة المشبعة أو تكون قادرة على الاندفاع بعمق إلى المنطقة المشبعة. سوائل الطور غير المائي الخفيف (LNAPL) "عائمة (floaters) وسوائل الطور غير المائي الثقيل (DNAPL) غاطسة sinkers وأكثر وقود الهيدروكربون LNAPLs وأكثر الهيدروكربون DNAPLs.

الإشباع والسوائل الرطبة وغير الرطبة

عندما يتواجد (NAPL) في المنطقة غير المشبعة، هناك ثلاثة أطوار تشغل حيز المسامات هي الهواء، الماء، NAPL. اما في المنطقة المشبعة، فيوجد طوران هما: الماء و NAPL. و الإشباع هو معامل لوصف الوفرة النسبية لكل طور.

جدول - 4 الكثافة، اللزوجة، الشد السطحي للماء و سوائل الطور غير المائي (NAPL)

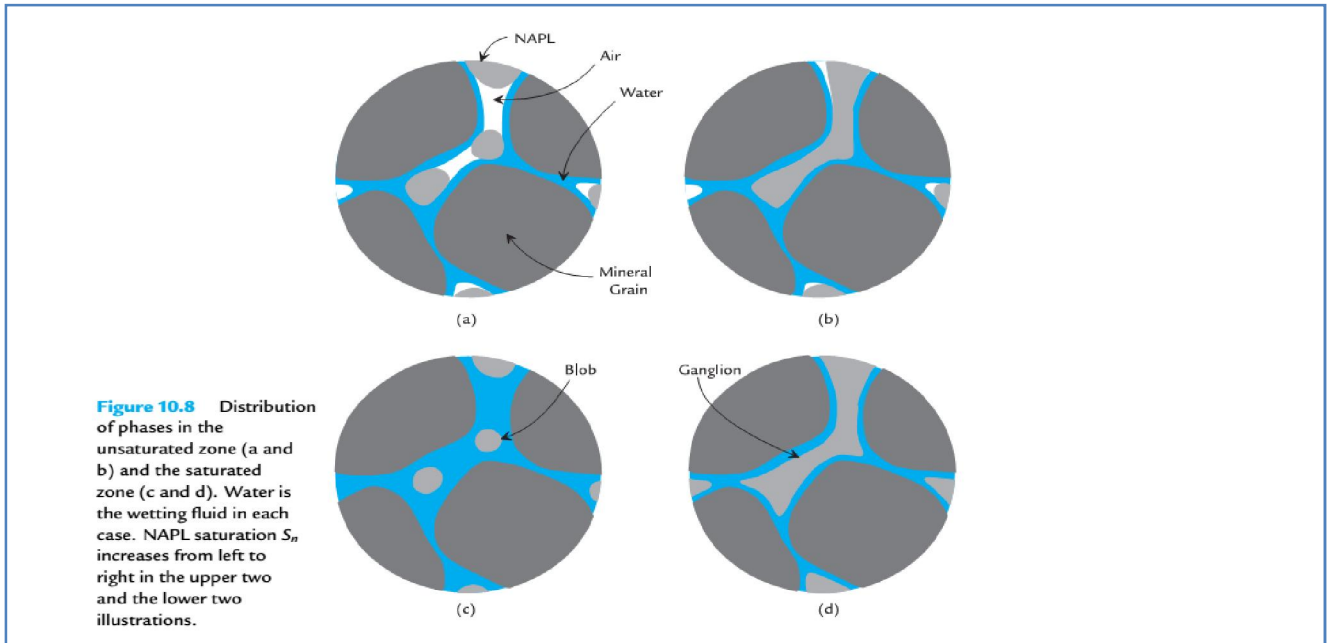
| Liquid | Density, ρ (g/cm ³) | Viscosity, μ (N·sec/m ²) | Interf. Tension, σ (dynes/cm) | Source |
|--------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|--------|
| LNAPLs: | | | | |
| Unleaded gasoline | 0.75-0.85 | $< 8 \times 10^{-4}$ | | 1 |
| Leaded gasoline | 0.73 | 5×10^{-4} | 20 | 1 |
| Jet fuel (A/A1) | 0.82 | 2×10^{-3} | 37 | 1 |
| Home heating oil | 0.86 | 1.7×10^{-3} | 27 | 1 |
| Kerosene | 0.81 | 1×10^{-3} | 23-32 | 1 |
| Arabian medium crude oil | 0.88 | 2.3×10^{-2} | 23 | 1 |
| DNAPLs: | | | | |
| DCM | 1.33 | 4.4×10^{-4} | 28 | 2 |
| 1,2-DCA | 1.26 | 8.4×10^{-4} | 30 | 2 |
| 1,1,1-TCA | 1.35 | 8.4×10^{-4} | 45 | 2 |
| TCE | 1.46 | 5.7×10^{-4} | 35 | 2 |
| PCE | 1.63 | 9.0×10^{-4} | 44 | 2 |
| Water: | 1.00 | 1.0×10^{-3} | | |

$$S_i = V_i / V_v \text{----- (1)}$$

Where V_i is the volume of phase i and V_v is the volume of voids in the material. The sum of the saturations of all phases present equals one.

For example, in the unsaturated zone with air, water, and NAPL, the corresponding saturations total one: $S_a + S_w + S_n = 1$.

In the saturated zone with only water and NAPL, $S_w + S_n = 1$.



الشكل - 14 توزيع الأطوار في مسامات المنطقة المشبعة وغير المشبعة.

الشد السطحي و الضغط الشعري ينقطع الضغط عند جبهة الاتصال، مع ضغط (NAPL) P_n أكبر من (ضغط الماء) P_w و لها جاذبية ذاتية أكبر من الأخرى. الجزيئات قُرب الجبهة مَسْحُوبَة بعيداً عن الجبهة نحو داخل السائل بالقوة الجزيئية. الشد بين الوجوه صفة التي

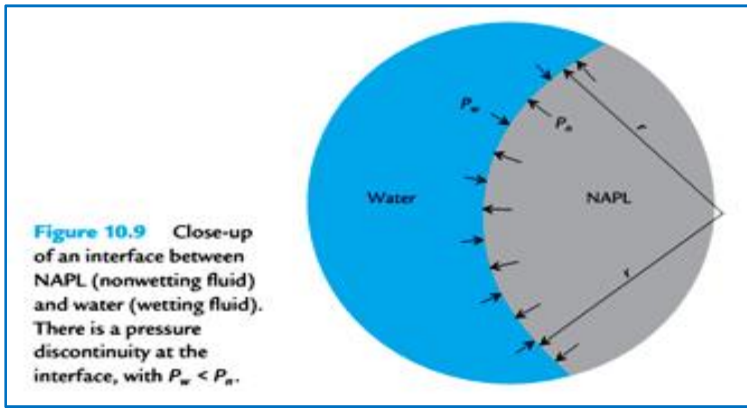


Figure 10.9 Close-up of an interface between NAPL (nonwetting fluid) and water (wetting fluid). There is a pressure discontinuity at the interface, with $P_w < P_n$.

تقيس كمية عدم التوازن في الجاذبية الجزئية عند الجبهة بين سائلين. له أبعاد الطاقة / مساحة، أو بشكل قوة / طول. الشد بين الوجوه للماء و طور السائل غير المائي (NAPL) هو 20-50 داين/سم (جدول-4).

إن عدم توازن القوة الجزيئية عند الجبهة ينتج عنه عدم استمرارية الضغط. إن السائل غير الرطب في الداخل من تقوس الجبهة له ضغط أعلى من السائل الرطب (الشكل 15)، $(P_w < P_n)$.

إن الاختلاف في الضغط عبر جبهة الاتصال تُدعى الضغط الشعري، P_c

الشكل- 15 جبهة الاتصال بين NAPL و الماء.

$$P_c = P_n - P_w$$

حيث أن P_n الضغط في السائل غير الرطب (NAPL) و P_w الضغط في السائل الرطب (الماء). في المنطقة غير مشبعة و بدون وجود NAPL ، الماء هو السائل الرطب ، والهواء هو السائل غير الرطب، وضغط ماء المسام (ضغظ القياس) يساوي (P_c) ، حيث شكّل الجبهة يشبه غطاء كروي نصف قطره r ، الضغط الشعري P_c يمثل دالة الشد السطحي و نصف القطر r في الأوساط المسامية.

$$P_c = 2\sigma/r \text{ (spherical interface)}$$

وإذا كان شكّل الجبهة يشبه اسطوانة طويلة نصف قطرها r فالضغط الشعري P_c يمثل دالة الشد السطحي في كسور الصخور

$$P_c = \sigma/r \text{ (cylindrical interface)}$$

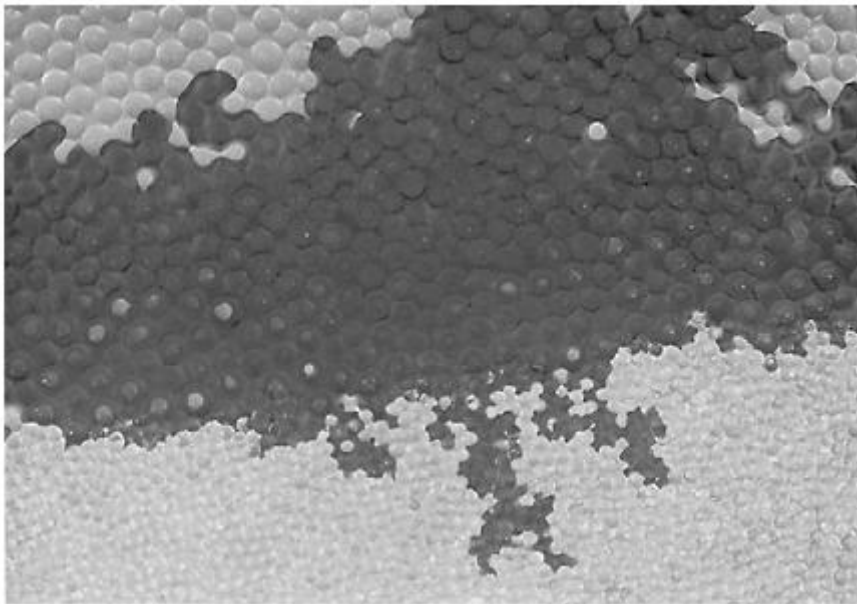


Figure 10.11 PCE DNAPL (dark) accumulating in a layer of coarse glass beads atop a layer of fine glass beads. The PCE is thick enough that it has begun invading the layer of finer beads. Source: Schuille (1988) with permission of CRC Press.

النفاذية النسبية وتدفق الأطوار المتعددة (Relative Permeability and Flow of Multiple Phases) إن معدلات تدفق الماء و طور السائل غير المائي (NAPL) عند وجود مراحل أو أطوار متعددة تحكّم بمعادلات دارسي لسوائل الكثافة المتغيرة المعدلة بعامل النفاذية النسبي الذي يتعلّق بالإشباع. سواء لسائل الماء أو (NAPL) ،

the specific discharge components of fluid i (discharge/area) are given by

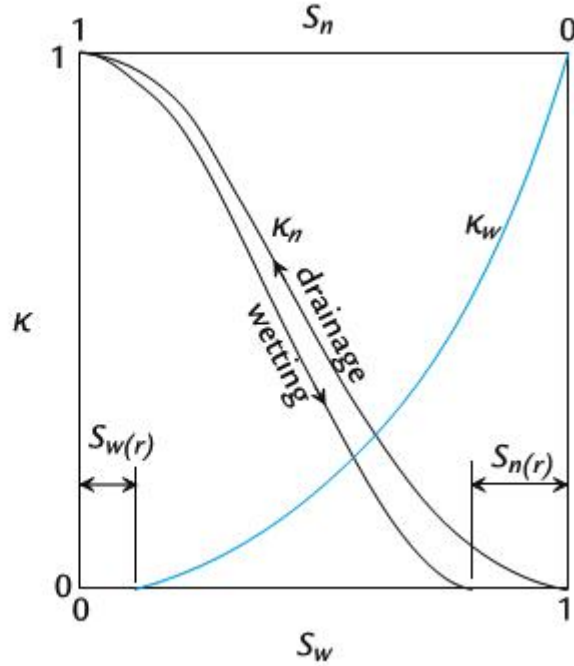
$$q_{xi} = -k_x k_i / \mu_i \partial P_i / \partial x$$

$$q_{yi} = -k_y k_i / \mu_i \partial P_i / \partial y$$

$q_{zi} = -k_z k_i / \mu_i (\partial P_i / \partial z + \rho_i g)$ where k_x , k_y , and k_z are the components of intrinsic permeability, μ_i is the fluid viscosity, P_i is the fluid pressure, ρ_i is the fluid density, and g is gravitational acceleration.

عامل النفاذية النسبي k_i هو واحد عندما يشبع الوسط بالكامل بالسائل ($S_i=1$)، وهو يتناقص إلى صفر في الإشباع المتبقي عند $(S_i = S_i(r))$ والشكل- يوضح العلاقة.

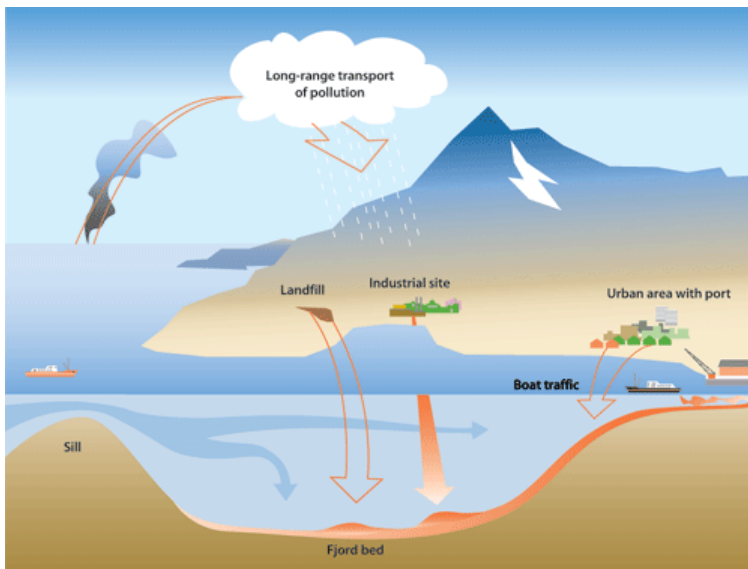
Figure 10.15 Relative permeability factors K vs. saturation S , for water and NAPL in a two-phase system. The NAPL curve is hysteretic. Both water and NAPL have residual saturation states where K reduces to zero because the phase is not mobile.



التلوث الإشعاعي للمياه :

يعتبر أخطر أنواع التلوث على الإطلاق لما يشكله من خطورة مباشرة على حياة الكائنات الحية في الطبيعة، ويحدد التلوث الإشعاعي بمصدرين (طبيعي وصناعي):
 المصادر الطبيعية (كوني، وارضى) فالأشعة الكونية مصدرها الفضاء الخارجي يضعف تأثيرها عند اصطدامها بالغلاف الجوي للأرض. والأشعة الأرضية مصدرها القشرة الخارجية للكرة الأرضية الحاوية على كميات ضئيلة من اليورانيوم والثوريوم والراديوم ونظائرها المشعة التي تختلف نسبتها تبعاً لنوع الصخور، ففي مكونات الصخور الغرانيتية يزداد تركيزها وتقل في مكونات الصخور الرسوبية. المصادر الصناعية: وتشمل:

1 - تساقط الغبار الذري : نتيجة التفجيرات النووية في الجو أو تحت سطح الأرض، ففوة التفجير ودرجة حرارته العالية تحت الأرض يؤدي لتلوث المياه الجوفية بالعناصر المشعة التي يقدر عمرها الزمني من عدة ثوانٍ إلى عدة آلاف من السنين.



2- المفاعلات الذرية: فعند إنتاج الوقود الذري في المفاعل يتسرب جزء من المواد المشعة إلى الوسط الخارجي عن طريق مياه التبريد للمفاعل الذري التي تلتقى فيما بعد في مجاري الأنهار والبحار، وهي محملة بكميات محدودة من المواد المشعة التي تسبب أمراض بالغة للإنسان.

يحتوي قلب المفاعل الذري على (50-100) طن متري من قضبان اليورانيوم بشكل أوكسيد اليورانيوم UO_2 ويصل عدد قضبان الوقود لنحو 40 ألف قضيب داخل المفاعل الذري ويحتاج كل قضيب وقود لتبريده نحو 730 م^3 ماء (إجمالي حجم مياه التبريد لمحطة المفاعل

يبلغ 3 ملايين م³) وعند انخفاض فعالية الوقود الذري (انتهاء عمره الافتراضي المقدر بنحو 30-40 سنة) يتوجب التخلص من نفايات مياه التبريد الحاوية على ملوثات إشعاعية بإلقائها في مجاري الأنهار أو البحار مما تتسبب في أمراض سرطانية خطيرة على الكائنات الحية".

3- استخدام النظائر المشعة:

في أغلب الأبحاث العلمية ومحطات الطاقة الكهربائية والمستشفيات تستخدم بعض النظائر المشعة التي يتسرب جزء منها عبر مياه الصرف إلى المجاري العامة ومن ثم إلى المسطحات المائية فالمياه الجوفية أخيرا.

4- النفايات النووية : يتم دفنها في باطن الأرض أو أعماق البحار مما يؤدي لتسرب بعض الإشعاعات للمياه الجوفية ومياه البحار وتسبب أضرار على الكائنات الحية خاصة عند حدوث هزات أرضية أو تفجيرات نووية في باطن الأرض قد تؤدي لتسرب المواد المشعة للمياه. بالإضافة إلى ذلك أصبح استخدامها كأسلحة فتاكة (قذائف اليورانيوم المنضب) لتدمير الدروع والتي استخدمتها الولايات المتحدة

الأمريكية في حربها مع العراق في حرب الخليج الثانية التي تسببت بإصابة آلاف من السكان المدنيين والجنود ومازلت آثارها السلبية ماثلة في الولادات المشوهة في منطقة جنوبي العراق، وتأثيراتها على المياه الجوفية ستمتد لمئات السنين.

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، ويمكن أن تتعرض الخزانات الجوفية للتلوث بالإشعاعات النووية وتتسبب بكارث بيئية.

