

## عمليات انتقال المواد الذائبة (Solute Transport Process)

إن هجرة سوائل الطور غير المائي (NAPLs) هو طريقٌ واحد يُمكن أن تتحرَّك به الملوثات تحت السطح. البقية هي انتقال محلول و تمثل حركة المواد الذائبة في المياه الجوفية المتدفقة. عدّة عمليات طبيعية وكيميائية مختلفة تؤثر في انتقال المحلول بطرقٍ مثيرة.

### 1- الحركة الأفقية والتشتت الميكانيكي (Advection and Mechanical Dispersion)

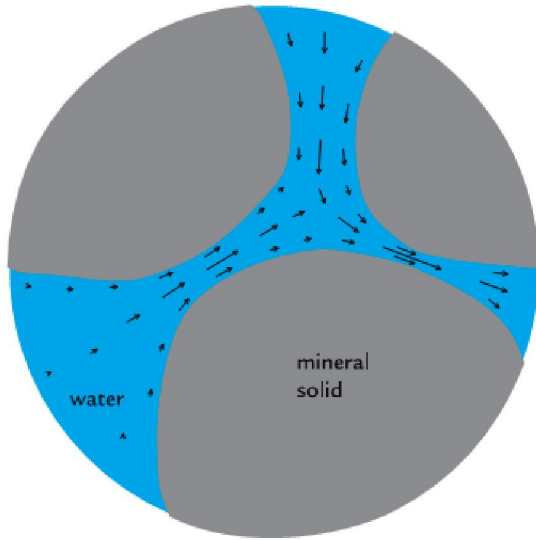
(Advection) حركة الكتلة ضمن التدفق. و (Solute advection) تمثل حركة المواد الذائبة ضمن حركة الماء. تدفق كتلة المحلول ضمن حركة الماء فقط (advection) تمثل بالمعادلة-1

$$F_{ax} = q_x c \quad \text{----- (1) Where,}$$

$F_{ax}$  is the advective flux of solute mass in the x direction (mass/time/area normal to the x direction).

$q_x$  is specific discharge in the x direction (volume/time/area), and  $c$  is solute concentration (mass/volume).

تدفع كتلة المحلول في إتجاه  $x$  (كتلة/ وقت / المساحة عمودية على إتجاه  $x$ ) ،  $q_x$  التصريف النوعي بإتجاه  $x$  (الحجم/ الوقت/ المساحة)،  $c$  تركيز المحلول (الكتلة/ الحجم). متوسط هجرة المحلول تساوي متوسط السرعة الخطية  $v$ ، معدل تدفق المحلول الظاهري يختلف عن متوسط السرعة الخطية  $v$  عند و بسبب تفاعل المحلول بالمادة الصلبة التي يتدفق خلالها.

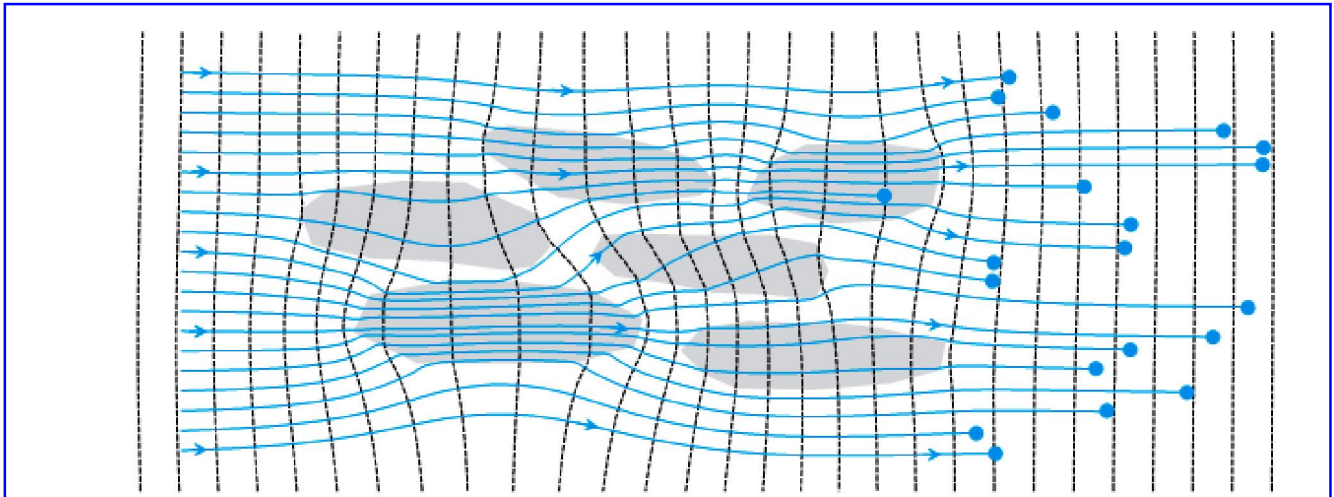


التدفق الأفقي لا ينقل الكتلة من موقع إلى آخر فقط بل يميل إلى نشر أو تفريق الكتلة مع عملية التدفق. هذا يحدث بسبب عدم تجانس توزيع سرعة الماء. التوزيع الفعلي لسرعة المياه الجوفية  $v$  يتفاوت بشكل ملحوظ في الزمان و المكان. تحدث اختلافات السرعة المكانية بمقاييس حجم المسامات إلى حجم ترسبات القناة في السهل الرسوبي.

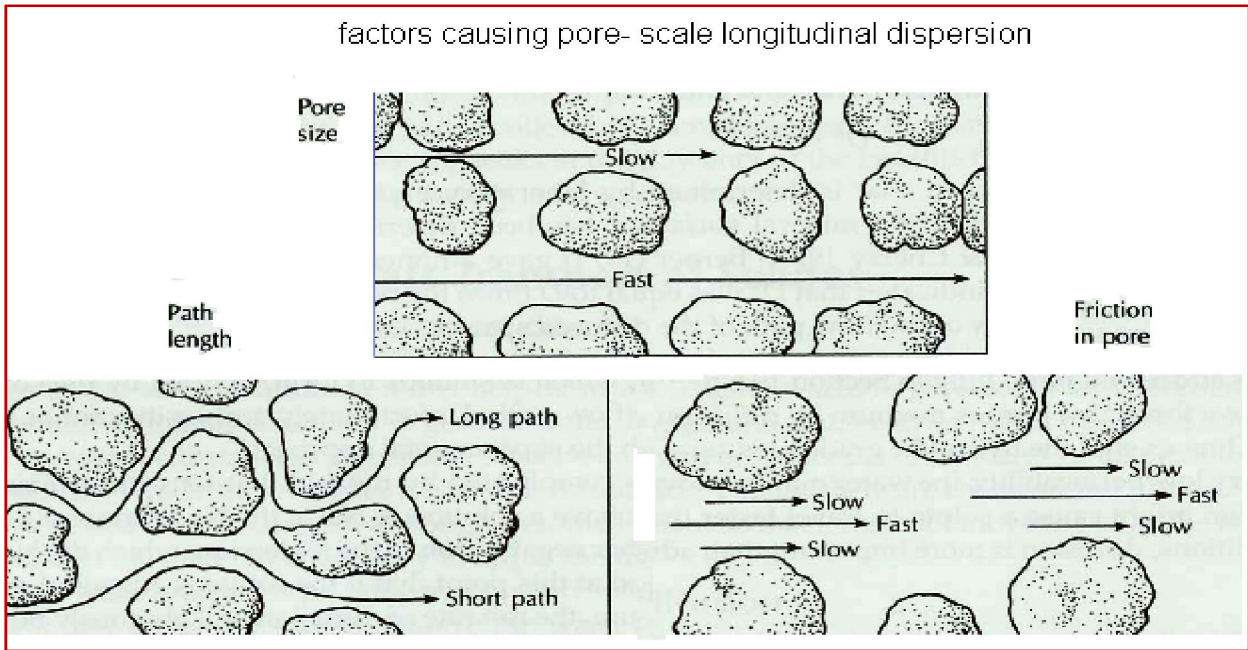
الشكل-1 يوضح توزيعات السرعة في بضعة مسام في وسط حبيبي. فالتدفق خطي (laminar flow)، مع اختلافات هامة في السرعة. الاختلافات في السرعة تسبب انتشار هالة المحلول في إتجاه التدفق، بينما تسرع بعض المحاليل خلال حناجر المسام و يتلکأ آخر في حدود الحبيبات وفي المسامات الأكبر. ففي تدفق المياه الجوفية الثابت والرقتي لوحده يسبب انتشاراً طويلاً ولا وجود لانتشار مستعرض. اما في حالة نقل المواد الذائبة ضمن المياه الجوفية الحقيقية فإنه توجد اختلافات في السرعة العابرة (transient velocity) والانتشار الجزيئي (molecular diffusion) و كلا منهما يساهم في الانتشار المستعرض.

شكل 1- اختلاف السرعة في مقياس المسام.

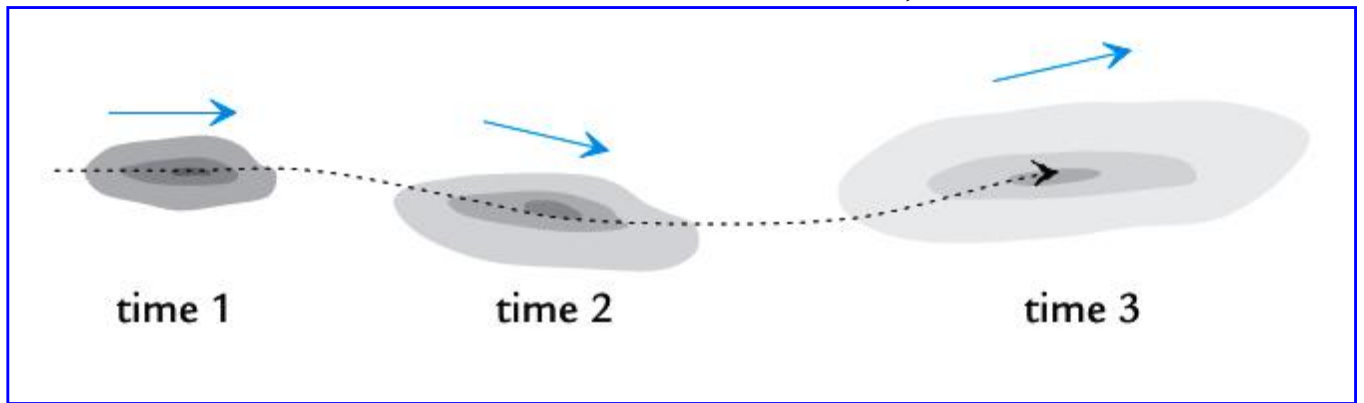
في مقياس مكاني أكبر، كل الاوساط الجيولوجية متباينة و تُعني بأن متوسط السرعة الخطية الحلقية متعرجة. الشكل-2 يعرض التدفق لنموذج تحليلي ثنائي الأبعاد خلال حقل يحتوي على ستة عدسات غير متجانسة. في العدسات منخفضة النفاذية، الميول الهيدروليكية عالية والسرع منخفضة. و في العدسات عالية النفاذية، الميول الهيدروليكية منخفضة والسرع عالية.



الشكل-2 يبين التدفق ثنائي الأبعاد يحتوي على ستة عدسات غير متجانسة.



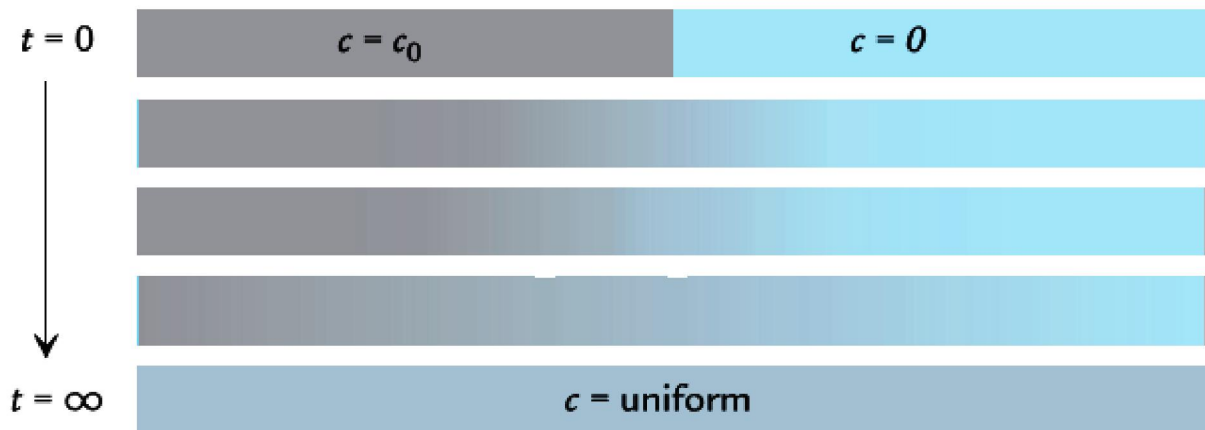
و الشكل-3 يوضح مقطع تخطيطي ثنائي الأبعاد لهجرة وانتشار هالة محلول مع الوقت و الأسهم الزرقاء توضح إتجاه  $v$  في كل وقت، و الخط المقطع يمثل طريق الهجرة المار بمركز الهالة.



الشكل-3 يوضح هجرة وانتشار هالة المحلول مع الوقت

## 2- الانتشار الجزيئي (Molecular Diffusion)

الانتشار الجزيئي هو الخلط الذي يحدث بسبب الحركة العشوائية للجزيئات في السائل. تصادم وتدافع الجزيئات في السائل بمرور الوقت، تسبب نشر المواد الذائبة (Solutes) وتوزعه بانتظام في الفضاء. يحرك الانتشار كتل المواد الذائبة من المناطق بالتركيز العالي نحو المناطق بالتركيز المنخفض. يميل الانتشار (Diffusion) إلى تعديل الاختلافات الحادة في توزيعات التركيز مع الوقت، كما في الشكل-4.



الشكل-4: الانتشار الجزيئي

قانون Fick الأول، يَحْكُمُ تدفقَ انتشارِ الموادِ الذائبة (Solutes) في الوسطِ المسامي المُشْبَع

$$F_{dx} = -nT^*_x D \partial c / \partial x$$

حيث أنَّ  $F_{dx}$  يمثل تدفقَ انتشارِ الموادِ الذائبة (Solutes) بِإِتْجَاهِ  $x$  (كتلة/الزمن/ المساحة) ،  $n$  مساميةُ الوسط ،  $T^*_x$  tortuosity الطور السائل بِإِتْجَاهِ  $x$  ،  $D$  ثابت يسمَّى معاملُ الانتشارِ الجزيئي، و  $c$  تركيزُ الموادِ الذائبة. التعابير المماثلة تُنطبقُ في  $y$  و  $z$  إِتْجَاهَات.

Where  $F_{dx}$  is the diffusive mass flux of solute in the  $x$  direction (mass per time per area normal to the  $x$  direction),

$n$  is the porosity of the medium,

$T^*_x$  is the tortuosity of the liquid phase in the  $x$  direction,

$D$  is a constant called the molecular diffusion coefficient,

and  $c$  is solute concentration. Similar expressions would apply in the  $y$  and  $z$  directions.

جريانُ الموادِ الذائبة في أي إِتْجَاهِ يتناسب مع ميل التركيز في ذلك الإِتْجَاهِ. الإشارةُ السالبة في هذه المعادلة تشير الى حركة الكتلة بِإِتْجَاهِ نَقْصِ التركيز، الإِتْجَاهِ معاكس لميل التركيز. نسبة الإِنْتِشَارِ للماءِ في الأوساطِ المسامية، أبطأ من الإِنْتِشَارِ خلال الوسطِ المائي فقط، لأن طَورَ الماءِ يَحْتَلُ فقط جزء من الفضاءِ في شبكةِ الممراتِ الملتوية.

التعرج و الالتواء (Tortuosity) بدون وحدات، وقيمتها دائماً أقل من واحد، ومقياس الالتواء هو طريق التدفق المثالي خلال الوسط. و يمثل طول الخط المستقيم لممر التدفق مفسوّم على طول التدفق الملتوي الفعلي. و تتراوح قيمة  $T^*$  بين 0.7 (رمال) و 0.1 (طين)، و تنخفض الى 0.01 في طين bentonite و هي بمدى  $0.56 < T^* < 0.8$  في الأوساط الحبيبية. تتفاوت قيم Tortuosity مع الإِتْجَاهِ لأن نسيج الوسطِ المسامي يتغير مع الإِتْجَاهِ. خصوصاً في الرسوبيات المسامية وفي الصخور ذات الكسور.

معاملُ الإِنْتِشَارِ الجزيئي ( $D$ ) [ $L^2/T$ ] يعتمد على درجة الحرارة وعلى صفات السائل والمحلول. درجات الحرارة الأعلى تعني حركة جزيئية أسرع و  $D$  أكبر. الجزيئات الأصغر تنتشر أسرع ولها  $D$  أعلى من الجزيئات الأكبر. و معاملات الإِنْتِشَارِ الجزيئية أوطأ في السوائل الأكثر لزوجة. و الجدول يوضح معامل انتشار (diffusion coefficient) بعض محاليل الملوثات.

Table 10.5 Molecular Diffusion Coefficients in Water		
Solute	$D$ ( $cm^2/sec$ )	Source
<b>Ions:</b>		
$H^+$	$9.3 \times 10^{-5}$	1
$OH^-$	$5.3 \times 10^{-5}$	1
$Na^+, K^+, F^-, Cl^-, HCO_3^-, SO_4^{2-}$	1.1 to $2.1 \times 10^{-5}$	1
$Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Ra^{2+}, Fe^{3+}, Cr^{3+}, CO_3^{2-}$	$5.9$ to $9.6 \times 10^{-6}$	1
<b>VOCs:</b>		
DCM	$1.1 \times 10^{-6}$	2
1,1,1-TCA, PCE, TCE	$7.5$ to $8.3 \times 10^{-6}$	2
(1) Li and Gregory (1974).		
(2) Cohen and Mercer (1993).		

Example:

Consider a clay layer that will serve as a landfill liner. It is 1 m thick, and its conductivity is estimated at  $K=10^{-10}cm/sec$ . Assume that the hydraulic gradient through the layer is 0.1, that the concentration of a solvent goes from  $c=80$  mg/L at the top of the layer to  $c=0$ mg/L at the bottom of the layer, and that  $n=0.4$ ,  $T^*=0.1$ , and  $D=8 \times 10^{-6} cm^2/sec$ .

Estimate the magnitude of both the diffusive and the advective flux through the clay ?

The diffusive flux is given by Eq. as follows:

$$F_{dx} = -nT^*_x D \partial c / \partial x$$

$$= - (0.4)(0.1)(8 \times 10^{-6} cm^2/sec) \{ [80 mg/1000 cm^3] / 100 cm \}$$

$$= - 2.6 \times 10^{-10} mg/(cm^2 \cdot sec)$$

Assuming an average concentration of 40 mg/L, the advective flux based on followed Eq. is

$$F_{ax} = q_x c = -K (\partial h / \partial x) c = -(10^{-10} cm/sec)(0.1)(40 mg/L)$$

$$= - 4 \times 10^{-10} mg/(cm^2 \cdot sec)$$

### 3- الامتزاز (Sorption)

عمليات امتزاز المواد الذائبة (Solutes) لها تأثيرات مثيرة على أنماط هجرتها. في حالة عدم إمتزاز المواد الذائبة (Solutes) من على سطوح مواد الطبقة الجوفية الصلبة أثناء الجريان، فإن معدل نقل المواد الذائبة (Solutes) يُمكن أن يخمن مباشرة من السرعة الخطية و عندما تمتز المواد الذائبة (Solutes) بشكل ملحوظ فإن هجرته تكون أبطأ من السرعة. إن هجرة جبهة المواد الذائبة (Solutes) أبطأ من معدل السرعة الخطية  $\bar{v}$  إذ يمكن افتراض موازنة الامتزاز، وإذا كان الامتزاز خطي، فإن معدل هجرة جبهة المواد الذائبة vs ترتبط بشكل خطي مع السرعة  $\bar{v}$ :

$vs = \bar{v}/R$  (linear equation and equilibrium sorption)

where R is a constant called the retardation factor. (ثابت عامل التأخير أو الاحتجاز)

R is related to the sorption distribution coefficient  $K_d$  as  $R=1+\rho_b K_d n$  (linear, equilibrium sorption)

Where,

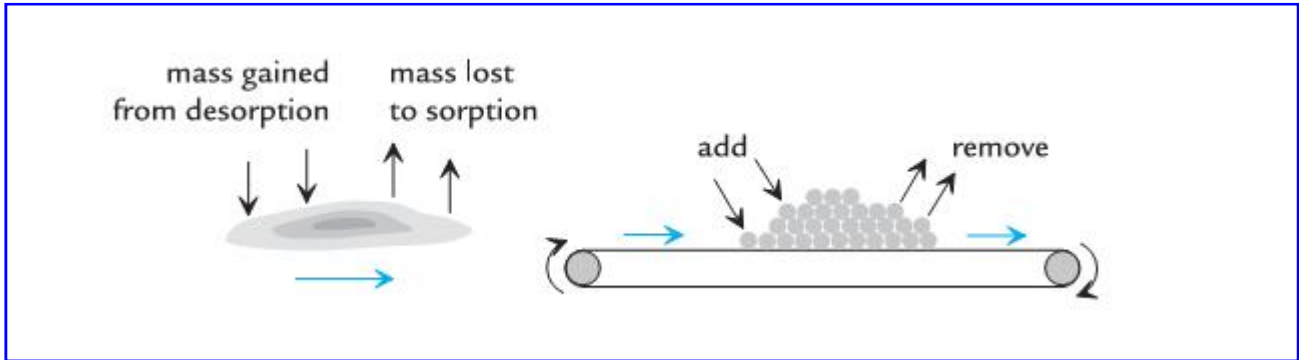
$\rho_b$  is the dry bulk density of the aquifer media.

n is porosity.

$K_d$  is sorption distribution coefficient.

موازنة الامتزاز في أغلب الأحيان ليست فرضية جيدة. في العديد من المواد الجيولوجية الانتشار الجزيئي يحدد جريان جزيئات المواد الذائبة إلى بعض مواقع الامتزاز. تفاعلات الامتزاز سريعة نسبياً، لكن في بعض المواد جزء هام من مواقع الامتزاز المحتملة ليست على اتصال مباشر بماء المسام المتحرك. الماء في بعض المسامات المغلقة (المنتهية) ضمن النسيج المعدني هو ماء راكد، والانتشار الجزيئي هو الطريق الوحيد لتحريك المواد الذائبة خلاله إلى مواقع الامتزاز المحتملة.

الشكل-5 ادناه يوضح هجرة نبضة المواد الذائبة الممتزة (يسار) كمخطط كنتوري و هي مثل هجرة كومة البرتقال على حزام ناقل (اليمين). في هذا التشبيه، البرتقال يُمثل كتلة المواد الذائبة والناقل يُمثل الحركة advection. البرتقال يزال من حافة تحميل الكومة (sorption) و يضاف في نهاية الكومة (desorption) و كأنه تحرر من الامتزاز). الكومة نفسها (نبضة المواد الذائبة) سُهَّاجر بمعدل أبطأ من سرعة الحزام الناقل (advection).



الانتشار الجزيئي عملية بطيئة، تركيز المواد الذائبة في هذه الجيوب الراكدة الصغيرة تختلف عن تركيز المواد الذائبة في الماء المتحرك القريب. بنفس النمط، تركيز الممتز على سطوح الجيوب الراكدة تختلف عن تركيز الممتز على السطوح المتصلة بتدفق الماء.

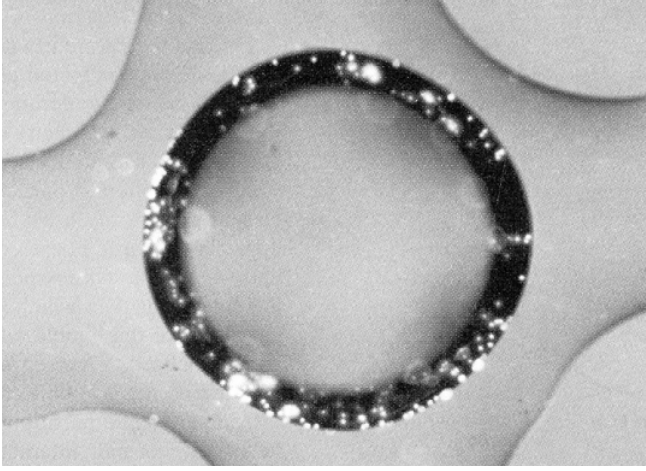
### 4- نقل المواد الغروية (Colloid Transport)

المواد الغروية تعرف كجزيئات عالقة في الماء بأقطار أصغر من  $10\mu\text{m}$  بين  $10^{-6}$  و  $10^{-3}\mu\text{m}$  في القطر. في هذا الحجم الصغير، القوى الجذبية صغيرة بالمقارنة إلى القوى الأخرى، لذا الجزيئات كماد غروية تبقى معلقة لأوقات طويلة جداً.

المواد الغروية يُمكن أن تتكون من الأجزاء المعدنية الصغيرة، بكتيريا، فيروسات، قطرات NAPLS، وجزيئات عضوية أكبر. بعض المواد الغروية تتولد بالتفاعلات الكيميائية التي تُرسب المعادن. المواد الغروية يُمكن أن تنتقل من الماء السطحي إلى الجوفي بالتسرب الطبيعي أو غير الطبيعي. المواد الغروية تتجرف في أغلب الأحيان مع المياه الجوفية و تندفق خلال فراغات المسام. وهذه آلية محتملة أخرى لهجرة الملوثات.

المادة الغروية بنفسها يُمكن أن تكون ملوثات، كما في قطرات NAPLS أو بعض البكتيريا. أحياناً المادة الغروية بنفسها ليست ملوثة، لكن الملوث قد يلتصق في سطوح المادة الغروية. المواد الغروية لها مساحة سطحية كبيرة لتحتشد الملوثات عليها. المواد الغروية الثابتة توجد في السطوح المعدنية، و في السطوح البينية للماء و الهواء و/ أو السوائل غير المائية و في المنطقة غير المشبعة.

الشكل-6 يوضح جزيئات المطاط الصمغية ملتصقة بين السطح المائي والهواء و هذا نوع من الامتصاص يُمكن أن يُعيق هجرة المادة الغروية بشكل ملحوظ في مياه مسام المنطقة غير المشبعة.



الذي يَحْمَلُ المواد الغروية إلى هذه السطوح مجموعة القوى الكهربائية المستقرة والكيميائية. تَمِيلُ المواد الغروية إلى رِبْط نفسها بالسطوح التي لها شحنة كهربائية معاكسة لشحنة سطح المادة الغروية. على سبيل المثال، مواد غروية تَحْمَلُ شحنة موجبة تَمِيلُ إلى الرِبْط بالسيليكات سالبة الشحنة و أكاسيد المعادن.

المواد الغروية يمكن أن ترشح (او تحصر) في المسامات الصغيرة جداً لإسكان و اصطياد المواد الغروية. مثل هذا الترشيح يعد القاعدة للعديد من عمليات معالجة مياه الفضلات. إذا المادة الغروية كبيرة بما فيها الكفاية فإنها تُسْتَنْتَى مِنْ طَرُق التدفق الملتوية الصغيرة، و اذا كانت صغيرة بما فيه الكفاية للهجرة فإنها تعبر من أصغر الممرات الملتوية، المادة الغروية يُمكن أن تُهاجرَ بمعدل أكبر مِنْ السرعة الخطية v للماء.

المواد الذائبة أثناء هجرتها في المياه الجوفية تَمِيلُ لِلخَلْط و التشتت كنتيجة لعمليتين أساسيتين:

### موديل التشتت والانتشار (Modeling Dispersion and Diffusion)

المواد الذائبة أثناء هجرتها في المياه الجوفية تَمِيلُ لِلخَلْط و التشتت كنتيجة لعمليتين أساسيتين:

1. التشتت الميكانيكي بسبب إختلاف السرعة.

2. الإنتشار الجزيئي .

الإنتشار الجزيئي مَحْكُومٌ بقانون Fick الأول في الاوساط المسامية و ليس هناك موديل او نموذج ثابت لجريان الكتلة في حالة التشتت الميكانيكي. يَعمَدُ على طبيعته إختلافات السرعة المكانية والعابرة، و الذي يَعمَدُ على طبيعة عدم تجانس الوسط و ظاهرة التدفق العابرة. يَعمَدُ التشتت الميكانيكي على العمليات المعقدة و التي توضح بقانون جريان الكتلة.

لذا التشتت الميكانيكي ايضا مَحْكُومٌ بقانون Fick الأول. إن تأثيرات التشتت الميكانيكي زائداً الانتشار الجزيئي تدمج سوية و تدعى بالتشتت الاكبر.

جريان التشتت الاكبر macrodispersive  $F_{mx}$  الأحادي البعد مَحْكُومٌ بمعادلة قانون Fick الأول،

$$F_{mx} = -nD_{mx} \frac{\partial c}{\partial x}$$

حيث أن n مسامية، c تركيز، و  $D_{mx}$  معامل التشتت الكبير في الاتجاه x . معامل التشتت الكبير يَشْمَلُ شرطين، الأول للتشتت الميكانيكي والثانية للإنتشار الجزيئي:

$$D_{mx} = \alpha_x |v| + T_x^* D$$

Where  $\alpha_x$  is called the dispersivity in the x direction,

|v| is the magnitude of the average linear velocity of flow,

$T_x^*$  is the tortuosity in the x direction,

D is the molecular diffusion constant.

إجمالاً في المواد قليلة النفاذية مثل الطين، التشتت الميكانيكي يسبب تشتت أكثر بكثير من ما يَعمَلُ الإنتشار الجزيئي، لذا يهمل الانتشار الجزيئي و تصبح المعادلة.

$$D_{mx} = \alpha_x |v| \text{ (advection-dominated dispersion)}$$

التشتت الميكانيكي في إتجاه التدفق أكبر من المستعرض للتدفق، لذا في موديلات الانتقال الثنائية وثلاثية الأبعاد معاملات التشتت تُميز عادة في الإتجاهات المتعامدة، اتجاه واحد موازي للتدفق، والبقية مستعرضة على التدفق.  $D_{my}, D_{mx}, D_{mz}$ .

$D = 5-10 \text{ m}^2/\text{day}$ . (D = diffusion constant)

$\alpha_L = 0.1 \text{ m/day}$  (dispersion constant, longitudinal).

$\alpha_T = 0.001 \text{ m/day}$  (dispersion constant, transverse).

• Longitudinal dispersion ( $D_L$ ) =  $(\alpha_L)(V_x) + D$

• Transverse dispersion ( $D_T$ ) =  $(\alpha_T)(V_z) + D$

## اقتحام مياه البحر (Sea water Intrusion).

الخرزانات المائية الجوفية الساحلية في حالة تماس مع البحار والمحيطات عند الخط الساحلي ، وفي الظروف الطبيعية يحدث تصريف من المياه الجوفية العذبة إلى مياه المحيطات والبحار ، وعند ضخ المياه الجوفية من الطبقات المائية الساحلية التي ترتبط هيدروليكيًا مع مياه البحر فإن منسوب المياه في الخزانات غير المحصورة ينخفض ، ومع زيادة الضخ يمكن أن يحدث انعكاس للميل الطبيعي بحيث يصبح الجريان من مياه البحر المالحة باتجاه البئر . وتسمى هجرة المياه المالحة إلى الطبقات المائية العذبة تحت هذه الظروف باقتحام البحر .



ومن اجل فهم طبيعة هذه العملية فمن الضروري معرفة طبيعة السطح البيئي بين المياه العذبة والمالحة في الطبقات المائية الساحلية تحت الظروف الطبيعية. ونتيجة الدراسات التي أجريت على امتداد الساحل الأوربي وجد أن المياه المالحة الموجودة تحت الأرض لا تكون على نفس مستوى سطح البحر بل على عمق معين يصل إلى 40 ضعف من ارتفاع المياه العذبة فوق مستوى سطح البحر ( شكل - ) ولقد عزي هذا التوزيع إلى التوازن الهيدروستاتيكي الموجود بين سائلين لهما كثافتان مختلفتان . وافترض فيها الظروف الهيدروستاتيكية البسيطة للطبقات المائية الساحلية غير

المحصورة والمتجانسة . وقد تبين أن السطح البيئي الذي يفصل بين المياه المالحة ذات الكثافة  $\rho_s$  والمياه العذبة ذات الكثافة  $\rho_f$  يجب ان يصنع زوايا اقل من تسعين مع مستوى ماء البحر ( شكل - a). تحت الظروف الهيدروستاتيكية فان وزن وحدة لعمود المياه العذبة الذي يمتد من المستوى المائي إلى السطح البيئي تكون في حالة توازن مع وزن وحدة لعمود المياه المالحة الذي يمتد من مستوى مياه البحر إلى نفس العمق إلى السطح البيئي. واعتمادا على ذلك نجد أن:

$$\rho_s g z_s = \rho_f g (z_s + h)$$

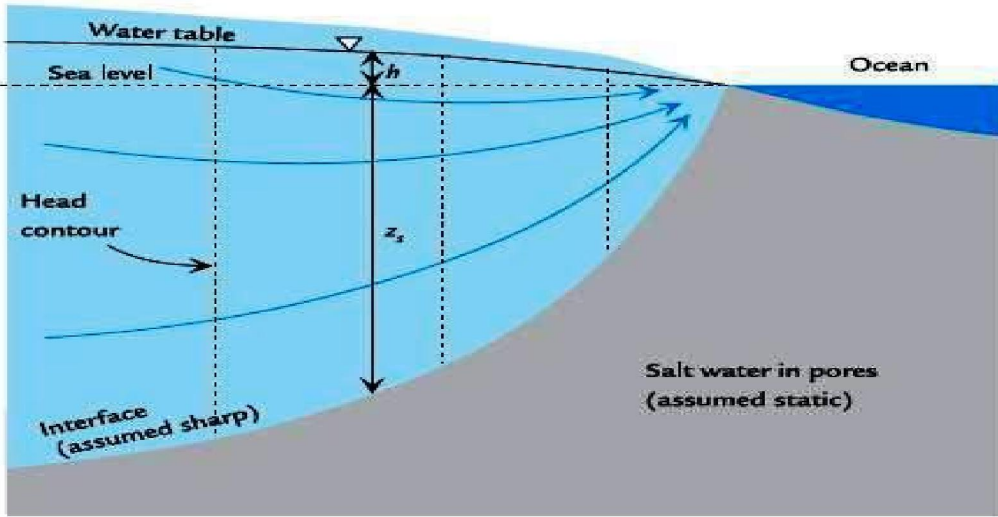
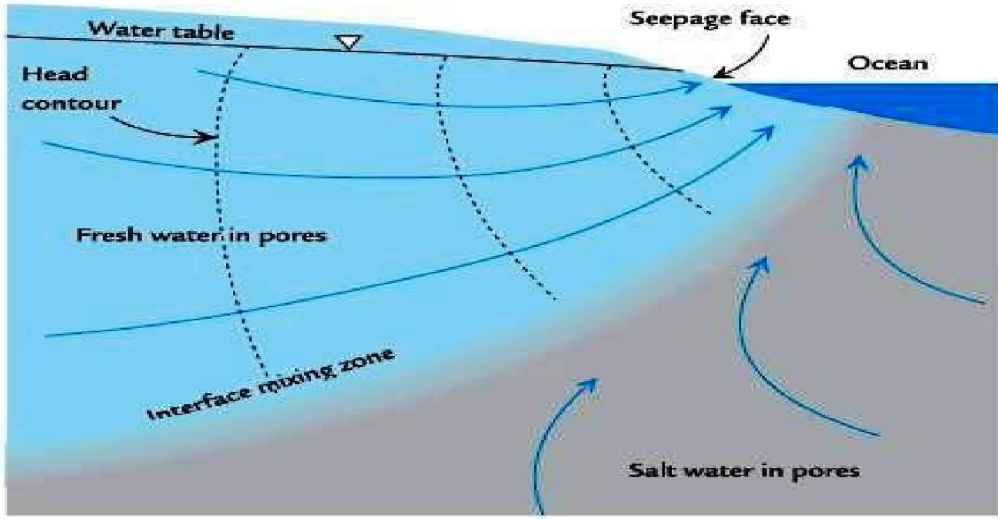
$$z_s = \rho_f / (\rho_s - \rho_f) \cdot h$$

$$\rho_f = 1.0 , \quad \rho_s = 1.025$$

وإذا كانت:

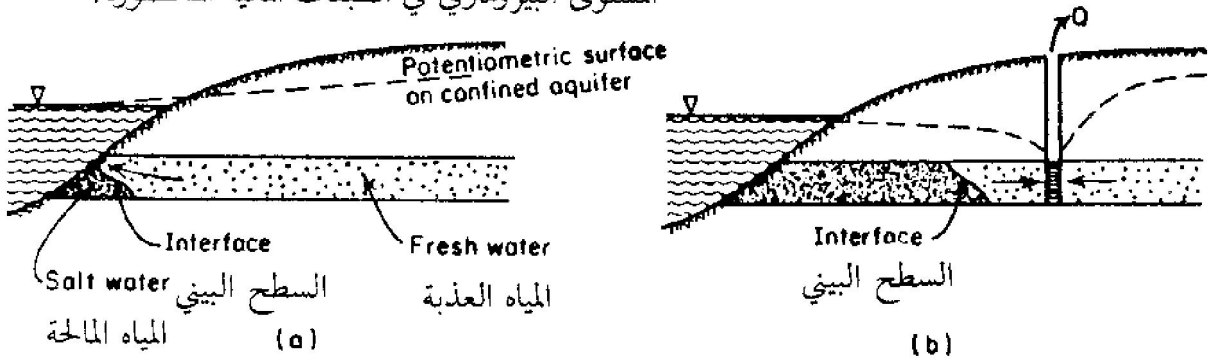
$$z_s = 40 h$$

وتدعى هذه المعادلة بعلاقة غيبين-هيرزبيرغ وإذا ما حددنا التغير في مستوى المياه الجوفية  $\Delta z_w$  فان العلاقة تصبح  $\Delta z_s = 40 \Delta h$  وهذا يعني انه إذا انخفض مستوى المياه الجوفية في الطبقات المائية الساحلية غير المحصورة (1 متر) فان المستوى البيئي للمياه المالحة سيرتفع 40 مترا. لقد أظهرت الدراسات أن علاقة غيبين - هيرزبيرغ لا تكون حقيقية لجميع الحالات وتبدو صحيحة للطبقات المائية القريبة من شواطئ البحار. لذا فقد حاول كثير من العلماء تحليل ظاهرة اقتحام مياه البحر، ويبدو إثبات Hubbert, 1940 هو الأنسب ، حيث عرض هذه الظاهرة تحت ظروف حالة الجريان الثابت اعتمادا على رسم شبكات الجريان ( شكل ) ويبدو أن كلا التحليلين السابقين اعتمد على فريضة إن السطح البيئي الذي يفصل بين المياه العذبة والمالحة في الطبقات المائية الساحلية ما هو إلا حد هيدروجيولوجي. وفي الحقيقة إن المياه العذبة والمياه المالحة تمتزج مع بعضها في نطاق انتشار حول السطح البيئي. ويعتمد هذا النطاق على طبيعة الطبقة المائية وخواصها .



شكل ( ) السطح البيني في الطبقات المائية الساحلية غير المحصورة . a: تحت الظروف الهيدروستاتيكية . b: تحت ظروف الجريان باتجاه البحر .

كذلك فإن اقتحام مياه البحر يمكن أن يحدث في كل من الطبقات المائية المحصورة وغير المحصورة والشكل ( ) يبين السطح البيني بين المياه المالحة والمياه العذبة في الطبقات المائية الساحلية المحصورة تحت ظروف الجريان الثابت باتجاه البحر . المستوى البيزومتري في الطبقات المائية المحصورة .



شكل ( ) a- السطح البيني في المياه المالحة- العذبة في الطبقات المائية المحصورة في حالة الجريان الثابت باتجاه البحر . b - اقتحام مياه البحر نتيجة الضخ .