

## نمذجة رقمية ثنائية البعد للانتشار السطحي للانسكابات النفطية من السفن على سطح البحر

الدكتور محمد شلوف\*

وهاد حاتم\*\*

(تاريخ الإيداع 6 / 8 / 2015. قُبِلَ للنشر في 10 / 11 / 2015)

### □ ملخص □

عندما يحدث الانسكاب النفطي، فإنه من الضروري جدا أن يتم الإسراع قدر الإمكان في الإجراءات اللازمة من أجل تقليل الأضرار الناجمة والتي يمكن أن تؤثر على الإنسان والطبيعة في نفس الوقت. بالتالي، ومن أجل أن يتم القيام بالعمليات الضرورية في الوقت المناسب الذي يلي الحادثة مباشرة، تم في هذا البحث تطوير نموذج رقمي ثنائي البعد من أجل دراسة أهم العمليات التي تحدث للبقعة النفطية حال انسكابها من السفن على سطح البحر، ألا وهي عملية الانتشار السطحي، كما تم الأخذ بالاعتبار كل من عمليتي التبخر والانحلال والتي تؤدي إلى فاقد لا بأس به من كمية المادة النفطية سواء في الجو أو في عمود الماء أسفل البقعة النفطية، بالإضافة إلى نمذجة هذه العمليات للانسكاب النفطي المنتشر على سطح البحر باستخدام الطريقة التجريبية. بعدئذ، تم إنشاء سيناريوهات للانسكاب النفطي، ومن ثم اختبار انتشار البقعة النفطية ذات الكثافة والموضع الابتدائي المعروفين، وباستخدام الـ MATLAB، وأخيرا تم إجراء محاكاة للتدفق ومناقشتها أيضا.

**الكلمات المفتاحية:** نمذجة رقمية ثنائية البعد، الانتشار السطحي للنفط، التبخر، الانحلال، الانسكابات النفطية.

\*أستاذ مساعد - قسم الهندسة البحرية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية  
\*\*طالب ماجستير - قسم الهندسة البحرية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

## 2-D Numerical Modeling Of Oil Spill Spreading From Ships Over The Sea Surface

Dr. Mohammad Shallouf\*  
Wehad Hatem\*\*

(Received 6 / 8 / 2015. Accepted 10 / 11 / 2015)

### □ ABSTRACT □

As oil spills, it is important to act as quickly as possible in order to minimize damages that can affect people and natural life. Thus, for the necessary operations to be done on time following an accident, numerical simulation of oil spill is an essential tool. The purpose of this paper is to develop a 2-D numerical model for the main operations that control and affect the trajectory and fate of an oil spill. Two additional operations had been considered, those are evaporation and dissolution which lead to lose some of the spilled oil even in air or water column. Afterwards, oil spill scenarios had been created and spreading of an oil spill, whose density and initial position are known, had been examined. Using MATLAB, flow simulations had been made and results had been discussed.

**Keywords:** 2-D numerical modeling, oil spreading, oil spill.

---

\*Associate Professor- Department of Marine Engineering, Faculty of Electronic and Mechanical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Postgraduate student, Department of Marine Engineering, Faculty of Electronic and Mechanical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## مقدمة:

لقد أدى النمو السريع في عدد سكان العالم، وكذلك التطورات المستمرة في المجالات الاقتصادية، إلى زيادات كبيرة في الحاجة إلى الطاقة على مستوى العالم، وكما هو معروف فإن المصدر الأساسي للطاقة في العالم هو النفط. بناء على ذلك، توجد حركة تجارة نفطية هائلة في العالم؛ حيث تحمل ناقلات النفط وكذلك الأنابيب النفطية المغمورة في مياه البحار والمحيطات كميات كبيرة من المواد النفطية سواء في البحار المفتوحة أو في المناطق الشاطئية. ترفع عمليات النقل هذه من مستوى الخطر الذي يشكله الانسكاب النفطي. حيث أنه وكنتيجة للحوادث المختلفة التي يمكن أن تحدث، فإن كميات كبيرة جدا من النفط المنسكب يمكن أن تنتشر على سطح الماء مهددة الحياة الطبيعية، ويحدث هذا بشكل خاص بعد حوادث ناقلات النفط، حيث يتم انسكاب آلاف الأطنان من النفط الخام. حيث أنه وفي السنوات الأخيرة ازداد الاهتمام بالتلوث المتزايد للمسطحات المائية والمناطق الشاطئية المجاورة والناجم عن الانسكابات النفطية. إن بعض العمليات، كمخلفات العمليات الصناعية، التتقيب عن النفط ونقله، وكذلك وسائل تخزينه، إلخ، زادت من خطر حوادث الانسكاب النفطي، حيث أن لهذه الحوادث أثارا سلبية وضارة جدا على المحيط البيئي وكذلك على صحة الإنسان.

عموما، فإن حركة ومصير البقعة النفطية يمكن أن تتأثر بمجموعة من العمليات الفيزيائية، الكيميائية والبيولوجية، حيث تتضمن هذه العمليات كلا من: الانتشار السطحي (spreading)، التدفق الأفقي (advection)، التبخر (evaporation)، الانحلال (dissolution)، الاستحلاب (emulsification)، الأكسدة الضوئية (photo-oxidation)، الترسيب (sedimentation) وكذلك التحلل الحيوي (biodegradation).

لقد قاد الاهتمام البيئي بالانسكابات النفطية إلى إيجاد نماذج رياضية تحاكي حركة البقعة النفطية ومصيرها، حيث تم تطوير نماذج الانسكاب النفطي كأدوات رقمية لدراسة سلوك الانسكابات النفطية وكذلك دراسة مساراتها التقريبية في المسطحات المائية. وهي نماذج ثنائية البعد وتحاكي مصير البقعة النفطية على سطح البحر وذلك عن طريق حل معادلات الانتشار السطحي والتبخر والانحلال، هذه العمليات تم تضمينها في نماذج انسكاب النفط ثنائية البعد. [1]

## أهمية البحث وأهدافه:

تتجلى أهمية البحث في أنه يتيح إمكانية تتبع مسار الانسكاب النفطي والذي يعتبر من الأساسيات المهمة في تحديد أثر المادة النفطية على المسطحات المائية، وكذلك على الأنظمة البيئية الحساسة الأخرى. علاوة على ذلك، فإنه يساعد في تحديد الاستجابات المناسبة ووضع خطط الطوارئ وخطط التدريب لمكافحة هذا النوع من التلوث، وكذلك التنبؤ بحركة البقعة النفطية، ولذلك فإن النمذجة الرياضية للانسكاب النفطي هو عملية أساسية وجوهرية في التنبؤ بمسار ومصير النفط المنسكب في ظروف مختلفة.

## طرائق البحث ومواده

تم الاعتماد على طريقة لاغرانج للجسيمات المنفصلة في تتبع مسار البقعة النفطية وذلك بعد الأخذ بالاعتبار المفاهيم في كمية المادة المنسكبة الناجمة عن كل من التبخر والانحلال.

1 - خوارزمية لاغرانج للجسيمات المنفصلة The Lagrangian Discrete Particle Algorithm

في الوقت الحاضر، هنالك طريقتان تطبيقيتان. يمكن في النماذج استخدام كل من هاتين الطريقتين وهما تآثرات لاغرانج (Lagrangian spilllets) وحزم لاغرانج المنفصلة (Lagrangian discrete parcels) يتم تطبيق نظرية تآثرات لاغرانج بافتراض أن الانسكاب المستمر يتألف من مجموعة من الانسكابات المنفصلة، والتي يتم تحريرها في فواصل زمنية محددة. عندئذ يتم تطبيق نظريات الانتشار لكل انسكاب منفصل على حدى. أما في طريقة لاغرانج للحزم المنفصلة، فيتم تمثيل البقعة النفطية بمجموعة كبيرة من الحزم الصغيرة. تمتلك كل حزمة مجموعة من الإحداثيات المكانية المستقلة عن الزمن وكذلك لكل منها كتلتها الخاصة. ويتم تطبيق نظريات الانتشار بعد اعتبار أن حجم هذه الحزم الكلي عبارة عن شبكات أجزاءها على شكل قطعة الحلوى والتي تتحرك ضمن البقعة النفطية [2]. عندئذ يمكن لكل حزمة أن تتحرك بسرعة انجراف  $\vec{v}_e$  وذلك خلال كل خطوة زمنية.

تم استخدام نظرية العناصر المنتهية لتقسيم النطاق الحسابي إلى 400 عنصر محددة بـ 231 عقدة وإدخال البيانات على برنامج MATLAB الذي تم استخدامه لتطبيق طريقة حزم لاغرانج المنفصلة على النطاق الحسابي لكل عنصر من عناصر الشبكة ولرسم الخطوط البيانية الخاصة بكل عملية من العمليات التي سيرد ذكرها لاحقاً.

تعطى سرعة الانجراف بالعلاقة التالية

$$\vec{v}_e = \vec{v} + \vec{v}' \quad (1)$$

حيث أن  $\vec{v}_e$  هي سرعة الانجراف للجزيء النفطي؛  $\vec{v}$  هي سرعة الانجراف الوسطية والتي تمثل انجراف السطح الناجم عن التأثير المشترك لكل من الرياح و التيار؛  $\vec{v}'$  هي تذبذب الاضطراب لسرعة الانجراف والذي يحاكي الانتشار السطحي للبقعة النفطية.

## 2 - آلية التجوية The Weathering Mechanism

تخضع المشتقات النفطية أو البترولية المنسكبة إلى الماء لسلسلة من التغيرات في خصائصها الفيزيائية والكيميائية والتي يصطلح على تسميتها بمجموعها بمصطلح (التجوية). تحدث عمليات التجوية بنسب مختلفة جداً ولكنها جميعاً تبدأ مباشرة حالما يتم تحرر المادة النفطية في المحيط البيئي.

لا تكون هذه النسب ثابتة وعادة ما تكون قيمها أعظمية مباشرة بعد عملية التدفق. كما أن هذه العمليات وكذلك النسب التي تحدث بها إنما تعتمد على نوع المادة البترولية أكثر من اعتمادها على الظروف البيئية المحيطة. كما أن معظم عمليات التجوية تكون مرتبطة وبشكل كبير بدرجات الحرارة العالية غير أن ذلك الارتباط غالباً ما يقل كلما اقتربت درجة الحرارة من الصفر.

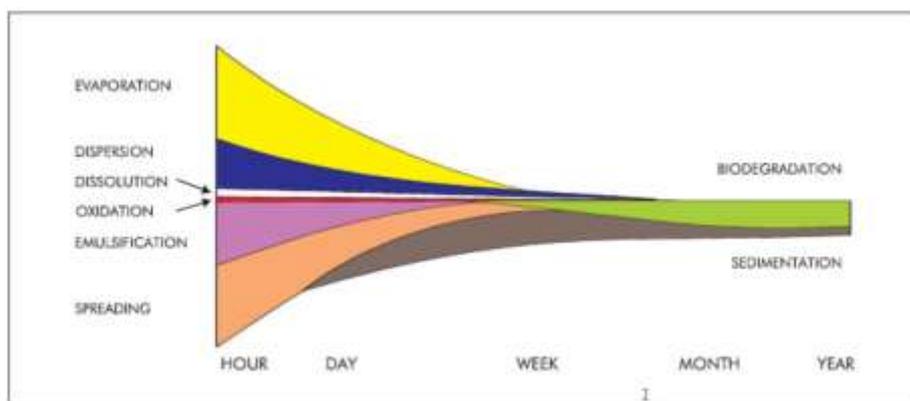
يمثل الجدول (1) موجزاً للعمليات التي تؤثر على مصير الهيدروكربونات النفطية وذلك من خلال سبع فئات إدخال رئيسية. حيث تم تصنيف كل فئة بإدخال باستخدام مقياس عال، متوسط وضعيف حيث يتم من خلاله تحديد الأهمية النسبية لكل عملية.

تم إعداد هذا الجدول فقط من أجل توضيح التغير، كما أنه يعتمد على عدد من الفرضيات، ومع ذلك فإنها تعطي فكرة عن الأهمية النسبية لهذه العمليات. ومما هو واضح أن واحدة من أكبر المشاكل التي تعوق تطوير جدول كهذا هي أن أي عملية جزئية ستعتمد على تفاصيل حادثة تحرر أو انسكاب المادة النفطية إلى الوسط المحيط. إن الجدول (1) هو عبارة عن محاولة لتفسير ذلك من أجل الحد من اتساع مساحة الانسكاب في حالة الانسكابات الطارئة وذلك بتضمين فئات فرعية لأنواع مختلفة من النفط.

يؤكد هذا الجدول على دور العمليات البيئية المتنوعة والمختلفة، والذي يمكن أن تلعبه في أنواع مختلفة وواسعة من حالات الانسكاب، وهو ما يؤكد بدوره على أن واحدا فقط من مجموعة معقدة من المتغيرات قد يتغير من انسكاب لانسكاب، جاعلا كل انسكاب حدثا فريدا من نوعه. وهكذا فإن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للنفط الخام أو المشتقات النفطية تؤثر بشكل كبير على سلوك هذه المكونات في المحيط البيئي بالإضافة إلى تأثير كل من فترة ودرجة العوامل البيئية على تحرر هذه المكونات [3].

تعرف التغيرات الفيزيائية والكيميائية التي تخضع لها المادة النفطية المنسكبة بمجموعها بـ (التجوية)، كما سبق وذكرنا سابقا. وعلى الرغم من أن العمليات المستقلة التي تسبب هذه التغيرات يمكن أن تحدث بشكل متزامن، إلا أن أهميتها النسبية تتغير مع مرور الزمن. كما أنها تؤثر مع بعضها البعض على سلوك البقعة النفطية كما وتحدد مصيرها النهائي.

يوضح الشكل (1) هذه العمليات من أجل انسكاب لمادة نموذجية للنفط الخام المتوسط في ظروف بحر هادئ [3]. حيث يعبر عرض كل نطاق عن أهمية العملية التي يمثلها في انتشار البقعة النفطية ومصيرها.



(الشكل 1) تمثيل تخطيطي لمصير انسكاب نفطي يعرض التغيرات في الأهمية النسبية لعمليات التجوية مع الزمن. إن عرض كل زمرة أو نطاق تحدد أهمية هذه العملية [3]

كما أن العمليات التالية: الانتشار، التبخر، التشتت، الاستحلاب والانحلال تعتبر أكثر العمليات أهمية خلال المراحل الأولية من الانسكاب، في حين أن عمليات الأكسدة الضوئية، الترسيب والتحلل الحيوي هي عبارة عن عمليات ذات مدى أطول وتحدد المصير النهائي للنفط المنسكب.

إن فهم الطريقة التي تتفاعل فيها عمليات التجوية يأخذ أهمية كبيرة عند محاولة التنبؤ بخصائص وميزات التغيرات التي تطرأ على النفط المنسكب خلال فترة بقاء البقعة النفطية في البحر [3]. ومن المهم إدراك أن حركة البقعة النفطية على سطح البحر تحدث بسبب التيارات السطحية والرياح كما أنها يمكن أن تتأثر بمجموعة من عمليات التجوية المترابطة. كما أن الآليات الفعلية التي تحكم حركة النفط المنسكب تكون معقدة جدا، غير أن الخبرات توضح أنه يمكن التنبؤ بالانجراف الذي يحدث للبقعة النفطية من خلال حساب الشعاع الموجه البسيط لاتجاه كل من الرياح والتيارات السطحية.

في المياه الضحلة بالقرب من الشواطئ أو على طول حواف الجزر، قد تكون التيارات السطحية معقدة وغالبا ما يكون فهمها وتوضيحها أمرا ليس باليسير. وبالتالي فإن الانتهاء أو الخلوص إلى تنبؤ دقيق بحركة البقعة النفطية يكون أمرا صعبا إلى حد ما [3].

## 2 † التبخر

يمكن أن تتغير خصائص المادة النفطية بشكل كبير مع استمرار عملية التبخر. حيث أنه إذا ما تبخر 40% (من الوزن) من الوقود، فإن لزوجته ستزيد بمقدار ألف مرة. كما أن الكثافة يمكن أن ترتفع بمقدار 10%، كما قد تصل نقطة الوميض إلى 400% من القيمة الأصلية قبل التبخر.

إن مقدار امتداد عملية التبخر يمكن أن تكون العامل الأكثر أهمية في تحديد خصائص النفط في وقت محدد بعد عملية الانسكاب، وكذلك في تغيير سلوك المادة النفطية [4].

كلما ازداد تبخر المركبات الطيارة في المادة النفطية، كلما اعتمدت عملية التبخر على درجة الحرارة المحيطة وكذلك على سرعة الرياح. وعموماً فإن هذه المكونات ذات درجة الغليان دون  $200\text{ C}^\circ$  سوف تتبخر خلال فترة من الزمن تقارب 24 ساعة وذلك في الشروط المعتدلة. وكلما ازدادت كمية المواد ذوات درجات الغليان المنخفضة، كلما ازدادت درجة التبخر.

يؤثر معدل الانتشار الابتدائي للنفط المنسكب على عملية التبخر، حيث أنه كلما ازدادت مساحة السطح الذي تغطيه المادة النفطية، كلما كان تبخر المركبات الخفيفة أسرع. أما في البحار الهائجة، فإن الرياح ذات السرعة العالية وكذلك درجات الحرارة الدافئة ستزيد أيضاً من معدل التبخر.

إن أي مخلفات نفطية تبقى بعد عملية التبخر سيكون لها مقادير عالية من الكثافة واللزوجة، الأمر الذي يؤثر على عمليات التجوية اللاحقة وكذلك على فعالية عمليات التنظيف [5].

إن حجم أجزاء النفط المتبخر يعطى من خلال المعادلة التالية [6]

$$F_V = \left[ \ln P_0 + \ln \left( CK_E t + \frac{1}{P_0} \right) \right] / C \quad (2)$$

حيث أن:

$$K_E = K_M AV_M / (RT_0 V_0) \quad (a-2)$$

$$K_M = 0.0025 V_w^{0.78} \quad (b-2)$$

$K_E$  هو معامل يأخذ بعين الاعتبار البارامترات الخاصة بالمادة النفطية.

$K_M$  هو معامل انتقال الكتلة (m/s)

$V_w$  سرعة الرياح على ارتفاع 10m فوق سطح الماء (m/s)

$A$  مساحة البقعة النفطية  $\text{m}^2$

$V_M$  الحجم المولي ( $\text{m}^3/\text{mol}$ ) والذي يمكن أن تتراوح قيمته بين  $150 \times 10^{-6}$  و  $600 \times 10^{-6}$

$R$  وهو ثابت الغازات العام ( $8.206 \times 10^{-5} \text{ atm m}^3/\text{K mol}$ )

$T_0$  درجة حرارة سطح البقعة النفطية ( $\text{K}^\circ$ ) والتي عادة ماتكون قريبة من درجة الحرارة المحيطة  $T_E$

$V_0$  الحجم الأولي للانسكاب  $\text{m}^3$

يعطى ضغط التبخر الابتدائي  $P_0$  في الجو عند درجة الحرارة  $T_E$  بالمعادلة التالية

$$\ln P_0 = 10.6(1 - T_0/T_E) \quad (C-2)$$

حيث أن:

$T_E$  هي درجة حرارة الوسط المحيط ( $\text{K}^\circ$ )

$T_0$  هي درجة حرارة نقطة الغليان الابتدائية للمادة النفطية ( $\text{K}^\circ$ )

لقد بين (Mackay) أن  $T_E C$  هو عبارة عن قيمة ثابتة بالنسبة للمادة النفطية المعطاة.

إن قيم  $C$  عند  $T_E = 283 K$  بالإضافة إلى درجة حرارة نقطة الغليان الابتدائية  $T_0$  تعطى بواسطة (Mackay). باستخدام هذه القيم فإنه قد تم الحصول على العلاقة التابعية التالية من أجل المواد النفطية:

$$C = 1158.9API^{-1.1435} \quad (d-2)$$

$$T_0 = 542.6 - 30.275API + 1.565API^2 - 0.03439API^3 + 0.0002604API^4 \quad (e-2)$$

حيث أن: American Petroleum Institute (API) وهو مقياس للوزن، يعتمد وزن API على كثافة المياه النقية، حيث له قيمة محددة ومعينة عند درجة الحرارة  $10^\circ$ . وتمتلك المواد النفطية ذات الأوزان النوعية المتزايدة تدريجياً قيمة أعلى لوزن API [4].

تعطى المعادلة التالية من أجل حساب وزن API:

$$API \text{ gravity} = [141.5 \div (\text{density at } 15.5^\circ\text{C})] - 131.5 \quad (c-2)$$

يتم توصيف الأجزاء التي تتم خسارتها بواسطة التبخر  $F_e$  من أجل مادة نفطية هيدروكربونية معينة أيضاً من خلال المعادلة التالية

$$\frac{dF_e}{dt} = \frac{KA_0}{V_0} \exp \left[ A - \frac{B}{T_p} (T_i + T_G F_e) \right] \quad (3)$$

حيث أن:

$$K = 2.5 \times 10^{-3} \mu_v^{0.78} \quad (4)$$

$T_p$  هي درجة حرارة المنتج ( $K^\circ$ )

$T_i$  درجة الحرارة الابتدائية (عندما  $F_e = 0$ )

$A = 6.3 ; B = 10.3$

$T_G$  هو تدرج منحنى التقطير ( $K^\circ$ )

$\mu$  اللزوجة الديناميكية

$A_0$  سطح البقعة النفطية ( $m^2$ )

$V_0$  حجم النفط المنسكب ( $m^3$ )

2 2 الانحلال

خلال عملية الانحلال، يتم فقدان بعض المكونات الأكثر قابلية للانحلال في الماء أسفل البقعة النفطية. تشتمل هذه المكونات على المواد العطرية ذات الأوزان الجزيئية المنخفضة، بالإضافة إلى بعض المركبات القطبية، والتي تصنف بمجموعها تحت اسم الراتنجيات. كما أن كمية قليلة فقط، (وعادة ما تكون أقل بكثير من واحد بالمائة من كمية المادة النفطية المنسكبة)، سوف يدخل في عمود الماء، كذلك فإن الانحلال لا يحدث تغيراً ملحوظاً في توازن كتلة المادة النفطية.

تكمن أهمية عملية الانحلال في أن المكونات العطرية المنحلة تكون ذات تأثير سمي خاصة على الأسماك

والحياة المائية، وفي حال حدوث عملية الانسكاب النفطي الذي يحتوي على كمية كبيرة من المواد العطرية القابلة للانحلال في منطقة ذات مياه ضحلة وأدى إلى حدوث تركيز موضعي عال لهذه المكونات، فإنه في هذه الحالة سيتم قتل عدد كبير من الكائنات الحية المائية [4].

يعتبر كل من البنزين، وقود الديزل، والوقود الخام الخفيف من أكثر المواد سمية للبيئة المائية. في حين تصبح المادة النفطية المعرضة لعمليات التجوية لفترة طويلة غير قابلة للانحلال بشكل مؤثر. على أية حال، فإن تركيز الهيدروكربونات في عمود الماء في المياه المفتوحة يكون صغيرا لإحداث ضرر وأذى للكائنات الحية.

يحدث الانحلال مباشرة بعد بدء الانسكاب، كما أن معدل الانحلال يتناقص بسرعة بعد الانسكاب بسبب الاستنزاف السريع للمواد القابلة للانحلال. كما أن بعض المكونات القابلة للانحلال تتبخر وبشكل سريع أيضا [4]. يعتبر انحلال الهيدروكربونات من البقعة النفطية ذو تأثير ثانوي على توازن كتلة النفط المنسكب بسبب أن أقل من 1% يمكن أن تتحلل في الماء. حيث أن هذه النسبة المنخفضة للانحلال هي كنتيجة لثلاثة عوامل:

- (1) انخفاض معامل انتقال الكتلة المنحلة.
- (2) القيمة المنخفضة جدا للقوة المحركة لقابلية الانحلال في الماء.
- (3) بسبب وجود كميات قليلة نسبيا من الهيدروكربونات القابلة للانحلال، حيث أن معظم هذه المواد تكون أكثر عرضة للتبخر [4].

يعتمد معدل حدوث عملية الانحلال و مداها على كل من تركيب المادة النفطية، عملية الانتشار السطحي، درجة حرارة الماء، الاضطراب وكذلك درجة التشتت. عمليا، لا تتحلل المركبات الثقيلة من النفط الخام في مياه البحر، في حين أن المركبات الأخف، وبالتحديد الهيدروكربونات العطرية كالبنزين والتولوين، فإنها تتحلل ولكن بكميات ضئيلة. على أية حال، فإن هذه المكونات هي أكثر المواد الطيارة التي يتم فقدانها بسرعة عن طريق التبخر، أسرع بـ 10 إلى 1000 مرة من فقدانها عن طريق الانحلال.

إن تراكيز الهيدروكربونات المنحلة في مياه البحر نادرا ما تتجاوز 1 جزء بالمليون (1 ppm)، كما أن الانحلال لا يشكل مصدرا لضريبة كبيرة يتوجب دفعها عند القيام بعملية تخليص المياه من المادة النفطية [5]. يمكن أن يتم حساب كتلة المادة النفطية المنحلة في عمود الماء اعتمادا على نظرية المكونات المتعددة (multi-component theory) والمطورة من قبل العالم Mackay عام [1980]. يمكن أن يتم تقدير كمية المكون النفطي  $i$ ،  $M_{di}$  (moles)، والتي يتم فقدانها بالانحلال من خلال العلاقة التالية: [7]

$$M_{di} = K_d \cdot A \cdot X_i \cdot S_i \cdot t \quad (5)$$

هنا  $K_d (= 3 \times 10^{-6} \text{ m/s})$  هو معامل انتقال الكتلة المنحلة

$S_i$  هو قابلية الانحلال للمكون الجزئي  $i$

يتم حساب معدل الانحلال الكلي كالتالي: [7]

$$S_d = \sum_{i=1}^m M_{di}/t = K_d \cdot A \cdot \sum_{i=1}^m X_i S_i \quad (6)$$

تم تطوير نظرية أخرى بواسطة العالم Cohen وذلك في عام 1980، وثبتت هذه النظرية إمكانية حساب معدل الانحلال من خلال المعادلة التالية:

$$S_d = K_d A S \quad (7)$$

حيث أن

$S_a$  معدل الانحلال الإجمالي للبقعة النفطية ( $g/h$ )،  $K_a$  معامل انتقال الكتلة المنحلة ( $m/h$ )،  $A$  مساحة سطح البقعة النفطية [ $m^2$ ]،  $S$  قابلية الانحلال في الماء.

تتناقص قابلية الانحلال في الماء بسرعة كبيرة بعد حدوث الانسكاب وذلك بسبب عمليات التجوية.

قام كل من Huang و Monastero عام (1982) بالبرهان على أنه يمكن أن يتم محاكاة قابلية الانحلال من أجل مادة نفطية نموذجية بالمعادلة التالية: [7]

$$S = S_0 e^{-at} \quad (7-a)$$

حيث أن:  $S_0$  قابلية الانحلال من أجل النفط النقي،  $a$  ثابت التعفن،  $t$  الزمن بالـ ( $h$ )

لقد قام كل من العالمين Lu و Polak عام (1973) بوضع قيم لكل من  $S_0$  والثابت  $a$  من أجل ثلاثة أنواع

مختلفة من النفط.

### 3 - الانتشار السطحي

يعرف الانتشار بأنه الامتداد أو التوسع الأفقي للبقعة النفطية بسبب كل من قوى الجاذبية، العطالة، اللزوجة

وكذلك قوى التوتر السطحي.

بعد انسكاب المادة النفطية على سطح الماء، تميل المادة النفطية للامتداد والانتشار ضمن البقعة النفطية على

مدى سطح الماء. وهذا صحيح بشكل خاص من أجل المنتجات النفطية الخفيفة كالبنزين، ووقود الديزل، والنفط الخام الخفيف، والتي تشكل بقع نفطية رقيقة.

ينتشر الوقود الخام الثقيل ليشكل بقعا نفطية ذات سماكة تصل لعدة ميليمترات [4].

تعتمد السرعة التي يتم فيها انتشار المادة النفطية على سطح الماء إلى درجة كبيرة على لزوجة المادة الزيتية

وكذلك على حجم النفط المنسكب. حيث أن المواد النفطية ذات اللزوجة المنخفضة تنتشر بشكل أسرع من تلك التي

تمتلك لزوجة عالية. تنتشر للمواد النفطية السائلة في البداية على هيئة بقعة متماسكة ولكنها سرعان ما تبدأ بالتكسر.

أما بالنسبة للمواد النفطية الصلبة أو ذات اللزوجة العالية فإنها تخضع لعملية تكسر إلى أجزاء أكثر من عملية الانتشار

حيث أنها تتكسر إلى طبقات رقيقة نسبة للطبقة الأصلية. تتحول المواد النفطية في درجات الحرارة التي تكون أدنى من

درجة التبخر بسرعة إلى الشكل الصلب ويصبح من الصعوبة بمكان انتشارها كما أنه من الممكن أن تبقى بسماكة

تصل إلى عدة سنتيمترات [8].

يتم الانتشار الأفقي للمادة النفطية على سطح الماء حتى في حالة الغياب التام للرياح أو للتيارات المائية. يتم

هذا الانتشار بفعل قوى الثقالة وكذلك قوى التوتر للسطح البيني بين الماء والمادة النفطية. تقاوم لزوجة المادة النفطية

هذه القوى. ويمرور الزمن، يقل تأثير قوى الجاذبية، بينما تستمر قوى التوتر للسطح البيني بين الماء والمادة النفطية

بجعل المادة النفطية تنتشر. كما أن التحول بين هذه القوى يبدأ منذ الساعات القليلة الأولى بعد عملية الانسكاب

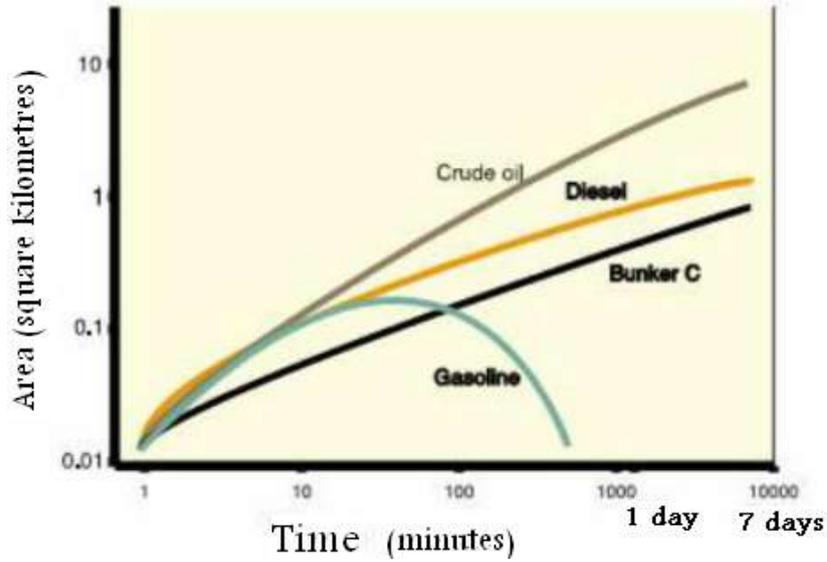
النفطي [4].

يوضح الشكل (3) نسب الانتشار تحت الظروف المثالية. وكقاعدة عامة، فإن البقعة النفطية في الماء تنتشر

بسرعة نسبيا بعد حدوث الانسكاب مباشرة. إن الحواف الخارجية للبقعة النفطية النموذجية تكون رقيقة نسبيا مقارنة

بالجزء الداخلي منها في هذه المرحلة وبالتالي فإن البقعة النفطية تشكل ما يشبه "البيضة المقلية". غير أن هذا التأثير

يتضاءل بعد يوم واحد تقريبا من بدء الانتشار [4].



(الشكل 3) المقارنة بين انتشار أنواع مختلفة من المواد النفطية والوقود [4]

**Bunker c 983 [kg/m<sup>3</sup>], Crude oil 1000.32 [kg/m<sup>3</sup>], Gasoline 815.9 [kg/m<sup>3</sup>], Diesel 838.9 [kg/m<sup>3</sup>]**

تتأثر النسبة التي يتم فيها انتشار المواد النفطية أو تجزئتها أيضا بتيارات المد والجزر وكذلك التيارات البحرية - كلما كانت القوى المركبة أكبر، كلما كانت العملية أسرع - . يوجد العديد من الأمثلة على انتشار انسكابات نفطية على مدى عدة كيلومترات مربعة وخلال عدة ساعات فقط وكذلك على مدى عدة مئات من الكيلومترات المربعة خلال أيام قليلة، مما يحد وبشكل خطير من إمكانية القيام بعمليات التنظيف في مياه البحر. كما أنه لا بد من إدراك حقيقة أنه، وباستثناء حالات الانسكابات الصغيرة لمواد نفطية منخفضة اللزوجة، فإن عمليات الانتشار تكون غير منتظمة كما يمكن أن يكون هناك اختلافات كبيرة في سماكات البقعة النفطية من عدة ميكرو مترات إلى عدة ميليمترات [4]. لقد تم تحديد ثلاث مراحل لعملية الانتشار لبقعة نفطية [3].

**في المرحلة الأولى،** فإن كلا من قوى الثقالة وكذلك قوى العطالة تحكم عملية الانتشار على سطح الماء. **في المرحلة الثانية،** تصبح قوى العطالة غير ذات أهمية بالمقارنة مع قوى اللزوجة على السطح. **في المرحلة الثالثة،** تصبح القوى البيئية مسيطرة وتؤمن القوة المحركة والتي تقوم بدفع عملية الانتشار. وبالتالي فإن المادة النفطية المتوازنة يمكن أن تنتشر عبر السطح أو يمكن أن تشكل ما يعرف بالعدسة (lens). تم وضع الجدول (2) والذي يلخص كل من قطر الانتشار المتوافق مع المحور وكذلك عرض الانتشار أحادي البعد في كل طور. كما أن التغيرات التي تطرأ على خواص البقعة النفطية والتي تسببها عوامل التجوية يمكن أن تؤدي إلى توقف نهائي في عملية الانتشار الميكانيكي [3].

تبعاً للعديد من الملاحظات الميدانية، اقترح Fay المعادلة التالية لحساب مساحة البقعة النفطية: [3]

$$A = 10^5 V^{3/4} \quad (8)$$

حيث أن  $A$  مساحة البقعة النفطية النهائية  $m^2$

$V$  الحجم الكلي للبقعة النفطية  $m^3$

الجدول (2): قانون الانتشار للبقع النفطية

القطر $R_g$	العرض $L_g$	طور الانتشار
$1.14(\Delta g V t^2)^{1/4}$	$1.39(\Delta g A t^2)^{1/2}$	الجاذبية - العطالة
$0.98(\Delta g V^2 t^{3/2} \nu^{-1/2})^{1/6}$	$1.39(\Delta g A^2 t^{3/2} \nu^{-1/2})^{1/4}$	الجاذبية - اللزوجة
$1.60(\sigma^2 t^3 \rho_w^{-2} \nu^{-1})^{1/4}$	$1.43(\sigma^2 t^3 \rho_w^{-2} \nu^{-1})^{1/4}$	التوتر السطحي - اللزوجة

حيث أن:  $\rho_0$  كثافة المادة النفطية [ $\text{kg/m}^3$ ]،  $\rho_w$  كثافة مياه البحر [ $\text{kg/m}^3$ ] من ناحية أخرى، فإنه، وبسبب عدم أخذ تأثير الرياح بالاعتبار وكذلك الاضطراب المرافق لذلك فإنه قد تم وضع معادلة Fay للتنبؤ بانتشار البقعة النفطية وذلك من أجل تقليل تأثيرات الانتشار الأفقي بالمقارنة مع تلك التي تتم ملاحظتها في القياسات الميدانية. في عام 1984 تم وضع معادلة Lehr كتطوير لمعادلة Fay-type للانتشار آخذة بعين الاعتبار الاضطراب الناجم عن الرياح:

$$A = 2270 \left( \frac{\nabla \rho}{\rho_0} \right)^{2/3} V^{2/3} t^{1/2} + 40 \left( \frac{\nabla \rho}{\rho_0} \right)^{1/3} V^{1/3} U_{wind}^{4/3} t \quad (9)$$

حيث أن  $A$  هي مساحة البقعة النفطية  $\text{m}^2$

$$\nabla \rho = \rho_w - \rho_0 \quad (10)$$

$V$  الحجم الكلي للنفط المنسكب بالبرميل،  $U_{wind}$  سرعة الرياح بالعقدة،  $t$  الزمن بالدقيقة. بالاعتماد على معادلة Lehr، فإنه يمكن الحصول على مساحة البقعة النفطية الناجمة عن الانتشار في كل خطوة زمنية [6]. وقد اختصر Buckmaster حلا مقاربا من خلال حساب حجم وشكل العدسة كتابع للزمن. وأخيرا استنتج من خلال هذه النظرية تعبيراً رياضياً يحسب من خلاله نصف قطر البقعة النفطية،  $R$ ، على النحو التالي: [6]

$$R(t) = 1.76(g\nabla\rho)^{0.25} V^{0.3333} \nu^{-0.125} t^{0.375} \quad (11)$$

يمكن الحصول على لزوجة مياه البحر من خلال معادلة ITTC (1999): [5]

$$\nu_s = ((0.659 \times 10^{-3}(T - 1.0) - 0.05076)(T - 1.0) + 1.7688) \times 10^{-6} \quad (12)$$

حيث أن  $T$  درجة حرارة الماء ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\nu_s$  لزوجة مياه البحر

## النتائج والمناقشة

سيتم إجراء نماذج رياضية لكل من العمليات أنفة الذكر من تبخر وانحلال وانتشار، ورسم خطوط بيانية كخرج لهذه النماذج، بالإضافة إلى محاكاة عملية الانتشار ومناقشة هذه النتائج.

تم استخدام برنامج MATLAB في الحصول على الخطوط البيانية وكذلك لإدخال بيانات الشبكة (Mesh) للحقل المستطيل وإحداثيات كل عنصر من عناصر الشبكة، والسرعة الناجمة عن الرياح والتيارات، وذلك باستيراد ملفات خاصة بهذه البيانات ومعدة مسبقاً واستدعاؤها ضمن توابع البرنامج.

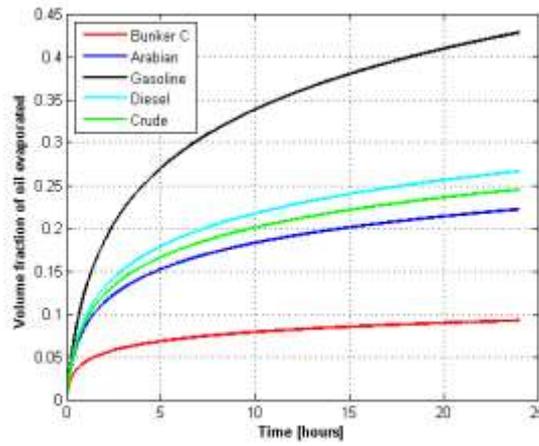
## 1 - النطاق الحسابي للحقل المستطيل

قمنا بإنشاء نطاق حسابي لمساحة أبعادها  $2000 \times 4000$  m، كما هو موضح في الشكل (7). وهو تم تقسيمه إلى 231 عقدة و400 عنصر مثلثي متطابقة في المساحة. يأخذ النطاق الحسابي شكل حرف V باتجاه عمق النطاق.

## 2 - محاكاة عمليات التجوية

### 2.1 التبخر

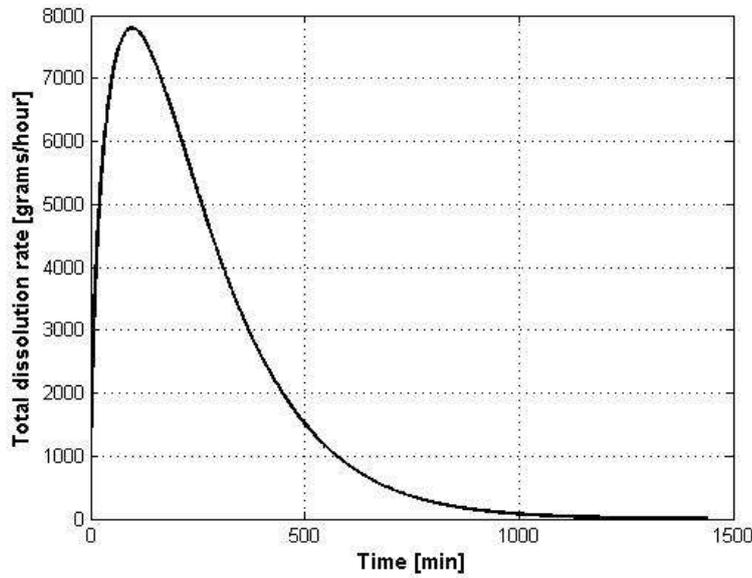
يحدث التبخر كما عرض سابقا عندما تصبح المركبات الخفيفة أو المركبات الأكثر قابلية للتطاير أبخرة مغادرة لسطح الماء. تم إنشاء نموذج رياضي انطلاقا من معادلة التبخر أنفة الذكر فكان خرجة موضعا في الشكل (4) الذي يبين النسبة المئوية للتبخر مقابل الزمن من أجل أنواع مختلفة من الوقود باستخدام المعادلة (2) يمكن ملاحظة أن التبخر يحدث بشكل أساسي في أول 1-2 يوما. تؤثر نقطة غليان للمادة النفطية بشكل كبيرة على معدل التبخر. وعليه، فإن البنزين، والذي يمتلك نقطة غليان هي الأقل مقارنة مع بقية أنواع الوقود، يمتلك أكبر معدل تبخر.



(الشكل 4) الجزء الحجمي للنفط المتبخر مقابل الزمن لأنواع مختلفة من المادة النفطية

### 2.2 الانحلال

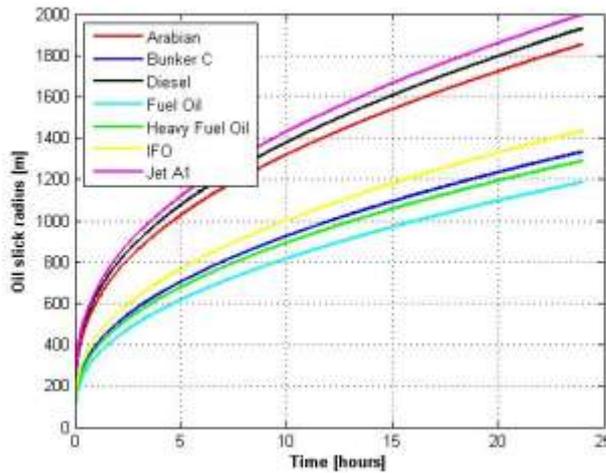
يمكن أن تتحلل المركبات النفطية القابلة للانحلال في الماء في المياه المحيطة. يعتمد هذا الأمر على تركيب وحالة المادة النفطية، ويحدث بشكل أسرع عندما تنتشتت المادة النفطية في النهاية في عمود الماء. تم إنشاء نموذج رياضي فكان خرجة كما الشكل (5) والذي يبين أن معدل الانحلال الكلي لمادة نفطية معينة في خلال 6 ساعات. إن البيانات المتوفرة عن قيم انحلالية المادة النفطية هي بيانات محدودة وتقتصر في المراجع المستخدمة على نوع واحد من المواد النفطية لذلك لم يتم إجراء مقارنة بين الانحلالية لمواد مختلفة.



(الشكل 5) معدل الانحلال الكلي للمادة النفطية

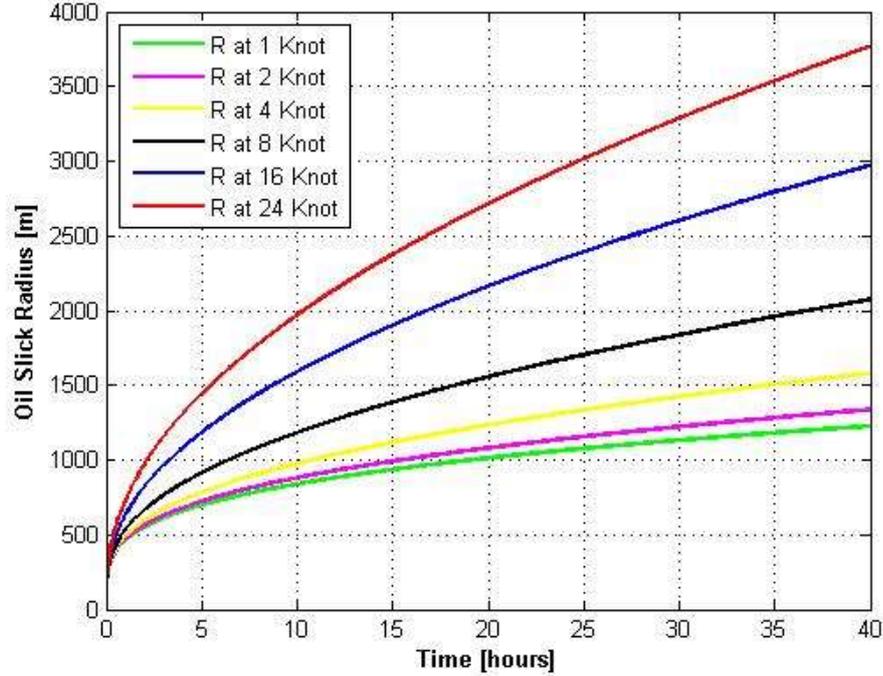
### 3 - محاكاة انتقال الطبقة السطحية للبقعة النفطية (الانتشار)

حالما يتم انسكاب المادة النفطية، فإنها تبدأ بالانتشار فوق سطح الماء. تعتبر عملية انتشار المادة النفطية من أهم العمليات في المراحل المبكرة من مراحل انتقال البقعة النفطية التي تلي الانسكاب، وذلك نتيجة للتأثير الكبير الذي تقوم به هذه العملية على عمليات التجوية كالتبخر والانحلال. تتحدد عملية الانتشار للبقعة النفطية من خلال التوازن بين قوى الجاذبية، اللزوجة والتوتر السطحي. كما يعتبر كل من لزوجة المادة النفطية وحجم النفط المنسكب من أهم العوامل التي تؤثر على عملية الانتشار. تم إنشاء نموذج رياضي يعطي خرجاً، كما هو موضح في الشكل (6)، مقارنة بين تغير أقطار البقعة النفطية لأنواع مختلفة من المواد النفطية وذلك بحسب المعادلة (9).



(الشكل 6) مقارنة تغير قطر البقعة النفطية لانسكاب نفطي مقداره 300 متر مكعب من أنواع مختلفة من المواد النفطية مع الزمن تبعاً لمعادلة Lehr

تم تطبيق معادلة Fingas وذلك بعد تحديد موضع الانسكاب الأولي على الشبكة المقسمة إلى 400 عنصر مثلثي وذلك باستخدام نظرية العناصر المنتهية FEM وباستخدام برنامج MATLAB تم إدخال بيانات الشبكة وتطبيق معادلة الانتشار مع إمكانية التحكم بالبيانات المتغيرة بحسب الحالة المعتمدة.

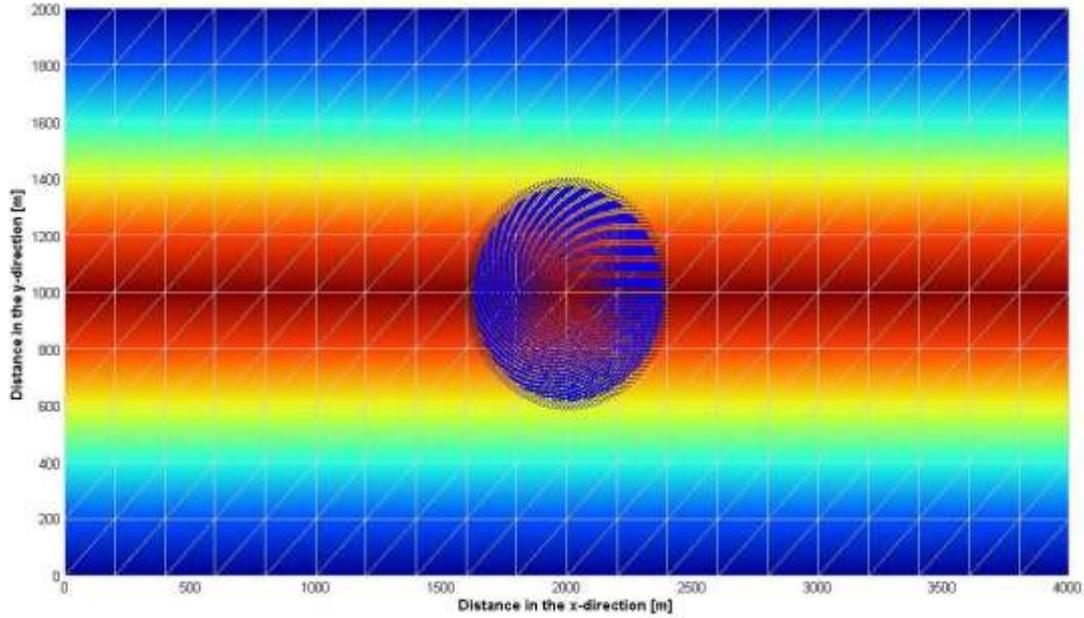


(الشكل 7) تأثير سرعة الرياح على تغير قطر البقعة النفطية مع الزمن

لانسكاب نفطي مقداره 300 متر مكعب لمادة نفطية معينة تبعا لمعادلة Lehr

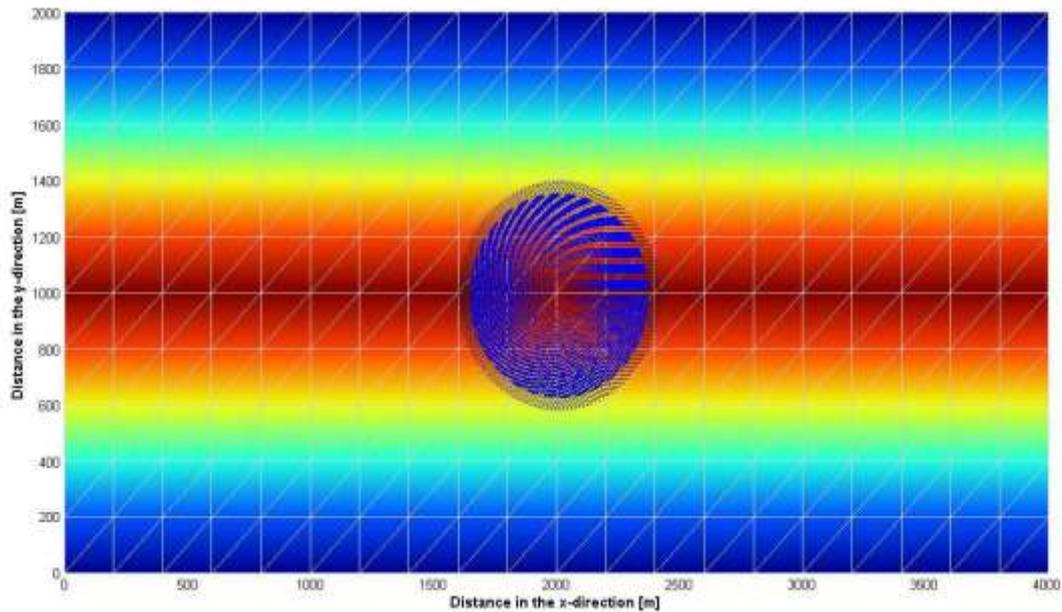
نلاحظ من الشكل السابق تأثير سرعة الرياح على تغير قطر البقعة النفطية حيث يزداد نصف القطر لنفس المادة النفطية وعند نفس درجة الحرارة حيث يزداد نصف القطر بشكل ملحوظ بزيادة سرعة الرياح حتى ولو بقيم صغيرة.

يبين الشكلان (7) و (9) عملية محاكاة لانتشار بقعة نفطية لانسكاب نفطي بحجم مقداره 50 متر مكعب، ذو كثافة  $815.9 \text{ kg/m}^3$ ، عند درجتى حرارة 15 و 35 درجة مئوية لمياه البحر، وسرعة مقدارها 7 عقدة للرياح عند مستوى 10 متر فوق سطح البحر. وذلك بعد فترة زمنية مقدارها 120 دقيقة.



الشكل (8) محاكاة لانتشار 50 م<sup>3</sup> من مادة نفطية بكثافة 815.9 كغ/م<sup>3</sup> عند درجة الحرارة 15 درجة مئوية

يبين الشكل (8) تأثير التبخر حيث تناقص نصف قطر البقعة النفطية من 773.5863 م من دون حدوث تبخر إلى 771.1313 م في حال وجود التبخر



الشكل (9) محاكاة لانتشار 50 م<sup>3</sup> من مادة نفطية بكثافة 815.9 كغ/م<sup>3</sup> عند درجة الحرارة 35 درجة مئوية

يبين الشكل (9) تأثير التبخر حيث تناقص نصف قطر البقعة النفطية من 773.5863 م من دون حدوث تبخر إلى 684.4933 م في حال وجود التبخر. بالمقارنة بين الشكلين السابقين، يظهر تأثير تغير درجة الحرارة على عملية الانتشار حيث أنها تسبب فاقدا أكبر في كمية المادة المنتشرة حيث يتبخر قسم أكبر منها في الهواء كلما ازدادت درجة الحرارة.

### الاستنتاجات والتوصيات:

- 1 كلما قلت كثافة المادة النفطية المنسكبة (أي كلما ازدادت نسبة المكونات الطيارة الخفيفة فيها) كلما ازدادت نسبة المادة المتبخرة منها، مما يندرج بتلوث بيئي للهواء وكذلك بتصلب المادة المتبقية على سطح البحر وصعوبة القيام بعمليات تنظيفها، كما أن النسبة الأكبر من فقد المادة عن طريق التبخر تتم في الساعات العشر الأولى من الانسكاب (الشكل 4)، وبالتالي فإنه يجب الإسراع في البدء بعمليات التنظيف قبل الوصول إلى هذه المرحلة.
- 2 يبلغ معدل الانحلال الكلي ذروته بعد ساعتين تقريبا من الانسكاب، كما أن عملية الانحلال تؤدي إلى أضرار سمية على البيئة البحرية من أسماك وغيرها (الشكل 5). مما يؤكد ضرورة وأهمية الإسراع في عمليات التنظيف لتجنب الوصول إلى هذه المرحلة، وخطر التأخر القيام بعمليات التنظيف.
- 3 تبين بالاستعانة بالشكلين (8) و (9) أنه يمكن التنبؤ بقطر البقعة النفطية بفعل عملية الانتشار على سطح البحر وبالتالي التنبؤ بحالة الانسكاب النفطي في أي لحظة زمنية مما يساعد على توظيف الإمكانيات المتوفرة بأفضل شكل للحد من انتشار البقعة النفطية.
- 4 يوصى بتطوير النموذج الذي تم إنشاؤه في هذا البحث ليأخذ بالاعتبار تأثير التيارات البحرية إن وجدت في مكان الانسكاب.
- 5 تبين من خلال هذا البحث الأهمية الكبيرة لعامل الزمن في الحد من الآثار السلبية للانسكابات النفطية، ونظرا لوجود مركز واحد فقط في الجمهورية العربية السورية متخصص في مكافحة التلوث من هذا النوع، وهو موجود في مصب بانياس، بالإضافة إلى الوقت اللازم لتجهيز المعدات ونقل فريق العمل في حال وقوع حادثة انسكاب ما في مصب طرطوس، الأمر الذي يجعل المعالجة في الوقت المناسب شبه مستحيلة، لذلك يوصى بإنشاء مركز آخر في مصب طرطوس، يكون شبيها بمركز مصب بانياس.

### المراجع:

- 1- Wang, S.D.; Shen, Y.M. and Y.H. Zheng, Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas, *Ocean Engineering* 32, 2005, 1556–1571.
- 2- ASCE, State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills, ASCE Committee on Modeling Oil Spills, *Water Resources Engineering*, November, 1996, pp. 594-609.
- 3- Fay, J.A., Physical processes in the spread of oil on a water surface. In: Proc. Conf. Prevention and control of Oil Spills, 15-17 June. American Petroleum Institute, Washington, 1979, DC, 463-467.
- 4- Fingas, M., The basics of oil spill cleanup, Lewis Publishers, CRC Press, LLC, Florida, 2000.
- 5- ITOPF, Fate of marine oil spill (technical information paper), 2002.
- 6- Lehr, W.J.; Fraga, R.J.; Belen, M.S.; and Cekirge, H.M., A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula, *Marine Pollution Bulletin*, 15, 1984, 326-329.
- 7- Mackay, D.; Buist, I.; Mascarenhas and R., Paterson, S., Oil Spill processes and models, Environment Canada Report EE-8, 1980.
- 8- National Research Council (U.S), Committee on Oil in the Sea: Input, Fates and Effects, Oil in the sea III: inputs,