

SCHISM 模式模擬油污染擴散- 以「德翔臺北」漏油為例

黃清哲¹ 邱啓敏² 莊士賢³ 范揚洺⁴ 吳立中⁵ 邱永芳⁶ 蘇青和⁷
李俊穎⁸

¹國立成功大學水利及海洋工程學系教授暨近海水文中心主任

²國立成功大學水利及海洋工程學系博士候選人

³國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授

⁴國立成功大學近海水文中心研發組組長

⁵國立成功大學近海水文中心助理研究員

⁶交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

⁷交通部運輸研究所港灣技術研究中心第三科科長

⁸交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

摘要

港口地區的大型油污不但會對海洋生態與經濟活動造成嚴重之衝擊，也影響到了一個國家的門面。掌握油污的發生區域與運動特徵，將能更有效地進行油污災情控制與清理工作。本研究建立一套油污擴散預報系統，此系統運作方式分為二階段。第一階段以 X-Band 雷達在溢油事件發生時即時觀測的海表面的流場，再加入實測風速資料，可快速模擬計算油污在溢洩初期階段，油污在海面上的擴散與移動方向。第二階段則蒐集海氣象資料，並利用 SCHISM 模式模擬未來三天油污擴散的演變情況。本研究以今年度新北市石門外海「德翔臺北」漏油事件為例，在第一階段模擬計算溢油初始階段的油污擴散面積與漂移方向，以及第二階段以 SCHISM 模式模擬未來三天油污擴散模擬的演變，二者結果皆與航拍照片做定性比較，證明本研究未來可用於海域油污擴散的模擬。

關鍵詞：SCHISM、Lagrangian Particle Tracking、油污擴散、傳輸、X-Band 雷達

Application of SCHISM model to simulate oil spill trajectories - A case study for the T.S. Taipei's oil spill

Ching-Jer Huang* Chi-Min Chiu Laurence Z.H. Chuang Yang-Ming Fan

Li-Chung Wu Yung-Fang Chiu Ching-Ho Su Chun-Ying Lee

* Professor, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University
Director, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

ABSTRACT

Oil spills in the coastal and harbor areas have serious impact on marine ecosystems and economic activities. Accurate information on the temporal and spatial variations of oil spill would be helpful for mitigating the oil-spill disaster and make the clean-up operation more effective. The purpose of this study is to build up an oil spill forecasting system. In this study, a two-step strategy was proposed. In the first step, based on the empirical formulas, the initial oil spilled area and the successive diffused area can be estimated, once the volume and the properties of the spilled oil are known. The location of the diffused area can then be estimated from the vectorial summation of the

current speed and three percent of the wind speed. In the second step, based on the given current and wind fields, the SCHISM model was applied to forecast the location and the area of the oil spilled area. The T.S. Taipei's oil spill event was then used as a case study for testing the capability of the developed forecasting system. The predicted diffusion and trajectory of the oil spill obtained by the present forecasting system agree quite well with those obtained from the aerial photograph provided by the GEOSAT Aerospace & Technology Inc.

Keywords: SCHISM; Lagrangian Particle Tracking; Oil Spill Diffusion; Transport; X-Band Radar

一、前言

河川、海灣、港區以及海岸地區發生油污染意外事件的原因，大部份來自油輪或大型船舶擱淺、輸油管線破裂、煉油廠或儲油設備意外事故等。當溢油事件發生時，可能對海岸與港區之環境與經濟造成嚴重的損害。然而，溢油發生後會有物理、化學、生物等不同機制的變化作用，這些過程包括油污的風化作用 (weathering)、傳輸 (transport)、宿命 (fate)。此外，油污特性、海洋流體動力、氣象與海岸環境條件亦關係著海岸地區油污的傳輸及宿命。

如何減少油污染事件對海岸地區之經濟與環境的衝擊是全世界最關心的議題。根據 ITOPF (International Tanker Owners Pollution Federation, 2008) 統計，全世界超過 700 噸以上的油污染已逐年減少，但小於 7 噸的油污染事件發生機率卻佔所有油污染事件的 85%。而臺灣海域為東亞航運必經之地，經濟快速開發使得臺灣對外的航運更趨頻繁。尤其是石化工業的興起，油品及化學品的進出口更增加了港灣環境管理的不確定性，例如 2016 年 3 月 10 日本國籍「德翔臺北」貨輪因失去動力擱淺於新北市石門外海 0.3 海浬處，船體被連日的大浪衝擊，於 3 月 24 日斷裂，溢漏出油污嚴重影響當地海岸環境之生態。

油污洩漏後，會產生各種風化過程，除了隨水流、潮流和風向造成水平擴散之外，部分還會蒸發；部分會與垃圾漂浮物混合，或是與沉澱物結合而成垂直擴散或是滲入沙灘；此外還會被海中生物分解後，又被魚蝦等生物攝食。若能在事發現場即時掌握油污擴散範圍，並有效掌握未來的油污擴散方向，將可有效降低對自然環境的衝擊。為能控制海上油污擴散，目前常見的方法是透過攔油索控制油污的擴散範圍，但若能在事先掌握海流的運動特性，

從中預測出油污的漂移路徑，則必能有效的透過攔油索控制海上油污。

本研究應用一套三維跨尺度的 SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) 海洋數值模式 (如圖 1)，來模擬油污擴散。此模式系統結合大氣與波浪模式，來提昇近岸及河口流體動力現象預測的精度，並提供油污擴散模式，預測洩油漂移軌跡。本研究以今年度 3 月 10 日在新北市石門外海因「德翔臺北」貨輪擱淺造成油污事件案例，進行海域油污監測與擴散模擬，並探討油污污染在新北市石門外海的擴散與傳輸現象。

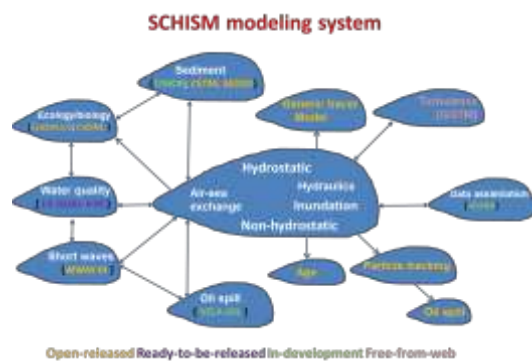


圖 1 SCHISM 海洋數值模式系統
(摘自: <http://ccrm.vims.edu/schismweb/>)

二、數值模式

SCHISM 海洋數值模式 (2014 年 12 月 13 日前為 SELFE) 是由 Zhang 與 Baptista (2008) 以 ELCIRC 模式基礎修改而成，是一個求解三維淺水波方程 (3D shallow-water equations)、靜水壓方程 (Hydrostatic)、包氏近似 (Boussinesq approximations)、與鹽度及溫度的傳輸方程的海洋流體動力數值模式。SCHISM 模式的基本控制方程式有連續與動量守恆方程式，為簡化 SCHISM 模式的

方程式，假設流體為不可壓縮，在卡氏座標下水體的連續方程式 (continuity equation)、自由液面運動方程式、及動量方程式可分別寫為

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} \mathbf{u} dz = 0 \quad (2)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{f} - g\nabla\eta + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_A - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \nabla \rho dz + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) \quad (3)$$

其中， $\mathbf{f} = -f \mathbf{k} \times \mathbf{u} + \alpha g \nabla \psi$

鹽度及溫度傳遞擴散方程式可分別寫為

$$\frac{D\mathbf{S}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial z} \right) + F_s \quad (4)$$

$$\frac{D\mathbf{T}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho_0 C_p} + F_h \quad (5)$$

以上方程式中符號標記說明如下：

(x,y): 水平卡式座標(m); z: 垂直座標, 向上為正(m);
 ∇ : $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$; $\eta(x,y,t)$: 自由液面高度(m);
 $h(x,y)$: 水深(m); $\mathbf{u}(x,y,z,t)$: 水平速度向量, 於卡式座標速度分量為 (u,v) ($m s^{-1}$); w : 垂直速度 (m/s); f : 科氏力參數 (s^{-1}); g : 重力加速度 ($m s^{-2}$); $\psi(\phi, \lambda)$: 地球潮汐位能 (m); α : 有效地球彈性因子 ($= 0.69$); ρ_0 : 水密度為 $1,025$ ($kg m^{-3}$); P_A : 自由液面的大氣壓力 ($N m^{-2}$); S, T: 水中鹽度 (practical salinity units, psu) 與溫度 ($^{\circ}C$); ν : 垂直渦流黏滯係數, ($m^2 s^{-1}$); μ : 水平渦流黏滯係數 ($m^2 s^{-1}$); κ : 鹽度與熱通量垂直渦流擴散係數或熱通量垂直渦流擴散係數 ($m^2 s^{-1}$); F_s, F_h : 水平傳輸方程式; Q : 太陽輻射的吸收率 ($W m^2$); C_p : 水的比熱 ($J kg^{-1} K^{-1}$)。

SCHISM 模式水平網格座標系統可結合非矩型與矩形網格, 因應不同計算需求能選用卡式或球面座標系統; 垂直網格可採用 SZ 及 LSC² 的座標系統, 其中陡變地形是許多海洋數值模式一項重要的挑戰, 地形陡變會造成壓力梯度變化劇烈, 在海洋數值模式計算中會產生偽流 (spurious flow) 的問題 (Zhang et al., 2015), 而 LSC² 座標系統即針對水域中地形陡變變化而發展一個新的數值方法, 可有效避免因地形陡變產生偽流的計算誤差。紊流閉合模式

採用 Umlauf and Burchard (2003) 的 Generic Length Scale (GLS) turbulence closure, 其優點為含括了 $k-\epsilon$ (Rodi, 1984)、 $k-\omega$ (Wilcox, 1998)、及 Mellor and Yamada (1982) 等紊流閉合模式。SCHISM 為一套三維跨尺度的海洋數值模式, 已成功應用在全世界超過 40 個以上水深地形變化複雜的海岸、潮間帶、河川、以及湖泊等地方, 可快速及精確的求解海洋流體動力與物理現象之變化。

SCHISM 模式系統中模擬油污擴散的模式有二套, 一為採用 Lagrangian Particle Tracking 方法, 另一為耦合葡萄牙國家土木實驗室 (National Laboratory of Civil Engineering) 團隊所發展 Eulerian-Lagrangian Method (ELM) 的三維油污擴散與傳輸模式 (2D/3D VOILS), 以描述油污在海洋、海岸、以及河川的擴散與傳輸現象。

三、溢油事件模擬

2016 年 3 月 10 日於新北市石門外海發生「德翔臺北」貨輪擱淺造成溢油的事件, 本研究針對此事件以基隆港垂直岸邊往外延伸約 35 公里, 水平方向約 70 公里的範圍建置模式計算區域。水平座標系統採用有限元素非結構性三角形網格, 最小元素邊長約為 16 m, 總計共 118,132 個三角元素 (如圖 2), 垂直座標系統則採用 21 層的混合 S-Z 座標。

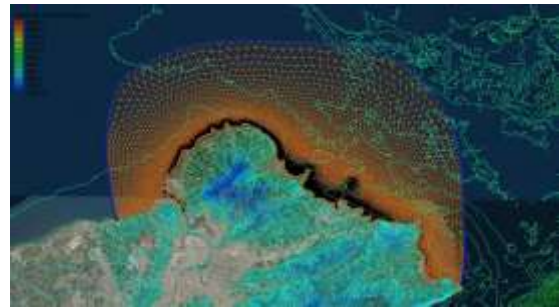


圖 2 石門外海油污擴散模擬範圍與計算網格系統

本研究模擬油污擴散分為二階段, 第一階段為立即掌握油污擴散初期的變化, 依據 Fay (1969) 二維油污擴散理論計算油污擴散面積, 油污在初始溢洩的擴散面積可由下列公式表示:

$$A_0 = \pi \frac{k_l^4}{k_2^2} \left(\frac{V_0^5 g A \rho}{v_w^2} \right)^{1/6} \quad (6)$$

式中， $A_p = \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w}$ ， ρ_w 為水的密度 (kg m^{-3})， ρ_o 為油的密度 (kg m^{-3})， k_1 與 k_2 為分散常數 (分別為 1.52 及 1.21)， g 是重力加速度 (ms^{-2})， V_0 是油污的溢洩數量 (m^3)， ν_w 是水的黏滯性 ($\text{kg} \cdot \text{ms}^{-1}$)。

隨著時間增加，油污溢洩的擴散面積計算公式可表示為：

$$A_1(t) = \pi \frac{k_1^4}{k_2^2} (V_0^5 g \Delta \rho t^{1.5} / \nu_w^2)^{1/3} \quad (7)$$

式中， t 為時間，單位為小時。

Fay (1969) 提供的油污擴散面積計算公式，可在油污事件剛發生時快速計算出油污擴散面積。此外，油污在海面上擴散的驅動力主要是表面流與風速，若油污靠近海岸邊且風速小於 10 km/h 時，油污擴散與移動的方向主要受表面流的影響；而在開放的海域，風速大於 20 km/h 時，風會主導油污的擴散 (Finags, 2014)。油污擴散速度一般可由流速及 0.03 倍風速的向量和求出。本研究於油污事件發生時，先利用(6)式及(7)式求出油污初始及隨時間變化的擴散面積，再由 X-Band 雷達所測得的表面流，及風速計算油污的移動方向。第一階段的模擬有助於油污事件發生時，快速調度與配置緊急救災資源及器具。

第二階段則應用 SCHISM 進行模擬計算油污於海面上擴散的情況，先給定模擬計算區域在外海開放邊界，水位、流速、海水溫度、海水鹽度等邊界資料；氣象場資料如海表面氣壓場 (Pressure reduced to MSL)、風場 (Wind field)、太陽輻射通量 (Radiation flux)、空氣的比濕度 (Specific humidity)、海表面的氣溫場等，皆來自於中央氣象局 WRF 模式模擬計算得到 5 公里解析度的資料。同時 SCHISM 模式已成功耦合 WWM (Wind Wave Model) 波浪模式，波浪場的資料由 WWM 模擬計算得到。利用上述海氣象與波浪資料，以 SCHISM 模擬石門附近海域流體動力演變的時序列資料，再提供油污擴散模式計算「德翔臺北」貨輪發生油污洩漏後，模擬未來三天海面上油污擴散及漂移軌跡。第二階段模擬可瞭解油污未來擴散的演變，以利後續的災害應變之規劃及處置。

四、結果與討論

為了因應新北市石門外海的「德翔臺北」貨輪

擱淺及溢油事件，在第一階段的油污擴散模擬，本研究團隊於溢油事件剛發生時，立即前往現場以 X-Band 雷達進行油污擴散監測。圖 3 為雷達監測影像經由影像分析處理技術得到的表面流場分佈圖，由圖中顯示表面流速約 1 m/sec，流向為沿著海岸方向平行流動。另外圖 4 為 SCHISM 模式模擬的表面海流與雷達監測結果比對，圖中上方為海流流速比對，下方為海流流向比對，其結果顯示於 3 月 26 日 06:00 至 16:00 期間，監測與模擬的海流流速與流向之趨勢皆非常一致。同時檢視溢油事件發生位置鄰近中央氣象局富貴角資料浮標的風速資料，即時觀測資料顯示於 3 月 24 日 17:00 至 3 月 26 日 11:00 期間三秒陣風超過 20 km/h (如圖 5)，依此結果初判油污擴散初期 (1~2 天內) 皆由風所主導。本研究案例參考環保署公布的資訊，假設有 50 噸重油溢洩，以 (6) 式計算油污初始溢油面積，得到初始溢油面積約為 3 公頃，再以 (7) 式計算不同時間的擴散面積，可得到擴散 3 小時後的擴散面積為 7 公頃，擴散 6 小時後的擴散面積為 10 公頃。為了進一步瞭解油污擴散面積計算結果的合理性，本研究蒐集相關資料，如圖 6 所示 (資料來源：http://www.geosat.com.tw/News/2016/images/20160327001_1.jpg)，航拍資料分析結果顯示油污污染範圍面積已達 10 公頃，此結果與本研究計算得到的油污擴散面積吻合。

第二階段則應用 SCHISM 模式進行油污擴散模擬，首先模擬水位及潮流的演變，模擬期間自 3 月 1 日至 4 月 30 日。圖 7 為麟山鼻實測與預測水位比對歷線圖，比對期間自 3 月 1 日開始至 3 月 15 日，其結果顯示實測與預測的變化趨勢一致。石門附近海域海流模擬結果如圖 8，圖中由箭矢方向表示海流流向，箭矢長度與底圖顏色表示海流流速。雖然石門海域無長期海流觀測資料可進行比對，但董等人 (2014) 的研究結果顯示在富貴角離岸 2 公里外的海域開始，其海流平均流速有超過 70% 時間大於 1m/s，觀測期間最大達 3.92 m/s (如圖 9)，而在海流流向部份則呈現與海岸平行方向流動。由上述結果可知，經由 SCHISM 模擬結果得到石門海域海流與之前觀測海流資料比對，在定性比較上有合理性的依據。

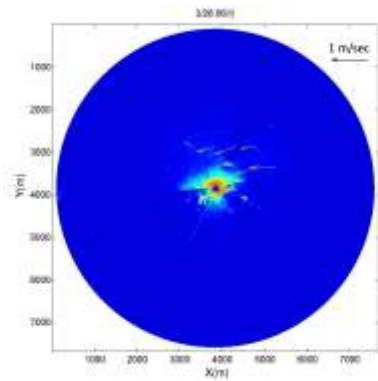


圖 3 X-Band 雷達監測之表面海流分佈圖

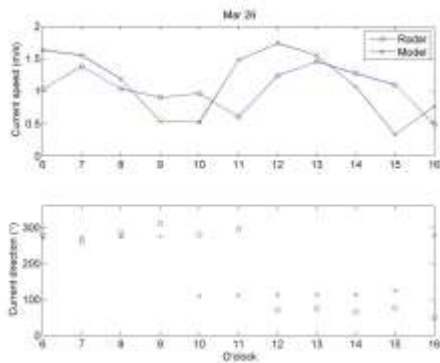


圖 4 雷達監測與模式模擬海流流速與流向之比較

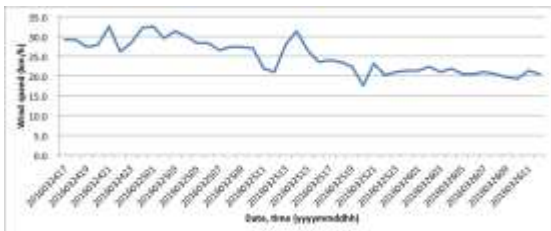


圖 5 中央氣象局富貴角資料浮標三秒陣風時序列圖



圖 6 擱淺貨輪「德翔臺北」漏油影響範圍圖

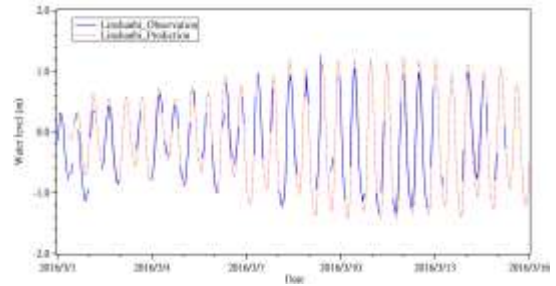


圖 7 麟山鼻實測與預測水位比對歷線圖

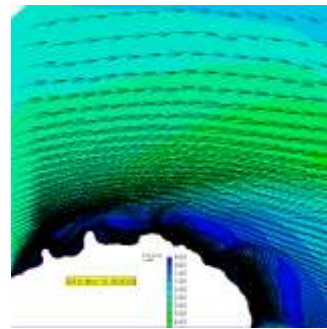


圖 8 石門海域海潮流模擬結果

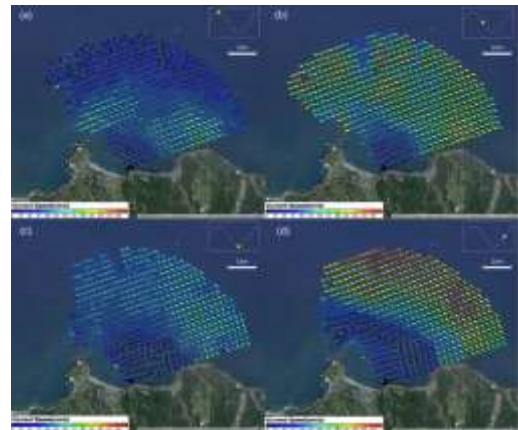


圖 9 富貴角海域各潮時流速分佈圖(董等人, 2014)

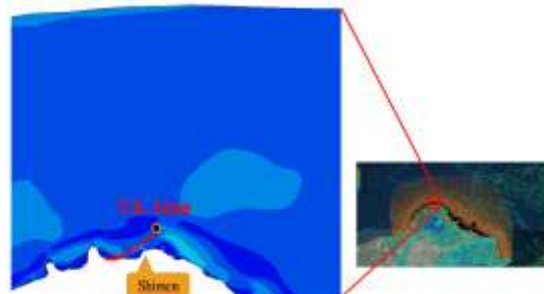


圖 10「德翔臺北」貨輪溢油發生後 20 小時油污分佈模擬結果

自富貴角資料浮標三秒陣風時序列資料可知(如圖 5)，3 月 24 日至 26 日風向皆為北北東風，風速大於 20 km/hr (約 10.8 Knots)。圖 10 為模擬「德翔臺北」貨輪於 2016 年 3 月 25 日溢漏 50 公噸燃料油的油污擴散結果。圖 10 顯示，溢油發生時，受到強烈東北風影響，貨輪擱淺位置離岸僅約 300 公尺，因此油污快速往西南方向漂移抵達岸邊。接著受到海流影響，油污沿著東西方向往返黏附在岸邊，此模擬結果與環保署公布的調查資料相符。

五、結論與建議

本研究建置一套油污擴散模擬系統，共分為二階段的油污擴散模擬，第一階段依據 X-Band 雷達實際觀測的表面海流與鄰近測站的風速資料，進行計算油污擴散面積與漂移方向，可有效即時掌握油污事件剛發時的擴散情況，以利快速調度與配置的救災資源及器具。第二階段再透過 SCHISM 模式模擬未來三天的油污擴散演變，可降低油污對海岸地區所造成的災害，可即時提供專業諮詢服務予政府機關做緊急應變處置之參考。

目前已成功應用 SCHISM 模式中 Lagrangian Particle Tracking 方法，模擬海面上油污擴散與傳輸的演變情況，未來將再進一步應用葡萄牙的 2D/3D VOILS 油污擴散模式，可較精確地描述近岸或港灣地區油污擴散與傳輸的演變情況。

謝誌

本研究係交通部港灣研究中心研究計畫「海域油污監測與擴散模擬技術研發(3/3)」(2016)之部份研究成果，承蒙交通部港灣研究中心經費補助使本研究成果更臻完善。此外，美國威廉與瑪麗學院維吉尼亞海洋研究所 Yinglong Joseph Zhang 教授在 SCHISM 模式應用上的協助，以及中山大學海洋環境工程系 尤皓正博士提供海氣象相關資料，謹致謝忱。

參考文獻

1. 董東璟、蔡政翰、陳盈智、顏志偉、馬名軍(2014) 應用岸基微波雷達量測近岸海流空間分布，*航測及遙測學刊*，第 18 卷，第 193-1204 頁。

2. Azevedo, A., Oliveira, A., Fortunato, A., Zhang, J., Baptista, A.M. (2014) "A cross-scale numerical modeling system for management support of oil spill accidents," *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 80, pp. 132-147.
3. Fay, J.A. (1969) "The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea, in Oil on the Sea," D.P. Hoult, Editor, Plenum Press, New York, pp. 53.
4. Fingas, Merv, ed. (2014) "Handbook of oil spill science and technology," John Wiley & Sons.
5. ITOPF, (2008) "The International Tanker Owners Pollution Federation Limited Handbook," pp. 54. <www.itopf.com/information-services/publication-s/documents/itopfhandbook2008.pdf>.
6. Mellor, G.L., Yamada, T. (1982) "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems," *Rev. Geophys.* Vol. 20, pp. 851–875.
7. Rodi, W. (1984) "Turbulence models and their applications in hydraulics: a state of the art review," *International Association for Hydraulics Research*, Delft, The Netherlands.
8. Umlauf, L., Burchard, H. (2003) "A generic length-scale equation for geophysical turbulence models," *J. Mar. Res.*, Vol. 6, pp. 235–265.
9. Wilcox, D.C. (1998) "Reassessment of scale determining equation for advance turbulence models," *AIAA J.*, Vol. 26, pp. 1299–1310.
10. Zhang, Y., Baptista, A.M. (2008) "SELFE: a semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation," *Ocean Modelling*, Vol. 21, pp. 71–96.
11. Zhang, Y. J., Ateljevich E., Yu H. C., Wu C. H., Yu J. C.S. (2015) "A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model," *Ocean Modelling*, Vol. 85, pp. 16–31.