



مدلسازی عددی دو بعدی سرنوشت آلودگی نفتی در آب های ساحلی با استفاده از نرم افزار Telemac-2D

پویا ابوسعیدی^۱، مهناز قائینی حصاروئی^{۲*}، احسان فدائی کرمانی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۳

مقاله پژوهشی

چکیده

در این تحقیق به منظور شبیه سازی حرکت لکه نفتی از روش عددی ترکیبی اولری-لاگرانژی استفاده شده است. معادلات حاکم بر پدیده با استفاده از مدل جریان دو بعدی افقی Telemac-2D حل شدند. در این مدل از روش اجزاء محدود برای گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان آب، استفاده می شود. در مرحله شبیه سازی فرایند جابجایی، سرعت لکه نفتی که وابسته به سرعت جریان و سرعت باد است، توسط مدل انتقالی خالص محاسبه شد. سپس این سرعت در مدل احتمالاتی انتقال-انتشار با رویکرد لاگرانژی بکار رفته است. در نهایت موقعیت لکه نفتی در زمان های مختلف تعیین شده است. لازم به ذکر است که در این مرحله با فرض آرام بودن آب های ساحلی، از اثر امواج صرف نظر شده است. در مرحله شبیه سازی فرایند های هواشناسی، ابتدا به منظور مدل سازی پهن رفت به عنوان مهمترین عامل از مدل Fay با فرض اثرگذار بودن نیروهای جاذبه و ویسکوزیته استفاده شد. در ادامه با محاسبه مساحت ذرات، معادله تبخیر حل گردید. نتایج نشان داد که معادله نهایی تبخیر به صورت تابعی از دمای نقطه جوش و نوع نفت می باشد. بر اساس مقایسه نتایج بدست آمده در این مطالعه، با نتایج Goeury و همکاران، مدل دو بعدی حاضر در مساله تبخیر گازوئیل دارای $RMSE=0.414$ و در مساله انحلال $RMSE=2.97$ است که بیانگر دقت مناسب و قابل قبول این روش می باشد.

واژه های کلیدی: انتقال آلودگی نفتی، روش اولری-لاگرانژی، سرنوشت لکه نفتی، مدل عددی

^۱فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه های هیدرولیکی، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان (Email: pooya9743@gmail.com)

^{۲*}دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان (Email: mghaeini@uk.ac.ir) (نویسنده مسئول)

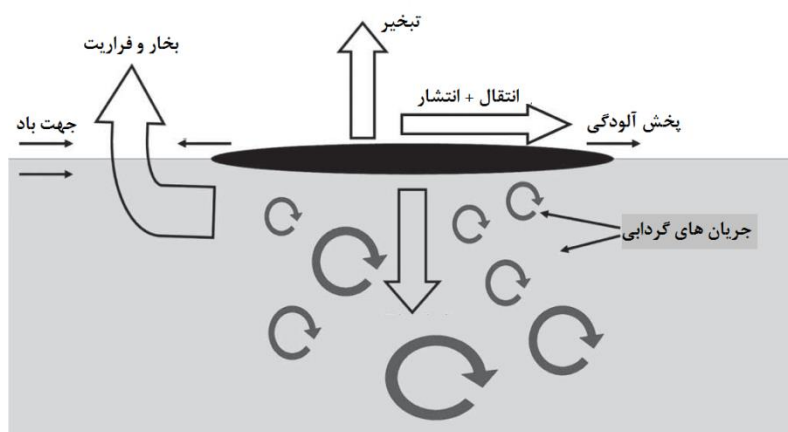
^۳فارغ التحصیل دکتری مهندسی عمران-سازه های هیدرولیکی، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان (Email: e.fadaei@eng.uk.ac.ir)



مقدمه

نفت شامل ترکیب، تبخیر، پخش نفت، تداخل لکه نفتی با آب دریا و تشکیل قطرات نفت، پراکندگی قطرات نفتی در ستون آب، پراکندگی لکه های کوچک روی سطح آب و انتقال و انتشار لکه های نفتی به واسطه نیروهای هیدرودینامیکی می باشد. شکل ۱ فرآیند ایجاد شده بر روی لکه های نفتی را به صورت کلی نشان می دهند (Goery et al., 2014) و (Mackay and Matsugu, 1973)

بررسی کیفیت آب در مناطق ساحلی از نقطه نظر سلامت اکوسیستم ساحلی و بهداشت آب آشامیدنی از اهمیت فراوانی برخوردار است. با توجه به استخراج نفت و احتمال روز افزون نشدن آن به ویژه در آب های آزاد، پیش بینی گسترش آلودگی در مناطق ساحلی از دغدغه های مهندسی این حوزه می باشد. اساس پیش بینی حرکت نفت و پخش آلودگی های ناشی از آن، مدل ریاضی می باشد. پدیده های اصلی موثر بر پیش بینی نشر



شکل (۱): فرآیند ایجاد شده بر روی یک لکه های نفتی در دریا (Goery et al., 2014)

نفتی مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحقیق خود با بهره گیری از روش دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی عددی نحوه پخش آلودگی های نفتی پرداختند. در تحقیقی توسط Lavine و همکاران (2019) تاثیر تغییرات تراز آب دریا بر نحوه پخش و انتقال آلودگی های نفتی مورد بررسی قرار گرفت. آنها با مدل سازی توسط نرم افزار Telemac-2D نحوه پخش آلودگی نفتی را شبیه سازی نمودند.

شبیه سازی ها و مدل سازی های عددی، در واقع مسیر یابی معکوس لکه نفتی جهت پیدا کردن مکان و زمان شروع ریزش نفت به آب و جلوگیری از ادامه نشدن می باشد (Simecek-Beatty and Lehr, 2016). در حال حاضر، بهترین حدس محققان برای محل تقریبی نشتن آلودگی، بصورت یک پیش بینی واحد نیست، بلکه به علت وجود متغیر های زیاد به صورت یک پیش بینی ترکیبی ارائه می شود که برای اجرای هر مدل از شرایط

در سال های اخیر تحقیقات متعددی جهت بررسی منشاء آلودگی های نفتی صورت پذیرفته است. Zhang و همکاران (2011) با بهره گیری از تصاویر هوایی و ماهواره ای و با استفاده از تکنیک های پردازش تصویر، به بررسی و پایش سرنوشت آلودگی های نفتی در بستر دریا ها پرداختند. Maslo و همکاران (2014) با استفاده از مدل Lattice Boltzmann به شبیه سازی نشتن و پخش آلودگی های نفتی در مقیاس بزرگ پرداختند. نتایج حاصل از مدل از مطابقت قابل قبولی در قیاس با تصاویر ماهواره ای برخوردار بود. De Padova و همکاران (2017) به بررسی و پایش آلودگی های نفتی با استفاده از مدل های نوسان نفت و مشاهدات سنجش از دور پرداختند. ایشان مطالعات خود را پیرامون دریای بالتیک که در سال ۲۰۰۳ با پدیده نشتن نفت در ساحل مواجه شده بود، انجام دادند. Xu و همکاران (2019) نقش جریان های گردابی را در نحوه پخش آلودگی های

از معادلات مذکور در راستای عمق انتگرالگیری می شود. در این مطالعه روابط هیدرودینامیک حاکم بر جریان دو بعدی افقی، از مدل Telemac-2D میانگین گیری شده در عمق استخراج می شود. لازم به ذکر است که این مدل توسط آزمایشگاه ملی هیدرولیک و محیط زیست، بخش تحقیق و توسعه الکترونیک فرانسه^۲ به صورت آزاد در اختیار عموم قرار گرفته است. معادلات هیدرودینامیک ارائه شده به شرح زیر است:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huu) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + hF_x + \nabla \cdot (hv_e \vec{v}(u)) \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hvv) = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + hF_y + \nabla \cdot (hv_e \vec{v}(v)) \quad (3)$$

که در روابط بالا x و y بیانگر جهت پارامترها در مختصات کارتزین، t زمان، u و v مولفه های افقی سرعت میانگین گیری شده در عمق، v_e پخشیدگی موثر که بیانگر ویسکوزیته آشفته میانگین گیری شده در عمق (v_t) است. و h عمق آب، Z_s ارتفاع سطح آزاد آب و F_x و F_y نیروهای خارجی هستند (مانند اصطکاک).

انرژی جنبشی متلاطم میانگین گیری شده در عمق (k) و شدت اتلاف آن (ε) با مدل تلاطمی $k-\varepsilon$ به صورت زیر ارائه می گردد (Goeury et al., 2014):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{1}{h} \nabla \cdot \left(h \frac{v_t}{\sigma_k} \vec{v}(k) \right) + P - \varepsilon + P_{kv} \quad (4)$$

اولیه متفاوتی استفاده می شود، که نهایتاً دسته ای از جواب ها با بیشترین احتمال را مشخص می کند (Dominicis et al., 2015). به عنوان مثال دریای Bohai در چین، به علت وجود سکوه های نفتی متعدد و همچنین تردد زیاد نفت کش ها، یکی از مناطق پرخطر نشت آلودگی نفتی است. در این منطقه لکه های نفتی در صورت نشت به وسیله سنسور های کنترل از راه دور و عکس های هوایی تشخیص داده می شوند. اما تعیین منشأ این لکه ها دشوار است (Yu et al., 2016). معمولاً از روش پیش بینی موج hindcast برای یافتن منشأ لکه ها استفاده می شود. جریان آب سطحی، جریان باد و گام تصادفی^۱ پارامتر های اصلی روش hindcast هستند و دقت گام تصادفی تأثیر قابل توجهی در نتایج این مدل دارد (Yu et al., 2016). در مطالعه حاضر از روش عددی ترکیبی اولری-لاگرانژی به منظور شبیه سازی حرکت و ارزیابی سرنوشت لکه نفتی استفاده شده است. برای حل معادلات جریان شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم دو بعدی افقی از روش اولری و برای حل معادلات جا به جایی آلودگی نفتی، از روش لاگرانژی استفاده شده است.

روش انجام تحقیق

معادلات حاکم بر مساله مدل سازی فرایند پایش آلودگی های نفتی در برگزیده چند دسته معادلات مختلف شامل: معادلات جریان، معادلات انتقال-انتشار (معادلات جا به جایی) و معادلات ناشی از تأثیر عوامل جوی می باشد در شکل ۲ فلوجارت روند مدل سازی عددی نشان داده شده است.

معادلات جریان

معادلات حاکم بر جریان در حالت کلی معادله پیوستگی و معادلات مومنتوم سه بعدی می باشد. با فرض آنکه از تغییرات پارامترهای هیدرودینامیکی در راستای عمق جریان صرف نظر گردد،

^۲National Hydraulics and Environment Laboratory, a department of Electricité de France's Research and Development

^۱ random walk



نفی در سطح آب استفاده می شود. انتقال لکه نفتی در سطح آزاد آب تحت تاثیر سرعت جریان آب و سرعت باد می باشد (GoEURY et al., 2014).

$$u_{oil} = u_c + \beta u_w \quad (9)$$

در رابطه بالا u_{oil} بردار سرعت لکه نفت، u_c بردار سرعت جریان در سطح آزاد، u_w بردار سرعت باد در بالای سطح و β ضریب تاثیر سرعت باد هستند. به منظور تخمین سرعت جریان در سطح آزاد می توان از پروفیل توزیع قائم لگاریتمی بصورت زیر استفاده نمود:

$$u_c = u \left(1 + \frac{1}{k} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \right) \quad (10)$$

در رابطه بالا k ثابت ون کارمن است ($k=1$). نیروی وارد بر جسم جامد شناور با سرعت جریان ثابت بصورت زیر است:

$$F = \frac{1}{2} \rho S C_d |U|U \quad (11)$$

با اعمال قانون دوم نیوتن در شرایط دائمی به ذره ای که تحت اثر جریان و باد انتقال می یابد، می توان ضریب β را به صورت زیر تقریب زد (TkalicH and Chao, 2001).

$$\beta = \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} \cong 0.036 \quad (12)$$

که ρ_a چگالی هوا و ρ_w چگالی آب هستند.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} &= \frac{1}{h} \nabla \cdot \left(h \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \vec{\nabla}(\varepsilon) \right) \\ &+ \frac{\varepsilon}{k} [C_{1\varepsilon} P - C_{2\varepsilon} \varepsilon] \\ &+ P_{\varepsilon v} \end{aligned} \quad (5)$$

$$P = v_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \quad (6)$$

$$P_{kv} = C_k \frac{u_*^3}{h} \quad (7)$$

$$P_{\varepsilon v} = C_\varepsilon \frac{u_*^4}{h^2} \quad (8)$$

که u_* سرعت برشی کف، $C_k = (1/\sqrt{C_f})$ و $C_\varepsilon = 3.6 (C_{2\varepsilon} \sqrt{C_\mu}) / (C_f^{3/4})$ ضریب اصطکاک بدون بعد است.

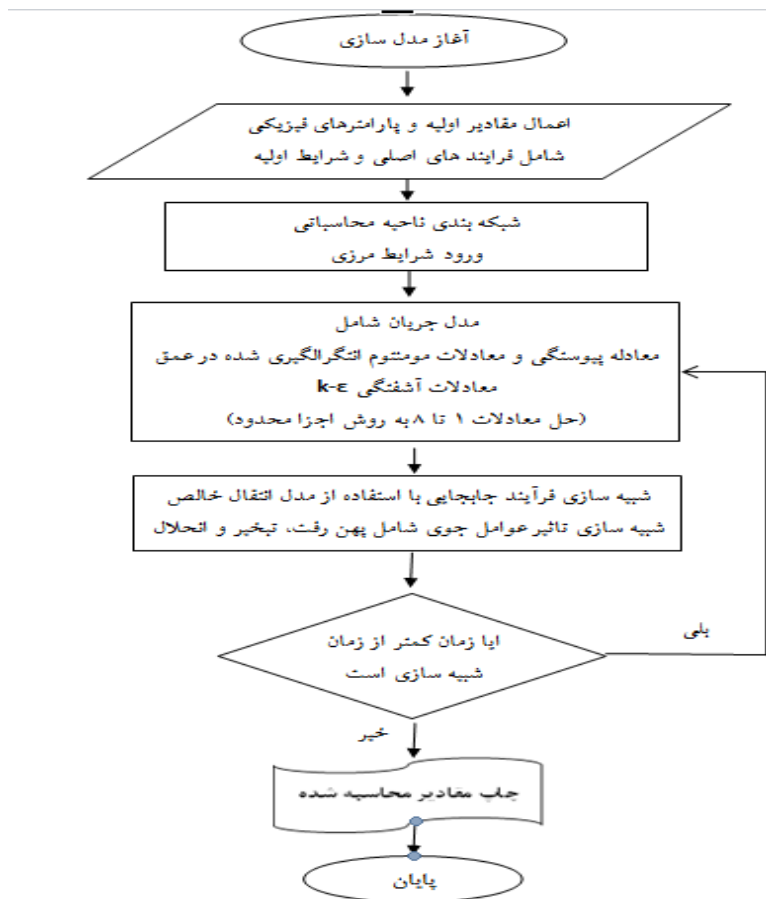
و $v_t = C_\mu (k^2/\varepsilon)$ ، $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ، $C_\mu = 0.09$ ، $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ، $\sigma_\varepsilon = 1.3$ و $\sigma_k = 1$ می باشند.

Telemac-2D سیستم معادلات ۱ تا ۸ را با روش اجزا

محدود و شبکه بندی مثلثی حل می نماید. همچنین این مدل توانایی در نظر گرفتن اثرات انتشار امواج، اصطکاک کف، تاثیر نیروی کریولیس، جریان فوق بحرانی، جریان رودخانه ای و اقیانوسی را دارد.

معادلات جابجایی

معادلات جابه جایی در واقع همان معادلات انتقال - انتشار بوده که به منظور شبیه سازی جابه جایی لکه



شکل (۲). فلوچارت روند حل مدل عددی

که مدل انتقال آلودگی حاضر از اجزا گسسته تشکیل شده است، بایستی برای استفاده در معادلات لاگرانژی رابطه (۱۳) را به شکل جدیدی تبدیل نمود. به عنوان اولین قدم در تبدیل معادله، $C(X,t)$ را به صورت تابع احتمالی $P(X,t)$ نوشته می‌شود، که P احتمال یافتن ذره‌ای از آلودگی در موقعیت X و زمان t می‌باشد. بنابراین تغییر جمله انتشاری معادله ۱۳ به صورت رابطه فوکر-پلنک^۲ خواهد بود:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \left[\mathbf{u} - \frac{1}{h} \vec{v} \left(\frac{h v_t}{\sigma_c} \right) \right] \nabla P + \nabla \cdot \left(\frac{v_t}{\sigma_c} \vec{v} P \right) \quad (14)$$

اثرات آشفتگی جریان باعث می‌شود که حرکت ذرات نفت درون آب بصورت یک فرایند تصادفی باشد. لذا بایستی از رویکردی آماری برای شبیه‌سازی استفاده نمود. فرم غیر بقای معادله انتقال- انتشار به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \vec{v}(C) = \frac{1}{h} \nabla \cdot \left(\frac{h v_t}{\sigma_c} \vec{v} C \right) \quad (13)$$

که در رابطه فوق، C غلظت متوسط‌گیری شده در عمق، σ_c عدد اغتشاش اشمیت^۱ برابر با ۰/۷۲ و v_t لزجت اغتشاشی است.

هرچند که معادله فوق برای مدل‌سازی انتقال و پراکندگی آلودگی پیوسته بسیار کارا است، اما از آنجا

² Fokker-Planck

¹ turbulent Schmidt number



فازی ترمودینامیک به صورت زیر قابل ارائه است
(Stiver and Mackay, 1984).

$$\frac{dm_i}{dt} = -K_{evap} A_p \frac{P_i m_i}{\sum_j (m_j / M_{wj}) RT} \quad (17)$$

$$P_i = \exp \left[\frac{\Delta H_i}{RT_{Bi}} \left(1 - \frac{T_{Bi}}{T} \right) \right] \quad (18)$$

که m_i جرم عنصر i ام، k_{evap} ضریب انتقال جرم تبخیر، P_i فشار تبخیر عنصر i ام، M_{wj} جرم مولی عنصر i ام، R ثابت جهانی گاز، T دمای محیط، T_{Bi} نقطه جوش عنصر i ام، ΔH_i آنتالپی مولی عنصر i ام هستند. برای تعیین آنتالپی مولی می توان از رابطه ذیل استفاده نمود (Boethling et al., 2000):

$$\Delta H_i(T) = T_{Bi} R \ln(82.06 T_{Bi}) \left(3 - 2 \frac{T}{T_{Bi}} \right)^m \quad (19)$$

$$m = 0.4133 - 0.275 \frac{T}{T_{Bi}} \quad (20)$$

با جرم مولی بدست آمده از رابطه (۱۹۹۷) Jones و با استفاده از رابطه قبل، تمامی مولفه‌ها را می توان بر اساس نقطه جوش عنصر i ام بیان نمود. بنابراین پارامترهای الگوریتم تبخیر، نقطه جوش عناصر T_{Bi} و ترکیب نفتی اولیه خواهد بود، که با منحنی تقطیر و ضریب انتقال جرم تبخیر (k_{evap}) محاسبه می شوند. در

جواب احتمالی^۱ رابطه فوق برای بردار موقعیت ذرات هیدروکربن $X(t)$ بر اساس معادله Langevin^۲ بدست می آید:

$$X(t + \delta t) = X(t) + \left[\mathbf{u}_{oil} - \frac{1}{h} \vec{v} \left(\frac{h v_t}{\sigma_c} \right) \right] \delta t + \sqrt{\frac{2v_t}{\sigma_c}} \delta t \xi(t) \quad (15)$$

که δt گام زمانی و $\xi(t)$ برداری با مولفه‌های تصادفی استاندارد شده مستقل هستند و مقادیر h و v_t با مدل Telemac-2D محاسبه می شوند.

معادلات ناشی از تاثیر عوامل جوی

پهن رفت یکی از مهمترین فرآیندهای ناشی از عوامل جوی است. در حقیقت تمام پدیده‌های انتقال جرم که در مدت نشست نفت صورت می پذیرد، تحت تاثیر مساحت لکه نفتی می باشد. در مدل سازی حاضر از رابطه Fay برای بیان پهن رفت با صرف نظر کردن از نیروی اینرسی و کشش سطحی بصورت زیر استفاده شده است (Fay, 1969).

$$S = 0.96 \pi \left(\frac{\Delta g V_0^2}{\sqrt{v_0}} \right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{t} \quad (16)$$

در رابطه بالا، S تمام سطح نفت، ρ_w - ρ_o / ρ_o حجم اولیه نفت، v_0 لزجت سینماتیک، g شتاب گرانش و t زمان است.

تبخیر مهمترین فرآیند انتقال جرم است که نفت پس از نشست، با آن مواجه است. طبق گزارش انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE, 1996) محصولات تصفیه شده و خام نفتی در مدت تنها چند روز بیش از ۷۵٪ حجم خود را از دست می دهند. درک درست فرآیند تبخیر از نقطه نظر پاکسازی و همچنین توسعه مدل پیش بینی مهم است. شبیه سازی فرآیند تبخیر در این مطالعه بر اساس رویکرد شبه عنصر انجام پذیرفته است. تغییر در جرم عنصر i ام نفتی بر اساس جمله شار مولاریته Stiver و Mackay (1984) و معادله تعادل

² Langevin equation

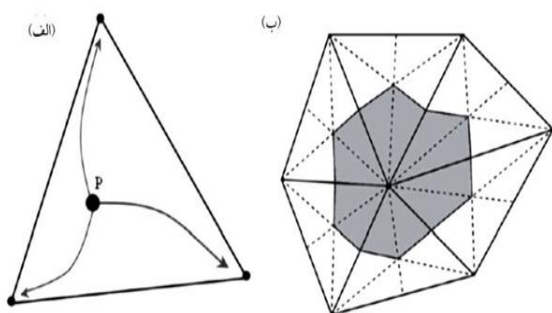
¹ Stochastic solution

در رابطه فوق C بیانگر غلظت در هر گام زمانی و مکانی،
 V حجم گره و S سطح نفت می باشد.

تبدیل روابط از روش لاگرانژی به اولری

همانگونه که قبلاً ذکر شد مدل Telemac-2D بر اساس روش اجزا محدود برنامه‌ریزی شده، بدین مفهوم که متغیرها را در گره‌های شبکه‌بندی شده تعریف می‌کند. اگر جزء P درون یک المان در نظر گرفته شود (شکل ۳) باید جرم حل شده این جزء، بین گره‌های المان توزیع گردد. بنابراین برای محاسبه ضریب α در هر گره j ، مساحت هر جزء A_p بین گره‌های المان موضعی با استفاده از رابطه زیر توزیع می‌گردد (Goeyry et al., 2014):

$$A_p S_{HP}(j) = A_r(j) \quad (24)$$



شکل (۳). جزء P درون المان (الف) و مساحت گره (ب)
(Goeyry et al., 2014)

در رابطه بالا، $S_{HP}(j)$ مختصات گرانیگاهی گره j ام و $A_r(j)$ مساحت نسبی ذره در همان گره هستند. مساحت هر گره را می‌توان با رسم میانه‌های المان‌های مثلثی اطراف

گره بدست آورد. جرم حل شده PAH i در ستون آب برای هر گره j بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$mass_{diss}^{n+1} = [1 - \exp(\alpha_j \delta t)] (S_i X_i^i - C_i^n) \quad (25)$$

مطالعه حاضر این ضریب بر اساس تئوری Mackay و Matsugu در سال (۱۹۷۳)، محاسبه می‌شود.

در فرایند انحلال نفت تنها ۱٪ جرم اولیه آن در آب حل می‌شود. بر اساس خاصیت‌های فیزیکی-شیمیایی تنها PAH ها قابل حل در آب هستند. همچنین براساس تئوری Whitman (1923)، ارزیابی غلظت ماده حل شونده با معادله دیفرانسیل مرتبه اول قابل ارائه است:

$$\frac{dC_i}{dt} = \alpha(S_i X_i - C_i) \quad (21)$$

به طوری که S_i حلالیت پذیری عنصر i ام در آب، X_i بخش مولاریته عنصر i ام و $\alpha = (k_{diss} A_p)/V$ که k_{diss} ضریب انتقال جرم انحلال، A_p سطح ذره و V حجم گره هستند. با حل معادله قبل، غلظت PAH های حل شده در ستون آب در گام زمانی $t(C_i^{n+1})$ به عنوان تابعی از غلظت در گام زمانی قبلی $(t - (C_i^1))$ به صورت زیر خواهد بود:

$$C_i^{n+1} = S_i X_i^n + [C_i^n - S_i X_i^n] \exp(-\alpha \delta t) \quad (22)$$

در این رابطه ضریب انتقال جرم حل شده باید بر اساس پیشنهاد Yapa و Shen در سال ۱۹۹۴ کالیبره شود. با استفاده از رابطه زیر جرم حل شده در زمان $t = (n + 1)\delta t$ برای عنصر i ام استنتاج می‌گردد:

$$mas_i^{n+1} - mas_i^n = [1 - \exp(-\alpha \delta t)] (S_i X_i^n - C_i^n) V_j \quad (23)$$

گره، و اتصال مرکز هر المان به المان مجاور و در نهایت ایجاد یک چندضلعی (ناحیه هاشورخورده در شکل ۳ (ب)) محاسبه نمود. همچنین با ضرب مساحت در عمق آن گره^۲، حجم گره V قابل محاسبه خواهد بود. با انجام این مرحله، می‌توان ضریب α_j را برای هر

² Depth of the node

¹ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons



موجود بوده و ضریب انتقال جرم حل شده (K_{diss}) که باید کالیبره گردد.

واسنجی^۱ مدل

همان گونه که در بخش قبل ملاحظه شد ضریب انتقال جرم حل شده نیازمند واسنجی است. این عمل در ابتدا نیازمند دسته‌بندی PAHها بر اساس تعداد حلقه‌های بنزوئیک به ۴ دسته شبه عنصر است. جدول (۱) بر اساس نتایج ارائه شده در (Tkalic and Chao, 2001) بیانگر ضرایب کالیبره شده انتقال جرم حل شده K_{diss} است. مقدار ضریب بین $۱۰^{-۵} \times ۱/۱۵$ تا $۱۰^{-۷} \times ۶/۵$ ms^{-1} بیان شده است. اما Goery در (۲۰۱۴) بیان می‌کند، در حالی که ضریب کالیبره شده انتقال جرم حل شده، برای نفت سفید^۲ و سوخت سنگین^۳ در این بازه جای دارند اما مقدار این ضریب برای نفت معمولی^۴ تقریباً ۴ برابر بزرگ

و کل مقدار جرم حل شده برای هر عنصر جزء i ام به صورت:

$$mass_{i_{disstot}}^{n+1} = \sum_{j=0}^{num_{node}} mass_{i_{diss}}^{n+1} \quad (26)$$

خواهد بود. بنابراین، غلظتی که در گام زمانی t در گره j به دلیل فرآیند انحلال اضافه می‌شود، بصورت زیر خواهد بود:

$$C_j^{n+1} = C_j^n + \frac{mass_{i_{diss}}^{n+1}}{V_j} \quad (27)$$

پارامترهای مهم برای الگوریتم انحلال عبارت‌اند از قابلیت حل عنصر i در آب (S_i) که در ادبیات فنی

جدول (۱). ضرایب کالیبره شده انتقال جرم حل شده $K_{diss} ms^{-1}$ (Goery et al., 2014)

دسته اول	دسته دوم	دسته سوم	دسته چهارم	نوع ماده
دارای ۲ حلقه PAH	دارای ۳ حلقه PAH	دارای ۴ حلقه PAH	دارای ۵ حلقه PAH و بیشتر	نفت سفید
$۱/۲۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۵/۶۳ \times ۱۰^{-۵}$	۲×۱۰^{-۵}	$۱/۳۷ \times ۱۰^{-۵}$	نفت معمولی
$۲/۵۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۵۷ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۴۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۲۷ \times ۱۰^{-۵}$	سوخت سنگین
$۵/۵۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۶/۵۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۴۷ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۳۳ \times ۱۰^{-۵}$	

اطلاعات نشت نفت در آب‌های آزاد کمتر به صورت دقیق جمع آوری شده است مگر جاهایی که عکس هوایی، محل نشت را به خوبی نشان می‌دهد. در دهه

صحت سنجی نتایج حاصل از مدل
صحت سنجی فرآیند انتقال

⁴ Home heating oil

¹ calibration

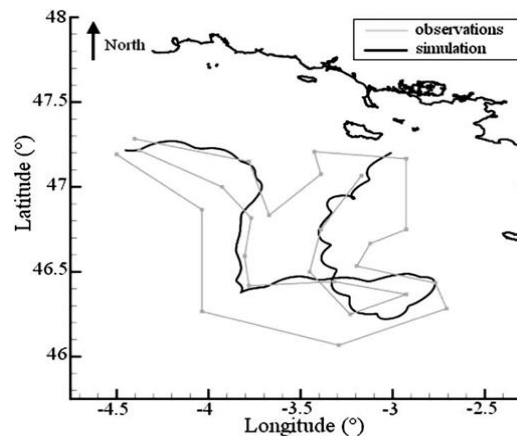
² Kerosene

³ Heavy fuel

همکاران، با نتایج هوایی، در شکل ۴ مقایسه شده است و خروجی آن بیانگر تطابق مناسب است، به جز ابتدای مسیر حرکت که حتی تا 16 km فاصله، دارد) که به دلیل مشخص نبودن زمان دقیق نشت نفت به دریا و صرف نظر کردن از اثر موج می باشد (Goeury et al., 2014).

۱۹۹۰ یک نفتکش به نام Erika در دریای غرب فرانسه غرق شد که باعث سرازیر شدن ۱۵۰۰۰ تن نفت به دریا شد.

Goeury و همکاران با مقایسه بین مسیر شبیه‌سازی شده و مشاهدات، نشان داد که مدل انتقال آلودگی تطابق خوبی با یک رخداد حقیقی دارد. پیش‌بینی عددی مسیر حرکت مرکز سطح لکه توسط Goeury و



شکل (۴). مسیر حرکت لکه نفتی (Goeury et al., 2014)

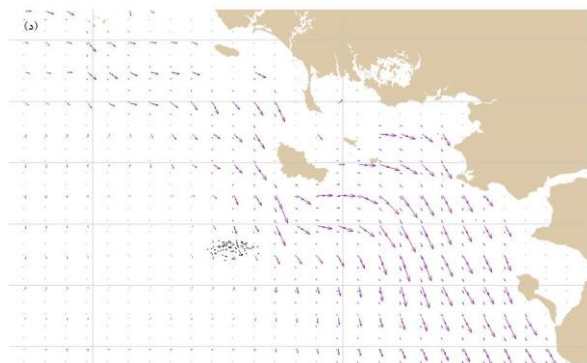
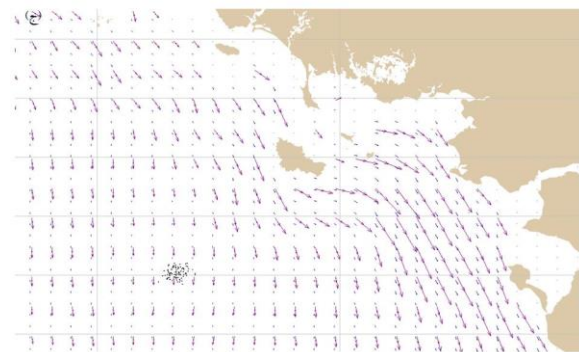
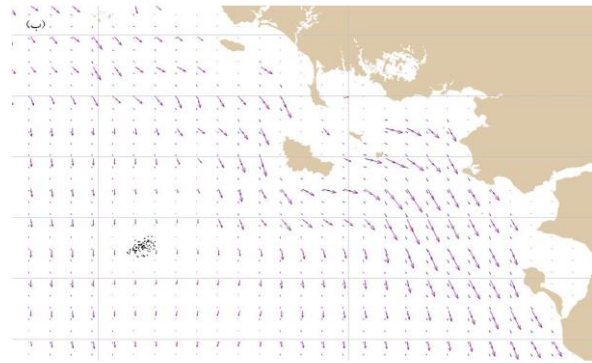
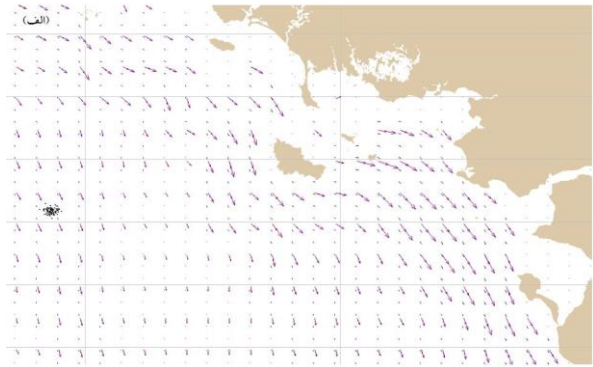
مدل Goeury و همکاران، بیان کننده اثر قابل توجه باد بر شبیه‌سازی فرایند جابجایی می باشد.

صحت سنجی فرآیند پهن رفت

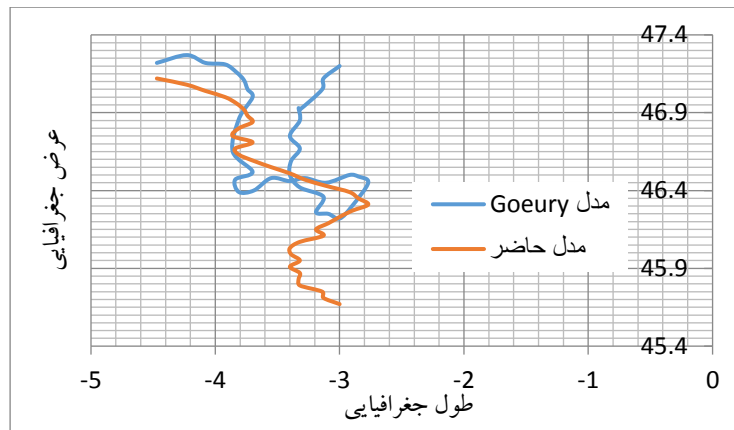
در این بخش از جواب‌های شبیه‌سازی عددی Goeury و همکاران (۲۰۱۴) برای صحت سنجی مدل حاضر استفاده شده است. آزمایش انجام شده توسط Osamor و Ahlert (۱۹۷۸) مبنای صحت سنجی شبیه‌سازی در مدل Goeury و همکاران (۲۰۱۴) بوده است. در این آزمایش 25 ml سوخت سنگین با مشخصات $\rho_0 = 951\text{ kg/m}^3$ و $v_0 = 0.0028\text{ m}^2/\text{s}$ به داخل مخزن بزرگ مستطیل شکل به ابعاد $1/5 \times 1\text{ m}$ حاوی آب ریخته شد. تغییرات سطح لکه نفتی با دوربینی ثبت گشت که توانایی اندازه‌گیری افزایش سطح لکه را دارد. گام زمانی $\Delta t = 0.5\text{ s}$ و گام مکانی $\Delta x = 0.015\text{ m}$ برای شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شد (Osamor and Ahlert, 197)

در این مطالعه به علت عدم دسترسی به اطلاعات سرعت باد منطقه‌ای، در ارزیابی سرعت نفت از این پارامتر و همچنین اثر موج صرف‌نظر می‌گردد. با آنالیز حساسیت ابعاد شبکه محاسباتی، مش مورد استفاده در مدل عددی متشکل از حدود ۴۵۰۰۰ گره و ۷۵۰۰۰ المان مثلثی در نظر گرفته شده است. در خط‌های مرزی غیر ساحلی، ارتفاع سطح آزاد و یا سرعت، تحت تاثیر شرایط جزرومدی است. و برای خط ساحلی شرایط مرزی به صورت یک دیوار صلب در نظر گرفته شده و در شکل ۵ نتایج مدل حاضر را نشان می‌دهد.

پیش‌بینی عددی مسیر حرکت مرکز سطح لکه با مدل حاضر و مدل Goeury و همکاران در شکل ۶ مقایسه شده است. با توجه به نمودار ارائه شده، می‌توان دریافت که نتایج دارای اختلاف معناداری می‌باشند. همچنین محاسبه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE=0.5688) و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE=0.5417) برای نتایج مدل حاضر و



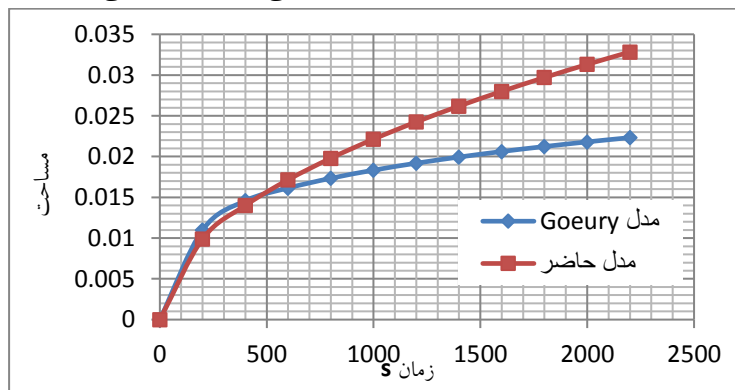
شکل (۵). مدل سازی فرایند انتقال در مدل حاضر، (الف) ۲ ساعت پس از آزاد سازی، (ب) ۴ ساعت پس از آزاد سازی، (ج) ۸ ساعت پس از آزاد سازی، (د) ۱۶ ساعت پس از آزاد سازی لکه نفتی.



شکل (۶). مقایسه شبیه‌سازی جابجایی مدل حاضر و مدل Goeury et al., 2014

در مدل سازی تحقیق حاضر با بهره بردن از رابطه Fay (1969) همانگونه که پیشتر ارائه شد، پهن‌رفت محاسبه شده است. بنابراین پهن رفت و در نتیجه شبیه‌سازی فرایند تبخیر این مدل با مدل Goeury متفاوت خواهد بود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی پهن رفت مدل حاضر با استفاده از روابط Fay و Goeury در شکل ۷ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود، اختلاف موجود به دلیل استفاده از رابطه Fay (رابطه ۱۶) در مدل سازی حاضر برای بیان پهن‌رفت با صرف نظر کردن از نیروی اینرسی و کشش سطحی، بوده است.

مدل Goeury و همکاران در ابتدا پهن‌رفت را بیشتر برآورد می‌کند بطوریکه بعد از ۲ دقیقه درصد خطای بین نتایج مدل و نتایج آزمایش ۶۵٪ می‌باشد، اما بعد از ۴ دقیقه درصد خطا به کمتر ۱۰٪ کاهش می‌یابد. این میزان اختلاف در ابتدای نشت می‌تواند به علت تدریجی بودن فرایند نشت (در مدت ۴۰ ثانیه) و نیز زیاد بودن اثر اینرسی باشد، اگرچه در مدل Goeury نشت بصورت آنی در نظر گرفته شده و از اثر اینرسی صرف نظر می‌شود.



شکل (۷). مقایسه نتایج شبیه‌سازی پهن‌رفت در مدل حاضر و مقایسه با مدل عددی Goeury et al., 2014

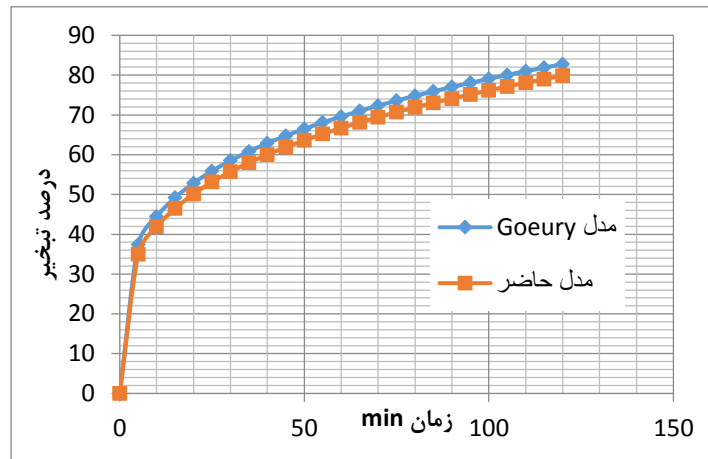
عددی حاضر به خوبی نتایج شبیه‌سازی عددی Goeury و همکاران را تأیید می‌کند و با آن مطابقت دارد. در این شبیه‌سازی گام زمانی $\Delta t = 1\text{ s}$ و $\Delta x = 0.02\text{ m}$ بوده و مقدار جذر میانگین مربعات خطا $RMSE=0.414$ بدست آمد، که می‌تواند به علت

صحت سنجی فرآیند تبخیر

به منظور صحت سنجی فرآیند تبخیر (رابطه ۱۷) از نتایج شبیه‌سازی عددی Goeury و همکاران (۲۰۱۴) استفاده می‌شود. شکل ۸ بیانگر مقایسه نتایج مدل حاضر و مدل Goeury و همکاران است. مدل



صرفنظر کردن از اثر کشش سطحی و نیروی اینرسی در مدل سازی پهن رفت باشد.



شکل (۸). مقایسه نتایج مدل حاضر برای شبیه سازی تبخیر گازوئیل با مدل Goeury et al., 2014

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر پیش بینی فرایندهای موثر پس از نشت نفت در آب، مورد بررسی قرار گرفته است. این فرایندها به صورت کلی شامل جابجایی و اثر عوامل جوی می باشند. در ابتدا برای شبیه سازی مدل افقی دوبعدی جریان انتگرال گیری شده در عمق آب های ساحلی، از مدل Telemac-2D که بر پایه روش اجزاء محدود استوار می باشد بهره برده شد. در مدل سازی از المان های مثلثی شکل برای شبکه بندی ناحیه حل استفاده شد. معادلات حاکم بر جریان در این مرحله شامل معادله پیوستگی، معادلات مومنوم و نیز به منظور پوشش اثر تلاطم آب های ساحلی، معادله آشفتگی $k-\epsilon$ می باشد. در مرحله شبیه سازی فرایند جابجایی، سرعت لکه نفتی که وابسته به سرعت باد و سرعت جریان بدست آمده از مدل جریان است، از مدل انتقالی خالص محاسبه شده است.

سپس سرعت لکه نفتی در مدل احتمالاتی انتقال-انتشار با رویکرد لاگرانژی بکاربرده شد و در نهایت موقعیت لکه نفتی در زمان های مختلف بدست آمد. لازم

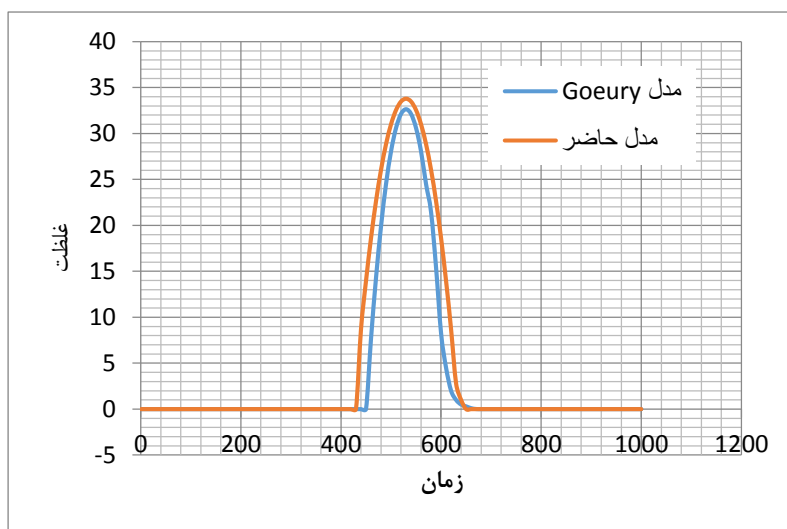
صحت سنجی فرآیند انحلال

Goeury و همکاران برای ارزیابی مدل عددی انحلال سوخت سنگین در آب، از مدل آزمایشگاهی رودخانه مصنوعی $VERI^1$ در دردمای ۲۰ سانتی-گراد با مشخصات $\rho_o = 950 \text{ kg/m}^3$ و $v_o = 44.65 \text{ mm/s}$ استفاده نمود. مقایسه نتایج مدل عددی ایشان برای تغییرات غلظت بر حسب زمان با نتایج آزمایشگاهی، نشان داد که مدل عددی غلظت سوخت سنگین حل شده را کمتر از میزان آزمایشگاهی برآورد می کند (Goeury et al., 2014). شبیه سازی حاضر با فرض ناچیز بودن اثر تبخیر نفت حل شده در آب، انجام شده است. که نتایج آن در نمودار زیر (شکل ۹) ارائه شده است. از این نمودار برای صحت سنجی مدل عددی استفاده می شود. با مقایسه مدل حاضر و مدل Goeury، مقدار RMSE برابر با ۲/۹۷ و خطای نقطه پیک ۳/۴٪ بدست می آید که همان گونه که پیشتر اشاره گردید این اختلاف ناشی از در نظر نگرفتن اثر تبخیر در مدل حاضر می باشد.

¹ Veolia Environnement Recherche et Innovation

با محاسبه Ap مبادرت به حل معادله تبخیر شد. در این مرحله مشخص گردید که معادله نهایی تبخیر به صورت تابعی از دمای نقطه جوش و نوع نفت می باشد. در ادامه شبیه سازی فرایند اثر عوامل جوی، مدل سازی انحلال را بر این اساس که حدود ۱٪ جرم اولیه نفت نشت شده در آب حل می گردد، با صرف نظر از اثر تبخیر نفت حل شده در آب صورت پذیرفت.

به ذکر است که در این مرحله با فرض آرام بودن آب های ساحلی از اثر موج، و همچنین به علت فقدان اطلاعات کافی از اثر باد نیز صرف نظر گردید. در شبیه سازی فرایند اثر عوامل جوی در ابتدا به منظور مدل سازی پهن رفت به عنوان مهمترین عامل اثر عوامل جوی (بعلت اثرگذاری مستقیم مساحت ذرات (Ap) بر سایر فرایندهای اثر عوامل جوی) از مدل Fay با فرض اثرگذار بودن نیروهای جاذبه و ویسکوزیته استفاده شد. در ادامه



شکل (۹). مقایسه نتایج غلظت شبیه سازی شده مدل حاضر با نتایج Goeury et al., 2014

برای فرایند تبخیر گازوئیل دارای خطای $RMSE=0.414$ و نیز برای انحلال دارای خطای $RMSE=2.97$ می باشد، که می تواند بیانگر دقت مناسب این روش در مطالعه مسائل انتقال آلودگی های نفتی باشد.

در این مرحله برای واسنجی ضریب انتقال جرم حل شده، از نتایج واسنجی Goeury استفاده شد. برای صحت سنجی نتایج مدل عددی این مطالعه، از نتایج صحت سنجی و همکاران استفاده گردید. نتایج حاصل از صحت سنجی مدل حاضر نشان داد که با توجه به مطابقت قابل قبول نتایج مدل عددی حاضر با نتایج Goeury و همکاران، رویکرد ترکیبی اولری- لاگرانژی،

منابع

- ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills, 1996. State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(11): 594-609.
- Boethling, R.S. and Mackay, D., 2000. *Handbook of Property Estimation Methods for Chemicals: Environmental Health Sciences*. CRC press.

- De Dominicis, M., Falchetti, S., Trotta, F., Pinardi, N., Giacomelli, L., Napolitano, E., Fazioli, L., Sorgente, R., Haley Jr, P.J., Lermusiaux, P.F. and Martins, F., 2014. A relocatable ocean model in support of environmental emergencies. *Ocean Dynamics*, 64(5): 667-688.
- De Padova, D., Mossa, M., Adamo, M., De Carolis, G. and Pasquariello, G., 2017. Synergistic use of an oil drift model and remote sensing observations for oil spill monitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(6): 5530-5543
- Fay, J.A. 1969, "The Spread of Oil Slick on a Calm Sea", Hoult, D.P.(Ed), *Oil on the Sea*. Plenum Press, New York, NY: 53-63.
- Goeury, C., Hervouet, J.M., Baudin-Bizien, I. and Thouvenel, F., 2014. A Lagrangian/Eulerian oil spill model for continental waters. *Journal of hydraulic Research*, 52(1): 36-48.
- Lavine, W., Jamal, M.H., Abd Wahab, A.K. and Kasiman, E.H., 2019. Effect of sea level rise on oil spill model drift using TELEMAC-2D. *Journal of Water and Climate Change*.
- Mackay, D. and Matsugu, R.S., 1973. Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 51(4): 434-439.
- Maslo, A., Panjan, J. and Žagar, D., 2014. Large-scale oil spill simulation using the lattice Boltzmann method, validation on the Lebanon oil spill case. *Marine pollution bulletin*, 84(1-2): 225-235.
- Osamor, F.A. and Ahlert, R.C., 1978. *Oil/water Separation: State-of-the-art (Vol. 1)*. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Industrial Environmental Research Laboratory.
- Simecek-Beatty, D., and Lehr, W. (2016) "Standard Handbook Oil Spill Environmental Forensics (Second Edition): 1015-1037.
- Stiver, W. and Mackay, D., 1984. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. *Environmental science & technology*, 18(11): 834-840.
- Tkalich, P. and Xiaobo, C., 2001, March. Accurate simulation of oil slicks. In *International Oil Spill Conference (Vol. 2001, No. 2, pp. 1133-1137)*. American Petroleum Institute.
- Whitman, W.G., 1923. The two-film theory of gas absorption. *Chem. Metall. Eng.*, 29, pp.146-148.
- Xu, J., Hao, Z., Wang, Y., Liu, J., Liu, G. and Zhang, Y., 2019, April. Modeling and numerical simulation of oil spill at different positions of blunt body. In *2019 3rd International Forum on Environment, Materials and Energy (IFEME 2019)*. Atlantis Press
- Yu, F., Li, J., Cui, S., Zhao, Y., Feng, Q. and Chen, G., 2016. A hindcast method to simulate oil spill trajectories for the Bohai Sea, Northeast China. *Ocean Engineering*, 124: 363-370.
- Zhang, B., Perrie, W., Li, X. and Pichel, W.G., 2011. Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR image. *Geophysical Research Letters*, 38(10).



Two dimensional numerical modeling of oil spill fate in coastal waters using Telemac-2D

Pooya Abousaeidi¹, Mahnaz Ghaeini-Hessaroeeyeh^{2*}, Ehsan Fadaei-Kermani³

Abstract

In this study, combined numerical Eulerian-Lagrangian method was used to simulate the movement of and assess the fate of oil spills. Momentum and continuity equations of two-dimensional horizontal flow and transport equations of oil pollution were obtained from Eulerian and Lagrangian methods and solved by a two-dimensional horizontal flow model, Telemac-2D. The finite element method was used for discretizing the governing equations. At the simulation stage of transport process, oil spill velocity which is depended on wind and current speed was computed from net transport model and then substituted into stochastic advection-diffusion model by Lagrangian approach. As a result, the location of the oil spill was provided at different times. It is necessary to point out that the effect of the waves was ignored based on the assumption that coastal currents were weak. At the simulation stage of weathering processes, Fay model was used to model spreading as the most important factor considering gravity and viscosity effects. Then, the surface area of the particles was calculated to solve the evaporation equation. Here, the final evaporation equation was described as a function of oil boiling point and its type. Comparison between results of the present study and Goeury et al. shows that Root Mean Square Error (RMSE) calculated for two-dimensional model in gasoline oil evaporation and dissolution problems are 0.414 and 2.97 respectively which is shown its reasonable accuracy.

Keywords: Oil pollution transport, numerical model, Euler-Lagrange method, fate of oil spill

¹ M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, PO Box 76169-133, Kerman, Iran (Email: pooya9743@gmail.com)

^{2*} Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, PO Box 76169-133, Kerman, Iran (Corresponding Author, Email: mghaeini@uk.ac.ir)

³ Ph.D. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, PO Box 76169-133, Kerman, Iran (Email: e.fadaei@eng.uk.ac.ir)