

Dor: [20.1001.1.20089597.1400.12.23.15.5](https://doi.org/10.1001.1.20089597.1400.12.23.15.5)

## مدل‌سازی انتشار آلودگی نفتی در مکان‌های مختلف رودخانه اروندرود – ایران

باقر بهروز<sup>۱</sup>، ابوالفضل دلبری<sup>۲\*</sup>، محمد فیاض محمدی<sup>۲</sup>

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران

۲. استادیار گروه فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸؛ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۰۴/۰۷)

### چکیده

انتقال و پخش لکه نفتی در محیط‌های آبی به دلیل فرآیندهای شیمیایی، فیزیکی و زیست‌شناسی است که خود وابسته به خصوصیات نفت، هیدرودینامیک، هواشناسی و شرایط محیط‌زیستی است. پخش و انتقال لکه‌های نفتی به دلیل جریان، امواج، اثر باد است. این تحقیق بر پایه وجود پالایشگاه نفت آبادان، وجود بنادر آبادان، خرمشهر و بصره در منطقه اروندرود صورت گرفته است. برای این منظور از مدل مایک ۲۱ استفاده شده است. این مدل عددی بر پایه روش اویلری توسعه داده شد و در آن برای مشخص کردن الگوی حرکت جریان آب از معادلات پیوستگی و تکانه (معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده در عمق) استفاده شده است. پس از واسنجی، مقایسه‌ی نتایج مدل با اندازه‌گیری‌های میدانی نشان می‌دهد مدل دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی نوسان سطح آب، جهت و سرعت جریان دارد. جهت شبیه‌سازی الگوی انتشار نفت، خروجی ماژول هیدرودینامیک به ماژول تحلیل نشت نفت اعمال شده است. ماژول تحلیل نشت نفت از روش لاگرانژی ذرات برای پیش‌بینی غلظت و ضخامت لکه نفتی استفاده می‌کند. سپس سه سناریو مکانی برای بررسی، عوامل محیطی فوق‌الذکر بر انتشار و پخش آلودگی نفتی طراحی و اجرا شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد چنان‌چه آلودگی هنگام شروع جزر به مدت سه ساعت در مقابل پالایشگاه نفت آبادان و پیچ خسروآباد رخ دهد و دبی متوسط رودخانه  $480 \text{ m}^3/\text{s}$  باشد، بدون اعمال باد، آلودگی به ترتیب پس از ۱۲۴ و ۸۵/۵ ساعت به خلیج فارس می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** اروندرود، جزر و مد، مدل هیدرودینامیک مایک ۲۱، پخش و انتشار آلودگی نفتی

## سرآغاز

انتشار آلودگی در محیط‌های آبی یک پدیده رو به افزایش است. نگرانی از عواقب محیطی و اقتصادی ناشی از انتشار آلودگی در محیط‌های آبی محققین را وادار کرده که در این راستا تحقیقات فراوانی انجام داده و مدل‌هایی را برای بررسی این پدیده و پیش‌بینی اثرات آن ارائه نمایند. یکی از روش‌هایی که می‌تواند در پیش‌بینی و حرکت لکه‌های نفتی و پاک‌سازی آن‌ها کمک شایانی کند، مدل‌سازی عددی است. در رابطه با انتشار آلودگی نفتی و مدل‌سازی جریان تاکنون مطالعاتی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات انجام شده زیر اشاره شده است.

(Qiao et al., 2018) با استفاده از مدل مایک ۲۱ به مدل‌سازی جریان و فرآیند انتقال شوری در تالاب ساحل پینک از مصب رودخانه لیائو پرداخت. نتایج این مطالعه نشان داد که سرعت جریان جزرومدی به طور قابل ملاحظه با تراکم پوشش گیاهی کاهش می‌یابد و همچنین پوشش گیاهی اثر ناچیزی بر عمق آب و شوری در آن ناحیه دارد و همچنین غلظت شوری با افزایش وردی آب به تالاب کاهش پیدا می‌کند.

(Bozkurtoğlu, 2017) با استفاده از مدل مایک ۲۱ به شبیه‌سازی نشت نفت در تنگه بوسفر پرداخته، در این تحقیق، منطقه مورد مطالعه ابتدا با استفاده از مش‌بندی نامنظم (مثلثی) شبکه‌بندی شده است و به همراه سایر پارمترهای محیطی به مدل جریان اعمال، و مدل جریان کالیبره شد. سپس خروجی مدل جریان به همراه سایر پارامترهای به ماژول تحلیل نشت نفت<sup>(۱)</sup> اعمال شد و در نهایت ۱۱۲ بار برای ۱۴ مکان بحرانی شبیه‌سازی انجام شد، نتیجه شبیه‌سازی نشان داده که اگر سرعت آب کم باشد نفت ریخته شده در ساعت‌های اولیه به ساحل کشورهای اروپایی می‌رسد پس بهتر است عملیات جمع‌آوری در همان ساعت‌های اولیه رخ دهد و همچنین در این تحقیق پی بردند بهترین شیوه برای کاهش اثرات نفت استفاده از ریزه‌ها و جاذب‌های نفتی است. (Ajiwibowo et al., 2017) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی عددی جریان جزرومدی در تنگه لاراتانکا در اندونزی برای استحصال انرژی تجدیدپذیر به تحقیق پرداخت، نتایج این تحقیق نشان داد که توافق بسیار خوبی بین داده‌های میدانی و خروجی مدل وجود داشته است، به گونه‌ای که میانگین خطای تراز جزرومدی و سرعت آب به ترتیب ۴/۰۴ و ۹/۷۹ درصد بوده است. همچنین دو مکان مناسب برای تولید برق در

باریک‌ترین بخش تنگه یافته شده است و در ادامه نتایج نشان داده است که تنگه لاراتانکا برای تولید برق با استفاده از جریانات جزرومدی مناسب است و نیز محاسبات نشان داد میزان برق تولید شده برای این دو نقطه در سال ۲۰۱۴ به ۵۲۲/۹۷۲ و ۳۲۴/۱۲ مگاوات است.

(Dong et al., 2018) از مدل مایک ۲۱ برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی شیمیایی در رودخانه‌های منتهی به ساحل و نواحی کم عمق ساحلی استفاده کردند، براساس نتایج شبیه‌سازی، یک روش برای آنالیز خطر حوادث آلوده‌کننده آب‌های ساحلی (CAWPRA)<sup>(۲)</sup> پیشنهاد داده‌اند. CAWPRA عبور خطر آلودگی‌های حاد از بالادست به پایین‌دست و همچنین به سمت مصب و نواحی کم عمق ساحلی را در حوضه آب‌های ساحلی در نظر گرفته است. این روش برای Beihai City (یک نمونه ساحل در حال توسعه اقتصادی) به کار گرفته شد تا ارزیابی دقیقی مبنی بر شبیه‌سازی خطرات آلودکننده آب از منابع زمینی (پالایشگاه‌ها، چاه‌های حفر شده در خشکی و ...) تهیه کنند، در این شبیه‌سازی یک حادثه نشت اسید هیدروکلریک از شرکت Wenkehayannng co. به عنوان مثال در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی با توجه به کیفیت آب مشخص می‌کند بعد از ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ساعت پیک غلظت اسید هیدروکلریک به ترتیب ۳/۷۲، ۰/۹۱، ۰/۷۵، ۰/۶۸ mg/l خواهد بود، پیشروی آلودگی براساس استانداردها کیفیت آب دریا به ترتیب به ابعاد ۵/۵۶، ۴/۹۲، ۹/۷۱، ۴۵/۰۱ km<sup>2</sup> خواهد رسید، اسید هیدروکلریک ۱۴ ساعت بعد از شروع نشت به جنگل‌های مانگروی دانگ جیانگ می‌رسد. نقشه نهایی به دست آمده از این شبیه‌سازی، ناحیه‌هایی که دارای خطر آلودگی بالا، پایین و متوسط‌اند، همچنین مناطقی که نسبت به آلودگی حساسیت بیشتری دارند را مشخص می‌کند. بندر ماردل پالاتا در آرژانتین بندری تجاری است و به واسطه ساخت‌وسازهایی که در آن انجام گرفته است به یک بندر گردشگری نیز تبدیل شده است؛ اما به علت وجود مشکلات ناشی از جریان‌های برگرداننده رسوب به کانال دسترسی این بندر، چند سالی است که ساخت‌وسازها متوقف شده است. بنابراین، در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی، سازوکارهای رسوب‌گذاری و فرسایش در این منطقه با استفاده از سیستم مدل‌سازی ریخت‌شناسی ساحلی مایک ۲۱/۳ شرکت DHI بررسی شد. این مدل ریخت‌شناسی ابتدا به کمک اندازه‌گیری میدانی یک ساله تغییرات عمق سنجی، واسنجی و

هیدرودینامیکی استفاده شده است. ماژول هیدرودینامیک<sup>(۳)</sup>، ماژول پایه‌ای در مدل جریان Mike 21 است. این مدل برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی در دریاچه‌ها، مصب‌ها، خلیج‌ها، مناطق ساحلی و دریاها و اقیانوس‌ها قابل استفاده است. این ماژول انتشار جریان و تراز سطح آب را به کمک رفتارهای هیدرولیکی حاکم بر بستر توپوگرافی، اثرات باد سطحی و شرایط مرزی شبیه‌سازی می‌کند. مدل‌سازی هیدرودینامیکی برای ارزیابی توزیع مکانی و جزرومدی جریان در منطقه مورد مطالعه انجام می‌شود. جریان در منطقه مورد مطالعه بیشتر افقی، بدون لایه‌بندی و سیستم به صورت دو بعدی همراه با عمق فرض شده است.

### مبانی تئوری و معادلات حاکم

مدل مایک بر پایه روش اویلری توسعه داده شده است و در آن برای مشخص کردن الگوی جریان از معادلات پیوستگی و تکانه (معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده در عمق)، معادلات (۱)، (۲) و (۳) استفاده شده است (DHI, 2012).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t}$$

(۱)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gh \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega_q - f v v_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

(۲)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gh \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] + \Omega_q - f v v_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

(۳)

کمیت‌های استفاده شده در این معادلات عبارتند از، عمق آب  $d(x, y, t)$ ، تراز سطح آب  $\zeta(x, y, t)$ ، تغییر زمانی عمق آب  $d(x, y, t)$ ، چگالی‌های شارژ در جهت‌های  $(x, y, p, q)$ ، شتاب گرانش  $g$ ، مقاومت شزی (واحد،  $(\frac{M^2}{s} C x y)$ )، نیروی کوریولیس وابسته به عرض جغرافیایی  $\Omega$ ، سرعت باد و مولفه‌های آن در جهت‌های  $v$ ؛ واحد آن  $v_x m/s$ ، فشار اتمسفر  $p_a$  چگالی

صحت‌سنجی شد و سپس، لایروبی مجدد و دسترسی به عمق مطلوب در کانال دسترسی با شبیه‌سازی کوتاه‌مدت مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل کمک قابل‌توجهی به فهم رفتار هیدرودینامیکی و رسوب‌شناختی در اطراف ورودی بندرگاه، و همچنین دستیابی به اطلاعات بالقوه مفید در جهت نگهداری و لایروبی کانال کرد. علاوه بر این منشا اصلی رسوبات ورودی به کانال دسترسی نیز مشخص شد (Cáceres et al., 2016).

اعتماد شهیدی و همکاران در سال ۱۳۹۰، با استفاده از نسخه ۳/۶ مدل دوبعدی (میانگین عرضی) هیدرودینامیک کیفیت آب CE-QUAL-W2، ابتدا شوری در مصب اروند را با وارد کردن هندسه واقعی رودخانه به مدل در دو حالت جریان آمیخته و لایه‌ای شبیه‌سازی کرده‌اند و سپس میزان کارایی روش کنترل و تئوری در کنترل نفوذ شوری به مصب اروند با سه سناریوی کاهش عرض، کاهش عمق، و کاهش هم‌زمان این دو پارامتر مورد بررسی قرار داده‌اند. در نتیجه‌گیری، عملکرد روش کنترل و تئوری در کاهش طول نفوذ شوری مناسب تشخیص داده شده است (Etemadshahidi et al., 2011).

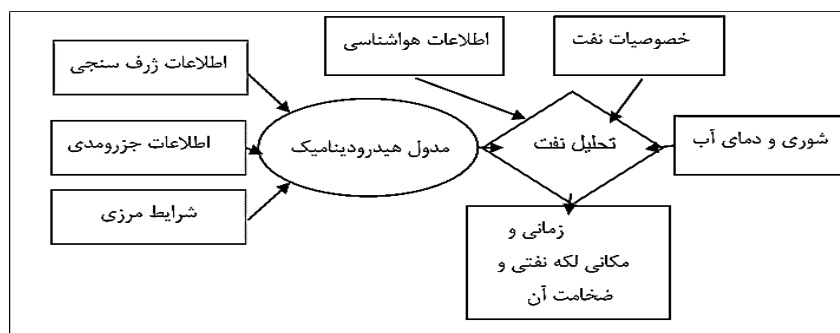
سبحانی پور و امیری، به کمک مدل مایک ۳، حرکت آب و رسوب و تاثیر آن بر ریخت‌شناسی (مورفولوژی) رودخانه سیوند توسط مدل سه‌بعدی MIKE را شبیه‌سازی کرده است. پس از تحلیل رودخانه سیوند در دو حالت پایدار و ناپایدار، به بررسی تغییر فرم بستر رودخانه توسط توابع انتقال رسوب مختلف پرداخته شده است. پس از مدل‌سازی، پارامترهای مهم هیدرولیکی جریان از قبیل عمق، سرعت، شعاع هیدرولیکی و ... تعیین شده است. در ادامه از بین توابع موجود در برنامه، تابع انتقال رسوب انگلند و هانسن که بیشترین تطبیق را با شرایط حاکم در رودخانه سیوند داشته، انتخاب و به بررسی تغییر فرم بستر رودخانه تحت تاثیر سیلاب‌های مربوط به چندین سال متوالی پرداخته شده است و سرانجام بهترین تابع در رودخانه سیوند پیشنهاد شده است (Sobhanipour & Amiri, 2015; Abdolkhanian et al., 2017; Wang et al., 2008; Hakimzadeh, 2012) مطالعاتی در این رابطه انجام داده‌اند.

### مواد و روش‌ها

در این مقاله از بسته نرم‌افزاری Mike 21 که توسط موسسه هیدرولیک و آب و محیط‌زیست دانمارک توسعه یافته است، بر اساس مدل دوبعدی جریان‌های آزاد سطحی به منظور شبیه‌سازی

شبکه منظم حل شده‌اند. شکل (۱) فلوچارت مدل هیدرودینامیکی و انتشار نفت را نشان می‌دهد.

آب:  $\rho_w$  زمان:  $t$ ، مولفه‌های تنش‌های تشعشی  $\tau_{xy}$ ،  $\tau_{yy}$ ،  $\tau_{xx}$  معادلات فوق با گسسته‌سازی به روش تفاضل محدود و بر روی

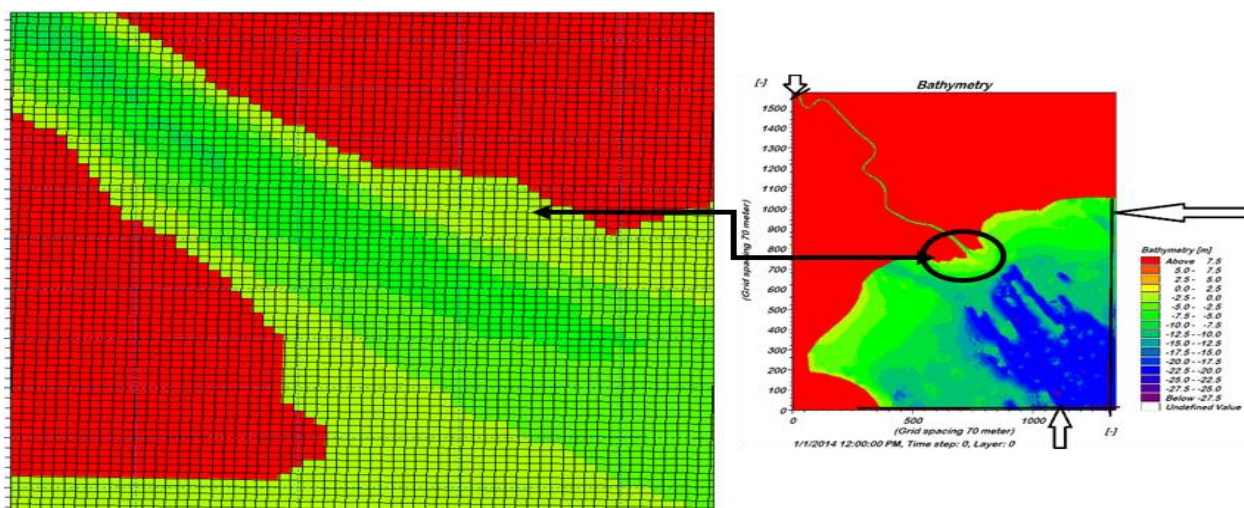


شکل (۱): فلوچارت مدل هیدرودینامیکی و شبیه‌سازی انتشار نفت

به ذکر است این نقشه‌ها با وضوح بالا از اداره کل بندر و دریانوردی خرمشهر دریافت شد. شکل (۲) ژرفاسنجی، مرزهای مدل و گریدبندی اعمال شده به نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

### برپایی مدل هیدرودینامیکی

در این مقاله، محدوده مدل‌سازی رودخانه اروند است که به صورت یک فایل عمق سنجی به نرم‌افزار اعمال شده است. عمق سنجی حاصل از رومی کردن نقشه‌های با مقیاس ۱:۵۰۰۰ هستند، لازم



شکل (۲): مش بندی منطقه مورد مطالعه و مرزهای مدل

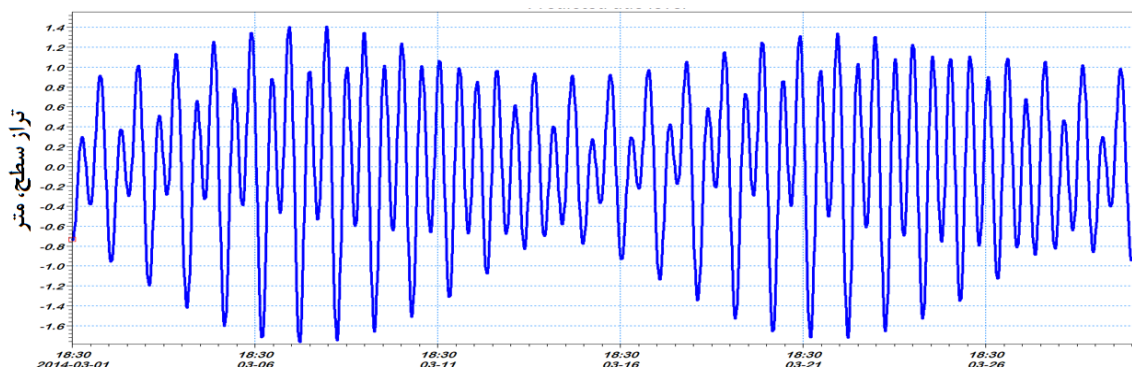
منطبق بر مرز جنوبی در مدل بوده و دامنه و فاز جزر و مدی مولفه‌های قید شده در جدول (۱) **Error! Reference source not found.**

لازم به توضیح است که ضرایب واسنجی استفاده شده در مدل هیدرودینامیک شامل ویسکوزیته بر اساس فرمول‌بندی اسم‌گورینسکی<sup>(۴)</sup> و نیز تعیین ضریب اصطکاک بستر بر اساس عدد مانینگ<sup>(۵)</sup> است.

در این تحقیق دو مرز باز (مرز دریا و مرز بالادست رودخانه) برای مدل در نظر گرفته شد و نوسان سطح آب در مرز دریا به صورت شکل (۳) به مدل اعمال شده است. این سری زمانی، به کمک ابزار پیش‌بینی جزرومد<sup>(۴)</sup>، از مولفه‌های جزرومدی، در جعبه ابزار مایک ۲۱ ساخته شده است. دامنه و فاز چهار مولفه اصلی جزرومد ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $O_1$ ,  $K_1$ ) مربوط به دهانه اروندرود از کتاب جداول جزرومدی آدمیرالتی استخراج و به مدل معرفی شده‌اند. این منطقه،

جدول (۱): مولفه‌های جزرومدی مرز جنوبی مدل

نام مولفه	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$
دامنه (متر)	۰/۸۴	۰/۲۹	۰/۵	۰/۳
فاز (درجه)	۳۰۸	۹	۲۹۵	۲۴۷



شکل (۳): تغییرات تراز سطح آب اعمال شده به مرز دریا (جدول ادمیرالتی)

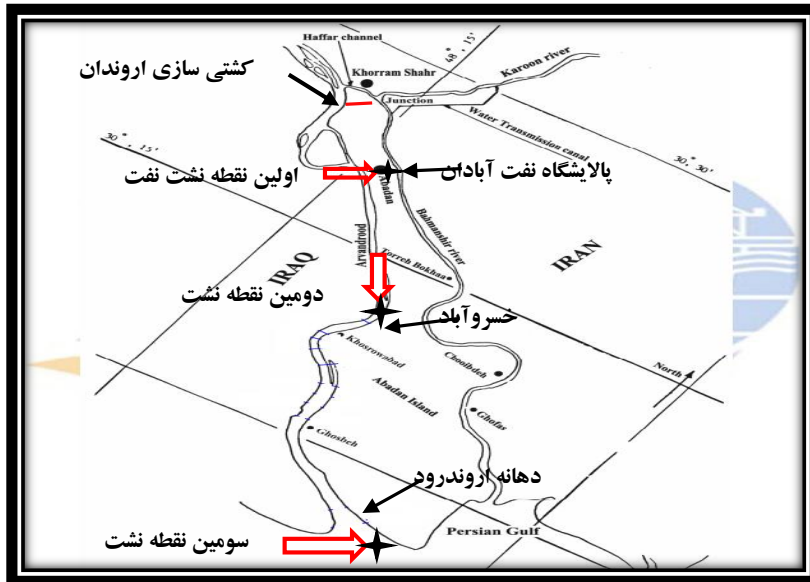
خورهای مسطح ساحلی محسوب می‌شود جریان خروجی در طول بهار افزایش و بیشینه آن در فروردین - اردیبهشت است، در پاییز، جریان کاهش یافته و کمینه آن در طول مهر است (Mukdad, 2003). این رودخانه تحت تاثیر سیلاب‌های دجله، فرات، کارون و کرخه قرار دارد، با توجه به دامنه مولفه‌های جزر و مدی در دهانه اروندرود، عدد کشنده  $0.71$  است و نشان‌دهنده یک جزر و مد مختلط و عمدتاً نیم‌روزانه در مصب اروندرود است (Tables, 2003). در طی این دوره، حداکثر مطلق درجه حرارت هوا  $53$  درجه سانتی‌گراد در تیرماه و حداقل مطلق  $-5$  درجه سانتی‌گراد در دی‌ماه به ثبت رسیده است. دمای متوسط آن  $25/2$  درجه کمتر از  $30\%$  و در ماه‌های مرطوب به حدود  $70\%$  می‌رسد به طوری که در دی‌ماه  $70\%$  و در خردادماه  $28\%$  است. بنابراین، منطقه مطالعاتی جزو یکی از خشک‌ترین مناطق ایران به حساب می‌آید. برای ارزیابی وضعیت تبخیر در محدوده مطالعاتی می‌توان از آمار تبخیر از تشتک در ایستگاه سینوپتیک آبادان استفاده کرد. بر این اساس، در طی دوره زمانی ۳ ساله (۱۳۸۵-۱۳۸۳) میزان تبخیر سالیانه  $3670/4$  میلی‌متر گزارش شده است (iran meteorological organization, 2016). شکل (۴) منطقه مورد مطالعه از کشتی‌سازی اروندان تا دهانه اروندرود به طول  $84$

مدل هیدرودینامیک توسط اطلاعات اندازه‌گیری شده در محدوده اسکله شیلات آبادان و همچنین مولفه‌های جزرومدی بندر فاو کالیبره شد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده دبی رودخانه  $480 \text{ m}^3/\text{s}$ ، عمق کم‌آبی  $0/3$  متر و عمق سیلابی را  $0/5$  متر، زبری بستر برابر با  $65$  و ویسکوزیته ادی بر اساس فرمول بندی اسمانگورینسکی با مقدار ثابت  $0/28$ ، تراز سطح اولیه  $1/5$  متر، بدون باد، بدون پوشش یخ، بدون تنش‌های تشعشعی امواج و فواصل شبکه‌ها با توجه دقت و حجم محاسبات  $70 \times 70$  متر در نظر گرفته شد که  $1345$  گره در جهت افقی و  $1574$  گره در جهت عمودی در نظر گرفته شد (شکل ۳)، که به ازای این مقادیر نتایج شبیه‌سازی با دقت قابل قبولی با نتایج اندازه‌گیری تطابق دارد. لازم به توضیح است بازه زمانی شبیه‌سازی هیدرودینامیکی به مدت سه ماه با گام‌های زمانی  $60$  ثانیه اجرا شده است.

#### خصوصیات طبیعی منطقه مورد مطالعه

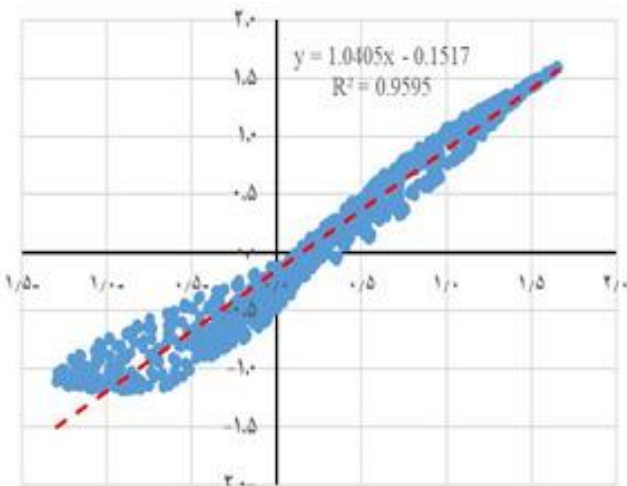
آروندرود رودخانه پهناوری در مرز ایران و عراق در جنوب غربی ایران است و از هم ریزش رودهای دجله، فرات و کارون پدید آمده است. در نهایت بعد از متصل شدن کارون به اروندرود، رودخانه مسیری در حدود  $85$  کیلومتر را در مرز ایران و عراق طی می‌کند و به شمال خلیج فارس می‌ریزند. عرض این رودخانه به‌طور متوسط حدود  $500$  متر است (Ramshet, 1989). خور اروندرود جز

کیلومتر و محل ریزش‌های احتمالی نفت در سه نقطه، مقابل پالایشگاه آبادان، پیچ خسروآباد و دهانه اروندرود نشان داده است.



شکل (۴): منطقه مورد مطالعه و محل ریزش نفت (مقابل پالایشگاه نفت آبادان، پیچ خسرو، دهانه اروندرود)

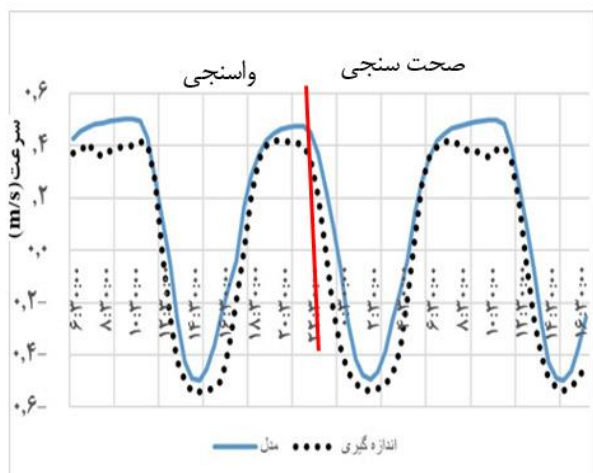
همبستگی<sup>(۷)</sup> ( $R^2 = 0.96$ ) و خطای مجذور میانگین مربعات<sup>(۸)</sup> ( $Rmse = 0.238$ ) و رگرسیون خطی ( $y = 1.048x - 0.1607$ ) است.



شکل (۵): نمودار پراکنندگی مربوط به نتایج مدل و داده‌های میدانی تراز آب

شکل (۸) نشان‌دهنده واسنجی و صحت‌سنجی جریان آب در مقابل اسکله شیلات آبادان و در شکل (۷) نمودار پراکنندگی جریان آب حاصل از مدل و اندازه‌گیری میدانی به همراه شاخص‌های آماری و معادله رگرسیون خطی آورده شده است، مقادیر ضریب

واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرودینامیک ضرایب واسنجی استفاده شده در مدل هیدرودینامیک شامل ویسکوزیته بر اساس فرمول‌بندی اسماگورینسکی و نیز تعیین ضریب اصطکاک بستر بر اساس عدد مانینگ است. مدل هیدرودینامیک توسط اطلاعات اندازه‌گیری شده در محدوده اسکله شیلات آبادان و همچنین مولفه‌های جزرومدی بندر فاو کالیبره شده است. به منظور انجام صحت‌سنجی مدل برای شرایط هیدرودینامیک، در منطقه مورد مطالعه کالیبره گشت و برای کالیبره کردن سرعت آب در ایستگاه آبادان یک جریان سنج مغناطیسی به مدت ۳۲ ساعت توسط فیاض محمدی در فاصله ۱۵۰ متری ساحل ایران در عمق ۳ متری نصب شد (Fayaz Mohammadi, 2017). در این نقطه عمق کل حدود ۶ متر و عرض رودخانه ۵۰۰ متر است. برای کالیبره کردن تراز سطح آب یک دوره مهکشدن و کهکشند را در نظر گرفته و در نهایت داده‌ها (سرعت، تراز سطح آب) با داده‌های استخراج شده از مدل مقایسه شده است، لازم به توضیح است که برای مقایسه سرعت جریان یک سیکل جزرومد در نظر گرفته شده و با داده‌های میدانی مقایسه شده است. شکل (۶) نشان‌دهنده واسنجی و صحت‌سنجی تراز سطح آب در بندر فاو و در شکل (۵) نمودار پراکنندگی تراز آب حاصل از مدل و اندازه‌گیری میدانی به همراه شاخص‌های آماری و معادله رگرسیون خطی آورده شده است. مقادیر ضریب

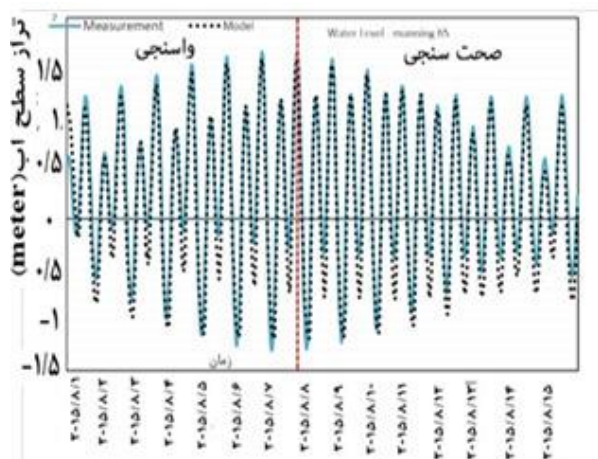


شکل (۸): واسنجی و صحت‌سنجی جریان آب نتایج مدل با نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده مقابل اسکله شیلات آبادان شبیه‌سازی پخش و انتشار آلودگی نفتی

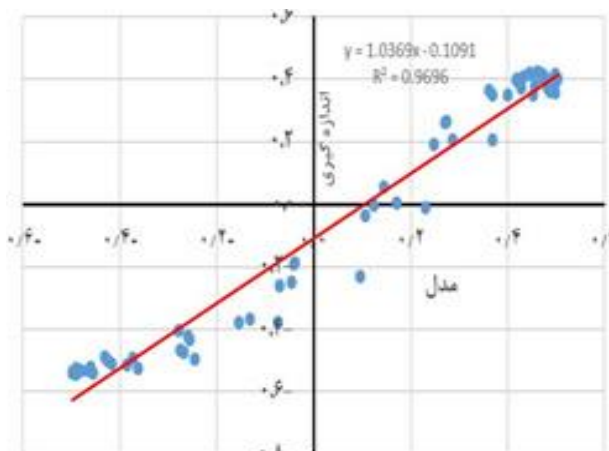
در این مرحله پس از شبیه‌سازی جریان‌های جزرومدی و شرایط هیدرودینامیک منطقه، به مدل‌سازی پخش و انتشار لکه نفتی ناشی از تخلیه  $200 \text{ m}^3$  آلاینده نفتی که در مدت زمان ۳ ساعت با دبی  $0.185 \text{ m}^3/\text{s}$  به داخل رودخانه اروندرود نشت پیدا کرده است می‌پردازیم. این مرحله شامل برپایی مدل و آماده‌سازی داده‌هایی مانند، فایل خروجی مدل جریان هیدرودینامیک مرحله قبل که شامل تاریخچه زمانی تغییرات عمق آب، تراز سطح آب و تغییرات شار جریان در منطقه در راستای X و Y با گام زمانی ۶۰ ثانیه به صورت دو بعدی منظم است، فایل سری زمانی دبی آلودگی نفتی ریخته شده در بازه زمانی سه ساعت با دبی ثابت  $0.185 \text{ m}^3/\text{s}$  است. دما و شوری آب ثابت و به ترتیب برابر با ۲۶ درجه سانتی‌گراد و ۲ psu است. لازم به ذکر است در هنگام اجرای سناریوی سوم (دهانه اروندرود) دما و شوری به صورت سری زمانی (Fayaz Mohammadi, 2017) به مدل اعمال شده است.

درجه حرارت هوا و میزان ابرناکی منطقه به صورت سری زمانی به مدل اعمال شده است. مقادیر ثابت ضریب بازتابش نفت، آب‌وهوا برای موازنه حرارتی لکه نفتی به ترتیب مقادیر ۰/۸۲، ۰/۹۸ و ۰/۸۲ در نظر گرفته شده است. ثابت تبخیر به کار رفته در شبیه‌سازی ۰/۲۹ است که نسبت مستقیم با میزان آب و نفت تبخیر شده دارد. برای شبیه‌سازی نفت دیزلی در نظر گرفته شده است که اطلاعات مربوط به ترکیبات آن در جدول (۲) آورده شده است. به علت پدیده امولسیون حجم نفت در ستون آب افزایش یافته که این خود موجب افزایش مقدار ویسکوزیته می‌شود. به منظور انجام فرآیند امولسیون شدن نفت در آب و آب در نفت

همبستگی ( $R^2 = 0.96$ ) و خطای مجذور میانگین مربعات ( $Rmse = 0.127$ ) و رگرسیون خطی ( $y = 1.0386x - 0.1088$ ) نشان می‌دهد.



شکل (۶): واسنجی و صحت‌سنجی تغییرات تراز سطح آب نتایج مدل و نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده در بندر فاو (جداول جزرومدی آدمیرالتی)



شکل (۷): نمودار پراکندگی مربوط به نتایج مدل و داده‌های میدانی جریان آب

نشان داده شده است. شکل‌های (۱۶ تا ۲۲)، وضعیت لکه نفتی را از شروع نشست نفت تا لحظه رسیدن لکه نفتی به خلیج فارس در پیچ خسروآباد نشان می‌دهد.

شکل‌های (۲۳ تا ۲۹)، وضعیت لکه نفتی در دهانه به مدت ۷۲ ساعت نشان می‌دهد. با توجه به این که زمان جزر برای شروع نشست نفت در مدل در نظر گرفته شده است، در دو سناریوی اول (مقابل پالایشگاه نفت آبادان، پیچ خسروآباد)، لکه نفتی پس از رها شدن، توسط جریان به سمت دریا حرکت کرده و سپس با تغییر رژیم جریان از جزر به مد به سمت بالادست رودخانه حرکت می‌کند به طوری که پس از ۶ ساعت از رهاسازی، لکه نفتی به سمت دریا حرکت کرده سپس از ساعت ششم تا ساعت دوازدهم به طرف پایان دست حرکت کرده است، بنابراین، این گردش به صورت سیکل جزر و مدی تکرار شده و در نهایت اولین آثار لکه نفتی به ترتیب بعد از ۱۲۴ و ۸۵/۵ ساعت از رهاسازی به خلیج فارس می‌رسد.

لازم به توضیح است روند پخش لکه نفتی در دهانه نسبت به دو سناریوی اولیه نشست نفت متفاوت است، دلیل این امر پدیده جزرومدی است. با توجه به این که زمان نشست نفت در سه مکان یکسان است و همچنین مبنای نشست نفت را مقابل پالایشگاه نفت در نظر گرفته شده است، بنابراین سیکل جزرومدی دهانه با دو نقطه اولیه در نظر گرفته برای نشست نفت به دلیل فاصله مکانی زیاد متفاوت است و همین عامل سبب شده تا روند پخش نفت در دهانه متفاوت‌تر باشد به گونه‌ای که لکه نفتی در دهانه به دلیل تغییر سریع رژیم جریان از جزر به مد، پس از ۴ ساعت از نشست نفت به طرف بالادست حرکت می‌کند و به طوری که لکه نفتی به مدت ۶ ساعت (ساعت ۱۰ تا ۳) به طرف بالادست حرکت می‌کند (شکل‌های ۲۵ تا ۲۶) و سپس با تغییر رژیم جریان از مد به جزر دوباره لکه نفتی به مدت ۶ ساعت (ساعت ۳ تا ۹) به سمت پایین دست حرکت کرده است (شکل ۲۷)، این روند به صورت سیکل جزر مدی تکرار شده است و در نهایت لکه نفتی به طرف حاشیه ساحلی غربی و شرقی حرکت کرده است و سبب آسیب به محیط‌زیست ساحل کشورهای عراق و ایران می‌شود.

ضریب حداکثر حجم آب ۰/۸۵، حجم آسفالتین ۰/۰۵، درصد حجم واکس ۵/۷، ثابت جذب آب  $e^{-0.5}$  و ثابت رها آب  $e^{-0.5}$  ۱/۲۰ (پیش فرض مدل) است. برای تعیین میزان انحلال نفت در ستون آب ضریب تبادل جرمی انحلال نفت برابر با  $e^{-0.6}$  ۲/۳۶ (پیش فرض مدل) در نظر گرفته شده است. ویژگی لکه نفتی شامل نوع نفت، درصد حجمی اجزای تشکیل دهنده آن و نقطه جوش هر یک از اجزای نفت در جدول (۲) نشان داده شده است.

**بررسی پخش آلودگی نفتی در مکان‌های مختلف اروندرود**  
در این قسمت آلودگی نفتی با حجم  $200 \text{ m}^3$  و با دبی ثابت  $\text{m}^3/\text{s}$  ۰/۱۸۵ در مکان‌های مختلف نشست داده شده است لازم به ذکر است که شرایط مدل هیدرودینامیک همه سناریوها یکسان است.

#### جدول (۲): جدول مشخصات نفت ریخته شده در

##### محدوده مورد مطالعه

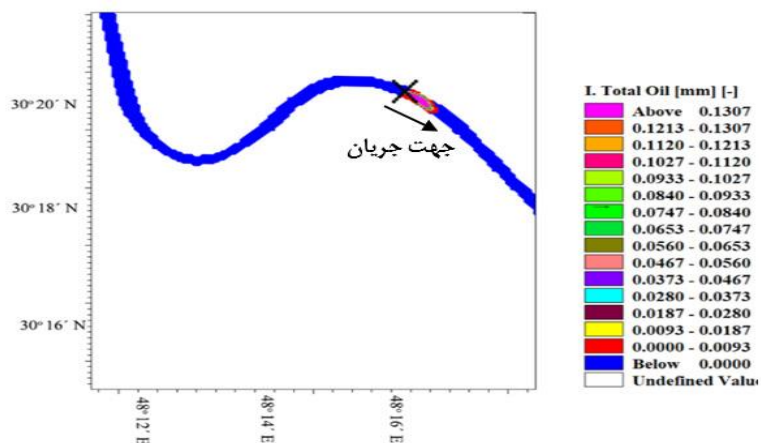
شماره	ترکیب نفت	نقطه جوش	درصد جزیی
۱	$\text{H}_2\text{C}_{11}$	۶۹-۲۳۰	۷/۴
۲	$\text{H}_{13}\text{C}_{25}$	۲۳۰-۴۰۵	۱۷/۳
۳	$\text{H}_6\text{C}_{11}$	۷۰-۲۳۰	۲/۸
۴	$\text{H}_{13}\text{C}_{23}$	۲۳۰-۴۰۵	۶/۵
۵	$\text{H}_6\text{C}_{11}$	۸۰-۲۴۰	۱۹/۸
۶	$\text{H}_2\text{C}_{18}$	۲۴۰-۴۰۰	۴۶/۲
۷	$\text{H}_9\text{C}_{25}$	۱۸۰-۴۰۰	۰
۸	باقی مانده	$400 <$	۰

برای بررسی اثرات مکانی بر الگوی پخش و انتشار لکه‌ی نفتی سه مکان فرضی، مقابل پالایشگاه نفت آبادان، پیچ خسروآباد و دهانه اروندرود را در نظر گرفته و مدل تحلیل نشست نفت برای سه نقطه اجرا شده است.

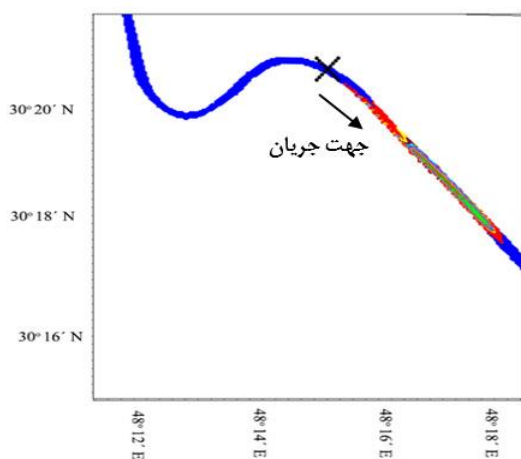
در شکل‌های (۹ تا ۲۹) آلودگی نفتی با حجم  $200 \text{ m}^3$  و با دبی ثابت  $\text{m}^3/\text{s}$  ۰/۱۸۵ به ترتیب در مقابل پالایشگاه، پیچ خسروآباد و دهانه نشست داده شده است.

شکل‌های (۹ تا ۱۵) وضعیت لکه نفتی از شروع نشست نفت تا لحظه رسیدن لکه نفتی به خلیج فارس در مقابل پالایشگاه نفت آبادان

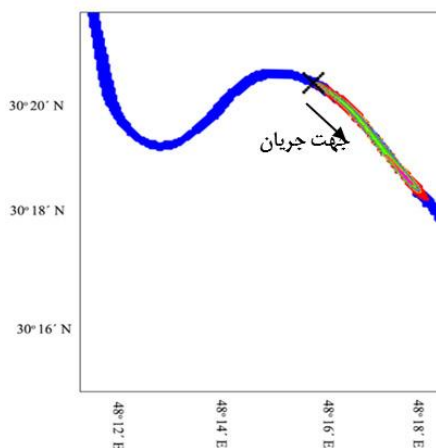




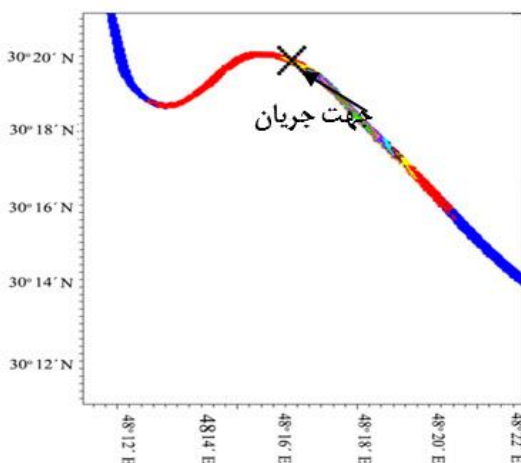
شکل (۹): وضعیت لکه نفتی پس از ۱ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۷)



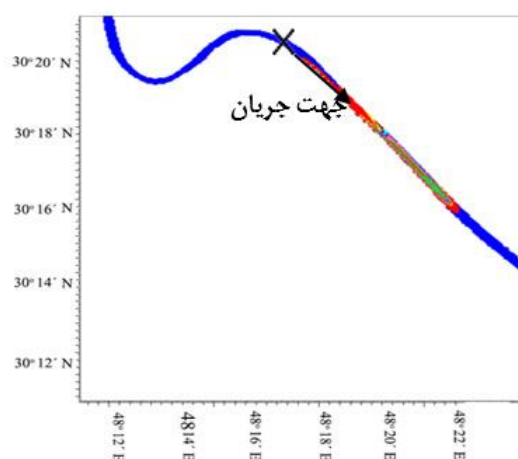
شکل (۱۱): وضعیت لکه نفتی پس از ۴ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۱۰)



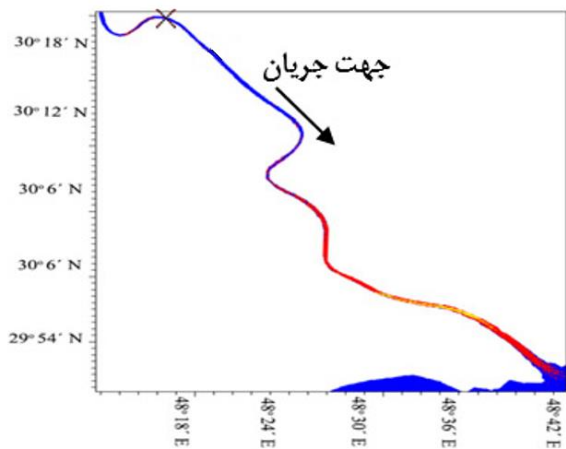
شکل (۱۰): وضعیت لکه نفتی پس از ۳ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۹)



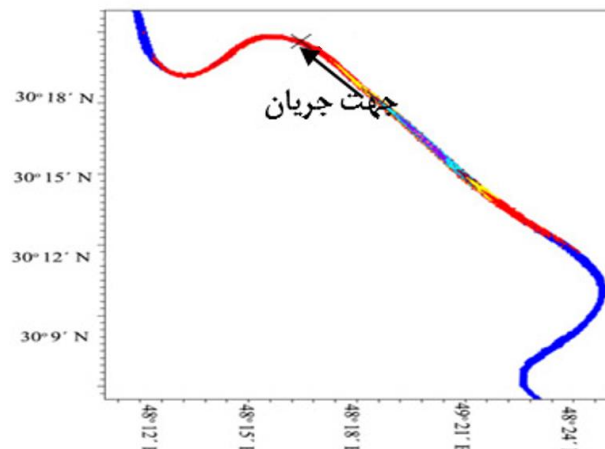
شکل (۱۳): وضعیت لکه نفتی پس از ۱۲ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۲: ساعت ۶)



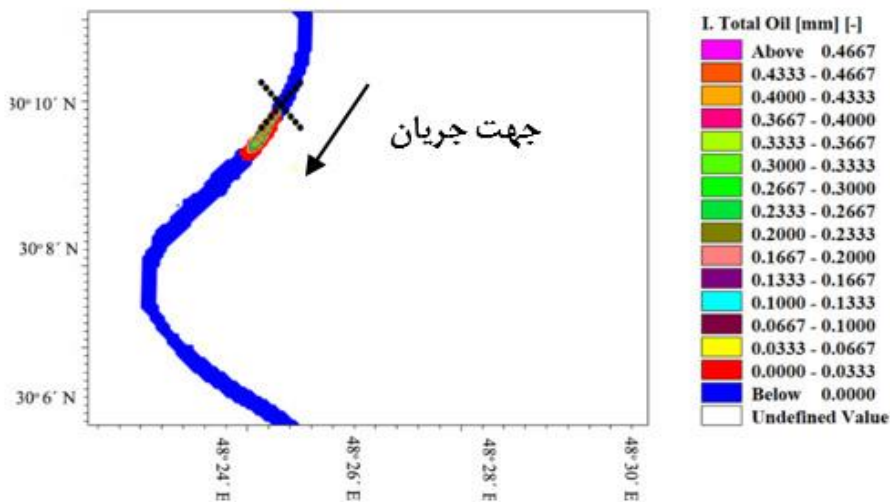
شکل (۱۲): وضعیت لکه نفتی پس از ۶ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۲: ساعت ۰۰)



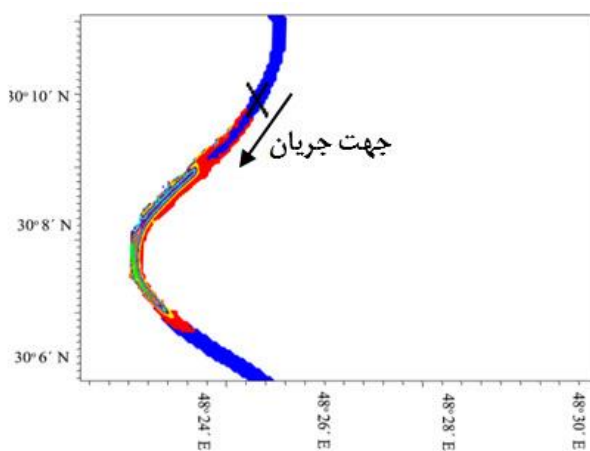
شکل (۱۵): وضعیت لکه نفتی پس از ۱۲۴ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۶: ساعت ۲۲)



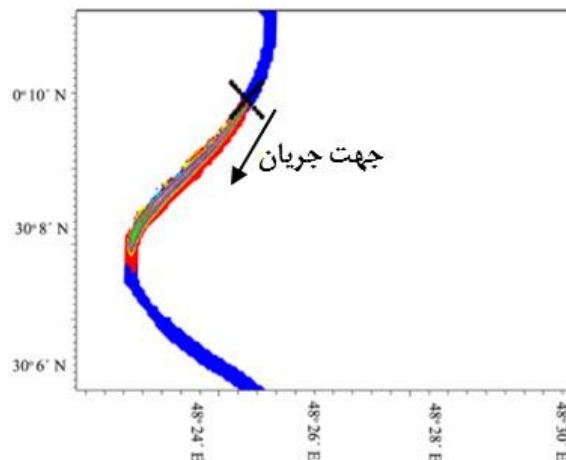
شکل (۱۴): وضعیت لکه نفتی پس از ۲۴ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۲: ساعت ۶)



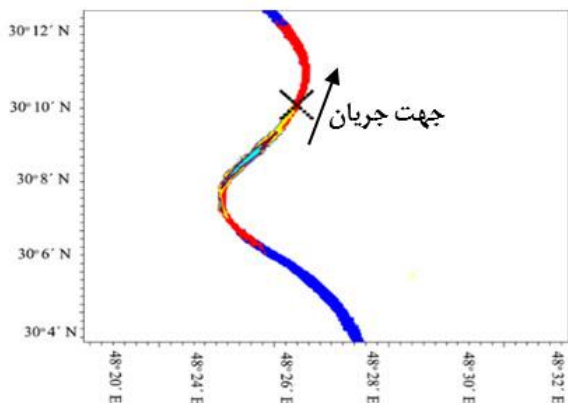
شکل (۱۶): وضعیت لکه نفتی پس از ۱ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۷)



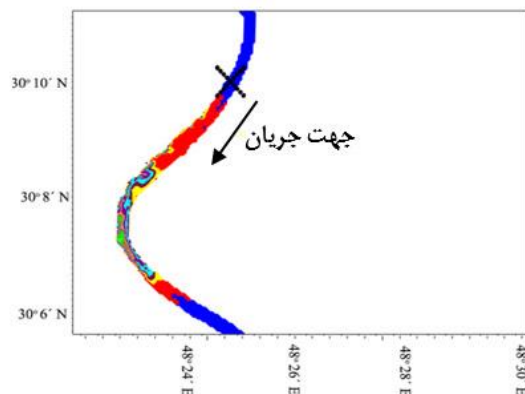
شکل (۱۸): وضعیت لکه نفتی پس از ۴ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۱۰)



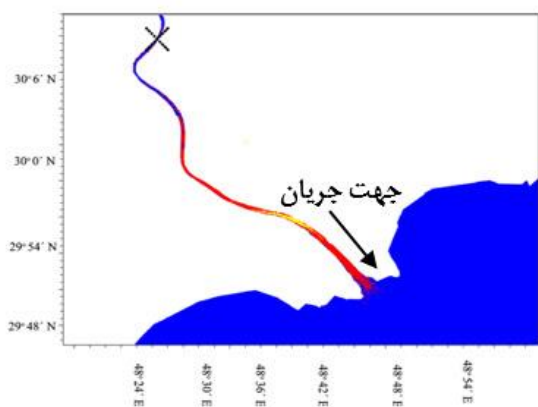
شکل (۱۷): وضعیت لکه نفتی پس از ۳ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۹)



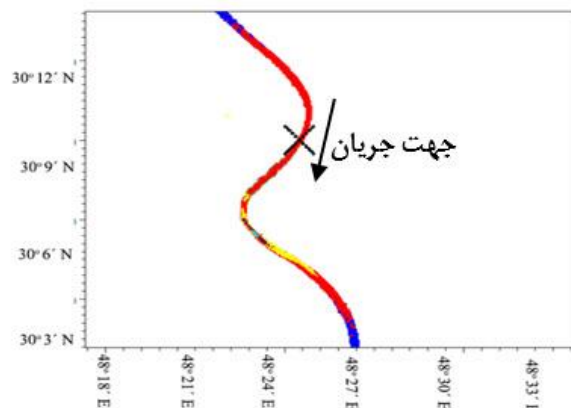
شکل (۲۰): وضعیت لکه نفتی پس از ۱۲ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۲: ساعت ۶)



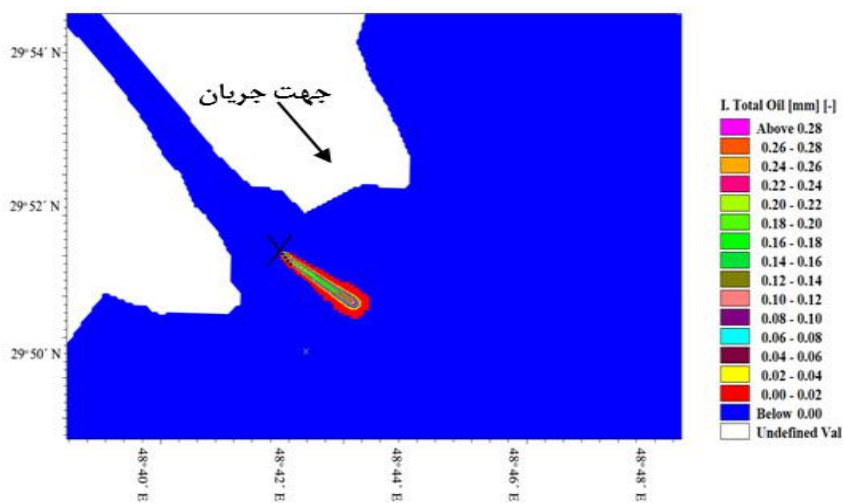
شکل (۱۹): وضعیت لکه نفتی پس از ۶ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۰۰)



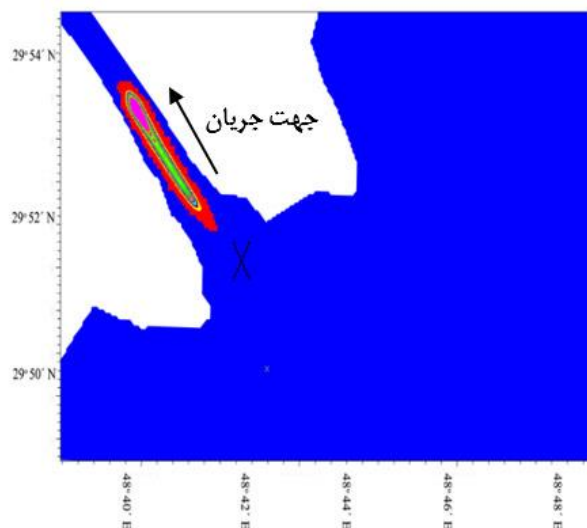
شکل (۲۲): وضعیت لکه نفتی پس از ۸۵ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۵: ساعت ۷)



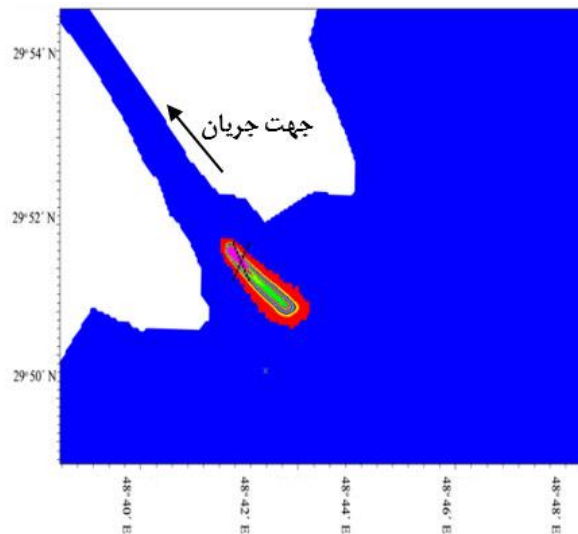
شکل (۲۱): وضعیت لکه نفتی پس از ۲۴ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۲: ساعت ۱۸)



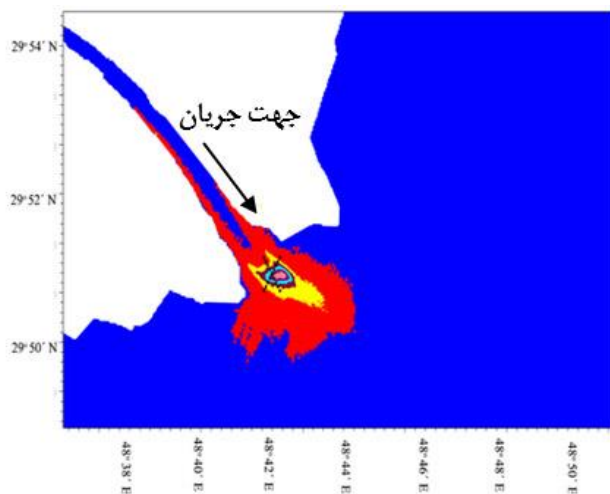
شکل (۲۳): وضعیت لکه نفتی پس از ۱ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۷)



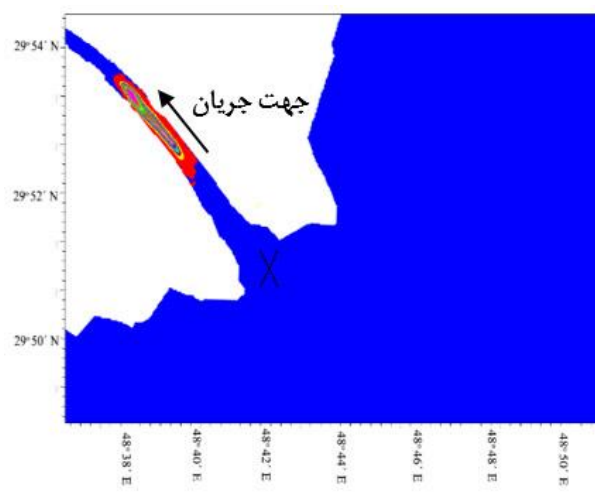
شکل (۲۵): وضعیت لکه نفتی پس از ۴ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۱۰)



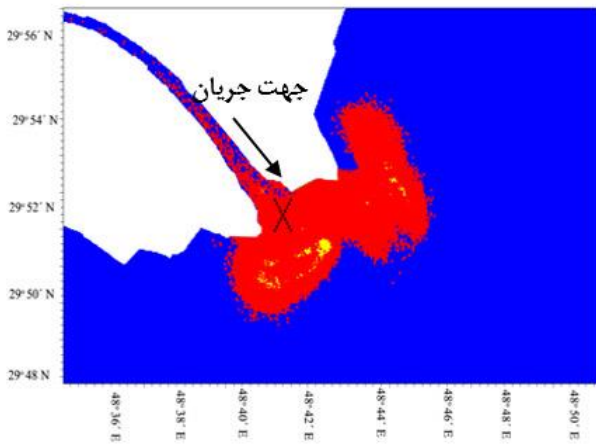
شکل (۲۴): وضعیت لکه نفتی پس از ۳ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۹)



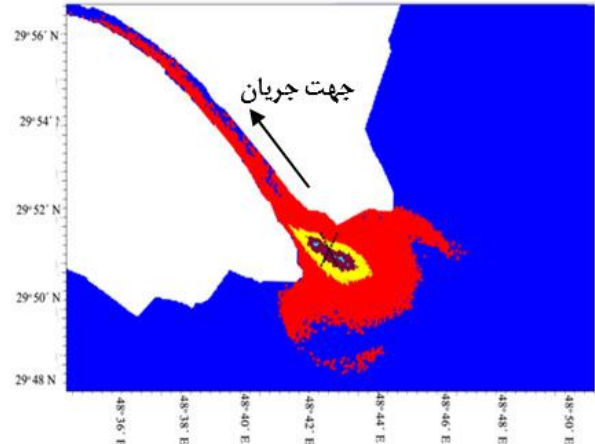
شکل (۲۷): وضعیت لکه نفتی پس از ۱۲ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۲: ساعت ۹)



شکل (۲۶): وضعیت لکه نفتی پس از ۶ ساعت  
(۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۳)



شکل (۲۹): وضعیت لکه نفتی پس از ۷۲ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۴: ۲ ساعت ۱۸)



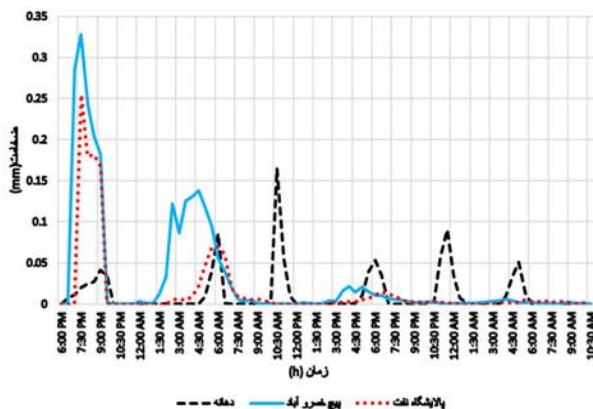
شکل (۲۸): وضعیت لکه نفتی پس از ۲۴ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۲: ۲ ساعت ۱۸)

ضخامت لکه نفتی در دهانه نسبت به پیچ خسرو و دهانه کمینه است که علت این امر وسیع بودن منطقه و نوع الگوی جریان است.

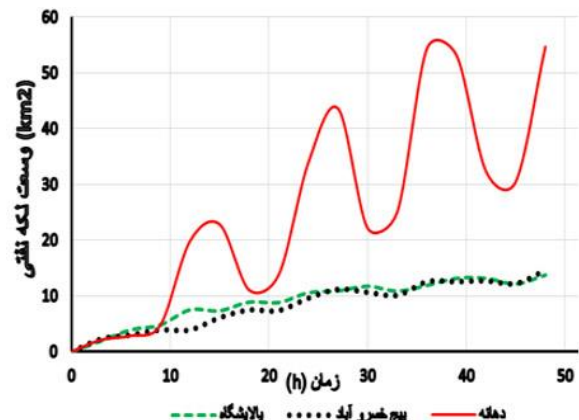
### نتیجه‌گیری و بحث

پخش و انتشار لکه‌ی نفتی در اروندرود تابع جریان جزرومدی و مکان و زمان است، روند پخش لکه نفتی در دو سناریوی اول مانند هم است، چنان‌چه پخش و انتشار لکه نفتی در هنگام جزر به مدت سه ساعت در زمان مهکشند مقابل پالایشگاه، پیچ خسرو و

در شکل (۳۰)، وسعت لکه نفتی در یک دوره ۴۸ ساعته در مکان‌های مختلف نشان می‌دهد. وسعت لکه نفتی در دهانه به علت باز بودن محدوده و جهت بردارهای جریان در دهانه نسبت به پیچ خسرو و پالایشگاه نفت، بیشتر است و وسعت لکه نفتی در پیچ خسرو کمترین است، علت این امر آن است که در پیچ خسرو سرعت بالای جریان در انحنای پیچ و همچنین کوچک بودن عرض رودخانه، لکه نفتی را به حاشیه پیچ رانده و بنابراین وسعت کمتری پیدا می‌کنند. در شکل (۳۱)، به مقایسه ضخامت لکه نفتی در مکان‌های مختلف پرداخته است. ضخامت لکه نفتی در پیچ خسرو نسبت به دهانه و پالایشگاه نفت، بیشینه است، علت این موضوع تنگ بودن مسیر سرعت جریان در انحنای پیچ است ولی



شکل (۳۱): مقایسه ضخامت لکه نفتی در ۱ کیلومتری پایین دست نقطه انتشار نفت



شکل (۳۰): وسعت لکه نفتی در یک دوره ۴۸ ساعت پس از نشت نفت

دهد باعث می‌شود تا سواحل ایران بیشتر در معرض آلودگی قرار بگیرند و دلیل این اتفاق خروجی رودخانه اروند است. بنابراین دبی رودخانه می‌تواند دو مسیر داشته باشد به گونه‌ای که تحت تاثیر نیروی کوریولیس پلوم آب تازه به طور خاص در امتداد ساحل کویت و عربستان جاری شود و باعث نگهداری و ماندن یک رژیم چرخشی و اچرخند در قسمت غرب خلیج فارس شود، اما در زمان‌های خاص ممکن است مقابل سواحل ایران یافت شود. این مطلب با نتایج تحقیق (Reynolds, 1993) سازگاری خوبی دارد. آن چه در ایران کمتر توجه شده است نقش و اهمیت آلاینده‌های مختلف و تاثیر آن‌ها بر اکوسیستم‌هاست. این مساله هم از دیدگاه وضعیت حال و هم مسایل مربوط به پیشگیری و جلوگیری از تخریب و ایجاد خسارت‌ها به محیط‌های انسانی در آینده، مطالعه می‌شود در مورد اکوسیستم‌های ساحلی این مساله اهمیت بیشتری دارد. از طرفی آلاینده‌های نفتی به دلیل ماهیت ماندگاری طولانی، شناور بودن و آثار مخرب آن‌ها بر سلامت جانوری، انسانی و محیطی آثاری مخرب و زیان‌باری به جای می‌گذارد. بنابراین، نتیجه می‌گیریم شناسایی مکان‌های حساس در برابر آلاینده‌ها ضمن اقدام پیشگیرانه از آثار تخریبی به وجود آمده و احتمالی می‌کاهد.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نقشه‌ها نشان داد انتشار آلودگی در دهانه اروندرود بیشترین مقدار و در پیچ خسروآباد کمترین مقدار است. دلیل این امر وسعت منطقه و شرایط محیطی (تنش باد، جریان جزرومدی و...) است.

#### یادداشت‌ها

1. SA(SpillAnalysis) Module, Mike 21
2. Flow model
3. Tidal Prediction of Hights
4. Smagorinsky
5. Number Maninng
6. Number Tide
7. Correlation coefficient
8. Root Mean Square Error

دهانه اروندرود رخ دهد، در سه ساعت اولیه به صورت پیوسته به سمت دریا حرکت کرده است و پس از ۴ ساعت نشت لکه‌ی نفتی قطع می‌شود و نقطه اولیه نشت نفت از آلودگی نفتی تمیز شده است و همچنان لکه نفتی در ۶ ساعت اولیه در دو سناریوی اول (مقابل پالایشگاه نفت، پیچ خسروآباد) به سمت پایین دست حرکت کرده است و با تغییر رژیم جریان از جزر به مد دوباره لکه نفتی به بالادست حرکت کرده است و این روند به صورت سیکل جزرومدی تکرار می‌شود. لکه نفتی در دو مکان اولیه به ترتیب پس از ۱۲۴ و ۸۵/۵ ساعت لکه نفتی به خلیج فارس رسیده است. روند پخش لکه نفتی در مقابل پالایشگاه نفت نسبت به دو نقطه نشت بالادست متفاوت است به طوری که لکه نفتی در ساعت چهارم به سمت بالادست حرکت کرده است (ساعت ۱۰ تا ۳) و باعث آلوده شدن قسمت بالادست دهانه رودخانه شده است، بنابراین آلودگی با تغییر رژیم جریان از مد به جزر به سمت دریا حرکت کرده است (ساعت ۳ تا ۹) و در نهایت این روند تکرار می‌شود و باعث آلوده شدن سواحل شرقی و غربی دهانه می‌شود. با مقایسه وسعت لکه نفتی در یک دوره ۴۸ ساعته از پخش در سه مکان مختلف مقابل پالایشگاه نفت، پیچ خسروآباد و دهانه مشاهده شده است، ضخامت لکه نفتی در دهانه بیشترین و در پیچ خسروآباد کمینه است. علت این موضوع بزرگ بودن محدوده پخش و الگوی بردارهای جریان در دهانه است. مقایسه ضخامت لکه‌ی نفتی در ۱ کیلومتری پایین دست نقطه نشت نشان داده است ضخامت در پیچ خسروآباد بیشترین و در دهانه کمینه است، دلیل این امر تنگ بودن عرض رودخانه در پیچ خسروی همچنین الگوی جریان در این نقطه است. نتایج سناریوها اول و دوم نشان داده در طول رودخانه، تراکم آلودگی بیشتر به سمت سواحل کشور عراق است و نتایج سناریوی سوم (دهانه) نشان داده آلودگی بیشتر به سمت سواحل ایران و دهانه رودخانه بهمن شیر انتشار یافته است، این نتایج مشابه مطالعات عبدالخانیان و همکاران است (Abdolkhanian et al., 2017). بنابراین اگر در طول رودخانه اتفاق رخ دهد باعث آلوده شدن بیشتر سواحل عراق می‌شود و اگر نشت نفت در دهانه رخ

#### فهرست منابع

Abdolkhanian, N.; Elimizadeh H.; Dadolahi S.; Savari A. & Fayaz Mohammadi, M., 2017. Modelling of pollution dissemination in Arvandroud River in low and high water seasons, Journal of Marine Science, Volume 16, Number 4, Winter 2017 (In Persian)

Ajiwibowo, H.; Lodiwa, K.S.; Pratama, M.B. & Wurjanto, A., 2017. Field measurement and numerical modeling of tidal current in Larantuka Strait for renewable energy utilization. International Journal of Geometer 124-131.

Bozkurtoğlu, Ş.N.E., 2017. Modeling oil spill trajectory in Bosphorus for contingency planning. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), pp.57-72.

Cáceres, R.A.; Zyserman, J.A. & Perillo, G.M., 2016. Analysis of sedimentation problems at the entrance to Mar del Plata Harbor. *Journal of Coastal Research*, 32(2), pp.301-314.

Dong, L.; Liu, J.; Du, X.; Dai, C. & Liu, R., 2018. Simulation-based risk analysis of water pollution accidents combining multi-stressors and multi-receptors in a coastal watershed. *Ecological Indicators*, 92, pp.161-170.

Etemadshahidi, A.; Sburi, A. & Parsa, j., 2011. Control of Salinity intrusion in Arvand River Estuary in Different Hydrological Conditions, *Journal of Iran-Water Resources Research*, Year 7, Issue 2, Summer 2011, pp. 50-60 (In Persian)

Fayaz Mohammadi, M. , 2017. Numerical and field study of tidal effect on sediment transport in Arvandroud estuary, PhD thesis, Physical oceanography, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology (In Persian) (169 pages).

Hakimzadeh, H., 2012. Numerical modeling of oil release in order to prepare a hazard map on the Persian Gulf using Mike 3 software, Master Thesis in Marine Physics, University of Isfahan. (In Persian)

Iran Meteorological Organization, 2016. <https://www.irimo.ir/>

Mukdad H. A., 2003. Hydrological constrains and solutions to improve the sustainable water resources management in Iraq, College of Sciences, Baghdad University.

Qiao, H.; Zhang, M.; Jiang, H.; Xu, T. & Zhang, H., 2018. Numerical study of hydrodynamic and salinity transport processes in the Pink Beach wetlands of the Liao River estuary, China. *Ocean Science* 14:437.

Ramshet, M. H., 1989. Natural Geography of the Persian Gulf, University of Tehran Press. (In Persian)

Reynolds, R.M., 1993. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin*, 27, pp.35-59.

Sobhanipour, M. & Amiri, A., 2015. The impact of water and sediment movement on river morphology by DHI MIKE a three-dimensional model, Sivand River Case study, International Conference on New Research in Engineering Sciences, Dubai, Institute of Saramad, Karin Conference. (In Persian)

Tables, A.T., 2003. Indian Ocean and South China Sea. Hydrographer to the Navy, Admiralty Hydrography Department.

Wang, S.D.; Shen, Y. M.; KunGuo, Y. & Tang, J., 2008. Three Dimensional Numerical Simulation for transport of oil spills in sea, *Ocean Engineering*, pp. 508-510.