

## شبیه‌سازی انتشار آلودگی نفتی؛ مطالعه موردی رودخانه اروند در ایران باقر بهروز<sup>۱</sup>، ابوالفضل دلبری<sup>۲\*</sup>، محمد فیاض محمدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر  
bagherbehrooz@yahoo.com  
<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر  
abolfazl\_delbari@yahoo.com  
<sup>۳</sup> استادیار گروه فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر  
fayyaz1360@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۷/۶/۱۳

### چکیده

خطر انتشار آلودگی در اطراف پالایشگاه‌ها، تأسیسات نفتی و ناوگان تجاری بر اثر حوادث طبیعی و غیرمترقبه مورد توجه است. رودخانه اروند یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های قابل کشتیرانی ایران و عراق و محل تردد تعداد زیادی شناور نفتی است که این مسئله احتمال آلودگی نفتی را دوچندان کرده است. در این مقاله به منظور شبیه‌سازی هیدرودینامیکی از بسته نرم‌افزاری مدل مایک ۲۱ که بر اساس مدل دوبعدی جریان‌های آزاد سطحی است و توسط مؤسسه هیدرولیک دانمارک توسعه یافته، استفاده شده است. نتایج مدول هیدرودینامیک با استفاده از تراز سطح و سرعت آب کالیبره شده است. این مدل عددی بر پایه روش اویلری توسعه داده شده و در آن برای مشخص کردن الگوی حرکت جریان آبی از معادله‌های پیوستگی و ممنتوم (معادله‌های ناویر استوکس متوسط‌گیری شده در عمق)، استفاده شده است. پس از واسنجی، مقایسه نتایج مدل با اندازه‌گیری‌های میدانی نشان می‌دهد، مدل دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی نوسان سطح آب، سمت و سرعت جریان دارد. برای 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. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد؛ چنانچه آلودگی هنگام شروع جزر به مدت سه ساعت در مقابل پالایشگاه نفت آبادان رخ دهد و دبی متوسط رودخانه  $480 \text{ m}^3/\text{s}$  باشد، بدون اعمال باد، آلودگی پس از ۱۲۴ ساعت به خلیج فارس می‌رسد.

**واژه‌های کلیدی:** اروندرود، آلودگی نفتی، مایک ۲۱/۳، هیدرودینامیک، ماژول تحلیل نشت نفت

### ۱- مقدمه

وقتی آلودگی از یک منبع نقطه‌ای به محیطی تخلیه می‌شود، با توجه به خصوصیات آن آلاینده، دمای محیط، غلظت سایر

مواد درون آب و سرعت باد و دیگر عوامل، آلودگی تخلیه‌شده به محیط شروع به پخش شدن در راستای افقی و قائم می‌کند که در سطح به انتشار معروف است [۱]. نشت و

آسیب‌دیدگی احتمالی ناشی از نشت ناگهانی نفت از میدان‌های نفتی واقعی در این مناطق باشد. با توجه به حساسیت منطقه، مدل‌سازی عددی پخش و انتشار نفت در این منطقه ساحلی، به‌منظور طراحی یک برنامه مدیریتی کارا و پویا برای کاهش اثرات سوء و جانبی از چنین حوادثی حائز اهمیت است. در رابطه با انتشار آلودگی نفتی تاکنون مطالعاتی انجام شده است که از جمله می‌توان به مطالعات انجام‌شده زیر اشاره کرد.

دیمیتار و همکاران، مدل کوهرنس را برای بررسی آلودگی بیوزئوشیمی و انتقال آلودگی در سواحل ایتالیا (Sacca di goro) عملیاتی و کالیبره نمودند و زمان ماندگاری را برای قسمت‌های مختلف این سواحل مورد بررسی قرار دادند [۷]. مومن نیا و همکاران، با استفاده از مدل مایک ۲۱ به شبیه‌سازی پخش و انتشار لکه نفتی نشت شده در منطقه تنگه خوران واقع در خلیج فارس پرداخته‌اند. بر همین اساس، مطالعات برای دو سناریو شامل شبیه‌سازی نشت نفت بدون در نظر گرفتن پارامترهای باد منطقه‌ای و شبیه‌سازی با در نظر گرفتن پارامترهای باد و مشاهده تأثیر باد در پخش و انتشار لکه نفتی در منطقه کانال قشم انجام شده است. نتایج بیانگر تأثیر قابل ملاحظه باد (سرعت و جهت وزش باد) در پخش، انتشار و همه فرایندهای هوازدهی نفت شامل تبخیر، انحلال، امولسیون و غیره است [۸].

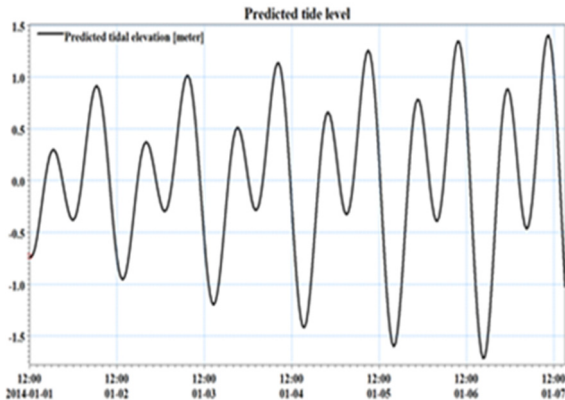
بدری و فقیهی فرد، با استفاده از مدل مایک ۳ به شبیه‌سازی سه‌بعدی سرنوشت لکه نفتی با تأثیر فرایندهای مختلف از جمله باد، جزرومد در خلیج فارس پرداخته‌اند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که سطح منطقه آلوده شده در پایان بازه زمانی در سال ۲۰۰۸ حدود ۶۲ کیلومتر مربع است که به آلودگی بنادر سیراف و قسمتی از بندر کنگان منجر شده است، همچنین در سال ۲۰۱۲ نیز رشد لکه نفتی در سمت جنوب عسلویه به آلوده شدن خلیج نایبند در ۳۰ کیلومتری عسلویه منجر شد [۹].

لی دانگ و همکاران از مدل مایک ۲۱ برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی شیمیایی در رودخانه‌های منتهی به ساحل و نواحی کم‌عمق ساحلی استفاده کردند. آن‌ها بر اساس نتایج شبیه‌سازی، روشی برای تحلیل خطر حوادث آلوده‌کننده آب‌های ساحلی (CAWPRA<sup>۱</sup>) پیشنهاد داده‌اند [۱۰].

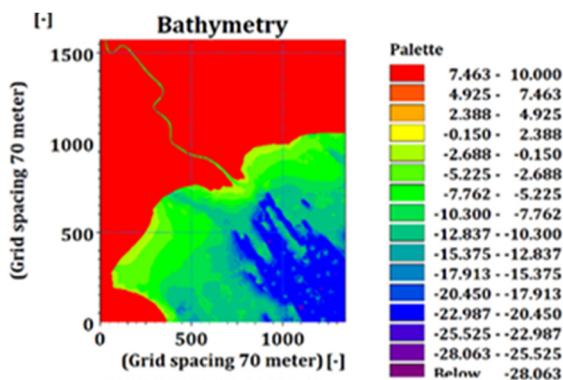
انتشار نفت در محیط‌های دریایی به خسارت‌های جدی زیست‌محیطی، اثرات کوتاه و بلندمدت قابل توجه بر چرخه حیات آبزیان، اکولوژی منطقه، فعالیت اجتماعی و اقتصادی می‌انجامد [۲]. کشتی‌های باری و خطوط لوله دریایی حجم عظیمی از نفت خام را در سراسر مناطق باز و ساحلی منتقل می‌کنند. این حمل‌ونقل سبب افزایش پتانسیل نشت نفت و آسیب دیدن اکوسیستم دریایی شده است [۳]. بیش از ۴۱۰۰ مورد نشت‌های بزرگ نفتی و ۱۰۰۰۰۰ گالن در سراسر جهان از سال ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷ رخ داده است [۴]. از این رو، شبیه‌سازی عددی پخش و انتشار نفت با استفاده از مدل ریاضی، مبنای مهمی برای مطالعات و تحقیقات آینده است. عوامل بسیاری بر پخش و وضعیت انتشار لکه نفتی در محیط دریایی اثر گذارند. از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پخش و انتشار لکه نفتی در محیط دریایی می‌توان از حجم اولیه لکه نفت رهاشده، ترکیبات آب و گردش آن در زیر و اطراف منطقه نشت نفت نام برد. سرنوشت نفت رهاشده به خصوصیات فیزیکی، شیمیایی نفت و هواشناسی منطقه از قبیل تبخیر، انحلال، و امولسیون، بستگی دارد. این مدل همه عوامل یادشده را مورد بررسی قرار می‌دهد.

داشتن اطلاعات مربوط به پخش، انتشار و زوال لکه نفتی یکی از ملزومات اساسی برای طراحی و آماده‌سازی برنامه مدیریت بلایای طبیعی در فعالیت‌های فعلی و آتی مرتبط با هیدروکربن‌های دریایی است [۵]. می‌توان با شبیه‌سازی ریاضی پخش و انتشار لکه نفتی تصاویری از منطقه تحت تأثیر در شرایط مختلف آب هوایی به دست آورد [۶]. ارون‌دروود یکی از مهم‌ترین منابع آب‌های جاری استان خوزستان و کشور است که نقش مهمی در تعادل زیستی، اکولوژیکی، اجتماعی و شکوفایی اقتصاد و پیشرفت صنایع دارد. این رودخانه از دیرباز و به‌طور مستمر باعث ارتباط و انتقال فرآورده‌های نفتی و صادرات و واردات کالاهای تجاری و کشاورزی از طریق سه بندر مهم خود یعنی آبادان، خرمشهر و بصره بوده و نیاز مردم شهر آبادان به آب شرب و کشاورزی، نخیلات، مراکز صنعتی مهم و بزرگ شیمیایی و غذایی را برطرف می‌ساخته است. با آگاهی از موقعیت مناطق مستعد و آسیب‌پذیر در برابر آلودگی‌های نفتی، نتایج شبیه‌سازی می‌تواند پایه‌ای برای ارزیابی پتانسیل

و تغییرات تراز سطح آب به صورت یک عدد ثابت (۰/۵) به مرز بالادست در بازه زمانی مورد مطالعه به بخش هیدرودینامیکی اعمال شده است. در شکل ۱ تغییرات تراز سطح آب نشان داده شده است.



شکل ۱. تغییرات تراز سطح آب اعمال شده به مرز دریا



شکل ۲. ژرفا سنجی رودخانه اروند

## ۲-۲. منطقه مورد مطالعه

طول بخش مرزی رودخانه اروند ۸۴ کیلومتر و طول سراسری آن حدود ۱۹۰ کیلومتر است، رودخانه اروند از تلاقی رودخانه دجله و فرات در بالادست بصره تشکیل می‌شود، مسیر کلی رودخانه اروند جنوب شرقی و شیب متوسط آن صفر است [۱۱].

رودخانه اروند از محل القرنه رو به سوی جنوب غربی از کنار شهر بصره می‌گذرد و در نقطه‌ای به مختصات طولی ۴۸ درجه و ۶ دقیقه و عرضی حدود ۳۰ درجه و ۲۷ دقیقه به مرز ایران و عراق وارد می‌شود، این رودخانه در شهر خرمشهر با شاخه غربی رود کارون مخلوط شده و شهرستان‌های خرمشهر و آبادان را طی می‌کند و در هشت کیلومتری جنوب اروند به خلیج فارس می‌ریزد [۱۱].

## ۲. مواد و روش‌ها

جریانات جزر و مدی منطقه با استفاده از ماژول MIKE 21 HD از بسته نرم‌افزاری MIKE 21 شبیه‌سازی شد. این شبیه‌سازی به مدت ۳ ماه از تاریخ ۲۱/۲/۱۴۰۴ صورت گرفت. اساس مدل هیدرودینامیکی مایک ۲۱ حل معادله‌های دیفرانسیل حاکم بر جریان دویعدی است. همانند سایر معادله‌ها آن‌ها نیز نیازمند یکسری شرایط مرزی هستند. این شرایط مرزی عبارت است از فشار (ارتفاع سطح آب) در مرزهای باز، عمق‌سنجی مناسب، مقاومت کف و سرعت، جهت و ضریب برشی باد. برای دستیابی به بهترین الگوی هیدرودینامیکی در این رودخانه، بیش از هر چیز به انتخاب صحیح مرزهای باز نیاز است.

### ۲-۱. ایجاد دامنه حل و اعمال شرایط مرزی و اولیه

در این مقاله، دامنه شبیه‌سازی رودخانه اروند است که به صورت یک فایل عمق‌سنجی به نرم‌افزار اعمال شده است. عمق‌سنجی حاصل از رقومی کردن نقشه‌های با مقیاس ۵۰۰۰:۱ است و همچنین گریدبندی به صورت شبکه‌های ۷۰×۷۰ صورت گرفته شده، لازم به یادآوری است این نقشه‌ها با وضوح بالا از اداره کل بندر و دریانوردی خرمشهر دریافت شده است. شکل ۲ ژرفا سنجی اعمال شده به نرم‌افزار را نشان می‌دهد. در این تحقیق دو مرز باز (مرز دریا و مرز بالادست رودخانه) برای مدل در نظر گرفته شده و نوسان سطح آب در مرز دریا به صورت سری زمانی به مدل وارد شده است. این سری زمانی، به کمک ابزار پیش‌بینی جزرومد<sup>۲</sup>، از مؤلفه‌های جزرومدی، در جعبه ابزار مایک ۲۱ ساخته شده است. دامنه و فاز چهار مؤلفه اصلی جزرومد (O<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>) مربوط به دهانه اروند رود از کتاب جدول‌های جزرومدی آدمیرالنتی استخراج و به مدل معرفی شده‌اند. این منطقه، منطبق بر مرز جنوبی در مدل بوده، دامنه و فاز جزر و مدی مؤلفه‌های قید شده در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

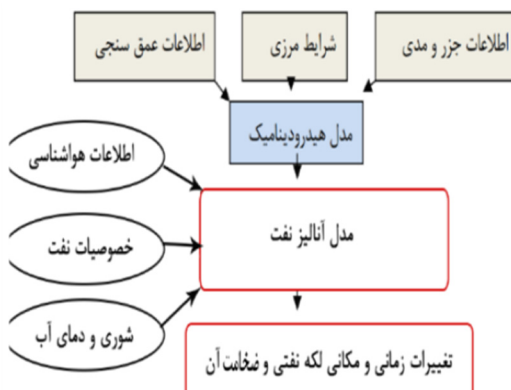
جدول ۱. مؤلفه‌های جزرومدی مرز جنوبی مدل

نام مؤلفه	M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>
دامنه (متر)	۰/۸۴	۰/۲۹	۰/۵	۰/۳
فاز (درجه)	۳۰۸	۹	۲۹۵	۲۴۷

شده است، معادله‌های گفته شده با گسسته سازی به روش تفاضل محدود و بر شبکه منظم حل شده‌اند. در شکل ۴ فلوجارت مدل هیدرو دینامیکی و مدل نفت آورده شده است.

جدول ۲. معرفی کمیت‌های معادله‌های مدل جریان

$h(x, y, t)$	عمق آب ( $\zeta - d, m$ )
$\zeta(x, y, t)$	تراز سطح آب (m)
$d(x, y, t)$	تغییرات زمانی عمق آب (m)
$p, q(x, y, t)$	چگالی شارش در جهت $x, y$ ( $m^3/s/m$ )
$g$	شتاب گرانش ( $m/s^2$ )
$C(x, y)$	مقاومت شزی ( $m^{1/2}/s$ )
$\Omega(x, y)$	پارامتر کوریولیس وابسته به عرض جغرافیایی ( $s^{-1}$ )
$V_x, V_y$	سرعت باد و مولفه‌های آن در جهت‌های $x$ و $y$ (m/s)
$p_a(x, y, t)$	فشار اتمسفر ( $kg/m^2$ )
$\rho_w$	چگالی آب ( $kg/m^3$ )
$t$	زمان (s)
$\tau_{yy}, \tau_{xx}, \tau_{xy}$	مولفه‌های تنش برشی موثر



شکل ۴. فلوجارت مدل هیدرو دینامیکی و شبیه‌سازی انتشار نفت

#### ۴-۲. حساسیت سنجی مدل هیدرو دینامیک

شبیه‌سازی ریاضی با ضرایب مانینگ<sup>۳</sup> مختلف انجام شد و ضریب مانینگ ۶۵ به عنوان ضریب مناسب برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. شکل ۵ و ۶ به ترتیب سری زمانی تراز جزرومدی در بندر فاو و سرعت جریان در اسکله شیلات آبادان برای ضریب مانینگ ۴۰، ۷۵، ۶۵، ۹۰ و داده‌های میدانی با هم مقایسه شده است. تغییرات تراز جزرومدی با ضریب مانینگ به دلیل رابطه مستقیم بین ضریب مانینگ و مقاومت بستر است.

عرض دهانه رودخانه ۲۳۰۰ متر و رنج تغییرات جزرومد در دهانه رودخانه برابر با ۳ متر بوده و بدین سبب خور رودخانه‌ای اروند به لحاظ طبقه‌بندی جزر و مدی در دسته خورهای کشندی میانه قرار می‌گیرد و از نظر طبقه‌بندی شوری، خور رودخانه‌ای اروند در دسته خور رودخانه‌ای با اختلاط ناقص قرار می‌گیرد [۱۱]. شکل ۳ منطقه مورد مطالعه را نشان داده است.



شکل ۳. منطقه مورد مطالعه

#### ۲-۳. مبانی تئوری و معادله‌های حاکم

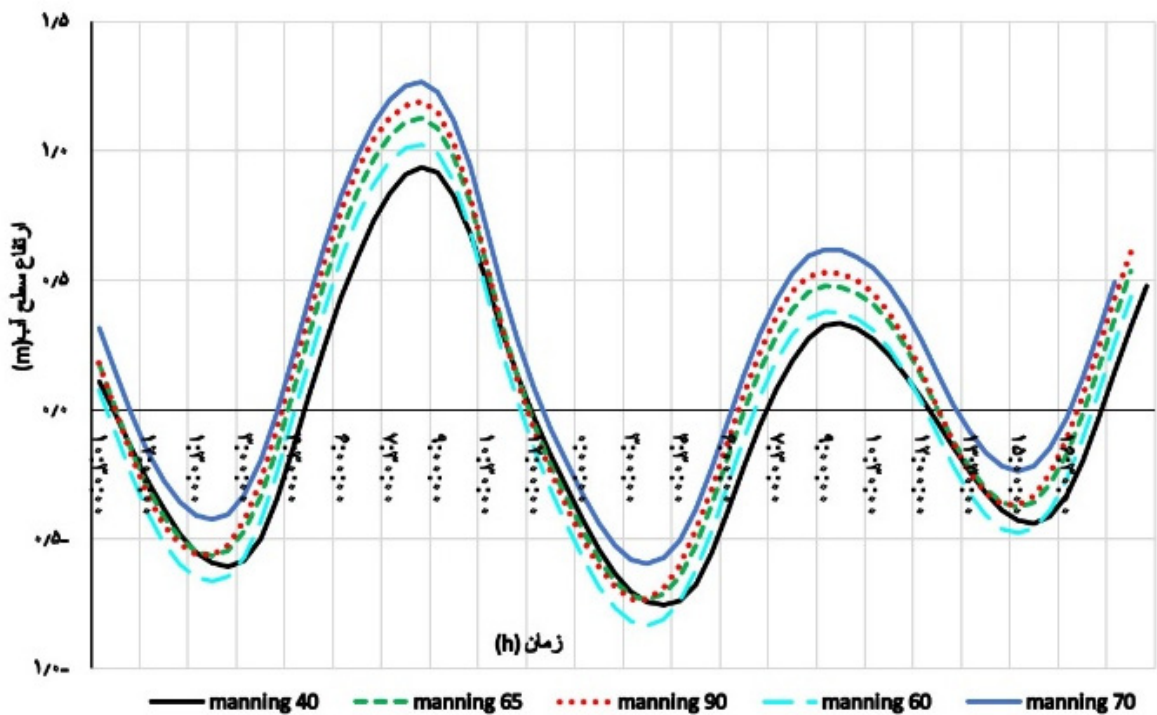
مدل مایک بر پایه روش اویلری توسعه داده شده است و در آن برای مشخص کردن الگوی جریان از معادله‌های پیوستگی و ممتوم (معادله‌های ناویر استوکس متوسط گیری شده در عمق) و معادله‌های (۱)، (۲) و (۳) استفاده شده است [۱۲].

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

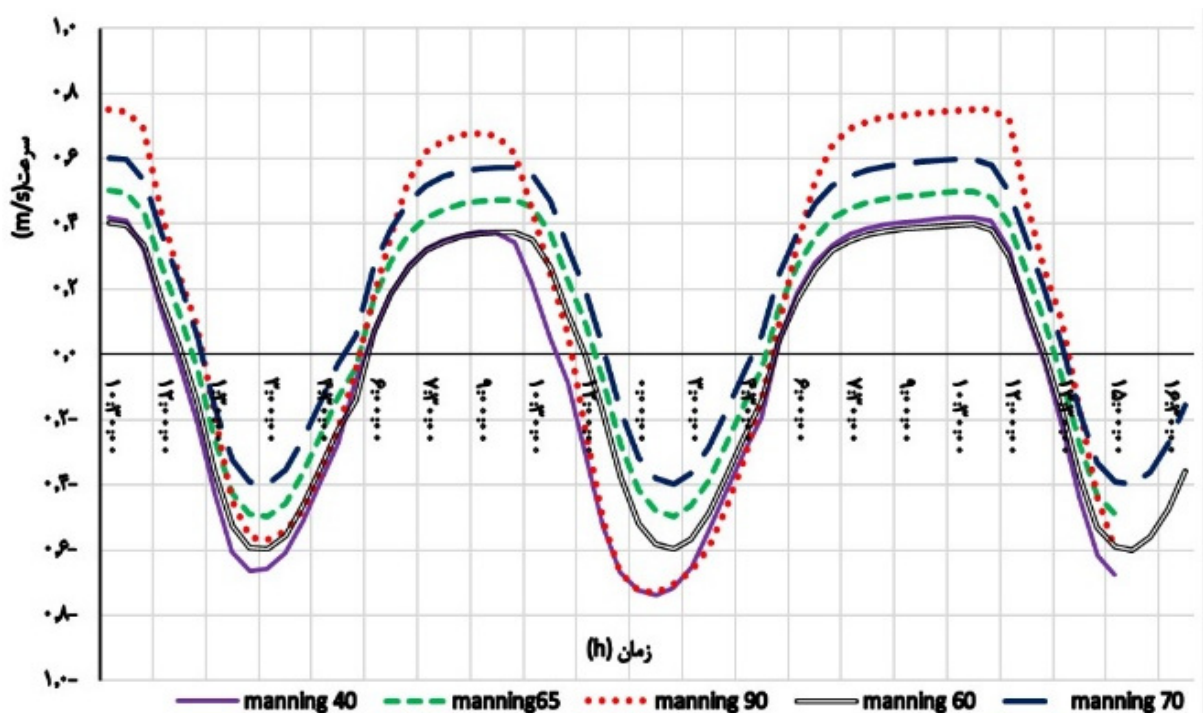
$$\left\{ \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gh \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} \right. \\ \left. - \frac{1}{p_w} \left[ \frac{\partial}{\partial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

$$\left\{ \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gh \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} \right. \\ \left. - \frac{1}{p_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] + \Omega_q - f v v_x + \frac{h}{p_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) \right\} = 0 \quad (3)$$

کمیت‌های استفاده شده در این معادله‌ها در جدول ۲ آورده



شکل ۵. حساسیت‌سنجی تغییرات تراز سطح آب در بندر فاو (جدول آدمیرالتی)



شکل ۶. حساسیت‌سنجی سرعت جریان آب به زبری بستر در مقابل اسکله شیلات آبادان

## ۲-۵. واسنجی و صحت‌سنجی مدل

مدل هیدرودینامیک با اطلاعات اندازه‌گیری شده در محدوده اسکله شیلات آبادان و مؤلفه‌های جزرومدی بندر فاو کالیبره شد. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده عدد مانینگ برابر با ۶۵ و

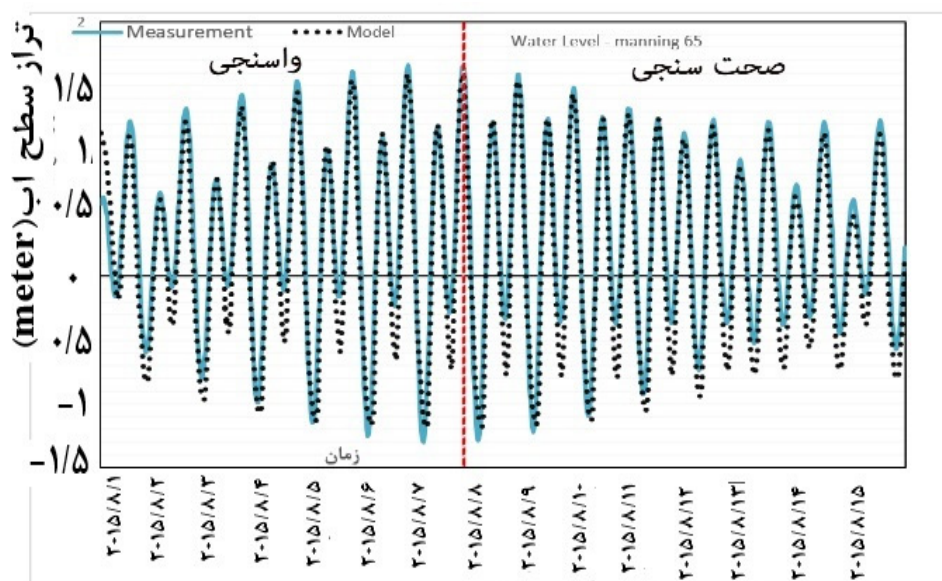
ویسکوزیته گردابی بر اساس فرمول‌بندی اسمانگورینسکی<sup>۴</sup> با مقدار ثابت ۰/۲۸ در نظر گرفته شده که به ازای این مقادیر نتایج شبیه‌سازی با دقت بسیار خوب به نتایج اندازه‌گیری شده تطابق می‌یابد بازه زمانی شبیه‌سازی هیدرودینامیکی به

نمودار پراکندگی جریان آب حاصل از مدل و اندازه گیری میدانی به همراه شاخص های آماری و معادله رگرسیون خطی آورده شده است، مقادیر ضریب همبستگی ( $R^2 = 0.96$ ) و خطای مجذور میانگین مربعات  $Rmse = 0.127$  و رگرسیون خطی  $y = 1.0386x - 0.1088$  نشان می دهد.

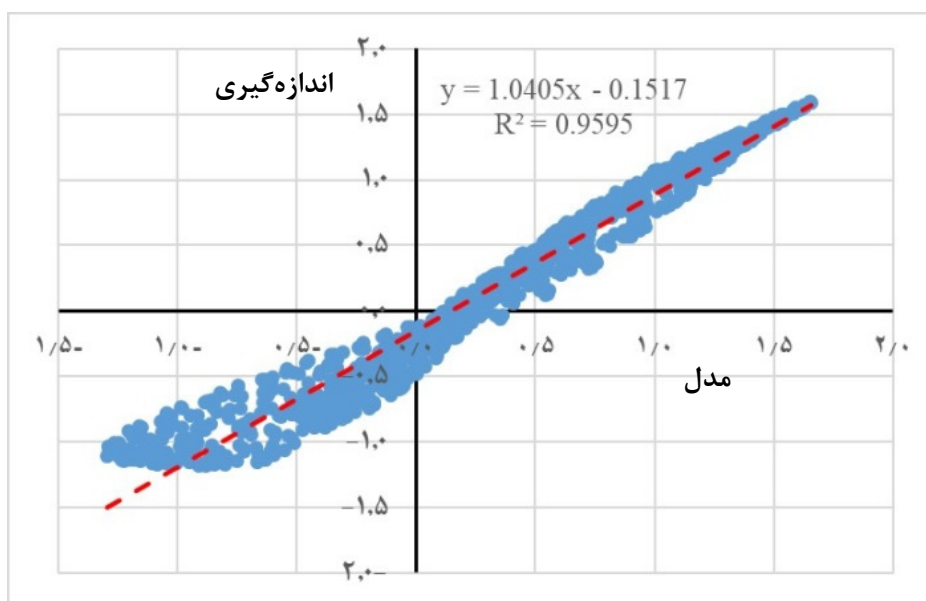
محاسبه آماری نشان می دهد نتایج محاسبات از دقت و کیفیت قابل قبولی برخوردار بوده است و همچنین این پیش بینی ها با نتایج لورنتز تطابق بسیار خوبی دارد [۱۳].

مدت سه ماه اجرا شده است شکل (۷) نشان دهنده واسنجی و صحت سنجی تراز سطح آب در بندر فاو است. در شکل ۸ نمودار پراکندگی تراز آب حاصل از مدل و اندازه گیری میدانی به همراه شاخص های آماری و معادله رگرسیون خطی آورده شده است. مقادیر ضریب همبستگی  $R^2 = 0.95$  و خطای مجذور میانگین مربعات  $Rmse = 0.238$  و رگرسیون خطی  $y = 1.0405x - 0.1517$  است.

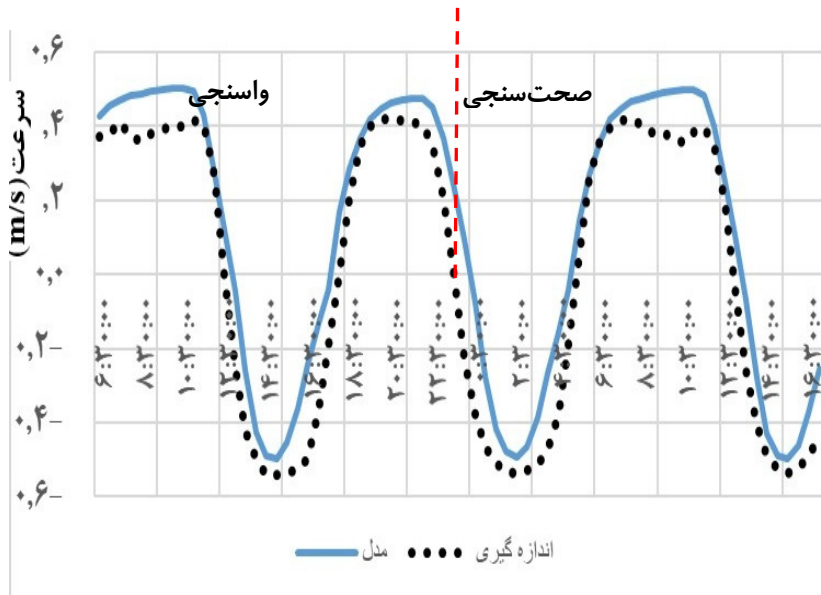
شکل (۹) نشان دهنده واسنجی و صحت سنجی جریان آب در مقابل اسکله شیلات آبادان است، همچنین در شکل (۱۰)



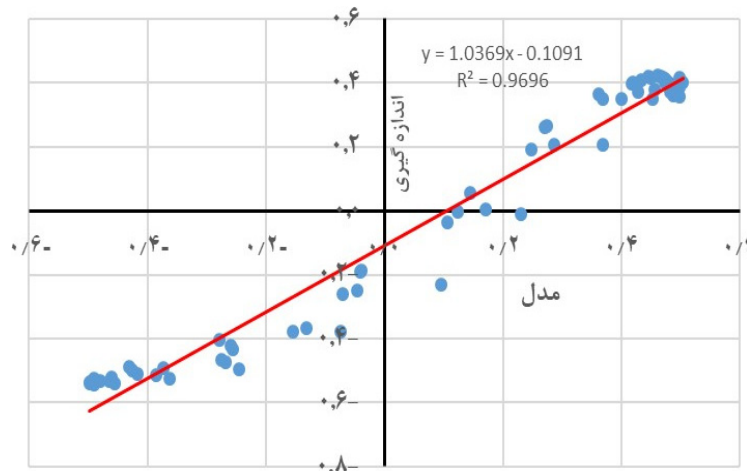
شکل ۷. واسنجی و صحت سنجی تغییرات تراز سطح آب نتایج مدل و نتایج داده های اندازه گیری شده در بندر فاو (جداول جزرومدی آدمیرالیتی)



شکل ۸. نمودار پراکندگی نتایج مدل و میدانی تراز آب



شکل ۹. واسنجی و صحت‌سنجی جریان آب نتایج مدل با نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده مقابل اسکله شیلات آبادان



شکل ۱۰. نمودار پراکنده نتایج مدل و میدانی جریان آب

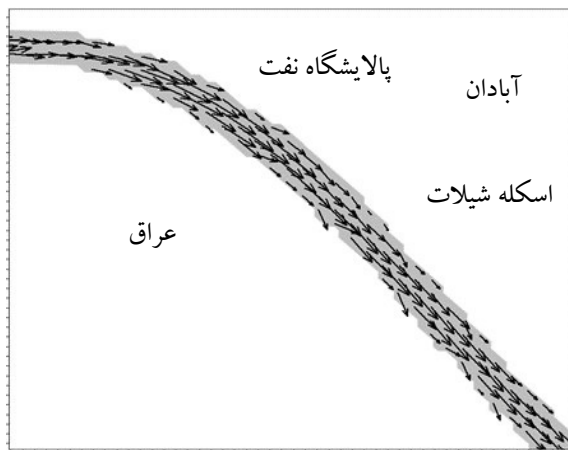
نفتی ریخته شده در بازه زمانی سه ساعت با دبی ثابت ۰/۰۱۸۵ مترمکعب بر ثانیه است. دما و شوری آب ثابت و به ترتیب برابر با ۲۶ درجه سانتی‌گراد و ۲ psu هستند. درجه حرارت هوا و میزان ابرناکی منطقه به صورت سری زمانی به مدل اعمال شده است. مقادیر ثابت ضریب بازتابش نفت، آب و هوا برای موازنه حرارتی لکه نفتی به ترتیب مقادیر ۰/۸۲، ۰/۹۸، و ۰/۸۲ در نظر گرفته شده است. ثابت تبخیر به کاررفته در شبیه‌سازی ۰/۰۲۹ است که نسبت مستقیم با میزان آب و نفت تبخیر شده دارد.

به‌علت پدیده امولسیون حجم نفت در ستون آب افزایش یافته است، که این خود موجب افزایش مقدار ویسکوزیته می‌شود.

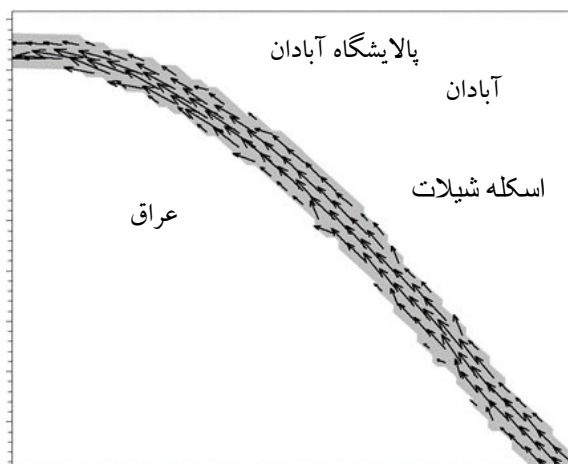
### ۳. شبیه‌سازی پخش و انتشار آلودگی نفتی

در این مرحله پس از شبیه‌سازی جریان‌های جزر و مدی و شرایط هیدرودینامیک منطقه، به مدل‌سازی پخش و انتشار لکه نفتی ناشی از تخلیه ۲۰۰m<sup>۳</sup> آلاینده نفتی که در مدت زمان ۳ ساعت با دبی ۰/۰۱۸۵ مترمکعب بر ثانیه به داخل رودخانه اروند نشت پیدا کرده است، پرداخته می‌شود. 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 دوعبدهی منظم است، فایل سری زمانی دبی آلودگی

ساعت از لحظه شروع رهاسازی، لکه نفتی به سمت دریا حرکت کرده (شکل ۱۳ تا ۱۶)، سپس از ساعت ششم تا دوازدهم (شکل ۱۶ تا ۱۷) لکه نفتی به سمت بالا دست رودخانه حرکت کرده است، در ادامه ۷ کیلومتر از قسمت بالا در معرض آلودگی قرار گرفته است، به طوری که این روند طی سیکل جزر و مدی تکرار می شود، در نهایت اولین لکه نفتی بعد از ۱۲۴ ساعت از رهاسازی لکه نفتی به دریا می رسد و منطقه دریا را آلوده می سازد. این موضوع با نتایج حاصل از مدل سازی هیدرودینامیک جریانات منطقه و کثرت و شدت بردارهای جریان حاکم تطابق و هماهنگی دارد. بر اساس محاسبات انجام شده به وسیله مدل حجم نفت خارج شده از مرزهای باز محدوده کلی مدل سازی شده در این بخش در حدود صفر است.



شکل ۱۱. بیشینه سرعت جریان در حالت جزر مقابل پالایشگاه نفت آبادان



شکل ۱۲. بیشینه سرعت جریان در حالت مد در مقابل پالایشگاه نفت آبادان

به منظور انجام فرایند امولسیون شدن نفت در آب و آب در نفت ضریب حداکثر حجم آب ۰/۸۵، حجم آسفالتین ۰/۰۵، درصد حجم واکس ۵/۷، ثابت جذب آب  $5 \times 10^{-7}$  و ثابت رها آب  $1/2 \times 10^{-5}$  (پیش فرض مدل) است.

برای تعیین میزان انحلال نفت در ستون آب ضریب تبادل جرمی انحلال نفت برابر با  $2/36 \times 10^{-6}$  (پیش فرض مدل) در نظر گرفته شده است، ویژگی لکه نفتی شامل نوع نفت، درصد حجمی اجزاء تشکیل دهنده آن و نقطه جوش هر یک از اجزاء نفت اعمال شده به مدل در جدول ۳ آمده شده است.

جدول ۳. مشخصات نفت در مدل (DHI, 2012)

شماره	ترکیب نفت	نقطه جوش	درصد جزئی
۱	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	۶۹-۲۳۰	۷/۴
۲	C <sub>13</sub> H <sub>25</sub>	۲۳۰-۴۰۵	۱۷/۳
۳	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	۷۰-۲۳۰	۲/۸
۴	C <sub>13</sub> H <sub>23</sub>	۲۳۰-۴۰۵	۶/۵
۵	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub>	۸۰-۲۴۰	۱۹/۸
۶	C <sub>7</sub> H <sub>18</sub>	۲۴۰-۴۰۰	۴۶/۲
۷	C <sub>9</sub> H <sub>25</sub>	۱۸۰-۴۰۰	۰
۸	باقی مانده	۴۰۰ <	۰

#### ۴. نتایج شبیه سازی هیدرودینامیکی

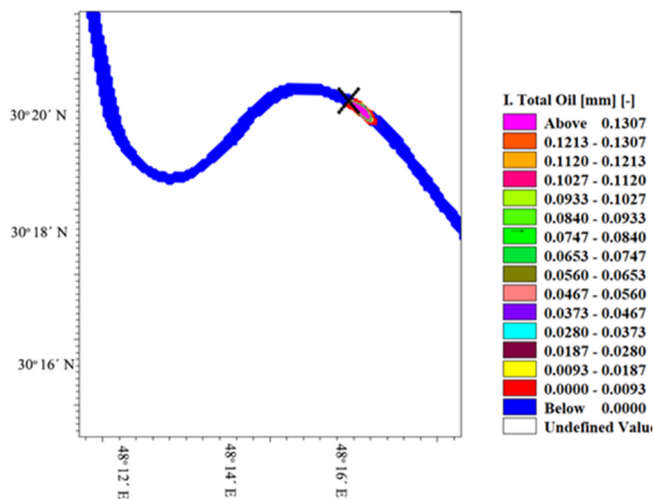
به منظور بررسی الگوی جریان در اروندرود، بردارهای میانگین جریان از سطح تا بستر در بازه زمانی مختلف در دو حالت جزر و مد در دهانه اروندرود به صورت شکل ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده و با بررسی رفتار عددی مبحث تری و خشکی در مطالعات جزرومد از طریق بررسی مکرر سلول های تر و خشک در نظر گرفته شده است.

#### ۵. نتایج حاصل از شبیه سازی الگوی پخش و انتشار آلودگی نفتی

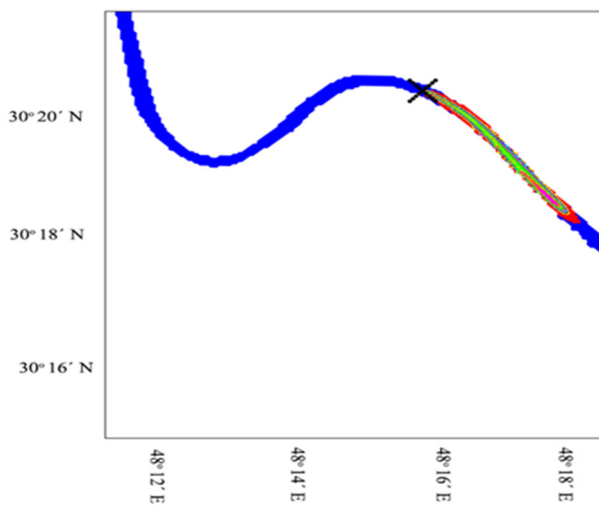
در شکل ۱۳ تا ۱۹ وضعیت لکه نفتی از شروع نشست نفت تا لحظه رسیدن لکه نفتی به خلیج فارس نشان داده شده است.

لکه نفتی پس از رها شدن، با جریان به سمت دریا حرکت کرده، سپس با تغییر رژیم جریان از جزر به مد به سمت بالادست رودخانه حرکت کرده است، به طوری که پس از ۶

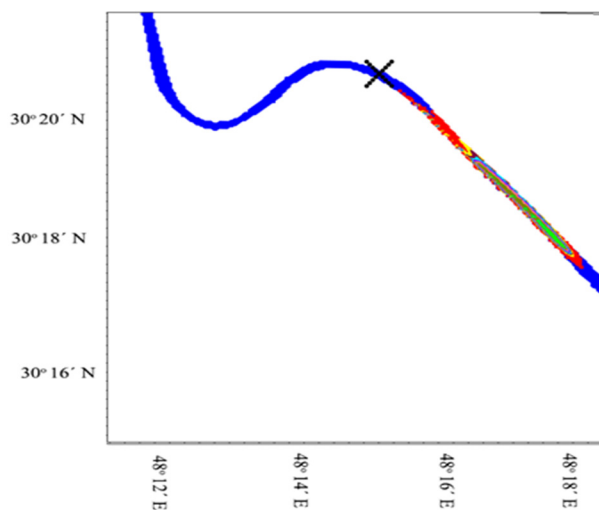




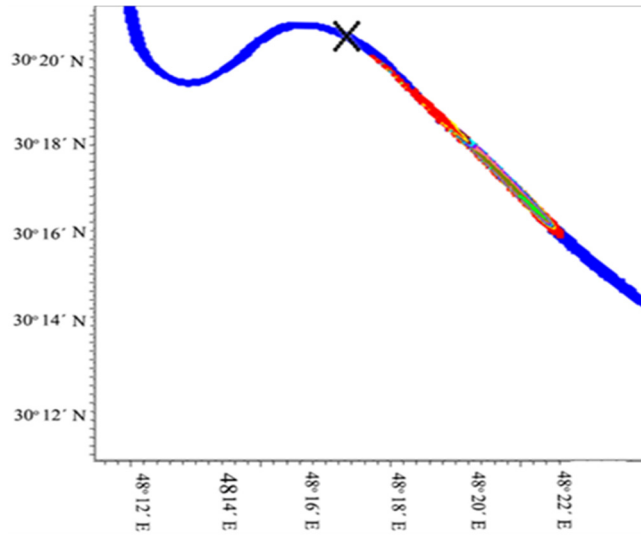
شکل ۱۳. وضعیت لکه نفتی پس از ۱ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۷)



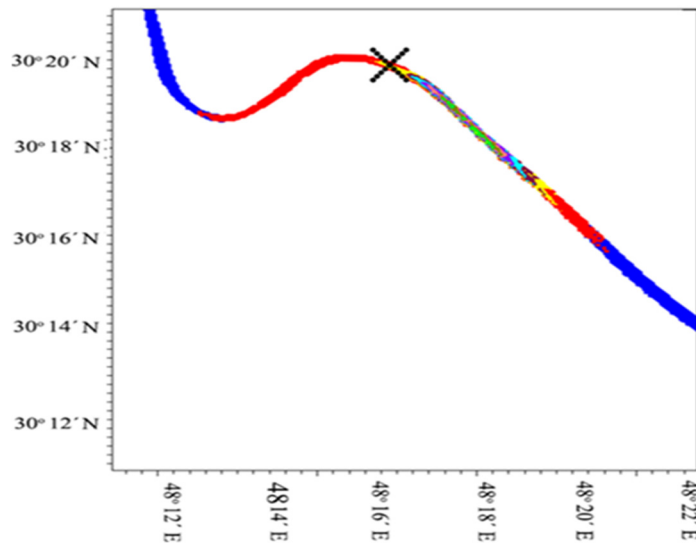
شکل ۱۴. وضعیت لکه نفتی پس از ۳ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۹)



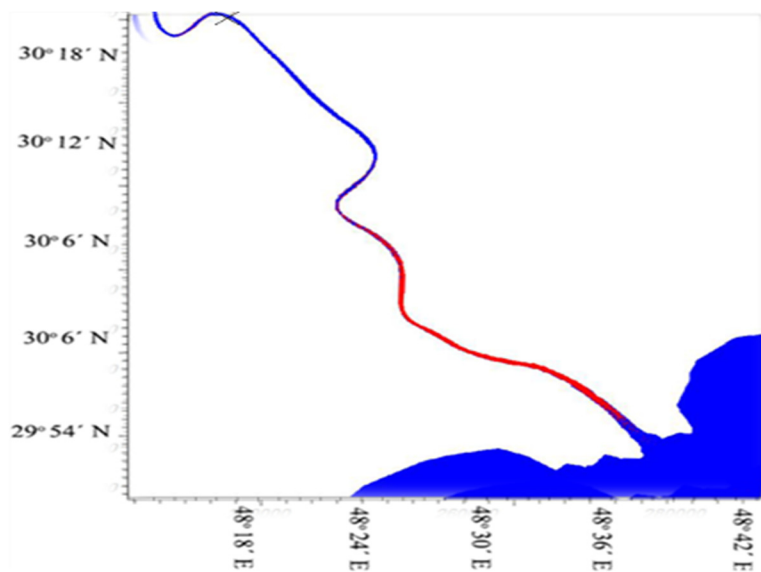
شکل ۱۵. وضعیت لکه نفتی پس از ۴ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۱: ساعت ۱۰)



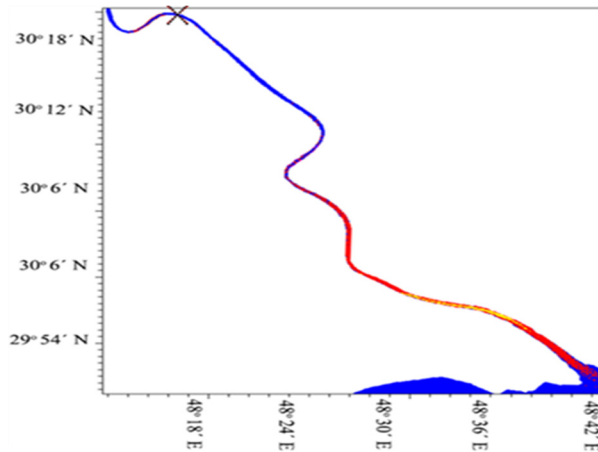
شکل ۱۶. وضعیت لکه نفتی پس از ۶ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۲: ساعت ۰۰)



شکل ۱۷. وضعیت لکه نفتی پس از ۱۲ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۲: ساعت ۶)



شکل ۱۸. وضعیت لکه نفتی پس از ۱۲:۳۰ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۶: ساعت ۲۱)



شکل ۱۹. وضعیت لکه نفتی پس از ۱۲۴ ساعت (۲۰۱۴/۲/۲۶: ساعت ۲۲)

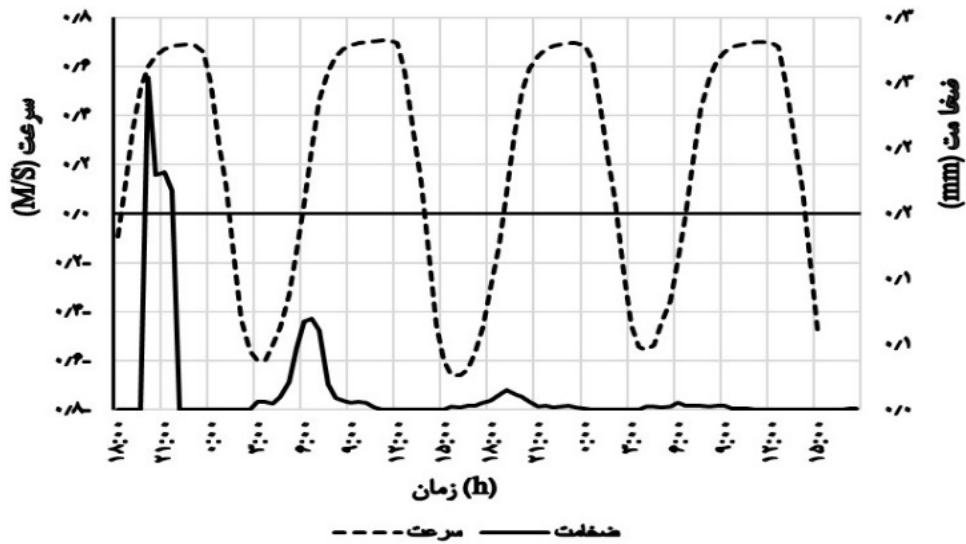
نقاط بالادست صفر است. با تغییر رژیم جریان از جزر به مد، لکه نفتی به سمت بالادست حرکت می‌کند و بعد از ۹ ساعت لکه نفتی به یک کیلومتری بالادست می‌رسد پس ضخامت افزایش پیدا می‌کند و با کامل شدن روند مد لکه نفتی به سمت بالادست حرکت می‌کند و ضخامت لکه نفتی در نقطه مورد نظر کاهش می‌یابد، هنگامی که دوباره جزر آغاز می‌شود لکه نفتی به سمت پایین دست حرکت می‌کند و ضخامت در سلول مورد نظر در وسط رودخانه افزایش می‌یابد. با کامل شدن جزر و حرکت لکه نفتی به سمت پایین دست، ضخامت در این نقطه کاهش می‌یابد. در بیشینه سرعت جزر باقی مانده لکه نفتی از گوشه و کنار به سمت پایین دست حرکت می‌کند، در نهایت ضخامت افزایش می‌یابد.

روند تغییرات ضخامت در شکل ۲۲ شبیه به شکل ۲۰ است، با این تفاوت که لکه نفتی بعد از ۳ ساعت به ۵ کیلومتری پایین دست می‌رسد و ضخامت در این نقطه، به دلیل کمتر بودن عرض رودخانه بزرگ‌تر از ضخامت در ۱ کیلومتری پایین دست است.

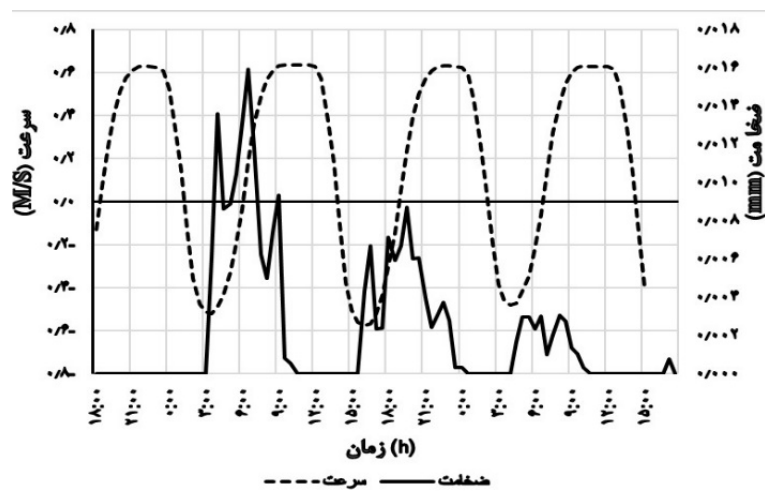
روند ضخامت لکه نفتی در شکل ۲۳ مانند شکل ۲۱ است، با این تفاوت که لکه نفتی پس از ۱۰/۵ ساعت به ۵ کیلومتری بالادست می‌رسد و ضخامت به دلیل فاصله از منبع آلودگی و کم بودن آلودگی در بالادست در هنگام بیشینه سرعت جزر به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۲۰ تا ۲۳ سری زمانی تغییرات ضخامت لکه نفتی در قسمت بالادست و پایین دست منبع آلودگی نشان داده شده است، با توجه به اینکه نشت نفت در هنگام جزر اتفاق می‌افتد و لکه نفتی ابتدا به سمت پایین دست رودخانه حرکت می‌کند، ضخامت لکه نفتی در قسمت پایین دست نسبت به قسمت بالادست رودخانه بزرگ‌تر است از آنجا که لکه نفتی در هنگام جزر رها شده و نشت نفت به مدت ۳ ساعت رخ می‌دهد؛ بنابراین در شکل ۲۰ لکه نفتی به سمت پایین دست حرکت می‌کند و پس از ۱/۵ ساعت به یک کیلومتری پایین دست می‌رسد و ضخامت آن افزایش پیدا می‌کند، در ادامه روند جزر لکه نفتی از نقطه مورد نظر در وسط رودخانه به سمت پایین دست رفته و باعث کاهش ضخامت لکه نفتی در این نقطه می‌شود، طوری که ضخامت به صفر می‌رسد و در نهایت با تغییر رژیم جریان و آغاز مد همچنان ضخامت در این نقطه صفر است و با افزایش سرعت مد و حرکت لکه نفتی به سمت بالادست ضخامت افزایش می‌یابد، از آن جا که در جزر سابق لکه نفتی به میزان زیادی از این نقطه دور شده، همچنین به دلیل فرایندهای شیمیایی، بخش کوچکی از لکه نفتی به نقطه مورد نظر می‌رسد و باعث به وجود آمدن پیک کوچک از ضخامت می‌شود.

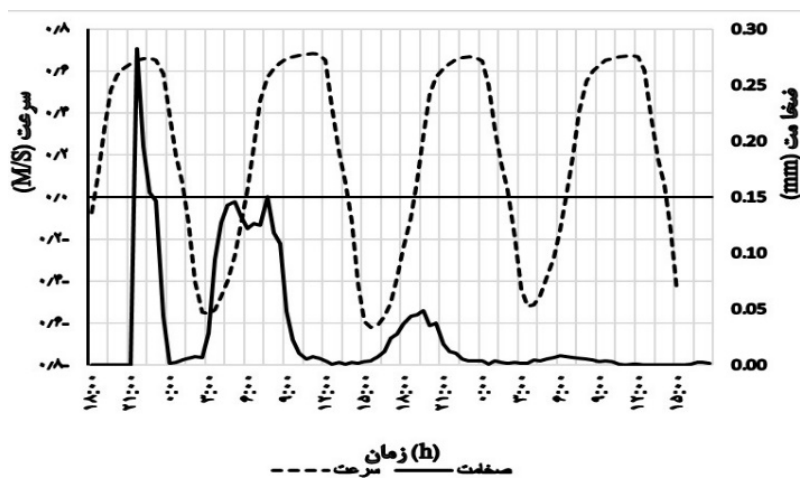
در شکل ۲۱ با توجه به این که لکه نفتی در هنگام جزر رها شده و نفت به مدت سه ساعت نشت شده است، بنابراین ابتدا لکه نفتی به سمت پایین دست حرکت می‌کند و ضخامت در



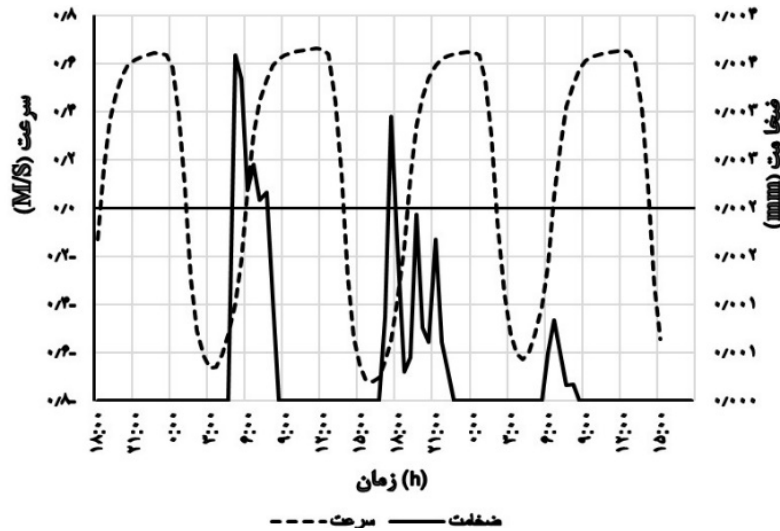
شکل ۲۰. ضخامت لکه نفتی در ۱ کیلومتری پایین دست نقطه رهاسازی لکه نفت



شکل ۲۱. ضخامت لکه نفتی در ۱ کیلومتری بالادست نقطه رهاسازی لکه نفت



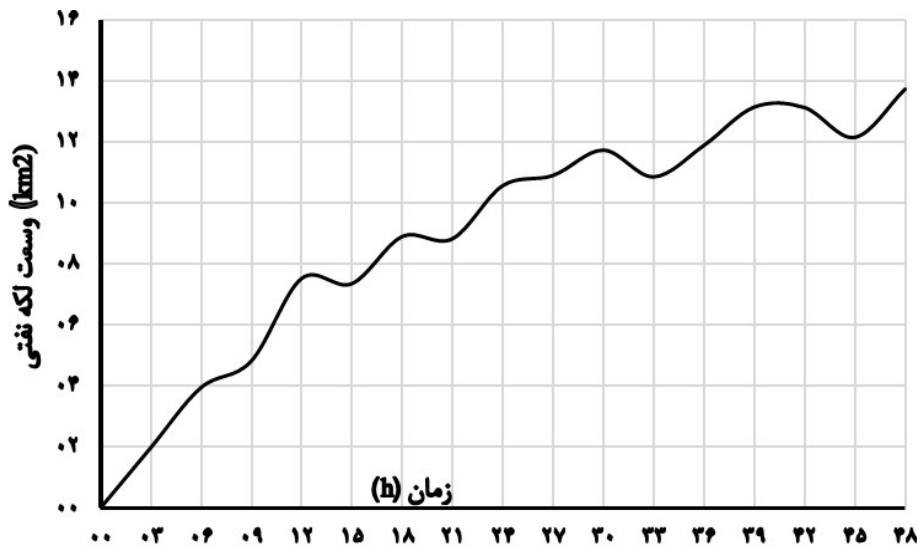
شکل ۲۲. ضخامت لکه نفتی در ۵ کیلومتری پایین دست نقطه رهاسازی لکه نفت



شکل ۲۳. ضخامت لکه نفتی در ۵ کیلومتری بالادست نقطه رهاسازی لکه نفت

در نهایت به دلیل جزر و مد روند نوسانی پیدا می‌کند به طوری که در هنگام مد کاهش پیدا می‌کند و در هنگام جزر افزایش می‌یابد، ولی با گذشت زمان به دلیل به دام انداختن لکه نفتی در ساحل و طی نمودن مسافت بیشتر، روند صعودی خود را حفظ می‌کند.

از آنجاکه سرعت جزر نسبت به سرعت مد بیشتر است؛ بنابراین لکه نفتی در شکل ۲۴، در ساعت‌های اولیه با شیبی تند افزایش پیدا می‌کند و با تغییر رژیم جریان از جزر به مد وسعت لکه نفتی روند افزایش خود را حفظ می‌کند ولی به دلیل برگشتن لکه نفتی با شیب ملایم‌تری افزایش پیدا کرده و



شکل ۲۴. وسعت لکه نفتی در یک دوره ۴۸ ساعته پس از نشت نفت

۱۲۴ ساعت، پس از رهاسازی لکه نفتی به خلیج فارس می‌رسد، از آنجاکه پخش و انتشار آلودگی نفتی در اروندرود تابع جریان است و در هنگام جزر، جریان طبیعی رودخانه با جریان ناشی از جزر هم سو است، بنابراین جریان و لکه نفتی به سمت خلیج فارس حرکت می‌کنند و در هنگام مد، جریان و آلودگی به سمت بالادست رودخانه حرکت می‌کنند.

## ۶. نتیجه‌گیری و بحث

از آنجاکه عامل اصلی انتشار آلودگی، جریان است، بنابراین پخش آلودگی در اروندرود تحت تأثیر جریانات کشندی است و به تبع آن روند پخش آلودگی نفتی نیز حالت رفت و برگشتی دارد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی آلودگی حدود

[۸] مؤمن نیا سارا، مدیحی محمد سعید، سیف ا. .... راعی محمد، عطایی آشتیانی بهراز. شبیه سازی ریاضی الگوی پخش و انتشار آلودگی نفتی در دریا - مطالعه موردی کانال قشم. ارائه شده در سیزدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران؛ ۱۳۹۰ آبان ۱۷ تا ۱۹؛ جزیره کیش، ایران.

[۹] بدری محمدعلی، فقیهی فرد محسن. شبیه سازی عددی آلودگی نفتی بر اساس الگوی بهینه اغتشاشی جریان و تأثیرات باد و جزر و مد. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۳۹۴؛ ۴۵(۴): ۲۲-۱۵.

[10] Dong L, Liu J, Du X, Dai C, Liu RJEI. Simulation-based risk analysis of water pollution accidents combining multi-stressors and multi-receptors in a coastal watershed. 2018;92:161-70.

[۱۱] اعتماد شهیدی امیرفرشاد، صبوری امیرادهم، پارسا جواد. کنترل نفوذ شوری در خور رودخانه ای اروند در شرایط مختلف هیدرولوژیکی. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۳۹۰؛ ۷(۷): ۵۰-۶۰.

[12] DHI (Danish Hydraulic Institute). MIKE21: Oil Spill Module Scientific Documentation. Copenhagen: DHI; 2012b.

[13] Lorentzen TJoMS. Statistical analysis of temperature data sampled at Station-M in the Norwegian Sea. 2014;130:31-45.

### پی نوشت ها

1. Coastal Accidental Water Pollution Risk Analysis
2. Tidal Prediction of Heights
3. Manning Coefficient
4. Smagorinsky
5. Correlation Coefficient
6. Root Mean Square Error

از آنجا که رهاسازی لکه نفتی در هنگام جزر اتفاق می افتد، انتشار و پخش لکه نفتی بیشتر به سمت پایین دست است، طوری که بالاتر از ۵ کیلومتر به ندرت آلوده می شود.

ضحامت در نقاط پایین دست نسبت به نقاط بالادست بیشتر است. ضحامت لکه نفتی اغلب به مسافت طی شده و عرض رودخانه بستگی دارد، به طوری که هر چه عرض رودخانه کمتر باشد ضحامت بیشتر و وسعت کمتر است، با افزایش مسافت طی شده ضحامت لکه نفتی کاهش و وسعت آن افزایش می یابد.

### مراجع

- [۱] مهرمطلق محسن. مدل سازی عددی دوبعدی انتقال و پخش آلودگی با روش تفاضلات محدود به صورت صریح Explicit در محیط دریا. ارائه شده در دهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی؛ ۱۳۹۱ آبان ۲۹- آذر ۱؛ تهران، ایران.
- [2] Hampson GR, Moul ETJJotFBoC. No. 2 fuel oil spill in Bourne, Massachusetts: Immediate assessment of the effects on marine invertebrates and a 3-year study of growth and recovery of a salt marsh. 1978;35(5):731-44.
- [3] Papadimitrakis J, Psaltaki M, Christolis M, Markatos NJEM, Software. Simulating the fate of an oil spill near coastal zones: The case of a spill (from a power plant) at the Greek Island of Lesvos. 2006;21(2):170-7.
- [4] Etkin DS, Welch J, editors. OIL SPILL INTELLIGENCE REPORT INTERNATIONAL OIL SPILL DATABASE: TRENDS IN OIL SPILL VOLUMES AND FREQUENCY1. International Oil Spill Conference; 1997: American Petroleum Institute.
- [5] Ventikos NP, Psaraftis HNJJJoHM. Spill accident modeling: a critical survey of the event-decision network in the context of IMO's formal safety assessment. 2004;107(1-2):59-66.
- [6] Reed M, Daling P, Lewis A, Ditlevsen MK, Brørs B, Clark J, et al. Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters. 2004;19(7-8):681-90.
- [7] Marinov D, Norro A, Zaldivar J-MJEM. Application of COHERENS model for hydrodynamic investigation of Sacca di Goro coastal lagoon (Italian Adriatic Sea shore). 2006;193(1-2):52-68.