

مدل عددی سه بعدی پیش بینی حرکت لکه نفت ناشی از ریزش اتفاقی در ناحیه بین جزیره خارک و بندر بوشهر - سواحل شمالی خلیج فارس در تابستان

شهلا حبیبی واحد زنجانی^{*۱}

shhabibip@standard.ac.ir

علی اکبر بیدختی^۲

تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۱۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۷

چکیده

زمینه و هدف: این مقاله، مدل عددی سه بعدی بر اساس حل معادلات حاکم ناویر استوکس و پیوستگی جهت پیش‌بینی حرکت لکه نفتی ناشی از حادثه ریزش اتفاقی در ناحیه بین جزیره خارک و بندر بوشهر واقع در سواحل شمالی خلیج فارس را معرفی می‌کند. **روش بررسی:** در این مدل با کمک معادله غلظت، مدل سه بعدی حرکت ذرات نفت در ستون آب به دست می‌آید. در فرمول‌بندی مدل از تقریب بوسینسک به صورت معادلات لپس استفاده شده است. برای حل معادله فرا رفت در مدل، الگوریتم بالاسوی وزن‌دار ترابرد مثبت معین چند بعدی (MPDATA)^۳ به کار رفته است. اساس این الگوریتم، طرحواره ساده پاد جریانسو است که در آن از مفهوم سرعت پاد پخش برای تعدیل اثر پخش موجود در طرحواره استفاده می‌شود. در مدل، سرعت باد و ضرایب پخش عمودی و افقی، چگالی جریان آب - نفت متغیر در نظر گرفته شده است.

یافته‌ها: مدل عددی با شبکه به ابعاد 180×555 کیلومتر مربع، 11346 نقطه، $\Delta X = \Delta Y = 3000$ متر اجرا شده و شکل‌های توزیع غلظت و جهت ذرات نفت خام در تابستان طی $1/7$ ، 7 و 14 ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در ترازهای 5 ، 10 و 15 متر از سطح آب به دست آمده است.

نتیجه‌گیری: مدل نشان می‌دهد جهت حرکت ذرات در تابستان به طرف بندر بوشهر می‌باشد که با تجربیات و مطالعات در توافق می‌باشد. این تحقیق می‌تواند در پیش‌بینی و جهت حرکت آلودگی نفت به منظور جمع‌آوری آلودگی ناشی از ریزش اتفاقی در دریا، جهت جلوگیری از خطر حرکت آن به طرف ساحل، مفید واقع شود.

کلمات کلیدی: مدل عددی، حرکت نفت، اختلاف محدود صریح، جزیره خارک و بندر بوشهر.

۱- استادیار گروه پژوهشی مکانیک و فلزشناسی، پژوهشکده برق، مکانیک و ساختمان، پژوهشگاه استاندارد* (مسئول مکاتبات)

۲- استاد موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

مقدمه

در سال‌های اخیر، مسئله افزایش آلودگی خط ساحلی توسط ریزش نفت مورد توجه بوده است. به‌طوری‌که فرآیندهای همچون تخلیه صنعتی، انتقال و اکتشاف نفت، امکانات ذخیره نفت، حرکت مکرر نفتکش‌ها و غیره، خطر حوادث ریزش نفت را افزایش داده است. ریزش عمده نفت می‌تواند خط ساحلی را آلوده کند و باعث صدمات بلند مدت در محیط آبریان برای ماهیگیری و حیات وحش شود. ریزش نفت ممکن است ساختارهای لنگرگاه و کشتی‌ها را نیز آلوده کند. برای آماده بودن چنین حوادثی، بسیاری از آژانس‌های دولتی، نقشه‌های ریزش نفت غیرمترقبه را تهیه کرده‌اند. مولفه مهم این نقشه‌ها، کاربرد مدل‌های عددی است که حرکت لکه نفت و توزیع غلظت‌های ذرات نفت را در آب‌های ساحلی پیش بینی می‌کند. ایجاد سیستمی کاربردی برای پیش بینی انتقال و پخش آلودگی نفتی در حوادث احتمالی ریزش در طی توسعه میدان‌های نفتی نیاز می‌باشد. امروزه خلیج فارس به علت برخورداری از ذخایر عظیم نفت و گاز با گستردگی تولید و صدور و به سبب دستیابی سریع به اقیانوس‌ها و آب‌های آزاد از اهمیت بازرگانی، ارتباطی و استراتژیکی خاص برخوردار می‌باشد.

در سال ۱۹۸۹ سگریک و همکاران (۱)، جریان‌های سطحی ناشی از رانش باد را برای پیش بینی حرکات لکه نفت در خلیج فارس را بررسی کردند که شامل یک الگوریتم محاسباتی برای تعیین جریان‌های سطحی تحت شرایط باد بود که برای پیش بینی حرکت لکه نفت در خلیج فارس استفاده شد. در مدل هیدرودینامیک سه بعدی، جریان‌های سطحی برای هر سرعت باد داده شد. سرعت باد ترکیبی از هشت جهت اصلی باد و هفت سرعت باد در محدوده ۵ تا ۳۵ گره بود. این الگوریتم توانسته بود جریان‌های سطحی را با شرایط مختلف باد برای حرکات لکه نفت پیش بینی کند.

در سال ۱۹۹۲ میلادی (۲)، پیپر دانیل مطالعات خود را تحت عنوان مطالعه عددی حرکت لکه نفت در سطح دریا در خلیج فارس از ۲۵ ژانویه تا اول فوریه سال ۱۹۹۱ میلادی ارائه داد. جهت پیش بینی‌های دریایی، دو مدل جو جهانی که میدان باد

و میدان فشار در سطح دریا را پیش بینی می‌کرد، معرفی شد. ریزش نفت حدود ۸۰۰۰۰۰ تن در محل مینا آل بکر (سواحل کویت) صورت گرفت که ۵۶۰ کیلومتر از ساحل عربستان سعودی را تحت تأثیر قرار داد. مدل که حرکات لکه را با داده‌های جوی پیش بینی می‌کرد، نشان داد که حرکات لکه‌ها با مشاهدات مربوط به گزارش رسانه‌ها نسبتاً خوب شبیه‌سازی شده است. در مدل فرآیندهای فیزیکی تبخیر، گسترش، حلالیت در نظر گرفته نشد.

در سال ۱۹۹۳ میلادی (۳)، پرایس و همکاران، مطالعات خود را تحت عنوان مدل‌های عددی و تجربی برای انتقال سطحی ریزش نفت در خلیج فارس را ارائه دادند. این مطالعه شامل قسمت اول مدل مسیریابی ریزش نفت به نام Gulf slickII که توسط KFUPMRI توسعه یافت که انتقال سطحی ریزش نفت را شبیه سازی کرده و با کاربرد داده‌های بویه‌های شناور گشت دریایی مونت میشل (Mt Mitchell Cruise) آزمایش شد. نتایج نشان داد که مدل دقت معقولی داشته است. در سال ۲۰۰۷ دی مارتینو و همکاران (۴)، در مورد شبیه‌سازی حرکت نفت با استفاده از مدل آب کم عمق، رفتار لکه نفت در سطح دریا با استفاده از یک مدل آب کم عمق با مرز آزاد مورد مطالعه قرار دادند این مدل توسط روش اولری لاگرانژی‌های با استفاده از روش مشخصه و با استفاده از یک گسسته فضایی گالرکین حل شده بود.

در سال ۱۳۹۱ بدری و همکاران (۵)، شبیه‌سازی عددی حرکت لکه نفت در خلیج فارس را با تحت تأثیر قرار دادن عوامل جزر و مدی در نزدیکی جزیره خارک و بندر عسلویه را مطالعه کردند که در این شبیه‌سازی الگوی جریان آب با توجه به نوسانات سطح آب برای تعیین سرنوشت و انتقال آلودگی در دریا تعیین شد. مؤلفه‌های جزر و مدی مهم از طریق اعمال شرایط اولیه نوسانات آب در تنگه هرمز در محل جزیره هنگام در مدل داده شده بود که در نهایت بررسی نشان می‌داد که کاربرد توصیف فرآیندهای جابجایی انتشار پخش افقی و عمودی و استهلاک لکه نفتی به تخمین حجم باقیمانده نفت بر روی آب و مقدار

در سال ۱۳۸۰، سیدرضا صباغ یزدی (۸)، مدل دو بعدی جزر و مدی پراکنش نفت در خلیج فارس را با حل معادلات میانگین عمقی بر روی شبکه اجزای بی ساختار ارائه داد. به طوری که از نتایج آنالیز هارمونیک که نوسانات جزر و مدی را در نزدیکی تنگه هرمز شامل می شد برای شرایط مرزی جزر و مدی در تنگه هرمز استفاده شد.

در این مقاله، مدل عددی سه بعدی جهت ریزش اتفاقی نفت خام در منطقه میان بندر بوشهر و جزیره خارک با کمک داده های جوی و دریایی و حل معادلات حاکم فرآیندهای مؤثر بر نفت خام به همراه فرضیات و شرایط اولیه و مرزی شبیه سازی شده است. برای حل معادله فرا رفت در مدل، الگوریتم بالا سوی وزن دار ترابرد مثبت معین چند بعدی (MPDATA) به کار رفته است (۹). این مدل سابقا در منطقه دریایی عسلویه اجرا شده است و نتایج حاصل از مدل با مشاهدات سازگاری خوبی داشته است (۱۰).

مواد و روش ها

معادلات پایه مورد استفاده در مدل

فرآیندهای مؤثر بر لکه نفت ریزش شده:

معادله گستردگی (گسترش لکه نفت در سطح آب)

گسترش نفت، بسط افقی یک لکه نفت بدلیل ثقل، اینرسی، ویسکوزیته و نیروهای تنش سطحی می باشد. Lehr لهر و همکاران (۱۹۸۴)، معادله اصلاح شده گسترش نوع فی با اثر باد را در نظر گرفتند (۱۱-۱۲). بر اساس معادله لهر، مساحت لکه نفت به دلیل گسترش در هر مرحله زمانی می تواند به دست آید. با توجه به این که لکه های نفت به طور نامتقارن گسترش می یابد، در مدل عددی فرض شده است که لکه نفت به شکل یک بیضی با محور بزرگ در جهت باد گسترش یافته که معادله این گستردگی توسط لهر به صورت زیر می باشد:

تبخیر - امولسیون و نفوذ ذر داخل آب در محل جزیره خارک و بندر عسلویه منجر می شود.

در سال ۱۳۹۱ صالحی پورباورصاد و همکاران (۶)، مدل سازی لکه نفتی و مقایسه مسیر حرکت تحت تأثیر بادهای مختلف در جزیره لاوان واقع در شمال خلیج فارس را بررسی کردند. در این مطالعه از مدل عددی دو بعدی MIKE21 استفاده شده بود. مدل سازی انتشار لکه نفتی در مسیر خط لوله انتقال از سکوی بلال به جزیره لاوان برای دو وضعیت مختلف باد بررسی شد که نتایج شبیه سازی نشان داد که لکه نفتی به سمت جنوب شرقی آب های خلیج فارس حرکت می کند و غلظت آلودگی نسبت به اولین لحظه ریزش کاهش دارد. از این رو ارزیابی خطر و برنامه ریزی در خصوص آماده سازی و مقابله با آلودگی نفتی در نواحی اطراف سکوی نفتی و ساحل شمالی خلیج فارس ضروری دانسته شد.

در سال ۱۳۸۴ واصل علی و همکاران (۷)، بررسی تأثیر جریان های دریایی بر انتشار آلودگی های نفتی و مقایسه دو مدل ریاضی و تجربی در پیش بینی حرکت لکه های نفتی (مطالعه موردی خلیج فارس) را مطالعه کردند. در این تحقیق اهمیت حضور جریان های دایمی عرضی و طولی و قائم همانند جریان های بازگشتی، جریان های چگالی، جریان های سطحی، جریان های زیر سطحی و غیره و همچنین شیب و شکل ساحل در کاهش آلودگی دریاها و بویه خلیج فارس بررسی شد. دو مدل ریاضی و تجربی به منظور مقایسه دو مدل با یکدیگر و پیش بینی حرکت لکه های نفتی در خلیج فارس تهیه شد. مدل ریاضی، مدل Gulfslk II بود که در آن شبیه سازی حرکت لکه های نفتی به وسیله اطلاعات بویه شناور انجام یافت. در مدل تجربی با استفاده از اطلاعات به دست آمده از بویه شامل سرعت باد و سرعت جریان حرکت لکه نفت پیش بینی شد. با مقایسه نتایج این دو مدل به نظر رسید که مقادیر به دست آمده در مدل ریاضی دقیق تر بوده است، اما روش های تجربی هم توانسته است در تحلیل نتایج و مقایسه با مدل ریاضی مفید واقع شود.

$$A = 2270 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_{oil}} \right)^{2/3} V_{oil}^{2/3} t^{1/2} + 40 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_{oil}} \right)^{1/3} V_{oil}^{1/3} U_{wind}^{4/3} t = \left(\frac{\pi}{4} \right) L_{min} L_{max} \quad \text{معادله ۱}$$

$$L_{min} = 53.76 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o} \right)^{1/3} V_{oil}^{1/3} t^{1/4} \quad \text{معادله ۲}$$

$$L_{max} = L_{min} + 0.95 U_{wind}^{4/3} t^{3/4} \quad \text{معادله ۳}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad \text{معادله ۴}$$

علائم فرمول‌ها در انتهای مقاله درج شده است. بر اساس معادله لهر، مساحت لکه نفت به دلیل گسترش در هر مرحله زمانی می‌تواند به دست آید. مقادیر پارامترهای به کار رفته در مدل عددی:

$$t = (0, 21 \text{ و } \dots), U_{wind} = 10, V_{oil} = 629/33, \rho_o = 875, \rho_w = 1027$$

توزیع غلظت نفت در آب‌های ساحلی به شرح زیر می‌باشند

$$(11-12):$$

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad \text{معادله ۴}$$

معادلات ممتنم (حرکت) در جهت‌های y, x :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (v_h \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v_h \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\tau_x)}{\partial z} + \Omega V \quad \text{معادله ۵}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (v_h \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v_h \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\tau_y)}{\partial z} - \Omega U \quad \text{معادله ۶}$$

معادله انتقال ذره نفت:

معادله فشار غیر هیدروستاتیک:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \neq 0 \quad \text{معادله ۷}$$

مدل سه بعدی هیدرودینامیک

مدل سه بعدی هیدرودینامیک جزر و مدی چند لایه بر اساس معادلات سه بعدی نویراستوکس توسعه پیدا کرده است. بر اساس معادلات سه بعدی میانگین‌گیری شده رینولدز، با به-کارگیری تقریب بوزینس، تنش آشفتگی و دبی جرمی آشفتگی به وسیله ویسکوزیته اغتشاش و پخش اغتشاش شبیه سازی می‌شود. معادلات حاکم جریان‌های سه بعدی جزر و مدی علاوه بر

معادله ۸

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} + \frac{\partial(WC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(D_z \frac{\partial C}{\partial z}) + \frac{\partial(\omega_b c)}{\partial z} + \sum S$$

که در آن طول اختلاط l_{mo} که به سادگی تابع عمق نسبی (z/H) می باشد:

$$l_{mo} = 0.7z(1 - z/H)^{0.5} \quad \text{معادله ۱۴}$$

در معادله غلظت ۸، ضرائب پخش افقی می تواند بوسیله معادلات ۱۵ و ۱۶ هـار، والینگ فورد (hr, wallingford, 1982) به دست آید که برای ضریب پخش عمودی، می تواند به عنوان تابع ویسکوزیته پیچکی آشفته بیان شود:

$$D_x = \frac{A_x}{A_{tx}} (F_0 + F_1 Q_T) + \alpha Q_K \frac{\Delta x}{A_x} \quad \text{معادله ۱۵}$$

$$D_y = \frac{A_y}{A_{ty}} (F_0 + F_1 Q_T) + \alpha Q_K \frac{\Delta y}{A_y} \quad \text{معادله ۱۶}$$

$$D_z = \frac{v_e}{\sigma_{\varphi z}} = \frac{v}{\sigma_{\varphi z}} + \frac{v_t}{\sigma_{\varphi z}} \quad \text{معادله ۱۷}$$

بر اساس مدل اختلاط آشفته طولی، همان معادله ۱۲، v_t ویسکوزیته آشفته می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$v_t = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \quad \text{معادله ۱۸}$$

که در آن (l_m) طول اختلاط در جریان نفت - آب می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{l_m}{l_{mo}} = (1 + \beta R_i)^{-0.5} \quad \text{معادله ۱۹}$$

(l_{mo}) طول اختلاط طبیعی و $\beta = 20$ می باشد، که می تواند از معادله ۱۴ به دست آید. R_i عدد ریچاردسون است که به صورت زیر بیان می شود:

$$R_i = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho / \partial z}{(\partial U / \partial z)^2} \quad \text{معادله ۲۰}$$

که در آن $\left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)$ تغییر سرعت زمانی محلی آلوده کننده در

یک نقطه خاص، $(\vec{\nabla}(C\vec{U}))$ جا به جایی یا حرکت آلوده کننده به خاطر حرکت مرکزی خودش، $\vec{\nabla}(D\vec{\nabla}C)$ پخش

آلوده کننده، $(\vec{\nabla})$ عملگر برداری $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$ می باشد،

که در آن :

$$\omega_b = \frac{1}{18} \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} g \frac{d^2}{v_w} \quad \text{معادله ۹}$$

چگالی ρ و ویسکوزیته v به وسیله کسری از نفت در جریان مخلوط نفت - آب تشخیص داده می شود که می تواند به صورت زیر تعریف شود (۱۱-۱۰):

$$\rho = F_{ow} \rho_o + (1 - F_{ow}) \rho_w \quad \text{معادله ۱۰}$$

$$v = F_{ow} v_o + (1 - F_{ow}) v_w \quad \text{معادله ۱۱}$$

بر طبق تقریب بوزینس، تنش های رینولدز بر حسب ترم های ویسکوزیته آشفته بیان می شوند. همان طور که ترم های ویسکوزیته پیچکی افقی مورد توجه می باشد، فرض همگن بودن به کار می رود. برای ترم های مبادله عمودی، مدل اختلاط آشفته طولی به کار می رود و تنش های آشفته τ_x ، τ_y در معادلات ۵ و ۶ می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\tau_x = v_{tx} \frac{\partial U}{\partial z} = \rho l_{mo}^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \frac{\partial U}{\partial z} \quad \text{معادله ۱۲}$$

$$\tau_y = v_{ty} \frac{\partial V}{\partial z} = \rho l_{mo}^2 \left| \frac{\partial V}{\partial z} \right| \frac{\partial V}{\partial z} \quad \text{معادله ۱۳}$$

زمانی را در بر دارد. مدلی که انتخاب می شود، تفاضل رو به جلو برای مشتق زمانی و ترمهای مکانی می باشد. با ترکیب معادلات تفاضل محدود صریح برای همه عناصر، یک معادله ماتریس پراکنده به دست می آید. بعد از اجرای مدل، جریانات به علاوه غلظت نفت در بدنه آب در هر مرحله زمانی می تواند به دست آید.

در مدل، برای محاسبه ضرایب پخش افقی در معادله ۸ از معادله زیر استفاده شده است (۱۱).

$$Dx = Dy = C_{sa} \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{معادله ۲۲}$$

$$C_d = (2.28 + 0.033((U^2 + V^2)^{1/2} - 25))10^{-3}$$

فرضیات مدل

۱. در مدل هیدرودینامیک، معادله بودجه شوری و حرارت به کار نرفته است و چگالی ثابت می باشد،

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \right) \text{ و سیال غیر لزج است.}$$

۲. با توجه به تقریب بوسینسک، تغییرات چگالی صرف نظر شده است به جز جاهایی که شناوری تأثیر دارد.

۳. تقریب غیر هیدروستاتیک می باشد و در معادله سوم حرکت از شتابها و تنشهای متناظر آن صرف نظر نشده است، مولفه های عمودی سرعت مورد نظر می باشد.

۴. ترازبندی ستون آب در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر در سه تراز ۵، ۱۰ و ۱۵ متر از سطح در نظر گرفته شده است و در بعد قائم، آب کاملاً مخلوط نبوده و سرعت نسبت به عمق یکنواخت نمی باشد.

۵. تنش کف مورد نظر بوده است.

برای عدد اشمیت آشفته $\sigma_{\varphi\varphi}$ ، نفوذ شناوری نیاز است که مورد توجه قرار گیرد و می تواند توسط معادله Munk Anderson محاسبه شود ($\sigma_{\varphi\varphi} = 1$):

$$\frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{\sigma_{\varphi\varphi}} = \frac{(1 + 3.33R_i)^{1.5}}{(1 + 10R_i)^{0.5}} \quad \text{معادله ۲۱}$$

بعد از به دست آوردن V_t ، ضریب پخش عمودی می تواند به دست آید. در این مدل، میدان غلظت به وسیله میدان جریان محاسبه می شود. روش تفاضل محدود، یک روش مرحله

که در آن $C_{sa} = 0/5$ ثابت اختیاری، (Δx) ، (Δy) طول شبکه در جهت های x ، y می باشد.

برای محاسبه ضریب پخش عمودی در معادله ۸ از معادلات ۱۱، ۱۴، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ استفاده شده است.

برای محاسبه تنش سطح τ_{sx} ، τ_{sy} و تنش بستر τ_{bx} ، τ_{by} در معادلات ۵ و ۶ از روابط زیر استفاده شده است (۱۳):

$$\tau_{sx} = C_d \rho_a (U^2 + V^2)^{1/2} U$$

$$\tau_{sy} = C_d \rho_a (U^2 + V^2)^{1/2} V$$

معادله ۲۳

$$\tau_{bx} = \rho_w k (U^2 + V^2)^{1/2} U$$

$$\tau_{by} = \rho_w k (U^2 + V^2)^{1/2} V$$

که در آن (U) ، (V) مولفه های سرعت باد در ۱۰ متری بالای سطح دریا، (k) ضریب اصطکاک کف ۰.۰۰۰۲، می باشد. برای سرعت های باد کم تر از ۲۵ متر بر ثانیه، ضریب پسا به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C_d = (0/63 + 0/066(U^2 + V^2)^{1/2})10^{-3}$$

برای سرعت های باد بالاتر از ۲۵ متر بر ثانیه، وابستگی ضریب پسا به باد کاهش یافته، رابطه زیر به کار می رود:

که قطرات در ستون آب در این فاصله زمانی همگی در داخل آب قرار دارند.

۱۹. حرکت نفت در ستون آب در نظر گرفته شده است .

۲۰. حرکت قطرات در ستون آب نسبت به زمان متغیر بوده است.

۲۱. در معادله غلظت، نفت خام به صورت یک مولفه در نظر گرفته شده است و چند مولفه‌ای نمی باشد.

۲۲. قطر قطرات مولفه نفت خام متغیر بوده است (اقطار بزرگ و کوچک)

۲۳. شاره نیوتنی بوده، گرادبان سرعت شاره با تنش برشی ایجاد شده توسط حرکت شاره ارتباط مستقیم

$$\text{دارد،} \left(\tau = \mu \frac{du}{dt} \right)$$

۲۴. جریان تلاطمی بوده و حرکت شاره یکنواخت نمی باشد و اجزای شاره حرکت نامنظمی دارند.

۲۵. چگالی و ویسکوزیته جریان نفت- آب نسبت به زمان متغیر در نظر گرفته شده است .

۲۶. با توجه به کم بودن تغییرات فشار جو نسبت به فشارهای مربوط به امواج روی سطح دریا ، فشار در سطح دریا ثابت فرض شده است (۱۰۰۰ میلی بار).

شرایط اولیه

۱- با توجه به سخت بودن مرزها (Rigid- Lid) ، تغییرات

$$\text{عمودی آب در مرزها صفر است} \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \right)$$

۲- بالا روی عمودی آب در مرزها صفر است، اما در سایر نقاط شبکه برای شرایط اولیه از جدول جزر و مدی استفاده شده است (۱۴). در مرز سخت

$$Z(x, y, t=0) = \eta_0(x, y) = 0$$

۳- $u = v = w = 0$ (سرعت) در مرز سخت می باشد، در

$$u(x, y, t=0) = u_0(x, y) = 0$$

$$v(x, y, t=0) = v_0(x, y) = 0 \quad \text{مرز}$$

$$w(x, y, t=0) = w_0(x, y) = 0$$

۶. تغییرات پارامتر کوریولیس مورد نظر نبوده و نیروی کوریولیس در تمام نقاط ثابت فرض شده است،

$$\left(B = \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \right)$$

۷. سرعت و تنش باد متغیر فرض شده و جهت باد غالب، شمال غربی در نظر گرفته شده است .

۸. ۸- دمای میانگین آب در کلیه نقاط شبکه در تابستان متغیر فرض شده است .

۹. فشار بخار نفت در تابستان متغیر در نظر گرفته شده است .

۱۰. سیال تراکم ناپذیر بوده و چگالی ثابت است $(\nabla \cdot \vec{u} = 0)$

۱۱. مقادیر سرعت u, v, w در زمان‌های مختلف در ترازهای مختلف در نظر گرفته شده است .

۱۲. فرآیند تبخیر، حلالیت و پخش عمودی در عبارت تعادل جرمی در معادله انتقال جرم (غلظت) در نظر گرفته شده است.

۱۳. در معادله حرکت، ترم‌های غیر خطی (فرارفت) حذف نشده است.

۱۴. تنش سطحی ناشی از برش باد روی آب از قانون مرتبه دوم سرعت (توان دوم سرعت باد) استفاده شده است ، $(T \propto W^2)$.

۱۵. تغییرات فشار به جز در مرز سخت نسبت به سطح در تمام نقاط شبکه در ۲۳ ایستگاه متغیر بوده است.

۱۶. در مدل از ویسکوزیته پیچکی و شرایط جوی صرف نظر نشده است.

۱۷. لکه نفت به صورت بیضی فرض شده است و ضخامت برای کل لکه یکسان فرض شده و به صورت لکه نازک و ضخیم در نظر گرفته نشده است. ضخامت لکه، نسبت به زمان متغیر بوده است.

۱۸. از بازگشت مجدد قطرات نفت به سطح در فاصله زمانی Δt صرف نظر شده است و فرض شده است

- ۴- چگالی ثابت می باشد، $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0\right)$.
- ۵- شتاب گرانی ثابت است ($g = 9.8$).
- ۶- مقادیر اولیه فشار به جز در مرز سخت طبق جدول جزر و مدی می باشد.
- ۷- تنش برشی هوا - نفت با تنش برشی بین هوا و آب یکسان در نظر گرفته نشده است، جدول ۱.
- ۸- مولفه عمودی سرعت W صفر نمی باشد (تقریب غیر هیدروستاتیک).
- ۹- مقیاس $\Delta x = \Delta y = 3000$ متر می باشد.
- ۱۰- مرحله زمانی $\Delta t = 5$ ثانیه می باشد.
- ۱۱- ضریب ویسکوزیته پیچکی عمودی $V_v = 10^{-5} - 10^{-1} m^2/s$ و افقی $V_h = 10 - 10^5 m^2 s^{-1}$ می باشد
- ۱۲- مقادیر اولیه خواص نفت خام در شرایط اولیه طبق جدول ۱ می باشد.

جدول ۱- داده‌های ورودی به کار رفته در مدل‌های هیدرولیک و ریزش نفت (۱۹-۱۵)

ردیف	نوع فرآورده	وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	کدماژیک ویسکوزیته (سانتی پوز)	جرم مولکولی (گرم بر مول)	تنش موئینی (دین بر سانتی‌متر)	فشار بخار (اتمسفر)	قابلیت حلالت در آب (میلی گرم در لیتر)	API gravity	
۱	نفت خام	۸۷۵	۱۹٫۲	۵۲۵	۱۸٫۶	تابستان : ۰٫۸۰۹۶	۱۸	۳۰٫۲۱	
		عدد اشمیت (بی بعد)	ضریب پخش نفت در آب (مترمربع بر ثانیه)	عمق نفوذ ذرات نفت در آب (متر)	ارتفاع موج شکست (متر)	عمق شکست موج (متر)	ارتفاع موج موثر (H_s متر)	جذر میانگین مربعات ارتفاع موج (H_{rms} متر)	
		۱۲۸	۰٫۱۲۶	۳	۲	۲٫۵۶	۱٫۶۲	۱٫۴۱۲	

not SI) - Kinematic Viscosity, $1 m^2 s^{-1} = 10^4 cm^2 s^{-1} (=10^4 \text{ stokes} - 1$
 $atm = 101325 Pa, 1 \text{ blin}^2 = 6894,76 Pa (N/m^2) 2 - 1$

ادامه جدول ۱- داده‌های ورودی به‌کاررفته در مدل‌های هیدرودینامیک و ریزش نفت

ردیف	حجم مولاری (مترمکعب بر مول)	ثابت گاز (R)	وزن مخصوص آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	ویسکوزیته آب (سانتی پوز)	غلظت رسوب معلق در آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	قطر رسوب معلق در آب (میلیمتر)	دمای میانگین (درجه سانتی‌گراد)
۱	600×10^{-6}	8.206×10^{-5}	۱۰۲۷	۱	۰٫۲	۰٫۰۴۳	تابستان : ۳۵٫۵۱۵

ادامه جدول ۱- داده‌های ورودی به‌کاررفته در مدل‌های هیدرودینامیک و ریزش نفت

ردیف	نوع فرآورده	محل ریزش	شرایط ریزش	قلمرو و محاسبه (مترمربع)	حجم ریزش (مترمکعب)	تعداد گره شبکه	نقطه محل ریزش در شبکه	$\Delta x = \Delta y$ (متر)	تعداد ردیف شبکه	تعداد ستون شبکه
۱	نفت خام	بن جزیره خارک و بندر بوشهر	فوری	180×555	۱۰۰	۱۱۳۴۶	ردیف : ۱۹ ستون : ۷۵	۳۰۰۰	۰-۶۰	۰-۱۸۵

شرایط مرزی

۱- $\vec{U} \cdot n = 0$ حالت نفوذ ناپذیر (نفوذ شاره به داخل و خارج مرز امکان پذیر نیست) شاره به مرز چسبیده است .

۲- در مرزها هیچ جریان ورودی و خروجی وجود ندارد و تغییرات عمودی آب صفر است.

۱- تمام مرزها جامد (سخت) است ، بدون لغزش، غیر قابل نفوذ، نشت ناپذیر می باشد . مرز دارای حرکت نمی باشد. حرکت شاره در مجاورت مرز، صفر است .

$u = v = w = 0$ مرکز ساکن ، $\vec{U} \times n = 0$ غیر لغزشی و چرخش نیست (سرعت شاره در مرز صفر است)،

(می باشد . محل ریزش اتفاقی نفت خام بین جزیره خارک و بندر بوشهر ۲۱ کیلومتر دور از ساحل در نقطه مختصات عرض جغرافیایی $29^{\circ}2'$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ}30'$ شرقی (نقطه مختصات ردیف ۱۹ و ستون ۷۵) در ساعت ۱۰ صبح هفتم جولای (۱۶ تیر) ۲۰۰۵ میلادی (تابستان) انتخاب شد. میانگین دما در تابستان ۳۵٫۵۱۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت باد ۵٫۹۶ متر بر ثانیه بوده است. مقادیر جداول جزر و مدی در ایستگاه‌های استان‌های خوزستان و بوشهر که شامل خرمشهر، چوبیده، خورموسی، بندر امام خمینی، ماهشهر، هندیجان، بوطاهری، دیلم، بندر امام حسن، جزیره خارک، گناوه، بندر ریگ، بندر بوشهر، هلیله، محمدمیر، بندرامیر، لاوان ساحلی، بردخون، دیر، کنگان، بندر طاهری، نخل تقی و تبن می باشند، برای روز حادثه استفاده شده است. (۲۰) .

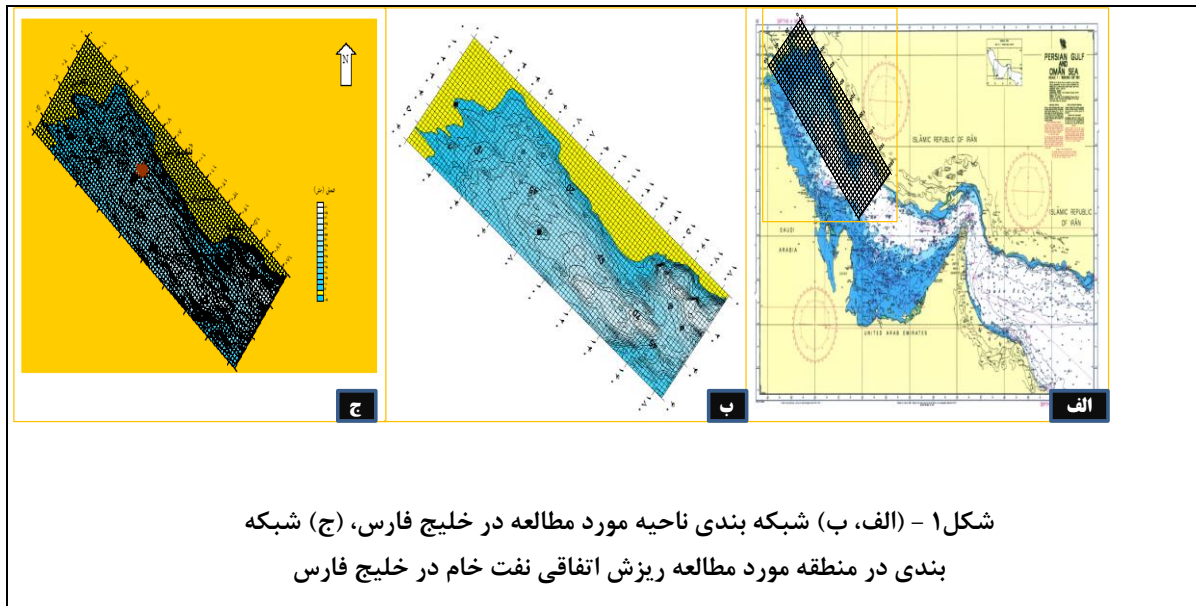
شکل‌های ۱ و ۲ شبکه بندی و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

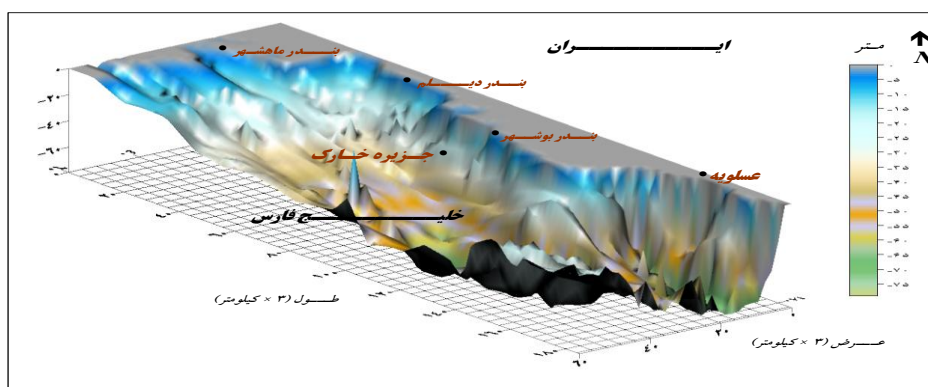
۳- در مرز سخت، مولفه عمودی سرعت (عمود بر مرز) صفر می باشد.

۴- در مرز سخت، افت و خیز سطح صفر است و تنش رینولدز در سطح مرز صفر است (شرط غیر لغزشی).

شبکه بندی مدل

۱-۶- شبکه بندی منطقه مورد مطالعه در خلیج فارس خلیج فارس در عرض جغرافیایی $24-30$ درجه شمالی و طول جغرافیایی $48-56.5$ درجه شرقی قرار دارد. در نقشه به مقیاس $1:750000$ خلیج فارس (تهیه شده از سازمان نقشه برداری کشور)، یک شبکه مربع مستطیل با توجه به جهت باد غالب شمال غربی به ابعاد 555×180 کیلومتر مربع با $\Delta x = \Delta y = 3000$ متر با ردیف (۶۰-۰) و ستون (۱۸۵-۰) با تعداد نقاط شبکه ۱۱۳۴۶ نقطه رسم شد. شبکه در عرض جغرافیایی $30^{\circ}30' - 26^{\circ}45'$ شمالی و طول جغرافیایی $48^{\circ} - 53^{\circ}$ شرقی قرار داشته و شامل رأس خلیج فارس در شمال تا بندر جوادالائمه در شرق (سواحل شمالی خلیج فارس





شکل ۲ - توپوگرافی ناحیه مورد مطالعه در خلیج فارس

ساختار مدل ریزش نفت

مدل، شامل دو مدل هیدرودینامیک و ریزش نفت می باشد که پارامترهای به کار رفته در مدل هیدرودینامیک طبق جدول ۱ شامل تعداد نقاط شبکه، اندازه شبکه، ضرایب پخش افقی و عمودی ویسکوزیته پیچکی. مرحله زمانی $\Delta t = 5$ ثانیه، دمای آب، دامنه و فاز جزر مدی می باشد. پارامترهای به کار رفته در مدل ریزش نفت طبق جدول ۱ و مرحله زمانی $\Delta t = 5$ ثانیه می باشد.

جریان و سرعت جریان جزر و مدی، فاکتورهای مهم در جابه جایی ریزش نفت در سطح و زیر سطح می باشد. برای این منظور از مدل هیدرودینامیک که با کمک معادلات حرکت و پیوستگی و به روش تفاضل محدود صریح حل شده، استفاده می شود. که ورودی های مدل شامل سرعت باد، ارتفاع جزر و مدی، دما با توجه به شرایط مرزی و اولیه می باشد. خروجی مدل، مولفه های سرعت های عمودی و افقی هر نقطه شبکه می باشد که به بانک اطلاعات وارد شده و به عنوان داده های ورودی وارد مدل ریزش نفت می شود. در این مدل از معادله غلظت و نظریه طول اختلاط استفاده می شود.

توزیع نفت در سه تراز محاسبه می شود که شامل ترازهای ۵، ۱۰ و ۱۵ متر از سطح می باشد.

معرفی مدل

مدلی که در این مطالعه استفاده می شود یک مدل غیر هیدروستاتیک است که در فرمول بندی آن از تقریب بوسینسک به صورت معادلات لیپس (۱۹۹۰) (۲۱) استفاده شده است. با توجه به روابط بیان شده فرمول بندی مدل به صورت زیر می باشد: (۲۲) (اسمولارکیویچ و مارگولین، ۱۹۹۵):

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} - \alpha(u_e) - \frac{\partial \tau_{1j}}{\partial x_j} \equiv F^u \quad \text{معادله ۲۴}$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} - \alpha(v) \equiv F^v \quad \text{معادله ۲۵}$$

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \pi}{\partial z} + \alpha(w) \equiv F^w \quad \text{معادله ۲۶}$$

معادله غلظت:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} + \frac{\partial(WC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial(\omega C)}{\partial z} + \sum s \quad \text{معادله ۲۷}$$

معادله پیوستگی :

معادله ۲۸

$$\frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z} = 0$$

π پربشیدگی فشار نسبت به نمایه‌های محیطی است که به-وسیله چگالی بهنجار شده، C غلظت آلاینده و F نشان-دهنده مجموع واداشت‌ها است.

پارامتر α در معادلات ۲۴، ۲۵ و ۲۶ کار جذب امواج گرانی را در لبه‌های مدل انجام داده و جواب‌ها را در مرزها به سمت

$$\alpha = \frac{1}{1000} s^{-1} \quad \text{مقادیر مرزی سوق می دهند:}$$

در این مدل τ_x و τ_y که نشان دهنده اثر تنش باد است با توجه به مرجع (۲۳) به دست آمده است.

برآورد کمیت‌های مدل به وسیله الگوریتم MPDATA

(مسئله مقدار مرزی)

در الگوریتم مدل، یک معادله فشار بیضوی با استفاده از معادله پایستگی جرم ۳۶ وارد شده است. به این ترتیب که معادلات ۲۴ تا ۲۶ را نسبت به U, V, W وارون می کنیم. با جایگذاری

معادله ۲۹

$$U_{i,j,k}^{n+1} = -U_{i,j,k}^n \frac{(U_{i+1,j,k}^n - U_{i,j,k}^n) \Delta t}{\Delta x} - V_{i,j,k}^n \frac{(U_{i,j+1,k}^n - U_{i,j,k}^n) \Delta t}{\Delta y} - W_{i,j,k}^n \frac{(U_{i,j,k+1}^n - U_{i,j,k}^n) \Delta t}{\Delta z} - g \left[\frac{\eta_{i+1,j,k}^n - \eta_{i,j,k}^n}{\Delta x} \right] \Delta t + v_h \left[\frac{U_{i+2,j,k}^n - 2U_{i+1,j,k}^n + U_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} \right] \Delta t + V_h \left[\frac{U_{i,j+2,k}^n - 2U_{i,j+1,k}^n + U_{i,j,k}^n}{\Delta y^2} \right] \Delta t + \left[0/7 z_{i,j,k} (1 - z_{i,j,k}/H)^{0/5} \right]^2 \Delta t \left[\frac{U_{i,j,k+2}^n - 2U_{i,j,k+1}^n + U_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} \left| \frac{U_{i,j,k+1}^n - U_{i,j,k}^n}{\Delta z} + \frac{U_{i,j,k+2}^n - 2U_{i,j,k+1}^n + U_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} \right| \frac{U_{i,j,k+1}^n - U_{i,j,k}^n}{\Delta z} \right] + 2 * 7 / 29 * 10^{-5} V_{i,j}^n \sin \phi \Delta t + U_{i,j,k}^n$$

مولفه‌های سرعت متعامد در معادله ۳۶، معادله بیضوی به دست می آید. (GCR) با شرایط مرزی مناسب برای مولفه‌های عمودی سرعت میتوان این معادله بیضوی را با استفاده از روش مانده همیوگ تعمیم یافته که یک روش حل برای معادله بیضوی است، حل کرد. سپس Generalized-Conjugate-Residual مقادیر جدید U, V, W به دست می آید. سرانجام با داشتن مقادیر جدید متغیرهای مدل، می توان واداشت‌های مورد نیاز برای گام زمانی بعدی را محاسبه کرد. بعد از محاسبه واداشت‌ها و متغیرهای دینامیکی شارش، با استفاده از معادله غلظت، مقادیر غلظت در گام‌های زمانی بعدی محاسبه می‌شود. معادلات ۲۹ تا ۳۲ شکل جداسازی شده معادلات حرکت، پیوستگی و غلظت را نشان می دهد.

معادلات حرکت:

معادله ۳۰

$$V_{i,j,k}^n = -U_{i,j,k}^n \frac{(V_{i+1,j,k}^n - V_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta x} - V_{i,j,k}^n \frac{(V_{i,j+1,k}^n - V_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta y} - W_{i,j,k}^n \frac{(V_{i,j,k+1}^n - V_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta z} -$$

$$g \left[\frac{\eta_{i,j+1,k}^n - \eta_{i,j,k}^n}{\Delta y} \right] \Delta t + v_h \left[\frac{V_{i+2,j,k}^n - 2V_{i+1,j,k}^n + V_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} \right] \Delta t +$$

$$v_h \left[\frac{V_{i,j+2,k}^n - 2V_{i,j+1,k}^n + V_{i,j,k}^n}{\Delta y^2} \right] \Delta t + \left(0.7 z_{i,j,k} (1 - z_{i,j,k}/H)^{0.5} \right)^2 \Delta t \left[\frac{V_{i,j,k+2}^n - 2V_{i,j,k+1}^n + V_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} \left| \frac{V_{i,j,k+1}^n - V_{i,j,k}^n}{\Delta z} + \frac{V_{i,j,k+2}^n - 2V_{i,j,k+1}^n + V_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} \left| \frac{V_{i,j,k+1}^n - V_{i,j,k}^n}{\Delta z} \right| \right] -$$

$$2 * 7 / 29 * 10^{-5} U_{i,j,k}^n \sin \varphi \Delta t + V_{i,j,k}^n$$

معادله ۳۱

$$W_{i,j,k}^n = \frac{-1}{2} \left[\frac{U_{i+1,j+1,k}^n - U_{i-1,j+1,k}^n}{\Delta x} + \frac{U_{i+1,j-1,k}^n - U_{i-1,j-1,k}^n}{\Delta x} + \frac{V_{i-1,j+1,k}^n - V_{i-1,j-1,k}^n}{\Delta y} + \frac{V_{i+1,j+1,k}^n - V_{i+1,j-1,k}^n}{\Delta y} \right] (-h_{i,j,k}^n)$$

معادله ۳۲

$$C_{i,j,k}^{n+1} = -U_{i,j,k}^n \frac{(C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta x} - C_{i,j,k}^n \frac{(U_{i+1,j,k}^n - U_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta x} -$$

$$V_{i,j,k}^n \frac{(C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta y} - C_{i,j,k}^n \frac{(V_{i,j+1,k}^n - V_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta y} -$$

$$W_{i,j,k}^n \frac{(C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta z} - C_{i,j,k}^n \frac{(W_{i,j,k+1}^n - W_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta z} +$$

$$D_x \frac{(C_{i+2,j,k}^n - 2C_{i+1,j,k}^n + C_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta x^2} + D_y \frac{(C_{i,j+2,k}^n - 2C_{i,j+1,k}^n + C_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta y^2} +$$

$$D_z \frac{(C_{i,j,k+2}^n - 2C_{i,j,k+1}^n + C_{i,j,k}^n)\Delta t}{\Delta z^2} + \Delta t \left(\frac{1}{18} \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} g \frac{d^2}{v_w} \right) *$$

$$\frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta z} = \sum S * \Delta t + C_{i,j,k}^n$$

معادله غلظت :

نتایج

جغرافیایی $27^{\circ}40'N$ و طول جغرافیایی $52^{\circ}20'E$ در شبکه بندی نقشه خلیج فارس را نشان می دهد.

مقایسه داده های سرعت جریان حاصل از اجرای مدل و اندازه گیری میدانی در بندر طاهری (شبکه بندی نقشه خلیج فارس)

جدول ۲ مقایسه مقادیر میانگین سرعت های جریان حاصل از اجرای مدل و مشاهده در بندر طاهری در نقطه عرض

جدول ۲- مقایسه مقادیر میانگین سرعت‌های جریان (m/s) حاصل از اجرای مدل و مشاهده در بندر طاهری (E ۵۲°۲۰' و N ۲۷°۴۰') در نقشه خلیج فارس

ردیف	عمق (متر)	مدل	مشاهده (۱۳۸۴)	خطای نسبی (درصد)
۱	۵	۰٫۰۲۱۷	۰٫۰۲۷۷	۲۱٫۶۶
۲	۱۵	۰٫۰۲۱۹	۰٫۰۶۹	۶۸٫۲۶

مقایسه داده‌های سرعت جریان حاصل از اجرای مدل و

داده‌های گشت مونت میشل

جدول ۳ مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان (m/s) حاصل از

اجرای مدل و داده‌های گشت مونت میشل (۲۴) را در نقطه

عرض جغرافیایی $27^{\circ}3'79''N$ و طول

جغرافیایی $52^{\circ}22'75''E$ را نشان می‌دهد که در عمق ۱۰

متر سازگاری خوبی وجود دارد.

جدول ۳- مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان (m/s) حاصل از اجرای مدل و داده‌های گشت مونت میشل (۱۹۹۲) در

نقطه $27^{\circ}03'79''N$ و $52^{\circ}22'75''E$

ردیف	عمق (متر)	مدل عددی	مونت میشل	خطای نسبی (درصد)
۱	۱۰	حداکثر ۰٫۱۶۱۲۹۷	۰٫۲۲۶۲	۲۸٫۷
		میانگین ۰٫۰۴۷۱۸۴	۰٫۰۵۴۹	۱۴٫۰۵
۲	۲۰-۲۴	حداکثر ۰٫۲۳۳۸۳	۰٫۱۶۲۷	۳۰٫۴۲
		میانگین ۰٫۰۷۳۶۴۱	۰٫۰۳۹۷	۴۶٫۰۹

مقایسه داده‌های سرعت جریان حاصل از اجرای مدل و

اندازه گیری میدانی در بندر بوشهر

جدول ۴ مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان حاصل از اجرای مدل

و مشاهده در نقطه عرض جغرافیایی $28^{\circ}59'N$ و طول

جغرافیایی $50^{\circ}50'E$ (۵ متر از سطح آب) نشان می‌دهد

که سازگاری خوبی وجود دارد.

جدول ۴- مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان (m/s) حاصل از اجرای مدل و

مشاهده در بندر بوشهر (E^{۵۰°۵۰'} و N^{۲۸°۵۹'}) در ۵ متر از سطح آب

ردیف	مقادیر	مدل	مشاهده	
			مقدار	زمان
۱	حداکثر	۰٫۴۳۸	۰٫۴۹	۱۰/۱۳/۹۶
	حداقل	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۳	۱۰/۱۳/۹۶
۲	حداکثر	۰٫۴۳۸	۰٫۵۲	۱۰/۲۳/۹۶
	حداقل	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۳	۱۰/۲۳/۹۶
۳	حداکثر	۰٫۴۳۸	۰٫۵۴	۱۰/۲۵/۹۶
	حداقل	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۳	۱۰/۲۵/۹۶
۵	بعد از ۷ ساعت	۰٫۱۰۹۲	۰٫۱۳	۱۰/۱۳/۹۶
۶	بعد از ۷ ساعت	۰٫۱۰۹۲	۰٫۱۱	۱۱/۱۴/۹۶
۷	میانگین	۰٫۱۴۲۸	۰٫۱۴۹	۱۰/۳۱/۹۶

مقایسه مقادیر غلظت هیدروکربن حاصل از اجرای مدل و

انجام آزمایش سازمان محیط زیست

جدول ۵ مقایسه مقادیر غلظت هیدروکربن‌ها (میکروگرم بر

گرم) حاصل از اجرای مدل و مشاهدات (سازمان محیط زیست

ایران) را نشان می دهد.

جدول ۵- مقایسه مقادیر غلظت هیدروکربن‌ها (میکروگرم بر گرم) حاصل از اجرای مدل و مشاهدات

(سازمان محیط زیست ایران)

ردیف	مقادیر غلظت	مدل	مشاهدات	خطای نسبی (درصد)
۱	حداکثر	۵۶٫۶۷	(گشت فردوس)	۱٫۹۲۱
	میانگین	۱۷٫۴۸۰۶	۵۷٫۷۸ ۱۹٫۹۰۱۲۶	۱۲٫۱۶۳
۲	حداکثر	۵۶٫۶۷	(گشت فردوس)	۶٫۳۳۰۶
	میانگین	۱۷٫۹۵۰۲۷	۶۰٫۵ ۲۰٫۳۲۲۸	۱۱٫۶۷۴
۳	میانگین	۱۷٫۴۸۰۶	(گشت قدس)	۱۴٫۴۶۲
			۲۰٫۴۳۶	

بحث

در مدل عددی، حادثه ریزش اتفاقی نفت خام در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر و با توجه به شرایط مرزی و اولیه و شبکه بندی (۱۸۰ × ۵۵۵) کیلومتر مربع و حجم ریزش ۶۲۹/۳۳ متر مکعب و محل ریزش ۲۱ کیلومتر دور از ساحل بندر بوشهر (ردیف ۱۹ و ستون ۷۵)، فرآیندهای موثر و سرنوشت نفت خام بررسی شد. توزیع غلظت ذرات نفت خام و بردارهای سرعت جریان در ترازهای ۵، ۱۰ و ۱۵ متر از سطح آب طی، ۷، ۱۰، ۱۴ و ۱۷ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر حاصل از اجرای مدل (تابستان) به دست آمد.

با توجه به محل ریزش اتفاقی نفت خام در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر شکل ۱-ج و باد شمالی غربی در تابستان، جریان های یکنواخت جنوب غربی در تراز ۵ متر از

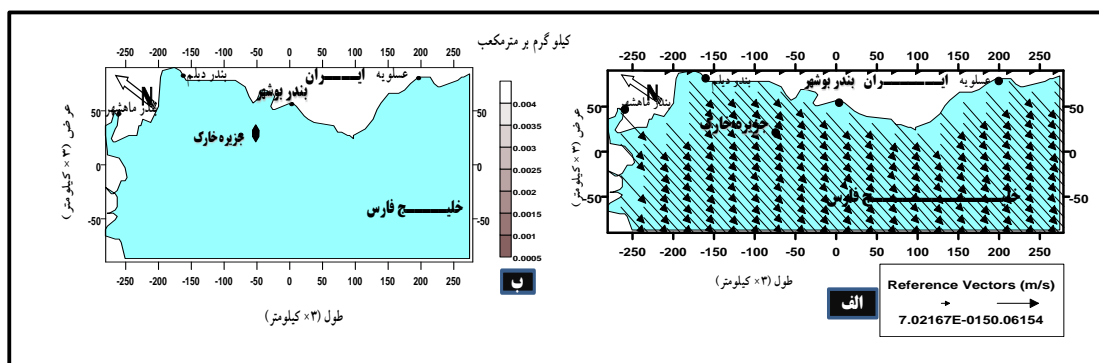
سطح آب شکل ۳-ب، موجب گستردگی نفت خام و کشیدگی آن پس از ۱/۷ ساعت از حادثه ریزش اتفاقی شده است، شکل ۳-الف. حداقل، حداکثر و میانگین غلظت ذرات به ترتیب $0.0005, 0.004$ و $10^{-3} \times 2.25$ کیلوگرم بر متر مکعب و حداقل، حداکثر و میانگین سرعت جریان به ترتیب $10^{-6} \times 0.7, 0.062$ و 0.31 متر بر ثانیه می باشد. شکل ۴-الف توزیع غلظت ذرات نفت خام در تراز ۵ متر از سطح آب پس از ۷ ساعت از حادثه ریزش را نشان می دهد که تجمع و گستردگی کمتری دارد که با توجه به جریان های جنوب و جنوب غربی و جریان برگشتی شمالی شکل ۴-ب می باشد.

حداقل، حداکثر و میانگین غلظت ذرات به ترتیب

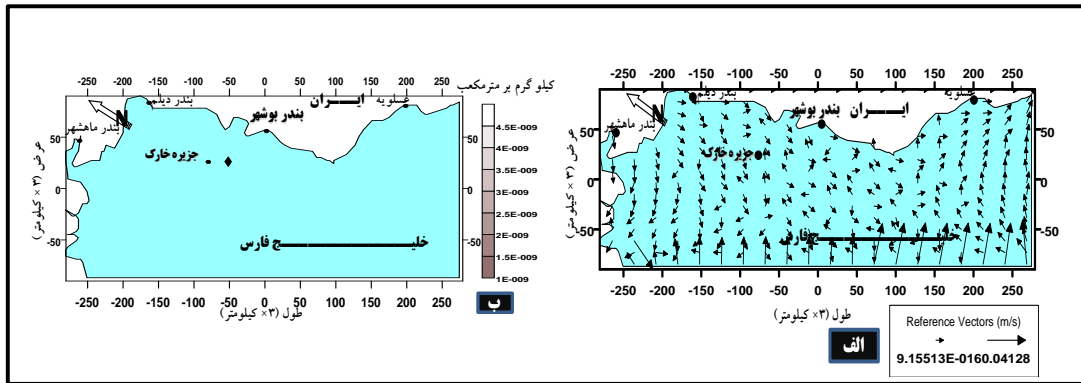
$10^{-9} \times 1, 4.5 \times 10^{-9}$ و $10^{-9} \times 2.25$ کیلوگرم بر متر

مکعب و حداقل، حداکثر و میانگین سرعت جریان به ترتیب

$10^{-6} \times 9.2, 0.41$ و 0.205 متر بر ثانیه می باشد.



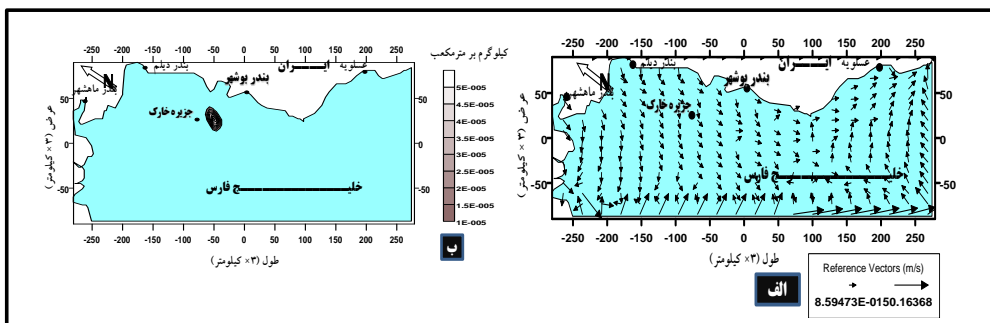
شکل ۳- بردارهای سرعت جریان (الف) و توزیع غلظت ذرات نفت خام (ب)، در تراز ۵ متر از سطح آب، ۱/۷ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر (تابستان)



شکل ۴- بردارهای سرعت جریان (الف) و توزیع غلظت ذرات نفت خام (ب)، در تراز ۵ متر از سطح آب، ۷ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر (تابستان)

ذرات به ترتیب $10^{-5} \times 1$ ، $10^{-5} \times 5$ و $10^{-5} \times 3$ کیلو گرم بر متر مکعب و حداکثر و میانگین سرعت جریان به ترتیب $10^{-6} \times 8.16$ ، 0.16 و 0.08 متر بر ثانیه می باشد.

در شکل ۵- الف توزیع غلظت ذرات در تراز ۵ متر از سطح آب پس از ۱۴ ساعت از حادثه ریزش را نشان می دهد که ذرات گستردگی بیشتری را داشته اند و با توجه به جریان جنوب و جنوب غربی شکل ۵-ب می باشد. حداکثر و میانگین



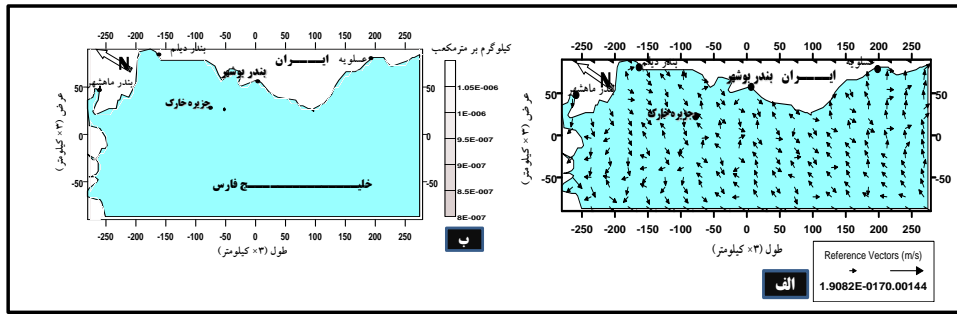
شکل ۵- بردارهای سرعت جریان (الف) و توزیع غلظت ذرات نفت خام (ب)، در تراز ۵ متر از سطح آب، ۱۴ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر (تابستان)

0.14 و $10^{-4} \times 7$ متر بر ثانیه می باشد. در شکل ۷- الف توزیع غلظت در تراز ۱۰ متر از سطح آب، طی ۷ ساعت پس از حادثه ریزش را نشان می دهد که گستردگی ذرات بیشتر بوده است که با توجه به جریان جنوب و جنوب غربی و جریان برگشتی شمالی شکل ۷-ب می باشد و حداکثر و میانگین توزیع غلظت ذرات به ترتیب $10^{-6} \times 8$ ، $10^{-5} \times 1.3$ و $10^{-5} \times 1.05$ کیلوگرم بر متر مکعب و حداکثر و

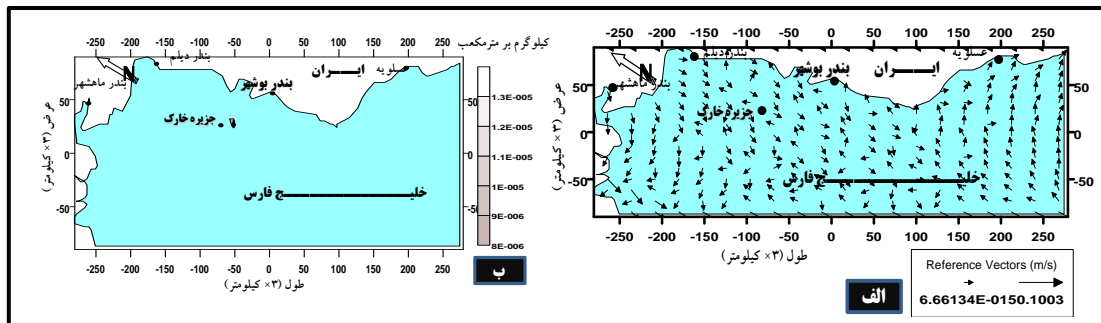
در شکل ۶- الف توزیع غلظت در تراز ۱۰ متر از سطح آب، طی ۱.۷ ساعت پس از حادثه ریزش را با گستردگی کم تر نشان می دهد که با توجه به جریان های جنوب و جنوب غربی و جریان برگشتی شمال و شمال شرقی می باشد شکل ۶-ب. حداکثر و میانگین ذرات به ترتیب $10^{-7} \times 8$ ، $10^{-6} \times 1.05$ و $10^{-6} \times 0.925$ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد و حداکثر، حداکثر و میانگین سرعت جریان به ترتیب $10^{-6} \times 1.9$ ،

جریان برگشتی شمالی مشاهده نمی شود. حداقل، حداکثر و میانگین توزیع غلظت ذرات به ترتیب 5×10^{-7} ، 1.3×10^{-6} و 0.9×10^{-6} و حداقل، حداکثر و میانگین سرعت جریان به ترتیب 0.8×10^{-6} ، 1.6×10^{-6} و 0.8×10^{-6} متر بر ثانیه می باشد.

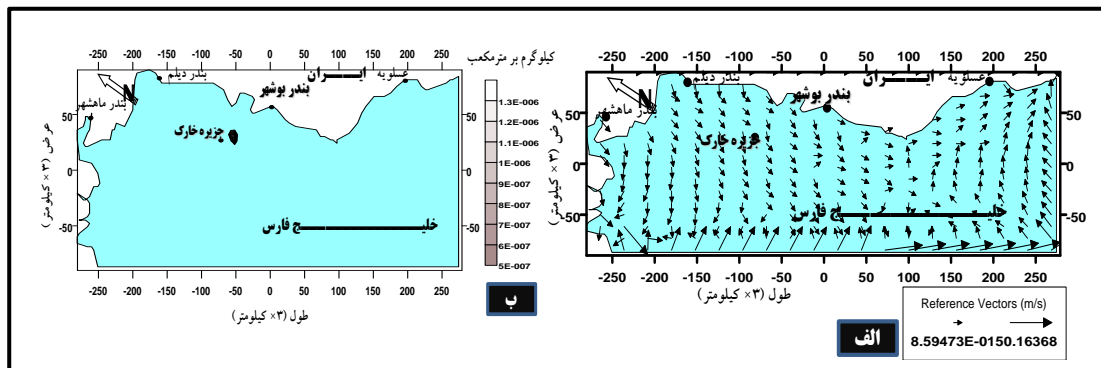
میانگین سرعت جریان به ترتیب $10^{-6} \times 6.7$ ، 0.1 و 0.05 متر بر ثانیه می باشد. شکل ۸- الف توزیع غلظت ذرات در تراز ۱۰ متر از سطح آب، ۱۴ ساعت پس از حادثه ریزش را نشان می دهد که گستردگی بیش تر داشته است که با توجه به جریان جنوب و جنوب غربی شکل ۸-ب می باشد که در این مرحله



شکل ۶- بردارهای سرعت جریان (الف) و توزیع غلظت ذرات نفت خام (ب)، در تراز ۱۰ متر از سطح آب، ۱/۷ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر (تابستان)



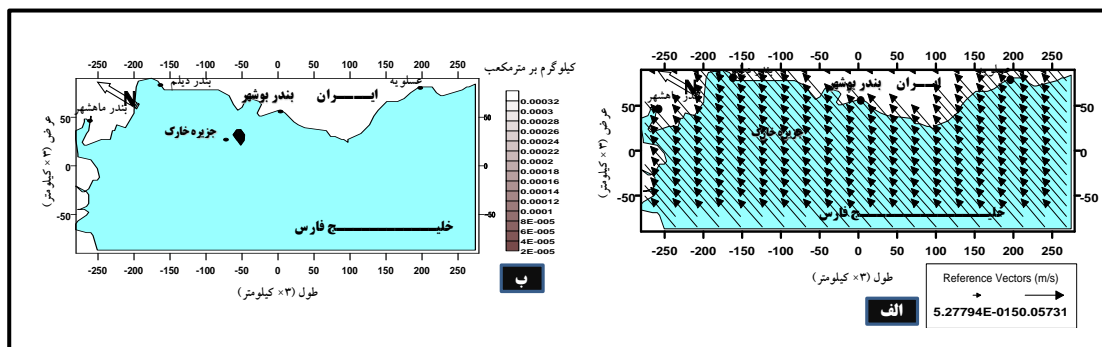
شکل ۷- بردارهای سرعت جریان (الف) و توزیع غلظت ذرات نفت خام (ب)، در تراز ۱۰ متر از سطح آب ۷ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر (تابستان)



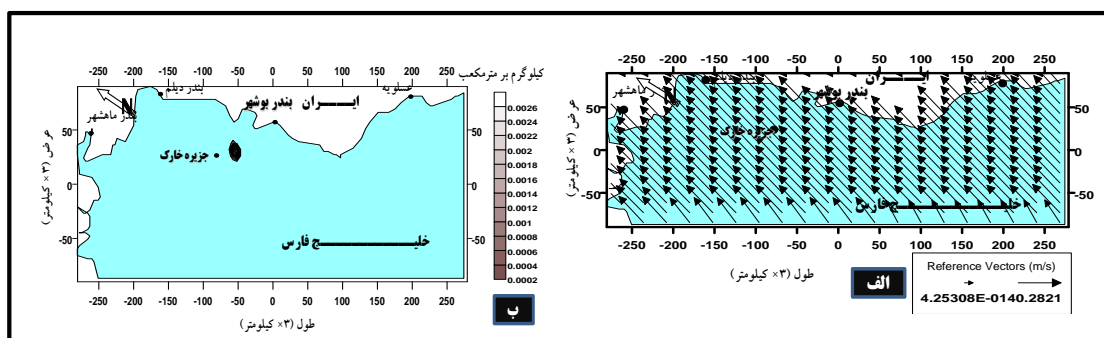
شکل ۸- بردارهای سرعت جریان (الف) و توزیع غلظت ذرات نفت خام (ب)، در تراز ۱۰ متر از سطح آب ۱۴ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر (تابستان)

شکل ۹- الف توزیع غلظت ذرات نفت خام در تراز ۱۵ متر از سطح آب، طی ۱/۷ ساعت پس از حادثه را نشان می دهد که گستردگی کمی داشته است و با توجه به جریان های برگشتی یکنواخت شمالی شکل ۹-ب می باشد. حداقل، حداکثر و میانگین غلظت ذرات به ترتیب 2×10^{-5} ، 0.00032 و 1.7×10^{-4} کیلوگرم بر متر مکعب و حداقل، حداکثر و میانگین سرعت جریان به ترتیب $5.27794E-0150.05731$ متر بر ثانیه می باشد. شکل ۱۰- الف توزیع غلظت ذرات نفت خام در تراز ۱۵ متر از سطح آب، طی ۷ ساعت پس از حادثه را نشان می دهد که گستردگی کمتری داشته است و با توجه به جریان برگشتی یکنواخت شمالی می باشد شکل ۱۰-ب. حداقل، حداکثر و میانگین غلظت ذرات به ترتیب 0.00026 ، 0.00026 و 0.00026 کیلوگرم بر متر مکعب و حداقل، حداکثر و میانگین سرعت جریان به ترتیب $4.25308E-0140.2821$ متر بر ثانیه می باشد. به طور کلی در حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر پس از گذشت ۱۴ ساعت توزیع غلظت ذرات نفت خام به صورت تکه های جداگانه نبوده است و مربوط به سرعت جریان کم تر و آشفتگی کم تر می باشد.

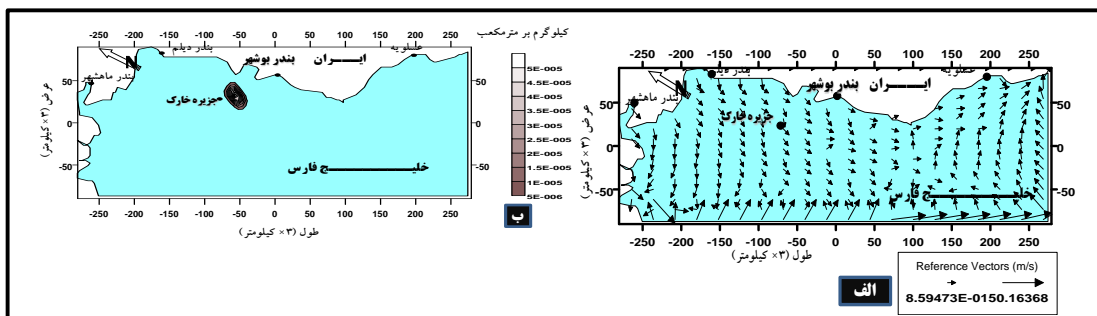
شکل ۹- الف توزیع غلظت ذرات نفت خام در تراز ۱۵ متر از سطح آب، طی ۱/۷ ساعت پس از حادثه را نشان می دهد که گستردگی کمی داشته است و با توجه به جریان های برگشتی یکنواخت شمالی شکل ۹-ب می باشد. حداقل، حداکثر و میانگین غلظت ذرات به ترتیب 2×10^{-5} ، 0.00032 و 1.7×10^{-4} کیلوگرم بر متر مکعب و حداقل، حداکثر و میانگین سرعت جریان به ترتیب $5.27794E-0150.05731$ متر بر ثانیه می باشد. شکل ۱۰- الف توزیع غلظت ذرات نفت خام در تراز ۱۵ متر از سطح آب، طی ۷ ساعت پس از حادثه را نشان می دهد که گستردگی کمتری داشته است و با توجه به جریان برگشتی یکنواخت شمالی می باشد شکل ۱۰-ب. حداقل، حداکثر و میانگین غلظت ذرات به ترتیب 0.00026 ، 0.00026 و 0.00026 کیلوگرم بر متر مکعب و حداقل، حداکثر و میانگین سرعت جریان به ترتیب $4.25308E-0140.2821$ متر بر ثانیه می باشد. به طور کلی در حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر پس از گذشت ۱۴ ساعت توزیع غلظت ذرات نفت خام به صورت تکه های جداگانه نبوده است و مربوط به سرعت جریان کم تر و آشفتگی کم تر می باشد.



شکل ۹- بردارهای سرعت جریان (الف) و توزیع غلظت ذرات نفت خام (ب)، در تراز ۱۵ متر از سطح آب، ۱/۷ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر (تابستان)



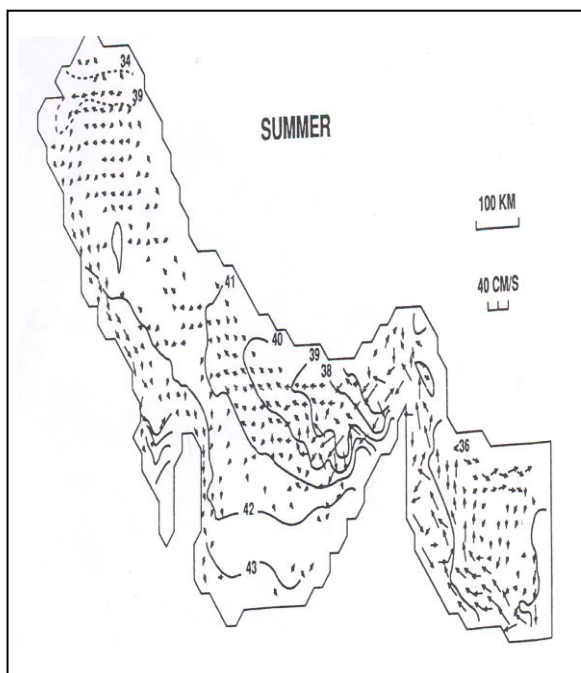
شکل ۱۰- بردارهای سرعت جریان (الف) و توزیع غلظت ذرات نفت خام (ب)، در تراز ۱۵ متر از سطح آب، ۷ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر (تابستان)



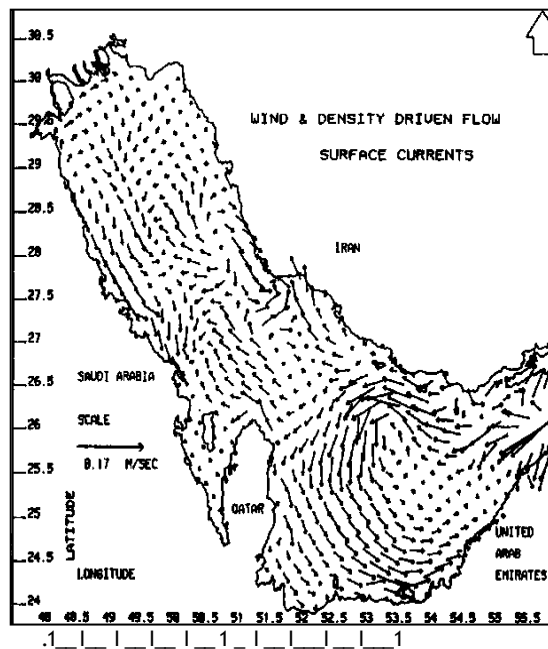
شکل ۱۱- بردارهای سرعت جریان (الف) و توزیع غلظت ذرات نفت خام (ب)، در تراز ۱۵ متر از سطح آب، ۱۴ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر (تابستان)

۱۵ متر از سطح آب، ۱٫۷ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی و شکل ۱۱- الف بردارهای سرعت جریان در تراز ۱۵ متر از سطح آب، ۱۴ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی با شکل ۱۴ و ۱۵ (۱۴) سازگاری دارد .

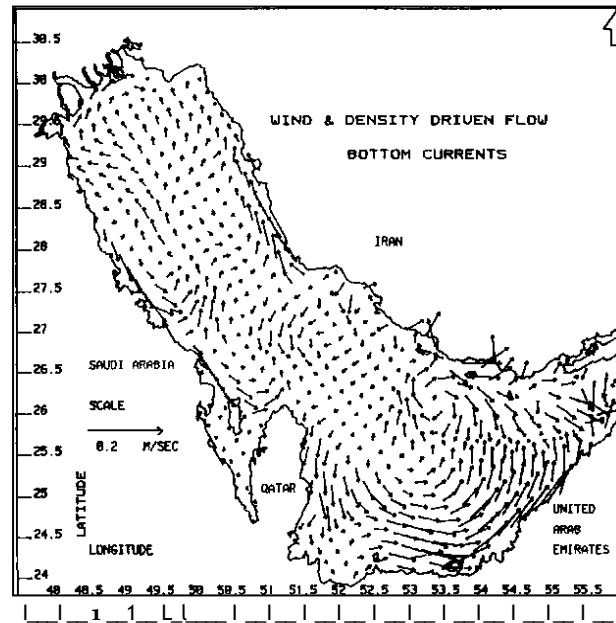
شکل ۳- الف بردارهای سرعت جریان در تراز ۵ متر از سطح آب طی ۱٫۷ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی و شکل ۵- الف بردارهای سرعت جریان در تراز ۵ متر از سطح آب ، ۱۴ ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی با شکل ۱۲ (۲۳) و شکل ۱۳ (۲۴) سازگاری دارد و شکل ۹- الف بردارهای سرعت جریان در تراز



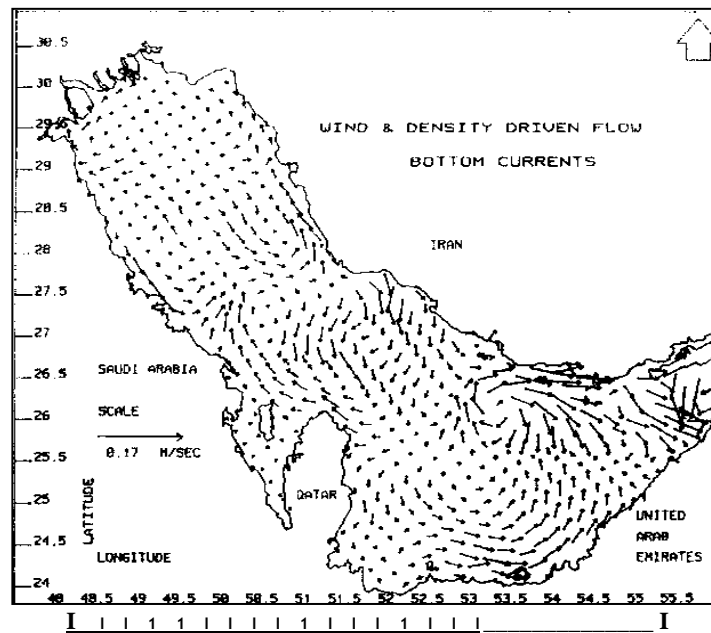
شکل ۱۳- جریان سطحی و خطوط هم شوری در فصل تابستان که توسط مدل Chao و همکاران در سال ۱۹۹۰ با در نظر گرفتن تبخیر، بادهای شمال غربی و ورودی رودخانه شط العرب نتیجه شده است (۲۶).



شکل ۱۲- جریان سطحی ناشی از رانش ماهانه باد و اختلاف چگالی در طی ماه آگوست توسط لرنر (۱۴)



شکل ۱۴- جریان بستر محاسبه شده توسط میانگین باد ماه ژوئن و گرادیان‌های چگالی از مرحله ۶ داده‌های گشت تحقیقاتی مونت



شکل ۱۵ - جریان بستر محاسبه شده توسط میانگین باد ماه آگوست و گرادیان‌های چگالی از مرحله ۶ داده‌های گشت تحقیقاتی Mt-Mitchell (۱۲).

اصطکاک و فشار و نیروی کوریولیس به وجود می آید که نیروی کوریولیس همیشه عمود بر جهت جریان است.

نتیجه گیری

در این مقاله، در فرمول بندی مدل از تقریب بوسینسک به صورت معادلات لایپس استفاده شده که در آن معادله هیدروستاتیک به کار نرفته است. برای حل معادله فرا رفت در مدل، از الگوریتم بالا سوی وزن دار ترابرد مثبت معین چند بعدی (MPDATA) استفاده شده است. اساس این الگوریتم، طرحواره ساده پاد جریانسو است که در آن از مفهوم سرعت پاد پخش برای تعدیل اثر پخش موجود در طرحواره استفاده شده است. برای حل معادله بیضوی حاصل از مدل، از روش باقی-مانده همیوغ تعمیم یافته (GCR) استفاده شده است. پس از انتخاب مدل و الگوریتم عددی، برای حل آن از کد فورترن اسمولارکیویچ و مارگولین (۱۹۹۵) استفاده شد. پس از شناخت کامل کد کامپیوتری مربوط به مدل، برای اطمینان از خروجی آن، کد بر روی توپوگرافی زنگی شکل، مورد استفاده قرار گرفت (۹). مدل عددی با شبکه به ابعاد 180×555 کیلومتر مربع، 11346 نقطه، $\Delta X = \Delta Y = 3000$ متر اجرا شده و توزیع غلظت و جهت ذرات نفت خام در تابستان طی $1/7$ ، 7 و 14 ساعت پس از حادثه ریزش اتفاقی در ترازهای 5 ، 10 و 15 متر از سطح آب به دست آمد. نتایج مدل نشان می دهد جهت حرکت ذرات در تابستان به طرف بندر بوشهر می باشد که با تجربیات و مطالعات در توافق می باشد. این تحقیق می تواند در پیش بینی و جهت حرکت آلودگی نفت به منظور جمع آوری آلودگی ناشی از ریزش اتفاقی در دریا، جهت جلوگیری از خطر حرکت آن به طرف ساحل، مفید واقع شود.

نوآوری

- ۱- آرایه مدل عددی سه بعدی با روش جدید جهت پیش بینی حرکت لکه نفت در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر
- ۲- تاثیر سرعت شناوری (Buoyant Velocity) در معادله انتقال غلظت.

در منطقه بین جزیره خارک و بندر بوشهر در فصل تابستان بعد از حادثه ریزش اتفاقی، حرکت ذرات نفت تابع جریان تغییرات زمانی سرعت آب و باد، تنش باد و در پیوندهای کم تر از 24 ساعت تابع جریان جزر و مدی بوده و حرکت عمودی ذرات تابع تلاطم و پایداری ستون آب می باشد. در تابستان به دلیل کاهش سرعت باد، تلاطم و لایه اختلاط و افزایش پایداری و لایه بندی ستون آب و پیش روی بیش تر آب به طرف سواحل موجب می شود که حرکت ذرات به طرف ساحل بیش تر شده و نفوذ ذرات به طرف عمق کاهش داشته باشد. با توجه به شرایط اولیه و مرزی و لایه بندی و پایداری بیش تر آب در تابستان و افزایش نیروی شناوری (افزایش عدد ریچاردسون) و کاهش تلاطم (کاهش عدد رینولدز) و افزایش ویسکوزیته و کاهش لایه اختلاط و افزایش دما و کاهش چگالی سطحی آب، نفوذ ذرات به عمقی از ستون آب کاهش داشته و بیش تر در سطح تجمع می کنند و پراکندگی ذرات بیش تر به سمت ساحل است تا دور از ساحل. نزدیک مرز سخت، تنش رینولدز کاهش داشته و جریان بسیار ضعیف بوده و سرعت ذرات کمتر و دور از مرز سخت سرعت ذرات رو به افزایش بوده که در نهایت با جریان اصلی آب حرکت می کند. در نزدیک مرز در جریان تغییرات عمده زمانی مشاهده نمی شود و حرکت ذرات ضعیف است و تجمع در نزدیک مرز بیش تر می باشد. تأثیر باد که در تابستان سرعت آن کم تر می باشد، حرکت ذرات را بیش تر در سطح تحت تأثیر قرار داده و با افزایش عمق، تأثیر آن (جریان ناشی از باد) نسبت به ذرات کاهش می یابد، یعنی در عمق سرعت آب ناشی از باد کم می شود و تأثیر ویسکوزیته پیچکی عمودی در عمق کاهش می یابد و با توجه به عمق اکمن، زاویه بین سرعت باد و سرعت جریان آب که حرکت ذرات نفت را تحت تأثیر دارد بیش تر می شود به گونه ای که نفوذ اصطکاک ناشی از تنش باد نیز در ستون آب رو به کاهش می رود که تأثیر آن بر سرعت ذرات به طرف عمق کم می شود. از طرفی بزرگی نیروی کوریولیس به سمت راست کاهش داشته و چرخش جریان به سمت چپ ایجاد شده و یک تعادل بین

ظرفیت جذب نفت، سواحل خلیج فارس طبقه بندی شود (بخصوص سواحل در معرض آلودگی نفت).

۳- جریان‌های ساحلی ناشی از شکست موج و باد که در امتداد ساحل و به دور از ساحل ایجاد می‌شوند نقش موثری می‌توانند در انتقال حرکت لکه نفتی داشته باشند. پیشنهاد می‌گردد در سایر مطالعات اثر جریان‌های ساحلی نیز در نظر گرفته شود.

۴- فشار بخار، ضرایب پخش عمودی و افقی در آب، قابلیت حلالیت نفت در آب با توجه به شرایط جوی و دریایی منطقه مورد مطالعه، با دقت بالا و بطور دقیق محاسبه شوند.

۵- در اکثر مدل‌های ریزش نفت، نفت به عنوان یک مولفه منفرد در نظر گرفته می‌شود، از آنجا که نفت شامل چندین مولفه ترکیب شده می‌باشد، پیشنهاد می‌گردد نفت در مدل‌ها به صورت چند مولفه (ذرات با قطره‌های مختلف) بررسی گردد.

۳- متغیر در نظر گرفتن ضرایب پخش عمودی و افقی در معادلات مربوط.

۴- عدم کاربرد معادله هیدروستاتیک در مدل سه بعدی.

۵- متغیر در نظر گرفتن چگالی جریان آب-نفت خام در معادلات حرکت.

۶- ارایه مدل سه بعدی هیدرودینامیک جهت بررسی جریان‌ها.

۷- بررسی توزیع غلظت و جهت ذرات در ترازهای مختلف از سطح آب در زمان‌های متفاوت.

پیشنهادها

۱- جهت بررسی دقیق تر فرآیندهای موثر بر لکه نفت ریزش شده، بهتر است تاثیر گردش‌های لانگمیر (*Langmuir*) بر پراکندگی عمودی ذرات نفت در ستون آب مورد مطالعه قرارگیرد.

۲- از آنجا که جذب نفت در ساحل به رسوب ساحل، خلل و فرج، فشار آب و شیب ساحل وابسته می‌باشد. ضروری است که به صورت کامل با توجه به نوع رسوب و شکل هندسی ساحل و حساسیت

۱۶- علایم و نشانه‌ها:

علایم	شرح	علایم	شرح	علایم	شرح	علایم	شرح
A	مساحت لکه نفت به متر مربع (m^2)	Q_K	تخلیه کلی	L_{min}	ضریب ویسکوزیته پیچکی افقی	محور کوچک بیضی به متر (m)	شرح
A_y, A_x	به ترتیب نواحی مقطع عرضی در جهت‌های y, x	U_{wind}	سرعت باد به نات (Knots)	L_{max}	به ترتیب ضرائب ویسکوزیته آشفتگی در جهت-های y, x	محور بزرگ بیضی به متر (m)	شرح
A_{ty}, A_{tx}	به ترتیب نواحی کل مقطع عرضی در جهت‌های y, x	U, V, W	مولفه‌های سرعت متوسط زمانی به ترتیب در جهت-های طولی x ، عرضی y و عمقی z	P	ویسکوزیته جنبشی آب	فشار متوسط زمانی	شرح

دبی خروجی جزر و مدی طی فصل مشترک	Q_T	چگالی جریان نفت - آب	ρ	حجم کل نفت ریزش شده به بشکه (Barrels)	V_{oil}	غلظت ذرات نفت	C
سرعت شناوری ذرات نفت	ω_b	چگالی هوا	ρ_a	ترم تأثیر منبع	$\sum S$	ضریب پسا	C_d
سرعت زاویه ای چرخش زمین	ω	چگالی جرم نفت به کیلوگرم بر متر مکعب	ρ_o	زمان به دقیقه	t	به ترتیب ضرایب پخش در جهت‌های x, y, z	D_x , D_y , D_z
عرض جغرافیایی	ϕ	چگالی جرم آب به کیلوگرم بر متر مکعب	ρ_w	طول اختلاط	l_m	اندازه متوسط ذره نفت	d
پارامتر کوربولیس	$\Omega = 2\omega \sin \phi$	عدد آشفتگی اشمیت	$\sigma \varphi z$	طول اختلاط طبیعی	l_{mo}	شتاب ثقل	g
		تنش‌های برشی افقی حاصل از انتقال ممتنم آشفتگی عمودی	$and \tau_x$ τ_y	اختلاف چگالی	$\Delta \rho = \rho_w - \rho_o$	کسری از نفت در مخلوط	F_{ow}
		به ترتیب لزجت مولکولی جنبشی و لزجت آشفتگی جنبشی و لزجت موثر جنبشی	V_e, V_t, V	به ترتیب مسافت- های بین مراکز عنصر در جهت- های y, x	Δ_y, Δ_x	فاکتورهای تجربی	F_1, F_0 و α

منابع

- Price, A.R.G. and Robinson, J.H., Marine Pollution Bulletin, Pergamon Press 1 .td, pp.3-7, 97-98, 1993.
- Di Martino B., Peybernes M., Simulation of an oil slick movement using a shallow water model Original Research Article Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 76, Issues 1-3, 12 October, Pp. 155-160, 2007
- بدری س.، حسن زاده ا.، حکیم زاده هو.، شبیه سازی عددی حرکت لکه نفت در خلیج فارس تحت تاثیر عوامل جزر و مدی در نزدیکی جزیره خارک و بندر عسلویه، کنفرانس فیزیک ایران، ۱۳۹۱. <http://badri.iut.ac.ir/fa/kahesh-fa>
- Cekirge H.M., Al-Rabeh A.H., Gunay N., Determining the wind-driven surface currents for prediction of movements of oil slicks in the Persian Gulf Original Research Article Computers & Mathematics with Applications, Vol. 17, Issue 11, pp. 1449-1453, 1989.
- Daniel, P., Poitevin J., A Numerical Study of Movements of an Oil Slick on the Sea Surface in the Persian Gulf From 25 January 1991 to 1 February 1991", First thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, pp.249-260, 1992.

12. Comerma, E. and et al, Inclusion of an Oil Database into a Forecasting System, Proceedings of AMOP, Victoria, Canada, pp.1-17, 2003.
13. Daniel, Pierre, Operational Forecasting of Oil Spill Drift at Meteo-France, Spill Science & Technology Bulletin (Pergamon), Vol.3, No.112, pp.53-64, 1996.
14. Lardner, R.W., and et al, Computation of the Residual flow in the Gulf using the Mt Mitchell Data and the KFUPM/RI Hydrodybnamical Models, Marine Pollution Bulletin (Pergamon Press Ltd), Vol.27, pp.61-70, 1993.
15. Riazi, Mohammad R. and et al, Modelling of the Rate of Oil Spill Disappearance from Seawater for Kuwaiti Crude and Its Products, Chemical Engineering Journal (Elsevier), Vol. 73, pp.161-172, 1999.
16. Riazi, Mohammad R. and Edalat, Mohsen, Prediction of the Rate of Oil Removal from Seawater by Evaporation and Dissolution, Journal of Petroleum Science and Engineering (Elsevier), Vol.16, pp. 291-300.
۱۷. ابوالحمد، گیتی، مبانی پالایش نفت، انتشارات دانشگاه تهران، صفحات ۵، ۳۶، ۷۷، ۷۹، ۸۳، ۹۳-۹۴، ۹۱، ۱۳۴، ۱۳۶، ۱۶۹، ۲۵۲، ۳۰۴-۳۰۱، ۳۲۲، ۶۰۳-۵۶۹، ۱۳۸۱.
۱۸. خسروی، مرتضی، شیمی نفت، روش‌های تصفیه و فرآورده‌های پالایشگاه‌ها، انتشارات دانشگاه تهران، صفحات ۴، ۱۳، ۱۵، ۲۹، ۴۷، ۱۰۱، ۱۳۹، ۱۴۴، ۴۴۲-۱۳۷۶، ۴۰۵.
۶. م. صالحی پورباورصاد، ن. حاجی زاده ذاکر، مو. اردستانی، مدل‌سازی لکه نفتی و مقایسه مسیر حرکت تحت تأثیر بادهای مختلف در خلیج فارس، نخستین همایش ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری، علوم و صنایع وابسته، ۱۳۹۱. <http://mrfi.ir/asli/MBAmaghale/MBA1/MBA47/MBA92.htm>
۷. واصل علی ع.، آزر م. س.، واصل علی مو بررسی تأثیر جریان‌های دریایی بر انتشار آلودگی‌های نفتی و مقایسه دو مدل ریاضی و تجربی در پیش‌بینی حرکت لکه‌های نفتی (مطالعه موردی خلیج فارس) ششمین، همایش علوم و فنون دریایی ۱۳۸۴. http://www.civilica.com/Paper-ICMST06-ICMST06_016.html
۸. س. ر. صباغ یزدی، مدل دوبعدی جزرومدی پراکنش نفت در خلیج فارس باحل معادلات میانگین عمقی بر روی شبکه اجزای بی ساختار، مجله علمی و پژوهشی علوم و تکنولوژی محیط زیست شماره ۷ و ۸، مرکز انتشارات علمی دانشگاه آزاد اسلامی صفحات ۱۳-۳۱، ۸۰-۱۳۷۹.
۹. م. عرب حسین، مطالعه عددی میدان باد در یک منطقه با توپوگرافی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک-دانشگاه تهران-صفحات ۱۷-۴۳، ۱۳۸۳.
10. Habibi, S, Torabi Azad. M & Bidokhti. A.A, A numerical model for the prediction of movement of gas condensate from spill accidents in the Assalouyeh marine region, Persian Gulf, Iran, Indian Journal of Marine Sciences., 37, No.3 pp.233-242, 2008.
11. Chao, Xiaobo and et al, Development and Application of Oil Spill Model for Singapore Coastal Waters, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, pp. 495-503, 2003.

- First thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments , pp.249-260,1992.
24. Abdel rahman, saad M.and et al. A Note on the Residual currents in the presian Gulf,Elsevier Science Ltd (Pergamon),Continental Shelf Research , vol . 15, No .8, PP. 1015-1022, 1995.
۲۵. شرکت پارگاز ایران، گزارش بررسی اقیانوسی، سازمان انرژی اتمی ایران، بوشهر(NPP) ۱۳۷۵.
26. Chao, Shenn-Yu and et al., A Numerical Investigation of Circulation in the Persian Gulf, Journal of Geophysical Research, Vol.97, No. C7, pp.11219-11236, 1999.
۱۹. نوری، سیروس، شیمی و فن آوری نفت ، انتشارات دانشگاه ارومیه ، صفحات ۳۳ ، ۳۸ ، ۴۵ ، ۴۶ ، ۶۰ ، ۷۰-۷۱ ، ۲۳۱ ، ۲۴۶ ، ۳۰۲ ، ۱۳۸۲.
۲۰. سازمان نقشه برداری کشور، جداول جزرومدی خلیج فارس و دریای عمان، سازمان نقشه برداری کشور، صفحات ۱۸۱-۱۱۱۳۸۳، (۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ میلادی).
21. Lipps, F.B, On the Anelastic Approximation for Deep Convection, J.Atmos. SCi, 39, pp. 2192-2210, 1990.
22. Somolarkiewicz / P.K. and L. Margolin, On Forward in Time Differencing for Fluids: An Eulerian/ semi – lagrangian Nonhydrostatic Model for stratiedl Flows.”, Tj. Artmos – Ocean special 35, PP. 127-152, 1995.
23. Daniel , Pierre, A Numerical Study of Movements of an Oil Slick on the Sea Surface in the Persian Gulf From 25 January 1991 to 1 February 1991 ,