مدل سازی عددی انتقال و پخش آلودگی نفتی در دریا

فرزاد عزیزی‌قناد [۱*]، فریدون وفایی [۲]، مهدی محمدی‌عراق [۳]

۱- کارشناس ارشد رشته سازه های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
۳- عضو موسسه تحقیقات آب ایران

چکیده

پخش آلاینده های نفتی در محیط‌های آبی از معضلات بشر امروزی است. معمولاً، انتقال و پخش لکه نفتی در محیط های آبی به دلیل فرایندهای شیمیایی، فیزیکی و زیست شناسی است که خود وابسته به خصوصیات نفت، هیدرودینامیک، هواشناسی و شرایط زیست محیطی است. این فرایند ها شامل انتقال، پراکندگی، تبخیر، و ... می‌باشد. زمانی که نفت در سطح آب پخش می شود، کشیده شده و لایه نفتی را تشکیل می‌دهد. پخش و انتقال لایه نفتی به دلیل جریان، امواج و اثر باد می‌باشد. افزایش تمایل نسبت به مطالعه لکه نفتی و همچنین اهمیت روز افزون این موضوع در زندگی روزمره بشر، باعث توسعه تعداد زیادی از مدل های عددی شده است.

در این مقاله یک مدل عددی برای شبیه سازی انتقال و پراکندگی ضخامت لکه نفتی و همچنین پخش و جابجایی مقدار متوسط غلظت نفت در ستون آب و تبخیر با دیدگاه اویلری و به صورت یک مدل چند فازی توسعه داده شده است. مدل هیدرودینامیک موجود معادلات دو بعدی غیر دایمی ناویر استوکس متوسط‌گیری شده در عمق را حل می‌کند. در حل عددی جریان از روش تغییر جهت متناوب ضمنی استفاده شده است. گسسته سازی معادلات به روش احجام محدود انجام شده است. به منظور بررسی صحت کارایی مدل عددی، با یک رابطه تجربی مقایسه شده است که نتایج، تطابق مناسبی را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: انتقال و پراکندگی لکه نفتی، متوسط گیری شده در عمق، روش اویلری، مدل چند فازی

SIMULATION OF NUMERICAL MODEL FOR OIL POLLUTION ON THE SEA

F. Azizi Ghannad [1], F. Vafaei [2], M. Mohammadi Aragh[3]

1-Msc of Marine Structures, Civil College, K. N. Toosi Univ. of Tech.
2-Assistant Professor of Civil Engineering College, K. N. Toosi Univ. of Tech.
3-Member of Iranian Water Research Institute

Abstract

Nowadays oil spill are one of the most important problem in the humans life. Usually advection and dispersion occur because of chemicals, physicals and biological processes that related by properties of oil and other things. These processes are evaporation, dispersion and so on. When oil spills on the sea, it is extended and made oil slick. Increasing these kinds of events cause developing many kind of oil spill model.

In this paper a numerical model for simulating drifting and spreading of oil slick thickness including dissipative processes such as advection and diffusion of averaged oil concentration in the water column and evaporation, with Eulerian approach and multi phase model has been developed. Equations were discrete using finite volume method. Available hydrodynamic model can solve two-dimensional depth-averaged unsteady Navier-Stokes equations. Alternating

* نویسنده مسوول مقاله f_azizi_gh@sina.kntu.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.4.3]

Direction Implicit method (ADI) is used for numerical solution of flow. In order to verify the accuracy of hydrodynamic, advection and diffusion model of oil slick thickness and oil average concentration, numerical results compared with experimental measurements and analytical model. Comparison shows the model can satisfactory simulate the problem.
Keywords: Drifting and spreading of oil slick, Depth averaged, Eulerian approach, Multi phase model

۱- مقدمه

رشد اقتصادی سریع باعث افزایش نسبتاً زیادی در مصرف نفت در دهه‌های اخیر شده است. حجم زیادی از نفت هنگام برخورد نفت کش‌ها با موانع و یا غرق شدن آنها در آبها رها می‌شود. لکه‌های نفتی حاصل از رفت و آمد کشتی‌های نفت کش، حفاری چاههای نفتی و فعالیت‌های مشابه به دلیل رشد روز افزون نفت و محصولات آن افزایش می‌یابد. معمولاً، انتقال و پخش لکه نفتی در محیط‌های آبی به دلیل فرایندهای شیمیایی، فیزیکی، و زیست شناسی است که خود وابسته به خصوصیات نفت، هیدرودینامیک، هواشناسی و شرایط زیست محیطی است. این فرایندها شامل انتقال، پراکندگی، نفوذ در ستون آب و... می‌باشد [۱].
از آنجائیکه حوادث دریایی اکثرا در محیط‌های گسترده و غیر قابل دسترس رخ می‌دهد، لذا دسترسی محلی به آلودگی نفتی در موقعیت مورد نظر تقریباً غیر اقتصادی و زمانبر می‌باشد. یکی از روشهایی که می‌تواند در پیش‌بینی حرکت لکه نفتی و پاکسازی آن کمک شایانی کند، مدلسازی عددی است. رشد چشمگیر حوادث دریایی در سالهای اخیر محققان را بر آن داشت تا مدلهای متنوعی را برای پیش‌بینی چگونگی انتقال و پخش لکه نفتی ارایه دهند که هر یک از آنها به نوبه خود دارای نقاط ضعف و قوت بودند. از مشهورترین مدل‌ها می‌توان به مدل ارائه شده توسط Fay در سال ۱۹۶۹ [۲]، مدل Lehr و همکاران در سال ۱۹۸۴[۳]، مدل Delvigne در سال ۱۹۹۴[۴]، مدل Oilpol توسط Alrabeh در سال ۱۹۹۹[۵] و مدل ارائه شده توسط Fignas در سال ۲۰۰۳ [۶] اشاره نمود. اکثر این مدل-ها تنها به بررسی حرکت لکه نفتی در سطح آب می-پردازند و نفت را به صورت مجموعه‌ای از ذرات در نظر می‌گیرند. اما مطالعات اندکی در مورد تخمین غلظت نفت موجود و فرایندهای مستهلک‌کننده در زیر سطح آب انجام گرفته‌است[۱و۵و۶].
در این تحقیق سعی شده است تا یک مدل عددی برای شبیه‌سازی پخش و انتقال لکه نفتی در سطح آب با در نظر گرفتن فرایندهای استهلاکی همچون تبخیر و نفوذ ذرات در داخل ستون آب به صورت یک مدل چند فازی توسعه داده شود.

۲- روش انجام کار

برای پیش بینی دقیق فرایند پخش و انتقال لکه نفتی در سطح دریا، لازم است تا علاوه بر شناسایی عوامل موثر در پخش و انتقال، فرایندهای استهلاکی همانند تبخیر و نفوذ نفت در ستون آب، نیز شناخته و بررسی شوند. برای این منظور یک مدل عددی بر پایه روش اویلری توسعه داده‌شده و در آن برای مشخص شدن الگوی حرکت جریان آبی از معادلات پیوستگی و ممنتوم (معادلات نویر – استوکس متوسط‌گیری شده در عمق)، (روابط (۱) الی (۳)). و برای بررسی انتقال لکه نفتی از معادلات انتشار نفت در سطح (رابطه (۴)) استفاده‌شده‌است[۷].
هنگامي كه ابعاد افقی محیط آبي بسيار بزرگتر از ابعاد قائم باشد، معادلات دو بعدی افقی آب های کم عمق می‌تواند جریان را بطور رضایت بخشی مدل کند. اگر از نیروهای باد و کوریولیس صرفنظر شوند و فشار هیدروستاتیک فرض گردد، معادلات حاکم بر جریان غیر دائمی دو بعدی آب های کم عمق با استفاده از سیستم مختصات کارتزین به صورت زیر نوشته می‌شوند[۷و۸]:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.4.3]

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial (HU)}{\partial x}+\frac{\partial (HV)}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(HU)+\frac{\partial}{\partial x}(HU^2)+\frac{\partial}{\partial y}(HUV)=-gH\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{g}{C_e^{\,2}}U(U^2+V^2)^{1/2}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(2\nu\frac{\partial HU}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\nu\left(\frac{\partial (HU)}{\partial y}+\frac{\partial (HV)}{\partial x}\right)\right] \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(HV)+\frac{\partial}{\partial x}(HUV)+\frac{\partial}{\partial y}(HV^2)=-gH\frac{\partial H}{\partial y}-\frac{g}{C_e^{\,2}}V(U^2+V^2)^{1/2}+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(2\nu\frac{\partial HV}{\partial y}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\nu\left(\frac{\partial (HU)}{\partial y}+\frac{\partial (HV)}{\partial x}\right)\right] \qquad (۳)$$

U و V مولفه‌های متوسط‌گیری شده سرعت در عمق در دو جهت x و y می باشند. H، ν، g و C_e به ترتیب عمق آب با در نظر گرفتن سطح آزاد، ضریب پخشودگی، شتاب گرانش و ضریب شزی می‌باشند.

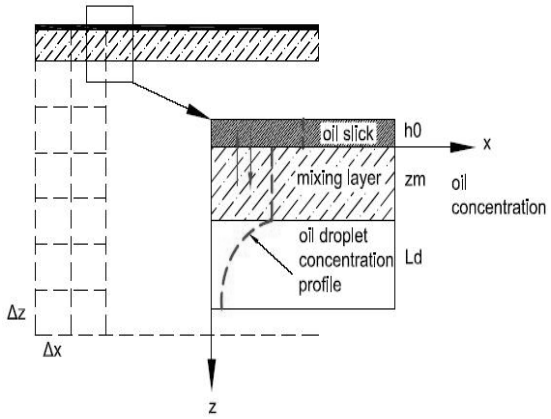
$$\frac{\partial h}{\partial t}+\overline{\nabla}(h\overline{v})-\overline{\nabla}(D\overline{\nabla}h)=R_h \qquad (۴)$$

در هر گام زمانی، تغییرات خصوصیات نفت و مقدار کاهش حجم نفت به واسطه فرایندهای مختلف از جمله تبخیر که از معادله Mackay 1980، (رابطه (۵)) بدست می‌آید [۹و۱۰] و همچنین مقدار نفوذ نفت در ستون آب که به واسطه مشخصات موج و شناوری محیط رخ می‌دهد از رابطه (۶)، محاسبه می‌شود[۷و۱۱].

$$s_e=\frac{\sum M_i}{t}=\frac{\sum K_e A X_i P_i^s}{RT} \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\overline{\nabla}(C\vec{u})-\overline{\nabla}(\vec{E}\,\overline{\nabla}C)=R \qquad (۶)$$

در روابط (۴) و (۶)، با توجه به شکل ۱، h ضخامت لایه نفتی، C غلظت آلاینده نفتی در ستون آب، $\vec{E}=(E^x,E^y)$ ضریب پخش آشفتگی به ترتیب در دو جهت xو y، R_h و R عبارت‌های دینامیکی فیزیکی شیمیایی، $\overline{v}=(u^x+\tau^x/f,u^y+\tau^y/f)$ سرعت جابجایی لکه در دو جهت xو y، $(\tau^x,\tau^y)/f\approx 0.03(U^x,U^y)$ تنش‌های برشی به دلیل باد، $D=gh^2(\rho-\rho_o)\rho_o/\rho f$ تابع پخش[۱]، ρ و ρ_o چگالی آب و نفت به ترتیب، f ضریب اصطکاک بین لایه نفتی و سطح آب، g شتاب ثقل، $\vec{u}=(u^x,u^y)$، u^x و u^y سرعت سیال به ترتیب در دو جهت x و y، t زمان، $\overline{\nabla}=(\partial/\partial x,\partial/\partial y)$ می‌باشند[۷].



شکل ۱- لایه نفتی و لایه اختلاط آب و نفت و همچنین شبکه محاسباتی مربوطه[۷]

رابطه (۴) برای دینامیک لکه نفتی بوده و با متوسط گیری از معادلات ناویر استوکس روی ضخامت نفت سطحی حاصل شده است. عبارت دوم این رابطه جابجایی افقی لکه نفتی در اثر جریان باد و جریان نزدیک به سطح و عبارت سوم پخش توسط نیروهای ویسکوزیته- جاذبه می‌باشند. رابطه (۶) انتقال نفت در ستون آب را بیان می‌کند. عبارت‌های سمت راست روابط (۴) و (۶)، انتقال نفت بین دو لایه را نشان می‌دهد [۷].

در رابطه (۵)، M_i حجم نفت مولفه iام که به موجب تبخیر کاهش یافته است بر حسب مول، K_e ضریب انتقال جرم برای تبخیر (m/s) که از رابطه (۷) بدست می‌آید. A سطح لکه نفتی (m^2)، t زمان بر حسب ثانیه، X_i مقدار حجم مولفه iام بر حسب مول، P_i^s فشار بخار مولفه iام، T دمای هوا بر حسب کلوین، R ثابت گازها، می‌باشد[۹].

$$k_e=.0292\,U_{wind}^{0.78}D^{-0.11}S_c^{-0.67} \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، U_{wind} سرعت باد بر حسب (m/s) و D قطر لکه نفتی بر اساس متر و S_c عبارتست از عدد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.4.3]

Schmidt که صافی سطح آب را نمایش می‌دهد و مقدار آن ۲/۷ می‌باشد[۴].

۳- روش حل و گسسته سازی معادلات

در این تحقیق با استفاده از یک مدل هیدرودینامیک دو بعدی که با استفاده از نرم افزار Fortran، نوشته شده است، منطقه مورد نظر، مدل شده و معادلات دو بعدی غیر دایمی ناویر استوکس متوسط گیری شده در عمق حل می‌شود.

به منظور حل معادلات مربوط از الگوی حل تغییر جهت متناوب ضمنی[۲] و روش گسسته‌سازی احجام محدود[۳] در شبکه‌بندی سازمان‌یافته لغزان استفاده‌شده‌است. با در نظر گرفتن دو نیم گام زمانی در هر گام زمانی، معادله پیوستگی و ممنتوم در جهت x در نیم گام زمانی اول و معادله پیوستگی و معادله ممنتوم در جهت y در نیم گام زمانی دوم حل می‌شوند. به نحوی که در نیم گام زمانی اول هر ردیف از سلول های محاسباتی مجزا موازی با محور x تشکیل یک دستگاه معادلات را می دهد. با محاسبه مجهولات مربوط به هر ردیف محاسباتی و جاروب کردن ردیف های محاسباتی از پایین به بالا و انجام عملیات تکرار به جهت همگرا شدن جواب معادلات - به دلیل غیر خطی بودن معادلات هیدرودینامیک - نیم گام زمانی اول به پایان می رسد. مشابه با آنچه که برای نیم گام زمانی اول بیان شد، در نیم گام زمانی دوم دستگاه معادلات ستون های محاسباتی در جهت y حل می گردند. در هر نیم گام زمانی بعد از محاسبه میدان سرعت، معادله انتقال غلظت مواد معلق و محلول حل می‌گردد. در انتها برای هر گام زمانی معادلات استهلاک ذکر شده حل می‌شود. برای سرعت‌های موازی دیواره‌های صلب از فرضیه دیواره‌های بدون اصطکاک استفاده شده و سرعتهای عمود بر دیواره‌های صلب برابر با صفر در نظر گرفته شده است. انتقال غلظت مواد معلق و محلول از جداره ها امکان پذیر نمی‌باشد.[۸]

همانطور که در بالا به آن اشاره شد، شبکه بندی استفاده شده در این مدل، از نوع سازمان یافته است، به نحوی که هر نقطه در تقاطع دو خط قرار دارد. در این شبکه بندی از خطوط عمود بر هم استفاده شده است. محل قرار گیری عمق آب در مرکز سلول ها و محل قرار گیری U، سرعت در راستای محور x، در وسط جداره‌های موازی با محور y ها و محل قرارگیری V، سرعت در راستای محور y، در وسط جداره های موازی با محور x ها می باشند[۸].

۴- بررسی عملکرد مدل

برای دست یافتن به صحت عملکرد مدل بایستی نتایج بدست آمده از مدل را با یک الگوی دقیق و درست سنجید. در این راستا به جهت صحت سنجی مدل، کانال با جریان دایمی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۴-۱- انتقال و پراکندگی لکه نفتی در کانال مستقیم

مقایسه نتایج مدل عددی با یک رابطه تجربی (ارایه شده توسط Borthwick,1992) در یک مثال ساده در کانال یکنواخت و مستطیلی ارایه می‌شود. کانالی به طول ۲۰ متر و عرض ۱۰ متر در نظر گرفته می‌شود. اندازه ابعاد شبکه در دو جهت طول و عرض کانال برابر با ۰/۲ متر در نظر گرفته می‌شود. سرعت جریان ثابت، و برابر با ۰/۱ متر بر ثانیه در جهت طولی کانال انتخاب می‌شود. با فرض ثابت بودن عمق آب، سرعت و ضرایب پخش و آنی بودن ورود آلودگی رابطه پخش آلودگی نفت بر اساس آزمایشات Borthwick، در رابطه (۸) ارایه شده است[۱۲و۱۳].

M جرم غلظت ورودی در $x=0$، $y=5$ و $t=0$، uسرعت متوسط و t زمان محاسبه شده از لحظه ورود آلاینده نفتی برای جواب معادله (۸) است.

۰/۰۰۵۲ متر مکعب نفت با چگالی $840\ kg/m^3$ بر روی سلول (۲۵،۲۵) به طور یکنواخت و آنی توزیع می‌شود. این مقدار نفت بر اساس روابط ارایه شده در بخش قبل به مدل وارد شده و پس از اجرای مدل نتایج با استفاده از نرم افزار Tecplot 8.0 به حالت گرافیکی در شکل های زیر نشان داده می‌شود.

$$S_{(x,y,t)} = \frac{M}{h4\pi t\sqrt{D_x D_y}}.\exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{4D_y t}\right].\exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4D_x t}\right] \qquad (۸)$$

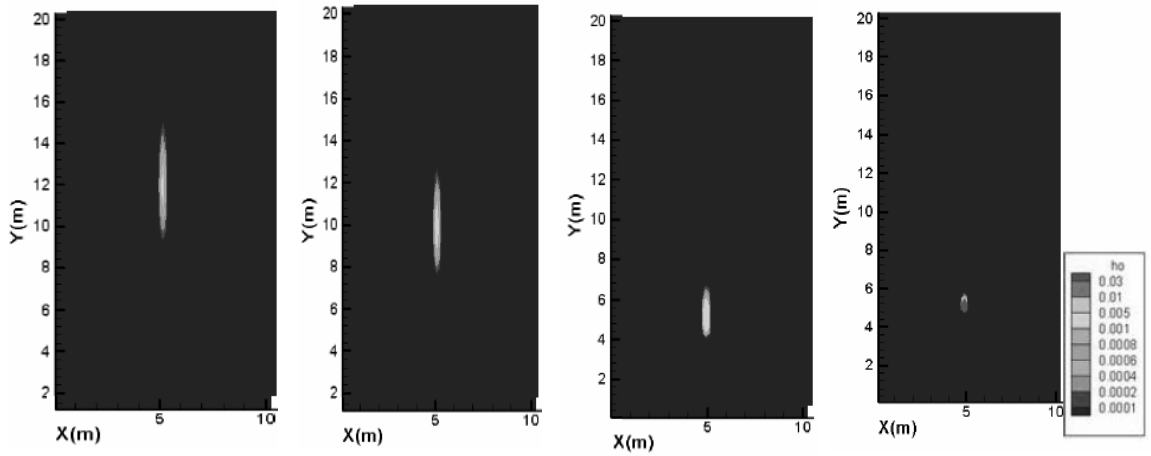
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.4.3]

۰/۰۰۵۲ متر مکعب نفت با چگالی $840\ kg/m^3$ بر روی سلول (۲۵،۲۵) به طور یکنواخت و آنی توزیع می‌شود. این مقدار نفت بر اساس روابط ارایه شده در بخش قبل به مدل وارد شده و پس از اجرای مدل نتایج با استفاده از نرم افزار Tecplot 8.0 به حالت گرافیکی در شکل های زیر نشان داده می‌شود.

با توجه به رابطه تجربی بدست آمده از آزمایشات Borthwick، و برای انجام مقایسه دقیق‌تر همان مقدار نفت با همان مشخصات ذکر شده برای مدل عددی، در رابطه (۸) وارد شده و نتایج بدست آمده از این رابطه تجربی به همراه نتایج حاصل از مدل عددی با استفاده از نرم افزار Excel، و به صورت یک نمودار واحد در شکل های بعدی آمده است.

اشکال ۲ تا ۵ ضخامت لایه نفتی را در زمان آغاز شبیه سازی، ۲/۵ ثانیه، ۴۰ ثانیه و ۷۰ ثانیه پس از آغاز شبیه سازی نشان می‌دهند. همانطور که در این شکل‌ها مشخص است مدل به خوبی پدیده انتقال لکه نفتی را نشان می‌دهد.

اشکال ۶ تا ۹ پخش و انتقال نفت در ستون آب را در زمان آغاز شبیه سازی، ۲/۵ ثانیه، ۴۰ ثانیه و ۷۰ ثانیه پس از آغاز شبیه سازی را نشان می‌دهند. با توجه به شکل می‌توان به نحوه و میزان نفوذ نفت در ستون آب و همچنین تبادل جرم بین دو فاز (لکه سطحی و ستون آب)، پی برد.

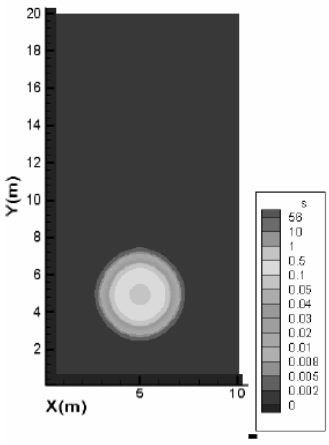


شکل۲ – تغییرات ضخامت لکه، T=2.5 s]، h_o بر حسب متر]

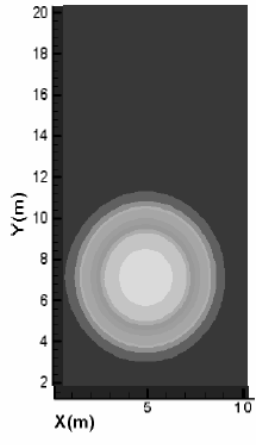
شکل ۳ – تغییرات ضخامت لکه، T=10 s

شکل ۴ – تغییرات ضخامت لکه، T=40 s

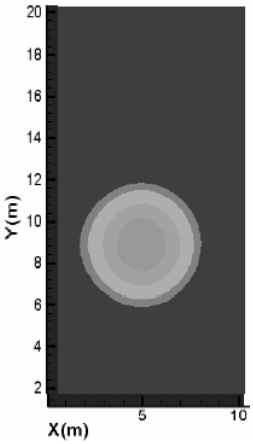
شکل ۵ – تغییرات ضخامت لکه، T=70 s



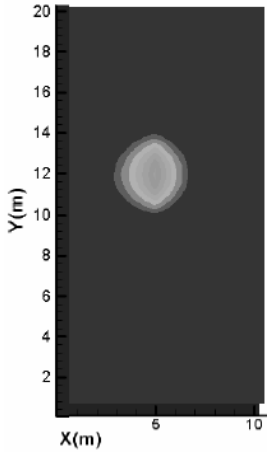
شکل ۶ – تغییرات غلظت نفت در ستون آب ، T=2.5 s
[s بر حسب kg/m^3]



شکل ۷ – تغییرات غلظت نفت در ستون آب ، T=10 s



شکل ۸ – تغییرات غلظت نفت در ستون آب ،T=40 s



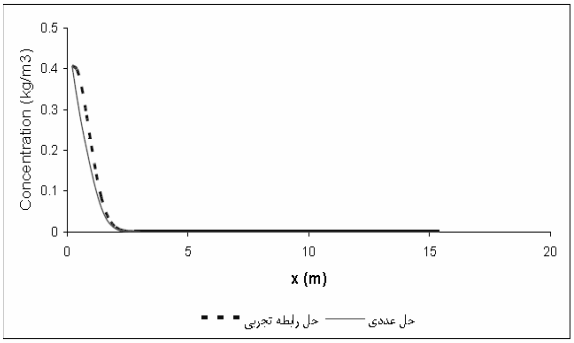
شکل ۹ – تغییرات غلظت نفت در ستون آب ، T=70 s

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.4.3]

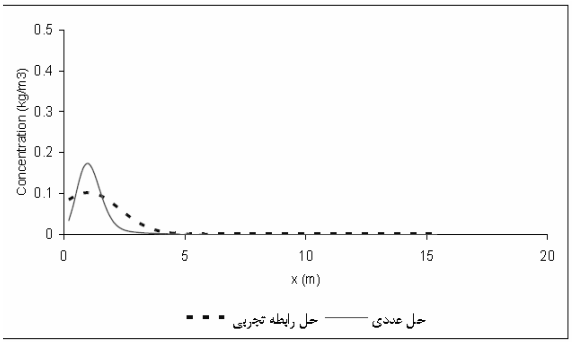
اشکال ۱۰ تا ۱۳ مقایسه نتایج شبیه سازی را با رابطه تجربی بر روی محور میانی و موازی با طول کانال (در راستای محور x)، نشان می‌دهند. با توجه به نتایج ارائه شده مشخص می‌شود که مدل می‌تواند انتقال و استهلاک لکه نفتی را با دقت زیاد شبیه سازی کند.

۵- نتیجه‌گیری

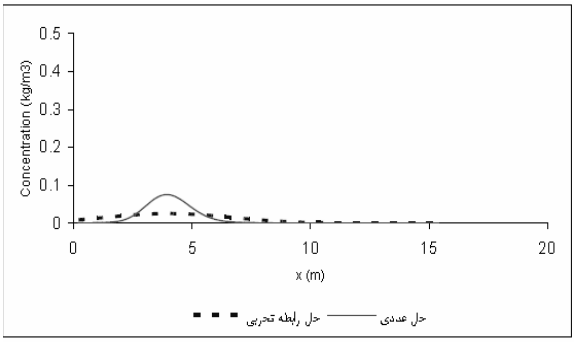
در این مقاله مدلی عددی به منظور پیش بینی انتقال و پراکندگی ضخامت لکه نفتی بر اساس روش گسسته سازی احجام محدود توسعه داده شده است. معادلات انتقال و پخش ضخامت لکه نفتی و مقدار متوسط غلظت نفت در ستون آب همراه و همزمان با معادلات میانگین گیری شده در عمق جریان حل می‌شوند. مدل هیدرودینامیک موجود، معادلات دو بعدی غیر دایمی ناویر استوکس متوسط گیری شده در عمق را حل می‌کند. در حل عددی جریان از روش تغییر جهت متناوب ضمنی استفاده شده است. به منظور صحت سنجی مدل، انتقال غلظت لکه نفتی با نتایج یک رابطه تجربی در شرایط یکسان از نظر مشخصات و میزان نفت ورودی، مقایسه شده است. با توجه به نمودار های ارایه شده در بخش قبل می توان چنین نتیجه گرفت که مدل عددی انتقال لکه نفتی را به صورت یک مدل دو فازی، در سطح و ستون آب، به خوبی شبیه سازی می‌کند.



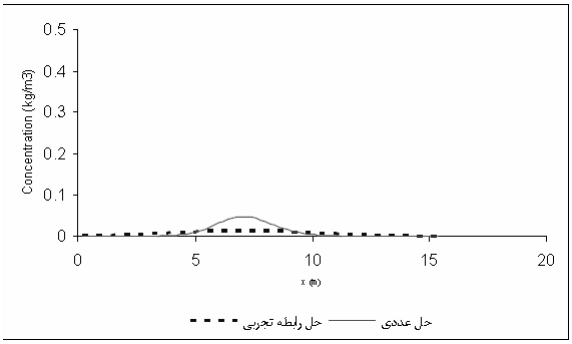
شکل ۱۰ – نمودارتغییرات غلظت در مکان (۵ و x) در T=2.5 s [مبدا مختصات بر روی نقطه رها شده لکه نفتی قرار دارد]



شکل ۱۱ – نمودارتغییرات غلظت در مکان (۵ و x) در T=10 s



شکل ۱۲ – نمودارتغییرات غلظت در مکان (۵ و x) در T=40 s



شکل ۱۳ – نمودارتغییرات غلظت در مکان (۵ و x) در T=70 s

کلید واژگان

1- Spreading Function
2- ADI: Alternating Direction Implicit
3- Finite Volume

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.4.3]

۶- مراجع

1-ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division, (1996), "State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 122, 11, 594-609.

2-Fay ,J.A,1969. The spread of oil slick on a calm sea. In: Hoult,D.P . (Ed),Oil on the Sea. Plenum Press, New York,NY,pp. 53-63

3-Lehr, W.J., Cekrige, H.M, Fraga, R.J., Belen, M.S., 1984. Emprical studies of the spreading of oil spills. Oil and Petrochemical Pollution 2,7-11

4-Delvigne, G.A.L., Hulsen, L.J.M., 1994. Simplified laboratory measurements of oil dispersion coefficient – application in computations of natural oil dispersion. In: Proceedings of the 17th Arctic and Marine Oil Spill Program, Environment Canada, pp.

5-Al-Rabeh, A.H., Cekirge, H.M., Gunay, N. (1999), "A stochastic simulation model of oil spill fate and transport", Appl. Math. Modeling, Vol. 13. June.

6-Fingas, M.Fieldhouse, B. (2003). "Studies of the formation process of water-in-oil emulsions. "Marine Pollution Bulletin, 47, 369-396.

7-Paval Tkalich, 2004. "A CFD solution of oil spill problems." Enviromental Modelling & Software. Sience Direct

8- M. Mohamadi, 2007, Modeling Flow and Turbulence and study Geometric influence of Port on Mixing of Flow due to Tide Effect with Finite Volume Method, Msc Thesis in Marine Structure, K.N Toosi University, Civil College, In Persian

9-Mackay, D., Buist, I., Mascarenhas, R., Paterson, S., 1980. Oil Spill Processes and Models, Report EE8. Environment Canada, Ottawa.

10-R., Mackay, D., Prentki, R., 1999. Oil spill modelling toward the close of the 20th century: overview of the state of the art. Spill Science and Technology Bulletin 5 (1), 3–16.

11-Tkalich, P., Huda, K., Gin, k., 2003. A multiphase oil spill model. Journal of Hydraulic Research 41 (2), 1-11.

12-M. Naghibi, 2007, Numerical Modeling of Oil Slick in Marine Water, Msc Thesis, Amir kabir university of Technology, Civil College, In Persian

13-Borthwick, A.G.L., Joynes, S.A., (1992), "Laboratory Study of Oil Slick Subjected to Nearshore Circulation", Journal of Environmental Engineering, Vol. 118, No.6.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.4.3]