

مدل‌سازی گسترش و پخش آلودگی‌های نفتی با روش احجام محدود در محیط‌های آبی

کوروש حجازی^۲

احسان سرحدی‌زاده^۱

(دریافت ۸۸/۱۲/۸ پذیرش ۸۹/۱۰/۸)

چکیده

محیط زیست دریایی و مناطق ساحلی تحت تأثیر جدی تأسیسات صنعتی مستقر در نزدیکی ساحل و در مجاورت بنادر و نیز تأسیسات دریایی دور از ساحل هستند. علاوه بر این، تردهای معمول دریایی، ناوگان‌های تجاری و صنعتی نیز از عوامل تأثیرگذار بر محیط‌زیست منابع آبی دریایی محسوب می‌شوند. در این مقاله با توجه به وجود دو مرز آبی بزرگ خلیج فارس و دریای عمان در جنوب و دریای خزر در شمال و نیز با توجه به اتکای جدی کشور به استخراج و صدور نفت به‌خصوص از طریق ناوگان‌های دریایی و رشد و توسعه روزافزون صنایع پتروشیمی، چگونگی انتشار، گسترش و پخش لکه‌های نفتی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از آنها مورد مطالعه قرار گرفت. آسیب‌های جدی زیست‌محیطی ناشی از صنایع پتروشیمی و نفتی خصوصاً در دوران جنگ خلیج فارس اهمیت توجه ویژه به این موضوع را بیشتر نمایان می‌کند. حرکت لکه نفتی، گسترش، پخش و آثار کیفی آن در محیط، با توسعه یک مدل عددی میانگین‌گیری شده در عمق و با استفاده از روش احجام محدود شبیه‌سازی شد. مدل توسعه داده شده، پارامترهای مؤثر در انتقال و پخش آلودگی‌های نفتی را در مدل مناسب پیش‌بینی جریان و انتقال لکه نفتی مورد استفاده قرار می‌دهد. با توجه به اینکه در پدیده انتقال و پخش آلودگی نفتی، بخش‌های انتقال و پخش معادلات ناویر - استوکس نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند، انتخاب روش مناسب عددی در قسمت انتقال و پخش از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مقاله برای جملات انتقال و پخش از الگوریتم با دقت بالا با استفاده از تابع شکل رویه و با فرض تغییرات درجه چهار در دو بعد استفاده شد که در مدل‌های مشابه دیده نمی‌شود. همچنین به‌منظور شبیه‌سازی پدیده جزر و مد، جبهه تر و خشک نیز در نظر گرفته شد. معادلات حاصل با استفاده از روش ضمنی با جهت متناوب حل شدند که ضمن ارضای دقت مناسب موردنظر، مجهولات با حل یک ماتریس پنج قطری در هر گام زمانی به‌دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: آلودگی نفتی، روش ضمنی با جهت متناوب، معادلات ناویر- استوکس، ماتریس پنج قطری، روش احجام محدود (FVM)

Dispersion Modeling of Oil Pollution with Finite Volume Method in Aquatic Environments

Ehsan Sarhadizadeh¹

Kourosh Hejazi²

(Received Feb. 27, 2010 Accepted Dec. 29, 2010)

Abstract

As long as oil is used, the risk of an oil spill exists. Rapid economic growth has caused a significant increase in fossil fuel consumption in recent decades. The world production of crude oil is about 3 billion tons per year and half of it is transported by sea. Exporting oil, especially via marine fleets and increasing development of petrochemical industry, marine system is exposed to severe environmental damages. The movement of oil spill, its diffusion and hydro-environmental effects have been simulated by developing a 2DH numerical model based on non-linear shallow water Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations using Finite Volume Method.

1. MSc. of Hydraulic and Civil Eng., Khajeh Nasir Toosi University of Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 22028317 Sarhadi@ihr.ir

2. Assist Prof. of Hydraulic and Civil Eng., Khajeh Nasir Toosi University of Tech., Tehran

۱- کارشناس ارشد عمران- هیدرولیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران (نویسنده مسئول) ۲۲۰۲۸۳۱۷ (۰۲۱) Sarhadi@ihr.ir

۲- استادیار عمران- هیدرولیک، دانشگاه خواجه نصیر طوسی، تهران

The new model deploys the relevant formulations for oil spill processes. Since advection and diffusion of oil pollution play a crucial role in oil spill flow pattern, it is important to choose an appropriate numerical scheme for the transport terms of N-E equations. In this work, a highly-accurate algorithm based on a 4th degree accurate shape function has been used for the hydrodynamic model, which is not present in similar models. The solution method is based on the alternating direction implicit (ADI) scheme. The equations are then solved by a Penta-Diagonal matrix in each half-time-step. Results from the numerical model are compared with measured values. Reasonable agreement is obtained between predicted and experimental nearshore circulation patterns.

Keywords: Oil Spill, Alternating Direction Implicit (ADI), Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (RANS), Penta-Diagonal Matrix, Finite Volume Method (FVM).

۱- مقدمه

منابع آلوده کننده آب دریاها نظیر پسابهای صنعتی، زباله‌های شهری، تخلیه آب توازن^۱ و شستشوی کشتی‌ها به داخل دریا، نشت مواد نفتی ناشی از حوادث مربوط به نفتکش‌ها و سکوها نفتی، زباله‌های اتمی، عوامل طبیعی نظیر طوفان‌ها، گرد و غبار و آتشفشان‌ها، مواد زائد ناشی از ارگانسیم‌های دریایی و سایر منابع آلودگی آثار مخربی بر اکوسیستم دریایی به جای می‌گذارند. گسترش تدریجی این آلودگی‌ها به سواحل و جزایر، سبب بروز بیماری‌های مهلک و عوارض ژنتیکی بر روی انسان نیز می‌گردد. آلودگی‌های نفتی جزو سمی‌ترین و بادوام‌ترین آلاینده‌های محیط‌های آبی و دریاها به حساب می‌آیند که اثرات زیست‌محیطی و بیولوژیکی بسیار مخرب و پایداری بر محیط زیست منطقه دارند. به‌طور کلی نفتی که در دریا پراکنده می‌شود، تحت تأثیر عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی دریا قرار می‌گیرد که روند فیزیکی-شیمیایی آن عبارت است از تشکیل لکه، حل شدن در آب، تبخیر، تشکیل پلیمر، اموله شدن به‌صورت امولسیون^۲ آب در نفت و یا نفت در آب، فتو اکسیداسیون، تجزیه میکروبی، رسوب کردن، مصرف پلانکتون‌ها و تشکیل مواد و تکه‌های جامد. مجموع این روند را باد خوردن یا هوا خوردن نفت^۳ می‌گویند. انحلال، یک عامل بسیار مهم در مطالعات پخش لکه نفت است. اکثر اجزای محلول نفت معمولاً سمی هستند [۱].

پس از نشت نفت در دریا، لکه نفتی تحت تأثیر نیروی باد و امواج پخش شده، با کاهش ضخامت و افزایش نرخ تبخیر مواجه می‌شود و به تدریج بر میزان لزجت نفت افزوده می‌شود. همچنین اعمال فتوشیمیایی موجب تغییر خواص نفت و کاهش تجزیه بیولوژیکی آن می‌گردد. انتقال نفت نشت یافته اصولاً بر پایه عوامل زیر استوار است

۱- پخش لکه نفتی بر اثر نیروهای ثقل، اینرسی، لزجت و کشش سطحی

۲- انتقال خالص و پخش آشفته‌گی افقی ناشی از جریان آب و باد

¹ Ballast

² Emulsification

³ Weathering

۳- تبخیر و تجزیه ناشی از فرایندهای آب و هوایی

۴- انتشار قائم ناشی از شکست موج و آشفته‌گی لایه‌های فوقانی امروزه راههای ساده شده دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ هنوز هم در مدل‌سازی ریزش نفت معمول است. اولین و متداول‌ترین مدل برای محاسبه سطح لکه نفتی در سال ۱۹۶۹ از رابطه فی مشتق شده بود که از معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده در لایه استفاده می‌کرد [۲]. با این وجود روش ساده شده فی، پارامترهای اصلی نفت و ستون آب را در بر نداشت. تکالیچ^۴ و چاو^۵ در سال ۲۰۰۱، نتایج مشابهی با استفاده از روش اولری^۶ به دست آوردند [۳]. تکالیچ و چان^۷ در سال ۲۰۰۲ نظریه نیروهای غالب که بر شکل قطره و توزیع قائم تأثیر می‌گذارد را ارائه کرده‌اند که یک مدل حرکتی اختلاط قائم قطره نفت در اثر شکست موج را توسعه می‌دهد [۴]. مدل چند فازه ریزش نفت^۸، به محاسبه پدیده‌های اصلی رفتار نفت در محیط زیست دریاها و به‌ویژه در خلیج سنگاپور پرداخته است [۵]. پریانز^۹ در سال ۲۰۰۷ یک مدل عددی ارائه داده است که در آن از روش تعقیب ذره^{۱۰} استفاده شده است [۶]. از این مدل در تنگه گیبالتار^{۱۱} (حد فاصل اسپانیا و مراکش) برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین یانگ و همکاران^{۱۲} در سال ۲۰۰۸ یک مدل عددی را توسعه داده‌اند که در آن از تکنیک گام تصادفی^{۱۳} به روش اولری-لاگرانژی^{۱۴} استفاده شده است [۷].

در مطالعه حاضر هر دو بخش انتقال و پخش معادلات ناویر استوکس در مدل‌سازی در نظر گرفته شد در حالی که در اکثر مدل‌ها بخش انتقال بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مدل جبهه تر و خشک در نظر گرفته شدند و به این ترتیب پدیده جزر و مد در

⁴ Tkalich

⁵ Chao

⁶ Eulery

⁷ Chan

⁸ Multiphase Oil Spill Model (MOSM)

⁹ Perianez

¹⁰ Particle-Tracking

¹¹ Gibraltar

¹² Wang et al.

¹³ Random Walk Technique

¹⁴ Eulerian Lagrangian

سرعت باد، C_{Chezy} ضریب زبری شزی و C_w ضریب اصطکاک ناشی از باد است.

۳- دینامیک لکه نفتی

هنگامی که مایع نفتی روی سطح دریا ریخته می‌شود، به شکل یک لایه نازک^۵ پخش می‌گردد. حرکت لکه نفتی تابع عوامل انتقال و پخش است که در اثر جریان، امواج و باد به وجود می‌آیند. گسترش لکه نفت روی سطح آب تا زمانی که ترکیب نفت از زمان اولیه نشت تغییر نکند، در اثر توازن بین نیروهای ثقل، لزجت (ویسکوزیته) و کشش سطحی ایجاد می‌شود. قسمت‌های فرار تبخیر می‌شوند، اجزای قابل حل در آب، در ستون آب حل می‌شوند و اجزای غیرقابل حل به شکل قطرات کوچک در ستون آب معلق شده و پراکنده می‌شوند، بخش اعظم مواد نفتی نشت یافته، بر اثر نیروهای جاذبه و کشش سطحی در سطح آبهای آرام دریا پخش می‌شوند. نیروی جاذبه پس از گذشت زمان کوتاهی در مقابل نیروی کشش سطحی قابل چشم‌پوشی بوده و عمل پخش تا زمانی که لزجت بر نیروی پخش فائق آید، ادامه می‌یابد. اثر کشش سطحی در پخش نفت مهم است و به علت اختلاف بین کشش‌های لایه مرزی "نفت - هوا" و "نفت - آب" صورت می‌گیرد. مدل ریزش نفتی چند فازه MOSM، دینامیک نفت را در محیط زیست دریا با استفاده از رابطه ۴ شبیه‌سازی می‌کند. در هر گام زمانی بعد از تلفیق تبخیر و امولسیون نفت، حجم نفت نشت کرده باقیمانده روی سطح آب را می‌توان به دست آورد.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (S \bar{v}) - \bar{\nabla} \cdot (D \bar{\nabla} S) = R_{Sink} \quad (4)$$

که در آن S ضخامت لکه نفتی، $\bar{v} = (u_x + \tau_x / f, u_y + \tau_y / f)$ سرعت رانش لکه نفتی، $\bar{\tau} / f \approx 0.03 \bar{W}$ ، $\bar{W} = (W_x, W_y)$ سرعت باد، $D = g S^2 (\rho - \rho_{oil}) / \rho f$ تابع گسترش لکه نفتی، f ضریب اصطکاک "فیلم نازک نفت - سطح آب"، g شتاب جاذبه، ρ چگالی آب، ρ_{oil} چگالی نفت، $\bar{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ و R_{Sink} کاهش جرم نفت در اثر فرایندهای فیزیکی و شیمیایی است. رابطه بالا حرکت لکه نفتی را تشریح می‌کند و از معادلات ناویر - استوکس میانگین‌گیری شده در ضخامت لکه مشتق شده است. جمله دوم رابطه، رانش افقی لکه را معین می‌کند که وابسته به ترکیب اثرات باد و جریان سطح آب است. جمله سوم رابطه، گسترش لکه در اثر نیروهای لزجت - جاذبه را نشان می‌دهد.

⁵ Oil Slick

قسمت سواحل دیده شد. در این مطالعه دقت مسئله از درجه چهار فرض شد. ماتریس ضرایب به صورت پنج قطری^۱ بود و در حل آن از روش خاصی به نام KPENTA استفاده شد. در موارد مشابه که دقت مسئله از درجه چهار فرض می‌شود، ماتریس به دست آمده از روشهای حذفی حل می‌شود که زمان محاسبات به شدت افزایش می‌دهد.

۲- هیدرو دینامیک جریان

به منظور پیش‌بینی حرکت، گسترش و پخش لکه نفتی و آثار کیفی آن در آب، مدل‌سازی عددی دوبعدی میانگین‌گیری شده در عمق^۲ با استفاده از روش احجام محدود به‌طور ضمنی با جهت متناوب^۳ مورد استفاده قرار گرفت. در آبهای کم عمق، تغییرات قائم کمیتهای جریان بسیار جزئی است، بنابراین می‌توان از معادلات اندازه حرکت و پیوستگی در عمق، متوسط‌گیری نمود. در این شرایط فقط توزیع افقی کمیتهای متوسط‌گیری شده در عمق تعیین می‌شوند [۸]

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (HU)}{\partial t} + \frac{\partial (HU^2)}{\partial x} + \frac{\partial (HUV)}{\partial y} - \Omega HV + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\rho a}{\rho} C_w W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} + \frac{gU}{C_{chezy}^2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (2)$$

$$= v \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(2 \frac{\partial HU}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial (HU)}{\partial y} + \frac{\partial (HV)}{\partial x} \right) \right]$$

$$\frac{\partial (HV)}{\partial t} + \frac{\partial (HUV)}{\partial x} + \frac{\partial (HV^2)}{\partial y} + \Omega HU + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\rho a}{\rho} C_w W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} + \frac{gV}{C_{chezy}^2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (3)$$

$$= v \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(2 \frac{\partial HV}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial (HU)}{\partial y} + \frac{\partial (HV)}{\partial x} \right) \right]$$

که در این روابط U و V سرعت آب میانگین‌گیری شده در عمق در جهت‌های x و y ، η جابجایی سطح آب بالای تراز میانگین دریا، $H = h + \eta$ عمق کلی آب که در آن h عمق آب در زیر تراز سطح آب میانگین می‌باشد، Ω پارامتر کوریولیس^۴، $\Omega = 2\omega \sin \beta$ که ω سرعت زاویه‌ای دورانی زمین و β عرض جغرافیایی است)، g شتاب ثقل، ρ چگالی آب، v لزجت گردابه‌ای افقی، ρa چگالی هوا، W_x و W_y مؤلفه‌های

¹ Penta-Diagonal

² Depth-Average

³ Alternating Direction Implicit

⁴ Coriolis

(۱۲) افزایش لزجت در نتیجه تبخیر: $\mu = \mu_0 \exp(C_\mu F_e)$

$$\frac{d\mu}{dt} = \mu C_\mu \frac{dF_e}{dt} + \frac{2.5\mu}{(1-C_F Y)^2} \frac{dY}{dt} \quad (13)$$

که در این روابط

Y کسر آب در نفت، C_F کل کسر گنجایش آب (۰/۷) نفت خام سنگین و ۰/۲۵ (نفت سبک)، μ_0 لزجت نفت، A_C درصد گنجایش آسفالتین (ماده‌ای سخت مانند زغال سنگ که از تقطیر نفت خام باقی می‌ماند) و C_μ نرخ زمان بازیافت نفت (۱ گازوئیل و ۱۵ نفت خام سنگین) است.

۴- گسسته‌سازی معادلات جریان

در حل معادلات از الگوی ضمنی با جهت متناوب استفاده می‌شود (شکل ۱-الف). به این ترتیب که هر گام زمانی به دو نیم‌گام زمانی تقسیم می‌شود: در نیم‌گام زمانی اول مؤلفه سرعت در جهت محور x و عمق آب η به صورت ضمنی و بقیه متغیرها صریح، و در نیم‌گام زمانی دوم مؤلفه سرعت در جهت محور y و عمق آب η به صورت ضمنی و بقیه متغیرها صریح در نظر گرفته می‌شوند. در نیم‌گام زمانی اول، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهت x و در نیم‌گام زمانی دوم معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهت y با هم حل می‌شوند [۱۱].

انتگرال‌گیری از معادلات پیوستگی و همچنین معادلات اندازه حرکت روی حجم کنترل دو بعدی، با استفاده از قضیه دیورژانس گوس^۳ اعمال شده است [۱۲]

$$\int_{CV} \frac{\partial \eta}{\partial t} dV + \int_{CV} \frac{\partial (HU)}{\partial x} dV + \int_{CV} \frac{\partial (HV)}{\partial y} dV = 0 \quad (14)$$

$$\int_{CV} \text{div } a dV = \int_S \mathbf{n} \cdot a dS \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \eta dV + \int_S \mathbf{n} \cdot (HU) dS + \int_S \mathbf{n} \cdot (HV) dS = 0 \quad (16)$$

شبکه بندی استفاده شده در این مدل شبکه لغزان^۴ سازمان یافته بود. شکل ۱-ب، سرعتها را دقیقاً در مکان‌هایی که نیاز به محاسبات انتقال اسکالر^۵ (جابجایی - نفوذ) دارند، تولید می‌کند. از این رو محاسبه سرعتها نیازی به درون‌یابی در وجه سلول اسکالر ندارند. در این شبکه بندی مقادیر اسکالر شامل ارتفاع سطح آب η ، ضخامت لکه و لزجت گردابه‌ای در مرکز سلول و عمق آب h ، سرعت u و v بر روی دیواره سلول تعریف می‌شوند [۱۳].

³ Gauss Divergence
⁴ Staggered Grid
⁵ Scalar

نخستین و مهم‌ترین تغییر ترکیبی بر روی نفت نشت شده روی آب، تبخیر است که تابعی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نفت، شامل فشار بخار اشباع در دمای مورد نظر، وزن مولکولی مواد نفتی در فاز بخار، سرعت باد، امواج دریا، شدت تشعشع خورشیدی، درجه حرارت آب و ضخامت لکه است. تبخیر آب به شدت به رطوبت هوا و سرعت باد وابسته است. ماکای در سال ۱۹۸۴، رابطه ۵ را برای نرخ تبخیر توسعه داد [۹]

$$F_e = \ln \left[1 + B \left(\frac{T_G}{T} \right) \theta \exp \left(A - B \frac{T_0}{T} \right) \right] \left[\frac{T}{BT_G} \right] \quad (5)$$

$$\theta = \frac{K_2 A_s t}{V_0} \quad (6)$$

$$K_2 = 0.0292 U_{wind}^{0.78} D^{-0.11} S_c^{-0.67} \quad (7)$$

$$\frac{dF_e}{dt} = \frac{K_2 A_s}{V_0} \exp \left(A - \frac{B}{T} (T_0 + T_G F_e) \right) \quad (8)$$

که در این رابطه

F_e نرخ تبخیر، A و B مقادیر $۶/۳$ و $۱۰/۳$ ، T_G گرادیان نقطه جوش، T دمای محیط، T_0 نقطه جوش اولیه در F_e برابر صفر، A_s سطح لکه، V_0 حجم اولیه لکه، K_2 ضریب انتقال جرم (m/s)، U_{wind} سرعت باد (m/s)، D قطر لکه نفتی (m) و S_c عدد اشویت^۱ برابر $۲/۷$ است که نمایانگر زبری سطحی است.

چنانچه دریا به هنگام نشت نفت متلاطم باشد، نفت به ذرات کوچک تقسیم شده و تا اعماق آب پراکنده می‌شود. این ذرات نتیجه تداخل لایه سطحی نفت در دریا بر اثر حرکت امواج و جریان‌های آبی هستند. تشکیل امولسیون نفت در آب، صفات و خصوصیات نفت را به شدت تغییر می‌دهد. قابل توجه است که لزجت معمولاً تا چند برابر افزایش پیدا می‌کند. این افزایش لزجت، مایع نفتی را به یک ماده سنگین و شبه جامد تبدیل می‌کند که خصوصیات غیرنیوتنی از خود نشان می‌دهد. این مواد که به خامه شکلاتی^۲ یخ‌زده موسومند، ممکن است به صورت ذرات جامد مدتها بر روی آب پایدار بمانند. ماکای در سال ۱۹۸۰ رابطه ۹ را برای امولسیون و در نتیجه تغییر در لزجت ارائه کرده است [۱۰]

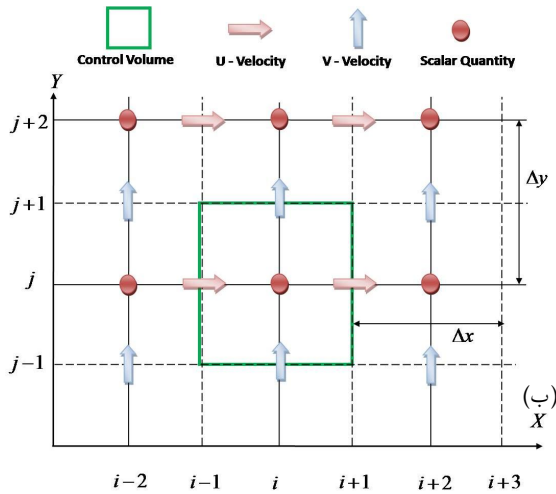
$$\frac{dY}{dt} = 2 \times 10^{-6} (U_{wind} + 1)^2 \left(1 - \frac{Y}{C_F} \right) \quad (9)$$

$$\mu_0 = 224 A_c^{0.5} \quad (10)$$

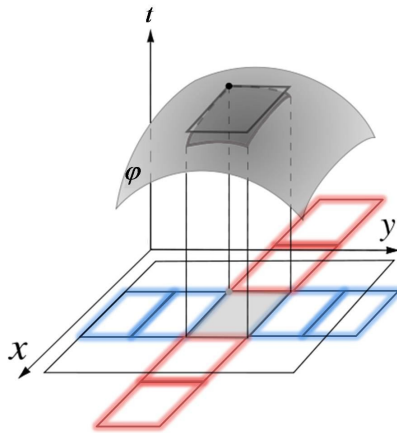
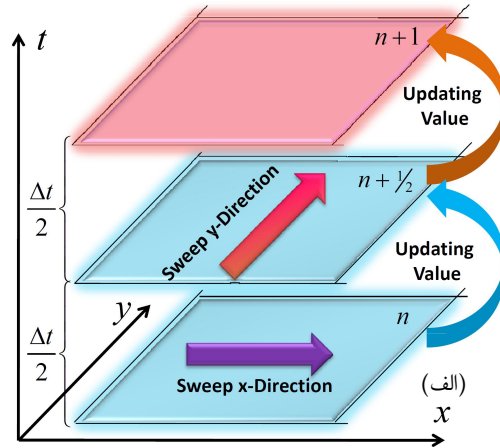
(۱۱) افزایش لزجت در نتیجه امولسیون:

$$\mu = \mu_0 \exp \left(\frac{2.5Y}{1 - C_F Y} \right)$$

¹ Schmidt
² Chocolate Mousse



شکل ۱- گامهای اول و دوم در روش ADI (الف) و شبکه محاسباتی دو بعدی لغزان (ب)



شکل ۲- رویه درجه ۴

۵- حل دستگاه معادلات جریان

در روش حل ضمنی با جهت متناوب، هر گام زمانی به دو نیم گام زمانی تقسیم می شود که در نیم گام زمانی اول هر ردیف از سلول های محاسباتی موازی با محور x تشکیل یک دستگاه معادلات را می دهند. با محاسبه مجهولات مربوط به هر ردیف محاسباتی و جاروب کردن^۲ ردیفهای محاسباتی از پایین به بالا و انجام عملیات تکرار به منظور 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، ستون های محاسباتی در جهت y حل می گردند. معادلات اندازه حرکت و پیوستگی در جهت x برای نیم گام زمانی اول به صورت کوپل به شکل زیر نوشته می شود

بر اساس حجم کنترل تعریف شده، رابطه گسسته شده اندازه حرکت، با تعریف شدت جریان در واحد عرض به شکل $p = uh$ و $q = vh$ در نیم گام زمانی اول به صورت زیر نمایش داده می شود. مقدار صریح \hat{u} ، \hat{v} ، \hat{p} و \hat{q} با استفاده از عملیات تکرار زمانی تصحیح می شوند.

$$\frac{p_{i+1,j}^{n+1/2} - p_{i,j}^n}{\Delta t/2} + \beta \left[\frac{\hat{u}_{i+1,j}^{n+1/2} - \hat{u}_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{v^n \hat{p}_{i+1,j+1} - v^n \hat{p}_{i+1,j-1}}{\Delta y} \right]$$

$$\frac{2\mu^{-n}}{\rho} \left[\frac{(p_{i+3,j}^{n+1/2} - 2p_{i+1,j}^{n+1/2} + p_{i-1,j}^{n+1/2})}{\Delta x^2} + \frac{(q_{i+2,j+1}^n - q_{i,j+1}^n) - (q_{i+2,j-1}^n - q_{i,j-1}^n)}{2\Delta x \Delta y} + \frac{(\hat{p}_{i+1,j+2}^n - 2\hat{p}_{i+1,j+2}^{n+1/2} + \hat{p}_{i+1,j-2}^n)}{2\Delta y^2} \right] = f q_{i+1,j}^n - q_{i+1,j}^n \frac{\eta_{i+2,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} +$$

$$C_w \frac{p_a}{\rho} \sqrt{W \cos \theta} - g p_{i+1,j}^{n+1/2} \frac{\sqrt{(\hat{p}_{i+1,j}^n)^2 + (q_{i+1,j}^n)^2}}{(h_{i+1,j}^{dec2\eta_{i+1,j}})^2}$$

برای محاسبه مقادیر متوسط اسکالر u و v با فرض تغییرات درجه چهار در دو بعد، رویه ϕ مطابق شکل ۲ به صورت رابطه ۱۸ تعریف می گردد. این مقادیر با انتگرال گیری در بازه مورد نظر محاسبه می شوند [۱۴].

$$\phi_{i,j} = a_x x^4 + b_x x^3 + c_x x^2 + d_x x + a_y y^4 + b_y y^3 + c_y y^2 + d_y y + e \quad (19)$$

$$v_{i+1,j+1}^{u>0} = \frac{1}{2\Delta x} \int_{-\Delta x/2}^{3\Delta x/2} (\tilde{v}_{i,j+1})_{@y=0} dx \quad u_{i+1,j+1} > 0$$

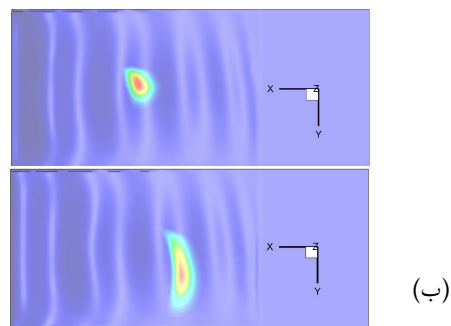
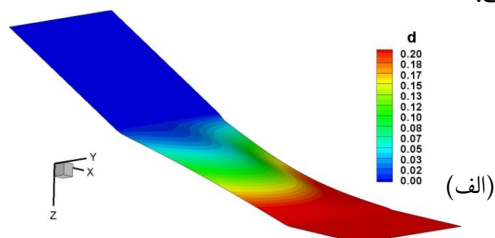
² Sweep

¹ Shape Function

شکل ۴- الف درآمده است. رابطه داسیلوا لیما^۱ برای طراحی کف به کار رفته است.

$$h(x, y) = s[x - 0.875 \sin(\pi x / 3.5) \sin(n\pi y / \lambda)] \quad (22)$$

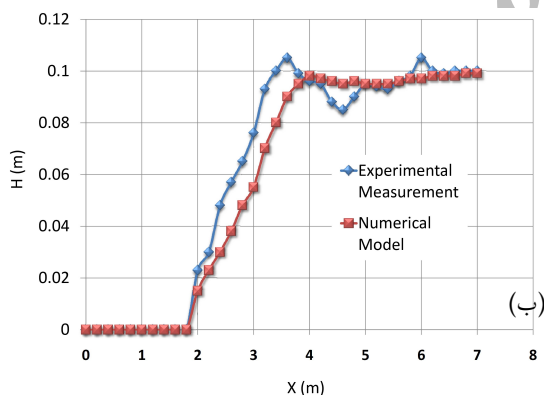
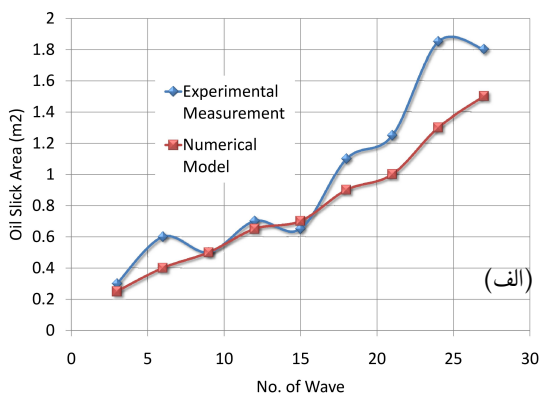
که در آن $s=0.0714$ شیب ساحل و $\lambda=7$ ضریب فاصله شکاف بر حسب متر است. ساحل سینوسی به منظور استحکام توسط ورق آلومینیومی با ضریب زبری 0.37 پوشیده شده است. مطابق شکل ۴- الف، عمیق ترین نقطه در سمت پدال برابر 0.255 متر بود و با حرکت به سمت ساحل، عمق کاهش می یافت. نمونه نفت به کار رفته دارای چگالی معادل 950 کیلوگرم بر متر مکعب بود که برای فرض آنی بودن ریزش، از فاصله 4 سانتی متری در کمتر از 1 ثانیه تخلیه می گردید. لکه نفتی در فاصله 3 متری از ساحل و $1/7$ متری از لبه حوضچه قرار گرفته و سطحی معادل 0.1475 متر مکعب را می پوشاند. موقعیت لکه در زمان های مختلف توسط دوربین ثبت می گردید. بررسی خروجی مدل نفتی به صورت ضخامت لکه نفت و حرکت آن در شکل ۴- ب نشان داده شده است. نتایج به دست آمده توافق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی را نشان داد. با این حال تفاوت هایی در چرخش وجود داشت. این تفاوتها عمدتاً در اثر انعکاس موج^۲ ایجاد می شود که در مدل عددی منظور نشده است.



شکل ۴- عمق آب و خطوط هم تراز (الف) و حرکت چرخشی لکه نفتی (ب)

شکل ۵- الف ارتفاع موج پیش بینی شده در حالت پایدار را به شکل تابعی از فاصله نشان می دهد. ارتباط معقولی بین داده های آزمایشگاهی و پیش بینی عددی وجود دارد، هر چند که شبیه سازی عددی ملایم تر است. در نزدیکی ساحل ارتفاع موج کمتر از مقدار اندازه گیری شده است که اساساً به دلیل انعکاس موج از ساحل آزمایشی است که در اثر آنتی نود، یک موج ایستا به شکل منطقه شکست موج است [۱۹].

شکل ۵- ب رشد سطح لکه نفتی را نشان می دهد. اختلاف کمی در مورد سطح لکه وجود دارد که به دلیل در نظر نگرفتن گسترش در اثر لزجت - کشش سطحی در مدل عددی است و در لکه های کوچک اهمیت خود را نشان می دهد.



شکل ۵- ارتفاع موج در وسط حوضچه (الف) و رشد سطح لکه نفتی (ب)

۸- نتیجه گیری

به منظور مدل سازی جریان و پیش بینی حرکت و گسترش لکه نفتی در تحقیق حاضر، از معادلات دو بعدی میانگین گیری شده در عمق ناویر- استوکس استفاده شد. این معادلات به روش اجسام محدود به طور ضمنی با جهت متناوب حل شدند. برای دستیابی به دقت های

¹ Da Silva- Lima
² Reflection

۹- پیشنهادها

توصیه می‌شود یک مدل آشفتگی میانگین‌گیری شده در عمق $k-\epsilon$ به منظور محاسبه ضریب لزجت گردابه‌ای در معادله اندازه حرکت به کار گرفته شود. این امر به تخمین‌های بهتری برای اختلاط موضعی و پیش‌بینی صحیح‌تر جریان‌های ثانوی در مدل ضمنی منتهی می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود اثر امواج بر یکدیگر توسط روابطی نظیر کوپلند^۱ که بر اساس معادلات شیب ملایم، انعکاس و تفرق^۲ را به خوبی انکسار^۳ مدل می‌کنند، بررسی شود. به علاوه برای دستیابی به دقت‌های بیشتر، گسترش لکه نفتی در فاز لزجت - کشش سطحی نیز در نظر گرفته شود.

بالا تر، مقادیر متوسط اسکالر در هر سلول با فرض تغییرات آن بر اساس تابع شکل یک چندجمله‌ای درجه چهار تخمین زده شد. در حل ماتریس ضرایب دستگاه معادلات حاصله که به صورت پنج قطری بود از روش خاصی به نام KPENTA استفاده شد. با استفاده از این مدل رفتار لکه نفت تحت شرایط کنترل شده نزدیک ساحل در مقیاس کوچک مقایسه شد. اختلاف موجود بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل بیشتر در اثر انعکاس موج در ساحل نفوذ ناپذیر و هموار است که در مدل حاضر شبیه‌سازی نشده. این اختلاف در سواحل شنی و ماسه‌ای که محدودیت جانبی ندارند، کاهش می‌یابد.

¹ Copeland

² Diffraction

³ Refraction

۱۰- مراجع

- 1- ASCE. (1996). *State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills*, American Society of Civil Eng., USA.
- 2- Fay, J.A. (1969). "The spread of oil slick on a calm sea." Hoult, D.P. (Eds.), *Oil on the sea*, Plenum Press, New York.
- 3- Thalich, P., and Chao, X. B. (2001). "Accurate simulation of oil stricks." *Proceeding of the International Oil Spill Conference*, Florida, 26-29.
- 4- Thalich, P., and Chan, E.S. (2002). "Vertical mixing of oil droplets breaking waves." *Marine Pollution Bulletin*, 44 (11), 1219-1229.
- 5- Tkalich, P. (2006). "A CFD solution of oil spill problems." *Elsevier J. Environ. Modeling and Software*, 21, 271-282.
- 6- Perianez, R. (2007). "Chemical and oil spill rapid response modeling in the strait of Gibraltar." *Elsevier Journal*, 207, 210-222.
- 7- Wang, S., and Shen, Y. (2008). "Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas." *Elsevier J. Ocean Eng.*, 35, 503-510.
- 8- Falconer, R. A. (1999). *Divast model reference manual*, User Manual, Cardiff University, Walks, U.K.
- 9- Mackay, D. (1984). "Evaporation rates of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures." *Environ. Sci.*, 18 (11), 834-840.
- 10- Mackay, D. (1980). *Oil spill processes and models*, Environmental Protection Service Pub., Canada.
- 11- Copeland, G. J. M. (1985). "Practical radiation stress calculations in the connected with equations of wave propagation." *Coastal Eng.*, 3, 195-219.
- 12- Hirsch, Ch. (2007). *Numerical computation of internal and external flows*, 2nd Ed., Elsevier, U.K.
- 13- Sarhadi Zadeh, E., and Hejazi, K. (2009). "Development of a high accurate numerical model for oil slicks transport using finite volume method." 2nd *International Symposium on Environmental Engineering (ISOEE)*, KNTU, Tehran, Iran.
- 14- Ferziger, J. H., and Peric, M. (2002). *Computational method for fluid dynamic*, 3rd Ed., Springer Pub., New York.
- 15- Karawia, A.A. (2006). "A computational algorithm for solving periodic penta-diagonal linear systems". *Elsevier J., Applied Mathematics and Computation*, 174, 613-618.
- 16- Hejazi, K. (2004). *3D modeling of flow and turbulence in stratified coastal zones*, Cardiff Uni., Wales, UK.
- 17- Rodi, W. (1984). *Turbulence models and their application in hydraulics*, IAHR Pub., Delft.
- 18- Borthwick, A. G., and Joynes S. (1992). "Laboratory study of oil slick subjected to nearshore circulation." *J. Environmental Eng.*, 118 (6), 905-923.
- 19- Dean, R.G., and Dalrymple, R.A. (1998). *Water wave mechanics for engineers and scientists*, World Scientific, Singapore.