

## شبیه‌سازی عددی آلودگی نفتی بر اساس الگوی بهینه اغتشاشی جریان و تأثیرات باد و جزر و مد

محمدعلی بدری\*

استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا  
کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا

محسن فقیهی فرد

### چکیده

انتقال و پخش لکه نفتی در محیط‌های آبی به دلیل فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی است که خود وابسته به خصوصیات نفت، هیدرودینامیک، هواشناسی و شرایط زیست محیطی است. در این مقاله مدل‌سازی آلودگی نفتی در منطقه عملیاتی انجام شده است. همچنین اثرات کلیه عوامل آب و هوایی از جمله باد و جزرومد در انتشار و پخش لکه نفتی نیز بررسی شده‌اند. مدل استفاده شده یک مدل سه‌بعدی بر اساس روش حجم محدود می‌باشد. همچنین در این مقاله سعی شده است با استفاده از داده‌های بومی، امکان تهیه دستورالعمل کلی جمع‌آوری لکه نفتی با توجه به تغییرات آب و هوایی فراهم گردد. به همین منظور از نرم‌افزار Mike 3، برای تعیین سرنوشت لکه نفتی که شامل تعیین گسترش، انتشار، پخش و نیز میزان تبخیر، امولسیون، حلالیت نفت در آب و ضخامت لکه نفت باقی‌مانده می‌باشد، استفاده شده است. در ابتدا، الگوی جریان با توجه به نوسانات سطحی آب تعیین شده است. نوسانات جزرومدی به عنوان مرز باز با استفاده از تغییرات سطح آب در جزیره هنگام به مدل اعمال شده است و برای رسیدن به نتیجه‌های دقیق‌تر به جای در نظر گرفتن سرعت ثابت باد از داده‌های تجربی سری زمانی باد استفاده شده است. همچنین برای حل معادلات هیدرودینامیکی اغتشاشی از فرمول‌بندی اسمانگورینسکی<sup>۱</sup> که تطابق خوب آن با نتایج تجربی احراز شده، استفاده گردیده است. همچنین نتایج الگوی جریان با داده‌های حاصل از بویه‌ها و جریان‌سنج‌ها در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲ مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: آلودگی نفتی، مدل‌سازی عددی، منطقه عملیاتی، نرم‌افزار Mike.

## Numerical Simulation of Oil Pollution Due to Turbulence Flow Pattern, Wind and Tide Effects

M. A. Badri

Assistant professor, Isfahan University of Technology, Subsea Research & Development Centre

M. Faghihi Fard

M.Sc. student, Isfahan University of Technology, Subsea Research & Development Centre

### Abstract

Advection and dispersion occur because of chemicals, physicals and biological processes that related by properties of oil and other things. In this paper oil pollution simulation was done in Assaluyeh port. The spreading and diffusion of oil pollution was investigated due to wind forces and tide effects as well. The model, MIKE3, as a three dimensional model based on finite volume method was invoked for oil spill fate including spreading, advection, diffusion and determination of evaporation rate, emulsification, oil in water dissolution and total remaining oil. First, the model of water current was determined with respect to water level fluctuations. The main tidal components as an open boundary were applied to the model using initial conditions of water level variations in Hangam Island. Also, due to turbulence hydrodynamic considerations, Smagorinsky formulation was used and verified with experimental results in a fair agreement. Also, flow pattern results compared with buoys and current meters data in 2008 and 2012 years.

**Keywords:** Oil pollution, Numerical Modeling, MIKE software, Assaluyeh Port.

<sup>1</sup> Smagorinsky Formulation

## ۱- مقدمه

در دو دهه‌ی اخیر، تحقیقات درباره‌ی مطالعه روی انتشار و سرنوشت لکه نفتی و بررسی روی مدل‌های گوناگون انتشار آن افزایش یافته است. افزایش تمایل نسبت به مطالعه لکه نفتی و همچنین اهمیت روز افزون این موضوع در زندگی روزمره بشر، باعث توسعه تعداد زیادی از مدل‌های عددی شده است. بر اساس مدل‌های گسترش و پخش آلودگی نفتی، بسیاری از این مدل‌ها بر روی حرکت افقی وسطی لکه نفتی متمرکز شده‌اند. وقتی آلودگی از یک منبع نقطه‌ای به محیطی تخلیه می‌شود، برحسب خصوصیت آن آلاینده، دمای محیط، غلظت سایر مواد درون آب و وزش باد و دیگر عوامل، آلودگی تخلیه شده به محیط شروع به پخش شدن در راستای افقی و عمودی می‌کند، که در سطح به انتشار معروف است [۱]. چائو [۲] مدل دو و سه بعدی سرنوشت لکه نفتی برای آب‌های ساحلی را توسعه داد. همچنین او یک مدل سه بعدی برای گسترش لکه نفتی بر اساس معادلات انتقال جرم به‌دست آورد. فینگاس [۳] مدل عددی جدیدی بر اساس داده‌های تجربی و همچنین دانش فیزیکی تشکیل امولسیون تولید کرد. همچنین فرآیندهای فوتوآکسیداسیون و تجزیه زیستی برای مدلسازی لکه نفتی توسط در مدل وانگ [۴] در نظر گرفته شده است. همچنین گو [۵] با استفاده از حرکت براونی جزئی سرنوشت لکه نفتی را مدل کرد. در تحقیق دیگری نقشه ریسک حاصل از آلودگی نفتی برای پیش‌بینی زمان انتقال لکه نفتی و همچنین تعیین جهت بحرانی باد استفاده شد [۶]. در پژوهش دیگری با استفاده از یک مدل عددی توسعه یافته، سرنوشت لکه نفتی در خلیج فارس و نزدیک ترمینال الاحمدی بررسی شده است. بر اساس نتایج مشخص شده که در صورت اختلاط نیروهای امواج و باد، انتقال لکه نفتی حدود ۹۵ درصد افزایش یافته است. همچنین نسبت تأثیر نیروهای باد، امواج و جریان آب بر روی حرکت لکه نفتی به ترتیب برابر ۸۰، ۱۵ و ۵ درصد گزارش شده است [۷]. در مقاله بیرجیت نیز مدلسازی عددی سه بعدی انتشار ذرات در اثر جریان‌های جزرومدی انجام شد و اثرات نوع شبکه بندی افقی روی چگونگی پخش ذرات بررسی گردیده است [۸]. در مقاله حاضر به منظور در نظر گرفتن کلیه عوامل جوی و همچنین ایجاد امکان تهیه دستورالعمل جمع‌آوری لکه نفتی، استفاده از داده‌های بومی هواشناسی برای جلوگیری از گسترش حادثه احتمالی در سمت سواحل ایران از نرم افزار Mike استفاده شده است. در این پژوهش، مدل هیدرودینامیکی نرم‌افزار Mike بر اساس اعتبارسنجی با نتایج تجربی حاصل از الگوی جریان منطقه عسلویه، کالیبره شده است. همچنین به عنوان یک مثال کاربردی تعیین جهت حرکت لکه نفتی در ترمینال عسلویه، تحلیل شده است. در مدلسازی انجام شده

توسط مایک، جریان‌های جزرومدی بایکارگیری نوسانات سطح آب خلیج فارس بیان شده‌اند. به‌همین منظور متوسط نوسانات سطح آب مرز باز خلیج فارس (تنگه هرمز) برای بازه زمانی ۱۹ روزه از ۲۲ آگوست تا ۹ سپتامبر سال ۲۰۰۸ میلادی در جزیره هنگام به نرم‌افزار اعمال شده است. در ادامه مقاله، بعد از مقدمه در قسمت‌های ۱-۲ و ۲-۲ توضیحاتی درباره مدل آلودگی نفتی در خلیج فارس و همچنین داده‌های ورودی به مدل مایک داده خواهد شد. در بخش ۳-۲ تأثیرات فرآیندهای استهلاک لکه نفتی شامل سه عامل مهم تبخیر، انحلال و امولسیون نفت در آب بیان شده‌اند. در قسمت ۴-۲ فرآیند انتشار و پخش لکه نفتی بررسی می‌شود. در بخش‌های پایانی ۳ و ۴ نیز نتایج مدلسازی و بحث بیان شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدلسازی لکه نفتی

در مدلسازی انجام شده، تنگه هرمز به عنوان مرز باز خلیج فارس در نظر گرفته شده است. به‌همین منظور نوسانات سطح آب جزیره هنگام به‌عنوان نزدیک‌ترین جزیره به این مرز باز انتخاب شده است. پوش شکل خلیج فارس با یک شبکه‌بندی بی‌سازمان صورت پذیرفته است. داده‌های عمق‌سنجی نیز به صورت فایلی به مدل اعمال شده است. علاوه بر آن، شوری آب منطقه به‌طور متوسط برابر ۳۹psu و دمای آب برابر ۲۰°C و دمای هوا ۵۰°C برآورد شده است [۹]. برای حل جریان‌های اغتشاشی فرمول اسمانگورینسکی در مدل هیدرودینامیکی استفاده شده است. همچنین شار حرارتی به عنوان یک ابزار مهم در دریاهایی مانند خلیج فارس که تبخیر و امولسیون نقش مهمی در حرکت و جابجایی آب و نفت بازی می‌کنند، به‌کار گرفته شده است. همچنین به‌منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدلسازی، این نتایج که شامل نوسانات سطح آب منطقه عسلویه و سرعت جریان در این منطقه می‌باشند، با نتایج حاصل از بویه‌ها و شناورهای سطحی مقایسه شده‌اند.

### ۲-۲- مدلسازی بر اساس انتشار و استهلاک لکه

#### نفتی

#### ۲-۲-۱- مدل هیدرودینامیکی

مدل هیدرودینامیکی در نرم‌افزار Mike3 یک سیستم مدلسازی عددی کلی برای جریان سواحل دریایی، بنادر، خلیج‌ها و حوضچه‌ها می‌باشد. این نرم‌افزار جریان‌های سه‌بعدی غیر پایا را براساس تغییرات چگالی، عمق و نیروهای خارجی مثل نیروهای جوی، جزرومدی و جریان مدلسازی می‌کند. در مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی برای جریان سیالات نیوتنی از معادلات پیوستگی جرم، بقای ممنوم، پیوستگی شوری و دما و

۱۹۶۳ به دست آمده است. در فرمول اسماگورینسکی لزجت اغتشاش توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود که براساس اعتبارسنجی با نتایج تجربی انتخاب شد [۱۱].

$$v_T = \ell^2 \sqrt{S_{ij} \cdot S_{ji}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

که در آن  $u_i$  جزء سرعت در جهت  $x_i$ ،  $\ell$  اندازه شبکه است که با  $C_{sm} \Delta s$  جایگزین می‌شود و در آن  $\Delta s$  اندازه شبکه  $C_{sm}$  ثابت فرمول اسماگورینسکی می‌باشد. که دارای دو مقدار یکی در جهت افقی و دیگری در جهت عمودی می‌باشد. مقدار این اعداد برای راستای افقی ۰٫۰۸۸ و برای راستای عمودی ۰٫۱۷۶ در نظر گرفته شده است.

### ۲-۲-۳- مدل تحلیل آلودگی نفتی

مدول تحلیل لکه نفتی مایک از گام‌های تصادفی برای حل معادله فوکر پلانک برای ذره معلق استفاده می‌کند [۱۲]. در این میان فرایندهای فیزیکی و شیمیایی بر حرکت هر ذره اثر خواهند گذاشت. مسیر و جرم رهاشده هر ذره در ستون آب، به صورت تابعی از زمان و نسبت به مرجعی ثابت دنبال شده است. معادله فوکر پلانک برای ذرات نفت معلق توسط روش گسسته‌سازی لاگرانژی حل شده است [۱۳].

در این ماژول فرایندهایی که بر استهلاك لکه نفتی اثر می‌گذارند، بررسی شده است. این فرایندها شامل تبخیر، امولسیون و نفوذ در ستون آب می‌باشند.

### ۲-۳-۱- فرآیندهای استهلاك لکه نفتی

#### ۲-۳-۱- تبخیر

تبخیر باعث انتقال اجزاء سبک‌تر نفت به هوا از طریق سطح می‌شود. بیشترین کاهش جرم لکه نفتی در طول روزهای اولیه ایجاد آلودگی نفتی به تبخیر مربوط می‌شود. تبخیر مهم‌ترین مکانیزم برای حذف لکه نفتی می‌باشد. مقدار نفت تبخیر شده به سرعت باد و دمای باد و نوع نفت بستگی دارد. به‌طور کلی محصولات سبک‌تر مثل بنزین و سوخت جت سریع‌تر از محصولات سنگین‌تر مثل نفت خام تبخیر می‌شوند. در حالی که نفت خام پایداری بیشتری در محیط زیست دارد. میزان تبخیر با استفاده از فرمول مک‌کی به دست آمده است.

$$N_i^e = K_{ei} \cdot p_i^{SAT} / RT \cdot \frac{M_i}{\rho_i} \cdot X_i \left[ m^3 / m^2 s \right] \quad (6)$$

که در آن  $N_i^e$  روند تبخیر،  $K_e$  ضریب انتقال جرمی،  $P^{sat}$  فشار بخار،  $R$  ثابت گاز،  $T$  دما،  $m$  وزن مولکولی،  $X$  کسر مولی،  $\rho$  غلظت کسری از نفت،  $i$  به مشخصات عنصر  $i$  دلالت دارد.

معادله نسبت بین چگالی با شوری، دما و فشار استفاده شده است. بنابراین، معادلات حاکم، در برگرفته‌ی هفت معادله با هفت پارامتر مجهول می‌باشند. پایه ریاضی در Mike 3 معادله پیوستگی جرم، معادلات متوسط‌گیری شده ناوراستوکس در سه بعد می‌باشد. این معادلات اثرات اغتشاش و تغییر چگالی را با معادلات پیوستگی شوری و دما باهم در نظر می‌گیرد.

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = SS \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_T \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) + u_i SS \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (S u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_s \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) + SS \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + SS \quad (4)$$

معادلات (۱) و (۲) معادلات هیدرودینامیکی می‌باشند و معادلات (۳) و (۴) معادلات انتشار هستند و توسط مدول انتشار حل شده‌اند.

در حل مدول هیدرودینامیکی در این مسئله از تکنیک 'ADI برای حل انتگرالی معادلات پیوستگی جرم و ممنتوم در حوزه‌ی زمان و مکان استفاده می‌شود [۱۰]. در نتیجه مدول هیدرودینامیکی دارای این ویژگی‌ها خواهد بود:

- اتلاف ممنتوم و جرم عددی صفر
- ایجاد یک الگوریتم حل شرطی خوب که تامین‌کننده دقت، صحت و عملکرد سریع باشد.

با توجه به مطالب گفته شده مدلسازی در دو بخش هیدرودینامیک و تحلیل آلودگی انجام شده است. به همین جهت منطقه خلیج فارس در نرم‌افزار انتخاب و کل منطقه در راستای صفحه افقی به شبکه‌های ۵۰۰۰ متری و در ابعاد ۱۴۵×۱۶۵ تقسیم‌بندی شده است. تنگه هرمز نیز به عنوان مرز باز در نظر گرفته شده است و سری زمانی سطح آب جزیره هنگام به عنوان نزدیک‌ترین منطقه به تنگه هرمز در بازه زمانی مورد مطالعه به مدل هیدرودینامیکی اعمال گردیده است. همچنین برای عدم وابستگی نتایج به شبکه‌بندی فاصله زمانی ده ثانیه برای بازه‌ها انتخاب شده است.

### ۲-۲-۲- مدل اغتشاشی

فرمول اسماگورینسکی معروف‌ترین مدل برای لزجت اغتشاش زیر شبکه است که توسط اسماگورینسکی در سال

<sup>1</sup> Alternating direction implicit technique.

### ۲-۳-۲-۲- امولسیون

امولسیون فرآیند شکل‌گیری ذرات نفت در آب می‌باشد، که باعث تغییرات در خصوصیات و رفتار نفت می‌شود. تشکیل امولسیون آب و نفت، یکی از مهم‌ترین فرآیندهایی است که منجر به ماندگاری نفت در سطح آب می‌شود. نفوذ قطرات آب در نفت باعث تبدیل نفت به یک مخلوط خیلی لزج می‌شود. چنین امولسیونی می‌تواند محتوی بیش از ۸۰ درصد آب باشد. سهولت شکل‌گیری و پایداری به نوع نفت و شرایط محیطی بستگی دارد.

همچنین مکانیزم امولسیون هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. اما می‌توان چنین انتظاری را داشت که در شرایط آرام و بدون در نظر گرفتن اثر باد و در غیاب باد، فرآیند تشکیل امولسیون خیلی کم و قابل اغماض است. بعلاوه قابلیت شکل‌گیری امولسیون به شرایط آب و خواص شیمیایی نفت نیز بستگی دارد. در مدلسازی انجام شده میزان نفوذ نفت در آب توسط رابطه زیر به دست آمده است:

$$\frac{dy_w}{dt} = R_1 - R_2 \quad (7)$$

که در آن  $R_1$  روند جذب آب است و با افزایش دما و سرعت باد افزایش می‌یابد و  $R_2$  روند آزادسازی آب است که با افزایش درصد مولی آسفالتین‌ها، موم و سورفاکتانت‌ها در نفت و افزایش لزجت نفت، کاهش می‌یابد.

$$R_1 = K_1 \frac{(1 + U_w)^2}{\mu_{oil}} (y_w^{max} - y_w) \quad (7-f)$$

$$R_2 = K_2 \frac{1}{As.Wax.\mu_{oil}} .y_w$$

در این رابطه:  $U_w$  سرعت باد،  $\mu_{oil}$  لزجت نفت،  $y_w^{max}$  بیشترین گنجایش آب ورودی،  $y_w$  گنجایش واقعی آب،  $K_1$  ضریب تخمینی،  $As$  گنجایش آسفالتین‌ها در نفت،  $Wax$  گنجایش موم در نفت (wt%)،  $K_2$  ضریب تخمینی است. ثابت‌های امولسیون‌سازی  $K_1$  و  $K_2$  به صورت زیر تخمین زده شده‌اند.

$$K_1 = 5.10^{-7} [kg/m^3]$$

$$K_2 = 1,2.10^{-5} [kg(wt\%)/s] \quad (7-b)$$

ضرایب  $K_1$  و  $K_2$  از طریق داده‌های آزمایشگاهی از یک لکه نفتی کنترل شده درهالتن بانکن [۱۴] به دست آمده‌اند.

### ۲-۳-۳- حلالیت

میزان انحلال نفت در آب در مقایسه با فرآیندهای دیگر ناچیز است، ولی برای افزایش دقت نتایج، این مقدار به دست آمده است. بنابراین مقدار ضخامتی از نفت که بر اثر حلالیت سطح لکه را ترک می‌کند، محاسبه شده است. با فرض اینکه

غلظت واقعی هیدروکربن‌ها در مقایسه با میزان و قابلیت حل شدن آنها جزئی باشد روند حلالیت از طریق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dV_{dsi}}{dt} = K_{si} C_i^{sat} X_{mol} \frac{M_i}{\rho_i} A_{oil} \quad (8)$$

که در آن،  $X_{mol}$  کسر مولی جزء  $i$ ،  $C_i^{sat}$  قابلیت حل شدن جزء  $i$ ،  $M_i$  وزن مولی جزء  $i$ ،  $\rho_i$  چگالی جزء  $i$ ،  $A_{oil}$  سطح لکه نفتی بر حسب متر مربع و ضریب انتقال جرمی برابر  $K_{si} = 2.36.10^{-6} ei$  است.

### ۲-۴- فرآیندهای انتشار و پخش افقی

انبساط افقی لکه نفتی تحت تأثیر نیروهای مکانیکی مانند گرانش، اینرسی، لزجت و پخش توربولانسی، پدیده انتشار نامیده می‌شود. در طول فرآیند انتشار، شکل و جهت حرکت لکه نفتی به عواملی چون باد، جریانات سطحی و نیروی امواج بستگی خواهد داشت. نفوذ لکه نفتی در ستون آب توسط مکانیزم‌های متفاوتی صورت می‌گیرد که مهم‌ترین آن‌ها پدیده تبخیر سطحی و پخش عمودی است. در طول هفته اول استهلاک لکه نفتی، تمایل نفت به پخش عمودی یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین سرنوشت آلودگی خواهد بود. پخش عمودی باعث کاهش حجم لکه نفت در روی سطح و میزان تبخیر می‌شود. حرکت هر نقطه به علت باد و موج و جریانات جزرو مدی محاسبه شده است. سرعت انتشار یا سرعت حرکت کلی،  $U$  برای هر نقطه با رابطه زیر محاسبه شده است.

$$\vec{U} = K_t \vec{U}_{tide} + K_w(z) . (\vec{U}_{wind} + \vec{U}_{wave}) \quad (9)$$

$\vec{U}_{wind}$  و  $\vec{U}_{wave}$  سرعت‌های باد و موج هستند.  $(\vec{U}_{wind} + \vec{U}_{wave})$  بر اساس سرعت باد در ۱۰ متری بالای سطح آب محاسبه می‌شوند. بنابراین سرعت کلی از طریق رابطه زیر به دست آمده است.

$$\vec{U} = K_t \vec{U}_{tide} + K_w(z) . \vec{U}_{wind-10m} \quad (10)$$

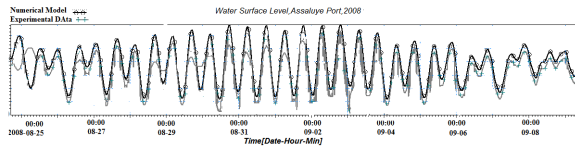
که در آن  $\vec{U}_{tide}$  سرعت انتگرالی عمقی جریان،  $K_t$  عامل جریان افقی آب و برای خلیج فارس ۱٫۰ در نظر گرفته شده است.  $K_w(z)$  توسط رابطه زیر به دست آمده است.

$$K_w(z) = K_w^* (1 - \frac{3z}{h}) . (1 - \frac{z}{h}) , \quad 0 \leq z \leq h \quad (11)$$

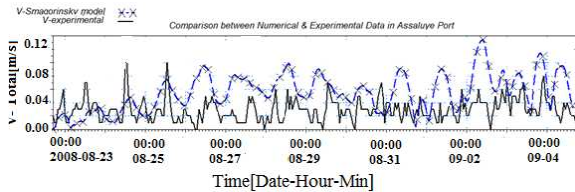
که در آن  $h$  عمق آب،  $z$  محور عمودی است که از سطح آب سنجیده می‌شود و  $K_w^*$  برابر مقدار ۰٫۰۲۶ در نظر گرفته شده است.

### ۳- نتایج

در مدلسازی انجام شده خلیج فارس با یک مرز باز به نام تنگه هرمز انتخاب گردیده است. همچنین نتایج به دو قسمت تقسیم شده‌اند. بخش اول نشان‌دهنده نتایج هیدرودینامیکی



شکل ۴- نتایج حاصل از مدلسازی و داده‌های تجربی نوسانات سطح آب عسلویه



شکل ۵- سرعت جریان حاصل از مدلسازی در مقایسه با داده‌های تجربی

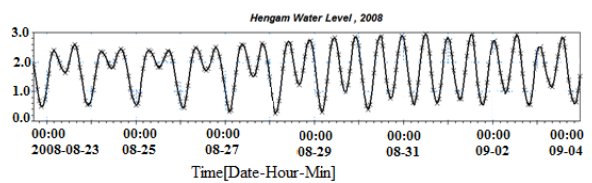
در بخش تحلیل آلودگی نفتی، میزان حلالیت، تبخیر، امولسیون و مقدار نفت باقیمانده در اثر تغییرات باد و جزرومد مقایسه شده‌اند.

### ۳-۱- تأثیر عامل باد

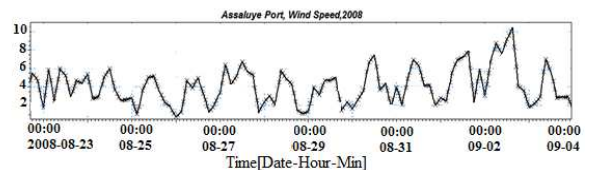
نیروی باد مهم‌ترین عامل در تغییرات فیزیکی و شیمیایی لکه نفتی می‌باشد. به منظور بررسی تأثیرات باد بر روی فرآیندهای نفتی، دو طرح، یکی براساس اعمال سرعت و جهت باد و دیگری بدون وزش باد، به مدل اعمال شده است. بر اساس شکل ۶، میزان تبخیر نفت در اثر اعمال باد، به طور محسوسی در روزهای اول افزایش یافته است. همچنین بر اساس شکل تبخیر بعد از روز اول به مقدار ثابتی رسیده است. داده‌های حاصل از مدلسازی نشان داده است که در اثر اعمال نیروی باد، تبخیر به میزان ۹۲ درصد افزایش یافته است. در شکل ۷ نیز روند تناوبی امولسیون نفت در آب را نشان می‌دهد، این روند تناوبی نیز ناپایداری امولسیون نفت در آب را به خوبی نشان می‌دهد. علاوه بر این افزایش ۶۹ درصدی میزان امولسیون در اثر وزش باد به خوبی مشهود است. در شکل ۸ منحنی میزان حلالیت نفت در آب نشان داده شده است. طبق منحنی، بر خلاف دو فرآیند بالا، حلالیت نفت در آب کاهش ۱۷ درصدی را نشان می‌دهد. از آنجا که در کل میزان حلالیت نفت در آب کم است، باد نیز نتوانسته است تغییر چندانی بر میزان انحلال پذیری بگذارد. علاوه بر این میزان نفت باقیمانده نیز به دلیل افزایش میزان تبخیر و امولسیون نفت در اثر وزش باد، کاهش در حدود ۳۰ درصد داشته است (شکل ۹).

می‌باشد که شامل سرعت سطح آب و نوسانات سطح آب منطقه عسلویه می‌شود. در قسمت دوم نیز اثرات جزرومد و باد بر روی گسترش و پخش لکه نفتی بررسی گردیده است. در مدلسازی انجام شده منطقه عسلویه از آن جهت مورد بررسی قرار گرفته است که یکی از مهم‌ترین مناطق در تولید، ذخیره‌سازی و جابجایی نفت می‌باشد و احتمال آلودگی در این منطقه بیشتر است.

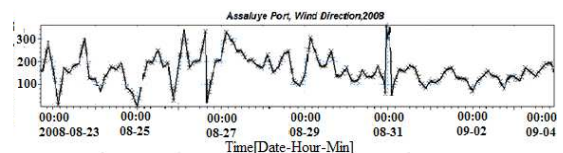
در بخش هیدرودینامیک، نوسانات سطح آب نزدیک‌ترین مکان به تنگه هرمز که جزیره هنگام می‌باشد (شکل ۱) و همچنین سرعت و جهت باد منطقه عسلویه به مدل به عنوان شرایط مرزی اعمال شده است (شکل ۲ و ۳).



شکل ۱- نوسانات سطح آب جزیره هنگام



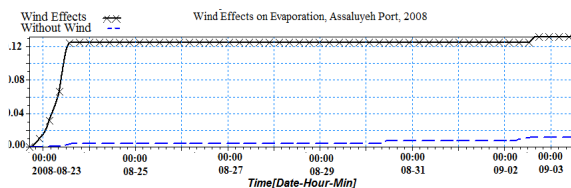
شکل ۲- سرعت باد در منطقه عسلویه



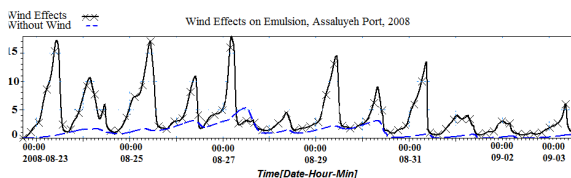
شکل ۳- جهت باد در منطقه عسلویه

در کار حاضر، معادلات هیدرودینامیکی توسط شبکه حجم محدود بی‌سازمان به وسیله نرم‌افزار Mike3 حل شده‌اند. به همین منظور نتایج مدل مورد نظر با داده‌های تجربی مقایسه شده است. برای نیل به این هدف، مدل هیدرودینامیکی شامل نوسانات سطح آب منطقه عسلویه و سرعت جریان منطقه با نتایج حاصل از بویه‌ها و جریان‌سنج‌ها اقتباس شده از سازمان بنادر و دریا نوردی کشور، مقایسه شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

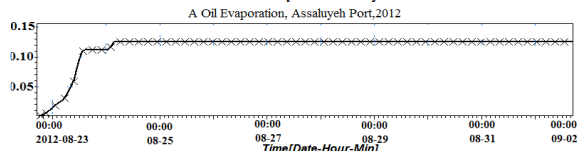
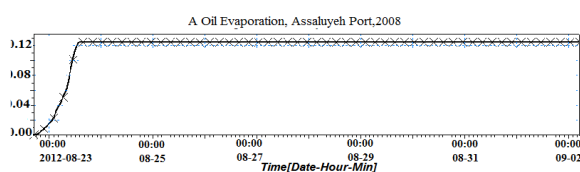
همچنین برای پاسخگویی به این مهم کلیه فرآیندهای اضمحلال و استهلاک لکه نفتی در طی این آلودگی بررسی شده‌اند. در شکل ۱۱ میزان تبخیر لکه نفتی در طی این دو سال با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بر طبق نتایج عددی مقدار عددی تبخیر حدود ۸ درصد افزایش را نشان می‌دهد. همچنین میزان امولسیون نفت در آب در حدود ۳۶ درصد افزایش یافته است (شکل ۱۲). دلیل افزایش میزان امولسیون را می‌توان در افزایش نسبی نوسانات سطح آب دنبال کرد که موجب اختلاط بیشتر نفت و آب و تشکیل امولسیون پایدار را می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج عددی و شکل ۱۳ حلالیت نفت در آب تغییر چندانی نکرده است و قابل چشم‌پوشی است.



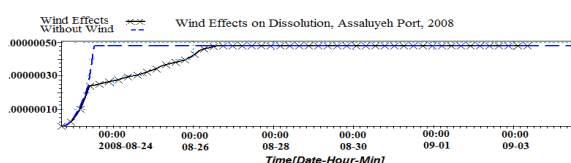
شکل ۶- اثر وزش باد بر روی میزان تبخیر نفت در منطقه عسلویه



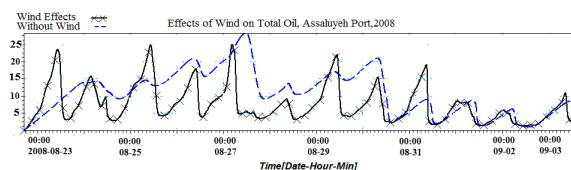
شکل ۷- اثر وزش باد بر روی میزان امولسیون نفت در منطقه عسلویه



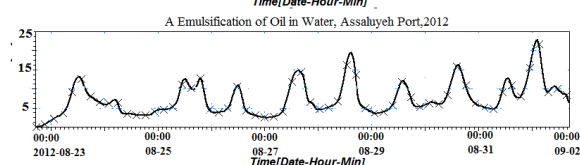
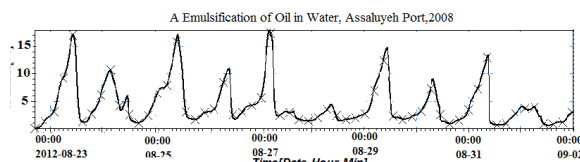
شکل ۱۱-تأثیر نیروی جزرومد بر میزان تبخیر در ایستگاه عسلویه



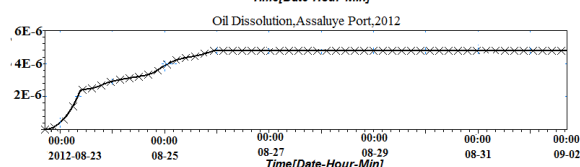
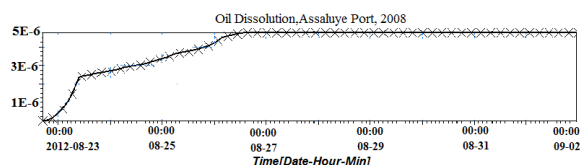
شکل ۸- اثر وزش باد بر روی میزان حلالیت نفت در منطقه عسلویه



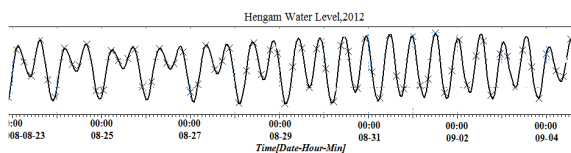
شکل ۹- اثر وزش باد بر روی میزان نفت باقیمانده در منطقه عسلویه



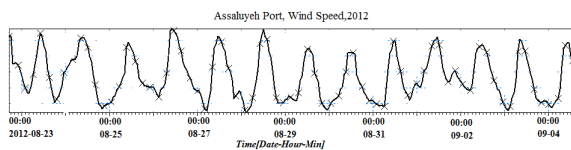
شکل ۱۲- تأثیر نیروی جزرومد بر میزان امولسیون نفت در آب در ایستگاه عسلویه



شکل ۱۳- تأثیر نیروی جزرومد بر میزان حلالیت نفت در آب در ایستگاه عسلویه



(الف)



(ب)

شکل ۱۰الف- نوسانات سطح آب جزیره هنگام پ. سرعت باد منطقه. سال ۲۰۱۲ میلادی عسلویه

بر طبق شکل ۱۵ رشد لکه نفتی در سمت جنوب عسلویه روی داده است. هر چند که به دلیل بسته بودن منطقه و به تله افتادن لکه نفتی در خلیج نایبند گسترش آلودگی کم خواهد بود، ولی به دلیل غلظت بالای نفت باقیمانده در خلیج نایبند، هزینه پاکسازی افزایش می‌یابد و حیات وحش بیشتر در معرض خطر قرار گرفته است. عوامل متعددی در نوع گسترش آلودگی در این دو سال نقش دارند که می‌توان به تغییرات نوسانات سطح آب، سرعت و جهت باد اشاره کرد.

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله شبیه‌سازی سه‌بعدی سرنوشت لکه نفتی در خلیج فارس انجام شده است. مطالعات نشان داده است که شبیه‌سازی صورت گرفته برای پیش‌بینی حرکت لکه نفتی مناسب می‌باشد. در ابتدا با حل معادلات هیدرودینامیکی اغتشاشی، میدان سرعت و نوسانات سطح آب منطقه‌ها توجه به تطابق خوب حاصل شده با فرمول اسماکورینسکی و با داده‌های تجربی، به تعیین الگوی جریان خلیج فارس منجر شده است. سپس با استفاده از میدان سرعت و فشار منته‌جه از مدل و روش گام‌های تصادفی و معادلات فوکر پلانک، تأثیر پارامترهای مختلف جوی از جمله باد و جزرومد بر این فرآیندها بررسی شده است. نتایج نشان داده‌اند که سطح منطقه آلوده شده در پایان بازه زمانی در سال ۲۰۰۸ حدود ۶۲ کیلومتر مربع می‌باشد که منجر به آلودگی بنادر سیراف و قسمتی از بندر کنگان شده است. در سال ۲۰۱۲ نیز رشد لکه در سمت جنوب عسلویه بوده است که حاکی از آلوده شدن خلیج نایبند در ۳۰ کیلومتری عسلویه می‌باشد.

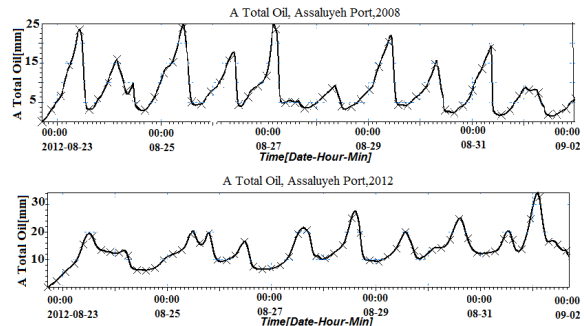
#### فهرست علائم

سرعت صوت در آب	$c_s$
ثابت تجربی	$C_D$
ضرایب انتشار	$D_s, D_T$
انرژی جنبشی اغتشاشی	$k$
فشار	$p$
شوری	$S$
جملات چاه و چشمه	$SS$
دما	$T$
زمان	$t$
سرعت در جهت محور افقی	$u_i$
نوسانات جریان متلاطم	$w', v', u'$

#### علائم یونانی

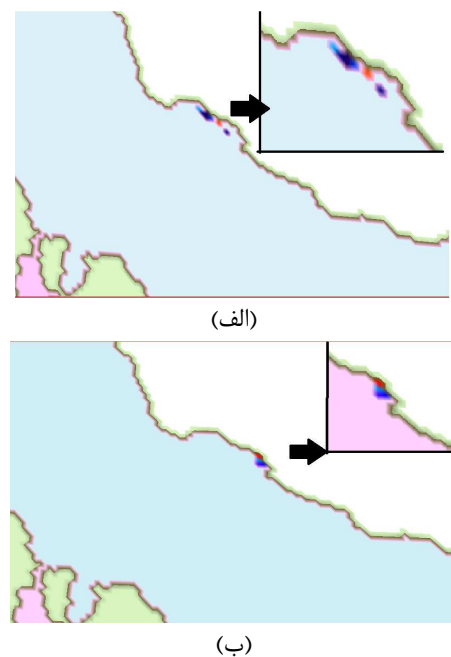
ضریب انبساط حجمی	$\beta$
------------------	---------

همچنین میزان نفت باقیمانده در سطح آب نیز در سال ۲۰۱۲ افزایش ۳۳ درصدی را در مقایسه با سال ۲۰۰۸ نشان می‌دهد، افزایش نفت باقیمانده نیز به خاطر افزایش میزان امولسیون و میزان افزایش محدود تبخیر می‌باشد. (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- تأثیر نیروی جزرومد بر میزان نفت باقیمانده در ایستگاه عسلویه

همچنین در پایان بازه مدلسازی سرنوشت لکه نفتی به دست آمده است (شکل ۱۵). طبق شکل لکه نفتی به سمت غرب حرکت کرده و در کنار ساحل گسترش یافته است. همچنین بر اساس طول و عرض جغرافیایی سطح آلوده شده منطقه در حدود ۶۲ کیلومتر مربع می‌باشد. نقشه جغرافیایی نشان داده است که آلودگی زیست محیطی ناشی از نفت به نزدیکی بندر کنگان رسیده است و حتی کل منطقه بندر سیراف نیز آلوده شده است. اما آنچه در سال ۲۰۱۲ روی داده است متفاوت است.



شکل ۱۵- چگونگی گسترش لکه نفتی. (الف). سال ۲۰۰۸ (ب). سال ۲۰۱۲

- [13] MIKE3 Spill Model, Spill Analysis Module, User Guide, pp. 60-62, 2012.
- [14] IKU - Institut for kontinentalsokkelundersøgelser, "The experimental Oil Spill in Haltenbanken 1982", IKU Publication no. 112, 1984.

دلتای کرونگر	$\delta_{ij}$
لزجت اغتشاشی	$\nu_T$
چگالی سیال	$\rho$
کمیت اسکالر شناوری	$\phi$
تانسور کوریولیس	$\Omega_{ij}$

## مراجع

[۱]. مهر مطلق، م، "مدل‌سازی دوبعدی انتقال و پخش آلودگی با روش تفاضلات محدود به صورت صریح در محیط دریا"، دومین همایش سواحل و بنادر و سازه‌های دریایی، تهران ۲۹ آبان ۹۱

[2] Chao X., Jothi Shankar N., Cheony H.F., "two and three dimensional oil spill model for coasted waters" ocean engineering, pp.1557-1573, 2001.

[3] Fingas M., Fieldhouse, B., "Formation of water-in-oil emulsions and application to oil spill modeling", Journal of Hazardous Materials 107, pp. 37-50, 2004.

[4] Shou-Dong Wang, Young -Ming Shen, Ya-kun Guo, JanTang. "Three dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas", OceanEngineering, pp. 508-510, 2008.

[5] Guo W.J., Wang Y.X., Xie M.X., Cui Y.J., "Modeling oil spill trajectory in coastal waters based on fractional Brownian motion ". Marine Pollution Bulletin, pp.1339-1346, 2009.

[6] Elshorbagy W., Abu-Bakr Elhakeem, "Risk assessment maps of oil spill for major desalination plants in the United Arab Emirates". Desalination(Elsevier), pp. 200-216, 2008.

[7] Soltanpour M., Wijayaantna N., "Numerical modeling of oil slick spread in the Persian gulf", International journal of maritime technology, vol.1, no.1, pp.57-66, 2013.

[8] Kjøsslyng, B., Berntsen, J., "Numerical studies of Dispersion due to tidal flow through Moskstraumen, northern Norway". Ocean Dynamics, pp.907-920, 2010.

[9] Hassanzadeh S., Hosseini F., and Rezaei-Latifi, A., "Numerical modelling of salinity variations due to wind and thermohaline forcing in the Persian Gulf", Applied Mathematical Modelling 35, pp.1512-1537, 2011.

[10] MIKE3 hydrodynamic model, HD scientific Documentation, User Guide, pp. 13-30, 2012.

[۱۱] فقیهی فرد، محسن، بدری، محمدعلی، "حساسیت‌سنجی مدل‌های اغتشاشی به منظور تعیین الگوی بهینه جریان در آب‌های خلیج فارس"، پانزدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه هرمزگان، آذر ۹۲.

[12] Rolf Deigaard and Erik Asp Hansen, "Simulation of turbulent diffusion of suspended sediment by a random walk model", DTU, Dec. 1994.