



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل وهفت، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۶۵ تا ۱۷۴  
Vol. 47, No. 1, Summer 2015, pp. 165-174



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## شبیه سازی عددی مدل آلودگی نفتی در سواحل شمال غربی خلیج فارس

رضا غیائی<sup>۱\*</sup>، جمشید زهره حیدریها<sup>۲</sup>، امین محمودی مقدم<sup>۳</sup>

۱- عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی عمران پردیس فنی، دانشگاه تهران، ایران  
۲- کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران پردیس فنی، دانشگاه تهران، ایران  
۳- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت ۱۳۸۹/۵/۳، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۵)

### چکیده

در مقاله حاضر نتایج مدل‌سازی توزیع آلودگی نفتی در ناحیه شمال غربی خلیج فارس در نزدیکی چاه الاحمدی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور مدل دو بعدی توزیع آلودگی نفتی در آب دریا تهیه شده است که جهت افزایش دقت آن در تخمین جملات انتقال از روش بالادست مرتبه سوم همراه با محدودکننده GH استفاده شده است. در این مدل نفتی در دو لایه لکه سطحی و امولسیون مغروق مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل بر اساس اطلاعات هیدرودینامیک و سرعت جریان آب، باد، تبخیر، امولسیون و جذب ساحل، توزیع و حرکت لکه آلودگی را پیش‌بینی می‌نماید. در مطالعه موردی در ساحل خلیج فارس از اطلاعات ماهانه بادهای ماه‌های مختلف در خلیج فارس جهت پیش‌بینی طولانی مدت لکه آلودگی استفاده شده است. با مقایسه نتایج مدل آلودگی نفتی با داده‌های اندازه‌گیری شده آلودگی نفتی خلیج فارس، دقت بالای مدل عددی و شیوه مدل‌سازی انجام شده، اثبات گردیده است.

### کلمات کلیدی

آلودگی نفتی دریا، خلیج فارس، محدودکننده GH، پخش لکه نفتی.

\* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: rgghiassi@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

اساس حیات موجودات زنده، آب است. اقیانوس‌ها و آب‌های کره خاکی ۷۱ درصد از سطح زمین را با عمق متوسط ۸/۳ کیلومتر پوشانده‌اند. آبزیان بخش عمده حیات زنده روی کره زمین را تشکیل می‌دهند. حجم کل آب‌های موجود در اقیانوس-ها، دریاها و رودخانه‌ها حدود ۱/۳ بیلیون کیلومتر مکعب می‌باشد و ۲۴ درصد از جرم زمین را تشکیل می‌دهد [۱].

امروزه بیش از هر زمان دیگری دریاها به طرق و صور مختلف در معرض تحمیلات زیان‌بار و سوءاستفاده بشری قرار گرفته‌اند. در این رابطه مهمترین آلودگی‌های دریایی، آلودگی‌های نفتی است که منشأ آن ممکن است نزولات جوی، تراوشات طبیعی، بهره‌برداری از منابع نفتی فلات قاره، حمل و نقل دریایی و بالأخره تأسیسات ساحلی از قبیل پالایشگاه‌ها، ترمینال‌های تخلیه و بارگیری و فاضلاب‌های صنعتی و شهری باشد. لذا تعیین الگوی توزیع و پخش آلودگی از نظر مسائل زیست‌محیطی و همچنین در مدیریت بحران حائز اهمیت است.

تعداد تصادفاتی که منجر به ایجاد لکه‌های نفتی در دریا می‌شود در حال افزایش است. حمل نفت، اکتشافات و ذخایر نفتی همگی از پتانسیل ایجاد لکه‌های نفتی می‌باشند. از سال ۱۹۸۸ تا سال ۱۹۹۱، ۲۸ حادثه که منجر به ایجاد آلودگی نفتی ۵۰۰/۰۰۰ لیتر یا بیشتر شده است، اتفاق افتاده است. کل حجم آلودگی‌های نفتی مهم بجز آلودگی نفتی خلیج فارس تا آن زمان ۲۹۳ میلیون لیتر می‌باشد. آلودگی نفتی در جنگ خلیج فارس در سال ۱۹۹۱ حدود ۱۴۳ بیلیون لیتر برآورد شده است [۲].

آمار نسبتاً کاملی توسط آکادمی ملی علوم دریایی آمریکا از کلیه حوادث و آلودگی‌های نفتی با حجم بیش از ۱۰ میلیون گالن (۳۷۸۵۴ متر مکعب) تهیه شده است [۳].

خلیج فارس به عنوان دریایی نیمه بسته دارای اکوسیستم منحصر به فردی در میان حوضه‌های آبی جهان است و محور حمل و نقل جهانی نفت محسوب می‌شود. خلیج فارس یک محیط بسته است که هر تغییری در آن به کل خلیج فارس برمی‌گردد و تنها شدت و ضعف آن متفاوت است.

فی (۱۹۶۹ و ۱۹۷۱) و استولزن باخ (۱۹۷۷) فرمول‌های پخش نفت را با فرض حجم ثابت نفت در محیط ایده‌آل شده و در دریای آرام ارائه کردند [۲]. ایوت (۱۹۸۶) با در نظر گرفتن انتشار ناشی از برش شامل برش جانبی و برش عمودی گسترش لکه نفت در جهت باد و امواج را شبیه‌سازی نمود. وبر (۱۹۸۳) و چنکینز (۱۹۸۶) مدل‌هایی را که از پیچیدگی‌ها و دقت زیادی برخوردار بودند برای بررسی حرکت لکه نفتی در آب‌های عمیق با در نظر گرفتن اثرات باد، جریان و موج و اندرکنش آن‌ها با

یکدیگر در لایه سطحی آب توسعه دادند. یوسف و اسپالدینگ (۱۹۹۳) مدل عددی دیگری که اثر موج ناشی از باد را در نظر می‌گیرد گسترش داده اند [۴].

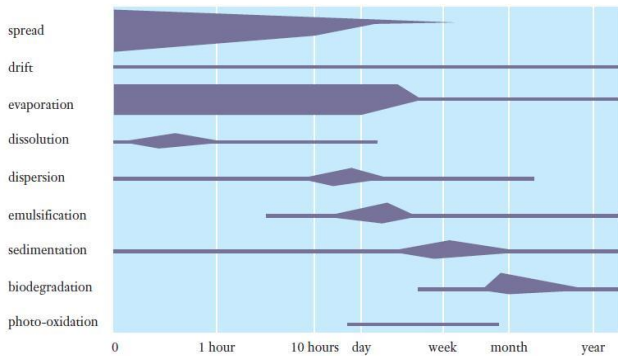
مدل‌های کامپیوتری آلودگی نفتی معمولاً از فرمول‌های ریاضی یا الگوریتم‌هایی جهت پیش بینی حرکت لکه نفت و از بین رفتن آن استفاده می‌کنند که در مقاله‌های مختلفی از جمله مقالات استولزن باخ (۱۹۷۷)، هانگ موناستر (۱۹۸۲)، اسپالدینگ (۱۹۸۸)، لی (۱۹۹۰) و اسپالدینگ (۱۹۹۵) بدان اشاره شده است [۲].

با افزایش اهمیت و میزان حوادث آلودگی نفتی در سال‌های اخیر، تحقیقات در این زمینه گسترده‌تر شده است. هوم و همکاران (۲۰۰۳) تحقیقات اخیر در خصوص تجزیه مواد نفتی توسط عوامل میکروبیولوژیک را جمع‌آوری نمودند [۵]. ویندرل و همکاران (۲۰۰۸) میزان تأثیر عوامل کاهش‌دهنده بی‌هوازی و عوامل مختلف کاهش‌دهنده اکسیداسیون میکروبی را در میزان تغییر توده نفت سنگین مورد بررسی قرار دادند [۶]. اوون و همکاران (۲۰۰۸) میزان پایداری و تغییر مشخصات نفت به تله افتاده در لابه‌لای ماسه‌های ساحلی را مورد بررسی قرار دادند [۷]. غیائی و همکاران (۱۳۹۰) وضعیت توسعه آلودگی ناشی از حادثه سکوی نفتی Deep Horizon در خلیج مکزیک را به صورت کیفی ارزیابی و بررسی کردند [۸]. ماریانو و همکاران (۲۰۱۱) نیز با کاربرد مدل‌های پیش‌بینی، سرنوشت دو لکه نفتی کوچک در مجموعه آلودگی حاصله از حادثه سکوی نفتی در خلیج مکزیک را مورد ارزیابی قرار دادند [۹].

مقاله حاضر حاوی نکات تکمیل شده بر روی روش آقای تیکالیچ (۲۰۰۱) می‌باشد. در این روش حرکت لایه نفتی در دو لایه مورد بحث قرار می‌گیرد. برای لایه سطحی ضخامت لایه نفت از روی معادله دیفرانسیل خاصی محاسبه می‌گردد. لایه زیرین در واقع نماینده غلظت و تمرکز قطرات نفتی در ستون آب می‌باشد. حرکت و از بین رفتن لکه نفتی در آب تحت تأثیر شرایط فیزیکی، شیمیایی می‌باشد که همگی به شرایط هیدرودینامیک، خواص هیدروکربن آلاینده و شرایط محیطی بستگی دارند [۱۰].

## ۲- آلودگی نفتی و عوامل موثر بر آن

مدل‌های نفتی معمولاً از فرمول‌های ریاضی یا الگوریتم‌ها جهت پیش‌بینی حرکت لکه نفت و از بین رفتن آن استفاده می‌کنند که در مقاله‌های مختلفی از جمله مقالات استولزن باخ (۱۹۷۷)، هانگ موناستر (۱۹۸۲)، اسپالدینگ (۱۹۸۸)، لی (۱۹۹۰) و اسپالدینگ (۱۹۹۵) بدان اشاره شده است [۲]. مطابق شمای شکل ۱ مراحل اولیه حرکت آلاینده نفتی



شکل (۲): اهمیت عوامل مختلف بر روی آلودگی نفتی در اثر گذشت زمان [۱۳]

### ۱-۲- تبخیر

تبخیر بیشترین عامل کاهش حجم آلودگی‌های نفتی می‌باشد (مخصوصاً در مراحل اولیه حرکت لکه نفتی). آقای مک کی (۱۹۸۰) نشان داد که درصدی از حجم نفت که تبخیر می‌شود را می‌توان با فرمول (۱) تخمین زد [۱۴]، [۱۵].

$$F = \left(\frac{1}{C}\right) \left[ \ln P_0 + \ln \left( CK_E \cdot t + \frac{1}{P_0} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن  $T_E$  درجه حرارت هوا بر حسب درجه کلونین و  $T_0$  نقطه جوش اولیه بر حسب درجه کلونین می‌باشد. مشخصات فیزیکی انواع نفت در جدول ۱ دیده می‌شود.

مک کی (۱۹۸۰) نشان داد که TEC برای یک نوع نفت ثابت می‌باشد. مقادیر C در KTE، ۲۸۳ درجه کلونین و نقطه جوش اولیه  $T_0$  به صورت جدولی توسط آقای مک کی ارائه شده است. [۱۵] با توجه به این مقادیر آقای شین (۱۹۸۹) رابطه زیر را برای نفت خام استخراج نمود:

$$C = 1158.9 \times API^{-1.1435} \quad (2)$$

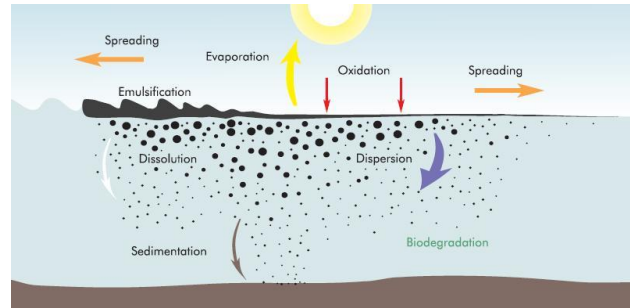
$$T_0 = 542.6 - 30.275 \times API + 1.565 \times API^2 - 0.03439 \times API^3 + 0.0002604 \times API^4$$

اندیس API و وزن مخصوص نفت نیز به صورت زیر با هم رابطه دارند.

$$\text{وزن مخصوص} = \frac{141.5}{(API + 131.5)} \quad (3)$$

حجم مولی نفت را که در رابطه (۱) مورد احتیاج است، می‌توان از وزن مولکولی نفت محاسبه نمود. مقدار عددی حجم مولی می‌تواند بین  $150 \times 10^{-6}$  تا  $600 \times 10^{-6}$  متر مکعب بر مول بسته به ترکیب نفت تغییر کند. برای سوخت‌ها این مقدار تقریباً برابر  $200 \times 10^{-6}$  متر مکعب بر مول می‌باشد [۱۴].

شامل پخش، تبخیر، معلق شدن هیدروکربن در ذرات گاز، پراکندگی، امولسیون شدن ذرات نفت، اندرکنش نفت- ساحل و نفت- یخ و رسوب کردن ذرات نفت می‌باشد. مراحل بعدی شامل فتواکسیداسیون و تجزیه بیوشیمیایی می‌باشد [۲].



شکل (۱): شمای تأثیر عوامل مختلف بر روی آلودگی نفتی در اثر گذشت زمان [۱۱]

تا به حال برخوردهای متفاوتی با آلاینده‌های نفتی در محیط آبی وجود داشته است. در یکی از این دیدگاه‌ها آلودگی نفتی به صورت ذرات و قطرات ریزی فرض می‌شود که در آب غوطه‌ورند. دیدگاه دیگر بر این اساس است که آلودگی به صورت لکه یکنواختی می‌باشد که دائماً از ضخامت آن کسر شده و بر وسعت آن افزوده می‌شود. در این تحقیق دیدگاه اخیر که توسط آقای تیکالیچ در سال ۱۹۹۹ بسط و گسترش یافته است، مورد استفاده قرار گرفته است [۲].

پدیده‌هایی که در حرکت آلاینده‌های نفتی مؤثرند عبارت‌اند از: انتقال، انتشار، پخش مکانیکی، تبخیر، انحلال، امولسیون شدن، فتواکسیداسیون، اثرات باد، اثرات جریان، موج و فساد بیولوژیکی. وقتی که نفت روی سطح آب می‌ریزد تحت تأثیر نیروهای جاذبه، اینرسی، ویسکوزیته و نیروهای کشش سطحی پخش می‌گردد درحالی‌که تغییرات جرم آلاینده بیشتر تحت تأثیر هوازگی می‌باشد. تغییر زمانی عوامل طبیعی بر لکه نفتی در شکل ۲ دیده می‌شود.

علاوه بر مسائل فوق واکنش‌های فتوشیمیایی و تجزیه‌های بیولوژیکی می‌توانند مقدار نفت را (در مدت زمان طولانی) کاهش دهند. معادلات حاکم بر مدل‌های دو بعدی یا مدل‌های سه بعدی در مقالات مختلفی ذکر شده است. از آن جمله می‌توان به مقالات الیوت (۱۹۸۹)، رید و همکاران (۱۹۹۱) و یاپا (۱۹۹۴) اشاره نمود [۱۲].

North Slope Crude Oil	۰.۸۹	۱۷.۵ تا ۳۵	-	۴۵۰	-
San Ardo(CA) Crude Oil	۰.۹۹	۵ تا ۱۷.۵	-	۵۹۰	۸۰
Residual Asphalt	-	۱۰.>	۷۵۲<	۱۶۰۰	-

## ۲-۲- امولسیون

امولسیون شدن در واقع مخلوط شدن آب در نفت می‌باشد؛ که معمولاً به عنوان «موس شکلات» یا «موس» در میان محققان معروف است. امولسیون شدن تأثیر به‌سزایی در خواص نفت دارد. امولسیون‌های پایدار حاوی ۵۰٪ تا ۸۰٪ آب می‌باشند که این مسئله منجر به افزایش حجم لکه نفتی بین ۲ تا ۵ برابر حجم اولیه می‌شود. وزن مخصوص این امولسیون‌ها ممکن است حتی به ۱/۰۳ نیز برسد (در مقایسه با عدد اولیه که حدوداً ۰/۸ می‌باشد) [۲].

یکی از مکانیزم‌های شکل‌گیری امولسیون این است که آبی که توسط حباب‌های هوا محبوس شده است به سمت بالا شروع به حرکت می‌کند تا از فاز آب وارد نفت شود. مسیر حرکت توسط شکست موج ایجاد می‌شود [۲۰]. نرخ امولسیون شدن با توان اول زمان ارتباط دارد. به طور کلی، تحقیقاتی در مورد امولسیون شدن انجام گرفته، اما هنوز برای درک صحیحی از آن به تحقیقات بیشتری نیاز است [۲].

نرخ امولسیون شدن نفت-آب توسط فرمول زیر شبیه‌سازی شده است

$$\frac{dY_w}{dt} = k_A (1 + U_s)^2 (1 - Y_w / Y_w^f) \quad (4)$$

$Y_w^f$  آب نهایی موجود (معمولاً ۰/۸)،  $Y_w$  آب موجود در لکه نفتی،  $U_s$  ۳/۵ درصد سرعت باد (جهت در نظر گرفتن اثر باد سطحی و اثر موج)،  $K_A$  ضریب ثابت جهت تطابق با منحنی (برابر ۶-۱۰ × ۵/۴) می‌باشد [۲۱].

جدول (۱): مقایسه مشخصات نفت‌های مختلف. آدائل (۱۹۷۷) [۱۶]. گیلیان (۱۹۹۳) [۱۷]. ای پی آی (۱۹۹۰) [۱۸] و مارکاریان و همکاران (۱۹۹۳) [۱۹]

Product	Specific Gravity	API Gravity	Boiling Point (°F)	Relative Persistence	Pour Point (°F)
Gasoline	۰.۷۳ تا ۰.۷۴	۶۲ تا ۹۹	۱۰۴ تا ۳۰۲	۱	-
Jet Fuel (JP-4)	۰.۷۵ تا ۰.۸۰	۴۴.۳ تا ۵۶.۷	۲۰۲ تا ۵۱۸	-۲	-
Kerasene	۰.۸ تا ۰.۸۸	۲۹ تا ۴۳	۳۹۲ تا ۵۷۲	-	۰
Fuel Oil No. 2 (Diesel)	۰.۸۸	۲۹	۹۳ تا ۳۶۵	۸	۲۰
Lube Oil (Crankcase)	۰.۸۷	۲۹	۷۱۰ تا ۸۲۲	۵۵	-۳۵
Kuwait Light Crude Oil	۰.۸۳	۳۷.۸	-	۳۲۰	-۵۰
Fuel Oil No. 6 (Bunker)	۰.۹۶ تا ۰.۹۷	۱۰ تا ۱۷.۵	۶۱۵ تا ۸۲۶	۴۰۰	۶۰

## ۳-۲- پراکندگی و مخلوط شدن

پراکندگی آلودگی نفت سطحی در واقع جدا شدن نفت به صورت قطرات کوچک و پخش و انتشار آن در ستون آب می‌باشد. از عوامل مهم در بررسی قطرات پایدار و ناپایدار آلودگی نفتی اندازه قطرات، نیروی غوطه‌وری آن‌ها و حرکت آشفته آن‌ها در آب است (قطرات و ذرات ناپایدار به سطح آب باز می‌گردند) [۲].

باد، موج و شکست امواج از عوامل موثر در ایجاد پدیده پراکندگی هستند (اثر باد و موج در لایه سطحی نفت بیشتر است). پراکندگی نیز مانند تبخیر و انحلال از عواملی می‌باشد که نفت را از لایه سطحی جدا می‌کند. البته پراکندگی به تنهایی عاملی نیست که نفت را به اجزا و ذرات کوچکتر تقسیم کند و حجم و جرم نفت را تغییر دهد ولی می‌توان اظهار نمود نفتی که در ستون آب پراکنده می‌گردد، نیز تحت تأثیر پدیده‌های انحلال و تبخیر تجزیه بیولوژیکی قرار می‌گیرد [۲].

الیوت (۱۹۹۲) روشی برای پراکندگی ذرات پیشنهاد کرد. در این روش پراکندگی با استفاده از روش منت کارلو مدل شده است بدین ترتیب که هر ذره به صورت تصادفی هم در جهت افقی و هم در جهت عمودی ممکن است پراکنده شود. پراکندگی افقی  $D_h$  و عمودی  $D_v$  با استفاده از روابط (۵) و (۶) بیان می‌شوند:

$$D_h = RAN(12K_h \Delta t) \quad (5)$$

$$D_v = (2RAN - 1)(6K_v \Delta t)^{1/2} \quad (6)$$

که در آن RAN عدد تصادفی بین صفر و ۱ می‌باشد و  $K_h$  و  $K_v$  به ترتیب ضرایب پخش افقی و عمودی می‌باشند،  $\Delta t$  گام زمانی محاسباتی و  $D_h$  و  $D_v$  میزان پراکنش یا فواصل نوسان حرکت ذره در جهت‌های افقی و عمودی می‌باشد [۲۲].

## ۴-۲- تجمع آلودگی در منطقه ساحلی

بعضی مواقع آلودگی نفتی به خط ساحلی می‌رسد. گراندلاک و هیز در سال ۱۹۷۸ روشی را جهت دسته‌بندی انواع ساحل‌ها بر اساس درجه آسیب‌پذیری ارائه نمود که در آن ضریبی جهت در نظر گرفتن شرایط محیطی استفاده می‌گردد. برای انواع ساحل‌ها آقای تورگریسم سون (مقاله چاپ نشده ۱۹۸۰) روش نیمه عمر را برای قابلیت ساحل در نگهداری آلودگی تشریح

مختلف مقادیر  $SO$  و  $a$  را انتشار داده‌اند [۲۲].

جدول (۲): مقادیر نیمه عمر و ضریب آسیب پذیری انواع ساحل (تورگریسم سون ۱۹۸۰)، [۱۱]، [۲۳]

نوع خط کناره	نیمه عمر	ضریب آسیب‌پذیری
صخره‌های تحت تأثیر موج و بالاتر از آب	۱ ساعت	۱
سکوه‌های موج شکن فرسایشی	۱ ساعت	۲
کناره‌های شنی	۱ روز	۳
ساحل ماسه‌ای	۱ روز	۴
ساحل ماسه‌ای و شنی	۱ روز	۵
ساحل قلوه سنگ و ماسه‌ای	۱ سال	۶
جلگه‌های تحت تأثیر جزر و مد	۱ ساعت	۷
ساحل حفاظت شده با سنگ	۱ سال	۸
ساحل حفاظت شده در مقابل جزر و مد	۱ سال	۹
لجن‌زارهای حفاظت‌شده	۱ سال	۱۰
زمین معمولی	۱ سال	۰

#### ۲-۶- انتقال در دریای آزاد

انتقال در سطح آب در نتیجه اثر توأم باد و جریان بوده و نقش به‌سزایی در حرکت لکه نفتی ایفا می‌نماید. سرعت انتقال لکه نفتی معمولاً به صورت جمع برداری انتقال ناشی از باد و انتقال ناشی از جریان بیان می‌شود (استولزن باخ ۱۹۷۷). سرعت انتقال شامل اثر توأم باد و جریان می‌باشد که به صورت ذیل بیان می‌گردد (هالت ۱۹۷۲):

$$\vec{V} = a_w \vec{V}_w + a_c \vec{V}_c \quad (11)$$

که در آن  $\vec{V}_w$  سرعت باد در ۱۰ متری سطح دریا و  $\vec{V}_c$  سرعت متوسط جریان در عمق و  $a_w$  ضریبی که اثر باد بر انتقال لکه سطحی را اعمال می‌کند و  $a_c$  ضریبی که اثر انتقال جریان بر لکه سطحی اعمال می‌کند.

بر اساس گزارشات سرعت جریان‌های سطحی ناشی از باد بین ۱٪ تا ۶٪ سرعت باد می‌باشد. لذا عدد ۰.۳٪ به عنوان ضریب اثر باد در مدل‌های نفتی بیشتر استفاده شده است (استولزن باخ ۱۹۷۷).

با فرض پروفیل لگاریتمی برای سرعت، رابطه سرعت سطحی جریان را می‌توان با سرعت متوسط در عمق به صورت زیر بیان نمود

$$\frac{Vs}{V_c} = 1 + \frac{u^*}{kV_c} \quad (12)$$

که در آن  $Vs$  سرعت سطحی،  $u^*$  سرعت برشی و  $k$  ثابت فون کارمن (۰/۴) می‌باشد. نسبت  $Vs/V_c$  بر اساس شرایط محیطی محاسبه می‌گردد و تغییرات آن بین ۱/۱ تا ۱/۲ می‌باشد

نمود. در واقع پارامتر نیمه عمر قابلیت نگهداری آلودگی را پس از استقرار آلودگی بر ساحل عنوان می‌کند. جدول ۲ مقادیر نیمه عمر را برای انواع مختلف ساحل و همچنین ضریب آسیب‌پذیری آن را، بیان می‌کند.

بر اساس روش نیمه عمر حجم نفتی که در ساحل باقی می‌ماند را می‌توان به حجم کل آلودگی اولیه با فرمول زیر مرتبط ساخت:

$$V_2 = V_1 e^{-k(t_2 - t_1)} \quad (7)$$

که در آن  $V_1$  و  $V_2$  حجم‌های نفت روی ساحل در زمان‌های  $t_1$  و  $t_2$  می‌باشد. همچنین ضریب  $k$  ثابت تجزیه می‌باشد که از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$K = \left[ \frac{Ln2}{\lambda} \right] \quad (8)$$

که  $\lambda$  مقدار نیمه عمر که در جدول ۲ ارائه شده است [۱۱].

#### ۲-۵- انحلال

در یک محلول پایدار نفت و آب، نفت به دو شکل وارد آب می‌شود، یک قسمت از آن در آب حل می‌شود و قسمت دیگر وارد آب می‌گردد و در داخل آب محبوس و نگهداری می‌شود. آن قسمت از آب که در رابطه با انحلال واقعی می‌باشد  $WSF$  و آن بخشی که ذرات و یا قطرات نفت را در خود نگهداری می‌کند  $WAF$  نام دارد [۲].

انحلال واقعی در واقع مخلوط شدن مولکول‌های نفت با فاز آب می‌باشد. قسمت نگهداره آب یا  $WAF$  شامل ذرات و قطرات پایدار نفت است. در این قسمت انحلال واقعی ( $WSF$ ) مورد بحث می‌باشد.

انحلال از لحاظ بیولوژیکی مسئله مهمی است، هر چند که قسمت کمی از حجم نفت در آب حل می‌شود. در اینجا روش کهن (۱۹۸۰) را به صورت خلاصه بیان می‌کنیم. در این روش کل نرخ انحلال از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$N = KA_p S \quad (9)$$

که در آن  $N$  کل نرخ انحلال لکه نفتی بر حسب گرم بر ساعت،  $K$  ضریب انتقال جرم بر حسب متر بر ساعت،  $AS$  مساحت لکه نفتی و  $S$  حلالیت نفت در آب. انحلال نفت در آب به علت مسئله هوازگی به شدت کاهش می‌یابد. مونسرتروهانگ (۱۹۸۲) پیشنهاد کردند که برای یک نوع مشخص انحلال از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$S = S_0 e^{-at} \quad (10)$$

که در آن  $SO$  انحلال نفت تازه و  $a$  ثابت تجزیه و  $t$  زمان بر حسب ساعت می‌باشد. لو و پلاک (۱۹۷۳) برای سه نوع نفت

که در اکثر مدل‌ها از عدد ۱/۱ استفاده شده است. [۱۱]

### ۳- بررسی معادله دیفرانسیل حاکم

جهت ارتباط پدیده‌های مشاهده شده با تئوری، اخیراً (۱۹۹۹ تا ۲۰۰۰) مدل چندفاز لکه‌های نفتی (MOSM) توسط آقای تیکالیچ عنوان شده است. تفاوت این مدل با مدل‌های ارائه شده دیگر، استفاده از پارامترهای مربوط به خواص فیزیکی مرتبط می‌باشد که باعث می‌شود مدل در شرایط مختلف و شرایط محیطی مختلف قابل اعمال باشد. این مدل در حالت کلی پدیده‌های مؤثر در آلودگی‌های نفتی شامل تبخیر، پخش آلودگی، پدیده امولسیون شدن، انحلال و غلظت نفت در ستون آب را در نظر می‌گیرد.

در روش MOSM جهت مدل نمودن لایه نفتی پخش و حرکت آن از معادله ناویر-استوکس که در عمق متوسط‌گیری شده، (استولزن باخ ۱۹۷۷ و وارلوزل و بنرکو ۱۹۸۱) استفاده گردیده است. این معادله در شکل برداری به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (h(\bar{u}_s + \bar{\tau} / f)) - \bar{\nabla} E_s \bar{\nabla} h = R_h \quad (13)$$

که  $h$  ضخامت لایه نفتی  $\bar{u}_s(x, y) = (u_s^x, u_s^y)$  سرعت

جریان در لایه اختلاط آب،  $\tau = (\tau^x, \tau^y) \approx 0.03f \times \bar{w}$  تنش برشی ناشی از باد،  $f$  ضریب اصطکاک آب-نفت،

ضریب انتشار دارد،  $E_s = g\rho_0 \varepsilon h^2 / f$  ضریبی که عملکردی شبیه به عملکرد ضریب انتشار دارد،  $\varepsilon = (\rho - \rho_0) / \rho$  دانسیته نسبی،

دانسیته آب،  $\rho_0$  دانسیته نفت،  $g$  شتاب جاذبه و عملگر گرادیان.

در این روش برای اینکه پدیده‌های مختلف محیطی که باعث تغییرات در میزان غلظت نفت می‌شوند، (از جمله پراکندگی و تبخیر) در نظر گرفته شود از روابطی که پدیده‌های فیزیکی-شیمیایی را مدل می‌نمایند (جمله Rh) استفاده شده است (تیکالیچ ۲۰۰۰) [۲۴].

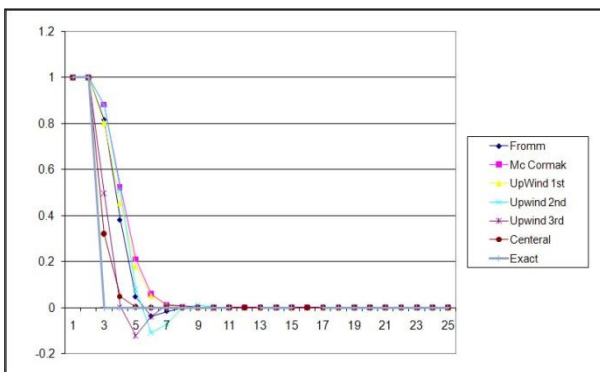
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (h(\bar{u}_s + \bar{\tau} / f)) - \bar{\nabla} E_s \bar{\nabla} h = R_h \quad (14)$$

که در آن  $C_{max} = h_0 \rho_0 / Z_m$  حداکثر غلظت قطرات،  $h_0$  ارتفاع اولیه لکه نفتی در واحد سطح  $A$  و  $C_{min}$  غلظت قطرات کوچک که به علت کوچکی نمی‌توانند به سطح بیابند (نیروهای شناوری کوچکی دارند) و نیروی روبه پایین بیشتری دارند.  $\delta_1$  نرخ پراکندگی به خاطر شکست موج (که تبعاعی از سرعت باد و ارتفاع موج می‌باشد) و  $b_s$  نرخ تبخیر.

### ۴- انتخاب شیوه مناسب منقطع سازی عبارت انتقال

روش‌های مختلفی جهت منقطع‌سازی و حل معادله دیفرانسیل حاکم وجود دارد که انتخاب بهترین روش مستلزم مقایسه نتایج روش‌های مختلف می‌باشد. از این رو نتایج حاصل در قالب نمودار شکل ۳ آورده شده است. در این شکل روش‌های مختلف به ازای آلودگی یکسان با هم مقایسه شده‌اند.

در نمودار ۳ روش تفاضل مرکزی نیز از دقت خوبی برخوردار است ولی در پایین‌دست دچار نوسانات شدیدی می‌شود. سایر روش‌ها کم و بیش یکسان هستند و تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. ولی آنچه که حائز اهمیت می‌باشد شیوه بالادست مرتبه اول 1st Order Upwind بوده که به سبب مرتبه اول بودن دقت آن دارای هیچ‌گونه خطای پخشی نمی‌باشد.



شکل (۳): مقایسه نتایج روش‌های مختلف منقطع سازی

همان‌گونه که در شکل نیز دیده می‌شود با افزایش مرتبه، دقت نیز به طور کاملاً مشهودی بالا می‌رود ولی این امر نیازمند محاسبات پیچیده‌تری می‌باشد. از آنجایی که هدف این تحقیق دقت بالا در انجام محاسبات می‌باشد، از شیوه بالادست مرتبه سوم 3rd Order Upwind که از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های ذکر شده برخوردار می‌باشد، استفاده گردیده است.

مشکل این روش و روش‌های مراتب ۲ به بالا در این است که دارای خطای پخش می‌باشند. به عنوان نمونه در شکل فوق نیز به وضوح می‌توان دریافت که شیوه بالادست مرتبه سوم دارای خطا در پایین‌دست جریان می‌باشد.

### ۵- محدودکننده GH و نحوه عملکرد آن

جهت از بین بردن خطای حاصل از تغییرات ناگهانی پارامترها در شیوه‌های مختلف منقطع‌سازی می‌توان از توابعی به نام محدودکننده (Limiters) استفاده نمود. محدودکننده‌ها همان‌گونه که از نامشان پیداست برای محدود کردن خطای نوسانات ناشی از روش منقطع‌سازی و نیز از بین بردن و یا کم کردن نوسانات حاصله از تغییرات ناگهانی (مانند شوک) بکار

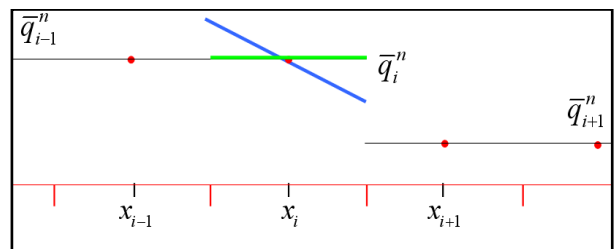
گرفته می‌شوند. محدودکننده جدید GH (مخفف Ghiassi-Heydariha) که توسط دو نفر از نگارندگان مقاله پیشنهاد و استفاده شده است طبق روابط زیر تعریف می‌شود:

$$q(i) = \begin{cases} q(i-1) + a\Delta x & \text{if } |a| < |b| \text{ and } ab > 0 \\ q(i+1) + b\Delta x & \text{if } |b| < |a| \text{ and } ab > 0 \\ q(i-1) & \text{if } |a| < |b| \text{ and } ab < 0 \\ q(i+1) & \text{if } |b| < |a| \text{ and } ab < 0 \\ q(i-1) & \text{if } ab = 0 \end{cases} \quad (15)$$

که در آن  $q(i)$  مقدار کمیت مورد محاسبه  $q$  در نقطه  $i$  و  $a$  و  $b$  به ترتیب دو شیب بالادست و پایین دست نقطه مورد نظر می‌باشند که از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$a = \frac{(\bar{q}_i^n - \bar{q}_{i-1}^n)}{\Delta x}, \quad b = \frac{(\bar{q}_{i+1}^n - \bar{q}_i^n)}{\Delta x} \quad (16)$$

به این ترتیب مقدار شیب کم نشده و درعین حال نقاط اکسترمم هم مقادیر واقعی خود را خواهند داشت. شیب‌های بالادست و پایین دست در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): نمایش شیب بالادست (سبز) و پایین دست (آبی)

## ۶- مدل توزیع آلودگی نفتی

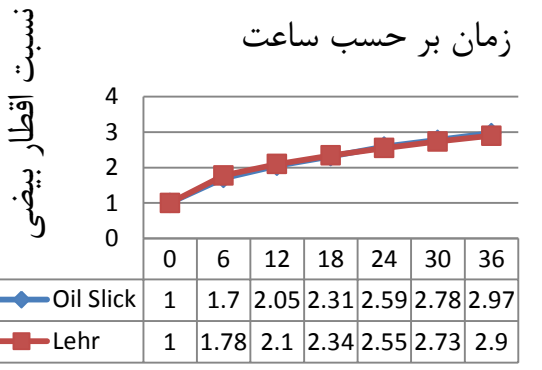
بر اساس مطالب گفته شده، برنامه OilSlick تهیه گردیده و به صورت یکی از ماژول‌های نرم افزار CECAD-MAR اجرا می‌شود. این ماژول داده‌های هیدرودینامیک را از نرم افزار مذکور خوانده و مدل سازی توزیع آلودگی نفتی را انجام می‌دهد. با توجه به مشاهدات تجربی لهر (۱۹۸۴) پیشنهاد کرد که در صورت وزیدن باد در میدان، لکه نفتی به صورت بیضی با مشخصات زیر پخش گردد [۲۵]، [۲۶].

$$A_e = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times R_{\max} \cdot R_{\min} \quad (17) \text{ مساحت بیضی}$$

$$R_{\min} = 1.7[(\rho - \rho_0)/\rho]^{1/3} V^{1/3} t^{1/4} \quad (18) \text{ طول قطر کوچک}$$

$$R_{\max} = R_{\min} + 0.03 U_{wind}^{4/3} t^{3/4} \quad (19) \text{ طول قطر بزرگ}$$

در فرمول‌های فوق حجم نفت ریخته شده بر حسب بشکه



شکل (۵): مقایسه نتایج مدل و نتایج فرمول لهر

## ۷- توزیع آلودگی در خلیج فارس

### ۷-۱- مدل هیدرودینامیکی

جهت مدل سازی جریان از ماژول هیدرودینامیک نرم افزار CECAD استفاده گردید. این مدل سازی در دو حالت انجام شده است: (الف) مدل عمومی برای کل خلیج فارس که در پژوهش‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفته است و صحت نتایج آن کنترل شده بود. (ب) مدل اختصاصی برای محدوده غرب خلیج فارس که برای این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه لکه نفتی از چاه الاحمدی در ساحل کویت شروع به پخش شدن می‌کند، مدل سازی هیدرودینامیک منطقه غرب خلیج فارس با شبکه بندی ریزتر توجه داشته است. جهت مدل سازی این محدوده از نتایج مدل عمومی خلیج استفاده گردید. نمونه‌ای از نتایج مدل سازی هیدرودینامیک در محدوده شمال غرب خلیج فارس در شکل ۶ ارائه گردیده است.



این مدل نیز به این مقایسه افزوده شده است.

جدول (۳): سرعت موثر بادهای ماهانه خلیج فارس [۲۷]

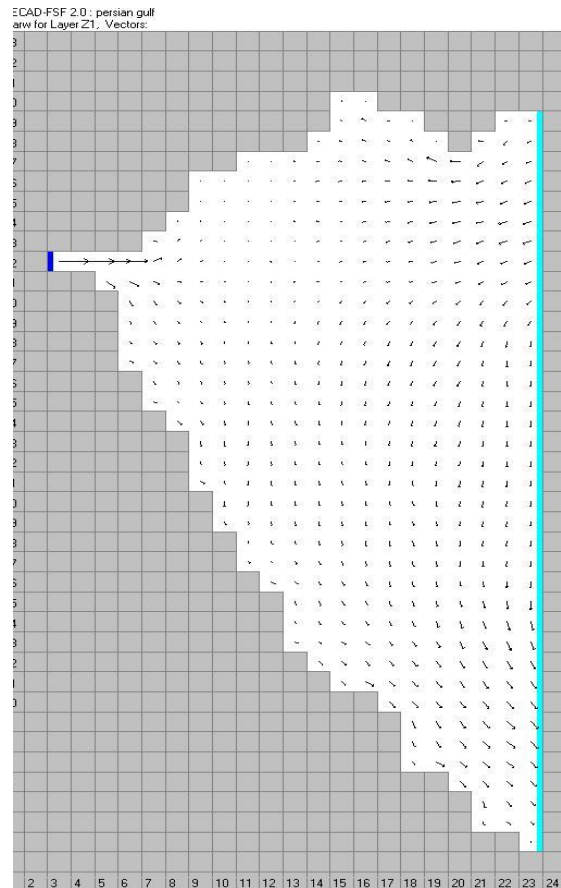
Season	January	February	March	April	Annual
Speed (ms-1)	5.324	5.487	5.006	4.483	4.471
Direction (°)	141.7	131.7	132.5	128.5	132.7
Season	May	June	July	August	
Speed (ms-1)	4.472	4.892	3.892	3.000	
Direction (°)	118.5	127.7	122.8	126.3	
Season	September	October	November	December	
Speed (ms-1)	3.465	3.296	4.689	4.784	
Direction (°)	132.8	143.4	147.8	135.9	

نتایج Mike3-SA تطابق بسیار خوبی با نتایج پایش شده در هفته اول نشان می‌دهد و زمان‌های ارائه شده در ایستگاه‌های پایش کم و بیش با اطلاعات واقعی مطابقت دارند. ولی به تدریج این اختلاف زیاد می‌شود که می‌تواند به سبب استفاده از متوسط بادهای ماهانه به جای بادهای بهینه باشد، ولی همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با استفاده از اطلاعات واقعی باد برنامه OilSlick قادر است با دقت بسیار بالایی حرکت لکه نفتی را شبیه‌سازی کند. این امر نشان از توان بالای برنامه در پیش‌بینی حرکت آلودگی نفتی در خلیج فارس دارد.

به طور کلی تمامی برنامه‌ها خط سیر کلی لکه نفتی را به درستی پیش‌بینی می‌نمایند که نتایج به صورت گرافیکی در شکل ۷ و به صورت تاریخی در جدول ۴ منعکس شده است. اختلاف اصلی بین ایستگاه‌های اول و دوم و همچنین چهارم و پنجم می‌باشد. برنامه OilSlick بهترین سازگاری را نشان می‌دهد و بعد از آن برنامه GulfSlick می‌باشد که خطای کمتری دارد و در آخرین ایستگاه کمی دچار خطا می‌گردد.

#### ۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر توضیحات کاملی در خصوص مدل دو بعدی تهیه شده برای شبیه‌سازی توزیع نفتی در مناطق ساحلی ارائه گردید. در این مدل نفت در دو لایه سطحی و مغروق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل مورد نظر ضریب انتشار ثابت منظور نگردیده و به صورت تابعی از پارامترهای مختلف و متغیر نسبت به مکان و زمان منظور شده است. به منظور افزایش دقت مدل، از منقطع‌سازی با دقت مرتبه سه و کاربرد محدودکننده GH بهره‌گیری شده است.



شکل (۶): بردارهای سرعت جریان آب در محدوده مدل‌سازی

#### ۲-۷- اطلاعات باد

جهت هرچه بهتر مدل کردن لکه آلودگی از اطلاعات بهینه شده بادهای ماهانه خلیج فارس در بازه زمانی ۱۹ ژانویه تا ۱۳ فوریه که توسط (Al-Rabeh (1994 پیشنهاد شده، استفاده شده است. سرعت و زاویه وزش باد در ماه‌های مختلف سال در قالب جدول ۳ آورده شده است.

#### ۳-۷- نتایج مدل‌سازی

نتایج مدل‌سازی آلودگی نفتی توسط برنامه OILSLICK با نتایج سایر برنامه‌ها و همچنین نتایج حاصل از پایش لکه آلودگی مقایسه شده است. مقدار  $6 \times 10^6$  بشکه نفت از نوع نفت ونزونا در نزدیکی چاه الاحمدی واقع در بندر مینا در جنوب کویت وارد دریا گردیده است [۲۷].

حرکت لکه نفتی مشاهده شده تابع جهت جریان می‌باشد. از آنجایی که جهت جریان از شمال غربی به سمت جنوب شرقی می‌باشد خط سیر لکه نفتی نیز به همین شکل می‌باشد. این اطلاعات با نتایج حاصل از مدل‌سازی برنامه GulfSlick که از اولین مدل‌های پیش‌بینی آلودگی است و همچنین Mike3 که از برنامه‌های معروف موجود می‌باشد، مقایسه شده است. جهت نمایش دقت مدل آلودگی نفتی تهیه شده در این مقاله، نتایج



مذکور بیشتر از حدود ۹۵٪ عوامل موثر بر تغییرات کمیت نفت را شامل می‌شود. در مقایسه با دیگر مدل‌سازی‌های ارائه شده در مقالات تحقیقاتی می‌توان گفت که مدل حاضر با دقت بیشتری طبیعت آلاینده‌های نفتی را شبیه‌سازی می‌کند.

مدل تهیه شده با تست استاندارد لهر مقایسه گردیده و برای شرایط مشابه، نتایج بسیار خوبی داشته است. همچنین مدل مورد نظر برای آلودگی نفتی اتفاق افتاده در سال ۱۹۹۱ در منطقه چاه الاحمدی واقع در شمال غرب خلیج فارس به کار رفته و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردیده است که حاکی از دقت بالای مدل در پیش‌بینی پدیده‌های واقعی است.

جدول (۴): مقایسه نتایج واقعی و محاسبه شده چاه الاحمدی

Location	Date of Actual Oil Sighting	Predicted date of impact using GULFSLICK II
Al-Ahmadi (Start)	January 19, 1991	January 19, 1991
Khafji	January 25, 1991	January 26, 1991
Safaniya	January 29, 1991	January 30, 1991
Ras Al Ghar	February 08, 1991	February 09, 1991
Abu Ali	February 14, 1991	February 13, 1991
Location	Predicted date of impact using MIKE3	Predicted date of impact using OILSLICK
Al-Ahmadi (Start)	January 19, 1991	January 19, 1991
Khafji	January 26, 1991	January 25, 1991
Safaniya	January 30, 1991	January 29, 1991
Ras Al Ghar	February 07, 1991	February 08, 1991
Abu Ali	February 09, 1991	February 14, 1991

### مراجع

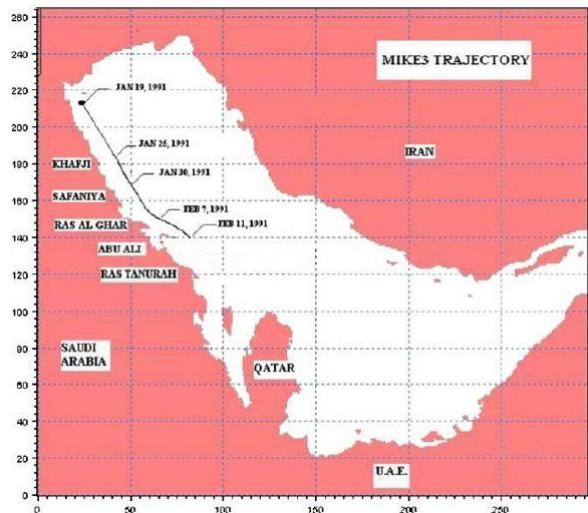
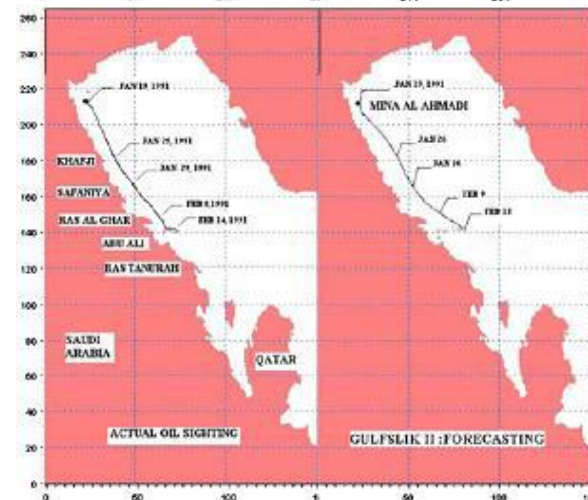
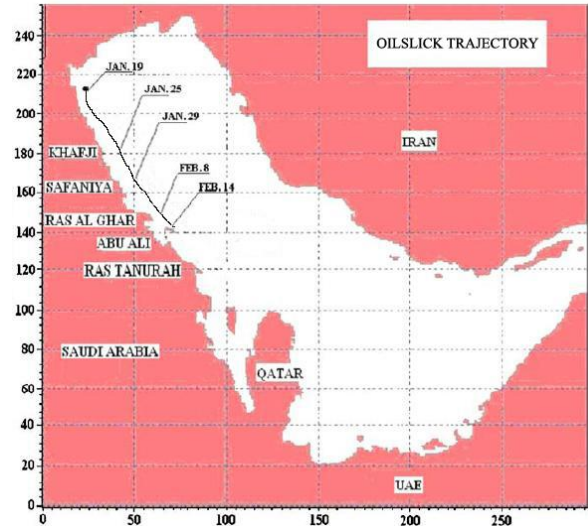
Johnston, P.; Santillo, D.; Stringer, D.; Ashton, J.; McKay, B.; Verbeek, M.; Jackson, E.; Landman, J.; Broek, J.V.D., Samsom, D., Simmonds, M.; Report On the World ocean, Green peace Research Laboratories report. [۱]

ASCE Task Committee; on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division, State of art review of modeling transport and fate of oil spills, J. Hydraulic Engineering, 122(11), pp. 594- 609, 1995. [۲]

Oil Spill Intelligence Report, Oil Spill Involving More Than 10 Million Gallons., <http://www.cutter.com/osir/biglist.htm> [۳]

Yu, X.; Liu, H.; Dong, Z.; A Numerical Method For Oil Spreading On Water, Korea-China Conference on Port and Coastal Engineering, September 21- 23, 2000, Seoul, Korea. 2000. [۴]

Van Hamme, J., D.; Singh, A.; Ward, O., P.; Recent advances in petroleum microbiology, Microbiology and Molecular Biology Reviews, Vol. 67, pp. 503- 510, 2003. [۵]



شکل (۷): مقایسه OILSLICK با اطلاعات واقعی و سایر روش‌ها

[۲۳]

در مدل تهیه شده عوامل اصلی موثر بر حرکت و توزیع آلاینده‌های نفتی شامل سرعت و مشخصات جریان آب، سرعت باد، اثرات شکست و تلاطم امواج، تبخیر و امولسیون شدن، پخش مکانیکی و اثر جذب ساحلی در نظر گرفته شده است. عوامل

- Marine Research Laboratory. 69 pgs, 1993.
- American Petroleum Institution (API); The Role of Chemical Dispersants in Oil Spill Control, Prepared by the API Dispersants Task Force. API: Washington, DC. API Publ. No. 4425. 39 pgs, 1990.
- Markarian, R, K.; Nicolette, J., P.; Barber, T., R.; Giese, L., H.; A Critical Review of Toxicity Values an Evaluation of the Persistence of Petroleum Products for Use in Natural Resource Damage Assessments, Entrix, Inc. Wilmington, DC, for American Petroleum Institute, Washington, DC, 1993.
- Farmer, D.; Li, M.; Patterns of Bubble Clouds Organized by Langmuir Circulation, Journal of Physical Oceanography, vol. 25, (6 part II), pp. 1426- 1440, 1995.
- Farrell, K., J.; Cawley, A., M.; Hydrographic tracking and Oil weathering Model for Contingency Planning and Emergency Response in the Shannon Estuary, Ireland MCS International Merchants Rd, Galway, Ireland, 1990.
- Cohen, Y.; MacKay, D.; Shiu, W., Y.; Mass transfer rates between oil slicks and water, The Canadian Journal of Chemical Engineering. vol. 58, 1980.
- Shen, H., T.; Yapa, P., D.; Petroski, M., E.; Simulation of Oil Slick Transport in Great Lake Connecting Channels, Theory and Model Formation, CRREL Report, pp. 90-1, 1990.
- Tkalich, P.; Chao, X., B.; Accurate Simulation Of Oil Slick, Proceedings of the International Oil Spill Conference, Tampa, Florida, API, Washington DC, USA, pp. 1133- 1137, 2001.
- Cormack, D.; Nichols, J., A.; Lynch, B.; Investigation of Factors Affecting the Fate of North Sea Oil Discharged as Sea. Warren Spring Laboratory Publication, Stevenage, Hertfordshire, UK, 1978.
- Jeffery, P., G.; Large-Scale Experiments on the Spreading of Oil at Sea and Disappearance By Natural Factors, Proceedings, Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, American Petroleum Institute, Washington DC, pp. 469- 474, 1973.
- Al-Rabeh, A., H.; Cekirge, H., M.; Gunay, N.; Modeling the fate and transport of Al-Ahmedi oil spill, Water and Air Pollution, vol. 65, pp. 257 -279, 1992.
- Winderl, C.; Anneser, B.; Griebler, C.; Meckenstock, R., U.; Lueders, T.; Depth-resolved quantification of anaerobic toluene degraders and aquifer microbial community patterns in distinct redox zones of a tar oil contaminant plume, Applied and Environmental Microbiology, vol. 74, pp. 792- 801, 2008.
- Owens, E., H.; Taylor, E.; Humphrey, B.; "The persistence and character of stranded oil on coarse-sediment beaches", Marine Pollution Bulletin, vol. 56, pp. 14- 26, 2008.
- غیائی، ر.، طالبپور، م.ح.، شیرازی، آ.؛ بررسی آلودگی نفتی خلیج مکزیک، چگونگی توسعه و تاثیرات آن بر محیط زیست، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ۱۳۹۰.
- Marianoa, A., J.; Kourafalou, V., H.; Srinivasana, A.; Kanga, H.; Halliwell, G., R.; Ryana, E., H.; Rofferc, M.; On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico Oil Spill, Dynamics of Atmospheres and Oceans, vol. 52, pp. 322- 340, 2011.
- مجموعه اولین کنفرانس بین‌المللی بررسی اثرات نشست نفت در خلیج فارس، ۳۰ اردیبهشت الی ۶ خرداد ۱۳۶۴، موسسه انتشارات چاپ دانشگاه تهران، ۱۳۶۴.
- Shen, H., T.; Yapa, P., D.; Oil Slick Transport in Rivers, J. of Hydr. Engrg, ASCE, 114(5), pp. 529- 543, 1989.
- Johanson, P.; Santillo, D., St., R.; Ashton, J.; Report On the World Ocean, Green peace Research Laboratories report, 1998.
- Korotenko, K., A.; Mamedov, R., M.; Mooers, C. N., K.; Prediction of the Transport and Dispersal of Oil in the South Caspian Sea Resulting from Blowouts, Environmental Fluid Mechanics 1, pp. 383- 414, 2002.
- Mackay, D.; Paterosn, S.; K.trudel. A.; Mathematical Model of Oil Spill Behavior, Report EE-7. Enviromental Protection Services, Fisheries and Environmental Canada, Ottawa, Ontario, 1980.
- Mackay, D.; Paterson, S.; Madeau, S.; Calculation of the evaporation rate of volatile liquids, Proceedings, National Conference on Control of Hazardous Material Spills, Louisville, Kentucky, pp. 361-368, 1980.
- Curl, H., Jr.; O'Donnel, K.; Chemcial and Physical Properties of Refined Petroluem Products, NOAA Marine Ecosystems Analysis Program, Boulder, CO. NOAA Technical Memorandom ERL MESA-17. 31 pgs, 1977.
- Gilfillan, E., S.; Dispersant Use Guidelines for the State of Maine, Bowdoin College