فرآیندهای مؤثر بر لکه نفت پس از حادثه اتفاقی ریزش در دریا - مهم در مدل‌های عددی ریزش نفت

شهلا حبیبی واحد زنجانی

گروه پژوهشی مکانیک و فلزشناسی، پژوهشکده برق، مکانیک و ساختمان، پژوهشگاه استاندارد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۲۵

چکیده

در این مقاله فرآیندهای مؤثر بر لکه نفت پس از ریزش اتفاقی در دریا معرفی می‌شوند. فرآیندها شامل جابجایی، تبخیر، حلالیت، فتواکسیداسیون، رسوب سازی و تجزیه بیولوژیک می‌باشند که به روش تحلیلی بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد این فرآیندها مشخصه‌های اولیهٔ نفت را شامل میزان آب و چگالی آن را تحت تأثیر و تغییر قرار می‌دهند. فرآیند گسترش نقش حاکم طی زمان چند ساعت بعد از ریزش نفت را بازی می‌کند. مادامی که تغییر شکل لکه نفت ممکن است طی یک دوره چند روزه رخ دهد. تخمین تبخیر، جابه جایی و ضخامت لایهٔ نفت توسط مدل‌های عددی بسیاری در محاسبهٔ نسبت پراکنش طبیعی بکار می‌رود که میزان تبخیر و ضخامت لایهٔ نفت، طول عمر لکه نفتی در سطح دریا را تعیین می‌کنند. علاوه بر آن تخمین مساحت لکه، برای ارزیابی کارایی توان روش‌های مبارزه ریزش نفت و ارزیابی تأثیرات محیطی نیاز می‌شود. مطالعات در منطقه دریایی عسلویه در سواحل شمالی خلیج فارس برای فرآیندهای مؤثر بر لکه میعانات گازی ریزش شده استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که میعانات گازی پس از حادثه ریزش اتفاقی با توجه به شرایط جوی و دریایی به صورت تبخیر به جو و نیز نفوذ در ستون آب منتقل می‌شوند. در زمستان به دلیل غالب بودن مؤلفه سرعت ناشی از باد، موجب حرکت میعانات گازی به دور از ساحل می‌شود و در تابستان به علت پایداری بیشتر در دریا، ذرات میعانات گازی بیشتر در سطح تجمع می‌کنند و این پدیده در باره ذرات بزرگ‌تر بارز می‌باشد.

واژگان کلیدی: فرآیندهای مؤثر، لکه نفت، محیط زیست دریا، خواص نفت، مدل عددی

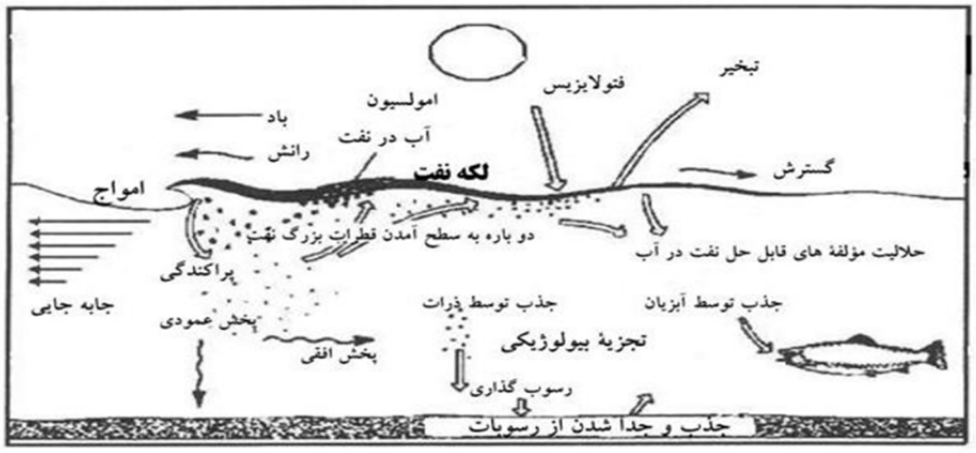
* نگارنده پاسخگو: shhabibip@standard.ac.ir

مقدمه

ریزش نفت که ناشی از فرآیندهایی همچون تخلیه صنعتی، انتقال و اکتشاف نفت، عملیات ذخیره نفت، رفت و آمد نفتکش ها و غیره روی می‌دهد، برای محیط دریا و سلامتی بشر زیانبخش می‌باشد. ریزش‌های عمده می‌تواند خط ساحلی را آلوده کند و مسبب صدمات بلند مدت در محیط آبزیان برای ماهیگیری و حیات وحش شود (Chao *et al*., 2001). با آلوده شدن سواحل، زیست دریایی و از جمله پرندگان تهدید می‌شود و تأمین آب نوشیدنی از دریا در معرض خطر قرار می‌گیرد. ریزش نفت در دریا، هزینه مبارزه را افزایش می‌دهد. اگرعملیات حفاظت و پاکسازی فوراً انجام شود، چنین صدماتی می‌تواند به‌طور قابل توجه کاسته شوند. ذرات نفت می‌تواند در ستون آب برای مدت طولانی باقی بماند و مناطق عمیق‌تر را آلوده کند. نفت می‌تواند مانع رسیدن نور خورشید به جمعیت‌های فیتوپلانکتون که با جریان امواج حرکت می‌کنند، شود و جمعیت آنها را به شدت کاهش دهد (دانه کار و همکاران،۱۳۷۷).

منابع آلوده کننده محیط زیست را می‌توان به دو گروه ثابت (نقطه‌ای) و متحرک (غیرنقطه ای) تقسیم نمود. گروه ثابت منابع آلاینده دائمی بوده در محیط زیست پایدار هستند و استقرار مکانی دارند مانند صنایع، کارخانجات ساحلی، شهرها، سکوهای نفتی و ترمینال‌ها. درگروه متحرک مانند نفتکش ها و سایر شناورها که موقعیت مکانی ثابتی ندارند و در حال جابجایی هستند (دانه کار و همکاران،۱۳۷۷).

عموماً، انتقال و جابجایی نفت ریزش شده می‌تواند توسط فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی (Chao *et al*., 2001) تحت تأثیر قرار گیرد. که آن‌ها شامل گسترش Spreading، جابجایی Advection، تبخیر Evaporation، حل شدن Dissolution، پخش طبیعی Natural Dispersion، امولسیون سازی Emulsification، درون آمیختگی Entrainment در ستون آب، فتواکسیداسیون Photo - Oxidation ، رسوب سازی Sedimentation، پخش ناشی از آشفتگی Turbulent Diffusion به علت جریان آب و باد و نیز تجزیه بیولوژیکی Biodegradation می‌باشد، شکل (۱) (Korotenko *et al*., 2004).



شکل ۱- انتقال و جابه جایی نفت ریزش شده توسط فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی

این فرآیندها به تنهایی صورت نمی‌گیرد و گاهی در زمان وقوع معمولاً چند پدیده و اثرات متقابل آنها رخ دهد. فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی عموماً بعد از ریزش نفت طی زمان طولانی رخ می‌دهد.

تحت تأثیر شکست موج و آشفتگی لایهٔ بالا، لکهٔ نفت متلاشی و به ذرات کوچک تبدیل می‌گردد. سپس حجم نفتی در ستون آب جابجا و پخش می‌شود، بعضی ذرات دوباره به سطح خواهند آمد، مادامی که، بعضی امولسیون‌های آب در نفت یا نفت در آب را تشکیل می‌دهند. در دریا، آلودگی‌ها توسط فرآیند جریان‌های همرفت، پراکندگی و پدیده‌های پیچیدهٔ بسیاری منتقل می‌شوند که می‌تواند حساس‌ترین خواص محیط دریای را تحت تأثیر قرار دهد، (Task Committee,ASCE1996).

در سال ۱۹۹۶ میلادی، ریاضی و عدالت، مدل عددی را معرفی کردند که سرعت‌های تبخیر و حلالیت را برای ریزش نفت شناور در سطح دریا پیش بینی می‌کند (Riazi & Edalat, 1996). او تجربیات آزمایشگاهی دو نمونه را مورد بررسی قرار داد، که شامل اندازه گیری سرعت حلالیت و تبخیر در دماهای مختلف و غلظت‌های مختلف شوری آب بود. نمونه‌های مورد آزمایش, نفت خام از میدان‌های نفتی اهواز در ایران و کروزن تولید شده در پالایشگاه تهران بود. اثر دما بین ۱۶ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد و غلظت شوری (۰ ppt -۶۰ ppt) در سرعت زدایش نفت مطالعه شد. بررسی نشان داد که سرعت حلالیت تحت شرایط معمولی سطح دریا تقریباً ۰/۱ درصد سرعت تبخیر می‌باشد. نتایج نشان داد حلالیت با دما افزایش و با افزایش غلظت شوری آب کم می‌شود. در این حالت سرعت حلالیت خیلی کمتر از سرعت تبخیر می‌باشد. مدل مزبور نشان داد که سرعت تبخیر شدیداً به وزن مولکولی نفت، ضخامت لکهٔ نفت و دما وابسته می‌باشد (Riazi & Edalat, 1996).

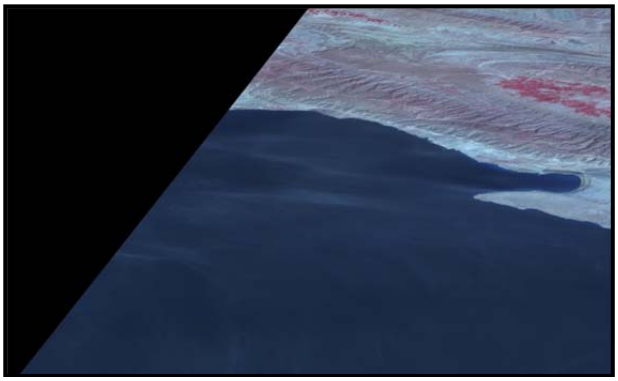
در سال ۱۹۹۹ میلادی ریاضی و همکاران، مدل نرخ محو شدگی ریزش نفت از آب دریا را برای نفت خام صادراتی کویت و چهار محصول پترولتوم مختلف کویت ارائه دادند. یک مدل نیمه تحلیلی توسعه داده شد که مقدار محو شدگی نفت از یک ریزش نفت شناور در سطح آب دریا را توسط تبخیر، حلالیت و رسوب گذاری با ضخامت لکه وابسته به زمان تخمین می‌زند. مدل سرعت‌های تبخیر، حلالیت و رسوب گذاری (فروروی) مؤلفه‌های نفت را بررسی می‌کرد. مدل نشان داد که مؤلفه‌های سنگین با چگالی‌های بیشتر از چگالی آب به کف دریا فرو می‌رود، در حالی که مؤلفه‌های سبک تبخیر شده یا درون آب محلول می‌شوند. روابط ریاضی ساده برای سرعت‌های تبخیر و حلالیت با معرفی دو ضریب انتقال جرم وابسته به زمان یکی برای تبخیر و دیگری برای حلالیت با ضخامت ثابت لکه ارائه شد. قابلیت حلالیت نمونه‌های نفت در دما و غلظت‌های شوری مختلف اندازه‌گیری شد. مدل نشان داد، فرآیند حلالیت نفت، میزان شوری آب و در فرآیند تبخیر، فشار بخار نفت و در فرآیند رسوب گذاری، چگالی نفت مؤثر می‌باشد. مؤلفه‌های سبک‌تر سریع‌تر از مؤلفه‌های سنگین تبخیر شده و مقدار حلالیت آن کمتر از یک درصد جرم اصلی ریزش می‌باشد. مؤلفه‌های سبک نفت بیشتر در معرض فرآیندهای تبخیر, حلالیت و فراریت بوده و مؤلفه‌های سنگین نفت در معرض فرآیندهای پخش و فرو روی می‌باشد. از آنجا که خواص فیزیکی و شیمیایی نفت بستگی به خواص نفت ریزش شده دارد و خواص نفت و همچنین داده‌های محیطی همیشه به سرعت در دسترس نیست، گاهی اوقات تقریباً کمبود شدید اطلاعات وجود دارد. بنا بر این مهم است که یک بانک اطلاعاتی برای ثبت خواص نفت به منظور امکان انجام عکس العمل سریع در بروز یک حادثه ریزش تهیه شود.

در این مقاله فرآیندهای مؤثر بر نفت ریزش شده در دریا همچون گسترش، جابجایی، تبخیر، حلالیت، پراکندگی طبیعی، امولسیون سازی، درون آمیختگی در ستون آب، فتواکسیداسیون، رسوب سازی، پخش آشفتگی، تجزیه بیولوژیکی و عوامل تأثیر گذار بر فرآیندها معرفی می‌شود. همچنین فرآیندهای مؤ ثر بر لکه میعانات گازی ریزش شده در منطقه دریایی عسلویه واقع در نواحی شمالی خلیج فارس مورد

بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

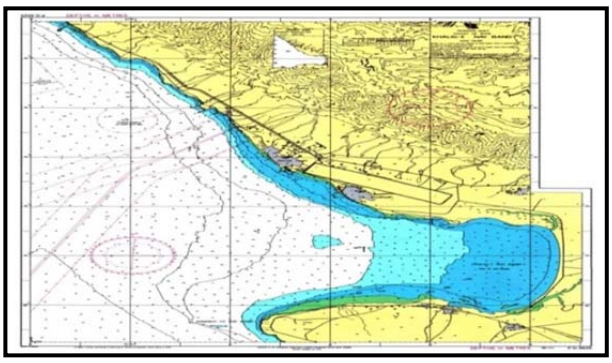
در این مطالعه از روش تحلیلی و مقایسه‌ای استفاده شده است و برای این منظور از سایت‌های معتبر و مقالاتی همچون (Wang *et al.*, 2005)، (Chao *et al.*, 2003)، (Comerma *et al.*, 2003)، و (Korotenko *et al.*, 2004)، (Riazi *et al.*, 1999)، (Al-Rabeh *et al.*, 2000)، (Chao *et al.*, 2001)، (Reji & Renu, 2013) و (Reed *et al.*, 1999) پایگاه‌های علمی داخل کشور و سازمان‌های مرتبط همچون سازمان هواشناسی کشور، سازمان نقشه برداری و سازمان جغرافیایی کشور مراجعه شده است. همچنین اطلاعات و مقالات داخل و خارج از کشور مرتبط با فرآیندهای مؤثر بر نفت ریزش شده و خواص نفت به‌طور عمقی بررسی شده است. تأثیر فرآیندها همچون تبخیر و حلالیت به طور عملی در مدل عددی پیش بینی حرکت میعانات گازی ناشی حادثه ریزش در منطقه دریایی عسلویه واقع در سواحل شمالی خلیج فارس اجرا شده است، (Habibi *et al.*, 2008). ناحیه مورد مطالعه، منطقه دریایی عسلویه است که در عرض جغرافیایی N ′۳۰ °۲۷ و طول جغرافیایی E ′۳۷ °۵۲ قرار دارد (شکل ۲, ۳).



شکل ۲- تصویر ماهواره‌ای منطقه دریایی عسلویه

(منبع: سازمان جغرافیایی کشور).

این منطقه در حاشیه شمالی خلیج فارس و در ۳۰۰ کیلومتری شرق بندر بوشهر و ۵۷۰ کیلومتری غرب بندرعباس واقع است و حدود ۱۰۰ کیلومتر با حوزه گاز پارس جنوبی (دنباله حوزه گنبد شمالی کشور قطر) فاصله دارد، (پارس، ۱۳۸۳) و (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۷۵).



شکل ۳- نقشه عسلویه، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰

(منبع: سازمان نقشه برداری کشور)

خواص فیزیکی نفت خام

اصلی‌ترین خواص فیزیکی که بر رفتار نفت ریزش شده در دریا اثر می‌گذارد عبارت است از وزن مخصوص ، مشخصات تقطیر، ویسکوزیته و نقطه ریزش می‌باشد.

وزن مخصوص نفت، تراکم یا چگالی آن نسبت به آب خالص کمتر است. از اینرو بیشتر نفت‌های سبک‌تر از آب، چگالی کمتر از یک دارند. وزن مخصوص نفت‌های خام و تولیدات نفتی معمولاً بر حسب وزن API مطابق فرمول زیر بیان می‌شود:

$$API = [141.5/S.g.] - 131.5$$

American Petroleum Institute gravity, or API gravity

علاوه بر تعیین شناوری نفت، مقدار وزن مخصوص می‌تواند بیانی عمومی از سایر خواص نفت باشد. مثلاً نفت‌های با وزن مخصوص کم (API بالا)، ویسکوزیته پایین داشته و ترکیبات فرار زیادی دارند (ابوالحمد، ۱۳۸۱).

نقطه جوش

نقطه جوش اجزای نفت، فراریت آن را بیان می‌کند. همچنان که دمای نفت بالا می‌رود، ترکیبات مختلف آن به نقطه جوش خود رسیده و جدا می‌شوند. مشخصات جدایی بر اساس اجزای نفت مادر که در یک محدود دمایی جدا می‌شوند، بیان می‌گردد (دانه کار و همکاران،۱۳۷۷).

ویسکوزیته

ویسکوزیته نفت، پایداری آن در برابر جریان یافتن است. نفت‌های با ویسکوزیته بالا به سختی جریان می‌یابند، در حالی که نفت‌های با ویسکوزیته پایین بسیار متحرک هستند. ویسکوزیته در دمای بالا، کاهش می‌یابد، بنابراین دمای آب دریا و میزان جذب گرمای خورشید توسط نفت، اهمیت قابل توجهی دارد (دانه کار و همکاران،۱۳۷۷).

نقطه ریزش

نقطه ریزش دمایی است که کمتر از آن، نفت جریان نخواهد یافت. در این دما، اساساً نفت مانند یک ماده جامد رفتار خواهد نمود (دانه کار و همکاران،۱۳۷۷). تغییرات فیزیکی و شیمیایی که نفت ریزش شده تحمل می‌نماید مجموعاً به عنوان "فرآیندهای هوازدگی" شناخته می‌شوند (Reed *et al.*,1999).

سم شناسی محیطی هیدروکربن

پترولیوم یک مخلوط بسیار پیچیدهٔ هیدروکربن‌های آلی مختلف می‌باشد. حداکثر ۵۰۰۰ هیدروکربن شاخص می‌تواند در نفت خام پیدا شود. معمولاً این ترکیبات به چهار خانواده اصلی طبقه‌بندی می‌شود همچون: ترکیبات اشباع شده (شامل تنها با باند C-C منفرد، معمولاً بزرگ‌ترین گروه را تشکیل می‌دهند)، آروماتیک، آسفالتنس Asphaltness و رزین‌ها می‌باشد.

از نقطه نظر سم شناسی محیطی، خطرناک‌ترین هیدروکربن‌ها برای حیات انسان و حیوان زمانی است که رادیکال متیل به ترکیبات پلی آروماتیک متصل شود مانند ترکیبات زیر:

(1, 2 بنزو آنتراسن (Maure *et al.*,1995) benzoantracene)، (1, 2, 4, 6 بنزوآنتراسن benzoantracene) و بنزو پیرین (3,4 benzopirine).

تماس مستقیم این مواد به پوست به‌طور سیستماتیکی موجب غدد سرطانی در پوست Carcinomas می‌شود. حداکثر مقدار مجاز در معرض قرارگیری این آلوده کننده‌ها خیلی پایین می‌باشد که در مقادیر خاص در غلظت‌های چند میکروگرم در لیتر می‌باشد. بخش‌های پترولیوم سبک (نفت‌های ناپایدار) همچون گازوئیل و کروزن می‌تواند به‌طور کامل با زمان تبخیر شود. نفت‌های خام که شامل ترکیبات سنگین (Hydrocarbon – plus, C_{20}+ or C_{30}+) می‌باشد، امکان ندارد به‌طور کامل تبخیر شود. ترکیبات سنگین (یا ترکیباتی که چگالی بالاتر از آب دارند) و باقیمانده‌ها تمایل دارند به درون آب پخش شوند یا به کف دریا فرو روند. نسبتی که در آن هیدروکربن در آب محلول می‌شود معمولاً کمتر از نسبت تبخیر تحت همان شرایط است (Lonin, 1999).

طبقه بندی نفت خام

نفت خام از نظر چگالی (ρ) به چهار دسته به شرح زیر تقسیم می‌شود ابوالحمد، ۱۳۸۱):

۱- نفت خام سبک $\rho<0/825$

۲- نفت خام متوسط $0/825<\rho<0/875$

۳- نفت خام سنگین $0/875<\rho<1$

۴- نفت خام خیلی سنگین $\rho>1$

فرآیندهای مؤثر بر لکهٔ نفت ریزش شده

نفت ریزش شده در دریا به دو صورت ۱) لکهٔ شناور در سطح و ۲) نفت مخلوط شده به صورت قطرات معلق شده در ستون آب شکل می‌گیرد. معادلات برای فرآیندهای گسترش، جا به جایی و پخش آشفتگی بر

سطح آب، پخش برشی افقی، پخش عمودی (نفوذ نفت در ستون آب)، تبخیر، حلالیت، امولسیون و فتواکسیداسیون که در مدل عددی به کار می‌رود توسط افرادی همچون Papadimitrakis و همکاران، در مدل سه بعدی ریزش نفت برای آب‌های ساحلی شرح داده شده است (Papadimitrakis *et al*., 2005) و سایر نویسندگان در مدل خود نیز ارائه دادند Habibi *et al*., 2008) و (Chao *et al*., 2001).

گسترش

گسترش نفت، بسط افقی لکهٔ نفت به دلیل ثقل، اینرسی، ویسکوزیته و نیروهای تنش سطحی می‌باشد (Chao *et al*., 2001). تنش سطحی تعیین می‌کند که آیا نفت گسترده می‌شود یا نه. بسیاری فاکتورها، بخصوص ثقل و تنش سطحی، گسترش را توسعه می‌دهند. گسترش نفت در آب به‌وسیله نیروهای رانشی ثقل و تنش سطحی و اثرات به تأخیر اندازی اینرسی و ویسکوزیته کنترل می‌شود که به گسترش نفت ریزش شده و تشکیل لکه در سطح دریا منجر می‌شود. ضخامت لایهٔ نفت توسط مدل‌های بسیاری در محاسبهٔ نسبت پراکندگی طبیعی بکار می‌رود که پایداری طول عمر (Persistence (Lifetime نفت روی سطح دریا را تعیین می‌کند. علاوه بر آن تخمین‌های ضخامت لایه و مساحت لکه، برای ارزیابی کارآئی توان روش‌های مختلف مبارزه ریزش نفت و برای ارزیابی تأثیرات محیطی نیاز می‌شود (Choa *et al*. 2003; Comerma, 2003).

تبخیر

تبخیر بی درنگ بعد از ریزش رخ می‌دهد و اتلاف جرمی برای انواع نفت که تأثیر عمیق در چگالی، ویسکوزیته و سایر خواص نفت دارد. مهم می‌باشد سرعت‌های تبخیر به فشار بخار نفت، همانطور که تحت تأثیر ترکیب و دما قرار می‌گیرد، به مشخصه‌های انتقال لایه مرزی هوا – دریا که تحت تأثیر عمدتاً باد بوده، وابسته می‌باشد.

دو روش برای مدل نمودن تبخیر وجود دارد:

۱)- روش تحلیلی (Analytical Approach)

۲)- روش شبه مؤلفه (Pseudo – component approach)

در روش تحلیلی، عبارتی برای فشار بخار به عنوان تابعی از درجهٔ تبخیر یا هوا خوردگی ارائه می‌شود (Choa *et al*. 2001). در روش شبه مؤ لفه، نفت بوسیلهٔ یک سری مؤلفه‌های هیدروکربن که توسط وزن مولکولی و یا نقاط نقطه جوش گروه بندی شده، مشخص می‌شود. به دلیل تعداد زیاد مؤلفه‌ها (تعداد هیدروکربن) در نفت خام، مور Moore شبیه سازی مؤلفه‌ها را به هشت مؤلفه یا ۲۷ شبه مؤلفهٔ منفرد پیشنهاد کرده است (Choa *et al*. 2001). این گروه‌ها به آلکاناز سبک‌تر که خیلی فرار و قابلیت حل بیش از ۱۰ mg/l و عموماً در محدودهٔ c3 تا c7 قرار دارند شامل سیکلوآلکاناز و به آلکاناز سنگین‌تر که کمتر فرار و قابل حل بوده و ۸ یا بیشتر کربن دارند مانند بنزین و نفتالنز تقسیم می‌شوند. در روش شبه مؤلفه، میزان تبخیر شده تنها به عنوان تابعی از زمان و دما محاسبه می‌شود. اهمیت تبخیر در اتلاف حجم نفت بوسیلهٔ محققین بسیاری مورد توجه بوده است. در بررسی مدل برای حرکت لکه نفت از یک مؤلفه استفاده شده است.

پخش عمودی

وقتی لکهٔ نفت پراکنده می‌شود، ابر گسترده‌ای از قطرات نفت تشکیل می‌شود و به دلیل آشفتگی به‌طور افقی و عمودی پخش می‌شود (Korotenko *et al*, 2000). بعضی قطرات بزرگ ممکن است دوباره بالا آیند و لکهٔ نفت را تشکیل دهند، اما اگر فرآیند پراکندگی مؤثر باشد، اکثر قطرات داخل لایهٔ زیر سطح مخلوط می‌شوند. اکثر محاسبات دقیق پخش انتقال نفت نیاز به کاربرد مدل‌های آشفتگی و انتقال آشفتگی دارد. نقش پراکندگی بدین صورت است که عمل موج،

نفت را به داخل آب می راند که با تشکیل ابری از قطرات زیر ریزش همراه است. قطرات یا تقسیم می‌شود یا به صورت قطرات بزرگی که سریعاً بالا رفته و دوباره به لکه ملحق می‌شوند یا به صورت قطرات کوچک آرام‌تر بالا رفته و ممکن است به مدت طولانی فرو روند و در داخل لایه‌های پایین‌تر ستون آب پخش شوند (Al-Rabeh *et al*., 2000). محاسبهٔ پراکندگی طبیعی برای ارزیابی طول عمر یک ریزش نفت مورد نیاز است. سرعت پخش طبیعی بستگی به پارامترهای محیطی یعنی حالت دریا دارد اما توسط پارامترهای مربوط به نفت تحت تأثیر قرار می‌گیرد که مانند ضخامت لایه نفت و خواص نفت (چگالی، تنش سطحی و ویسکوزیته) می‌باشد (Reed *et al*.,1999).

این فرآیند تابعی از حالت دریا و زمان بعد از ریزش می‌باشد. نفت ممکن است به قطرات با قطرهای (۱- ۰/۰۱) میلی‌متر تقسیم شده و در لایه زیر سطحی قرار گیرد (Korotenko *et al*, 2000). هدف اصلی مطالعه پخش عمودی این است که سرعت درون آمیختگی نفت و توزیع ذرات نفت را تخمین بزند (Choa *et al*., 2001). اثر شناوری و تغییرات عمودی آشفتگی، مکانیسم‌های مهم برای حرکت عمودی نفت در ستون آب می‌باشد. مطالعات میدانی، آزمایشگاه و مدل به‌طور آشکار اهمیت بعد عمودی در حرکت نفت را اثبات می‌کند.

حلالیت

حلالیت هیدروکربن‌ها از یک لکه نفت معمولاً برای تعادل جرمی ریزش دارای اهمیت نمی‌باشد برای اینکه کمتر از ۱ درصد لکهٔ نفت ممکن است محلول شود. حلالیت کم نفت، نتیجه سه فاکتور می‌باشد (Korotenko *et al*, 2000):

۱) پایین بودن ضریب انتقال جرم حلالیت

۲) نیروی رانش خیلی کوچک قابلیت حل آب

۳) حضور مقادیر نسبتاً کوچک هیدروکربن‌های قابل حل‌تر که اکثر آنها مستعدتر برای تبخیر می‌باشند.

امولسیون (تعلیق)

نفت بسیار تمایل دارد که آب را جذب کند و امولسیون تشکیل دهد. (Korotenko *et al*, 2000). بنابراین امولسیون فرآیندی مهمی است برای نفت که تشکیل و پایداری آب امولسیون شده را تسهیل می‌کند. فرآیندی همچون امولسیون یا تبخیر نقش مهمی در رانش لکه دارد. لایه‌های سطحی نفت به داخل ستون آب توسط عمل شکست موج سطحی رانده می‌شوند و تنها قسمت رانده شده نفت در فرآیند پخش عمودی درگیر می‌شوند. این ذرات در حالت دوباره به سطح آمدن، ذرات لایهٔ سطحی را دوباره تشکیل می‌دهند و اگر آنها بار دیگر به عمق رانده شوند، تبدیل به امولسیون خواهند شد. امولسیون نفت تا لایه‌های حدود ۷/۶-۵/۱ سانتی‌متر ممکن است نه تنها در لایه‌های سطحی، سطوح غلظت سمی پلانکتونی را حفظ کند، بلکه ممکن است مانع نور خورشید شود، بدین طریق تولید فیتوپلانکتون محدود می‌شود.

افزایش چگالی

فرآیندهای تبخیر و تشکیل امولسیون آب با نفت باعث افزایش چگالی نفت می‌شود. به دلیل هوا خوردن، چگالی معدودی نفت خام ممکن است چگالی آب را افزایش دهد.

فتو اکسیداسیون

هیدروکربن‌های محلول در آب در اثر نور مستقیم و ملایم و دمیدن هوا به شدت اکسید شده و ترکیبات مختلفی به وجود می‌آورند که نوع و سرعت فعل و انفعالات بستگی به اکسیژن محلول در آب، شدت نور، ضخامت لایه نفتی و زمان هوادهی دارد. مولکول‌های هیدروکربن با اکسیژن واکنش داشته به تکه‌های محلول یا شکسته شده یا با هم ترکیب می‌شوند و گلوله‌های پایدار می‌سازند. بسیاری از واکنش‌های اکسیداسیون تنها در حضور نور خورشید صورت

می‌گیرند. اگر چه این فرآیند در تمام مدت وجود لکه نفت اتفاق می افتد، تأثیر آن در متلاشی شدن سراسری نسبت به سایر فرآیندهای هوازدگی کمتر است. واکنش به کمک تابش خورشید فرآیند مهم دیگری برای هواخوردگی لکه نفت با تشکیل گونه‌های اکسید شده می‌باشد (Korotenko *et al*, 2000). این فرآیند بعد از یک هفته یا بیشتر در حادثه ریزش نفت مهم می‌باشد.

فروروی / رسوب گذاری

فروروی / رسوب گذاری نفت (نتیجه فرآیندهای تبخیر و امولسیون)، ممکن است رخ دهد وقتی که وزن مخصوص نفت بزرگ‌تر از وزن مخصوص آب باشد، هر چند آن یک فاکتور جزئی است که موجب می‌شود نفت فرو رود. بیشتر احتمال دارد که حضور رسوبات موجب شود یک قسمت قابل توجه نفت ریزش شده به هم چسبیده و سپس به کف فرو رود. شوری و بعضی خواص نفت همچون سولفور و مواد آلی محتوی و درجه آشفتگی از عوامل مؤثر بر جذب / دفع نفت به داخل ذرات رسوب می‌باشد (Korotenko *et al*., 2000).

رسوب گذاری نفت به درون آب یک فرآیند وابسته به زمان می‌باشد و بوسیلهٔ شرایط موج تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مؤلفه‌های نفت که چگالی آن‌ها بزرگ‌تر از آب است به درون آب فرو می‌روند. مواد نفتی باقیمانده، به ذرات معلق در آب از قبیل خاک، ماسه، ذرات صدف و میکروارگانیسم‌ها چسبیده و در آب غوطه ور می‌شوند. ذرات فوق در اثر فعل و انفعالات مختلف از جمله فرآیندهای بیولوژیکی به تدریج سنگین‌تر شده و ته نشین می‌شوند ولی با تغییرات باد و تلاطم امواج ممکن است مجدداً به سطح آب برگردند.

افزایش حدود ۱۰ درجه سانتی گراد دما، وزن مخصوص آب را تنها ۰٫۲۵ درصد تغییر می‌دهد، در حالی که وزن مخصوص نفت ۰٫۵ درصد تغییر می‌کند و در نتیجه نفتی که در تمام طول روز شناور بوده ممکن است با افت دما، در اثر بیشتر شدن وزن مخصوص غرق شود و این امکان وجود دارد که مجدداً در آب گرم‌تر به سطح بیاید.

رسوب گذاری در امتداد خط ساحلی

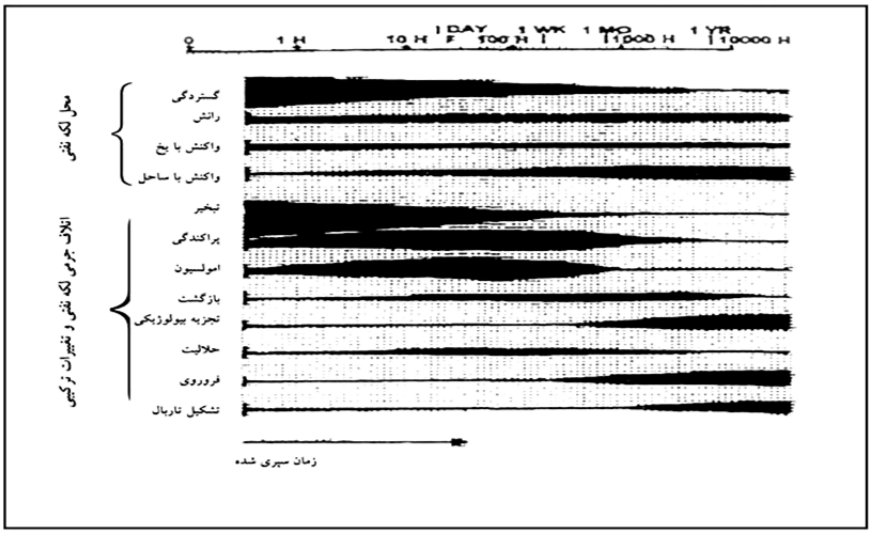
نفت امکان دارد در امتداد خط ساحلی آورده شده و رسوب نموده و دوباره به داخل آب رود (Yapa, 2005؛ Chao *et al*., 2001, Chao *et al*., 2003). مشاهدات میدانی ریزش‌های بزرگ نفت معرفی می‌کند که توانایی سواحل برای نگهداری نفت محدود می‌باشد. وقتی که توانایی خط ساحلی حاصل می‌شود، نفت در معرض فرآیندهای انتقال در امتداد ساحل قرار می‌گیرد. نفت پراکنده شده نزدیک ساحل سریعاً به مواد بسیار ریز می‌چسبد و فرو می‌رود که فرآیند رسوب گذاری نفت نام دارد. نسبت رسوب گذاری بستگی به هر دو خواص نفت و ته نشست دارد. نفت سریعاً به رس، شن، سیلت یا بخش‌های چوبی می‌چسبد.

تجزیه بیولوژیکی

تجزیه بیولوژیکی، یک فرآیند فوق العاده آرام است که تنها در بلند مدت در برداشت نفت از محیط دریایی دارای اهمیت می‌باشد (Korotenko *et al*., 2000). فرآیند بیولوژیکی شامل بلعیدن و قورت دادن توسط ارگانیسم موجود زنده و علاوه بر آن تجزیه میکروبی می‌باشد. میکروب‌های مسئول برای تجزیه نفت، نسبتاً در محیط ساحلی و مصب و در ناحیهٔ با آلودگی مستمر فراوان هستند. فرآیندهای هواخوردگی بیولوژیکی ممکن است شامل تبخیر قسمت‌های سبک، حلالیت ترکیبات قابل حل در آب، پخش، اکسیداسیون فتوشیمی، امولسیون نفت، جذب به مواد بسیار ریز معلق، فروروی و رسوب گذاری باشد.

عوامل اصلی تأثیرگذار بر میزان تجزیه بیولوژیکی، دما، دسترسی به اکسیژن و مواد مغذی، اساساً

ترکیبات نیتروژن و فسفر می‌باشند. شکل (۴) Task Committee (ASCE),1996) مقیاس‌های نسبی زمانی فرآیندهای مؤثر بر نفت ریزش شده در دریا را نشان می‌دهد که محور افقی، زمان را نشان می‌دهد که بر حسب ساعت در بازه صفر الی ۱۰۰۰۰ می‌باشد. با توجه به شکل، گسترش و تبخیر طی روزهای اولیه ریزش انجام می‌شود ولی تجزیه بیولوژیکی و فروروی طی سال‌ها انجام می‌شود.

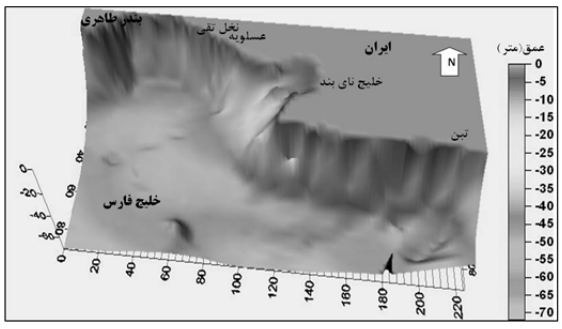


شکل ۴- مقیاس‌های نسبی زمانی فرآیندهای مؤثر بر نفت ریزش شده در دریا

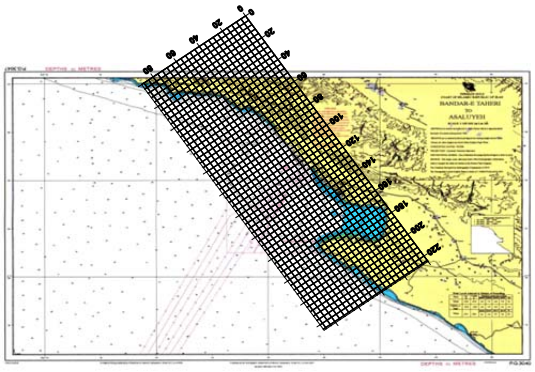
شبکه بندی منطقه دریایی عسلویه

منطقه دریایی عسلویه در عرض جغرافیایی ′۲۷°۳۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ′۵۲°۳۷ درجه شرقی قرار دارد. در نقشه به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (تهیه شده از سازمان نقشه برداری کشور)، یک شبکه مربع مستطیل با توجه به جهت باد غالب شمال غربی به ابعاد ۶۷/۵×۲۷ کیلومتر مربع با $\Delta x = \Delta y = ۳۰۰$ متر با ردیف (۹۰-۰) و ستون (۲۲۵-۰) با تعداد نقاط شبکه ۲۰۵۶۶ نقطه رسم شد. شبکه در عرض جغرافیایی ′۲۷°۲۱ شمالی و طول جغرافیایی ′۵۲°۵۰ شرقی قرار داشته و شامل بندر طاهری در غرب تاتبن (Teben) در شرق (سواحل شمالی خلیج فارس) می‌باشد.

محل ریزش اتفاقی میعانات گازی در نزدیکی گوی شناور، ۳ کیلومتر دور از ساحل در نقطه مختصات عرض جغرافیایی ′۲۷°۳۱/۵ شمالی و طول جغرافیایی ′۵۲°۳۱/۵ شرقی (نقطه مختصات ردیف ۲۱ و ستون ۷۸) در ساعت ۱۰ صبح هفتم فوریه (۱۹ بهمن ۲۰۰۵ میلادی (زمستان) و ساعت ۱۰ صبح هفتم جولای (۱۶ تیر) ۲۰۰۵ میلادی (تابستان) انتخاب شد، (Habibi *et al*., 2008). شکل (۵) شبکه بندی منطقه دریایی عسلویه را نشان می‌دهد. شکل (۶) توپوگرافی منطقه مورد مطالعه در عسلویه را نشان می‌دهد.



شکل ۵- توپوگرافی منطقه دریایی عسلویه



شکل ۶- شبکه بندی ناحیه مورد مطالعه در منطقه دریایی عسلویه. در نقشه مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰
(منبع: سازمان نقشه برداری کشور)

نتایج

مطالعه نشان داد که در منطقه دریایی عسلویه در سواحل شمالی خلیج فارس، در زمستان (Habibi *et al.*, 2008)، تنش باد بیشتر و با ایجاد امواج، انرژی آشفتگی بیشتری را ایجاد می‌کند. تأثیر امواج و تلاطم دریا بر لکه میعانات گازی، باعث ایجاد قطرات میعانات گازی در اندازه‌های گوناگون می‌شود. پس از حادثه ریزش، لکه همان طور که نازک‌تر شده، تحت تأثیر موج، آشفتگی و گرادیان‌های افقی سرعت ناپایدار شده و به لکه‌های کوچک به شکل غیر منظم شکسته می‌شود که نزدیک سطح آب حرکت می‌کنند. در زمستان، تغییرات چگالی، آشفتگی را زیاد می‌کند و ناپایداری نیروی شناوری را کاهش می‌دهد. شدت باد بیشتر، تنش باد باعث ایجاد امواج می‌شود و انرژی آشفتگی بیشتری را اضافه خواهد کرد که باعث اختلاط بیشتر ذرات می‌شود.

در منطقه، در تابستان سرعت جریان سطحی نسبت به زمستان افزایش داشته و آشفتگی نیز کمتر بوده و تجمع ذرات بیشتر در نزدیکی سطح می‌باشد. نیروی شناوری نیز به کمک پایداری آمده و با تلاطم مخالفت می‌کند و تغییرات چگالی تمایل به کاهش آشفتگی دارد و اختلاط در لایه بالا را کمتر می‌کند. بنابر این، درون آمیختگی ذرات در تابستان کمتر بوده و تجمع در سطح بیشتر می‌شود. کاهش شدت باد در تابستان، آشفتگی را کاهش می‌دهد و تجمع ذرات در سطح نیز بیشتر می‌شود که تجمع در سطح بیشتر مربوط به ذرات بزرگ‌تر است و ذرات کوچک به دلیل شناوری کمتر و نیروی اختلاط به طرف پایین می‌روند.

فرآورده‌های با ویسکوزیته بالا مانند نفت خام نسبت به فرآورده‌های با ویسکوزیته پایین مانند میعانات گازی، آرام‌تر گسترش دارد و لکه میعانات گازی با ویسکوزیته و تنش سطحی پایین نسبت به لکه نفت خام با ویسکوزیته و تنش سطحی بالا، سریع‌تر پخش می‌شود. فرآیند امولسیون (پس از چند روز)، به دلیل افزایش ویسکوزیته و افزایش ضخامت لکه با آب محتوی باعث به تأخیر انداختن گسترش و افزایش حجم و کاهش پخش طبیعی می‌شود و تبخیر و گسترش آرام می‌شود.

نتایج مطالعات انجام شده بر اساس فرآیندهای مؤثر بر روی لکه نفت ریزش شده در دریا:

پارامترهای اصلی در فرآیندهای:

۱) تبخیر: فشار بخار، ۲) حلالیت: قابلیت حلالیت مؤلفه نفت خام و میعانات گازی در آب و شوری آب، ۳) رسوب گذاری: چگالی، ۴) امولسیون: درصد جذب آب، ۵) پخش عمودی: ارتفاع شکست موج، ۶) جابه جایی: سرعت جریان آب و باد، ۷) گسترش: حجم و ضخامت لکه نفتی، ۸) تجزیه بیولوژیکی: تعداد و نوع میکروب، ۹) جذب و دفع نفت خام و میعانات گازی در رسوب معلق در آب: مواد آلی و درجه آشفتگی، ۱۰) رسوب نفت در ساحل: شرایط و شیب خط ساحلی، ضخامت سطحی نفت و نفوذ پذیری رسوب در ساحل می‌باشد.

عوامل مؤثر بر فرآیندها

- حالت دریا (Sea-State) که به‌وسیله توزیع دامنه موج و فرکانس‌ها و نیز فرکانس امواج شکسته مشخص می‌شود و به سرعت و مدت وزش باد و

طول موجگاه (Fetch) بستگی دارد بر روی نرخ پراکندگی لکه نفت مؤثر می‌باشد.

- تغییرات و مقدار حجم نفت باقیمانده بر سطح آب به عواملی مانند سرعت باد و درجه حرارت آب دریا و زمان پس از نشت بستگی دارد. مقدار حجم نفت پراکنده شده وابسته به سرعت باد و حالت دریا بوده و با تغییرات شرایط محیطی مقدار آن کم یا زیاد می‌شود.
- شوری و درجه حرارت آب، به جز در جایی که مستقیماً روی نقطه ریزش مؤثر است، تأثیر کمی بر پدیده گسترش دارند، اما کشش سطحی و ضریب انتشار مستقیماً تأثیر می‌گذارند.
- رشد و افزایش امواج ناشی از باد (بدون در نظر گرفتن گروه موج) هنگام وجود نفت در سطح آب، کاهش می‌یابد و با باد قوی‌تر اثر شدیدتر می‌گردد.
- در انتقال پخش آلودگی، عوامل مؤثر مانند نوسانات دوره‌ای، زمان اقامت آب، ارتفاع جزر و مدی، ارتفاع تراز آب، امواج ایستاده، امواج شکسته و جریان کرانه‌ای مهم می‌باشند.
- پایداری پخش (دوباره به سطح آمدن قطرات بزرگ) به اندازه قطره بستگی دارد.
- قطرات بزرگ با شناوری بالا تمایل دارد به طرف سطح آیند (تعادل جرمی بین لایه اختلاط و لکه سطحی) و قطرات کوچک به دلیل آشفتگی به طرف پایین در ستون‌آب درون آمیخته می‌شوند و خیلی آرام به طرف سطح آب می‌روند و در زمان طولانی فرو می‌روند.
- قطر ذرات نفت خام و میعانات گازی، تابع تنش موبینی نفت- آب، شتاب ثقل، چگالی نفت-آب و ویسکوزیته آب بوده است.
- میعانات گازی با ویسکوزیته و تنش سطحی پایین نسبت به لکه نفت خام با ویسکوزیته و تنش سطحی بالا، سریع‌تر پخش می‌شود.
- در حضور باد، اختلاف سرعت بین لکه نفت خام (و یا میعانات گازی) و ستون آب و همچنین جریان‌های برشی طی ستون آب، دلیل اصلی کشیدگی لکه به درون می‌باشد.
- وجود شناوری باعث می‌شود، عمق پخش کاهش یافته و غلظت در یک یا دو متر اول تجمع داشته باشند.

منطقه مورد مطالعه:

- در زمستان به دلیل باد قوی در خلیج فارس، لکه به دور از ساحل حرکت می‌کند.
- در زمستان به دلیل غالب بودن مؤلفه سرعت ناشی از باد، حرکت جریان از نیمه خلیج به طرف جنوب شرقی، موجب حرکت نفت ریزش شده به دور از ساحل همراه با جریان سطحی به طرف جنوب شرقی را می‌شود.
- پایداری بیشتر (بخصوص در تابستان) موجب می‌شود ذرات نفت خام و میعانات گازی بیشتر در سطح تجمع کنند (بخصوص ذرات بزرگ‌تر).
- تجمع مجدد ذرات به دلیل تأثیر نیروی شناوری (بخصوص در تابستان) می‌باشد و عمق نفوذ ذرات کمتر می‌شود.
- در تابستان به دلیل جریان قوی، لکه به طرف ساحل حرکت می‌کند.
- در تابستان به دلیل کاهش سرعت باد و افزایش سرعت جریان آب، حرکت سطحی ناشی از گرادیان چگالی و پیشروی آب به طرف رأس خلیج، حرکت نفت ریزش شده بیشتر به طرف ساحل می‌باشد.
- جریان‌های ناشی از چگالی در خلیج، فقط در مجاورت شط‌العرب در شمال و تنگه هرمز در جنوب قابل توجه است و در وسط خلیج فارس جریان ناشی از چگالی تأثیر ندارد. در منطقه دریایی عسلویه جریان ناشی از باد و جزر و مد حاکم است.

بحث و نتیجه گیری

فرآیند گستردگی

فرآیند گستردگی به پارامترهای قطر لکه، حجم نفت ریزش شده، سرعت باد و چگالی آب و نفت وابسته می‌باشد (Al-Rabeh *et al.*, 2000). در طول مراحل اولیه بعد از حادثه ریزش نفت در توده آب، فرآیند گسترش بر لکه نفت حاکم بوده که منجر به نازک‌تر شدن لکه، افزایش قطر و مساحت لکه و کاهش ضخامت لکه شده است.

فرآیند تبخیر

فرآیند تبخیر به پارامترهای مساحت لکه نفت، ضخامت لکه، فشار بخار (تابع درجه تبخیر یا هواخوردن، نقطه جوش، دمای نفت)، ثابت گاز (فشار بخار طی قانون ثابت گاز محاسبه می‌شود به دلیل مقادیر پایین فشارهای بخار)، دمای هوای بالای لکه (معمولاً دمای سطحی نزدیک به دمای هوا)، ضریب انتقال جرم تبخیر (تابع خواص و ترکیب نفت، دما، سرعت سطحی باد ۱۰ متر بالای سطح آب، ضریب پسا هوا- دریا «ضریب پسا وابسته به سرعت باد به دلیل تغییر در زبری سطح دریا با حالت دریا می‌باشد»، قطر لکه نفت و عدد اشمیت وابسته می‌باشد.

فرآیند حلالیت

فرآیند حلالیت در ستون آب از یک لکه سطحی نفت مولکول جدا شده مؤلفه نفت و ورود به فاز آب به پارامترهای مساحت لکه نفت، قابلیت حلالیت نفت در آب، ضریب انتقال جرم حلالیت (تابع سرعت آب، ریشه دوم مساحت سطحی لکه نفت، ضریب سینماتیکی آب دریا و ضریب پخش نفت در آب)، اثرات سرعت باد، دما، خواص نفت، غلظت شوری آب (خاصیت مهم آب در تعیین سرعت حلالیت نفت)، وزن مولکولی نفت و اندازه قطر قطره نفت وابسته می‌باشد. پس از طی زمان، ضریب انتقال جرم کاهش داشته و سرعت حلالیت و حجم اتلاف نفت خام افزایش یافته است سرعت حلالیت می‌تواند به دلیل فصل مشترک آب - نفت بالا رود.

فرآیند پخش عمودی

سرعت درون آمیختگی در واحد سطح که جرم پخش شده نفت در ستون آب در مساحت واحد سطح در حادثه شکست موج می‌باشد، این سرعت برای قطرات کوچک و بزرگ نسبت به سپری شدن زمان افزایش یافته ولی سرعت درون آمیختگی قطرات بزرگ به دلیل بالا بودن سرعت بالا روی (شناوری) نسبت به سرعت پخش و تمایل به نزدیک شدن به سطح از قطرات کوچک، بیشتر بوده و قطرات کوچک کمتر شناور بوده و نیروی شناوری و سرعت پخش آنها قابل مقایسه است و بیشتر تمایل دارند به درون ستون آب فرو روند. این قطرات خیلی آرام بالا می‌آیند. سرعت درون آمیختگی قطرات بزرگ بیشتر از قطرات کوچک است.

فرآیند رسوب گذاری / فروروی قطرات نفت (جذب قطرات نفت به رسوب معلق در آب)

به دلیل اعمال شکست موج و آشفتگی آب، لکه نفت نازکتر شده و به ذرات کوچک شکسته می‌شود. این ذرات در آب جابه جا و پخش می‌شوند و به آسانی به‌وسیله مواد معلق گوناگون در آب و مواد بستر جذب می‌شوند.

جذب به‌وسیله رسوب معلق در آب به دو صورت انجام می‌شود: ۱- جذب سطحی به دلیل فعالیت یونها در سطح رسوب و ۲- جذب مویینی به دلیل حفره‌ها (Pores) است. ظرفیت جذب سطحی با معادله جذب لانگیمر محاسبه می‌شود و ظرفیت جذب مویینی در ارتباط با قطر ذرات رسوب می‌باشد. ظرفیت جذب تعادلی، جمع ظرفیت‌های جذب سطحی و جذب مویینی است. ظرفیت جذب تعادلی نفت به رسوب، غلظت اولیه نفت، غلظت رسوب و قطر رسوب بستگی دارد. رسوب گذاری و فرو روی نفت، حاصل فرآیندهای

تبخیر و امولسیون است که رسوب و فروروی نفت ممکن است وقتی رخ دهد که وزن مخصوص نفت بزرگ‌تر از وزن مخصوص آب باشد.

فرآیند امولسیون

ویسکوزیته مؤثر نفت در اثر فرآیند امولسیون نسبت به زمان افزایش می‌یابد و چگالی نفت نیز در اثر فرآیند امولسیون نسبت به زمان افزایش دارد.

منابع

ابوالحمد، گ. ۱۳۸۱. مبانی پالایش نفت. انتشارات دانشگاه تهران. ایران.

پارس. ۱۳۸۳. پروژه فاز یک توسعه میدان گازی پارس جنوبی. نشریه مناطق ویژه اقتصادی انرژی و پتروشیمی، ۱ (۱۰): ۱-۱۲.

دانه کار، ا. و پوروخشوری، ز. ۱۳۷۷. فرآیندآلودگی نفتی دریا. فصلنامه علمی سازمان حفاظت محیط زیست ۱۰ (۲): ۷۲-۵۶.

سازمان حفاظت محیط زیست. ۱۳۷۵. بررسی و مطالعه باقیمانده آلودگی‌های نفتی در ساحل (Tarball) در نوار ساحلی شمال خلیج فارس (سواحل جمهوری اسلامی ایران). دفتر محیط زیست دریایی. ایران.

Al-Rabeh, A.H., Lardner, R.W. & Gunay, N. 2000. Gulf Spill Version 2.0: a Software Package for Oil Spills in the Persian Gulf. Environmental Modelling of Software.15: 425-442.

Comerma, E., Poutchkovsky, A., Guyomarch, J., Cabioc'h, F., Doré, A. & Daniel, P. 2003. Inclusion of an oil database into a forecasting system. Proceedings of AMOP, Victoria, Canada.

Chao, X., Shankar, J. & Cheong, H. F. 2001. Two-and three-dimensional oil spill model for coastal waters. Ocean Engineering, 28 (12):1557-1573.

Chao, X., Shankar, J. & Wang, S. S. Y. 2003. Development and application of oil spill model for Singapore coastal waters. Journal of Hydraulic Engineering, 129 (7):495-503.

Habibi, S., Torabi Azad, M. & Bidokhti, A. A, 2008. A numerical model for the prediction of movement of gas condensate from spill accidents in the Assalouyeh marine region, Persian Gulf, Iran. Indian Journal of Marine Sciences, 37(3): 233-242.

Korotenko, K. A., Mamedov, R. M. & Mooers, C. N. K. 2000. Prediction of the dispersal of oil transport in the Caspian Sea resulting from a continuous release. Spill Science and Technology Bulletin, 6(5-6): 323–339.

Korotenko, K. A., Mamedov, R. M., Kontar, A. E. & Korotenko, L. A. 2004. Particle tracking method in the approach for prediction of oil slick transport in the sea: modelling oil pollution resulting from river input. Journal of Marine Systems, 48(1–4): 159–170.

Lonin, S. A. 1999. Lagrangian model for oil spill deffusion at sea. Spill Science & Technology Bulletin, 5 (5/6): 331-336.

Maure, A., Ceroolaza, M. & Berrios, R.1995. Modelling the behavior of crude oil spills in shallow bodies of water. Environmental Software, 10(4): 241-249.

Papadimitrakis, J., Psaltaki, M. Christolis, M. & Markatos, N.2005. Three-dimensional oil spill modeling for coastal waters. Journal of Marine Environmental Engineering, 7(4): 249-260.

Reji, k.P. & Renu, P. 2013. Review on marine oil spill trajectory Modeling and ESI Mapping with a focus on the Kerala coastal environment. IOSR Journal of Engineering, 3(11): 56-61.

Reed, M., Johansen, O., Brandvik, P. J., Daling, P., Lewis, A., Fiocco, R., Mackay, D. & Prentki, R. 1999. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art. Spill Science & Technology Bulletin, 5(1):3-16.

Riazi, M. R. & Edalat, M.1996. Prediction of the rate of oil removal from seawater by evaporation and dissolution. Journal of Petroleum Science and Engineering, 16: 291-300.

Riazi, M. R. 1999. Modelling of the rate of oil spill disappearance from seawater for Kuwaiti Crude and its products. Chemical Engineering Journal, 73: 161-172.

Task Committee (ASCE), 1996. State – Of – The – Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. Journal of Hyadraulic Engineering,122(11):pp.594-609.

Wang, S. D., Shen, Y. M. & Zheng, Y. H. 2005. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. Ocean Engineering, 32 (13):1556-1571.

Singapore coastal waters. Journal of Hydraulic Engineering, 131(1):69-72.

Yapa, P. D. 2005. Discussion of development and application of oil spill model for