حذف لکه‌های نفتی و شبیه‌سازی فرآیند تقطیر اتمسفری آن

شبنم ملایونسی

۱*- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

*ایمیل نویسنده مسئول: sh.mollayouneci@ut.ac.ir

تاریخ دریافت : ۱۴۰۰/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش : ۱۴۰۰/۰۴/۲۷

چکیده

لکه نفتی[1] یک معضل زیست محیطی است که با نشت نفت در محیط زیست پدیدار می‌شود و باعث به وجود آمدن اثرات جبران‌ناپذیری در زندگی انسان و آبزیان می‌شود به همین دلیل برای جلوگیری از انتشار این آلودگی راهکارهای متفاوتی ارائه شده است. استفاده از جاذب‌ها یکی از این روش هاست، این روش با اینکه کمک شایانی به حذف لکه‌های نفتی می‌کند ولی جداسازی این جاذب‌ها از آب خود یک مشکل بزرگ می‌باشد. وسعت آسیب‌های ناشی از آلودگی‌های نفتی بستگی به شاخص‌هایی مانند شرایط بروز حادثه و شرایط زیست محیطی دارد. سالانه بیش از ۵۰۰ لکه نفتی معادل ۵/۲ میلیون تن نفت وارد آب‌های آزاد می‌شوند. تاکنون راه حل‌های گوناگونی برای کم کردن میزان آلودگی‌های نفتی ارائه شده است. بسیاری از محققان برای کم کردن میزان آلودگی‌های نفتی تحقیقات گسترده‌ای را انجام داده‌اند. این تحقیقات منجر به تولید گروهی از مواد شیمیایی شده که جذب نفت در آب را به صورت قابل توجهی کاهش می‌دهند. اکثریت این مواد از نوع سورفکتانت‌ها و حلال‌های آلی می باشند. بدون شک یکی از عوامل بسیار موثر حذف مواد نفتی در دریا تجزیه میکروبی می‌باشد. مواد نفتی نزدیک سطح آب و مواد نفتی که به طور کامل در آب پراکنده شده‌اند به راحتی تحت تجزیه میکروبی قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی

نشت نفت، لکه نفتی، تقطیر اتمسفری، ظرف تبخیر ناگهانی

Remove Oil Stains & Simulation of Its Atmospheric Distillation Process

Shabnam mollayouneci *

1*. MSc student, Department of Environment, University of Tehran, Teharn, Iran

*Email Address: sh.mollayouneci@ut.ac.ir

Abstract

Oil slick is an environmental problem that occurs with oil spills in the environment and causes irreversible effects on human and aquatic life, so different solutions have been proposed to prevent the spread of this pollution. The use of adsorbents is one of these methods, this method, although it helps to remove oil stains, but the separation of these adsorbents from the water itself is a big problem. The extent of damage from oil pollution depends on characteristics such as accident conditions and environmental conditions. Every year, more than 500 oil wells equivalent to 5.2 million tons of oil enter the open waters. So far, various solutions have been proposed to reduce the amount of oil pollution. Many researchers have done extensive research to reduce the amount of oil pollution. This research has led to the production of a group of chemicals that significantly reduce the absorption of oil in water. The majority of these substances are surfactants and organic solvents. Undoubtedly, one of the most effective factors in the removal of petroleum products in the sea is microbial decomposition. Petroleum materials near the surface of the water and petroleum materials that are completely dispersed in the water are easily degraded.

inhaled by inhabitants and causes serious problems for human body. Among Streets, roads and highways of Tehran, Enqelab Street is one of the busiest and connects Enqelab square to Imam Hossein Square.

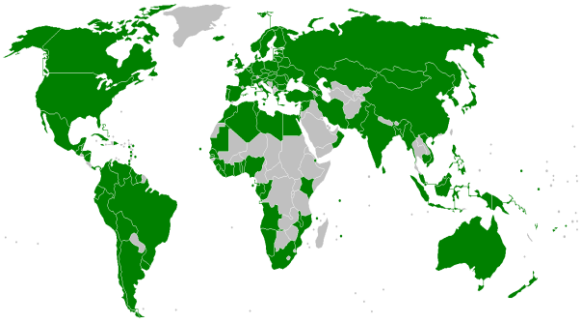
Keywords

Oil Spill, Oil Slick, Atmospheric Distillation, Sudden Evaporation Vessel

1. Oil Stain

۱- مقدمه

نفت اگرچه یک منبع بسیار با ارزش جهت تولید انرژی و بسیاری از مواد شیمیایی است اما بی‌توجهی در مراحل استخراج و انتقال آن می‌تواند آلودگی‌های زیست محیطی فراوانی را باعث شود که بعضا غیر قابل جبران هستند. آلوده شدن محیط زیست به مواد نفتی در بعضی موارد به صورت طبیعی حادث می‌شود. در بعضی مناطق نفت‌خیز جهان به علت نزدیک بودن منابع نفتی به سطح زمین نفت همچون چشمه‌ای جوشان از دل زمین خارج می‌شود و محیط پیرامون خود را آلوده می‌کند. بروز چنین مواردی بسیار نادر می‌باشد و بیشترین آلودگی‌های نفتی ناشی از نفت خام یا فرآورده‌های آن ناشی از فعالیت‌های انسانی است. از آن‌جا که معمولا مناطق نفت‌خیز اکثرا در بستر دریاها و مناطق ساحلی قرار دارند در هنگام استخراج، نشت نفت در مسیرهای مختلف استخراجی می‌تواند به آب‌های دریا و یا اقیانوس و همین‌طور به ساحل و زمین‌های مجاور آن راه یابد و محیط زیست را آلوده کند. مورد دوم در ایجاد آلودگی‌های نفتی در مسیر انتقال این ماده جهت تحویل به مقصدی دیگر صورت می‌گیرد که می‌تواند در اثر نشت از لوله‌های انتقال باشد و یا ناشی از تانکرهای اقیانوس‌پیمای نفتکش این نشت صورت گیرد. از آن‌جا که نفت از مواد شیمیایی مختلفی تشکیل شده است راه یافتن آن به محیط زیست می‌تواند بسیاری از مشکلات را به بار آورد که شمار زیادی از آن‌ها امروزه شناخته شده‌اند و شاید بسیاری دیگر هم بعدها شناخته شوند. وقتی نفت خام به سطح زمین و یا آب راه پیدا می‌کند اجزای سبک آن که بسیار سمی هستند مثل بنزن و تولوئن سریع بخار می‌شوند و هوای آن منطقه را آلوده می‌نمایند اما قسمت‌های سنگین‌تر ترکیبات نفتی برای مدت‌های طولانی در محیط زیست باقی می‌مانند و خاک زمین و آب دریاها و اقیانوس‌ها و همینطور سواحل را آلوده می‌کنند، در این میان جانداران دریایی دچار آسیب شده و از بین می‌روند. بنابراین اگرچه نفت و ترکیبات حاصل از آن برای حیات ضروری هستند اما بی‌توجهی در تولید و انتقال آن و آلوده شدن محیط زیست به این مواد می‌تواند حیات را از انسان‌ها و سایر موجودات این کره خاکی بگیرد. وسعت آسیب‌های ناشی از آلودگی‌های نفتی بستگی به شاخص‌هایی مانند شرایط بروز حادثه و شرایط زیست محیطی دارد. سالانه بیش از ۵۰۰ لکه نفتی معادل ۵/۲ میلیون تن نفت وارد آب‌های آزاد می‌شوند. تاکنون راه حل‌های گوناگونی برای کم کردن میزان آلودگی‌های نفتی ارائه شده است. بسیاری از محققان برای کم کردن میزان آلودگی‌های نفتی تحقیقات گسترده‌ای را انجام داده‌اند. این تحقیقات منجر به تولید گروهی از مواد شیمیایی شده که جذب نفت در آب را به صورت قابل توجهی کاهش می‌دهند. اکثریت این مواد از نوع سورفکتانت‌ها[1] و حلال‌های آلی[2] می باشند. استفاده از مواد جاذب یکی از این روش‌های حذف آلودگی‌های نفتی در دریاست. جاذب‌ها از نظر جنس به سه دسته جاذب‌های طبیعی، جاذب‌های طبیعی فرآوری شده و جاذب‌های سنتزی تقسیم می‌شوند. علاوه بر تقسیم‌بندی فوق جاذب‌ها را می‌توان به سه دسته جاذب‌های آلی، جاذب‌های معدنی و جاذب‌های سنتزی تقسیم کرد. یکی از بهترین روش‌های حذف آلودگی نفتی در دریا استفاده از باکتری‌های نفت خوار یا همان روش بیولوژیکی می‌باشد، این روش به عنوان جدیدترین و تنهاترین روش طبیعی در استفاده از باکتری زنده به منظور از بین بردن آلودگی‌های نفتی است. به نظر می‌رسد که برای مقابله با آلودگی محیط زیست دریایی، به یک همکاری بین المللی نیاز باشد که خوش بختانه زمینه‌های آن فراهم آمده است. در شکل ۱ نمایی از کشورهای عضو کنوانسیون مارپل[3] به رنگ سبز نشان داده شده است. وظیفه این کشورها پذیرش مقابله با آلودگی نفتی در مناطق تحت پوشش آن‌هاست.



شکل ۱- نمایی از کشور های عضو کنوانسیون مارپل

- **آلودگی های نفتی دریا**

نفت یک فرآورده سمی برای سیستم‌های بیولوژیک است و آلوده کننده اصلی محیط زیست محسوب می‌شود. در صورت وقوع آلودگی در خشکی مساله قابل حل است وبه راحتی برطرف می‌شود، اما از بین بردن آلودگی دریایی مشکل است. هر معیاری که فراوانی، سطح، مدت یا شدت آلودگی سیستم‌های دریایی به وسیله نفت خام را کاهش دهد. توانایی نگهداری و استخراج آن را به عنوان منبع اولیه انرژی و مواد خام افزایش می‌دهد. بررسی‌ها نشان دهنده این واقعیت است که آلودگی‌های نفتی به سه نوع شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی در محیط زیست نمایان می‌شوند. عوامل شیمیایی، آلودگی نفتی در محیط زیست شامل پخش آمونیاک، فنل، سیانور، فسفر، فلزهای سنگین، هیدروکربن‌های سبک و سنگین، دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن حاصل از احتراق نفت، کلریدهای سدیم، منیزیم، سولفات، سیلیس و اکسیدهای آهن موجود در نفت که موجب جرم گرفتگی و خوردگی تاسیسات می‌شوند، می‌باشد. عوامل فیزیکی آلودگی نفتی در محیط زیست شامل پخش چربی، روغن، مواد معلق، تغییر درجه حرارت، رنگ و بو، نشت نفت به هنگام استخراج و حمل و نقل، گل حفاری، آب شور فرآیند حفاری و خرده سنگ‌های حاصل از استخراج می‌باشند. عوامل بیولوژیکی آلودگی نفتی در محیط زیست شامل افزایش میزان اکسیژن خواهی شیمیایی[4] و اکسیژن خواهی بیوشیمیایی[5] می‌باشد. مواد نفتی با پخش شدن در محیط زیست لایه‌ای غیر قابل نفوذ ایجاد می‌کنند که در محیط آبی از رسیدن اکسیژن به موجودات آبزی و در محیط خشکی از فعالیت‌های حیاتی موجود می‌کاهند.

- **عملیات تانکرها**

تولید جهانی نفت حدود ۳ بیلیون تن در سال بوده که نیمی از آن از طریق دریاها انتقال داده می‌شود. پس از این که یک تانکر محموله

1 Surfactant
2 Organic Solvents
3 International Convention on Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)
4 COD
5 BOD

نفت خود را تخلیه نمود، می‌بایست در سفر بازگشت به مناطق نفتی و برای حفظ تعادل، مخازن خود را با آب دریا پر کند. این آب توازن، به طور معمول در مخازنی که پیش‌تر حاوی نفت بوده‌اند، ذخیره می‌شود. طی تخلیه محموله مقداری از نفت با چسبیدن به دیواره‌ها در مخزن باقی می‌ماند که در یک تانکر ۲۰۰۰۰۰ تنی این مقدار تا ۸۰۰ تن هم می‌رسد. آب توازن کثیف به همراه نفت، طی سفر بازگشتی به دریا تخلیه می‌شود. این نوع از رفتار، فراهم آورنده قسمت‌های اعظمی از آلودگی نفتی اقیانوس‌های جهان است. البته سیستمی تحت عنوان تجهیزات نظارت بر تخلیه نفت[1] در کشتی‌ها تعبیه شده است تا آب تخلیه شده از کشتی را چک نماید و در صورتی که آلودگی آن از ppm ۱۵ تجاوز کند به طور خودکار سیستم تخلیه را قطع نماید.

- **کنترل کیفی آنالیز**

برای تعیین کیفیت روشهای آنالیز، دقت و صحت بررسی گردید، بدین منظور در هر مرحله، حداقل یک نمونه دوبار تحت آنالیز قرار گرفت. میزان اختلاف نتایج حاصله بیانگر دقت روش آنالیز می‌باشد. میزان درصد اختلاف (دقت) برای سنجش فلزات سنگین در خیابان انقلاب اسلامی‌تهران را در جدول ۱ مشاهده می‌نمایید. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود میزان دقت مابین ۳ تا ۱۷ درصد متغیر است که در محدوده قابل قبول دستورالعمل آژانس حفاظت محیطزیست آمریکا[1] می‌باشد (Chambers. ; 1983 Pardakhti, 2011).

جدول ۱- میانگین صحت روش آنالیز فلزات سنگین

میانگین درصد بازیافت		
کروم	کادمیوم	مس
٪۸۶	٪۹۲	٪۹۳
روی	منگنز	نیکل
٪۹۱	٪۹۰	٪۸۴
سرب	ارسنیک	آهن
٪۸۶	٪۸۶	٪۸۵

- **حوضچه تعمیر**

تمام کشتی‌ها از جمله تانکرهای نفتی به طور دوره‌ای برای سرویس تعمیرات، پاکیزگی بدنه و مانند آن به حوضچه تعمیر منتقل می‌شوند. برای اجتناب از خطر انفجار گازهای نفتی لازم است که تمام نفت موجود در محفظه باز تانکرها و سوخت تمامی کشتی‌ها، به طور کامل خارج شود و امکانات دریافت کننده پساب در حوضچه-های تعمیر کشتی فراهم شوند و این خود می‌تواند باعث آلودگی دریاها شود.

- **پایانه های دریایی**

تصادم‌های ناشی از اشتباه‌های انسانی و اختلال در خط لوله، یک جزء جدانشدنی از بارگیری نفت بر روی تانکرها و تخلیه آن در پایانه‌ها است. مقدار کم این ورودی نشان دهنده مراقبت انجام گرفته برای کاهش این تصادم‌ها است.

- **تصادم تانکرها**

هر ساله تعدادی تصادم با حضور تانکرهای نفتی روی می‌دهد. اکثر این حوادث بدون نشت نفت یا به صورت کم اهمیت بوده و تصادم به محفظه بار صدمه نزده، شناور صدمه دیده نجات یافته یا این که محموله آن به تانکرهای دیگر منتقل می‌شود. فجایع کشتیرانی اصلی در مورد تانکرها موضوع متفاوتی هستند حوادث کشتیرانی نزدیک به خشکی و در تنگه‌های باریکی مانند تنگه مالاکا[2] و در نزدیکی ورودی بنادر، جایی که تراکم کشتیرانی بالا است، اتفاق می افتند. در نتیجه اکثر حوادث تانکرها نزدیک به ساحل بوده و نفت نشت یافته، موجب آلودگی نفتی در ساحل خواهد شد.

- **سرنوشت نفت در دریا**

نفت خام و محصولات تقطیر نفتی که وارد محیط زیست دریا می-شوند به سرعت در معرض تغییر فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قرار می‌گیرند. فرآیندهای هوازدگی شامل تبخیر، حل شدن، پراکندگی، اکسیداسیون فتوشیمیایی، امولسیون آب در نفت، جذب به مواد معلق و ته‌نشین شدن می‌باشد. فرآیندهای بیولوژیکی هم شامل هضم توسط میکروارگانیسم‌ها و تجزیه میکروبی می‌باشد. این فرآیندها اغلب هم زمان اتفاق می‌افتند و تغییرات مهمی را در ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی آلاینده اولیه ایجاد می‌کنند که به نوبه خود سرعت و تاثیرپذیری تجزیه بیولوژیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

- **تجزیه ی بیولوژیکی نفت**

نفت خام، یک مخلوط پیچیده‌ای از هزاران ترکیب شیمیایی مختلف می‌باشد. ترکیب نفت بسته به محل تولید نفت بسیار منحصر به فرد می‌باشد و با توجه به میزان پالایش آن تغییر می‌کند. بسیاری از ترکیبات نفت در میزان فراریت، گرانروی و قابلیت تجزیه بیولوژیکی با هم متفاوت هستند. برخی ترکیبات به سادگی تجزیه شده اما برخی هم مقاوم به تجزیه بیولوژیکی هستند و گاهی برخی غیرقابل تجزیه بیولوژیکی هستند. هیدروکربن‌های نفتی را می‌توان به طور کلی به چهار دسته بزرگ تقسیم‌بندی کرد: هیدروکربن‌های اشباع، آروماتیک‌ها، آسفالتین‌ها و رزین‌ها. هیدروکربن‌های اشباع دسته‌ای هستند که پیوند کربن- کربن در آن‌ها یگانه است و بزرگترین گروه موجود در نفت می باشند. در میان این هیدروکربن‌ها، آلکان‌های نرمال یا زنجیره مستقیم، سریع‌تر و بیشتر از بقیه تجزیه می‌شوند. ترکیبات با زنجیره بیش از ۴۴ اتم کربن می‌توانند توسط میکروب‌ها متابولیزه شوند. اما آن هایی که ۱۰ تا ۲۴ اتم کربن دارند برای متابولیزه ساده‌تر هستند. به طور نسبی زنجیره‌های کوتاه‌تر حدود(C_{12})راحت‌تر تبخیر می‌شوند. تنها، چند گونه می‌توانند آلکان‌های C_1- C_4 را مصرف کنند. آلکان‌های C_5 تا C_9 توسط برخی از میکروارگانیسم‌ها قابل تجزیه می‌باشند اما برخی سمی هستند. آلکان‌های شاخه‌دار نسبت به تجزیه بیولوژیکی مقاوم‌تر از آلکان‌های نرمال هستند اما نسبت به آلکان‌های حلقوی(نفتالن‌ها) که اتم‌های کربن به صورت حلقوی قرار دارند، راحت‌تر تجزیه می‌شوند. در آلکان‌های شاخه‌دار، هر چه تعداد شاخه‌ها افزایش می‌یابد نسبت به تجزیه بیولوژیکی مقاوم‌تر می‌شوند. در غلظت‌های پایین، آلکان‌های حلقوی ممکن است با

1. Oil Discharge Monitoring Equipment or ODME

2 .Malacca Strait

سرعت‌های معمولی تجزیه شوند. آلکان‌های سنگین‌تر ۵ تا ۲۰ درصد نفت سبک و بیش تر از ۶۰ درصد نفت سنگین را تشکیل می‌دهند. هیدروکربن‌های آروماتیک حداقل دارای یک حلقه بنزن یا بنزن جانشین شده می‌باشند. آروماتیک‌های با وزن مولکولی کم تبخیر شده و برای محیط زیست دریایی سمی هستند و به راحتی تجزیه می‌شوند. نفت سبک شامل ۲ تا ۲۰ درصد آروماتیک‌های سبک می‌باشد، در حالی که نفت سنگین دارای ۲ درصد یا کمتر آروماتیک می‌باشد. هر چه قدر که وزن مولکولی و پیچیدگی ترکیبات آروماتیک افزایش می‌یابد، کمتر مورد تجزیه قرار می‌گیرند. بنابراین سرعت تجزیه پلی‌آروماتیک‌ها کمتر از مونوآروماتیک‌ها می‌باشد. آروماتیکهای با ۵ حلقه یا بیشتر به راحتی مورد حمله میکروب‌ها قرار نمی‌گیرند و ممکن است به مدت طولانی در محیط زیست باقی بمانند. آروماتیکه‌ایی با وزن مولکولی بالا، ۲ تا ۱۰ درصد نفت سبک و بیش از ۳۵ درصد نفت سنگین را تشکیل می‌دهند. آسفالتین شامل ترکیباتی است که یا قابل تجزیه بیولوژیکی نیستند و یا خیلی آهسته تجزیه می‌شوند. تاربال‌ها به سختی تجزیه می‌شوند، زیرا سطح تماس کوچک آن‌ها، در دسترس بودن اکسیژن و مواد معدنی دیگر را محدود می‌کند. رزین‌های موجود در نفت خام شامل ترکیباتی حاوی نیتروژن، سولفور و یا اکسیژن می‌باشند. نفت سبک شامل ۱ تا ۵ درصد آسفالتین و رزین و نفت سنگین و هوازده ممکن است بیش از ۲۵ ٪ آسفالتین و ۲۰ ٪ رزین داشته باشند. به طور خلاصه، سرعت تجزیه بیولوژیکی در مورد هیدروکربن‌های اشباع بیشترین مقدار است و به دنبال آن آروماتیک‌های سبک با آروماتیک‌های با وزن مولکولی زیاد، آسفالتین‌ها و رزین‌ها که سرعت تجزیه کمی دارند، می‌باشند. وقتی نفت ریخته شده در معرض تغییرات آب و هوایی قرار میگیرد(نفت هوازده) ترکیب آن تغییر می‌کند، آروماتیک‌های سبک و آلکان‌ها به سرعت تبخیر و یا حل شده و توسط میکروب‌ها متابولیزه می‌شوند.

- **فرایندهای میکروبی و تجزیه ی نفت**

لکه‌های نفتی در آب تمایل دارند پخش شوند و یک لایه نازک روی آب تشکیل دهند. در اثر وزش باد و عملکرد امواج آب، حالت امولسیونی از آب در نفت یا از نفت در آب تشکیل می‌شود. پخش هیدروکربن‌ها در ستون آب، سطح تماس آن را با آب افزایش می‌دهد و لذا مستعد تجزیه میکروبی می‌شوند. با این وجود، مقادیر بزرگ نفت روی آب باعث کم شدن فرآیند تجزیه بیولوژیکی می‌شود. توده‌های همانند قیر، که در اثر تجمع بزرگ ترکیبات نفتی تجزیه نشده حاصل می‌شوند به دلیل محدودیت سطح تماس با آب کمتر توسط میکروارگانیسم‌ها مورد تجزیه واقع می‌شوند.

- **فعالیت آب**

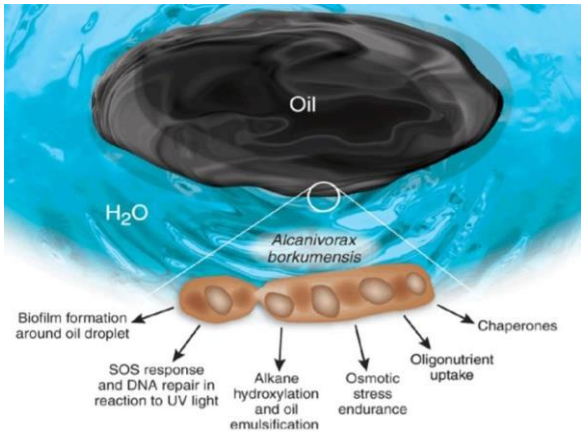
فعالیت یا پتانسیل آب موجود در خاک‌ها بین صفر تا ۹۹درصد متغیر است در حالی که فعالیت آب در محیط‌های آبی ۹۸٪ بوده و ثابت است. تجزیه بیولوژیکی در محیط‌های غیرآبی ممکن است به دلیل محدودیت دسترسی به آب برای رشد و انجام متابولیسم میکروب‌ها محدود شود.مشاهده شده است که سرعت مناسب تجزیه بیولوژیکی هیدروکربن‌ها در غلظت‌های اشباع ۳۰ تا ۹۰ درصد آب انجام می‌پذیرد. در این رابطه عنوان شده است که عدم تجزیه توده‌های قیر مانند نفتی که در کناره‌های ساحل نشست می‌کنند به دلیل محدودیت دسترسی به آب (فعالیت بسیار پایین) می‌باشد.

- **عوامل دیگر**

متغیرهای دیگری شامل فشار، میزان شوری و pH ممکن است اثر مهمی روی میزان تجزیه بیولوژیکی داشته باشد. افزایش فشار باعث کاهش میزان تجزیه‌پذیری می‌شود. بنابراین فشار ممکن است در اعماق اقیانوس عامل مهمی باشد. نفتی که به اعماق اقیانوس می‌رسد، خیلی آهسته تجزیه می‌شود و ممکن است به مدت طولانی در محیط باقی بماند. قابل مشاهده است که میکروارگانیسم‌ها با میزان شوری موجود در اقیانوس های جهان، به خوبی سازگاری یافته‌اند. حدود pH ممکن است بر توانایی میکروب جهت تجزیه هیدروکربن‌ها موثر باشد. اما همانند شوری، pH به میزان زیادی در اقیانوس‌ها متغیر نمی‌باشد و در حدود ۸/۱-۷/۶ باقی می‌ماند و به نظر می‌رسد که اثر مهمی روی میزان تجزیه بیولوژیکی در بیشتر محیط‌های دریایی داشته باشد. در باتلاق‌های نمکی، pH ممکن است به ۵ هم برسد و بنابراین میزان تجزیه را در این مناطق کاهش دهد.

- **باکتری های نفت خوار**

باکتری‌های دریایی جدیدی که قادر به تجزیه آلودگی‌های نفتی در محیط‌های دریایی می‌باشند از ناحیه‌ای در نزدیکی جزیره بورکوم[1] در دریای شمال، شناسایی شده‌اند. این باکتری‌های دریایی میله‌ای شکل، گرم منفی و هوازی اجباری بودند. این باکتری‌ها هیدروکربن‌های آلیفاتیک مختلفی مانند هیدروکربن‌های آلیفاتیک خطی یا زنجیره‌ای شاخه‌دار و ترکیبات آروماتیک مانند تولوئن، نفتالین، فنانترن و آنتراسن، پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها یا پلیساکاریدها را به عنوان تنها منبع کربن و انرژی مورد استفاده قرار می‌دهند. این باکتری‌ها از نظر فیلوژنتیکی سابقه قبلی نداشته و تحت عنوان آلکانیوراکس[2] طبقه‌بندی شده‌اند. این باکتری‌ها قادرند در NaCl با غلظت M ۸۰-۳۵ زندگی کنند. این میکروارگانیسم‌ها، فیزیولوژی و ترکیب سلولی غیرعادی دارند. کوچک بوده، حجم آن ها ۲۰ میکرومتر مکعب است و سیتوپلاسم رقیقی دارند. این باکتری‌ها فقط نصف تعداد پروتئین‌های بیان شده به وسیله اشریشیا کلی را بیان می‌کنند و ژنوم آن‌ها کوچک است. در شکل۲، نمایی از بخش‌های مختلف باکتری‌های نفت‌خوار و عملکرد آن‌ها تشریح داده شده است.



شکل ۲- نمایی از بخشهای مختلف باکتری نفتخوار و عملکرد آن

یکی از روش‌های نوینی که در حال حاضر در کشور بومی گردیده است استفاده از باکتری‌های نفت‌خوار به منظور از بین بردن آلودگی‌های نفتی

1 Borkum Island
2 Alcanivorax

می‌باشد، در حال حاضر این مساله به طور ویژه‌ای در دانشگاه های صنعتی اصفهان، شهید باهنر کرمان، جهاد دانشگاهی و شرکت نفت مورد مطالعه قرار گرفته و باکتری‌های بومی در منطقه خلیج فارس و دریای خزر به منظور از بین بردن و شکستن آلودگی‌های نفتی شناسایی شده‌اند. با توجه به این‌که آلودگی نفتی امری اجتناب ناپذیر است و کشور ما نیز از آن مستثنی نیست، باید آمادگی لازم برای مقابله با آلودگی نفتی وجود داشته باشد که یکی از بهترین روش‌ها استفاده از روش‌های مولکولی و اکولوژیکی است. به دلیل این که تجزیه زیستی مشتقات نفتی در محیط‌های دریایی موثرتر و قوی‌تر از روش‌های فیزیکی و شیمیایی است. آلودگی نفتی در خلیج فارس بسیار بالاست و در واقع لقب آلوده‌ترین دریای جهان را به خود داده است. استفاده از باکتری‌ها جهت از بین بردن آلودگی نفتی در خلیج فارس بهترین روش استفاده از روش‌های مولکولی و بیولوژیکی می‌باشد که هم واسطه ایجاد نمی‌کند و هم از نظراقتصادی به صرفه است. با توجه به تحقیقات گسترده انجام یافته در کشور و سویه‌های به دست آمده در مقیاس نیمه صنعتی در حوضچه‌های مصنوعی و با بررسی یک سری از تغییرات مشخص شده که ژن آلکان هیدروکسیلاز از فراوانی بالاتری در این سویه‌ها برخوردار است. بنابراین می‌توان با کمک این باکتری به راحتی و با حداقل امکانات آلودگی‌های نفتی را ازبین برد. همچنین با تجهیز مراکز مقابله با آلودگی نفتی به مواد حاوی باکتری‌های نفتخوار می‌توان با اطمینان بیشتری نسبت به قبل در مبارزه و از بین بردن آلودگی‌های نفتی گام برداشت. در شکل ۳ نمایی از دو نوع ترکیب حاوی باکتری-های نفت‌خوار نشان داده شده است.

شکل ۳- دو ترکیب حاوی باکتری‌های نفت‌خوار

- **مروری بر سایر پژوهش ها**

لی و همکارانش[1] برای حذف نفت از آب از فوم پلی‌اورتان[2] الفینی اصلاح شده استفاده کردند. آنها برای این آزمایش از پیوند پلیمریزاسیون بین دو مونومر الفینی که مونومر اول از حل کردن دیوینیل بنزن[3]با بنزوئیل پراکسید[4](به عنوان آغازگر) در تولوئن(به عنوان حلال) تشکیل شد و از فوم پلی‌اورتان به عنوان مونومر دوم استفاده کردند. آن‌ها در این بررسی به این نتیجه رسیدند که به ازای هر گرم پلی‌اورتان اصلاح شده ۴۶/۹۸ گرم دیزل و ۴۱/۴۲ گرم نفت سفید[5]از آب حذف می‌شود.

1 Le et al.
2 Polyurethane (PU)
3 Divinylbenzene (DVB)
4 Benzoyl Peroxide (BPO)
5 Kerosene

همچنین میزان آب جذب شده همراه لکه نفتی۵۰٪ نسبت به پلی‌اورتان اصلاح نشده کاهش می‌یابد. الگا و همکارانش[6] از جاذب‌های گوناگونی برای حذف نفت از آب استفاده کردند که از جمله این جاذب‌ها می‌توان به کربن تترا کلرید، خزه شووید(که حاوی الیاف پلی پروپیلن است) ، متیلن آبی[7]و خزه پیت[8](زغال سنگ نارس) کربونیزه اصلاح شده با اسید استیک اشاره کرد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که خزه پیت کربونیزه اصلاح شده با اسید استیک در دمای ۲۵۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ظرفیت جذب بالاتری نسبت به بقیه مواد که به عنوان جاذب استفاده شده بودند را دارد به طوری که این ماده میزان مواد نفتی باقی مانده در آب را به کمتر از gr/lit ۰/۰۳ می‌رساند. گلبلاوب و همکارانش[9]طی یک بررسی گسترده جاذب‌های گیاهی که برای حذف نفت از آب کاربرد دارند را مورد مطالعه قرار دادند که نتایج این بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- ظرفیت جذب جاذبهای مختلف

Sorbent	Sorption capacity kg/kg
Activated carbon AU-3 (all-Union State Standard 20464-75)	4.5-10
Macropore technical carbon	4-4.5
Peat sorbent *Sorboyl S8*	8-10
Lessorb-extra	8
Phenol formaldehyde resin (powder)	4.42
Uremiks-913	25
Peat Sorb	4-6
Sawdust	4.5-8.5
Fallen leaves	8-9
Waste of grass processing	4-6.5
Peat	8-10
Rice husk	6-10
Cotton felt	6-30
Hemp rope	10-13
Sunflower husk	6-8
Waste paper	8-9.5
Corncobs	5-7
Wheat straw (shreddings)	4.1
Flax shive	5-10
Knop (flocks)	8-13

لین و همکارانش[10]از الیاف پلی استایرن[11]برای حذف نفت از آب استفاده کردند. آن‌ها در این آزمایش الیاف پلی‌استایرن که ساختار متخلخل دارد و به شدت آب‌گریز است را با استفاده از فرآیند الکتروسپینگ[12] یک مرحله‌ای تولید کردند. مکانیسم جذب این الیاف به صورت جذبی یا مویرگی و یا ترکیبی از هر دو می‌باشد. این جاذب می‌تواند در هر بار استفاده g/g ۱۱۳/۸۷ نفت را از آب جدا کند که این میزان جداسازی ۴-۳ برابر بیشتر از جاذب‌های طبیعی و الیاف پروپیلنی است. لازم به ذکر است که این جاذب، جذب نسبتا بالایی برای روغن‌های خوراکی مانند روغن دانه آفتابگردان[13](g/g ۹۶/۸۹) و روغن لوبیا[14](g/g ۱۱۱/۸۰) دارد.

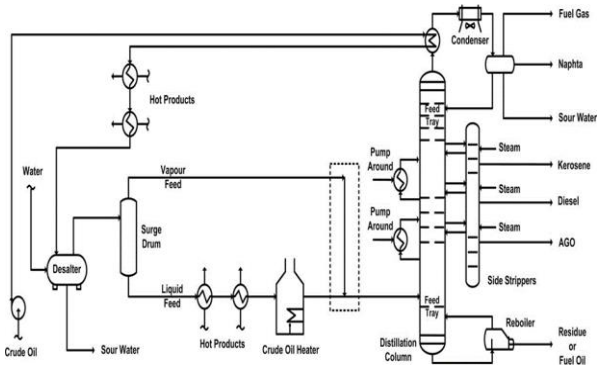
6 Olga et al.
7 Methylene Blue
8 Peat Moss
9 Galblaub et al.
10 Lin et al.
11 Polystyrene (PS)
12 Electrospinning Process
13 Seed Oil
14 Bean Oil

- **اسفنج‌ها آخرین راه‌حل پاک‌سازی لکه‌های نفتی در دریاها و اقیانوس‌ها**

نشت نفت برای محیط‌های دریایی فاجعه بار است، به خصوص اگر به سرعت عملیات پاک‌سازی صورت نگیرد. در زمانی که یک نشت در وسط اقیانوس رخ می‌دهد جایی که خدمه ساعت‌ها از ساحل فاصله دارند این امر می‌تواند دشوارتر باشد و طی چند ساعت، گسترش نفت و فرورفتن آن در اعماق آب پیشرفت می‌نماید. دانشمندان آزمایشگاه ملی آرگون[1] مواد جدیدی به نام اسفنج اولو[2] که از اسفنج و مولکول‌های جاذب نفت تشکیل شده است را طراحی نموده‌اند. این ماده می‌تواند نفت را در سطح آب و زیر آب جذب نماید و پس از برداشتن اسفنج، هر دو، هم اسفنج و هم نفت بازیافت شده را می‌توان مورد استفاده مجدد قرار داد. تکنیک‌های سنتی مانند سوزاندن یا برداشت سطحی نفت، فقط زمانی کاربرد دارند که نشت نفتی روی سطح آب متمرکز شود. اما در موارد شدید، مانند نشت نفت خلیج مکزیک[3] در سال ۲۰۱۰، دانشمندان دریافته‌اند که نفت در سطوح زیرین، جایی که حذف آن مشکل است، جمع می‌گردد. اسفنج اولو می‌تواند به سرعت جذب نفت موجود در سطوح زیرین را نیز انجام دهد و در واقع این اسفنج به عنوان یک منبع برداشت‌کننده امن عمل می‌نماید. این اسفنج ترکیبی از فوم پلی اورتان است که در بالشتک‌های مبلمان و عایق‌ها است. نوآوری اصلی در این‌جا استفاده از اکسید فلزی است که مولکول‌های جذب‌کننده نفت را به فوم متصل می‌کند. در آینده، انواع دیگری ازمولکول‌های جاذب آلاینده‌ها می‌توانند به این اسفنج‌ها متصل شوند و نقش کمک‌کننده در تصفیه آلاینده‌ها را ایفا کنند. دانشمندان صدها آزمایش در آزمایشگاه تحقیق و آزمایش انرژی انرژی تجدیدپذیر نیوجرسی انجام دادند و با موفقیت توانسته‌اند دیزل و نفت خام را از سطح آب جمع‌آوری نمایند. یکی از محاسن این ماده مقاومت آن است به نقل از یکی از دانشمندان این پروژه، اسفنج‌های به کار گرفته شده در طول آزمایش به هیچ وجه شکسته نمی‌شوند؛ بدین معنا که می‌توانند از لحاظ تئوری دوباره و دوباره بر روی یک سایت جهت پاک‌سازی استفاده شوند و نفت را از آب خارج نمایند. در همین حال، این مهم که که نفت بازیافتی را می‌توان دوباره استفاده کرد عامل مشوق موثری برای شرکت‌های نفتی به منظور استفاده از این ماده است. اسفنج اولئو می‌تواند تأثیر جدی بر روی تمیز کردن نشت نفت داشته باشد، اما همچنین می‌تواند در موقعیت‌های معمول‌تر مانند تمیز کردن آب در بنادر، جایی که ترافیک حمل بار سنگین باعث آلودگی آب می‌شود مورد استفاده قرار گیرد.

- **شبیه سازی فرآیند**

از آنجا که شبیه‌سازی فرآیند مستلزم شناخت و درک صحیح ازآن است، شرح مختصری از فرآیند واحد مزبور ضروری به نظر می‌رسد. فرآیند تقطیر نفت خام به منظور تولید محصولاتی همچون بنزین[4]، نفتا[5]، نفت سفید[6]، نفت گاز[7] و انواع روغن‌ها صورت می‌گیرد. براساس اختلاف نقطه جوش در قسمت‌های مختلف ستون تقطیر، برش‌های موجود در نفت خام از همدیگر تفکیک می‌شوند و به مخازن مربوطه ارسال می‌شوند. نفت خام گرفته شده از مخازن در مبدل‌های حرارتی به دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و وارد نمک‌زدا می‌شود. نفت خام نمک‌زدایی شده وارد گرم‌کن شده و پس از گرم شدن به چند جریان تقسیم شده و هر یک وارد کوره‌ها می‌شوند. جریان خروجی از کوره پس از ادغام با یکدیگر وارد سینی خوراک(سینی۳۸) ستون تقطیر اتمسفریک می‌شود. ستون تقطیر مذکور حدود ۵۲ سینی دارد که برحسب مشخصات نفت خام و خلوص محصولات ممکن است تعداد سینی‌ها کمتر یا بیشتر شود. بخارات هیدروکربنی به سمت بالا و مایعات نفتی به سمت پایین حرکت می‌کنند برای جداسازی مواد سبک موجود در باقی مانده ستون تقطیر اتمسفریک، به زیر سینی۵(قسمت تحتانی برج) سه جریان بخار آب داغ با فشار ۶۰ بار[8] در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد تزریق می‌شود. شماتیک شبیه‌سازی شده واحد فوق در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ٤- شماتیک فرآیند مرسوم واحد تقطیر نفت خام

- **طرح های پیشنهادی**

دو طرح پیشنهادی توسط نرم افزار Aspen Hysys 7.3 شبیه‌سازی شده است. در این دو شبیه‌سازی از معادله حالت پنگ رابینسون برای حل معادلات استفاده شد و همچنین مشخصات خوراک‌های ورودی برای هر دو طرح در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- میزان بازیابی مواد موجود در لکه نفتی در طرح پیشنهادی اول

نام ماده	مقدار ماده در جریان خوراک (Kg/h)	مقدار ماده در جریان ۴۷ (Kg/h)	درصد بازیافت ماده از خوراک (٪)
٪متان	۰	۰	۰
اتان	۳/۵۲۳	۰/۳۴۱	۹۰/۳
پروپان	۵۹/۹۷	۰/۶۱۴	۹۸/۹۷
ایزوبوتان	۲۴/۷۰۳	۰/۳۹۵	۹۵/۲
نرمال-بوتان	۱۱۶/۴۵۷	۱/۲۰	۹۸/۴
ایزوپنتان	۲۲۲/۳۲۷	۰/۱۱۲	۹۹/۹۵
نرمال‌پنتان	۲۱۵/۲۶۳	۱/۴۲۰	۹۹/۳۴

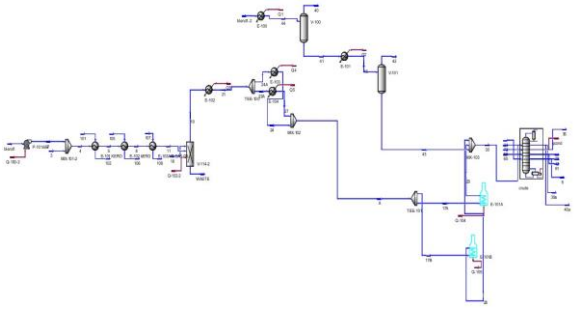
جدول ۳- میزان بازیابی مواد موجود در لکه نفتی در طرح پیشنهادی دوم

1 National Argonne Laboratory
2 Sponge Oleo
3 Horizon Deepwater
4 Gasoline
5 Naphtha
6 Kerosene
7 Gas Oil
8Bar

نام ماده	مقدار ماده در جریان خوراک (Kg/h)	مقدار ماده در جریان ۴۳ (Kg/h)	درصد بازیافت ماده از خوراک (٪)
متان	۰	۰	۰
اتان	۵/۲۹۳	۰/۴۲۴	۸
پروپان	۲۱/۱۷	۱/۷۰۰	۸
ایزوبوتان	۳۷/۰۵	۱۲/۶۴	۳۴/۱
نرمال‌بوتان	۱۷۴/۶۶	۸/۳۹	۴/۸
ایزوپنتان	۳۳۳/۴۶	۴۴/۹۵	۱۳/۴۸
نرمال‌پنتان	۳۲۲/۸۷۳	۳۴/۰۳	۱۰/۵۴

- **طرح پیشنهادی اول**

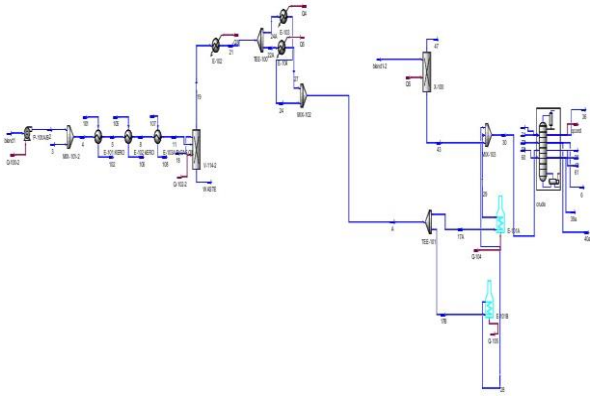
با توجه به شکل ۵ نفت خام جمع آوری شده از سطح دریا به منظور تبدیل به مشتقات نفتی وارد قسمت تقطیر اتمسفریک نفت خام پالایشگاه می‌شود. ابتدا برای جداسازی آب موجود در آن توسط گرم‌کن گرم شده و وارد ستون تقطیر ناگهانی اولیه می‌شود. جریان خروجی از پایین ستون تقطیر ناگهانی بار دیگر توسط گرم‌کن گرم شده و وارد ستون تقطیر ناگهانی دوم می‌شود تا آب آن کاملا خارج شود. جریان خروجی از پایین ستون تقطیر ناگهانی با جریان‌های خروجی از کوره‌ها ادغام شده سپس وارد ستون تقطیر اتمسفریک نفت خام می‌شوند.



شکل ۵- طرح پیشنهادی اول برای تقطیر لکه نفتی

- **طرح پیشنهادی دوم**

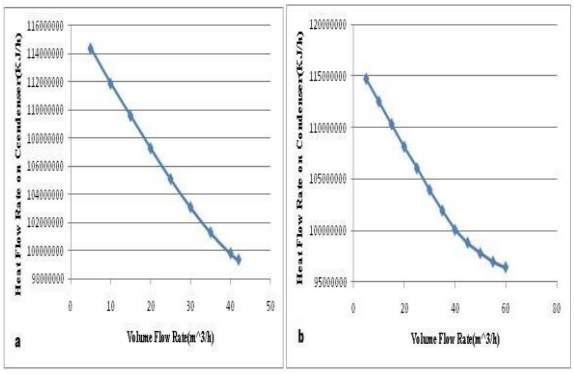
با توجه به شکل ۶ نفت خام جمع آوری شده از سطح دریا ابتدا برای جداسازی آب موجود در آن وارد یک اسپیلیتر می‌شود تا آب آن کاملا خارج شود. جریان خروجی از پایین اسپیلیتر با جریان‌های خروجی از کوره‌ها ادغام شده و وارد ستون تقطیر اتمسفریک نفت خام می‌شوند.



شکل ٦- طرح پیشنهادی دوم برای تقطیر لکه نفتی

۲- نتایج

برای تعیین میزان انرژی بهینه کندانسور و دبی ورودی بهینه به برج و میزان بازده مواد بازیابی شده از طرح‌های پیشنهادی از نرم افزار Aspen Hysys 7.3 استفاده شد. به همین منظور در هر طرح پیشنهادی برای پیدا کردن این پارامترها ابتدا جریان خوراک با دبی‌های متفاوتی وارد برج تقطیر شد تا مقدار دقیق دبی بهینه مشخص شود، هم زمان با این کار میزان بار حرارتی کندانسور در هر دبی تعیین شده محاسبه می‌شود که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار دبی بهینه لکه نفتی برای طرح پیشنهادی اول m^3/h ۶۰ و برای طرح پیشنهادی دوم m^3/h ۴۲ می‌باشد. همچنین بار حرارتی کندانسور در طرح پیشنهادی اول KJ/h ۱۰^۷ × ۹/۶۳۸ و برای طرح پیشنهادی دوم KJ/h ۱۰^۷ × ۹/۹۳۵ است. با مقایسه نتایج این دو طرح می‌توان به این نتیجه رسید که طرح پیشنهادی اول بهتر از طرح پیشنهادی دوم است ولی با مقایسه نتایج جداول ۱ و ۲ که میزان بازیابی مواد موجود در لکه نفتی را نشان می‌دهند می‌توان دریافت که اگر چه طرح پیشنهادی اول با مصرف انرژی کم و تقطیر دبی زیاد نسبت به طرح پیشنهادی دوم بهتر است ولی به لحاظ بازده، کارایی پایینی نسبت به طرح دوم دارد.



شکل ۷- مقادیر محاسبه شده بار حرارتی کندانسور بر حسب دبی جریان لکه نفتی
a) طرح پیشنهادی اول b) طرح پیشنهادی دوم

۳- نتیجه‌گیری

نفت یک منبع بسیار با ارزش جهت تولید انرژی و بسیاری از مواد شیمیایی است اما بی‌توجهی در مراحل استخراج و انتقال آن می‌تواند آلودگی‌های زیست محیطی فراوانی را باعث شود که بعضا غیر قابل جبران هستند. در بخشی از این پژوهش لکه نفتی جمع آوری شده از سطح دریا به عنوان یک خوراک ورودی جداگانه به واحد تقطیر اتمسفریک نفت خام در نظر گرفته شد. برای شبیه سازی این طرح از نرم افزار Aspen Hysys 7.3 استفاده شد. برای حل معادلات ترمودینامیکی از مدل ترمودینامیکی پنگ رابینسون استفاده شد. با مقایسه نتایج به دست آمده از این دو حالت می‌توان به این نتیجه رسید که طرح پیشنهادی اول به لحاظ دبی ورودی و مصرف انرژی بهتر از طرح پیشنهادی دوم می‌باشد. ولی به لحاظ بازیافت مواد موجود در لکه نفتی طرح پیشنهادی دوم نسبت به طرح پیشنهادی اول از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. به طوری که میزان بازیافت برای طرح اول تقریبا ۱۴٪ و برای طرح دوم ۹۷٪ می‌باشد. با توجه به اینکه در حال حاضر پتانسیل خود پالایی دریاها قادر به حذف آلودگی‌های ناشی از

ورود ترکیبات نفتی به آن ها نمی‌باشند، بنابراین لزوم بهره‌گیری از روش بیولوژیکی نیز علاوه بر روش‌های شیمیایی و مکانیکی محرز می‌شود. این روش جهت تجزیه بیولوژیکی نفت با بهره‌گیری از ارگانیسم‌های نفت‌خوار می‌باشد. بدون شک یکی از عوامل بسیار موثر حذف مواد نفتی در دریا تجزیه میکروبی می‌باشد. مواد نفتی نزدیک سطح آب و مواد نفتی که به طور کامل در آب پراکنده شده‌اند به راحتی تحت تجزیه میکروبی قرار می‌گیرند. میکروارگانیسم‌ها برای رشد نیاز به منبع کربن و نیتروژن و فسفر دارند و نفت خام که مخلوطی از هیدروکربن‌های متعدد می‌باشد قادر به تامین منبع کربن و به عبارت بهتر منبع انرژی برای میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. بنابراین باکتری‌ها با بهره‌وری از نفت و استفاده از آن در حذف آلودگی نفتی بسیار موثر خواهند بود. مطالعات متعددی که انجام شده حاکی از افزایش تعداد میکروارگانیسم‌های مصرف کننده هیدروکربن‌ها می‌باشد و با افزایش سهم آن‌ها در بخش مقابله با آلودگی‌های ناشی از نفت می‌توان به بهترین شکل و به صورت طبیعی و منطبق با شرایط قابل تحمل در محیط زیست به از بین بردن آلودگی‌های نفتی اقدام نمود .

منابع

- Ballschmiter, K.H., Froescheis, O., Jarman, W.M., Caillet, G., "Contamination of the deep-sea", Marine Pollution Bulletin, 34,288–289, 1997.
- Bassin, N.J., Ichiye, T, "Flocculation behaviour of suspended sediments and oil emulsions". Journal of Sedimentary Petrology 47, 671–677, 1977.
- Blumer, M., Ehrhard, M., Jones, J.H., "The environmental fate of stranded crude oil", Deep-Sea Research 20, 239–259, 1973.
- Blumer, M., Sass, J., "Indigenous and petroleum-derived hydrocarbons in a polluted sediment". Marine Pollution Bulletin 3, 92–94, 1972.
- Guodong.Q, Yupeng.Zh, Xuhe.R Jie.C, "Research on Development and Effectiveness Evaluation Technology of New Environment-friendly Oil Spill Dispersant", Aquatic Procedia, 3, 245 – 253, 2015.
- Li. H, Liu.L, Yang. F, "Oleophilic polyurethane foams for oil spill cleanup", Procedia Environmental Sciences, 18, 528 – 533, 2013.
- Rotar. O, Iskrizhitskaya. D. V, Iskrizhitsky. A.A, Oreshina. A.A, "Cleanup of water surface from oil spills using natural sorbent Materials", Procedia Chemistry, 10, 145 – 150, 2014.
- Galblaub. O.A, Shaykhiev. I.G, Stepanova. S.V, Timirbaeva. G.R, "Oil Spill Cleanup of Water Surface by Plant-Based Sorbents: Russian Practices", Process safety and environmental protection, 20, 342-358, 2015.
- Lin. J, Shang.Y, Ding.B, Yang's, Yu.J, Al-Deyab.S.S, "Nanoporous polystyrene fibers for oil spill cleanup", Marine Pollution Bulletin 64, 347–352, 2012.
- Arjmand.M, Moreno.L , Liu.L, "Energy Saving in Crude Oil Atmospheric Distillation Columns by Modifying the Vapor Feed Inlet Tray", Chemical engineering technology, 34, 1359-1367, 2011.
- www.fastcodesign.com by Katharine Schwab -03.07.2017.
- Martins VAP et al. (2008). "Genomic Insights into Oil Biodegradation in Marine Systems". Microbial Biodegradation: Genomics and Molecular Biology. Caister Academic Press. ISBN 978-1-904455-17-2.
- Ahn, YH; Hong, GH; Neelamani, S; Philip, L and Shanmugam, P (2006) Assessment of Levels of coastal marine pollution of Chennai city, southern India. Water Resource Management, 21(7), 1187-1206.
- Daoji, L and Dag, D (2004) Ocean pollution from land-based sources: East China sea. AMBIO – A Journal of the Human Environment, 33(1/2), 107- 113.
- Dowrd, BM; Press, D and Los Huertos, M (2008) Agricultural non-point sources: water pollution policy: The case of California's central coast. Agriculture, Ecosystems & Environment, 128(3), 151-.161
- Laws, Edward A (2000) Aquatic Pollution John Wiley and Sons. ISBN 9780471348757
- Sheavly, SB and Register, KM (2007) Marine debris and plastics: Environmental concerns, sources, impacts and solutions. Journal of Polymers & the Environment, 15(4), 301-305.
- Slater, D (2007) Affluence and effluents. Sierra 92(6), 27.
- UNEP (2007) Land-based Pollution in the South China Sea. UNEP/GEF/SCS Technical Publication No 10.
- Hindsight and Foresight, 20 Years After the Exxon Valdez Spill". NOAA. 2010-03-16. http://vimeo.com/ 10216588. Retrieved 2010-04-30.

- "Less Than 1% of Oil-Soaked Birds Survive: TreeHugger". www.treehugger.com. http://www.treehugger.com/files/2010/06/less-1- percent-oil-soaked-birds-survive.php. Retrieved 2010-06-09.
- C. Michael Hogan (2008), "Magellanic Penguin", GlobalTwitcher.com, ed. N. Stromberg.
- Dunnet, G., Crisp, D., Conan, G., Bourne, W. (1982) "Oil Pollution and Seabird Populations [and Discussion]" Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B 297(1087): 413–427.
- https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10916466.2016.1163395
- Untold Seabird Mortality due to Marine Oil Pollution, Elements Online Environmental Magazine.