

بررسی اثر نانوذره‌های اکسید تیتانیوم بر عملکرد سورفکت‌های ساپونین و سدیم دودسیل سولفات در فرایند پاک‌سازی مخازن ذخیره نفت خام سنگین

ریحانه عضدی آبادشاپوری

گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

حسین امانی

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

رضا حاجی محمدی*، هادی سلطانی

گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

چکیده: در این پژوهش، اثر نانوذره‌های اکسید تیتانیوم بر عملکرد سورفکت‌های ساپونین و سدیم دودسیل سولفات در تمیز کردن مخزن ذخیره نفت خام سنگین بررسی شد. همچنین پس از فرایند پاک‌سازی، از سدیم دودسیل سولفات، ساپونین و نانوذره‌های اکسید تیتانیوم برای بازیابی نفت از لجن ته مانده مخازن ذخیره نفت خام در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. نتیجه‌ها نشان داد، مقدار مطلوب HLB برای فرآیند استخراج در حدود ۲۴/۱ برای مخلوط، ۴۰٪ سدیم دودسیل سولفات و ۶۰٪ ساپونین بود. همچنین نتیجه‌ها نشان داد که استفاده همزمان از سورفکت‌ها و نانوذره‌ها منجر به یک اثر هم‌افزایی می‌شود که به طور چشمگیری بازده فرآیند استخراج را افزایش می‌دهد. حداکثر مقدار باقیمانده نفت در لجن در شرایط مطلوب حدود ۲/۶٪ (مقدار HLB=۲۴/۱) برای مخلوط سورفکت‌ها و ۳g/l نانوذره‌های اکسید تیتانیوم) به دست آمد که این مقدار برای هر یک از سورفکت‌ها بدون حضور نانوذره‌های اکسید تیتانیوم، ۹۲/۵ و ۹۳/۷٪ برای ساپونین و سدیم دودسیل سولفات بود. نتیجه‌های مطالعه حاضر نشان داد که این روش پتانسیل کاربردهای صنعتی را دارد و می‌تواند در بازیافت نفت از لجن ته مانده نفتی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: محلول تمیزکننده، سورفکت، لجن نفتی، نانوذره اکسید تیتانیوم، مخزن ذخیره‌سازی

KEYWORDS: Cleaning solution, Surfactant, Petroleum sludge, Titanium oxide nanoparticles, Storage tank

مقدمه

روزانه مقادیر زیادی نفت خام جابجا شده و با تانکرهای حمل نفت، ماشین‌های مخزن‌دار و کامیون‌ها به پالایشگاه‌ها توزیع می‌شود. بنابراین تولید، تصفیه و توزیع فرآورده‌های نفتی به طور معمول به انواع گوناگونی از مخازن ذخیره‌سازی احتیاج دارد [۱ و ۲]. ته مانده مخازن

این نانوذره‌ها در فرایند ازدیاد برداشت نفت خام را به خوبی نشان دادند [۱۰، ۱۱]. اثر هم افزایی دو سورفکتنت با توجه به متفاوت بودن HLB (Hydrophilic/Lipophilic Balance) می‌تواند بازدهی سیستم را افزایش دهد. یکی از خصوصیات مهم که بر اساس آن امولسی فایرها را تقسیم بندی می‌کنند بر اساس خصوصیت انحلال آن‌ها و یا به اصطلاح HLB می‌باشد. HLB نسبت آب دوستی و چربی دوستی سورفکتنت‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین، بر اساس HLB به ترکیبات محلول در روغن اعداد پایین و اعداد بالاتر به ترکیباتی که تمایل بیشتری به حلالیت در آب دارند اختصاص داده می‌شوند. میزان HLB را می‌توان بر اساس تعداد گروه‌های چربی دوست و آب‌دوست از طریق رابطه (۱) محاسبه نمود [۱۲]. با توجه به اینکه از کارهای پژوهشی قبلی خواص خوب ساپونین مانند کاهش کشش سطحی و امولسیون کنندگی برای ما مشخص بود لذا در این پژوهش از بیوسورفکتنت ساپونین^۴ استفاده شد [۱۳]. نانو ذره‌های تیتانیوم هم اخیراً در صنایع نفتی بدلیل داشتن خواصی از قبیل کاهش کشش سطحی و همچنین تغییر تر شونده‌گی بسیار مورد توجه بوده است. در واقع یکی از روش‌های افزایش ضریب برداشت نفت استفاده از نانوذره‌های تیتانیوم همراه با تزریق آب به مخازن نفتی است. نانوذره‌ها با تغییر ترشوندگی سنگ مخزن بوسیله کاهش کشش سطحی باعث جابه‌جایی نفت به تله افتاده در سنگ مخزن گردیده و میزان نفت بیشتری را استخراج می‌کنند. لذا در این پژوهش از این مواد استفاده گردید [۱۵ و ۱۴]. با این حال، اگرچه مطالعات زیادی در مورد تمیز کردن مخازن نفت خام سنگین وجود دارد [۱۶]، اما در مورد اثر هم افزایی^۵ سورفکتنت‌های زیستی و نانوذره‌ها بر تمیز کردن مخازن ذخیره نفت خام سنگین، مطالعه کمی انجام شده است. بنابراین، این مطالعه می‌کوشد با بررسی اثر هم افزایی بیوسورفکتنت ساپونین و سورفکتنت سدیم دودسیل سولفات و نانوذره‌های اکسید تیتانیوم گام موثری در پاک سازی مخازن ذخیره نفت خام سنگین بردارد.

$$HLB = \frac{\sum(\text{hydrophilic group number})}{\sum(\text{hydrophobic group number}) + 7} \quad (1)$$

مواد و روش‌ها

مواد

تنوع مواد مصرفی مثل ساپونین و سورفکتنت شیمیایی مانند سدیم دودسیل سولفات به همراه نانوذره جهت بهبود پاکسازی مخازن نفتی

می‌تواند خوردگی را تسریع کرده و ظرفیت ذخیره سازی را کاهش داده و همچنین عملیات انتقال نفت خام سنگین را مختل کند [۳ و ۴]. به طور معمول، ته مخازن (لجن نفتی) را می‌توان از طریق فرآیندهای گوناگون فیزیکی و شیمیایی مانند رطوبت زدایی، استخراج حلال، شستشو با سورفکتنت‌ها تمیز کاری کرد [۵ - ۶]. سانپنگ و همکاران^۱ سیستم‌های تمیز کاری دستی، اتوماتیک و رباتیک را مورد ارزیابی قرار داده و هر یک از روش‌ها را با توجه به مزایا و معایب آن تجزیه و تحلیل کرده‌اند [۷]. سیستم‌های تمیز کردن سنتی بر اساس حذف دستی لجن است. چالش‌های بسیاری در این مورد وجود دارد، این موارد شامل خطرات ایمنی بالا و حجم زیاد پساب برای دفع می‌باشد. روش‌های جداسازی فیزیکی شامل استفاده از تجهیزات متعددی مانند سانتریفیوژها و مواد شوینده برای افزایش بازیابی لجن بسیار مناسب است. این روش رسوبات را فقط از لجن جدا می‌کند ولی هیچ بازیابی واقعی در نفت اتفاق نمی‌افتد، فقط ایجاد یک فاز نفت ناپایدار است که پس از پمپ شدن در مخزن دیگر، دوباره رسوب می‌کند. سیستم تمیز کردن خودکار سریع‌ترین سیستم تمیز کردن است اما تمیز کردن با روبات‌ها هیچ تاثیری در بازیابی لجن ندارد [۸، ۹]. سورفکتنت‌های شیمیایی که برای افزایش حلالیت آلاینده‌های موجود استفاده می‌شوند، اغلب سمی هستند. تا حد امکان در این موارد می‌توان از بیوسورفکتنت‌ها کمک گرفت. بیوسورفکتنت‌ها^۲ ترکیبات آمفیفیلیکی هستند که با تجمع در بین مایعات غیرقابل مخلوط یا یک مایع و یک ماده جامد، تنش‌های سطحی را کاهش می‌دهند و باعث افزایش سطح تماس ترکیبات نامحلول می‌شوند و کشش سطحی و بین سطحی را کاهش می‌دهند. سورفکتنت‌ها توسط بسیاری از سوبه‌های باکتریایی تولید می‌شوند که می‌توانند اجزای فرآورده‌های نفتی را تخریب یا به مواد موثری تبدیل کنند. بانات^۳ و همکاران از بیوسورفکتنت‌ها برای تمیز کردن مخزن ذخیره نفت استفاده کردند [۱۰-۱۴]. نتیجه‌های آنها نشان داد که لجن نفت به طور چشمگیری از کف مخزن برداشته شده و در امولسیون تشکیل شده حل شده است. این تمیز کاری مخازن با سورفکتنت‌ها، ۹۱٪ هیدروکربن‌های موجود در لجن را بازیابی کرد. /*احتسابی و همکاران* در مورد ازدیاد برداشت نفت با استفاده از نانوذره‌های اکسید تیتانیوم مطالعه‌ای انجام دادند. آنها نشان دادند در غلظت ۰/۰۱ درصد از نانوذره‌های اکسید تیتانیوم بازدهی فرایند ۴۵ تا ۵۵ درصد بود. در مطالعه دیگری *چراغیان و همکاران* در مورد کاربرد نانوذره‌ها مثل سیلیکا در ازدیاد برداشت نفت خام پژوهش کردند و اهمیت و کاربردهای

(۱) Sanpeng et al

(۳) Banat et al

(۵) Synergistic Effect

(۲) Biosurfactants

(۴) Saponin

جدول ۱: مشخصات فیزیکی شیمیایی ته مانده پساب نفتی

درصد نفت (درصد وزنی)	آب (درصد وزنی)	جامدات (درصد وزنی)	دانسیته (g/ml)	ویسکوزیته (mm ² /s)	pH	نقطه فلش (C°)
۴۸/۲	۳۷/۱	۱۴/۷	۱/۴	۱۹۰	۷/۲	۱۳۱

جدول ۲: مشخصات سورفکتنت‌های مورد استفاده

نام ماده	ساپونین	سدیم دودسیل سولفات
فرمول شیمیایی	C36H58O9	NaC12H25SO4
وزن ملکولی (g/mol)	۶۳۴/۸۵۱	۲۸۸/۳۷۲
CMC(mg/l)	۱۵۰	۲۳۵۰
HLB	۱۳/۵	۴۰



شکل ۱: نمونه لجن نفت از ته مانده مخزن جدا کننده نفت

و غلظت‌های گوناگون آنها و همچنین متغیرهای مستقل و وابسته زیاده، ایده طراحی آزمایش در این پژوهش بود. در این پژوهش از غلظت‌های بالای (Critical Micelle Concentration) CMC برای دو سورفکتنت استفاده شد. در غلظت‌های بالای CMC معمولاً کمترین کشش سطحی و بین سطحی که بسیار مهم است، در پاکسازی مخازن نفتی به دست می‌آید. غلظت‌های نانوذره هم بر اساس موارد گزارش شده در مقالات استفاده گردید. نمونه لجن نفت از ته مانده مخازن نگهداری نفت خام سنگین از مناطق صنعتی شهر تبریز تهیه شد (شکل ۱). خواص نمونه لجن نفت در جدول ۱ نشان داده شده است. ساپونین یک سورفکتنت طبیعی و سازگار با محیط زیست است و در ضمن غیر سمی است و هدف دیگر مقایسه نتیجه‌های آن با سورفکتانت شیمیایی سدیم دودسیل سولفات است. نانوذره اکسید تیتانیوم یکی از پرکاربردترین نانوذره‌هایی است که در صنعت نفت از آن در فرایند ازدیاد برداشت نفت و فرایندهای امولسیون سازی استفاده می‌شود [۱۴]. لذا از این مواد برای فرایند امولسیون سازی استفاده گردید. بیوسورفکتنت ساپونین و سدیم دودسیل سولفات و نانوذره‌های اکسید تیتانیوم از شرکت مرک آلمان خریداری شده است. همچنین خصوصیات و ویژگی‌های سورفکتنت‌های مورد استفاده در جدول ۲ ذکر شده است. مقدارهای HLB هریک از سورفکتنت‌ها با استفاده از رابطه (۱) به دست آمده است.

$$\text{درصد باقیمانده نفت} = (1 - V_{oil} / V_{total}) \times 100 \quad (2)$$

که در آن V_{oil} و V_{total} به ترتیب حجم فاز نفت استخراج شده و حجم فاز مایع کل می‌باشد.

تعیین غلظت بهینه سورفکتنت‌ها

برای به دست آوردن مقدار HLB بهینه درصد‌های گوناگونی از مخلوط سورفکتنت‌ها استفاده شد. مقدار HLB بهینه با مخلوط کردن سدیم دودسیل سولفات و ساپونین توسط معادله (۳) به دست آمد [۱۷].

$$HLB_{ds} = HLB_d \times D\% + HLB_s \times S\% \quad (3)$$

که در آن HLB_d ، HLB_s و HLB_{ds} به ترتیب HLB سدیم دودسیل سولفات، ساپونین و مخلوط سورفکتنت‌ها هستند. همچنین، $D\%$ و $S\%$ درصد سدیم دودسیل سولفات و ساپونین در محلول است. نتیجه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

فرایند تمیزکاری در حالت هم افزایی سورفکتنت‌ها

۴۰ گرم نمونه لجن و ۱۰۰ ml محلول تمیز کننده (مخلوط بیوسورفکتنت‌ها) مطابق جدول ۳ در ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد.

فرایند تمیز کردن لجن نفت خام سنگین

حذف لجن ته مخزن روغن توسط سورفکتنت‌های سدیم دودسیل سولفات و ساپونین ۱۰۰ میلی لیتر از غلظت‌های گوناگون سدیم دودسیل سولفات (۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵ و ۳/۰ g/l) و ساپونین (۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵ و ۳/۰ g/l) به ۴۰ گرم نمونه لجن اضافه شد. روش انجام آزمایش و غلظت‌های بکار رفته از مطالعه قبلی مان الگو برداری شده است [۱۳]. برای تعیین بازده حذف و سپس استخراج، نمونه‌های حاوی مواد جامد و نفت خام به مدت ۵ روز در دمای محیط، درون شیکر انکوباتور (مدل KMC65، ساخت شرکت فن آزما گستر) دور ۱۵۰ دور در دقیقه و $pH=6/8$ قرار داده شد. دما در ۲۵ درجه سلسیوس تنظیم شد. در پایان روز پنجم، نمونه همگن به مدت ۱۵ دقیقه در ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد و فاز جامد از سیستم جدا شد. سپس امولسیون نفت بازیابی شده در واحد حجم اندازه‌گیری شد. جامد به دست آمده در لایه پایین سپس در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در یک اجاق خشک شد. در فاز مایع به دست آمده نسبت نفت باقیمانده با استفاده از معادله (۲) تعیین شد.

جدول ۴: مقدارهای کاهش در کشش سطحی و بین سطحی توسط سورفکتنت‌ها

کشش سطحی (mN/m)	کشش بین سطحی (mN/m)	سورفکتنت
۳۳/۴	۲/۴	ساپونین
۴۵/۶	۵/۴	سدیم دودسیل سولفات

کشش سطحی اش حلقه را به پایین می‌کشد. وقتی حلقه بیرون کشیده می‌شود بر اساس میزان نیروی وارد شده، زاویه آب با حلقه تغییر کرده به گونه‌ای که حلقه به صورت تعادلی می‌ایستد. یک نیروی بیشینه‌ای در این فرایند وجود دارد. در این نیرو آب متصل به حلقه به صورت عمود بر سطح تراز آب ایستاده است و نیازی نیست که زاویه‌ای در نظر گرفته شود. در واقع با کشیدن حلقه به بالا به مرور زاویه آب با حلقه به صورت عمودی در می‌آید و جایی که نیرو بیشینه می‌شود زاویه آب متصل به حلقه با راستای عمودی صفر است. نیرویی که یک مرز آب به حلقه وارد می‌کند برابر با γ_L است که L محیط حلقه است. با استفاده از دستگاه تنسیومتر بطور کاملاً اتوماتیک می‌توان کشش سطحی و کشش بین سطحی را اندازه‌گیری کرد. تنسیومتر KRUSS K10ST از نوع تنسیومتر دیجیتالی می‌باشد. در این روش، نیروی کششی که در اثر خیس شدگی یک پروب آغشته شده در مایع وجود می‌آید اندازه‌گیری می‌شود. پروب اندازه‌گیری، معمولاً رینگ دو نوبی^۴ است [۱۸]. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است، کشش بین سطحی میان آب و نفت خام به ترتیب ۳۹/۷ mN/m بود. کشش بین سطحی سدیم دودسیل سولفات (۳g/l) و ساپونین (۳g/l) به ترتیب ۵/۴ و ۲/۴ mN/m بود. همچنین آزمایشات نشان داد ساپونین و سدیم دودسیل سولفات کشش سطحی آب را به ترتیب به میزان ۳۳/۴ و ۴۵/۶ mN/m کاهش دادند. بنابراین، سدیم دودسیل سولفات به دلیل کاهش بیشتر در کشش سطحی و کشش بین سطحی، بهتر از ساپونین عمل کرده است. در این پژوهش، مقادیر نفت باقیمانده به ترتیب برای ساپونین و سدیم دودسیل سولفات به ترتیب ۷/۵ و ۶/۳ درصد به دست آمد. با توجه با وجود پارامترهای زیاد طراحی آزمایش می‌تواند داده‌های با دقت بالا نیز در این فرایند ارائه دهد.

اثر هم افزایی سورفکتنت‌ها روی تمیز کردن مخازن

در این قسمت، فرایند تمیز کردن با استفاده از مخلوط سورفکتنت‌ها مطابق جدول ۳ و معادله (۲) انجام شد. نتیجه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: ترکیب درصد سورفکتنت‌های مورد استفاده در مقدارهای گوناگون HLB

HLB مخلوط	ساپونین (درصد)	سدیم دودسیل سولفات (درصد)
۱۶/۱۵	۹۰	۱۰
۱۷/۵	۸۵	۱۵
۱۸/۸	۸۰	۲۰
۲۱/۵	۷۰	۳۰
۲۴/۱	۶۰	۴۰
۲۶/۷۵	۵۰	۵۰
۲۹/۵	۴۰	۶۰
۳۲	۳۰	۷۰
۳۴/۷	۲۰	۸۰
۳۷/۴	۱۰	۹۰

برای تعیین قدرت تمیز کردن مخلوط سورفکتنت‌ها، محلول به دست آمده در ۲۵ دمای درجه سلسیوس و ۱۵۰ دور در دقیقه به مدت پنج روز همزده شدند. پس از ۲۴ ساعت نگهداشت در حالت سکون نسبت نفت باقی مانده مطابق با رابطه ۱ تعیین شد.

اثر هم افزایی نانوذره‌های اکسید تیتانیوم

برای بررسی تأثیر هم افزایی نانوذره‌های اکسید تیتانیوم، غلظت‌های گوناگون نانوذره‌های اکسید تیتانیوم به مخلوط سورفکتنت‌ها در حالت HLB بهینه اضافه شد و سپس نسبت نفت باقیمانده طبق رابطه ۲ تعیین شد.

نتیجه‌ها و بحث

بررسی عملکرد سدیم دودسیل سولفات و ساپونین در تمیز کردن مخزن

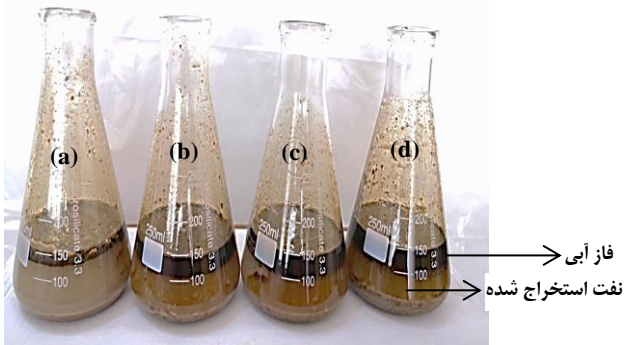
شکل ۲ نتیجه‌های عملکرد سدیم دودسیل سولفات و ساپونین در حذف نفت خام سنگین از مخزن ذخیره را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، عملکرد سدیم دودسیل سولفات در فرایند تمیزکاری بهتر از ساپونین بود. همچنین تست کشش سطحی برای اثبات این فرایند انجام شد. کشش سطحی^۱ و کشش بین سطحی^۲ با استفاده از روش رینگ متد و با یک تنسیومتر^۳ دیجیتالی مدل (K10ST, Kruss، آلمان) در ۲۵ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. وقتی یک حلقه غوطه ور در آب به بیرون کشیده می‌شود اگر حلقه با نیروی F کشیده شود، مقدار این نیرو بر حسب کشش سطحی مایع با هوا و زاویه تماس آب با حلقه قابل محاسبه است. در واقع آب به خاطر

(۱) Surface Tension

(۳) Tensiometer

(۲) Interfacial Tension

(۴) Du Nouy

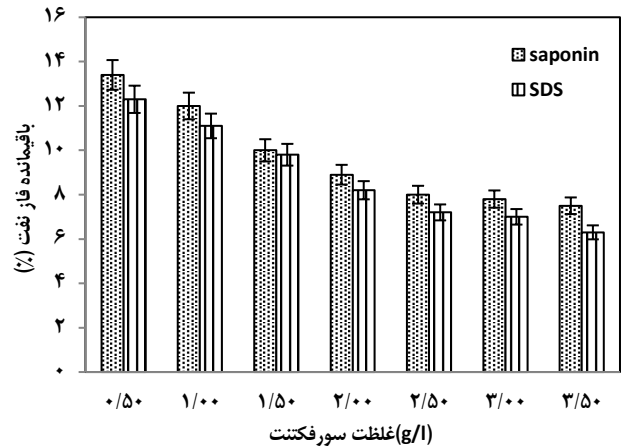


شکل ۴: فرایند امولسیون سازی و استخراج نفت خام سنگین از لجن در حالت مخلوط سورفکتنت‌ها و مقدار HLB برابر با ۲۴/۱ بعد از گذشت ۲۴ ساعت از حالت سکون (a): ۱g/l, (b): ۱/۵ g/l (c): ۲/۵ g/l (d): ۳/۵ g/l

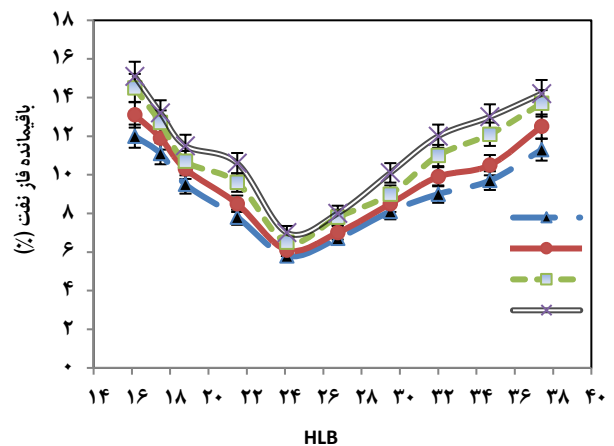
اندازه‌ی ذره‌ها می‌باشد، با مصرف شدن ذره‌های ریز موجود در سیستم همراه است. این ذره‌های ریز ابتدا بهم چسبیده و سپس ذره‌های بزرگتر را تشکیل می‌دهند. [۱۹]. شکل ۴ فرایند استخراج نفت خام سنگین از لجن را در مقدار HLB بهینه به خوبی نشان می‌دهد.

اثر هم افزایی نانوذره‌های اکسید تیتانیوم

پس از تعیین غلظت بهینه سورفکتنت‌ها، غلظت‌های گوناگونی از نانوذره‌های اکسید تیتانیوم به مخلوط سدیم دودسیل سولفات و ساپونین اضافه شد. نتیجه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست اثر هم افزایی بیوسورفکتنت‌ها و نانوذره‌ها برای تمیز کردن مخزن مشاهده شد. مکانسیم عمل در فرایند پاک‌سازی مخازن، شامل ۲ مکانیزم کلی کاهش کشش سطحی و امولسیون کنندگی سورفکتنت‌ها و سپس تغییر ترشوندگی^۲ و افزایش نفوذ سورفکتنت‌ها به داخل فصل مشترک جامد و مایع توسط نانو ذره‌ها می‌باشد. به نظر می‌رسد سورفکتنت‌ها نقش اساسی در کاهش کشش سطحی را بازی می‌کنند و نانوذره‌های اکسید تیتانیوم بیشتر برای ترشوندگی سیستم و همچنین بهبود نسبت نفوذ سورفکتنت‌ها به داخل فصل مشترک فازهای جامد و مایع به فرایند امولسیون سازی کمک می‌کند. همچنین ذره‌های نانویی دارای ابعاد کوچک و در نتیجه نفوذ پذیری بالا می‌باشند [۲۰ و ۲۱]. کوچکی این ذره‌ها به آنها این قابلیت را می‌دهد که داخل حفرات نفوذ کرده و با تغییر ترشوندگی، از نفت دوستی به آب دوستی، سبب خروج نفت از داخل حفرات گردند و همچنین تشکیل میسل و امولسیون‌های نفت در آب با نفوذ به لایه‌های نفت و افزایش سطح تماس را تسهیل می‌کنند. بر طبق مطالعات *امانی* و همکاران [۲۲] نانوذره‌ها همچنین می‌توانند



شکل ۲: عملکرد سورفکتنت‌ها بر روی جداسازی نفت از لجن



شکل ۳: اثر هم افزایی سورفکتنت‌ها بر روی جداسازی نفت از ته مانده مخازن نفتی

مطابق شکل ۳ در غلظت ۳g/l مخلوط سورفکتنت‌ها (۶۰ درصد ساپونین و ۴۰ درصد سدیم دودسیل سولفات)، مقدار بهینه HLB در حدود ۲۴/۱ به دست آمد. حداکثر نفت خام باقیمانده حدود ۵/۸ درصد بود. به عبارت دیگر بازده بازیافت نفت خام در فرایند تمیز کاری، حدود ۹۴/۲ درصد بود. طبق نتیجه‌های به دست آمده، ترکیب ساپونین و سدیم دودسیل سولفات تأثیر چشمگیری بر عملکرد بازیابی نفت خام دارد. به نظر می‌رسد مخلوط ساپونین و سدیم دودسیل سولفات می‌تواند یک فیلم در اطراف فاز پراکنده شده ایجاد کند و ثبات فاز آبی و فیلم بین سطحی را بهبود بخشد. در حقیقت بیوسورفکتنت‌ها سرعت فرایند استوالد رایپنینگ^۱ در امولسیون‌های نفت در آب کاهش می‌دهند. اوستوالد رایپنینگ به فرایند درشت شدن ذره‌های فازی در محیط‌های جامد، مایع و گاز اشاره دارد. درشت شدن فازی که در واقع رشد متوسط

(۱) Ostwald Ripening

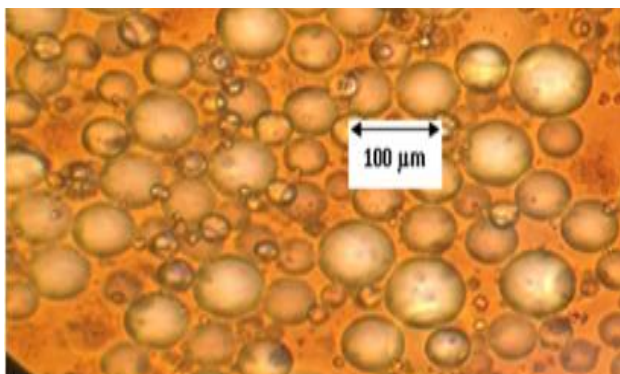
(۲) Wetting

جدول ۵: مقایسه مقدار بازیابی نفت خام در حالت سورفکتنت‌ها به تنهایی (۳/۵g/l)، مخلوط آنها و استفاده از نانو ذره‌های اکسید تیتانیوم (۳g/l)

باقیمانده فاز نفت (%)	مقادیر HLB
۶/۳	سدیم دودسیل سولفات (HLB=۴۰)
۷/۵	ساپونین (HLB=۱۳/۵)
۵/۸	HLB بهینه (HLB=۲۴/۱)
۳/۶	HLB بهینه + نانوذره‌های اکسید تیتانیوم (۳g/l)



شکل ۷: تصویری از لجن باقیمانده نفتی پس از تمیز کردن و خشک شدن

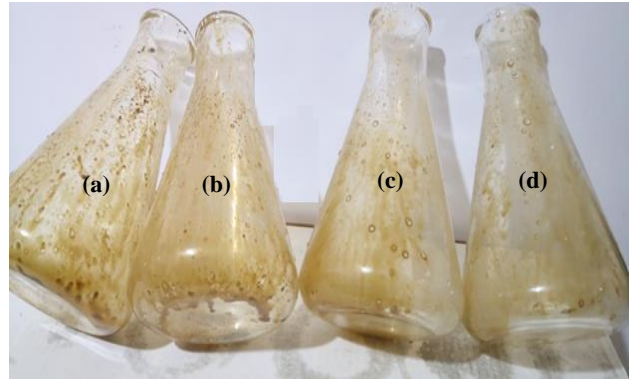


شکل ۸: تصویر میکروسکوپی از امولسیون نفت در آب تشکیل شده حین فرایند جداسازی

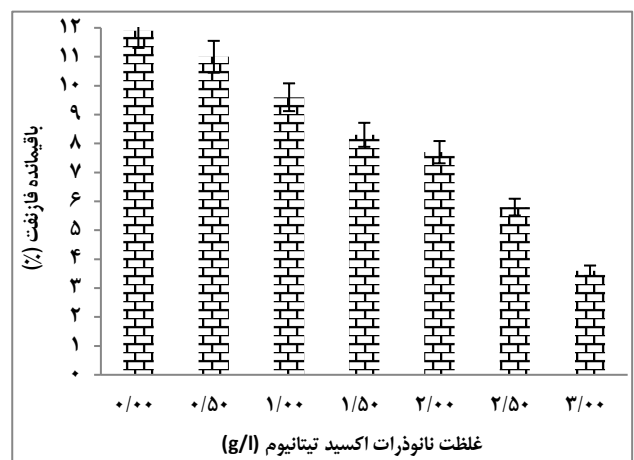
هم‌افزایی و استفاده از نانوذره‌های اکسید تیتانیوم بیشتر از تک تک سورفکتنت‌ها می‌باشد. بطوری که در حالت هم‌افزایی مقدار بازیافت نفت در حضور نانوذره‌های اکسید تیتانیوم حدود ۹۶/۴٪ بود که این مقدار برای هر یک از سورفکتنت‌ها بدون حضور نانوذره‌های اکسید تیتانیوم، ۹۲/۵ و ۹۳/۷٪ برای ساپونین و سدیم دودسیل سولفات بود.

نتیجه گیری

در این پژوهش، فرایند تمیز کردن مخزن ذخیره‌سازی نفت خام سنگین با استفاده از محلول شستشو (مخلوطی از سدیم دودسیل



شکل ۵: تاثیر نانوذره‌های اکسید تیتانیوم در پاک سازی مخازن نفتی در حالت مخلوط سورفکتنت‌ها و مقدار HLB برابر با ۲۴/۱ (a): ۱ g/l, (b): ۱/۵ g/l (c): ۲/۵ g/l (d): ۳/۵ g/l



شکل ۶: تاثیر نانوذره‌های اکسید تیتانیوم در بازیابی مقدار نفت موجود در لجن مخازن نفتی در حالت مخلوط سورفکتنت‌ها و مقدار HLB برابر با ۲۴/۱

از طریق منافذ به سطح مشترک جامد و مایع جریان داشته باشند و در کاهش کشش سطحی و کشش بین سطحی، نقش بسزایی می‌توانند داشته باشند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است در مقدار بهینه HLB، حداکثر نفت باقیمانده در غلظت ۳ g/l از نانوذره‌های اکسید تیتانیوم، حدود ۳/۶٪ بود.

تصویری از لجن باقیمانده نفتی پس از تمیز کردن و خشک شدن در شکل ۷ و تصویر میکروسکوپی از امولسیون نفت در آب تشکیل شده حین فرایند جداسازی در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتیجه‌های این مطالعه، استفاده همزمان از سورفکتنت‌ها و نانوذره‌ها منجر به یک اثر هم‌افزایی می‌شود که به طور چشمگیری روند بازیابی نفت را افزایش می‌دهد [۲۳]. بطور خلاصه نتیجه‌های این پژوهش به صورت مقایسه‌ای در جدول ۵ نشان داده شده است. همانطور که از نتیجه‌های جدول ۵ مشخص می‌شود، بازده بازیافت نفت در حالت اثر

مقیاس صنعتی باید آزمایش های تکمیلی و در مخازن واقعی تر نیز انجام شود. این پژوهش قدم های اولیه در جهت کارهای صنعتی می تواند محسوب شود. در استفاده از این روش ها هدف استفاده از مواد دوستدار محیط زیست می باشد که کمترین آسیب را به طبیعت و افراد شاغل در محیط وارد کند، بطوریکه سلامت کارکنان و ایمنی آنها در تمیز کردن مخازن حفظ شود. لذا می توان گفت با پیشرفت علم بیوتکنولوژی و نانو تکنولوژی کاهش هزینه ها نیز صورت می گیرد.

سولفات، ساپونین و نانو ذره های اکسید تیتانیوم) مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه ها نشان داد که استفاده همزمان از سورفکتنت ها و نانو ذره ها منجر به یک اثر هم افزایی می شود که به طور چشمگیری بازده فرآیند تمیزکاری را افزایش می دهد. حداکثر مقدار نفت باقیمانده در شرایط بهینه (مقدار $HLB=24/1$ برای مخلوط سورفکتنت و 3 g/l نانو ذره های اکسید تیتانیوم)، حدود $3/6\%$ بود به عبارت دیگر بازده بازیافت نفت خام سنگین در فرآیند تمیز کاری فرآیند حدود $96/4\%$ بود. همچنین بازده بازیافت نفت خام برای هر یک از سورفکتنت ها بدون حضور نانو ذره های اکسید تیتانیوم، $92/5\%$ و $93/7\%$ برای ساپونین و سدیم دودسیل سولفات بود. از نظر زیست محیطی این روش تمیز کردن مخازن ذخیره می تواند برای صنایع نفت و پتروشیمی مفید واقع شود. در مقیاس آزمایشگاهی و در مقیاس ارلن خوشبختانه جواب های خوبی حاصل شد ولی در

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

مراجع

- [1]. Kim, J.G., Kim, J.H., Song, B.J., Lee, C.W., Lee, Y.S. and Im, J.S.,. [Empirical Approach to Determine Molecular Weight Distribution using MALDI-TOF Analysis of Petroleum-Based Heavy oil. *Fuel*, **186**: 20-23\(2016\)](#)
- [2]. Wylde, J.J., [Successful Field Application of Novel, Nonsilicone Antifoam Chemistries for High-Foaming Heavy-Oil Storage Tanks in Northern Alberta. *SPE Production & Operations*, **25**\(1\): 25-30 \(2010\)](#)
- [3]. Hassanzadeh, M., Tayebi, L. and Dezfouli, H., [Investigation of Factors Affecting on Viscosity Reduction of Sludge from Iranian Crude Oil Storage Tanks. *Petroleum Science*, **15**\(3\): 634-643 \(2018\)](#)
- [4]. Dakhel, A.A. and Rahimi, M., 2004. [CFD Simulation of Homogenization in Large-Scale Crude Oil Storage Tanks. *Journal of petroleum science and Engineering*, **43**\(3-4\): 151-161 \(2004\)](#)
- [5]. Narayani, B., Ravichandran, S., & Rajagopal, P. [Design and Simulation of a Tank Floor Cleaning Mechanism for Mobile Robots used in Storage Tanks. *In Proceedings of the Advances in Robotics* **46**\(1\): 1-6 \(2019\)](#)
- [6]. Wylde, J. J., & Slayer, J. J. [Development, Testing, and Field Application of a Heavy-Oil Pipeline-Cleaning Chemical: A Cradle-to-Grave Case History. *SPE Projects, Facilities & Construction*, **5**\(1\), 22-30 \(2010\)](#)
- [7]. Sanpeng, D., Xiaoli, X., Chongning, L., & Xinghui, Z. [Research on the Oil Tank Sludge Cleaning Robot System. *In 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* 5938-5942 \(2010\)](#)
- [8]. Topalis, P., Korneliussen, G., Hermanrud, J. and Steo, Y., [Risk Based Inspection Methodology and Software Applied to Atmospheric Storage Tanks. *In Journal of Physics: Conference Series* **364**\(1\): 21-25 \(2012\)](#)

- [9]. Jin, Y., Zheng, X., Chu, X., Chi, Y., Yan, J. and Cen, K., [Oil recovery from Oil Sludge through Combined Ultrasound and Thermochemical Cleaning Treatment](#). *Industrial & engineering chemistry research*, **51**(27): 9213-9217 (2012)
- [10]. Ehtesabi, H., Ahadian, M. M., Taghikhani, V., [Enhanced heavy Oil recovery Using TiO₂ Nanoparticles: Investigation of Deposition During Transport in Core Plug](#). *Energy & Fuels*, **29**(1): 1-8 (2015)
- [11]. Cheraghian, G., & Hendraningrat, L. [A review on Applications of Nanotechnology in the Enhanced Oil Recovery part A: Effects of Nanoparticles on Interfacial Tension](#). *International Nano Letters*, **6**(2): 129-138 (2016)
- [12]. Kozlov, M. Y., Melik-Nubarov, N. S., Batrakova, E. V., & Kabanov, A. V. 2000. [Relationship Between Pluronic Block Copolymer Structure, Critical Micellization Concentration and Partitioning Coefficients of Low Molecular Mass Solutes](#). *Macromolecules*, **33**(9): .3305-3313 (2000)
- [13]. Hajimohammadi, R., Hosseini, M., Amani, H., & Najafpour, G. D. [Production of Saponin Biosurfactant from Glycyrrhiza Glabra as an Agent for Upgrading Heavy Crude oil](#). *Journal of Surfactants and Detergents*, **19**(6): 1251-1261(2016)
- [14]. Ehtesabi, H., Ahadian, M. M., Taghikhani, V., & Ghazanfari, M. H. [Enhanced Heavy Oil Recovery in Sandstone Cores Using TiO₂ Nanofluids](#). *Energy & Fuels*, **28**(1): 423-430 (2014)
- [15]. Eltoun, H., Yang, Y. L., & Hou, J. R. [The Effect of Nanoparticles on Reservoir Wettability Alteration: a Critical Review](#). *Petroleum Science*, **18**(1): 136-153 (2021)
- [16]. Banat, I. M., Samarah, N., Murad, M., Horne, R., & Banerjee, S. [Biosurfactant Production and Use in Oil Tank Clean-up](#). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **7**(1): 80-88(1991).
- [17]. Hajimohammadi, R., & Johari-Ahar, S. [Synergistic Effect of Saponin and Rhamnolipid Biosurfactants Systems on Foam Behavior](#). *Tenside Surfactants Detergents*, **55**(2): 121-126 (2018).
- [18]. Wanic, M., Cabaleiro, D., Hamze, S., Fal, J., Estellé, P., & Żyła, G. [Surface Tension of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Various Types of Nitrides](#). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **139**(2): 799-806 (2020)
- [19]. Zhu, Q., Pan, Y., Jia, X., Li, J., Zhang, M. and Yin, L., [Review on the Stability Mechanism and Application of Water-in-Oil Emulsions Encapsulating Various Additives](#). *Comprehensive reviews in food science and food safety*, **18**(6): 1660-1675 (2019)
- [20]. Hajimohammadi, R., Johari-Ahar, M. and Ahmadpour, S., [Designing of Dual Biosensor System for Detection of Zinc and Chromium from Contaminated Soil Using Saponin Biosurfactant and Bioluminescence Bacteria](#). *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, **2**(1): 1-11 (2020)

- [21] Mori, Y., Okastu, Y. and Tsujimoto, Y., [Titanium Dioxide nanoparticles Produced in Water-in-oil Emulsion](#). *Journal of Nanoparticle Research*, **3**(2): 219-225 (2001)
- [22]. Amani, H. [Synergistic Effect of Biosurfactant and Nanoparticle Mixture on Microbial Enhanced Oil Recovery](#). *Journal of Surfactants and Detergents*, **20**(3): 589-597 (2020)
- [23]. Maurya, N.K. and Mandal, A., [Investigation of Synergistic Effect of Nanoparticle and Surfactant in Macro Emulsion Based EOR Application in Oil Reservoirs](#). *Chemical Engineering Research and Design*, **132**: .370-384 (2018)