اثر شوری و نوع نمک بر زمان ادغام قطرات نفت در روش ازدیاد برداشت با آب کم‌شور

مهران کریم پور خامنه، حسن ماهانی*

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

mahani_h@yahoo.com

Accepted Paper

چکیده

مکانیزم های دخیل در ازدیاد برداشت با آب کم شور به دو دسته کلی سیال-سیال و سنگ-سیال تقسیم بندی می‌شوند. از این میان، برهم‌کنشهای سیال-سیال کمتر در مقالات مورد بررسی قرار گرفته اند. یکی از اثرات این برهم‌کنش ها حفظ و یا افزایش پیوستگی فاز نفت است که موجب بالارفتن تراوایی نسبی فاز نفت و تولید بهتر آن از مخزن می گردد. در این پژوهش برای فهم عمیق تر این اثرات و مقیاس زمانی اثر آنها، پدیده به هم‌آمیختگی[1] دو قطره نفت در مجاورت شورآب بررسی شده است. برای مطالعه این پدیده دستگاه و روش جدید آزمایشگاهی توسعه داده شد. طبق این روش ابتدا دو قطره نفت (یکی از بالا و یکی از پایین) در مجاورت شورآب مورد نظر به حالت تعلیق درآمده و پس از پیرسازی، به هم نزدیک شده و در تماس با یکدیگر قرار می گیرند. پس از تماس مدتی طول می کشد تا قطرات ادغام شوند که به عنوان "زمان ادغام" ثبت می شود. بر اساس نتایج به دست آمده، مدت زمان به هم‌آمیختگی دو قطره نفت با افزایش زمان پیرسازی افزایش می یابد و پس از ۱۵ دقیقه تقریبا ثابت می ماند. همچنین زمان ادغام دو قطره نفت رفتاری غیریکنوا با شوری از خود نشان می‌دهد و در یک شوری میانی به حداکثر میزان خود می رسد. حداکثر زمان ادغام در قدرت یونی کمتری در شوراب های شامل نمک های دو ظرفیتی مانند کلسیم، منیزیم و سولفات نسبت به نمک های تک ظرفیتی می‌رسد که این مقادیر برای شورآب های سدیم کلرید، منیزیم کلرید، کلسیم کلرید و سولفات سدیم به ترتیب در غلظت های ۰.۵، ۰.۰۵، ۰.۰۵، ۰.۰۱ مولار می باشند. نتایج این مطالعه پیش بینی می کند که مقدار بهینه شوری برای اثرات سیال-سیال در تزریق آب کم شور در افزایش برداشت نفت وجود خواهد داشت که نیازمند انجام تست های سیلابزنی می باشد.

مقدمه

سیلاب زنی با آب یکی از روش های کاربردی جهت بهبود برداشت نفت از میدانهای نفتی است[۱, ۲]. مطالعات اخیر نشان می دهد که ترکیب آب تزریقی بر بازده فرآیند سیلاب زنی تاثیر فراوان دارد[۳]. در دهه های اخیر تغییر ترکیب آب تزریقی و کاهش شوری آن منجر به توسعه روش ازدیاد برداشت نفت جدیدی شده است که تاثیر چشم گیری بر روی بازیافت نفت باقی

[1] Coalescence

مانده از مخازن،مخصوصا مخازن کربناته نفت-دوست ایران دارد[۴]. محققان این روش را با نام های مختلف از قبیل تزریق آب هوشمند[۵]، LoSal [6]، مدیریت یون پیشرفته [۲] آب تزریق شده[۷]، تنظیم یونی آب [۳][۸] و غیره. در مطالعات خود معرفی کرده اند.

مکانیزم های متعددی برای فرآیند تزریق آب کم شور پیشنهاد شده است. این مکانیزم ها از مشاهده نتایج در مقیاس های مختلف استنباط شده اند. این مکانیزم ها را به دو گروه برهم‌کنش های سیال-سیال و برهم‌کنش های سنگ-سیال می توان تقسیم بندی کرد. مکانیزم های مربوط به برهم‌کنش سنگ-سیال شامل این موارد است: ۱- مهاجرت ذرات ریز [۴] [۹, ۱۰] ۲- تغییرات pH [۱۱] ۳- تبادل یونی چندگانه [۵] [۱۲, ۱۳] ۴- انبساط لایه دوگانه [۶] [۱۲, ۱۴] ۵- انحلال کانی ها [۴, ۱۵]. مکانیزم های مربوط به برهم‌کنش سیال-سیال شامل این موارد است: ۱- تشکیل امولسیون [۷] ۲- اثرات اسمزی [۸] [۱۶, ۱۷] ۳- تغییرات نیروی کشش بین سطحی [۱۲, ۱۸] ۴- تغییر در خصوصیات ویسکوالاستیک سطح تماس دو سیال[۱۹] و دیگر مکانیزمها. با وجود این که مطالعات بسیاری برای شناخت مکانیزم های آب کم شور انجام شده است؛ نمی توان تنها از یک گونه مکانیزم موثر یاد کرد و به نظر مکانیزمهای درگیر چندگانه می باشند.

ثابت شده است که تغییر خصوصیات سطح مشترک دو سیال یکی از مکانیزم های مهم در فرآیند تزریق آب کم‌شور است. سطح تماس شورآب و نفت بسته به میزان و نوع یون و همچنین ترکیبات قطبی فاز نفت می‌تواند رفتاری ویسکوز و یا الاستیک از خود نشان دهد. آلوارادو و همکاران نشان دادند که تزریق آب کم‌شور به سیستم سبب کشسان تر شدن سطح تماس آب/نفت می‌شود و در نتیجه از به دام افتادن نفت به دلیل بریدگی [۹] (که یکی از علل اصلی به دام افتادن نفت و ناپیوسته شدن آن در محیط متخلخل است) جلوگیری می‌کند[۲۰]. چاوز و همکاران در مطالعه ای که مربوط به اثر ماده افزودنی فعال سطحی به آب بود به این نکته اشاره کردند که صرفا تغییرات ترشوندگی برای افزایش بازیافت نفت کافی نیست. آن ها مودول الاستیک و ویسکوز سطح تماس آب و نفت را در ترکیب ها و غلظت های مختلف آب اندازه گیری کردند و مشاهده کردند در یک بازه ی خاصی از غلظت نمک محلول در آب سطح تماس دو سیال خاصیت ویسکو الاستیک بالایی نشان می‌دهد و در کمتر از آن غلظت و یا بیشتر از آن این خاصیت کاهش می‌یابد. آن ها پیشنهاد دادند که در فرآیند تزریق آب کم‌شور تغییر خصوصیت سطح تماس دو سیال پارامتری مهم در مشاهده اثر آب کم‌شور است[۲۱]. کار و همکاران بر روی بازیابی نفت از مغزه های کربناته و رابطه آن با خاصیت ویسکوالاستیک سطح تماس آب و نفت مطالعاتی انجام دادند. همچنین آن ها در مطالعات خود به ترکیب آب های تزریقی سورفکتانت آنیونی (DeM) [۱۰] نیز اضافه کردند و به این نتیجه رسیدند که ویژگی ویسکوالاستیک سطح تماس آب و نفت در مقابل غلظت نمک آب تزریقی رفتاری غیر یکنواخت دارد و در یک محدوده ی خاصی از شوری سطح تماس آب و نفت رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهد. سپس با انجام تست های سیلاب زنی مغزه مشاهده کردند که روند بازیافت نفت از مغزه با روند تغییرات ویسکوالاستیسیته سطح تماس در مقابل غلظت آب تزریقی دارد. در واقع هنگامی که سطح تماس آب و نفت رفتار الاستیک از خود نشان می دهد، فیلم پیوسته نفت پایداری بالایی پیدا می کند و در مقابل قطع

[2] Advanced Ion Management
[3] Ion Tuning
[4] Fines migration
[5] Multi Ion Exchange (MIE)
[6] Double Layer Expansion (DLE)
[7] Micro dispersion formation
[8] Osmosis
[9] Oil Snapp-off
[10] Decylmaltoside

Accepted Paper

شدن مقاومت بیشتری از خود نشان می دهد؛ در نتیجه تولید نفت از مغزه افزایش پیدا می کند. پس آن ها نتیجه گرفتند که مکانیسم غالب بازیافت نفت در فرآیند تزریق آب کم‌شور الاستیک شدن سطح تماس آب و نفت است[۲۲].

به منظور مطالعه رفتار خصوصیات سطح تماس محققان از روش های مختلفی استفاده کرده اند. خواجه پور و همکاران [۲۳] با در نظر گرفتن مدت زمان آمیختن قطره نفت با فاز نفت در مجاورت شورآب های مختلف خواص سطح تماس دو سیال را مورد بررسی قرار دادند. در این روش قطرات نفت از پایین به سیستم اضافه شده اند و روی سطح آب یک لایه نفتی ایجاد کرده اند. با ادامه این روند، مدت زمان آمیختن قطره نفت با لایه نفتی اندازه گیری شده است. آن ها متوجه شدند که با افزایش غلظت نمک شورآب موجود در ظرف، مدت زمانی که طول می‌کشد تا فیلم آب موجود در بین قطره و فاز نفت تخلیه شود افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت نمک شورآب مدت زمان پیوستن قطره نفت به فاز نفت از لحظه تماس قطره با فاز نفت موجود در سطح ظرف، افزایش می‌یابد. آن ها افزودند هر چه سطح تماس دو سیال نرم تر یا به عبارت دیگر الاستیک تر باشد، مدت زمان آمیختن قطره به فاز نفت بیشتر است. مورین و همکاران آزمایش های میکروسیالی[11] را به منظور مطالعه ی تاثیر الاستیسیته بین سطحی شورآب و نفت را در مقیاس حفره انجام دادند. آن ها نقش ترکیب آب و الاستیسیته سطح را در مقیاس های مختلف زمانی مورد بررسی قرار دادند. آن ها مشاهده کردند که نفت خام پیر شده با شورآب سطم تماس الاستیک تری از خود نشان می‌دهد. و نیز در مجاورت آب کم‌شور سطح تماس دو سیال رفتاری منعطف تر از خود به نمایش می‌گذارد[۲۴]. آیرالا و همکاران برای بررسی خواص سطح تماس دو سیال مدت زمان به هم‌آمیختن دو قطره نفت را در مجاورت شورآب های مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش، دو قطره نفت در ظرفی پر از شورآب مورد نظر به صورت آویزان قرار می‌گیرد. سپس یکی از قطره ها با سرعت ثابت به قطره دیگر نزدیک می‌شود. این فرآیند توسط دوربین ثبت شده و مدت زمان بین لحظه تماس دو قطره و به هم‌آمیخته شدن آن ها سنجیده می‌شود. آن ها مشاهده کردند که با کاهش شوری آب، مدت زمان به هم‌پیوستن دو قطره نفت افزایش پیدا می‌کند. در حقیقت سطح تماس دو سیال رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهد[۲۵].

در این پژوهش با ساخت یک سامانه مناسب دیداری، روشی جدید برای مطالعه خصوصیات سطح تماس دو سیال در مجاورت شورآب های کلرید کلسیم، کلرید سدیم، کلرید منیزیم و سولفات سدیم در قدرت های یونی مختلف ارائه می شود. در این روش دو قطره نفت در مجاورت شورآب مورد نظر به تعلیق درآمده و پس از پیرسازی و تعادل، قطره ها در مجاورت همدیگر قرار می گیرند و سپس مدت زمان ادغام آن ها اندازه گیری می شود. در ادامه به ارائه کامل روش پژوهش و سپس ارائه و تفسیر نتایج به دست آمده پرداخته می شود.

روش پژوهش

شورآب

در انجام تستها شور آبهای متنوعی در بازه گسترده ای از قدرت یونی که شامل آب مقطر و آب بسیار شور می باشد تهیه شده است. در جدول ۱ غلظت ها و نمک های استفاده شده در ساخت شورآب های مختلف ارائه شده است. این نمکها شامل سدیم کلرید، منیزیم کلرید، کلسیم کلرید و سولفات سدیم می باشند که با خلوص آزمایشگاهی ۹۹.۹ درصد از شرکت صنایع شیمیایی مجللی تهیه شده اند. جهت تهیه آبها، نمکهای مورد نظر در آب مقطر با استفاده از یک همزن مغناطیسی (Alpha D-100) حل گردیدند تا محلول همگنی آماده شود.

[11] Microfluidics

Accepted Paper

جدول- ۱ ترکیب و غلظت شورآب مورد استفاده در این پژوهش.

قدرت یونی ($\frac{\text{مول}}{\text{لیتر}}$) / نوع نمک محلول	۲	۱	۰.۱	۰.۰۱
کلرید سدیم ($\frac{\text{میلی گرم}}{\text{لیتر}}$)	۱۱۶۸۸۰	۵۸۴۴۰	۵۸۴۴	۵۸۴
کلرید کلسیم ($\frac{\text{میلی گرم}}{\text{لیتر}}$)	۹۸۰۱۰	۴۹۰۰۰	۴۹۰۰	۴۹۰
کلرید منیزیم ($\frac{\text{میلی گرم}}{\text{لیتر}}$)	۱۳۵۵۳۰	۶۷۷۷۰	۶۷۷۷	۶۷۷
سولفات سدیم ($\frac{\text{میلی گرم}}{\text{لیتر}}$)	۹۴۶۹۰	۴۷۳۵۰	۴۷۳۵	۴۷۳

نفت خام

در این مطالعه از نفت خام مرده مخزن بنگستان یکی از میادین نفتی جنوب ایران استفاده شده است. قبل از استفاده نمونه نفت از کاغذ صافی با قطر حفرات ۴۲ میکرون عبور داده شده است تا تمامی ذرات جامد آن گرفته شود. همچنین نمونه نفت توسط دستگاه سونیکاتور (مدل HD2200 ، سازنده Bandelin) همگن سازی شده است تا گاز های همراه آن به طور کامل خارج شوند. در جدول ۲ خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی نفت مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است.

جدول- ۲ خصوصیات نمونه نفت خام مورد استفاده در پژوهش.

آنالیز SARA				گرانروی در **25℃ (cP)**	درجه API	وزن مخصوص در **25℃**	عدد اسیدی (mg KOH/g oil)
آسفالتین (درصد وزنی)	رزین (درصد وزنی)	آروماتیک (درصد وزنی)	اشباع (درصد وزنی)				
۱.۶۵	۹.۰۶	۲۵.۳۳	۶۳.۹۶	۲۵.۲	۳۰.۵۷	۰.۸۷۳۱	۰.۱۴

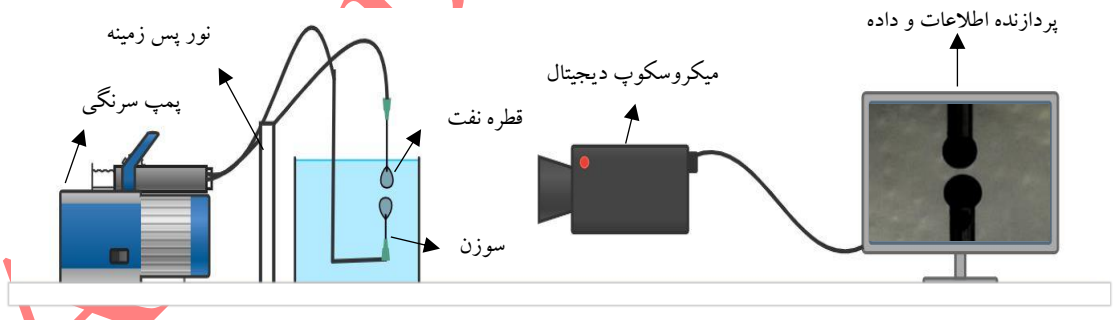
نفت مورد استفاده در این پژوهش، در مطالعات قبلی ازدیاد برداشت نفت انجام شده توسط گروه پژوهشی نیز استفاده شده است و در تستهای آب آب کم‌شور نتایج قابل توجهی نشان داده است[۶, ۲۶].

Accepted Paper

سامانه تست ادغام دوقطره نفت

در این پژوهش از یک دستگاه جدید برای بررسی رفتار سطح تماس دو سیال استفاده شده است. در این روش، مدت زمانی که طول می‌کشد دو قطره نفت که در تماس با هم هستند، به هم بپیوندند به عنوان یک پارامتر جدید اندازه گیری شده است. این پارامتر می‌تواند بیانگر خصوصیات سطح تماس مشترک شورآب و نفت و میزان نرمی ویا صلبیت آن باشد. همانطور که در مطالعات دیگر آمده است[۲۳, ۲۵]، هنگامی که در سطح تماس نفت-آب ساختاری منظم متشکل از یون های موجود در شورآب و ترکیبات قطبی نفت تشکیل می‌شود؛ سطح تماس رفتاری منعطف تر از خود نشان می‌دهد. هنگامی که سطح تماس کشسان تر می‌شود مدت زمان ادغام دو قطره نفت افزایش می‌یابد. [۲۳, ۲۴].

در شکل- ۱ شماتیک سامانه ساخته شده برای اندازه گیری زمان به ادغام دو قطره نفت در مجاورت شورآب آورده شده است. دو قطره کروی نفت (با قطر ۲ الی ۲.۳ میلیمتر) از دو سوزن با قطر داخلی $\frac{1}{16}$ اینچ که در راستای عمود مقابل هم در یک ظرف شیشه ای شفاف قرار گرفته اند، خارج می‌شوند و در فاصله ۱.۶-۱.۸ میلیمتری از هم معلق می‌مانند. سپس یکی از قطره ها توسط تزریق نفت با دبی ثابت (۰.۵ میلی لیتر بر ساعت) و بدون این که آشفتگی در سیستم رخ دهد افزایش حجم می‌یابد و بدون جدا شدن از نوک سوزن به قطره دیگر نزدیک می‌شود تا در تماس با یکدیگر قرار گیرند. این فرآیند با دوربین میکروسکپی (Dino light 1000 ×) مشاهده و تصاویر دیجیتال ثبت می‌شود. جهت تزریق نفت از دو پمپ تزریق سرنگی (شرکت فن‌آوران نانو مقیاس مدل SP100) و اتصالات مناسب استفاده گردید. جهت اطمینان از صحت نتایج ادغام دو قطره نفت هر تست سه مرتبه تکرار شده است. با میانگین گیری نتایج و محاسبه انحراف معیار نتایج میزان خطای درنظر گرفته شده حدود ۰.۵ ثانیه می‌باشد. جهت تعیین مدت زمان لازم برای به تعادل رسیدن سطح تماس مشترک دو سیال، ادغام دو قطره نفت در مجاورت شورآب کلرید سدیم ۱ مولار در زمان های ماند مختلف اندازه گیری شده است که نتایج آن در بخش بعدی ارائه خواهد شد.



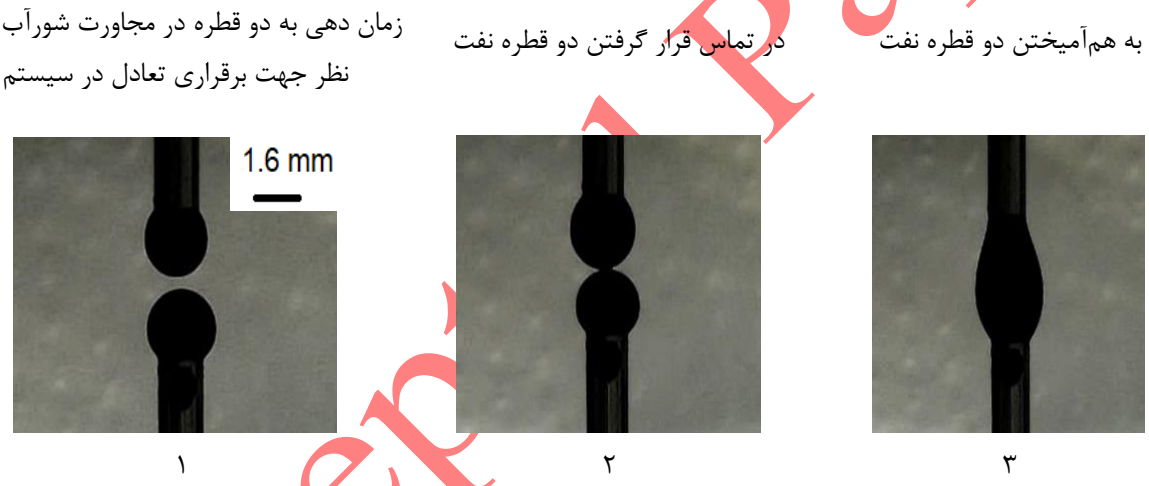
شکل- ۱ سامانه دیداری اندازه گیری ادغام دو قطره نفت در مجاورت شورآب.

Accepted Paper

نتایج و بحث

بررسی مراحل ادغام دو قطره نفت

برای بررسی زمان ادغام دو قطره نفت در مجاورت شورآب طبق روش توضیح داده شده در بخش قبل عمل شد. شکل- ۲ نشان دهنده مراحل انجام تست مذکور است. این تست در مجاورت شورآب کلرید سدیم ۱ مولار انجام شد. در مرحله یک دو قطره نفت از سرنگ خارج شده و به آن ها زمان داده می‌شود تا در مجاورت شورآب به تعادل برسند. در مرحله دو پس از گذشت مدت زمان معین (مدت زمان کافی جهت پیرشدگی سیستم) دو قطره نفت به هم نزدیک می‌شوند. در این مرحله فیلم آب بین دو قطره نفت تخلیه می‌شود و سطح تماس دو قطره نفت در مجاورت هم قرار می‌گیرند. هنگام تماس دو سطح، ساختار های موجود در سطوح تماس، در تماس با هم قرار می‌گیرند و پس از گذشت مدت زمان ساختار موجود در سطوح تماس درهم می‌شکنند و دو قطره نفت در هم ادغام می‌شوند. مرحله سه ادغام دو قطره نفت را نشان می‌دهد.



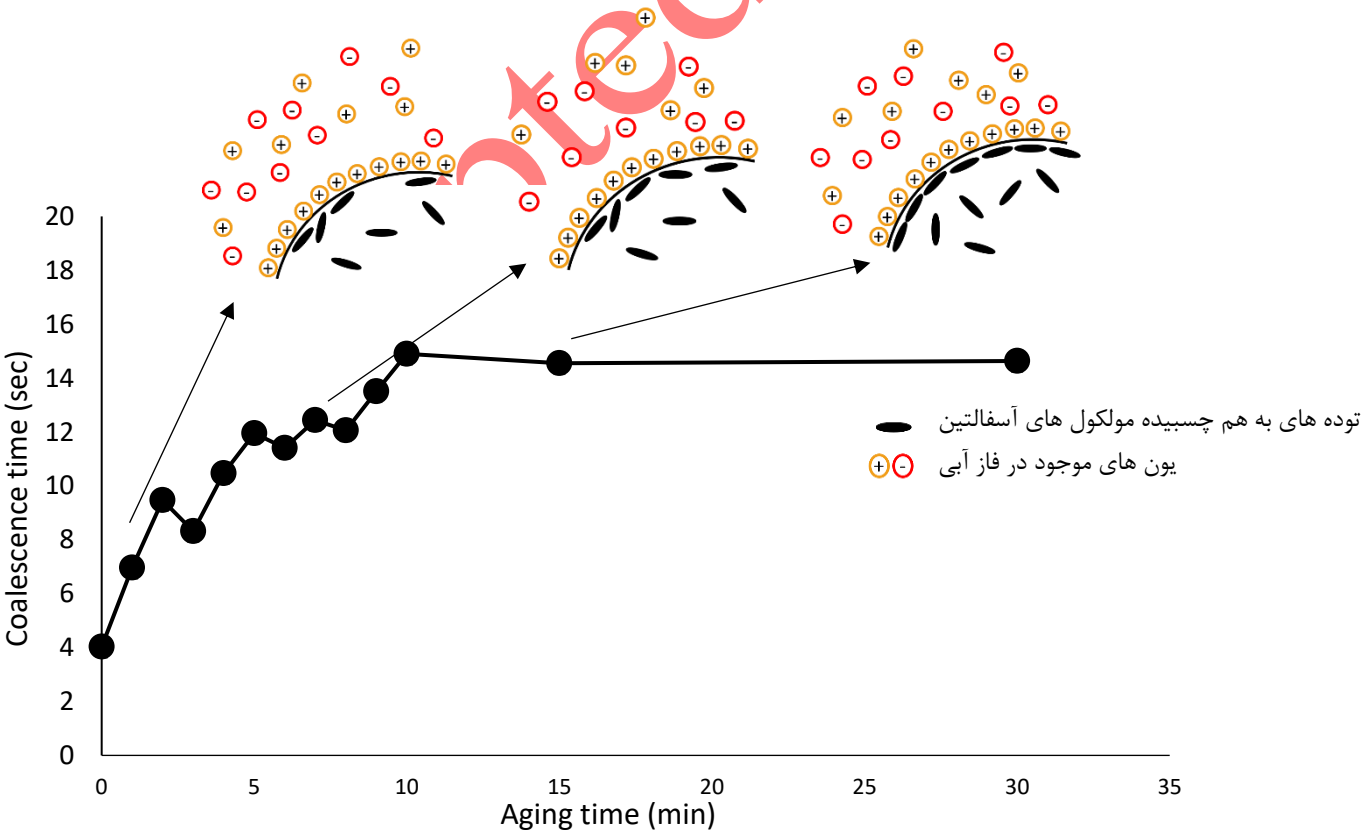
شکل- ۲ مراحل ادغام دوقطره نفت۱: تعلیق دو قطره نفت در مجاورت شورآب و پیرسازی۲: به هم نزدیک کردن دو قطره نفت بعد از پیر شدن، تخلیه فیلم آب بین سطوح و تماس دو قطره با هم ۳: ادغام دو قطره در مجاورت شورآب.

بررسی اثر مدت زمان پیرشدگی سیستم نفت-آب

برای بررسی خصوصیات سطح تماس دو سیال، ابتدا باید مدت زمانی که طول می‌کشد تا سیستم به تعادل برسد و ساختار منظمی از یون های آب و ترکیبات قطبی نفت تشکیل شود تعیین شود. با توجه به نتایج در

Accepted Paper

شکل- ۳ مدت زمان درهم‌آمیختگی دو قطره نفت با افزایش زمان پیرشدگی سیستم روند افزایشی به خود می گیرد و از ۴ ثانیه به حدود ۱۴.۹ ثانیه می رسد. در زمان پیرشدگی ۱۵ دقیقه سیستم به نقطه تعادل رسیده و با افزایش بیشتر زمان پیرشدگی سیستم، مدت زمان ادغام دو قطره نفت ثابت می شود.



ted Paper

شکل- ۳ تاثیر مدت زمان پیرشدگی بر روی مدت زمان ادغام دو قطره نفت در مجاورت شورآب ۱ مولار کلرید سدیم.

علت این رفتار اینست که در سطح تماس مشترک نفت-آب یون های شورآب، ترکیبات نفت و مولکول های آب برای تشکیل یک ساختار منظم در تعامل با همدیگر هستند[۲۱]. در زمان های اولیه، غلظت یون ها و ترکیبات قطبی در سطح تماس هنوز کم است. با گذشت زمان و پیرشدن سیستم یون های موجود در فاز آب و ترکیبات موجود در فاز نفت از توده به سمت سطح تماس مشترک نفوذ کرده و نهایتا در آن جذب می شوند و یک ساختار منظم تشکیل می دهند[۲۷].

نتایج زمان ادغام دو قطره نفت بر حسب قدرت یونی آب نمک

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، تشکیل ساختاری منظم از یون های موجود در شورآب و مولکول های آب و ترکیبات قطبی نفت سبب رفتار الاستیک سطح تماس دو سیال می‌شود. یکی از عوامل موثر بر تشکیل این ساختار غلظت نمک یا شوری آب است. شکل- ۴ به صورت شماتیک سطح تماس دو سیال را در حضور آب بسیار کم‌شور، آب کم‌شور و آب پرشور نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در حالتی که یون های محلول غلظت کمی دارند و یا غلظت بسیار بالایی دارند، ساختار منظمی در سطح تماس تشکیل نمی‌شود. اما در حالتی که غلظت بهینه ای از یون ها در شورآب وجود دارد ساختاری منظم از یون های محلول و مولکول های آب و ترکیبات قطبی نفت تشکیل می‌دهد.

شکل- ۴ شماتیک اثر غلظت یون های محلول در شورآب بر روی تشکیل ساختار منظم در سطح مشترک نفت-آب.

در شکل- ۵ نتایج زمان ادغام دو قطره نفت در مجاورت شورآب های مختلف با قدرت یونی های متفاوت ارائه شده است و در جدول-۳ مقادیر میانگین و انحراف معیار اندازه گیری های مدت زمان ادغام دو قطره ی نفت در مجاورت شورآب های مختلف است همانگونه که مشاهده می شود، زمان ادغام دو قطره نفت در مجاورت تمام شورآب ها رفتاری غیریکنواخت از خود نشان داد و بسته به نوع یونهای موجود در آب در غلظت خاصی زمان ادغام به بیشینه مقدار خود می رسد. در مجاورت شورآب کلرید سدیم بیشینه مقدار زمان ادغام در قدرت یونی ۰.۵ مولار، ۲۱.۱ ثانیه است. در مجاورت شورآب سولفات سدیم در قدرت یونی ۰.۰۱ به بیشینه مقدار خود، ۱۸.۲۶ ثانیه می رسد. در شورآب کلرید کلسیم بیشینه مقدار زمان ادغام در قدرت یونی ۰.۰۵ مولار، ۲۱.۵۱ ثانیه است و برای شورآب کلرید منیزیم زمان ادغام در قدرت یونی ۰.۰۵ مولار به بیشینه مقدار خود ۲۰.۶ ثانیه می رسد. بیشینه مقدار زمان ادغام در نمک های دو ظرفیتی در قدرت یونی کمتر از قدرت یونی نمک های تک ظرفیتی به دست آمد. که دلیل این امر به این صورت است که یون های دو ظرفیتی در قدرت یونی کمتری نسبت به یون های تک ظرفیتی، ساختار منظم در سطح تماس مشترک تشکیل می دهند. این پدیده به ماهیت یون ها وابسته است. همچنین با مقایسه نتایج

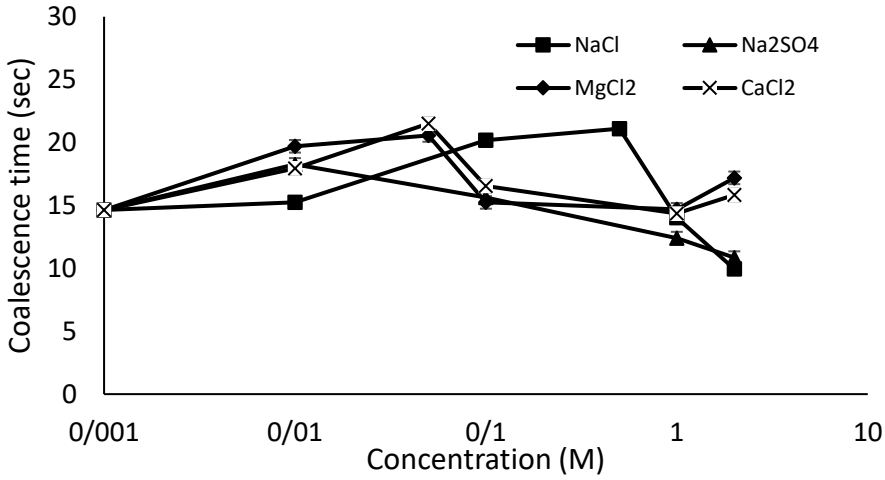
Accepted Paper

نمک های کلرید سدیم، کلرید منیزیم و کلرید کلسیم می‌توان گفت که ساختار سطح تماس دو سیال بیشتر تابع نوع کاتیون نمک است. در رابطه با نتیجه نمک سولفات سدیم می‌توان گفت که آنیون سولفات در سطح تماس دو سیال رفتار متفاوتی نشان می‌دهد و در خصوص تاثیر زیاد آن روی خصوصیات الاستیک سطح تماس دو سیال تردید وجود دارد. اما در مقالات تاثیر مثبت حضور این آنیون در آب و تعامل بالای آن با سنگ کربناته و کمک به تغییرترشوندگی سنگ گزارش شده است[۴, ۱۲]. نمک های دو ظرفیتی کلرید کلیسیم و کلرید منیزیم در قدرت یونی بیش از ۱ مولار روند افزایشی در مدت زمان ادغام نشان می‌دهند که البته تغییرات به طور نسبی خیلی جزیی است. این امر می تواند نشان دهنده تفاوت در نحوه چیدمان مجدد یون های دو ظرفیتی و تک ظرفیتی در غلظت های بالای نمک باشد. در واقع در قدرت یونی بیش از ۱ مولار ساختاری منظم برای سیستم های دارای یون های دوظرفیتی ایجاد شده است. که طی ایجاد ساختار مذکور، سطح تماس نرم تر شده و مدت زمان ادغام دو قطره نفت افزایش می‌یابد. برای درک دقیقتر این موضوع و بررسی سهم عوامل مختلف، مطالعات مقیاس مولکولی مانند شبیه سازی مولکولی می تواند بسیار راه گشا باشد.

ایجاد یک ساختمان منظم از یون ها و مولکول های فعال سطحی فاز نفت و مولکول های آب سبب بهبود خواص سطح تماس دو سیال می‌شود. در واقع وجود ساختاری منظم در سطح تماس دو سیال سبب رفتار الاستیک سطح و در نتیجه تاخیر در ادغام دو قطره نفت می‌شود. و تشکیل این ساختار، به ترکیب شورآب و نفت وابسته است. همچنین در مطالعات دیگر [۲۰, ۲۱, ۲۴] به این موضوع اشاره شده است که تشکیل ساختار منظم در سطح تماس دو سیال سبب ایجاد یک لایه (غشای) سطحی منعطف می‌شود. این خصوصیت سطح تماس سبب جلوگیری از تقسیم[۱۲] توده نفت بزرگ به توده های کوچکتر هنگام عبور از گلوگاه های باریک می‌شود. به همین ترتیب این پدیده سبب افزایش بازده جاروبی تزریق آب کم‌شور می‌شود به خصوص در حالت تزریق ثانویه می شود.. با نرم تر شدن سطح تماس آب تزریقی و نفت، آب می‌تواند در خلل و فرجی که نفت دوست هستند و نیروی مویینگی بالایی دارند نفوذ کند و نفت آن نواحی را نیز جابجا کند. این پدیده طی تزریق ثانویه آب کم‌شور به سیستم برای افزایش بازیافت نفت بسیار موثر است. اما در هنگام تزریق ثالثیه آب کم‌شور اینگونه نخواهد بود[۲۸] .در تزریق ثالثیه آب کم‌شور، در ابتدا آب پرشور به صورت ثانویه به سیستم تزریق شده است. در حین تزریق آب پرشور، سطح تماس دو سیال رفتار الاستیک از خود نشان نمی‌دهد و نفت در هنگام عبور از گلوگاه باریک تقسیم می‌شود. با تزریق آب کم‌شور، پس از آب پرشور، به صورت ثالثیه توده های کوچک نفت که در هنگام تزریق آب پرشور از هم جدا شده بودند، در مدت زمان بیشتری ادغام می‌شوند. در حین تزریق آب کم‌شور به صورت ثانویه، از همان ابتدای فرآیند جابجایی نفت با آب کم‌شور در تماس قرار می‌گیرد و سطح تماس به صورت الاستیک عمل می‌کند و سبب عدم تقسیم توده های بزرگ نفت می‌شود. در نتیجه فاز نفت به صورت پیوسته باقی می‌ماند و از این طریق تولید می‌شود و در نهایت میزان تولید در حین تزریق آب کم‌شور به صورت ثانویه بیشتر از میزان تولید در حین تزریق آب کم‌شور به صورت ثالثیه می‌شود.

Accepted Paper

[12] Snap-off



شکل- ۵ زمان ادغام دو قطره نفت در مجاورت شورآب های کلرید سدیم، کلرید منیزیم، کلرید کلسیم، سولفات سدیم در قدرت های یونی متفاوت.

جدول- ۳ مقادیر میانگین و انحراف معیار مدت زمان ادغام دو قطره نفت بر حسب ثانیه در مجاورت شورآب سولفات سدیم، کلرید منیزیم، کلرید سدیم، کلرید کلسیم با قدرت های یونی مختلف.

نوع نمک محلول / قدرت یونی ($\frac{\text{مول}}{\text{لیتر}}$)	۰.۰۱	۰.۱	۱	۲	
کلرید سدیم	۱۵.۲۴	۲۰.۱۸	۱۴.۰۴	۹.۹۵	میانگین (ثانیه)
	۰.۴۹	۰.۵۰	۰.۴۲	۰.۴۲	انحراف معیار (ثانیه)
سولفات سدیم	۱۸.۲۵	۱۵.۶۲	۱۲.۴۰	۱۰.۸۵	میانگین (ثانیه)
	۰.۱۴	۰.۳۰	۰.۲۹	۰.۴۶	انحراف معیار (ثانیه)
	۱۷.۹۵	۱۶.۵۴	۱۴.۳۶	۱۵.۸۳	میانگین (ثانیه)

Accepted Paper

انحراف معیار (ثانیه)	۰.۱۷	۰.۲۰	۰.۴۳	۰.۴۹	**کلرید کلسیم**
میانگین (ثانیه)	۱۷.۲۱	۱۴.۷۰	۱۵.۲۷	۱۹.۶۹	**کلرید منیزیم**
انحراف معیار (ثانیه)	۰.۴۸	۰.۵۰	۰.۴۹	۰.۴۹	

چاوز و همکاران با بررسی خواص رئولوژی سطح تماس دو سیال نفت و شورآب کلرید سدیم و کلرید منیزیم در غلظت های مختلف به کمک روش حلقه، مشاهده کردند که ضرایب های الاستیک و ویسکوز سطح تماس دو سیال رفتاری غیر یکنواخت با تغییر غلظت نمک دارد که با نتایج به دست آمده در این مطالعه همخوانی دارد[۲۱].

با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، مدت زمان به تعادل رسیدن سطح تماس دو سیال بین چند ثانیه تا چند دقیقه متغیر هست. این در حالیست که نتایج حاصل از ترشوندگی نفت و سطح در مجاورت آب کم‌شور در حدود حداقل چند ساعت و یا چند روز است[۶]. در واقع می‌توان گفت که مکانیزم های مربوط به سطح تماس سیال- سیال در مدت زمان کمتری نسبت به مکانیزم های مربوط به سطح تماس سنگ-سیال عمل می‌کنند و مقیاس زمانی اثر بخشی آن ها متفاوت است. البته، در خصوص بررسی تاثیر نسبی برهمکنشهای سیال-سیال و سنگ-سیال (که خارج از زمینه این پژوهش بوده است) روی ازدیاد برداشت نفت با آب کم شور هم نیاز به مطالعه جامع وجود دارد که نتایج این بررسی در مقالات بعدی گروه ارائه خواهد شد.

همچنین با توجه به این که نمونه نفت استفاده شده در این پژوهش نفت نسبتا سبک می باشد، بررسی تاثیر نوع نفت (مثلا سبک، نسبتا سبک، سنگین و فوق سنگین) و ترکیبات آن برروی بر هم کنشهای سیال-سیال و مکانیزم های دخیل در فرآیند آب کم‌شور و نهایتا ازدیاد برداشت نیازمند مطالعه جداگانه ای می باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش ادغام دو قطره نفت در حضور شورآب نمک های کلرید سدیم، کلرید کلسیم، کلرید منیزیم و سولفات سدیم در قدرت های یونی مختلف به همراه طراحی و ساخت سامانه جدیدی مورد بررسی قرار گرفت. پدیده ادغام دو قطره نفت در مجاورت شورآب می‌تواند توصیفی از ویژگی الاستیک سطح تماس دو سیال شورآب و نفت باشد و بر میزان پیوستگی فاز نفت تاثیرگذار است. بدون حفظ این پیوستگی، دیگر مکانیزمهای موثر بر تر شوندگی سنگ هم کم تاثیر خواهند شد.

بر اساس تستهای انجام شده، نتیجه گیری نهایی این پژوهش به صورت زیر است:

- با توجه به نتایج به دست آمده مدت زمان لازم برای به تعادل رسیدن بر هم‌کنشهای بین نفت-مولکولهای آب و یونها در سطح تماس دو سیال (پیرشدگی) ۱۵ دقیقه می باشد. با افزایش زمان پیر شدگی، زمان ادغام قطرات نفت هم افزایش می یابد که مربوط به تشکیل ساختارهای منظم در فصل مشترک دو سیال است و میزان الاستیسته را هم کنترل می کند.
- در تمامی شورآب های در نظر گرفته شده در آزمایش‌ها، مدت زمان ادغام دو قطره نفت رفتاری غیریکنوا با غلظت نمک یا شوری از خود نشان می دهد. به دلیل ماهیت یون های موجود در شورآب ها، در غلظت های مختلفی مدت زمان ادغام به مقدار بیشینه خود رسید.

Accepted Paper

- نمک های شامل کاتیون های دو ظرفیتی (مانند کلرید کلسیم و کلرید منیزیم) در قدرت یونی کمتری نسبت به نمک های شامل کاتیون تک ظرفیتی به مقدار بیشینه مدت زمان به هم‌آمیختگی دو قطره نفت می رسند. همچنین تغییرات مدت زمان به هم‌آمیختگی دو قطره نفت در مجاورت نمک سولفات سدیم کمتر از تغییرات دیگر نمک هاست. که در این راستا مدت زمان به هم‌آمیختگی دو قطره نفت در مجاورت نمک های کلرید سدیم (در قدرت یونی ۰.۵ مولار)، کلرید کلسیم (در قدرت یونی ۰.۰۵ مولار) و کلرید منیزیم (در قدرت یونی ۰.۰۵ مولار) به ترتیب برابر ۲۱.۱، ۲۱.۵ و ۲۰.۵ مولار به دست آمد.

بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش که وجود مقدار بهینه شوری در اثرات سیال سیال را نشان داد، می‌توان پیشنهاد داد که در یک مقدار شوری خاصی میزان برداشت نفت از سیستم به بیشین مقدار خود خواهد رسید که بررسی آن نیازمند آزمایش های دقیق سیلآبزنی است که در پژوهشهای بعدی انجام می گیرد. این مورد در افزایش بهره وری آب کم‌شور تاثیر به سزایی خواهد داشت.

مراجع

۱ Green, D.W. and G.P. Willhite, *Enhanced oil recovery*. Vol. 6. 1998: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers.

۲ Mahani, H. and G. Thyne, *Low-salinity (enhanced) waterflooding in carbonate reservoirs*, in *Recovery Improvement*. 2023, Elsevier. p. 39-107.

۳ Morrow, N. and J. Buckley, *Improved oil recovery by low-salinity waterflooding.* Journal of petroleum Technology, 2011. **63**(05): p. 106-112.

۴ Mahani, H., et al., *Electrokinetics of carbonate/brine interface in low-salinity waterflooding: Effect of brine salinity, composition, rock type, and pH on?-potential and a surface-complexation model.* Spe Journal, 2018. **22**(01): p. 53-68.

۵ RezaeiDoust, A., et al., *Smart water as wettability modifier in carbonate and sandstone: A discussion of similarities/differences in the chemical mechanisms.* Energy & fuels, 2009. **23**(9): p. 4479-4485.

۶ Mohammadi, M. and H. Mahani, *Direct insights into the pore-scale mechanism of low-salinity waterflooding in carbonates using a novel calcite microfluidic chip.* Fuel, 2020. **260**: p. 116374.

۷ Gupta, R., et al. *Enhanced waterflood for carbonate reservoirs-impact of injection water composition*. in *SPE Middle East oil and gas show and conference*. 2011. Society of Petroleum Engineers.

۸ Xie, Q., et al., *Ion tuning waterflooding in low permeability sandstone: Coreflooding experiments and interpretation by thermodynamics and simulation.* SCA2015-004, 2015.

۹ Song, W. and A.R. Kovscek, *Direct visualization of pore-scale fines migration and formation damage during low-salinity waterflooding.* Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016. **34**: p. 1276-1283.

۱۰ Morrow, N.R., et al., *Prospects of improved oil recovery related to wettability and brine composition.* Journal of Petroleum science and Engineering, 1998. **20**(3-4): p. 267-276.

Accepted Paper

١١ Austad, T., *Water-based EOR in carbonates and sandstones: New chemical understanding of the EOR potential using "smart water"*, in *Enhanced oil recovery Field case studies*. 2013, Elsevier. p. 301-335.

١٢ Mahani, H ,.et al., *Insights into the mechanism of wettability alteration by low-salinity flooding (LSF) in carbonates.* Energy & Fuels, 2015. **29**(3): p. 1352-1367.

١٣ Zhang, P., M.T. Tweheyo, and T. Austad, *Wettability alteration and improved oil recovery by spontaneous imbibition of seawater into chalk: Impact of the potential determining ions Ca2+, Mg2+, and SO42−.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007. **301**(1-3): p. 199-208.

١٤ Nasralla, R.A. and H.A. Nasr-El-Din, *Double-layer expansion: is it a primary mechanism of improved oil recovery by low-salinity waterflooding?* SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2014. **17**(01): p. 49-59.

١٥ Hiorth, A., L. Cathles, and M. Madland, *The impact of pore water chemistry on carbonate surface charge and oil wettability.* Transport in porous media, 2010. **85**(1): p. 1-21.

١٦ Fredriksen, S., et al., *Wettability effects on osmosis as an oil-mobilization mechanism during low-salinity waterflooding.* Petrophysics-The SPWLA Journal of Formation Evaluation and Reservoir Description, 2017. **58**(01): p. 28-35.

١٧ Bartels, W.-B., et al., *Oil configuration under high-salinity and low-salinity conditions at pore scale: a parametric investigation by use of a single-channel micromodel.* Spe Journal, 2017. **22**(05 :(p. 1362-1373.

١٨ Lashkarbolooki, M., S. Ayatollahi, and M. Riazi, *Effect of salinity, resin, and asphaltene on the surface properties of acidic crude oil/smart water/rock system.* Energy & fuels, 2014. **28**(11): p. 6820-6829.

١٩ Karadimitriou, N.K., et al., *Nonmonotonic effects of salinity on wettability alteration and two-phase flow dynamics in PDMS micromodels.* Water Resources Research, 2019. **55**(11): p. 9826-9837.

٢٠ Bidhendi, M.M., et al., *Interfacial viscoelasticity of crude oil/brine: An alternative enhanced-oil-recovery mechanism in smart waterflooding.* SPE Journal, 2018. **23**(03): p. 803-818.

٢١ Chávez-Miyauchi, T.s.E., A. Firoozabadi, and G.G. Fuller, *Nonmonotonic elasticity of the crude oil–brine interface in relation to improved oil recovery* .Langmuir, 2016. **32**(9): p. 2192-2198.

٢٢ Kar, T., et al., *Improved oil recovery in carbonates by ultralow concentration of functional molecules in injection water through an increase in interfacial viscoelasticity.* Langmuir, 2020. **36**(41): p. 12160-12167.

٢٣ Khajepour, H., H.A.A. Amiri, and S. Ayatollahi, *Effects of salinity, ion type, and aging time on the crude oil-brine interfacial properties under gravity condition.* Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020. **195**: p. 107896.

٢٤ Morin, B., et al., *A microfluidic flow focusing platform to screen the evolution of crude oil–brine interfacial elasticity.* Lab on a Chip, 2016. **16**(16): p. 3074-3081.

Accepted Paper

۲۵ Ayirala, S.C., et al., *Coalescence of crude oil droplets in brine systems: effect of individual electrolytes.* Energy & fuels, 2018. **32**(5): p. 5763-5771.

۲۶ Golmohammadi, M., et al., *The non-linear effect of oil polarity on the efficiency of low salinity waterflooding: A pore-level investigation.* Journal of Molecular Liquids, 2021: p. 117069.

۲۷ Moeini, F., et al., *Toward mechanistic understanding of heavy crude oil/brine interfacial tension: The roles of salinity, temperature and pressure.* Fluid phase equilibria, 2014. **375**: p. 191-200.

۲۸ Namaee-Ghasemi, A., S. Ayatollahi, and H. Mahani, *Insights into the Effects of Pore Structure, Time Scale, and Injection Scenarios on Pore-Filling Sequence and Oil Recovery by Low-Salinity Waterflooding Using a Mechanistic DLVO-Based Pore-Scale Model.* SPE Journal, 2023: p. 1-17.

Accepted Paper

The effect of salinity and salt type on the coalescence time of oil droplets in low-salinity enhanced oil recovery

Abstract

The mechanisms involved in increased oil recovery by low-salinity waterflooding are divided into two general groups: fluid-fluid and rock-fluid. Among these mechanisms, fluid-fluid interactions have been investigated less in the published literature. One of the effects of these interactions is maintaining or increasing the connectivity of the oil phase, which increases the relative permeability of the oil phase and its production rate from the reservoir. In this research, for a deeper understanding of these effects and the time scale of their effects, the coalescence of two adjacent oil droplets in the vicinity of a saline water has been investigated. A new device and method was developed to study this phenomenon. According to this method, two drops of oil (one pendent from the top and one from the bottom) are placed in the vicinity of the desired brine, and after an aging time, they are brought close to each other to start contacting with each other. After the contact, it takes some time for the droplets to coalesce, which is recorded as the "coalescence time". Based on the obtained results, the coalescence time increases with the increase of the aging time and remains almost constant after 15 minutes. Also, the coalescence time of two oil droplets shows a nonmonotonic behavior with salinity and reaches its maximum value at an intermediate salinity. The maximum coalescence time occurs at a lower ionic strength in brines containing divalent salts such as calcium, magnesium and sulfate compared to that in monovalent salts. These values for sodium chloride, magnesium chloride, calcium chloride and sodium sulfate brines are 0.5, 0.05, 0.05, 0.01 M respectively. The results of this study highlights that there will be an optimal salinity for fluid-fluid effects in low-salinity waterflooding. Understanding their effect on oil recovery requires waterflooding experiments.

Accepted Paper