

کاربرد نانوذرات در تغییر ترشوندگی مخازن نفتی

رضا آذین^۱، ایمان آماره^۱، رحمت الله صبوری^۲، شهریار عصفوری^۲

۱. دانشگاه خلیج فارس، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، گروه مهندسی نفت

۲. دانشگاه خلیج فارس، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، گروه مهندسی شیمی

چکیده

نیاز روز افزون جهان به انرژی و محدودیت ذخایر هیدروکربوری، پژوهشگران را به طراحی شیوه‌های جدید و مقرون به صرفه بیشترین تولید از مخازن نفتی را به دنبال داشته باشد. در دهه اخیر استفاده از مواد شیمیایی از جمله نانوذرات جهت تغییر ترشوندگی مخازن به منظور افزایش برداشت نفت مورد توجه قرار گرفته است. نانوذرات با افزوده شدن به یک سیال، می‌توانند میزان برداشت نفت را افزایش دهند. پایداری نانو سیال‌ها و طراحی آن‌ها به گونه ای که با شرایط مخزن و محیط زیست سازگار باشند از ظرفیت‌های بالقوه این مواد می‌باشد. در این پژوهش با ارائه معیارهای غربالگری نانوذرات، نقشه راه انتخاب نانوذره مناسب را بیان کرده و در ادامه با طرح موضوع آنالیز حساسیت به اثر بخشی شاخص‌ها پرداخته شده است. جدول غربالگری و آنالیز حساسیت، طراحی آزمایش‌ها را برای رسیدن به نتیجه مطلوب را هموار کرده و باعث صرفه جویی در هزینه و زمان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ترشوندگی، نانوذرات، ازدیاد برداشت، مخازن نفت و گاز

osfour@pgu.ac.ir

۱- مقدمه

نفت به عنوان مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده انرژی دنیا به شمار می‌آیند. حال با توجه به گسترش روز افزون مصرف انرژی در دنیا و همچنین محدودیت منابع نفتی در جهان، بهره برداری از منابع هیدروکربوری با بالاترین بازدهی از اولویت‌های اصلی شرکت‌های نفتی دنیا به شمار می‌آید. برداشت از مخازن نفتی به سه دسته بازیابی اولیه، بازیابی ثانویه، بازیابی ثالثیه (ازدیاد برداشت) تقسیم‌بندی می‌شوند. در مرحله اولیه نفت با انرژی طبیعی خود به سطح جریان پیدا می‌کنند و اگر این توانایی به صورت طبیعی وجود نداشته باشد از روش‌های فراآوری مصنوعی جهت تولید استفاده می‌گردد. با گذشت زمان به دلیل تولید نفت، فشار مخزن کاهش پیدا کرده که برای حفظ تثبیت فشار و افزایش تولید، با تزریق سیال خارجی به عنوان منبع انرژی به مخزن، عمدتاً آب و یا گاز، استفاده می‌شود. سیلاب‌زنی آب و تزریق گاز از روش‌های ثانویه تولید به حساب می‌آیند. درصد بازیافت نفت در این دو مرحله ۲۵-۴۵ درصد می‌باشد. روش‌هایی که بعد از بازیابی اولیه و ثانویه جهت استخراج نفت باقیمانده از مراحل قبل و افزایش تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد را روش‌های ثالثیه (ازدیاد برداشت) گویند که به چهار دسته کلی، حرارتی، تزریق مواد شیمیایی، تزریق گاز و استفاده از روش‌های دیگر تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به شرایط سنگ و سیال مخزن، از بین روش‌های مختلف، روش مناسب انتخاب و به کارگرفته می‌شود. سیلاب‌زنی آب به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌های ازدیاد برداشت نیز مطرح بوده است [۱]. در دهه‌های قبل به کیفیت آب تزریقی به مخازن جهت ازدیاد برداشت توجه نمی‌شد، ولی اکنون ترکیب یونی و تنظیم شوری آب تزریقی (آب هوشمند) جهت افزایش میزان

بازیافت نفت، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۲]. آب هوشمند، نسبت به سایر روش‌های ازدیاد برداشت ساده‌تر، هزینه کمتر و عملکرد قابل توجه آن در بررسی‌های آزمایشگاهی و مدل‌های کوچک مشابه‌سازی، بسیار مورد توجه قرار داده است [۳]. هم‌زمان با گسترش کاربردهای روزافزون فناوری جدید نانو در عرصه‌های مختلف علمی از قبیل مهندسی مواد و پزشکی و زیست‌شناسی و فناوری اطلاعات و... صنعت نفت نیز کاربرد این فناوری را در کل بدنه خود از صنایع بالا دستی گرفته تا صنایع پایین دستی احساس کرده است. بخش‌های بالادستی چون اکتشاف، استخراج، حفاری، مدیریت مخزن و ازدیاد برداشت و پایین دستی همچون تولید، فرآوری و پالایش به طور ملموس کاربرد این فناوری را درک کرده‌اند. فناوری نانو از طریق نانو حسگرها، نانو غشاهای، نانو مواد، نانو سیالات و نانو کاتالیست‌ها برای پژوهشگران صنعت نفت محوریت خاصی پیدا کرده‌اند [۴]. یکی از روش‌های که در دهه اخیر جهت ازدیاد برداشت از مخازن نفتی جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌است، تغییر ترشوندگی سنگ مخزن با استفاده از مواد شیمیایی می‌باشد. تغییر ترشوندگی سنگ مخزن در مخازن نفتی از نفت‌دوست به حالت خنثی و یا آب‌دوست، باعث کاهش میزان نفت به دام افتاده و افزایش تولید نهایی از مخازن نفتی می‌گردد. این تغییر ترشوندگی از طریق ایجاد نیروی دافعه بین سنگ و نفت و یک نیروی جاذبه بین سنگ با آب ایجاد می‌گردد. در این مقاله با بررسی مطالعات انجام شده، نانوذرات و نانو سیال‌های مختلف به منظور ازدیاد برداشت در مخازن نفتی ارزیابی، دسته بندی و تحلیل می‌شود. در ادامه با تحلیل شاخص‌های تاثیرگذار بر فرایند تغییر ترشوندگی به کمک نانوذرات، معیارهای غربالگری انتخاب نانوذره مناسب تعیین

می‌گردد. همچنین با انجام آنالیز حساسیت و طراحی آزمایش، نقشه راه پژوهش‌های آزمایشگاهی در این حوزه ارائه خواهد شد.

۲- مکانیسم اثر بخشی نانوذرات در مخازن نفتی

با گسترش علم نانو استفاده از نانو ذرات جهت بهبود میزان برداشت نفت مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات با بهبود خواص سیال تزریقی، تغییر شرایط سنگ و یا سیال مخزن باعث ازدیاد برداشت نفت می‌شوند. گرانیوی کربن دی‌اکسید با اضافه کردن یک درصد نانو ذره مس اکسید تقریباً ۱۴۰ برابر افزایش می‌یابد. با افزایش گرانیوی سیال تزریقی، نسبت تحرک‌پذیری کاهش یافته و بازدهی جاروبی افزایش پیدا می‌کند و در نهایت باعث ازدیاد برداشت می‌شود [۵]. استفاده از نانو ذرات باعث افزایش خواص رئولوژیکی و ایجاد تغییر در کشش سطحی می‌شود [۶]. در تأسیسات سطحی، نانوفناوری می‌تواند به جداسازی و خالص‌سازی سیالات هیدروکربوری کمک می‌کند [۷]. استفاده از نانوذرات در جهت پایداری کردن امولسیون‌های تزریق‌شده به مخزن از کاربردهای دیگر فناوری نانو است [۸]. پژوهش‌های جو و همکاران نشان داد که استفاده از نانوذره پلی‌سیلیکون می‌تواند باعث تغییر ترشوندگی سنگ مخزن و تغییر آن از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست شود [۹]. برخی از نانوذرات با افزایش حجم خود و بستن انتخابی کانال‌های بزرگ باعث ازدیاد برداشت می‌شوند [۱۰]. با افزودن نانوذره به یک سیال می‌توان خواص آن از جمله چگالی، گرانیوی، هدایت حرارتی و گرمای مخصوص و... را به حالت بهینه تنظیم کرد [۱۱]. می‌توان گفت نانو سیالات با مکانیزم‌های مختلف باعث بهبود تولید و افزایش برداشت می‌شوند. هریک از این مکانیزم‌ها وابسته به شرایط مخزن و سیال است. در مخازن نفت سنگین، تغییر گرانیوی و هدایت حرارتی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. شاکرلو و همکاران نشان دادند که می‌توان گرانیوی نفت سنگین را با نانوذرات فلزی حتی در دمای اتاق کاهش داد و این کاهش گرانیوی به ترکیب نفت به خصوص اجزای سنگین آن و نوع نانوذره بستگی دارد [۱۲]. همچنین نشان دادند که افزودن نانوذرات فلزی نیکل به نفت سنگین باعث افزایش ۱۰ درصد بازده نهایی می‌شود [۱۳].

۳- کاربرد نانوذرات در تغییر ترشوندگی سنگ مخازن نفتی

ترشوندگی تمایل چسبندگی یک سیال به سنگ در حضور سیال غیرامتزاجی دیگر تعریف می‌گردد. روش‌های تعیین ترشوندگی به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. چسبندگی بین سیال و سطح سنگ توسط زاویه تماس تعریف می‌گردد [۱۴]. زاویه تماس دقیق‌ترین روش از مجموعه روش‌های دسته مستقیم می‌باشد. زاویه تماس آب‌دوست، نفت‌دوست و خنثی بودن سنگ مخزن را نشان می‌دهد. از جمله روش‌های غیرمستقیم روش سل آموت، روش USBM و... می‌توان نام برد [۱۵]. تغییر ترشوندگی از نفت‌دوست به آب‌دوست یا خنثی بر زاویه تماس، تراوایی نسبی سیال، کشش سطحی، نسبت تحرک‌پذیری، میزان نفت باقیمانده و میزان تولید و... اثر گذار می‌باشد. از جمله موادی که جهت تغییر ترشوندگی مخازن نفتی کاربرد دارند می‌توان به مواد پلیمری [۱۶]،

ارایه نتایج مطالعاتی در این قالب می‌تواند با معرفی نانوذرات مناسب با بهترین درصد بازیافت، کلید حل مشکلات باشد. ارایه مطالب و نتایج در قالب جدول غربالگری نانوذرات کمک می‌کند که بتوان به صورت سرانگشتی با توجه به نتایج، نوع نانوذره‌ها، سیال‌های پایه، ویژگی‌های سنگ به نتیجه نهایی دست یافت. این اطلاعات کمک می‌کند که کمبودهای مطالعات گذشته را بهتر درک کرده و آزمایش‌های پیش‌رو را هدفمند طراحی کرد. همچنین ارایه میزان حساسیت شاخص‌های مختلف بر ازدیاد برداشت، به اولویت‌دهی و کاهش تعداد سناریوهای مختلف آزمایشگاهی می‌انجامد. همچنین تعیین غلظت بهینه نانوذره می‌تواند اقتصادی بودن استفاده از نانوذرات را توجیه کند. هر چقدر حجم مطالعات در این حوزه بیشتر شود، می‌توان نتایج را با قطعیت بیشتری بیان کرد. در جدول ۱، شاخص‌های مؤثر در ازدیاد برداشت به کمک نانوذرات ذکر شده است. جدول ۲ نمونه‌ی کامل شده جدول غربالگری ازدیاد برداشت به کمک نانوذرات بر اساس مطالعات پیشین را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود داده‌های پژوهش در قالب یک جدول به راحتی قابل تحلیل می‌باشد. در این صورت می‌توان کاستی‌های یک پژوهش را شناسایی و آزمایش‌های بعدی را بطور هدفمند بر اساس جدول طراحی کرد.

شده است [۲۳]. زید و همکاران، در تحقیق خود نشان دادند که نانوذره روی اکسید با تغییر نیروی بین سطحی باعث ازدیاد برداشت می‌شود. افزایش ضریب بازیافت در این تحقیق حدود ۴۹ درصد گزارش شده است [۲۴]. گیرالدو و همکاران با بررسی نانوذره آلومینیوم اکسید، تغییر ترشوندگی سنگ از نفت دوست با زاویه تماس ۱۴۲-۱۰۴ درجه به سمت آب دوست با زاویه تماس ۱۵-۰ درجه را گزارش داده اند. میزان اشباع آب باقیمانده در نمونه از ۷ به ۲۳ درصد افزایش یافته است که این هم دلیلی بر آب دوست شدن نمونه است [۲۵]. از جمله تجربیات میدانی می‌توان به تزریق نانوذرات مس اکسید به مخزن نفت سنگین آلاسکا اشاره کرد که باعث افزایش برداشت ۱۸ درصدی نسبت به تزریق کربن دی‌اکسید شد [۲۶]. همچنین، تزریق محلول سوسپانسیون نانوذرات سیلیکون به نه چاه مورد آزمایش در کشور چین که افزایش ۵ درصدی سرعت تزریق متوسط سیال بعد از تزریق نانومواد را به دنبال داشت [۲۷].

۴- جدول غربالگری

انتخاب نانوذره مناسب جهت بهترین بازدهی در فرآیند ازدیاد برداشت منوط به تحقیقات و مطالعات ساختار یافته در این زمینه می‌باشد. جدول غربالگری می‌تواند کمک شایانی به این امر کند.

جدول ۱: شاخص‌های مؤثر بر جدول غربالگری ازدیاد برداشت به کمک نانوذرات

نانوذره	سیال پایه	نفت مورد استفاده	ویژگی‌های سنگ	شرایط آزمایش	میزان تغییرات
نوع نانوذره	آب مقطر	درجه API	تخلخل	دما	زاویه تماس
اندازه نانوذره	اتانول	گرانروی	تراوایی	فشار	نیروهای کشش سطحی
سطح مخصوص نانوذره			نوع سنگ		درصد بازیافت

جدول ۲: غربالگری ازدیاد برداشت به کمک نانوذرات

بررسی خواص و کاربردهای نانوذرات سیلیکا در صنایع مختلف													
نانو سیال			نفت		شرایط		سنگ		نتیجه				
نانوذره	سیال پایه	اندازه (نانومتر)	سطح مخصوص (مترمربع بر گرم)	گرانروی (سانتی پوز)	API	فشار	دما (سانتی گراد)	سیستم	تخلخل	تراوایی (میلی داریسی)	زاویه تماس	درصد بازیافت	منابع
اکسید آلومینیوم	آب مقطر	۴۰	۶۰	۵۳/۲۷	۲۲/۱۴	۲۷	۲۷	بسترشنی	---	---	---	+۵	[۱۹]
	آب نمک	۴۰	۶۰	۵۳/۲۷	۲۲/۱۴	۲۷	۲۷	بسترشنی	---	---	---	+۵	[۱۹]
	اتانول	۴۰	۶۰	۵۳/۲۷	۲۲/۱۴	۲۷	۲۷	بسترشنی	---	---	---	+۵	[۱۹]
سیلیکا (۰/۱ درصد)	آب مقطر	۱۴	۲۰۰	۸۹/۶	۱۹	۲۶	۲۶	میکرومدل	۳۰	۲۰۰	۹۵/۲۵	+۰/۸	[۲۱]
	آب نمک	۱۴	۲۰۰	۸۹/۶	۱۹	۲۶	۲۶	میکرومدل	۳۰	۲۰۰	۹۵/۲۵	+۰/۸	[۲۱]
	سیلیکا (۳ درصد)	۱۴	۲۰۰	۸۹/۶	۱۹	۲۶	۲۶	میکرومدل	۳۰	۲۰۰	۹۹/۸۴	+۲۶	[۲۱]
اکسید آهن	آب مقطر	۵۰	---	۴۷/۹	۲۷/۴	۲۰	۲۰	کربناته	۱۳-۲۴	۷۷-۱۴۹	---	+۷/۵	[۲۸]
	آب نمک	۵۰	---	۴۷/۹	۲۷/۴	۲۰	۲۰	کربناته	۱۳-۲۴	۷۷-۱۴۹	---	+۷/۵	[۲۸]
	اکسید مس	۵۰	---	۴۷/۹	۲۷/۴	۲۰	۲۰	کربناته	۱۳-۲۴	۷۷-۱۴۹	---	+۷/۵	[۲۸]

حساسیت کاهش تعداد آزمایش ها را به دنبال خواهد داشت. البته آنالیز حساسیت می‌تواند بر روی موارد دیگر که در جدول غربالگری بیان شده است، نیز مورد بررسی قرار گیرد.

۶- نتیجه گیری

فناوری نانو را می‌توان راه حل مناسبی جهت پاسخگویی به چالش‌های آینده صنعت نفت دانست. صرفه اقتصادی، سازگاری با محیط و بالاترین بازدهی از عوامل مهم در انتخاب نانوسیال مناسب هستند. این انتخاب وابسته به شناخت شرایط سنگ و سیال مخزن و مکانیزم‌های اثرگذاری نانوسیال می‌باشد. همه نانوذرات باعث بهبود شرایط ازدیاد برداشت نمی‌شوند. جدول غربالگری ازدیاد برداشت به کمک نانوذرات با در نظر گرفتن عوامل مؤثر در استفاده از نانوذرات راه را برای انتخاب نانوذره مناسب فراهم کرده و شرایط را برای عبور از چالش‌های پیش‌رو آسان‌تر می‌کند. آنالیز حساسیت در کنار جدول غربالگری سناریوهای مطرح برای آزمایش را هدفمند و کمتر می‌کند تا در وقت و هزینه‌ها صرفه‌جویی شود. می‌توان با تکرارپذیر کردن آزمایش‌ها و نزدیکی شرایط آزمایش به واقعیت گام‌های خوبی را برای عملیاتی کردن روش های ازدیاد برداشت به کمک نانوذرات برداشت.

۷- منابع

- [1] D. W. Green and G. P. Willhite, Enhanced oil recovery: Richardson, Tex.: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, 1998.
- [2] N. Morrow and J. Buckley, "Improved oil recovery by low-salinity waterflooding," Journal of Petroleum Technology, vol. 63, pp. 106-112, 2011.
- [3] T. Sorop, B. Suijkerbuijk, S. Masalmeh, M. Looijer, A. Parker, D. Dindoruk, S. Goodyear, and I. Al-Qarshubi, "Integrated approach in deploying low salinity waterflooding," in Paper SPE 165277 presented at the SPE Enhanced Oil Recovery Conference held in Kuala Lumpur, Malaysia, 2013, pp. 2-4.
- [4] X. Kong and M. Ohadi, "Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry- Overview of the Recent Progress," in Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference, 2010.
- [5] S. Rusheet, "Application of nanoparticle saturated injectant gases for EOR of heavy oils," in SPE annual technical conference and exhibition. New Orleans, Louisiana, USA, 2009.
- [6] B. Suleimanov, F. Ismailov, and E. Veliyev, "Nanofluid for enhanced oil recovery," Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 78, pp. 431-437, 2011.

۵- آنالیز حساسیت ازدیاد برداشت به کمک نانوذرات

تعداد زیاد شاخص‌های مؤثر و بررسی اثر تمامی آن‌ها بر فرآیند ازدیاد برداشت به کمک نانوذرات، دشوار و نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی است. با توجه به اینکه هدف، انتخاب بهینه و مناسب نانوذره می‌باشد، بنابراین می‌توان با بررسی آنالیز حساسیت، شاخص‌های مختلف را با توجه به میزان اثرگذاری آن‌ها اولویت‌بندی و آزمایش‌ها را با جامعه آماری کمتری طراحی کرد. در واقع آنالیز حساسیت، اثر گذاری هر یک از شاخص‌ها را بر طراحی آزمایش‌ها و نتیجه نهایی مشخص می‌کند. هندرینگرات و همکاران [۲۹] در یکی از تحقیقات خود با بررسی پارامترهای مختلف از قبیل اندازه نانوذرات، تراوایی سنگ، ترشوندگی اولیه سنگ، نرخ تزریق و دما میزان حساسیت هر یک از پارامترها را در میزان برداشت نفت طی فرآیند تزریق نانو مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق در ادامه آمده است.

۱-۵- اثر اندازه نانو ذرات

هر چه اندازه نانوذرات کوچکتر باشد، احتمال ورود آنها به منافذ بیشتر شده و سطح بیشتری تحت تأثیر نانوذره قرارگرفته و در نتیجه نفت بیشتری تولید و درصد بازیافت نفت افزایش پیدا می‌کند.

۲-۵- اثر تراوایی سنگ

آزمایش نمونه‌هایی با گستره تراوایی بین ۷ تا ۲۲۳ میلی‌داری نشان دادند که تراوایی ارتباط مستقیم با افزایش بازیافت نفت ندارد به عبارت دیگر با تغییر تراوایی، تغییری در افزایش بازیافت نفت مشاهده نمی‌شود و برای گستره زیاد تراوایی می‌توان از تزریق نانوذرات استفاده کرد.

۳-۵- اثر ترشوندگی اولیه سنگ

بررسی نمونه با ترشوندگی‌های مختلف در بازه قویاً آب‌دوست تا نفت‌دوست و ترشوندگی میانه صورت گرفته است. بیشترین ازدیاد برداشت مربوط به ترشوندگی میانه بوده است.

۴-۵- اثر نرخ تزریق

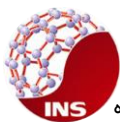
نانوذرات با نرخ‌های مختلف ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه تزریق شده‌است. با افزایش نرخ تزریق نانوذره، میزان بازیافت نفت به دلیل انباشته‌شدن نانوذرات و افزایش احتمال ته نشین شدن در گلوگاه‌ها و فضاهای خالی کاهش می‌یابد.

۵-۵- اثر دما

افزایش دما می‌تواند باعث کاهش ویسکوزیته نفت و افزایش حرکت برونی و در نهایت افزایش برداشت نفت، را به دنبال داشته باشد.

با توجه به پارامترهای ذکر شده می‌توان استنباط کرد که شاخص اندازه نانوذرات، نرخ تزریق و دمای آزمایش از اولویت بالاتری نسبت به شاخص‌های دیگر برخوردار است. بنابراین برای طراحی آزمایش‌ها باید سهم بیشتری را برای آن‌ها در نظر گرفت. آنالیز

- [7] S. Ayatollahi and M. M. Zerafat, "Nanotechnology-assisted EOR techniques: New solutions to old challenges," in SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, 2012.
- [8] T. Zhang, D. Davidson, S. L. Bryant, and C. Huh, "Nanoparticle-stabilized emulsions for applications in enhanced oil recovery," in SPE Improved Oil Recovery Symposium, 2010.
- [9] B. Ju, T. Fan, and M. Ma, "Enhanced oil recovery by flooding with hydrophilic nanoparticles," China Particology, vol. 4, pp. 41-46, 2006.
- [10] S. Kapusta, L. Balzano, and P. M. Te Riele, "Nanotechnology Applications in Oil and Gas Exploration and Production," in International Petroleum Technology Conference, 2011.
- [11] R. Krishnamoorti, "Extracting the benefits of nanotechnology for the oil industry," Journal of petroleum technology, vol. 58, 2006.
- [12] Y. Hamed Shokrlu and T. Babadagli, "Effects of nano-sized metals on viscosity reduction of heavy oil/bitumen during thermal applications," in Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 2010.
- [13] Y. H. Shokrlu and T. Babadagli, "Transportation and interaction of nano and micro size metal particles injected to improve thermal recovery of heavy-oil," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2011.
- [14] K. L. Mittal, Contact angle, wettability and adhesion vol. 4: CRC Press, 2006.
- [15] W. Anderson, "Wettability literature survey-part 2: Wettability measurement," Journal of Petroleum Technology, vol. 38, pp. 1,246-1,262, 1986.
- [16] R. Fernandez, M. M. Fahes, B. Zoghbi, and N. S. El Cheikh Ali, "Wettability Alteration at Optimum Fluorinated Polymer Concentration for Improvement in Gas Mobility," in SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, 2011.
- [17] Y. Zheng and D. N. Rao, "Experimental Study of Spreading and Wettability Effects by Surfactants in Condensate Reservoirs at Reservoir Conditions," in SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 2011.
- [18] A. R. Doust, T. Puntervold, S. Strand, and T. Austad, "Smart water as wettability modifier in carbonate and sandstone," in 15th European symposium on improved oil recovery, Paris, France, 2009.
- [19] N. Ogolo, O. Olafuyi, and M. Onyekonwu, "Enhanced oil recovery using nanoparticles," in SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, 2012.
- [20] A. Karimi, Z. Fakhroueian, A. Bahramian, N. Pour Khiabani, J. B. Darabad, R. Azin, and S. Arya, "Wettability alteration in carbonates using zirconium oxide nanofluids: EOR implications," Energy & Fuels, vol. 26, pp. 1028-1036, 2012.
- [21] A. Maghzi, S. Mohammadi, M. H. Ghazanfari, R. Kharat, and M. Masihi, "Monitoring wettability alteration by silica nanoparticles during water flooding to heavy oils in five-spot systems: A pore-level investigation," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 40, pp. 168-176, 2012.
- [22] A. Roustaei, J. Moghadasi, H. Bagherzadeh, and A. Shahrabadi, "An Experimental Investigation of Polysilicon Nanoparticles' Recovery Efficiencies through Changes in Interfacial Tension and Wettability Alteration," in SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, 2012.
- [23] M. O. Onyekonwu and N. A. Ogolo, "Investigating the use of nanoparticles in enhancing oil recovery," in Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 2010.
- [24] H. M. Zaid, N. Yahya, and N. R. A. Latiff, "The effect of nanoparticles crystallite size on the recovery efficiency in dielectric nanofluid flooding," in Journal of Nano Research, 2013, pp. 103-108.
- [25] J. Giraldo, P. Benjumea, S. Lopera, F. B. Cortes, and M. A. Ruiz, "Wettability alteration of sandstone cores by alumina-based nanofluids," Energy & Fuels, vol. 27, pp. 3659-3665, 2013.
- [26] B. Ju, S. Dai, Z. Luan, T. Zhu, X. Su, and X. Qiu, "A study of wettability and permeability change caused by adsorption of nanometer structured polysilicon on the surface of porous media," in SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 2002.
- [27] P. Pourafshary, S. Azimpour, P. Motamedi, M. Samet, S. Taheri, H. Bargozi, and S. Hendi, "Priority assessment of investment in development of nanotechnology in upstream petroleum industry," in SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium, 2009.
- [28] M. Haroun, S. Alhassan, A. A. Ansari, N. A. M. Al Kindy, N. Abou Sayed, A. Kareem, B. Ali, and H. K. Sarma, "Smart nano-EOR process for Abu Dhabi



carbonate reservoirs," in Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, 2012, pp. 11-14.

[29] L. Hendraningrat, H. Li, and O. Torsater, "Effect of Some Parameters influencing Enhanced Oil Recovery

Process using Silica Nanoparticle:An Experimental Investigation," in SPE Abu Dhabi, 2013.