

کاربرد نانو سیالات در تغییرات خواص سنگ و سیال مخزن برای ازدیاد برداشت نفت

زهرا حسینی

فارغ التحصیل رشته مهندسی نفت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه

چکیده

در مخازن نفتی رایج، بعد از حفاری یک چاه، هیدروکربن‌ها با استفاده از نیروهای طبیعی خود مخزن شروع به تولید می‌کنند. بعد از مدتی که از تولید می‌گذرد، انرژی مخزن کاهش می‌یابد و روش‌های بازیافت ثانویه برای ثابت نگه‌داشتن دبی تولیدی استفاده می‌شوند. رایج‌ترین روش ثانویه، سیلاب زنی به‌وسیله‌ی تزریق آب در مخزن می‌باشد، بدین‌صورت نفت به تله افتاده به سمت چاه‌های تولیدی حرکت می‌کند. سیلاب زنی یک روش بلند مدت برای تولید نفت نیست و به‌محض اینکه آب، راهی برای تولید شدن پیدا کند، بالا می‌رود و از این‌رو تزریق بیش از این از لحاظ اقتصادی سودمند نیست؛ بنابراین روش‌های ثالثیه یا روش‌های EOR مطرح می‌شوند. در این روش‌ها به‌وسیله‌ی نوع خاص سیال، سنگ و یا خواص سیال تغییر کرده است و بخش دیگری از نفت به تله افتاده، می‌تواند تولید شود. نانو ذرات یکی از عوامل جدید ازدیاد برداشت هستند که توسط مهندسان نفت مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این کار، از دو نوع نانو ذرات برای مطالعه‌ی تأثیر نانو ذرات روی بازیافت نفت اضافی، استفاده شده است. در مرحله‌ی اول اختلاف غلظت نانو سیالات بررسی شد و تأثیر هر غلظت روی IFT و زاویه‌ی ترشوندگی تعیین شد. پس از مشخص شدن غلظت مورد نظر (مطلوب) نانو سیال، برای هر دو نوع نانو ذرات، ابتدا دو نمونه‌ی ماسه‌سنگی به‌وسیله‌ی چهار پورولیوم brine سیل زده شدند و سپس با سه پورولیوم نانو سیال، و حجم نفت تولیدی برای محاسبه‌ی ضریب بازیافت، ثبت شد. نتایج نشان دادند که نانو ذرات آب گریز و نانو ذرات با ترشوندگی خنثی، می‌توانند ضریب بازیافت را در نمونه‌های مغزه‌ی ماسه‌سنگی به ترتیب به ۲۳/۸ درصد و ۲۹/۹ درصد افزایش دهند. این بهبود (پیشرفت) در نمونه‌های ماسه‌سنگی می‌تواند ناشی از کاهش کشش بین سطحی و تغییرات ترشوندگی باشد.

کلمات کلیدی: بازیافت ثانویه، تزریق، EOR، نانو ذرات، ضریب بازیافت

مقدمه

تقاضای جهانی انرژی در سال‌های اخیر به طرز قابل توجهی افزایش یافته است. به منظور تهیه نفت و گاز کافی برای مصارف صنعتی دیگر و همچنین مصرف روزانه مردم، تولید بیشتری از منابع رایج و غیر رایج مورد نیاز است. این تقاضا می‌تواند توسط اکتشاف میادین جدید هیدروکربنی و حفاری چاه‌ها و یا به‌وسیله بهبود تولید از میادین موجود، پاسخ داده شود. از این‌رو بیشتر مخازن با دسترسی آسان، کشف و حفاری شده‌اند، بنابراین مهندسان نفت ترجیح می‌دهند که روی بهبود تولید از میادین موجود با استفاده از روش‌های مختلف IOR، متمرکز شوند.

هدف این آزمایش مطالعه‌ی تأثیر دو نوع نانوذره روی تنش بین سطحی (IFT)^۱ و زاویه‌ی ترشوندگی و بهبود بازیافت نفت، بعد از بازیافت اولیه و ثانویه نفت به‌وسیله مفهوم سیلاب زنی در نمونه‌های ماسه‌سنگی است. برای انجام این آزمایش، دو سه نوع نانو سیال بررسی شده است و تأثیر آنها روی تغییرات مقدار IFT، زاویه‌ی ترشوندگی تعیین شد. بعد از پیدا کردن غلظت مطلوب نانو سیال برای هر نوع پلی سیلیکون، دستگاه‌های سیل زنی مغزه، با نمونه‌ی مغزه، نفت، brine و نانو سیال مطالعه شده بارگذاری شدند. نمونه ابتدا با brine به منظور تقلید از بازیافت اولیه و ثانویه، برای چهار حجم منفذی سیل زنی شد و سپس با سه حجم منفذی نانو سیال. حجم نفت تولید شده در فواصل مخصوص برای تعیین ضریب بازیافت، ثبت شد. در مرحله‌ی بعد نمودار ضریب بازیافت بر حسب حجم منفذی برای هر یک از تست‌های سیل زنی ترسیم شد. باب آنالیز نمودارها غلظت مطلوب سیال تزریقی برای هر آزمایش تعیین شد.

مبانی نظری

تخلخل

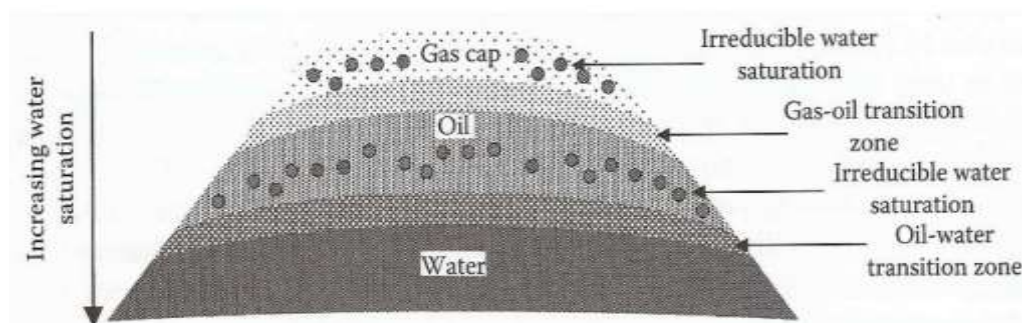
یکی از پارامترهای مهم در مطالعات مخزن تخلخل است که باید به دقتی ترین حالت ممکن تعیین شود. تخلخل به عنوان ظرفیت سنگ به ذخیره کردن یک مایع، و یا به عبارتی دیگر کسری از حجم کل که توسط منافذ اشغال شده است می‌باشد [1].

$$(۱) \text{ Porosity } (\varphi) = \frac{V_p}{V_b} \times 100\% = \frac{V_p}{V_p + V_g} \times 100\% = \frac{V_b - V_g}{V_b} \times 100\%$$

که V_p ، حجم فضاهای خالی، V_b حجم کل سنگ و V_g حجم دانه‌ها هستند.

اشباع آب بحرانی، S_{wc}

حداکثر اشباع آب در فضای متخلخلی که آب هنوز در آن بی‌حرکت است، اشباع آب بحرانی نامیده می‌شود. اشباع آب هم‌زاد، اشباع آب غیر قابل تقلیل، پارامترهای دیگری هستند که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [9]. شکل ۱ توزیع اشباع آب غیر قابل تقلیل در یک مخزن را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک اشباع آب غیر قابل تقلیل در یک مخزن [10]

¹ interfacial tension

اشباع نفت بحرانی، S_{OC}

همان طور که با افزایش تولید اشباع نفت کاهش می‌یابد، به نقطه ای می‌رسد که نفت در منافذ به تله می‌افتد و دیگر قادر به جریان یافتن نیست، این اشباع، اشباع نفت بحرانی، S_{OC} نامیده می‌شود [9].

اشباع نفت باقی مانده، S_{OR}

در طول جابه جایی نفت به وسیله‌ی روش‌های ثانویه و ثالثیه، بخشی از نفت جاروب نمی‌شود و در میان حفره‌ها باقی می‌ماند، این مقدار که بزرگ تر از اشباع نفت بحرانی است، اشباع نفت باقی مانده نامیده می‌شود. پارامتر اشباع نفت باقی مانده معمولاً به فاز غیر تر، وقتی که به وسیله‌ی فاز تر جا به جا می‌شود، بر می‌گردد [9].

$$(۲) S_{OR} = \frac{(PV - \text{cumulative volume of produced oil})}{PV} = \frac{\text{trapped oil in the sample}}{PV}$$

که PV حجم فضاهای خالی بر حسب سی سی و

cumulative volume of produced oil، حجم انباشته نفت تولیدی ت.

اشباع نفت متحرک؛ S_{Om}

اشباع نفت متحرک بخشی از اشباع نفت است که می‌تواند تولید شود و به وسیله‌ی معادله‌ی زیر بیان می‌شود [9]:

$$(۳) S_{Om} = 1 - S_{WC} - S_{OC}$$

که S_{WC} ، اشباع آب همزاد و S_{OC} ، اشباع نفت بحرانی می‌باشند.

اندازه گیری های کیفی

روش‌های کیفی برای گرفتن یک نظریه‌ی کلی درباره‌ی ترشوندگی سنگ مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های مختلفی از قبیل آشام، آزمون میکروسکوپی، شناور سازی^۲، اسلاید شیشه‌ای، منحنی‌های تراوایی نسبی، منحنی‌های (نمودار های) فشار موئینگی، روش موئینگی سنجی^۳، جابه جایی فشار موئینگی، رابطه‌ی تراوایی / اشباع و لاگ‌های مخزن، برای تخمین ترشوندگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. لاگ رزونانس مغناطیسی هسته (NMR) و جذب رنگ، روش‌هایی برای اندازه گیری ترشوندگی جزئی هستند [12].

باز یافت نفت

باز یافت نفت اساساً به سه مرحله‌ی اولیه، ثانویه و ثالثیه تقسیم بندی می‌شود.

باز یافت اولیه

در طول تولید اولیه، هیروکربن با استفاده از انرژی طبیعی موجود در مخزن تولید می‌شود [17]. این نیروها می‌تواند انبساط سنگ و سیال^۴، رانش گاز محلول^۵، انبساط کلاهدک‌گازی^۶ و بالا آمدن سفره‌ی آبی^۷ باشند [18].

² flotation

³ capillarimetric method

⁴ rock and fluid expansion

⁵ solution gas drive

⁶ gas cap expansion

⁷ aquifer encroachment

بازیافتِ ثانویه

با گذشتِ زمان و به دلیل تولید از مخزن، فشارِ مخزن کاهش می‌یابد و نمی‌تواند دبی تولید را حفظ کند بنابراین بعد از این رویداد از بازیافتِ ثانویه استفاده می‌شود. در بازیافتِ ثانویه به وسیله‌ی تزریق گاز یا آب، هیدروکربن‌ها به سمتِ چاه‌های تولیدی سوق داده می‌شوند. همچنین به این روش، روش نگهداری فشار نیز گفته می‌شود. بازیافتِ ثانویه می‌تواند به طرقِ گوناگون از قبیل تزریق گاز به کلاهکِ گازی، تزریق آب به سفره‌ی آبی برای هل دادن هیدروکربن‌ها به بالا و نگهداشتن فشارِ مخزن و سیلاب زنی که در آن، آب به زون تولید تزریق می‌شود تا هیدروکربن‌ها را به سمتِ تولید شدن سوق دهد. بیشترِ اوقات بازیافتِ ثانویه به عنوانِ سیلاب زنی شناخته می‌شود [17].

بازیافتِ ثالثیه

بعد از گذشتِ دوره‌ی ای از زمان، استفاده از بازیافتِ ثانویه از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست که این به دلیل نسبتِ بالای تولید آب به نفت و گاز به نفت ناشی از مخروطی شدن آب/گاز^۸ یا شکستِ آب^۹ است، بنابراین روش‌های دیگرِ بازیافت که تحتِ عنوان بازیافتِ ثالثیه یا EOR نیز شناخته می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند [19]. در این روش‌ها با سعی بر تغییرِ خواص سنگ و یا سیال، میزانِ اشباعِ نفتِ باقی مانده کاهش خواهد یافت و درصدِ دیگری از هیدروکربن‌های اولیه‌ی درجا^{۱۰} استخراج می‌شوند [17]. روش‌های مختلفی از EOR وجود دارند اما مشهورترین آنها، فرآیند‌های شیمیایی، فرآیند‌های احتراق درجا، فرآیند‌های امتزاجی و ازدیاد برداشت به روش میکروبی هستند. در ادامه بعضی از روش‌های EOR مورد بحث قرار خواهد گرفت.

نانو سیالات

نانو سیالات نوع جدیدی از سیالات سیستم دو فازی هستند که با معلق کردن مواد با اندازه‌ی نانومتر (نانوذرات، نانو فیبرها (نانو الیاف)ها) نانو لوله‌ها، نانو میله‌ها، نانو قطره‌ها) در یک سیال پایه، به دست می‌آیند. نانو سیالات در همه‌ی صنایع، تأثیر فوق العاده‌ای به وسیله‌ی ویژگی‌های خود از قبیل کنترل هدایت حرارتی، قابلیت انتشار، ویسکوزیته و ... به دلیل سطح بالای آنها نسبت به حجم، نشان می‌دهند [28]. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در تهیه‌ی نانو سیالات باید مرتفع شود، پایداری است. پایداری زمانی که نیروی جاذبه‌ی ذرات، کمتر از نیروهای دافعه‌ای که از انباشته شدن ذرات جلوگیری می‌کنند، باشد، به دست می‌آید.

تجزیه و تحلیل نتایج پژوهش

قبل از انجام آزمایش‌های سیلاب زنی، غلظت‌های بهینه‌ی دو نوع از نانو سیالات پلی سیلیکونی، که تأثیر بهتری روی ترشوندگی سنگ داشتند و خواص سیال را بهبود دادند، تعیین شد. در مرحله‌ی بعد تغییرات ضریب بازیافت با سیلاب زنی نمونه‌ها ابتدا با براین و سپس با غلظت مناسبی از نانو سیال ثبت شد. همچنین، علاوه بر ضریب بازیافت، پورالیوم تزریقی برای براین و نانو سیال مطالعه شدند به طوری که حجم تزریق بهینه را می‌توان تعیین کرد.

در این آزمایش از دو پلاگ ماسه‌سنگی آب دوست برای آزمایش سیلاب زنی استفاده شده است. جدول ۱ خواص فیزیکی مغزه‌ها را نشان می‌دهد. نفتی که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است، نفتی سبک است. جدول ۲ خواص نفت مخزن را که به وسیله‌ی موسسه‌ی تحقیقاتی صنعت نفت اندازه‌گیری شده است را نشان می‌دهد.

⁸ water/gas coning

⁹ water breakthrough

¹⁰ Initial hydrocarbon in place (IHIP)

جدول ۱: خواص پتروفیزیکی نمونه‌های مطالعه شده

شماره ی نمونه	طول (cm)	قطر (cm)	تخلخل (درصد)	چگالی دانه (gr/cm ³)	تراوایی (mD)	نوع کانی
7	5/19	3/88	24/0	2/68	580/91	Sandstone
9	5/07	3/88	23/2	2/68	443/01	Sandstone

جدول ۲: خواص نفت مخزن

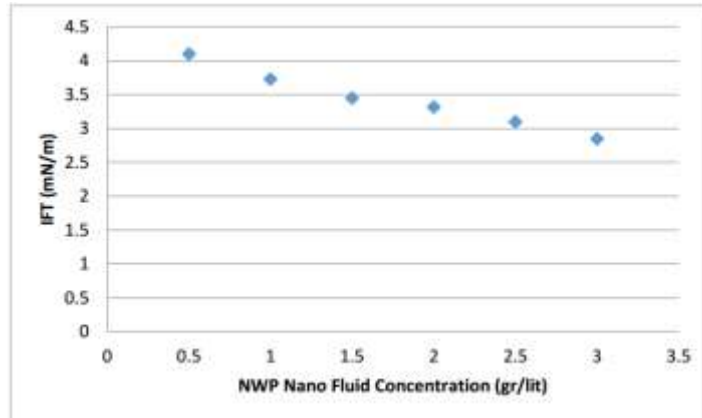
مشخصات	واحد	مقدار	روش آزمایش
Specific Gravity @ 15.56 °C	-	0/8065	ASTM D - 4052
°API	-	43/9	ASTM D - 1298
Sulfur Content	% Wt.	0/32	ASTM D - 2622
Total Nitrogen	% Wt.	< 0.02	ASTM D - 3228
Base Sediment and Water	% Vol.	< 0.05	ASTM D - 1796
Water Content	% Vol.	< 0.05	ASTM D - 4006
Salt Content	P.T.B.	3	ASTM D - 3230
Kinetic Viscosity @ 10 °C	c.St.	4/14	ASTM D - 445
Kinetic Viscosity @ 20 °C	c.St.	3/42	ASTM D - 445
Kinetic Viscosity @ 40 °C	c.St.	2/35	ASTM D - 445
Pour Point	°C	-۴۰ >	ASTM D - 5853

غلظت بهینه ی نانو سیالات

دو نوع از ذرات نانو پلی سیلیکونی در این آزمایش مورد مطالعه قرار گرفتند، اما فاکتور کلیدی قبل از مطالعه‌ی تأثیر آنها، تعیین غلظت بهینه ی تزریق نانو سیالات بود. برای انجام این هدف، ۶ غلظت مختلف (0/5، 1/5، ۲، 2/5 و ۳ گرم بر لیتر) از نانو سیالات برای نانو پودر های NWP و HLP فراهم شدند و تأثیر آنها روی زاویه‌ی ترشوندگی و کشش بین سطحی بررسی شد. نانو ذرات NWP و HLP به دلیل توانایی تغییر ترشوندگی از آب دوست به نفت دوست و از آب دوست به حالت ترشوندگی خنثی بر روی مغزه های ماسه سنگ آزمایش شدند [34]. غلظت بهینه ی نانو سیال برای هر یک از دو پلی سیلیکون مختلف یک بود که توانست زاویه‌ی ترشوندگی را تا حد ممکن تغییر دهد و همچنین کشش بین سطحی را نیز تا حد ممکن کاهش داد. در ادامه نتایج این مطالعه برای نانو پلی سیلیکون مورد بحث قرار خواهد گرفت.

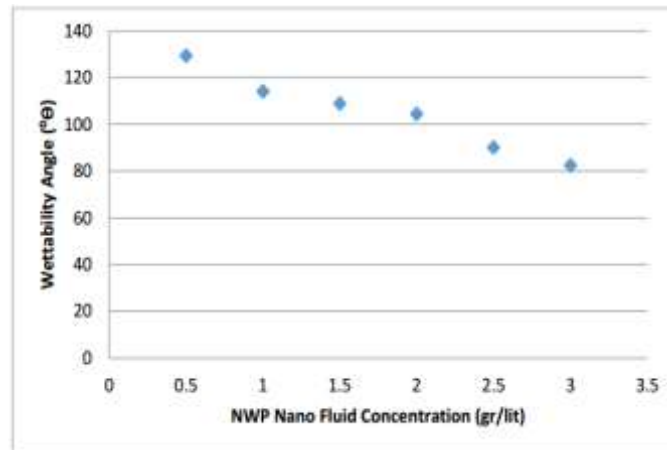
نانو سیال NWP

تعیین غلظت بهینه ی دو پارامتر نانو سیال NWP، یعنی هم تغییرات کشش سطحی و هم تغییرات زاویه‌ی ترشوندگی مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی تغییرات IFT، بعد از آماده کردن غلظت های مختلف نانو سیالات، آنها در سل دستگاہ IFT ریخته شدند و مقادیر کشش بین سطحی آنها تعیین شد. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، کشش بین سطحی نانو سیال / نفت، با افزایش غلظت نانو سیال کاهش یافت، بنابراین غلظت ۳ گرم بر لیتر به عنوان غلظت بهینه ی کاهش IFT انتخاب شد.



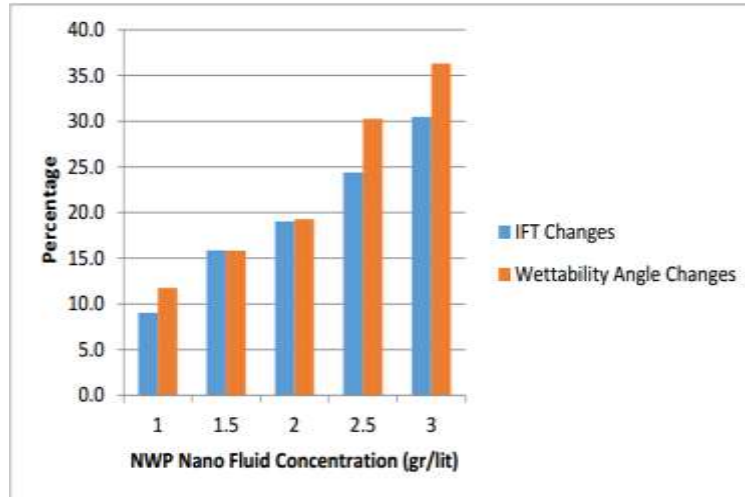
شکل ۲: تغییرات IFT نسبت به غلظت های مختلف نانو سیال NWP

در مرحله‌ی بعد برای مطالعه‌ی تغییرات ترشوندگی، ۷ تکه از ماسه سنگ، با استفاده از ماشین برش و اصلاح آماده شد. تکه‌ها در ظرف نانو سیال به طور عمودی برای جلوگیری از هر نوع ته نشینی ذرات نانو ناشی از فرض نا پایداری مایع غوطه‌ور شدند. به علاوه یک تکه در براین به عنوان نمونه‌ی پایه گذاشته شد. بعد از یک روز زاویه‌ی تماس برای هر یک از این تکه‌ها اندازه‌گیری شد. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، افزایش در غلظت نانو سیال موجب کمتر شدن مقدار زاویه‌ی تماس خواهد شد، بنابراین نانو سیال NWP با غلظت ۳ گرم بر لیتر، همان غلظت بهینه برای تغییرات ترشوندگی است.



شکل ۳: تغییرات زاویه‌ی ترشوندگی نسبت به غلظت نانو سیال NWP

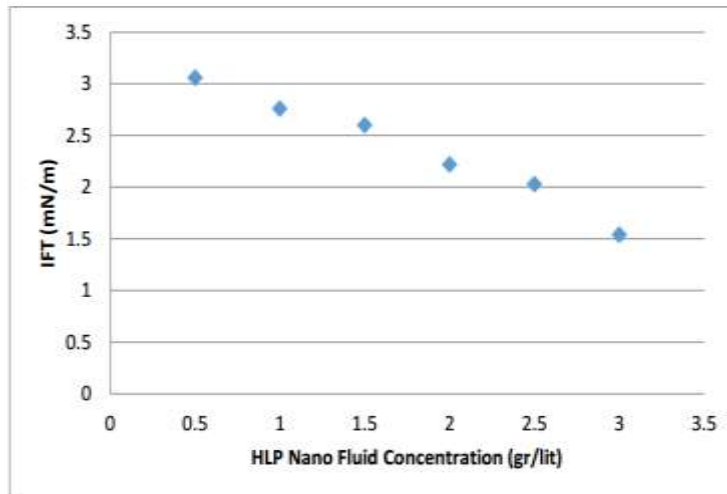
با مقایسه‌ی نتایج مطالعات IFT و تغییرات ترشوندگی، مشخص شد که غلظت ۳ گرم بر لیتر، غلظت سیال بهینه برای استفاده در دستگاه سیلاب زنی مغزه است. شکل ۴ درصد تغییرات در زاویه‌ی ترشوندگی و IFT در هر غلظت را نسبت به مقادیر حداقل غلظت نانو سیال را نشان می‌دهد. این نتیجه که نانو ذرات NWP تأثیر بیشتری بر تغییرات ترشوندگی نسبت به IFT در غلظت‌های بیشتر نانو سیال دارد، می‌تواند گرفته شود.



شکل ۴: مقایسه ی تأثیر غلظت های مختلفِ نانو سیال NWP بر IFT و تغییرات زاویه ی ترشوندگی

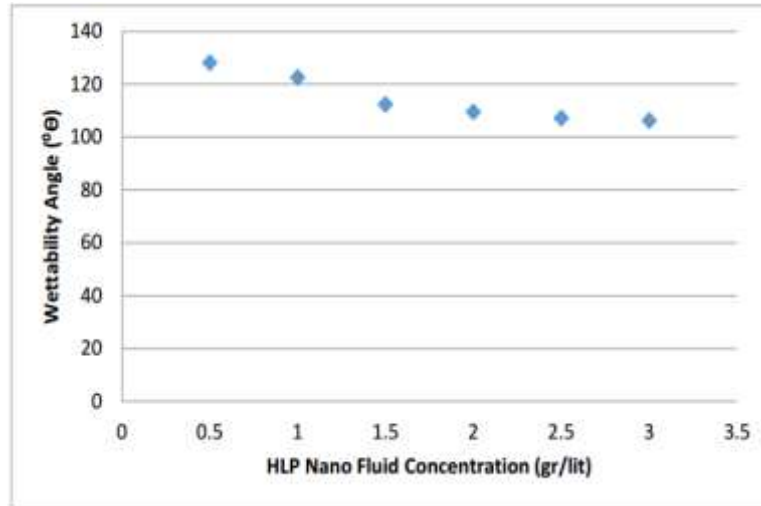
نانو سیال HLP

۶ غلظتِ مختلفِ نانو سیال HLP با هم زدنِ نانو پودر در اتانول و پایدار کردنِ آن با استفاده از دستگاهِ تراسونیک آماده و مهیا شدند. سیالات آماده شده به طور جدا گانه در دستگاه اندازه گیریِ بینِ سطوح مورد استفاده قرار گرفتند و تنشِ بینِ نانو سیال و نفت اندازه گیری شد. شکل ۵ نتایج این اندازه گیری ها را نشان می دهد. شناسایی شد که هر چه قدر میزانِ نانو ذرات در نانو سیال افزایش یابد، کاهشِ بیشتری در کشش بین سطحی مورد انتظار است؛ بنابراین غلظتِ ۳ گرم بر لیتر، به عنوانِ غلظتِ ایده آل در کاهشِ IFT برای نانو سیالِ HLP انتخاب شد.



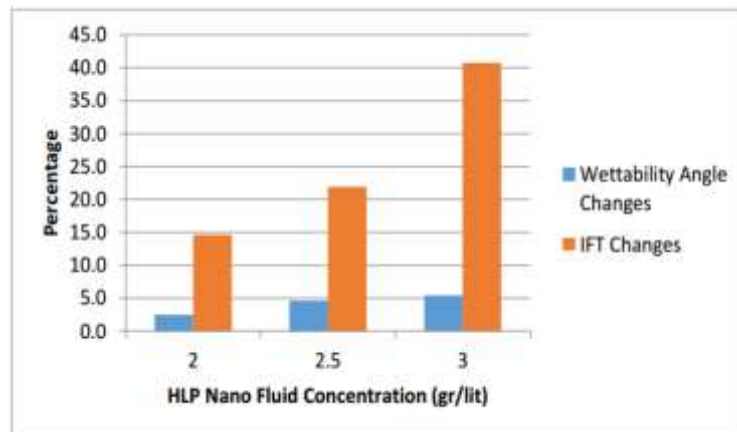
شکل ۵: تغییراتِ نسبت به غلظتِ مختلفِ نانو سیالِ HLP

همان طور که قبلا نیز اشاره شد، نانو پودرِ HLP به دلیلِ ویژگیِ هیدروفوبیک بودنِ آن (آبگریز) می تواند سنگِ آب دوست را به سنگِ نفت دوست، یا سنگِ نفت دوست را به سنگِ شدیداً نفت دوست تغییر دهد؛ بنابراین تغییراتِ ترشوندگی فاکتور تعیین کننده ی دیگری در انتخابِ غلظتِ مناسبِ نانو سیالِ تزریقی است. برای پیدا کردنِ بهترین غلظت، ۶ تکه از ماسه سنگ در نانو سیالاتِ آماده شده قرار داده شد و بعد از یک روز، زاویه ی تماس برای هر یک از آنها اندازه گیری شد. همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، در غلظت های کم (از 0/5 تا 1/5 گرم بر لیتر)؛ تغییراتِ ترشوندگی قابل توجه است، اما برای غلظت های بیشتر از 1/5 گرم بر لیتر، اختلاف میان دو زاویه ی تماسی که به طور متوالی اندازه گیری شده اند اندک است. بر این اساس، غلظتِ 1/5 گرم بر لیتر به عنوانِ مقدارِ بهینه برای تغییراتِ ترشوندگی سنگ انتخاب شد.



شکل ۶: تغییرات زاویه‌ی ترشوندگی نسبت به غلظت‌های مختلفی نانو سیال HLP

با مقایسه‌ی IFT و زاویه‌ی ترشوندگی، پیدا شد که غلظت بهینه برای این دو فاکتور متفاوت است. با مقایسه‌ی درصد کاهش IFT و تغییرات ترشوندگی برای غلظت‌های بیشتر از 1/5 گرم بر لیتر نسبت به 1/5 گرم بر لیتر، این مورد انظار بود که برای IFT، کاهش نانو سیال ۳ گرم بر لیتر، 40/7 درصد بود، در حالی که برای زاویه‌ی تماس، همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده، فقط حدود 5/4 درصد است. بر اساس این مقایسه، غلظت ۳ گرم بر لیتر به عنوان مقدار بهینه برای فرآیند سیلاب زنی مغزه به دلیل توانایی آن به کاهش دادن قابل توجه مقدار IFT، انتخاب شد.



شکل ۷: مقایسه‌ی تأثیر غلظت‌های مختلف نانو سیال بر روی IFT و تغییرات ترشوندگی نسبت به مقدار غلظت 1/5 گرم بر لیتر

سیلاب زنی مغزه

بعد از تعیین مقدار بهینه برای هر نوز پلی سیلیکون‌ها، نمونه مغزه‌های آماده شده ابتدا با پراین و سپس با نانو سیال، سیلاب زنی شدند و حجم نفت تولیدی، برای محاسبه‌ی ضریب بازیافت و آنالیز تغییرات اشباع، ثبت شد. در ادامه نتایج تزریق برای سه نوع نانو پلی سیلیکون مورد بحث قرار خواهد گرفت.

سیلاب زنی در مغزه‌ی شماره ۹

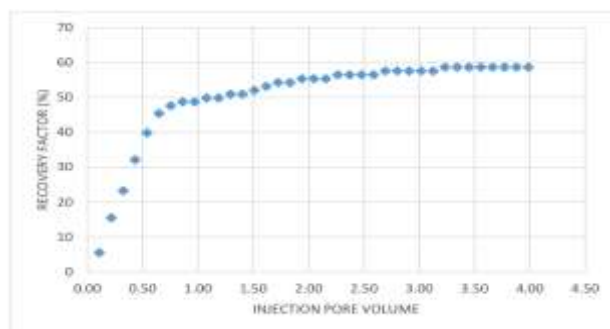
برای بررسی تأثیر نانو ذرات روی بهبود تولید، یک پلاگ ماسه‌سنجی با ابعاد و خواصی که در جدول ۳ نشان داده شده است، ابتدا برای ۴ پوروالیوم با آب و سپس با نانو سیال NWP با غلظت ۳ گرم بر لیتر برای ۳ پور والیوم، سیلاب زنی شد. نفتی که در فواصل مشخص با فشار به بیرون رانده شد، برای محاسبه‌ی ضریب بازیافت ثبت شد.

جدول ۳: خواص پلاگ مغزه‌ی برای مطالعات نانو سیال NWP

شماره مغزه	طول (cm)	قطر (cm)	تخلخل Helium (percent)	چگالی دانه Density (gr/cm ³)	تراوایی (mD)	S _w (percent)
9	5/07	3/88	23/2	2/68	443/01	35/1

سیلاب زنی (با آب)

همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، ضریب بازیافت نهایی بعد از سیلاب زنی مغزه با چهار پوروالیوم براین، 58/7 درصد است، که در بیشتر نفت تولیدی قبل از شکست^{۱۱}، اتفاق افتاده است که گواهِ بر قابلیت آب دوستی مغزه‌ی ماسه‌سنجی است. به علاوه بعد از تزریق دو پور والیوم هیچ تولید نفتی که قابل توجه باشد دیده نشد و فقط 3/4 درصد نفت اولیه تولید شده است؛ بنابراین به دلیل زیاد بودن نسبت آب به نفت، حجم بهینه‌ی سیلاب زنی در این قسمت از مطالعه، دو پوروالیوم است.

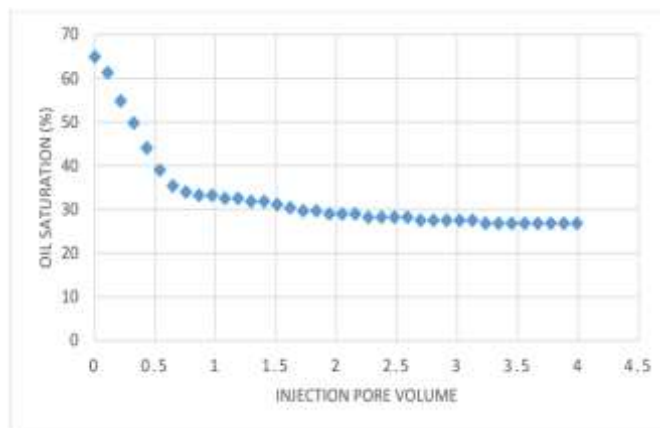


شکل ۸: ضریب بازیافت در سیلاب زنی مغزه‌ی شماره ۹

همچنین مطالعات اشباع نشان می‌دهد که اشباع نفت با یک شیب تند، قبل از شکست^{۱۲} به دلیل به بیرون رانده شدن نفت به تله افتاده در مرکز حفره‌های بزرگ، کاهش می‌یابد (شکل ۹). بعد از آن به دلیل فشار مؤینگی بالا، قطرات نفت، نمی‌توانند از میان دهانه‌های حفره‌ها عبور کنند و آنها در محیط متخلخل به تله می‌افتند.

¹¹ break through

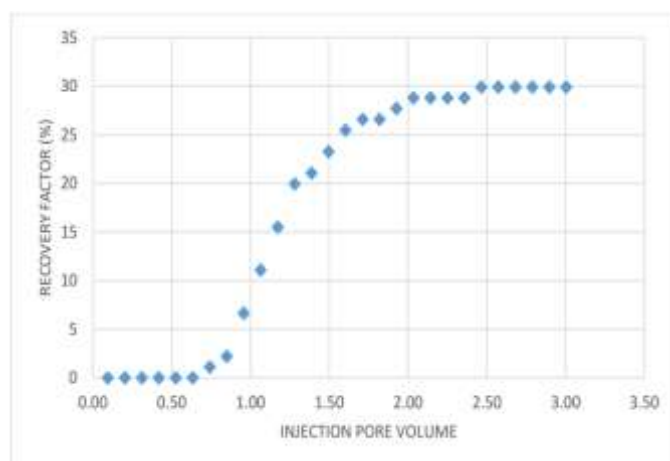
¹² break through



شکل ۹: تغییرات اشباع نفت در طول سیلاب زنی برای نمونه‌ی شماره ۹

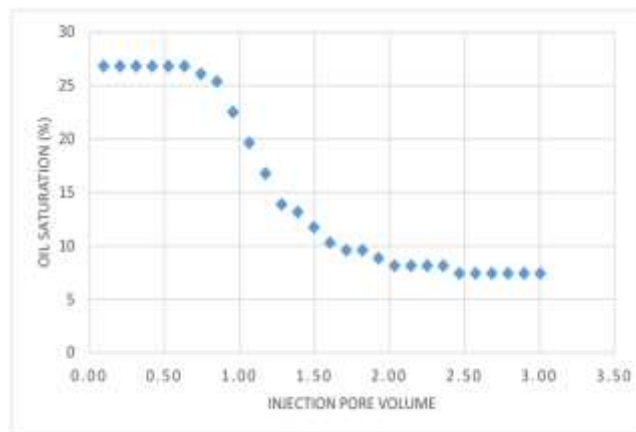
تزریق نانو سیال NWP

بعد از انجام بازیافت اولیه و ثانویه با سیلاب زنی نمونه، نانو سیال NWP به نمونه تزریق شد. همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در آغاز تزریق، ضریب بازیافت صفر است زیرا هنوز این برای این است که از مغزه به بیرون رانده می شود اما به عنوان جبهه ی نانو سیال مسیر خود را پیدا می کند و شکست اتفاق می افتد و آن قطرات نفت به دام افتاده، با فشار به بیرون از نمونه رانده می شوند. نتایج نشان داد که نانو سیال NWP، ضریب بازیافت نفت را به بالای 88/6 درصد بهبود بخشد.



شکل ۱۰: تغییرات ضریب بازیافت در نمونه‌ی شماره ۹ در زمان سیلاب زنی NWP

شکل ۱۱ نتایج محاسبات اشباع به وسیله‌ی آنالیز نفت تولیدی را نشان می دهد. همان طور که گراف نیز نشان می دهد نانو ذرات می توانند به طور قابل توجهی اشباع نفت را کاهش دهند. این پدیده را میتوان از دو طریق کاهش IFT و تغییرات ترشوندگی توضیح داد. مطالعات قبلی نشان دادند که نانو سیالات NWP می تواند مثل یک سورفکتانت در کاهش IFT عمل کند به طوری که با کم کردن مقدار فشار موئینگی، به تولید کمک می کند. همان طور که فشار موئینگی کاهش می یابد، قطرات نفت به تله افتاده می توانند با تغییر شکل، از میان دهانه های منافذ کوچک عبور کنند که منجر به تولید نفت و کاهش اشباع نفت باقی مانده می شود. جنبه ی دیگری که می تواند در نظر گرفته شود تغییر ترشوندگی است؛ نانو ذرات NWP می توانند وابستگی ترشوندگی سنگ را از آ دوست یا نفت دوست، به سمت ترشوندگی خنثی تغییر دهند که یعنی زاویه ی تماس در حدود ۹۰ درجه است. همان طور که قبلا نیز بحث شد، فشار موئینگی رابطه ی مستقیمی با کسینوس θ دارد، بنابراین برای سنگ های با ترشوندگی متوسط، مقدار فشار موئینگی به حداقل می رسد که به معنی کاهش تولید و کاهش مقدار اشباع نفت باقی مانده است.



شکل ۱۱: تغییرات اشباع نفت در طول سیلاب زنی NWP

سیلاب زنی در مغزه‌ی شماره ۷

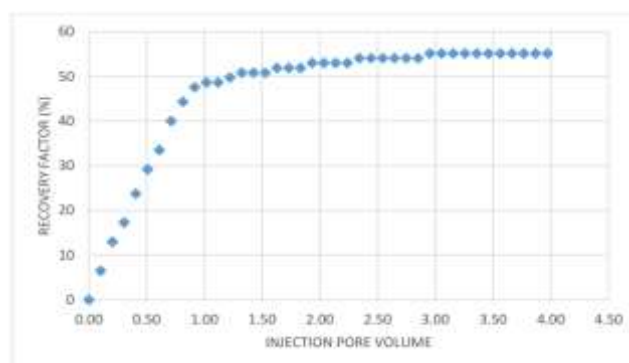
در دومین آزمایش یک پلاگ ماسه‌سنگی با قطر و اطلاعات پتروفیزیکی ای که در جدول ۴ نشان داده شده است، به ترتیب با پراین و نانو سیال HLP سیلاب زنی شد. نتایج هر سیلاب زنی در مراحل بعد مورد بحث قرار خواهد گرفت. برای داشتن یک بازده جاروبی بیشتر و جلوگیری از انگشتی شدن و اثر کانال، دبی تزریقی ۱ سی سی بر دقیقه برای آزمایش انتخاب شد.

جدول ۴: خواص پلاگ مغزه‌ی مطالعات نانو سیال HLP

شماره‌ی نمونه	طول (cm)	قطر (cm)	تخلخل (percent)	چگالی دانه (gr/cm ³)	تراوایی (mD)	S _w (percent)
7	5/19	3/88	24/0	2/68	580/91	37/2

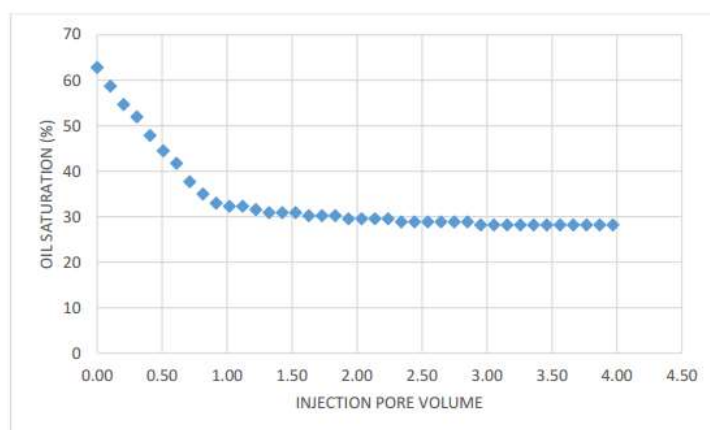
سیلاب زنی (با آب)

چهار پوروالیوم پراین تزریق شد و حجم نفت تولیدی در فواصل زمانی مشخص ثبت شد. با داشتن حجم نفت اولیه در نمونه و حجم نفت تولیدی، ضریب بازیافت محاسبه و شکل ۱۲ ترسیم شد. همان طور که شکل نشان می‌دهد، بیشتر از نیمی از نفت اولیه به وسیله‌ی شبیه سازی مراحل بازیافت اولیه و ثانویه تولید شد و بالغ بر 86/2 درصد از این تولید قبل از شکست آب اتفاق افتاد، که مقادیر بالاتر تراوایی نسبی نفت را، نسبت به تراوایی نسبی آب، برای اشباع آب کم نشان می‌دهد که منجر به جابه جایی نفت به تله افتاده شد. به علاوه با ملاحظه‌ی میزان تولید، گراف، میزان قابل توجه تولید نفت بعد از دو پوروالیوم تزریق را نشان نداد؛ بنابراین دو پوروالیوم، میزان تزریق بهینه است.



شکل ۱۲: ضریب بازیافت در سیلاب زنی نمونه‌ی شماره ۷

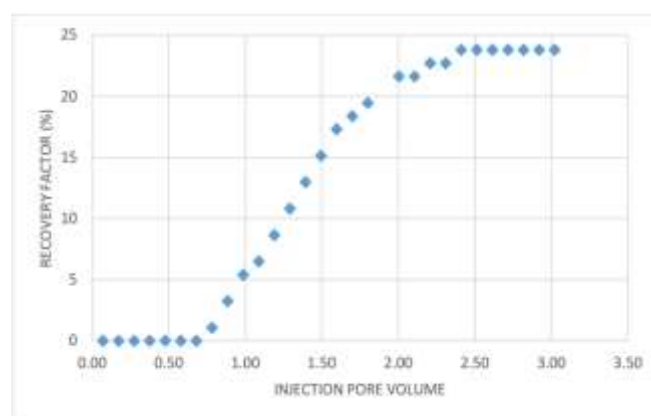
شکل ۱۳ نتایج تغییرات اشباع نفت نسبت به پورالیوم آب تزریق شده را نشان می دهد. کاهش شدید اشباع نفت در آغاز تزریق می تواند ناشی از تمایل به آب دوستی دانه های سطح، تفسیر شود. از این رو دانه ها در سنگ آب دوست با فیلم نازک آب پوشیده شده اند، در طول تزریق آب، قطرات آب سعی می کنند که به یکدیگر متصل شوند و فضای خالی را اشغال کنند؛ بنابراین آنها قطرات نفتی که در مرکز حفره های بزرگ هستند را به بیرون هل می دهند؛ اما بعد از شکست^{۱۳} از آنجایی که آب قبلا مسیر خود را در فضای متخلخل پیدا کرده است، آب تزریق شده از میان کانال ها تولید می شود و بیشتر نفت موجود در کانال ها قبلا به بیرون رانده شده اند؛ بنابراین تزریق پورالیوم بیشتر آب، منجر به تولید حجم بیشتری از نفت نمی کند.



شکل ۱۳: تغییرات اشباع نفت در طول سیلاب زنی نمونه‌ی شماره ۷

تزریق نانو سیال HLP

نمونه‌ی سیلاب زنی شده، در معرض تزریق نانو سیال HLP با غلظت ۳ گرم بر لیتر، برای سه پورالیوم قرار گرفت و نفت تولید شده در فواصل زمانی مختلف ثبت شد. شکل ۱۴ ضریب بازیافت محاسبه و ترسیم شده را برای نانو سیال تزریقی نشان می دهد. گراف نشان می دهد که در طول یک دهم اول پور والیوم تزریق شده، هیچ تغییری در ضریب بازیافت دیده نمی شود و این می تواند به دلیل تولید براین از مغزه باشد، از این رو جبهه ی نانو سیال هنوز در طول مغزه حرکت نکرده است. بعد از مدت زمان کوتاهی نفت شروع به تولید می کند و نانو سیال می تواند تا 46/9 درصد از نفت به تله افتاده را بعد از فرآیندی سیلاب زنی آب، تولید کند. در این آزمایش، بعد از سیلاب زنی نانو سیال و آب ضریب بازیافت کل^{۱۳} 78/9 درصد به دست آمد.

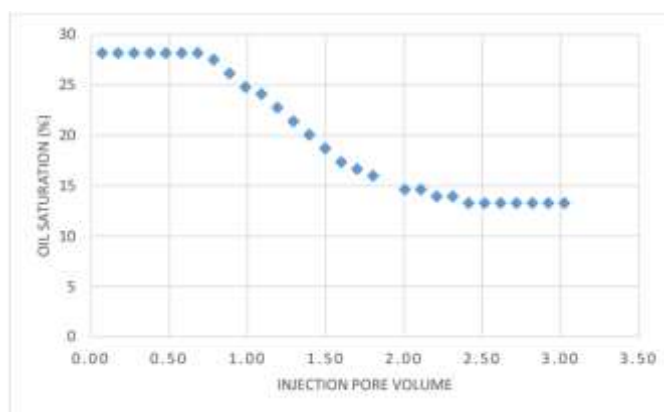


شکل ۱۴: تغییرات ضریب بازیافت در نمونه‌ی شماره ۷ در طول سیلاب زنی HLP

شکل ۱۵ تغییرات اشباع نفت نسبت به پور والیوم تزریقی نانو سیال را نشان می دهد. گراف به دلایلی که قبلا بحث شد تغییراتی را نشان نمی دهد، اما به زودی جبهه ی نانو سیال به بیرون از مغزه می رسد، و قطره ی نفت آزاد شده را به همراه

¹³ break through

خود می آورد. نتایج ثبت شده، کاهش ۱۴/۹ درصدی در اشباع نفت را فقط در ۱/۷ پوروالیوم نشان می دهد. شیب کاهش نمودار اشباع، می تواند به دو بخش برای بحث درباره ی این پدیده تقسیم شود. در فاصله ی ۰/۷ تا ۱/۷ نانو سیال تزریقی، نموداری اشباع در مقایسه با ۱/۷ تا ۲/۳، دارای یک شیب تند می باشد. کاهش شدید در بخش اول می تواند به دلیل کاهش IFT در اولین تماس نانو سیال و قطره ی نفت به تله افتاده در فضای متخلخل باشد که منجر به کاهش مقدار فشار موئینگی و کاهش مهاجرت نفت در فضای متخلخل می شود. بعد از آن، دلیل تولید می تواند ناشی از تغییرات ترشوندگی توضیح داده شود، از این رو، نانو ذرات وقت کافی برای رسوب بر روی سطح دانه ها داشتند و ترشوندگی آنها از آب دوست به ترشوندگی خنثی تغییر کرد که بدین معنی است که زاویه تماس به ۹۰ درجه نزدیک است؛ به عبارتی دیگر، مقدار فشار موئینگی نزدیک به صفر، عاملی مهم برای قطرات نفتی که نمی توانند حتی با کمک خاصیت سورفکتانت سیال تزریقی تولید شوند، می باشد.



شکل ۱۵: تغییرات اشباع نفت در طول سیلاب زنی HLP در نمونه ی شماره ۷

نتایج و پیشنهادات

در این تحقیق تأثیر نانو ذرات روی بازیافت نفت اضافی بعد از انجام بازیافت اولیه و ثانویه با انجام سیلاب زنی روی سه پلاگ مغزه مطالعه شد. نکته های مهم به دست آمده در زیر نوشته شده اند:

- غلظت های بالاتر نانو سیال NWP و HLP مقدار کشش بین سطحی را به طور قابل توجهی کاهش می دهد. این می تواند باعث رشد مشخصه ی سورفکتانت این دو نوع نانو ذرات، وقتی که در اتانول حل شده اند، شود.
- غلظت های بالاتر نانو سیال NWP می تواند منجر به تغییر ترشوندگی بزرگ تری شود، در حالی که نانو سیال HLP برای غلظت های بزرگتر از ۱/۵ گرم بر لیتر، هیچ تغییر قابل ملاحظه ای دیده نشد.
- مکانیزم مهم نفت تولید شده ی اضافی بعد از استفاده از نانو سیالات NWP و HLP در نمونه های مغزه کاهش IFT و همچنین تغییر زاویه ی ترشوندگی سنگ است.
- نفت تولید شده ی اضافی بعد از تزریق نانو سیال به فضای متخلخل را می توان به دو زیر مجموعه تقسیم کرد. حجم های اولیه ی نفت تولید شده می تواند ناشی از کاهش مقدار کشش بین سطحی بعد از تماس نانو سیال با نفت و کاهش فشار موئینه در فضای متخلخل، باشد؛ و آخرین حجم ها بعد از رسوب نانو ذرات روی سطح دانه ها و تغییر زاویه ی ترشوندگی به نزدیک ۹۰ درجه که منجر به کاهش فشار موئینگی و سهولت مهاجرت نفت در میان دهانه های حفرات کوچک شد، این دو پدیده به ترتیب باعث بازیافت نفت ۹/۲۹ و ۷/۳۰ درصدی شدند.
- برای پلاگ های ماسه سنگ، حجم مطلوب سیلاب زنی با آب به عنوان دو پوروالیم تخمین زده شد، از این رو بیشتر تولید نفت بعد از شکست آب (break through) اتفاق افتاد که تزریق آب بیشتر به دلیل نسبت بالای آب به نفت انجام شد.

- برای نانو سیالات NWP و HLP، غلظت بهینه ی تزریق، ۲/۵ پوروالیوم تعیین شد، از این رو بعد از آن تولید نفت قابل توجهی دیده نشد.

پیشنهادات

بر اساس یافته های و چالش های موجود در این آزمایش و درک کامل پارامتر های نسبی، برای تولید نفت و بهینه سازی آنها پیشنهادات زیر برای کارهای آینده ارائه می گردد:

- در این آزمایش اتانول به عنوان سیال حامل برای پخش نانو سیال انتخاب شد، پیشنهاد می شود که از دیگر سیالات غیر قطبی که دارای نقطه ی تبخیر بالاتر برای شبیه سازی شرایط دمای بالای مخزن هستند استفاده شود و تأثیر نانو ذرات روی بازیافت نفت در شرایط دما و فشار بالا مطالعه شود.
- از سدیم کلراید برای آماده کردن پرایم برای انجام سیلاب زنی و شبیه سازی اشباع آب اولیه در مغزه ها استفاده شد. پیشنهاد می شود که از نمک های مختلفی که در پرایم مخزن حضور دارند، برای آماده کردن آب سازنده مصنوعی استفاده شود، از این رو ممکن است کاتیون ها و آنیون ها بر رفتار نانو ذرات در محیط متخلخل اثر بگذارند.
- نمودار های تراوایی نسبی یک نقش مهم در شبیه سازی و پیش بینی رفتار مخزن بازی می کنند؛ بنابراین رسم نمودار های تراوایی نسبی برای این مطالعه بسیار توصیه می شود. برای جریان سه فازی، باید از تجهیزات XRD برای رد یابی کردن از مهاجرت نانو ذرات در محیط متخلخل و تعیین اشباع در هر نقطه استفاده شود.
- نانو ذرات برای رسوب بر روی سطح دانه ها و تغییر دادن ترشوندگی سنگ نیاز به زمان دارند، بنابراین، پیشنهاد می شود آزمایشات مختلف با زمان خواباندن مختلف و اندازه گیری تأثیر زمان روی میزان بازیافت نفت، انجام شود.
- نانو ذرات با کمک دستگه همزن و التراسونیک، در سیال پخش و پراکنده شدند؛ بنابراین پیشنهاد می شود که پایداری نانو سال تحت شرایط فشار و دمای بالا با استفاده از امکانات و تجهیزات XRD مطالعه شود.
- مطالعه ی آسیب سازند نیز پیشنهاد می شود. از آنجایی که بعد از تزریق چندین پوروالیوم نانو سیال، ممکن است نانو ذرات، دهانه ی حفرات را مسدود کنند و باعث کاهش تراوایی شوند.

منابع

- [1] Hamid, M. F. and Sulaiman, W. S. W., "Fundamentals of Petroleum Engineering, Rock and Fluid Properties", University Technology Malaysia, Department of Petroleum Engineering
- [2] Atiia, A. M., "Review of Reservoir Rock and Fluid Properties", The British University in Egypt, Department of Petroleum Engineering
- [3] <http://pages.geo.wvu.edu/~jtoro/petroleum/Review%202.html>
- [4] http://www.wvsoro.org/resources/pooling_unitization/slide_06.html
- [5] <http://www.geomore.com/oil-and-gas-traps/>
- [6] <http://www.co2crc.com.au/imagelibrary3/storage.php?screen=4>
- [7] Abu-Khamsin S. A., "Basic Properties of Reservoir Rocks", King Fahad University of Petroleum & Mineral, Dhahran, Saudi Arabia, 2004.
- [8] Bateman, R. M., "Openhole Log Analysis and Formation Evaluation", Second Edition, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, 2012.
- [9] Tarek Ahmad-Online
- [10] Dandekar, A. Y., "Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties", Second Edition, Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2006.

- [11] Heinemann, Z. E., "Fluid Flow in Porous Media", Vol. 1, Leoben, University of Leoben
- [12] Anderson, W., "Wettability Literature Survey- Part 2: Wettability Measurement", Society of Petroleum Engineers Journal of Petroleum Technology, Vol. 38 11 (1986), 1246-1262
- [13] <http://www.spec2000.net/09-relperm.htm>
- [14] Aminian, K., "Basic Reservoir Engineering, Course Note", Part 1, Petroleum and Natural Gas Engineering Department, West Virginia University, 2014.
- [15] http://www.aptifirst.com/rheometry/ctpt_cement_concrete_workability_test.htm
- [16] Bear, J., "Dynamic of Fluids in Porous Media", Dover Publication Inc., New York, 1988.
- [17] Green, D. W. and Willhite, P. G., "Enhanced Oil Recovery" Vol. vol. 6, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, 1998.
- [18] Craft, B. C., Hawkins, M. F., Terry, R. E., "Applied Petroleum Reservoir Engineering", Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, c1991.
- [19] Donaldson, C. E., Chilingarian, G. V. and Yen, T. F., "Enhanced Oil Recovery, I Fundamentals and Analyses", Amsterdam; New York: Elsevier, 1985-1989
- [20] Kong, X., and Ohadi M. M., "Application of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry- An Overview of the Recent Progress", SPE 138241.
- [21] Ju, B., Shugao, D., Zhian L., Tiangao, Z., Xiantao, S., and Xiaofeng Q., "A Study of Wettability and Permeability Change Caused by Adsorption of Nanometer Structured Polysilicon on the Surface of Porous Media", SPE 77938.
- [22] Shah, R. D., "Application of Nanoparticles Saturated Injectant Gases for EOR of Heavy Oils", SPE- 129539.
- [23] Ogolo, N. A., and Olafuyi, O. A., "Enhanced Oil Recovery Using Nanoparticles", SPE160847.
- [24] Rusheet D., S., "Application of Nanoparticle Saturated Injectant Gases for EOR of Heavy Oils", SPE- 129539.
- [25] Yu, H., Kotsmar, C., Yoon, K., Ingram, D., Johnston, K., Byrant, S., Huh, C., "Transport and Retention of Aqueous Dispersions of Paramagnetic Nanoparticles in Reservoir Rocks", SPE-129887.
- [26] Villamizar, L. C., Lohateeraparp, P., Harwell, J. H., Reasasco, D. E., Shiau, B. J., "Interfacially Active SWNT/Silica Nanohybrid Used in Enhanced Oil Recovery", SPE-129901.
- [27] Heydarian, A., Kharrat, R., and Hashemi, A., "The Impact of Sparkling Mechanism on Improving Oil Recovery in Nano-Particle Injection through Pseudo 3-Dimensional Micromodels", Journal of American Science, 2012.
- [28] Yu, W., and Xie, H., "A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Application", Journal of Nanomaterials, 2012.
- [29] Vinci Technologies Inc., "Keyphi Porosimeter and Permeameter User Guide", France.
- [30] Vinci Technologies Inc., "Formation Damage System, Model FDS-350 User Guide", France.
- [31] Invensys Company, "Eurotherm Programmable Temperature/Process Controllers,

Model 2416 User Guide”, United Kingdom.

[32] Spectrum Chromatography, “CF-2 Fraction Collector User Guide”, Houston, Texas.

[33] Sartorius Mechatronics, “Sartorius CP Operating Instructions”, Goettingen, Germany.

[34] Onyekonwu, M., Ogolo, A., “Investigating the Use of Nanoparticels in Enhancing Oil Recovery”, SPE-140744.