

بررسی کارایی و پتانسیل های کاربردی گل های حفاری بر پایه نانو ذرات

سپیده ویس کرمی^{*}، خلیل شهبازی، دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت

چکیده

نانو مواد، مواد مهندسی شده ای هستند که حداقل یکی از ابعاد آن ها در محدوده ۱-۱۰۰ nm قرار گیرد. نانو سیالات، کلوئیدهایی در ابعاد نانو بوده که حاوی نانو مواد مختلف هستند. این نانو سیالات خواص منحصر به فردی دارند که پتانسیل بالایی برای استفاده در حوزه های مختلف انرژی، هوافضا، محیط زیست و بهداشتی به وجود می آورند که ناشی از خواص منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی آن ها است. به همین دلیل نانو ذرات پتانسیل بالایی در طراحی گل های حفاری هوشمند دارند. در طراحی این دسته از سیالات حفاری، ویژگی هایی مانند خواص رئولوژیک و فیلتراسیون به دقت پیش بینی می شود. هر چند که به دلیل ریسک بالای به کار گیری فناوری جدید، ورود این دسته از سیالات به صنعت حفاری با تأخیر مواجه بوده است. در سال های اخیر پژوهشگران، کاربرد نانو ذرات با ویژگی های مختلف در صنعت حفاری را بررسی کرده اند تا به فرمولاسیون های با مطلوبیت بالا برای تحمل شرایط دمایی و فشاری بالای ته چاه دست یابند. نوشتار پیش رو، پیشرفت های اخیر در حوزه استفاده از افزایش های نانومقیاس به گل حفاری را بررسی می کند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی گل حفاری با ویژگی های بهینه رئولوژیک و فیلتراسیون و نیز افزایش پایداری گل حفاری در برخورد با رس ها و افزایش پایداری دیواره چاه است. نوع، اندازه و شکل نانو ذرات، غلظت حجمی آن ها، افزودن مواد فعال سطحی مختلف و استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، عواملی هستند که در حال حاضر بررسی شده اند. نتایج پژوهش های مختلف نشان می دهد که نانو ذرات پتانسیل بالایی برای کاربردهای گل حفاری داشته و می توانند باعث حل مشکلات عمده ای در صنعت حفاری شوند. هر چند در حال حاضر، چالش هایی وجود دارد که باید مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان به بررسی و بحث پیرامون پیشنهادهایی برای پژوهش های آتی پرداخت و از مزیت ها و ظرفیت های گل حفاری پایه نانو بهره برد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۴/۱۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۶/۱۸

واژگان کلیدی:

نانو ذرات، سیال حفاری هوشمند، هرزروی گل، رئولوژی، پایداری دیواره چاه.

مقدمه

عهده دارد. این گونه سیالات باید به گونه ای مهندسی شوند که کارایی خود را در شرایط سخت مانند: دما و فشار بالا حفظ کنند. هم چنین باید اطمینان حاصل کرد که گل حفاری در حین عملیات باعث ایجاد آسیب به سازند نمی شود.

کشف میدان های جدید در محیط های ناشناخته زیر سطحی و تحت دما و فشار بالا، نیازمند توسعه سیالات حفاری است که خواص رئولوژیک و فیلتراسیون خود را در چنین شرایط دشوار حفظ کنند. نانوفناوری در سال های اخیر در صدر پژوهش ها بوده است. در حال حاضر در حوزه های مختلف فناوری از جمله حوزه انرژی منجر به پیشرفت های شگرفی شده است. لذا صنعت حفاری نمی تواند جدا از این پیشرفت ها باشد. نانوذرات نسبت به سایر ذرات در ابعاد ماکرو و میکرو، ویژگی های منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی از خود بروز می دهند. این امر عمده تاً به دلیل ابعاد ریز آن ها و بالا بودن نسبت سطح به حجم آن هاست. این

یک عملیات حفاری موفقیت آمیز بستگی شدیدی به کارایی گل حفاری به کاررفته دارد. حفاری مخازن نفت و گاز می تواند منجر به ایجاد چاه هایی با طول کیلومترها گردد. عملیات حفاری به وسیله یک مته که به رشته طولانی حفاری وصل شده است، انجام می شود. با اعمال وزن و چرخش مته، سنگ های سازند به تکه های کوچک تبدیل می شوند. سیال حفاری که از سطح به گردش درآمده است، از طریق لوله های حفاری به مته می رسد تا کنده های حفاری را با خود به سطح زمین حمل کند. پس از آن، در سطح زمین تجهیزات جداسازی باعث جدایش کنده ها از سیال حفاری می شوند. سپس گل حفاری با به گردش در آمدن توسط پمپ های قدرتمند به ته چاه برمی گردد. گل حفاری وظایف دیگری از جمله کنترل فشار ته چاهی، پایداری دیواره چاه، جلوگیری از آلوده شدن سیال هیدروکربنی توسط آلاینده های زیر سطحی، ایجاد نیروی شناوری، خنک کردن و روان سازی مته را بر

* نویسنده عهده دار مکاتبات (Sepideh.Veiskarami@afp.put.ac.ir)

است. پیش‌بینی دقیق افت فشار اصطکاکی، نیازمند دانش دقیق پیرامون رئولوژی سیال حفاری است. با عبور سیال حفاری از درون لوله‌های حفاری، خواص رئولوژیک آن‌ها تحت تغییرات بسیار بزرگی قرار می‌گیرد. اثر چندوجهی عواملی مانند: دما، فشار، زمان و تاریخچه «تنش برشی» بر ویژگی رئولوژیک سیال حفاری، باعث می‌شود تا شناسایی و پیش‌بینی پروفایل خواص رئولوژیک گل حفاری پیچیده باشد [۷]. تعیین دقیق خواص رئولوژیک سیالات حفاری نیازمند دانش عمیق پیرامون سیال پایه و هم‌چنین درک چگونگی فرآیند مشارکت ساختارهای میکروسکوپی و ویژگی‌های جریان سیال است [۸]. علاوه بر رئولوژی که یکی از خواص کلیدی یک سیال حفاری بوده و نیازمند بهینه‌سازی برای توسعه یک سیال حفاری پایدار و مؤثر است، با کاهش میزان هرزروی گل نیز می‌توان به سیال حفاری ایمن‌تر و ارزان‌قیمت‌تر دست یافت.

تهاجم سیالات خارجی از طریق سازوکار نفوذ سیال حفاری به درون سازند تازه حفاری‌شده، یکی از عمده‌ترین عوامل ایجاد آسیب سازند است. آسیب سازند، عمدتاً منجر به عملیات انگیزشی گران‌قیمت و درنهایت از دست رفتن پتانسیل تولید خواهد شد. این مشکل به‌عنوان یکی از عمده‌ترین مشکلات حفاری در سال‌های گذشته مطرح بوده است. این مشکل، باعث کاهش چشمگیر در توانایی تولید و یا تزریق‌پذیری بسیاری از مخازن شده است. در حین عملیات حفاری، هرزروی گل به درون سازند به دلیل اختلاف فشار بین ستون گل حفاری و سازند رخ می‌دهد. این اختلاف فشار در بیشتر موارد به دلیل حفاری ایمن و جلوگیری از فوران چاه است. به همین دلیل در اکثر مواقع چاه به‌صورت فراتعادلی حفر می‌شود، در این موارد فشار درون دالیز از فشار منفذی سازند بیشتر بوده و همین امر منجر به نفوذ گل حفاری به درون سازند می‌شود. سپس رفته‌رفته یک‌لایه «فیلتر کیک» بر روی دیواره چاه تشکیل می‌شود. تشکیل این لایه حاصل تجمع ذرات جامد گل حفاری بر روی دیواره سازند است. با کنترل هرزروی گل و تجمع یک‌لایه نازک از کیک گل ناتراوا می‌توان تا حدی مشکل آسیب سازند را مرتفع کرد [۶]. پژوهشگران بسیاری به بررسی اثر حضور نانو ذرات مختلف بر خواص رئولوژیک نفوذ گل حفاری پرداخته‌اند. به‌طور سنتی، در عملیات حفاری، از پلیمرها برای پاسخ به این اهداف استفاده می‌شود. «امان‌الله» [۱] به بررسی فرمولاسیون‌های مختلف حاوی نانو ذرات پرداخت و درنهایت سه نوع گل حفاری مختلف معرفی کرد. اولین فرمولاسیون پیشنهادشده از طرف وی یک گل کارآمد با خواص فیزیکی پایدار و همگن بود؛ با توجه به اینکه ویژگی‌های پایداری دمایی در دوره‌های طولانی‌مدت با استفاده از سیالات آبی و آب‌شور دشوار

ویژگی‌ها باعث اثر بخشی نانو مواد در طراحی گل حفاری برای شرایط فشار و دمای بالای می‌شود [۱].

بنابراین صنعت حفاری می‌تواند به طرز چشم‌گیری از مزایای گل‌های حفاری بر پایه نانوذرات بهره‌برد. مهم‌ترین جنبه استفاده از نانو ذرات در سیال حفاری، ایجاد فرمولاسیون‌های گل حفاری هوشمند است. این گل‌ها، ویژگی‌های منحصربه‌فردی در محدوده‌های عملیاتی گسترده‌تر خواهند داشت. علاوه بر آن، پتانسیل تولید نانوذرات با ویژگی‌های مشخص می‌تواند نقش حیاتی توسعه گل‌های حفاری پایه نانو را داشته باشد؛ چراکه گل حفاری خاص می‌تواند نیاز منحصربه‌فرد هر اپراتور به گل حفاری خاص را تأمین کند. بنابراین چالش پیش روی نانوفتائوری در صنعت حفاری، ارائه فرمولاسیون‌هایی با کاربرد بالاست به‌طوری‌که بتواند چالش‌های پیش روی صنعت حفاری را برطرف کند.

در سال‌های اخیر، نیاز به بهبود گل‌های حفاری باعث شده است که پژوهشگران به بررسی توسعه سیالات حفاری بهبودیافته بپردازند. این امر عمدتاً با استفاده از نانوذرات مختلف به‌عنوان افزایه گل حفاری صورت گرفته و عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی بوده است؛ لکن موارد استفاده میدانی نانوذرات در گل حفاری انجام‌شده است [۲]. هم‌چنین پژوهش‌های مروری مختصری پیرامون کاربرد نانوتکنولوژی در صنعت حفاری منتشرشده است [۳]. مدل‌سازی رئولوژی مناسب گل حفاری با پایه نانو به‌عنوان تابعی از نرخ برشی، کسر حجمی نانو ذرات، دما و دیگر ویژگی‌های مهم در طراحی و برنامه‌ریزی گل‌های حفاری اقتصادی صورت گرفته است [۴-۶]. پژوهش حاضر به بررسی استفاده از نانو ذرات مختلف و ارائه فرمولاسیون‌هایی برای بهبود خواص گل حفاری می‌پردازد. به‌این منظور، تمرکز اصلی این پژوهش، بر مطالعات آزمایشگاهی با بررسی استفاده از نانو ذرات در بهبود خواص گل حفاری است. از بین ویژگی‌های ذکرشده برای گل حفاری، خواص رئولوژی، هرزروی، مقاومت دیواره چاه و به‌عبارت‌دیگر ناپایداری دیواره چاه، پایداری شیل‌ها، خواص مغناطیسی گل حفاری حاوی نانوذرات، معلق‌سازی‌کننده‌های حفاری و خواص دمایی آن مطرح است. امید است که این مطالعه مروری، مورد استفاده پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته و با تکیه بر دستاوردهای آن به طراحی سیالات حفاری هوشمند، دوستدار محیط‌زیست و کارآمد دست‌یافت.

۱- رئولوژی و کنترل هرزروی

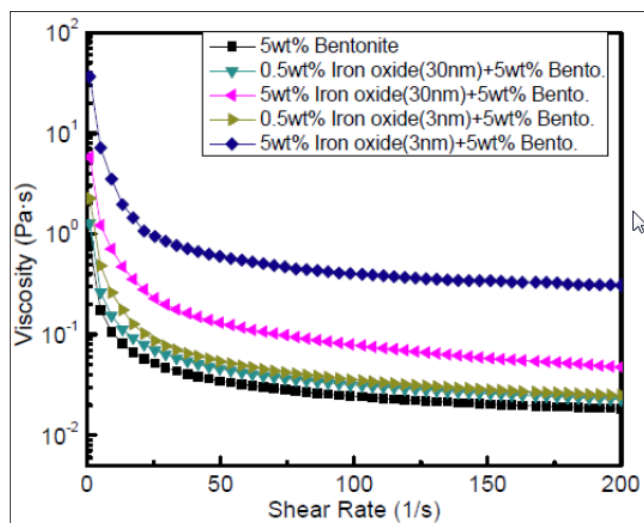
۱-۱- مطالعات آزمایشگاهی

مطالعه و کنترل خواص رئولوژیک گل حفاری یکی از وجوه اساسی موفقیت‌آمیز بودن طراحی گل حفاری و به‌طور کلی، عملیات حفاری

«رو به لبه»^۲ ساختار می‌یابند، در نتیجه تراوایی و گذردهی کیک گل را کم می‌کنند.

«باری و همکاران» [۱۰]، به بررسی فیلتراسیون سیال حفاری و ویژگی‌های رئولوژیک آن در حضور درصد پایین جامد بنتونایت و نانو ذرات آهن (Fe_2O_3) پرداختند. آن‌ها هم‌چنین به بررسی اثر دو نوع لایه هیبریدی گل رس (ICH)^۴ یکی از نوع نانوذرات آهن و دیگری از جنس رس‌های آلومینوسیلیکات^۵ (ASCH) پرداختند. بررسی‌ها در شرایط «دما و فشار پایین»^۶ ($25^\circ C$ و 69 bar) انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش دما و فشار منجر به تغییر ویژگی‌های رئولوژیک سیال حفاری و در نتیجه تغییر خواص گل حفاری خواهد شد. آن‌ها هم‌چنین متوجه شدند که عامل فشار بر کارایی محلول‌های تهیه‌شده، چندان مؤثر نیست. نانوذره ICH و محلول حاوی نانوذره آهن عملکرد بهتری را به نسبت سیال پایه حاوی محلول Wt. ۵٪ بنتونایت در تنش‌های برشی مختلف نشان داد. این نتایج در قسمت الف، شکل ۲- قابل مشاهده است. آزمایش‌های فیلتراسیون نشان داد که افزودن ICH و ASCH به گل پایه بنتونایت باعث کاهش هرزروی گل در شرایط LPLT به ترتیب به میزان ۳۷٪ و ۴۷٪ شد. مبنای مقایسه در این آزمایش‌ها میزان هرزروی گل حفاری با غلظت Wt. ۵٪ بنتونایت بود. اثر بهتر در شرایط «دما و فشار بالا»^۷ (HPHT) با کاهش ۴۷٪ مشاهده شد که در قسمت ب، شکل ۲- قابل مشاهده است. نویسندگان گزارش کردند که اضافه کردن مقدار اندک Wt. ۰/۵٪ نانوذره آهن با سایز ۳ nm و نمونه حاوی Wt. ۰/۵٪ نانوذره آهن با سایز ۳۰ nm باعث افزایش حجم فیلتراسیون به نسبت سیال پایه با میزان ۱/۵٪ و ۲/۱٪ شد. در حالی که در شرایط HPHT، نمونه حاوی Wt. ۰/۵٪ نانوذره آهن با سایز ۳ nm و ۰/۵٪ نانوذره آهن با سایز ۳۰ nm باعث کاهش هرزروی گل به میزان ۲۷/۶ و ۲۳/۴ خواهد شد. نویسندگان پیشنهاد کردند که در شرایط HPHT نانو ذرات آهن با یون Na^+ جایگزین می‌شود. این امر باعث لخته شدن رس‌ها و ایجاد فیلتر کیکی با تراوایی پایین می‌شود. از طرف دیگر، عملکرد بهتر ICH به دلیل شرکت آن در تشکیل شبکه و صفحات شبکه‌ای گل انعقاد شده می‌شود. این شبکه‌ها حساسیت کمتری نسبت به دما و فشار دارند که باعث ایجاد گل کمتر تراوا در محدوده گسترده‌تری از دما و فشار می‌شود. نتیجه این امر، ایجاد فیلتر کیکی کمتر تراوا می‌شود. تشکیل این فیلتر کیکی به‌نوبه خود باعث کاهش حجم فیلتراسیون در دو شرایط HPHT و LPLT می‌شود. تغییر ساختار صفحه‌های رس، به دلیل تغییر در بار سطحی آن‌ها رخ می‌دهد. این تغییر با آزمایش‌های پتانسیل زتا (ζ) و عکس‌های SEM تأیید شد. نویسندگان پیشنهاد کردند که بهبود

است، به همین دلیل فرمولاسیون‌هایی از یک گل حفاری همگن با استفاده از یک نانو سیال با پایداری دمایی بالا و زمان بالا بدون استفاده از مواد فعال سطحی مواد شیمیایی و افزایش‌های پلیمری مشکل خواهد بود. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که افزودن نانو ذرات موجب ایجاد یک کیک گل فشرده شده که به‌نوبه خود منجر به کاهش گیر اختلاف فشاری در سازند تراوا گردید. «جانگ و همکاران» [۹]، به بررسی خواص رئولوژیک محلول‌های حاوی پنج درصد وزنی «بنتونایت» به‌عنوان سیال پایه که حاوی درصدهای مختلف از نیم تا پنج درصد وزنی نانو ذرات آهن با اندازه ۳ تا ۳۰ nm بود پرداختند؛ محدوده دمایی بررسی آن‌ها از دمای $20^\circ C$ تا $200^\circ C$ و فشار ۱ تا 100 atm بوده است. نتایج نشان داد که افزایش غلظت نانو ذرات آهن در محلول‌های بنتونایت، باعث افزایش «تنش تسلیم»^۱ و افزایش برهم‌کنش متقابل ذرات خواهد شد. آن‌ها این افزایش گرانروی را به حضور پراکنده نانوذرات در ساختار حفرات اجزای رس و ایجاد پیوند بین ذرات بنتونایت ربط دادند؛ چراکه این ارتباط به‌نوبه خود باعث افزایش خاصیت «ژل‌شدگی» ذرات بنتونایت می‌شود. به‌علاوه آن‌ها آزمایش‌های استاندارد API در مورد تشکیل فیلتراسیون گل را انجام دادند. همان‌طور که در شکل ۱- قابل مشاهده است، آزمایش‌های آن‌ها در فشار 100 psi و در دمای محیط $25^\circ C$ درجه به ترتیب به‌عنوان مرجع فشاری دمایی انجام شد. آن‌ها کمینه هرزروی گل را در نیم درصد وزنی نانوذره آهن با سایز ۳۰ nm مشاهده کردند. درصدهای بالاتر از نیم درصد وزنی از نانو ذرات موجب افزایش هرزروی گل خواهد شد. آن‌ها پیشنهاد دادند که در غلظت‌های نزدیک به این عدد بحرانی، نسبت نیروهای جاذبه به دافعه به‌گونه‌ای است که صفحات رس بیشتر به صورت «روبه‌رو»^۲ و



شکل ۱ | گرانروی ظاهری بنتونایت در حضور و عدم حضور نانوذره آهن [۶]

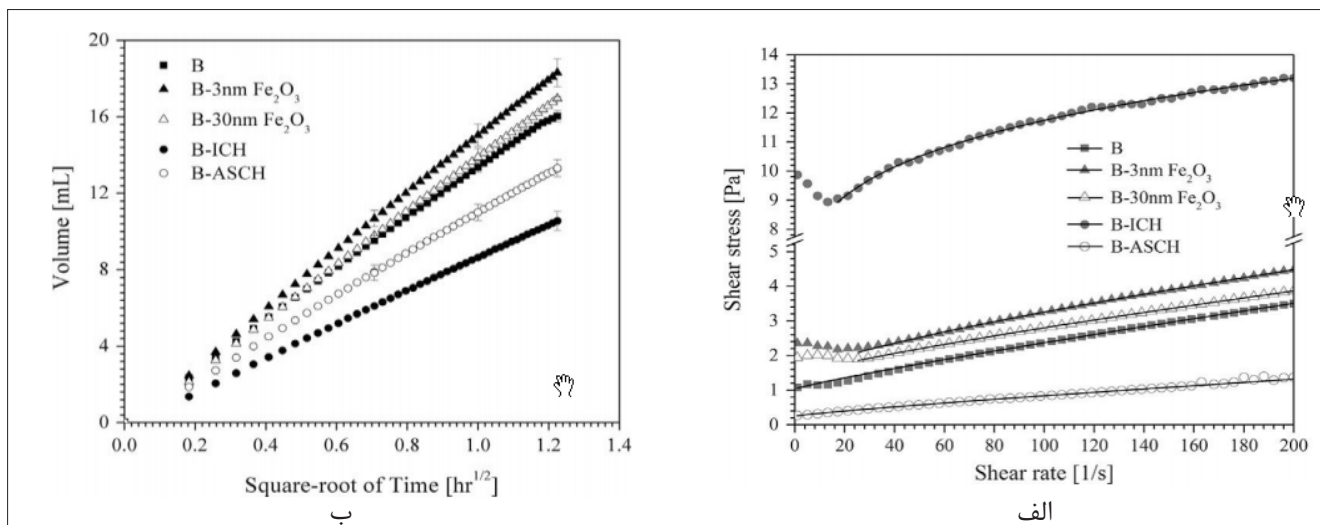
شود. تصاویر SEM نشان داد که در غلظت ۰/۵.Wt٪ ساختار فیلتر یک حوی تجمعات کمتری از نانو ذرات بود. آنالیزهای بیشتر فیلتر یک تشکیل شده با دستگاه میکرو CT و SEM در نوشتار دیگری منتشر شد [۱۱]. نویسندگان نتیجه گرفتند که افزودن نانو ذرات آهن به گل حفاری موجب بهبود خواص سیال حفاری در هر دو حالت استاتیک و دینامیک شد. بهترین فیلتر یک تشکیل شده در اثر افزودن ۰/۵.Wt٪-۰/۳ نانوذره آهن حاصل شد. نتایج آنالیز میکرو CT نشان داد که فیلتر یک تشکیل شده پس از اضافه شدن نانوذره آهن دارای دولایه است. لایه نزدیک به سطح سنگ، لایه اصلی است. در این لایه نانو ذرات به صورت فشرده عامل اصلی در تشکیل میکرو ساختار هستند. علاوه بر آن، در غلظت‌های بالای نانوذره، یک لایه جدید تشکیل می‌شود. این لایه عمدتاً از نانو ذرات تجمع یافته تشکیل شده است که اثر منفی روی خواص فیلتر یک دارد.

«کارپنتر و همکاران» [۱۲] اثر افزودن غلظت‌های مختلف نانوذره آهن تجاری به محلول بنتونایت سدیم (سیال پایه) را در مدل های آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که نانو ذرات آهن در غلظت پایین در شرایط HPHT کارایی بهتری دارند. بیشترین کاهش هرزروی گل در اثر افزودن ۰/۵.Wt٪ نانوذره به دست آمد. این فرمولاسیون باعث کاهش ۴۲/۵٪ درصدی هرزروی گل به نسبت سیال پایه شد. نتایج این مشاهدات در شکل ۴- نشان داده شده است. از طرف دیگر، افزایش نانوذره سیلیکا به گل پایه بنتونایت در غلظت‌های مختلف اثر عکس روی خواص فیلتراسیون در شرایط HPHT شد که در شکل ۵- به نمایش گذاشته شده است. اثر استثنایی نانو ذرات آهن را می‌توان به فیلتر یک فشرده تشکیل شده به نسبت سیال پایه

عملکرد گل حفاری توسط نانوذره ASCH به ساختار کم‌تراوی فیلتر یک برمی‌گردد. این ساختار به دلیل دافعه الکترواستاتیک بین ذرات هیبریدی و صفحات رس بوده است. این دافعه باعث پراکندگی خوب بارهای ذرات رس خواهد شد و از انعقاد رس جلوگیری می‌کند.

«محمود و همکاران» [۶] به بررسی عملکرد گل حفاری حاوی نانوذره آهن و سیلیکا در غلظت‌های مختلف (تا ۰/۲/۵.Wt٪) برای کمینه کردن آسیب سازند در شرایط HPHT پرداختند. لازم به ذکر است که محلول پایه، محلول بنتونایت کلسیم در غلظت ۰/۷.Wt٪ بوده است. آن‌ها گزارش کردند که افزودن نانوذره آهن باعث تغییر رئولوژی محلول گل پایه تا دمای ۲۰۰°F و هم‌چنین نقطه تسلیم و گرانیروی پلاستیک شد که در شکل ۳- قابل مشاهده است. از طرف دیگر افزایش نانوذره سیلیکا باعث کاهش تنش تسلیم در دماهای بالاتر خواهد شد. مدل «هرشل-باکلی» بهترین برازش با داده‌های ثبت شده را نشان داد. نویسندگان آزمایش‌های زمان دهی را در دمای ۳۵۰°F به مدت ۱۶ ساعت انجام دادند و مشاهده کردند که رئولوژی گل پایه بنتونایت حاوی نانوذره اکسید آهن در ساختار ژل به مدت طولانی‌تری پایدار می‌ماند. افزودن نانوذره سیلیکا به نسبت نانوذره آهن اثر بهتری در بهبود خواص رئولوژی در زمان دهی در شرایط مشابه داشت.

آزمایش‌های فیلتراسیون در شرایط HPHT (۳۰۰ psi و ۲۵۰°F) در هر دو حالت استاتیک و دینامیک با استفاده از آزمایش فیلتراسیون بررسی شد. نتایج نشان داد که محلول ۰/۵.Wt٪ نانوذره آهن باعث کاهش حجم فیلتراسیون به میزان ۴۲/۷٪ به نسبت سیال پایه شد، در حالی که حجم فیلتر یک به نسبت حالت پایه به میزان ۱۷/۳۲٪ افزایش یافت. برای تحلیل بهتر به جدول شماره ۲- رجوع

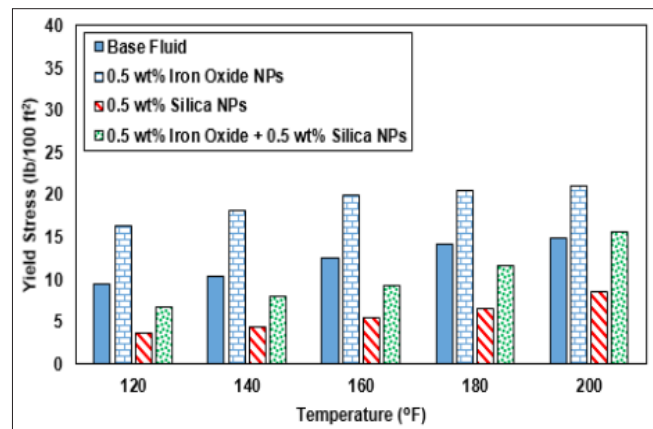
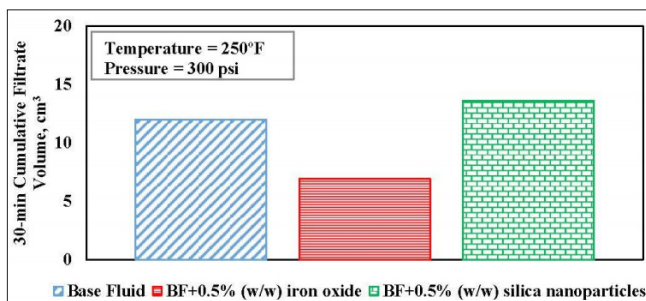


شکل ۲ | الف) تنش برشی برحسب نرخ برش برای سیالات حفاری مختلف. ب) حجم تجمعی فیلتراسیون برحسب مجذور سرعت [۱۰]

سدیم بنتونات شدند. آن‌ها متوجه شدند که تنش تسلیم و گرانیوی ظاهری در تمامی تنش‌های برشی وابستگی شدیدی به دما دارد. تنش تسلیم نانو سیالات سنتز شده، با افزایش دما تا 140°F ، به صورت خطی افزایش می‌یابد. ویسکوزیته ظاهری، در تمام تنش‌های برشی، در تمامی دماها، افزایش می‌یابد. افزودن نانوذره سنتز شده Fe_3O_4 در غلظت $0.5\text{ wt}\%$ ، بهینه خواص فیلتراسیون، با کاهش 40% هرزروی به نسبت سیال پایه را نشان داد (شرایط HPHT با دمای 250°F و 300 psi). آزمایش هرزروی اسپارت، که میزان هرزروی اولیه قبل از تشکیل کیک گل است، با افزایش نانوذره Fe_3O_4 سنتز شده تا 10% کاهش یافت. همچنین ضخامت کیک گل، با افزایش غلظت نانوذره آهن، افزایش یافت. آزمایش زمان‌دهی در دمای 350°F به مدت 16 ساعت باعث از دست رفتن خواص سیال پایه شد. هرچند که افزایش نانوذره باعث بهبود فوق‌العاده خواص فیلتراسیون و کاهش هرزروی گل به میزان 43% به نسبت سیال پایه شد. این آزمایش‌ها در شرایط دما و فشار محیط و بدون زمان‌دهی در دمای بالا انجام شده است. نتایج آن در شکل ۷- به نمایش درآمده است. آزمایش‌های SEM-EDS میکرو ساختارهای کیک گل را نشان داد. فیلتر کیک تشکیل شده توسط سیال پایه ساختاری خطی با چند تغییر، همراه بوده است. این در حالی است که، فیلتر کیک حاوی نانوذره سنتزی، ساختاری زنجیر مانند از خود

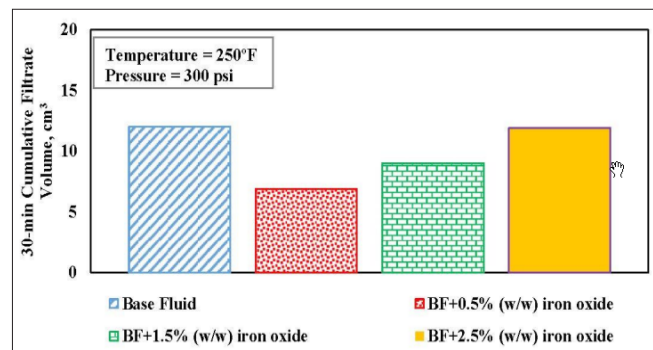
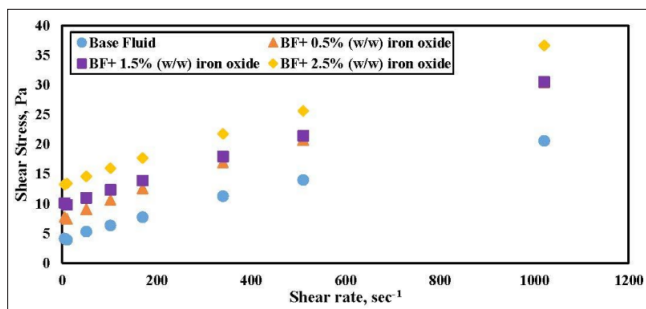
نسبت داد. این ساختار در تصاویر SEM مشاهده شد. همچنین در این پژوهش، آزمایش‌های رئولوژیک در غلظت‌های مختلف نانوذره آهن و دماهای مختلف بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که تنش تسلیم از مدل هرشل-باکلی پیروی می‌کند. این تنش در غلظت‌های مختلف نانو ذرات آهن افزایش می‌یابد که در شکل ۶- به نمایش گذاشته شده است. همچنین اثر افزایش دما بر تنش تسلیم هرشل-باکلی به صورت افزایشی خواهد بود. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات رئولوژی در اثر افزایش نانو ذرات چشم‌گیر نبوده و نیازی به افزایش‌های کنترل رئولوژی وجود ندارد. لازم به ذکر است که تغییرات تنش تسلیم نمونه‌های حاوی نانو ذرات سیلیکا به نسبت نانو ذرات آهن در دماهای مختلف اندک بوده است.

«وربیساز و همکاران» [۱۳]، به بررسی اثر نانو ذرات آهن مغناطیسی سنتز شده به‌عنوان افزایش‌دهنده گل حفاری پرداختند. این نانو ذرات با قطر 8 nm ، باعث بهبود خواص رئولوژیک و فیلتراسیون گل حفاری با پایه



شکل ۳ | میزان تنش حاصل برای نمونه‌های حاوی نیم درصد وزنی نانوذره در مقایسه با سیال پایه (محلول ۷ درصد وزنی کلسیم بنتونات) در دماهای مختلف

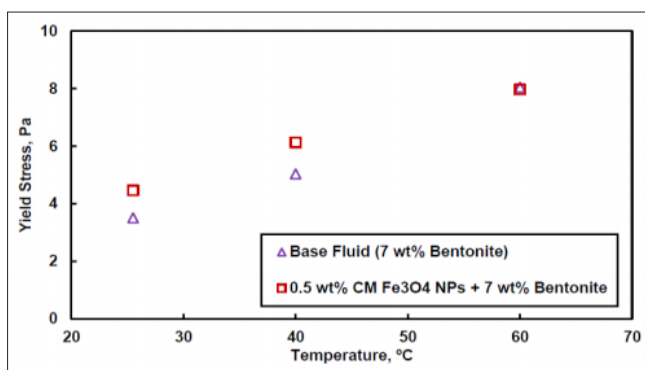
شکل ۵ | حجم فیلتراسیون در شرایط دما و فشار بالا به مدت ۳۰ دقیقه برای محلول نیم درصد وزنی نانوذره آهن و سیلیکا



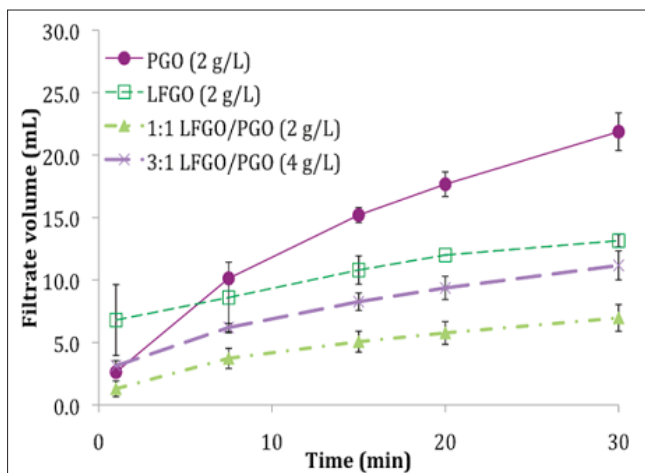
شکل ۴ | حجم جمعی فیلتراسیون در دما و فشار بالا به مدت ۳۰ دقیقه برای نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف نانوذره آهن (دمای 250°F درجه فارنهایت و فشار 300 psi)

شکل ۶ | رنوگرام برای نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانوذره و محلول ۷ درصد وزنی کلسیم بنتونات در دمای 78°F درجه فارنهایت

«بلاینه و همکاران» [۱۸]، به بررسی اثر نانوذره سیلیکا بر پلیمرهای (LV-CMC^۱، HV-CMC^{۱۱} و زانتان گام) و نمک‌های KCl و NaCl در گل‌های پایه بنتونایت پرداختند. سیال پایه این بررسی‌ها حاوی ۰/۲ گرم LV-CMC^۱، ۰/۳ گرم زانتان گام و ۲/۵ گرم KCl در محلول ۲۵ گرم بنتونایت در ۵۰۰ گرم آب بوده است. آن‌ها غلظت‌های مختلف نانوذره سیلیکا (تا میزان ۰/۴ گرم) را به سیال پایه اضافه کردند. سپس رفتار رئولوژی و فیلتراسیون محلول‌های به دست آمده را چک کردند. نتایج نشان داد که افزودن نانوذره سیلیکا باعث جابجایی مثبت رئوگرام به نسبت سیال پایه می‌شود و سیال رفتار «رقیق شدگی برشی»^{۱۲} از خود نشان می‌دهد. بیشینه تنش تسلیم ۱۰ پاسکال در اثر افزودن ۰/۲۵ گرم نانوذره سیلیکا بود، حال آنکه تنش تسلیم سیال پایه برابر با ۵/۵ پاسکال بوده است. آزمایش‌های اندازه‌گیری فیلتراسیون API نشان داد که افزودن ۰/۲۵ گرم نانوذره سیلیکا باعث کاهش ۴/۵٪ به نسبت سیال پایه حاصل شد. از طرف دیگر، اضافه شدن ۰/۲ گرم



شکل ۷ | میزان تنش حاصل برحسب دما برای سیال پایه حاوی نیم درصد وزنی نانوذره آهن.



شکل ۸ | میزان فیلتراسیون API برای درصد کربن‌های مختلف در حضور محلول پایه زانتان گام

بروز داده است. نویسندگان نتیجه گرفتند که تشکیل این ساختارها باعث افزایش مساحت سطح شده است. این افزایش سطح به نوبه خود باعث برهم کنش‌های مؤثر در ساختار فیلتر کیک خواهد شد.

محققین بسیاری به بررسی اثر نانوذره سیلیکا (SiO₂) به عنوان افزایه گل حفاری پرداختند. «مائو و همکاران» [۱۴]، به سنتز یک کامپوزیت بر پایه «نانوذره سیلیکا و پلیمر آب‌گریز با پوسته کروی»^{۱۳} پرداختند. آن‌ها از روش تشکیل امولسیون‌های معکوس در پلیمریزاسیون و تشکیل ژل جامد استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کامپوزیت سنتز شده پایداری دمایی، روان‌کنندگی، خواص رئولوژیک و قابلیت کنترل هرزروی مطلوبی دارد. به طور خاص‌تر، افزودن SFDL با ۰/۵ Wt به گل حفاری پایه آب شیرین، باعث کاهش ۶۹٪ هرزروی گل در شرایط HPHT شد. نویسندگان نتیجه گرفتند که سیال حفاری تشکیل شده باعث پایداری دیواره چاه و محافظت از مخزن می‌شود. «لی و همکاران» [۱۵]، یک سیال حفاری با افزودن نانوذره سیلیکا به گل حفاری تشکیل شده از مواد متداول مانند بنتونایت، KCl و پلیمر زانتان گام تشکیل دادند. افزودن نانوذره سیلیکا به گل حفاری باعث بهبود خواص رئولوژیک و کاهش هرزروی گل حفاری می‌شود. آن‌ها آنالیزهایی با هزینه پایین انجام دادند که صرفه اقتصادی استفاده از گل حفاری فرموله شده را به عنوان یک گل حفاری جدید نشان می‌دهد. «صالح و همکاران» [۱۶]، نشان دادند که استفاده از نانوذره سیلیکا در محدوده ۰/۱ تا ۰/۳ Wt، بیشترین اثرگذاری را روی خواص گل حفاری به نسبت غلظت‌های بالاتر از ۰/۳ Wt دارد. علاوه بر آن، گل‌های حفاری پایه آبی که به آن نانوذره سیلیکا افزوده شده است می‌تواند جایگزین مناسبی برای گل‌های پایه آبی در حفاری‌های افقی، جهت‌دار و سازندهای شیلی باشد. چراکه این نوع از گل حفاری، پتانسیل بالایی در کاهش مشکلات حفاری و بهره‌برداری دارد. در نهایت، این پژوهشگران گزارش کردند که گل‌های نانو سیلیکا به pH گل حفاری حساس هستند و می‌توانند باعث بهبود خواص گل حفاری در pH‌های بالا شوند.

«اسماعیل و همکاران» [۱۷]، به بررسی اثر «نانو ذرات لوله‌ای کربن چند دیواره»^{۱۴} و نانو ذرات سیلیکا به عنوان افزایه‌های گل حفاری پرداختند. هدف این بررسی‌ها بهبود خواص رئولوژیک، فیلتراسیون و روان‌سازی گل حفاری پایه آبی بوده است. نتایج نشان داد که افزودن MWCNT و نانوذره سیلیکا باعث بهبود خواص رئولوژیک گل حفاری مانند گرانروی پلاستیک و تنش تسلیم به نسبت سیال پایه شدند. به علاوه آن‌ها متوجه شدند که بیشترین کاهش هرزروی در اثر افزودن ۰/۰۲۸۵٪ Wt نانوذره MWCNT^{۱۵} (۱ ppb) بوده است.

آن‌ها نتیجه گرفتند که گرافن اکساید به‌عنوان افزایه کنترل فیلتراسیون در گل‌های پایه آبی با غلظت $0.12 \text{ wt.}\%$ کربن عملکرد مناسبی داشته است. آن‌ها آزمایش فیلتراسیون API را در محلول‌های گرافن اکساید و زانتان گام بررسی کردند. آن‌ها از ترکیب گرافن اکسیدهای صفحه‌ای و پودری به نسبت $1/3$ استفاده کردند و بهترین عملکرد را با هرزروی $6/1 \text{ ml}$ و ضخامت $20 \mu\text{m}$ ، در این نسبت غلظتی مشاهده کردند. آن‌ها نتایج مشاهداتشان را با گل حفاری رایج در صنعت حفاری با غلظت 12 g/l رس و پلیمر، با حجم هرزروی $7/2 \text{ ml}$ و ضخامت $280 \mu\text{m}$ مقایسه کردند. نتایج این پژوهشگران در شکل-۸ به تصویر کشیده شده است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به‌مرور دستاوردهای جدید در حوزه استفاده از نانوذرات در گل‌های حفاری پرداخته است. چالش‌ها و مسیر پیش‌رو در این حوزه شرح داده شد. بر اساس مرور اساسی صورت گرفته، نتایج زیر قابل‌ارائه است.

۱- شکل، اندازه و غلظت نانو ذرات به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار مهم در کارایی نانوذرات بر پایه نانو گزارش شده است.

و 0.3 g گرم باعث افزایش هرزروی به میزان $8/7 \%$ و 13% به نسبت سیال پایه شد. نتایج این پژوهش به نتایج گزارش شده توسط Vryzas نزدیک بود [۸].

«آگاروال و همکاران» [۱۹]، به بررسی اثر نانوذره رس و نانوذره سیلیکا در حضور ماده فعال سطحی پلیمری پرداختند. آن‌ها موفق شدند که امولسیون‌های معکوس پایداری را تشکیل دهند که در شرایط HPHT پایدار بودند. فاز نفتی استفاده‌شده در این پژوهش روغن معدنی «پلی-۱-دکان» و فاز آبی، آب دیونیزه بوده است. نانو رس استفاده‌شده، رس بر پایه مونتموریونیت با کاتیون‌های مختلف آلی و نانو سیلیکای استفاده‌شده، نانو سیلیکای نفت دوست بوده است. این پژوهشگران کشف کردند که بهترین عملکرد از لحاظ پایداری و ویژگی‌های جریان، از مخلوط نانو سیال و نانو رس حاصل شده است. نانو رس نفت را به‌راحتی پخش می‌کند و خواص ژل شدگی مطلوبی دارد. در نهایت آن‌ها گزارش کردند وقتی که زمان‌دهی به مدت ۹۶ ساعت در دمای 250°C انجام شد، تنش تسلیم با کاهش اندکی مواجه بود اما امولسیون هم‌چنان پایدار باقی ماند.

«کازینکین و همکاران» [۲۰]، اثر حضور نانو ذرات «گرافن اکسید»^۳، به‌عنوان عامل کنترل هرزروی در گل حفاری پایه آبی بررسی کردند.

خلاصه از پژوهش‌های مرور شده

پژوهشگر	نانوذره مورد بررسی	نتایج مشاهده شده
امان‌الله [۱]	فرمولاسیون‌های مختلف حاوی نانو ذرات	ایجاد یک کیک گل فشرده کاهش‌گیر اختلاف فشاری در سازند تراوا
جانگ و همکاران [۹]	نانو ذرات آهن (Fe_2O_3)	افزایش تنش تسلیم و افزایش برهم‌کنش متقابل ذرات افزایش‌گرانروی
باری و همکاران [۱۰]	نانو ذرات آهن (Fe_2O_3) نانوذره رس و رس‌های آلومینوسیلیکات (ASCH) (ICH)	افزایش دما و فشار منجر به تغییر ویژگی‌های رئولوژیک سیال حفاری و در نتیجه تغییر خواص گل حفاری خواهد شد. همچنین حجم فیلتراسیون به نسبت سیال پایه به میزان $11/5 \%$ و $2/1 \%$ افزایش یافت.
محمود و همکاران [۶]	نانو ذرات آهن (Fe_2O_3)	باعث تغییر رئولوژی، نقطه تسلیم و گرانروی پلاستیک محلول گل پایه تا دمای 20°F شد.
کارپنتر و همکاران [۱۲]	نانو ذرات آهن (Fe_2O_3)	بیشترین کاهش هرزروی گل در اثر افزودن $0.5 \text{ wt.}\%$ نانوذره به دست آمد. این فرمولاسیون باعث کاهش $42/5 \%$ درصدی هرزروی گل به نسبت سیال پایه شد.
مانو و همکاران [۱۴]	نانوذره سیلیکا (SiO_2)	هرزروی گل در شرایط 69% HPHT کاهش یافت.
لی و همکاران [۱۵]	نانوذره سیلیکا (SiO_2) و زانتان گام	استفاده از نانوذره سیلیکا در محدوده 0.1 تا $0.3 \text{ wt.}\%$ ، بیشترین اثرگذاری را روی خواص گل حفاری به نسبت غلظت‌های بالاتر از $0.3 \text{ wt.}\%$ دارد
اسماعیل و همکاران [۱۷]	اثر نانو ذرات لوله‌ای کربن چند دیواره و نانو ذرات سیلیکا	خواص رئولوژیک، فیلتراسیون و روان‌سازی گل حفاری پایه آبی بهبود یافت.
بلاینه و همکاران [۱۸]	نانوذره سیلیکا بر پلیمرهای (HV-CMC) و (LV-CMC) و زانتان گام) و نمک‌های KCl و NaCl در گل‌های پایه بنتونایت	افزودن نانوذره سیلیکا باعث جابجایی مثبت رنگ‌گام به نسبت سیال پایه شده و سیال رفتار رقیق شدگی برشی از خود نشان می‌دهد
آگاروال و همکاران [۱۹]	نانوذره رس و نانوذره سیلیکا	بهترین عملکرد از لحاظ پایداری و ویژگی‌های جریان، از مخلوط نانو سیال و نانو رس حاصل شده است. نانو رس نفت را به‌راحتی پخش می‌کند و خواص ژل شدگی مطلوبی دارد.
کازینکین و همکاران [۲۰]	نانو ذرات گرافن اکسید	افزایه کنترل فیلتراسیون در گل‌های پایه آبی

همچنان نیاز به افزایشها در کنارشان احساس می‌شود.
 ۴- رفتار ژل شدگی گل‌های حفاری در حضور نانوذرات پروفایلی مسطح دارد. همچنین حفظ میزان تنش حاصل را به خوبی انجام می‌دهند که این امر به نوبه خود باعث می‌شود که پتانسیل بالایی در انتقال کنده‌ها داشته باشند.
 ۵- تلاش‌های موفقیت‌آمیزی در زمینه مدل‌سازی رفتار رئولوژیک گل حفاری در اثر افزودن نانوذرات انجام شده است. ■

۲- اثر عمده به کارگیری نانوذرات در سیالات حفاری، افزایش چشمگیر خواص کنترل هرزروی گل در شرایط دما و فشار بالا بوده است. این امر می‌تواند منجر به آن شود که صنعت حفاری به گل‌های مقرون‌به‌صرفه دست یابد. غلظت‌های بهینه گزارش شده کمتر از یک درصد وزنی و عموماً در حدود نیم درصد وزنی بوده است.
 ۳- نانوذرات باعث اثرگذاری بر خواص رئولوژیک گل‌های مختلف پایه آبی و پایه نفتی خواهند شد. اما اثرات گزارش شده اندک بوده و

پانویس‌ها

1. Yieldstress
2. Face to face
3. Face to edge
4. Intercalated Clay hybrids (ICH)
5. Aluminosilicate clay hybrid (ASCH)
6. Low pressure low temperature (LPLT)
7. High pressure high temperature (HPHT)
8. Polymerbased nano-silica composite with core-shell structure (SDFL)
9. Multi-walled carbon nanotube (MWCNT)
10. Low viscosity carboxymethyl cellulose (LV-CMC)
11. High viscosity carboxymethyl cellulose (HV-CMC)
12. Shear thinning
13. Grapheneoxide

منابع

- [1]. Amanullah, M., M.K. AlArfaj, and Z.A. Al-abdullatif. Preliminary test results of nano-based drilling fluids for oil and gas field application. in SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. 2011. Society of Petroleum Engineers.
- [2]. Borisov, A.S., M. Husein, and G. Hareland, A field application of nanoparticle-based invert emulsion drilling fluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015. 17(8): p. 340.
- [3]. Taha, N.M. and S. Lee. Nano graphene application improving drilling fluids performance. in International petroleum technology conference. 2015. International Petroleum Technology Conference.
- [4]. Reilly, S.I., et al., First-principles rheological modelling and parameter estimation for nanoparticle-based smart drilling fluids, in *Computer Aided Chemical Engineering*. 2016, Elsevier. p. 1039-1044.
- [5]. Gerogiorgis, D.I., et al. Experimentally validated first-principles multivariate modeling for rheological study and design of complex drilling nanofluid systems. in SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. 2017. Society of Petroleum Engineers.
- [6]. Mahmoud, O., et al. Nanoparticle-based drilling fluids for minimizing formation damage in HP/HT applications. in SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. 2016. Society of Petroleum Engineers.
- [7]. Vryzas, Z., et al. Understanding the temperature effect on the rheology of water-bentonite suspensions. in *Proceedings of the Nordic Polymer Days and Nordic Rheological Conference*, Helsinki, Finland. 2016.
- [8]. Vryzas, Z., et al. Development and testing of novel drilling fluids using Fe₂O₃ and SiO₂ nanoparticles for enhanced drilling operations. in International Petroleum Technology Conference. 2015. International Petroleum Technology Conference.
- [9]. Jung, Y., et al. Effect of nanoparticle-additives on the rheological properties of clay-based fluids at high temperature and high pressure. in AADE National Technical Conference and Exhibition. 2011. American Association of Drilling Engineers Houston, TX.
- [10]. Barry, M.M., et al., Fluid filtration and rheological properties of nanoparticle additive and intercalated clay hybrid bentonite drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015. 127: p. 338-346.
- [11]. Mahmoud, O., et al. Characterization of filter cake generated by nanoparticle-based drilling fluid for HP/HT applications. in SPE International Conference on Oilfield Chemistry. 2017. Society of Petroleum Engineers.
- [12]. Carpenter, C., Development of novel drilling-fluid nanoparticles for enhanced drilling operations. *Journal of Petroleum Technology*, 2016. 68(11): p. 48-50.
- [13]. Vryzas, Z., et al. Incorporation of Fe₃O₄ nanoparticles as drilling fluid additives for improved drilling operations. in ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2016. American Society of Mechanical Engineers.
- [14]. Mao, H., et al., Novel hydrophobic associated polymer based nano-silica composite with core-shell structure for intelligent drilling fluid under ultra-high temperature and ultra-high pressure. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2015. 25(1): p. 90-93.
- [15]. Li, S., S. Osisanya, and M. Haroun. Development of new smart drilling fluids using nano-materials for unconventional reservoirs. in Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. 2016. Society of Petroleum Engineers.
- [16]. Salih, A., T. Elshehabi, and H. Bilgesu. Impact of nanomaterials on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluids. in SPE Eastern Regional Meeting. 2016. Society of Petroleum Engineers.
- [17]. Ismail, A., et al., The novel approach for the enhancement of rheological properties of water-based drilling fluids by using multi-walled carbon nanotube, nanosilica and glass beads. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016. 139: p. 264-275.
- [18]. Belayneh, M. and B.S. Aadnøy. Effect of nano-silicon dioxide (SiO₂) on polymer/salt treated bentonite drilling fluid systems. in ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2016. American Society of Mechanical Engineers.
- [19]. Agarwal, S., et al. Flow behavior of nanoparticle stabilized drilling fluids and effect of high temperature aging. in AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston. 2011.
- [20]. Kosynkin, D.V., et al., Graphene oxide as a high-performance fluid-loss-control additive in water-based drilling fluids. *ACS applied materials & interfaces*, 2011. 4(1): p. 222-227.