

بررسی تحلیلی و مقایسه‌ای تأثیر انواع نانوذرات بر خواص رئولوژیکی و فیلتراسیون گل‌های حفاری آب‌پایه (مروری بر مطالعات ۲۰۲۰ تاکنون)

مریم سلطانی مهنج^{۱*}، غزاله سلیمانی^۲

۱- کارشناس ارشد بیوتکنولوژی محیط زیست و صنعت، دانشگاه بیرجند؛ کارشناس تحقیق و توسعه هولدینگ زمرد صنعت مجد

(Soltanimaryam844@gmail.com)

۲- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه بیرجند؛ کارشناس فرآوری مواد معدنی هولدینگ زمرد صنعت مجد

(ghazaleh00soleimani@gmail.com)

خلاصه

با افزایش پیچیدگی شرایط حفاری و بروز چالش‌هایی نظیر ناپایداری دیواره چاه، افت سیال و محدودیت‌های رئولوژیکی گل‌های حفاری متداول، استفاده از نانوذرات به‌عنوان افزودنی‌های نوین در گل‌های حفاری آب‌پایه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. با وجود مطالعات متعدد در این زمینه، تفاوت عملکرد انواع نانوذرات و مکانیزم اثر آن‌ها بر خواص گل حفاری همچنان نیازمند بررسی تحلیلی و مقایسه‌ای است. هدف از این مقاله، ارائه یک مطالعه مروری تحلیلی بر تأثیر انواع نانوذرات شامل نانوبنتونیت، نانوسیلیکا، نانوگرافن و نانوذرات اکسید فلزی بر خواص رئولوژیکی و فیلتراسیون گل‌های حفاری آب‌پایه بر اساس پژوهش‌های منتشر شده طی سال‌های اخیر است. در این راستا، مطالعات منتخب با تمرکز بر پارامترهایی نظیر ویسکوزیته ظاهری، تنش تسلیم، افت سیال و تشکیل لایه گل مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد نانوذرات در شرایط عملیاتی مختلف از جمله دما و فشار بالا تحلیل شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که هر نوع نانوذره با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود می‌تواند به بهبود بخشی از عملکرد گل حفاری کمک کند، به‌طوری‌که نانوبنتونیت در تقویت ساختار ژلی، نانوسیلیکا در کنترل افت سیال، نانوگرافن در کاهش ضخامت لایه گل و نانوذرات اکسید فلزی در افزایش پایداری حرارتی نقش مؤثری ایفا می‌کنند. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر تجمع ذرات و کاهش کارایی در محیط‌های با شوری بالا مشاهده می‌شود. در نهایت، این مطالعه با تأکید بر ضرورت استفاده از اصلاح سطحی و سیستم‌های هیبریدی نانوذرات، مسیرهای پژوهشی آینده جهت بهینه‌سازی فرمولاسیون گل‌های حفاری نانویی را پیشنهاد می‌کند.

کلمات کلیدی: گل حفاری آب‌پایه، نانوذرات، نانوبنتونیت، رئولوژی، فیلتراسیون

۱. مقدمه

عملیات حفاری در صنایع نفت و گاز، فرآیندی پیچیده است که موفقیت آن به شدت به عملکرد سیال حفاری وابسته است. سیالات حفاری که با نام گل‌های حفاری نیز شناخته می‌شوند، نقش اساسی در عملیات حفاری نفت و گاز ایفا می‌کنند. این سیالات وظایف کلیدی متعددی را برای موفقیت و ایمنی فعالیت‌های حفاری بر عهده دارند. به‌طور عمده، سیالات حفاری با ایجاد فشار هیدرواستاتیک، پایداری دیواره چاه را حفظ کرده و از فوران چاه و ورود سیالات از سازندهای اطراف جلوگیری

می‌کنند [۱]. حفاری در چاه‌های عمیق و شرایط فشار و دمای بالا^۱ به‌طور قابل توجهی به سیالات حفاری وابسته است، زیرا این سیالات وظایف حیاتی مانند انتقال کننده‌ها از مته به سطح، تأمین خنک‌کاری و روانکاری مته، کاهش آسیب سازند و حفظ پایداری دیواره چاه را انجام می‌دهند. اجرای موفق این وظایف به‌طور مستقیم بر سرعت حفاری، هزینه‌های عملیاتی و جلوگیری از مشکلات پایین‌چاهی مانند گردش از دست‌رفته، گیر کردن لوله و ریزش سازند تأثیرگذار است [۲].

سیالات حفاری عمدتاً به سه دسته آب‌پایه^۲، نفت‌پایه^۳ و پایه سنتتیک تقسیم می‌شوند. نفت‌پایه‌ها خواص روانکاری برتر، پایداری دیواره چاه، کنترل عالی اتلاف سیال و کیفیت کیک فیلتر مناسب دارند، اما مشکلاتی از جمله هزینه بالا، محدودیت‌های زیست‌محیطی، مسائل ایمنی و دفع پسماند دارند. به همین دلیل، آب‌پایه‌ها با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی توسعه یافته‌اند، اما نیازمند بهبود عملکرد برای جلوگیری از تورم شیل، ناپایداری دیواره و افزایش نفوذ آب به سازند هستند. سیالات حفاری پایه سنتتیک ترکیبی از سیالات پایه آبی و پایه روغنی هستند. سیال پایه آن‌ها از روغن‌های سنتتیک یا استرها تشکیل شده است. این سیالات پیشرفته روان‌کاری برتر، پایداری بهتر دیواره چاه و مقاومت بالاتری در برابر دما، به‌ویژه در شرایط عملیاتی سخت، فراهم می‌کنند [۳، ۴].

چالش‌های اصلی در سیالات حفاری سنتی شامل نوسانات شدید در خواص رئولوژیکی تحت شرایط دمایی و فشاری بالا، و همچنین ناتوانی در تشکیل کیک فیلتر نازک، متراکم و با نفوذپذیری بسیار کم است. عدم کنترل دقیق این پارامترها منجر به افزایش اتلاف سیال، هیدروژن سولفیدزنی و ناپایداری‌های جدی در چاه می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که اندازه منافذ شیل بین ۱۰ تا ۳۰ نانومتر است، در حالی که افزودنی‌های متداول مانند بنتونیت و باریت قطر ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ نانومتر دارند و قادر به مسدود کردن منافذ نانومتری نیستند [۵]. این محدودیت‌ها باعث شده تا در دهه‌های اخیر فناوری نانو به‌عنوان راهکار مؤثر برای بهبود عملکرد آب‌پایه‌ها معرفی شود. نانوذرات با نسبت سطح به حجم بالا و خواص کوانتومی منحصر به فرد، می‌توانند تعاملات قوی‌تری با محیط مایع و ذرات جامد بزرگتر ایجاد کنند و توانایی ارتقای رسانایی حرارتی، ویژگی‌های رئولوژیکی، کنترل فیلتراسیون و پایداری دیواره چاه را دارند [۶، ۷].

لذا با توجه به اهمیت تأثیر انواع نانوذرات بر خواص رئولوژیکی و فیلتراسیون گل‌های حفاری آب‌پایه، هدف اصلی این پژوهش، ارائه یک بررسی تحلیلی و مقایسه‌ای از تأثیر انواع نانوذرات شامل نانوبنتونیت، نانوسیلیکا، نانوگرافن و نانوذرات اکسید فلزی بر خواص رئولوژیکی و فیلتراسیون گل‌های حفاری آب‌پایه است. این مطالعه قصد دارد مزایا و محدودیت‌های هر نوع نانوذره را شناسایی کرده و روندها و مکانیزم‌های اثر آن‌ها بر عملکرد گل‌های حفاری را تحلیل نماید. به طوری که بررسی تفاوت عملکرد انواع نانوذرات در بهبود ویسکوزیته، تنش تسلیم و افت سیال، شناسایی ترکیب‌های مؤثر نانوذرات برای بهبود عملکرد گل‌های حفاری و ارائه شکاف‌های پژوهشی موجود و مسیرهای تحقیقاتی آینده جهت طراحی گل‌های حفاری بهینه و مقاوم در شرایط عملیاتی چالش‌برانگیز از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد.

۲. پیشینه تحقیق

ایده نانوسیالات (سیالات بهبودیافته با نانوذرات) نخستین بار در اوایل دهه ۱۹۹۰ به‌عنوان راهکاری بالقوه برای بهبود انتقال حرارت در کاربردهای صنعتی مطرح شد [۸]. پس از موفقیت اولیه، پژوهشگران به‌سرعت به مزایای بالقوه نانوذرات پی بردند و تلاش کردند آن‌ها را در حوزه‌های مختلف، از جمله صنعت نفت و گاز، به‌ویژه در فناوری سیالات حفاری، به کار گیرند [۹]. در اوایل دهه ۲۰۰۰، تحقیقات بر مهندسی و تنظیم خواص نانوذرات برای مقابله با چالش‌های خاص حفاری، نظیر محیط‌های با فشار بالا و دمای بالا متمرکز شد [۱۰].

^۱ HPHT

^۲ WBM

^۳ OBM

نانوذرات که معمولاً اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ نانومتر دارند، ویژگی‌های منحصر به فردی ارائه می‌دهند که می‌توانند عملکرد سیال حفاری را به‌طور چشمگیری بهبود بخشند. نسبت سطح به حجم بالای آن‌ها موجب افزایش برهم‌کنش با سیال حفاری و محیط حفاری شده و در نتیجه، بهبود خواص رئولوژیکی، کاهش اصطکاک و انتقال حرارت بسیار بهتر را به همراه دارد [۱۱]. علاوه بر این، توانایی نانوذرات در مسدودسازی ریزشکستگی‌ها در سازندهای سنگی، نقش مهمی در پایداری دیواره چاه ایفا می‌کند و از ریزش احتمالی چاه و افت سیال جلوگیری می‌نماید [۱۲]. تا سال ۲۰۱۰، طیف گسترده‌ای از نانوذرات برای کاربرد در سیالات حفاری مورد بررسی قرار گرفته که هر یک مزایای خاص خود را داشتند. به‌عنوان مثال، اکسید گرافن^۱ و نانولوله‌های کربنی^۲ به دلیل استحکام مکانیکی فوق‌العاده و هدایت حرارتی بالا شناخته شده‌اند [۱۳]. اکسیدهای فلزی مانند دی‌اکسید تیتانیوم^۳، آلومینا^۴ و سیلیکا^۵ نیز به دلیل توانایی در بهبود ویسکوزیته، کنترل فیلتراسیون و روان‌کاری مورد بررسی قرار گرفتند [۱۴].

تحولات اخیر بر بهبود پایداری زیست‌محیطی نانوسیالات متمرکز شده‌اند. دانشمندان در حال بررسی نانوذرات غیرسمی و زیست‌تجزیه‌پذیر هستند تا اثرات زیست‌محیطی عملیات حفاری کاهش یابد [۱۵]. علاوه بر این، تحقیقات جاری بر روی «نانوسیالات هوشمند» که می‌توانند به تغییرات دما، pH یا میدان‌های مغناطیسی واکنش نشان دهند، مزایای بیشتری را در عملیات حفاری ارائه می‌دهد. این نانوسیالات پاسخ‌گو می‌توانند امکان کنترل لحظه‌ای خواص سیال، بهینه‌سازی کارایی حفاری و کاهش ریسک‌ها را فراهم کنند [۱۰]. این مزایا شامل روان‌کاری بهتر، بهبود خواص سیال حفاری، افزایش کارایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی می‌شود.

سیالات حفاری تقویت‌شده با نانوذرات، پتانسیل بالایی برای بهبود کارایی حفاری و پایداری دیواره چاه دارند. با این حال، چالش‌های قابل توجهی در مسیر پذیرش گسترده آن‌ها وجود دارد. این چالش‌ها شامل حفظ پایداری نانوذرات در شرایط سخت حفاری، سازگاری با اجزای سیستم، رسیدگی به ملاحظات زیست‌محیطی، بهینه‌سازی کارایی انتقال حرارت و تضمین توجیه‌پذیری اقتصادی است. علاوه بر این، مسائل ایمنی، هزینه‌های بالای تولید، مشکلات مقیاس‌پذیری و نبود روش‌های استاندارد برای مشخصه‌یابی نانوذرات نیز باید مورد توجه قرار گیرند. انجام تحقیقات و توسعه بیشتر در این زمینه‌ها برای تحقق کامل پتانسیل نانوسیالات در صنعت نفت و گاز ضروری است.

با توجه به پیشرفت‌های سریع و مزایای بالقوه نانو فناوری در حفاری، این مطالعه مروری جامع از اهمیت بالایی برخوردار است. این مطالعه با دقت بالا پژوهش‌های موجود را تلفیق کرده و به شکاف‌های دانشی مهم می‌پردازد؛ از جمله اثربخشی نانوذرات در انواع مختلف سیالات حفاری (پایه آبی، پایه روغنی و پایه سنتتیک) و تأثیر آن‌ها بر خواص رئولوژیکی، پایداری حرارتی و کنترل فیلتراسیون. این مطالعه به‌طور جامع کاربردهای نانوذرات در حفاری را بررسی کرده و به‌ویژه بر نقش آن‌ها در بهبود پایداری دیواره چاه، کنترل افت سیال و پایداری حرارتی تأکید دارد. افزون بر این، پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی مرتبط با استفاده از نانوذرات که اغلب نادیده گرفته می‌شوند نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این تلفیق علمی به‌عنوان منبعی ارزشمند برای هدایت تحقیقات و توسعه آینده عمل کرده و در نهایت به ادغام مسئولانه و مؤثر نانو فناوری به‌منظور بهینه‌سازی کارایی حفاری، حفظ یکپارچگی چاه و پایداری عملیات حفاری کمک می‌کند.

¹ GO² CNTs³ TiO₂⁴ Al₂O₃⁵ SiO₂

۳. روش کار

روش‌شناسی این پژوهش بر مبنای یک رویکرد تحلیلی و مقایسه‌ای جامع استوار است. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی و مقایسه تأثیر انواع مختلف نانوذرات (مانند نانوذرات فلزی، اکسیدی، کربنی و ترکیبی) بر دو دسته اصلی خواص گل‌های حفاری آب‌پایه، یعنی خواص رئولوژیکی (مانند ویسکوزیته پلاستیک، نقطه تسلیم، و استحکام ژل) و خواص فیلتراسیون (مانند حجم کیک فیلتر و میزان آب از دست رفته)، می‌باشد. این بررسی محدود به مجموعه مطالعات تجربی و عددی منتشر شده از ابتدای سال ۲۰۲۰ میلادی تاکنون است تا جدیدترین دستاوردها در این حوزه مورد ارزیابی قرار گیرد. فرایند کار شامل جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی از مقالات منتخب، دسته‌بندی تأثیر نانوذرات بر اساس نوع آن‌ها و غلظت مؤثر، و در نهایت، تحلیل مقایسه‌ای نقاط قوت و ضعف هر نوع نانوذره در بهبود عملکرد گل حفاری در شرایط مختلف است.

۴. بحث و نتیجه گیری

نانوذرات و کاربرد آن‌ها در سیالات حفاری:

استفاده از نانوذرات یکی از پیشرفت‌های اخیر در صنایع نفت و حفاری به شمار می‌رود [۱۶، ۱۷]. نانوذرات به دلیل خواص منحصر به فردی مانند هدایت حرارتی بالا و سطح ویژه زیاد قادر به حل بسیاری از چالش‌های سیالات حفاری هستند. از جمله مزایای آن‌ها می‌توان به کاهش آسیب به سازند، کنترل جریان و ضخامت گل، حذف مواد خطرناک، بهبود انتقال حرارت، روانکاری و بهبود خواص رئولوژیکی مانند ویسکوزیته اشاره کرد [۱۸، ۱۹]. در ادامه به انواع نانوذرات مورد استفاده در سیالات حفاری اشاره شده است.

الف) نانوذرات پلیمری

نانوذرات پلیمری بیشترین کاربرد را در تولید نانوکامپوزیت‌ها دارند و بسته به نوع سنتزی یا طبیعی پلیمر، در صنایع مختلفی مانند داروسازی، الکترونیک، انرژی و نفت و گاز استفاده می‌شوند. صادق الوعد و صباغی (۲۰۱۵) نانوکامپوزیت TiO_2/PAM را برای استفاده در سیالات حفاری بر پایه آب سنتز کردند و مشاهده کردند که این نانوکامپوزیت باعث کاهش حجم سیال از دست رفته، کاهش ضخامت گل و بهبود خواص رئولوژیکی می‌شود [۲۰]. هانگ و همکاران (۲۰۱۸) ترکیب SiO_2 /رزین اکریلیک را با ساختار هسته-پوسته در سیالات حفاری بررسی کردند و نشان دادند که این نانوکامپوزیت کارایی پر کردن و کاهش نفوذ سیال را افزایش می‌دهد [۲۱]. زو و همکاران (۲۰۱۸) از نانوذرات سیلیکا به عنوان عامل تغییر ترشوندگی شیل‌ها استفاده کرد و نشان داد که این نانوذرات می‌توانند خواص ترشوندگی را بهبود دهند [۲۲]. آفتاب و همکاران (۲۰۱۶) ZnO -اکریلامید را سنتز و بررسی کردند و نشان دادند که این ترکیب باعث بهبود خواص شیمیایی و حرارتی سیالات حفاری می‌شود [۲۳]. ترکیب پلی‌اتیلن گلاکول و نانوذرات سیلیکا نیز به عنوان تثبیت‌کننده شیل و عامل پرکننده حفره‌های شیل در سیالات حفاری مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴].

ب) نانوذرات سرامیکی

نانوذرات سرامیکی شامل فسفات‌ها، کربنات‌ها، کربیدها و اکسیدها هستند که مقاومت حرارتی بالا و بی‌اثر بودن شیمیایی دارند و می‌توانند به عنوان عوامل مکانیکی و دارویی عمل کنند [۲۵]. نانوذرات سرامیکی شامل موارد زیر می‌باشد: سیلیکا: نانوذرات سیلیکا برای کاهش نفوذ سیال و افزایش پایداری شیل در سیالات حفاری کاربرد دارند [۲۶، ۲۷].
اکسید روی^۱: اکسید روی و ترکیبات آن مانند ZnTiO_3 برای جذب H_2S و بهبود خواص رئولوژیکی و حرارتی سیالات حفاری استفاده می‌شوند [۲۸].

^۱ ZnO

دی‌اکسید تیتانیوم^۱: این ترکیب با غلظت ۰/۶ درصد وزنی باعث بهبود روانکاری، پایداری و خواص مکانیکی سیالات حفاری می‌شود [۲۹].

اکسید مس^۲: اکسید مس و اکسید روی در سیالات حفاری با افزودنی‌های پلی‌وینیل‌پیرولیدون، پلی‌اتیلن گلاکول و زانتان گام بهبود خواص حرارتی و کنترل نفوذ سیال را ایجاد می‌کنند [۳۰].
نانوذرات خاک رس: نانوذرات خاک رس مانند ترکیب $Al_2O_3-SiO_2$ و هیبریدهای اکسید آهن^۳ می‌توانند با تغییر سطح شارژ و تعامل با سایر افزودنی‌ها، حجم سیال از دست رفته را کاهش داده و پایداری حرارتی را افزایش دهند [۳۱].

ج) نانوذرات فلزی

نانوذرات فلزی از طریق روش‌های شیمیایی، فوتوشیمیایی یا الکتروشیمیایی تولید می‌شوند و در زمینه‌های مختلف از جمله تصویربرداری بیومولکولی و کاربردهای محیط‌زیستی استفاده دارند [۳۲].
نانوذرات آهن: نانوذرات آهن در شرایط فشار و دمای بالا باعث کاهش ۷۶٪ سیال از دست رفته و بهبود خواص ویسکوزیته و رئولوژیکی می‌شوند [۳۳].
نانوذرات کلسیم و زیرکونیوم: این نانوذرات باعث افزایش فشار شکستگی و کاهش ضخامت گل و سیال از دست رفته می‌شوند [۳۴].
نانوذرات نقره: ترکیب نانوذرات نقره و صفحات گرافنی باعث افزایش ویسکوزیته پلاستیک تا ۸۹٪ و کاهش سیال از دست رفته و نقطه تسلیم می‌شود [۳۵].

د) نانوذرات کربنی

نانوذرات کربنی شامل فولرن‌ها و نانولوله‌های کربنی هستند. نانولوله‌ها می‌توانند تک دیواره^۴ یا چند دیواره^۵ باشند و مقاومت مکانیکی و هدایت حرارتی بالایی دارند [۳۶].
نانوذرات کربنی: باعث کاهش ته‌نشینی سیال و حفظ همگنی سیال حفاری شده و چگالی سیال را ۴-۱۰٪ افزایش می‌دهند [۳۶].
نانوذرات گرافن و اکسید گرافن: گرافن به عنوان عامل پرکننده حفره در گل حفاری بر پایه نفت استفاده می‌شود، اما اکسید گرافن به دلیل پایداری بهتر در محیط آبی در گل حفاری بر پایه آب کاربرد دارد و خواص مکانیکی و مقاومت در برابر شوری را افزایش می‌دهد [۳۷، ۳۸].

چالش‌های عملیات حفاری و کاربرد نانوذرات

الف) روان‌کاری و رفتار رئولوژیکی

روان‌کاری در سیالات حفاری به منظور کاهش اصطکاک، جلوگیری از گیر کردن رشته حفاری، افزایش بهره‌وری حفاری، انتقال حرارت، حفاظت از مته، حفظ پایداری چاه و ارتقای ایمنی و عملیات زیست‌محیطی انجام می‌شود. مکانیزم اساسی روان‌کاری شامل کاهش اصطکاک و سایش بین اجزای متحرک تجهیزات حفاری مانند مته و رشته حفاری با دیواره چاه است. این کار با ایجاد یک فیلم روان‌کننده پایدار انجام می‌شود که می‌تواند در سیستم‌های روان‌کاری مرزی، هیدرودینامیک و مختلط عمل کند. نانوذرات، به دلیل اندازه بسیار کوچک خود، قابلیت تشکیل چنین فیلم‌های روان‌کننده پایدار را دارند و همچنین می‌توانند نامنظمی‌های میکروسکوپی سطح را پر کنند و اصطکاک بین تجهیزات حفاری و دیواره چاه را به طور چشمگیری کاهش دهند. این امر نه تنها از سایش و خرابی تجهیزات حفاری جلوگیری می‌کند، بلکه با کاهش مقاومت، نرخ

¹ TiO_2

² CuO

³ Fe_3O_4

⁴ SWCNT

⁵ MWCNT

نفوذ را نیز افزایش می‌دهد. نمونه‌ای از این نانوذرات، نانوبورات تیتانیوم است که عملکرد پیک را تحت شرایط فشار شدید نشان داده است. سایر نانوذرات مؤثر شامل نانوذرات اکسید فلز، نانوذرات الماس و نانوذرات بور هستند که می‌توانند در دما و فشارهای بالا کارایی بالایی داشته باشند [۳۹، ۴۰].

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات به سیالات حفاری آب‌پایه و امولسیون‌های نفت/آب^۱ می‌تواند خواص رئولوژیکی آن‌ها را به طور قابل توجهی بهبود دهد. حاجی آبادی و همکاران (۲۰۱۹) رفتارهای رئولوژیکی امولسیون‌های نفت/آب را با تمرکز بر ادغام نانو لوله‌های کربنی چند دیواره مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات باعث افزایش چشمگیر ویسکوزیته، تنش تسلیم و سایر پارامترهای رئولوژیکی می‌شود و رفتار سیالات حفاری با مدل Carreau تطابق خوبی دارد. همچنین، پروفیل‌های فشار تفاضلی در طول تزریق نشان داد که نمونه‌های حاوی نانوذرات افزایش ناگهانی فشار را تجربه کردند، در حالی که سیال پایه افزایش فشار یکنواخت و ملایم داشت [۴۱].

این‌توری و همکاران (۲۰۱۹) اثر افزودن سیلیکا نانو، پلی‌اکریلامی و سدیم دودسیل سولفات^۲ را بر خواص رئولوژیکی سیالات حفاری بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات در سرعت‌های برشی پایین، باعث کاهش دو مرحله‌ای ویسکوزیته می‌شود، اما به دلیل ساختار پیچیده ذره-سورفکتانت-پلیمر، سیال رفتار برشی ضخیم‌شونده از خود نشان می‌دهد. تعامل بارهای یونی بین ذرات و پلیمرهای هیدراته، موجب شکل‌گیری ساختار پیچیده‌ای شده و اثر قابل توجهی بر ویسکوزیته دارد [۴۲].

ناسکیمنتو و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر اندازه ذرات گوی شیشه‌ای، باریت و کلسیت بر ویسکوزیته ظاهری سیالات را بررسی کردند. سوسپانسیون‌هایی با ذرات کوچک دارای مقادیر برشی بیشتری بودند. در حضور پلیمر کربوکسی متیل سلولز^۳، افزایش ویسکوزیته بیشتر از صمغ زانتان^۴ مشاهده شد و اثر ذرات جامد نسبت به ویژگی‌های زنجیره‌ای پلیمر کمتر بود. تعامل الکترواستاتیکی بین ذرات و پلیمر در سوسپانسیون‌های کلسیت بیشتر از سایر ذرات بود و ذرات گوی شیشه‌ای و باریت به دلیل پتانسیل زتا بالا، مقادیر برشی پایین‌تری داشتند. تحلیل پژوهش مذکور نشان داد که ویسکوزیته و رفتار برشی به طور معنی‌داری تحت تأثیر پلیمر، توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های شیمیایی جامدات قرار دارد [۴۳].

صبوری و همکاران (۲۰۱۹) استفاده از نانوکامپوزیت CuO/PAM را در سیالات حفاری آب‌پایه گزارش کردند. نانوکامپوزیت سنتز شده با روش پلیمرسازی محلولی، پس از افزودن به سیالات پایه، ویسکوزیته را افزایش و از دست دادن سیال و ضخامت کیک فیلتر را کاهش داد. کیک‌های فیلتر ایجاد شده صاف‌تر و کم‌تخلخل‌تر بودند. عملکرد نانوکامپوزیت در آب شیرین بهتر از آب شور بود، اما هدایت حرارتی در آب شور بیشتر افزایش یافت [۱۷].

الیاسیری و همکاران (۲۰۱۹) ترکیب بیوپلیمر-نانوذرات (XG-SiO₂) را معرفی کردند که موجب بهبود رئولوژی، کاهش از دست دادن فیلتراسیون و بهبود روان‌کاری سیال شد. بررسی‌ها با روش‌های آنالیز ترموگراویمتری^۵، طیف مادون قرمز تبدیل فوریه^۶، پراش پرتو ایکس^۷ و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۸ نشان داد که این ترکیب می‌تواند بسیاری از مشکلات عملیاتی در حفاری را کاهش دهد. هانگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز افزودن نانو لایپونیت به ترپلیمر AAD را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که تعامل گروه‌های عاملی AAD با لایپونیت، ویسکوزیته سیال را به طور قابل توجهی افزایش داده و پایداری حرارتی را بهبود می‌بخشد [۱۶].

¹ W/O² SDS³ CMC⁴ XG⁵ TGA⁶ FTIR⁷ XRD⁸ SEM

ب) پاک‌سازی چاه و فیلتراسیون سیالات حفاری و تأثیر نانوذرات بر آن

سیالات حفاری آب‌پایه معمولاً شامل یک سیال پایه، افزودنی‌ها و مواد وزنی هستند تا ویژگی‌هایی مانند چگالی و ویسکوزیته مطلوب فراهم شود. این سیالات به دلیل صرفه‌جویی در هزینه و سازگاری با طیف گسترده‌ای از سازندهای زمین‌شناسی، به طور گسترده در عملیات حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات به این سیالات می‌تواند عملکرد حفاری واقعی را بهبود دهد. برای مثال، استفاده از نانوکلی در عملیات حفاری عمیق موجب بهبود چشمگیر ویژگی‌های رئولوژیکی و پایداری حرارتی سیال، کاهش گشتاور و کشش، و افزایش کارایی پاک‌سازی چاه شده است [۴۴]. نانوذرات با افزایش تعامل کلونیدی با برش‌ها، انتقال آن‌ها را نسبت به سیالات آب‌پایه سنتی بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، استفاده از نانوالماس‌ها موجب بهبود روان‌کاری سیال و کاهش اصطکاک و سایش مته می‌شود [۴۵]. افزودن نانوسیلیکا در شرایط دمایی بالا باعث افزایش پایداری حرارتی سیال و تحمل دما تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد شده، که امکان حفاری چاه‌های عمیق‌تر و دسترسی به منابع زمین‌گرمایی جدید را فراهم کرده است [۴۶].

بایو و همکاران (۲۰۱۹) کارایی سیالات حاوی نانو-سیلیکا در پاک‌سازی چاه‌های جهت‌دار را بررسی کردند. آن‌ها از یک سیستم حلقه جریان با سرعت‌های چرخش متغیر (۱۵۰-۰ rpm) برای شبیه‌سازی شرایط حفاری استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزودن نانو-سیلیکا موجب افزایش ۳۰/۸ تا ۴۴ درصد در کارایی انتقال برش‌ها شد. این بهبود ناشی از افزایش تعامل کلونیدی بین نانوذرات و برش‌ها بود. استفاده از نانوسیلیکا امکان حفاری چاه‌های طولانی‌تر و بهبود فرآیند پاک‌سازی چاه را فراهم کرده است [۴۷].

مانیکو و همکاران (۲۰۱۹) اثر نانوذرات اکسید سیلیکون و آلومینیوم نیتريد بر فیلتراسیون سیالات در محیط‌های متخلخل با نفوذپذیری‌های مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان داد که اندازه، غلظت و نوع نانوذرات، ویژگی‌های میکروذرات و اندازه روزنه فیلتر همه بر فیلتراسیون تأثیر دارند. افزودن نانوذرات به میکروسوسپانسیون باعث کاهش شدید از دست دادن سیال و تغییر شکل و ضخامت کیک فیلتر شد. علاوه بر این، ویژگی‌های میکروذرات و اندازه روزنه سنگ نیز نقش مؤثری در بهبود فیلتراسیون دارند [۴۸]. مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که ترکیب نانوذرات با سورفکتانت‌ها و پلیمرها، همانند سیلیکا نانو در حضور PAM و SDS ساختار پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که بر ویسکوزیته و رفتار برشی سیال تأثیرگذار است [۴۲]. همچنین، نانوکامپوزیت CuO/PAM موجب بهبود همزمان رئولوژی، کاهش از دست دادن فیلتراسیون و افزایش هدایت حرارتی سیالات شده است؛ اثرات آن در آب شیرین بیشتر بوده، در حالی که در آب شور هدایت حرارتی افزایش یافته است [۱۷].

ج) حفاظت سازند و افزایش کارایی

حاجی آبادی و همکاران (۲۰۲۰) نانوذرات سیلیکا را با ^۱ 3-glycidoxypopyl-triethoxy silane اصلاح کردند و از ترکیب GPTS و propyl silane برای تغییر هیدروفیلیسیته سطح نانوذرات استفاده کردند. مطالعات نشان داد که اصلاح سطح نانوذرات می‌تواند رئولوژی سیال حفاری را بهبود دهد و آسیب به سازند را کاهش دهد، که این اثر وابسته به گروه عملکردی اصلاح‌شده و اندازه نانوذرات است. ویسکوزیته پلاستیک با افزایش دما کاهش یافت، زیرا ویسکوزیته فاز پیوسته کاهش می‌یابد. تنش تسلیم با تغییرات دمایی بیشتری مواجه شد، که ناشی از حساسیت بیشتر دما در تعاملات بین اجزای سیال حفاری است. نانوذرات شیمیایی اصلاح‌شده، احتمالاً به دلیل تشکیل یک سد خارجی غیرقابل نفوذ یا آسیب داخلی به هسته، مانند ایجاد فیلتر کیک روی سطح هسته، باعث افزایش شدید فشار شدند [۴۹].

وانگ و همکاران (۲۰۲۰) استفاده از اکسید گرافن را برای جلوگیری از تورم کانی‌های رسی بررسی کردند. برای ارزیابی حفاظت اکسید گرافن روی شیل، آزمایش‌های مختلفی شامل مقاومت فشاری یک‌محوره، تورم خطی، ایمبیشن و فیلتراسیون انجام شد. در مقایسه با نانوذرات سیلیکا و سایر مهارکننده‌های معمول شیل، اکسید گرافن عملکرد بهتری در جلوگیری از

^۱ GPTS

تورم کانی‌های رسی، مسدود کردن منافذ نانو و میکرو، محدود کردن نفوذ آب به داخل هسته شیل و حفظ مقاومت شیل ارائه داده است [۵۰].

کمالی و همکاران (۲۰۲۱) اثر نانوکامپوزیت Fe₃O₄-CMC بر ویژگی‌های فیلتراسیون و رئولوژی سیال حفاری را بررسی کردند. نانوکامپوزیت با استفاده از طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس، SEM، FTIR، XRD و روش سنتز هم‌رسوبی شناسایی شد. پس از افزودن نانوکامپوزیت با نسبت‌های مختلف به سیالات حاوی آب شیرین و شور، کاهش قابل توجهی در حجم فیلتراسیون و ضخامت کیک فیلتر مشاهده شد و ویسکوزیته بهبود یافت [۵۱].

دوتا و داس (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای روی مخازن Upper Assam، بر دو جنبه هزینه بالای نانوذرات و بهبود ویژگی‌های آن تمرکز کردند. نتایج مطالعه نشان داد که سیالات حفاری هوشمند مبتنی بر نانوذرات می‌تواند به جای افزودنی‌های تجاری استفاده شود، اگرچه محدودیت‌های اقتصادی و عملیاتی باعث شده است که تاکنون در این مخازن به کار نرود. افزودن مقادیر کم نانوذرات موجب بهبود رئولوژی سیالات حفاری، کاهش ویسکوزیته و کاهش از دست دادن فیلتراسیون شده است [۵۲]. میرزاآسدی و همکاران (۲۰۲۱) روشی ساده برای سنتز نانوذرات از پوسته برنج ارائه کردند تا هزینه‌های بالای نانوذرات کاهش یابد. نانوذرات سیلیکا با دو روش بدون مواد شیمیایی و با درمان شیمیایی تولید شدند. نتایج نشان داد که نانوذرات مذکور به‌طور مؤثر ویسکوزیته را بهبود می‌دهند، نفوذ به سازند را کاهش می‌دهند و پایداری حرارتی سیال حفاری را افزایش می‌دهند [۵۳].

د) پایداری شیل و پایداری حرارتی

جیانگ و همکاران (۲۰۲۰) نانوذرات فوق‌آمفیبی^۱ را به عنوان یک جزء چندمنظوره در سیالات حفاری روغن پایه توسعه دادند. هدف از این بررسی، شناسایی ویژگی‌های نانوذرات فوق‌آمفیبی و بررسی اثر آن بر سیالات حفاری روغن پایه بود. نتایج نشان داد که نانوذرات فوق‌آمفیبی می‌تواند ساختار میکرونانو به دلیل شکل کروی و قطر حدود ۱۰۰ نانومتر ایجاد کند. ویژگی‌های سطح فوق‌آمفیبی شیل، کاهش حجم فیلتراسیون OBMs، کاهش ایمیشن خودبه‌خود و حفظ مقاومت فشاری هسته شیل از نتایج محتمل ساختار سطحی نانوذرات و گروه‌های عملکردی است. سیالات حفاری روغن پایه مجهز به نانوذرات فوق‌آمفیبی می‌توانند برای حفاری مخازن گاز و نفت غیرمتعارف مورد استفاده قرار گیرند، زیرا ثبات بالایی دارند و اجازه نفوذ کمتر مایع به منافذ شیل را می‌دهند [۳].

مروجی و همکاران (۲۰۲۰) سیال حفاری مبتنی بر گلیکول پایدار را برای جایگزینی سیالات حفاری روغن پایه توسعه دادند. ابتدا سیلیکا نانوذرات آمورف از پوسته‌های برنج با اندازه‌های ۱۲، ۲۲ و ۵۴ نانومتر تولید شد. نانوذرات پراکنده در آب به عنوان افزودنی مایع به گل حفاری گلیکولی اضافه شدند. اثر نانوذرات سیلیکا بر رئولوژی، فیلتراسیون و پایداری شیل مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات سیلیکا باعث افزایش رئولوژی سیال حفاری گلیکولی شدند که این بهبود وابسته به مقدار و اندازه نانوذرات بود. همچنین نانوذرات باعث کاهش از دست دادن مایع و بهبود پایداری حرارتی سیال حفاری شدند [۵۴].

بگ و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر نانوذرات TiO₂ را بر پایداری حرارتی سیال حفاری در دو سیستم گل سلولز پلی‌آنیونی و هیدروکسی‌اتیل سلولز بررسی کردند. سیالات حفاری برای شبیه‌سازی شرایط چاه در یک کوره غلتان در ۱۱۰ درجه سانتیگراد و سرعت ۳۰ rpm به مدت ۱۶ ساعت مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نانوذرات باعث افزایش مقاومت حرارتی در رئولوژی و فیلتراسیون شدند و درصد کاهش ویسکوزیته آشکار (AV) با نانوذرات کمتر از نمونه‌های بدون نانو بود [۵۵].

وانگ و همکاران (۲۰۲۰) همچنین نشان داد که اکسید گرافن در جلوگیری از تورم کانی‌های رسی و مسدود کردن منافذ میکرو و نانو مؤثر است، در حالی که عملکرد آن در حفظ استحکام شیل نیز برتر از نانوذرات سیلیکا و مهارکننده‌های معمول است [۵۰].

^۱ SAN

ه) مهار شیل و نانوسیالات پایدار

دوتا و داس (۲۰۲۱) امکان حفاری در مخازن Upper Assam Basins را بررسی کردند. نانوذرات اکسید آهن از طریق فرآیند کاهش شیمیایی سنتز شدند و با استفاده از طیف‌سنجی UV و تحلیل اندازه ذرات شناسایی شدند. نتایج نشان داد که مقدار کمی از نانوذرات اکسید آهن، رئولوژی سیالات حفاری را به شکل مؤثری بهبود بخشیده و آنها را به سیالات غیرمخرب تبدیل می‌کند؛ این بهبود رئولوژی به کاهش مشکلاتی نظیر چسبندگی تفاضلی، نرخ نفوذ پایین^۱ و فشار حلقوی^۲ بالا کمک می‌کند. اما علیرغم مزایای فنی مذکور، به دلیل ملاحظات اقتصادی، این فناوری نانویی هنوز در عملیات حفاری به کار گرفته نشده است [۵۲].

برای کاهش هزینه‌های بالای استفاده از نانوذرات، میرزااسدی و همکاران (۲۰۲۱) روشی ساده برای تولید نانوذرات سیلیکا از پوسته برنج ارائه کردند. نانوسیالات تولید شده در سه غلظت ۳، ۵ و ۷٪ به سیالات حفاری آب‌پایه اضافه شدند و اثر آنها بر رئولوژی، فیلتراسیون و نفوذ سیال بررسی شد. نتایج نشان داد که نفوذ سیال کاهش یافته، رئولوژی بهبود یافته و پایداری حرارتی سیال افزایش یافته است. این نانوذرات همچنین باعث مسدود کردن منافذ نانومتری شیل و افزایش بازایی برش‌ها شدند. مزایای بلندمدت استفاده از افزودنی‌های نانو شامل کاهش هزینه‌های حفاری، افزایش کارایی عملیاتی، افزایش ثبات چاه و کاهش مشکلات حفاری است. این افزودنی‌ها می‌توانند باعث کاهش از دست دادن فیلتراسیون، بهبود پایداری دیواره چاه و افزایش سرعت حفاری شوند. همچنین کاهش زمان غیرعملیاتی و تولید کمتر ضایعات از دیگر مزایای استفاده از نانوذرات است [۵۳].

مهمترین نانوسیالات صنعت حفاری و مقایسه کارکرد آنها

نانوسیالات در حفاری به دلیل بهبود رئولوژی، هدایت حرارتی، کاهش افت سیال و افزایش کارایی پاک‌سازی چاه، کاربرد گسترده‌ای دارند. مهم‌ترین نانوسیالات مورد استفاده عبارتند از [۴]:

الف) سیلیکا: پراکنده‌سازی نانوذرات سیلیکا در گل حفاری پایه آبی، رئولوژی و پایداری حرارتی را افزایش می‌دهد، افت فیلتراسیون را کاهش داده و به عنوان فیلتر مسدودکننده منافذ عمل می‌کند. ترکیب با بیوپلیمرها و سورفکتانت‌ها اثرات بازدارندگی تورم و انتقال حرارت را تقویت می‌کند.

ب) آلومینا: نانوذرات آلومینا به دلیل خنثی بودن شیمیایی و استحکام مکانیکی، رئولوژی، روان‌کاری و حمل خرده‌سنگ‌ها را بهبود می‌دهند. حتی در غلظت‌های پایین، پایداری حرارتی سیال افزایش می‌یابد و در شرایط فشار و دمای بالا افت سیال کاهش می‌یابد.

ج) اکسید مس: هدایت حرارتی بالا و خواص ضدباکتریایی دارند. ترکیب آن با پلی‌اکریلامید^۳ یا صمغ زانتان باعث کاهش افت فیلتراسیون و ضخامت فیلترکیک، افزایش هدایت حرارتی و بهبود رئولوژی حتی در شرایط فشار و دمای بالا می‌شود.

د) نانولوله‌های کربنی: استحکام مکانیکی بالا و هدایت حرارتی زیادی دارند، رئولوژی و استحکام ژل را افزایش داده و افت فیلتراسیون را کاهش می‌دهند. نانولوله‌های کربنی در دماهای بالای ۲۵۰-۳۵۰ درجه فارنهایت عملکرد بهتری نسبت به دی‌اکسید تیتانیوم دارد.

ه) گرافن و اکسید گرافن: به دلیل هدایت حرارتی بالا، رئولوژی، استحکام ژل و کاهش افت فیلتراسیون را بهبود می‌بخشند. اکسید گرافن به دلیل پایداری بهتر، در گل‌های پایه آبی قابل استفاده است.

و) دی‌اکسید تیتانیوم: هدایت حرارتی بالا، پایداری شیمیایی و مکانیکی و کاهش افت فیلتراسیون دارد. با کاهش اندازه نانوذرات، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

¹ ROP² ECD³ PAM

ی) اکسید آهن: زیست‌سازگار و مغناطیسی، کاهش افت سیال، ضخامت فیلترکیک و ضریب اصطکاک را بهبود می‌دهد و رئولوژی را حتی در شرایط فشار و دمای بالا کنترل می‌کند.

در انتها می‌توان گفت نانوسیالات با افزایش ویسکوزیته، پایداری حرارتی و کاهش افت فیلتراسیون، قابلیت پاک‌سازی بهتر چاه و محافظت از سازند را فراهم می‌کنند و انتخاب نوع نانوذرات با توجه به شرایط حفاری و اهداف عملیاتی انجام می‌شود. برخی از انواع نانوذرات مورد استفاده و رفتار آنها در سیالات حفاری در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱- انواع نانوذرات گزارش شده مورد استفاده در سیالات حفاری و رفتار آنها [۱۰].

نوع نانوذرات	حجم اتلاف سیال (میلی لیتر)	استحکام اولیه ژل (پاسکال)	استحکام ژل بعد از ۱۰ دقیقه (پاسکال)
CuO	۱۲	۱۶	۳۵
MWCNT	۹	۴/۵	۷
ZnO	۴/۷	۶	۹
Silica	۷/۲	۳/۵	۶/۵
Al ₂ O ₃	-	۱۵	۳۹
Yttrium Oxide	-	۱۵	۱۶
Al ₂ O ₃	۶	۱۱	۴۰
Silica	۱۰	۱۳	۳۲
BiFeO ₃	۷/۸	۱۳	۲۰
Silica	۵/۱	۷	۸

مزایا و کاربردهای اقتصادی و زیست‌محیطی نانوذرات در سیالات حفاری

استفاده از نانوذرات در سیالات حفاری نه تنها عملکرد سیال را بهبود می‌بخشد، بلکه مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی نیز ارائه می‌دهد. ویژگی‌های منحصر به فرد نانوذرات مانند سطح ویژه بالا نسبت به جرم باعث افزایش واکنش‌پذیری و کاهش میزان مصرف آنها در سیال حفاری می‌شود، که به نوبه خود کاهش هزینه‌های مواد اولیه و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از سیالات حفاری سنتی را به همراه دارد [۵۶].

الف) مزایای اقتصادی

کاهش هزینه مواد گران‌قیمت سیالات حفاری: نانوذرات به دلیل اثرگذاری بالا در غلظت کم، می‌توانند جایگزین مواد افزودنی سنتی گران‌قیمت شوند و هزینه کلی سیال حفاری را کاهش دهند [۵۷، ۵۸].
افزایش راندمان حفاری در سازندهای چالشی: کاربرد نانوذرات به سیالات حفاری اجازه می‌دهد تا در شرایط دشوار و چاه‌های نامطمئن به کار گرفته شوند و با بهبود پایداری گل و دیواره چاه، افزایش میزان بازیافت نفت و گاز حاصل شود [۵۹].

کاهش زمان غیرمولد^۱: با کاهش مشکلات ناشی از نفوذ سیال، تشکیل گل غیرایزوله و آسیب به سازند، استفاده از نانوذرات باعث صرفه‌جویی در زمان حفاری و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود [۶۰].

ب) مزایای زیست‌محیطی

تأکید روزافزون بر حفاری "سبز" باعث شده تا جنبه‌های زیست‌محیطی نانوذرات مورد توجه قرار گیرد:

¹ Non-Productive Time

کاهش استفاده از مواد شیمیایی خطرناک: با جایگزینی نانوذرات با برخی مواد شیمیایی سنتی، می‌توان اثرات زیست‌محیطی و آلاینده‌گی سیالات حفاری را کاهش داد. این موضوع به ویژه در سیالات حفاری پایه آب و سازندهای حساس زیست‌محیطی اهمیت دارد.

کاهش تولید زباله و گل حفاری آلوده: نانوذرات با کاهش میزان گل از دست رفته و کنترل نفوذ سیال، باعث کاهش تولید گل‌های اضافی و دفع مواد آلوده به محیط زیست می‌شوند.

افزایش بازدهی استفاده از منابع طبیعی: با کاهش مصرف مواد افزودنی و افزایش کارایی سیال حفاری، میزان استخراج مواد اولیه و انرژی مصرفی در تولید و انتقال سیالات حفاری کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه گیری

کاربرد نانوذرات در سیستم‌های گل حفاری آب‌پایه یک تحول اساسی در مهندسی سیالات حفاری محسوب می‌شود که پتانسیل بهینه‌سازی خواص کلیدی فراتر از توانایی‌های افزودنی‌های متعارف را دارد؛ در حوزه رئولوژی، نانوذرات با ایجاد شبکه‌های ساختاری در سیال، قادر به بهبود همزمان ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم هستند که این امر برای حفظ تعلیق بهینه کاتدها و کاهش فشار حلقوی حیاتی است، در حالی که در بخش کنترل فیلتراسیون، اندازه فوق‌العاده کوچک آن‌ها به طور مؤثر منافذ کیک فیلتراسیون را مسدود کرده و منجر به تشکیل لایه‌ای متراکم و با نفوذپذیری بسیار پایین می‌شود که این نتیجه مستقیماً از کاهش نفوذ سیال به سازند جلوگیری می‌کند؛ با این حال، موفقیت کلی در گرو انتخاب دقیق نوع نانوذرات و کنترل غلظت آن‌هاست تا یک تعادل کارآمد بین بهبود عملکرد فنی و مدیریت ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی حاصل شود، که این پیچیدگی، ماهیت نانوذرات را به عنوان یک فناوری دو وجهی در صنعت حفاری تثبیت می‌کند. در مجموع، استفاده از نانوذرات در سیالات حفاری باعث بهبود عملکرد مکانیکی، رئولوژیکی و حرارتی سیال، کاهش آسیب به سازند و دیواره چاه، و مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی می‌شود. به طوری که نانوذرات با اثرگذاری بالا در غلظت کم، توانسته‌اند جایگزین برخی افزودنی‌های سنتی شده و راهکاری پایدار و اقتصادی برای صنعت حفاری ارائه دهند.

۷. مراجع

1. Mikhienkova, E. I., Lysakov, S. V., Neverov, A. L., Zhigarev, V. A., Minakov, A. V., & Rudyak, V. Y. (2022). Experimental study on the influence of nanoparticles on oil-based drilling fluid properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109452.
2. Mahmoud, O., Nasr-El-Din, H. A., Vryzas, Z., & Kelessidis, V. C. (2016). Nanoparticle-based drilling fluids for minimizing formation damage in HP/HT applications. In *SPE international conference and exhibition on formation damage control*.
3. Jiang, G., Ni, X., Yang, L., Li, W., Li, Y., & Deng, Z. (2020). Synthesis of superamphiphobic nanofluid as a multi-functional additive in oil-based drilling fluid, especially the stabilization performance on the water/oil interface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 588, 124385.
4. Gokapai, V., Pothana, P., & Ling, K. (2024). Nanoparticles in drilling fluids: a review of types, mechanisms, applications, and future prospects. *Eng*, 5(4), 2462-2495.
5. Xu, T., & Bezuijen, A. (2019). Bentonite slurry infiltration into sand: filter cake formation under various conditions. *Géotechnique*, 69(12), 1095-1106.
6. Kelessidis, V. C., Christidis, G., Makri, P., Hadjistamou, V., Tsamantaki, C., Mihalakis, A. & Foscolos, A. (2007). Gelation of water-bentonite suspensions at high temperatures and rheological control with lignite addition. *Applied clay science*, 36(4), 221-231.

7. Alghareeb, A. (2020). A review on controlling bentonite-based drilling mud properties. *Int. J. Archit. Energy Urban*, 1, 44-55.
8. Choi, S. U. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In *ASME international mechanical engineering congress and exposition* (Vol. 17421, pp. 99-105). American Society of Mechanical Engineers.
9. Amanullah, M., & Al-Tahini, A. M. (2009). Nano-technology-its significance in smart fluid development for oil and gas field application. In *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition* (pp. SPE-126102). SPE.
10. Cheraghian, G. (2021). Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art. *Journal of materials research and technology*, 13, 737-753.
11. Rafati, R., Smith, S. R., Haddad, A. S., Novara, R., & Hamidi, H. (2018). Effect of nanoparticles on the modifications of drilling fluids properties: A review of recent advances. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 161, 61-76.
12. Amanullah, M., Al-Arfaj, M. K., & Al-Abdullatif, Z. (2011). Preliminary test results of nano-based drilling fluids for oil and gas field application. In *SPE/IADC drilling conference and exhibition* (pp. SPE-139534). SPE.
13. Vryzas, Z., & Kelessidis, V. C. (2017). Nano-based drilling fluids: A review. *Energies*, 10(4), 540.
14. Liu, B. C., Liu, S. Q., Chen, Z. R., Meng, Q. N., & Li, C. (2016). Oxide and diamond nanoparticles modified drilling fluid for deep, complicated drilling conditions. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(12), 13007-13013.
15. Patidar, A. K., Ghosh, S., Thakur, N. K., Sharma, A., & Baliyan, A. (2022). A review and comparative analysis of effectively functionalized eco-friendly and biodegradable nanoparticle based additives for drilling muds. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1598-1604.
16. Al-Yasiri, M., Awad, A., Pervaiz, S., & Wen, D. (2019). Influence of silica nanoparticles on the functionality of water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179, 504-512.
17. Saboori, R., Sabbaghi, S., & Kalantariasl, A. (2019). Improvement of rheological, filtration and thermal conductivity of bentonite drilling fluid using copper oxide/polyacrylamide nanocomposite. *Powder Technology*, 353, 257-266.
18. Huang, X., Lv, K., Sun, J., Lu, Z., Bai, Y., Shen, H., & Wang, J. (2019). Enhancement of thermal stability of drilling fluid using laponite nanoparticles under extreme temperature conditions. *Materials Letters*, 248, 146-149.
19. Zhong, H., Gao, X., Zhang, X., Qiu, Z., Zhao, C., Zhang, X., & Jin, J. (2020). Improving the shale stability with nano-silica grafted with hyperbranched polyethyleneimine in water-based drilling fluid. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83, 103624.
20. Sadeghalvaad, M., & Sabbaghi, S. (2015). The effect of the TiO₂/polyacrylamide nanocomposite on water-based drilling fluid properties. *Powder Technology*, 272, 113-119.
21. Huang, X., Sun, J., Lv, K., Liu, J., Shen, H., & Zhang, F. (2018). Application of core-shell structural acrylic resin/nano-SiO₂ composite in water based drilling fluid to plug shale pores. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 55, 418-425.
22. Xu, J. G., Qiu, Z., Zhao, X., Mou, T., Zhong, H., & Huang, W. (2018). A polymer microsphere emulsion as a high-performance shale stabilizer for water-based drilling fluids. *RSC advances*, 8(37), 20852-20861.

23. Aftab, A. A. R. I., Ismail, A. R., Khokhar, S., & Ibupoto, Z. H. (2016). Novel zinc oxide nanoparticles deposited acrylamide composite used for enhancing the performance of water-based drilling fluids at elevated temperature conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 146, 1142-1157.
24. Bardhan, A., Vats, S., Prajapati, D. K., Halari, D., Sharma, S., & Saxena, A. (2024). Utilization of mesoporous nano-silica as high-temperature water-based drilling fluids additive: Insights into the fluid loss reduction and shale stabilization potential. *Geoenergy Science and Engineering*, 232, 212436.
25. Dejtardon, P., Hamidi, H., Chuks, M. H., Wilkinson, D., & Rafati, R. (2019). Impact of ZnO and CuO nanoparticles on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 570, 354-367.
26. Morgani, M. S., Saboori, R., & Sabbaghi, S. (2017). Hydrogen sulfide removal in water-based drilling fluid by metal oxide nanoparticle and ZnO/TiO₂ nanocomposite. *Materials Research Express*, 4(7), 075501.
27. Wang, R., Liu, T., Ning, F., Ou, W., Zhang, L., Wang, Z. & Jiang, G. (2019). Effect of hydrophilic silica nanoparticles on hydrate formation: Insight from the experimental study. *Journal of energy chemistry*, 30, 90-100.
28. Perween, S., Beg, M., Shankar, R., Sharma, S., & Ranjan, A. (2018). Effect of zinc titanate nanoparticles on rheological and filtration properties of water based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 170, 844-857.
29. Bég, O. A., Espinoza, D. S., Kadir, A., Shamshuddin, M. D., & Sohail, A. (2018). Experimental study of improved rheology and lubricity of drilling fluids enhanced with nano-particles. *Applied Nanoscience*, 8(5), 1069-1090.
30. Bayat, A. E., & Shams, R. (2019). Appraising the impacts of SiO₂, ZnO and TiO₂ nanoparticles on rheological properties and shale inhibition of water-based drilling muds. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 581, 123792.
31. İşçi, E., & Turutoğlu, S. İ. (2011). Stabilization of the mixture of bentonite and sepiolite as a water based drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 76(1-2), 1-5.
32. Cheraghian, G., & Nezhad, S. K. (2015). Experimental investigation of polymer solutions used in enhanced oil recovery-thermal properties improved by nanoclay. In *77th EAGE Conference and Exhibition 2015* (Vol. 2015, No. 1, pp. 1-3). European Association of Geoscientists & Engineers.
33. Alvi, M. A., Belayneh, M., Saasen, A., & Aadnøy, B. S. (2018). The effect of micro-sized boron nitride BN and iron trioxide Fe₂O₃ nanoparticles on the properties of laboratory bentonite drilling fluid. In *SPE Norway Subsurface Conference* (p. D011S011R002). SPE.
34. Paul, A. A., & Adewale, F. J. (2018). Experimental investigation of fluid loss and cake thickness control ability of zirconium (IV) oxide (**ZRO2**) nanoparticles in water based drilling mud. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2), 702-707.
35. Husin, H., Elraies, K. A., Choi, H. J., & Aman, Z. (2018). Influence of graphene nanoplatelet and silver nanoparticle on the rheological properties of water-based mud. *Applied Sciences*, 8(8), 1386.
36. Cheraghian, G. G., & Afrand, M. (2021). Nanotechnology for drilling operations. In *Emerging Nanotechnologies for Renewable Energy* (pp. 135-148). Elsevier.

37. Aramendiz, J., & Imqam, A. (2019). Water-based drilling fluid formulation using silica and graphene nanoparticles for unconventional shale applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179, 742-749.
38. Aramendiz, J., Imqam, A. H., & Fakher, S. M. (2019). Design and evaluation of a water-based drilling fluid formulation using SiO and graphene oxide nanoparticles for unconventional shales. In *International petroleum technology conference* (p. D031S062R003). IPTC.
39. Saffari, H. R. M., Soltani, R., Alaei, M., & Soleymani, M. (2018). Tribological properties of water-based drilling fluids with borate nanoparticles as lubricant additives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, 253-259.
40. Zhou, S. S., Song, J. J., Xu, P., He, M., Xu, M. B., & You, F. C. (2023). A review on tribology, characterization and lubricants for water-based drilling fluids. *Geoenergy Science and Engineering*, 229, 212074.
41. Hajiabadi, S. H., Aghaei, H., Kalateh-Aghamohammadi, M., Sanati, A., Kazemi-Beydokhti, A., & Esmaeilzadeh, F. (2019). A comprehensive empirical, analytical and tomographic investigation on rheology and formation damage behavior of a novel nano-modified invert emulsion drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181, 106257.
42. Inturi, S. K., Dash, G. R., & Kodavaty, J. (2019). Role of silica Nano particles in altering rheological properties of drilling fluid in Enhanced Oil Recovery. *Materials Today: Proceedings*, 17, 354-361.
43. Nascimento, D. R., Oliveira, B. R., Saide, V. G. P., Magalhães, S. C., Scheid, C. M., & Calçada, L. A. (2019). Effects of particle-size distribution and solid additives in the apparent viscosity of drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 182, 106275.
44. Al-Shargabi, M., Davoodi, S., Wood, D. A., Al-Musai, A., Rukavishnikov, V. S., & Minaev, K. M. (2022). Nanoparticle applications as beneficial oil and gas drilling fluid additives: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 352, 118725.
45. Suryam, L. V., Pradeep, A. V., Prasad, S. S., & Kumari, P. P. (2019). Functioning mechanism of nanomaterials and significance on machinability: A review. *Materials Today: Proceedings*, 19, 560-563.
46. Martin, C., Babaie, M., Nourian, A., & Nasr, G. G. (2023). Designing Smart drilling fluids using modified nano silica to improve drilling operations in geothermal wells. *Geothermics*, 107, 102600.
47. Boyou, N. V., Ismail, I., Sulaiman, W. R. W., Haddad, A. S., Husein, N., Hui, H. T., & Nadaraja, K. (2019). Experimental investigation of hole cleaning in directional drilling by using nano-enhanced water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176, 220-231.
48. Minakov, A. V., Mikhienkova, E. I., Voronenkova, Y. O., Neverov, A. L., Zeer, G. M., & Zharkov, S. M. (2019). Systematic experimental investigation of filtration losses of drilling fluids containing silicon oxide nanoparticles. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 71, 102984.
49. Hajiabadi, S. H., Bedrikovetsky, P., Mahani, H., Khoshshima, A., Aghaei, H., Kalateh-Aghamohammadi, M., & Habibi, S. (2020). Effects of surface modified nanosilica on drilling fluid and formation damage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 194, 107559.

50. Wang, K., Jiang, G., Li, X., & Luckham, P. F. (2020). Study of graphene oxide to stabilize shale in water-based drilling fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 606, 125457.
51. Kamali, F., Saboori, R., & Sabbaghi, S. (2021). Fe₃O₄-CMC nanocomposite performance evaluation as rheology modifier and fluid loss control characteristic additives in water-based drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108912.
52. Dutta, D., & Das, B. M. (2021). Development of smart bentonite drilling fluid introducing iron oxide nanoparticles compatible to the reservoirs of Upper Assam. *Upstream Oil and Gas Technology*, 7, 100058.
53. Mirzaasadi, M., Zarei, V., Elveny, M., Alizadeh, S. M., Alizadeh, V., & Khan, A. (2021). Improving the rheological properties and thermal stability of water-based drilling fluid using biogenic silica nanoparticles. *Energy Reports*, 7, 6162-6171.
54. Moraveji, M. K., Ghaffarkhah, A., Agin, F., Talebkeikhah, M., Jahanshahi, A., Kalantar, A., & Arjmand, M. (2020). Application of amorphous silica nanoparticles in improving the rheological properties, filtration and shale stability of glycol-based drilling fluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 115, 104625.
55. Beg, M., Kumar, P., Choudhary, P., & Sharma, S. (2020). Effect of high temperature ageing on TiO₂ nanoparticles enhanced drilling fluids: A rheological and filtration study. *Upstream Oil and Gas Technology*, 5, 100019.
56. Shah, S. N., Shanker, N. H., & Ogugbue, C. C. (2010). Future challenges of drilling fluids and their rheological measurements. In *AADE fluids conference and exhibition, Houston, Texas* (pp. 5-7).
57. Nabhani, N., & Emami, M. (2012). The potential impact of nanomaterials in oil drilling industry. *Nano con*, 201, 23-25.
58. Nasser, J., Jesil, A., Mohiuddin, T., Al Ruqeshi, M., Devi, G., & Mohataram, S. (2013). Experimental investigation of drilling fluid performance as nanoparticles. *World Journal of Nano Science and Engineering*, 2013.
59. Abdo, J., & Haneef, M. D. (2013). Clay nanoparticles modified drilling fluids for drilling of deep hydrocarbon wells. *Applied Clay Science*, 86, 76-82.
60. Al-Yasiri, M. S., & Al-Sallami, W. T. (2015). How the drilling fluids can be made more efficient by using nanomaterials. *American Journal of Nano research and applications*, 3(3), 41-45.