

به کارگیری نانورس و نانوگرافن به منظور بهبود گرانروی موثر سیالات حفاری پایه نفتی در دماهای مختلف

وحید نوری پور، کارشناسی ارشد مهندسی نفت دانشگاه صنعت نفت ■ عبدالنبی هاشمی^۱، دانشیار گروه مهندسی نفت دانشگاه صنعت نفت

چکیده

در دهه‌ی اخیر، نانوذرات به دلیل خصوصیات منحصر به فردی که دارند توجه محققین در زمینه‌ی سیال حفاری را به خود جلب کرده‌اند. هدف این مطالعه بررسی آزمایشگاهی اثر یک نانورس اصلاح سطحی شده و نانوگرافن بر گرانروی موثر سیالات حفاری پایه نفتی در دماهای مختلف است. به همین منظور، یک فرمولاسیون سیال حفاری پایه نفتی به عنوان سیال مینا ساخته شد. سپس، پنج غلظت وزنی از هر کدام از نانوذرات رس و گرافن به صورت جداگانه به سیال مینا افزوده شد. گرانروی موثر تمام سیالات در سه دمای ۹۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ درجه‌ی فارنهایت و در معرض شش نرخ برشی متفاوت اندازه‌گیری شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که نانورس در مقایسه با نانوگرافن در نرخ‌های برشی و دماهای مختلف، به منظور بهبود گرانروی موثر سیال حفاری مینا، قابلیت و پتانسیل بیشتری دارد. مدل آرنیوس دقت بالایی در بررسی وابستگی دمایی گرانروی سیالات حفاری مورد مطالعه دارد. لذا، با استناد بر مقادیر انرژی فعال‌سازی (activation energy) محاسبه شده به عنوان یکی از پارامترهای مدل آرنیوس، ترتیب پایداری دمایی گرانروی سیالات مورد مطالعه به صورت کلی بدین شرح است: سیال حفاری حاوی نانورس، سیال حفاری حاوی نانوگرافن و سیال حفاری مینا.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۱۱/۰۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۰۱/۱۷

واژگان کلیدی:

نانوتکنولوژی، گرانروی، سیال حفاری، مدل آرنیوس.

مقدمه

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. [۲] هدف این مطالعه بررسی اثر یک نانورس اصلاح سطحی شده^۱ و نانوگرافن^۲ بر گرانروی موثر^۳ یک سیال حفاری پایه نفتی است. برای این هدف، یک فرمولاسیون پایه (بدون نانو) به عنوان فرمولاسیون مینا ساخته شده است، سپس گرانروی آن در معرض سه دمای ۹۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ درجه‌ی فارنهایت و شش نرخ برشی متفاوت اندازه‌گیری شده و اثر متقابل دما و نرخ برشی بر گرانروی سیال حفاری پایه مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، پنج درصد وزنی متفاوت از هر کدام از دو نانوذره‌ی مذکور (۲۵، ۰، ۰، ۵، ۱، ۰، ۵ و ۲ درصد) نیز جداگانه به سیال پایه افزوده شده است و اندازه‌گیری‌ها انجام شده است تا اثر متقابل دما، نرخ برشی^۴ و غلظت نانوذرات بر گرانروی سیال حفاری پایه نفتی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- روش کار

۱-۲- مواد مورد نیاز

موادی که به عنوان ترکیبات سازنده‌ی سیال حفاری مینا مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل امولسیفایرهای اولیه و ثانویه، آهک، عامل کنترل فیلتراسیون، کلسیم کلرید و ویسکوزیفایر تماما از شرکت شیمیایی

نقش سیال حفاری در صنعت حفاری به مثابه خون در بدن انسان است. [۱] تاکنون بخش قابل توجهی از منابع نفت و گاز متعارف به تولید رسیده‌اند و جهت دستیابی به منابع هیدروکربوری نامتعارف صنعت حفاری به ناچار به سمت حفر چاه‌های پیچیده‌تر پیش می‌رود. [۲] لذا، سیال حفاری نیز باید به گونه‌ای طراحی شود که در شرایط پیچیده از نظر فنی کارایی خود را حفظ کند. به هنگام حفاری چاه‌های با دمای بالا پایداری دمایی خصوصیات رئولوژیکی حائز اهمیت است. در کشور ما، ایران، در ناحیه‌ی مخزنی که دما بالاست (تقریباً تا ۱۸۰ درجه فارنهایت)، اغلب سیال حفاری پایه نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا تغییر فرمولاسیون سیال حفاری پایه نفتی با کمترین هزینه‌ی ممکن جهت بهبود پایداری خصوصیات رئولوژیکی آن (علی‌الخصوص گرانروی)، برای مهندسی حفاری از اهمیت بالایی برخوردار است. سطح مخصوص بیشتر نانوذرات یک ماده در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر از همان ماده موجب بهبود خصوصیات الکتریکی، مکانیکی، گرمایی، هیدرودینامیکی و شیمیایی آن می‌شود. [۳] بنابراین، در مطالعات پیشین نانوذرات به عنوان افزاینده‌ی موثر در بهبود خصوصیات رئولوژیکی، گرمایی و فیلتراسیونی سیالات حفاری پایه آبی و نفتی

* نویسنده عهد‌دار مکاتبات (a.hashemi@put.ac.ir)

می‌شود. گرانروی موثر که در واقع گرانروی سیال حفاری در یک سرعت چرخشی معین است با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

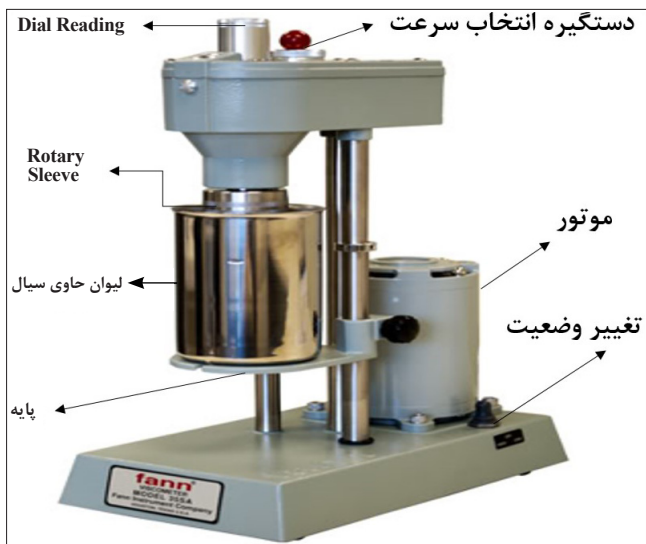
$$\mu_e = \frac{300 \times \text{Dial reading}}{\text{RPM}} \quad (1)$$

در این رابطه RPM^۲ سرعت چرخش Rotary Sleeve بر حسب دور بر دقیقه، μ_e ، گرانروی موثر بر حسب سانتی پویز یا میلی پاسکال در ثانیه و Dial Reading عدد قرائت شده از عقربه‌ی ویسکومتر به هنگام اعمال همان سرعت چرخش به Rotary Sleeve است. در طول این مطالعه مقصود از گرانروی، گرانروی موثر است.

۳- بحث

۱-۳- اثر غلظت نانوذرات بر گرانروی سیال حفاری پایه نفتی

جدول ۷-۲ به ترتیب حاوی گرانروی سیالات حفاری مورد آزمایش در سرعت چرخش‌های ۳، ۶، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه و در سه دمای متفاوت ۹۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ درجه‌ی فارنهایت است. اندازه‌گیری‌های به‌عمل آمده نشان می‌دهد که افزودن هر دو نانوذره موجب افزایش گرانروی سیال حفاری پایه نفتی می‌شود. دلیل بیشتر بودن گرانروی نانوسیالات در مقایسه با سیال حفاری پایه نفتی مبنا



شکل ۱ | ویسکومتر مورد استفاده

۱ | خصوصیات نانوذرات مورد استفاده

نانوگرافن	نانورس	سایز (نانومتر)
۲۰-۳۰	۵۰-۷۰	
۰.۳۵	۱.۷۷	دانسیته (gr/cc)
شبکه‌ای از ۶ ضلعی‌ها	ورقه‌ای	ساختار

نفت‌گستر در شهر اهواز تهیه شده است. همچنین نانورس اصلاح شده و نانوگرافن نیز از شرکت بین‌المللی پتروپلاستیک سهند در شهر تهران تهیه شده است. مشخصات نانوذرات در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- آماده‌سازی سیالات حفاری مورد آزمایش

به‌منظور تهیه کردن ۳۵۰ میلی‌لیتر سیال پایه‌ی همگن از همزن مکانیکی شرکت هامیلتون با سرعت چرخش ۸۵۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. ترتیب مخلوط کردن و مدت زمان هم زدن افزایش‌های مختلف به این شرح است:

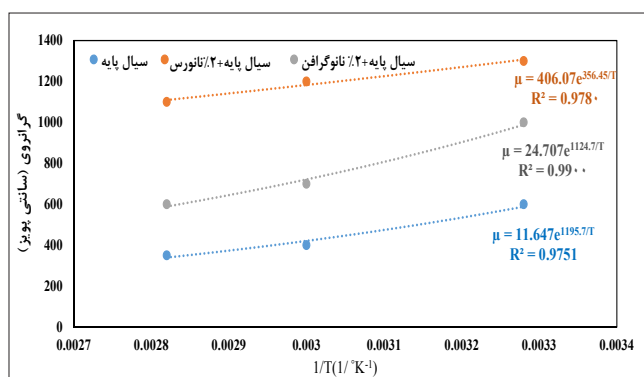
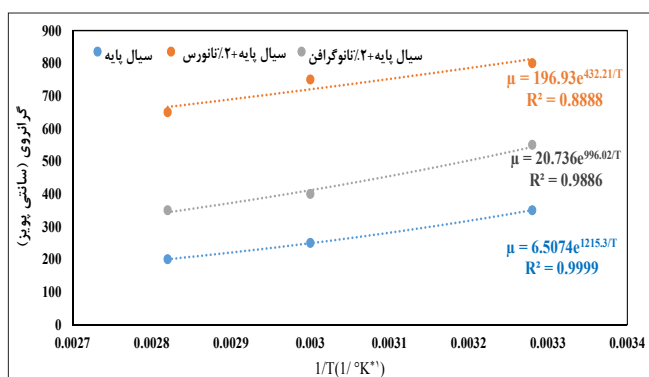
- افزودن ۱۳،۵ میلی‌لیتر امولسیفایر اولیه به ۲۴۰ میلی‌لیتر گازوئیل با دانسیته ۰،۸۵ گرم بر میلی‌لیتر و هم زدن به مدت ۱۰ دقیقه
 - افزودن ۱۳،۴ گرم آهک به‌عنوان عامل کنترل‌کننده‌ی قلیائیت و هم زدن به مدت ۱۰ دقیقه
 - افزودن ۱۱ گرم عامل کنترل‌کننده‌ی فیلتراسیون و هم زدن به مدت ۱۵ دقیقه
 - افزودن ۸۰ میلی‌لیتر محلول کلسیم کلرید در آب با دانسیته‌ی ۱،۳۱ گرم بر میلی‌لیتر و هم زدن به مدت ۲۰ دقیقه
 - افزودن ۴،۵ میلی‌لیتر امولسیفایر ثانویه و هم زدن به مدت ۱۵ دقیقه
 - افزودن ۲،۷۵ گرم ویسکوزیفایر و هم زدن به مدت ۱۵ دقیقه
- نهایتاً برای تهیه‌ی سیال حفاری نانو، غلظت‌های مختلف ۰،۲۵، ۰،۵، ۱، ۱،۵، ۲ درصد وزنی از هر کدام از نانوذرات به سیال پایه افزوده و به مدت ۱۵ دقیقه هم زده می‌شود. آن دسته از سیالاتی که باید در دماهای ۱۴۰ و ۱۸۰ درجه‌ی فارنهایت آزمایش می‌شدند، به مدت ۱۶ ساعت در آن چرخشی در دمای ۲۰۰ درجه‌ی فارنهایت در معرض گرما قرار گرفتند تا شرایط ناحیه مخزنی از نظر دمایی برای آنها شبیه‌سازی شود.

۳-۲- اندازه‌گیری گرانروی سیالات

تنش برشی سیالات ساخته شده با استفاده ویسکومتر دورانی^۵ شرکت Fan (شکل ۱) در شش نرخ برشی اندازه‌گیری شده است. سیالات ساخته شده در دمای مدنظر، در لیوان مخصوص به‌گونه‌ای ریخته می‌شوند تا سطح سیال تا خط نشانه‌ی Rotary Sleeve برسد. سپس با استفاده از دکمه‌ی تغییر وضعیت و دستگیره‌ی انتخاب سرعت تعبیه شده در ویسکومتر، شش سرعت چرخش ۳، ۶، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه‌ای جداگانه به Rotary Sleeve اعمال می‌شود تا سیال تحت برش قرار گیرد. در هر سرعت چرخش یک عدد ثابت از روی عقربه‌ی ویسکومتر قرائت می‌شود که به آن Dial Reading گفته

که خود حاوی دو زنجیر بلند کربنی می‌باشد. اتصال این زنجیره‌های کربنی به سطح بنتونایت به بنتونایت قابلیت برهم‌کنش با گاز ویل (تورم) و پخش شدن در فاز مایع را می‌دهد. این مساله باعث بیشتر بودن گرانیوی نانوسیالات حاوی نانورس در مقایسه با نانوسیالات حاوی نانوگرافن است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش که بیانگر نرخ برشی است، میزان گرانیوی کاهش می‌یابد، لذا سیالات مورد آزمایش همگی رفتار shear thinning از خود نشان می‌دهند که برای عملیات حفاری مطلوب است، چراکه در نرخ

به بیشتر بودن تعداد ذرات جامد در نانوسیالات بر می‌گردد، چراکه با افزایش تعداد ذرات جامد، تعداد برخورد های ذرات جامد با یکدیگر و همچنین برخورد آنها با ذرات مایع افزایش می‌یابد و به تبع آن اصطکاک مکانیکی موجود در سیال نیز افزایش یافته و گرانیوی بالا می‌رود. نتایج نشان می‌دهد که به صورت کلی اثر افزایشی نانورس بر گرانیوی در مقایسه با نانوگرافن بیشتر است. نانورس مورد استفاده در این مطالعه در واقع حاصل از جانشینی برخی از کاتیون‌های سطح بنتونایت مانند Na^+ و Ca^{2+} با یک کاتیون آمونیوم چهار تایی^۷ است



شکل ۳ | ترسیم مدل آرنیوس برای سیال پایه و نانوسیالات حاوی ۰.۲۵ درصد وزنی نانورس و نانوگرافن در سرعت چرخش ۶ دور بر دقیقه

شکل ۲ | ترسیم مدل آرنیوس برای سیال پایه و نانوسیالات حاوی ۰.۲۵ درصد وزنی نانورس و نانوگرافن در سرعت چرخش ۳ دور بر دقیقه

جدول ۳ | گرانیوی سیالات در سرعت چرخش ۶ دور بر دقیقه

	۹۰	۱۴۰	۱۸۰
سیال پایه	۳۵۰	۲۵۰	۲۰۰
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانورس	۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانورس	۴۵۰	۴۰۰	۳۰۰
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانورس	۷۰۰	۶۰۰	۵۵۰
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانورس	۷۰۰	۶۵۰	۶۰۰
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانورس	۸۰۰	۷۵۰	۶۵۰
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانوگرافن	۳۵۰	۳۰۰	۲۰۰
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانوگرافن	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰
سیال پایه+۱ درصد نانوگرافن	۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰
سیال پایه+۱.۵ درصد نانوگرافن	۵۰۰	۳۵۰	۳۰۰
سیال پایه+۲ درصد نانوگرافن	۵۵۰	۴۰۰	۳۵۰

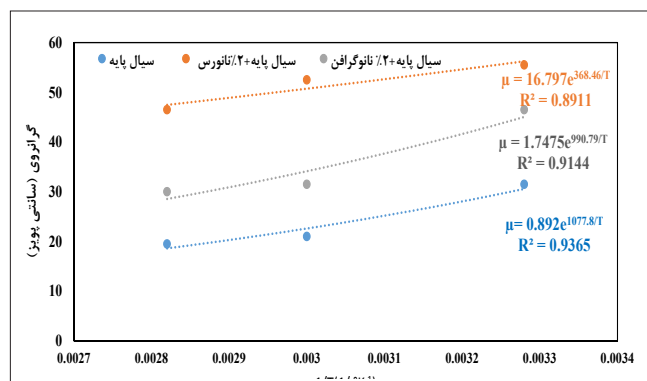
جدول ۲ | گرانیوی سیالات در سرعت چرخش ۳ دور بر دقیقه

	۹۰	۱۴۰	۱۸۰
سیال پایه	۶۰۰	۴۰۰	۳۵۰
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانورس	۷۰۰	۶۰۰	۵۰۰
سیال پایه+۰.۵ درصد نانورس	۸۰۰	۷۰۰	۶۰۰
سیال پایه+۱ درصد نانورس	۱۰۰۰	۹۰۰	۸۰۰
سیال پایه+۱.۵ درصد نانورس	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰
سیال پایه+۲ درصد نانورس	۱۳۰۰	۱۲۰۰	۱۱۰۰
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانوگرافن	۶۰۰	۵۰۰	۴۰۰
سیال پایه+۰.۵ درصد نانوگرافن	۷۰۰	۵۰۰	۴۰۰
سیال پایه+۱ درصد نانوگرافن	۷۰۰	۶۰۰	۵۰۰
سیال پایه+۱.۵ درصد نانوگرافن	۹۰۰	۶۰۰	۵۰۰
سیال پایه+۲ درصد نانوگرافن	۱۰۰۰	۷۰۰	۶۰۰

به ذرات ریزتر شده و همچنین ترتیب چینش آنها را به موازات با یکدیگر سوق می‌دهد، لذا نیروهای بین مولکولی و برهم کنش بین ذرات کمتر شده و آزادانه‌تر حرکت می‌کنند و نهایتاً گرانروی کاهش می‌یابد. [۶] برای بررسی دقیق‌تر اثر دما بر گرانروی سیالات مورد آزمایش از مدل آرنیوس ۸ (رابطه ۲) که برای سیالات تکمیل چاه و حفاری کاربرد دارد، استفاده می‌شود. [۷، ۸]

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

در این رابطه μ گرانروی بر حسب سانتی‌پویز، R ثابت عمومی گازها و

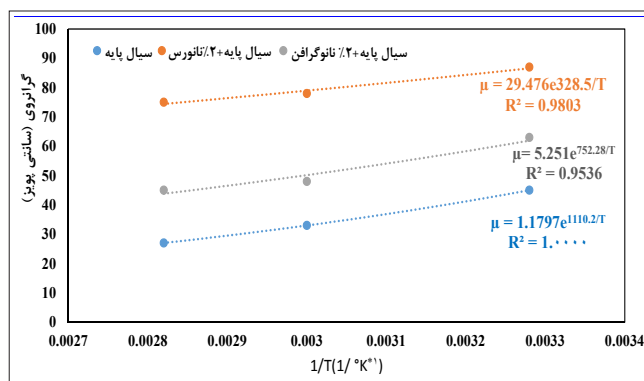


شکل ۴ | ترسیم مدل آرنیوس برای سیال پایه و نانوسیالات حاوی ۲ درصد وزنی نانوسیال و نانوتیتانوس در سرعت چرخش ۲۰۰ دور بر دقیقه

برش‌های کمتر که مانند فضای دالیزی می‌باشد، گرانروی بیشتری لازم است تا سیال توانایی تعلیق‌سازی خرده‌های حفاری را داشته باشد و همچنین در نرخ‌های برش بالاتر گرانروی کمتری نیاز است تا سیال بتواند از نازل‌های مته عبور کند. [۵]

۲-۲ بررسی اثر دما بر گرانروی

نتایج نشان می‌دهد که به صورت کلی با افزایش دما گرانروی سیالات مورد آزمایش کاهش می‌یابد. افزایش دما موجب تبدیل شدن ذرات



شکل ۵ | ترسیم مدل آرنیوس برای سیال پایه و نانوسیالات حاوی ۲ درصد وزنی نانوسیال و نانوتیتانوس در سرعت چرخش ۱۰۰ دور بر دقیقه

جدول ۵ | گرانروی سیالات در سرعت چرخش ۲۰۰ دور بر دقیقه

نوع سیال	۹۰	۱۴۰	۱۸۰
سیال پایه	۳۱.۵	۲۱	۱۹.۵
سیال پایه + ۰.۲۵ درصد نانوسیال	۳۴.۵	۲۵.۵	۲۴
سیال پایه + ۰.۵ درصد نانوسیال	۴۰.۵	۳۱.۵	۳۰
سیال پایه + ۱ درصد نانوسیال	۴۳.۵	۳۹	۳۷.۵
سیال پایه + ۱.۵ درصد نانوسیال	۴۹.۵	۴۶.۵	۴۰.۵
سیال پایه + ۲ درصد نانوسیال	۵۵.۵	۵۲.۵	۴۶.۵
سیال پایه + ۰.۲۵ درصد نانوتیتانوس	۳۳	۲۴	۲۱
سیال پایه + ۰.۵ درصد نانوتیتانوس	۳۱.۵	۲۴	۲۲.۵
سیال پایه + ۱ درصد نانوتیتانوس	۳۶	۲۷	۲۴
سیال پایه + ۱.۵ درصد نانوتیتانوس	۴۲	۳۰	۲۴
سیال پایه + ۲ درصد نانوتیتانوس	۴۶.۵	۳۱.۵	۳۰

جدول ۴ | گرانروی سیالات در سرعت چرخش ۱۰۰ دور بر دقیقه

نوع سیال	۹۰	۱۴۰	۱۸۰
سیال پایه	۴۵	۳۳	۲۷
سیال پایه + ۰.۲۵ درصد نانوسیال	۴۸	۳۶	۳۳
سیال پایه + ۰.۵ درصد نانوسیال	۵۷	۴۸	۴۵
سیال پایه + ۱ درصد نانوسیال	۶۶	۶۳	۶۰
سیال پایه + ۱.۵ درصد نانوسیال	۸۱	۷۸	۷۲
سیال پایه + ۲ درصد نانوسیال	۸۷	۷۸	۷۵
سیال پایه + ۰.۲۵ درصد نانوتیتانوس	۴۵	۳۳	۳۰
سیال پایه + ۰.۵ درصد نانوتیتانوس	۴۵	۳۹	۳۶
سیال پایه + ۱ درصد نانوتیتانوس	۵۱	۴۲	۳۶
سیال پایه + ۱.۵ درصد نانوتیتانوس	۶۰	۴۵	۳۶
سیال پایه + ۲ درصد نانوتیتانوس	۶۳	۴۸	۴۵

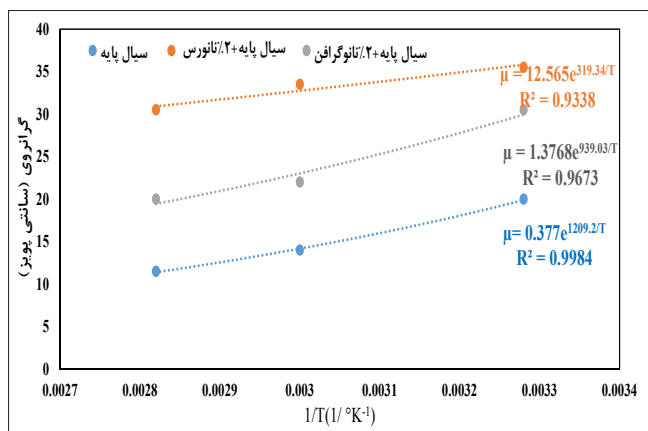
سیال حاوی ۲ درصد نانورس و سیال حاوی ۲ درصد نانوگرافن در سرعت‌های چرخش مختلف در شکل‌های ۲ تا ۷ نمایش داده شده است. محاسبه‌ی پارامترهای مدل آرنیوس برای سیال پایه در سرعت چرخش ۳ دور بر دقیقه به این روش است:

$$\mu_0 = 11.647 \text{ cp}$$

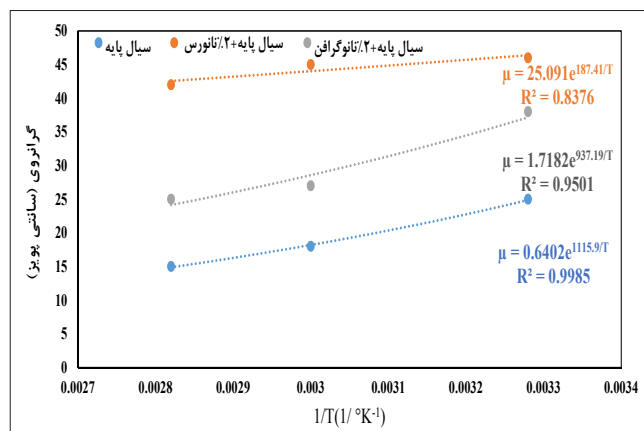
$$\frac{E_a}{R} = 1195.7 \rightarrow E_a = 1195.7 \times 8.314 \rightarrow E_a = 9941.05 \text{ Jol/mol}$$

برای سایر سیالات نیز به روش مشابه می‌توان عمل کرد.

برابر ۸,۳۱۴ ژول بر مول. کلین، T دمای سیال حفاری بر حسب کلین، E_a انرژی فعال‌سازی بر حسب ژول بر مول و μ ، عدد ثابت مدل آرنیوس بر حسب سانتی‌پویز است. انرژی فعال‌سازی بیشتر نشان‌دهنده‌ی وابستگی بیشتر گرانیوی سیال حفاری به دما است. [۹] با رسم دیتای گرانیوی بر حسب معکوس دما در مختصات کارتزین و مدل کردن دیتاها بر رابطه ۲، می‌توان پارامترهای مدل آرنیوس را محاسبه و تحلیل کرد. رسم مدل آرنیوس برای سیال مبنا،



شکل ۷ | ترسیم مدل آرنیوس برای سیال پایه و نانوسیالات حاوی ۰.۲۵ درصد وزنی نانورس و نانوگرافن در سرعت چرخش ۶۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۶ | ترسیم مدل آرنیوس برای سیال پایه و نانوسیالات حاوی ۰.۲۵ درصد وزنی نانورس و نانوگرافن در سرعت چرخش ۳۰۰ دور بر دقیقه

	۹۰	۱۴۰	۱۸۰
سیال پایه	۲۰	۱۴	۱۱.۵
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانورس	۲۲	۱۵.۵	۱۴.۵
سیال پایه+۰.۵ درصد نانورس	۲۶.۵	۱۹.۵	۱۸.۵
سیال پایه+۱ درصد نانورس	۲۹.۵	۲۳.۵	۲۲
سیال پایه+۱.۵ درصد نانورس	۳۱.۵	۲۸	۲۶.۵
سیال پایه+۲ درصد نانورس	۳۵.۵	۳۳.۵	۳۰.۵
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانوگرافن	۲۱	۱۵	۱۲.۵
سیال پایه+۰.۵ درصد نانوگرافن	۲۱.۵	۱۷	۱۳.۵
سیال پایه+۱ درصد نانوگرافن	۲۳.۵	۱۷.۵	۱۴.۵
سیال پایه+۱.۵ درصد نانوگرافن	۲۷	۱۹	۱۵
سیال پایه+۲ درصد نانوگرافن	۳۰.۵	۲۲	۲۰

	۹۰	۱۴۰	۱۸۰
سیال پایه	۲۵	۱۸	۱۵
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانورس	۲۸	۲۰	۱۹
سیال پایه+۰.۵ درصد نانورس	۳۴	۲۶	۲۴
سیال پایه+۱ درصد نانورس	۳۹	۳۱	۳۰
سیال پایه+۱.۵ درصد نانورس	۴۲	۳۸	۳۷
سیال پایه+۲ درصد نانورس	۴۶	۴۵	۴۲
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانوگرافن	۲۶	۱۹	۱۶
سیال پایه+۰.۵ درصد نانوگرافن	۲۶	۲۱	۱۸
سیال پایه+۱ درصد نانوگرافن	۲۹	۲۱	۱۹
سیال پایه+۱.۵ درصد نانوگرافن	۳۴	۲۳	۱۹
سیال پایه+۲ درصد نانوگرافن	۳۸	۲۷	۲۵

پارامترهای مدل آر نیوس برای سیالات در نرخ‌های برشی مختلف



پارامتر	پارامتر	سرعت چرخش Rotary Sleeve در لیوان حاوی سیال (دور بر دقیقه)					
		۳	۶	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۶۰۰
سیال پایه	μ_0	۱۱.۶۴۷	۶.۵۰۷۴	۱.۱۷۹۷	۰.۸۹۲	۰.۶۴۰۲	۰.۳۷۷
	E_a	۹۹۴۱.۰۵	۱۰۱۰۴	۹۲۳۰.۲	۸۹۶۰.۸۳	۹۲۷۷.۵۹	۱۰۰۵۳.۳
	R^2	۰.۹۷۵۱	۰.۹۹۹۹	۱.۰۰۰۰	۰.۹۳۶۵	۰.۹۹۸۵	
سیال پایه+۰.۲۵ درصد	μ_0	۶۷.۷۹۱	۵۴.۲۲۵	۳.۰۷۵۷	۲.۳۳۸۷	۱.۵۵۱۶	۰.۹۹۵۵
	E_a	۵۹۵۰.۷۵	۵۰۹۲.۳۳	۶۹۲۵.۸۹	۶۷۶۹.۰۱	۷۲۶۷.۴۳	۷۷۸۳.۵۷
	R^2	۰.۹۷۰۳	۰.۹۶۹۷	۰.۹۶۹۷	۰.۹۴۲۵	۰.۹۲۵۴	۰.۹۳۹۱
سیال پایه+۰.۵ درصد نانورس	μ_0	۱۰۸.۴۵	۲۹.۴۴۴	۱۰.۱۹۵	۴.۳۶۶۵	۲.۶۴۰۹	۱.۸۲۶۸
	E_a	۵۰۹۲.۳۳	۶۹۹۵.۶۵	۴۳۴۴.۵۶	۵۶۰۱.۰۶	۶۴۴۰.۳۶	
	R^2	۰.۹۷۲۶	۰.۸۷۴۴	۰.۹۸۲۸	۰.۹۴۰۴	۰.۹۶۸۸	۰.۹۳۲۶
سیال پایه+۱ درصد نانورس	μ_0	۲۱۱.۷۶	۱۲۴.۲۳	۳۳.۹۴۴	۱۴.۷۳۸	۵.۴۹۴۶	۳.۴۲۲۹
	E_a	۳۹۵۴.۴۷	۴۳۷۷.۷۴	۱۶۹۲.۹۸	۲۷۳۱.۱۵	۴۹۲۲.۱۴	۵۴۲۷.۸۸
	R^2	۰.۹۷۵۶	۰.۹۹۸۸	۰.۹۸۰۹	۰.۹۸۰۳	۰.۹۲۱۶	۰.۹۶۷۰
سیال پایه+۱.۵ درصد نانورس	μ_0	۱۵۲.۸۷	۲۳۹.۱۴	۳۶.۵۲	۱۲.۷۷	۱۶.۵۲۱	۹.۰۳۸۸
	E_a	۵۲۱۸.۱۲	۲۷۳۵.۲۲	۲۰۴۱.۲۵	۳۴۷۳.۱۷	۲۳۵۰.۰۴	۳۱۵۶.۴۱
	R^2	۰.۹۹۹۲	۰.۹۷۸۵	۰.۸۹۵۴	۰.۸۸۹۳	۰.۹۶۱۴	۰.۹۹۳۳
سیال پایه+۲ درصد نانورس	μ_0	۴۰۶.۰۷	۱۹۶.۹۳	۲۹.۴۷۶	۱۶.۷۹۷	۲۵.۰۹۱	۱۲.۵۶۵
	E_a	۲۹۶۳.۵۳	۳۵۹۳.۳۹	۲۷۳۱.۱۵	۳۰۶۳.۳۸	۱۵۵۸.۱۳	۲۶۵۴.۹۹
	R^2	۰.۹۷۸۰	۰.۸۸۸۸	۰.۹۸۰۳	۰.۸۹۱۱	۰.۸۳۷۶	۰.۹۳۳۸
سیال پایه+۰.۲۵ درصد نانوگرافن	μ_0	۳۶.۱۶	۸.۲۰۹۱	۲.۳۰۴۴	۱.۲۴۴۱	۱.۹۱۳۹	۰.۵۰۶۱
	E_a	۷۱۶۲.۰۱	۹۶۳۳.۴۳	۷۴۹۱.۷۵	۸۲۸۰.۹۱	۶۶۱۹.۷۷	۹۴۲۹.۷۴
	R_2	۰.۹۶۶۹	۰.۸۶۳۴	۰.۹۷۰۷	۰.۹۸۸۶	۰.۹۹۹۰	۰.۹۹۸۰
سیال پایه+۰.۵ درصد نانوگرافن	μ_0	۱۳۰.۱۵	۳۳.۸۹۶	۹.۰۸۱۹	۲.۶۲۵۵	۱.۹۱۳۹	۰.۸۲۸۲
	E_a	۱۰۱۰۴	۵۹۵۰.۷۵	۴۰۵۱.۸۳	۶۲۵۴.۴۶	۶۶۱۹.۷۷	۸۲۸۶.۰۶
	R^2	۰.۹۹۹۹	۰.۹۷۰۳	۰.۹۹۸۶	۰.۹۵۳۶	۰.۹۹۹۰	۰.۹۸۵۸
سیال پایه+۱ درصد نانوگرافن	μ_0	۶۷.۷۹۱	۵۴.۲۲۵	۴.۳۵۳۶	۱.۸۹۷	۱.۳۰۸۴	۰.۷۵۰۵
	E_a	۵۹۵۰.۷۵	۵۰۹۲.۳۳	۶۲۴۹.۲۲	۷۴۳۳.۷۱	۷۸۱۱.۲۵	۸۷۲۹.۷
	R^2	۰.۹۷۰۳	۰.۹۷۲۶	۹۹۶۶.	۰.۹۸۷۴	۰.۹۷۱۳	۱.۰۰۰۰
سیال پایه+۱.۵ درصد نانوگرافن	μ_0	۱۲.۸۱۳	۱۲.۳۵۳	۱.۶۱۸۶	۰.۷۸۰۹	۰.۵۱۱۹	۰.۴۱۱۸
	E_a	۱۰۷۴۶.۷	۹۳۵۰.۷۶	۹۱۷۲.۸۴	۱۰۱۰۴	۱۰۶۱۲	۱۰۶۰۷
	R^2	۰.۹۹۱۸	۰.۹۹۰۰	۰.۹۹۷۳	۰.۹۹۹۹	۰.۹۹۵۰	۰.۹۹۹۸
سیال پایه+۲ درصد نانوگرافن	μ_0	۲۴.۷۰۷	۲۰.۷۳۶	۵.۲۵۱	۱.۷۴۷۵	۱.۷۱۸۲	۱.۳۷۶۸
	E_a	۹۳۵۰.۷۶	۸۲۸۰.۹۱	۶۲۵۴.۴۶	۸۲۳۷.۴۶	۷۷۹۱.۸	۷۸۰۷.۱
	R^2	۰.۹۹۰۰	۰.۹۸۸۶	۰.۹۵۳۶	۰.۹۱۴۴	۰.۹۵۰۱	۰.۹۶۷۳

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

- ۱- افزودن نانوذرات رس اصلاح سطحی شده و نانوگرافن به سیال حفاری پایه نفتی موجب افزایش گرانشی آن می‌شود.
- ۲- به‌صورت کلی رابطه‌ی میان غلظت نانوذرات و گرانشی سیال حفاری پایه نفتی مستقیم است. هرچه غلظت نانوذرات بیشتر باشد، گرانشی نیز افزایش بیشتری به خود خواهد دید.
- ۳- افزایش نرخ برشی موجب کاهش گرانشی نانوسیالات می‌شود. لذا رفتار رئولوژیکی نانوسیالات مورد آزمایش به‌صورت shear thinning می‌باشد که رفتار مطلوب سیال حفاری به هنگام عملیات حفاری است.
- ۴- نانورس به‌دلیل برهم‌کنش بیشتر با فاز مایع موجود در سیال حفاری پایه نفتی در مقایسه با نانوگرافن، عامل بهتری برای افزایش گرانشی سیال حفاری پایه نفتی است.
- ۵- مدل آرنیوس دقت بالایی در بررسی وابستگی دمایی گرانشی سیالات مورد آزمایش دارد.
- ۶- به‌صورت کلی کمترین میزان انرژی فعال‌سازی به‌ترتیب به سیالات حاوی نانورس، نانوسیالات حاوی گرافن و سیال حفاری مینا اختصاص دارد. بنابراین، نانورس در کاهش وابستگی دمایی گرانشی سیال حفاری به دما به مراتب موثرتر از نانوگرافن است.
- ۷- نتایج نشان می‌دهد که نمی‌توان رابطه‌ی واحدی بین سرعت چرخش Rotary Sleeve (نرخ برشی) و انرژی فعال‌سازی سیالات مورد آزمایش یافت. ■

پارامترهای مدل آرنیوس برای تمامی ۱۱ نمونه سیال به‌صورت تابعی از نرخ برشی (سرعت چرخش) در جدول ۸ آورده شده است. همچنین دقت مدل مذکور با ضریب رگرسیون (R2) بیان شده است. همان‌گونه که مقادیر ضریب رگرسیون (نزدیک به ۱) نشان می‌دهد مدل آرنیوس به‌صورت کلی از دقت بالایی برای بررسی وابستگی دمایی گرانشی سیالات مورد آزمایش برخوردار است. لذا می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی گرانشی سیالات در دماهای بالاتر که ویسکومتر شرکت Fann کارآیی ندارد استفاده کرد. ضریب رگرسیون ۱,۰۰۰۰ سیال پایه در سرعت چرخش ۱۰۰ دور بر دقیقه بیانگر تبعیت کامل نتایج آزمایشگاهی در شرایط مذکور با مدل آرنیوس است. همچنین، کمترین دقت مدل آرنیوس در بررسی وابستگی دمایی گرانشی سیالات حفاری، مربوط به نانوسیال حاوی ۲ درصد وزنی نانورس در سرعت چرخش ۳۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. به‌صورت کلی افزودن هر دو نانوذره به سیال پایه موجب کاهش انرژی فعال‌سازی آن می‌شود، لذا گرانشی نانوسیالات در مقایسه با سیال حفاری پایه نفتی مینا وابستگی کمتری به دما دارد و پایداری دمایی بیشتری دارد. مقایسه‌ی انرژی فعال‌سازی نانوسیالات حاوی نانورس و نانوگرافن نیز نشان می‌دهد که نانورس در کاهش انرژی فعال‌سازی و کاهش وابستگی گرانشی سیال حفاری پایه نفتی به دما به مراتب موثرتر از نانوگرافن است. همچنین نتایج حاکی از آن است که نمی‌توان رابطه‌ی واحدی بین سرعت چرخش و انرژی فعال‌سازی برای هیچ‌کدام از سیالات تعیین کرد.

پانویس‌ها

1. Nano-clay
2. Nano-graphene
3. Effective viscosity
4. Shear rate
5. Rotational viscometer
6. Round Per Minute
7. Quaternary Ammonium cation
8. Arrhenius model
9. Activation energy

منابع

- [1]. X. Meng, Y. Zhang, F. Zhou, and P. K. Chu, "Effects of carbon ash on rheological properties of water-based drilling fluids," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 100, pp. 1-8, 2012.
- [2]. R. Rafati, S. R. Smith, A. S. Haddad, R. Novara, and H. Hamidi, "Effect of nanoparticles on the modifications of drilling fluids properties: a review of recent advances," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 161, pp. 61-76, 2018.
- [3]. L. Godson, B. Raja, D. M. Lal, and S. Wongwises, "Enhancement of heat transfer using nanofluids—an overview," *Renewable sustainable energy reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 629-641, 2010.
- [4]. Amoco-Production-Company, "Drilling fluids manual," 2010.
- [5]. S. Agarwal, P. Tran, Y. Soong, D. Martello, and R. K. Gupta, "Flow behavior of nanoparticle stabilized drilling fluids and effect of high temperature aging," in *AADE National Technical Conference and Exhibition*, 2011, pp. 1-6.
- [6]. M. Khalil, B. M. Jan, and A. A. A. Raman, "Rheological and statistical evaluation of nontraditional lightweight completion fluid and its dependence on temperature," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 77, no. 1, pp. 27-33, 2011.
- [7]. L. Bartlett, "Effect of temperature on the flow properties of drilling fluids," in *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, 1967: Society of Petroleum Engineers*.
- [8]. N. Alderman, A. Gavignet, D. Guillot, and G. Maitland, "High-temperature, high-pressure rheology of water-based muds," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1988: Society of Petroleum Engineers*.
- [9]. P. M. Falcone, S. Chillo, P. Giudici, and M. A. Del Nobile, "Measuring rheological properties for applications in quality assessment of traditional balsamic vinegar: description and preliminary evaluation of a model," *Journal of food engineering*, vol. 80, no. 1, pp. 234-240, 2007.