

سنتز و بررسی عملکرد برخی از نانوساختارهای کربنی و سیلیسی در بهبود ویژگی‌های روان‌سازی و فشار پذیری سیال‌های حفاری

مهشاد علانی*⁺، محمد سلیمانی، سعیده رعیت دوست، فاطمه کیان، علیمراد رشیدی

پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

چکیده: هدف از انجام این پژوهش، سنتز برخی از نانوساختارهای کربنی و سیلیسی با ریخت شناسی‌های گوناگون و استفاده از آن‌ها برای تهیه نانو افزایه روان‌سازی گل حفاری است. با ارزیابی ویژگی‌های روان‌سازی و فشار پذیری گل حفاری تهیه شده با هر یک از نانو افزایه‌های ساخته شده، تأثیر ساختار شیمیایی و ریخت شناسی مورد بررسی قرار گرفته و بهترین نانوساختار با ویژگی‌های بهینه انتخاب شد. به این منظور، گرافن اکسید به روش اصلاح شده هامر، نانولوله‌های کربنی چند دیواره به روش رسوب دهی شیمیایی فاز بخار، نانوذره سیلیکای کروی و نانوسیلیکا آئروژل به روش سل - ژل سنتز شدند. عامل دار نمودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره توسط نیتریک اسید انجام شد. برای تعیین ویژگی‌های نانوساختارهای مورد نظر از الگوی پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. نانو مواد با استفاده از سورفکتانت مناسب به روغن روان‌ساز و پس از آن به سیال حفاری پایه آبی افزوده شد و تأثیر افزایش نانو مواد مورد نظر بر کاهش اصطکاک و افزایش مقاومت پوسته سیال حفاری با استفاده از دستگاه اندازه گیر روان‌سازی/فشار پذیری بررسی شد. نتیجه‌های به دست آمده نشان دادند که ریخت شناسی و ساختار شیمیایی تأثیر زیادی بر ویژگی‌های تریبولوژی داشته و از بین نانوساختارهای مورد نظر، گرافن اکسید برترین ویژگی‌ها را در بهبود ویژگی‌های روان‌سازی و فشار پذیری سیال حفاری نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: سیال‌های حفاری؛ نانو افزودنی‌های روان‌ساز؛ نانولوله‌های کربنی؛ گرافن اکسید؛ نانوسیلیکای کروی؛ سیلیکا آئروژل.

KEYWORDS: Drilling fluids; Nano lubricating additives; Carbon nanotubes; Graphene oxide; Spherical silica; Silica aerogel.

مقدمه

روان‌سازها در صنایع بسیاری از جمله عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز کاربرد دارند. روان‌سازی و خنک کردن مته حفاری از جمله وظیفه‌های گل حفاری است [۱]. چاه‌های حفاری معمولاً به طور کامل عمود نیستند. رشته‌های حفاری انعطاف پذیر بوده و درون چاه به کناره‌های آن برخورد می‌کنند و مقاومت اصطکاکی ایجاد می‌شود که مستلزم گشتاور اضافی قابل دیدن خواهد بود.

تریبولوژی علم و تکنولوژی سطوحی است که نسبت به یکدیگر حرکت دارند و شامل پژوهش‌های علمی در زمینه‌های سایش، اصطکاک و روان‌سازی می‌شود [۱]. در حالت کلی به لایه‌های گاز، مایع و یا جامد که میان دو سطح قرار می‌گیرند و یکنواختی حرکت یک سطح بر روی دیگری را بهبود می‌بخشند و از ایجاد آسیب بر روی سطوح جلوگیری می‌کنند، روان‌ساز گفته می‌شود [۲].

*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: alaiem@ripi.ir

حفاری به منظور کنترل و کاهش اصطکاک و بهبود روان‌سازی انجام گرفته است. تعداد زیادی از این پژوهش‌ها بر کاهش مؤثر اصطکاک و افزایش مقاومت پوسته اتفاق نظر دارند. به طور کلی می‌توان دلایل بهبود روان‌سازی را به صورت زیر بیان کرد.

۱: ایجاد عامل‌های روان‌سازی با ابعاد نانو در منطقه تماس

به منظور کاهش اصطکاک

۲: ایجاد تمایل بسیار زیاد برای جذب در سطح

۳: واکنش با سطح و ایجاد تریبو فیلم به منظور تحمل بار و

دمای بالا

۴: اقتصادی بودن تولید و سازگاری با محیط زیست با کاهش

یا حذف مواد سمی [۹]

در این پژوهش به دلیل ویژگی‌های ساختاری چشمگیر نانولوله‌های کربنی [۱۰]، گرافن اکسید [۱۱] و نانوساختارهای سیلیکا [۱۲، ۱۳] به عنوان افزایش‌دهنده‌های روان‌سازی، نانوساختارهای یاد شده انتخاب و تهیه شدند. به منظور مقایسه ویژگی‌های تریبولوژی نانوساختارها به عنوان افزودنی به سیال حفاری پایه آبی، گرافن اکسید به روش اصلاح شده هامر، نانولوله‌های کربنی چند دیواره به روش رسوب دهی شیمیایی فاز بخار، نانوذره سیلیکا و نانوسیلیکای آتروژل به روش سل - ژل تهیه شدند. نانولوله‌های کربنی چند دیواره توسط نیتریک اسید عامل‌دار شدند. در ادامه پس از افزودن نانومواد مذکور به روغن روان‌ساز با استفاده از سورفکتانت مناسب و پس از آن به سیال حفاری، تأثیر افزایش نانومواد مورد نظر بر کاهش اصطکاک و افزایش مقاومت پوسته سیال حفاری با استفاده از دستگاه اندازه‌گیر روان‌سازی/فشارپذیری^(۱) بررسی شد. با استفاده از آزمایش روان‌سازی^(۲) می‌توان اصطکاک میان رشته حفاری با لوله و همچنین گشتاور^(۳) وارد شده و با استفاده از آزمایش فشارپذیری^(۴) می‌توان مقاومت پوسته ایجاد شده بین سطوح را محاسبه کرد. هدف از انجام این پژوهش، سنتز و مقایسه عملکرد نانوساختارهایی است که هم از نظر ریخت شناسی و هم از نظر ساختار شیمیایی با هم متفاوت هستند و در نتیجه بررسی چگونگی تأثیر ساختار شیمیایی و ریخت شناسی بر تهیه نانوافزایه روان‌ساز گل حفاری انجام گرفته است تا بتوان نانوساختارهای برتر با ویژگی‌های بهینه را تعیین نمود و برای تولید نانوافزایه‌های روان‌ساز سیال حفاری در مناطق نفت خیز به صورت عملیاتی استفاده کرد.

ممکن است مقاومت اصطکاک در بالا و پایین بردن لوله‌های حفاری نیز به وجود آید. می‌توان با قرار دادن لایه ای از روان‌سازهای حفاری بین قطعه‌های متحرک، اصطکاک را کاهش داد. روان‌سازهای حفاری افزودنی‌های سیال یا گل حفاری هستند که سبب روان‌سازی مته حفاری می‌شوند. استفاده از این مواد، باعث جدا شدن سطوح متحرک و سرانجام کاهش نیروی اصطکاک می‌شود. استفاده از نانومواد در روان‌سازهای حفاری موجب بهبود چشمگیر عملکرد آن‌ها خواهد شد. در نتیجه با کاهش ضریب اصطکاک می‌توان عمر مته و رشته‌های حفاری را افزایش و همچنین فشار وارده به پمپ و لزج شدن مته را به کم‌ترین مقدار رساند. قدرت روان‌سازی سیال‌های حفاری، به نوع، کیفیت ذره‌های جامد، وزن و ترکیب شیمیایی سامانه بستگی دارد [۴]. به دلیل مسئله‌های زیست‌محیطی برآمده از گل حفاری پایه روغنی، استفاده از گل‌های پایه آبی برتری دارد اما گل‌های پایه آبی برخلاف گل‌های پایه روغنی، به صورت ذاتی از خاصیت روان‌سازی مناسبی برخوردار نیستند [۵]. بنابراین باید با استفاده از افزودنی‌های مناسب، ویژگی‌های روان‌سازی سیال حفاری پایه آبی را به ویژگی‌های روان‌سازی سیال حفاری پایه روغنی نزدیک کرد [۶]. به عبارت دیگر، هدف از افزایش نانوافزایه روان‌سازی به سیال حفاری پایه آبی، برطرف کردن نقطه ضعف آن نسبت به سیال حفاری پایه روغنی است زیرا ویژگی‌های روان‌سازی آن ضعیف تر است ولی از سوی دیگر، اثرهای بد زیست محیطی ناشی از استفاده سیال حفاری پایه روغنی را ندارد. در سامانه‌هایی که روان‌سازی ضعیف و اصطکاک زیاد باشد، کشش و گشتاورهای شدیدی ایجاد می‌شود که موجب ایجاد مشکل در عملیات حفاری می‌شود که این مسئله باعث افزایش چشمگیر هزینه‌ها است. بهبود کیفیت سیال حفاری از عامل‌های اساسی در کاهش این گونه مشکل‌ها است. به همین دلیل همواره سعی شده است که با روش‌های گوناگون مانند به‌کارگیری روان‌سازهای مناسب، پایداری مناسبی در شرایط عملکرد چاه از نظر میزان فشار، دما و... ایجاد کرد تا لایه محافظ مناسبی بین دو سطح ایجاد شده و اصطکاک کاهش یابد [۷]. پیامد مثبت استفاده از روان‌سازهای مناسب در سیال حفاری، تسریع در عملیات حفاری و جلوگیری از هزینه‌های اضافی برآمده از اصطکاک و فرسایش قطعه‌های حفاری است [۸]. پژوهش‌های زیادی در زمینه افزودن نانوذره‌ها به روان‌سازهای

(۱) EP/Lubricity tester

(۲) Lubricity

(۳) Torque

(۴) Extreme Pressure (EP)

بخش تجربی**مواد مصرفی**

هیدروکلریک اسید ۳۷٪، نیتریک اسید ۶۵٪، اتانول ۹۹/۹٪، گرافیت، سولفوریک اسید ۹۸٪، هیدروژن پر اکسید ۳۶٪، سدیم نیترات، پتاسیم پرمنگنات، تترا اتیل ارتو سیلیکات ۹۸٪، و آمونیاک ۲۵٪ از شرکت مرک و نانولوله‌های کربنی چند دیواره ساخته شده در پژوهشگاه صنعت نفت مورد استفاده قرار گرفته است.

دستگاه‌ها

برای تعیین ویژگی‌های نانوساختارهای مورد نظر از دستگاه الگوی پراش اشعه ایکس^(۱) مدل Philips, PW 1840, $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ به منظور تهیه تصویر از کاوند از میکروسکوپ الکترونی روبشی^(۲) مدل HITACHI S-4160 و میکروسکوپ الکترونی عبوری^(۳) مدل JEOL 1200-EX II، طیف بین فروسخ تبدیل فوریه Perkin Elmer Spectrum 400، همچنین از دستگاه فراصوت مدل Misonix برای تهیه نمونه‌ها و از دستگاه سانتریفوژ SIGMA 3-18k برای شستشو و جداسازی نانومواد استفاده شد. از دستگاه اندازه‌گیر روان‌سازی/فشارپذیری مدل ۲۱۲ شرکت Fann به منظور اندازه‌گیری ضریب اصطکاک و مقاومت پوسته سیال حفاری استفاده شد.

سنتز نانومواد

برای سنتز گرافن اکسید از روش اصلاح شده هامر استفاده شد [۱۱]. در این روش، پودر گرافیت به عنوان ماده اولیه تولید گرافن اکسید مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا ۲ گرم گرافیت و ۵۰ میلی‌لیتر سولفوریک اسید غلیظ در یک بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته و هم‌زده شد. سپس ۲ گرم سدیم نیترات به آن افزوده شد و پس از یک ساعت هم‌زدن در حمام آب - یخ، دمای آن به صفر درجه سلسیوس کاهش یافت. پس از آن ۷/۳ گرم پتاسیم پرمنگنات به تدریج و به مدت ۲ ساعت افزوده شد. پس از افزودن کامل پتاسیم پرمنگنات، دمای مخلوط واکنش تا ۳۵ درجه سلسیوس افزایش داده شده و سپس به مدت ۲ ساعت در این دما هم‌زده شد. ۴۶ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر به ظرف واکنش افزوده شد سپس مخلوط در دمای ۹۰ درجه سلسیوس و به مدت ۳۰ دقیقه هم‌خورد.

واکنش با افزودن ۱۴۰ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر و ۱۶ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۳۰٪، متوقف شد. سوسپانسیون به دست آمده در ۳۵ کیلوهرتز^(۴) و به مدت ۳۰ دقیقه اولتراسونیک شد. گرافن اکسید تولید شده با محلول هیدروکلریک اسید ۳٪ در آب، ۳-۴ بار شستشو داده شد و با کمک کیف بوخنر صاف شد. در مرحله بعد سوسپانسیون به دست آمده ۳-۴ بار با آب مقطر دو بار تقطیر شستشو داده شد. شایان ذکر است سوسپانسیون به دست آمده پس از هر بار شستشو، با روش جداسازی صاف شد. سرانجام ماده جامد قهوه‌ای رنگ به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت در آن خلأ با دمای ۴۰ درجه سلسیوس قرار گرفت و خشک شد. نانولوله‌های کربنی چند دیواره همانند آنچه در مقاله گذشته آورده شده است، به روش رسوب‌دهی شیمیایی فاز بخار در پژوهشگاه صنعت نفت تهیه شد [۱۰]. در این روش، واکنش در داخل راکتور افقی کوارتز در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس انجام می‌گیرد درحالی که مخلوط گازهای هیدروژن و متان از روی کاتالیست کبالت - مولیبدن/ منیزیم اکسید عبور می‌کند. به منظور عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی چند دیواره، مقدار ۱ گرم از نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ۶۰ میلی‌لیتر نیتریک اسید متفرق شده و به مدت ۳ ساعت در دمای جوش بازچرخانی شد [۱۴]. برای تهیه نانوذره سیلیکا، ۶۰ میلی‌لیتر اتانول به ۱۰ میلی‌لیتر تترا اتیل ارتو سیلیکات همراه با هم‌زدن شدید افزوده شد. پس از گذشت ۱۵ دقیقه، همراه با هم‌زدن ۲ میلی‌لیتر آب با سرعت ۰/۱ میلی‌لیتر بر دقیقه به محلول افزوده شده و در ادامه محلول دو ساعت درون دستگاه فراصوت حمامی با فرکانس پایین قرار گرفت. سپس ۴ میلی‌لیتر آمونیاک با سرعت ۰/۱ میلی‌لیتر بر دقیقه به محلول افزوده شده و نمونه به مدت سه ساعت داخل دستگاه فراصوت حمامی با فرکانس پایین قرار داده شد. محلول به دست آمده با آب مقطر و اتانول با استفاده از سانتریفوژ شستشو داده شد و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شد [۱۲]. سیلیکا آتروژل به روش سل - ژل با استفاده از محلول تجارتي سدیم سیلیکات (آب شیشه) تهیه شد. حدود ۷ میلی‌لیتر محلول تجارتي سدیم سیلیکات در آب دیونیزه حل شد و با استفاده از محلول هیدروکلریک اسید، pH محلول در محدوده ۴ تنظیم شد. پس از ۲۴ ساعت سکون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، ژل به دست آمده ابتدا با آب مقطر و سپس با مخلوط حلال‌های

(۱) XRD

(۲) SEM

(۳) TEM

(۴) kHz

فیلمی در ناحیه برخورد ایجاد می‌کند که موجب مقاومت در برابر سایش می‌شود. افزایش گشتاور تا جایی ادامه خواهد داشت که صدای سایش شدید به گوش برسد. گشتاور اعمالی یادداشت شده و با استفاده از کولیس، عرض خراش ایجاد شده بر روی کیوب به دست می‌آید. با استفاده از این مقادارها، مقاومت ایجاد شده توسط سیال حفاری محاسبه می‌شود.

در آزمایش روان‌سازی، سرعت چرخش شفت بر روی ۶۰ دور بر دقیقه و گشتاور اعمالی بر روی ۱۵۰ اینچ - پوند^(۵) تنظیم می‌شود. این حالت مطابق با شرایط چاه است. پس از گذشت ۵ دقیقه، گشتاور نشان داده شده بر روی دستگاه یادداشت شده و با استفاده از ضریب تأثیر، ضریب اصطکاک و درصد کاهش گشتاور به دست می‌آید. در صورتی که به جای استفاده از سیال حفاری از آب مقطر در این آزمایش استفاده شود، ضریب تأثیر به دست می‌آید. این کار به منظور کالیبره کردن دستگاه انجام می‌شود.

نتیجه‌ها و بحث

ویژگی‌های نانوساختارهای تهیه شده

الگوی پراش پرتو X مربوط به نانوساختارهای سنتز شده در شکل ۲ دیده می‌شود. شکل ۲ الف متعلق به نمونه گرافن اکسید سنتز شده در این پژوهش بوده و دارای یک پیک مشخصه در ناحیه $2\theta = 14^\circ$ است که معادل پیک مشخصه (001) است. این پیک مربوط به وجود گروه‌های عاملی اکسیژن دار مانند هیدروکسید، اپوکسی و کربوکسید است. همچنین محاسبه‌ها نشان می‌دهند که تعداد لایه‌های گرافن اکسید سنتز شده در این پژوهش، ۷ لایه است. شکل ۲ ب متعلق به نمونه نانولوله‌های کربنی چند دیواره سنتز شده در این پژوهش بوده و دارای دو پیک مشخصه در ناحیه‌های $2\theta = 26^\circ$ و $2\theta = 43^\circ$ است که به ترتیب معادل پیک مشخصه (002) و (100) است. شکل ۲ ج مربوط به نمونه سیلیکای نانوذره است که پهنای زیاد پیک آن و تمرکز در $2\theta = 24^\circ$ بیانگر بی‌شکل بودن آن است. شکل ۲ د نیز مربوط به نمونه نانوسیلیکای آئروژل است که همانند سیلیکای نانوذره، آمورف است.

برای محاسبه تعداد لایه‌های گرافن اکسید از داده‌های الگوی پراش اشعه ایکس استفاده شده است. در این خصوص

۲- پروپانول - نرمال هگزان - تری متیل کلرو سیلان شسته و سرانجام در درون آن خشک شد [۱۳].

روش تهیه سیال حفاری

به منظور مقایسه کارایی نانومواد، گل پایه آبی با استفاده از مقدار مشخصی بنتونیت و هم چنین نانوافزایه‌ها تهیه شد. با استفاده از همزن مکانیکی با دور موتور استاندارد، مقدار مشخصی از بنتونیت در ۳۵۰ میلی‌لیتر آب مخلوط می‌شود. پس از گذشت ۵ دقیقه ۳ گرم نانوافزایه روان‌سازی دارای سیال پایه روان‌ساز و نانوذره‌ها افزوده شد. در ضمن برای پایدارسازی از سه سورفکتانت تویین ۸۰^(۱)، اسپان ۸۰^(۲) و مخلوط آن‌ها در نسبت‌های گوناگون ۱، ۱/۵ و ۲ استفاده شد. پایدارترین حالت مربوط به مخلوط تویین ۸۰ و اسپان ۸۰ در نسبت ۱:۱ بوده است. درصد نانوذره موجود در سیال حفاری حدود ۰/۰۱٪ وزنی است. این به دلیل حجم کم اختصاص یافته به نانوافزایه در سیال حفاری است. با توجه به پژوهش‌های صورت پذیرفته در گذشته تا مقدار مشخصی افزایش نانوذره در روان‌ساز، ویژگی‌های تریبولوژیکی آن را بهبود می‌دهد [۲۲-۱۵]. این مقدار مشخص در تمامی نانوذره‌ها بیش‌تر از مقدار پایدار شده در این پژوهش است. بنابراین نانوساختارها به کمک مقدار مناسب سورفکتانت به سیال پایه روان‌ساز افزوده شده و با استفاده از دستگاه فراصوت پایدار شد. سپس به سیال حفاری اضافه و آزمایش‌های روان‌سازی و فشار پذیری در مورد آن انجام شد.

چگونگی انجام آزمایش روان‌سازی و فشار پذیری

دستگاه سنجش ویژگی‌های روان‌سازی و فشارپذیری سیال‌های حفاری (شکل ۱) از محفظه‌ای تشکیل شده است که سیال حفاری درون آن ریخته می‌شود. شفت چرخانی وجود دارد که یک رینگ^(۳) سطح خارجی انتهای آن را می‌پوشاند. با استفاده از بازویی که بر روی دستگاه وجود دارد، کیوب^(۴) به این رینگ چرخان نزدیک شده و گشتاور ایجاد می‌شود.

به منظور انجام آزمایش فشارپذیری، سرعت چرخش شفت بر روی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه تنظیم می‌شود. با نرخ مشخصی گشتاور اعمالی به رینگ و کیوب زیاد می‌شود. سیال حفاری

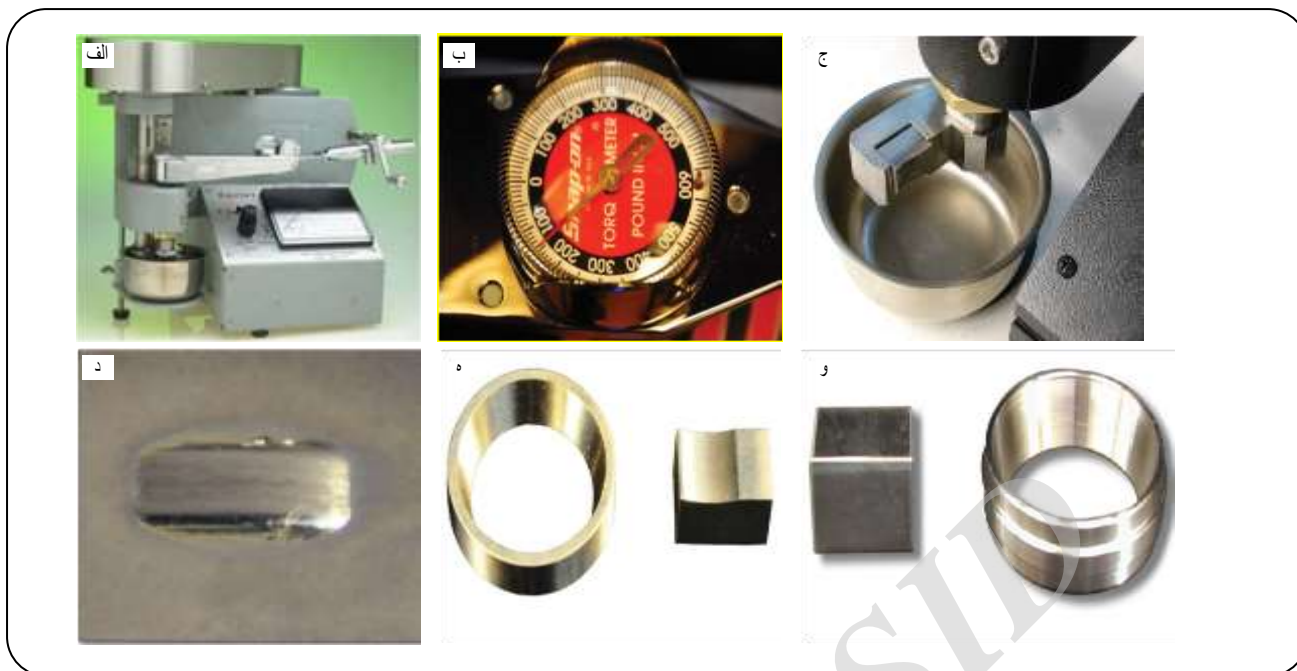
(۱) Tween80

(۲) Span80

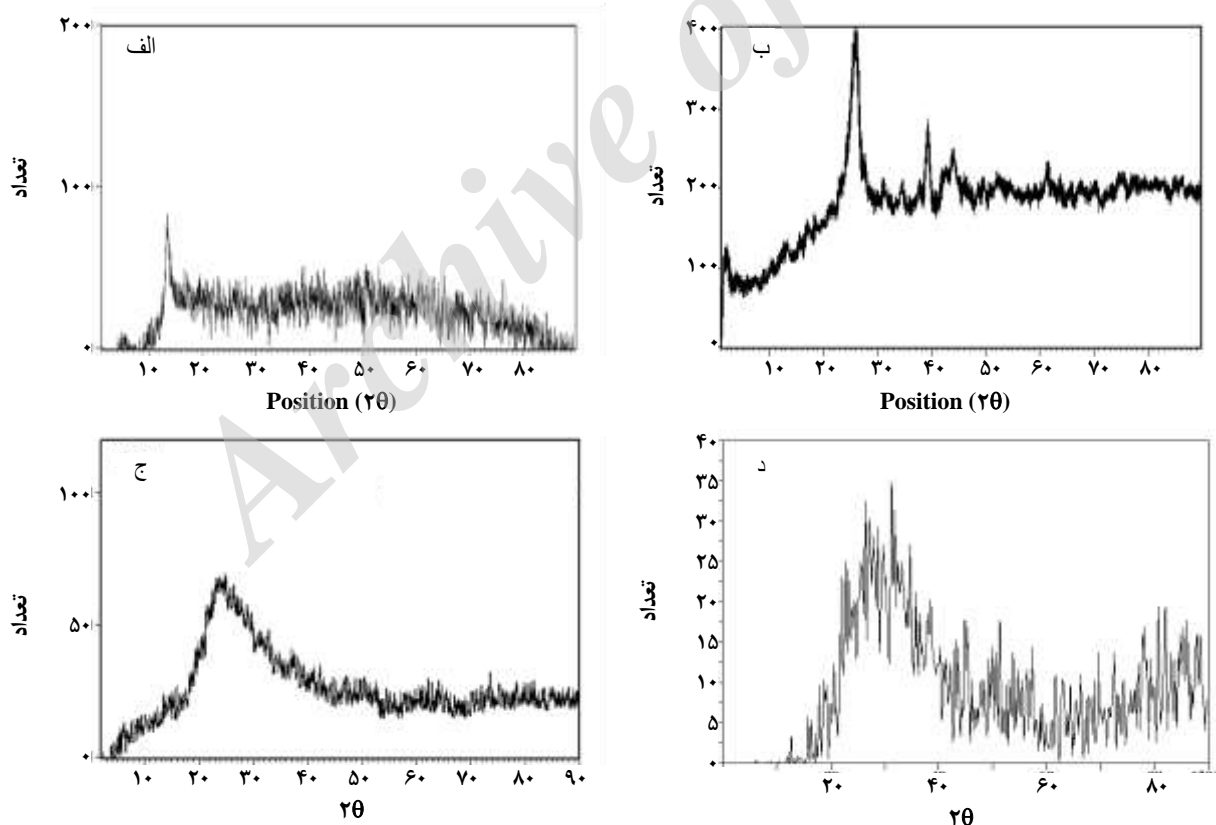
(۳) Ring

(۴) Cube

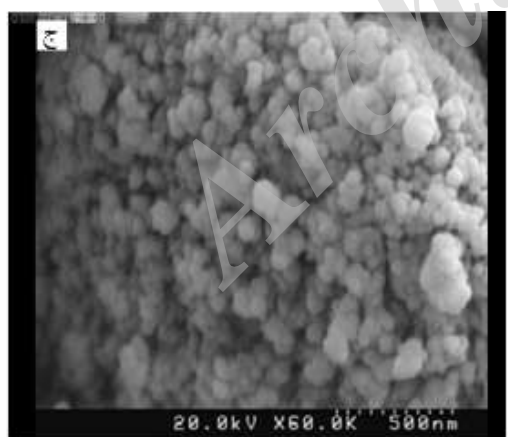
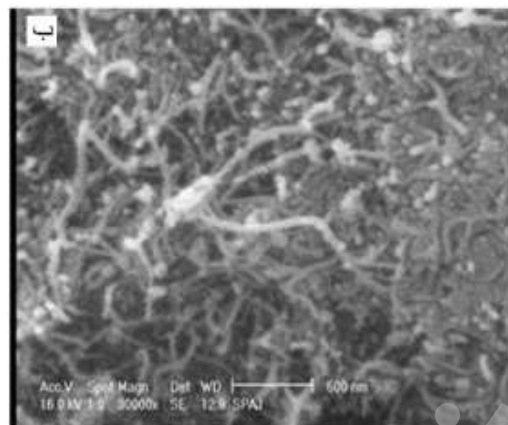
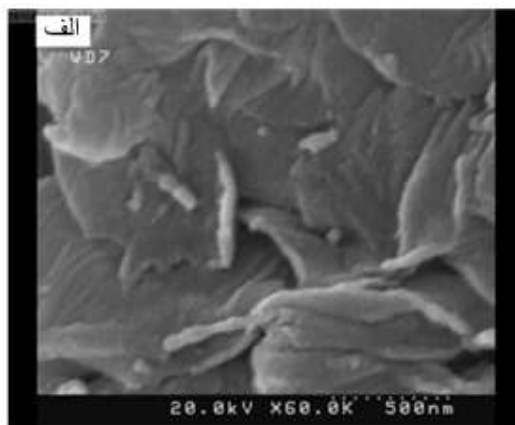
(۵) in-lb



شکل ۱- دستگاه اندازه گیر ویژگی های روان سازی/فشارپذیری: الف) نمای کلی دستگاه، ب) نمایش دهنده گشتاور، ج) محفظه نمونه، د) اثر سایش بر روی مکعب، ه) رینگ و کیوب مربوط به آزمایش روان سازی، و) رینگ و کیوب مربوط به آزمایش فشارپذیری.



شکل ۲- الگوی پراش پرتو X مربوط به نانوساختارهای سنتز شده: الف) گرافن اکسید، ب) نانولوله های کربنی چند دیواره، ج) سیلیکا نانوذره، د) سیلیکا آئروژل.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نانوساختارهای سنتز شده: الف) گرافن اکسید، ب) نانولوله‌های کربنی چند دیواره، ج) سیلیکای نانوذره.

از رابطه براگ و رابطه شرر استفاده می‌شود. رابطه براگ $n\lambda = 2d\sin\theta$ است. در این رابطه n تعداد لایه‌ها بوده و λ طول موج پرتو $\text{Cu K}\alpha$ و مقدار آن 1.5406 \AA است. رابطه شرر بر حسب نانومتر، $\tau = K\lambda/(\beta \cos\theta)$ است که در آن τ اندازه متوسط کریستالیت β در نظر گرفته می‌شود. β پهناي پیک مشخصه در نصف ارتفاع و θ زاویه پراش بر حسب درجه است. با تقسیم این دو رابطه به هم وارد نمودن داده‌ها با توجه به اطلاعات مربوط به الگوی پراش پرتو ایکس، تعداد لایه‌ها به دست می‌آید.

شکل ۳ تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوساختارهای تولید شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. شکل ۳.الف متعلق به نمونه گرافن اکسید است. همان‌گونه که دیده می‌شود، ساختار نمونه، لایه‌ای و ضخامت لایه در محدوده نانو است. شکل ۳.ب متعلق به نمونه نانو لوله‌های چند دیواره است. همان‌گونه که دیده می‌شود، ساختار نمونه، لوله‌ای و قطر آن در محدوده نانو است. شکل ۳.ج متعلق به نمونه نانوذره سیلیکا و میانگین اندازه ذره‌های آن در محدوده ۲۰ نانومتر است.

در راستای تکمیل آنالیزهای انجام شده از میکروسکوپ الکترونی عبوری و طیف بینی فرسرخ تبدیل فوریه استفاده شده است. به منظور دیدن دقیق ریخت شناسی لایه‌های گرافن اکسید و ساختار لوله‌ای نانو لوله‌های کربنی چند دیواره از میکروسکوپ الکترونی عبوری و همچنین به منظور تعیین ساختار نانوسیلیکا آتروژل از طیف بین فرسرخ تبدیل فوریه استفاده شده است. نتیجه‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است. شکل ۴.الف نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری گرافن اکسید است و ساختار لایه‌ای به روشنی قابل دیدن است. شکل ۴.ب نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانو لوله‌های کربنی چند دیواره به قطر حدودی ۲۰-۱۰ نانومتر و طول متوسط ۱۰ میکرومتر است. شکل ۴.ج نشان‌دهنده طیف بین فرسرخ تبدیل فوریه نانوسیلیکا آتروژل است. با توجه به طیف FT-IR نمونه، پیک‌های علامت زده شده مشخص کننده تشکیل ساختارسیلیس می‌باشند و با نتیجه‌های پژوهش‌های پیشین نیز همخوانی دارند.

نتیجه‌های آزمایش روان‌سازی و فشارپذیری

کلیه فرمول‌های مورد استفاده در این بخش، در کاتالوگ دستگاه سنجش ویژگی‌های روان‌سازی و فشارپذیری سیال‌های حفاری ارایه شده‌اند.

در آزمایش روان سازی نتیجه به دست آمده از کالیبراسیون قرائت شده و ضریب تصحیح به صورت زیر (معادله ۱) محاسبه می شود:

$$(1) \quad \text{میانگین قرائت شده} / 34 = (CF) \text{ ضریب تصحیح}$$

ضریب تصحیح به دلیل اطمینان از سالم بودن کیوب دستگاه تعریف شده است و مقدار کمتر از ۰/۶ آن گواه از سایش کیوب بر اثر انجام آزمایش است. در این صورت باید از کیوب جدید استفاده نمود و آزمایش کالیبراسیون را تکرار نمود. به منظور محاسبه کاهش گشتاور ایجاد شده ناشی از افزودن نانوذره از معادله ۲) استفاده می شود.

$$(2) \quad 100 \times (1 - BL/AL) = \text{درصد کاهش گشتاور}$$

گشتاور خوانده شده برای سیال حفاری حاوی افزایه BL =

گشتاور خوانده شده برای سیال حفاری بدون افزایه AL =

نمونه پایه از بنتونیت، آب و سیال پایه روان ساز تشکیل شده و سایر نمونه ها از افزودن نانو مواد سنتز شده به نمونه پایه به دست آمده است.

در صورت استفاده از گل اولیه (مخلوط بنتونیت و آب به تنهایی)، گشتاور قرائت شده ۵۲ است. بنابراین درصد کاهش گشتاور در مقایسه با گل اولیه به صورت معادله ۳) بیان می شود:

$$(3) \quad 100 \times (1 - BL/52) = \text{درصد کاهش گشتاور}$$

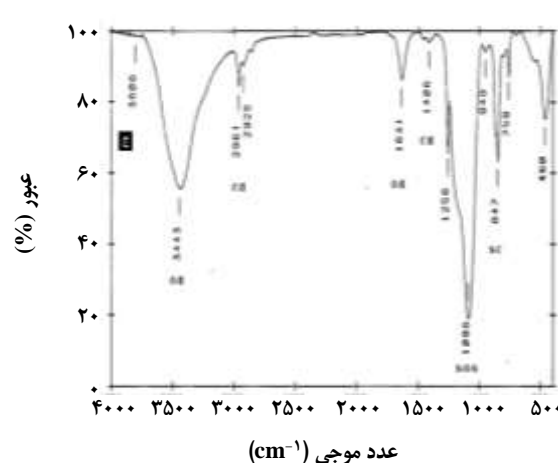
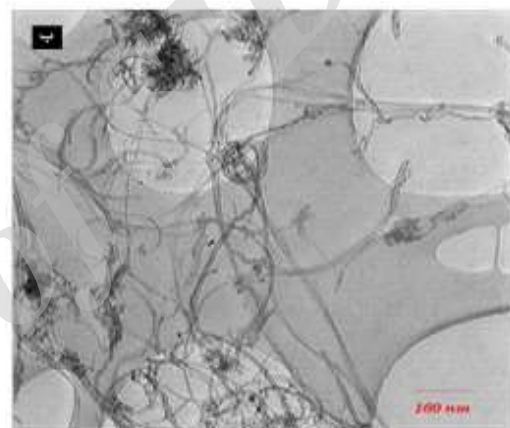
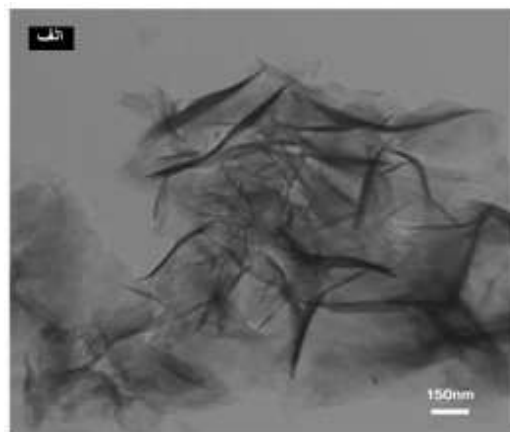
با توجه به این که گشتاور قرائت شده در صورت استفاده از نمونه پایه، ۱۸ است، درصد کاهش گشتاور در مقایسه با نمونه پایه به صورت معادله ۴) بیان می شود:

$$(4) \quad 100 \times (1 - BL/18) = \text{درصد کاهش گشتاور}$$

ضریب اصطکاک با استفاده از معادله ۵) محاسبه می شود:

$$(5) \quad BL \times CF / 100 = \text{ضریب اصطکاک}$$

همان گونه که در جدول ۱ دیده می شود، افزودن روغن روان ساز و تمامی نانومواد گشتاور را کاهش داده و ضریب اصطکاک نسبت به نمونه پایه کاهش یافته است. نتیجه های به دست آمده از نانوساختارهای سیلیسی و کربنی نشان می دهند که تفاوت ساختار شیمیایی و مورفولوژی موجب تفاوت قابل دیدنی در عملکرد نانومواد مورد نظر شده است.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مربوط به الف) گرافن اکسید ب) نانولوله های کربنی چند دیواره ج) طیف بین مادون قرمز تبدیل فوریه مربوط به سیلیکا آنروزل.

جدول ۱- نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش روان سازی.

نمونه	ضریب تصحیح	ضریب اصطکاک	گشتاور قرائت شده	درصد کاهش گشتاور نسبت به گل اولیه	درصد کاهش گشتاور نسبت به نمونه پایه
پایه	۰٫۷۳۹۱	۰٫۱۳۳۰	۱۸	۶۵٫۳۸	-
گرافن اکسید	۰٫۷۶۰۸	۰٫۰۶۵	۸٫۵	۸۳٫۶	۵۲٫۸
نانولوله کربنی چند دیواره	۰٫۷۳۹۱	۰٫۰۷۳۹	۱۰	۸۰٫۷	۴۴٫۴
سیلیکا نانوذره	۰٫۷۸۲۶	۰٫۰۹۳۹	۱۲	۷۶٫۸	۳۳٫۳
سیلیکا آئروژل	۰٫۷۶۰۸	۰٫۱۱۰۳	۱۴٫۵	۷۲٫۱۱	۱۹٫۴

(۶) $\text{سطح/نیرو} = \text{مقاومت پوسته}$

که در آن واحد مقاومت پوسته psi، واحد نیرو lb و واحد سطح in^2 است.

از آنجا که بازوی دستگاه ۱٫۵ اینچ و طول مؤثر در سایش ۰٫۱۲۵ اینچ است، می‌توان فرمول را به صورت زیر (معادله ۷) ساده کرد، که در آن T گشتاور قرائت شده از روی دستگاه به واحد اینچ - پوند و W عرض شیار به واحد صدم اینچ است.

$$P = \frac{T/1.5}{W \times 0.1 \times 0.125} = \frac{533T}{w} \quad (7)$$

با توجه به این که در صورت استفاده از گل اولیه مقاومت پوسته ۳۸۸ psi محاسبه شده است، می‌توان با استفاده از معادله ۸) ضریب افزایش مقاومت پوسته را محاسبه کرد:

$$\text{مقاومت پوسته نمونه مرجع} = \frac{\text{مقاومت پوسته به هنگام استفاده از افزایشها}}{\text{افزایش مقاومت پوسته}} \quad (8)$$

همان‌گونه که در جدول ۲ دیده می‌شود، استفاده از روغن روان‌ساز موجب افزایش چشمگیری در مقاومت پوسته شده است، همچنین تمامی نانوساختارها نیز موجب افزایش در مقاومت پوسته شده‌اند. نتیجه‌های به دست آمده از نانوساختارهای سیلیکا نشان داده‌اند که سیلیکا آئروژل خاصیت فشارپذیری زیادی ندارد، ولی سیلیکا نانوذره به میزان زیادی خاصیت فشارپذیری نانوافزایه را تقویت کرده است. چشمگیر است که در نانوساختارهای پایه کربنی دوباره گرافن اکسید عملکرد بهتری در مقایسه با نانولوله کربنی چند دیواره نشان داده است.

در این پژوهش، نانوذره‌های سیلیکای کروی سنتز شده‌اند که بدون فاصله و به صورت متراکم در کنار هم قرار گرفته‌اند. همچنین از سیلیکا آئروژل که ساختار بسیار متخلخل داشته و ۹۶٪ آن از هوا پر شده است، استفاده شده است. با تهیه نانوافزایه با هر دو ساختار سیلیکای سنتز شده و افزودن آن به گل حفاری، مشخص شد که ویژگی‌های نانوذره‌های سیلیکای کروی بهتر از سیلیکا آئروژل است. بنابراین ریخت شناسی و میزان تخلخل عامل تعیین کننده است و ساختار متراکم از نانوذره‌های سیلیکای کروی لایه روان‌ساز مناسب تری ایجاد می‌کند. در مورد ساختارهای کربنی مورد استفاده در این پژوهش یعنی گرافن اکسید و نانولوله‌های کربنی چند دیواره، به علت اینکه گرافن اکسید ساختار لایه‌ای دارد بهتر از نانولوله‌های کربنی که ساختار لوله‌ای دارند می‌تواند روی سطح قرار گیرد و لایه روان‌ساز مناسب را ایجاد نماید. بنابراین ریخت شناسی نقش اساسی دارد.

از لحاظ ساختار شیمیایی، به طور کلی خاصیت روان‌سازی و ایجاد لایه مناسب بین سطوح در مورد ساختارهای کربنی بهتر از ساختارهای سیلیسی است زیرا گرافن اکسید و نانولوله‌های کربنی چند دیواره تنها از اتم‌های یکسان کربن با هیبریداسیون‌های رزونانسی sp² و sp³ تشکیل شده‌اند و این ساختار رزونانسی به آسان کردن حرکت الکترون در کل ساختار و ایجاد لایه مناسب روان‌ساز کمک می‌کند درحالی که در ساختارهای سیلیسی، دو اتم متفاوت اکسیژن و سیلیس از دو گروه گوناگون جدول تناوبی عناصر که در تناوب‌های متفاوت قرار گرفته‌اند روبه‌رو هستیم که ساختار پلیمری داشته و همگونی ساختار ندارد و در نتیجه رزونانس الکترون به شکل موجود در ساختارهای کربنی دیده نمی‌شود.

در آزمایش فشارپذیری مقاومت پوسته با استفاده از معادله ۶) محاسبه می‌شود.

جدول ۲- نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش فشارپذیری.

نمونه	گشتاور	عرض شیار صدم اینچ	مقاومت پوسته	ضریب افزایش مقاومت پوسته نسبت به گل اولیه	ضریب افزایش مقاومت پوسته نسبت به نمونه پایه
پایه	۴۰۴	۳۵٫۰۱	۶۱۵۰	۱٫۵۸	-
گرافن اکسید	۴۲۲	۲۹٫۷۴	۷۵۶۳	۱٫۹۵	۱٫۲۳
نانولوله کربنی چند دیواره	۴۲۱	۲۹٫۸۳	۷۵۲۰	۱٫۹۴	۱٫۲۲۳
سیلیکا نانوذره	۴۰۶	۳۳٫۰۶	۶۵۴۵	۱٫۶۹	۱٫۰۶۴
سیلیکا آئروژل	۴۱۴	۳۵٫۷۵	۶۱۷۲	۱٫۵۹	۱٫۰۰۳

نتیجه‌گیری

انتخاب شد. نتیجه‌های به دست آمده نشان دادند که ریخت شناسی و ساختار شیمیایی تأثیر زیادی بر ویژگی‌های تریبولوژی داشته و از بین نانوساختارهای مورد نظر، گرافن اکسید برترین ویژگی‌هایی را در بهبود ویژگی‌های روان‌سازی و فشار پذیری سیال حفاری نشان داده است.

در این مقاله، سنتز برخی از نانوساختارهای کربنی و سیلیسی با ریخت شناسی‌های گوناگون و استفاده از آن‌ها برای تهیه نانو افزایه روان‌سازی گل حفاری مورد بررسی قرار گرفته است. با ارزیابی ویژگی‌های روان‌سازی و فشار پذیری گل حفاری تهیه شده با هریک از نانوافزایه‌های ساخته شده، تأثیر ساختار شیمیایی و مورفولوژی مشخص شده و بهترین نانوساختار با ویژگی‌های بهینه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱/۲۱

مراجع

- [1] Stachowiakl G.W., Batchelor A.W., "Engineering Tribology", Butterworth-Heinemann, (2013).
- [2] Jones, J. R., "Lubrication, Friction, and Wear Processes Analyzed for Space Vehicle Design Criteria", NASA, NASA-SP-8063 (1971).
- [3] Broni-Bediako E., Amorin R., [Effects of Drilling Fluid Exposure to Oil and Gas Workers Presented with Major Areas of Exposure and Exposure Indicators](#), *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(8): 710-719 (2010).
- [4] Sami Apaleke A., Al-Majed A., Hossain M., [Drilling Fluid: State of The Art and Future Trend](#), *Society of Petroleum Engineers, SPE-149555-MS* (2012).
- [5] Samuel H.R., Robertson J., [Vibration Analysis and Control with Hole-Enlarging Tools](#), *Society of Petroleum Engineers, SPE-134512-MS* (2010).
- [6] Zhang X. J., Taoutaou S., Guo Y., An Y., Liang Z., Shou Ming W., Yun, X., [Nanosilicas as Accelerators in Oilwell Cementing at Low Temperatures](#), *SPE Journal Paper*, 163974-PA (2014).
- [7] Amanullah M., Al-Tahini A.M., [Nano-Technology - Its Significance in Smart Fluid Development for Oil and Gas Field Application](#), *Society of Petroleum Engineers, SPE-126102-MS* (2009).

- [8] Shah S.N., Shanker N.H., Ogugbue C.C., "Future Challenges of Drilling Fluids and Their Rheological Measurements", *AADE Fluids Conference*, AADE-10-DF-HO-41 (2010).
- [9] Ekunsanmi E., "Evaluation of Lubricants Used in Water-Based Drilling Fluids", Texas A&M University, Thesis 1531834 (2012).
- [10] Rashidi A.M., Akbarnejad M.M., Khodadadi A.A., Mortazavi Y., Ahmadpour A., [Modification of Single Wall Carbon Nanotubes \(SWNT\) for Hydrogen Storage](#), *Nanotechnology*, **18**: 1-5 (2007).
- [11] Park S., An J., Piner RD., Jung I., Yang D., Velamakanni A., Aqueous Suspension and Characterization of Chemically Modified Graphene Sheets, *Chem. Mater.*, **20**: 6592–6594 (2008).
- [12] Jafarzadeh M., Rahman I.A., Sipaut C.S., [Synthesis of Silica Nanoparticles by Modified Sol–Gel Process: the Effect of Mixing Modes of the Reactants and Drying Techniques](#), *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **50**: 328-336 (2009).
- [13] Alaei M., Jalali M., Rashidi A., [Simple and Economical Method for the Preparation of MgO Nanostructures with Suitable Surface Area](#), *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering (IJCCE)*, **33**: 21-28 (2014).
- [14] Hu H., Zhao B., Itkis M.E., Haddon R.C., [Nitric Acid Purification of Single-Walled Carbon Nanotubes](#), *J. Phys. Chem.*, **107**: 13838-13842 (2003).
- [15] Kasiralvalad E., [The Great Potential of Nanomaterials in Drilling & Drilling Fluid Applications](#), *Int. J. Nano Dimens.*, **5**: 463-471(2014).
- [16] Zhang W., Ma G.J., Wu C.W., [Anti-Friction, Wear-Proof and Self-Lubrication Application of Carbon Nanotubes](#), *Adv.Mater.sci*, **36**: 75-88 (2014).
- [17] Church A.H., Zhang X.F., Sirota B., Kohli P., Aouadi S.M., Talapatra S., [Carbon Nanotube-Based Adaptive Solid Lubricant Composites](#), *Advanced Science Letters*, **5**: 188-191 (2012).
- [18] Berman D., Erdemir A., Sumant A.V., [Graphene: A New Emerging Lubricant](#), *Materials Today*, **17**: 31-42 (2014).
- [19] Kinoshita H., Nishinab Y., Alias A.A., Fujii M., [Tribological Properties of Monolayer Graphene Oxide Sheets as Water-Based Lubricant Additives](#), *Carbon*, **66**: 720-723 (2014).
- [20] Aftab A., Ismail A.R., Khokhar S., Ibupoto Z.H., [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 (2016).
- [21] Luo Z., Pei J., Wang L., Yu P., [Zhangxin Chen, Influence of an Ionic Liquid on Rheological and Filtration Properties of Water-Based Drilling Fluids at High Temperatures](#), *Applied Clay Science*, **136**: 96-102 (2017).
- [22] Zhang J., Zhang Y., Hu L., Zhang J., Chen G., [Modification and Application of a Plant Gum as Eco-Friendly Drilling Fluid Additive](#), *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **34**(2): 103-108, (2015).