

# The effect of graphene Oxide/Cobalt nanocomposite on the Rheological properties of drilling fluid

Mahboobeh Ghaemi<sup>1</sup>, Saba Mosivand\*<sup>1</sup>, Keivan Javanmard<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Lorestan University, Khorram Abad, Iran

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Faculty of Basic Sciences, Lorestan University, Khorram Abad, Iran

Received: 06.08.2021 Final revised: 27.01.2023 Accepted: 12.02.2023

Doi link: [10.22055/jrmbs.2023.18132](https://doi.org/10.22055/jrmbs.2023.18132)

## Abstract

Graphene oxide/cobalt nanocomposite was synthesized using the electrooxidation method and its structural and magnetic properties were specified. The effect of the produced nanocomposite on the rheological properties of drilling fluids containing bentonite and natural gum was investigated. The nanocomposite was characterized using XRD, FT-IR, SEM and VSM. XRD results confirmed the formation of graphene oxide/cobalt nanocomposite. The SEM images show the scaly shape of cobalt nanoparticles substituted on the graphene oxide sheets. Based on VSM results, the saturation magnetization, remanence magnetization and coercive field were determined to be 167.04 emu/g, 9.94 emu/g, and 142.5 Oe, respectively. In order to investigate the effect of graphene oxide/cobalt nanocomposite on the rheological properties of two types of fluids containing bentonite and natural gum, 0.1, 0.3, and 0.5 gr of nanocomposite were added to drilling fluids and their rheological properties were measured using an eight-speed viscometer at three temperatures of 23°C, 50°C and 70°C. Graphene oxide/cobalt nanocomposite in the bentonite samples increases the apparent viscosity, plastic viscosity, yield point, and gel strength up to 108 cp, 17 cp, 165 lb/100ft<sup>2</sup>, and 170 lb/100ft<sup>2</sup>, respectively, and decreases these parameters in the samples containing natural gum down to 70 cp, 32 cp, 42 lb/100ft<sup>2</sup>, and 5 lb/100ft<sup>2</sup>, respectively.

**Keywords:** Graphene oxide/cobalt nanocomposite, Drilling fluid, Bentonite, Natural gum, Rheological properties

\* Corresponding Author: Mosivand.S@lu.ac.ir

## اثر نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کبالت بر خواص رئولوژی سیال حفاری

محبوبه قائمی<sup>۱</sup>، صبا موسیوند<sup>۱\*</sup>، کیوان جوانمرد<sup>۲</sup><sup>۱</sup>گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران<sup>۲</sup>گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵ ویرایش نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

Doi link: [10.22055/jrmb.2023.18132](https://doi.org/10.22055/jrmb.2023.18132)

## چکیده

نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کبالت با روش الکترواکسیداسیون ساخته شد و مورد مشخصه‌یابی ساختاری و مغناطیسی قرار گرفت. سپس اثر نانوکامپوزیت تولید شده بر خواص رئولوژی دو نوع سیال حفاری محتوی بنتونیت و صمغ طبیعی بررسی شد. نانوکامپوزیت به‌دست آمده با استفاده از XRD، FT-IR، SEM و VSM مشخصه‌یابی شد. نتایج XRD تشکیل ساختار نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت را تأیید کرد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده شکل پولکی نانوذرات کبالت است که بر روی صفحات اکسید گرافن جایگزیده شده‌اند. طبق نتایج حاصل از VSM، مغناطش اشباع  $167.04 \text{ emu/g}$ ، پسماند مغناطیسی  $9.94 \text{ emu/g}$  و میدان وادارندگی  $142.5 \text{ Oe}$  تعیین شد. به‌منظور بررسی اثر نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کبالت بر خواص رئولوژی دو نوع سیال حاوی بنتونیت و صمغ طبیعی،  $0.1$ ،  $0.3$  و  $0.5$  گرم از این نانوکامپوزیت به‌سیالات حفاری افزوده شد و خواص رئولوژی آنها با استفاده از دستگاه ویسکومتر هشت سرعت در سه دمای  $23$ ،  $50$  و  $70$  درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت در نمونه‌های بنتونیتی باعث افزایش ویسکوزیته ظاهری، ویسکوزیته پلاستیک، نقطه واروی و استحکام ژله‌ای به‌ترتیب تا حدود مقادیر  $1.08 \text{ cp}$ ،  $0.17 \text{ cp}$  و  $165 \text{ lb}/100\text{ft}^2$  و  $170 \text{ lb}/100\text{ft}^2$  و در نمونه‌های صمغی باعث کاهش این پارامترها به‌ترتیب تا حدود مقادیر  $0.70 \text{ cp}$ ،  $0.32 \text{ cp}$  و  $42 \text{ lb}/100\text{ft}^2$  و  $5 \text{ lb}/100\text{ft}^2$  می‌شود.

کلیدواژگان: نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کبالت، سیال حفاری، بنتونیت، صمغ طبیعی، خواص رئولوژی

## مقدمه

مداوم از درون چاه به‌بیرون منتقل شود. در چاه‌های عمیق از یک سیال برای خروج سنگریزه‌ها استفاده می‌شود که اصطلاحاً سیال حفاری و یا گل حفاری نامیده می‌شود. در واقع، گل حفاری سیالی است که با گردش در چاه و عبور از رشته‌های حفاری و مته از طریق فضای حلقوی بین دیواره چاه و لوله‌های حفاری، کندهای حاصل از حفاری را به‌سطح چاه حمل می‌کند و باعث تمیز شدن مته و خنک شدن آن می‌شود. این سیال از مهم‌ترین و اصلی‌ترین اجزاء در عملیات

فناوری نانو تحول و پیشرفت شگرفی را در صنایع گوناگون ایجاد کرده است. از جمله حوزه‌هایی که فناوری نانو در آن تغییرات چشمگیری را ایجاد کرده است، صنایع بالادستی نفت است که شامل اکتشاف تا قبل از پالایشگاه می‌شود. به‌منظور دستیابی به سیال مخزن می‌بایست با استفاده از مته‌های دوار چاه‌هایی را از سطح زمین تا محل تجمع نفت حفر نمود. کندها و سنگریزه‌های حاصل از عملیات حفاری باید به‌طور

\* نویسنده مسئول: Mosivand.S@lu.ac.ir



در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری در ساخت نانوکامپوزیت‌های گوناگون با خواص فیزیکی و شیمیایی بهبود یافته، حاصل شده است. نانوکامپوزیت‌ها مواد مرکبی هستند که حداقل یکی از اجزای سازنده آنها در مقیاس نانو قرار دارد. اخیراً مطالعات متعددی در مورد کاربرد کامپوزیت‌ها در سیالات حفاری انجام شده است که از آن جمله می‌توان به ساختارهای اکسید گرافن/پلی‌اکریل آمید [۱۲]، کامپوزیت پلیمری محتوی سیلیکا [۱۳]، کامپوزیت هسته/پوسته سیلیکا/پلیمر [۱۴]، آکریلیک/سیلیکا [۱۵] اکسید روی/آکریلامید [۱۶]، پلی‌اتیلن گلیکول/سیلیکا [۱۷] و نانوکامپوزیت با ساختار هسته/پوسته بر پایه پلیمر و سیلیکا [۱۸] اشاره کرد. وجود گرافن در نانوکامپوزیت‌ها موجب افزایش استحکام مکانیکی، پایداری حرارتی بهتر، فعالیت الکتروشیمیایی و هدایت الکتریکی مناسب می‌شود.

کنترل خواص رئولوژی سیال حفاری به‌عنوان یکی از عوامل اساسی در موفقیت‌آمیز بودن عملیات حفاری به‌شمار می‌رود. با عبور سیال حفاری از درون لوله‌های حفاری، خواص رئولوژی آنها تحت تغییرات چشمگیری قرار می‌گیرد. عواملی مانند دما، فشار و زمان نیز بر ویژگی‌های رئولوژی سیال حفاری اثرگذار هستند.

در این پژوهش، ابتدا نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت به‌روش الکترواکسیداسیون [۲۸-۱۹] ساخته می‌شود و ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس مقادیر متفاوت از نانوکامپوزیت ساخته شده به‌نمونه‌های گوناگون گل حفاری حاوی بنتونیت و صمغ طبیعی افزوده شده و با استفاده از دستگاه فراصوت به‌طور کامل و یکنواخت در آن پخش و پراکنده می‌شود و در نهایت رفتار رئولوژی نانوسیالات تولید شده مطالعه می‌شود.

حفاری به‌شمار می‌رود، به‌طوری که بدون آن فرایند حفاری عملاً غیرممکن است. سیال حفاری موجب کاهش اصطکاک میان دیواره چاه و ادوات حفاری شده و پایداری قسمت‌های لوله‌گذاری نشده چاه را نیز حفظ می‌کند. علاوه بر این، باید دارای ویژگی‌های رئولوژی مطلوب و چگالی و ویسکوزیته<sup>۱</sup> مناسب جهت حمل و انتقال کنده‌های حفاری به‌سطح چاه باشد. در صورت قطع عملیات حفاری، سیال حفاری باید به‌حالت ژلاتینی درآید تا از ته‌نشین شدن کنده‌های حفاری ممانعت به‌عمل آید. علاوه بر این، سیال ژلاتینی باید این قابلیت را داشته باشد که با کم‌ترین تنش از حالت ژلاتینی به‌حالت روان تبدیل شود. معمولاً به‌طور مداوم موادی تحت عنوان وزن‌دهنده به‌سیال حفاری اضافه می‌شود و باعث تولید مقادیر زیادی پسماند سیال و جامد می‌شود. موادی که با افزودن آنها به‌سیال حفاری، خاصیت ژلاتینی آن افزایش می‌یابد، اصطلاحاً ویسکوزیفایر<sup>۲</sup> نام دارند. در واقع، ویسکوزیفایر نوعی اصلاح‌کننده خواص رئولوژی است که برای افزایش ویسکوزیته استفاده شده و به‌عنوان قوام‌دهنده یا غلیظ‌کننده سیال حفاری عمل می‌نماید. افزایش ویسکوزیته سیال حفاری به‌منظور افزایش قدرت آن در حمل و بالا آوردن کنده‌های حاصل از عملیات حفاری مهم است. برای دستیابی به ویژگی‌هایی همچون چگالی مناسب، خورندگی کم، روان‌کاری و خاصیت ژلاتینی مطلوب، نانومواد به‌عنوان مواد افزودنی به‌سیال حفاری به‌کار برده می‌شوند. سیال حفاری محتوی نانومواد، سیالی است که حداقل یک ماده در ابعاد نانو با اندازه<sup>۱</sup> ۱ تا ۱۰۰ نانومتر داشته باشد. با افزایش این نانومواد، خواص سیال پایه تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۱۱-۱]. این سیال دارای خواص رئولوژی مطلوب، پایداری مناسب و پاسخگوی نیازهای عملیات حفاری است.

<sup>2</sup> Viscosifier

<sup>1</sup> Viscosity

## کارهای آزمایشگاهی

### ساخت نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت به روش الکترواکسیداسیون

در این پژوهش به منظور ساخت نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت به روش الکترواکسیداسیون از یک سلول الکتروشیمیایی شامل دو الکتروود، آند از جنس گرافیت و کاتد از جنس نیکل، درون محلول آبی الکترولیت محتوی سولفات کبالت هفت آبه،  $(\text{Co}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O})$  با غلظت ۰/۱ مولار استفاده شد. پودر سولفات کبالت ۷آبه مورد استفاده در این پژوهش از شرکت یوسی بی (ucb) بلژیک خریداری شده است. برای آماده‌سازی الکتروودهای آند و کاتد، دو قطعه گرافیت و نیکل، هرکدام به ابعاد  $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  برش داده شد. به منظور برطرف کردن آلودگی‌های احتمالی روی سطح الکتروودها و رفع ناخالصی‌ها، از سونش مکانیکی با استفاده از سنباده با دانه‌های ریز و امواج فراصوت استفاده شد. سونش مکانیکی با استفاده از سنباده فقط برای الکتروود کاتد از جنس نیکل انجام شد و برای گرافیت به علت تخریب ساختار آن توسط سنباده، سونش مکانیکی انجام داده نشد و فقط از سونش فراصوت استفاده گردید. به منظور سونش با امواج فراصوت، الکتروودها درون آب مقطر به مدت دو دقیقه در دمای اتاق، درون حمام فراصوت مدل PARSONIC 2600S قرار گرفتند و کاملاً سونش شده و آمادهٔ ماسک‌گذاری گردیدند. جهت اتصال الکتروودها به منبع تغذیه و برقراری جریان الکتریکی لازم در سلول الکتروشیمیایی، یک رشته سیم مسی با استفاده از چسب نواری روی یک سطح از هر الکتروود قرار گرفت و سطح دیگر الکتروودها برای تماس با محلول الکترولیت، آزاد در نظر گرفته شد. سپس الکتروودها در سلول الکترواکسیداسیون مورد استفاده که یک بشر

۲۵۰ ml محتوی محلول الکترولیت است، در فاصله ۲ cm از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این مجموعه به یک منبع ولتاژ DC مدل PHYWE 11709.93 جهت برقراری جریان و یک آوومتر برای نمایش مقدار ولتاژ اعمال شده متصل گردید. با توجه به آزمایشات اولیه انجام شده، زمان انجام واکنش ۹۰ دقیقه و ولتاژ مطلوب ۲۳ ولت انتخاب شد. محلول الکترولیت در ابتدا صورتی‌رنگ و دارای pH اولیه پنج می‌باشد. با شروع واکنش‌ها رنگ محلول به مرور زمان سیاه می‌شود و این تیرگی تا پایان آزمایش حفظ می‌شود و در نهایت به رنگ قهوه‌ای روشن درمی‌آید. پس از اتمام زمان ۹۰ دقیقه، جریان الکتریکی متصل به سلول الکتروشیمیایی قطع گردید. رسوب حاصل از محلول جدا شده و چندین بار با آب مقطر شستشو داده شد و در دمای اتاق خشک شد. در شکل ۱ نمایی از سلول الکتروشیمیایی متصل به منبع تغذیه مشاهده می‌شود. در ابتدای آزمایش با انحلال نمک سولفات کبالت در آب، یون‌های کبالت و سولفات وارد محلول می‌شوند. بعد از اعمال ولتاژ، مولکول‌های آب به یون‌های هیدروژن و هیدروکسیل تجزیه می‌شوند. یون‌های هیدروکسیل در خلاف جهت میدان الکتریکی به سمت آند با بار مثبت رفته و با ورقه‌های گرافیت برخورد می‌کنند و باعث اکسایش در لبه‌ها و منبسط شدن ورقه‌های گرافیت از هم می‌شوند. اکسید و هیدروکسید کردن لبه‌های گرافیت منجر به باز شدن ورقه‌ها از هم می‌شود. از طرفی یون‌های سولفات با بار منفی که در خلاف جهت میدان الکتریکی حرکت می‌کنند بین صفحات گرافیت باز شده وارد شده و فرآیند کاهش اتفاق می‌افتد و یون سولفات به گازهای  $\text{SO}_2$  و  $\text{O}_2$  تبدیل می‌شود. نیروی وارد شده از گازهای  $\text{SO}_2$  و  $\text{O}_2$  بین صفحات، باعث جداشدگی ورقه‌های گرافیت می‌شود. در این مرحله صفحات گرافن لایه‌برداری شده

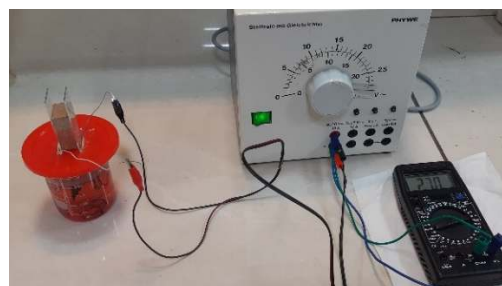
VSM مدل MDKB از شرکت مغناطیس دقیق کویر، در دانشگاه کاشان صورت گرفت.

### تهیه سیال حفاری حاوی نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت

در این پژوهش دو نوع سیال محتوی بنتونیت و صمغ طبیعی که از ویسکوزیفایرهای مورد استفاده در سیال حفاری می‌باشند، تهیه شدند.

برای تهیه سیال حاوی بنتونیت و صمغ طبیعی، ۱۲٫۵ گرم از هر یک از این مواد به ترتیب به ۲۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر و آب نمک اشباع شده افزوده شد. برای هر یک از ویسکوزیفایرهای بنتونیت و صمغ طبیعی، سه نانوسیال متفاوت با افزودن ۰٫۱، ۰٫۳ و ۰٫۵ گرم نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت به سیال پایه تهیه شد. به‌منظور پراکندگی مطلوب نانوکامپوزیت در سیال پایه و ممانعت از ته‌نشینی آنها از امواج فراصوت استفاده شد. سپس سیال حاصل به مدت ۳۰ دقیقه با همزن هم‌زده شد. لازم به‌ذکر است که تمام مراحل آزمایش در دمای محیط آزمایشگاه انجام شد. پس از آماده سازی سیال، برای تعیین اسیدی و بازی بودن سیال، مقدار pH اندازه‌گیری و داده‌ها ثبت گردید. برای اندازه‌گیری وزن مخصوص (برحسب پوند بر فوت مکعب و یا پوند بر گالن) که یکی از خواص سیالات است، از ترازوی گل ساخت شرکت OFITE واقع در شرکت سیالات حفاری پارس تهران استفاده شد. علاوه‌براین، خواص رئولوژی نمونه سیالات حفاری با استفاده از ویسکومتر ۸ سرعته ساخت شرکت OFITE مدل ۸۰۰، واقع در شرکت سیالات حفاری پارس تهران، در سرعت‌های ۳، ۶، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه در سه دما شامل دمای محیط ۲۳، ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت.

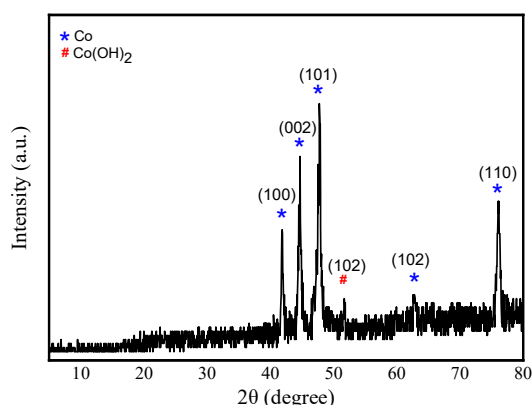
به‌صورت گرافن کم لایه (گرافن با تعداد لایه‌های بین ۳ تا ۱۰ لایه) وارد محلول شده و رنگ محلول سیاه می‌شود و این تیرگی تا پایان آزمایش باقی می‌ماند. الکترون‌های آزاد شده از فرآیند کاهش سولفات روی صفحات گرافن نشسته و به‌این ترتیب گرافن دارای بار منفی می‌شود و پس از به‌دام انداختن یون‌های  $Co^{2+}$ ، کامپوزیت گرافن-کبالت روی کاتد تشکیل می‌شود. لازم به‌ذکر است که تعدادی از یون‌های  $Co^{2+}$  با یون‌های  $OH^-$  واکنش داده و و منجر به‌شکل‌گیری هیدروکسید کبالت می‌شوند. پس از سپری شدن حدود ۷۰ دقیقه از آزمایش، درصد زیادی از صفحات سیاه‌رنگ گرافن موجود در محلول، با نانوذرات به‌هم‌پیوسته کبالت ترکیب شده و نانوکامپوزیت مغناطیسی گرافن-کبالت تشکیل می‌شود.



شکل ۱. نمایی از سلول الکتروشیمیایی متصل به‌منبع تغذیه مورد استفاده در ساخت نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت.

به‌منظور بررسی و مطالعه اندازه و شکل نانوکامپوزیت ساخته شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مدل MIRA3-LM در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان استفاده شد. تشخیص نوع ساختار و شناسایی ماهیت محصولات تولید شده به‌وسیله دستگاه پراش پرتو ایکس، XRD مدل X Pert pro در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه کاشان و نیز دستگاه FT-IR مدل Spectrum RX1 شرکت Perkin Elmer انجام شد. مشخصه‌یابی خواص مغناطیسی نانوکامپوزیت ساخته شده توسط دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش

امر ورقه‌ورقه شدن اکسیدگرافن طی فرآیند الکترواکسیداسیون می‌باشد، همچنین می‌تواند به این دلیل باشد که ذرات کبالت روی صفحات اکسیدگرافن لنگر انداخته‌اند و از دوباره جمع شدن صفحات اکسیدگرافن ورقه‌ورقه شده طی فرآیند کاهش جلوگیری می‌کنند. این امر مؤید آن است که اتصالاتی داخلی بین ذرات کبالت و صفحات اکسیدگرافن وجود دارد. علاوه بر این، مقدار کم اکسیدگرافن و شدت پراش کم آن در مقایسه با کبالت، می‌تواند باعث ناپدید شدن قله اکسیدگرافن شود [۲۹]. این نتایج با نتایج حاصل از تحقیقات کوتی و همکاران [۳۰] و پاپاجورجیو و همکاران [۳۱] در توافق است. با استفاده از رابطه دبای-شرر اندازه نانوبلورک‌های کبالت ۲۲٫۱ نانومتر برآورد شد.



شکل ۲. الگوی XRD نانوکامپوزیت ساخته شده تحت ولتاژ ۲۳ ولت.

در این پژوهش به منظور درک بیشتر از ساختار نانوکامپوزیت ساخته شده در ولتاژ ۲۳ ولت از طیف‌سنجی مادون قرمز-تبدیل فوریه استفاده شد. در شکل ۳ پیک‌های ۳۴۵۰، ۳۴۶۷، ۳۶۹۴ و ۳۷۷۳ بر سانتیمتر مربوط به پیوند O-H یکی از پیوندهای مولکول آب می‌باشد. پیک ۲۶۴۴ بر سانتیمتر نشان‌دهنده حالت ارتعاشی متقارن C-H گروه‌های CH<sub>2</sub> است. پیک ۱۶۲۹ بر سانتیمتر به ترکیب آروماتیک

نمونه‌های سیال با حروف لاتین نام‌گذاری شدند. سیال‌های پایه حاوی بتونیت و صمغ طبیعی به ترتیب با حروف B و G و سیال‌های حاوی نانوذرات با حرف n و برای مشخص کردن دما نیز از حرف T استفاده شده است (جدول ۱).

جدول ۱. نمونه‌های سیال مختلف در این تحقیق.

سیال	نام نمونه
سیال پایه بتونیتی	B
سیال پایه صمغ طبیعی	G
۰٫۵ گرم نانوذره + سیال پایه (B یا G)	n <sub>۱</sub>
۰٫۳ گرم نانوذره + سیال پایه (B یا G)	n <sub>۲</sub>
۰٫۱ گرم نانوذره + سیال پایه (B یا G)	n <sub>۳</sub>
دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد	T <sub>۱</sub>
دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد	T <sub>۲</sub>
دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد	T <sub>۳</sub>

## نتایج و بحث

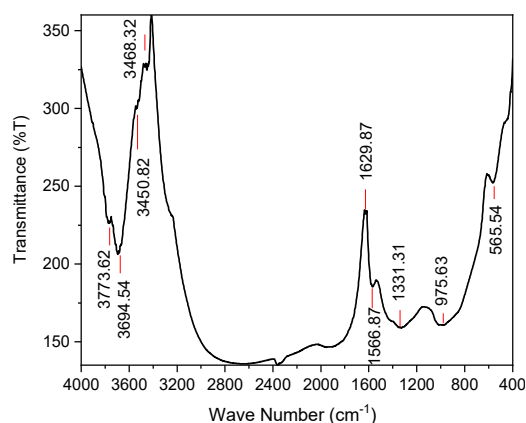
ماهیت ساختار بلوری نانوکامپوزیت تولید شده با استفاده از دستگاه XRD مورد مطالعه قرار گرفت. الگوی پراش پرتو X نمونه ساخته شده تحت ولتاژ ۲۳ ولت که در شکل ۲ ارائه شده است، دارای قله‌های تیز بوده که نشان‌دهنده ساختار بلوری مطلوب نانوکامپوزیت تهیه شده می‌باشد. با مقایسه الگوی پراش حاصل، با الگوی پراش موجود در کارت شماره (JCPDS 00-005-0727) مشخص می‌شود که این نمونه دارای ساختار بلوری هگزاگونال کبالت با فرمول شیمیایی Co است. علاوه بر این در مقایسه با کارت شماره (JCPDS 00-030-0443) دیده می‌شود که مقداری هیدروکسیدکبالت نیز با ساختار بلوری هگزاگونال و با فرمول شیمیایی Co(OH)<sub>2</sub> در نمونه وارد شده است. در الگوی XRD هیچ پیک آشکاری از اکسیدگرافن ظاهر نشده و فقط پیک‌های مربوط به کبالت و هیدروکسیدکبالت دیده می‌شوند که دلیل این

اندازه ذرات تقریباً ۱۱۰ نانومتر و اندازه میانگین ضخامت صفحات اکسید گرافن حدود ۲۰ نانومتر برآورد شد.

به منظور حصول اطلاعات بیشتر از عناصر موجود در نمونه، از آنالیز پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) استفاده شد. با توجه به نتیجه حاصل از آنالیز EDX نمونه ساخته شده، حضور عناصر کربن، اکسیژن و کبالت تأیید می‌شود. درصدی از طیف به عنصر طلا اختصاص داده شده است که در آماده‌سازی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در اکسیدگرافن مقدار نوعی نسبت اتمی کربن به اکسیژن می‌تواند بین ۱/۵ تا ۲/۵ باشد [۲۹]. در این تحقیق نسبت اتمی کربن به اکسیژن حدود ۲/۰۲ برآورد شد که مورد انتظار است. در نتیجه در نانوکامپوزیت ساخته شده، اکسیدگرافن به عنوان فاز زمینه تشکیل شده است.

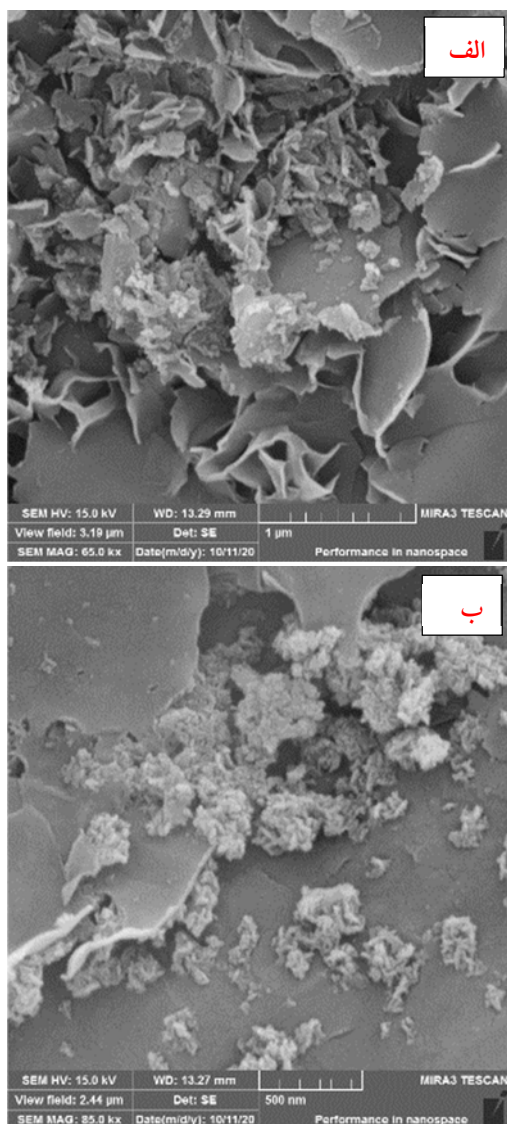
به منظور بررسی خواص مغناطیسی نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت تولید شده از دستگاه VSM در دمای اتاق استفاده گردید. شکل ۵ منحنی مغناطش نمونه را بر حسب میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. از عوامل مؤثر بر خواص مغناطیسی نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن می‌توان به اندازه نانوذرات مغناطیسی و همچنین حضور گروه‌های عاملی اکسیژنی در اکسیدگرافن اشاره کرد. گروه‌های اکسیژنی با برهم زدن تقارن ساختاری گرافن می‌توانند سبب القای ممان‌های مغناطیسی و ارتقای خواص مغناطیسی ساختارهای از این دست شوند. تفاوت رفتارهای مغناطیسی اکسیدگرافن در قیاس با گرافن خالص به حضور گروه‌های عاملی اکسیژنی و اثر آنها در به هم زدن تقارن زیرشبه‌های گرافنی نسبت داده می‌شود. علاوه بر عامل‌های اکسیژنی، خروج گروه‌های اکسیژنی از شبکه گرافنی و جاهای خالی حاصل از آن نیز می‌تواند تقارن ساختاری را در شبکه‌های اکسید گرافن برهم زده و

C=C اختصاص دارد که می‌توان آن را به ارتعاشات اسکلتی حوزه‌های گرافیتی اکسید نشده نسبت داد. پیک ۱۵۶۶ بر سانتیمتر به ارتعاشات اسکلتی ورقه‌های گرافن نسبت داده می‌شود. پیک ۱۳۳۱ بر سانتیمتر ارتعاشات کششی O-H را نشان می‌دهد. پیک ۹۷۵ بر سانتیمتر حالت خمش Co-OH را نشان می‌دهد و این پیک تولید هیدروکسید کبالت را تأیید می‌کند. پیک ۵۶۵ بر سانتیمتر متناظر با ارتعاشات کششی Co-O به واسطه واکنش بین اکسیژن و کاتیون‌های موجود در مکان‌های هشت‌وجهی است که بر وجود درصد کمی از اکسیدکبالت در نانوکامپوزیت دلالت دارد [۲۹].



شکل ۳. طیف FT-IR نانوکامپوزیت ساخته شده تحت ولتاژ ۲۳ ولت.

به منظور آگاهی از مورفولوژی سطح نمونه‌ها و نحوه پراکندگی نانوذرات کبالت روی صفحات اکسیدگرافن از میکروسکوپ الکترونی روبشی، SEM استفاده شد. دو تصویر نوعی حاصل در ۴الف و ۴ب نمایش داده شده است. این تصاویر بیانگر شکل پولکی نانوذرات کبالت می‌باشد که این نانوپولک‌ها به یکدیگر پیوسته و یک ساختار گل مانند متخلخل را تشکیل می‌دهند که بر روی صفحات اکسیدگرافن قرار گرفته و نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت را تشکیل می‌دهند. ورقه‌های اکسیدگرافن نیز دارای ساختار دوبعدی و چند لایه بوده و چین و چروک‌هایی روی آنها دیده می‌شود.



شکل ۴. الف و ب، تصاویر SEM نانوکامپوزیت ساخته شده تحت ولتاژ ۲۳ ولت با دو مقیاس متفاوت.

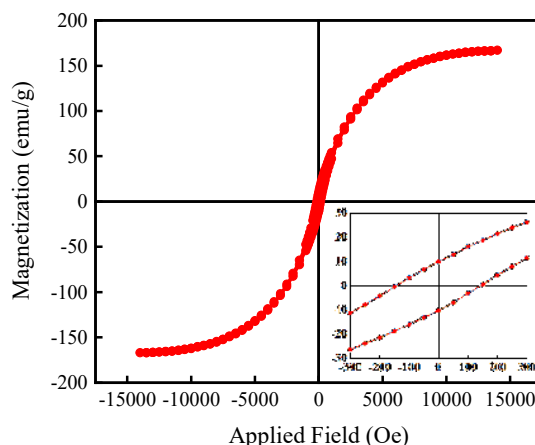
القای مؤلفه‌های مغناطیسی در ساختارهای از این دست را ممکن سازد [۳۲]. با توجه به داده‌های حاصل، مغناطش اشباع نمونه  $167.04 \text{ emu/g}$ ، پسماند مغناطیسی  $9.94 \text{ emu/g}$  و میدان وادارندگی آن معادل  $142.5 \text{ Oe}$  برآورد شد.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در این پژوهش انواع مختلف سیال محتوی بنتونیت و صمغ طبیعی که از ویسکوزیفایرهای مورد استفاده در سیال حفاری می‌باشند، تهیه و خواص رئولوژی آنها مطالعه شد.

بنتونیت یک ماده طبیعی است که از تجمع چند کانی رسی و تعدادی کانی غیر رسی تشکیل شده و قدرت شکل‌پذیری و تعلیق‌پذیری بالایی دارد. مهم‌ترین کانی تشکیل‌دهنده آن مونت موریلونینت است. بنتونیت آب را به خوبی در شبکه خود جذب می‌کند و دارای خاصیت تورم‌پذیری بالایی بوده و می‌تواند تا هشت برابر حجم اولیه متورم شود که در این شرایط چسبناک و ژلاتینی می‌شود. رنگ بنتونیت معمولاً سفید مایل به خاکستری و یا شیری و یا مغز پسته‌ای است که از دست دادن رطوبت باعث کم رنگ شدن آن می‌شود. از جمله مهم‌ترین کاربردهای بنتونیت می‌توان به سرد و لغزان کردن مت‌ه حفاری، تمیز کردن ته چاه و مته و نیز انتقال کنده‌ها به سطح زمین اشاره کرد که تمامی این اعمال به‌خواصی همچون لغزانندگی، گرانروی، وزن و مقاومت ژلی وابسته هستند [۵۶]. در این پژوهش بنتونیت شرکت باریت فلات ایران به‌عنوان یک ویسکوزیفایر گل حفاری مورد بررسی قرار گرفت.



خصوصیات رئولوژی و گرانیروی گل حفاری از اصطلاحاتی مانند گرانیروی ظاهری<sup>۱</sup> (AV)، گرانیروی پلاستیک<sup>۲</sup> (PV)، نقطه واروی<sup>۳</sup> (YP) و استحکام ژله‌ای<sup>۴</sup> (GS) استفاده می‌شود. گرانیروی پلاستیک در نتیجه اصطکاک مکانیکی حاصل از برخورد جامدات درون گل با یکدیگر، یا برخورد جامدات با مایعی که آنها را احاطه کرده و یا اصطکاک حاصل از حرکت لایه‌های مایع روی همدیگر ایجاد می‌شود، ولی این ویژگی بیشتر تحت تأثیر غلظت جامدات موجود در گل قرار دارد و انتظار می‌رود با افزایش وزن گل گرانیروی پلاستیک نیز افزایش پیدا کند. واحد اندازه‌گیری گرانیروی پلاستیک سانتی‌پواز (cp) است. در ترکیبات گل حفاری مقداری ذرات جامد وجود دارد که با مواد دیگر در فاز مایع پیوندهای الکتروشمیایی برقرار می‌کنند. نقطه تسلیم عبارت است از مقاومتی که این مواد در برابر برش خوردن از خود بروز می‌دهند. در واقع نقطه تسلیم بیانگر نیروی چسبندگی و نیروهای الکترواستاتیکی بین ذرات می‌باشد. ویژگی دیگر که به‌عنوان تابعی از گرانیروی پلاستیکی یا نقطه واروی است، گرانیروی ظاهری نام دارد. گرانیروی ظاهری با کمک دستگاه ویسکومتر در سرعت چرخشی ۶۰۰ دور در دقیقه اندازه‌گیری می‌شود و واحد اندازه‌گیری آن نیز سانتی‌پواز است. استحکام ژله‌ای بیانگر برشی است که یک گل باید در برابر وزن ذرات جامد درونش تحمل کند. استحکام ژله‌ای نشانگر خواص تیکسوتراپیک سیال می‌باشد. تیکسوتراپی سیال عبارت است از توانایی سیال در تولید نیروی استحکام ژلاتینی با گذشت زمان (تمایل سیال به ژله‌ای شدن). نقطه واروی و نیروی استحکام ژله‌ای پارامترهایی برای اندازه‌گیری



شکل ۵. منحنی مغناطش برحسب میدان مغناطیسی نانوکامپوزیت ساخته شده تحت ولتاژ ۲۳ ولت.

صمغ‌ها نیز گروه بزرگی از پلی ساکاریدها هستند که توانایی تولید محصولاتی با ویسکوزیته بالا در غلظت‌های پایین را دارند. صمغ‌ها را بر اساس ساختارشان به دو دسته صمغ‌های خطی و صمغ‌های انشعابی تقسیم بندی می‌کنند. از ویژگی‌های صمغ‌های خطی مانند صمغ زانتان و گوار می‌توان به افزایش بیشتر ویسکوزیته و تمایل کمتر به تشکیل ژل اشاره کرد. درحالی‌که از ویژگی صمغ‌های انشعابی مانند صمغ طبیعی عربی می‌توان افزایش کمتر ویسکوزیته و تمایل بیشتر به تشکیل ژل را برشمرد. در این پژوهش سیال تهیه شده از صمغ طبیعی از میدان‌های نفتی ایران می‌باشد.

خواص رئولوژی از مهم‌ترین خواص سیال حفاری است که در طول عملیات حفاری نظارت و کنترل می‌شود. به‌خواصی از سیال که مشخصات جریانی آن را در شرایط متفاوت و گوناگون بیان می‌کند، رئولوژی سیال گفته می‌شود. گرانیروی یا ویسکوزیته یکی از خواص رئولوژی مهم گل حفاری است و بیانگر مقاومتی است که سیال در برابر جاری شدن یا جابه‌جایی از خود نشان می‌دهد. معمولاً برای تشریح

<sup>3</sup> Yield Point (YP)

<sup>4</sup> Gel Strength (GS)

<sup>1</sup> . Apparent viscosity (AV)

<sup>2</sup> . Plastic viscosity (PV)

شدیدی پیدا می‌کند. همچنین با افزایش دما نیز خواص رئولوژی کاهش قابل توجهی می‌یابد. محققین با بررسی اثر pH و دما بر روی چندین نوع پلیمر مشاهده کردند که خواص رئولوژی در محیط اسیدی و نیز با افزایش دما کاهش پیدا می‌کنند. این پلیمرها در محیط بازی با pH بین ۹ تا ۱۱ دارای گرانیوی پلاستیکی و نقطه واروی مناسب و نزدیک به هم می‌باشند و رئولوژی مناسبی از خود نشان می‌دهند [۳۳]. مقدار pH نمونه بتونیتی با افزایش غلظت نانوذرات افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد.

نیروهای الکتروشمیایی یا جاذبه موجود در سیال به ترتیب در حالت حرکت و سکون می‌باشند. در این تحقیق ویسکوزیته نمونه‌های سیال تهیه شده با استفاده از دستگاه ویسکومتر هشت سرعتی در سرعت‌های ۳، ۶، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه اندازه‌گیری شد. با استفاده از داده‌های حاصل می‌توان خصوصیات رئولوژی سیال از جمله ویسکوزیته پلاستیک و نقطه واروی را اندازه‌گیری کرد. همچنین مقاومت یا استحکام ژله‌ای، ۱۰ ثانیه در کمترین سرعت ویسکومتر اندازه‌گیری می‌شود و سپس ۱۰ دقیقه نمونه را جهت ته‌نشین شدن رها می‌شود. داده‌های حاصل در کمترین سرعت ویسکومتر استحکام ژله‌ای در ۱۰ دقیقه را بیان می‌کنند. همچنین می‌توان با قرائت ویسکومتر در سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه مقدار ویسکوزیته ظاهری را اندازه‌گیری کرد. درجه انحراف ویسکومتر یا مقاومت فنر دستگاه به‌ازای سرعت‌های مختلف با  $\theta$  نشان داده می‌شود.

ابتدا اندازه‌گیری pH، وزن گل و گرانیوی در سه دمای مختلف بر روی سیال پایه محتوی بتونیت و صمغ طبیعی (بدون نانوکامپوزیت) انجام شد. نتایج حاصل به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ گردآوری شده است.

وزن سیال و pH اندازه‌گیری شده در سه دمای ۲۳، ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سه غلظت ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ گرم نانوکامپوزیت در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. با مقایسه نتایج این نمونه‌ها با سیال‌های بدون نانوکامپوزیت، مشاهده می‌شود که اضافه کردن نانوذرات و افزایش غلظت آنها تغییر محسوسی در وزن سیال جز در سیال حاوی ۰/۵ گرم نانوذره ایجاد نمی‌کند. بررسی pH نمونه صمغی نشان می‌دهد که این پلیمر در محیط اسیدی به دلیل تخریب و تجزیه شدن، خاصیت گرانیوی پلاستیک و نقطه واروی مناسبی نداشته و در کل رئولوژی در محیط اسیدی کاهش

جدول ۲. مشخصات سیال پایه حاوی بنتونیت.

T (°C)	MW(lb/ft <sup>3</sup> )	AV	Θ <sub>3</sub>	Θ <sub>6</sub>	Θ <sub>100</sub>	Θ <sub>300</sub>	Θ <sub>600</sub>	PV	YP	pH
۲۳	۶۴,۳	۱۸,۵	۲۴	۳۲	۳۳,۶	۳۵	۳۷	۲	۳۳	۸,۹۵
۵۰	۶۴,۳	۱۷,۵	۲۲	۳۰	۳۱,۶	۳۳	۳۵	۲	۳۱	۸,۷۸
۷۰	۶۴,۳	۳۳	۱۶	۲۸	۲۷,۳	۲۸	۳۳	۲	۵	۸,۵

جدول ۳. مشخصات سیال پایه حاوی صمغ طبیعی.

T (°C)	MW(lb/ft <sup>3</sup> )	AV	Θ <sub>3</sub>	Θ <sub>6</sub>	Θ <sub>100</sub>	Θ <sub>300</sub>	Θ <sub>600</sub>	PV	YP	pH
۲۳	۷۵,۵۳	۸۵,۵	۲۳	۳۰	۹۲	۱۳۵	۱۷۱	۳۶	۸۹	۶,۲۸
۵۰	۷۵,۵۳	۶۶	۱۳	۱۹	۶۸	۱۰۳	۱۳۲	۲۹	۶۸	۶
۷۰	۷۵,۵۳	۵۵	۹	۱۳	۵۴	۸۵	۱۱۰	۲۵	۵۳	۵,۹۸

جدول ۴. وزن و pH سیال بنتونیتی در حضور نانوکامپوزیت.

Temp (°C)	MW(lb/ft <sup>3</sup> )			pH				
	B	n <sub>۱</sub>	n <sub>۲</sub>	B	n <sub>۱</sub>	n <sub>۲</sub>		
۲۳	۶۴,۳	۶۴,۹۸	۶۴,۹۸	۶۷,۴۲	۸,۹۵	۹	۹,۵۰	۱۰,۲۱
۵۰	۶۴,۳	۶۴,۹۸	۶۴,۹۸	۶۷,۴۲	۸,۷۸	۸,۹۹	۹,۱۵	۱۰
۷۰	۶۴,۳	۶۴,۹۸	۶۴,۹۸	۶۷,۴۲	۸,۵	۸,۸۰	۹,۲۳	۹,۸۰

جدول ۵. وزن و pH سیال صمغ طبیعی در حضور نانوکامپوزیت.

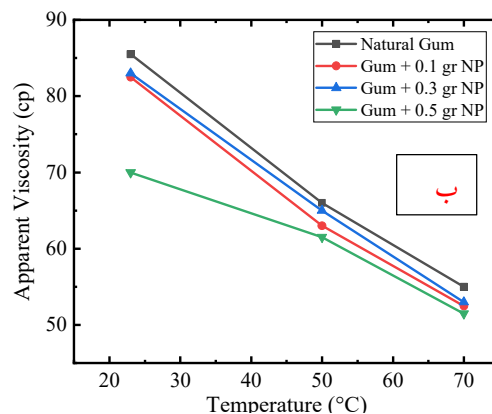
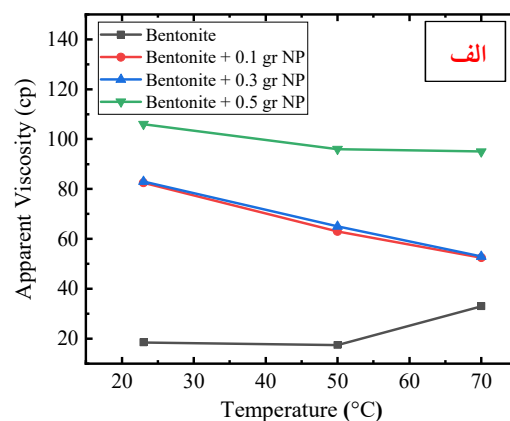
Temp (°C)	MW(lb/ft <sup>3</sup> )			pH				
	G	n <sub>۱</sub>	n <sub>۲</sub>	G	n <sub>۱</sub>	n <sub>۲</sub>		
۲۳	۷۵,۵۳	۷۵,۵۳	۷۵,۵۳	۷۶,۱۶	۶,۲۸	۶,۲۷	۶,۸۵	۷
۵۰	۷۵,۵۳	۷۵,۵۳	۷۵,۵۳	۷۶,۱۶	۶	۶,۱۶	۶,۵	۶,۹۵
۷۰	۷۵,۵۳	۷۵,۵۳	۷۵,۵۳	۷۶,۱۶	۵,۹۸	۶	۶,۳	۶,۵

شکل ۶. ویسکوزیته ظاهری برحسب دما برای سیالات پایه و حاوی نانوذرات با غلظت‌های مختلف محتوی الف: بنتونیت و ب: صمغ طبیعی.

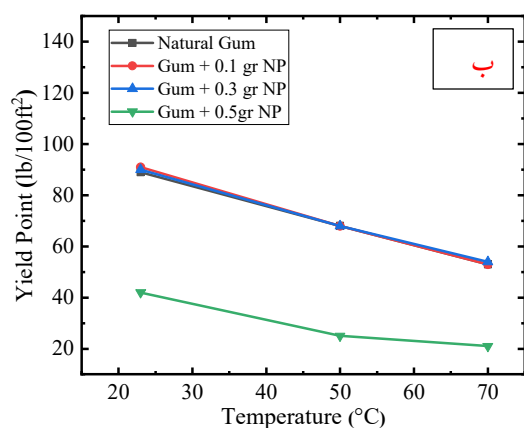
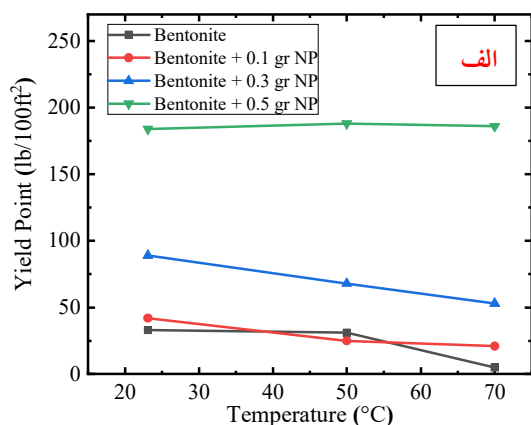
ویسکوزیته پلاستیک ناشی از اصطکاک مکانیکی و تابع غلظت ذرات جامد پراکنده در گل و وزن سیال می‌باشد. در دمای اتاق با افزایش غلظت نانوذرات در نمونه‌های بنتونیتی و افزایش میزان اصطکاک ناشی از ذرات جامد ویسکوزیته پلاستیک افزایش پیدا می‌کند (شکل ۷ الف). اما در دماهای ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد پایداری ویسکوزیته پلاستیک در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود. در نمونه حاوی ۰/۳ و ۰/۵ گرم نانوذرات افزایش دما باعث کاهش اصطکاک ناشی از ذرات جامد و در نتیجه کاهش ویسکوزیته پلاستیک می‌شود. این کاهش به‌گونه‌ای است که ویسکوزیته نمونه حاوی ۰/۵ گرم نانوذرات با ویسکوزیته نمونه بنتونیتی بدون نانوذره برابری می‌کند. در نمونه‌های حاوی صمغ طبیعی با افزایش دما میزان ویسکوزیته پلاستیک کاهش می‌یابد (شکل ۷ ب). در نمونه‌های حاوی غلظت‌های کمتر از ۰/۵ گرم نانوذرات در دمای اتاق ویسکوزیته پلاستیک با افزایش مقدار ذرات افزایش و در غلظت ۰/۵ گرم نانوذره کاهش پیدا کرده است. در همه نمونه‌ها با افزایش دما به ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد کاهش ویسکوزیته پلاستیک به دلیل کاهش اصطکاک ناشی از ذرات جامد مشاهده می‌شود.

نقطه عملکرد وابسته به نیروهای الکتروشمیایی و تجمع بار در سیال است. نقطه عملکرد بالا به جاروب کردن و تمیز کردن چاه کمک می‌کند. نمودار تغییرات نقطه عملکرد برحسب دما برای سیالات پایه حاوی بنتونیت و صمغ طبیعی و سیالات مختلف حاوی نانوذرات با غلظت‌های مختلف در شکل ۸ الف و ب ارائه شده است. نقطه عملکرد سیال بنتونیتی در حضور نانوذرات و با افزایش مقدار آنها از ۰/۱ تا ۰/۵ گرم به دلیل تجمع بار و افزایش نیروهای الکتروشمیایی در سیال نسبت به

ویسکوزیته ظاهری هم به ویسکوزیته پلاستیک و هم به نقطه عملکرد بستگی دارد. به بیان دیگر این پارامتر هم به میزان غلظت ذرات جامد در سیال و هم به بارها و نیروهای الکتروشمیایی وابسته است. نمودار تغییرات ویسکوزیته ظاهری برحسب دما برای سیالات پایه حاوی بنتونیت و صمغ طبیعی و حاوی نانوذرات با غلظت‌های مختلف در شکل ۶ الف و ب ارائه شده است. در نمونه‌های حاوی بنتونیت با افزایش مقدار نانوذرات مقدار ویسکوزیته ظاهری نیز افزایش پیدا می‌کند، ولی به دلیل افزایش برهم‌کنش بین نانوذرات با افزایش دما، مقدار ویسکوزیته ظاهری روندی کاهشی را طی می‌کند. در نمونه‌های حاوی صمغ طبیعی نیز با افزایش غلظت نانوذرات تا ۰/۵ گرم و به‌خصوص افزایش دما ویسکوزیته ظاهری به دلیل کاهش برهم‌کنش نیروهای الکتروشمیایی کاهش می‌یابد.



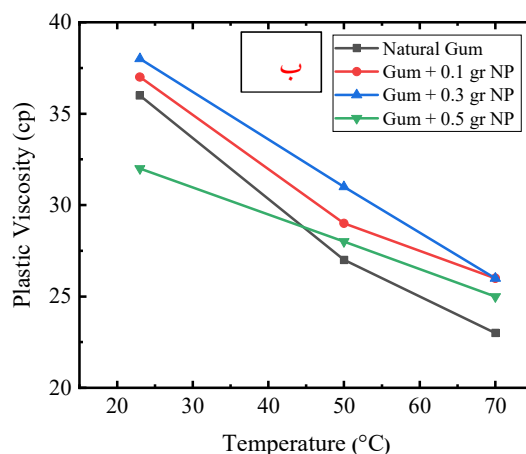
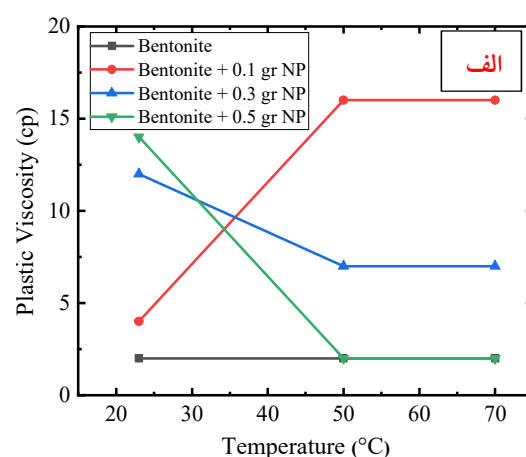
است به دلیل سخت شدن گل مشکلاتی از جمله گیر کردن لوله و مته ایجاد شود. به دلیل وجود بار و تجمع آن در نانوذرات اکسیدگرافن/کبالت انتظار می‌رود که استحکام ژله‌ای در حضور نانوذرات بیشتر شود.



شکل ۸. نقطه عملکرد برحسب دما برای سیالات پایه و سیالات حاوی نانوذرات با غلظت‌های مختلف محتوی الف: بنتونیت و ب: صمغ طبیعی.

شکل ۹ الف و ب، به ترتیب استحکام ژله‌ای در مقاومت ژلی ۱۰ ثانیه و ۱۰ دقیقه را در مورد نمونه‌های حاوی بنتونیت نشان می‌دهد. با افزودن نانوذرات و افزایش مقدار آنها از ۰/۱ به ۰/۵ گرم میزان ژل بیشتر می‌شود. در نمونه حاوی ۰/۵ گرم نانوذره نقطه عملکرد افزایش یافته ولی به دلیل افزایش استحکام ژله‌ای، می‌تواند فشار زیادی به پمپ وارد کرده و مشکلات زیادی ایجاد نماید. علاوه بر این تغییرات دما در میزان ژل تأثیر

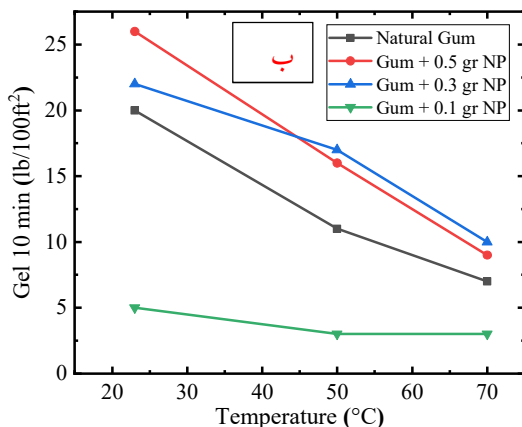
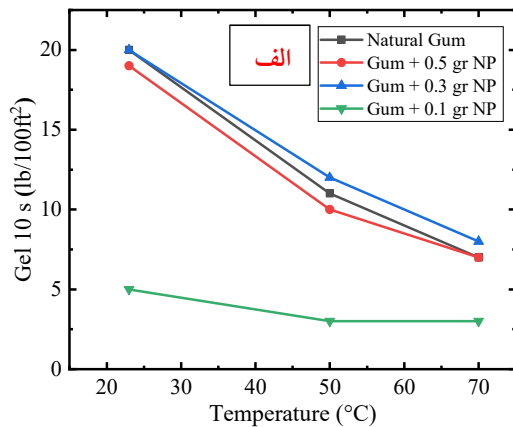
سیال پایه افزایش پیدا کرده و با افزایش دما در همه نمونه‌ها روند کاهش را دنبال می‌کند. در نمونه صمغ طبیعی نقطه عملکرد در غلظت ۰/۱ و ۰/۳ گرم در دمای محیط تقریباً معادل با سیال پایه و در غلظت ۰/۵ گرم کاهش پیدا می‌کند. با افزایش دما در همه نمونه‌ها به دلیل عدم تجمع بار و کاهش نیروهای الکتروشیمیایی، کاهش نقطه عملکرد مشاهده می‌شود.



شکل ۹. ویسکوزیته پلاستیک برحسب دما برای سیالات پایه و سیالات حاوی نانوذرات با غلظت‌های مختلف محتوی الف: بنتونیت و ب: صمغ طبیعی.

استحکام ژله‌ای مانند نقطه عملکرد به نیروهای الکتروشیمیایی و تجمع بار بستگی دارد و به قلمه‌های مته اجازه می‌دهد تا به هنگام توقف ناگهانی گردش گل، معلق شده و از ریزش چاه ممانعت به عمل آید. اگر ژله‌ای شدن به اندازه خیلی زیادی افزایش یابد ممکن

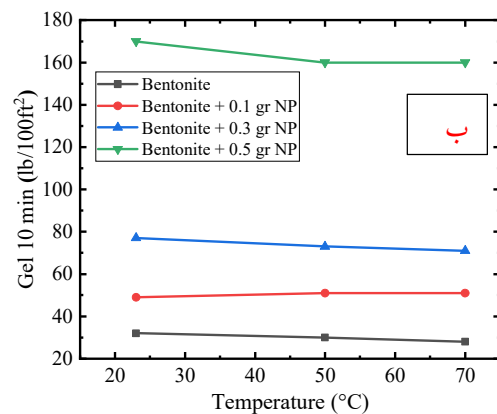
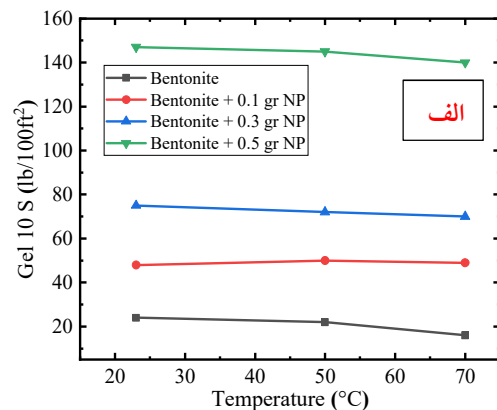
همچنین افزایش دما باعث کاهش استحکام ژله‌ای در سیال پایه و همه نمونه‌های حاوی نانوذرات شده است.



شکل ۱۰. استحکام ژله‌ای در مقاومت ژلی الف: ۱۰ ثانیه و ب: ۱۰ دقیقه برحسب دما برای سیالات پایه و سیالات حاوی صمغ طبیعی و نانوذرات با غلظت‌های مختلف.

در جدول ۶ نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده توسط گروه‌های تحقیقاتی دیگر، به‌منظور مقایسه نتایج با تحقیق حاضر، آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اکثر نانومواد بررسی شده، باعث بهبود و افزایش ویسکوزیته پلاستیک، نقطه واروی و استحکام ژله‌ای شده‌اند.

چندانی ندارد. با توجه به داده‌ها اضافه کردن نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت در سیال حفاری حاوی بنتونیت، سیستم را برای ایجاد ساختار ژلی سریع‌تر از سیال پایه تسهیل می‌کند.



شکل ۹. استحکام ژله‌ای در مقاومت ژلی الف: ۱۰ ثانیه و ب: ۱۰ دقیقه برحسب دما برای سیالات پایه و سیالات حاوی بنتونیت و نانوذرات با غلظت‌های مختلف.

شکل ۱۰ الف و ب، به ترتیب استحکام ژله‌ای در مقاومت ژلی ۱۰ ثانیه و ۱۰ دقیقه را در نمونه‌های محتوی صمغ طبیعی نشان می‌دهند. افزودن نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت به سیال با مقادیر ۰/۱ و ۰/۳ گرم تغییرات اندکی در استحکام ژله‌ای نمونه‌ها ایجاد می‌کند، اما با افزایش مقدار نانوذرات به ۰/۵ گرم روند تغییرات استحکام ژله‌ای به شدت کاهشی می‌باشد.

جدول ۶. کارهای تحقیقاتی انجام شده توسط گروه‌های تحقیقاتی دیگر.

مرجع	پارامترهای اصلاح شده	نوع نانو ماده
[34]	Plastic viscosity & yield point & Gel strength	Palygorskite
[35]	Plastic viscosity & yield point	نانو لوله‌های کربنی اکسید روی
[36]	viscosity	نانو گرافیت
[37]	Plastic viscosity & yield point	Sepiolite
[38]	Plastic viscosity & yield point	Nanocomposite of ZnO, montmorillonite and palygorskite
[39]	Plastic viscosity & yield point & Gel strength	Polyacrylamide and nanoclay & Polyacrylamide grafted polyethylene glycol and SiO <sub>2</sub> nanoparticles

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کبالت با روش الکترواکسیداسیون در یک سلول الکتروشیمیایی حاوی محلول الکترولیت ۰/۱ مولار سولفات کبالت و یک قطعه ورقه گرافیت به‌عنوان آند و ورقه نیکل در نقش کاتد، تحت اعمال ولتاژ ۲۳ ولت به مدت ۹۰ دقیقه تولید و مشخصه‌یابی ساختاری و مغناطیسی انجام شد. الگوی XRD تشکیل ساختار بلوری هگزاگونال کبالت را تأیید کرد. تصاویر SEM نشان داد که نانوذرات کبالت با شکل پولکی و اندازه میانگین برابر با ۱۱۰ نانومتر بر روی صفحات اکسید گرافن با ساختاری دو بعدی و چند لایه و ضخامت حدود ۲۰ نانومتر قرار گرفته‌اند. مغناطش اشباع نمونه ۱۶۷/۰۴ emu/g، پسماند مغناطیسی ۹/۹۴ emu/g و میدان وادارندگی آن معادل ۱۴۲/۵ Oe اندازه‌گیری شد. در مرحله بعدی این پژوهش اثر نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کبالت بر خواص رئولوژی گل حفاری بررسی شد. ابتدا با

افزودن نانوذرات pH و وزن سیال با استفاده از ترازوی گل اندازه‌گیری شد، سپس نقطه عملکرد، ویسکوزیته پلاستیک، ویسکوزیته ظاهری و استحکام ژله‌ای دو سیال حاوی بنتونیت و صمغ طبیعی با استفاده از دستگاه ویسکومتر در سرعت‌های برشی ۳، ۶، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه و در سه دمای ۲۳، ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه بنتونیتی با افزودن نانوذرات pH سیال افزایش پیدا کرده و در محدوده ۹ تا ۱۰/۵ می‌باشد. در نمونه صمغ طبیعی افزایش غلظت نانوذرات باعث افزایش pH تا ۷ شد، اما با توجه به اینکه pH سیال پایه پایین می‌باشد تغییر مطلوبی مشاهده نشد. افزایش دما از ۲۳°C تا ۷۰°C باعث کاهش pH سیال پایه حاوی بنتونیت و صمغ طبیعی به ترتیب تا ۸/۵ و ۶ شد. ویسکوزیته ظاهری و ویسکوزیته پلاستیک در نمونه بنتونیتی در دمای ۲۳°C با افزایش غلظت نانوذرات به ترتیب تا ۱۰۵ cp و نیز ۳۶ افزایش می‌یابد. نقطه عملکرد سیال بنتونیتی در حضور نانوذرات و با افزایش مقدار آنها از ۰/۱ تا ۰/۵ گرم به دلیل تجمع بار و افزایش نیروهای الکتروشیمیایی در سیال نسبت به سیال پایه در دمای ۲۳°C از حدود ۳ lb/100ft<sup>2</sup> تا ۱۴ lb/100ft<sup>2</sup> افزایش پیدا کرده و با افزایش دما در همه نمونه‌ها روند کاهشی را دنبال می‌کند. در نمونه صمغ طبیعی نقطه عملکرد در غلظت ۰/۱ و ۰/۳ گرم در دمای محیط تقریباً معادل با سیال پایه ۹۱ lb/100ft<sup>2</sup> و در غلظت ۰/۵ گرم تا ۴۲ lb/100ft<sup>2</sup> کاهش پیدا می‌کند. با افزودن نانوذرات افزایش استحکام ژله‌ای در مقاومت ژله‌ای ۱۰ دقیقه در دمای ۲۳°C تا ۱۷۰ lb/100ft<sup>2</sup> و ۲۶ lb/100ft<sup>2</sup> به ترتیب در حضور ۰/۱ گرم بنتونیت و ۰/۵ گرم صمغ طبیعی مشاهده می‌شود و تغییرات دما تأثیر چندانی در میزان ژل ندارد. اگر چه افزایش دما باعث کاهش ویسکوزیته می‌شود، اما با مقایسه نمونه‌های بنتونیتی حاوی نانوذره

loss control characteristic additives in water-based drilling fluid, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **205** (2021) 108912.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.10892>

[4] A. Katende, N.V. Boyou, I. Ismail, D.Z. Chung, F. Sagala, N. Hussein, et al., Improving the performance of oil based mud and water based mud in a high temperature hole using nanosilica nanoparticles, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **577** (2019) 645-73. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.088>

[5] E. Leusheva, V. Morenov, Effect of Temperature Conditions in Arctic Offshore Oil Fields on the Rheological Properties of Various Based Drilling Muds, *Energies* **15** (2022) 5750. <https://doi.org/10.3390/en15155750>

[6] L. Fu, K. Liao, B. Tang, L. Jiang, W. Huang, Applications of graphene and its derivatives in the upstream oil and gas industry: A systematic review, *Nanomaterials* **10** 6 (2020) 1013. <https://doi.org/10.3390/nano10061013>

[7] N. Alimohammadi, S.R. Shadizadeh, I. Kazeminezhad, Removal of cadmium from drilling fluid using nanoadsorbent, *Fuel* **111** (2013) 505-9. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.023>

[8] R. Ikram, B. Mohamed Jan, J. Vejpravova, M.I. Choudhary, Z. Zaman Chowdhury, Recent advances of graphene-derived nanocomposites in water-based drilling fluids, *Nanomaterials* **10** 10 (2020) 2004. <https://doi.org/10.3390/nano10102004>

[9] M.A.A. Alvi, M. Belayneh, S. Bandyopadhyay, M.W. Minde, Effect of iron oxide nanoparticles on the properties of water-based drilling fluids, *Energies* **13** 24 (2020) 6718. <https://doi.org/10.3390/en13246718>

[10] A. Etehad, C. Ülker, G. Altun, Nonlinear viscoelastic rheological behavior

با نمونه بتونیتی بدون نانوذره مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی نانوذرات از ویسکوزیته بالاتری نسبت به سیال پایه برخوردارند. در واقع اضافه کردن نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت باعث بهبود خواص رئولوژی این سیال شده است. می‌توان نتیجه گرفت که این نانوذرات در سیال بتونیتی مانند یک ویسکوزیفایر عمل کرده و باعث افزایش ویسکوزیته در این سیال شده‌اند. در نمونه‌های حاوی صمغ طبیعی ویسکوزیته ظاهری، ویسکوزیته پلاستیک و نقطه عملکرد با افزودن نانوذرات در غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۳ در مقایسه با نمونه‌های بتونیتی تغییرات محسوسی پیدا نکرد. اما در نمونه حاوی ۰/۵ گرم نانوذره کاهش خواص ذکر شده مشاهده شد. در واقع نانوکامپوزیت اکسیدگرافن/کبالت در نمونه صمغ طبیعی باعث بهبود خواص رئولوژی نشده است و در غلظت‌های بالا می‌تواند نقش یک کاهش‌دهنده ویسکوزیته یا تینر را ایفا کند.

## مرجع‌ها

[1] J. Njuguna, S. Siddique, L.B. Kwroffie, S. Piromrat, K. Addae-Afoakwa, U. Ekeh-Adegbotolu, G. Oluyemi, K. Yates, A.K. Mishra, L. Moller, The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations, *Waste Management* **139** (2022) 362-380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>

[2] S.R. Smith, R. Rafati, A.S. Haddad, A. Cooper, H. Hamidi, Application of aluminium oxide nanoparticles to enhance rheological and filtration properties of water based muds at HPHT conditions, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **537** (2018) 361-71. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.10.050>

[3] F. Kamali, R. Saboori, S. Sabbaghi, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CMC nanocomposite performance evaluation as rheology modifier and fluid



- drilling fluids at elevated temperature conditions, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **146** (2016) 1142-57. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.08.014>
- [17] J.G. Xu, Z.S. Qiu, X. Zhao, H.Y. Zhong, G.R. Li, W.A. Huang, Synthesis and characterization of shale stabilizer based on polyethylene glycol grafted nano-silica composite in waterbased drilling fluids, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **163** (2018) 371-7. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.007>
- [18] H. Mao, Z. Qiu, Z. Shen, W. Huang, H. Zhong, W. Dai, Novel hydrophobic associated polymer based nano-silica composite with core-shell structure for intelligent drilling fluid under ultra-high temperature and ultra-high pressure, *Journal of Progress in Natural Science* **25** 1 (2015) 90-3. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2015.01.013>
- [19] S. Mosivand, I. Kazeminezhad, Magnetite nanoparticles functionalized with polypyrrole by pulsed sono-electrocrystallization and their applications for water treatment, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **29** (2018) 12466–12476. [10.1007/s10854-018-9365-9](https://doi.org/10.1007/s10854-018-9365-9)
- [20] S. Mosivand, I. Kazeminezhad, The Effect of Current on Structural and Magnetic Properties of Electrocrystallized Magnetite Nanoparticles in The Presence of Ultrasound Waves, *Journal of Physics on Many-body Systems* **9** (2015) 41-51. [doi:10.22055/jrmbms.2015.11385](https://doi.org/10.22055/jrmbms.2015.11385)
- [21] S. Mosivand, I. Kazeminezhad, Synthesis of Electrocrystallized Cobalt Ferrite Nanopowders by Tuning the Cobalt Salt Concentration, *RSC Advances* **5** (2015) 14796-14803. [doi:10.1039/c4ra17162d](https://doi.org/10.1039/c4ra17162d)
- [22] S. Mosivand, I. Kazeminezhad, Functionalization and Characterization of Electrocrystallized Iron Oxide Nanoparticles in the Presence of  $\beta$ -cyclodextrine, *CrystEngComm* **18** (2016) 417-426. [doi:10.1039/c5ce01789k](https://doi.org/10.1039/c5ce01789k)
- of bentonite and sepiolite drilling fluids under large amplitude oscillatory shear, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **208** (2022) 109210. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.10920>
- [11] F. Farahbod, Experimental investigation of thermo-physical properties of drilling fluid integrated with nanoparticles: Improvement of drilling operation performance, *Powder Technology* **384** (2021) 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.02>
- [12] H. Movahedi, S. Jamshidi, M. Hajipour, New Insight into the Filtration Control of Drilling Fluids Using a Graphene-Based Nanocomposite under Static and Dynamic Conditions, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **9** (2021) 12844–12857. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c03563>
- [13] H. Mao, Z. Qiu, Z. Shen, W. Huang, Hydrophobic associated polymer based silica nanoparticles composite with core-shell structure as a filtrate reducer for drilling fluid at ultra-high temperature, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **129** (2015) 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.03.003>
- [14] G. Cheraghian, Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art, *Journal of materials research and technology* **13** (2021) 737-753. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.04.089>
- [15] X. Huang, J. Sun, K. Lv, J. Liu, H. Shen, F. Zhang, Application of core-shell structural acrylic resin/nano-SiO<sub>2</sub> composite in water based drilling fluid to plug shale pores, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* **55** (2018) 418-25. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.05.023>
- [16] A. Aftab, A.R. Ismail, S. Khokhar, Z.H. Ibupoto, Novel zinc oxide nanoparticles deposited acrylamide composite used for enhancing the performance of water-based

- electrical properties, *Ceramics International* **48** (2022) 12240–12254. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.086>
- [30] M. Kooti, A. Naghdi Sedeh, Kh Gheisari, A. Figuerola, Synthesis, characterization, and performance of nanocomposites containing reduced graphene oxide, polyaniline, and cobalt ferrite, *Physica B* **612** (2021) 412974. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.412974>.
- [31] G.Z. Papageorgiou, Z. Terzopoulou, D. Bikiaris, K.S. Triantafyllidis, E. Diamanti, D. Gournis, P. Klonos, E. Giannoulidis, P. Pissis, Evaluation of the formed interface in biodegradable poly(L-lactic acid)/graphene oxide nanocomposites and the effect of nanofillers on mechanical and thermal properties, *Thermochimica Acta* **597** (2014) 48–57. [doi:10.1016/j.tca.2014.10.007](https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.10.007).
- [32] S. Tanwar, D. Mathur, Magnetite-graphene oxide nanocomposites: facile synthesis and characterization of optical and magnetic property, *Materials Today: Proceedings* **30** (2020) 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.745>
- [33] R. Nickdel Teymoori, M.K. Ghasem Alaskari, Effects of Salinity, pH and Temperature on CMC Polymer and XC Polymer Performance (TECHNICAL NOTE), *IJE Transactions B: Applications* **20** 3 (2007) 283. [https://www.ije.ir/article\\_71677.html](https://www.ije.ir/article_71677.html)
- [34] J. Abdo, M. Haneef, Clay nanoparticles modified drilling fluids for drilling of deep hydrocarbon wells, *Applied Clay Science* **86** (2013) 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.10.017>
- [35] S.S. Hassani, A. Amrollahi, A. Rashidi, M. Soleymani, S. Rayatdoost, The effect of nanoparticles on the heat transfer properties of drilling fluids, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **146** (2016) 183–
- [23] S. Mosivand, L.M.A. Monzon, K. Ackland, I.Kazeminezhad, J.M.D. Coey, Structural and Magnetic Properties of Sonoelectrocrystallized Magnetite Nanoparticles, *Journal of Physics D: Applied Physics* **47** (2014) 1–13. [doi:10.1088/0022-3727/47/5/055001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/5/055001)
- [24] S. Mosivand, L.M.A. Monzon, I. Kazeminezhad, J.M.D. Coey, The Effect of Organics on the Structure and Magnetization of Electro-synthesised Magnetite Nanoparticles, *Journal of Nanoparticle Research* **15** (2013) 1–11. [doi:10.1007/s11051-013-1795-y](https://doi.org/10.1007/s11051-013-1795-y)
- [25] S. Mosivand, L.M.A. Monzon, I. Kazeminezhad, J.M.D. Coey, Influence of Growth Conditions on Magnetic and Structural Properties of Magnetite Nanoparticles Electrocrystallized in the Presence of Organic Molecules, *International Journal of Molecular Sciences* **14** (2013) 10383–10396. [doi:10.3390/ijms140510383](https://doi.org/10.3390/ijms140510383)
- [26] S. Piri Fathabad, S. Mosivand, I. Kazeminezhad, Synthesis and Characterization of Electro-Crystallized Alumina Nanoparticles and Investigation of Their Application in Removal of Cobalt and Cadmium from Seimareh and Karoon Rivers in Iran, *The Journal of Electronic Materials* **47** (2018) 7034–7052. [doi: 10.1007/s11664-018-6630-x](https://doi.org/10.1007/s11664-018-6630-x)
- [27] S. Mosivand, Effect of mineral additives on magnetite nanoparticles prepared in an electrolytic cell, *Advanced Powder Technology* **32** (2021) 432–444. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.12.020>
- [28] K. Garavand, S. Mosivand, Electro-crystallized NiO nanoparticles for river-water treatment applications, *Applied Physics A* **127** (2021) 73. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04185-y>
- [29] S. Iranshahi, S. Mosivand, Cobalt/graphene oxide nanocomposites: Electro-synthesis, structural, magnetic, and

- [38] A. Nizamani, A.R. Ismail, R. Junin, A. Dayo, A. Tunio, Z. Ibupoto, M. Sidek, Synthesis of titaniabentonite nano composite and its applications in water-based drilling fluids, *Chemical Engineering Transactions* **56** (2017) 949-954. <https://doi.org/10.3303/CET1756159>
- [39] R. Jain, V. Mahto, V. Sharma, Evaluation of polyacrylamide-grafted-polyethylene glycol/silica nanocomposite as potential additive in water based drilling mud for reactive shale formation, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* **26** (2015) 526-537. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.06.051>
- [36] J. Nasser, A. Jesil, T. Mohiuddin, M. Al Ruqeshi, G. Devi, S. Mohataram, Experimental investigation of drilling fluid performance as nanoparticles, *World Journal of Nano Science and Engineering* **3** (2013) 57-61. <https://doi.org/10.4236/wjnse.2013.33008>
- [37] A.-M. Needaa, P. Pourafshary, A.-H. Hamoud, A. Jamil, Controlling bentonite-based drilling mud properties using sepiolite nanoparticles, *Petroleum Exploration and Development* **43** 4 (2016) 717-723. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(16\)30084-2](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(16)30084-2)
- 190.
- <https://doi.org/10.1016/j.petro.2016.04.009>